



HOGERE ZEEVAARTSCHOOL ANTWERPEN

NAUTISCHE FACULTEIT

Hulpsystemen die sneller en economischer varen in de koopvaardij bevorderen

Elias Deleener

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

Promotoren: ir. Remke Willemen
Peter Bueken
Stefaan Bueken

academiejaar: 2015 - 2016



HOGERE ZEEVAARTSCHOOL ANTWERPEN

NAUTISCHE FACULTEIT

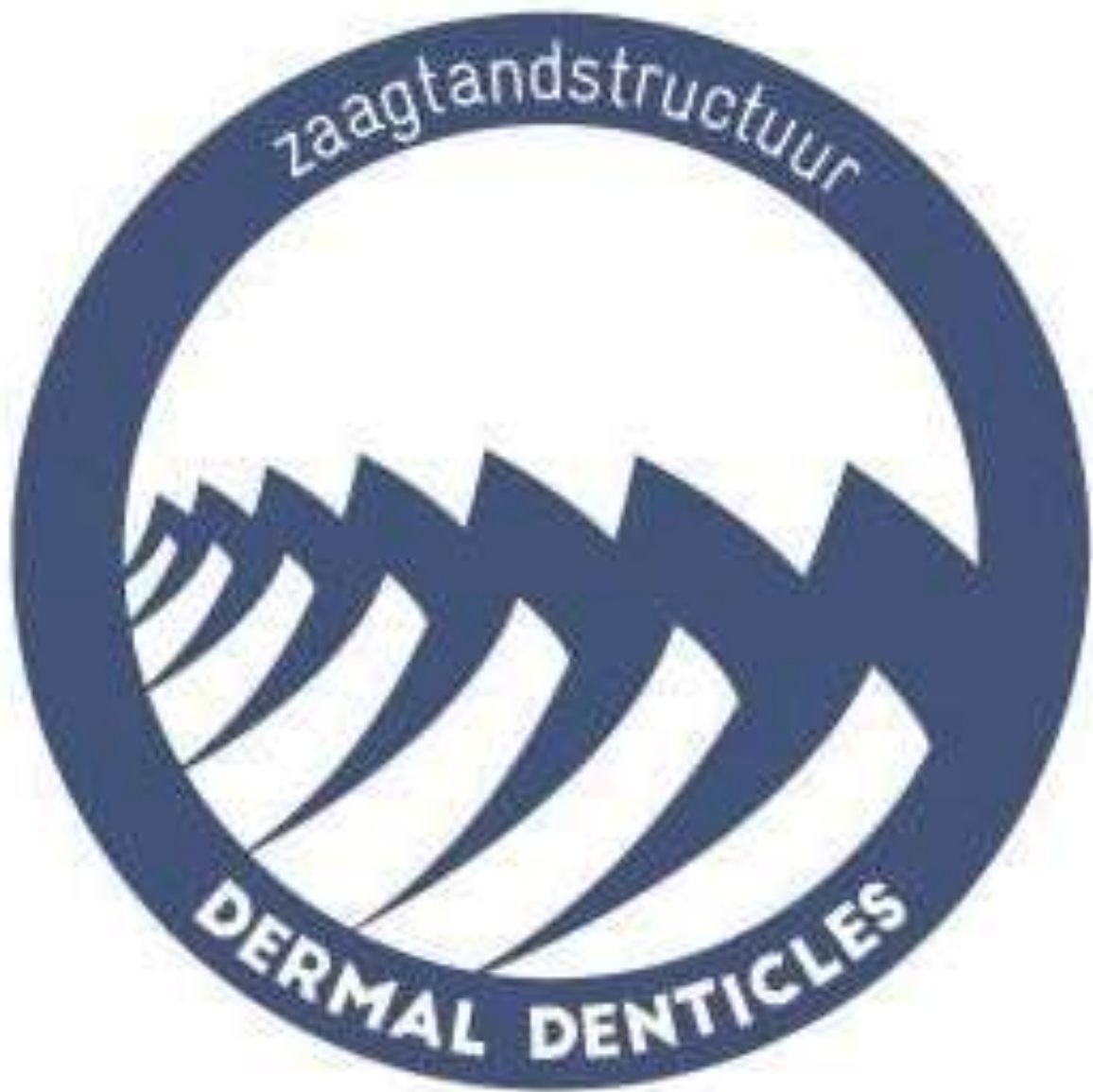
Hulpsystemen die sneller en economischer varen in de koopvaardij bevorderen

Elias Deleener

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

Promotoren: ir. Remke Willemen
Peter Bueken
Stefaan Bueken

academiejaar: 2015 - 2016



Met dank aan **Karen Devroe** voor het ontwerp.

Woord vooraf

In het kader van de opleiding nautische wetenschappen aan de Hogere Zeevaartschool Antwerpen wilde ik bij het bepalen van het onderwerp van de scriptie, zowel meteorologie als techniek en scheepvaart combineren. Dit heeft ertoe geleid dat ik mij in deze scriptie richt op hulpsystemen die sneller en economischer varen in de koopvaardij bevorderen en dus de rentabiliteit verhogen. De onderzochte technologieën zijn tot nog toe vrij onbekend en verdienen de nodige aandacht. Mijn inziens hebben deze vormen van besparing nog een enorme toekomst voor de boeg.

Om te beginnen werd een overzicht gemaakt van de meest courante middelen. Verder in de scriptie worden enkele gekozen thema's meer in detail uitgewerkt. Ik spits mij toe op het gebruik van dermal denticles, zaagtandstructuur en air bubbel lubrication. De technieken waarbij haaienschubben en/of luchtbellens gebruikt worden om wrijving te verminderen staan nog in hun kinderschoenen. Het gebruik van skysails voor windenergie is daarentegen wel geëvolueerd, maar het is voor de meesten - zelfs mensen uit de vakwereld - nog onbekend.

Voor de totstandkoming van deze scriptie gaat mijn bijzondere dank uit naar alle mensen die me erbij geholpen hebben. Op de eerste plaats richt ik een bijzonder woord van dank aan mijn promotoren, ir. Remke Willemen, Peter Bueken en Stefaan Bueken voor de begeleiding van dit werk, de constructie van de gebruikte materialen en voor de talrijke adviezen. Uit mijn persoonlijke leefsfeer wil ik ook mijn ouders bedanken voor hun raad die ervoor gezorgd heeft om gestructureerd te werk te gaan.

Het maken van een scriptie ... ik kwam erdoor tot boeiende inzichten, het verruimde mijn kennis en interesses.

Elias Deleener

Antwerpen, 5 mei 2016

Inhoud

Lijst van figuren en tabellen	iv
Inleiding.....	1
1 Verschillende middelen	4
1.1 Toelichting.....	4
1.2 Vergelijkende studies	10
2 Scheepsweerstand.....	13
2.1 Verschillende soorten weerstand	13
2.1.1 Wrijvingsweerstand.....	13
2.1.2 Vormweerstand	15
2.1.3 Golfweerstand	16
2.1.4 Totale weerstand	17
2.2 Theoretische benadering van de weerstand	19
2.3 Correcties	24
3 Air lubrication	26
3.1 Algemeen principe.....	26
3.2 Air bubbels	28
3.2.1 Inleiding.....	28
3.2.2 Potentiele gebruikers	29
3.2.3 Mitsubishi Air Lubrication System	29
3.2.4 Testen.....	31
3.2.5 Detail	34
3.2.6 Reglementering.....	34
3.2.7 Nadelen	36
3.3 Air cavity ships (ACS)	37
3.3.1 Inleiding.....	37
3.3.2 Bouw	38
3.3.3 Testen.....	39
3.3.4 Nadelen	40
3.3.5 Toepassing op hogesnelheidsvaartuigen	40

3.4	Air film.....	42
3.4.1	Inleiding.....	42
3.4.2	Testen.....	42
3.5	Vergelijking methoden	43
4	Sky sails	44
4.1	Algemeen	44
4.2	Testen.....	45
4.3	Bouw	46
4.4	Werking.....	48
4.5	Werkingsomstandigheden	50
4.6	Voordelen.....	51
4.6.1	Hoog aandrijfvermogen.....	51
4.6.2	Minimale heel	52
4.6.3	Betere zeegang.....	53
4.6.4	Dynamische krachtcontrole.....	53
4.6.5	Weinig ruimte	54
4.6.6	Noodoplossing	54
4.7	Nadelen	55
4.8	Wetgeving	56
4.8.1	Internationaal aanvaringsreglement van de scheepvaart	56
4.8.2	IMO.....	56
4.8.3	Arbeidsveiligheid	56
5	Dermal denticles.....	57
5.1	Inleiding.....	57
5.2	Wat	59
5.3	Toepassing in de sport.....	62
5.4	Testen.....	64
5.5	Dynamische beweging van de denticle.....	66
5.6	Fouling.....	68
5.7	Grootte en vorm	71
5.7.1	De ware grootte op de haai.....	71
5.7.2	De grootte bij dhr. Lauder	72
5.7.3	De grootte voor de testen in deze scriptie.....	73
5.8	Constructie	77

5.8.1	Microconstructie via mal	77
5.8.2	3D printen	85
5.9	De uitgevoerde stappen voor het testen	88
5.9.1	Van 2D tekening naar 3D computermodel	88
5.9.2	Van 3D computermodel naar fysiek model	89
5.9.3	De proefopstelling	104
5.9.4	De proef	112
5.9.5	De resultaten	113
5.9.6	De vaststellingen en besluiten uit de resultaten	121
6	Ribbelstructuur	123
6.1	Inleiding	123
6.2	Principe	124
6.3	Soorten en eigenschappen van de structuren	126
6.4	Toepassingen	127
6.5	De uitgevoerde stappen voor het testen	127
6.5.1	Van 2D tekening naar fysiek 3D model	127
6.5.2	De proef en resultaten	132
6.5.3	De vaststellingen en besluiten uit de resultaten	139
7	Nog te onderzoeken mogelijkheden/bedenkingen	141
7.1	Waar brengt men de structuur aan?	141
7.2	Wat is de optimale vorm van de denticle?	142
7.3	Hoe zijn de denticles te bevestigen?	142
7.4	Hoe de matten in/uit het water krijgen?	143
7.5	Bemerking	143
	Besluit	144
	Bibliografie	146
	Bijlage	151

Lijst van figuren en tabellen

Figuren

Figuur 1: Flettner rotor op ENERCON E-schip 1	6
Figuur 2: Achterschip met Hull Vane (Illustratie Van Oossanen)	7
Figuur 3: O-foil.....	8
Figuur 4: Weerstandscoefficienten bij 3D lichamen	14
Figuur 5: Drukverschillen langsheen een schip	15
Figuur 6: Transversaal- en Kelvin golfpatroon	16
Figuur 7: Belangrijkheid in soorten weerstand in functie van de snelheid	17
Figuur 8: Belangrijkheid in soorten weerstand volgens toenemend Froude getal	18
Figuur 9: Overgang van laminair naar turbulent	20
Figuur 10: Verschillende air lubrication technieken (Illustratie Makiharju).....	27
Figuur 11: Air bubble lubrication.....	28
Figuur 12: MALS.....	29
Figuur 13: Reglementering openingen air bubble lubrication	35
Figuur 14: Air cavity schip (ACS)	37
Figuur 15: Toepassing met verschillende air cavities	38
Figuur 16: Air cavity langsdoorsnede van rompconfiguratie op middenlijn	39
Figuur 17: Schets air film	42
Figuur 18: Skysails	44
Figuur 19: Skysail op 'Jan Luiken'.....	45
Figuur 20: Skysail op 'Beaufort'	45
Figuur 21: Hoofdcomponenten skysail.....	46
Figuur 22: Openen skysail	48
Figuur 23: Controlesysteem skysail	48
Figuur 24: Vlieghoogte skysails	51
Figuur 25: Helling skysail	53
Figuur 26: Optimale windrichting skysail	55
Figuur 27: Dermal denticles microscopisch.....	57
Figuur 28: Biologische voorstelling dermal denticle	59
Figuur 29: Verschil in vorm van dermal denticle.....	60
Figuur 30: Voorstelling weerstand op golfbal	61
Figuur 31: Speedo weefstructuur.....	62
Figuur 32: CFD-scan	63
Figuur 33: Soepele beweging dermal denticle	66
Figuur 34: Wereldwijd jaarlijks crude oil verbruik in de scheepvaart.....	68
Figuur 35: Scarlet AF design	70
Figuur 36: Visuele voorstelling Reynolds schaal.....	70
Figuur 37: Dimensies dermal denticle	71
Figuur 38: Dermal denticles in soepel membraan	73
Figuur 39: Soft lithography/gradientcopolymerisatie proces	80
Figuur 40: Visuele vergelijking in nauwkeurigheid.....	81
Figuur 41: Resultaten vergelijking in nauwkeurigheid	81

Figuur 42: Uitoefening van druk op haai denticles	82
Figuur 43: Wrijvingsvermindering grafisch voorgesteld	83
Figuur 44: Dermal denticle	85
Figuur 45: Dermal denticle op soepele mat Mr. Lauder	87
Figuur 46: 3D constructie van dermal denticle mat 120x120 mm	91
Figuur 47: 3D geprinte denticle mat 120x120 mm	91
Figuur 48: 3D geprinte denticle mat 120x120 mm	92
Figuur 49: Structuur van de denticles	93
Figuur 50: Verschillende structuren dermal denticles	94
Figuur 51: 3D printer Mr. P. Bueken	95
Figuur 52: Young's modulus schaal	97
Figuur 53: Vloeibare TEC7 Aquastop	98
Figuur 54: Shore hardheid schaal	99
Figuur 55: Eerste 3D test 9 denticles	100
Figuur 56: Eerste 3D test 15 denticles	100
Figuur 57: Nauwkeurigheidstest dermal denticles 3D printer	101
Figuur 58: Nauwkeurigheidstest dermal denticles 3D printer	102
Figuur 59: RIB concept	105
Figuur 60: Dermal denticle plaat constructie	106
Figuur 61: Materiaal voor het testschip concept	107
Figuur 62: Overzicht constructie aan/over boord	108
Figuur 63: Detail constructie met lager boven en onder + extra versterking	108
Figuur 64: Overzicht opstelling aan boord met dynamometer	109
Figuur 65: Constructie over boord	109
Figuur 66: KERN HDB 5K5N	110
Figuur 67: KERN HCB/HCN 50K20	111
Figuur 68: Proef met plaat en air bubble lubrication	112
Figuur 69: Resultaat testen vlakke plaat	114
Figuur 70: Resultaat testen dermal denticles	116
Figuur 71: Vergelijking tussen vlak en dermal denticles	117
Figuur 72: Rendementsvergelijking vlak/dermal denticle	120
Figuur 73: Zaagtandstructuur 3D geprint	123
Figuur 74: Turbulentievoorstelling vlakke plaat/ribbelstructuur	125
Figuur 75: Onderscheid zaagtandstructuur (a) en geschulpte structuur (b)	126
Figuur 76: Zaagtandstructuur 3D geprint	128
Figuur 77: Gebruikte klei	129
Figuur 78: Beste resultaat uit klei afdruk	130
Figuur 79: Ribbestructuur plaat	131
Figuur 80: Resultaat testen zaagtandstructuur	133
Figuur 81: Vergelijking tussen vlak en ribbels	134
Figuur 82: Vergelijking uitgelicht	135
Figuur 83: Rendementsvergelijking vlak/ribbel	138
Figuur 84: Rendementswinst tov vlakke plaat adhv gemiddelde waardes	144

Tabellen

Tabel 1: Rendement bij verschillende soorten aanpassingen.....	10
Tabel 2: Compatibiliteit op schepen.....	11
Tabel 3: Compatibiliteit verschillende middelen.....	12
Tabel 4: Toepassing MALS.....	31
Tabel 5: MALS ontwerpcondities en compressor specificaties.....	34
Tabel 6: Beaufortschaal voor skysails.....	50
Tabel 7: Dimensies dermal denticle op ware grootte.....	72
Tabel 8: Dimensies dermal denticle bij Mr. Lauder.....	73
Tabel 9: Dimensies dermal denticles bij onderzoek.....	75
Tabel 11: Verhouding dermal denticle boven membraan.....	76
Tabel 10: Dimensies dermal denticles voor onderzoek (vervolg).....	76
Tabel 12: Resultaten van testen vlakke plaat.....	113
Tabel 13: Resultaten van testen dermal denticles.....	115
Tabel 14: Vergelijking vlak/dermal denticle zonder air bubbels.....	118
Tabel 15: Vergelijking vlak/dermal denticle met air bubbles.....	119
Tabel 16: Resultaten van testen zaagtandstructuur.....	132
Tabel 17: Rendement vlak/ribbel zonder air bubbles.....	136
Tabel 18: Rendement vlak/ribbel met air bubbles.....	137

Inleiding

In het maritieme milieu worden enorme volumes en bijhorende oppervlakken verplaatst door het water. Snelheid is een sleutelement in de scheepvaart. Als een schip wordt gebouwd is één van de dingen waarnaar gekeken wordt de snelheid dat het schip nodig heeft om zijn cargo of passagiers te transporteren. Een voorwerp door het water verplaatsen vereist relatief weinig energie als men lage snelheden hanteert en er weinig of geen golfvorming en weerstand wordt veroorzaakt. Naarmate de snelheid toeneemt gaan de weerstand langsheen het voorwerp en ook de golfvorming toenemen waardoor ook het nodige vermogen aanzienlijk zal verhogen. Verminderen van de weerstand betekent een vermindering van het nodige vermogen en dus een vermindering in brandstofverbruik.

Verder in deze scriptie wordt duidelijk dat de oorsprong van de scheepsweerstand vooral te wijten is aan de wrijvingsweerstand van de romp met het water. Dit effect wordt aanzienlijk vergroot door de aangroei van algen, mosselen, zeepokken, etc. op het onderwaterschip. Sommige bronnen beweren dat 50 - 70% van de aandrijfenergie hieraan verloren gaat. [34] Aangezien deze wrijving de grootste invloed heeft bij normale scheepssnelheden en men hierdoor dus een groot deel van het aandrijfvermogen verliest, zal ik mij in deze scriptie richten op een aantal oplossingen om deze wrijving te verlagen. [23]

De geschikte coating zou een geweldige oplossing bieden. Er worden vele pogingen gedaan op de markt maar tot op vandaag bestaat er nog geen coating die er effectief voor zorgt dat er geen aangroei ontstaat aan de scheepsromp. Voor het verminderen van aangroei daarentegen zijn er al wel verven ontwikkeld. Coatings zijn ook niet steeds even milieuvriendelijk aangezien ze gemaakt zijn uit schadelijke stoffen. Echter, deze verven - anti fouling genaamd - verliezen hun efficiëntie naarmate het schip langer in het water ligt. Bovendien is deze verf een aanpak van het gevolg, dus niet een preventief of conceptueel design van het schip. Er wordt dus uitgebreid getest en onderzocht naar verschillende andere (conceptuele)methodes om zuiniger te kunnen varen. Zo is sinds een aantal jaren het bedrijf MARIN (Maritime Research Institute of the Netherlands) met onderzoek bezig naar het rendement van air lubrication als een middel om de wrijvingsweerstand van de romp met het water te verminderen bij schepen. [8]

Sommige van de technieken die besproken zullen worden in deze scriptie zullen meer effect hebben op kleinere schepen (± 150 meter) dan op grotere omdat kleine schepen meer gevoelig zijn voor golfweerstand dan grote, zoals bulkcarriers, triple E, etc. [8] Voor zeilboten en andere rondspanten is het gebruik van air films en air cavities niet voordelig aangezien deze een grote helling kunnen maken en niet over een platte bodem beschikken. Hierdoor kunnen de bubbels van onder de romp te gemakkelijk verdwijnen.

Het verminderen van de wrijvingsweerstand is één van de meest effectieve manieren om de operationele kosten en de CO₂ emissie te drukken. Dit mede doordat reders en scheepseigenaren kampen met steeds hoger wordende brandstofprijzen, strengere milieuvoorschriften en de stijgende beperkingen op CO₂-uitstoot. Het is dus moeilijk om aan deze vereisten te blijven voldoen en het financieel draagkrachtig te houden.

Brandstofverbruik is de nummer één kost bij de exploitatie van een schip. Het staat voor 50 - 60% van de kosten voor het runnen van een koopvaardijship. Een daling van 1% van het brandstofverbruik kan jaarlijks al een besparing opleveren van 50000 euro voor een middelgrote bulkcarrier en kan oplopen tot 300000 euro voor grote containerschepen. [1]

Vanwaar het idee:

Ik haal mijn inspiratie uit de reeds 400 miljoen jaar ontwikkelde oppervlaktehuid van haaien. Met in het bijzonder de 'Isurus oxyrinchus' anders gezegd de kortvinmakreelhaai. Deze haai heeft zijn huid zo ontwikkeld dat hij er snelheidsvoordeel heeft uit leren halen door de wrijving met het water zo minimaal mogelijk te houden. De bijzondere structuur van deze huid heeft me geïnspireerd om hierover de masterscriptie te maken. Ik wil deze structuur combineren met air bubble lubrication.

Als lezer vraagt u zich waarschijnlijk af hoe ik nu op dit bizarre idee ben gekomen? Ik ben sinds jong af altijd praktisch ingesteld geweest en knutselde vaak. In deze jonge jaren van mijn leven vertelde mijn vader dat hij voor zijn masterscriptie iets praktisch had gemaakt dat de aandacht van het hele publiek trok. Als kind vond ik dit adembenemend en sinds die dag was het een droom voor mij geweest om ook zoiets dergelijks te verwezenlijken in mijn scriptie. In mijn derde jaar bachelor zocht ik dus een onderwerp dat ik in mijn masterjaar praktisch kon verwezenlijken. Bijna toevallig door in contact te komen met professor A.

Constantinescu kwam ik tot het onderwerp: 'air bubble lubrication'. Tijdens de vakantieperiode na de herexamens van mijn laatste jaar bachelor ben ik beginnen nadenken over een onderzoek dat ik dit jaar zou kunnen uitvoeren met betrekking tot air bubble lubrication. Over alles wat ik zag en las in wetenschappelijke tijdschriften begon ik na te denken. Ik stelde mij steeds de vraag of dit interessant was voor mijn eindwerk, of dit kon bijdragen tot weerstandsvermindering. Ik vond niet meteen iets. Alles waaraan ik dacht was ooit al eens op een of andere manier getest geweest. Op een van de laatste avonden van de vakantie keek ik naar de reportage 'Shark week' op de zender Discovery. In deze reportage legde men het principe uit hoe de makreelhaai aan zijn enorme snelheid komt in het water. Dit werd vervolgens de verdere uitdieping van mijn bachelor scriptie. Zo ben ik begonnen aan dit interessante onderzoek waarbij iets te construeren valt en dat enorm nut kan hebben voor de scheepvaart.

1 Verschillende middelen

1.1 Toelichting

- **Rompvormen**

Bij de bouw van een nieuw schip worden er vele berekeningen gedaan om de meest optimale rompvorm voor dat type schip te vinden. Verandering in de vorm van de romp kunnen zorgen voor een vermindering in golfweerstand en/of luchtweerstand. De veranderingen hebben hun grootste effect bij kleinere schepen omdat deze een relatief grotere golfweerstand creëren vergeleken met grotere schepen. [51] Naast de klassieke rompvormen bestaan er nog enkele andere grote onderscheiden in rompvormen zoals:

- Hovercraft
- Catamaran
- Surface Effect Ship (SES) Dit is een vaartuig dat het luchtkussen van de hovercraft combineert met de dubbele romp van de catamaran. Dit zorgt ervoor dat wanneer het luchtkussen gebruikt wordt, de dubbele romp nog net het wateroppervlak raakt. Het voordeel van dit gecombineerd gebruik is dat het beter bestand is tegen het wegglijden door de wind of zeegang en dat er waterjets gebruikt kunnen worden aangezien de romp nog steeds het water raakt.

- **Antifouling**

Dit is een coating die wordt aangebracht op de onderwaterromp van een schip. Ze voorkomt dat macrofouling zoals algen en mosselen evenals microfouling - dit is een film van micro-organismen - zich aan de romp vasthechten. Als coating bestaan er silicium en koper gebaseerde verven. Silicium gebaseerde zijn duurder en zijn enkel effectief bij lage snelheden. Koperhoudende verf heeft als voordeel dat ze effectief is voor verschillende seizoenen. Ze zou tot 10 jaar effectief zijn waardoor ze dus weinig onderhoud vereist. Het zorgt tevens voor een zachte onderwaterromp waarop aangroei bijna onmogelijk is. De verf is door

ontwikkeling ook omgevingsvriendelijker geworden. Het nadeel is dat ze moeilijker te verwijderen is als men de coating wil herdoen. [12]

- **Vermindering van rompgewicht**

Een lager gewicht van de romp zorgt ervoor dat er minder natte oppervlakte ontstaat die op zijn beurt zorgt voor minder weerstand met het water. Een voorbeeld van een systeem om het gewicht te verminderen is het sandwich platen systeem (SPS). [8] SPS is een composiet materiaal dat uitvonden is door Dr Stephen Kennedy en dat samengesteld is uit staal en polyurethaan. Het is een vervanger voor verstevigd staal. Verschillende schepen waaronder vele bulk carriers maken hiervan gebruik. [48]

- **Zonnekracht**

Zonnekracht levert nauwelijks een bijdrage aan brandstofbesparing door zijn lage opwekking van elektriciteit. Tevens is het ook niet interessant door zijn hoge kostprijs voor aanschaf en installatie. Hierdoor wordt het dus weinig toegepast in de koopvaardij.

De Auriga Leader, een NYC RORO, is uitgerust met 328 stuks 40 kW zonnepanelen. Om het u praktisch voor te stellen, 40 kW komt overeen met het verbruik van 40 stofzuigers. Het kostenplaatje van de zonnepanelen bedroeg 1,54 miljoen euro. De opgewekte energie wordt vooral gebruikt voor de verlichting aan boord en toepassingen in de crew accommodatie. [3]

- **Flettner rotors**



Figuur 1: Flettner rotor op ENERCON E-schip 1

Bron: [3]

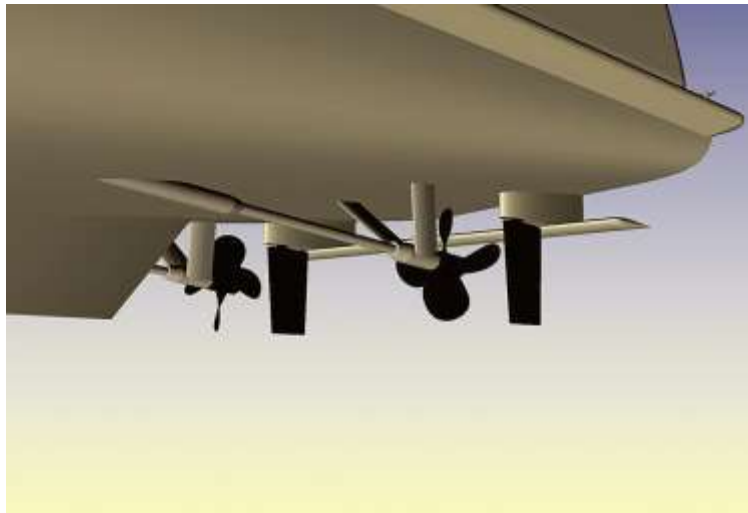
Flettner rotors als voortstuwing op schepen was een idee van Duitse ingenieur Anton Flettner. Dit zijn verticaal opstaande cilinders die aangedreven worden door kleine motoren en hierdoor rond hun as draaien zowel linksom als rechtsom. Het principe is gebaseerd op het Magnus effect. Deze zegt dat een ronddraaiend voorwerp in een bewegende luchtstroom een kracht oplevert loodrecht op die luchtstroom. Met andere woorden, er wordt een propulsiekracht gegenereerd in de richting loodrecht op die van de wind, waar de wind de rotor raakt. Ze hebben hun maximale efficiëntie bij schijnbare beam winden waardoor ze dus interessant zijn als aanvulling op de skysails. [3] [40] Flettner rotors worden vandaag de dag weinig gebruikt. Dit omdat ze een welbepaalde diameter moeten hebben en hierdoor dus ruimte op het dek in beslag nemen. Andere nadelen zijn dat het zwaartepunt van het schip hoger komt te liggen - wat nadelig is voor zijn stabiliteit - en dat het dek voldoende verstevigd moet worden om het gewicht te kunnen dragen.

- **Roer upgrade**

De weerstand die door de roeren ontstaat is heel klein. Als men de roeren zou wegnemen zou men amper een daling in brandstofverbruik zien. Heel slechte roeren maken slechts 5% deel uit van de totale weerstand. De besparing die dus

een hydrodynamisch roer kan leveren bedraagt steeds minder dan 5%. Uit testen uitgevoerd door het DST-Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme is gebleken dat een optimaal roer hooguit 3% brandstof bespaart. [29]

- **Hull vane**



Figuur 2: Achterschip met Hull Vane (Illustratie Van Oossanen)

Bron: [20]

Dit is een stalen vleugel die horizontaal achter de roeren en iets hoger geplaatst is. Ze kan voor een brandstofbesparing van 18-24% zorgen. Met deze brandstofbesparing wordt de extra investering binnen een jaar terugverdiend. De vleugel biedt ook het voordeel dat ze het stampen van het schip met 15% vermindert in zware zeegang. [28]

- **Leren van de natuur onder water**

Ook door levende wezens uit de natuur te bestuderen, kunnen we veel leren. Dolfijnenhuid en walvissenhuid vertonen kleine ribbels. Er wordt veronderstelt dat deze de weerstand verminderen maar er is nog geen onderzoek naar gebeurd. Naar het effect van haaienschubben, ook wel dermal denticles genoemd, is wel reeds onderzoek gedaan. Het zou een weerstandsvermindering van 10% opleveren.

Men kan ook leren van zwaardvissen, het snelste dier onder water. Het zwaard is bij de punt ruw en bevat holten die met elkaar verbonden zijn en die gladder

worden naarmate we meer naar de kop gaan. Wetenschappers hebben aan de hand van een MRI-scan (magnetic resonance imaging) - een scan die het binnenste van het lichaam laat zien zonder dat het daarvoor opengesneden moet worden - ontdekt dat deze gaten olieproducerende klieren bevatten die voor vermindering in weerstand zorgen. Door de hoge snelheid ontstaat een negatieve druk (wet van Bernoulli) nabij het hoofd waardoor deze olie naar buiten wordt gezogen. [3]

- **O-Foil**



Figuur 3: O-foil

Bron: [42]

De O-foil is een systeem dat bestaat uit een op- en neergaande vleugel die de schroef van een schip vervangt en gebaseerd is op de zwembeweging van dolfijnen. Het systeem is geplaatst voor de roeren en benut de volledige breedte van het schip. Hierdoor is het stuwingsoppervlak groter en wordt het rendement vergroot. Het zou een brandstofbesparing opleveren tot 50% waardoor ook de uitstoot van schadelijke stoffen daalt. Een ander voordeel is zijn stille aandrijving. Het systeem is vooral geschikt voor binnenvaartschepen en schepen met een beperkte diepgang. Niet enkel nieuwe schepen vallen binnen het bouwplaatje, ook oude schepen kunnen getransformeerd worden door enkel het achterschip aan te passen aan de O-foil. [61]

- **Air lubrication**

Air lubrication mag niet verward worden met de techniek die SES of hovercrafts gebruiken.

Het algemene idee is hetzelfde maar bij air lubrication is het doel de nodige kracht voor de voortstuwing te verminderen door de romp in contact te brengen met lucht en niet met het water.

Er bestaan 3 soorten technieken voor air lubrication [8] :

- Injecteren van lucht bubbels in de grenslaag romp/water. (Air bubbels)
- Gebruik van luchtholtes in de romp van het schip. (Air cavity)
- Een luchtfilm langs het bodem oppervlak. (Air film)

- **Skysails**

Bij deze techniek wordt windenergie gebruikt voor een deel van de voortstuwing door een kite aan de boeg van een schip te bevestigen.

- **Ribbelstructuur**

Deze structuur is al uitgebreid getest geweest in de luchtvaart. Onder water zorgt deze ervoor dat de wrijvingsweerstand verminderd wordt door turbulenties te creëren boven de toppen van de ribbels.

- **Supercavity**

Deze techniek wordt voornamelijk toegepast bij duikboten. De duikboot creëert een luchtbel rond zichzelf waardoor deze geen weerstand meer ondervindt met het water en hierdoor hogere snelheden bekomen kunnen worden.

- **Varen Salvinia Molesta**

Het is een soort varen die zichzelf omringt met een luchtlaag om zo droog te blijven onder water. De lucht wordt vastgehouden door kleine haartjes die zich op de bladeren van de plant bevinden. Dit zou een oplossing kunnen bieden om luchtbelletjes langer onder de romp te houden.

1.2 Vergelijkende studies

Tabel 1 geeft u een overzicht van het rendement op enkele van de voorgaande aangehaalde middelen. Dit zijn gemiddelde waarden. Het is dus mogelijk dat het rendement verschilt bij testen afhankelijk van het ontwerp van de romp.

Oplossing	Scheepstype	Rendement	Terugbetaaltijd
Rompvorm	Alle scheepstypes	Max. 9%	> 15 jaar
Antifouling	Alle scheepstypes	7%	< 1 jaar
Vermindering rompgewicht	Alle scheepstypes	5-9%	< 1 jaar
Air lubrication	Alle scheepstypes	5-15%	Zie pagina 28

Tabel 1: Rendement bij verschillende soorten aanpassingen

Bron: [8]

Compatibiliteit:

De technieken die toegelicht werden onder het hoofdstuk '1.1 Toelichting' zijn niet steeds compatibel met elkaar. Sommigen hiervan zijn enkel toepasbaar voor een specifiek type schip. Tabel 2 geeft u een duidelijk overzicht welke techniek kan gecombineerd worden met een andere en op welk soort schip deze toepasbaar is. Let op, deze gegevens zijn sterk afhankelijk van het ontwerp van een schip en moeten dus steeds geverifieerd worden door middel van modeltesten.

	Tankers Bulkers	General Cargo	Container ships	Passenger Ships	RORO/Car Carriers	ROPax	Gas Carriers
Wake-equalizing, Flow Separation Alleviating Devices							
Grothues Spoilers	✓						
Schneekluth Ducts	✓	✓	✓				
Stern Tunnels		✓	✓				
Pre-swirl Devices							
Pre-swirl Fins and Stators	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Mitsui Integrated Ducted Propeller	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Hitachi Zosen Nozzle	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Sumitomo Integrated Lammeren Duct	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Becker Mewis Duct	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Post-swirl Devices							
Rudder Thruster Fins	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Post-swirl Stators	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Assymmetric Rudders	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Rudder (Costa) Bulb	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Propeller Boss Cap Fit (PBCF)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Divergent Propeller Caps	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Grim Vane Whels	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
High-efficiency Propellers							
Large Diameter/Low RPM	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Controllable Pitch Propellers (CPP)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Ducted Propellers	✓	✓					
Propellers with End Plates	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Kappel Propellers	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Contra-rotating Propellers				✓			
Podded and Azimuthing Propulsion				✓		✓	
Skin Friction Reduction							
Air Cavity Systems	◆	◆					
Micro Bubbles	◆	◆	◆	◆	◆		◆
Renewable Energy							
Towing Kites	+	+					
Flettner Rotors	+	+					
Windmills	+	+					
Turbosail	◆	◆					

✓	Mature/proven technologies with documented service experience
+	Technologies with near-term applicability (those with demonstrated effectiveness through CFD and model tests, but lack service experience.)
◆	Technologies needing further development

Tabel 2: Compatibiliteit op schepen

Bron: [3]

Wake-equalizing, Flow Separation Alleviating Devices	Grothues Spoilers	Schneekluth Ducts	Stern Tunnels	Pre-swirl Devices	Pre-swirl Fins and Stators	Mitsui Integrated Ducted Propeller	Hitachi Zosen Nozzle	Sumitomo Integrated Lammeren Duct	Becker Mewis Duct	Post-swirl Devices	Rudder Thruster Fins	Post-swirl Stators	Asymmetric Rudders	Rudder (Costa) Bulb	Propeller Boss Cap Fit (PBCF)	Divergent Propeller Caps	Grim Vane Whels	High-efficiency Propellers	Large Diameter/Low RPM	Controllable Pitch Propellers (CPP)	Ducted Propellers	Propellers with End Plates	Kappel Propellers	Contra-rotating Propellers	Podded and Azimuthing Propulsion	Skin Friction Reduction	Air Cavity Systems	Micro Bubbles	Renewable Energy	Towing Kites	Flettner Rotors	Windmills	Turbosail		
Grothues Spoilers										C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	PC	C	C	C			C	C		C	C	C	C	C	C	
Schneekluth Ducts										C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	PC	C	C	C			C	C		C	C	C	C	C	C	
Stern Tunnels										C	PC	PC	PC	PC	PC	PC	PC	PC	PC	C	C	C	C			C	C		C	C	C	C	C	C	
Pre-swirl Devices										C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	PC	C	C			C	C		C	C	C	C	C	C	
Pre-swirl Fins and Stators										C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	PC	C	C			C	C		C	C	C	C	C	C	
Mitsui Integrated Ducted Propeller										C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	PC	PC	PC			C	C		C	C	C	C	C	C	
Hitachi Zosen Nozzle										C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	PC	C	C			C	C		C	C	C	C	C	C	
Sumitomo Integrated Lammeren Duct										C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	PC	PC	PC			C	C		C	C	C	C	C	C	
Becker Mewis Duct										C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	PC	PC	PC			C	C		C	C	C	C	C	C	
Post-swirl Devices										C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	PC	PC	C			C	C		C	C	C	C	C	C	
Rudder Thruster Fins										C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	PC	PC	C			C	C		C	C	C	C	C	C	
Post-swirl Stators										C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	PC	C	C			C	C		C	C	C	C	C	C	
Asymmetric Rudders										C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	PC	C	C			C	C		C	C	C	C	C	C	
Rudder (Costa) Bulb										C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	PC			C	C		C	C	C	C	C	C	
Propeller Boss Cap Fit (PBCF)										C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C			C	C		C	C	C	C	C	C	
Divergent Propeller Caps										C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	PC			C	C		C	C	C	C	C	C	
Grim Vane Whels										C											PC	PC	PC			C	C		C	C	C	C	C	C	
High-efficiency Propellers										C											C	PC	PC	C			C	C		C	C	C	C	C	C
Large Diameter/Low RPM										C											C	PC	PC	C			C	C		C	C	C	C	C	C
Controllable Pitch Propellers (CPP)										C											C	C	C				C	C		C	C	C	C	C	C
Ducted Propellers										C											PC	PC	C	C			C	C		C	C	C	C	C	C
Propellers with End Plates										C											C	C	C				C	C		C	C	C	C	C	C
Kappel Propellers										C											C	C	C				C	C		C	C	C	C	C	C
Contra-rotating Propellers										C											C	C	C				C	C		C	C	C	C	C	C
Podded and Azimuthing Propulsion										C											C	C	C				C	C		C	C	C	C	C	C
Skin Friction Reduction										C											C	C	C				C	C		C	C	C	C	C	C
Air Cavity Systems										C											C	C	C				C	C		C	C	C	C	C	C
Micro Bubbles										C											C	C	C				C	C		C	C	C	C	C	C
Renewable Energy										C											C	C	C				C	C		C	C	C	C	C	C
Towing Kites										C											C	C	C				C	C		C	C	C	C	C	C
Flettner Rotors										C											C	C	C				C	C		C	C	C	C	C	C
Windmills										C											C	C	C				C	C		C	C	C	C	C	C
Turbosail										C											C	C	C				C	C		C	C	C	C	C	C

LEGEND

C The devices are theoretically fully compatible with each other

PC The devices are partially compatible and overall efficiency is not fully additive

Figure 32. Device (PID) Compatibility

Tabel 3: Compatibiliteit verschillende middelen

Bron: [3]

2 Scheepsweerstand

Om deze thesis beter te kunnen begrijpen en omdat dermal denticles 100% invloed zullen hebben op de weerstand is het belangrijk om een basisidee te hebben van wat scheepsweerstand allemaal inhoud. In dit hoofdstuk zullen we de weerstand behandelen die een lichaam ondervindt wanneer het zich aan een relatieve snelheid door een medium verplaatst. Om deze redenen wordt er veel aandacht besteed aan dit hoofdstuk grotendeels gebaseerd op [36]. We zullen zien dat er 3 belangrijke weerstanden zijn die een grote invloed hebben op een varend schip.

2.1 Verschillende soorten weerstand

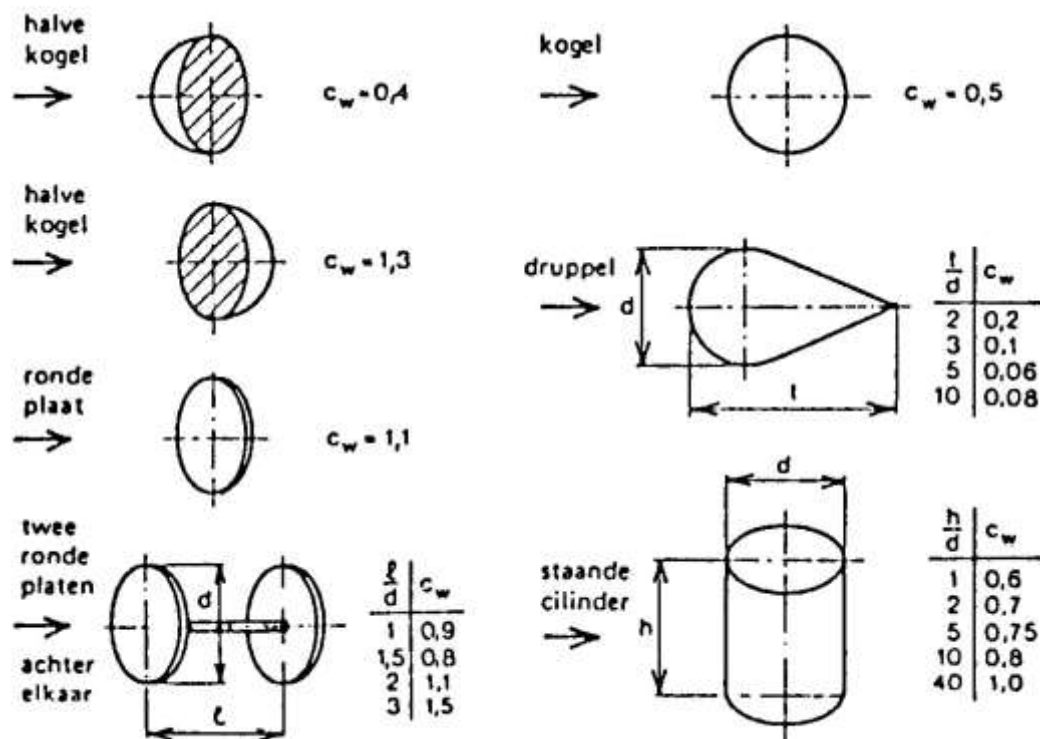
2.1.1 Wrijvingsweerstand

Wrijvingsweerstand is een langsscheepse kracht. Ze wordt veroorzaakt door de wrijvingskracht van het water langs de romp. Deze kracht is afhankelijk van de dichtheid van het medium, de vloeistof. Hoe hoger de dichtheid hoe meer weerstand en omgekeerd. Wanneer we dus een voorwerp door een vloeistof slepen met een hogere dichtheid (hoge viscositeit) zal de dikte van de verstoorde laag groter zijn. Dit komt door de hogere schijnbare wrijving tussen de moleculen onderling. De dichtheid van zeewater is afhankelijk van de temperatuur en het zoutgehalte en wordt als constant beschouwd op 1025 kg/m^3 . De weerstandskracht is ook evenredig met de gekwadrateerde relatieve snelheid v^2 en het oppervlak A van het lichaam loodrecht op de stromingsrichting. Volgende formule geeft de wrijvingsweerstandskracht weer: [10] [11]

$$R_D = C_w * A * \frac{1}{2} \rho v^2$$

C_w is de evenredigheidsconstante die hoofdzakelijk afhankelijk is van de vorm van het lichaam en wordt proefondervindelijk gevonden zoals figuur 4 laat blijken. Het is eveneens afhankelijk van de ruwheid en grootte van het natte oppervlak. [10] Een aanpassing van de vorm kan een aanzienlijke verandering teweegbrengen in de weerstandskracht. Zo heeft het vertragen van de loslating van de vloeistof over de lengte van het lichaam een positief effect op wrijvingsvermindering. Dit kan bekomen worden wanneer de verhouding lengte op dikte toeneemt. Het steunt op de wet van Bernouilli (verduidelijking onder hoofdstuk 2.1.2) dat

ervoor zorgt dat de druk toeneemt bij toenemende lengte. Achter het loslaatpunt wordt de stroming door wervels verstoord. Wanneer deze zich vooraan aan het lichaam bevindt, kan men niet meer spreken van een toenemende druk langs het lichaam. De symmetrische drukverdeling langs het lichaam wordt asymmetrisch. Er ontstaan langsscheepse krachten: de wrijvingsweerstand. Een vermindering in wrijvingsweerstand is mogelijk door $C_w * A$ te verlagen. [10] [11]



weerstandscoefficienten 3-D lichamen.

Figuur 4: Weerstandscoefficienten bij 3D lichamen

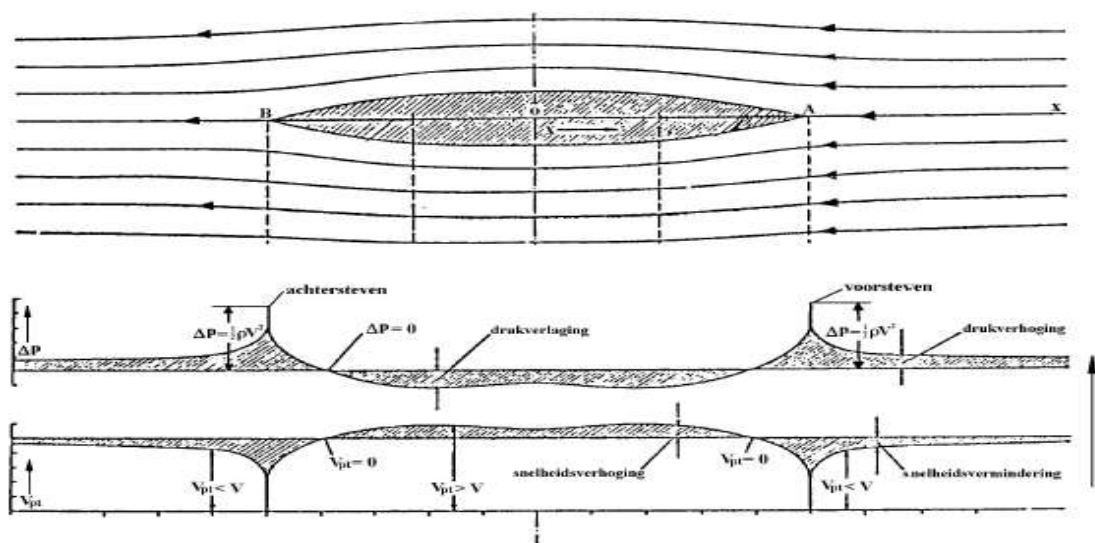
Bron: [10]

Fouling¹ is de grootste veroorzaker van wrijvingsweerstand. Het belang van een juiste coating is van extreem belang. Bepaalde coatings verhinderen dat fouling zich makkelijk op de romp kunnen vasthechten. Een van de geheimen die vissen, dolfijnen en haaien gebruiken is de secretie van slijm over hun huid. Deze zorgt ervoor dat ze een vermindering in weerstand ondervinden in het water doordat fouling zich niet kan vasthechten op de huid. [46] Bij haaien zorgt mede de microscopische kleine spatie tussen schubben dat micro-organismen moeilijkheden hebben om zich vast te hechten. [13]

¹ Verzamelnaam van micro-organismen, mosselen en algen die zich vasthechten op de romp van het schip.

2.1.2 Vormweerstand

Het is de energie die nodig is om een vloeistof weg te duwen van voor een voorwerp naar buiten en rond het voorwerp. Gestroomlijnde schepen zijn zo gemaakt dat deze weerstand minimaal wordt gehouden. Een schip verplaatst een bepaalde hoeveelheid water wanneer het zich door het water verplaatst. Bij een schip dat vooruit vaart, verplaatst het water zich van het voorschip, de boeg naar het achterschip, het hek. Terwijl het water zich langs de romp beweegt, ontwikkelen er zich statische drukverschillen. Aan de boeg en aan het hek creëren zich grotere drukken. Midscheeps vindt men een lagere druk. [36] Deze drukverschillen zijn te verklaren met de wet van Bernoulli². [59] Doordat een schip midscheeps breder is dan aan de boeg of het hek zal het water midscheeps aan een grotere snelheid stromen. Het water moet midscheeps namelijk een grotere afstand afleggen. De grotere snelheid zal midscheeps resulteren in een lagere druk. Het principe steunt op het effect dat kan waargenomen worden bij de vleugels van vliegtuigen. [27]



Figuur 5: Drukverschillen langs een schip

Bron: [10]

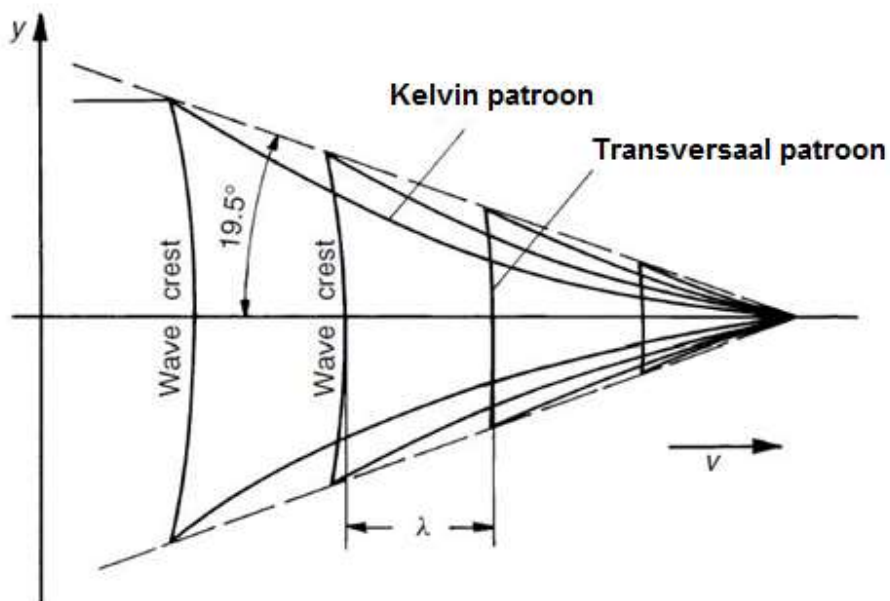
De wrijvingsweerstand van het water langs de romp zorgt ervoor dat er een laag wordt gecreëerd rond het schip die zich met dezelfde snelheid van het schip meebeweegt. Deze laag heeft een bepaalde massa die het schip dus moet meeslepen en waardoor het

² Hoge snelheid in een vloeistof of gas gaat gepaard met een lage druk en vice versa.

brandstofverbruik hoger komt te liggen. In ondiepe wateren zal deze massa hoger zijn. Deze laag laat zich geleidelijk aan los van het schip en zorgt ervoor dat golven ontstaan. [36]

2.1.3 Golfweerstand

Er creëren zich voornamelijk twee golfpatronen die zich zowel aan de boeg als aan het hek laten opmerken. We onderscheiden het transversale patroon die zich aan dezelfde snelheid en in dezelfde richting van het schip mee bewegen en het Kelvin patroon, waarbij de grens van de divergerende golven met het schip ligt op een typische hoek van $19,5^\circ$. [36]



Figuur 6: Transversaal- en Kelvin golfpatroon

Bron bewerkt van: [39]

Voor schepen met een laag Froude getal (zie figuur 8 en hoofdstuk 2.2) zal het meeste energie verloren gaan in de vorming van het transversale golfpatroon. Schepen met een hoog froude getal hebben eerder een dominant divergerend golfpatroon. [36]

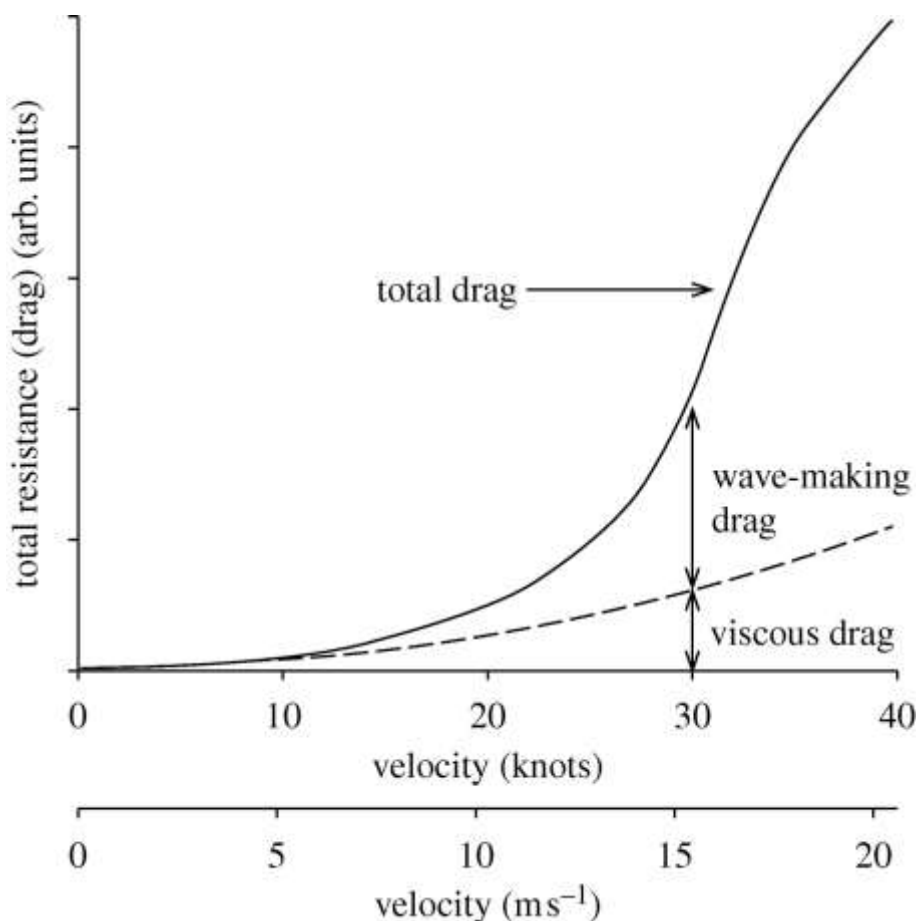
Daar het golfsysteem van een schip kan vereenvoudigd worden naar twee hoofdspelers, zijnde deze aan de boeg en aan het hek, is de interferentie van de transversale component tussen deze twee patronen van belang. Wanneer de golftop van de boeg samen valt met deze van het hek, zullen zij elkaar versterken (in fase). Wanneer de twee patronen echter uit fase zijn en even sterk, zullen zij elkaar opheffen wat de golfweerstand uiteindelijk herleidt

tot nul. De interferentie tussen de gecreëerde golfpatronen door een schip is belangrijk voor de golfweerstand. [35]

Uiteindelijk wordt de weerstand van een schip gerelateerd aan de stroming rond de romp en dit reflecteert zich ook in de snelheidsverdeling achter het schip, of kielzog genaamd.

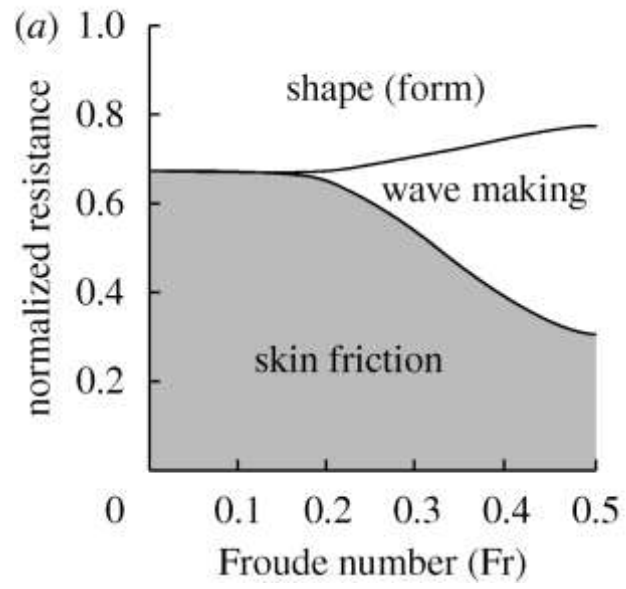
2.1.4 Totale weerstand

De totale weerstand op een schip is de som van de wrijvingsweerstand, de golfweerstand en de vormweerstand en wordt als volgt voorgesteld: $R_T = R_D + R_W + R_F$. Bij lage snelheden zoals de snelheid waarop schepen varen is de wrijvingsweerstand dominantier dan de golfweerstand, bij hoge snelheden vinden we het tegenovergestelde effect. Het is dus belangrijk om de focus te leggen op de vermindering in wrijvingsweerstand. Figuur 7 geeft het grafisch verband weer tussen de snelheid en de weerstand. [36]



Figuur 7: Belangrijkheid in soorten weerstand in functie van de snelheid

Bron: [46]



Figuur 8: Belangrijkheid in soorten weerstand volgens toenemend Froude getal

Bron: [46]

2.2 Theoretische benadering van de weerstand

Uit onderzoek is gebleken dat de weerstandscoefficiënt afhankelijk is van het Froude getal en het Reynolds getal. [36]

Het Froude getal is dimensieloos en geeft de verhouding weer tussen de kracht ten gevolge van de traagheid en de kracht ten gevolge van de gravitatie. Het laat toe om de weerstand te bepalen van een bewegend object door het water, wat tevens toelaat om objecten van verschillend grootte met elkaar te vergelijken. Het wordt ook gebruikt voor het beschrijven van het gedrag van vloeistofoppervlakken. [46]

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g * LLL}}$$

Het Reynolds getal is ook een dimensieloos getal dat wordt gebruikt om te bepalen of een stroming laminair of turbulent is. Het is de maat voor de verhouding van traagheidskrachten op viskeuze krachten en bepaalt het relatieve belang van deze krachten voor bepaalde stromingscondities. Het is een belangrijk getal bij het bepalen van het gedrag van een schaalmodel. [46]

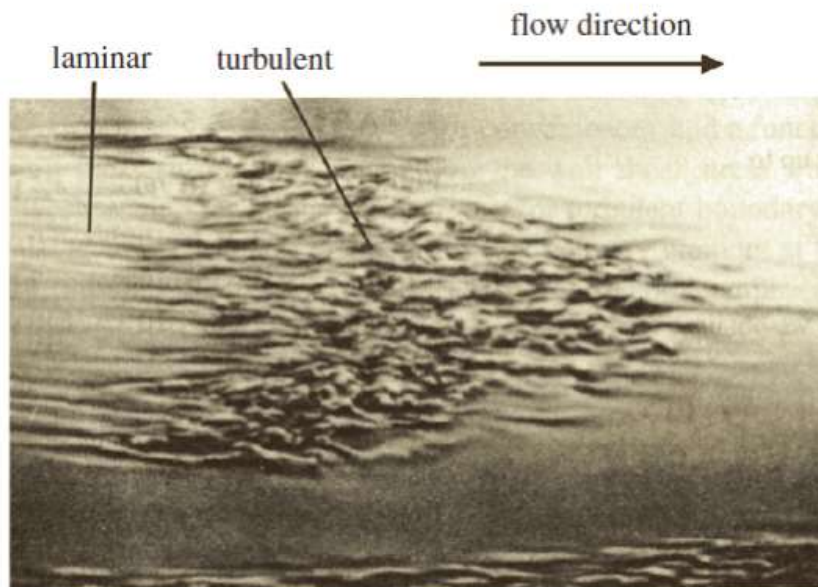
$$Re = \frac{V * LLL}{\nu}$$

V = Snelheid [m/s]

ν = Kinematische viscositeit [m²/s]

LLL = Lengte tussen de loodlijnen [m]

g = Zwaartekracht [m/s²]



Figuur 9: Overgang van laminair naar turbulent

Bron: [9]

Door de onderlinge weerstand tussen moleculen in een stromende vloeistof (kinematische viscositeit) ontstaan er verschillende lagen met een verschillende snelheid. Dit zorgt voor momenten onder de moleculen waardoor we geen laminaire stroming meer hebben maar turbulente stroming. Turbulente stroming wilt men niet hebben omdat deze zorgt voor een extra weerstand. [9]

De overgang van laminaire stroming naar turbulente voor een vlakke plaat gebeurt rond een Reynoldsnummer van 500000. Dit betekent dat bij laminaire stroming de viskeuze krachten tussen de moleculen domineert en dat bij turbulente stroming de inertiaële krachten domineren. [9]

De weerstand wordt benaderd aan de hand van sleeptanktesten die vervolgens moeten opgeschaald of geëxtrapoleerd worden van het model naar het ware schip. Zoals het ware schip is de weerstand van een schaalmodel in functie van het Froudegetal en het Reynoldsgetal. Wanneer de weerstand van een model wordt bepaald (bij een bepaald Froude en Reynoldsgetal), kunnen we ook de weerstand bepalen op ware grootte, gebruik makende van hetzelfde Froudegetal en Reynoldsgetal. Door het Froude en Reynoldsgetal

identiek te houden garanderen we eenzelfde stroming rond het schip als deze rond het model. Het is echter onmogelijk om beide constant te houden en bijgevolg moet men afstand doen van één van de schaalregels.

Wanneer de modelschaal van een schip hetzelfde Froudegetal en Reynoldsgetal heeft als het schip op ware grootte dan is de totale weerstandscoefficiënt van beide dezelfde. Beide getallen kunnen enkel dezelfde zijn wanneer de schaalfactor λ gelijk aan 1 is. Dit wil dus zeggen dat er testen moeten worden gedaan met het schip op ware grootte. Om deze reden doet men dus afstand van één van de schaalregels. Zo blijkt uit de vergelijking modelschaal (m) en ware schaal het volgende: [36]

$$Re = \frac{V * LLL}{\nu} = \frac{V_m * LLL_m}{\nu_m} \quad (v = v_m)$$

$$\rightarrow V * LLL = V_m * LLL_m \quad (1)$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g * LLL}} = \frac{V_m}{\sqrt{g * LLL_m}}$$

$$\rightarrow \frac{V}{\sqrt{LLL}} = \frac{V_m}{\sqrt{LLL_m}} \quad (2)$$

$$\rightarrow LLL = LLL_m \quad (1) \text{ in } (2)$$

$$\rightarrow \frac{LLL}{LLL_m} = 1 = \lambda$$

Omdat dit “(1) in (2)” onmogelijk is, wordt in de praktijk het Froudegetal constant gehouden en past men correcties toe voor het Reynoldsgetal.

Wanneer we testen willen doen op modelschaal kunnen we het Reynolds getal niet als constante beschouwen omdat dan de snelheid waarop de testen zouden moeten gebeuren extreem groot zouden worden.

$$Re = \frac{V * LLL}{v} = \frac{V_m * LLL_m}{v_m} \quad (v = v_m)$$

$$V * LLL = V_m * LLL_m$$

$$\rightarrow V_m = \frac{V * LLL}{LLL_m}$$

Wat men in de praktijk doet, zoals eerder al is uiteglegd, is het Froude getal constant nemen voor de schaalratio en een correctie uitvoeren voor de gevolgen van de afwijkingen in het Reynoldsgetal.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g * LLL}} = \frac{V_m}{\sqrt{g * LLL_m}}$$

$$\frac{V_m^2}{g * LLL_m} = \frac{V^2}{g * LLL}$$

$$\rightarrow V_m = \sqrt{\frac{V^2 * LLL_m}{LLL}} \quad \left(\frac{LLL}{LLL_m} = \lambda\right)$$

$$\rightarrow V_m = V * \sqrt{\frac{1}{\lambda}} = \frac{V}{\sqrt{\lambda}}$$

Volgend op bovenstaande kan de weerstand van een schip opgesplitst worden in een component afhankelijk van het Froudegetal en een component afhankelijk van het Reynoldsgetal. Gedurende een lange tijd wist men met bovenstaande geen weg tot William Froude vanuit de volgende hypotheses vertrok:

- Weerstandcomponenten zijn onafhankelijk van elkaar en bijgevolg is de totale weerstand van een schip = wrijvingsweerstand + restweerstand.
- De wrijvingsweerstand kan benaderd worden door de wrijvingsweerstand van een vlakke plaat met hetzelfde natte oppervlakte als deze van het schip en met dezelfde lengte van het schip.

De Froude extrapolatiemethode of de traditionele methode gaat uit van het volgende:

$$C_T = C_F + C_R$$

C_F = Wrijvingsweerstandscoefficiënt voor een equivalente platte plaat met een lengte gelijk aan het model of het schip.

C_R = Residuaire wrijvingscoëfficiënt, afgeleid van de test bij het model.

Verder stelt Froude dat de residuele weerstand bestaat uit de vormweerstand en golfweerstand, waarbij de vormweerstand als zijnde onafhankelijk van het Reynoldsgetal wordt beschouwd.

$$C_T(\text{Re}, \text{Fn}) = C_F(\text{Re}) + C_R(\text{Fn}) + \Delta C_A$$

ΔC_A = Extra element voor extrapolatiefouten en effecten van ware grootte die niet aanwezig zijn op het schaalmodel. Elke sleeptank kan zo zijn eigen ΔC_F waarde gebruiken.

De methode aangenomen op de Internationale Sleeptankconferentie van 1978 maakt gebruik van een andere manier om de wrijving te berekenen. De eerdere restweerstand wordt opgesplitst in de vormweerstand en de golfweerstand, waarbij de vormweerstand nu wel afhankelijk is van het Reynoldsgetal.

Daar er een verband bestaat tussen de wrijvingsweerstand en de vormweerstand, wordt dit uitgedrukt door de vormfactor $(1+k)$, (benadering van Hughes en aanvaard door ITTC).

$$C_T(\text{Re}, \text{Fn}) = (1 + k)C_{F0}(\text{Re}) + C_W(\text{Fn}) + \Delta C_A$$

2.3 Correcties

Bulbsteven

Een bulbsteven is een idee dat ontstond rond 1900. Het is een torpedovormig onderdeel dat zich onder water bevindt aan de boeg van een schip en is ontworpen voor een welbepaalde diepgang. De bulbsteven beïnvloedt de golfweerstand en de vormweerstand. De golfweerstand kan tot 30% verminderd worden door een bulbsteven te plaatsen. [6] Dit percentage is sterk afhankelijk van het soort schip, geladen/ongeladen, de vorm, etc. en is dus scheepseigen. Voor hoge snelheidsschepen zegt men vaak dat dit een rendement oplevert van 15%, voor schepen met een lagere snelheid zegt men ook wel eens 5 - 20%. [36] Door een golfdal te creëren waar zich normaal de boeggolf bevindt, zal de romp minder weerstand ondervinden. Het bulbsteven zorgt ook voor een bepaald drijfvermogen waardoor de diepgang aan de boeg verminderd zal worden en hierdoor als neveneffect minder energie wordt gestoken in het vormen van het Kelvin golfpatroon. [36] Het golfpatroon langsheen het schip zal zich gematigder voordoen en zal zich gemakkelijker van het hek loslaten waardoor het zuigeffect aan het hek zal verminderen. [6] Het voordeel is dat men minder brandstof zal verbruiken en dat men met hetzelfde vermogen een iets hogere snelheid kan bereiken.

Het beperken van de wrijvingsweerstand blijft een moeilijk onderwerp. De wrijvingsweerstand is proportioneel met de natte oppervlakte en zelfs met het kwadraat van de scheepssnelheid zoals eeder al is vermeld. De grootste component in scheepsweerstand blijft deze weerstand, de viskeuze weerstand met de romp. Deze weerstand kan op drie manieren worden verminderd.

- Het verminderen van het natte oppervlak. Dit levert een lineaire vermindering.
- Verminderen van de scheepssnelheid. Dit levert een kwadratische vermindering.
- Vergroten van de gladheid van het natte oppervlak door het beperken van aangroei.

De eerste twee punten zijn het makkelijkst maar hebben een invloed op de scheepsoperabiliteit. Voor deze reden gebeurt er veel onderzoek naar het laatste punt. [10]

Aanhangsels

We bedoelen hiermee het roer, de schroef, etc. die wrijvingsweerstand creëren. Modeltesten worden twee keer uitgevoerd. Een keer met aanhangsels en een keer zonder. Het verschil in beide is de weerstand door de aanhangsels. De snelheid heeft een zeer grote invloed. De weerstand is lineair met het kwadraat van de voorwaartse snelheid. [36]

Luchtweerstand

Deze is zo minimaal dat ze vaak wordt verwaarloosd en wordt daarom buiten beschouwing gelaten. [36]

Staat van de zee

De golfhoogte heeft een invloed op de weerstand en kan uitgedrukt worden via een formule maar wordt verder niet beschreven. [36]

De kimkiel

De kimkiel zorgt ervoor dat het schip minder rolt. Het zorgt voor een hoger nat oppervlak en dus ook voor extra wrijvingsweerstand. Omdat het onmogelijk is, door zijn kleine afmetingen, om deze te maken voor modelbouw wordt het oppervlak bij het natte oppervlak van de naakte romp opgeteld. [36]

3 Air lubrication

3.1 Algemeen principe

Als water over een vast oppervlak zoals de romp loopt, is de watersnelheid tegen dit oppervlak nul door de wrijving tussen het water en de moleculen van het vast materiaal. Als er zich een luchtlaag situeert tussen het vast materiaal en het water is de snelheid hoger dan nul. Dit komt doordat lucht een 55 keer lagere viscositeit heeft vergeleken met water. Hierdoor wordt de overdracht van wrijving met dezelfde factor verkleind. [31]

Air lubrication is een methode om de weerstand van de scheepsromp met het water te verminderen door gebruik te maken van lucht.

Air lubrication kan je opsplitsen in 3 grote delen:

- Air bubbels: waarbij kleine luchtbelletjes onder de romp van het schip worden gebracht.
- Air cavity: waarbij in de romp een inkeping wordt gebracht waarin lucht wordt vastgehouden.
- Air film: waarbij een volle ononderbroken luchtlaag zich onder de romp bevindt.

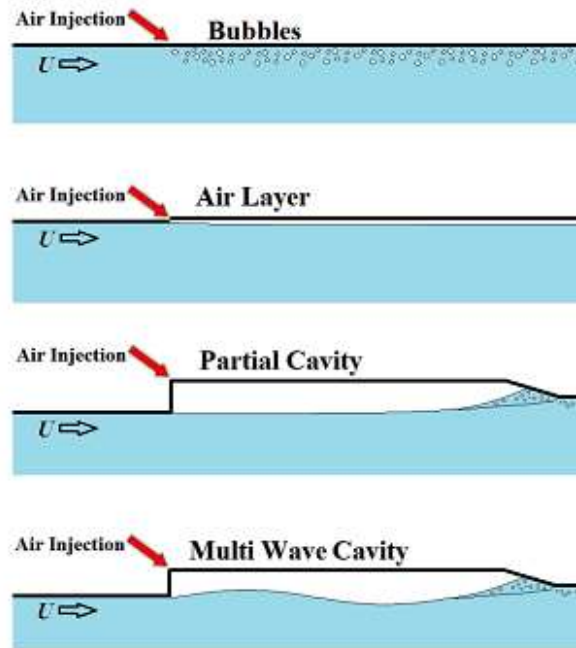
De 'air flow' nodig voor de lubrication heeft best een zo uniform mogelijk dikte. Een te dikke luchtlaag verhoogt de weerstand weer en verhoogt daarmee ook het energieverbruik nodig voor de blower. Er moet dus een correcte verhouding gevonden worden tussen deze beide. De 'air flow' is tevens afhankelijk van de scheepssnelheid.

Men kan twee grote onderscheiden maken in de vorm van schepen: [7]

- Platte bodem: (o.a. bulk carriers, heavy lift schepen) Deze hebben een enkele outlet van bubbels die geplaatst zijn nabij de boeg van het schip.
- Slanke bodem: (o.a. ferry's, containerschepen) Deze hebben 3 gescheiden bubble outlets. Een nabij de boeg en de twee anderen op 1/3 van de lengte van het schip meer naar achter. De vermindering in brandstofverbruik werd herleid tot 5% en is minder dan bij platte bodems.

De investeringskost bedraagt ongeveer 2 - 3% van de totale nieuwbouwkost en is eenmalig. De operationele kost die nodig is om de bubbels onder het schip te krijgen bedraagt 0,5 - 1% van de propulsie power. Dit resulteert gemiddeld in 0,3 tot 0,5 ton brandstof per dag. [26]

In dit hoofdstuk zal ik elk van deze delen globaal toelichten. Figuur 10 geeft alvast een goed inzicht in het algemene principe van wat te wachten staat in de komende 3 delen.

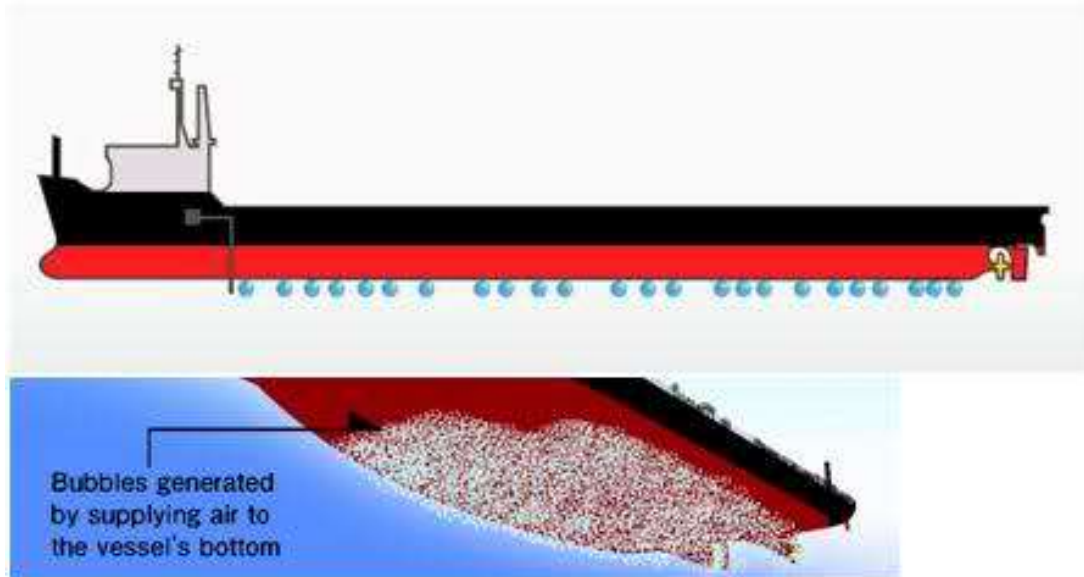


Figuur 10: Verschillende air lubrication technieken (Illustratie Makiharju)

Bron: [58]

De eerste weergave van figuur 10 toont het principe van air bubbels/luchtbellen, hetgeen wordt behandeld in 3.2. De tweede schets toont het principe van een air layer/luchtlaag, wat wordt behandeld 3.4. In 3.3 wordt air cavity/luchtcavitatie beschreven hetgeen is weergegeven door de laatste 2 schetsen.

3.2 Air bubbels



Figuur 11: Air bubble lubrication

Bron: [19]

3.2.1 Inleiding

Zoals werd uitgelegd onder het algemene principe worden er air bubbels onder de romp van het schip gebracht om de weerstand met het water te verminderen.

Onderzoek naar air bubbels is lopende sinds meer dan 50 jaar. Desondanks zijn er weinig schepen die zijn uitgerust met dit principe en is het nooit tot een volledige ontwikkeling gekomen. Dit komt doordat er te veel energie nodig was om de air blower aan te drijven en hierdoor het uiteindelijk rendement dus maar miniem was. [7]

Omdat dit systeem nog steeds in volle ontwikkeling is, kan men weinig zeggen over de kost effectiviteit. Het is dus moeilijk te zeggen wat de terugbetaaltijd is van deze techniek. [26]

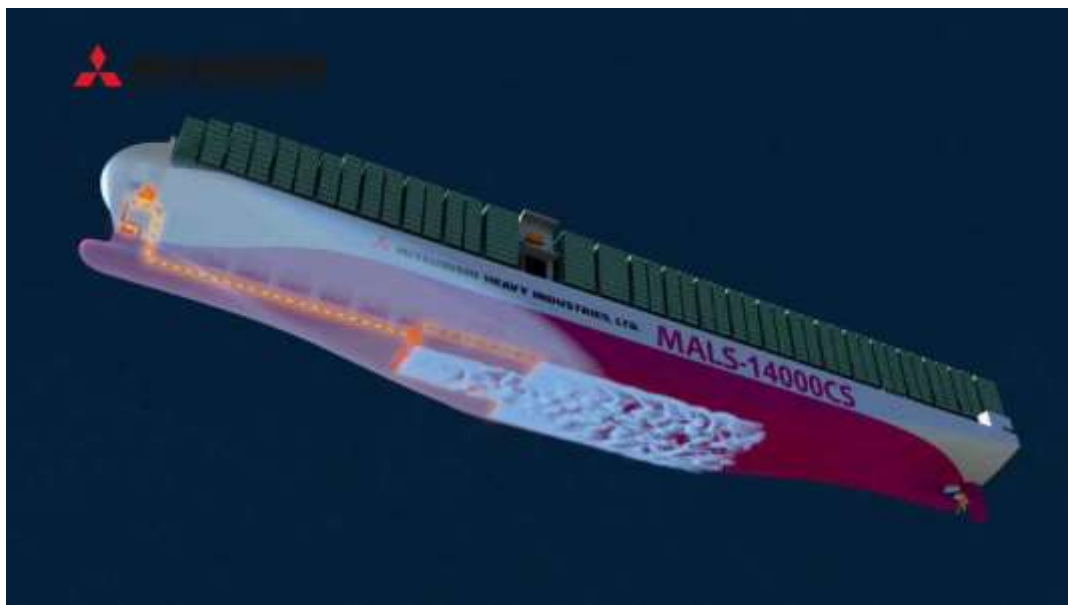
3.2.2 Potentiele gebruikers

Nieuwbouw schepen > 225 meter in lengte met platte bodem van het type: [30] [8]

- Crude oil tanker en bulk carriers > 60000 dwt
- LPG tankers met 50000 m³ capaciteit en meer
- Alle LNG tankers
- Full container schepen > 2000 TEU

3.2.3 Mitsubishi Air Lubrication System

Mitsubishi Heavy Industries (MHI) en transportbedrijf Nippon Yusen Kaisha (NYK) kondigden in februari 2011 aan dat ze plannen hadden om een systeem te zoeken om de weerstand op hun schepen te verminderen. [45] MHI schat de weerstand van de romp in contact met water in op 50 - 70% van de totaalweerstand. Dit was voor hun het doorslaggevende punt om te zoeken naar meer milieuvriendelijke en brandstof besparende middelen. Zo ontwikkelden ze het Mitsubishi Air Lubrication System (MALS) dat het principe van air bubbles gebruikt. Dit systeem zou volgens hun in staat zijn om de CO₂ emissie van schepen met 10 - 35% te verlagen. [7]



Figuur 12: MALS

Bron: [21]

MALS is de naam die gegeven wordt door Mitsubishi Heavy Industries voor air bubble lubrication. Kleine luchtbelletjes worden aan de boeg door een air blower onder het schip geblazen. Deze luchtbelletjes verplaatsen zich langsscheeps langs de romp en zorgen voor een vermindering in wrijving met het water.

Het systeem is door MHI ontwikkeld voor graanschepen, containerschepen en passagiersschepen. Het is reeds op 2 schepen geïnstalleerd: de *Yamatai* en de *Yamato*. Deze schepen werden gekozen voor twee redenen:

1. Ze beschikken over een geringe diepgang waardoor het water een relatief kleine waterdruk uitoefent op de romp. Dit heeft als voordeel dat de blower, die de bubbels onder de romp moet krijgen, niet veel elektrische energie nodig heeft.
2. Ze beschikken over een platte bodem waardoor de bubbels niet snel van onder de romp kunnen ontsnappen.

De resultaten waren verbluffend. Bij het testen werd een vermindering van 20% gevonden in benodigde engine power maar een 7% extra energie was nodig voor de blowers. Dit levert dus een totaal rendement van 13%. Deze besparing leverde ook een brandstofvermindering op van 12 - 13% in kalm weer. De langsscheepse verplaatsing van de bubbels werd gecontroleerd door MHI door gebruik te maken van een remotely operated vehicle (ROV). Dit gaf hun inzicht in de modificaties die nodig waren voor verbetering en deze werden toegepast op de ferry *Naminoue* midden 2012. Opmerkelijk was een vermindering in trillingen en geluid. [7] [41]

De *Yamatai* is het werelds eerste schip voor overzees transport dat gebruik maakt van de MALS techniek en is eigendom van NYK, een Japanse rederij. Beide schepen werden in 2010 in omloop gebracht en werden gebouwd in de "Koyagi Plant of Mitsubishi Heavy Industries' Nagasaki Shipyard & Machinery Works".

MHI heeft plannen om in de toekomst dit systeem te plaatsen op een nieuw Panamax containerschip van 14000 TEU (twenty-foot equivalent unit). De nieuwe Panamax schepen zijn schepen die door het vernieuwde, uitgebreide Panamakanaal kunnen varen. Schepen met een lengte van 366 meter, 49 meter breed en met een diepgang van 15,2 meter gemeten in fresh water kunnen door de sluis. [43] Ook hier wordt verwacht ongeveer 10% vermindering in weerstand te bekomen. Door de romp aan te passen en door de

accommodatie meer naar voor te plaatsen schatten ze een vermindering van 35% CO₂.

Scheepspecificaties:

Naam	LOA [m]	Breadth [m]	Draft [m]	Gross tonnage [ton]
Yamatai	162	38	6.37	14538
Yamato	162	38	6.37	14538
Naminoue	146	24	N/A	8072

Tabel 4: Toepassing MALS

Bron: [41]

3.2.4 Testen

3.2.4.1 Projecten

Er lopen twee onderzoeksprojecten bij MARIN die de 3 types van air lubrication (air bubbles, air cavity en air film) bestuderen. Enerzijds hebben we PELS (Project Energy-saving air-Lubricated Ships) en anderzijds hebben we SMOOTH (Sustainable Methods for Optimal design and Operation of ships with air-lubricated Hulls). [8] Beide projecten worden gesponsord door een consortium, bestaande uit sloopseigenaren, sloopswerfen, verf producerende bedrijven en universiteiten, en testen vinden plaats in model bassins.

1. PELS

Verskillende projecten vonden hun ontstaan in 1999 in Nederland. Eén daarvan was PELS. PELS is een Nederlands onderzoek consortium dat wordt gesubsidieerd door SenterNovem en de Provincie Gelderland. [23] [16] Het PELS project richtte zich vooral op de theoretische kant en het testen van modelbouwschepen. [56] Omdat de experimenten met deze 3 types (bubbels, cavity, film) positief waren, zorgde dit voor 2 nieuwe projecten.

- Het PELS 2 project: hier werd gefocust op air cavity schepen.
- Het SMOOTH project: hier werd de nadruk gelegd op air film en air bubbels.

Beide projecten zijn gericht op binnenvaartschepen en coasters. Om een optimaal idee te verwerven, werden voor beiden projecten telkens een full-scale testschip gebouwd. [24]

Na een serie van testen te hebben uitgevoerd onder het PELS 2 project, bleek dat het makkelijker was om de weerstand te vermeerderen in plaats van te verminderen. Dit

werd zelfs na het optimaliseren van de air cavities door gebruik te maken van stromingsleer geconstateerd. Het aanpassen van de lengte-, breedte- en aantal cavities zorgde er niet voor dat er een weerstandvermindering waar te nemen was. Een nauwkeurige beoordeling van de resultaten hebben geleid tot de conclusie dat de stroming over de boeg van het schip, de stroming over de scheepsromp zou verstoren waardoor de air cavities geen effect hebben. Om deze hypothese te testen wijzigde men de boeg van het modelschip en herhaalden ze de testen. Welke vormaanpassingen exact werden gemaakt is niet nader bepaald. Uit de nieuwe testen bleek dat de wrijvingsweerstand was gedaald met 20%. Dit duidt dus op het belang om een juiste boegconfiguratie te hebben bij air cavity schepen. [23]

2. SMOOTH

(Sustainable Methods for Optimal design and Operations of ships with air lubricated Hulls)

Een consortiumovereenkomst tussen verschillende bedrijven en onderzoeksinstituten zorgde ervoor dat het EU gefinancierde SMOOTH project tot stand kwam. MARIN is van dit project de hoofdcoördinator. Het project is in september 2006 gestart en zal in de zomer van 2009 worden afgerond. [16] De belangrijkste onderzoeksvraag bij MARIN was hoe men de bubbels zo lang mogelijk onder het schip kon houden. Net zoals bij een duiker die lucht uitademt, hebben de bubbels de neiging om naar de oppervlakte te ontsnappen. In totaal werden drie methodes onderzocht om de bubbels zo lang mogelijk vast te houden.

- De eerste methode is deze van de air cavity. Hierbij werd gezocht naar de meest geschikte vorm van caviatie.
- De tweede methode is deze met air film.
- Bij de derde methode werd een speciaal soort verf gebruikt die over een sterk waterafstotende eigenschap beschikt. Dit moet ervoor zorgen dat de luchtbellen zich gaan vasthechten aan de verflaag en niet via het water ontsnappen.

Deze drie methodes werden verder onderzocht door MARIN en drie andere onderzoeksinstituten (DST, ITU en SSPA) waarbij men zich richtte op de volgende vragen:

- Hoe zien de ideale luchtkamers eruit?
- Kunnen de luchtkamers allemaal even groot zijn of moeten er verschillende groottes zijn?

Om deze drie methodes te testen werd beroep gedaan op een bestaand schip van New-Logistics en op één van de duwbakken van Thyssen Krupp Veerhaven. Deze laatste was ook voorzien van waterafstotende verf van Akzo Nobel (International Paint). Scheepswerf Damen zorgde voor de aanpassingen aan de schepen. Atlas Copco Marine Center was verantwoordelijk voor de compressoren. Bureau Veritas onderzocht of alle technische plannen haalbaar waren. Het waarheidsgrootte schip waarmee testen werden uitgevoerd had de naam *Till Deymann*. Het doel van SMOOTH was om meer en beter inzicht te krijgen in onderzoek naar air lubrication, zijn effect op de weerstand, propulsie, manoeuvreerbaarheid en zeekarakteristieken. [24]

3.2.4.2 Model/werkelijkheid

Om de prestaties van air lubrication experimenteel op schaal te onderzoeken en te beoordelen is het van belang dat het modelschip zo nauwkeurig mogelijk de werkelijkheid benadert. Een model is de vereenvoudiging en verkleinde versie van het werkelijke. We bouwen modellen zodat we beter het systeem begrijpen wat er ontwikkeld moet worden. Het ontwikkelen van modelbouwschepen leverde tijdens de testen enkele problemen op :

Een eerste probleem bij het testen van de schaalmodellen is dat het niet mogelijk is om de grootte van de bubbels aan te passen aan de grootte van het schaalmodel. Het schip verkleint dus wel maar de bubbels niet waardoor het dus praktisch onmogelijk is om de vermindering van het brandstofverbruik correct in te schatten. Om toch een idee te krijgen van deze vermindering moet men ingewikkelde berekeningen maken die dus een hoge technische kennis vereisen. [7] Als de bubbel vergroot in schaal vergroot ook de mogelijkheid dat de bubbel vervormt zodat deze niet meer sferisch is. [24]

Een tweede probleem dat optreedt is dat de eigenschappen en de druk van de air blower variëren van schip tot schip en van hun toepassing.

Item	Unit	Module carrier	Bulk carrier	Container ship	Passenger ship
Length, L	m	153	230	350	240
Speed, Vs	kt	13.0	14.0	24.0	17.0
Flow rate, Qs	m ³ /min	80 -120	150 - 250	200 - 550	100 - 200
Pressure, P	kPa	65	155	170	100
Item	kW	130 - 200	500 - 840	680 - 1900	230 - 460

Tabel 5: MALS ontwerpcondities en compressor specificaties

Bron: [7]

3.2.5 Detail

De twee testschepen hebben geen probleem met lucht aan hun schroef doordat deze lucht verdwijnt via honderden holten in de romp.

De hoeveelheid bubbels wordt gecontroleerd door de blower en door verschillende kleppen.

De blower staat vooraan gepositioneerd. [7]

3.2.6 Reglementering

In het onderzoek naar de reglementering omtrent de constructie van air bubbels in de scheepsomp ben ik via de Europort beurs in Rotterdam met enkele classificatie maatschappijen in contact gekomen. Hierbij ben ik te weten gekomen dat er tot op heden nog geen reglementering bestaat omtrent de gaten die moeten gemaakt worden in de romp waardoor de lucht kan ontsnappen. [18]

Volgens Lloyds Register zorgen de gemaakte gaten niet voor een zodanig grote verzwakking van de structuur wanneer deze in de romp van de boeg zijn gemaakt. Dit omdat de boeg één van de sterkste verstevigde delen op een schip is. Er moet wel op gelet worden dat de penetraties zich bevinden voor het aanvaringsschot van het schip, zodat in het geval van lekkage of schade de veiligheid van het schip niet in gedrang komt. [18]

Voor inspecties behandelen ze elke opening in de romp volgens een vaste methode zoals deze in figuur 13 is beschreven. Air bubbel openingen zouden dan worden behandeld als een geïsoleerd geval.

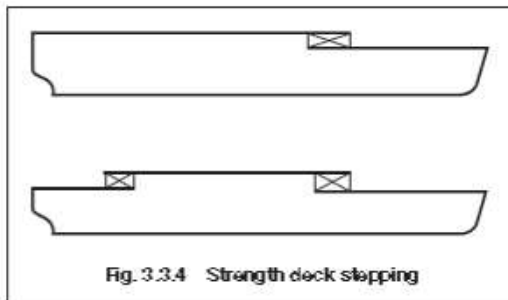


Fig. 3.3.4 Strength deck stepping

3.4.3 Openings having a length in the fore and aft direction exceeding 2,5 m or 0,1B m or a breadth exceeding 1,2 m or 0,04B m, whichever is the lesser, are always to be deducted from the sectional areas used in the section modulus calculation.

3.4.4 Smaller openings (including manholes, lightening holes, single scallops in way of seams, etc.) need not be deducted provided they are isolated and the sum of their breadths or shadow area breadths (see 3.4.7), in one transverse section does not reduce the section modulus at deck or bottom by more than 3 per cent.

3.4.5 Where B_1 equals the breadth of the ship at the section considered and Σb_1 equals the sum of breadths of deductible openings, the expression $0,06 (B_1 - \Sigma b)$ may be used for deck openings in lieu of the 3 per cent limitation of reduction of section modulus in 3.4.4.

3.4.6 Where a large number of openings are proposed in any transverse space, special consideration will be required.

3.4.7 When calculating deduction-free openings, the openings are assumed to have longitudinal extensions as shown by the shaded areas in Fig. 3.3.5. The shadow area is obtained by drawing two tangent lines to an opening angle of 30° . The section to be considered should be perpendicular to the centreline of the ship and should result in the maximum deduction in each transverse space.

3.4.8 Isolated openings in longitudinals or longitudinal girders need not be deducted if their depth does not exceed 25 per cent of the web depth with a maximum depth for scallops of 75 mm.

3.4.9 Openings are considered isolated if they are spaced not less than 1 m apart.

3.4.10 For compensation that may be required for openings, see individual ship Chapters.

3.4.11 Where trunk decks or continuous hatch coamings are effectively supported by longitudinal bulkheads or deep girders, they are to be included in the longitudinal sectional area when calculating the hull section modulus. The lever z_t is to be taken as:

$$z_t = z_0 \left(0,9 + 0,2 \frac{y}{B} \right) \text{ m but not less than } z_0$$

y = horizontal distance from top of continuous strength member to the centreline of the ship, in metres
 z = vertical distance from the neutral axis to the moulded deck line at side, in metres
 z_0 = vertical distance from the neutral axis to the top of the continuous strength member, in metres
 z_0 and y are to be measured to the point giving the largest value of z_t .

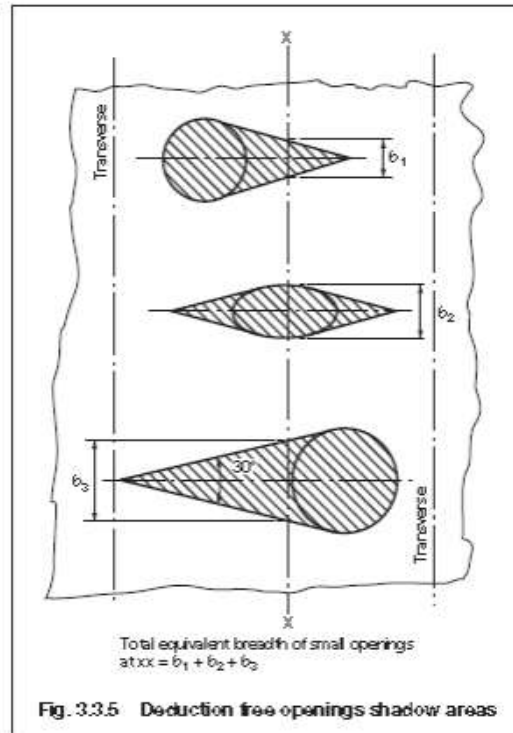


Fig. 3.3.5 Deduction free openings shadow areas

3.4.12 Where continuous hatch coamings are effectively supported (except inboard coamings of multi-hatch arrangements, see 3.4.14), 100 per cent of their sectional area may be included in the calculation of the hull section modulus.

3.4.13 Where a continuous longitudinal underdeck girder, or girders, are arranged to support the inboard hatch coamings, 50 per cent of their sectional area may be included. If the girder is fitted in conjunction with a longitudinal centreline bulkhead, 100 per cent of the sectional area may be included. In cases where the girders are enclosed box sections, or where the girders are effectively tied to the bottom structure, the area to be included will be specially considered.

3.4.14 The percentage of the sectional area to be included for inboard continuous hatch side coamings should be the same percentage as that of the longitudinal girder under.

Figuur 13: Reglementering opening en air bubble lubrication

Bron: Drasko Radalj, scheepsarchitect Lloyd's Register

3.2.7 Nadelen

Zoals reeds werd beschreven onder het hoofdstuk '3.2.4.2 Model/werkelijkheid', is het moeilijk om de correcte bubbelgrootte te verkrijgen in de ware werkelijkheid en om deze grootte te kunnen behouden over de volledige lengte van het schip. Dit is moeilijk omdat de bubbels groter worden op hun pad en zich aan andere bubbels gaan kleven waardoor het effect van wrijvingsvermindering dus sterk vermindert.

Een ander bezwaar is dat de bubbels moeilijk aan de romp blijven hangen van zodra ze onder de romp worden gepompt. [3]

Een heel ander soort nadeel is dat de compressoren, die de bubbels onder de scheepsromp brengen, problemen kunnen ondervinden bij diep draft schepen doordat ze de bubbels dieper moeten pompen en hierdoor dus over een grotere kracht moeten bezitten. [30]

3.3 Air cavity ships (ACS)



Figuur 14: Air cavity schip (ACS)

Bron: [58]

3.3.1 Inleiding

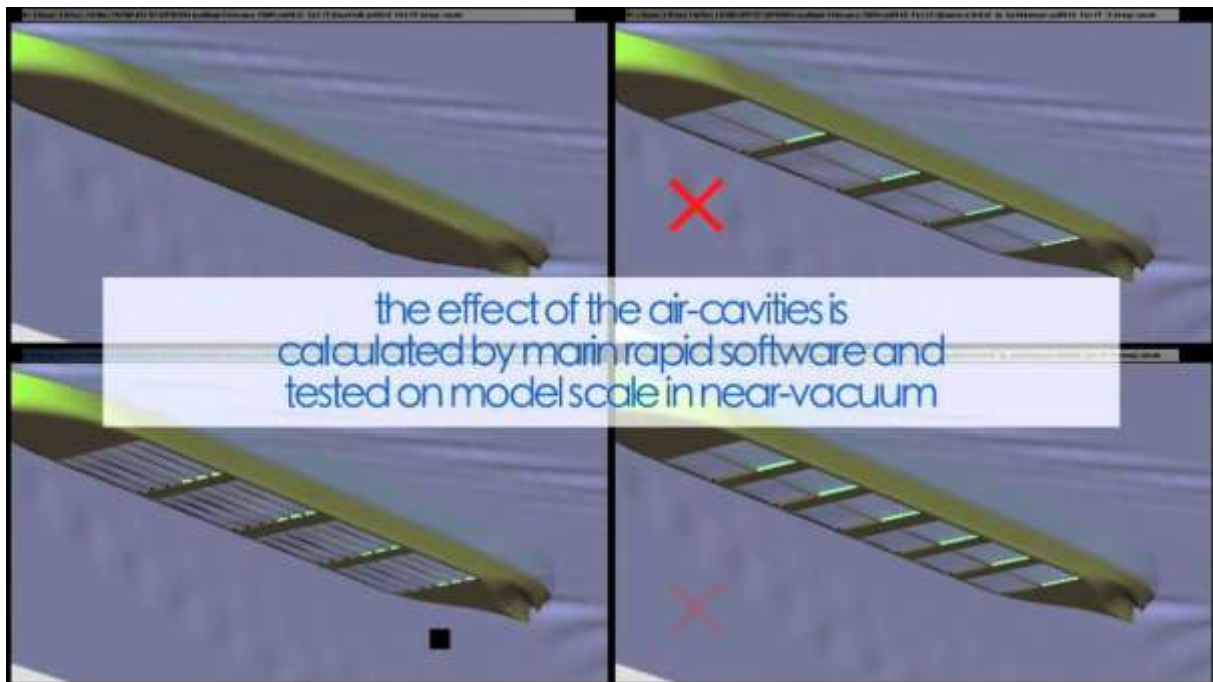
Deze schepen maken gebruik van een dunne luchtlaag die behouden blijft onder de vlakke romp. Deze luchtlaag kan het best gebruikt worden bij schepen met lage Froude getallen omdat bij hierbij de laag lang stabiel behouden blijft. [3]

De onderwaterromp van schepen uitgerust met air cavity bestaan uit uitsparingen die constant gevuld zijn met een stroom van lucht. Dit vermindert het natte oppervlak drastisch waardoor er minder wrijving optreedt. [25]

Deze techniek kan toegepast worden op nieuwe schepen maar ook oudere schepen kunnen er gebruik van maken na een aanpassing. De schepen moeten wel voldoen aan enkele vereisten. Naast de vereiste dat het schip een minimum lengte van 225 meter dient te hebben moet ze ook over een grote platte bodem beschikken. Afhankelijk van het scheepstype kan dit leiden tot een besparing van 5 - 15%. Zo besparen tankers en bulk schepen 10 - 15% en containerschepen 5 - 9%. [8]

3.3.2 Bouw

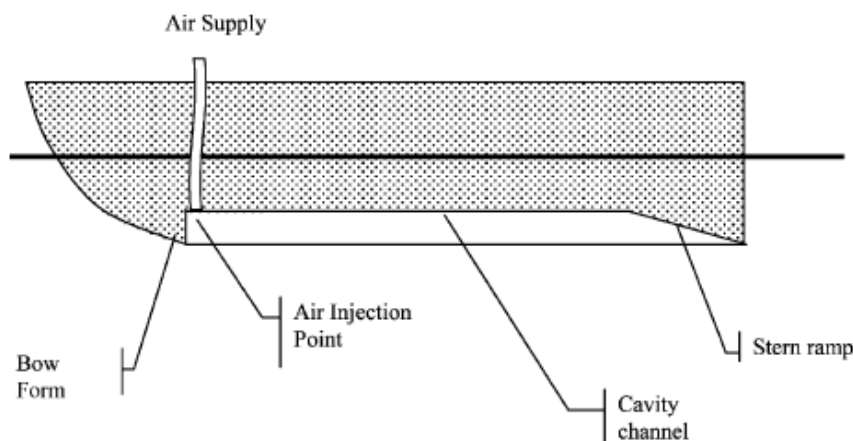
Het schip heeft onderaan zijn romp een of meerdere uitsparingen die gevuld worden met lucht. Om deze techniek toe te kunnen passen is het noodzakelijk een horizontale, platte kiel te hebben. [23]



Figuur 15: Toepassing met verschillende air cavities

Bron: [22]

De air cavity romp vorm is eenvoudig te maken. De romp vorm is als volgt ingedeeld : men start bij de boeg waar 20% na de boeglengte behouden blijft, zonder enige verandering. Deze lengte heeft als functie om het schip te laten planeren/semi-planeren wat zorgt voor een betere zeewaardigheid van het schip. Hierna wordt de cavity, de holte gevormd door een uitsparing in de romp met diepere kanalen langs de zijden van de romp. De lucht wordt net achter de wigvormige trede die het begin vormt van de uitsparing, gepompt. De luchtholte op het achterschip is zacht hellend naar beneden. Deze zorgt voor een planerend oppervlak en is in contact met het water om zo de luchtontsnapping te verminderen. Dit vlak moet een bepaalde hoek hebben om van optimaal rendement te kunnen genieten.



Figuur 16: Air cavity langsdoorsnede van rompconfiguratie op middenlijn

Bron: [25]

De lucht wordt naar beneden geblazen door een ventilator die wordt aangedreven door een elektrische motor. [25]

3.3.3 Testen

De testen werden zoals eerder gezegd uitgevoerd onder het PELS en PELS 2 project. Testen hebben aangetoond dat de holle ruimte (cavity) niet over de volledige scheepslengte kan reiken bij lage snelheden. Het probleem bij deze snelheden is dat de lucht die zich in de holte bevindt, zich naar het hek van het schip verplaatst en daar loskomt en verdwijnt. Om dit probleem te verhelpen zou men volgens Butuzov *et al.* kunnen werken met verschillende uitsparingen om zo verschillende cavities over de volledige romp te verkrijgen. Bij hoge snelheden daarentegen is het wel mogelijk om de holte over de volledige scheepslengte te laten reiken. De loslating van lucht bij het hek verdween evenals verdween er minder lucht op zijden van de holte. Men kan dus besluiten dat de lengte van de holte afhangt van de snelheid van het schip en van de hoeveelheid lucht injectie.

Uit testen bleek ook dat de weerstandsvermindering in de holte drie oorzaken heeft [25] :

- Vermindering van het natte oppervlak door de lift door de lucht.
- Vermindering van het natte oppervlak door vermindering van het wrijvingsoppervlak.
- Golfweerstandverandering.

3.3.4 Nadelen

- Wanneer het schip stampst of rolt door zeegang kan er lucht ontsnappen uit de holle ruimte. Op binnenwateren heeft men veel minder last van dit probleem. Air cavity is daarom dus geschikt voor toepassing op binnenvaartschepen. Mede hebben ze het voordeel is dat ze makkelijk te stoppen zijn door het loslaten van de lucht uit de cavities. Een eigenschap die toch wel relevant is voor de drukke binnenvaart. [23]
- Bij bepaalde snelheden is het moeilijker is om de luchtlag te behouden. [3]
- De stabiliteit wordt negatief beïnvloed door de creatie van extra vrij vloeistofoppervlak. [23]
- De scheepsromp moet perfect glad zijn. Elke ruwe plek door bijvoorbeeld roest of algenaangroei vermindert het effect drastisch. Dit hebben onderzoekers van de stichting FOM en de Universiteit Twente vastgesteld in 2007.

3.3.5 Toepassing op hogesnelheidsvaartuigen

3.3.5.1 Abstract

Golfweerstandstesten werden uitgevoerd in een sleeptank aan de hand van twee scheepsvormen. Een eerste had een prismatische boegvorm met een deadrise hoek³ van de romp van 10°, de tweede had een alternatieve vorm met air cavity. Beiden werden getest zonder air injectie en met air injectie op twee verschillende snelheden/debietten. [25]

De totale weerstand, trim, inzinking, hoeveelheid toevoeging van lucht, de druk van lucht in de holte en het golfpatroon veroorzaakt door de boeg werden bestudeerd en gemeten. De wrijvingsweerstand van het natte oppervlak werd berekend en vergeleken met de weerstandscomponent verkregen door de totale weerstand te verminderen met de golfweerstandcomponent.

De vermindering van de golfweerstand bij deze schepen is volop toegepast door de romp configuratie te veranderen. Zo zijn de multihulls en de luchtkussenvaartuigen ontstaan. Maar tot nog toe is er weinig gedaan om een andere grote weerstandscomponent te verminderen, namelijk de viskeuze weerstand. [25]

³ De hoek die de bodem van een schip maakt vanuit de kiel tot zijn grootste breedte.

3.3.5.2 Toepassing

Butuzov *et al.* onderzocht in 1999 de toepassing van air cavity op volgende hogesnelheidsschepen:

- Passagiersferry Linda (30 Kn, 70 passagiers)
- Landingschip Serna (30 Kn, 10 ton displacement)
- Patrouilleboot Sajgak (38 Kn, 13 ton displacement)

Er werd een weerstandsvermindering van 20 - 35% waargenomen voor planerende rompen en 15 - 30% voor semi-planerende rompen. [25]

3.3.5.3 Bouw

De luchttoevoerdruk in the holte wordt behouden door lage druk ventilatoren waarvan het verbruik 3% bedraagt van de motorkracht. [25]

3.4 Air film



Figuur 17: Schets air film

Bron: [58]

3.4.1 Inleiding

Deze techniek kan gezien worden als een combinatie van air bubbels en air cavity schepen. Een constante luchtstroom wordt geïnjecteerd naar de bodem van het schip die zorgt voor de film. De film is een tapijt/laag van luchtbelletjes die zo min mogelijk in afstand van elkaar gescheiden zijn. Dit is niet het geval bij air bubbels waar ze meer gespreid liggen.

3.4.2 Testen

De coating beïnvloedt het rendement van het systeem het meest. Dit wordt bewezen in onderstaande testen.

Fukada *et al.* vergeleek in 2000 het effect van air injectie voor verschillende objecten met verschillende soorten waterafstotende verf. Met een air film van 0,5 mm in dikte werd een weerstandsvermindering van 90% waargenomen. [23]

Shimoyama voerde testen uit op modellen met een platte bodem zonder waterafstotende verf. Zijn resultaten zijn beschreven in Kato & Kodama, 2003. Hij had moeilijkheden om een stabiele air film te verkrijgen. Men kon de air film niet stabiel krijgen doordat de vloeistof-lucht interferentie onstabiel werd. Dit zorgde ervoor dat de film brak waardoor de weerstand toenam en er zich grote bellen vormden. [23]

3.5 Vergelijking methoden

Voor alle drie de types moeten de schepen bezitten over een platte, zo effen mogelijke romp. Daarom zijn deze drie systemen het best toepasbaar bij binnenvaartschepen. De schepen die gebruik maken van air bubbels of air cavity moeten volgens sommige bronnen een minimale lengte van 225 meter hebben. Desondanks werden kleinere schepen ook uitgerust met één van deze systemen.

Air bubble lubrication kan enkel worden toegepast op nieuwbouwschepen en vraagt maar een kleine aanpassing. Air cavity kan toegepast worden op zowel nieuwbouw als oudere schepen en vraagt een grotere aanpassing van de romp.

Bij air bubble systemen spreekt men over een rendement van 5 - 15%. Bij air cavity is de grootte van het rendement afhankelijk van het scheepstype en schommelt de waarde rond de 5 - 15%. Hogesnelheidsschepen uitgerust met air cavity bereiken een rendementsverbetering tot maximaal 35%. Bij schepen uitgerust met air film is het rendement afhankelijk van de soort verf gebruikt voor de romp.

Zowel air bubbel als air cavity systemen kampen met het probleem dat de bubbels van onder de romp willen ontsnappen. Dit is vooral het probleem bij air cavity uitgeruste lage snelheidsschepen.

De reden waarom air bubbels zo attractief zijn is omdat ze geen stabiliteit vragen voor de flow van de bubbels, waar dit wel het geval is bij air cavity en air film schepen.

Een ander verschil en voordeel met air cavity is dat air bubbels minder energie vragen en over een groter oppervlak resultaat hebben. [3]

4 Sky sails



Figuur 18: Skysails

Bron: [5]

4.1 Algemeen

Het kite systeem is een relatief eenvoudig maar efficiënt systeem. Het genereert een voortstuwing aan de hand van een kite die aan de boeg van het schip is bevestigd. Het is een interessant principe omdat het geen gebruik maakt van olie, gas en andere fossiele brandstoffen maar van wind die overvloedig en gratis aanwezig is. Het is toepasbaar op bijna alle vrachtschepen en superjachten in volle zee. Het skysail systeem kan niet gebruikt worden op binnenwateren, rivieren, havens of verkeersscheidingsstelsels. [5] Het heeft zijn hoogste rendement als het schip een snelheid heeft van minder dan 16 knopen. Door deze snelheidslimiet is deze techniek enkel van toepassing op tankers (crude, product, chemical, LNG, LPG, etc.) en bulk schepen. [34]

4.2 Testen

Sky sails is een redelijk recent systeem en is voor de eerste keer getest in 2005 met een kleine kite van 40 m² op het testvaartuig “Jan Luiken”. Dit is een 15 meter lange, 18 ton zware loodsboot.



Figuur 19: Skysail op 'Jan Luiken'

Bron: [5]

In 2006 werd een tweede test uitgevoerd op een ex-bulk carrier “Beaufort” van 55 meter lengte. De gebruikte kite had een oppervlakte van 160 m².



Figuur 20: Skysail op 'Beaufort'

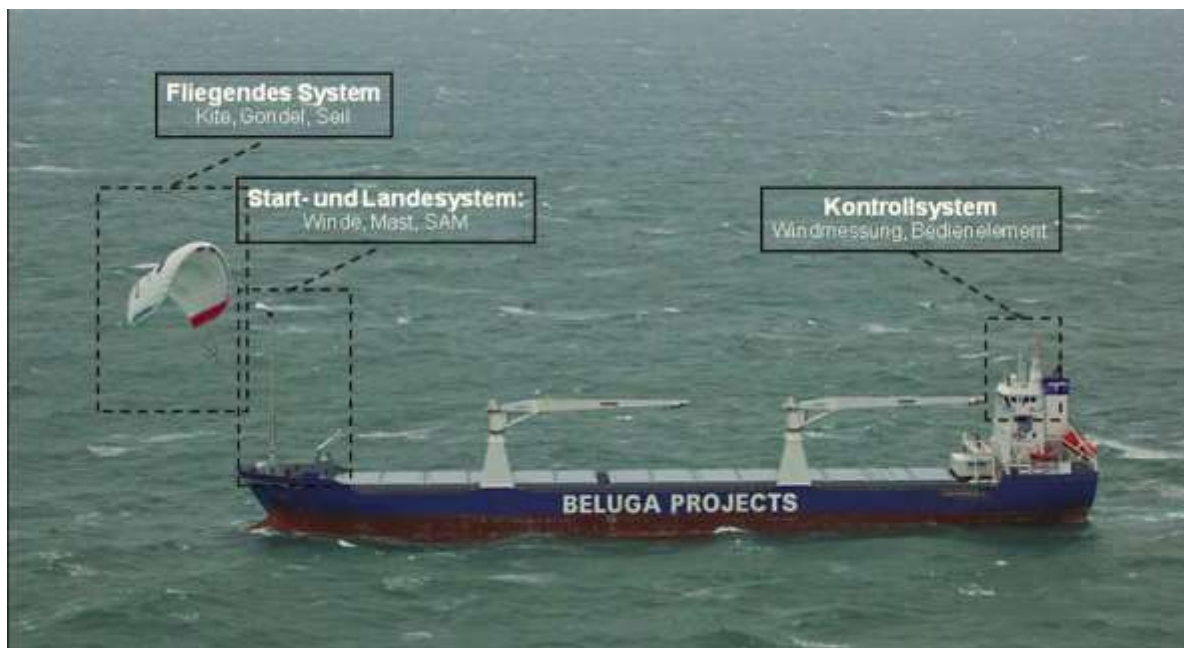
Bron: [5]

De eerste commerciële skysails werden verkocht in 2007 wat erop wijst dat dit een redelijk recente technologie is.

Bij één van de eerste testen bedroeg de effectieve trekkracht 8 ton wat neerkomt op een vermogen van 600 - 1000 kW. Bij latere testen kwam men tot een trekkracht van 32 ton. Dit

komt neer op een vermogen van 2000 - 3000 kW. Helaas is dit nog steeds te weinig om toegepast te kunnen worden in de containerscheepvaart. De nieuwste systemen zijn al een stuk interessanter voor de scheepvaart en hebben een trekkracht van 70 ton wat neerkomt op een vermogen van 7000 - 8500 kW; ter vergelijking een sleepboot heeft met eenzelfde motorvermogen dezelfde stuwkracht/trekkracht. Bij de bulkcarrier Beaufort werd een brandstofvermindering genoteerd van 5,5% op een reis van Europa naar Zuid-Amerika. [34]

4.3 Bouw



Figuur 21: Hoofdcomponenten skysail

Bron: [65]

Het kite systeem bestaat uit drie hoofddelen [34] :

- De kite met touw (minimum lengte 30 meter)
- Het lanceer- en terughaalplatform
- Het systeem voor automatische bediening

De kite met touw:

Het zeil is dubbelwandig en is gemaakt uit sterk, weerbestendig textiel. Het heeft ook longitudinale kamers en openingen aan de voorzijde voor optimaal aerodynamisch effect. Het touw is gemaakt uit moderne synthetische vezels die niet veel wegen en een lage rek hebben.

Het lanceer- en terughaalplatform:

Het lanceer- en terughaalplatform bestaat uit de automatische controle eenheid, een telescopische mast en een trektouw met takel. Het is op het dek aan de boeg geïnstalleerd. Dit is een geschikte plaats want het is één van de sterkere delen van het schip omdat de ankerlier hier ook is gevestigd waardoor er voldoende verstevigingen in de romp zijn aangebracht. Hierdoor kan het de extra spanning van de skysail aan. [5]

Het bedrijf dat gespecialiseerd is in het maken van skysails is gevestigd in Duitsland, Hamburg met bedrijfsnaam "Skysails". Het bedrijf is in 2001 opgericht door twee industrieel ingenieurs, Stephan Wrage en Thomas Meyer. Het bedrijf heeft ook een testcentrum dat gevestigd is in Wismar, aan de Duitse oostkust.

Aangezien elk schip anders gebouwd is, is het moeilijk om te weten te komen hoeveel aandrijfkracht effectief nodig is en geproduceerd wordt door een skysail. Om toch een idee te hebben van de aandrijfkracht van skysails, worden de prestaties gemeten onder standaardcondities bij normale omstandigheden. De standaardcondities zijn als volgt [5] :

- Het schip vaart met een snelheid van 10 knopen.
- De koers van het schip is 130° aan de ware wind.
- De windsnelheid bedraagt 25 knopen.
- De golfhoogte bedraagt maximaal 60 centimeter. Dit komt overeen met de zegangstoestand 2.
- De propellerefficiëntie van het schip bedraagt 60%. Deze waarde wordt als standaard genomen omdat vele scheepsschroeven amper een rendement van meer dan 60% bereiken. Dit betekent dat 40% van de voortstuwingskracht van de hoofdmotor niet wordt gebruikt voor de voortstuwing. Deze 40% gaat verloren door propellerverliezen.
- Er is geen aangroei aan de romp van het schip.
- De beladingstoestand is optimaal.

4.4 Werking



Figuur 22: Openen skysail

Bron: [65]

Het uithalen en binnenhalen van de kite gebeurt via een automatisch systeem waarvan de autopilot zich op de brug bevindt. Het brugpersoneel hoeft enkel een knop in te duwen om het te activeren. Het is dus niet nodig om extra bemanning te nemen voor het opereren van de kite.

De autopilot is verbonden met een controlesysteem die zich onder de kite bevindt. Het controlesysteem is op zich verbonden met de kite door middel van lijnen. De functie van de controle eenheid kan vergeleken worden met die van paragliding. Het gaat ervoor zorgen dat de stuurlijnen links of rechts meer opgespannen worden om zo de kite te kunnen besturen in de lucht. Het controlesysteem bepaalt ook waar de kite het best kan opereren in de lucht.



Figuur 23: Controlesysteem skysail

Bron: [65]

De geploide kite met controle eenheid wordt naar buiten gebracht door middel van een telescopische mast die in een opslaghouder opgeborgen zit. Vanaf dat deze telescopische mast een zekere hoogte heeft bereikt ontvouwt de kite zich tot zijn normale grootte door middel van de wind. Hierna wordt de kite losgelaten van het lanceer- en herstelplatform. De kite is vrij beweegbaar verbonden met het lanceer- en herstelplatform door slechts een punt waarna hij stijgt tot op een hoogte van 100 tot 300 meter. Hier maakt hij een dynamisch pad in de lucht, gestuurd door de automatische piloot.

Het terughalen van de kite gebeurt op dezelfde manier maar in omgekeerde volgorde. Het loslaten en terughalen van de kite duurt ongeveer 10 - 20 minuten. De software houdt rekening met de route, de eisen van de rederij, de huidige weersvoorspelling en de reisroute. Het zorgt er ook voor dat hij gebruik maakt van de meest gunstige wind. [5] [34]

4.5 Werkingsomstandigheden

Skysails zijn ontworpen om te kunnen werken in wind met snelheden van 3 tot 8 beaufort. Zowel bij windsnelheden van 3 beaufort of 10 beaufort is het mogelijk om de kite op te bergen.

Windkracht in Beaufort	Windsnelheid		
	Km/h	m/s	kn
0	0-1	0-0,2	0-1
1	1-5	0,3-1,5	1-3
2	6-11	1,6-3,3	4-6
3	12-19	3,4-5,4	7-10
4	20-28	5,5-7,9	11-16
5	29-38	8,0-10,7	17-21
6	39-49	10,8-13,8	22-27
7	50-61	13,9-17,1	28-33
8	62-74	17,2-20,7	34-40
9	75-88	20,8-24,4	41-47
10	89-102	24,5-28,4	48-55
11	103-117	28,5-32,6	56-63
12	>117	>32,7	>63

Tabel 6: Beaufortschaal voor skysails

Bron: [66]

4.6 Voordelen

4.6.1 Hoog aandrijfvermogen

Wanneer men de skysail vergelijkt met een schip dat voortgestuwd wordt met zeilen ziet men dat een skysail per vierkante meter een aanzienlijk hoger voortstuwingsvermogen levert. Dit komt omdat een kite meer technische mogelijkheden heeft omdat er meer ruimte zit tussen het schip en de kite.

Bijvoorbeeld: Een zeilschip "Sea Cloud" van 109 meter heeft een zeiloppervlakte van 3000 m² in totaal. Een vrachtschip met de zelfde lengte heeft om hetzelfde rendement te verkrijgen een kite nodig van 500 – 800 m². Dit is een forse besparing in kosten aan zeiloppervlak.

De kite werkt op een hoogte van 100 tot 300 meter. Op deze hoogte zijn de winden sterker, meer stabiel en heeft dit systeem zijn optimale effect. De windsnelheid op een hoogte van 100 meter is 10 - 20% hoger dan deze op 10 meter hoogte. Dit komt door het ontbreken van de wrijving met het water en de grond. Een verhoging van 15% in de windsnelheid levert 30% meer trekkracht.



Figuur 24: Vlieghoogte skysails

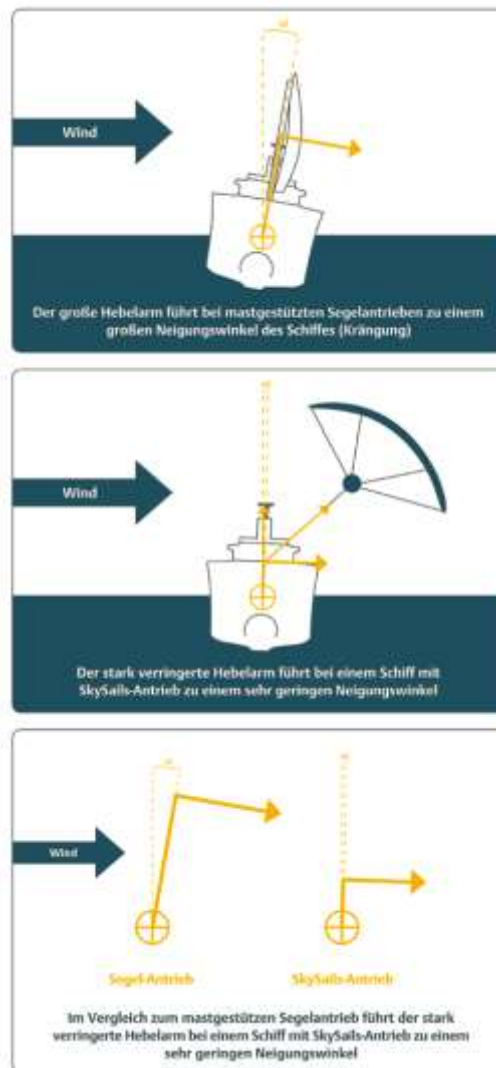
Bron: [5]

De kite blijft niet stationair hangen in de lucht. De automatische pilot zorgt ervoor dat de kite dynamische beweegt in de lucht, bijvoorbeeld een 8 vormig pad. Door hem dynamisch te laten bewegen neemt de windsnelheid over de kite toe en daarmee ook de liftkracht, dus nog meer trekkracht.

Bijvoorbeeld: Als je een starre vlucht met windsnelheid 11,5 m/s vergelijkt met de dynamische vlucht waar de snelheid van de luchtstroom als gevolg toeneemt tot 20 m/s, neemt de liftkracht toe met een factor 2,68 - dus om en bij het drievoudige. [5]

4.6.2 Minimale heel

Bij het gebruik van de skysail wordt de hefboomkracht verkleind doordat deze kracht aangrijpt op het dek. Dit levert wel grote spanningen maar zoals eerder beschreven is de boeg hiervoor verstevigd. Bij zeilschepen neemt de kracht hoger aan waardoor de hefboom veel groter is en men dus een grotere inclinatie ervaart. Skysails zijn dus veiliger en maritieme operaties kunnen beter uitgevoerd worden. [5]



Figuur 25: Helling skysail

Bron: [5]

4.6.3 Betere zeevang

De skysail werkt als een schokdemper waardoor het schip soepeler snijdt in de golven. Dit effect heeft men niet bij zeilschepen. [5]

4.6.4 Dynamische krachtcontrole

De automatische piloot zorgt ervoor dat de skysail dynamisch beweegt in de lucht maar meet tegelijkertijd welke kracht er op de kite wordt uitgeoefend. Als deze kracht te groot is door een plotselinge sterke wind dan gaat de automatische piloot ervoor zorgen dat de kite zich naar een neutrale positie begeeft in enkele seconden tijd (30 seconden). De neutrale positie is de zenit van het schip, het punt loodrecht boven het schip. In deze stand gaat de

kite kleine krachten uitoefenen op het schip. De kite kan zo ook veilig geland worden op het schip zonder al te grote moeilijkheden. Ook registreert de automatische piloot of er te weinig wind, te weinig kracht op de trekkabel komt. Als dit het geval is dan wordt de kite automatisch ingetrokken. Het is dus een extra veiligheid bovenop het weerroutesysteem als de weersomstandigheden niet voldoende kunnen worden voorspeld of niet bereikbaar zijn. [5]

4.6.5 Weinig ruimte

Skysails zijn gemakkelijk op te bergen zonder al te veel plaats in te nemen. Zeilschepen daarentegen moeten beschikken over een volledige vaste bovenbouw waardoor laad en los operaties moeizamer verlopen en men het nadeel heeft dat men niet onder laag hangende kabels of bruggen kan varen. [5]

4.6.6 Noodoplossing

Als de hoofdmotor het laat afweten kunnen skysails in vele gevallen een noodoplossing bieden. [5]

4.7 Nadelen

- Men kan het systeem niet gebruiken op reizen met tegenwind. Men moet steeds een koers van minimaal 50° volgen t.o.v. de wind. Men kan zover in de wind door de speciale aerodynamische vorm van de vleugels. [5]



Figuur 26: Optimale windrichting skysail

Bron: [5]

- Een ander nadeel is dat de skysails niet gebruikt kunnen worden in verkeersscheidingsstelsel vanwege veiligheidsredenen. De skysails van een vaartuig kan vast te komen zitten in dat van een ander.
- Men kan het ook niet gebruiken bij windsnelheden lager dan 3 beaufort.

4.8 Wetgeving

4.8.1 Internationaal aanvaringsreglement van de scheepvaart

Skysails zijn onderhevig aan deel A voorschrift 3 C).

Deze zegt: *“Betekent het woord "zeilvaartuig" elk vaartuig dat onder zeil is mits de voortstuwingsmachines, indien aangebracht, niet worden gebruikt.”*

Een vaartuig dat dus op motor vaart en gebruik maakt van skysails om vaart door het water te maken wordt dus beschouwd als een zeilvaartuig onder motor. Hierdoor gelden dezelfde regels al voor werktuigelijk voortbewogen vaartuigen onder motor. Er kan aan alle manoeuvres en regels voor uitwijking en het vermijden van aanvaringen voldaan worden. Temeer zodra de kite door een simpele druk op een knop in zijn neutrale positie komt. De kite oefent dan geen enkele kracht meer uit waardoor het schip zich gedraagt als een normaal schip. [5]

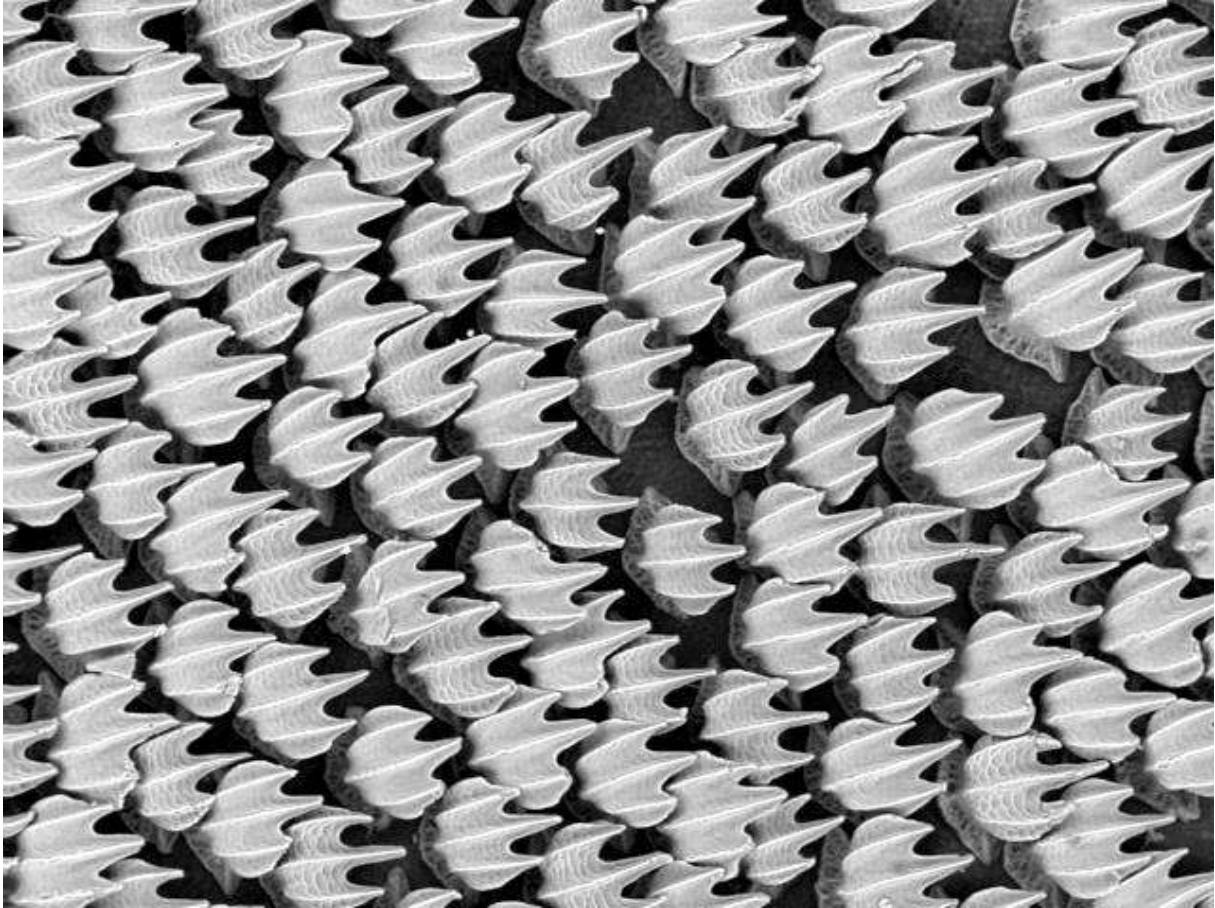
4.8.2 IMO

Schepen die zijn uitgerust met kites moeten voldoen aan de IMO resolutie A.749 (18): “Code on intact stability for all types of ships covered by IMO structures”. Daarom wordt de invloed van de skysail op de dwarsscheepse stabiliteit getest voor elk schip. Schepen met skysails ondervinden geen probleem bij het naleven van deze regels. De plaats waar de skysail aan het schip is bevestigd moet voldoende versterkt zijn maar meestal voldoet deze aan de voorschriften. [5]

4.8.3 Arbeidsveiligheid

Alle componenten gebruikt voor de skysail moeten in overeenstemming zijn met de toepasselijke regelgeving ter voorkoming van ongevallen. Bij het inhalen of loslaten van de kite moet er voldoende afstand bewaard worden door de crew om niet in contact te komen met bewegende delen. [5]

5 Dermal denticles



Figuur 27: Dermal denticles microscopisch

Bron : [37]

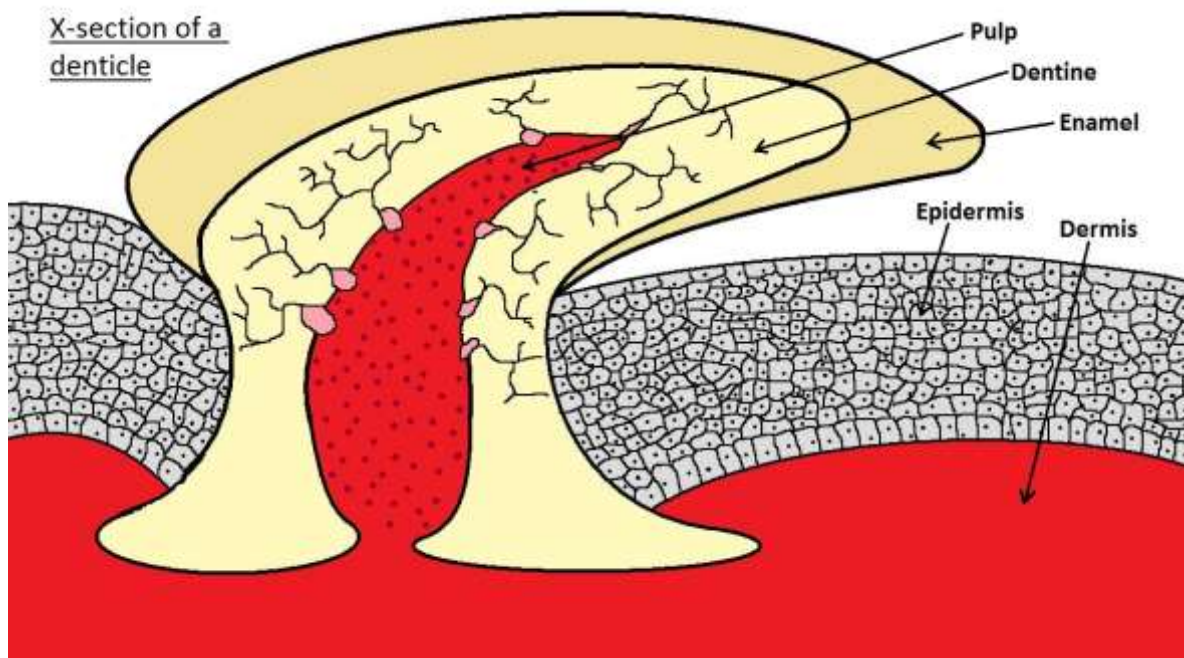
5.1 Inleiding

In de natuur vindt men heel wat structuren en oppervlakten waarvan men de eigenschappen kan gebruiken in commerciële toepassingen. Door het bestuderen en het verstaan van deze natuurlijke structuren kan men ze namaken en optimaliseren. De natuur heeft er voor gezorgd dat Gekko's ondersteboven aan muren kunnen hangen om prooien te vangen, dat Kameleons zich aan de omgevingskleur kunnen aanpassen maar ze heeft er ook voor gezorgd dat bepaalde waterroofdieren hun huid zo hebben ontwikkeld dat ze een minimaal effect van weerstand ondervinden. Eén van deze speciale eigenschappen waarover de natuur 400 miljoen jaar heeft over gedaan om te evolveren en te optimaliseren is de

haaienhuid. De huid van een haai bestaat uit kleine schubben ook wel 'dermal denticles' genoemd die mee liggen met de stroming. Doordat de huid uit deze schubben is opgebouwd ondervindt de haai minder weerstand door het water. Uit het namaken van deze structuren door wetenschappers bleek er een wrijvingsvermindering plaats te vinden van rond de 10%. [9] In dit hoofdstuk zal er onder andere aandacht besteed worden aan de proeven die we zelf zullen ondernemen. Bij de proeven werden dermal denticles geprint met een 3D printer en vervolgens getest op wrijvingsweerstand door ze via een bepaalde constructie door het water te slepen. Deze testen met dermal denticles worden hierbij gecombineerd met air bubble lubrication. Om een beter inzicht te verkrijgen in het constructieproces en de eigenschappen van deze denticles, wordt er gelijdelijk aan in het hoofdstuk opgebouwd. We beginnen met de eigenschappen (vorm, grootte, etc.) van denticles uit te leggen waarna de constructie voor de proef wordt verduidelijkt om tot slot te eindigen met de proef en haar resultaten.

5.2 Wat

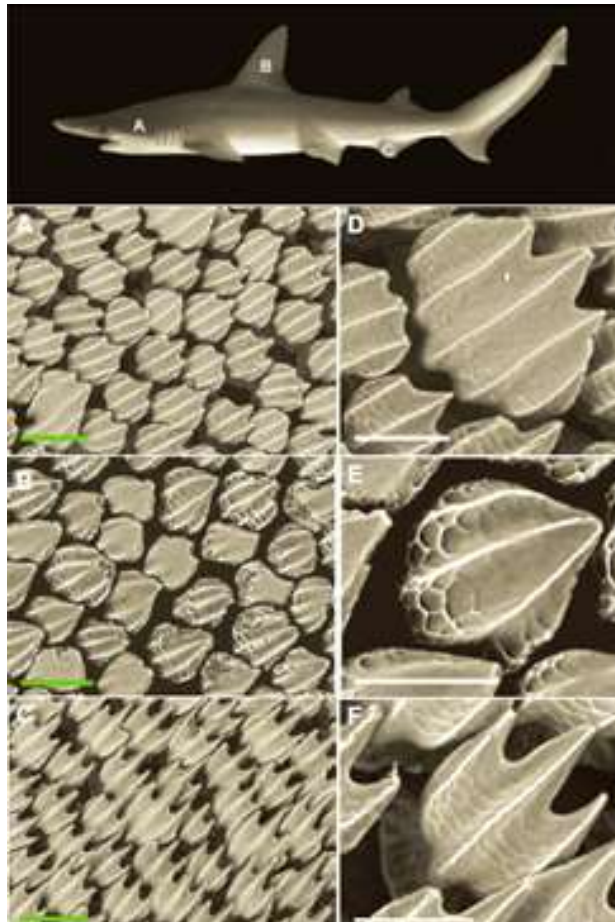
Dermal denticles of “placoid scales” of “tiny skin teeth” zijn taaie schubben die de huid van kraakbeenvissen (haaien en roggen) dekken. Het zijn erg gemodificeerde tanden die bestaan uit een kern van bindweefsel, bloedvaten en zenuwen. Deze kern wordt bedekt door een laag van tandbeen met hierop een harde glazuurachtige vitrodentine. Deze structuren zijn heel dicht op elkaar gepakt en bestaan uit toppen die allemaal in dezelfde richting naar achter groeien. Dit geeft de huid een ruw gevoel als je je vinger beweegt in één richting en een glad gevoel in de andere. [32]



Figuur 28: Biologische voorstelling dermal denticle

Bron: [49]

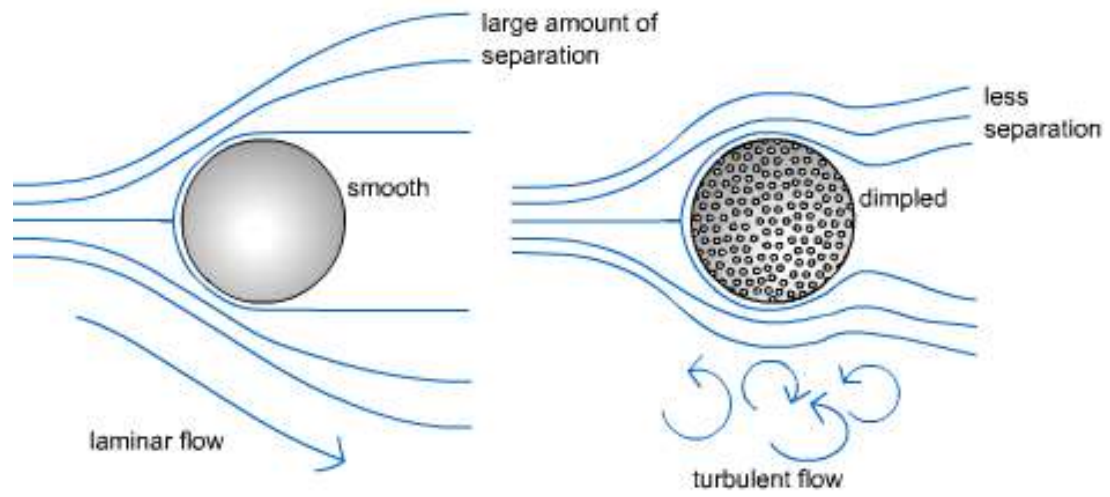
Dermal denticles stoppen met groeien vanaf ze een bepaalde grootte bereikt hebben (zie hoofdstuk 5.7). [32] De vorm en grootte van de dermal denticles verschilt tussen de verschillende klasse van haaien en zelfs van de plaats op een haai. Bij trage haaien bestaat de huid ook uit microschrubben maar deze zijn anders gevormd dan deze van hun snellere aanverwanten. De invloed van wrijvingsvermindering van hun schrubben is ook veel kleiner. [9]



Figuur 29: Verschil in vorm van dermal denticle

Bron: [9]

Dermal denticles hebben twee functies. Enerzijds bieden ze bescherming tegen andere roofdieren, anderzijds hebben ze een hydrodynamische functie. De hydrodynamische functie werkt net zoals de indeukingen in een golfbal. Ze zorgen voor een weerstandsvermindering door turbulentie te creëren. [2] Hieruit blijkt dus dat een laminaire stroming niet altijd de beste manier is om weerstand te verminderen. Scheepsrompen worden vaak zo glad mogelijk gemaakt om een zo effen mogelijke laminaire stroming te verkrijgen maar er zou ook voordeel kunnen gehaald worden uit een gecontroleerde turbulente stroming. Deze laatste stroming wordt verkregen door het gebruik van dermal denticles.

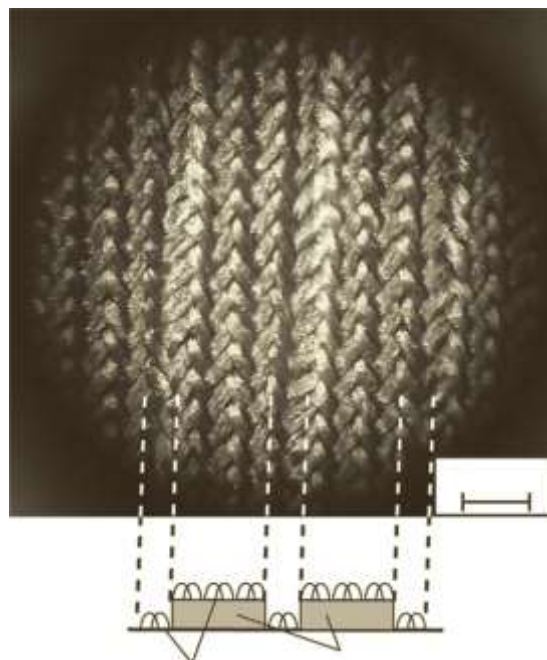


Figuur 30: Voorstelling weerstand op golfbal

Bron: [55]

5.3 Toepassing in de sport

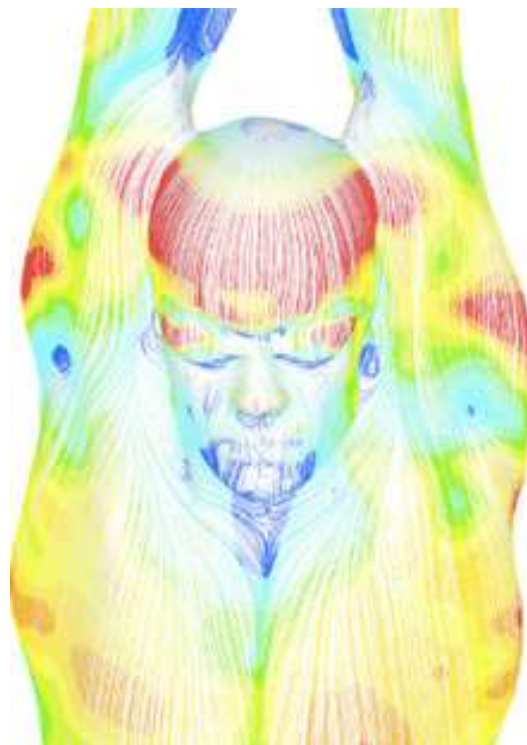
Een sport waar de eigenschappen van dermal denticles worden gebruikt is zwemmen. Speedo, een bedrijf dat zwemkleding produceert, maakt bij enkele van zijn producten (o.a. Fastskin) gebruik van de structuur van de haaienhuid (dermal denticles) om zijn zwemkleding te optimaliseren. De dermal denticle vorm zelf wordt niet gebruikt maar het concept van turbulentie wordt gekopieerd. Het gebruik van deze structuur op hun zwempakken zorgde ervoor dat Michael Phelps 8 medailles wist te behalen op het Olympische spelen van 2004 en dat 18 van de 26 olympische records konden verbroken worden. Het testen van deze zwempakken gaf aan dat er 4% minder weerstand is dan zwempakken zonder de eigenschappen van dermal denticles. Later, door verdere ontwikkelingen werd een winst van 10% bekomen. Fastskin verkrijgt dit rendement door de speciale structuur van de gewoven draden. Ze worden zo gewoven dat kleine en grote ribbels gevormd worden met kleine groeven op hun top, net zoals bij de denticles. De grote ribbels worden bekomen door een microgewoven patroon, de kleine ribbels door het individueel weven van draad met de grote ribbels mee. Deze structuur wordt gemaakt via speciale machines waarvan Speedo zegt dat er maar 6 van bestaan in de wereld. [53]



Figuur 31: Speedo weefstructuur

Bron: [9]

Om de best mogelijke plaats te vinden waarop de structuren op het zwempak bevestigd konden worden contacteerde Speedo het bedrijf, CyberFX. Deze is bekend in Hollywood voor het maken van virtuele special effect lichamen. 3D lichamen van zwemmers in bepaalde zwemposities werden virtueel gemaakt en werden gebruikt om Computational Fluid Dynamics (CFD) op uit te voeren. CFD laat toe om wiskundig een waterstroom over het virtuele lichaam te laten stromen zodat men de weerstand kon bestuderen en wist welke de beste plaatsen waren om de structuur aan te brengen. CFD staat bekend om zijn grote nauwkeurigheid en wordt onder andere ook gebruikt bij aerodynamica in de formule 1 autosport. [53]



Figuur 32: CFD-scan

Bron: [53]

5.4 Testen

In wat volgt bekijken we de testen die zijn uitgevoerd door G. Lauder *et al.* aan het Harvard University. Omdat dhr. G. Lauder uitvoerig getest heeft met dermal denticles en hierdoor jarenlang ervaring heeft ga ik mij in het praktische gedeelte van deze thesis richten tot zijn beste methodes van testen. Ik neem enkel zijn methode van werken over, de verschillende oppervlakken zal ik zelf reconstrueren en testen. Dit ga ik dan in combinatie brengen met air bubble lubrication wat volstrekt nieuw is.

Bij de testen van dhr. G. Lauder werd gebruik gemaakt van een micro-CT scan van de huid van een kortvinmakreelhaai. Deze scan wordt hierna gebruikt door een 3D printer voor het maken van de denticles. Zo bekomt hij zeer nauwkeurig de exacte dermal denticles met een optimale vortex. Duizenden stijve synthetische denticles worden dan lineair op een rij geplaatst op een flexibel membraan. Het testen in het water gebeurt door middel van een bewegende robot arm die door heen en weer te bewegen voor een zelf genererende snelheid zorgt. [64]

Men testte onder andere een echte haaienhuid, een silicone met richels die op dezelfde afstand van elkaar liggen en het Speedo zwempak bevestigd op een vaste plaat met flexibele dermal denticles. Uit de testen bleek dat Speedo zwempak geen verhoging in snelheid opleverde. Er werd wel resultaat geboekt met de ribbelstructuur die voor 7,2% verhoging in snelheid zorgde en met de flexibele haaienhuid die zorgde voor een winst van 8,3 - 12,3%. [38] [64] Deze resultaten werden verkregen bij lagere snelheden (0,25 m/s tanksnelheid en een Reynolds nummer van 25000). Bij hogere snelheden vergrootte de weerstand terug. Door gebruik te maken van een Digital Particle Image Velocimetry (DPIV) die de stroom detecteert werd ontdekt dat het zuigeffect verbeterde door gebruik te maken van dermal denticles. Dit lijkt ertoe dat de snelheid verhoogt en weerstand vermindert. [38]

Er is al een dikke 30 jaar onderzoek verricht naar dermal denticles. Door de technologische ontwikkeling is het de laatste jaren beter mogelijk om testen nauwkeuriger uit te voeren en om dermal denticles te reconstrueren. Zo werd in 1997 door Bechert *et al.*, de eerste beste resultaten bekomen door experimenten met een zelf, soepel, aanpasbaar oppervlak met overlangse ribben en geulen en een groefdiepte half zo groot als de ribbel laterale afstand.

Een weerstandsvermindering van 9,9% werd hier waargenomen. Ook in 2008 werd opnieuw bewezen dat een vlakke silicone laag op een vaste plaat meer weerstand opwekt dan een silicone laag met dermal denticles op een vaste plaat. Deze laatste had een rendement van 5,2 - 8,3%. Oudere hydrodynamische experimenten maakten gebruik van stijve, gesimplificeerde denticles die op een vlakke plaat werden bevestigd en die niet mee bewogen met de stroming. Dit is tegenstrijdig met de bewegende denticles die men vindt op een haaienhuid. Uit deze testen met niet soepele dermal denticles werd een rendement van slechts 3% bekomen. De stijfheid van de denticle heeft dus een dramatisch effect op de kwaliteit van de voortstuwing. Hierbij is rekening gehouden tijdens het praktisch onderzoek van deze thesis. We kunnen daarom beter het membraan waarin de dermal denticles zich bevinden, maken in een soepele silicone. [38]

Om de weerstandsvermindering van een gemodificeerd oppervlak zoals een oppervlak met dermal denticles te onderzoeken, is het belangrijk dat we rekening houden met volgende aspecten. [38]

1. Uit de verschillende onafhankelijke testen uitgevoerd door wetenschappers kunnen we besluiten dat een soepel membraan belangrijk is om een zo groot mogelijk rendement te verkrijgen.
2. Het gebruik van zelf voortstuwende bevestigingsoppervlakken waar weerstand en voortstuwing in evenwicht zijn.
3. Betrouwbare en nauwkeurige meettoestellen zodat verschillen tussen verscheidene oppervlakken waargenomen kunnen worden.
4. Verschillende oppervlaktestructuren zodat de hypothese bewezen kan worden dat de weerstandsvermindering en snelheidsvermeerdering enkel te wijten is aan het soort oppervlak.

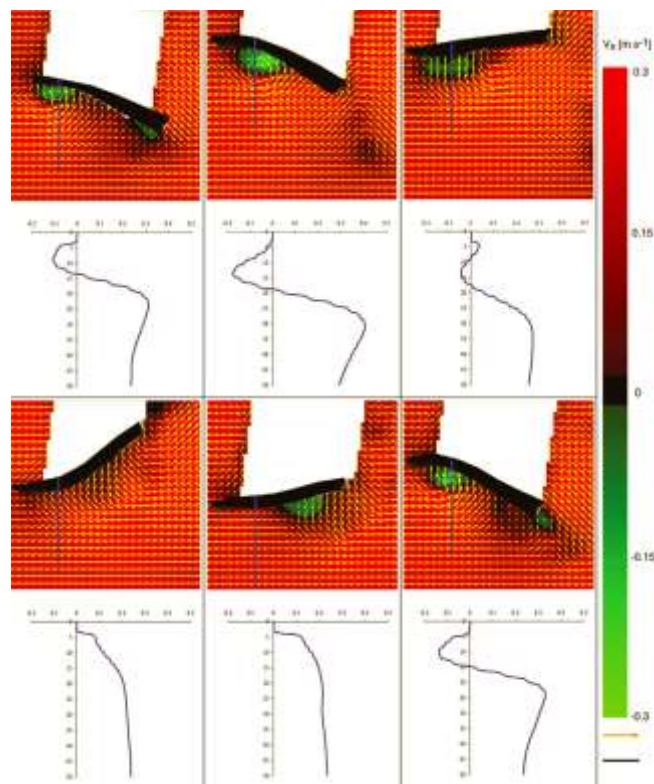
Hoofdvraag: *'Dermal denticles zorgen voor een weerstandsvermindering van ongeveer 8 à 10%, air bubble lubrication zorgt voor een weerstandsvermindering van ongeveer 15%. Zorgt de combinatie van beide systemen dan voor een grotere weerstandsvermindering of heeft deze combinatie een tegengesteld effect?'*

In deze scriptie voeren we testen uit met:

- Een vlakke plaat. Met en zonder air bubble lubrication.
- Een plaat met dermal denticles. Met en zonder air bubble lubrication.
- Een plaat met zaagtandstructuur. Met en zonder air bubble lubrication.

5.5 Dynamische beweging van de denticle

Dermal denticles gaan zich dynamisch bewegen wanneer ze een snelheid door het water hebben. In figuur 33 is de beweging van een dermal denticle zichtbaar wanneer deze door het water beweegt aan een snelheid van 0,2 m/s. [38] De momentopnamen vinden elke 100 ms plaats. Een cyclus start en eindigt op 0 ms en 500 ms respectievelijk. De gele pijlen stellend de snelheidsvectoren voor. De kleuren geven de snelheid weer waarbij rood het water beweegt met de stroom mee is en groen tegen de stroom in. De witte zone zijn de zones die niet gedetecteerd konden worden. Het zijn de schaduwzones van het meettoestel.



Figuur 33: Soepele beweging dermal denticle

Bron: [38]

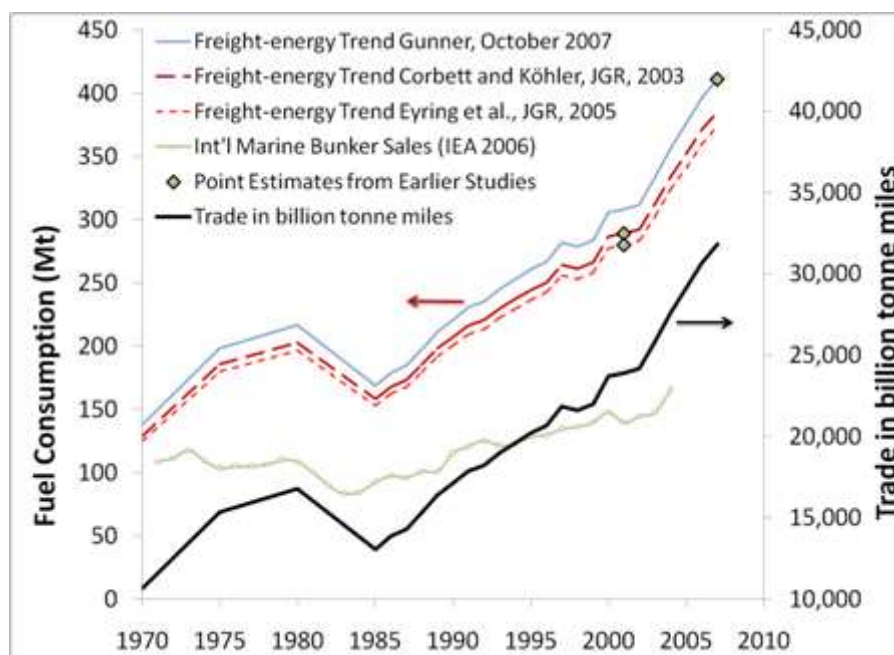
Er is een verschil in stroming op te merken doorheen een bepaalde tijd over een flexibel opgestelde dermal denticle. Het is duidelijk te zien dat de groene zones zich steeds aan de uiteinden voordoen. De groene zones zijn de zones waar de vortexen volledig ontwikkeld zijn. Een vortex is een regio die gekenmerkt is door een lage druk met zijn minimum druk in de kern van de vortex. Deze vortexen zullen de zuigkracht aan het oppervlak beïnvloeden. Een vortex zal ervoor zorgen dat de dermal denticle zijn typisch dynamische beweging krijgt. Door de lage druk aan één van de uiteinden zal het de denticle aan dit uiteinde naar beneden trekken en de andere zijde naar boven duwen waarna ook aan deze kant een lage druk zal ontstaan en een tegenovergestelde beweging gevormd wordt. Hoe lager de druk van de vortex hoe extremer de beweging. Doordat de beweging van het water op die plaatsen in tegengestelde richting loopt, dus mee met de vaarrichting, zal het zorgen voor een stuwende kracht. Dermal denticles verminderen dus niet alleen de weerstand maar zorgen ook voor een bepaalde stuwkracht. Het is vandaar belangrijk tijdens het onderzoek om de stuwkracht zo groot mogelijk te krijgen en niet enkel te concentreren op de weerstandsvermindering. In de literatuur wordt vaak verwezen naar de vermindering van de weerstand maar in feite moet men zich meer op de stuwkracht richten. Vortexen kunnen waargenomen worden door middel van een kleurstof of digitaal door Digital Particle Image Velocimetry (DPIV) data.

Een nadeel van het gebruik van het concept dermal denticles op de romp van een schip is dat deze, in tegenstelling tot haaien, geen vettige secretie afkomstig uit de huid van de haai loslaten. [14] Dit zorgt ervoor dat er zich aangroei zou kunnen vormen op de flexibel opgestelde denticles waardoor deze niet meer flexibel zullen bewegen en het concept zijn rendement verliest. De vraag is of ze toch hun flexibele eigenschap kunnen behouden ondanks aangroei en/of er siliconen zijn die aangroei afstoten? Een andere oplossing zou kunnen zijn om de silicone laag in de haven weg te nemen, te reinigen en terug te plaatsen binnen de laad en lostijd van het schip. In het hoofdstuk 5.6 wordt uitgelegd hoe en waarom organismen de neiging hebben om zich aan het oppervlak van een schip vast te hechten en of er een verschil in aanhechting van fouling bestaat op een effen en oneffen oppervlak.

5.6 Fouling

Biofouling is de aangroei van biologisch materiaal zoals algen, mosselen, etc. op een onderwateroppervlak. De aanhechting van deze organismen zorgt ervoor dat de wrijvingsweerstand toeneemt wat resulteert in extra brandstofverbruik en vermindering in voortstuwingsnelheid. Om deze organismen te verwijderen moet een schip naar een droogdok. Droogdokken brengt een grote economische kost met zich mee voor de rederij, ook is het schip op dat moment offhire. [46]

In 2007 werd een onderzoek gedaan naar het totale jaarlijkse verbruik van alle schepen ter wereld. Het resultaat was verbluffend, er werd toen ongeveer 350 miljoen metrische ton aan brandstof geconsumeerd. Een voorspelling van over de 400 miljoen ton voor 2012 werd geschat. IMO schatte in 2009 dat efficiënte antifouling een jaarlijkse brandstofbesparing oplevert van \$60 miljard. Figuur 34 laat enkele gegevens zien. [57]



Figuur 34: Wereldwijd jaarlijks crude oil verbruik in de scheepvaart

Bron: [57]

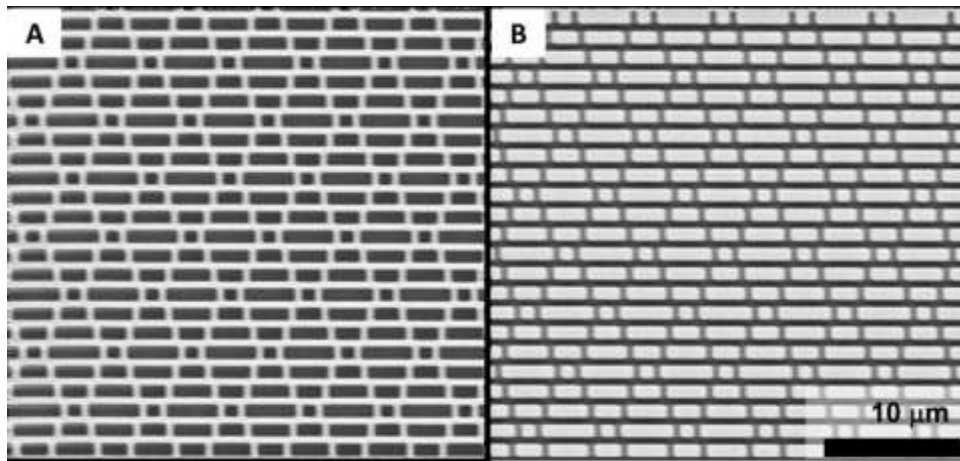
Het is dus belangrijk om biofouling te vermijden. Dit kan op verschillende manieren. De meest gebruikte manier momenteel is het gebruik van antifouling coatings. Oude coatings waren zeer toxisch en werden uit de verkoop genomen en vervangen door minder toxische. Biomimetica is de wetenschap die zich na het verbieden van deze toxische coatings onder

andere richt op het zoeken van niet toxische natuurlijke bio-antifouling. Hiervoor bestuderen ze de structuur en functies van biologische systemen. Het doel is om een efficiënte natuurvriendelijke manier te vinden die ervoor zorgt dat schepen minder brandstof moeten verbruiken en die kosten bespaart voor de rederij. Er worden vooral veel studies gedaan naar de topografie van natuurlijke mechanismen. Veel natuurlijke mechanismen hebben de topografie van hun huid zo ontwikkeld dat ze organismen afstoten. Uit studies blijkt dat een kleine verandering in de oppervlakteruwheid, grote veranderingen kan teweegbrengen in capillaire krachten en daarmee ook de weerstand. Hoe kleiner de schaal van een object hoe meer invloed van de capillaire krachten. Het is ook duidelijk dat microreplica's zelden even effectief zijn als deze op het organisme. [46]

Een spore⁴ [52] heeft moeilijkheden om zich te bevestigen op een huid wanneer de topografie van die huid zich op een kleinere afstand van elkaar bevindt dan de grootte van de spore en wanneer de topografie het gewicht van een spore niet kan dragen. (Carman *et al.* 2006; Schumacher *et al.* 2007b). Door de kleine openingen tussen de topografie is er sprake van verzwakking in adhesie in de niet ondersteunende celmembranen van sporen. Uit testen op zo een topografie bleek dat de *Ulva intestinalis*, een alg, moeilijkheden had om zich vast te klampen. De verankering van deze alg werd verminderd met 86% in vergelijking met een effen plaat zonder topografie. Dermal denticles hebben een kleine oppervlakte en staan lichtjes van elkaar. Het zou dus mogelijk kunnen zijn dat er hierdoor minder aangroei aan de romp ontstaat. Een studie waarin de optimale grootte en afstand getest wordt, kan hieraan besteed worden en meer duidelijkheid geven. [46]

In verscheidene publicaties van Schumacher *et al.* werd getest met het Sharklet AF™ design. Een voorbeeld hiervan kan gevonden worden in figuur 35. De ribbels waren 2 μm hoog met een lengte van 4, 8, 12 en 16 μm . Ook hij kwam tot het resultaat dat er zich in vergelijking met een vlak oppervlak minder *Ulva* linza sporen vestigden op het design. [60]

⁴ Een eencellig organisme geproduceerd door algen, zee varens, etc. dat tot een nieuw organisme kan groeien.

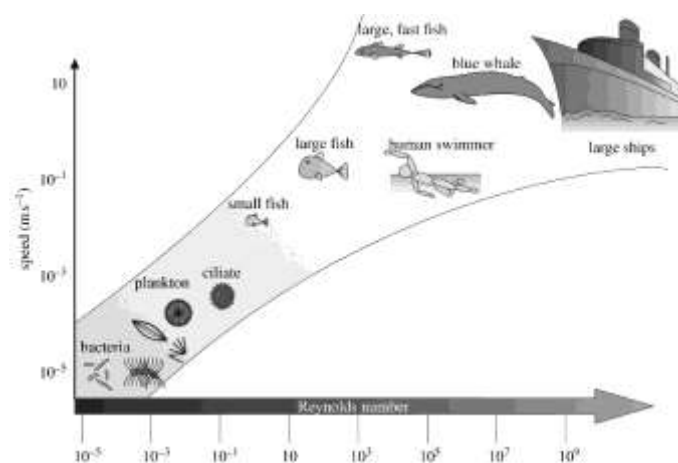


Figuur 35: Scarlet AF design

Bron: [60]

Topografieën gemaakt uit silicone rubber zijn over het algemeen enkel succesvol wanneer de snelheid van het schip meer bedraagt dat 20 knopen. Aangezien koopvaardijsschepen aan een lagere snelheid varen is het effect dus minder merkbaar. [46]

Figuur 36 laat zien dat de stromingssnelheid een grote impact heeft op het Reynoldsgetal. Kleine organismen hebben duidelijk meer last van viskeuze krachten dan inertiaële krachten. Deze viskeuze krachten beïnvloeden bijna volledig het vestigingsproces van de organismen wat het organisme toelaat om een gepast bevestigingsoppervlak te zoeken zoals en schip. Schepen echter hebben grote Reynoldsgetallen in de orde van $10^3 - 10^9$. Het is een uitdaging voor de biomimetica om natuurlijke systemen zoals dermal denticles na te maken en ervoor te zorgen dat het Reynoldsgetal hierbij zo klein mogelijk blijft. [46]



Figuur 36: Visuele voorstelling Reynolds schaal

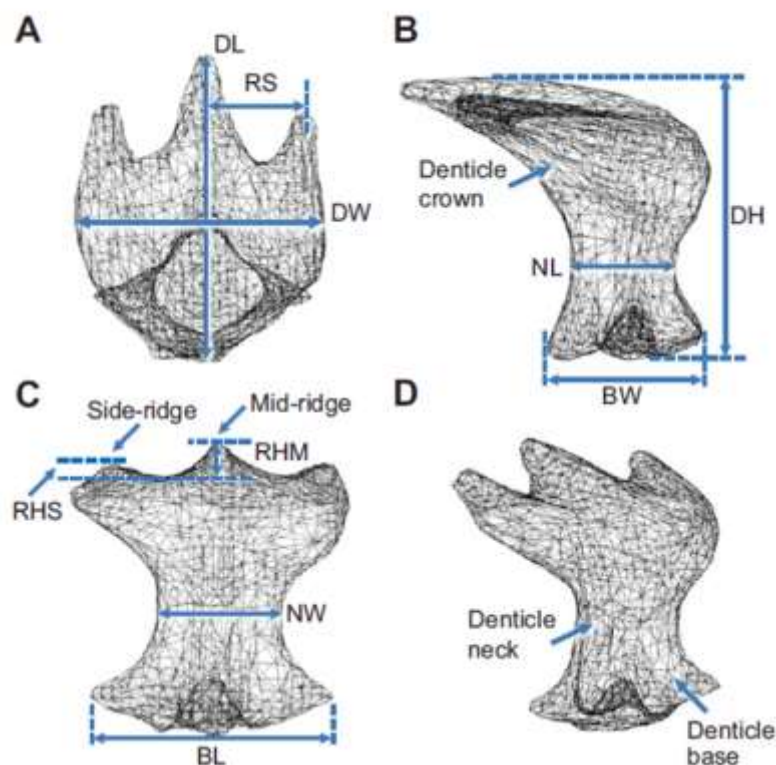
Bron: [46]

5.7 Grootte en vorm

De grootte van een dermal denticle is belangrijk voor een juist onderzoek in deze thesis. Hoofdstuk 5.7 wordt onderverdeeld in 3 delen: de grootte van de denticles zoals men ze vindt op een echte haai, de grootte van de denticles van dhr. Lauder en de grootte die wordt gebruikt voor de testen in deze scriptie. Bij de berekening van de schaalgrootte gaat men gebruik maken van Froude zoals eerder besproken.

5.7.1 De ware grootte op de haai

De dermal denticles verschillen in afmetingen en vorm op een haaienhuid. Wel bestaan de meeste dermal denticles uit 3 ruggen. Deze ruggen bevinden zich bovenaan de denticle en geleiden het water. Gemiddelde afmetingen zullen gebruikt moeten worden. G. Lauder *et al.* heeft door middel van een Environmental Scanning Electron Microscope (ESEM) foto's kunnen nemen van dermal denticles zoals men ze vindt op een haai. ESEM maakt gebruik van vacuüm omdat men zo foto's kan nemen aan hogere resolutie. [38]



Figuur 37: Dimensies dermal denticle

Bron: [64]

Figuur 37 laat de micro-CT scan zien van 1 dermal denticle die werd gescand op 10 cm onder de rugvin van een makreelhaai (*Isurus oxyrinchus*). De afmetingen zijn weergegeven in tabel 7.

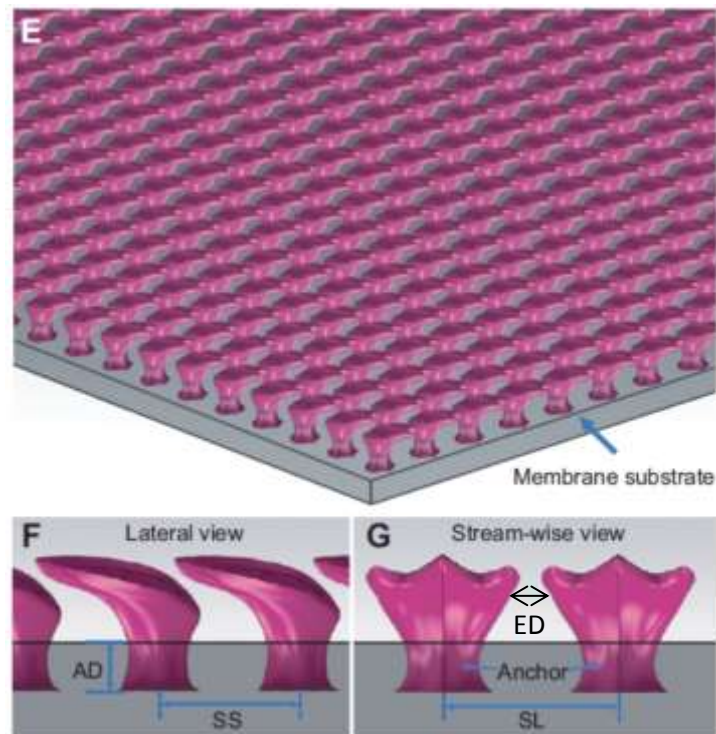
A [μm]	B [μm]	C [μm]	
DL = 151	DH = 113	NW = 51	RHM/RS = 0,41
DW = 125	BW = 119	BL = 84	RHS/RS = 0,21
RS = 51	NL = 45	RHM = 21	
		RHS = 11	

Tabel 7: Dimensies dermal denticle op ware grootte

Bron: [64]

5.7.2 De grootte bij dhr. Lauder

De afmetingen van de denticles van een echte haai zijn te klein om met een 3D printer te reconstrueren. Het zou kunnen geprint worden maar hiervoor heb je 3D printers nodig die met poeder en lasers werken en waaraan een groot prijskaartje hangt. Daarom werden ze vergroot tot een lengte van 1,5 mm en lineair geplaatst op een flexibel membraan. Een vergroting van 10 van de originele afmetingen werd toegepast. Alle andere denticles zijn gebaseerd op deze denticle. Voor de constructie werd gebruik gemaakt van het computer programma Solid Works. Het membraan werd flexibel geprint met een Young modulus van 1 MPa, zeer flexibel, de dermal denticle zelf bestond uit een harder materiaal en was stijf met een Young modulus van 1 GPa. Figuur 38 laat zien hoe de constructie er uiteindelijk uitziet. [64]



Figuur 38: Dermal denticles in soepel membraan

Bron bewerkt van: [64]

F [mm]	G [mm]
AD = 0,85	SL = 2,16
SS = 1,93	

Tabel 8: Dimensies dermal denticle bij Mr. Lauder

Bron: [64]

5.7.3 De grootte voor de testen in deze scriptie

Voor onze test gaan we zogenaamd een deel uit de romp van een schip op ware schaal nemen. Dit betekent dus dat de groottes van de dermal denticles in onze test overeen komen met de grootte zoals men ze zou vinden op een echt schip. De ware grootte zoals men ze op een makreelhaai vindt, zijn reeds eerder beschreven. De formules (Reynoldsgetal en Froudegetal) zijn reeds eerder besproken. Wanneer de modelschaal van een schip hetzelfde Froudegetal en Reynoldsgetal heeft als het schip op ware grootte, dan is de totale

weerstandscoefficiënt van beide dezelfde. Beide getallen kunnen enkel dezelfde zijn wanneer de schaalfactor λ gelijk is aan 1. Dit is zo omdat we testen doen op ware grootte. Dit betekent ook dat we de testen uitvoeren aan de snelheid waarop een schip vaart.

De berekening:

We hebben de lengte en breedte van zowel een gemiddelde kortvinmakreelhaai als van een schip waarop we willen testen nodig om de dermal denticles van een haai te kunnen converteren naar de ware grootte op een schip. De lengte van een volwassen kortvinmakreelhaai bedraagt 3,2 m en de breedte 0,5 m. Het representatieve schip waarop ik mij baseer is de gastanker de Methania van de rederij Exmar. Deze heeft 266 m als lengte tussen de loodlijnen en is 41 m breed. De keuze om het schip de Methania te nemen is omdat dit schip een effen bijna rechthoekige bodem heeft.

Nu gebruiken we de lengtes van de kortvinmakreelhaai en de Methania om de conversiefactor λ te vinden.

L = Lengte

B = Breedte

D = Diepte

m = Model schaal

w = Ware schaal

$$\lambda = \frac{L_w}{L_m}$$
$$\frac{L_w}{L_m} = \frac{266}{3,2} = 83,125$$

Uit deze berekening zien we dat we een conversiefactor 83,125 bedraagt. Dit zou ervoor zorgen dat de denticle lengte 'DL' van 151 μm , zoals we eerder hebben gezien, na berekening 12,6 mm wordt. Alle andere afmetingen van de dermal denticle zouden we dan ook moeten vermenigvuldigen met de factor 83,125. De afmetingen worden hieronder weergegeven en zijn geschikt om met een 3D printer geprint te worden.

A [mm]	B [mm]	C [mm]	
DL = 12,6	DH = 9,4	NW = 4,2	RHM/RS = 0,41
DW = 10,4	BW = 9,9	BL = 7,0	RHS/RS = 0,21
RS = 4,2	NL = 3,7	RHM = 1,7	
		RHS = 0,9	

Tabel 9: Dimensies dermal denticles bij onderzoek

Bron: Eigen berekening

Berekeningen:

Er zijn enkele wijzigingen gemaakt in afmetingen na de vermenigvuldiging van de denticle op ware grote met de conversiefactor. Zo is de lengte AD en SL gewijzigd.

De lengte AD is de diepte tot waarin de denticle is ingezonken in het flexibele membraan. Deze zou na de vermenigvuldiging 7,1 mm bedragen wat betekent dat de denticle 2,3 mm boven het flexibele membraan zou uitsteken. Dit is mogelijk wanneer de 3D printer is uitgerust met een dubbele extruder of anders gezegd met een dubbele kop zodat 2 soorten plastic gelijktijdig kunnen worden geprint. De beschrijving van de gebruikte 3D printer evenals het constructieproces wordt later verder beschreven in respectievelijke hoofdstukken 5.9.2.2 en 5.9.3.1. Omdat het gebruik van een dubbele extruder het constructieproces extreem verlengt, moet het flexibele membraan met de hand worden gegoten waardoor er weinig speling is voor eventuele fouten in het gieten. Daarom is deze lengte verminderd naar 4,0 mm. Dit heeft dan weer als voordeel dat de denticles hoger uitsteken en hierdoor meer kunnen bewegen zoals dit op een haai gebeurt. Onderstaande eenvoudige berekening in tabel 11 laat de verhouding zien hoeveel de denticle boven het membraan uitsteekt:

Verhouding oorspronkelijke afmetingen [mm]	Percentage boven membraan
$\frac{DH - AD}{DH} = \frac{2,3}{9,4}$	24,5 %
Verhouding aangepaste afmetingen [mm]	
$\frac{DH - AD}{DH} = \frac{5,4}{9,4}$	57,5 %

Tabel 10: Verhouding dermal denticle boven membraan

Bron: Eigen berekening

F [mm]	G [mm]
AD = 7,1 → 4,0	SL = 18,0 → Zie ED
SS = Zo dicht als mogelijk is bij 3D printen, ze overlappen lichtjes zoals bij de haai.	ED = 7,6 (= 18,0 - 5,2 - 5,2) → Zo dicht als mogelijk met 3D printen.

Tabel 11: Dimensies dermal denticles voor onderzoek (vervolg)

Bron: Eigen Berekening

Na een eerste test print van 9 denticles met de 3D printer waarbij alle afmetingen vergroot werden met 83,125 bleek dat de denticles te ver van elkaar stonden. De lengte SL tussen de denticles en dus ook de lengte ED zijn daarom aangepast. Bij de vergroting van denticles met de conversiefactor is er rekening gehouden met de afstand die Mr. Lauder heeft gebruikt tussen zijn denticles. Hij heeft getracht de denticles zo dicht mogelijk bij elkaar te plaatsen en dus de lengte SL zo klein mogelijk te houden. Het is dus niet logisch ook deze waarde met 83,125 te vermenigvuldigen omdat de denticles zich dan te ver van elkaar bevinden. Doordat ze ver van elkaar staan, ontstaan er gangen van openingen tussen de denticles wat we niet zien op de huid van een haai. De gangen hebben als nadelig effect dat wanneer air bubble lubrication gebruikt wordt, de luchtbelletjes zich gaan verzamelen in deze gangen en daardoor niet meer over de denticles stromen zoals we willen hebben. De luchtbelletjes zoeken namelijk de weg met de minste weerstand welke de gangen zijn. Om dit probleem op te lossen zijn de denticles dichter bij elkaar geplaatst zodat ze bij het 3D printen net niet elkaar raken en toch nog vrij kunnen bewegen.

Nu bekijken we de constructie van de dermal denticle vanuit een ander perspectief. Beschouw het volgende simpele voorbeeld: wanneer we een weiland hebben van 10 op 10 m bedekt met gras en men nu een weiland wil kopen van 100 op 100 m dan heeft het gras op beide weilanden dezelfde grootte. Het gras op een groter weiland zal niet groter zijn. Dit principe is net hetzelfde bij de kortvinmakreelhaai. Wanneer deze geboren wordt is hij minder dan 1 meter groot en hebben zijn dermal denticles een bepaalde grootte zoals als eerder is aangegeven. Naarmate hij groter wordt blijven de dermal denticles dezelfde grootte behouden. Ze worden niet groter naarmate hij ouder wordt. Er worden enkel extra denticles aangemaakt. Dit is een belangrijk gegeven voor dit onderzoek. Wanneer we via dit perspectief kijken hebben we geen conversiefactor λ nodig wanneer we denticles willen construeren voor schepen. We behouden dezelfde grootte van de denticle zoals men ze vindt op de kortvinmakreelhaai. Omdat het 3D printen van deze microscopische denticles zeer duur is zou men de microstructuur kunnen gebruiken voor de ontwikkeling van de denticles. De beschrijving van de microstructuur wordt later in de scriptie uitvoerig besproken.

5.8 Constructie

Onder dit hoofdstuk worden 2 grote methoden aangehaald hoe men dermal denticles kan construeren. Ze beginnen telkens met de vraag of dit een mogelijke oplossing is voor de constructie van dermal denticles of ribbelstructuur waarna deze vraag kort in de conclusie wordt beantwoord. De 2 methoden zijn de volgende: met een mal of via 3D printen. Dit hoofdstuk geeft enkel een algemeen inzicht in het constructieproces. Verder in de scriptie wordt dan uitgelegd welke methode we voor welke toepassing zullen gebruiken.

5.8.1 Microconstructie via mal

Is het mogelijk om de dermal denticles van een echte haaienhuid te vergroten en te reconstrueren in deze scriptie door gebruik te maken van het microconstructie proces?

De dermal denticles kunnen perfect nageemaakt worden op ware grootte zoals men ze vindt op makreelhaaien. Hierbij wordt gebruik gemaakt van synthetisch materiaal. Het hele proces wordt ook wel bioreplicatie genoemd. Er zijn 2 bestaande methoden om deze te repliceren.

5.8.1.1 Eerste methode: microreliëfafdruk/microgietsel

De eerste manier maakt gebruik van het maken van een microreliëfafdruk gevolgd door het vormen van een microgietsel. Het probleem bij het toepassen van deze techniek is dat er een persstap nodig is. Dit heeft als gevolg dat de groefbreedte, de rug hoogte en de schaal gaan vervormen. De weerstandsvermindering die men bekomt, is deze in de orde onder de 10%, ver onder deze van de natuurlijke haaienhuid. De natuurlijke haaienhuid heeft een perfecte weerstandsvermindering door zijn hiërarchische structuur van schubben en het gebruik van slijm. Om deze slijmlaag na te bootsen injecteerden wetenschappers DRA⁵ [15] of gecoate polymeren. Dit is een dure oplossing omdat door het schuren van het water, DRA loskomt en er hierdoor een constant verbruik is. Wegens bovenstaande nadelige redenen wordt deze manier van constructie niet verder beschreven maar zullen we ons richten op een nieuwe ontwikkelde tweede manier. [14]

5.8.1.2 Tweede methode: soft lithography/gradiëntcopolymerisatie

In het *Manufacturing Technology Research Center* in Beijing heeft men een tweede methode voor synthetische bioreplicatie gevonden. De nieuwe methode combineert soft lithography en de gradiëntcopolymerisatie met enkele voordelen als gevolg. Ze is veel nauwkeuriger waardoor de weerstandsvermindering groter is en verbruikt geen DRA. Het nadeel is dat de stoffen gebuikt voor soft lithography zeer soepel zijn en makkelijk kunnen verbuigen tijdens de constructie. [14]

- Soft lithography is een recente aanpak om microstructuren zeer precies na te maken. Het is een verzameling van technieken op basis van printen, gieten en drukken met een elastomerische drukpers. Het wordt 'soft' genoemd omdat het elastomerische materialen gebruikt. Een van de materialen die vaak gebruikt worden is PDMS, Polydimethylsiloxane, een soort van silicone. Hierdoor kan men driedimensionale en gebogen structuren construeren in verschillende soorten materialen. Enkele voordelen zijn [47]:

⁵ DRA (drag reduction agent) is een additief dat vaak wordt gebruikt in het transport van olie door pijpleidingen. Het zorgt voor minder turbulentie tussen de olie en de pijpleidingwand waardoor de doorstroomcapaciteit vergroot.

- Lage kost.
 - Makkelijk los te maken uit de mal.
 - Zeer geschikt voor toepassingen in plastic.
 - Geschikt voor niet lineaire oppervlakten.
- Copolomerisatie ontstaat als 2 of meer monomeren⁶ zich aan elkaar gaan vasthechten. Gradiëntcopolymersatie is een soort van copolomerisatie waarbij de verhouding tussen monomeren gradueel verandert.

Materialen

Er kan niet gestart worden wanneer er geen echt vel haaienhuid ter beschikking is. Er is ook nood aan een silicone rubber waarmee de mal wordt gemaakt. Deze rubber moet als karakteristieken hebben dat ze een kleine krimpfactor heeft bij het drogen en moet in staat zijn om gemakkelijk te ontvouwen uit de mal. Ook is er nood aan speciale soorten hars en chemische additieven die instaan voor de soepelheid en die de basis vormen voor de replica.

Methode

Het namaken van de haaienhuid bestaat uit 4 stappen: [14]

1. Voorbehandeling van de haaienhuid

Dit is een belangrijk gedeelte omdat er hier voor gezorgd wordt dat de microstructuur en de sterkte behouden blijft. Deze eerste stap bestaat verder uit: zorgen voor stijfheid, kuisen, chemische fixatie, spoelen, onttrekken van water en laten drogen. Om ervoor te zorgen dat er geen vervorming of krimp ontstaat wordt het op een vaste plaat gemonteerd voor het kuisproces.

2. Het maken van de mal

In deze stap wordt het principe soft lithography gebruikt. Wanneer de silicone uit twee componenten bestaat, die gemixt moeten worden, moet deze in de juiste verhouding worden afgewogen afhankelijk van de dikte/oppervlakte die je wil voor de mal. Het mengsel wordt dan op de haaienhuid gegoten en onder vacuüm worden de gassen onttrokken zodat er geen holtes gevormd worden door luchtbelletjes. Na

⁶ Een monomeer is een enkelvoudige chemische verbinding.

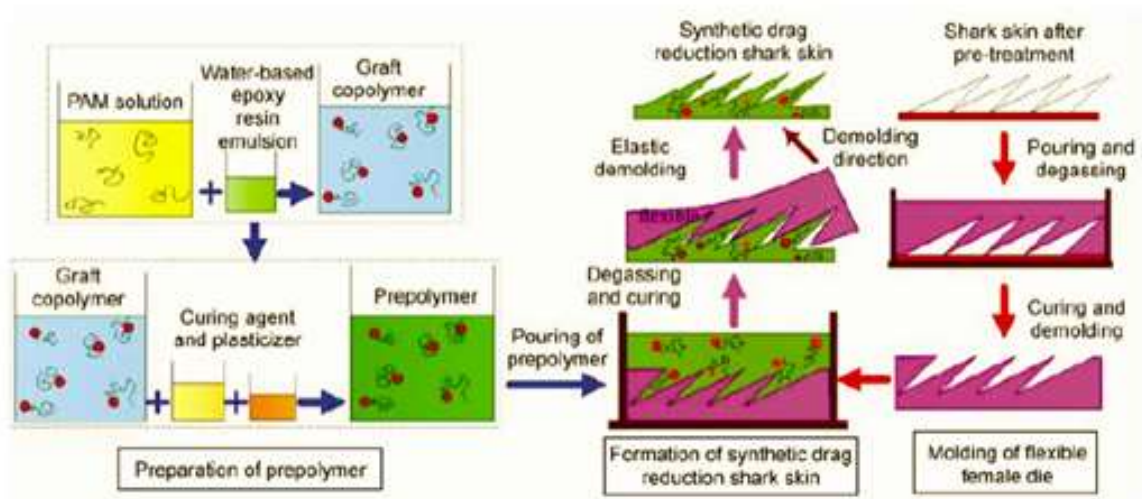
het uitharden moet de mal van de huid gehaald worden om verder te laten drogen op kamertemperatuur.

3. Het maken van de prepolymer voor de synthetische haaienhuid

Een gradiëntcopolymer wordt als basis gebruikt om de synthetische haaienhuid te maken. Het wordt gemaakt op basis van water gebaseerde epoxy hars en een bepaalde concentratie Polyacrylamide (PAM) die gemengd en achteraf gebruikt worden als substraat. De gradiëntcopolymer is na het drogen kruimelachtig en is hierdoor moeilijk los te krijgen van de haaienhuid. Dit probleem wordt verholpen door het toevoegen van weekmaker. Verharder en weekmaker worden daarom in juiste verhouding toegevoegd totdat men de prepolymer verkrijgt.

4. Vorming van synthetische haaienhuid

De prepolymer wordt dan ontgast en over de mal gegoten waarna het nog eens ontgast wordt onder vacuüm. Hierna wordt dit gedroogd in een droogoven waarna het van de mal wordt genomen. Wat men bekomt is de nagemaakte haaienhuid.

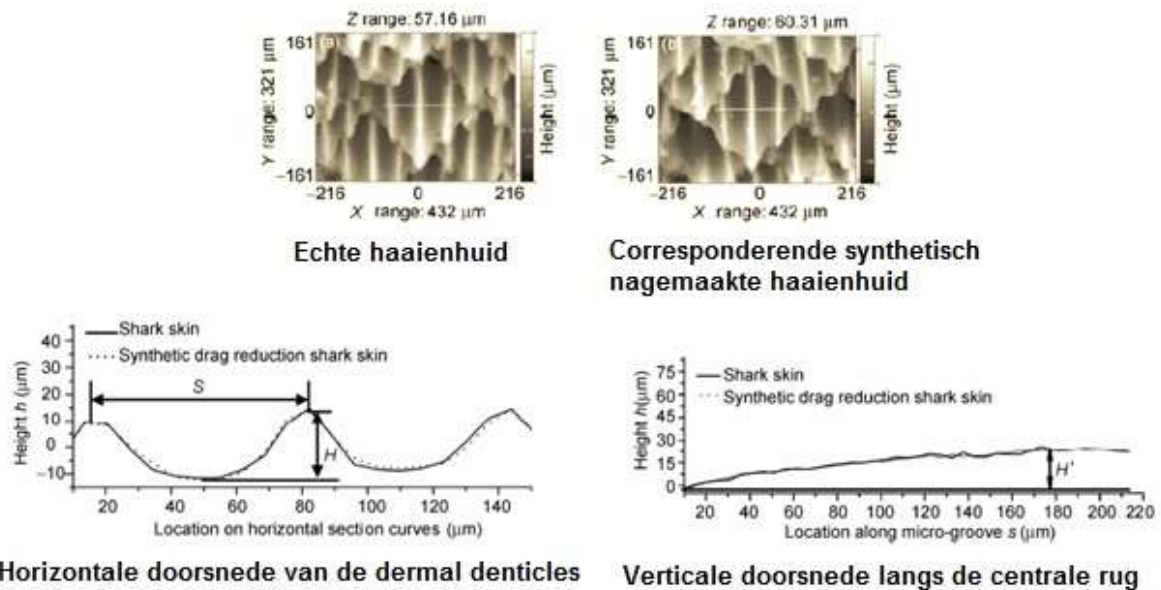


Figuur 39: Soft lithography/gradiëntcopolymerisatie proces

Bron: [14]

Nauwkeurigheid

De nauwkeurigheid van de nagemaakte haaienhuid wordt weergegeven in volgende foto's en krommen. Op de horizontale as van de kromme wordt de vorm weergegeven, op de verticale as de verticale vervorming. Men merkt op dat de bioreplicatie een zeer grote nauwkeurigheid vertoont en de echte haaienhuid perfect namaakt.



Figuur 40: Visuele vergelijking in nauwkeurigheid

Bron: [14]

	Vertical section			Deformation rate of Central ridge height (%)	Width of groove S (μm)		Deformation rate of groove width (%)	
	Average height offset $\Delta H'$ (μm)	Average height offset rate (%)	Central ridge height H (μm)		Left side	Right side	Left side	Right side
Shark skin sample			26.9		68.44	61.66		
Synthetic drag reduction shark skin	0.98	3.7%	26.2	-2.6	68.36	61.41	-0.1	-0.4%

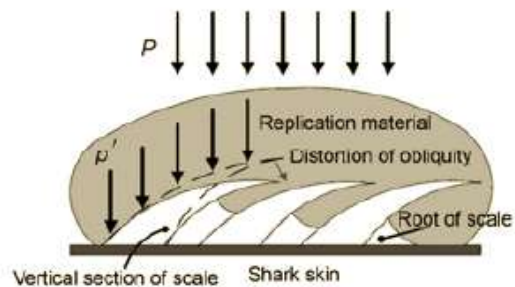
a) $H_{max} = 26.7 \mu\text{m}$.

Figuur 41: Resultaten vergelijking in nauwkeurigheid

Bron: [14]

De grote nauwkeurigheid met slechts een afwijking van 3,7% met deze van de ware haaienhuid, wordt verkregen door de grote vloeibaarheid van de silicone rubber. Om de mal nog meer te laten overeenkomen met de haaienhuid moet men de holten in de haaienhuid zo perfect mogelijk vullen. Dit kan bekomen worden door zachte drukking en een betere droging. Men moet er ook op letten dat we niet te veel gradiëntcopolymeer gebruiken

bovenop de haaienhuid omdat deze zorgt voor druk op de dermal denticles en hierdoor vervorming ontstaat.



Figuur 42: Uitoefening van druk op haai denticles

Bron: [14]

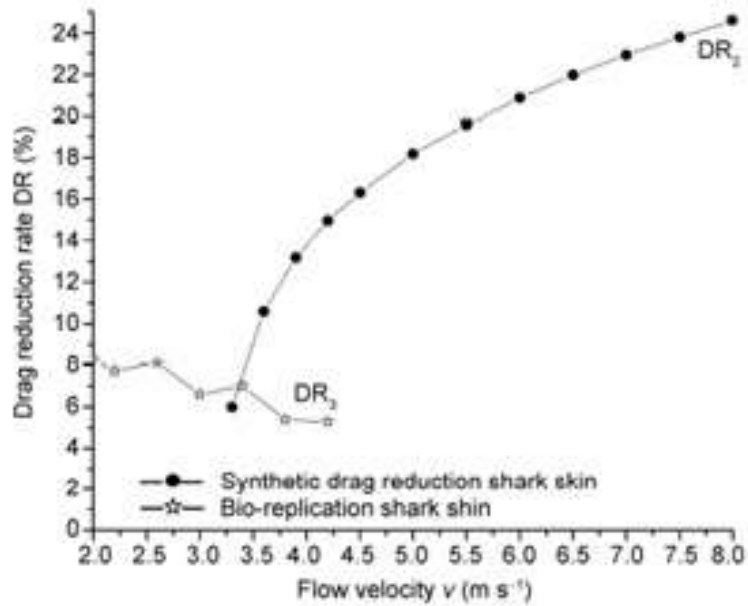
Wrijvingsvermindering

Om de wrijvingsvermindering te meten werden testen uitgevoerd in China Ship Scientific Research Center (CSSRC) in een watertunnel met afmetingen: lengte 3,2 m en diameter 0,8 m. De snelheid van het water bedroeg 0 - 20 m/s. Er werd gebruik gemaakt van een dynamometer met een bereik tot 300 N en nauwkeurigheid van 0,1 N

Er werden testen uitgevoerd met:

- Een vlakke huid. Deze wordt in figuur 43 niet weergegeven.
- DR2: De synthetische bioreplicatie van de haaienhuid volgens methode 2 in deze scriptie.
- DR3: De bioreplicatie van de haaienhuid (DR3). Methode 1, eerder beschreven in deze scriptie.

Er werd een holle cilinder bekleed met een van deze. De cilinder had een lengte van 50 cm en een buitendiameter van 9 cm, de replica had een lengte van 17 cm, breedte van 9,7 cm en een hoogte van 0,2 cm. [14]



Figuur 43: Wrijvingsvermindering grafisch voorgesteld

Bron: Bewerkt van [14]

Uit deze figuur kan men besluiten dat wanneer de stroomsnelheid toeneemt, de weerstandsvermindering door de synthetische haaienhuid continu stijgt. De test stopte bij 8 m/s waarbij een weerstandsvermindering van 24,6% werd gemeten bij synthetische haaienhuid. Deze is veel hoger dan DR3 waarbij slechts 8,25% rendement werd bekomen. Het gebruik van de drukpers bij DR3 die voor vervorming van de dermal denticles zorgt is hoofdzakelijk voor deze lage waarden.

5.8.1.3 Besluit

- 1) Men kan besluiten dat de synthetische bioreplica met grote nauwkeurigheid de vorm van de haaienhuid kan nabootsen. Deze prestatie met slechts een afwijking van 3,7% heeft een veel grotere nauwkeurigheid dan een microafdruk met microgietsel.

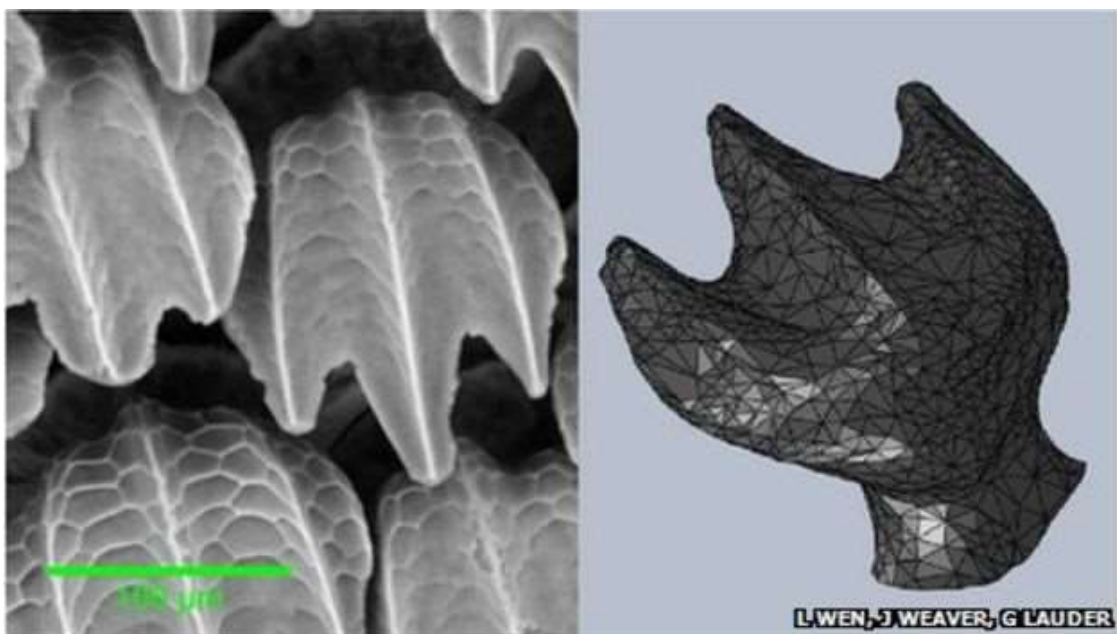
- 2) Microconstructie is geen geschikte oplossing voor het namaken van dermal denticles in deze scriptie. Vooral de grote kostprijs speelt hierbij een grote rol. De nauwkeurigheid waarmee je moet werken kan enkel bekomen worden door mensen die hierin gespecialiseerd zijn en de juiste toestellen en middelen hebben. Zo hebben we onder andere niet het geschikte materiaal tot onze beschikking zoals de drukpers, haaienhuid, specifieke chemische stoffen, vacuümzuiger, etc. Ook het additief DRA levert problemen op. DRA is een verbruiksproduct dat een grote kost met zich meedraagt. Het vergroot de efficiëntie maar de opslag van DRA in een tank draagt niet bij in het ruimtelijk concept van een schip. Het is niet handig om op een schip een ruime tank te plaatsen waarmee nuttige cargoruimte of plaats op het dek wordt ingenomen met dit dure additief. Een mogelijke oplossing om DRA te vermijden is om air bubbels te injecteren. Deze zouden onrechtstreeks eventueel kunnen zorgen voor een efficiëntere turbulentie door de verkregen luchtlaag die wordt gevormd. Hieruit zullen de proeven die uitgevoerd worden in deze scriptie een dieper inzicht geven.

5.8.2 3D printen

Indien het microconstructieproces geen optie biedt voor de constructie van de dermal denticles, heeft 3D printen dan voldoende voordelen om dit wel te kunnen?

Het construeren van biologische ideeën uit de natuur, om hiermee menselijke toepassingen uit te vinden heet: biomimetica. Het creëren van dermal denticles in 3D is hiervan dus een toepassing. [62]

G. Lauder, een biologische wetenschapper aan het Harvard University laboratorium, en zijn collega's hebben zich verdiept in de dermal denticles van een makreelhaai. Het doel was om een synthetische huid met lage wrijving te maken bestaande uit duizenden van deze kleine denticles. Het onderzoek bestond uit een gedetailleerde scan van de huid waarna ze een 3D model van één dermal denticle met een lengte van 0,15 mm hebben gereconstrueerd. Omdat de nauwkeurigheid van zelfs de recentste 3D printers gelimiteerd is, zijn deze denticles ongeveer 10 keer groter dan diegene op de haaienhuid. De uitdaging hierna bestond erin om een flexibel membraan te maken met enkele duizenden van deze kleine dermal denticles wat een volledig jaar in beslag heeft genomen. [62]

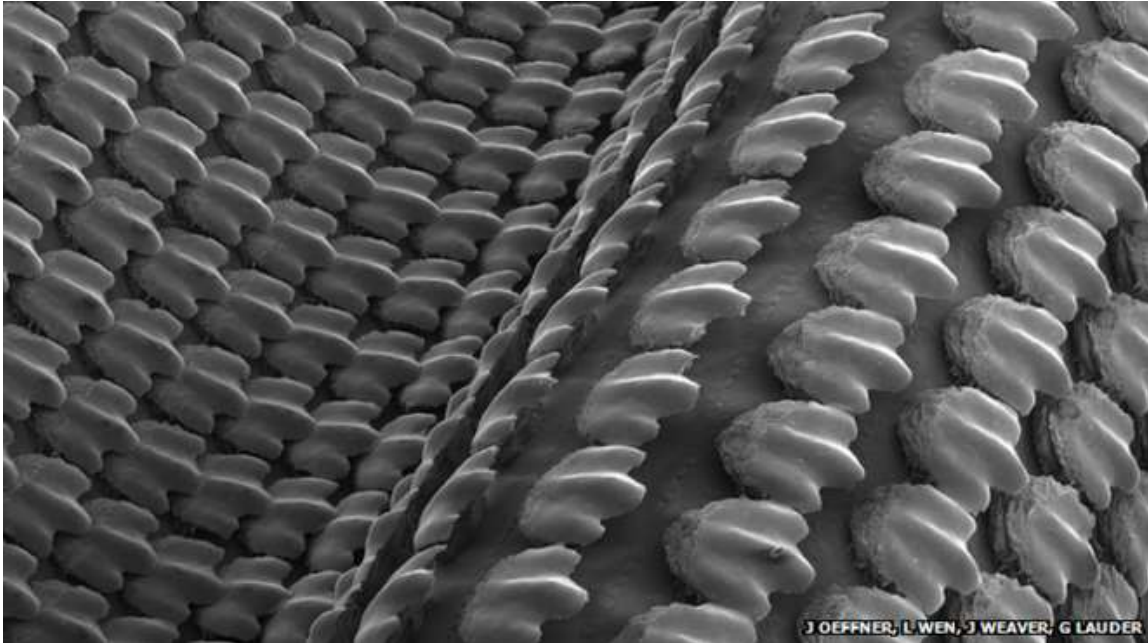


Figuur 44: Dermal denticle

Bron: [62]

Een 3D printer bouwt laag voor laag een object, gebaseerd op een computer ontwikkeld model. Wetenschappers aan het Harvard university gebruikten drie soorten materialen in de 3D printer om een dermal denticle te construeren. Een flexibel materiaal werd gebruikt voor de basis, het bevestigingsmembraan en een harder materiaal voor de bovenliggende tandachtige structuur. Een 3D printer heeft als voordeel dat de stijve denticles gemakkelijk ingebouwd kunnen worden in het flexibele membraan. Een moeilijkheid bij het construeren van deze dermal denticles via een 3D printer was hun speciale vorm. Dermal denticles hebben namelijk de eigenschap gedeeltelijk over elkaar te gaan liggen. 3D printers moeten hiervoor steeds een overbrugging maken tussen twee denticles waardoor deze achteraf steeds weggenomen moeten worden. Dit probleem kostte de wetenschappers veel tijd om opgelost te krijgen. Men maakte voor de overbrugging gebruik van een materiaal dat achteraf gemakkelijk kon verwijderd worden. De verwijdering gebeurde door middel van een waterjet zonder de denticles te beschadigen. In totaal gebruikte G. Lauder *et al.* dus 3 materialen. Een voor de denticle, een voor het flexibel membraan en een materiaal voor de overgang tussen de denticles. [62] De eigenschap om over elkaar te gaan liggen is niet mogelijk om te verkrijgen wanneer men werkt met een mal.

Het resultaat was een synthetische huid met duizenden kleine denticles die lineair geplaatst waren. De synthetische huid werd achteraf op een robot bewegende arm gezet die was bevestigd in een met water gevulde tank. De arm kon het model stationair houden of dynamisch in beweging brengen op zwemsnelheid. Uit deze testen kwam duidelijk naar voren waaruit haaien hun voordeel sprokkelen. De snelheid kon verhoogd worden met 6,6% in vergelijking met een vlak gecoat membraan om dezelfde hoeveelheid weerstand te verkrijgen. Het membraan met de dermal denticles kon tevens dezelfde gesimuleerde afstand afleggen met 5,9% minder energie. Het vermindert dus niet enkel de weerstand maar zorgt ook voor een voortstuwende kracht. De voordelen deden zich voor bij relatief lage snelheden. [62]



Figuur 45: Dermal denticle op soepele mat Mr. Lauder

Bron: [64]

Besluit

Het is mogelijk om met een mal de dermal denticles na te maken maar het is niet aangeraden omdat een mal het niet toelaat om de dermal denticles te laten overlappen. Wanneer ze niet zouden overlappen is het mogelijk dat de eigenschap van de denticles tenietgaan. Bij 3D printen is de overlapping wel mogelijk wat het constructieproces een zeer groot voordeel geeft.

5.9 De uitgevoerde stappen voor het testen

5.9.1 Van 2D tekening naar 3D computermodel

Nu de afmetingen en vorm van een dermal denticle gekend zijn, kan men de denticle beginnen construeren. Hierbij wordt er direct gestoten op een eerste probleem. Hoe is het mogelijk om een 2D tekening met gekende afmetingen te transformeren naar een 3D object? Om van 2D naar 3D te gaan waren er 2 mogelijkheden.

- 1) Zelf een dermal denticle in de klasse van 10 cm maken uit hout door het te schaven. Hierbij zouden alle afmetingen proportioneel vergroot zijn. Eens het houten model is ontwikkeld, zou het naar een 3D bureau gebracht kunnen worden waarmee ze dan via een laserscanner het model inscannen en een enkele dermal denticle printen. Deze denticle zou dan gebruikt worden voor het maken van een mal. Dit concept van de mal wordt verder besproken.
- 2) Verschillende 3D bureaus contacteren en vragen of deze in staat zijn om een 3D model te maken vanuit de 2D tekening. Het bleek mogelijk om via een computerprogramma een 3D afbeelding te maken om deze vervolgens op de gewenste grootte te printen. Het probleem is de kostprijs, die is enorm door het grote nodige aantal werkuren.

Toen ik bijna op het punt stond om te investeren, informeerde mevrouw Willemen dat Dhr. P. Bueken een 3D printer had aangekocht en het zag zitten om de denticles te printen. Dhr. S. Bueken is goed in AutoCAD en wou hiermee graag proberen om voor een model te zorgen dat compatibel is met de 3D printer. Het model stond enkele dagen nadien al op punt. Het werd gemaakt in een STL-bestand⁷. Dit is een computerbestand dat speciaal ontworpen is voor stereolithografie waarmee rechtstreeks modellen in kunststof kunnen worden gemaakt.

⁷ Surface Tessellation Language

5.9.2 Van 3D computermodel naar fysiek model

Nu het STL 3D model ontwikkeld was kon men overgaan naar de volgende stap: het fysiek ontwikkelen van een dermal denticle. Eerder in de scriptie werd er beschreven dat er hiervoor twee mogelijkheden bestaan: het gebruik van microconstructie via een mal of via een 3D printer. Beide mogelijkheden werden vervolgens met elkaar afgewogen en zijn hieronder weergegeven.

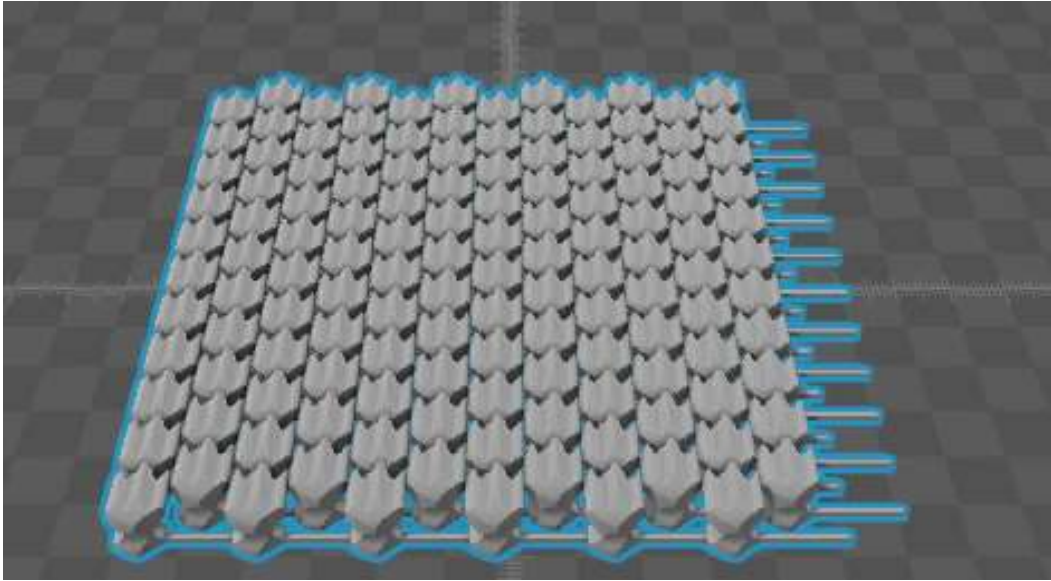
5.9.2.1 Microconstructie via mal

Het eerste plan was om te werken met een mal. Via de 3D printer van dhr. P. Bueken zouden er dan een enkele dermal denticles geprint kunnen worden. Eens we deze hebben gaan we te werk zoals eerder in deze scriptie is beschreven (zie hoofdstuk 5.8.1.2 onder 'Microconstructie via mal'). Eenvoudig uitgelegd zouden er hiermee verschillende afdrukken in een hiervoor bestemde stof (silicone rubber) gemaakt kunnen worden om zo een mal van enkele denticles te vormen. Het is een goedkope oplossing maar bracht ook enkele problemen met zich mee. De denticle heeft een speciale vooruitstekende kop die dikker is dan de nek onder deze kop. Wanneer we afdrukken willen nemen in de daarvoor voorziene stof duwt de kop de stof opzij waardoor er geen afdruk is van de nek. Een mogelijkheid om dit probleem te omzeilen is om de stof over de denticle te gieten, het te laten uitharden en de denticle uit die stof te wringen. Dit is een tijdrovende operatie waarbij we wel een mal bekomen maar enkel voor 1 denticle. Wanneer meerdere denticles zouden gemaakt moeten worden, zou deze stap een aantal keer uitgevoerd moeten worden. We zullen bij het gebruik van deze methode ook veel van deze speciale stof (rubber) verbruiken wat de kostprijs hoog maakt. Dhr. S. Bueken is er in geslaagd om met AutoCAD een mal te creëren waarin daarvoor voorziene rubber kan gegoten worden. Na het 3D printen van dit model kon men individuele gegoten denticles bekomen. Deze kunnen vervolgens op een mat geplaatst/vastgelijmd worden. Uit een test bleek dat het niet makkelijk was om de denticle uit de mal te krijgen. Dit komt doordat de rubber lichtjes bleef haken achter de fijne 3D geprinte lijntjes PLA. Verder onderzoek zou dieper inzicht kunnen bieden in de verfijning en de mogelijkheid in massaproductie van deze malstructuur. Er zou ook kunnen gecontroleerd worden of deze manier dan sneller is dan 3D printen. Als conclusie kunnen we dus stellen dat de

microconstructie via mal niet de meest geschikte is voor deze scriptie maar wel een optie kan bieden in de toekomst.

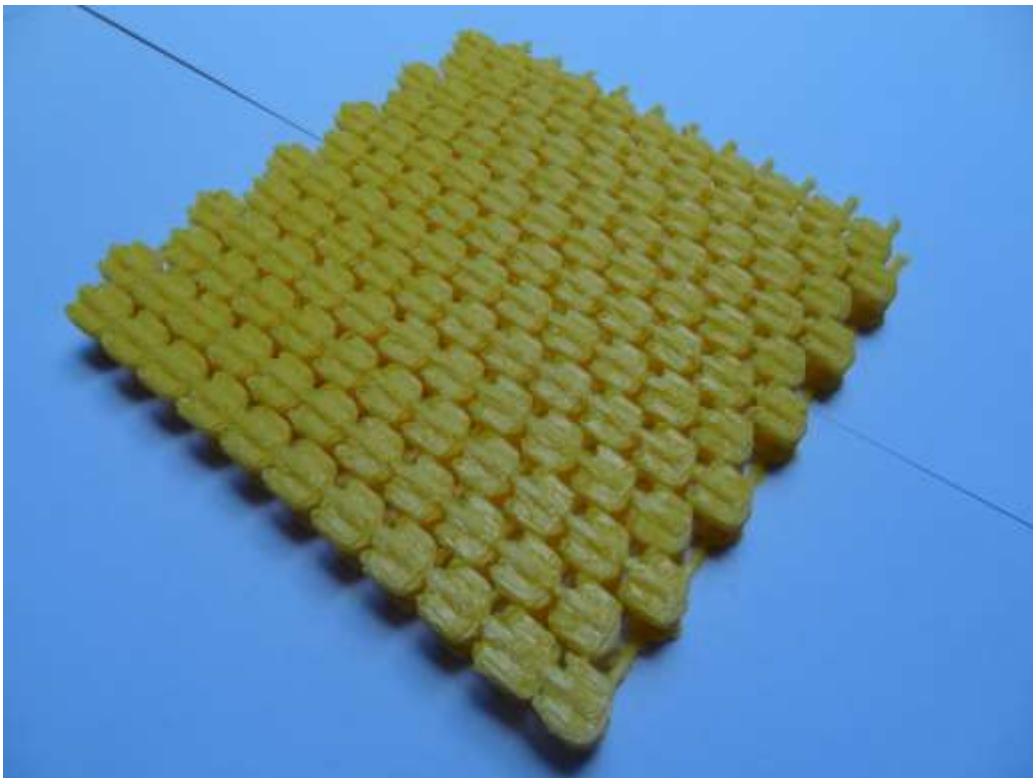
5.9.2.2 3D printen

De makkelijkste, beste en nauwkeurigste oplossing is het gebruik van een 3D printer. Dit is een kostelijke operatie maar door sponsoring van de Hogere Zeevaartschool werd dit een te overwegen oplossing. Dhr. P. Bueken vond het ook geen probleem om zijn printer het werk te laten doen. Eens dhr. S. Bueken het STL-bestand naar dhr. P. Bueken had doorgestuurd kon hij een matje van denticles maken. Het matje wordt gevormd door telkens een lijntje tussen de voet van de denticles te trekken. Dit zorgt ervoor dat de denticles op dezelfde afstand van elkaar blijven. Er werden twee 3D matjes geprint volgens de originele niet gecorrigeerde afmetingen. Eentje met 9 denticles en eentje met 15 denticles. Zoals al eerder is beschreven stonden de denticles te ver uiteen en zijn de afmetingen hierna aangepast. Om te voorkomen dat er telkens een nieuw matje geprint moest worden na elke wijziging, stuurde dhr. P. Bueken me achteraf telkens de aangepaste STL-bestanden door ter controle. De STL-bestanden konden onder andere worden geopend met 'Netfabb Basic' of MeshLab, twee gratis computerprogramma die STL-bestanden kunnen lezen. Na enkele aanpassingen zijn we gekomen tot een mat van 12 op 12 cm. De mat bevat 132 denticles en het duurt 8,5 uur om deze te printen. De computer had voor de berekening van de mat 3 uur tijd nodig. Van dit matje zijn er 22 modellen nodig om de volledige plaat te bedekken. Met de hierna volgende foto's is de evolutie van het ontwerp in kader gebracht.



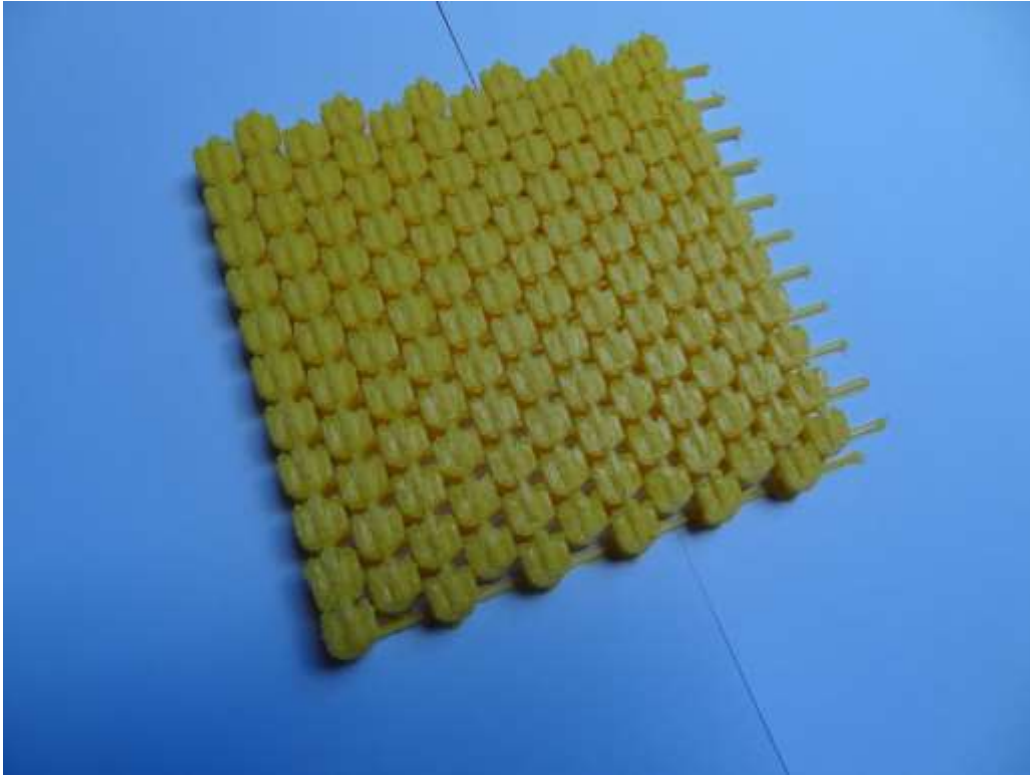
Figuur 46: 3D constructie van dermal denticle mat 120x120 mm

Bron: Peter Bueken



Figuur 47: 3D geprinte denticle mat 120x120 mm

Bron: Eigen figuur



Figuur 48: 3D geprinte denticle mat 120x120 mm

Bron: Eigen figuur

Structuur van de denticles

Er bestaan drie mogelijke structuren om de denticles te plaatsen. We onderscheiden de:

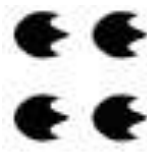
- geschrante structuur [B]



- lineair overstekende structuur [C]



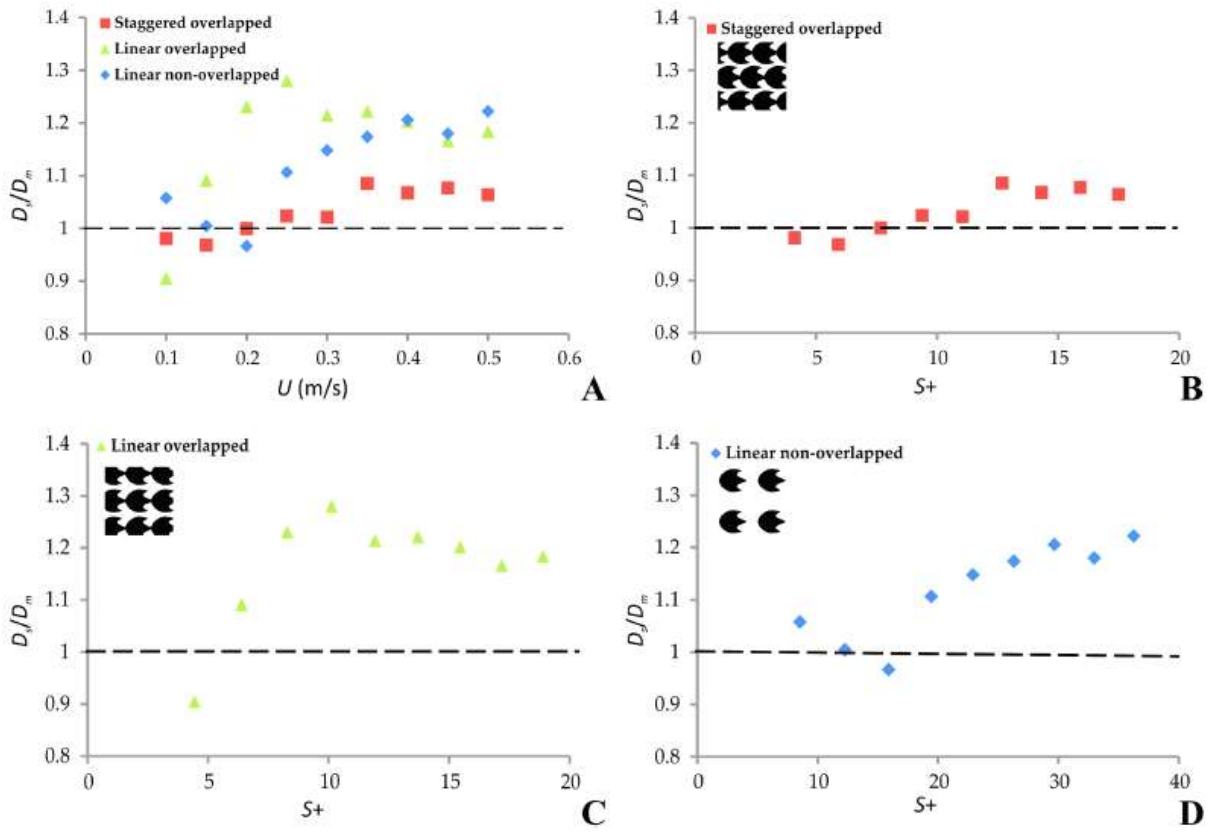
- lineair niet overstekende structuur [D]



Figuur 49: Structuur van de denticles

Bron: [63]

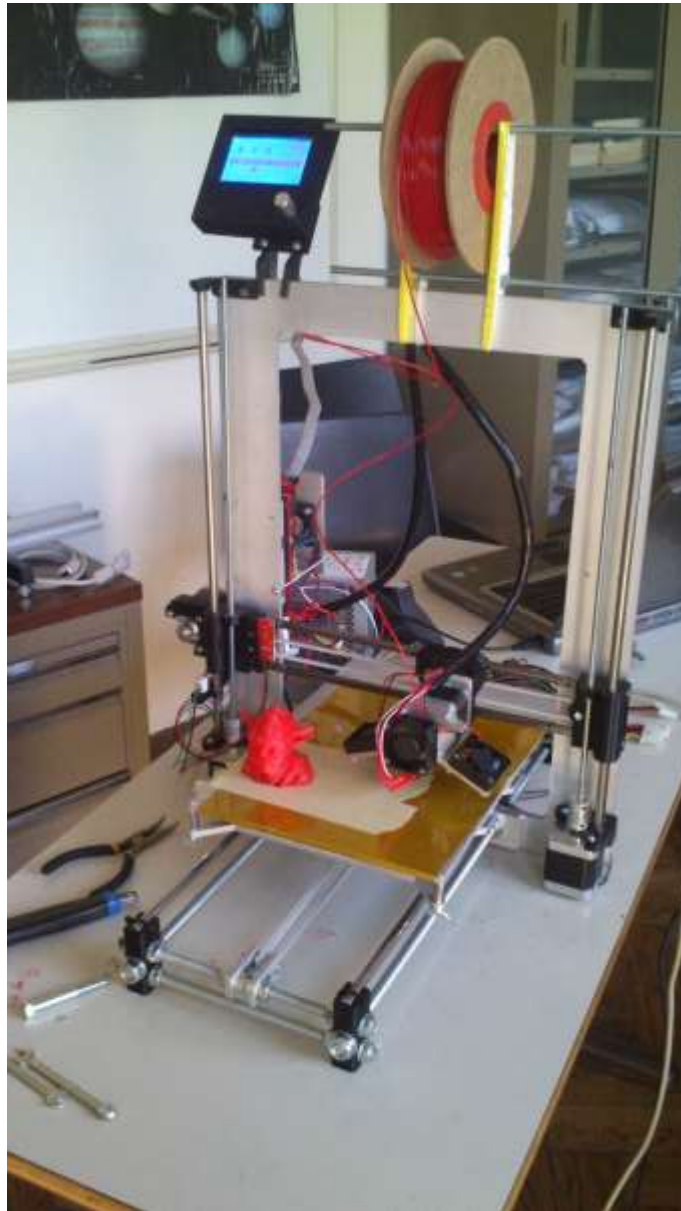
In figuur 49 worden de verschillende structuren in B, C en D weergegeven waarmee dhr. Lauder testen heeft uitgevoerd. Zijn testen laten ons toe de juiste keuze te maken voor de plaatsing van de denticles. Op de verticale as is de verhouding weergegeven tussen de statische weerstand van de dermal denticles D_s op de statische weerstand van het soepele membraan D_m . Wanneer de verhouding $\frac{D_s}{D_m} = 1$ betekent dit dat de weerstand van de denticles dezelfde is als die van het soepele membraan. Op de horizontale as vindt men de dimensieloze afstand tussen de ruggen van 2 naburige denticles. Deze wordt weergegeven als 'S+'. Men merkt dat wanneer de afstand S+ vergroot, ook de statische weerstand van de dermal denticles vergroot. Bij alle drie de structuren blijkt dat een kleine afstand tussen de denticles voor de minste weerstand zorgt. Bij het 3D printen in deze scriptie is ervoor gezorgd dat de denticles ook zo dicht mogelijk bij elkaar staan zonder dat ze elkaar raken. Op de eerste 3D geprinte matjes stonden de denticles nog lineair naast elkaar (structuur D). Aan de hand van deze informatie zijn we van structuur veranderd en zijn we begonnen met de geschrante structuur te gebruiken (structuur B). Dit omdat deze voor de minst statische weerstand zorgt van de denticles voor verschillende onderlinge afstanden. [63]



Figuur 50: Verschillende structuren dermal denticles

Bron: [63]

De werking van de 3D printer



Figuur 51: 3D printer Mr. P. Bueken

Bron: Eigen figuur

Voordat er kan gestart worden met printen moet het 3D model van de denticle mat in de computer geüpload worden. De computer is aangesloten aan de 3D printer.

In de computer wordt via een programma het model snel gescand in verschillende lagen. Aan de hand van deze lagen weet het Garduino, een computerplaatje, op de 3D printer welke denticle in welke volgorde hij moet printen. Onderaan de printer vinden we horizontaal de constructieplaat die is gemaakt uit aluminium. Onder de aluminium plaat

bevinden zich weerstanden die de plaat opwarmen tot de gewenste temperatuur. Voor het materiaal (PLA) dat wij gaan gebruiken voor de constructie van de denticles is dit 60°C. De plaat moet eerst opgewarmd worden vooraleer er kan begonnen worden met printen. Dit om ervoor te zorgen dat PLA niet meteen afkoelt en blijft kleven op het aluminium. Terwijl de plaat opwarmt tot de gewenste temperatuur, warmt ook de extruder op. De extruder is de kop van de printer waarin het stijve 1,75 mm print PLA draad wordt gesmolten en waarmee de vormen gemaakt worden. In de extruder bevindt zich een weerstand die de kop opwarmt tot in ons geval 200°C. Dit is de smeltemperatuur van het PLA. Wanneer de printer is uitgerust met een dubbele extruder kunnen twee verschillende soorten materiaal gebruikt en opgewarmd worden. In ons geval waar de denticles uit een harder materiaal gemaakt moeten worden dan het soepele membraan zou dit handig geweest zijn. Omdat de printtijd hiermee extreem lang verlengd wordt, hebben we besloten om een enkele extruder te gebruiken en handmatig het membraan te gieten. Nu alles is opgewarmd, kan er begonnen worden met printen. De printplaat en de extruder zijn verbonden met elektromotortjes die gestuurd worden vanuit het Garduino component. Via 2 motortjes en 2 verticale assen beweegt de extruder verticaal.

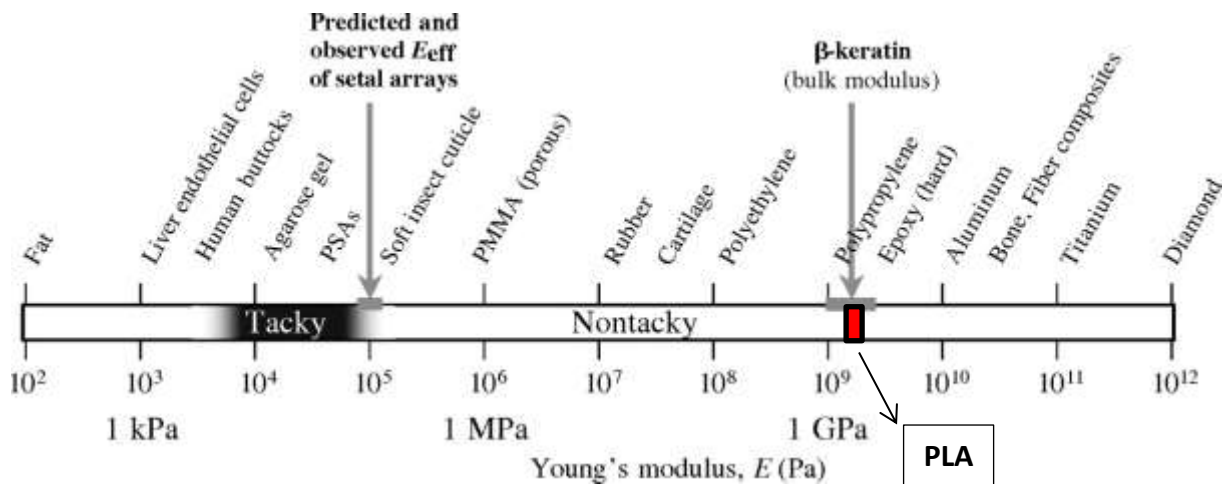
Het gebruikte materiaal

Er bestaan enorm veel verschillende soorten materiaal waarmee geprint kan worden: PLA, FlexPLA, ABS, EVA⁸, etc. Deze zijn allemaal verkrijgbaar in rollen draad met de gewenste dikte. Omdat de denticles op een haai stijver zijn dan de flexibele huid kiezen we voor de constructie van de denticles voor PLA⁹. PLA heeft een Young's modulus¹⁰ van 3,5 GPa en is daarmee stijf genoeg. [44] De keuze van PLA is gemaakt omdat het gebruiksvriendelijk is, weinig krimpt na afkoelen en een biologisch afbreekbare kunststof is. Er is ook rekening gehouden met de kleur. Er is bewust gekozen voor een gele kleur zodat indien er tijd over is, de turbulentie over een matje van denticles getest en waargenomen kan worden. Hiervoor kan er in het stromende water kleurstofdruppels toegevoegd worden die duidelijkheid geven in de turbulentie.

⁸ Ethyleenvinylacetaat

⁹ Polylactide of polymelkzuur is een thermoplastisch polymeer.

¹⁰ Elasticiteitsmodulus is een getal die de weerstand weergeeft van een materiaal tegen elastische vervorming.



Figuur 52: Young's modulus schaal

Bron bewerkt van: [4]

Wanneer er extra tijd zou zijn en de 3D printer is uitgerust met een dubbele extruder zou EVA of FlexPLA, twee andere zeer soepel materialen, gebruikt kunnen worden voor het printen van het membraan. Dit membraan moet soepeler zijn dan de denticles zodat de denticles soepel kunnen bewegen. FlexPLA (Young's modulus 95 MPa) is soepeler dan PLA maar raakte door zijn soepelheid verstopt in de extruder tijdens een test. Omdat dit nu niet mogelijk was, is er op zoek gegaan naar een vervangende manier voor de constructie van het membraan. Onder de mogelijkheden stond:

- Silicone
Silicone is duur in aankoop en is daarom niet gekozen.
- Malmateriaal
Dit zijn zeer geschikte materialen maar eveneens zeer duur in aankoop en daarom niet gekozen.
- Teer
Is een milieuonvriendelijk product.
- Verwarmd bed van EVA
Heel lang werd er overwogen om dit te gebruiken. EVA heeft in tegenstelling tot PLA een veel lagere smelttemperatuur (ongeveer 60°C), afhankelijk van het type EVA dat gebruikt wordt. [17] Het verwarmen van EVA zou gebeuren op de metalen plaat waarop het membraan achteraf bevestigd wordt. Er zou voor gezorgd worden dat deze metalen plaat een opstaande rand krijgt van 4 mm. Hierin zou er 3 mm EVA in

aangelegd worden waarna deze in een oven vloeibaar kan worden gemaakt. Door het plaatsen van de 3D geprinte matjes van denticles zal dit stijgen tot 4 mm, de hoogte tot waar de denticle in het membraan moet zitten, doordat de denticle voet ook bepaalt een volume inneemt. Deze manier van werken is geen geschikte oplossing omdat wanneer de denticles gelegd worden in de vloeibare EVA, PLA minder stijf zal worden en de denticles zouden beginnen kromtrekken. Omdat er geen idee is hoe vloeibaar EVA zal worden is er ook niet geweten of de verbindingen tussen de denticles een afdruk zullen geven in het EVA waardoor kuiltjes ontstaan.

- Vloeibare TEC7 Aquastop



Figuur 53: Vloeibare TEC7 Aquastop

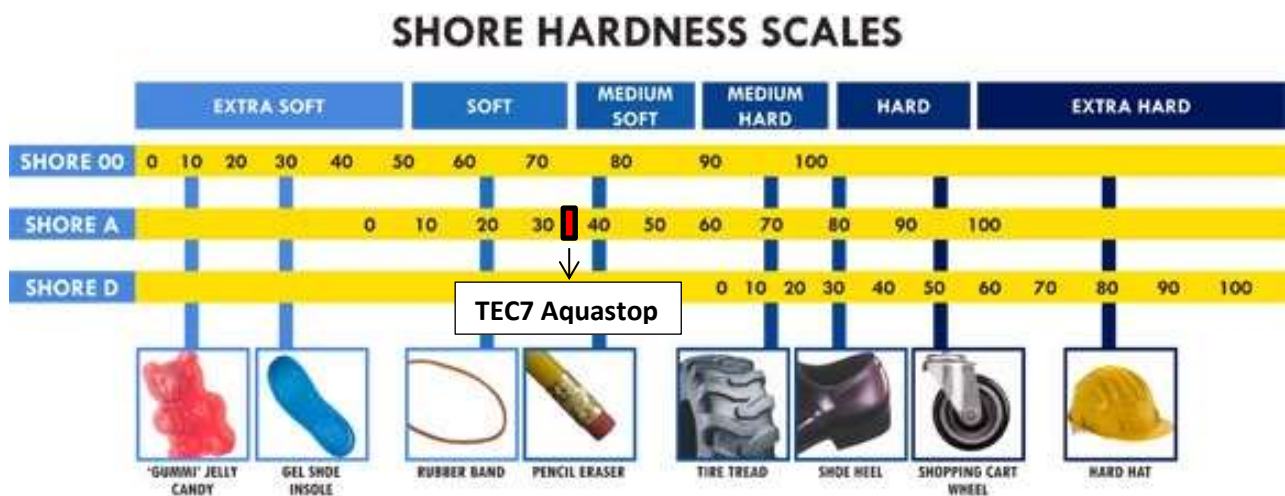
Bron: Eigen figuur

De keuze is uiteindelijk hierop gevallen. De vloeibare TEC7 Aquastop heeft enkele voordelen:

- Het is relatief goedkoop.
- Het kan tegen water.
- Het moet niet verwarmd worden waardoor deze moeilijkheid en bijhorende problemen vermeden wordt.

- Het is vloeibaar, vloeibaar genoeg om geen afrukken van de verbindingen tussen de denticles achter te laten
- Het heeft een hardheid van 35 shore¹¹ A, [54] minder hard dan het materiaal waaruit de denticle is gemaakt.

We werken net zoals hierboven is beschreven, rechtstreeks op de metalen plaat met opstaande rand van 4 mm. De plaat wordt ook aan het trillen gebracht om ervoor te zorgen dat de vloeistof effen open loopt tussen de denticles.



Figuur 54: Shore hardheid schaal

Bron bewerkt van: [50]

De nauwkeurigheid

Op de 3D printer kan de nauwkeurigheid van het printen ingesteld worden. De eerste geprinte denticle matjes (9 en 15 denticles) werden geprint op 0,2 mm nauwkeurigheid. Het oppervlak bovenaan was hierbij nogal ruw. De ribbels op de kop van de denticle waren niet zo uitgesproken en waren een beetje in elkaar uitgelopen. Zoals in deze scriptie al eerder is beschreven kan een kleine verandering in de ruwheid van het oppervlak een groot effect uitoefenen op de weerstandsvermindering.

¹¹ De 'shore scale' is een schaal die de hardheid van objecten weergeeft.



Figuur 55: Eerste 3D test 9 denticles

Bron: Eigen figuur

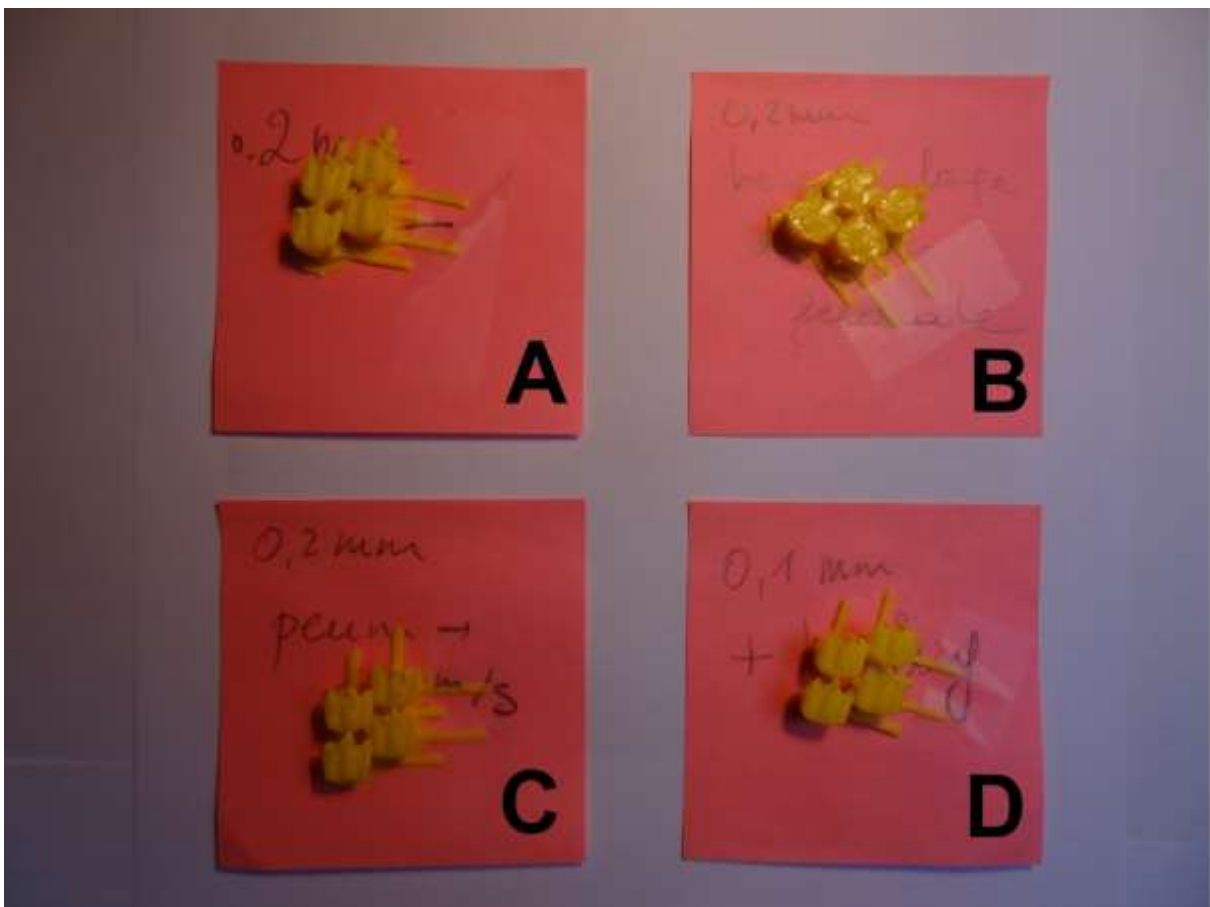


Figuur 56: Eerste 3D test 15 denticles

Bron: Eigen figuur

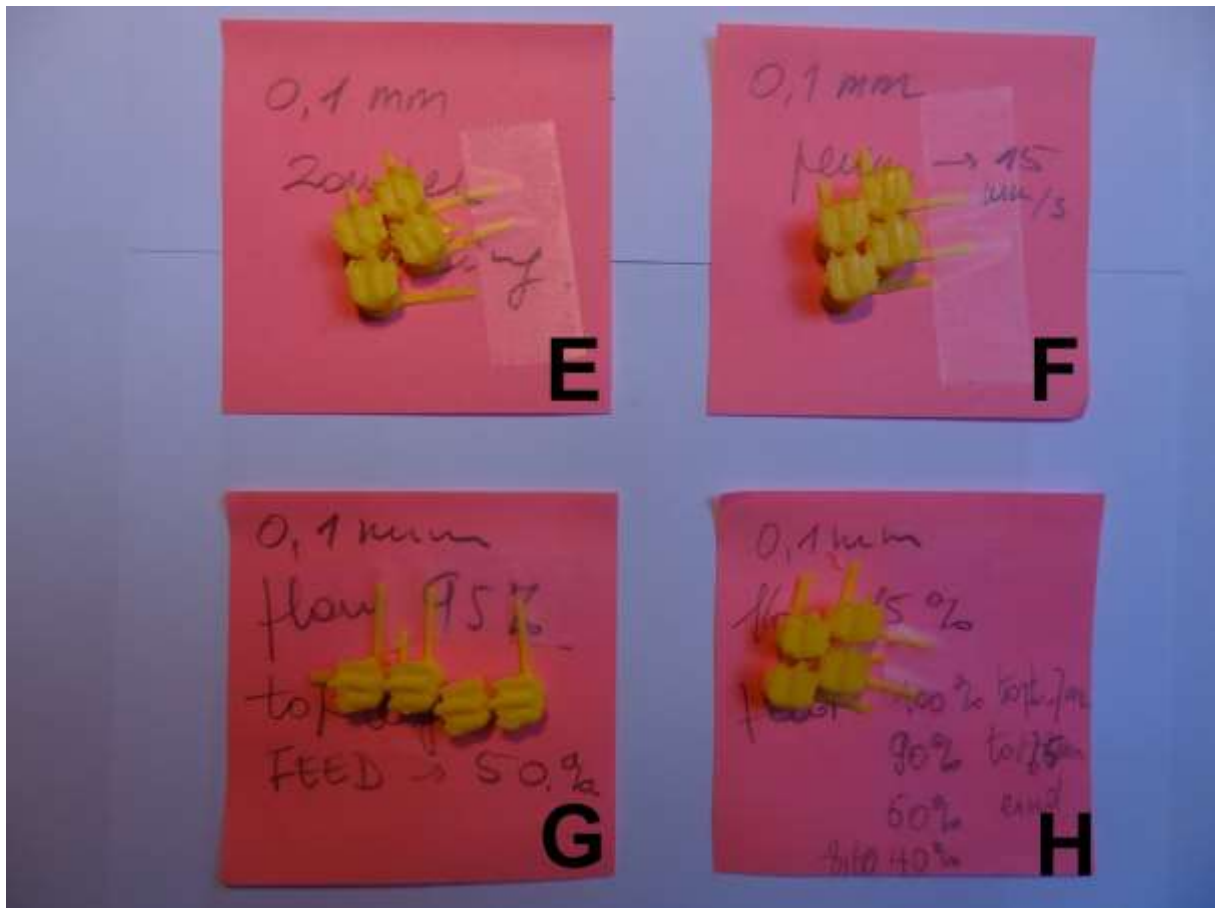
Er werden verschillende testen gedaan om het oppervlak zo nauwkeurig mogelijk te maken door de denticles op een andere manier te printen. Hierbij werden de ventilatie, de printsnelheid (feedrate) en de nauwkeurigheid aangepast. Volgende aanpassingen werden voorhanden genomen waarin figuur 57 en 58 verduidelijking geven.

- A. Printen op 0,2 mm nauwkeurigheid met ventilatie.
- B. Printen op 0,2 mm nauwkeurigheid met ventilatie en bovenlagen op 40% feedrate.
- C. Printen op 0,2 mm nauwkeurigheid met perimeter 15 mm/s.
- D. Printen op 0,1 mm nauwkeurigheid met ventilatie.
- E. Printen op 0,1 mm nauwkeurigheid zonder ventilatie.
- F. Printen op 0,1 mm nauwkeurigheid met perimeter 15 mm/s.
- G. Printen op 0,1 mm nauwkeurigheid met flow 95% en bovenlagen op 50% feedrate.
- H. Printen op 0,1 mm nauwkeurigheid met flow 85% en feedrate 100% tot op 7 mm hoogte, 90% tot 7,5 mm en 50%-40% boven 7,5 mm.



Figuur 57: Nauwkeurigheidstest dermal denticles 3D printer

Bron: Eigen figuur



Figuur 58: Nauwkeurigheidsstest dermal denticles 3D printer

Bron: Eigen figuur

Het printen van 4 denticles volgens deze laatste methode duurde 54 minuten maar waren de nauwkeurigste. Omdat de 3D printer niet automatisch zijn feedrate kan aanpassen voor de eindlagen moest dhr. P. Bueken telkens deze handmatig aanpassen. Om ervoor te zorgen dat deze scriptie op tijd getest kan worden is er voor volgende keuze gegaan: printen op 0,2 mm nauwkeurigheid met ventilatie en bovenlagen op 40% feedrate (methode B figuur 57). Het printen van 4 denticles duurt hierbij ongeveer 30 minuten. Het verschil in nauwkeurigheids met deze laatste is nauwelijks op te merken. Later is ook de hoogte van de ribbels op de kop aangepast van 1 mm hoogte naar 2 mm hoogte zodat de nauwkeurigheids verbeterd en de ribbels meer uitgesproken zijn.

5.9.2.3 Dermal denticle huid via Speedo

Hulp invoeren bij Speedo was de back-up oplossing indien er geen sponsoring was vanuit de Hogere Zeevaartschool. Er zou aan Speedo gevraagd kunnen worden voor een vel waarmee ze hun haaienzwempak bekleden. Dit vel zou dan geperforeerd worden met kleine gaatjes waarna dit strak over een plaat zou getrokken worden. Tussen het vel en de plaat zou er dan lucht worden geïnjecteerd. Deze lucht zal door de druk tussen de plaat en het vel, enkel via de kleine geperforeerde gaatjes in het vel ontsnappen. Dit zal zorgen voor kleine bubbeltjes over het vel waarmee we het air bubble lubrication effect kunnen bekomen. Daarmee zou dan ook het effect van air bubble lubrication over een soort van dermal denticle vezel getest worden. Deze manier van testen wordt in deze scriptie niet gebruikt.

5.9.3 De proefopstelling

5.9.3.1 De verschillende concepten

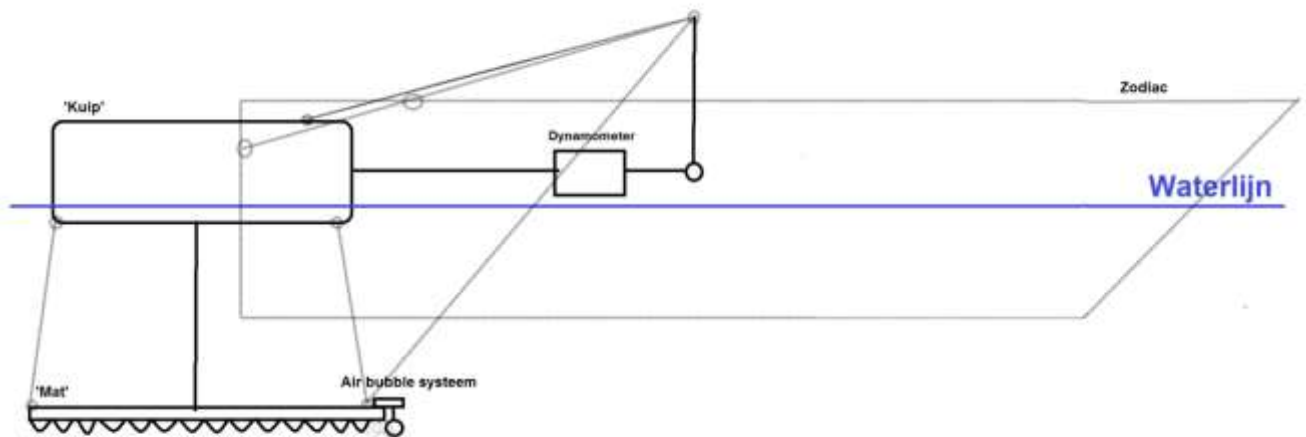
Sleeptank

De makkelijkste en nauwkeurigste manier om de denticle huid te testen is in een speciaal daarvoor voorziene model sleeptank die uitgerust is met de juiste apparatuur. Dit concept ging al snel niet door, door de hoge kosten in de klasse van €15000: zware aandrijfmotoren, personeel, sleeptank, etc. Om testen uit te voeren moest dus een zelfgemaakte proefopstelling ontworpen worden die goedkoper en eveneens zo nauwkeurig mogelijk is.

RIB¹²

Eerst werd er gedacht om testen te doen met een RIB (merk: Zodiac) en hierop de testconstructie te plaatsen. Na enige theoretische conceptwijzigingen bleek dat de nauwkeurigheid om via deze manier te testen niet voldoende zou zijn om veranderingen waar te nemen. Figuur 59 laat het concept zien waarbij aan een kuip de metalen plaat met denticles wordt bevestigd. De problemen die we hiermee zouden ondervinden zijn eindeloos. Zo zou door aan een hogere snelheid te varen de plaat een andere hoek aannemen en daardoor zorgen voor een andere weerstand. Dhr. E. Lataire, een expert in modeltesten, raadde een ander concept aan van testen omdat de weerstand ontwikkeld door de kuip veel te groot zou worden en niet constant is.

¹² Rigid Inflatable Boat



Figuur 59: RIB concept

Bron: Eigen figuur

Testschip

Door de verschillende problemen met een RIB werd er overgegaan naar een groter schip dat voor meer stabiliteit zorgt. Hieronder wordt het concept beschreven voor de installatie op dit schip.

We plaatsen de geprinte 3D matjes van dermal denticles op een niet vervormbare stalen plaat die het gedeelte van de echte romp zal voorstellen. De denticle matten plakken tegen de plaat door de TEC7 Aquastop. De plaat heeft een lengte van 80 cm en een breedte van 40 cm.



Figuur 60: Dermal denticle plaat constructie

Bron: Eigen figuur

De stalen plaat wordt aan de keerzijde bevestigd aan een stalen gestroomlijnde lat loodrecht op de plaat. De bevestiging is lichtjes voor het middelpunt (verhouding $1/3 - 2/3$) van de plaat geplaatst op een dwarse metalen lat. Deze dwarslat zorgt ervoor dat er geen puntbelasting op de plaat wordt uitgeoefend. Aan beide zijden van deze dwarse metalen lat is ook schroefdraad getrokken net zoals in de plaat met denticles. Hier komen kleine bouten die de plaat tegen de dwarse lat aanhouden. Het geeft ons de mogelijkheid om achteraf de plaat los te schroeven en een andere plaat met de zaagtandstructuur (wordt besproken in hoofdstuk 6) of de vlakke test-/referentieplaat te monteren.

De loodrechte lat steekt 50 cm onder het water. Ze is stevig genoeg om eigentrillingen ontstaan door het voorttrekken van de plaat door het water tegen te gaan. Waar deze lat boven het water uitsteekt, is een horizontale metalen buis gelast die aan boord van het schip - waarmee voortgetrokken wordt - steunt op lagers met behulp van een stalen as. Deze lagers zijn bedoeld om de rotatieweerstand van de steun zo min mogelijk te houden. Vanaf de lager steekt de horizontale buis 1,4 meter over het water tot de verticale lat, dit om turbulenties veroorzaakt door de romp van het testschip te vermijden. De horizontale buis steekt 0,7 meter in het schip tot de dynamometer. De verhouding in lengte over boord en aan boord van de horizontale buis zorgt ervoor dat de horizontale kracht die we meten met de dynamometer 2 keer zo groot wordt. De kleinste weerstandsverandering kan hierdoor makkelijker waargenomen worden.



Figuur 61: Materiaal voor het testschip concept

Bron: Eigen figuur

Doordat we aan verschillende snelheden testen, zal de plaat in het water naar achter getrokken worden door de wrijvingsweerstand van het water over de plaat. De horizontale buis zal in het schip hierdoor naar de boeg willen bewegen maar doordat deze aan zijn uiteinde is bevestigd aan de stationaire dynamometer wordt er kracht op deze uitgeoefend. Door het verschil in kracht te meten aan verschillende snelheden met de verschillende bevestigde platen (vlakke plaat als basisweerstand, zaagtandstructuur en dermal denticles alle drie met en zonder air bubble lubrication) kan het weerstandsverschil tussen deze waargenomen worden. Het doel is om te weten te komen of de weerstandvermindering bij de combinatie van air bubble lubrication en de verschillende oppervlaktestructuren mogelijk is en hoeveel deze dan zou bedragen.

We maken dus geen gebruik van een bewegende robotarm omwille van de kostprijs en omdat deze de kronkelende beweging van de haai voorstelt in tegenstelling tot de scheepsromp dat een statisch oppervlak is.



Figuur 62: Overzicht constructie aan/over boord

Bron: Eigen figuur



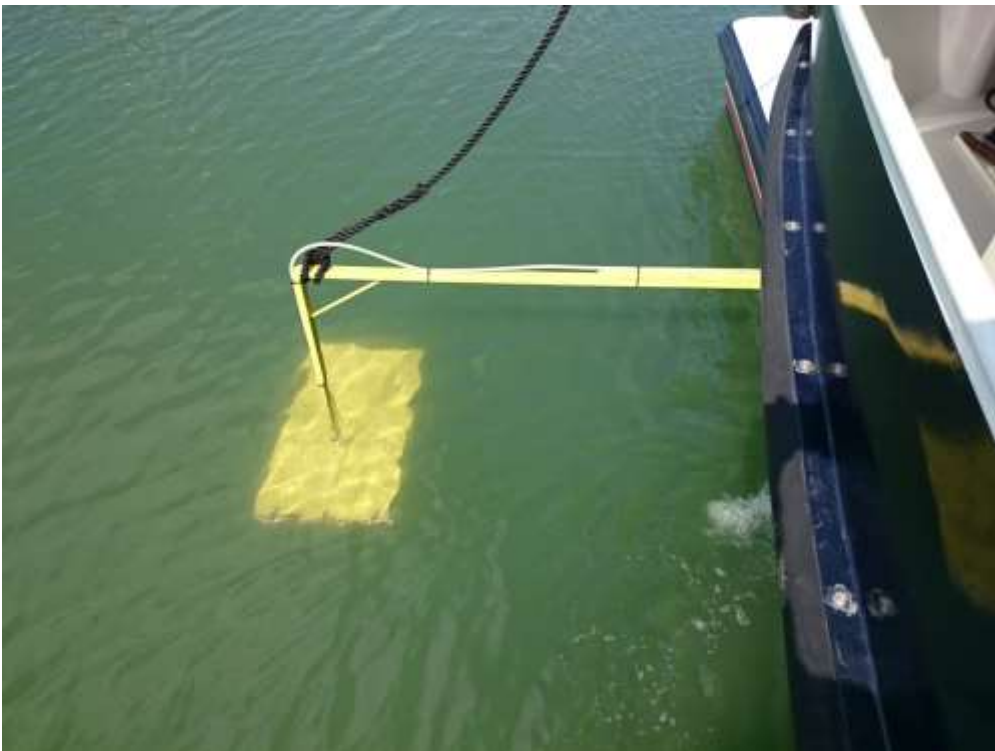
Figuur 63: Detail constructie met lager boven en onder + extra versterking

Bron: Eigen figuur



Figuur 64: Overzicht opstelling aan boord met dynamometer

Bron: Eigen figuur



Figuur 65: Constructie over boord

Bron: eigen figuur

5.9.3.2 Bijkomend materiaal

Dynamometer

Omdat het tasten in het duister is om een schatting van de krachten te maken zijn er 2 digitale dynamometers ter beschikking. De meeteenheden zijn kilogram, newton of pond. Het speciale aan deze dynamometers is dat ze zijn uitgerust met een dier weeg functie. Er worden 16 metingen gedaan in 3 seconden en hiervan een gemiddelde genomen. Dit resulteert in een stabielere aflezing zonder dat de metingen heen en weer verspringen. Dit kan handig zijn tijdens de metingen omdat we hier ook met wisselende krachten te maken hebben. [33]

1. De KERN HDB 5K5N. Deze heeft een bereik tot 5 kg met aflezing van 5 g.



Figuur 66: KERN HDB 5K5N

Bron: Eigen figuur

2. De KERN HCB/HCN 50K20. Deze heeft een bereik tot 50 kg met aflezing van 20 g.



Figuur 67: KERN HCB/HCN 50K20

Bron: Eigen figuur

Compressor

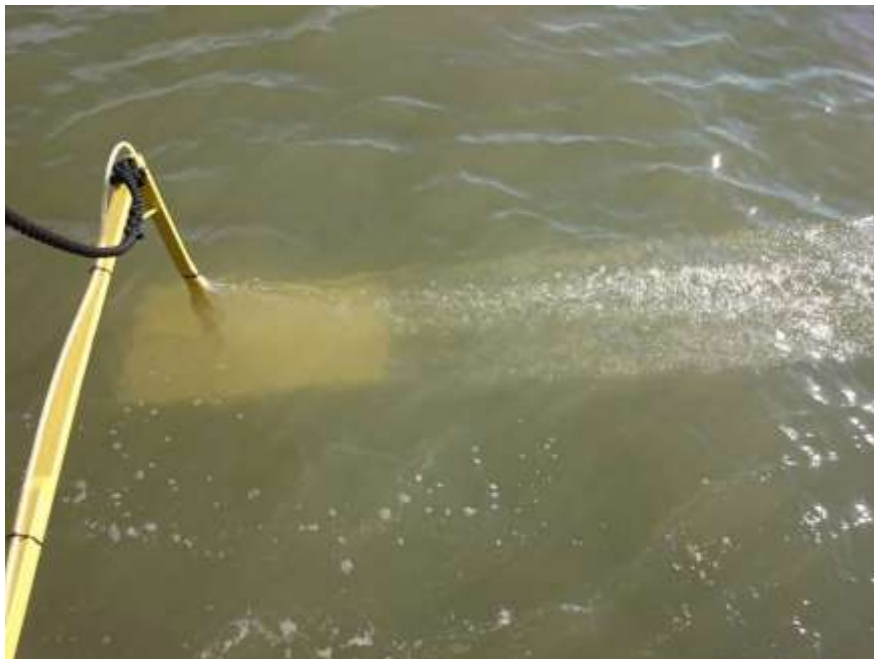
De compressor is een regelbare druk compressor die voor het effect van air bubble lubrication moet zorgen. De uitgang van de compressor is verbonden met een koperen buis bestaande uit zeer fijn geboorde gaatjes die horizontaal is bevestigd vooraan aan de voortgetrokken plaat. Deze buis zorgt ervoor dat de luchtbelletjes gevormd worden en deze verspreid zijn over de volledige breedte van de plaat. Via scharnieren kan de juiste hoogte van deze buis bepaald worden.

5.9.4 De proef

De proef wordt uitgeoefend aan verschillende snelheden. Aangezien we testen uitvoeren met denticles zoals ze kunnen gevonden worden aan boord van schepen moeten de snelheden dus overeenstemmen met de snelheden die koopvaardij schepen halen. De snelheid werd echter gelimiteerd tot 11,5 km/h omdat bij hogere snelheden de stalen as begon te plooiën en de meetwaarden bijzonder onstabiel werden. Deze schade werd gedurende het testen hersteld door onder meer ook een extra steunas te lassen. De gemeten snelheden worden bekomen via de GPS. Er werd gestart met de motoren in neutrale stand. Dit werd gedaan om de stroomsnelheid te meten.

De testen werden gestart met een vlakke plaat waarbij aan een bepaalde snelheid zowel resultaten met air bubble lubrication als zonder werden gemeten. Dit werd bekomen door telkens de toevoerslang met perslucht al dan niet los te koppelen. Na bij alle snelheden te hebben gemeten, werd de plaat vervangen door de plaat met dermal denticles en hierna ook met de zaagtandstructuur (zie hoofdstuk 6). Hier werd dezelfde procedure toegepast.

De test werd uitgeoefend op een rustige en kalme Scheldemonding, als dichtheid van het water nemen we 1025 kg/m^3 . De temperatuur van het water tijdens de testen bedroeg $9 \text{ }^\circ\text{C}$.



Figuur 68: Proef met plaat en air bubble lubrication

Bron: Eigen figuur

5.9.5 De resultaten

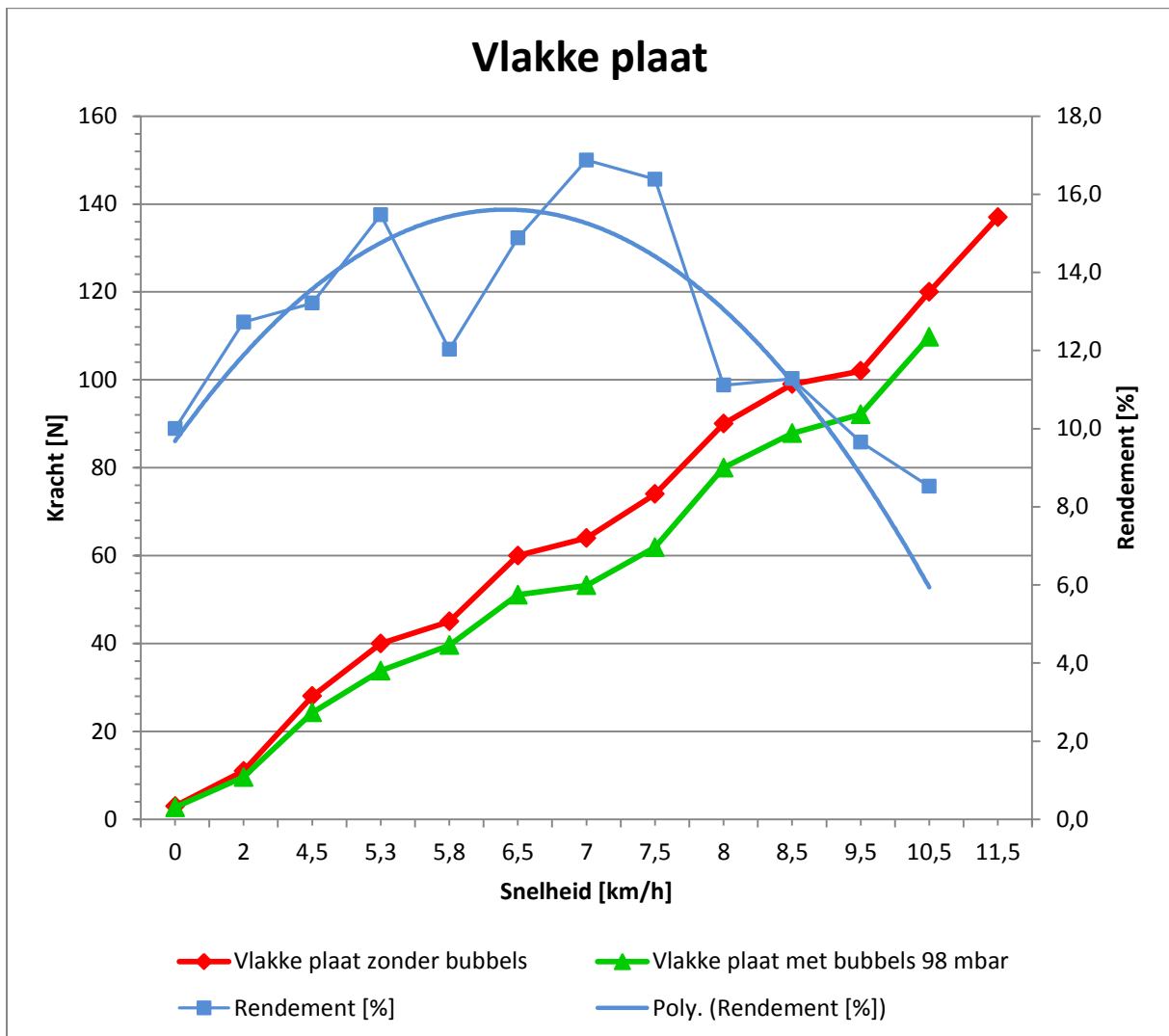
Resultaat testen met de vlakke plaat met en zonder air bubble lubrication:

Snelheid [km/h]	Kracht vlakke plaat zonder air bubble lubrication [N]	Kracht vlakke plaat met air bubble lubrication 98 mbar [N]	Rendement [%]
0	3	3	10,0
2,0	11	10	12,7
4,5	28	24	13,2
5,3	40	34	15,5
5,8	45	40	12,0
6,5	60	51	14,9
7,0	64	53	16,9
7,5	74	62	16,4
8,0	90	80	11,1
8,5	99	88	11,3
9,5	102	92	9,7
10,5	120	110	8,5
11,5	137		

Tabel 12: Resultaten van testen vlakke plaat

Bron: Eigen tabel

Grafiek testen met de vlakke plaat met en zonder air bubble lubrication:



Figuur 69: Resultaat testen vlakke plaat

Bron: Eigen figuur

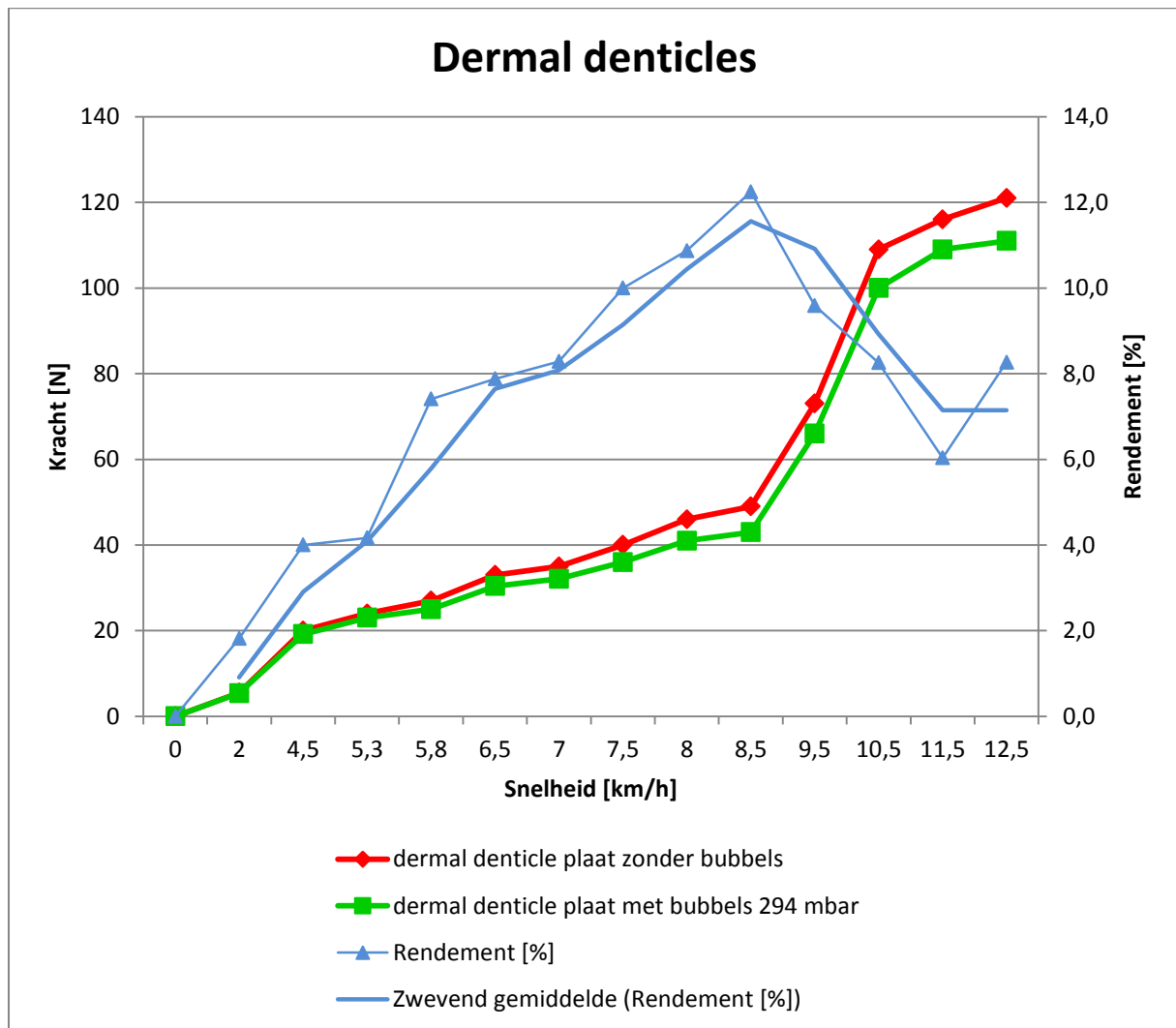
Resultaat testen met dermal denticles met en zonder air bubble lubrication:

Snelheid [km/h]	Kracht dermal denticles zonder air bubble lubrication [N]	Kracht dermal denticles met air bubble lubrication 294 mbar [N]	Rendement [%]
0	0	0	0,0
2,0	5,5	5	4,0
4,5	20	19	4,2
5,3	24	23	7,4
5,8	27	25	7,9
6,5	33	30	8,3
7,0	35	32	10,0
7,5	40	36	10,9
8,0	46	41	12,2
8,5	49	43	9,6
9,5	73	66	8,3
10,5	109	100	6,0
11,5	116	109	8,3
12,5	121	111	

Tabel 13: Resultaten van testen dermal denticles

Bron: Eigen tabel

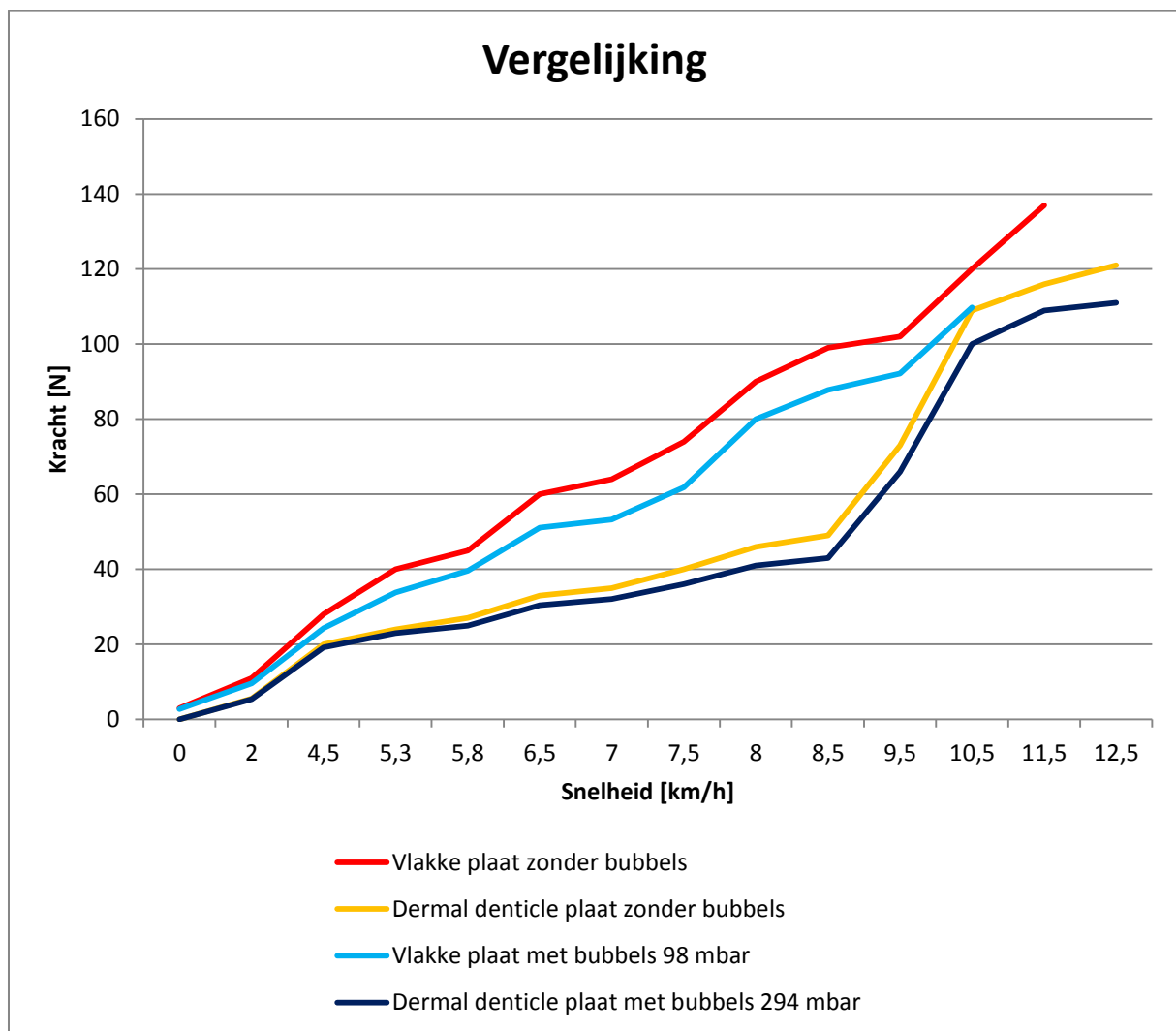
Grafiek testen met de dermal denticles met en zonder air bubble lubrication:



Figuur 70: Resultaat testen dermal denticles

Bron: Eigen figuur

Vergelijking tussen alle gegevens van de vlakke plaat en dermal denticles:



Figuur 71: Vergelijking tussen vlak en dermal denticles

Bron: Eigen figuur

Rendement tussen vlakke plaat zonder bubbels en dermal denticle plaat zonder bubbels:

Snelheid [km/h]	Kracht vlakke plaat zonder air bubble lubrication [N]	Kracht dermal denticle structuur zonder air bubble lubrication [N]	Rendement zonder air bubble lubrication [%]
0	3	0	100,0
2,0	11	5,5	50,0
4,5	28	20	28,6
5,3	40	24	40,0
5,8	45	27	40,0
6,5	60	33	45,0
7,0	64	35	45,3
7,5	74	40	45,9
8,0	90	46	48,9
8,5	99	49	50,5
9,5	102	73	28,4
10,5	120	109	9,2
11,5	137	116	15,3
12,5		121	

Tabel 14: Vergelijking vlak/dermal denticle zonder air bubbels

Bron: eigen tabel

Rendement tussen vlakke plaat zonder bubbels en dermal denticle plaat met bubbels 294

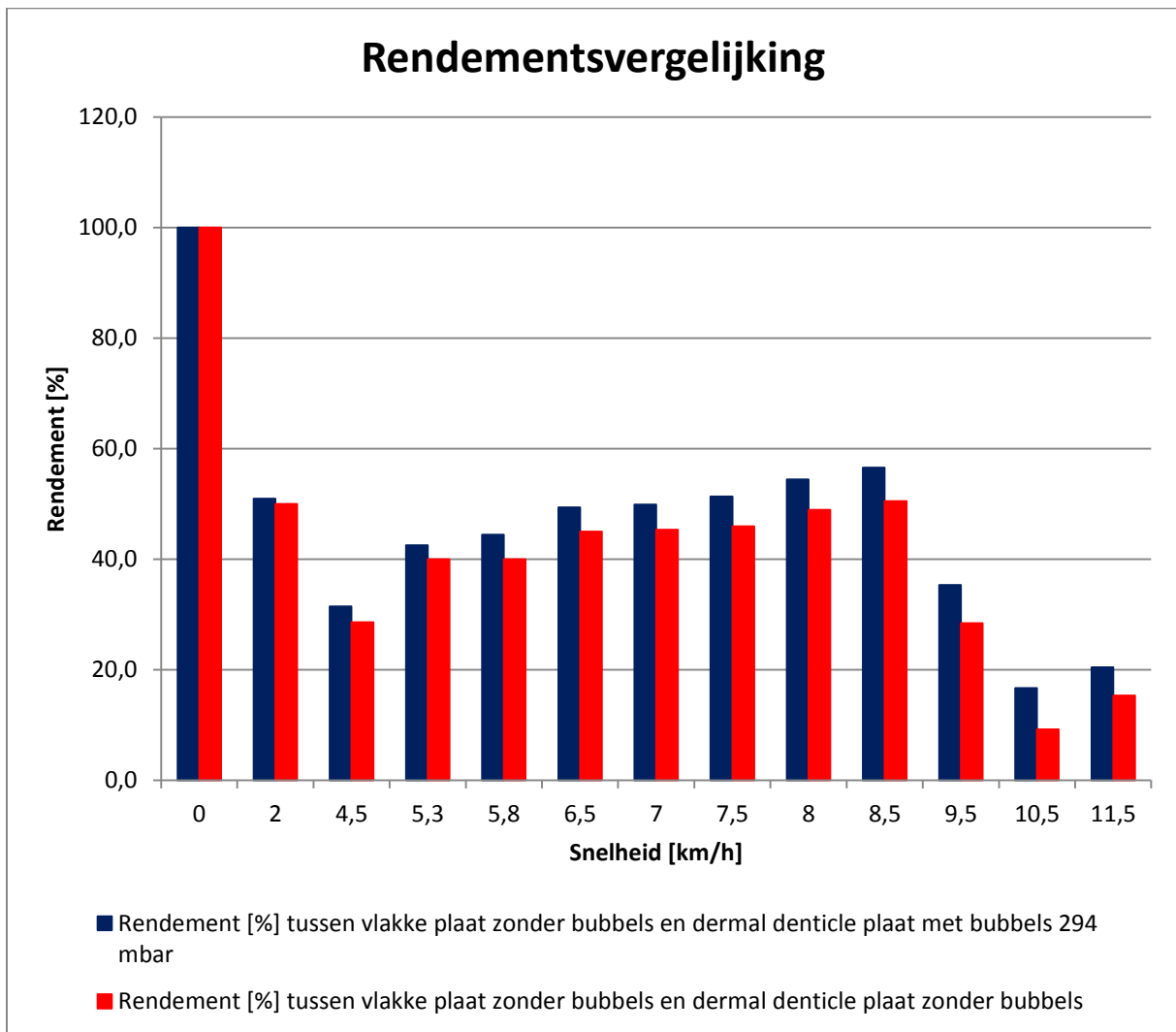
mbar:

Snelheid [km/h]	Kracht vlakke plaat zonder air bubble lubrication [N]	Kracht dermal denticle structuur met air bubble lubrication 294 mbar [N]	Rendement tussen 294 mbar en zonder air bubble lubrication [%]
0	3	0	100,0
2,0	11	5	50,9
4,5	28	19	31,4
5,3	40	23	42,5
5,8	45	25	44,4
6,5	60	30	49,3
7,0	64	32	49,8
7,5	74	36	51,4
8,0	90	41	54,4
8,5	99	43	56,6
9,5	102	66	35,3
10,5	120	100	16,7
11,5	137	109	20,4
12,5		111	

Tabel 15: Vergelijking vlak/dermal denticle met air bubbles

Bron: Eigen tabel

Grafiek rendementsvergelijking:



Figuur 72: Rendementsvergelijking vlak/dermal denticle

Bron: Eigen figuur

5.9.6 De vaststellingen en besluiten uit de resultaten

Vlakke plaat

We stellen vast dat de weerstand vrij lineair toeneemt met de snelheid, althans in ons gemeten snelheidsgebied. Bij het gebruik van air bubble lubrication noteren we een beduidende winst op vlak van weerstand. Hierdoor komt de weerstandsgrafiek met air bubble lubrication lager te liggen. De afname is echter relatief: de rendementsgrafiek laat duidelijk zien dat het hoogste rendement van 16,9% bereikt wordt bij 7 km/h. De polygoon maakt duidelijk dat bij lagere en hogere snelheden het rendement beduidend afneemt. Dit fenomeen moeten we echter interpreteren, aangezien de beide curves ongeveer dezelfde afstand van elkaar behouden. Dit betekent dat eenzelfde verschil bij hogere snelheden een lager rendementspercentage weergeeft. Anderzijds stellen we vast dat tot een snelheid van 4,5 km/h de curves samenvallen. Rendementswijze gezien boeken we een mooie winst ($\pm 12\%$) maar de effectieve weerstandsverbetering is echter klein. Een duidelijker en constant verschil tussen de 2 curves is merkbaar vanaf 6,5 km/h.

We berekenen in ons meetspectrum een gemiddelde rendmentsverbetering van 12,7%.

Dermal denticles

De weerstandswaarde van de plaat met denticles is in een eerste fase (tot 4 km/h) zacht tot normaal stijgend, vergelijkbaar met de testen met de vlakke plaat. Echter, vanaf 4 km/h neemt de weerstand nog amper toe tot een snelheid van 8,5 km/h. Dan schieten de weerstandswaarden plots omhoog tot 10,5 km/h, waarboven ze weer een veel vlakkere stijging kennen.

Opvallend aan de meetresultaten is dat de curve van de plaat zonder en met air bubbles zeer nauw samenloopt, maar dan met opnieuw de vaststelling dat de waarden met air bubble lubrication weerom lager liggen dan zonder. We berekenen een gemiddelde weerstandsvermindering van 7,1% met air bubble lubrication.

Bij het bestuderen van de rendementscurve merken we dat het rendement bijna rechtlijnig toeneemt tot 12,2% bij 8,5 km/h. Boven deze snelheid vermindert de winst snel tot 6% bij 11,5 km/h, maar eenmaal voorbij deze snelheid merken we dat het rendement opnieuw

toeneemt tot de maximale sleepsnelheid bereikt werd. Boven deze snelheid bleken veel trillingen op te treden, vermoedelijk te wijten aan de constructie van de meetopstelling.

Vergelijking vlakke plaat en dermal denticles

We stellen vast dat de weerstandsmetingen met de dermal denticles veel lager liggen dan bij de vlakke plaat ($\pm 10\%$ bij 10,5 km/h) en zelfs de ribbelstructuur ($\pm 3\%$ bij 10,5 km/h).

Weerstand bij 10,5 km/h: vlakke plaat = 110 N, ribbelstructuur = 103 N en denticles = 100 N.
(Telkens met air bubbels)

Ten opzichte van de vlakke plaat merken we dat de dermal denticles zonder en vooral met air bubbles tot een snelheid van 8,5 km/h een aanzienlijke en toenemende rendementsverbetering kent. Dit zou te wijten kunnen zijn aan een optimale werveling veroorzaakt door de dermal denticles. Dit werveleffect dient uiteraard nog verder onderzoek. Tussen 8,5 en 10,5 km/h is er een relatieve winstvermindering waarschijnlijk veroorzaakt door vermoedelijke verminderde wervelwerking. Boven de 10,5 km/h lijkt het effect van de denticlestructuur opnieuw te verbeteren ten opzichte van de vlakke plaat.

Onderzoek naar de wervelingseffecten door denticles moet dus uiteraard nog verder onderzocht worden in een verder gespecialiseerd onderzoek.

6 Ribbelstructuur



Figuur 73: Zaagtandstructuur 3D geprint

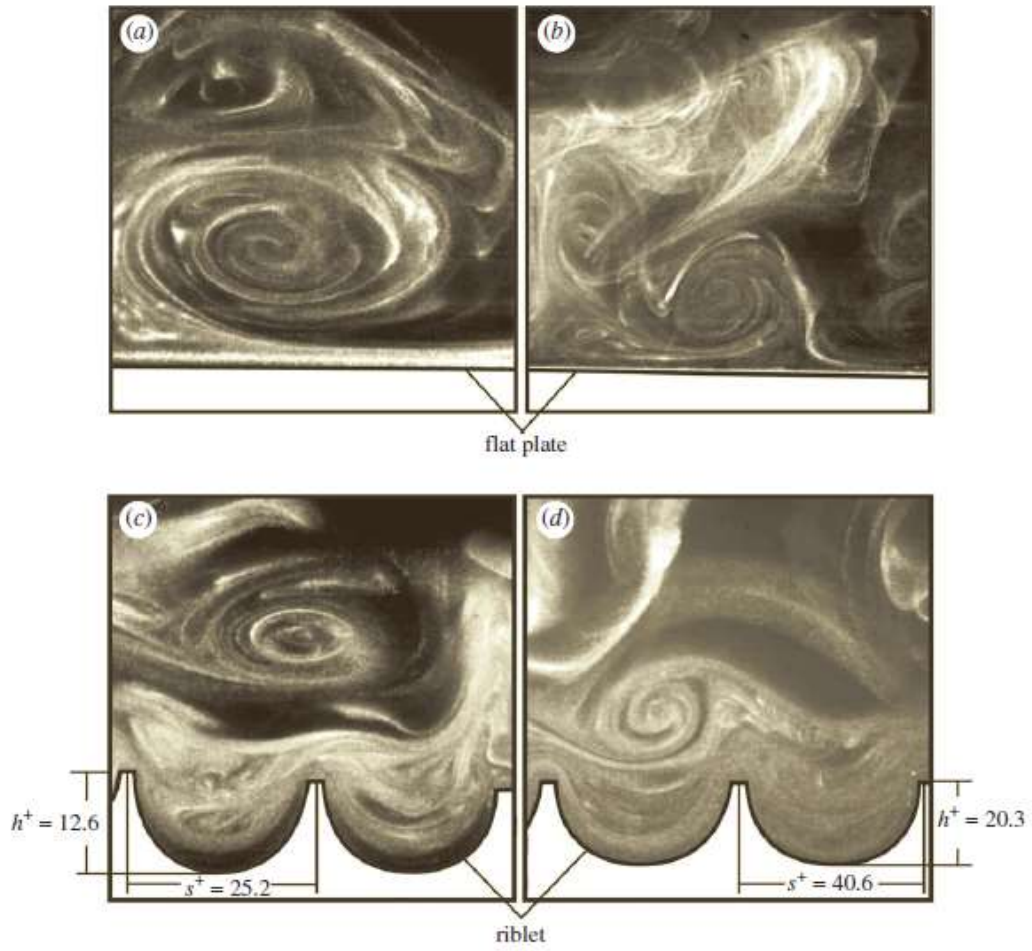
Bron: Eigen figuur

6.1 Inleiding

Wanneer het onderzoek naar de combinatie van air bubble lubrication en dermal denticles is afgelopen, kan er nagaan worden wat het effect is van air bubble lubrication met een ribbelstructuur van de romp. De ribbelstructuur is in tegenstelling tot de dermal denticles eenvoudiger te maken. Om het onderzoek vlot uit te voeren is het belangrijk om toch een idee te hebben hoe het principe van een ribbelstructuur nu juist werkt. Eens we dit onder de knie hebben kan men air bubbels toevoegen en het effect ervan bestuderen.

6.2 Principe

Bij het gebruik van dermal denticles vergroot men het oppervlak van het natte gedeelte van de romp. Zoals we al eerder besproken hebben zal dit dus resulteren in een hogere wrijvingsweerstand van het water. Bij het gebruik van de ribbelstructuur zullen vortexen zich boven de ribbelstructuur vormen. Ze zullen enkel met hun vortex tippen de rug van de ribbels raken. In het dal van de ribbel zal zich geen grote versnelling van de stroom voordoen wat resulteert in minder wrijvingsweerstand. De enige plaats waar de weerstand zal optreden zal op de tippen van de ruggen zijn. Hoewel het merendeel van de vortexen zich boven de ruggen houden, kan het toch zijn dat een vortex een andere tweede vortex creëert en deze een dal betreedt. Deze tweede vortex zorgt voor een kleine verhoging in weerstand maar is te verwaarlozen. Wanneer men dit principe vergelijkt met een vlakke plaat merkt men dat de stroomafwijkingen in een dal van de ribbelstructuur veel kleiner is als de stroomafwijkingen boven een vlakke plaat. Door de lage stroomafwijkingen zal de wrijvingsweerstand aan het oppervlak lager zijn en zal het effect van een groter nat oppervlak geminimaliseerd worden. Op figuur 74 is duidelijk ten zien waar de vortexen zich bevinden zowel boven een vlakke plaat als de ribbelstructuur. Heel duidelijk op te merken is de robuuste beweging van de vortexen boven een vlakke plaat. [9]



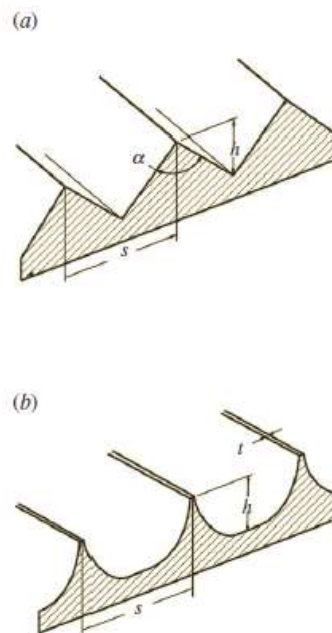
Figuur 74: Turbulentievoorstelling vlakke plaat/ribbelstructuur

Bron: [9]

6.3 Soorten en eigenschappen van de structuren

Bij het onderzoek is het belangrijk om te weten wat de hoogte en de afstand moeten zijn van deze ribbels om een optimaal effect te verkrijgen. Aangezien er hiernaar al uitgebreid onderzoek is geweest met hoogstaande apparatuur ligt het voor de hand om deze gegevens te raadplegen en te gebruiken voor dit onderzoek. Er bestaan 2 structuren: [9]

1. De zaagtandstructuur. Figuur 75 laat in (a) deze structuur zien. De optimale hoek ' α ' tussen de tanden bedraagt hierbij 54° , de beste verhouding tussen hoogte 'h' en breedte tussen de ribbels 's' wordt weergegeven via volgende verhouding $\frac{h}{s} = 0,98$. De weerstandsvermindering van deze structuur bedraagt 5%.
2. De geschulpte structuur. In (b) wordt deze structuur weergegeven. Er is al veel onderzoek naar gedaan maar een optimale structuur is moeilijk te bepalen. Er wordt vaak van uit gegaan dat de verhouding $\frac{h}{s}$ optimaal is bij 0,5 - 0,7. Ideaal is wanneer de tip dun en scherp is maar sommige testen met brede tippen gaven ook een goed resultaat. De weerstandsvermindering bedraagt ongeveer 6,5%.



Figuur 75: Onderscheid zaagtandstructuur (a) en geschulpte structuur (b)

Bron: [9]

6.4 Toepassingen

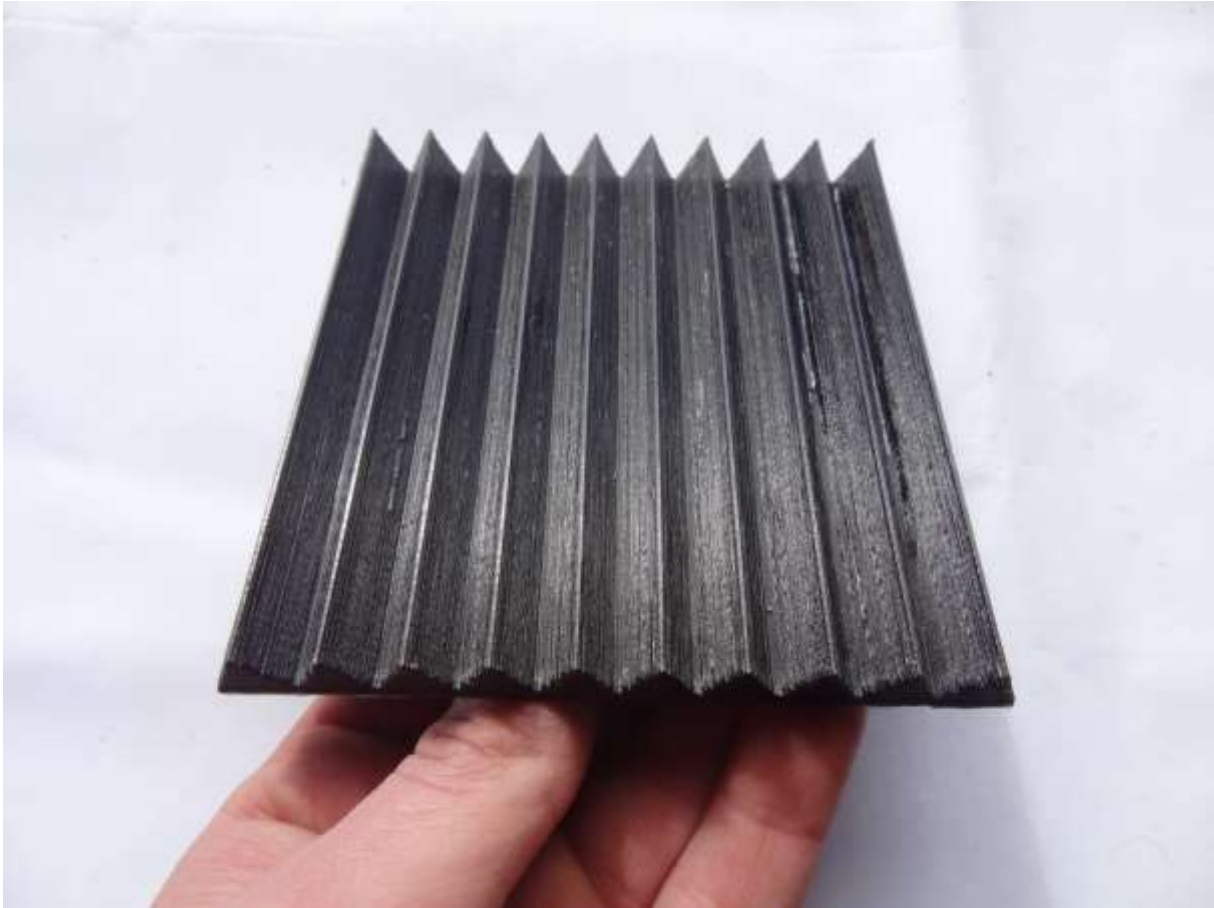
De ribbelstructuur kent in tegenstelling tot dermal denticles vele gebieden waar het in wordt toegepast. Dit omdat het onderzoek naar ribbels van al veel vroeger dateert, voor het eerste onderzoek naar dermal denticles plaatsvond. In de jaren tachtig werd de zaagtandstructuur gebruikt op scheepsrompen voor races. In de Olympische spelen werd het gebruikt als toepassing op zeilboten. Ook bekende vliegtuigmaatschappijen zoals Boeing en Airbus hebben al uitgebreid met deze structuur getest. Hoewel de testen positief waren komt men ze nog niet tegen op commerciële vliegtuigen. Hiervoor moet het via een langdurend proces goedgekeurd worden. Niet alle plaatsen op een vliegtuig mogen bedekt zijn. Zo moeten ruiten, locaties voor antivries, tankopeningen, etc. vrijgelaten worden. [9]

6.5 De uitgevoerde stappen voor het testen

We maken gebruik van de zaagtandstructuur (figuur 75 model a) omdat hiervan de vorm op punt staat zodat er niet constant van vorm moet veranderd worden. In deze scriptie zullen we voor de hoogte en breedte 1 cm nemen, dit stemt overeen met de optimale verhouding tussen beide.

6.5.1 Van 2D tekening naar fysiek 3D model

Ook hier worden dezelfde stappen toegepast als bij dermal denticles. Dhr. P. Bueken heeft een STL-bestand kunnen maken van deze zaagtandstructuur en kon hiermee snel een 10 op 10 cm plaatje printen met de 3D printer. De nauwkeurigheid van de print bedroeg 0,2 mm. Er werden 2 concepten van het plaatje gemaakt. Een plaatje zonder opstaande rand en een plaatje met opstaande rand. Het eerste plaatje kan dienen om mallen mee te maken in een ander materiaal. Het tweede plaatje dient om als mal gebruikt te worden. Aangezien we geen gebruik maken van de dure malrubber werd het plaatje met opstaande rand niet geprint. We gebruiken dus het eerste plaatje om afdrucken te nemen in een materiaal.



Figuur 76: Zaagtandstructuur 3D geprint

Bron: Eigen figuur

Voor het materiaal werd klei gekozen omdat dit het goedkoopste alternatief was. Er bestaan verschillende soorten klei met ook hier weer verschillende problemen. Verdere informatie is verkregen via een specialiste in klei. Vooreerst is klei (de boetseerklei en andere aanverwanten) niet het geschikte medium om een mal te maken, gezien klei wanneer het opdroogt afhankelijk van de soort een krimpingseffect heeft. De kans is dus groot dat het een licht vervormingseffect geeft. Dit is afhankelijk van de vochtigheidsgraad die jammer genoeg niet overal egaal is op bepaalde plaatsen van de gebruikte klei. Klei eenmaal droog breekt gemakkelijk of kan barsten vertonen. Hoe natter je de klei maakt, hoe moeilijker te bewerken doordat het kleeft en hoe groter het krimpingspercentage. Klei absorbeert ook gemakkelijk de producten die je erop wrijft of giet en kent een hoog hechtingsgedrag eenmaal droog. In bijlage kan informatie gevonden worden over klei. Doch is er ondanks bovenstaande tegenargumenten toch voor klei gekozen (zie figuur 77). Eens we enkele afdrukken in de klei hebben kan de klei opdrogen en kan er later plaaster over gegoten

worden. Plaaster laten we dan drogen waarna we de klei breken. Wat overblijft, is de plaaster die vernist moet worden zodat het geen water kan absorberen waarna het op de metalen plaat kan bevestigd worden.



Figuur 77: Gebruikte klei

Bron: Eigen figuur

Een afdruk maken van het plaatje met zaagtandstructuur in klei bleek achteraf niet te lukken. De klei bleef aan het plaatje hangen en kwam met veel moeite, vervormd los (zie figuur 78).



Figuur 78: Beste resultaat uit klei afdruk

Bron: Eigen figuur

Als oplossing werd gekozen om de zaagtandstructuur te frezen uit hard hout. Schrijnwerker Ronald François BVBA uit Vollezele zag het zitten om een frees te ontwikkelen die de juiste vorm heeft. Dit moest gebeuren omdat er geen frezen bestaan die een hoek van 54° maken. Met enige hulp hebben we samen de freesvorm kunnen maken die voldoet aan deze eisen. Het metalen plaatje werd voorzien van een speciale geslepen hoek die de scherppte geeft. Hierna werd deze vastgeklemd in een draaiende as. Deze as werd dan aan 11000 toeren per minuut aan het draaiën gebracht. Amerikaanse eiken planken van 15 cm in breedte werden langs dit slingerende metalen plaatje geschoven die het hout freesde tot de gewilde zaagtandstructuur.

De planken werden achteraf opgeschuurd, op maat afgezaagd en met verschillende lagen gele verf bespoten zodat een glad oppervlak verkregen werd. Eens gedroogd werden ze met bouwlijm op de metalen plaat gekleefd waarna ze 12 uur konden drogen. Om ervoor te zorgen dat de air bubbles niet aan de rand van de plaat zouden ontsnappen, werd een latje aan beide zijden vast geschoten (zie figuur 79).



Figuur 79: Ribbestruktuur plaat

Bron: Eigen figuur

6.5.2 De proef en resultaten

Omdat het principe van de proef net dezelfde is als bij dermal denticles wordt deze hier niet meer besproken (zie hiervoor hoofdstuk 5.9.4). De zaagtandstructuur wordt al dan niet gecombineerd met air bubble lubrication waarvan de resultaten hieronder worden weergegeven. Er werd getest met hoge druk (294 mbar) en lage druk (98 mbar) om het effect van de toegevoerde hoeveelheid lucht geleverd door de compressor op de zaagtandstructuur te testen. Omdat bij 98 mbar de rendementsvermindering lager ligt, worden in figuur 76 de resultaten van 294 mbar uitgelicht.

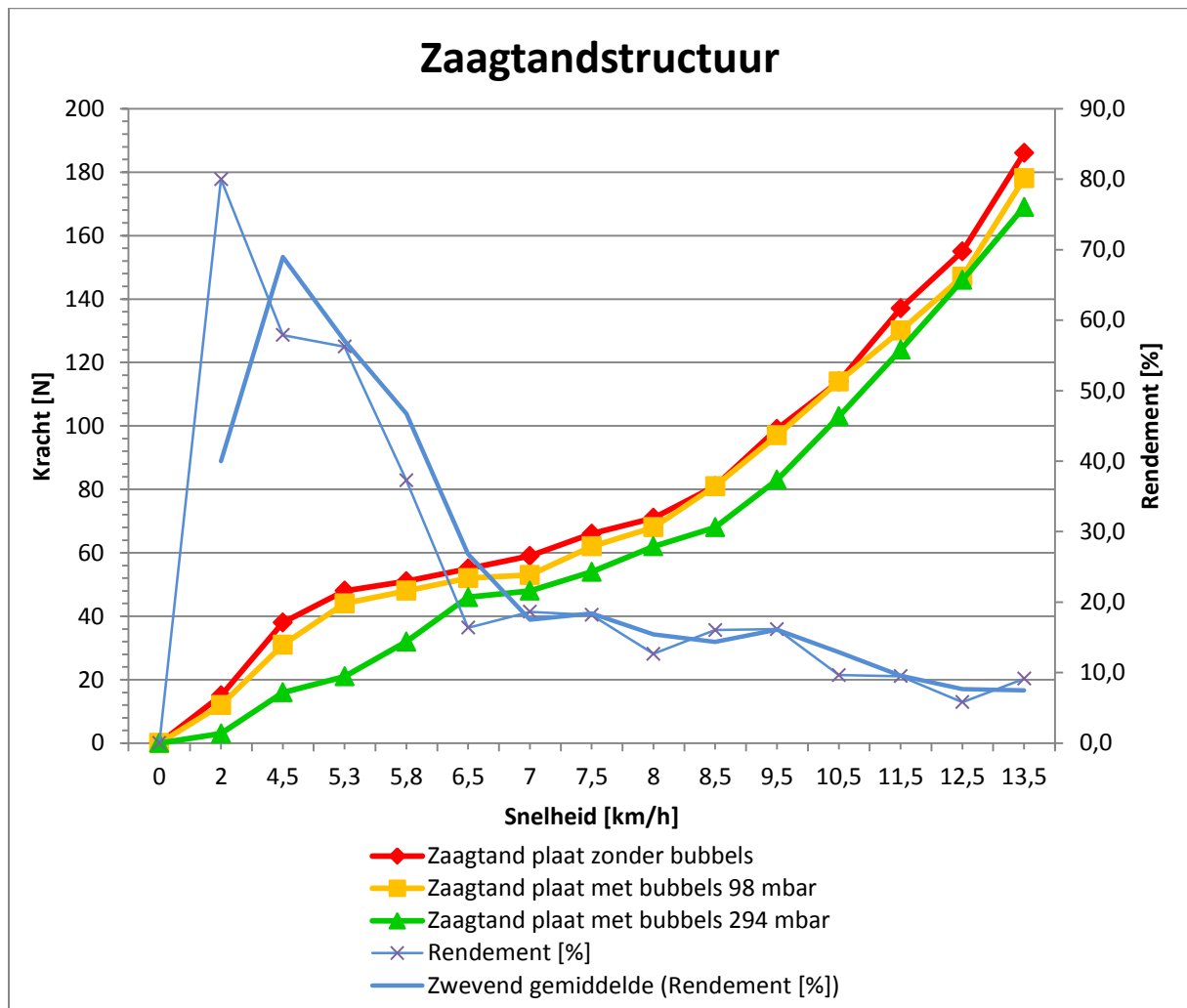
Resultaat testen met de zaagtandstructuur met en zonder air bubble lubrication:

Snelheid [km/h]	Kracht zaagtand structuur zonder air bubble lubrication [N]	Kracht zaagtand structuur met air bubble lubrication 98 mbar [N]	Kracht zaagtand structuur met air bubble lubrication 294 mbar [N]	Rendement tussen 284 mbar en zonder bubble [%]
0	0	0	0	0,0
2,0	15	12	3	80,0
4,5	38	31	16	57,9
5,3	48	44	21	56,3
5,8	51	48	32	37,3
6,5	55	52	46	16,4
7,0	59	53	48	18,6
7,5	66	62	54	18,2
8,0	71	68	62	12,7
8,5	81	81	68	16,0
9,5	99	97	83	16,2
10,5	114	114	103	9,6
11,5	137	130	124	9,5
12,5	155	147	146	5,8
13,5	186	178	169	9,1

Tabel 16: Resultaten van testen zaagtandstructuur

Bron: Eigen tabel

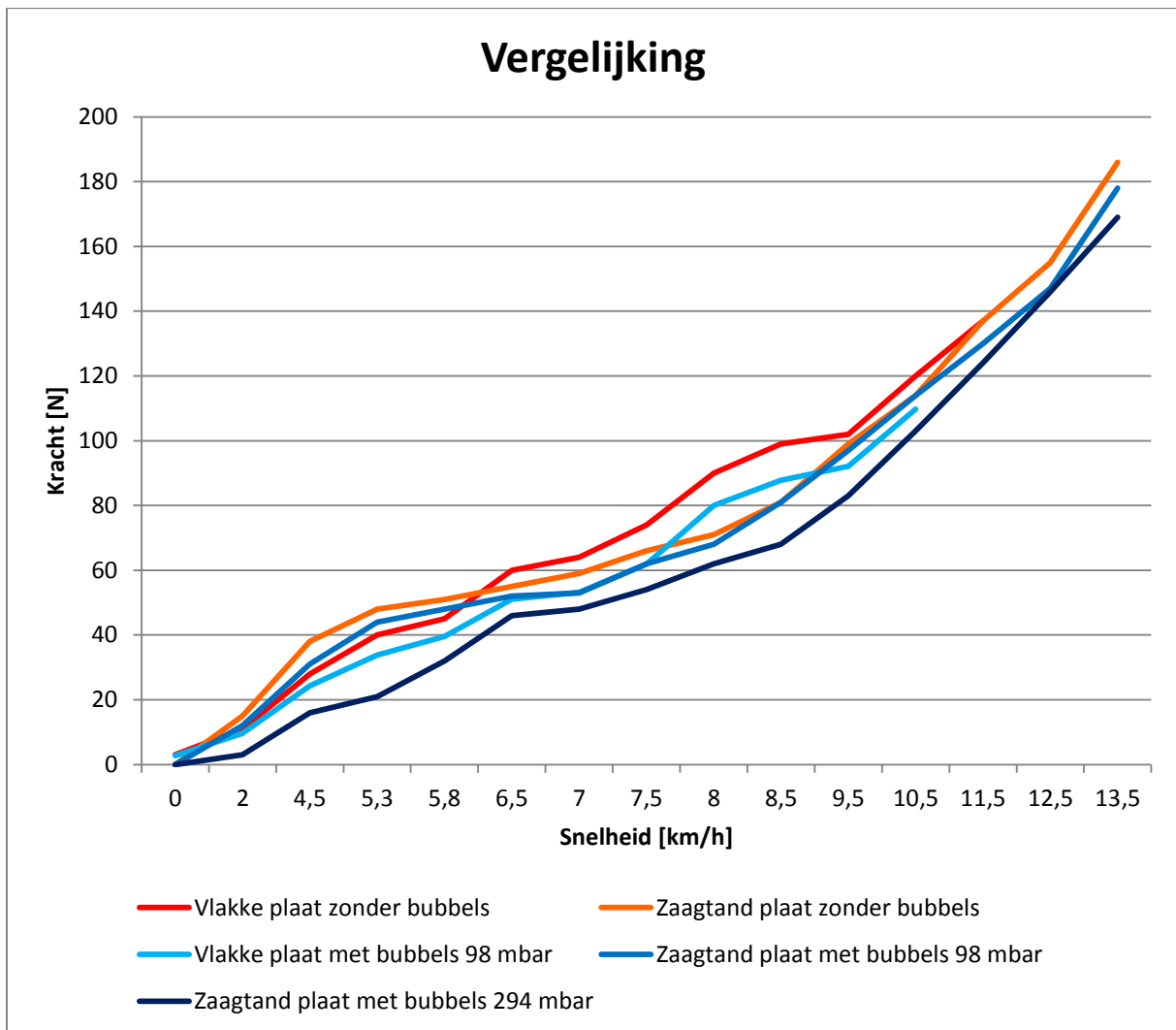
Grafiek testen met de zaagtandstructuur met en zonder air bubble lubrication:



Figuur 80: Resultaat testen zaagtandstructuur

Bron: Eigen figuur

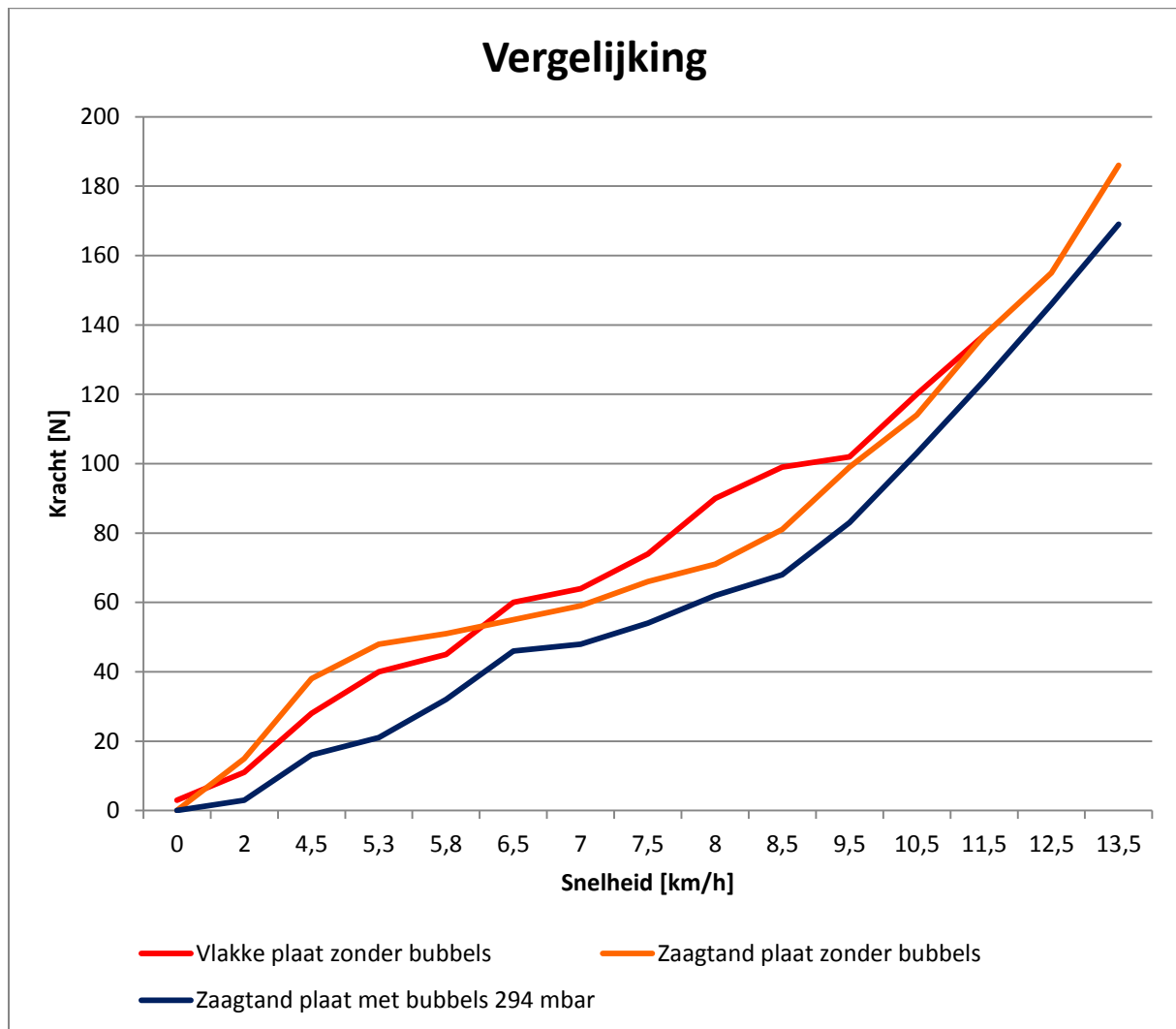
Vergelijking tussen alle gegevens van de vlakke plaat en zaagtandstructuur:



Figuur 81: Vergelijking tussen vlak en ribbels

Bron: Eigen figuur

Vergelijking tussen uitgelichte gegevens van de vlakke plaat en zaagtandstructuur:



Figuur 82: Vergelijking uitgelicht

Bron: Eigen figuur

Rendement tussen vlakke plaat zonder bubbels en zaagtand plaat zonder bubbels:

Snelheid [km/h]	Kracht vlakke plaat zonder air bubble lubrication [N]	Kracht zaagtand structuur zonder air bubble lubrication [N]	Rendement zonder air bubble lubrication [%]
0	3	0	100,0
2,0	11	15	-36,4
4,5	28	38	-35,7
5,3	40	48	-20,0
5,8	45	51	-13,3
6,5	60	55	8,3
7,0	64	59	7,8
7,5	74	66	10,8
8,0	90	71	21,1
8,5	99	81	18,2
9,5	102	99	2,9
10,5	120	114	5,0
11,5	137	137	0,0
12,5		155	
13,5		186	

Tabel 17: Rendement vlak/ribbel zonder air bubbles

Bron: Eigen tabel

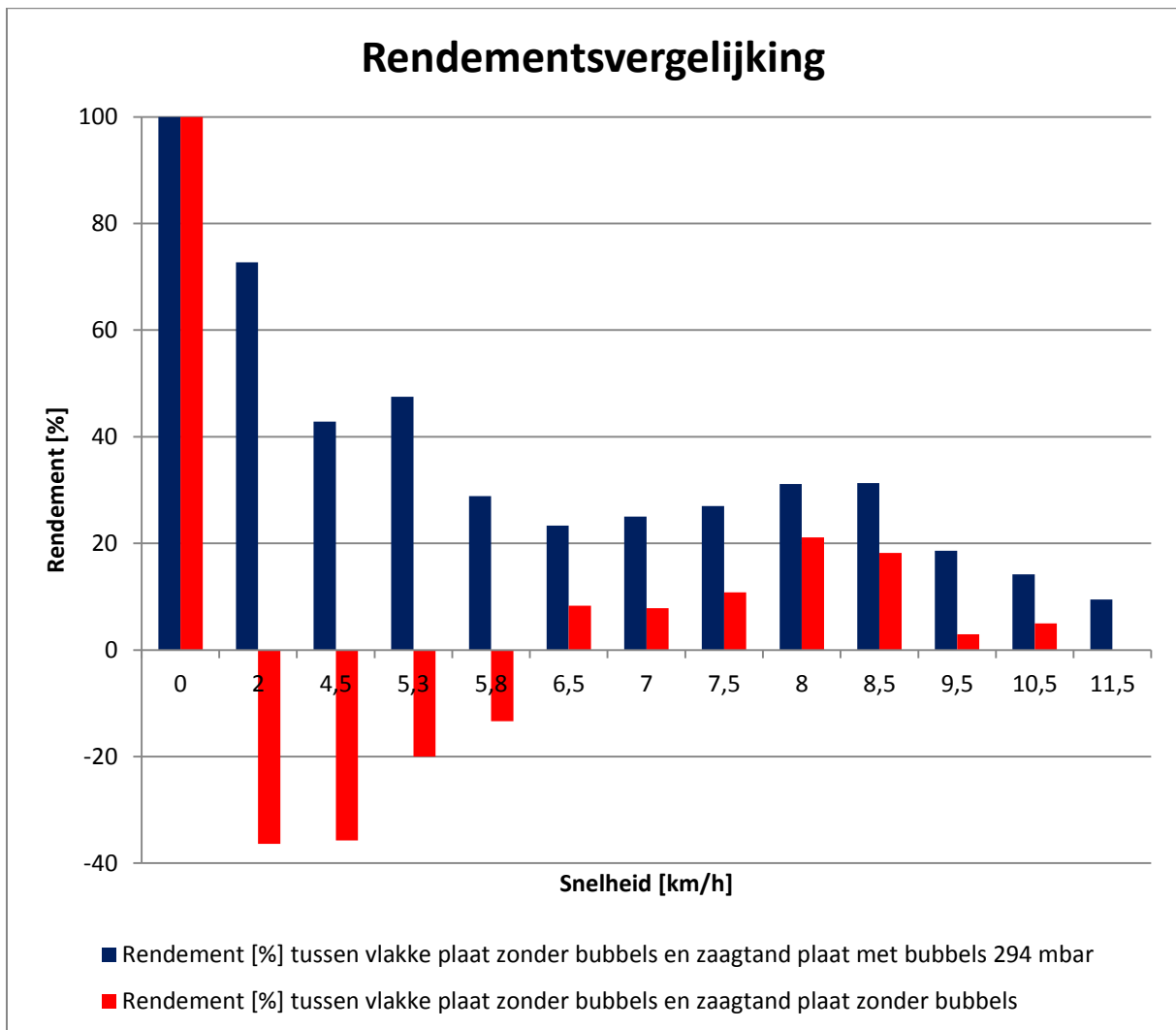
Rendement tussen vlakke plaat zonder bubbels en zaagtand plaat met bubbels 294 mbar:

Snelheid [km/h]	Kracht vlakke plaat zonder air bubble lubrication [N]	Kracht zaagtand structuur met air bubble lubrication 294 mbar [N]	Rendement tussen 294 mbar en zonder air bubble lubrication [%]
0	3	0	100,0
2,0	11	3	72,7
4,5	28	16	42,9
5,3	40	21	47,5
5,8	45	32	28,9
6,5	60	46	23,3
7,0	64	48	25,0
7,5	74	54	27,0
8,0	90	62	31,1
8,5	99	68	31,3
9,5	102	83	18,6
10,5	120	103	14,2
11,5	137	124	9,5
12,5		146	
13,5		169	

Tabel 18: Rendement vlak/ribbel met air bubbles

Bron: Eigen tabel

Grafiek rendementsvergelijking:



Figuur 83: Rendementsvergelijking vlak/ribbel

Bron: Eigen figuur

6.5.3 De vaststellingen en besluiten uit de resultaten

Zaagtandstructuur

In tegenstelling tot de metingen bij de vlakke plaat stellen we vast dat de curves niet zo rechtlijnig verlopen. Er is een enorme toename in weerstand tot 5,3 km/h, waarna tot 7 km/h er bijna geen toename meer is. Vanaf deze snelheid merken we een licht exponentiële toename in weerstand ten opzichte van de snelheid.

Bij toepassing van air bubble lubrication merken we in eertse instantie (bij 98 mbar, lage druk) een zeer lichte vermindering in weerstand over het volledige verloop van de curve.

Wat spectaculair opvalt is dat bij air bubble lubrication onder hogere druk (294 mbar, hoge druk) een intense weerstandsvermindering wordt waargenomen tot 6,5 km/h. Bij hogere snelheden blijft de winst aanzienlijk maar zonder verdere afwijkingen.

De rendementsgrafiek laat dit laatste fenomeen duidelijk zien met een rendementspiek van 80%. Vanaf 6,5 km/h meten we een licht dalend rendement dat steeds tussen 20% en 10% ligt. Het gemeten rendement van 80% is echter relatief te noemen omdat we te maken hebben met verschillen in zeer kleine weerstandswaarden. De belangrijkste opmerking blijft de grotere rendementsverbetering bij hogere druk van de toevoerlucht. In ons meetspectrum berekenen we een gemiddelde rendementsverbetering van 24,2%.

Vergelijking vlakke plaat en zaagtandstructuur

De vergelijkende grafieken (figuur 80 en 82) laten duidelijk zien dat bij het gebruik van zaagtandstructuur zonder bubbels en met lagedruk bubbels de weerstand tot 6 km/h hoger ligt dan bij de vlakke plaat zonder bubbels. Boven deze snelheid is er een duidelijke rendementsverbetering. Opvallend blijft de enorme verbetering bij zaagtandstructuur met hogedruk bubbels over het volledige meetgebied.

In de grafiek rendementsvergelijking (figuur 83) wordt nogmaals duidelijk dat bij toepassing van zaagtandstructuur zonder air bubble lubrication het rendement negatief is tussen 2 en 6,5 km/h. Gemiddeld bedraagt dit verlies 26%. Het is bij deze snelheden dus noodzakelijk om hogedruk air bubbles toe te passen. Boven 6,5 km/h is het rendement van de zaagtandstructuur steeds interessant met een piekwaarde van 21,1% bij 8 km/h zonder

bubbels en van 31,3% bij 8,5 km/h met hogedruk bubbels. Het is dus noodzakelijk om de zaagtandstructuur samen te gebruiken met air bubble lubrication omdat het gemiddelde rendementspercentage met 29,5% beduidend hoger ligt dan de 5,3% zonder bubbels.

Vanwaar het belang aangetoond is om schepen uit te rusten met een combinatie van zaagtandstructuur en air bubble lubrication, op voorwaarde dat ze varen tot een snelheid van 11,5 km/h (cf. havensnelheden).

7 Nog te onderzoeken mogelijkheden/bedenkingen

Als deze thesis wordt voortgezet kan verder onderzoek verricht worden in wat volgt:

7.1 Waar brengt men de structuur aan?

Zoals op vliegtuigen moet er bij schepen ook rekening gehouden worden waar men deze ribbelstructuur/dermal denticle structuur aanbrengt. Men moet plaats voorzien voor de opoffering anodes, plaats laten voor de steunen wanneer er naar een droogdok gegaan wordt, rond openingen van waterinlaten/uitlaten, andere openingen, etc.

Droogdok

Probleemstelling: Als een schip naar een droogdok gaat wordt er via een droogdokplan op bepaalde plaatsen steunen voorzien waarop het schip zal steunen. Er mogen op deze plaatsen dus geen ribbelstructuur of dermal denticles aangebracht worden om schade hieraan te vermijden. Omdat een schip niet altijd op dezelfde plaatsen belast zou worden in een droogdok worden de steunen af en toe van plaats veranderd. Dit maakt het oppervlak dat niet mag bekleed worden groter. Dit zorgt ervoor dat grote delen tijdens het varen niet onderworpen worden aan de weerstandsvermindering waardoor het effect kleiner zal zijn. Er zal hiervoor dus een oplossing gevonden moeten worden.

Te testen oplossing: het aanbrengen van tijdelijk verwijderbare silicone matten. Deze manier heeft enkele voordelen:

1. Deze matten zouden na een bepaalde periode van onder het schip gehaald kunnen worden om aan wal om te reinigen. Dit zou dan enkel moeten gebeuren indien blijkt dat aangroei zich vestigt op de silicone. Reinigen zal dan moeten gebeuren omdat door aangroei van algen en andere zee organismen de dynamische beweging van de dermal denticles zou kunnen verminderen of de vorm van de ribbelstructuur zou kunnen veranderen. In beide gevallen vermindert dus de werking van weerstandsvermindering. Het best zou deze reiniging dan kunnen gebeuren tussen het laden en lossen van een schip door. Het reinigen zou geen grote kost mogen zijn. Er zal moeten onderzocht worden of het mogelijk is om de silicone te reinigen met een hogedrukreiniger. Het schip moet voor het reinigen dus niet noodzakelijk naar

een droogdok waardoor grote kosten bespaard kunnen worden. Er wordt hierdoor continu gevaren met een propere romp waardoor het brandstofverbruik lager ligt. Het zou tevens milieuvriendelijker zijn omdat we minder verf nodig zullen hebben die om de x-aantal jaar vernieuwd moet worden.

2. Men zou de volledige scheepshuid kunnen bedekken met deze matten zonder rekening te moeten houden met open plaatsen voor het droogdok. Vlak voor men naar het droogdok gaat kunnen de matten dan van onder het schip weggehaald worden zodat men geen problemen ondervindt bij het droogdokken. Hierdoor kan er een optimaal effect gehaald worden van weerstandsvermindering.

7.2 Wat is de optimale vorm van de denticle?

Het onderzoek kan zich in eerste instantie nog verder richten op de vorm en de constructie van dermal denticles, ribbelstructuur en air bubble lubrication. Hierbij speelt de turbulentie nog een zeer belangrijke rol. Een mogelijke vraag zou zijn of de open plaatsen zorgen voor ongewilde turbulentie? Heeft deze turbulentie effect op de dermal denticles of ribbelstructuur achter deze open plaats? Een optimale combinatie zal proefondervindelijk gevonden moeten worden. Is het rendabel om deze structuur ook op de verticale onder waterstekende wanden te plaatsen? Aan deze vragen kan alvast nog een grote studie besteed worden.

7.3 Hoe zijn de denticles te bevestigen?

De bevestiging van de silicone matten moet op een eenvoudige en een zo goedkoop mogelijke manier gebeuren. Een manier vinden om ervoor te zorgen dat er geen duikers aan te pas komen lijkt een mooi verder onderzoek. Zou een kliksysteem voor de matten de oplossing bieden?

7.4 Hoe de matten in/uit het water krijgen?

Er kan onderzocht worden of een volledige mat ineens van onder het schip weggehaald kan worden. Als dit niet mogelijk is, bestaat er dan een manier om de matten in verschillende kleine delen boven te halen? Deze laatste optie lijkt voordeliger omdat je dan aan wal minder plaats nodig hebt. De wal is tevens een ander probleem. Is het voor hun mogelijk en hebben ze hiervoor de juiste middelen om de matten proper te maken indien ze met fouling bedekt zouden zijn? Is er een kraan nodig? Hoe sterk moet de kraan zijn?

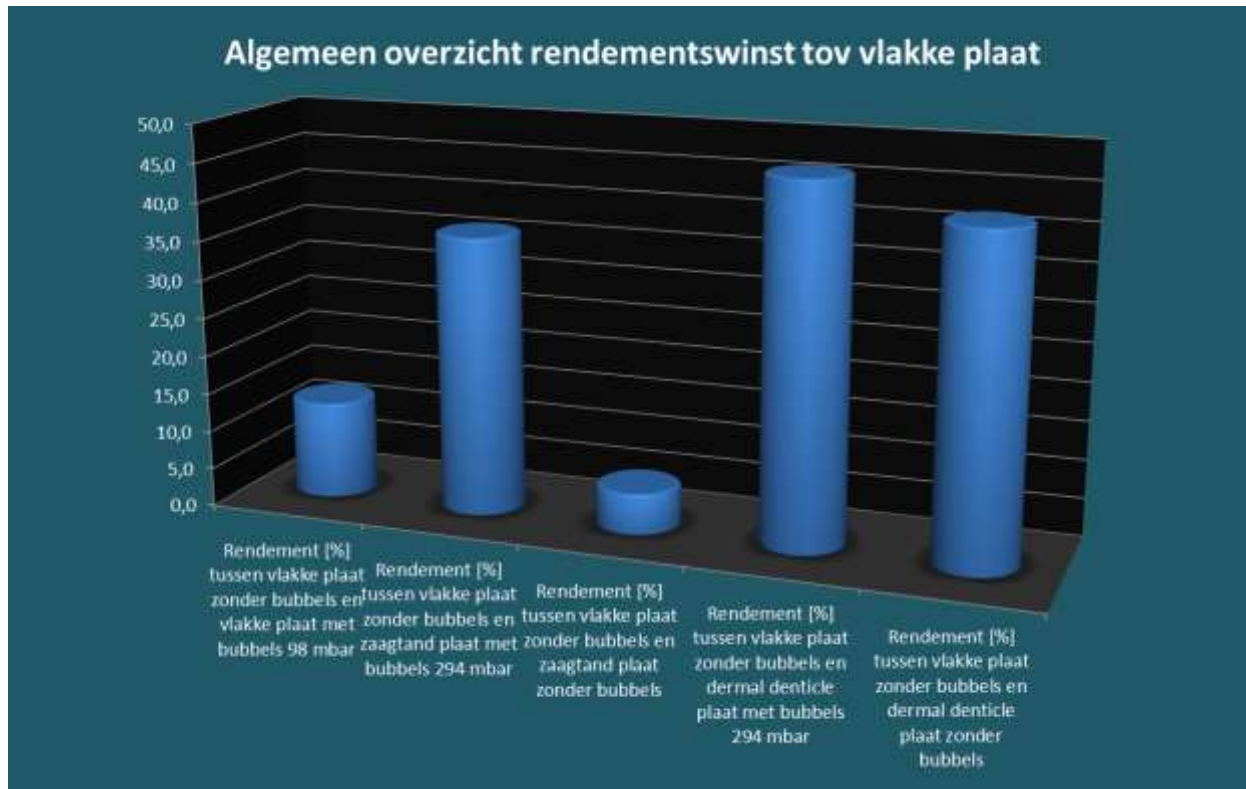
7.5 Bemerking

Zoals je kunt zien zijn er nog veel vragen die gesteld kunnen worden waar verder onderzoek de oplossing biedt. Wat in deze scriptie is behandeld, is het begin, het topje van de ijsberg die kan leiden tot een prachtig, groot onderzoek wat in de toekomst zou kunnen leiden tot milieuvriendelijkere scheepvaart.

Besluit

Algemeen overzicht: vlakke – , dermal denticle – en zaagtandstructuur plaat

Gemiddelde rendementswinst visueel voorgesteld:



Figuur 84: Rendementswinst tov vlakke plaat adhv gemiddelde waarden

Bron: Eigen figuur

De hoge brandstofprijzen en de verhoogde beperkingen voor CO₂ emissie maken het moeilijk voor reders. Het is niet de bedoeling om hierop te reageren door een vertraging van scheepssnelheid in te voeren. We moeten consequent blijven zoeken naar oplossingen en verbeteren van bestaande manieren.

Tijdens de opbouw en de ontwikkeling van dit eindwerk ben ik tot interessante inzichten gekomen wat betreft weerstand en energiewinst.

Het uiteindelijke streefdoel om specifiek te testen met zaagtandstructuren en denticles – al dan niet met air bubble lubrication – heeft geleid tot de ontdekking dat deze technologie

nog verder onderzoek behoeft en dat de scheepvaart in de nabije toekomst er alle voordeel bij heeft om te investeren in dit soort ontwikkelingen.

Uit de meetresultaten besluiten we dat het gebruik van ribbelstructuren een grote vooruitgang kan betekenen. Echter het gebruik van dermal denticles – en zeker in combinatie met air bubble lubrication – lijkt een zeker te volgen weg in het verdere terugdringen van kosten in de scheepvaart.

Zonder het volledig verstaan van de werking van air lubrication is het testen met waarheidsgetrouwe schepen noodzakelijk. Weerstandsvmindering door het gebruik van air lubrication blijft een zeer actief en actueel onderzoeksonderwerp. De lagere kosten en de grotere benutting van schepen zorgt ervoor dat de rederij haar rendement kan verhogen. Door het gebruik van air lubrication of skysails kan de concurrentiedruk op de vervoersprestatie beter worden aangepakt.

Hiermee is nogmaals bewezen dat we veel kunnen leren uit de natuur. We mogen stellen dat deze thesis aan de vooropgestelde verwachtingen inzake onderzoek naar weerstandsvermindering en economisch varen met succes voldoet, maar vooral ontdekt is, dat dit pas een begin is van een verder succesverhaal.

Bibliografie

- [1] ABB Communications (2012) "Smart ships can reduce fuel consumption by 20 percent." <http://www.abb.com/cawp/seitp202/14e177677aa71662c12579ff003fad9d.aspx> (Accessed 17 April 2015).
- [2] Aidan, R., Martin, A. and Barron, A. (n.d.) "Skin of the teeth." *Biology of Sharks and Rays*. http://www.elasmo-research.org/education/white_shark/scales.htm (Accessed 4 April 2016).
- [3] American Bureau of Shipping (2013) "Ship Energy Efficiency Measures." , p. 76.
- [4] Autumn, K., Majidi, C., Groff, R. E., Dittmore, A. and Fearing, R. (2006) "Effective elastic modulus of isolated gecko setal arrays." *Journal of experimental biology*, p. 11. doi:10.1242/jeb.02469
- [5] Brabeck, S. (n.d.) "SkySails - Neue Energie für die Schifffahrt!"
- [6] "Bulbsteven" (2016) *Bulbsteven*. <https://nl.wikipedia.org/wiki/Bulbsteven> (Accessed 25 March 2016).
- [7] ClassNK (2013) "Eco-Ship Technology." , ClassNK, p. 20.
- [8] Clean North Sea Shipping (n.d.) "Measures related to the hull." <http://cleantech.cnss.no/ghg-technologies/technical-measures/measures-related-to-the-hull/> (Accessed 17 April 2015).
- [9] Dean, B. and Bhushan, B. (2015) *Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: a review*. Ohio State University, 201 West 19th Avenue, Columbus, OH 43210-1142, USA: Nanoprobe Laboratory for Bio- and Nanotechnology and Biomimetics (NLBB). <http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/roypta/368/1929/4775.full.pdf> (Accessed 25 March 2016).
- [10] De Jong, P. (2016) "Hydromechanica 1 weerstand." https://ocw.tudelft.nl/course-readings/6-weerstand/?course_id=12334 (Accessed 4 January 2016).
- [11] De Jong, P. (2016) "Hydromechanica 1 voortstuwing." https://ocw.tudelft.nl/course-readings/8-voortstuwing/?course_id=12334 (Accessed 4 January 2016).
- [12] De Merchant, C. (n.d.) "Anti-Fouling Paints and Coatings." <http://christinedemerchant.inthebeach.com/anti-fouling-paints-coatings.html> (Accessed 17 April 2015).
- [13] "De slijm huid" (n.d.) *Telenet*. http://users.telenet.be/het_zoetwateraquarium/slijmhuid.htm (Accessed 4 January 2016).
- [14] DeYuan, Z., YuanYue, L., Xin, H., Xiang, L. and HuaWei, C. (2011) *High-precision bio-replication of synthetic drag reduction shark skin*. Beijing 100191, China; Bionic and Micro/Nano/Bio Manufacturing Technology Research Center, Beihang University. <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11434-010-4163-7> (Accessed 4 April 2016).
- [15] "Drag reducing agent" (2016) *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Drag_reducing_agent (Accessed 25 March 2016).

- [16] EICB (2008) "Luchtsmering (2)." *EICB Expertise- en InnovatieCentrum Binnenvaart*. <http://www.informatie.binnenvaart.nl/innovatie/innovatie-techniek/203-luchtsmerng2> (Accessed 17 April 2015).
- [17] "ELVAX® EVA COPOLYMER RESIN" (2016) *DuPont*. <http://www.dupont.com/products-and-services/plastics-polymers-resins/ethylene-copolymers/brands/elvax-ethylene-vinyl-acetate.html> (Accessed 25 March 2016).
- [18] "Europort 2015" (2015) , in Rotterdam. <http://www.europort.nl/nl> (Accessed 4 March 2016).
- [19] "Figuur air bubble lubrication" (n.d.) <http://nl.tinypic.com/view.php?pic=2v9vssh&s=5#.VTFD9iHtmko> (Accessed 17 April 2015).
- [20] "Figuur Hull Vane" (n.d.) <http://www.boatinternational.com/bi-cms~/wp-content/uploads/2012/09/Heesen-yacht-hull-vane-closeup.jpg> (Accessed 17 April 2015).
- [21] "Figuur MALS" (n.d.) <http://i.ytimg.com/vi/1RZ0UOITMk/maxresdefault.jpg>
- [22] "Figuur Toepassing met verschillende air cavities" (n.d.) http://i.ytimg.com/vi/kDC11_kHxqE/maxresdefault.jpg (Accessed 17 April 2015).
- [23] Foeth, E. J. (n.d.) "Decreasing frictional resistance by air lubrication." <http://www.hiswasymposium.com/assets/files/pdf/2009/Hiswa%20Symposium%202008%20Foeth.pdf> (Accessed 24 November 2014).
- [24] Foeth, E. J., EGGERS, R. and QUADVLIEG, F. H. H. . (2010) *The Efficacy of Air-bubble Lubrication for Decreasing Friction Resistance*. Istanbul, Turkije: MARIN.
- [25] Gokcay, S., Insel, M. and Odabasi, A. Y. (2004) "Revisiting artificial air cavityconcept for high speed craft." , (31), p. 15.
- [26] Hazeldine, T., Pridmore, A., Nelissen, A. and Hulskotte, J. (2009) "Technical Options to reduce GHG for non-Road Transport Modes (Paper 3)."
- [27] Hendriks, R. (n.d.) "Wet van Bernouilli." <http://www.roelhendriks.eu/Natuurkunde/w2E%20wet%20van%20bernoulli/bernoulli%20theorie.pdf> (Accessed 25 March 2016).
- [28] Heynen, H. (2012) "Hull Vane bespaart tot 24% brandstof." , 7th July, p. 1.
- [29] Heynen, H. (2014) "DST onderzoekt binnenvaartroer." http://www.vdvelden.com/fileadmin/user_upload/Documenten/PDF/Schuttevaer_-_DST_onderzoekt_binnenvaartroer_publicatie_9_juni_2014.pdf (Accessed 17 April 2015).
- [30] IMO (2010) *REDUCTION OF GHG EMISSIONS FROM SHIPS*.
- [31] J.Mayser, M., F.Bohn, H., Reker, M. and Barthlott, W. (2014) "Measuring air layer volumes retained by submerged floating-ferns *Salvinia* and biomimetic superhydrophobic surfaces." , pp. 812–821. doi:10.3762/bjnano.5.93
- [32] Kennedy, J. (n.d.) "Dermal denticle." *Dermal denticle*. <http://marinelife.about.com/od/glossary/g/dermaldenticle.htm> (Accessed 25 March 2016).

- [33] KERN (2015) "KERN HDB 5K5N en KERN HCB/HCN 50K20."
- [34] Klein, S. (2012) "Effizienzsteigerung in der Frachtschiffahrt unter ökonomischen und ökologischen Aspekten am Beispiel der Reederei Hapag Lloyd." Project. Frankfurt.
- [35] Knud Benedict, H., Baldauf, M., Kirchhof, M. and Wismar, H. (n.d.) *Estimating Potential Danger of Roll Resonance for Ship Operation*. Wismar: Schiffahrtsinstitut Warnemünde e.V. <http://schiw.sf.hs-wismar.de/siw/paper/heft5/beitrag10> (Accessed 4 January 2016).
- [36] Lataire, E. (2015) "Propulsion part2."
- [37] Lauder, G. (2012) "Specialised Features of Sharks - Skin." *Save our sharks*. <http://www.saveoursharks.com.au/shark-biology---skin.html> (Accessed 25 March 2016).
- [38] Lauder, G. V. and Oeffner, J. (2011) *The hydrodynamic function of shark skin and two biomimetic applications*. Museum of Comparative Zoology, Harvard University, 26 Oxford Street, Cambridge, MA 02138, USA. <http://jeb.biologists.org/content/215/5/785> (Accessed 4 April 2016).
- [39] Lazauskas, L. (2008) "Bow wave and Kelvin wake." *Boatdesign.net*. <http://www.boatdesign.net/forums/hydrodynamics-aerodynamics/bow-wave-kelvin-wake-45121.html> (Accessed 4 January 2016).
- [40] "Magnuseffect" (2015) (<http://nl.wikipedia.org/wiki/Magnuseffect>) (Accessed 17 April 2015).
- [41] NYC Line (2010) "Second Module Carrier Equipped with an Innovative Air-Lubrication System Delivered." http://www.nyk.com/english/release/788/NE_101202.html (Accessed 17 April 2015).
- [42] "O-foil JPG" (n.d.) <http://www.nieuwsbladtransport.nl/Portals/0/wosimages/O-Foil.jpg> (Accessed 17 April 2015).
- [43] "Panamax" (2016) *Wikipedia*. <https://en.wikipedia.org/wiki/Panamax> (Accessed 4 March 2016).
- [44] "PLA" (2015) *Makeitfrom.com*. <http://www.makeitfrom.com/material-properties/Polylactic-Acid-PLA-Polylactide/> (Accessed 4 April 2016).
- [45] Quick, D. (2012) "Mitsubishi reduces friction on ship hulls by blowing bubbles." <http://www.gizmag.com/mitsubishi-air-lubrication-system/21196/> (Accessed 17 April 2015).
- [46] Salta, M. and et al. (2010) *Designing biomimetic antifouling surfaces*. <http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/368/1929/4729> (Accessed 25 March 2016).
- [47] Sanchez, J., Holm, M. and Walcott, S. (2010) "Soft Lithography." <http://mmadou.eng.uci.edu/Pratica/Soft%20Litho%201.pdf> (Accessed 25 March 2016).
- [48] "Sandwich plate system" (2015) http://en.wikipedia.org/wiki/Sandwich_plate_system (Accessed 17 April 2015).
- [49] "Shark biology" (n.d.) *Department of environment*. <http://www.doe.ky/marine/sharks/shark-biology/> (Accessed 25 March 2015).

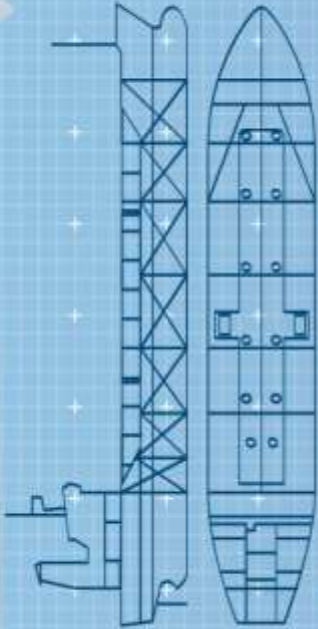
- [50] "SHORE HARDNESS SCALES" (2008) *Smooth On*. http://www.smooth-on.com/pdf/durometer_with_logo.pdf (Accessed 25 March 2016).
- [51] Speed at sea (2003) "Air-cavity ships are ready for a wider market." www.speedatsea.com (Accessed 17 April 2015).
- [52] "Spore" (2016) *Wikipedia*. <https://nl.wikipedia.org/wiki/Spore> (Accessed 25 March 2016).
- [53] "Swim like a shark" (n.d.) *Science in the news*. <http://www.scienceinthenews.org.uk/contents/?article=8> (Accessed 25 March 2016).
- [54] "TEC7 Aquastop Liquid" (2016) *TEC7*. <http://www.tec7.be/nl/producten/aquastop-liquid> (Accessed 4 April 2016).
- [55] "THE SCIENCE BEHIND THE DIMPLES OF A GOLF BALL" (2014) *Blogger@SATRO*. <http://bloggersatro.blogspot.be/2014/08/the-science-behind-dimples-of-golf-ball.html> (Accessed 25 March 2016).
- [56] Thill, C., Toxopeus, S. and van Walree, F. (2005) *Project Energy-saving air-Lubricated Ships (PELS)*. Busan, Korea.
- [57] "Time for change –\$70 billion at stake?" (n.d.) *TQC*. <http://www.hull-roughness.com/hull-roughness/time-for-change-70-billion-at-stake> (Accessed 25 March 2016).
- [58] Timmerman, A. J., Bakker, C., Vis, I., Witzier, R. and Zonneveld, Z. (2011) *Air Lubrication*. Rotterdam: Hogeschool voor de zeevaart.
- [59] Van der Veen, R. and Stel, B. (n.d.) "Wet van Bernouilli." <http://www.sciencespace.nl/technologie/artikelen/3861/wet-van-bernouilli> (Accessed 25 March 2016).
- [60] V.Graham, M. and C.Cady, N. (2014) *Nano and Microscale Topographies for the Prevention of Bacterial Surface Fouling*. 57 Fuller Road, Albany, NY 12203, USA: State University of New York (SUNY) College of Nanoscale Science & Engineering. www.mdpi.com/2079-6412/4/1/37/pdf (Accessed 4 April 2016).
- [61] Videler, J. J. (2011) "Bionica voor de jachtbouw."
- [62] Webb, J. (2014) "3D printing reveals the power of shark skin." *BBC News*, 15th May, p. 1.
- [63] Wen, L., C.Weaver, J., JMThornycroft, P. and V. Lauder, G. (2015) *Hydrodynamic function of biomimetic shark skin: effect of denticle pattern and spacing*. http://www.people.fas.harvard.edu/~glauder/reprints_unzipped/Wen.etal.2015.pdf (Accessed 4 April 2016).
- [64] Wen, L., Weaver, J. C. and Lauder, G. V. (2014) *Biomimetic shark skin: design, fabrication and hydrodynamic function*. Museum of Comparative Zoology, Harvard University, 26 Oxford Street, Cambridge, MA 02138, USA. <http://jeb.biologists.org/content/217/10/1656> (Accessed 4 April 2016).
- [65] WİNTECC (n.d.) "Demonstration der innovativen Windantriebstechnologie des SkySails-Systems für Frachtschiffe."

[66] Zirpel, T. (2012) "SkySails."

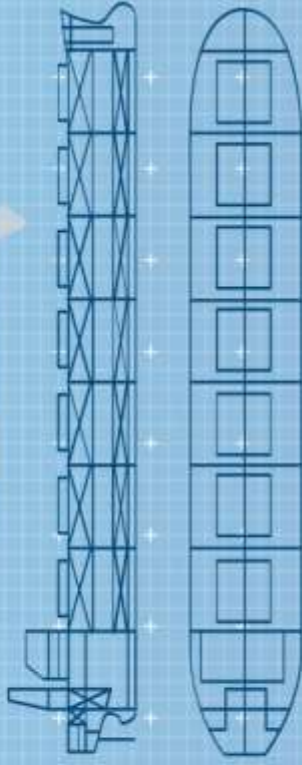
Keeping up with the efficiency pack: How to pimp a ship to remain competitive

Average tanker fuel prices
US\$400 per oil
US\$400 per oil (oil support), 50%
US\$200 per oil (oil support), 50%
US\$100

MR-Makrover (Medium range tanker: 45,000 dwt to 55,000 dwt)



Crane Pretender (Capacity: 150,000 dwt to 200,000 dwt)



Measurements	Approximate impact of improvements*	Measurements	Approximate impact of improvements*
<p>Standard fuel price US\$400 per oil US\$400 per oil (oil support), 50% US\$200 per oil (oil support), 50% US\$100</p> <p>Standard fuel consumption 100 tons per day (100 tons per month)</p> <p>Standard fuel price US\$400 per oil US\$400 per oil (oil support), 50% US\$200 per oil (oil support), 50% US\$100</p> <p>Standard fuel consumption 100 tons per day (100 tons per month)</p>	<p>Standard fuel price US\$400 per oil US\$400 per oil (oil support), 50% US\$200 per oil (oil support), 50% US\$100</p> <p>Standard fuel consumption 100 tons per day (100 tons per month)</p> <p>Standard fuel price US\$400 per oil US\$400 per oil (oil support), 50% US\$200 per oil (oil support), 50% US\$100</p> <p>Standard fuel consumption 100 tons per day (100 tons per month)</p>	<p>Standard fuel price US\$400 per oil US\$400 per oil (oil support), 50% US\$200 per oil (oil support), 50% US\$100</p> <p>Standard fuel consumption 100 tons per day (100 tons per month)</p> <p>Standard fuel price US\$400 per oil US\$400 per oil (oil support), 50% US\$200 per oil (oil support), 50% US\$100</p> <p>Standard fuel consumption 100 tons per day (100 tons per month)</p>	<p>Standard fuel price US\$400 per oil US\$400 per oil (oil support), 50% US\$200 per oil (oil support), 50% US\$100</p> <p>Standard fuel consumption 100 tons per day (100 tons per month)</p> <p>Standard fuel price US\$400 per oil US\$400 per oil (oil support), 50% US\$200 per oil (oil support), 50% US\$100</p> <p>Standard fuel consumption 100 tons per day (100 tons per month)</p>

*Approximate impact of improvements based on a 10% improvement in fuel efficiency. The actual impact will vary depending on the specific ship and the improvements implemented.

100% réutilisable



Plastiline

réduction de 25% par rapport au prix de 1 kg

49058 - 49056

Plastiline

Pâte à modeler professionnelle et prête à l'emploi convenant à de nombreuses réalisations : prise d'empreintes, maquettes, moules, bas-reliefs, etc. Idéale pour les sculpteurs, concepteurs... Produit complémentaire des élastomères silicones et polyuréthanes, elle permet la prise d'empreinte, la limitation de coulé de résine ou autre produit liquide pouvant durcir, moule occasionnel. Sa précision de reproduction est de 1/10 mm. La plastiline ne sèche pas, ne durcit pas et n'est pas toxique. Elle est 100 % réutilisable. Mise en œuvre facile et propre, une excellente tenue plastique (pas d'affaissement de masse), 5 fusions possibles. Informations complémentaires ramollissement : à proximité d'une source de chaleur, dans l'eau chaude en protégeant la plastiline par un sachet plastique étanche, dans une étuve. On peut la travailler à la main, à la gouge ou à la spatule. Il est possible à tout moment de modifier les détails, aucun raccord n'est apparent. 5 niveaux de dureté au choix : 40 : très souple | 55 : standard | 70 : très dure 50 : souple | 60 : dure

pâte à modeler 1 kg Prix par bloc.

niveau de dureté	température de ramollissement	réf.
ivoire		
40	39 - 41 °C	49055
50	48 - 52 °C	49056
55	52 - 56 °C	49057
60	56 - 58 °C	49058
70	58 - 60 °C	49059
gris		
40	39 - 41 °C	49063
50	48 - 52 °C	49064
55	52 - 56 °C	49065
60	56 - 58 °C	49066
70	58 - 60 °C	49067
pâte		18,50 €ttc

pâte à modeler 5 kg Prix par bloc.

niveau de dureté	température de ramollissement	réf.
ivoire		
40	39 - 41 °C	49068
50	48 - 52 °C	49069
55	52 - 56 °C	49070
60	56 - 58 °C	49071
70	58 - 60 °C	49072
gris		
40	39 - 41 °C	49073
50	48 - 52 °C	49074
55	52 - 56 °C	49075
60	56 - 58 °C	49076
70	58 - 60 °C	49077
pâte		69,50 €ttc



Plaxtine

49259 à 49261

Plaxtine

Pour le modelage de prototypes et plans de joint. Pâte grise de différentes duretés (dure-médium-souple), d'une grande malléabilité, utilisée pour le modelage, sculpture, prototype, automobile, maquette, le moulage (plan de joint). Ne sèche pas à l'air, se lisse à l'eau, ne colle pas aux doigts et ne réagit ni au froid ni au chaud. Elle supprime les inconvénients de la terre. Elle est réutilisable. Grâce à sa très bonne tenue plastique, aucun affaissement de la masse n'est à craindre. Avec le plaxtine, la restitution plastique des plus grandes finesse est réalisable, quelle que soit la dimension de l'original. Le vernis gomme laque est utilisé comme protection. Utiliser de préférence le talc comme démolant. Prix par pain.

dureté	réf.	médium	49260
souple	49259	dur	49261
☐ 1 kg			13,45 €ttc

pâte séchant à l'air libre



62015 CERADEL

pâtes autodurcissantes Ceradel

Pain de 1 kg. Les pâtes autodurcissantes sont très plastiques et séchent à l'air sans nécessiter de cuisson. 5 couleurs au choix. Prix par pain.

couleur	réf.	rouge	62016
blanc	62015	jaune	62018
☐ 1 kg			5,45 €ttc

3 couleurs disponibles, pâte autodurcissante Ceradel (1 kg)

62015 blanc	62016 rouge	62018 jaune
-------------	-------------	-------------

Hobby Line

pâte à modeler Aéroplast

Pâte à modeler prête à l'emploi et durcissant à l'air libre. Idéal pour les ateliers de modelage dans les écoles mais aussi pour les plasticiens professionnels et les loisirs créatifs. La matière peut être peinte avec de l'acrylique une fois sèche. Disponible en blanc et en terre cuite en pain de 0,5 kg ou 1 kg. Prix par pain.

☐ 0,5 kg	réf.	€ttc
☐ blanc	49610	4,95
☐ terre cuite	49620	4,95
☐ 1 kg	réf.	€ttc
☐ blanc	49615	8,75
☐ terre cuite	49625	8,75

colle pour pâte à modeler

Afin de modeler des éléments décoratifs réalisés avec la pâte Keramiplast sur d'autres matières minérales telles que des carreaux, de la céramique brute, des pots de fleurs, des cruches et des vases en argile, de la pierre et du plâtre, vous enduisez auparavant ces parties avec de la colle pour modelage. Il se crée alors un assemblage résistant, qui permet un collage efficace des parties modelées.

Prix par flacon.

unité	réf.	€ttc
☐ 50 ml	49180	4,65

darwi

49662/002 + 49663/003

verniss Darwi

Vernis protecteur à base d'alcool • Transparent après séchage • Séchage rapide en surface, durcissement lent en profondeur • Prêt à l'emploi • Appliquer au pinceau en fine couche, laisser sécher 3 h avant d'appliquer une seconde couche, le fini "céramique" s'obtient après 3 couches.

Ce vernis transparent permet de donner une finition céramique aux objets. L'application doit se faire sur des objets parfaitement secs. En cas d'application sur support humide, il y aura l'apparition d'un voile laiteux. Le vernis sera également fragilisé. Le nettoyage du pinceau se fait avec un nettoyant pinceaux à base d'alcool. Prix par flacon.

☐ brillant	réf.	€ttc
☐ 30 ml	49662/003	3,10
☐ 250 ml	49663/003	10,45
☐ satiné	réf.	€ttc
☐ 30 ml	49662/002	3,10
☐ 250 ml	49663/002	10,45

