

# Weerstand van een olie absorberende staart

---

## Onderzoeksdossier

7 januari 2013

Groep B 101-09:

Inge Kamp 1362259

Niels Kleijweg 4005694

Arthur Schout 4025415

Jan Tromp 4028910

I.A.Kamp@student.tudelft.nl

N.Kleijweg@student.tudelft.nl

A.Schout@student.tudelft.nl

J.M.Tromp@student.tudelft.nl

Begeleidende docenten:

Ir. P. Naaijen

Dr.ir. J.A. Keuning

# Inhoudsopgave

---

<b>Symbolenlijst</b>	<b>iii</b>
<b>1. Projectbeschrijving</b>	<b>1</b>
<b>2. Introductie onderzoek</b>	<b>2</b>
2.1 Achtergrond informatie 'Project Protei'	2
2.2 Doelstelling	2
2.3 Relevantie	3
2.4 Innovatie	3
<b>3. Onderzoeksvraag</b>	<b>4</b>
<b>4. Theoretische studie</b>	<b>5</b>
4.1 Weerstand van de staart	5
4.2 Velocity Prediction Program	8
<b>5. Plan van aanpak</b>	<b>10</b>
5.1 Eerste versie van het onderzoek – dynamisch model	10
5.2 Tweede versie van het onderzoek – stationair model	10
<b>6. Experiment</b>	<b>11</b>
6.1 Ontwerp experiment	11
6.2 Opstelling experiment	11
6.3 Meetprocedure	15
6.4 Planning van de metingen	15
<b>7. Meetresultaten</b>	<b>17</b>
7.1 Gemeten data	17
7.2 Statistiek	18
<b>8. Integratie theorie en meetresultaten</b>	<b>20</b>
8.1 Weerstand van de staart	20
8.2 Velocity Prediction	24
<b>9. Resultaten en conclusies</b>	<b>28</b>
<b>10. Zelfevaluatie</b>	<b>29</b>
<b>Referentielijst</b>	<b>30</b>
<b>Bijlage 1: Specificaties Protei</b>	<b>31</b>
<b>Bijlage 2: Planning</b>	<b>32</b>
<b>Bijlage 3: Samenvatting besprekingen</b>	<b>33</b>
<b>Bijlage 4: Cd-rom met meetdata</b>	<b>34</b>

# Symbolenlijst

---

A	nat oppervlak	[m <sup>2</sup> ]
A <sub>aanstroom</sub>	aanstroom oppervlak, frontaal oppervlak	[m <sup>2</sup> ]
C <sub>d</sub>	viskeuze weerstandscoëfficiënt	[-]
C <sub>f</sub>	huidwrijvingscoëfficiënt	[-]
C <sub>r</sub>	rest weerstandcoëfficiënt	[-]
C <sub>t</sub>	totale weerstandscoëfficiënt	[-]
C <sub>v</sub>	viskeuze weerstandcoëfficiënt	[-]
g	zwaartekrachtversnelling	[m/s <sup>2</sup> ]
GZ	stabiliteitsarm	[m]
Fn	Froudegetal	[-]
k	vormfactor	[-]
L	lengte olie absorberende staart	[m]
m <sub>verzadigde staart</sub>	massa van een volledig met olie verzadigde staart	[kg]
R	weerstand	[N]
R <sub>r</sub>	rest weerstand	[N]
R <sub>t</sub>	totale weerstand	[N]
R <sub>v</sub>	viskeuze weerstand	[N]
Rn	Reynoldsgetal	[-]
V	scheepssnelheid	[m/s]
V <sub>staart</sub>	volume staart	[m <sup>3</sup> ]
VPP	Velocity Prediction Program	
ρ	dichtheid medium	[kg/m <sup>3</sup> ]
Δ	deplacement	[kg]
∇%	onderdompeling percentage staart	[-]

# 1. Projectbeschrijving

---

## Project Description

Sailing Robot Tug

## Keywords

- oil spill cleaning
- wind propulsion
- unmanned sailing robot

## Department

Maritime and Transport Technology (M&TT)

## Supervisors

Peter Naaijen                      p.naaijen@tudelft.nl  
Lex Keuning                        j.a.keuning@tudelft.nl

## Introduction

A possibility to clean oil spills offshore is to use autonomous sailing robots: small unmanned sailing vessels which drag an oil absorbing tail at low-speed.

(see: <https://sites.google.com/a/opensailing.net/protei/>) Dragging such a tail through the water obviously results in an increased resistance. Moreover, its weight can drastically increase while absorbing the oil. Both factors will affect the speed that can be obtained by the vessel, especially taking into account the inertia of the tail that might play a significant role when accelerating after tacking.

## Research question

What is the obtainable speed of the sailing robot at different wind conditions and different levels of saturation of the oil absorbing tail.

## Requirements

Prior knowledge on ship resistance and sailing is a pre

## Remarks

The main dimensions of the vessel to be researched will be specified.

## 2. Introductie onderzoek

Om een geschikte onderzoeksvraag en hypothese te kunnen formuleren voor de gegeven opdracht, is het noodzakelijk de achtergrond van deze opdracht te kennen. Deze achtergrond, bestaande uit het 'Protei Project' wordt in paragraaf 2.1 toegelicht. Vervolgens wordt de doelstelling, de relevantie en de innovatie van het onderzoek elk toegelicht in een aparte paragraaf.

### 2.1 Achtergrondinformatie 'Project Protei'

'Project Protei' is een internationaal open source project met als doel het ontwerpen van een alternatieve methode om olievlekken op te ruimen van zee. Deze methode moet milieuvriendelijk zijn, geen risico voor de menselijke gezondheid vormen en efficiënter zijn dan bestaande methodes. Het huidige conceptontwerp bestaat uit een zwerm zeilboten met een olie absorberende staart, die door een olievlek varen en daarmee de olie opruimen. De 'Protei' is 7 meter lang en sleept één staart achter zich aan. Figuur 2.1 bevat een impressie van een Protei. Door met een aan de windse koers door de olievlek te varen, wordt een groot oppervlak bestreken. Figuur 2.1 bevat een illustratie van de vaarroute van een Protei. De Protei is alleen geschikt voor het opruimen van lichte oliën die in een dunne laag op het water liggen. Zware oliën worden niet opgenomen door de staart.

Het concept is milieuvriendelijk, omdat de Protei door wind wordt voortgestuwd en geen chemicaliën gebruikt. De menselijke gezondheid wordt niet in gevaar gebracht, omdat de boten onbemand zijn. Door een groot aantal Protei's tegelijk in te zetten, wordt verwacht een grotere efficiëntie te kunnen bereiken dan met conventionele methodes.



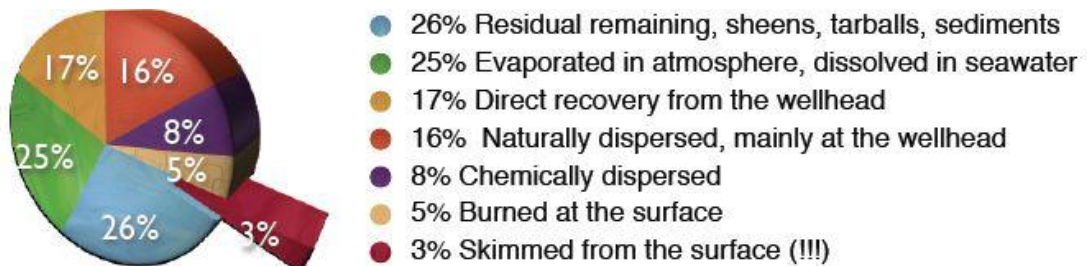
Figuur 2.1: De aan de windse koers van de Protei voorgesteld door de gele lijn (links) en een impressie van hoe de Protei er uit kan gaan zien (rechts). [1]

### 2.2 Doelstelling

Bij het ontwerp van de Protei en dit concept, is de meeste aandacht uitgegaan naar de rompvorm en benodigde elektronica. Er is nog weinig bekend over de eigenschappen van de staart, zo is ook de lengte van deze staart nog niet bepaald. De staartlengte heeft een grote invloed op het ontwerp van het concept. De weerstand van de staart is van belang, omdat dit een beperkende factor is voor de snelheid die een Protei zeilboot kan halen. Dit onderzoek heeft als doel de weerstand van de staart te bepalen als functie van de staartlengte en de vaarsnelheid. Het tweede doel is een voorspelling te doen van de maximaal haalbare staartlengte voor een Protei zeilboot, waarbij de snelheid die de boot nog haalt beperkend zal zijn.

### 2.3 Relevantie

De olieramp met het boorplatform 'Deep Sea Horizon', geleased door BP, heeft wederom aangetoond hoeveel schade olievlekken op zee kunnen aanrichten. Het ecosysteem in de Golf van Mexico ondervond namelijk grote problemen. Ook de vervuiling op de kusten van de aangrenzende staten was groot. Hoewel er geprobeerd is de olievlekken op te ruimen met aangepaste vissersboten en in te sluiten met drijvende booms, kon men niet voorkomen dat veel olie aanspoelde op de kust. De conventionele methoden om olievlekken op te ruimen bleken inefficiënt. Slechts 3% van de gelekte olie werd van het wateroppervlak opgeruimd, figuur 2.2. Tevens zijn deze methoden duur en is de gezondheid van de mensen die de olie opruimen in gevaar. Wanneer het Protei concept gerealiseerd wordt, worden deze problemen opgelost. Dit onderzoek levert informatie die nodig is om het ontwerp van de Protei te voltooien. Ook kan de gevonden kennis gebruikt worden om de haalbaarheid van het concept te toetsen.



Figuur 2.2: Olie opruimen volgens Protei Businessplan [1]

### 2.4 Innovatie

Er is onderzoek gedaan naar de weerstand van voorwerpen in water. De weerstand van een aantal scheepsvormen is bekend. Ook is de weerstand van een aantal geometrische vormen bekend voor wanneer zij volledig zijn ondergedompeld. De staart van de Protei is deels ondergedompeld en heeft een flexibele, onregelmatige vorm met een zeer ruw oppervlak. Dit maakt dat de weerstand hiervan niet goed benaderd kan worden aan de hand van bestaande literatuur. Door de weerstand van deze staart experimenteel te bepalen en dit te combineren met bestaande kennis, kan nieuwe kennis gecreëerd worden over de weerstand van dit specifieke voorwerp en het verband ervan met de lengte en de snelheid.

Het Protei ontwerp is zeer innovatief. Naast een doorlopend proces van ontwerpen, is er veel onderzoek nodig om te kennis te verzamelen waarmee dit ontwerp kan worden voltooid. Door de gevonden kennis over de staartweerstand meteen te gebruiken in een voorspelling van haalbare staartlengte en de daarbij gehaalde scheepssnelheid, kunnen resultaten uit dit onderzoek direct in dit project gebruikt worden.

# 3. Onderzoeksvraag

---

Het onderzoek wordt opgedeeld in twee delen, één deel empirisch onderzoek en één deel exploratief onderzoek. In het empirische deel wordt een relatie gezocht tussen de weerstand van een olie absorberende staart en de lengte en de snelheid. In het exploratieve deel wordt een gegronde hypothese opgesteld over de maximale staartlengte die de Protei kan voortslepen. Voor dit deel van het onderzoek zijn de resultaten van het empirische onderzoek nodig. De twee onderzoeksdelen hebben allebei een eigen onderzoeksvraag. Deze worden hieronder toegelicht.

## Empirisch onderzoek

De onderzoeksvraag voor het experimentele deel is als volgt geformuleerd:

*1. Wat is het verband tussen de weerstand van een verzadigde staart (VanDoClean type 6016-B) en de staartlengte en de snelheid?*

Hierbij is de volgende hypothese opgesteld:

*De vormfactor van de viskeuze weerstandscoefficiënt van de staart is 2 en de restweerstandscoefficiënt heeft een lineair verband met het Froudegetal ( $F_n$ ) in het domein  $0,05 < F_n < 0,55$ .*

Voor nadere toelichting over de formulering van de hypothese wordt verwezen naar paragraaf 4.1.

## Exploratief onderzoek

De onderzoeksvraag die bij het exploratieve deel van het onderzoek hoort is de volgende:

*2. Bij welke lengte van een met olie verzadigde staart haalt de Protei bij 8 knopen wind en bij een koers van 60 graden ten opzichte van de ware wind een scheepssnelheid van 2,5 knopen?*

Bij het opstellen van deze onderzoeksvraag is in overweging genomen dat de snelheid van 2,5 knopen een aanneembare dienstsnelheid is. De windsterkte van 8 knopen is een matige wind, waardoor de Protei in een grote windrange effectief zijn werk kan uitvoeren. De koers van 60 graden volgt direct uit het Protei concept dat uitgaat van een ruime aan de windse koers waarop de Protei door de olievlekken moet varen.

## Afbakening van het onderzoek

Er zijn meerdere versies de Protei. In dit onderzoek worden de specificaties van de meest recente versie Protei006 gebruikt. De specificaties van de olie absorberende staart staan in paragraaf 6.2. De weerstand van de staart wordt gemeten door een staart te slepen in een sleeptank. Bij het opstellen van de hypothese wordt niet meegenomen dat er in werkelijkheid olie op het wateroppervlak ligt en dat er golven zijn. Laatst genoemden zullen invloed hebben op de weerstand.

## 4. Theoretische studie

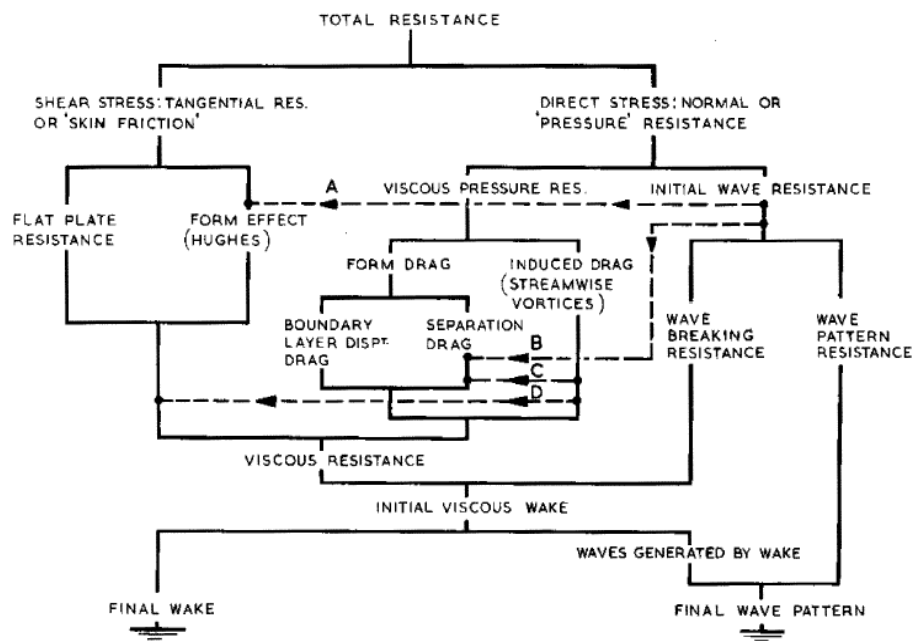
In dit hoofdstuk wordt uitgelegd welke bestaande kennis voor dit onderzoek wordt gebruikt en hoe deze wordt gebruikt. De eerste paragraaf gaat over de theorie die gebruikt is om de hypothese voor onderzoeksvraag 1 op te stellen over de weerstand van de staart. De tweede paragraaf geeft achtergrondinformatie over het programma dat wordt gebruikt om de snelheid van de Protei zeilboot te voorspellen.

### 4.1 Weerstand van de staart

Er is in bestaande literatuur theorie te vinden over de weerstand van een voorwerp in water en het verband van deze weerstand met lengte en snelheid. In deze paragraaf wordt de voor dit onderzoek relevante theorie uiteengezet. Deze theorie vormt de basis voor het opstellen van de hypothese.

#### 4.1.1 WEERSTANDSCOMPONENTEN EN VERBAND MET SCHEEPSSNELHEID EN STAARTLENGTE

De weerstand van een voorwerp dat zich door het water beweegt, bestaat uit een aantal weerstandsc componenten. [2] Figuur 4.1 toont de splitsing van de totale weerstand in componenten zoals ze door de 'International Towing Tank Conference' (ITTC) in 1972 bepaald zijn. [3]



Figuur 4.1: Weerstandsc componenten van een voorwerp in water. [3]

Te zien is dat de totale weerstand uit viskeuze weerstand en golfmakende weerstand bestaat. De golfmakende weerstand wordt veroorzaakt door normaalspanningen; het schip raakt energie kwijt door het water in beweging te 'duwen'. De viskeuze weerstand wordt deels veroorzaakt door schuifspanningen. De huidwrijving kan worden bepaald door deze te vergelijken met de huidwrijving van een vlakke plaat ('flat plate resistance'), vermenigvuldigd met een vormeffect. Het andere deel van de viskeuze weerstand wordt veroorzaakt door het ontstaan van een zog ('drag') bij turbulente stroming om en achter het voorwerp. De luchtweerstand wordt verwaarloosd, omdat 95% van de staart onder water ligt en de dichtheid en viscositeit van lucht vele malen kleiner zijn dan die van water.

Door de totale weerstand in componenten op te splitsen, wordt meer inzicht verkregen over het verloop ervan. De verschillende componenten blijken verband te hebben met verschillende grootheden. Wanneer deze verbanden gevonden zijn, kunnen de gemeten weerstandswaarden geschaald worden.



Voor een analyse van verbanden tussen grootheden waar de orde grootte (eenheden) de conclusies niet 'vervuilen', worden de grootheden uitgedrukt in dimensieloze coëfficiënten. Wanneer de weerstand  $R$  [N] gedeeld wordt door de dichtheid van het medium  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>], de snelheid  $V$  [m<sup>2</sup>/s] en het nat oppervlak  $A$  [m<sup>2</sup>], vallen de eenheden tegen elkaar weg. De dimensieloze weerstand ofwel weerstandscoëfficiënt  $c_t$  wordt nu gelijk aan:

$$c_t = \frac{R_t}{0,5 \rho V^2 A} \quad (4.1)$$

waarbij  $R_t$  en  $c_t$  staan voor totale weerstand. [2] De viskeuze weerstand en de restweerstand kunnen op dezelfde manier dimensieloos uitgedrukt worden door respectievelijk  $R_t$  door  $R_v$  en  $R_r$  te vervangen en  $c_t$  door  $c_v$  en  $c_r$ .

De viskeuze weerstand toont een correlatie met het Reynoldsgetal ( $Rn$ ) van de stroming. Het Reynoldsgetal

$$Rn = \frac{V L \rho}{\mu} \quad (4.2)$$

vertegenwoordigt de verhouding tussen viskeuze en inertiekrachten. De viskeuze weerstandscoëfficiënt  $c_v$  wordt berekend door de huidwrijvingscoëfficiënt te bepalen en deze te vermenigvuldigen met een vormfactor:

$$c_v = (k + 1) c_f \quad (4.3) [2]$$

waarbij

$$c_f = \frac{0,075}{(\log_{10} Rn - 2)^2} \quad (4.4) [2]$$

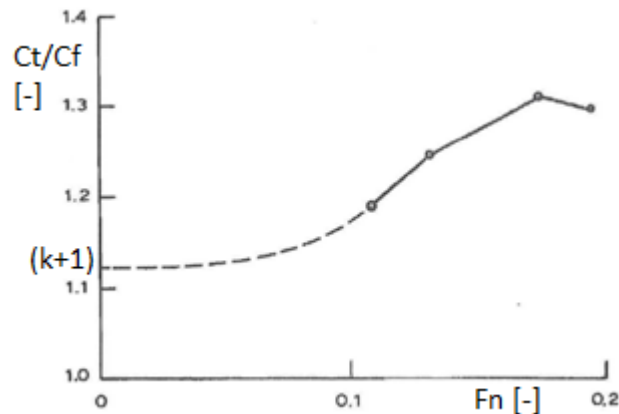
Het verband (4.4) tussen de huidwrijvingscoëfficiënt en het Reynoldsgetal wordt internationaal gebruikt om de weerstand van schepen te voorspellen en is vastgesteld door de International Towing Tank Conference (ITTC) in 1957.

Om de vormfactor te bepalen, wordt de gemeten totale weerstand  $R_t$  omgezet naar  $c_t$  en wordt  $c_r$  berekend. Vervolgens wordt  $c_t/c_r$  uitgezet tegen het Froudegetal, de dimensieloze snelheid. De formule voor het Froudegetal is

$$Fn = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (4.5)$$

waarbij  $V$  de scheepssnelheid is in m/s,  $g$  de zwaartekrachtversnelling in m/s<sup>2</sup> is en  $L$  de staartlengte in m is. Het Froudegetal vertegenwoordigt de verhouding tussen gravitatie- en inertiekrachten. De golfweerstand heeft een relatie met dit Froudegetal en neemt af naarmate deze dimensieloze snelheid afneemt. Er wordt gesteld dat  $c_r$  gaat naar 0 als  $Fn$  ook naar 0 gaat, zodat bij  $Fn = 0$  alleen de viskeuze weerstand een rol speelt. Uit de grafiek wordt de trend van  $c_t/c_r$  doorgezet naar  $Fn = 0$  en daar afgelezen. Deze waarde geeft  $k+1$ , waarbij  $k$  de vormfactor is. Deze methode is weergegeven in figuur 4.2.

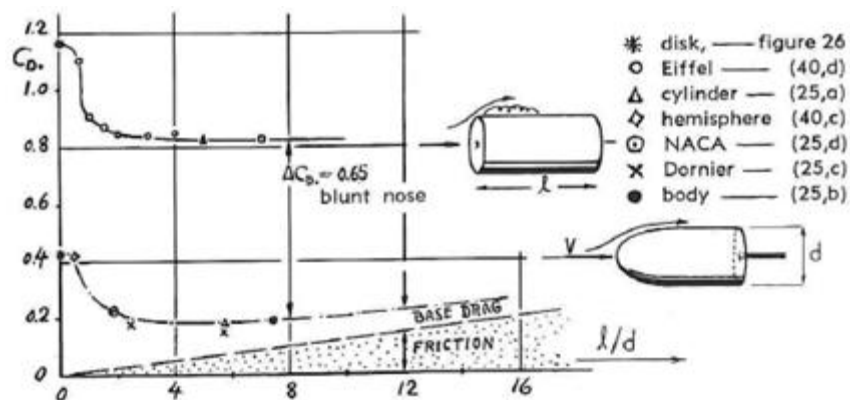
Nu de vormfactor is gevonden, is tevens  $c_v$  bekend. Wanneer  $c_t$  wordt verminderd met  $c_v$  blijft  $c_r$  over: de restweerstand. In het geval van de staart wordt aangenomen dat  $c_r$  de golfweerstand aangeeft, omdat andere factoren, zoals luchtweerstand, worden verwaarloosd. De golfweerstand is gecorreleerd met het Froudegetal. [2]



Figuur 4.2: Methode voor het extrapoleren voor het bepalen van de vormfactor  $k+1$ .

#### 4.1.2 VOORSPELLING VAN DE WEERSTAND EN BEPALING VAN DE HYPOTHESE

Bovenstaande theorie doet voorspellingen over het verloop van de weerstand. De absolute grootte van de weerstand kan zonder meetresultaten niet worden voorspeld met de theorie. Voor het experiment is echter wel een voorspelling van de grootte van de weerstandscoëfficiënten nodig. Metingen aan een deels ondergedompelde, flexibele, onregelmatige, vloeistof absorberende staart zijn nooit eerder gedaan. Er is wel onderzoek gedaan naar weerstand van een volledig ondergedompelde vaste cilinder, figuur 4.3. In deze figuur is de weerstandscoëfficiënt  $c_d$  van een cilinder met stompe en afgeronde neus uitgezet tegen de lengte-diameter verhouding van de cilinder.



Figuur 4.3: 'Drag coëfficiënts' ofwel viskeuze weerstandscoëfficiënten van cilindrische lichamen in axiale stroming - vs. de lengte/diameter ratio. Met stompe en afgeronde neus. [4]

Deze waarden voor  $c_d$  zijn berekend met het aanstroomoppervlak in plaats van het nat oppervlak zoals bij de overige coëfficiënten die worden genoemd in dit onderzoek. De weerstand is te berekenen met

$$R_d = c_d \cdot 0.5 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A_{aanstroom} \quad (4.6)$$

Verwacht wordt dat de viskeuze weerstand van de staart van dezelfde orde grootte is als de weerstand van een volledig ondergedompelde cilinder. De vorm van de staart is namelijk vergelijkbaar met die van een cilinder met afgeronde neus en de staart is bijna volledig ondergedompeld. De onregelmatige vorm van de staart zal echter voor een hogere weerstand zorgen. Het kleinere natte oppervlak (95%) voor een verkleining. De grote ruwheid van het oppervlak zal ook invloed hebben op de grenslaag. Aangezien de stroming rondom de cilinder al turbulent is, wordt verwacht dat de viskeuze weerstand hierdoor toe neemt. In totaal wordt voor de staart dus een hogere viskeuze weerstand verwacht dan voor de cilinder, maar wel één van dezelfde orde grootte. In tabel 4.1 zijn de met (4.6) berekende weerstandswaarden van een ondergedompelde

cilinder met dezelfde afmetingen als de gebruikte staart te zien. In tabel 4.2 staan de gebruikte coëfficiënten die volgen uit figuur 4.3.

**Tabel 4.1: Voorspelling viskeuze weerstand van de staart in Newton**

V[m/s]	Lengte staart [m]					
	2,00	3,00	5,00	7,00	8,00	10,00
0,5	0,79	0,82	1,57	2,20	2,51	3,14
1,0	3,14	3,30	6,28	8,80	10,05	12,57
1,5	7,07	7,42	14,14	19,79	22,62	28,27
2,0	12,57	13,19	25,13	35,19	40,21	50,27
2,5	19,63	20,62	39,27	54,98	62,83	78,54

**Tabel 4.2: Weerstandscoefficiënt**

Lengte staart [m]	$c_d$ [-]
2,00	0,20
3,00	0,21
5,00	0,40
7,00	0,56
8,00	0,64
10,00	0,80

Met de weerstandswaarden uit deze tabel wordt de vormfactor van een ondergedompelde cilinder bepaald volgens de methode uit paragraaf 4.1.1. De vormfactor is gelijk aan 1,7. Voor de staart wordt een iets hogere waarde van 2,0 voorspeld en aangehouden als hypothese.

De grootte van restweerstand van de staart is onbekend. Vanwege de 'gestroomlijnde' vorm en lage Froudegetallen wordt deze kleiner geschat dan de viskeuze weerstand. De werkelijke waarde zal uit de meetresultaten van het experiment moeten blijken. Voor het verloop van  $c_r$  ten opzichte van  $F_n$  wordt een lineair verband verwacht. Dit omdat bij verhoging van de snelheid van een schip de weerstand van dit schip in het algemeen tot de derde macht toeneemt. [5]

Voor de hypothese volgend uit de onderzoeksvraag 1 volgt dan dat de totale weerstand gelijk is aan

$$R_t = (c_v + c_r) \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A \quad (4.7)$$

waarbij voor de viskeuze weerstandscoefficiënt  $c_v$  geldt

$$c_v = (k + 1) \cdot \frac{0,075}{(\log_{10} Rn - 2)^2} \quad (4.8)$$

met  $k = 2$ . Voor de restweerstand coëfficiënt  $c_r$  geldt

$$c_r = a \cdot F_n + b \quad (4.9)$$

waarbij  $a$  en  $b$  nog onbekende coëfficiënten zijn.

#### 4.2 Velocity Prediction Program

Voor het opstellen van de tweede hypothese, die volgt uit het exploratieve deel van dit onderzoek, wordt een Velocity Prediction Program (VPP) gebruikt. Een VPP is een programma bedoeld om de zeilsnelheid van verschillende jachten met bepaalde specifieke kenmerken voor elke combinatie van ware wind snelheid en koers te voorspellen. De huidige methodes zijn gebaseerd op de input van parameters van het jacht, waarna het programma aan de hand van data van sleeptank- en windtunnelonderzoek en complexe fysische modellen een voorspelling doet van de prestaties van het jacht. Het programma zoekt door middel van een iteratie proces een evenwicht tussen de hydrodynamische krachten op de romp en de aerodynamische krachten op de zeilen. Voor de complete uitleg van de hydrodynamische - en aerodynamische modellen wordt verwezen naar Van Oossanen [6].

Het VPP dat voor dit onderzoek gebruikt zal worden is het programma WinDesign [7]. WinDesign is een toonaangevend programma op het gebied van VPP's. Het programma beschikt over een reeks modelleermethodes en daarnaast genereert het programma een grote diversiteit aan output, welke evaluatie en nadere analyse mogelijk maakt.

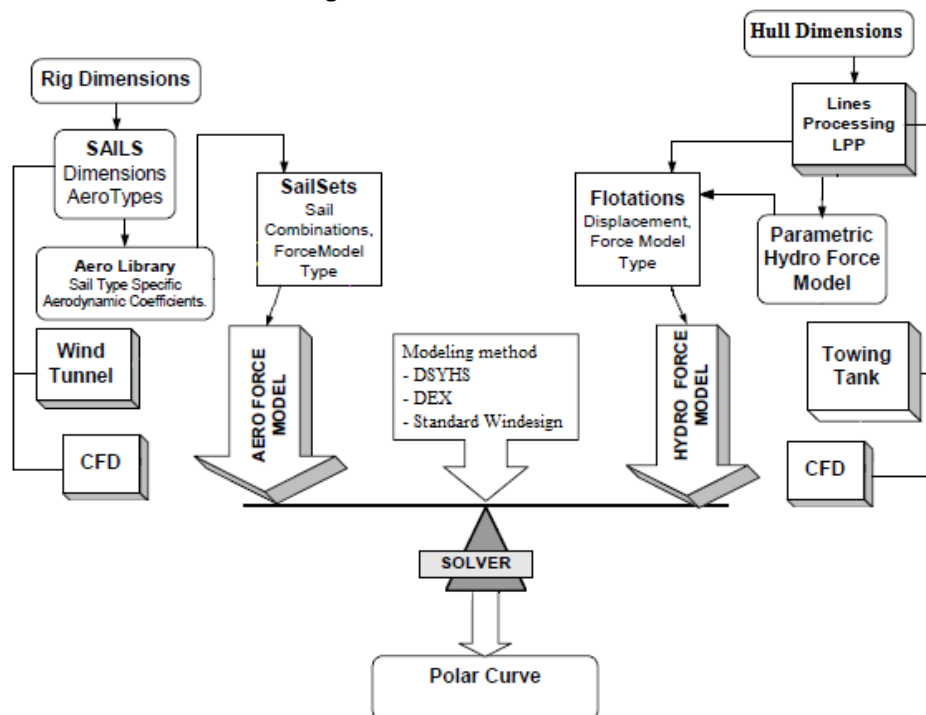
Voor de invoer in het programma is een specifieke verzameling van informatie van het jacht nodig. Deze informatie bestaat uit de karakteristieke parameters van de romp en appendages, de karakteristieke parameters van het tuig en de karakteristieke parameters van de onderdelen met luchtweerstand. Onderliggend aan deze fysische beschrijving van het jacht en tuig, is een berekeningsniveau waar de hydrodynamische en aerodynamische krachten bepaald worden. In

WinDesign is het mogelijk om dit hydrodynamische- en aerodynamische krachten model aan te passen met eigen gegenereerde onderzoeksdata. Alle informatie in het programma is in een bepaalde volgorde geordend. In figuur 4.4 is een overzicht van de voor dit onderzoek van belang zijnde informatiestromen binnen het programma opgenomen.

In het programma kan gekozen worden voor meerdere hydrodynamische modeleringmethodes, namelijk:

- Standard WinDesign Hydrodynamic model.
- Delft Systematic Yacht Hull Series (DSYHS) Hydrodynamic model.
- Simplified WinDesign Hydrodynamic model.
- Wolfson Experimental data regression fit.
- YRI Experimental data regression fit.
- Direct Experimental Data Entry (DEX)

Deze modeleringstypen verschillen in de gebruikte hydrodynamische krachtenmodellen, onderliggende meetdata en in de hoeveelheid informatie die benodigd is als input. De gebruikte modeleringmethodes voor dit onderzoek zijn het DSYHS Hydrodynamic-model en het DEX-model. Het DSYHS model is gebaseerd op regressie analyse van sleeptank onderzoek met meer dan 50 verschillende zeiljachtrompen. Het DEX-model wordt gebruikt als direct de gevonden data van sleeptankonderzoek of CFD-berekeningen verwerkt dient te worden.



Figuur 4.4: Overzicht informatiestromen binnen WinDesign

Via het DEX-model is het mogelijk om de weerstand van de staart aan het programma toe te voegen. De experimentele data invoer van de hydrodynamische krachten wordt in het programma gesplitst in meerdere delen. De weerstand van het jacht onder een willekeurige drift- en hellingshoek op een bepaalde snelheid wordt opgedeeld in: de weerstand bij 0 graden helling, de verandering van de restweerstand ten gevolge van helling en de geïnduceerde weerstand ten gevolge van de drifthoek en de daardoor opgewekte dwarskracht. Bij al deze afzonderlijke componenten wordt de weerstand van de staart opgeteld. De nu verkregen weerstandscomponenten worden vervolgens als invoer voor het programma gebruikt. De verschillende staartlengtes krijgen dus elk een eigen invoer.

## 5. Plan van aanpak

---

In de loop van dit bachelor onderzoeksproject zijn er twee verschillende versies van de opdracht ter sprake gekomen. De eerste versie van de opdracht, zoals oorspronkelijk bedoeld door de projectbegeleiders, bleek na een uitgebreide literatuurstudie niet haalbaar binnen de beschikbare tijd. Daarom is er in overleg met de begeleidende docenten een tweede versie van de opdracht gemaakt. In dit hoofdstuk zullen beide versies kort worden toegelicht.

### 5.1 Eerste versie van het onderzoek – dynamisch model

---

In de eerste versie van dit bachelor onderzoeksproject werd er gesproken over een model dat het dynamisch gedrag van de Protei met een olie absorberende staart beschrijft. Met dit model zou het mogelijk moeten worden om te testen of de Protei met verzadigde staart vanuit stilstand te versnellen is.

In deze versie van het onderzoek zou er een dynamisch model van een normale zeilboot geschreven worden. Aan dit model konden vervolgens de weerstandkarakteristieken van de staart, die verkregen zouden worden uit sleepproeven, worden toegevoegd. Om dit dynamische model te maken, zijn de eerste twee weken van het project besteed aan literatuuronderzoek naar de benodigde formules. Er zijn in die periode verschillende documenten bestudeerd van onder andere dr.ir. J.A. Keuning en ir. B. Verwerft, die zich in dit onderwerp verdiept hebben.

Uit de bestudering van deze documenten en overleg met de begeleidende docenten is vervolgens geconcludeerd dat een dergelijk onderzoek te veel tijd in beslag zou nemen. Het schrijven van een dynamisch model voor een zeilboot vergt meer tijd dan beschikbaar is voor het bachelor onderzoeksproject. Hierna is in overleg met de begeleidende docenten besloten om een andere opzet te kiezen voor het project.

### 5.2 Tweede versie van het onderzoek – stationair model

---

De tweede versie van het onderzoek gaat niet over het dynamische gedrag van de Protei met verzadigde staart, maar juist over het stationair gedrag. Er wordt dus gekeken naar het evenwicht van de voortstuwende krachten in de zeilen en de hydrodynamische krachten die werken op de romp. Hieruit zal een evenwichtssnelheid volgen. Dit is dus tevens de maximale snelheid die de Protei kan halen bij verschillende staartlengtes, koers en windsnelheden.

Het experiment dat gedaan wordt om dit te onderzoeken blijft hetzelfde. Ook in deze versie zullen de weerstandkarakteristieken van de staart bij verschillende snelheden en lengtes in de sleeptank bepaald worden. Uit de verkregen weerstanden, wordt in combinatie met de beschikbare theorie over weerstand van lichamen in water een verband gezocht tussen de lengte van de staart, de snelheid waarmee gesleept wordt en de weerstand van de staart.

Deze extra weerstand ten opzichte van een standaard zeilboot kan in een Velocity Prediction Program (VPP) worden toegevoegd om zo de snelheid van de Protei met staart te kunnen berekenen op verschillende koersen met verschillende windsnelheden. In het VPP is er als invoer een zeilboot gekozen die zo dicht mogelijk bij het ontwerp van de Protei komt als het programma toelaat. Met de gevonden resultaten van het VPP kan er vervolgens een hypothese gevormd worden.

# 6. Experiment

Nu het onderzoek is afgebakend en het plan van aanpak bekend is, kan het experiment worden uitgevoerd. In dit hoofdstuk worden alle aspecten van het verrichte experiment uiteengezet. Allereerst komt het ontwerp van het experiment aan bod en worden alle facetten van de opstelling kort toegelicht. Daarna worden de meetprocedure en de planning van de metingen behandeld.

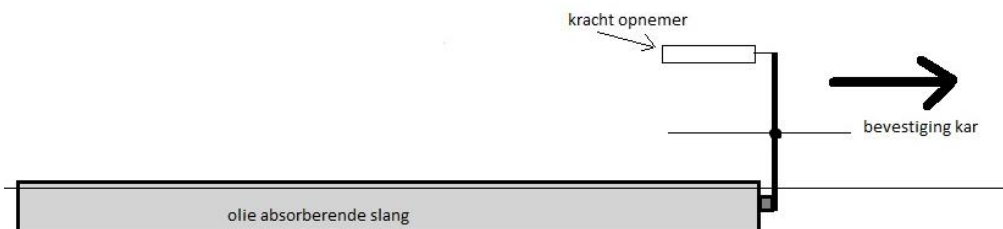
## 6.1 Ontwerp experiment

De weerstand van de staart wordt als functie van de lengte en scheepssnelheid bepaald. Om deze functie experimenteel te bepalen wordt de staart geslept en de weerstand gemeten. Het slepen gebeurt bij verschillende snelheden en staartlengtes. Er is hierbij één afhankelijke variabele: de weerstand van de staart.

Om de weerstand van de staart te meten, volstaat een eenvoudige meetopstelling bestaande uit één krachtopnemer, één staart, één sleepwagen en de nodige apparatuur om de krachtopnemer uit te lezen. De twee laatstgenoemden zijn al aanwezig in de kleine sleeptank van 3mE waar het experiment plaatsvindt. Een schets van een deel van de meetopstelling is te vinden in figuur 6.1. De te gebruiken krachtopnemer moet een meetbereik van 1 tot 100 Newton hebben. Dit is bepaald aan de hand van de schattingen voor de weerstand in paragraaf 4.1.

De onafhankelijke variabelen, die worden ingesteld en gemeten, zijn de lengte van de staart [m] en de snelheid van de sleepwagen [m/s]. De interveniërende variabelen bij dit experiment zijn de temperatuur [°C], de dichtheid van het water [kg/m<sup>3</sup>] en de uitwijking van de staart [cm].

De weerstand van de staart wordt gemeten bij lengtes van 2, 3, 5, 7, 8 en 10 meter en snelheden van 0,5 tot en met 2,5 m/s met een interval van 0,5 m/s. Daarnaast wordt bij elke lengte een nulmeting uitgevoerd als de sleepwagen stilstaat. Het totaal aantal verschillende metingen is dus 36.



Figuur 6.1: Ontwerp van de meetopstelling

## 6.2 Opstelling experiment

In deze paragraaf worden de hoofdonderdelen van de meetopstelling kort besproken. Daarnaast worden er een aantal grafische weergaven van de uiteindelijke meetopstelling gegeven.

### 6.2.1 SLEEPTANK & SLEEPWAGEN

In tabel 6.1 is een overzicht van de specificaties van de kleine sleeptank van de faculteit 3mE opgenomen. De sleepwagen behorend bij de kleine sleeptank haalt een maximale snelheid van 3 m/s. Op de sleepwagen is de apparatuur die nodig is om de krachtopnemer uit te lezen en de uitgelezen data te verwerken aanwezig.

Tabel 6.1: Afmetingen sleeptank

Lengte	[m]	85,0
Breedte	[m]	2,75
Diepte	[m]	1,20

### 6.2.2 STAART

De staart die voor de metingen wordt gebruikt, is geleverd door VanDoClean [8]. Het productnummer van de gebruikte staart is *6016-B Oil Only Boom Double Skin 500x20cm*. De olie absorberende staart is gemaakt van polypropyleen watten die in een sok zitten met daaromheen een plastic net. Tussen de sok en het net zit een touw waar aan de staart gesleept kan worden, zie figuur 6.2. De originele staart, zoals geleverd door VanDoClean, is niet volledig homogeen. In de staart zijn een aantal hobbels aanwezig. Door deze hobbels in de vulling van de staart varieert de diameter enigszins. In tabel 6.2 is een overzicht van de specificaties van de originele staart opgenomen. In deze tabel staan onder andere de diameter en samenstelling van de staart.

Tabel 6.2: Specificaties van de verschillende staarten

Specificaties originele staart			Specificaties te slepen staart		
Diameter	[cm]	15,0	Diameter	[cm]	20,0
Massa polypropyleen	[kg]	6,5	Massa polypropyleen	[kg]	1,8
Massa net+sok+touw	[kg]	0,35	Massa net+sok+touw	[kg]	0,35
Massa katoen	[kg]	0,0	Massa katoen	[kg]	21,0
Lengte	[m]	5,0	Lengte	[m]	5,0

Een volledig met olie verzadigde staart heeft een lengte van 5,0 meter en een gemiddelde diameter van 20,0 cm. Het polypropyleen kan 22 maal zijn eigen gewicht aan olie absorberen. Daarom wordt de diameter en onderdempeling van de geleverde nieuwe staart aangepast om een volledig met olie verzadigde staart te simuleren. Hieronder wordt de onderdempeling van een met olie verzadigde staart berekend. De totale massa van een met olie verzadigde staart is gelijk aan

$$m_{\text{verzadigde staart}} = 6,5 \cdot 22 + 6,5 + 0,35 = 149,85 \text{ kg.} \quad (6.1)$$

Na het opnemen van deze olie neemt de diameter van de staart toe tot 20,0 cm. Het totale volume van de staart is gelijk aan

$$V_{\text{staart}} = 0,10^2 \pi \cdot 5,00 = 0,157 \text{ m}^3. \quad (6.2)$$

Voor de onderdempeling van de staart volgt dus

$$\nabla_{\%} = \frac{\rho_{\text{staart}}}{\rho_{\text{water}}} = \frac{149,85}{0,157 \cdot 998} = 95,6\%. \quad (6.3)$$



Figuur 6.2: Staart gevuld met polypropyleen (links), De staart gevuld met mengsel van katoen en polypropyleen op de juiste diepgang (rechts).

De diameter van de originele staart moet voor dit onderzoek dus 5,0 centimeter toenemen. Ook de massa van de staart moet toenemen met ongeveer 150 kg om een met olie verzadigde staart te simuleren. Er is daarom gekozen om de vulling van de originele staart (polypropyleen) te vervangen door een mengsel van katoen en polypropyleen. Het katoen zal een grote hoeveelheid water opnemen, waardoor de staart de juiste diepgang krijgt. Door de nieuwe vulling verandert de buitenkant van de staart niet, de vulling zit nog altijd in de oorspronkelijke sok met daaromheen het net. De nieuwe staart is afwisselend gevuld met een deel polypropyleen een deel katoen. De

specificaties van de te slepen staart zijn terug te vinden in tabel 6.2. Ook de oorspronkelijke hobbels in het oppervlak blijven bij deze nieuwe vulling behouden. De diameter van de te slepen staart is gecontroleerd met behulp van een houten mal.

Door de niet volledig homogene vulling varieert de diepgang enigszins. Daarom is indompeling van de nieuwe staart gecontroleerd om te bepalen of deze gemiddeld 95% is. Dit is gedaan door de breedte van het waterdoorsnijdend oppervlak op te meten. Bij een indompeling van 95% moet deze breedte gemiddeld 12cm zijn. Hieronder zal kort toegelicht worden hoe dit bepaald is.

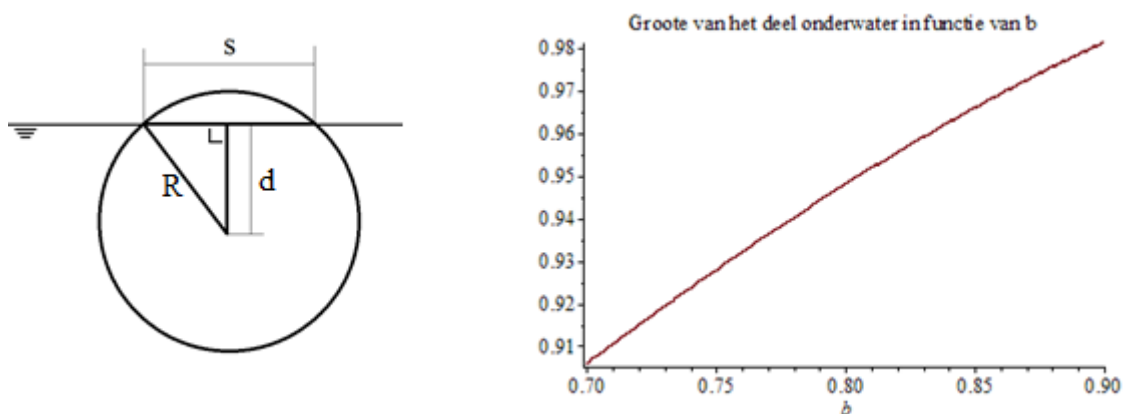
De indompeling is gerelateerd aan de breedte van het waterdoorsnijdend oppervlak  $s$ , figuur 6.3. Deze relatie kan bepaald worden door het oppervlak onderwater te delen door het totale oppervlak van de doorsnede van de staart

$$\nabla_{\%}(b) = \frac{\int_{-1}^b x^2 - 1 dx}{\int_{-1}^1 x^2 - 1 dx}. \quad (6.4)$$

Deze formule geeft het percentage indompeling als functie van  $b$ , voor  $b$  geldt

$$b = d/R. \quad (6.5)$$

In figuur 6.3 is een grafische weergave van (6.4) in het relevante domein opgenomen. Uit deze grafiek blijkt dat  $b = 0.8$  bij 95% indompeling. De breedte van het waterdoorsnijdend oppervlak  $s$  is dan eenvoudig uit  $b$  te bepalen. Deze breedte  $s$  blijkt 12,0 cm te zijn.



Figuur 6.3: Doorsnede van de staart (links). Grafiek die in functie van  $b$  het percentage indompeling geeft (rechts).

Voor het experiment zijn verschillende lengtes staart nodig. Aangezien de maximaal leverbare staartlengte 5 meter was, zijn er twee staarten van deze lengtes aan elkaar verbonden om een staart van 10 meter te maken. Hierbij zijn de netten van de staarten aan elkaar genaaid. Deze 10 meter staart is elke keer ingekort om zo de juiste lengte staart te kunnen slepen.

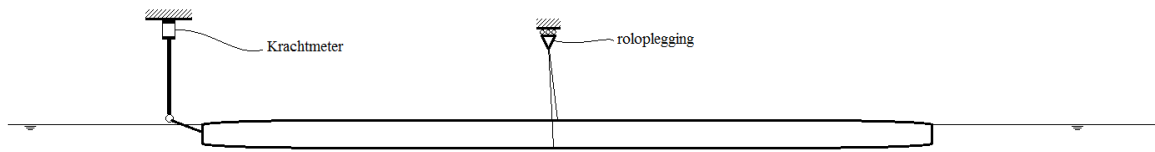
### 6.2.3 MEETINSTRUMENTEN

De krachtopnemer meet de kracht met een aantal rekstrookjes. Als er een kracht uitgeoefend wordt op de krachtopnemer veranderen de rekstrookjes van lengte. Door de lengteverandering verandert de weerstand. Dit weerstandsverschil wordt gemeten en gerelateerd aan een spanning. Door de krachtopnemer te ijken wordt deze spanning gerelateerd aan een kracht. De weerstand wordt tijdens een run met 30 Hz gesampled door een computer. Dit levert een gemiddelde waarde en een standaarddeviatie op voor elke run. De gebruikte krachtopnemer heeft een bereik van 1 tot 100 Newton.

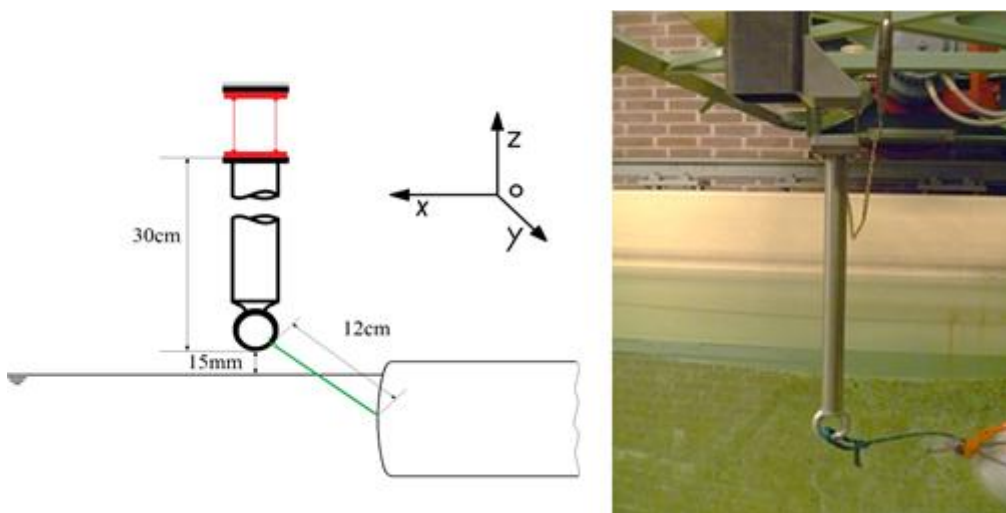


#### 6.2.4 MEETOPSTELLING

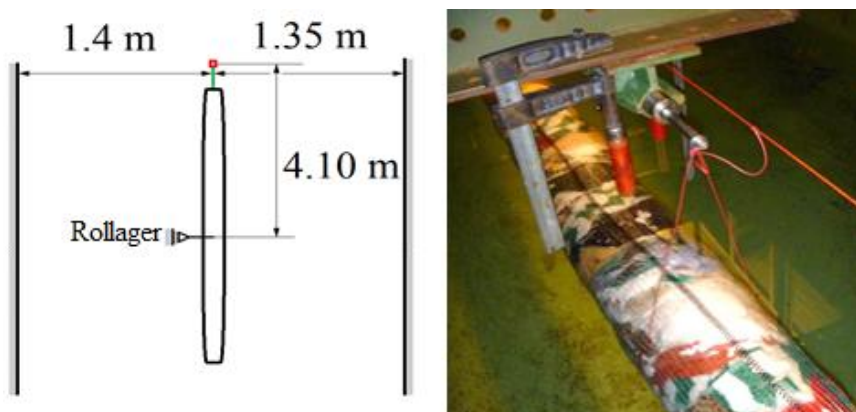
Om de weerstand van de staart te bepalen tijdens het slepen, is de staart verbonden met de krachtopnemer. In figuur 6.4 is een schematische weergave van de opstelling opgenomen. De verbinding van de staart aan de krachtopnemer is in figuur 6.5 weergegeven. In deze figuur is te zien dat de staart door middel van een touw met een lengte van 12,0 cm verbonden is met een oog, dat 15mm boven het water oppervlak hangt. Het oog zit dicht tegen het wateroppervlak om de richting waarmee de staart wordt voortgetrokken zoveel mogelijk axiaal te maken. Het oog zit aan een ronde staaf met een lengte van 30cm vast. Aan deze staaf zit de krachtopnemer verbonden. De krachtopnemer is star verbonden aan de sleepwagen. Naast de bevestiging aan de krachtopnemer is de staart ook op vier meter (vanaf de voorkant gemeten) verbonden met een rollager. Het rollager heeft als functie de beweging van de staart in dwarsrichting te beperken. In figuur 6.6 is een schematisch overzicht hiervan opgenomen.



Figuur 6.4: Schematische weergave van de meetopstelling



Figuur 6.5: Schematische weergave van de verbinding van de staart(links) en de praktische uitvoering(rechts)



Figuur 6.6: Schematische weergave van het rollager (links) en de praktische uitvoering (rechts).

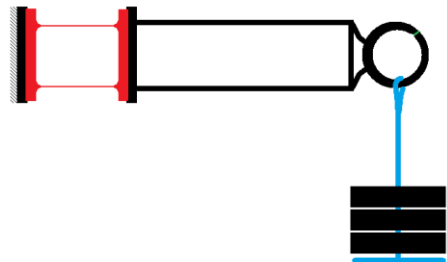
### 6.3 Meetprocedure

Tijdens het experiment is er telkens een standaard meetprocedure gevolgd. In deze paragraaf zal deze meetprocedure kort toegelicht worden.

#### 6.3.1 IJKEN MEETINSTRUMENTEN

De krachtopnemer dient geïjkt te worden alvorens er mee gemeten kan worden. Door te ijken wordt een lineair verband tussen kracht en spanning gevonden. Dit verband wordt in de computer ingevoerd die vervolgens een gemeten voltage kan koppelen aan een kracht.

Het ijken van de krachtopnemer gaat als volgt. De meetopstelling wordt horizontaal geplaatst, figuur 6.7. Vervolgens worden de meetinstrumenten op nul gezet. Dan worden er stuk voor stuk gewichten toegevoegd en na elke toevoeging wordt de waarde van de spanning afgelezen. Hetzelfde wordt gedaan bij het weghalen van de gewichten. Daarna wordt de krachtopnemer 180 graden gedraaid. En wordt de zelfde ijkprocedure gevolgd. Op deze manier is dus een relatie te vinden tussen de kracht die werkt op de krachtopnemer en het afgegeven voltage.



Figuur 6.7: Schematische weergave ijken krachtopnemer

#### 6.3.2 CONTROLE UITWIJING STAART

Een zeer belangrijke interveniërende variabele bij dit experiment is de uitwijking van de staart. Bij het experiment zal de uitwijking van de staart gecontroleerd worden door op 3 meter van het ophangpunt de uitwijking te meten. Dit is gedaan door de afstand te meten tussen de middenlijn van de staart en een draad die in het midden van de sleepwagen gespannen was. Deze gevonden waarden zijn als aparte waarneming genoteerd en zijn terug te vinden in bijlage 4.

#### 6.3.3 STAPPENPLAN METINGEN

- Staart recht leggen voor de meting begint.
- Bij versnellen staart vasthouden om de krachtopnemer te ontlasten.
- Eenmaal op snelheid staart rustig loslaten en kort daarna de meting starten.
- 30 seconden meten of zo lang mogelijk.
- Tijdens het meten wordt de uitwijking van de staart genoteerd.
- Bij afremmen staart vasthouden zodat de meetapparaten niet beschadigd raken.
- De gemiddelde kracht en standaarddeviatie worden genoteerd.
- 10-15 minuten wachten totdat het wateroppervlak geëgaliseerd is.
- Elke meting wordt 3 keer herhaald.
- Als alle metingen aan een bepaalde lengte klaar zijn wordt de staart ingekort en wordt de lengte van de ingekorte staart gemeten.

Tussen de metingen in wordt per staartlengte drie keer een nulmeting uitgevoerd. Dit om te controleren of er tijdens de meting of tijdens het inkorten van de staart niets veranderd is aan de instelling van de meetapparatuur.

### 6.4 Planning van de metingen

Tijdens het experiment moeten er 36 verschillende metingen qua lengte staart en snelheid plaats vinden. Om het betrouwbaarheidsinterval zo klein mogelijk te maken, wordt elke meting zo vaak mogelijk herhaald. Binnen de gegeven tijd in de sleeptank wordt er verwacht dat elke meting drie keer uit gevoerd kan voeren. Het totaal aantal metingen komt hiermee op 108. Uitgaande dat één meting ongeveer 14 minuten (de weerstandsmeting en het wachten op egalisatie van het wateroppervlak) in beslag neemt, komt het totaal aantal uren voor dit experiment op ongeveer 25 uur. Bij zeven effectieve meeturen per dag zijn er ongeveer drieënhalve dagen nodig voor de

metingen. Met één dag opbouwen en een halve dag afbouwen zijn er dus vijf dagen nodig. In onderstaande tabel is een overzicht van de meetvolgorde opgenomen.

**Tabel 6.3: Volgorde van de uit te voeren metingen**

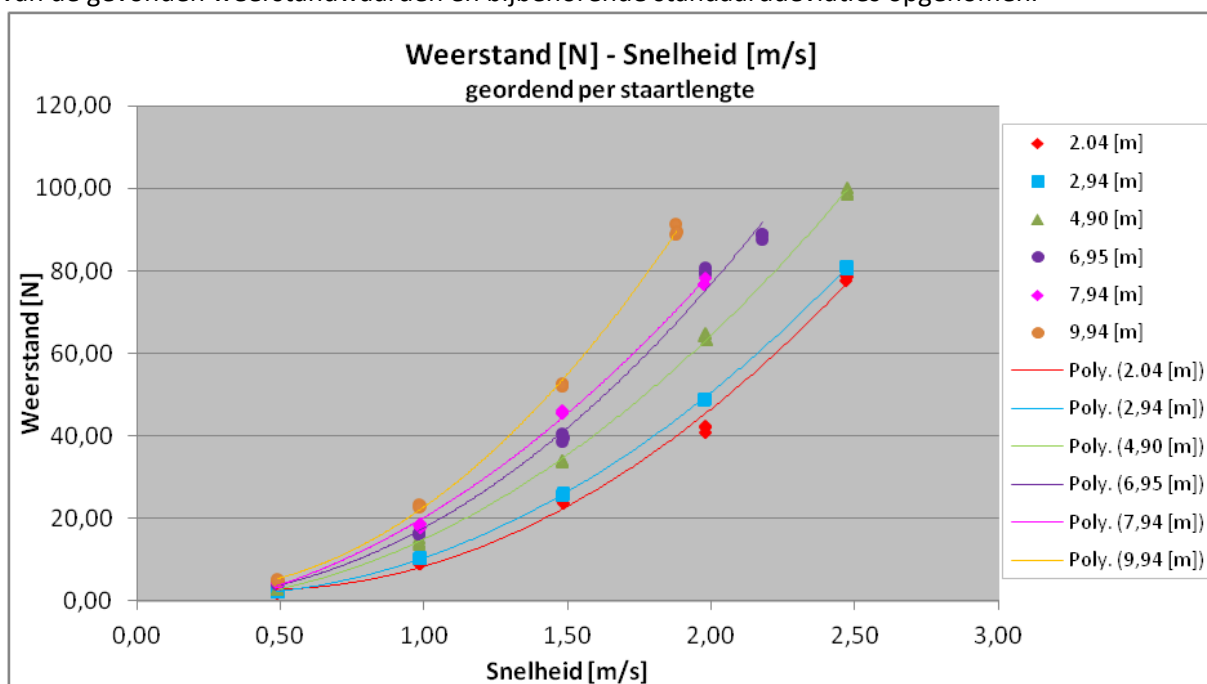
nr.	aantal	lengte [m]	snelheid [m/s]	nr.	aantal	lengte [m]	snelheid [m/s]
1	3	10	0,0	19	3	5	0,0
2	3	10	0,5	20	3	5	0,5
3	3	10	1,0	21	3	5	1,0
4	3	10	1,5	22	3	5	1,5
5	3	10	2,0	23	3	5	2,0
6	3	10	2,5	24	3	5	2,5
7	3	8	0,0	25	3	3	0,0
8	3	8	0,5	26	3	3	0,5
9	3	8	1,0	27	3	3	1,0
10	3	8	1,5	28	3	3	1,5
11	3	8	2,0	29	3	3	2,0
12	3	8	2,5	30	3	3	2,5
13	3	7	0,0	31	3	2	0,0
14	3	7	0,5	32	3	2	0,5
15	3	7	1,0	33	3	2	1,0
16	3	7	1,5	34	3	2	1,5
17	3	7	2,0	35	3	2	2,0
18	3	7	2,5	36	3	2	2,5

# 7. Meetresultaten

Uit het experiment volgt ruwe data. Deze data moet vervolgens verwerkt worden, zodat het bruikbaar is voor het onderzoek. In paragraaf 7.1 wordt een beknopt overzicht van de ruwe meetdata gegeven. Voor de volledige meetdata wordt verwezen naar bijlage 4. In paragraaf 7.2 zal de ruwe data gebruikt worden om de statistische waarde te bepalen. In hoofdstuk 8 zullen de meetresultaten verder verwerkt worden en gekoppeld worden aan de onderzoeksvragen.

## 7.1 Ruwe data

De gevonden meetresultaten zijn grafisch weergegeven in figuur 7.1. Bijlage 4 bevat alle meetresultaten. Aangezien elke meting bestaat uit een reeks van samples is voor elke meting een gemiddelde en een standaardafwijking berekend. Op de volgende pagina is een tabellarisch overzicht van de gevonden weerstandwaarden en bijbehorende standaarddeviaties opgenomen.



Figuur 7.1: Gemeten weerstand (gecompenseerd met nulmeting) versus snelheid, per staartlengte

Tabel 7.1: Overzicht weerstandswaarden en bijbehorende standaarddeviaties (S.D.).

Lengte [m]	Snelheid [m/s]	Weerstand [N]	S.D.	Lengte [m]	Snelheid [m/s]	Weerstand [N]	S.D.
9,94	0,5	4,77	1,76	4,9	0,5	2,94	1,56
		5,07	1,59			2,90	1,55
		5,42	1,67			2,92	1,65
		5,03	1,64	4,9	1,0	13,75	1,35
		5,30	1,62			15,19	1,81
9,94	1,0	22,97	1,61	4,9	1,5	14,42	1,44
		23,30	1,95			33,52	1,47
		22,71	1,52			33,87	1,35
9,94	1,5	52,11	1,72	4,9	2,0	33,94	1,62
		52,73	2,07			64,24	1,58
		52,33	1,61			63,30	2,38
9,94	1,9	88,90	1,90	4,9	2,5	64,72	1,57
		91,24	2,78			99,03	2,23
		89,38	2,66			99,95	2,00
7,94	0,5	4,21	1,63	2,94	0,5	98,59	2,16
		4,06	1,50			2,05	1,83
		4,31	1,55			2,32	1,72
7,94	1,0	18,56	1,46	2,94	1,0	2,25	1,68
		17,85	1,46			10,25	1,48
		18,31	1,36			10,51	1,45
7,94	1,5	46,06	1,63	2,94	1,5	10,39	1,45
		45,61	1,90			25,72	1,81
		45,64	1,92			26,13	1,37
7,94	2,0	78,26	3,46	2,94	2,0	25,82	1,39
		78,37	3,18			49,08	1,58
		77,75	4,37			49,08	2,20
		78,37	3,91			48,76	1,67
		76,65	2,69			81,47	5,05
6,95	0,5	76,82	2,02	2,94	2,5	80,44	2,62
		4,42	1,72			81,06	2,26
		4,17	1,65			81,05	2,10
6,95	1,0	4,34	1,66	2,04	0,5	2,05	1,45
		16,47	1,54			2,05	1,49
		16,21	1,26			1,93	1,48
6,95	1,5	16,32	1,35	2,04	1,0	9,08	1,47
		39,66	1,61			8,92	1,28
		38,64	1,72			9,20	1,72
6,95	2,0	40,39	1,57	2,04	1,5	24,61	1,42
		79,11	1,83			24,45	1,41
		79,67	2,13			23,73	1,41
6,95	2,2	80,90	2,15	2,04	2,0	42,37	1,63
		87,73	3,52			42,09	1,75
		88,76	3,83			40,92	1,70
6,95	2,2	88,78	3,32	2,04	2,5	78,98	2,11
						77,75	1,62
						78,49	2,02

## 7.2 Statistiek

Aangezien elke meting een onnauwkeurigheid heeft, is het noodzakelijk te bepalen hoe nauwkeurig de weerstandsmetingen aan de staart zijn. Dit gebeurt door statistiek toe te passen op de meetresultaten. De kracht is gemeten op een ratioschaal. Een meting bestaat uit een reeks van samples die tijdens een run gemaakt zijn. Van een meting is een gemiddelde waarde en een standaardafwijking berekend met (7.1) & (7.2) respectievelijk.

$$\bar{x}_n = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (7.1) [9]$$

$$\sigma_n = \sqrt{\text{var}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_n)^2} \quad (7.2) [9]$$

Met het gemiddelde en de standaardafwijking voor drie metingen per lengte en per snelheid is het mogelijk om een 95% betrouwbaarheidsinterval te bepalen per lengte en per snelheid. Er wordt dan vanuit gegaan dat de spreiding rond de werkelijke verdeling normaal verdeeld is. Voor het betrouwbaarheidsinterval moet gelden

$$0,95 = P\left(\bar{X} - z \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{X} + z \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right). \quad (7.3)$$

Voor een normale verdeling en een significantie niveau van 0,05 geldt dat z gelijk is aan 1,96. Hieruit volgt

$$0,95 = P\left(\bar{X} - 1,96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{X} + 1,96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right).$$

Dit toegepast op de meetwaarden uit tabel 7.1 geeft tabel 7.2. In deze tabel wordt een tabellarisch overzicht gegeven van de 95%-betrouwbaarheidsintervallen per soort meting. Gemiddeld is de relatieve grootte van de betrouwbaarheidsintervallen 3%. Aangezien er enkel lineaire bewerkingen uitgevoerd worden op de meetresultaten zullen de uiteindelijke waarden ook  $\pm 3\%$  afwijken.

**Tabel 7.2: Overzicht 95%-betrouwbaarheidsintervallen per soort meting**

L [m]	V [m/s]	Ondergrens BI [N]	Bovengrens BI [N]	Breedte interval [N]	L [m]	V [m/s]	Ondergrens BI [N]	Bovengrens BI [N]	Breedte interval [N]
9,94	0,5	4,67	5,56	0,90	4,90	1,0	13,30	15,60	2,30
9,94	1,0	22,52	23,47	0,94	4,90	1,5	33,42	34,13	0,71
9,94	1,5	51,95	52,83	0,88	4,90	2,0	62,93	65,24	2,31
9,94	1,9	87,86	91,82	3,96	4,90	2,5	98,08	100,30	2,22
7,94	0,5	4,00	4,39	0,39	2,94	0,5	1,98	2,43	0,46
7,94	1,0	17,67	18,82	1,15	2,94	1,0	10,18	10,60	0,42
7,94	1,5	45,37	46,18	0,81	2,94	1,5	25,55	26,23	0,68
7,94	2,0	76,29	79,11	2,82	2,94	2,0	48,67	49,27	0,60
6,95	0,5	4,11	4,51	0,40	2,94	2,5	80,28	81,72	1,44
6,95	1,0	16,13	16,54	0,41	2,04	0,5	1,90	2,13	0,23
6,95	1,5	38,15	40,97	2,82	2,04	1,0	8,84	9,29	0,45
6,95	2,0	78,43	81,36	2,93	2,04	1,5	23,52	25,01	1,49
6,95	2,2	87,46	89,38	1,92	2,04	2,0	40,56	43,02	2,46
4,90	0,5	2,89	2,96	0,07	2,04	2,5	77,35	79,46	2,11

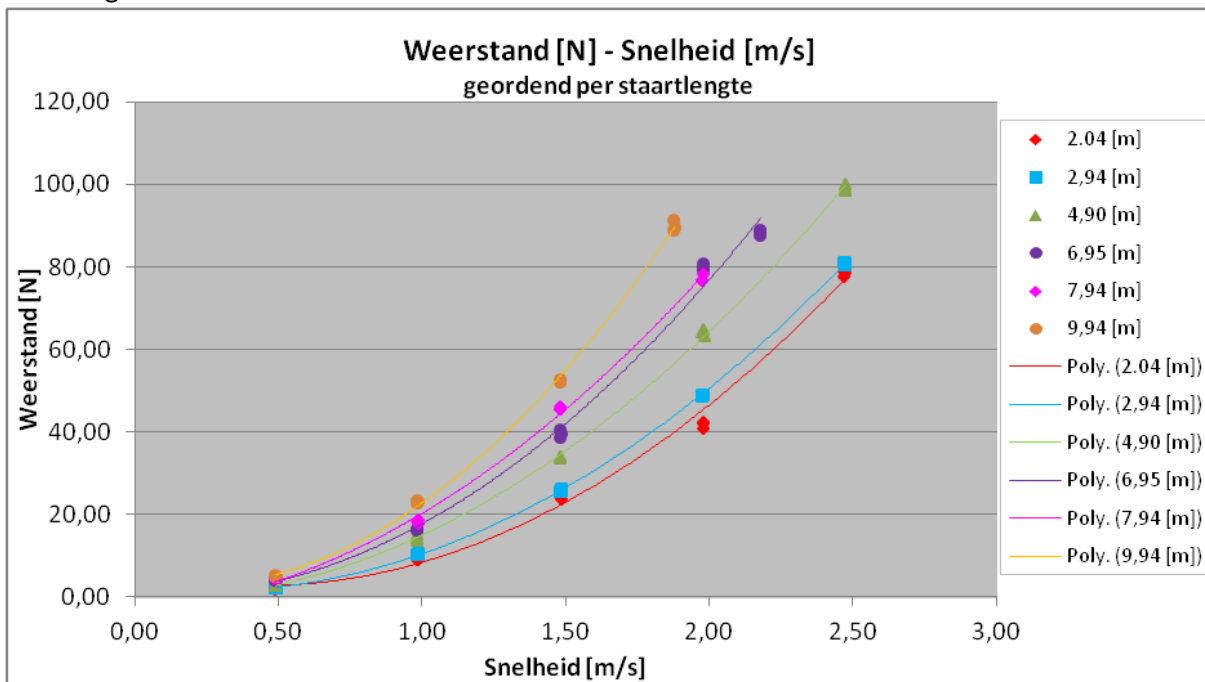
# 8. Integratie theorie met meetresultaten

In dit hoofdstuk worden de meetresultaten verwerkt met behulp van de theorie uit hoofdstuk 4. Allereerst zal in paragraaf 8.1 de eerste onderzoeksvraag behandeld en de hypothese getoetst worden door het verband tussen de weerstand van de staart met de lengte en snelheid te bepalen. In paragraaf 8.2 wordt een voorspelling gedaan als antwoord op de tweede onderzoeksvraag, door een snelheidsvoorspelling voor de Protei met verschillende staartlengtes te doen.

## 8.1 Weerstand van de staart

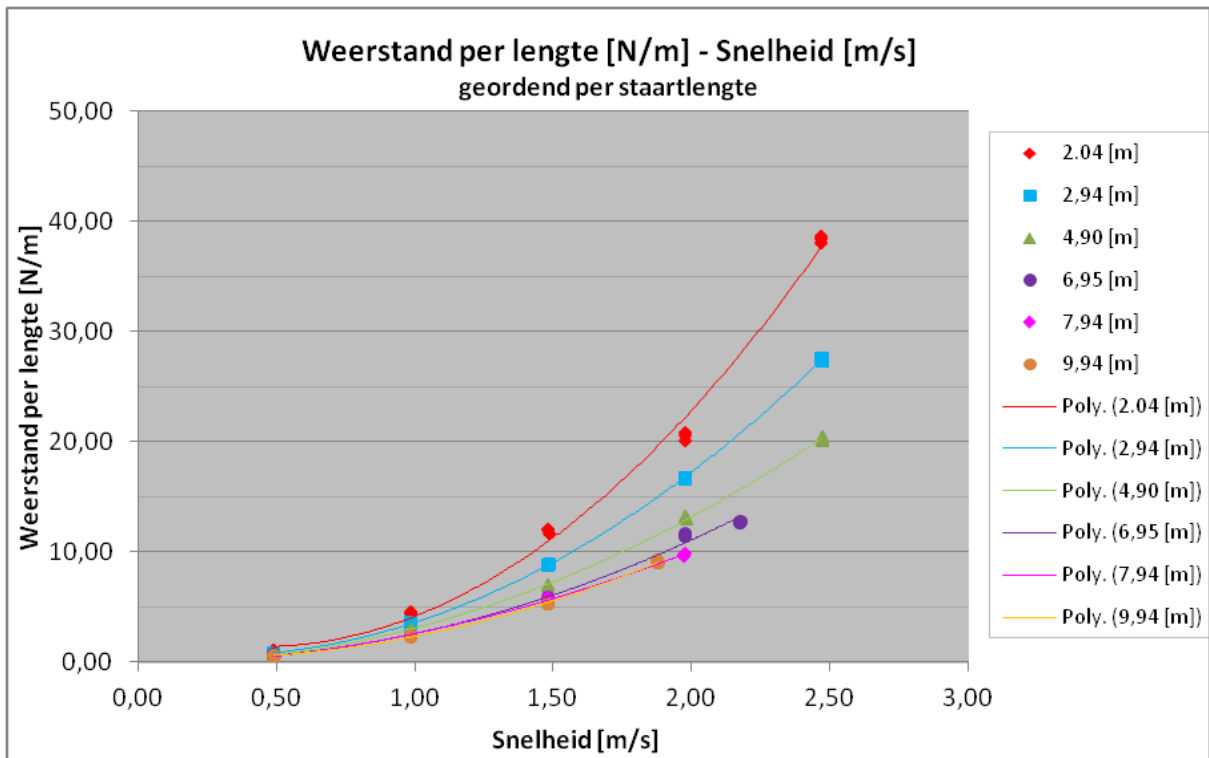
Bij staartlengtes rond 2, 3, 5, 7, 8 en 10 meter en bij snelheden van 0,5, 1,0, 1,5 en waar mogelijk 2,0 en 2,5 m/s is de weerstand in Newton gemeten. Deze waarden kunnen gecombineerd worden met de theorie over het schalen van weerstanden om een verband te vinden tussen  $c_v$  en  $R_n$ , en  $c_r$  en  $F_n$ .

In figuur 8.1 zijn de meetresultaten samengevat. De gemeten weerstand, verminderd met het gemiddelde uit de nulmetingen, is weergegeven als functie van de gemeten snelheid. Alle punten zijn gemeten waarden. De trendlijnen zijn per staartlengte toegevoegd om de leesbaarheid te vergroten. Elk type meting (gelijke staartlengte en ingestelde snelheid) is drie keer herhaald, waardoor er steeds drie datapunten op elkaar liggen. Te zien is dat de weerstand toeneemt met de staartlengte en de snelheid.



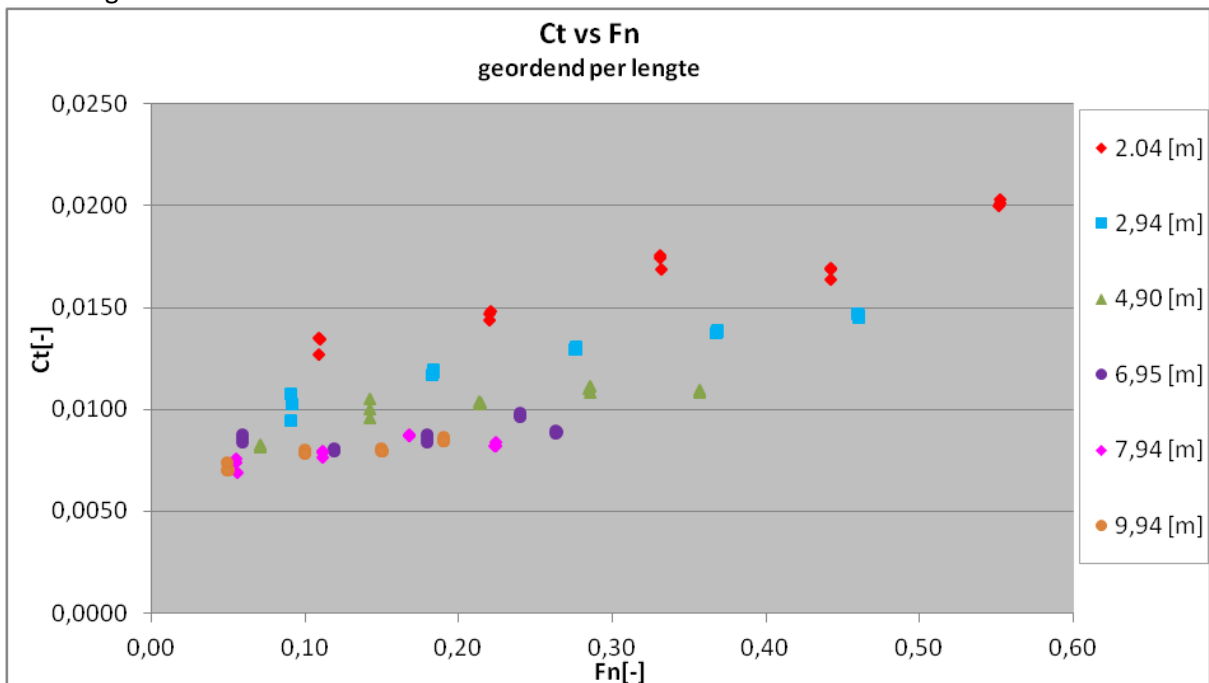
Figuur 8.1: Gemeten weerstand (gecompenseerd met nulmeting) versus snelheid, per staartlengte

Voor een duidelijker beeld van de invloed van de staartlengte op de totale weerstand, is in figuur 8.2 de weerstand per meter lengte weergegeven als functie van de snelheid. Te zien is dat een kortere staart een grotere weerstand per meter heeft dan een langere. De oorzaak hiervoor kan zijn dat weerstand veroorzakende begin- en eindeffecten zoals de boeggolf en het zog weinig afhankelijk zijn van de staartlengte. Bij een langere staart zijn ze even groot als bij een kortere, zodat de invloed per lengte afneemt bij het toenemen van de staartlengte. De absolute weerstand van een langere staart is wel groter dan die van een kortere, zoals te zien is in figuur 8.1. Hier kunnen andere wrijvings-effecten, zoals huidwrijving en golven die door onregelmatigheden in de doorsnede van de staart veroorzaakt worden, de oorzaak van zijn.



Figuur 8.2: Gemeten weerstand per lengte staart [N/m] versus snelheid [m/s]

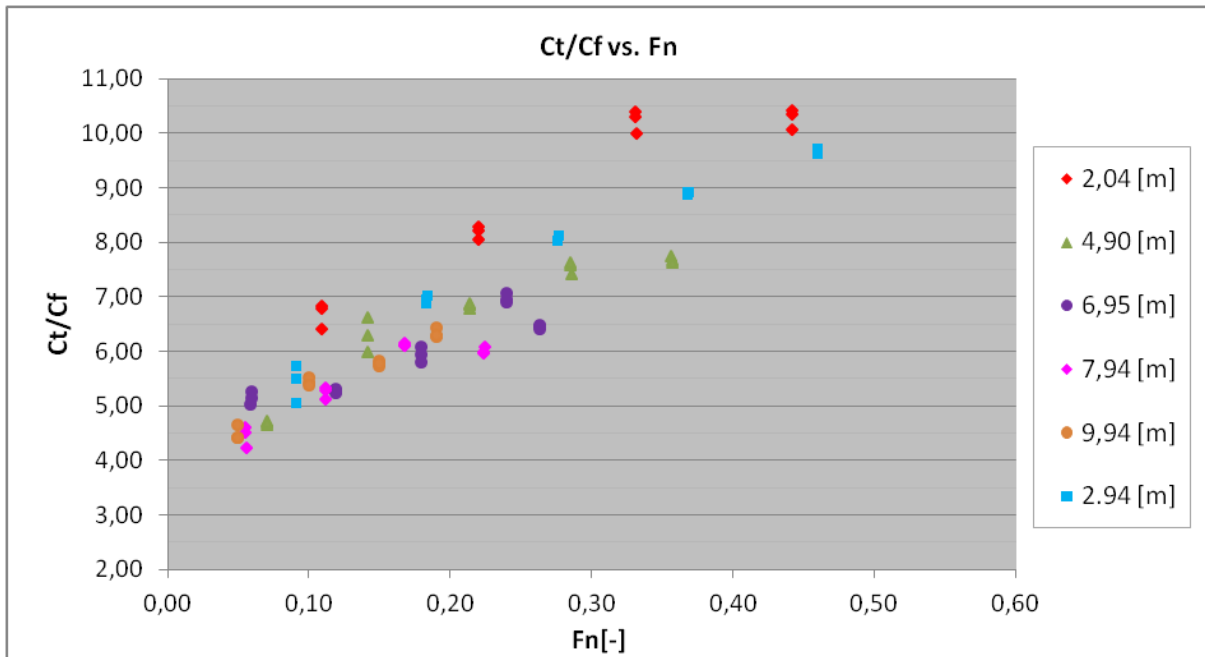
Voor een verdere analyse van de weerstand wordt deze dimensieloos gemaakt. In figuur 8.3 zijn de totale weerstandscoëfficiënten  $c_t$  uitgezet tegen de dimensieloze snelheid  $Fn$ . Uit deze figuur blijkt een lichte toename van  $c_t$  met het toenemen van het Froudegetal en met het afnemen van de staartlengte.



Figuur 8.3: De dimensieloze totale weerstand versus de dimensieloze snelheid

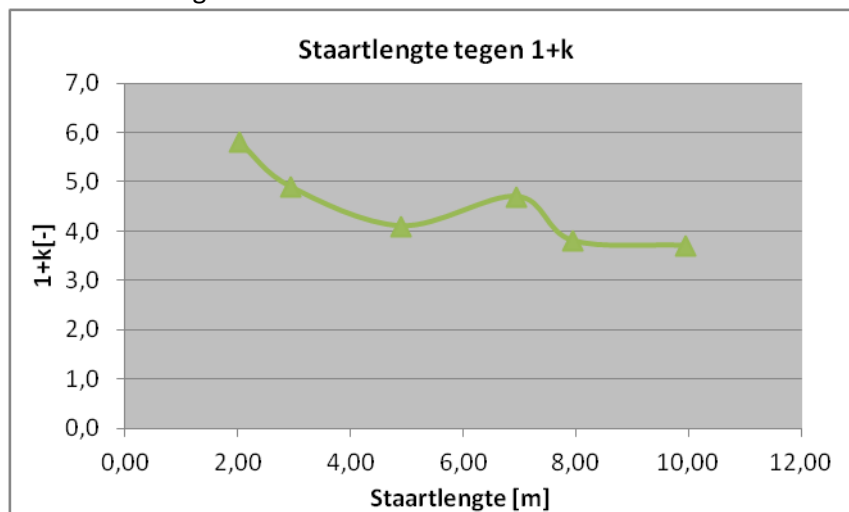
Om de onderzoeksvraag te beantwoorden en de hypothese te toetsen wordt de totale dimensieloze weerstand  $c_t$  gesplitst in  $c_v$  en  $c_r$ . De viskeuze weerstandscoëfficiënt  $c_v$  en de daarbij benodigde vormfactor worden bepaald volgens de methode van ITTC en Froude, uiteengezet in paragraaf 4.1. Hiervoor wordt  $c_t/c_f$  uitgezet tegen  $Fn$ , dit is te zien in figuur 8.4.





Figuur 8.4:  $c_t/c_f$  versus  $F_n$ , een weergave van de weerstand die gebruikt wordt om de vormfactor volgens Froude te bepalen.

Hieruit wordt de vormfactor bepaald. Voor elke staartlengte is de vormfactor apart bepaald. Het resultaat hiervan is te zien in figuur 8.5.



Figuur 8.5: De gevonden waarden voor de vormfactor  $k+1$ .

Hoewel de waarden niet zeer precies te bepalen zijn, kan er wel een trend worden waargenomen. Afgezien van de 'opleving' bij een staartlengte van 7 meter, lijkt  $k$  bij toenemende staartlengte te convergeren naar een constante waarde van 3,7. Dit zou betekenen dat een korte, relatief brede staart dus een hogere vormfactor heeft dan een lange, relatief smalle staart. Tevens blijkt dat boven een bepaalde lengte/breedte verhouding een toename van de lengte geen invloed meer heeft op het vormeffect van de viskeuze weerstand. Dit komt overeen met het verloop van weerstandscoefficienten uit literatuur, bijvoorbeeld de  $c_d$  waarden van een ondergedompelde cilinder in figuur 4.3.

De grootte van de waarden voor  $k$ , tussen de 4,8 en 2,7, ligt boven de verwachte waarde van 2. Een mogelijk verklaring hiervoor is dat de onregelmatigheden in de doorsnede van de staart een grotere rol spelen dan verwacht. Ook is tijdens de metingen waargenomen dat de staart niet altijd

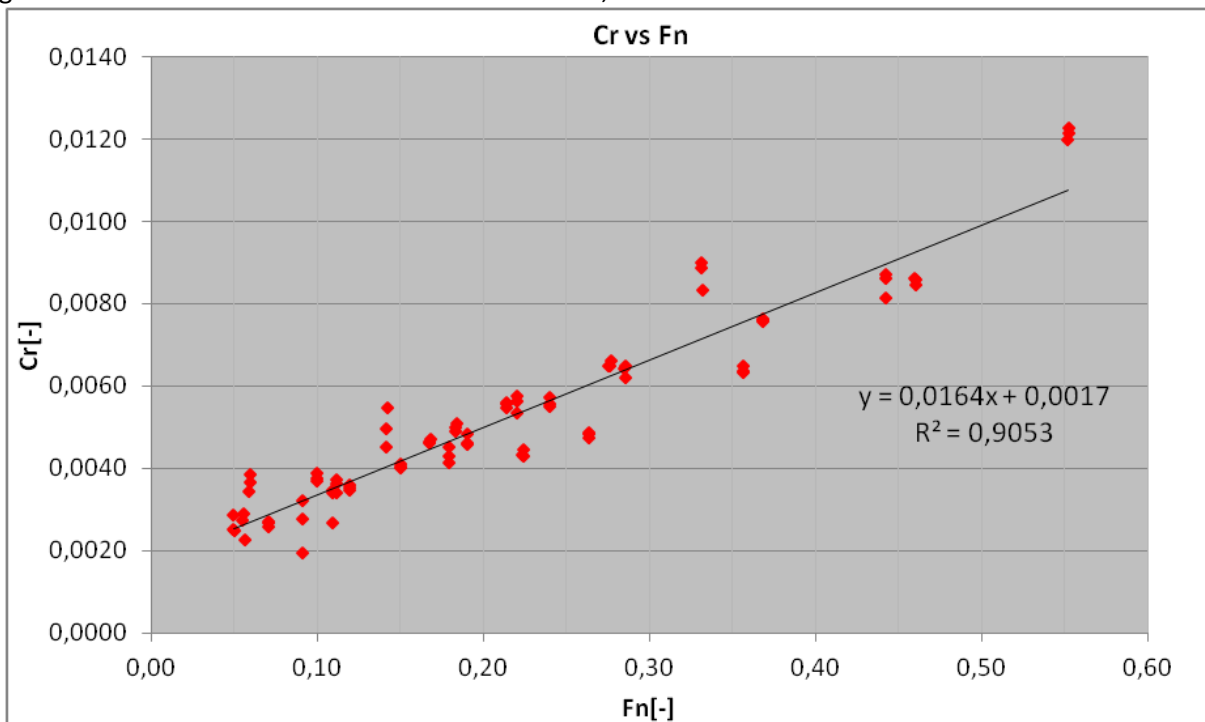
recht achter het bevestigingspunt lag. Dit heeft waarschijnlijk ook een verhogend effect op de weerstand gehad. Zowel de onregelmatigheden in de doorsnede van de staart als het scheefliggen zijn effecten die in werkelijkheid voorkomen.

Een verschijnsel dat tijdens de metingen optrad en niet op open zee zal voorkomen is het terugkaatsen van door de staart veroorzaakte golven via de wand van de sleeptank op de staart. Dit speelt een rol bij staartlengtes vanaf 7 meter en heeft naar verwachting de meetresultaten beïnvloed. Vanwege interferentie van golven is er geen eenduidige harde uitspraak te doen over de invloed op de gemeten weerstand, maar de piek in de vormfactor rond 7 meter staartlengte is een indicatie voor een plaatselijke verhoging. Deze piek is daarom beschouwd als meetfout en wordt niet meegenomen in het vaststellen van de vormfactor.

Aangenomen wordt dat voor staartlengtes boven de 10 meter  $k+1$  gelijk is aan 3,7 en dus de vormfactor  $k$  gelijk is aan  $2,7 \pm 0.081$ . Aangezien de staartlengtes gebruikt bij het opstellen van de hypothese allemaal boven deze lengte liggen, wordt deze waarde voor  $k$  bij de verdere berekeningen van de viskeuze weerstand gebruikt. Daarmee is het verband tussen  $c_v$  en  $Rn$ :

$$c_v = (2.7 + 1) \cdot \frac{0,075}{(\log_{10} Rn - 2)^2} \quad (8.1)$$

Nu  $c_v$  bekend is, kan  $c_r$  berekend worden. Wanneer  $c_t$  wordt verminderd met  $c_v$  blijft  $c_r$  over. Aangezien verwacht wordt dat  $c_r$  een lineair verband met  $F_n$  heeft, worden deze grootheden tegen elkaar uitgezet, figuur 8.7. Ook is er in deze figuur een lineair verband gevonden tussen beide grootheden met een correlatiecoëfficiënt  $R^2$  van 0,91.



Figuur 8.7: Restweerstandscoefficiënt versus Froudegetal. De formule van de lineaire trendlijn ( $y$ ) geeft het gevonden verband tussen  $c_r$  en  $F_n$ .

Hieruit wordt aangenomen dat er voor de staart een lineair verband is tussen  $c_r$  en  $F_n$  en dat dit verband voor het domein van Froudegetallen dat is gemeten gelijk is aan:

$$c_r = 0.0164 \cdot F_n + 0,0017. \quad (8.2)$$

De Froudegetallen bij de metingen variëren van 0,05 tot 0,55. De Froudegetallen bij de langere staartlengtes liggen allen binnen dit domein.

Samenvattend volgt uit het bovenstaande dus dat de weerstand van een volledig met olie verzadigde staart (VanDoClean 6016-B) als volgt is opgebouwd:

$$R_t = (c_v + c_r) \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A, \quad (8.3)$$

$$c_v = (2,7 + 1) \cdot \frac{0,075}{(\log_{10} Rn - 2)^2}. \quad (8.1)$$

$$c_r = 0,0164 \cdot Fn + 0,0017. \quad (8.2)$$

waarbij  $Rn$  en  $Fn$  functies zijn van de staartlengte en scheepssnelheid.

## 8.2 VELOCITY PREDICTION

Met de gevonden weerstand van de staart kan de snelheid van de Protei bij verschillende staartlengtes worden voorspeld. In deze paragraaf wordt eerst besproken welke parameters zijn ingevoerd in het VPP. Vervolgens worden de uitkomsten hieruit besproken en wordt een voorspelling gedaan voor de hypothese bij onderzoeksvraag 2. In bijlage 1 is een overzicht van de gebruikte afmetingen van de Protei opgenomen.

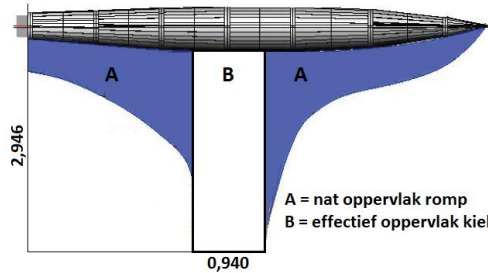
### 8.2.1 VPP PROTEI

Met het programma WinDesign zal allereerst een voorspelling van de prestaties van de Protei zonder staart gemaakt worden. Bij de invoer van de afmetingen van de Protei in het programma WinDesign bleek dat er twee parameters van de Protei extreem ver buiten de range van het programma vielen. Deze parameters zijn de lengte-breedte verhouding en de prismatische coëfficiënt. Om de Delft-modeleermethode uit het programma toe te kunnen passen dient de lengte-breedte verhouding tussen de 2,73 en 5,00 te liggen. Voor de prismatische coëfficiënt geldt dat deze tussen de 0,52 en 0,60 dient te liggen. Om met het programma toch een voorspelling te kunnen maken van de prestaties van de Protei is er voor gekozen om de sterk afwijkende parameters aan te passen, zodat ze binnen de range van het programma vallen. Uit de lengte-breedte verhouding volgt dan dat de breedte moet toenemen tot 1,21 meter. Uit de maximale prismatische coëfficiënt volgt een grootspantoppervlakte van 0,265 m<sup>2</sup>.

Een zeer invloedrijke parameter op de prestaties van de Protei is de stabiliteit. Voor de Protei zijn door het Protei-team reeds stabiliteitsberekeningen uitgevoerd. Deze volgen uit het onderzoeksverslag van het Protei-team. [10] Deze gegevens zijn gecontroleerd met een eigen gemaakt Hydromax-model. Hydromax is een analyse programma waarmee onder andere de stabiliteit van schepen onderzocht kan worden. [11] De stabiliteitsgegevens van het Protei-team bleken goed over een te komen met de eigen gevonden stabiliteitswaarden, tabel 8.1. Voor de invoer in het programma zal uitgegaan worden van de stabiliteitsgegevens van het Protei-team. Uit de eerste VPP-analyses bleek dat de prestaties van de Protei onrealistisch hoog waren en dat de daarbij behorende krachten en drifthoeken niet in de lijn der verwachting lagen. Nadere analyse leerde dat deze extreme waarden toe te schrijven waren aan de invoer van de kiel in het programma WinDesign. Het kieloppervlak van de Protei was in eerste instantie als volledig effectief in het programma ingevoerd. Zoals uit figuur 8.8 blijkt, beslaat de lengte van de kiel de volledige waterlijn lengte. Daarnaast heeft de kiel een niet conventionele vorm. Het gevolg hiervan is dat het kieloppervlak zeker niet als volledig effectief beschouwd kan worden. De liftkrachten die de kiel in de werkelijke situatie zou kunnen opwekken, kunnen dus in het programma slechts benaderd worden door het oppervlak van de kiel te verkleinen. Daarom is er is voor gekozen om de invoer van de kiel in het programma te wijzigen om zo tot een realistische voorspelling van de prestaties van de Protei zonder staart te komen. Deze prestaties zijn vergeleken met de prestaties van zeilboten met vergelijkbare lengte, displacement en zeilplan. Het effectieve kieloppervlak, figuur 8.8, beslaat 2,4675 m<sup>2</sup>. Het overige kieloppervlak wordt in het programma bij het nat oppervlak van de romp gevoegd, waardoor dit nat oppervlak toeneemt tot 9,8855 m<sup>2</sup>.

Tabel 8.1: Stabiliteitsarm

	Protei-team	Hydromax
Heel angle	GZ (m)	GZ (m)
0	0,000	0,000
5	0,078	0,084
10	0,156	0,167
15	0,234	0,250
20	0,310	0,330
25	0,382	0,408
30	0,452	0,484
35	0,518	0,556
40	0,580	0,623
45	0,640	0,687



Figuur 8.8: Opdeling oppervlakte kiel

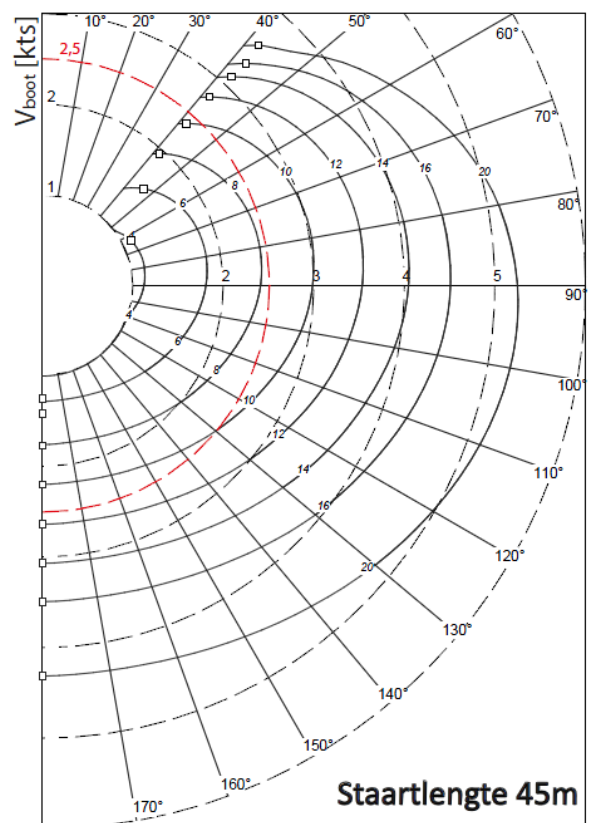
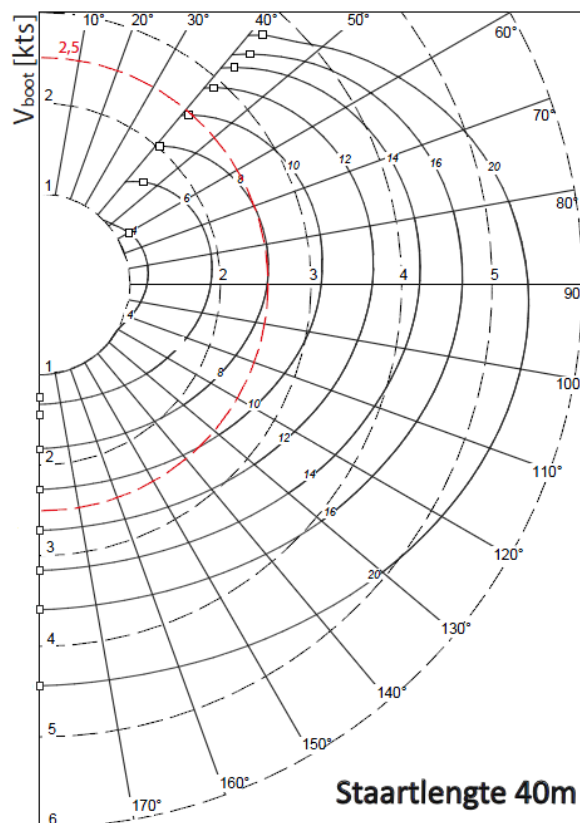
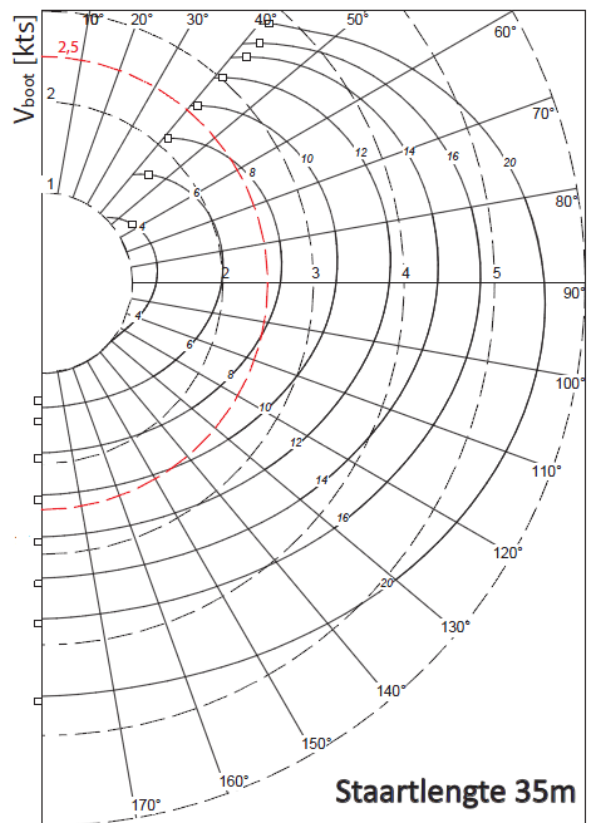
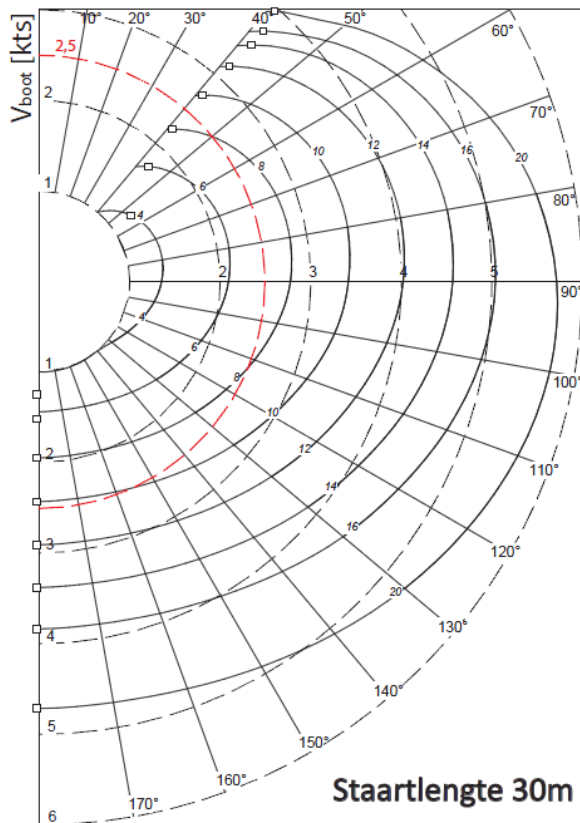
In figuur 8.9 is een tabellarisch overzicht van de definitieve invoer van de Protei in het programma WinDesign opgenomen. Met deze invoer genereert het programma WinDesign een voorspelling van de prestaties van de Protei. Deze prestaties worden weergegeven in een polair diagram, zie figuur 8.10.

#### 8.2.2 VPP PROTEI MET VERSCHILLENDE STAARTLENGTES

Nu er een prestatie voorspellend model van de Protei is, welke gecontroleerd is aan de hand van vergelijkbare schepen, kunnen er via de experimentele data invoer van het programma WinDesign voorspellingen gedaan worden over de prestaties van de Protei met verschillende staartlengtes. De te gebruiken weerstandgegevens van de staart voor verschillende lengtes volgen uit paragraaf 8.1. Deze weerstandwaarden worden per verschillende lengte in het programma bij de weerstand van de Protei opgeteld, waarna het programma de gebruikelijke analyse, zie paragraaf 4.2 voor toelichting, uitvoert om zo tot een voorspelling van de prestaties van de Protei met verschillende staart lengtes te komen. In figuur 8.11 zijn de polaire diagrammen van de Protei voor verschillende staart lengtes te vinden. De rode lijn is de snelheid van 2.5 knopen.

Bij een staartlengte van 35m snijdt de rode lijn de windsnelheid van 8 knopen op een koershoek van 60 graden. Dit zijn de eisen die voortkomen uit de onderzoeksvraag. Bij de kortere lengten gaat de Protei te sneller bij een koershoek van 60 graden en 8 knopen wind, dit is in de bovenste twee grafieken van figuur 8.11 te zien. Bij een staartlengte langer van 40 m gaat de Protei langzamer dan de gestelde snelheid, zoals in de grafiek linksonder in figuur 8.11 te zien is. Een staartlengte van 35m wordt hiermee de hypothese bij onderzoeksvraag 2.





**Figuur 8.11: Polair diagrammen Protei met verschillende staartlengtes. De rode lijn representeert een bootsnelheid van 2.5m/s. De getallen die op de doorgetrokken booglijnen staan representeren de verschillende windsnelheden in knopen.**

## 9. Resultaten en conclusies

---

Het doel van dit onderzoek was enerzijds het bepalen van de weerstand van een olie absorberende staart in relatie tot de lengte en de snelheid en anderzijds het opstellen van een gegronde hypothese omtrent de maximaal haalbare staartlengte achter de Protei.

De relatie tussen de weerstand van een volledig met olie verzadigde staart (VanDoClean 6016-B) en de lengte en de snelheid is experimenteel bepaald. Voor een verdere analyse is de weerstand dimensieloos gemaakt en opgesplitst in twee componenten, de viskeuze weerstand  $c_v$  en de restweerstand  $c_r$ . De gevonden relatie ziet er dan als volgt uit

$$R_t = (c_v + c_r) \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A, \quad (8.3)$$

$$c_v = (2,7 + 1) \cdot \frac{0,075}{(\log_{10} Rn - 2)^2}. \quad (8.1)$$

$$c_r = 0,0164 \cdot Fn + 0,0017. \quad (8.2)$$

waarbij  $Rn$  en  $Fn$  functies zijn van de staartlengte en de scheepssnelheid. De vormfactor  $k$  blijkt 2,7 te zijn. Dit is hoger dan verwacht, dit komt door de onregelmatige vorm en de grote ruwheid van de staart. Ook zat er tijdens het slepen een kleine kromming in de staart, waarvan verwacht wordt dat dit ook in werkelijkheid optreedt. Deze kromming verhoogt de viskeuze weerstand.

De restweerstand laat een lineair verloop zien zoals verwacht was aan de hand van de weerstand van een schip en aangenomen in de hypothese. Het domein waarvoor deze relatie geldt is  $Fn \in [0,05 ; 0,55]$ .

De gevonden relaties zijn gebruikt om bij verschillende staartlengtes en snelheden de staartweerstand op te tellen bij de weerstand van de Protei. Het VPP kan vervolgens de snelheden van de Protei bij verschillende windsnelheden en koershoeken berekenen. Dit leverde voor onderzoeksvraag 2 de volgende hypothese op:

*De Protei kan een olie absorberende staart met een maximale lengte van 35 meter voortslepen bij een koers van 60 graden, 8 knopen wind en een scheepssnelheid van 2,5 knoop.*

Deze hypothese geeft een indicatie van de staartlengte die achter de Protei kan komen. Aangezien de hypothese slechts een voorspelling is aan de hand van een simulatie, moet deze nog geverifieerd worden.

De hypothese gaat er vanuit dat de Protei door vlak water vaart. De invloed op de weerstand veroorzaakt door olie op het wateroppervlak is niet meegenomen in dit onderzoek. Ook buiten beschouwing gelaten is het feit dat in werkelijkheid de Protei op open zee vaart waar er ook golven zijn. Daarnaast berust de voorspelling op een stationair evenwicht. Doordat de staart een grote massa heeft is het van belang om in een vervolgonderzoek ook de dynamica van het systeem mee te nemen.

# 10. Zelfevaluatie

---

De samenwerking binnen de projectgroep is goed verlopen. Tijdens het project zijn er een aantal momenten geweest waarin we ons onderzoek of manier van werken hebben bijgesteld. De eerste keer was vlak na de eerste plenaire sessie. We waren in de eerste weken van het onderzoek begonnen met het idee een dynamisch model te schrijven van een zeilboot en dit te combineren met weerstandsmetingen van een olie absorberende staart. Tijdens het literatuuronderzoek naar dynamische modellen bleek dat het schrijven van een dergelijk model erg veel werk was, meer dan we verwachtten. Nadat we ook in de plenaire sessie als commentaar kregen dat we te veel hooi op onze vork hadden genomen, besloten we dat we het plan van aanpak moesten veranderen. In plaats van een nieuw dynamisch model te schrijven, zouden we een bestaand VPP gebruiken en ons focussen op het bepalen van de weerstand van de staart. Dit hebben we aan onze begeleiders voorgelegd en die gingen hiermee akkoord. Hoewel we met de groep een goede oplossing voor dit probleem hebben gevonden, heeft vooral het literatuuronderzoek naar dynamische modellen veel tijd gekost en weinig opgeleverd. We hebben geleerd dat een onderzoeksvraag al snel te breed en te groot is wanneer je binnen een gegeven tijd tot goed onderbouwde resultaten wilt komen.

Het tweede dat tijdens het project is veranderd is onze manier van werken. De eerste weken werkten we met zijn allen aan één bepaald onderdeel. Hoewel de resultaten daardoor steeds goed doordacht waren, zorgden de lange discussies en veel dubbel werk ervoor dat deze methode niet erg efficiënt was. Na een aantal weken zijn we overgestapt naar het maken van takenlijsten en deze onderling te verdelen. Alleen de belangrijke beslissingen werden met de hele groep bediscussieerd. Ook hielden we elkaar dagelijks op de hoogte van ieders voortgang en als iemand tegen een lastig probleem aanliep werd dat met de rest overlegd. Deze methode van werken bleek een stuk rustiger en vooral efficiënter.

Naast over de inhoud van ons onderzoek en over het samenwerken in een groep, hebben we in dit project veel geleerd over wetenschappelijk onderzoek in het algemeen. Vooral de onderzoeksmethodologie was nieuw voor ons. Het is ons nu een stuk duidelijker hoe je kennis genereert en wanneer het wel of niet voldoende onderbouwd is om als nieuwe kennis aan te nemen. Hoewel dit natuurlijk altijd een punt van discussie kan zijn.

Wel liepen we er tegen aan dat de planning van het project, met langzame start, laat ingeroosterde plenaire sessies en wel vroege deadlines, niet altijd meehielp in ons proces. Zo vonden we het lastig nog commentaar uit de plenaire sessie 'experiment en meting' te gebruiken terwijl we al bijna klaar waren met het interpreteren van de resultaten. Ook was het lastig in te schatten wat er van je verwacht werd. De feedback vanuit onze Maritieme begeleiders was vaak anders en soms zelf tegenstrijdig met die uit bijvoorbeeld de plenaire sessies of tips die je in colleges kreeg.

Samenvattend hebben wij het idee dat het project voor ons goed is verlopen. Soms waren er uitdagingen maar daardoor hebben we er wel veel van geleerd.



# Referentielijst

---

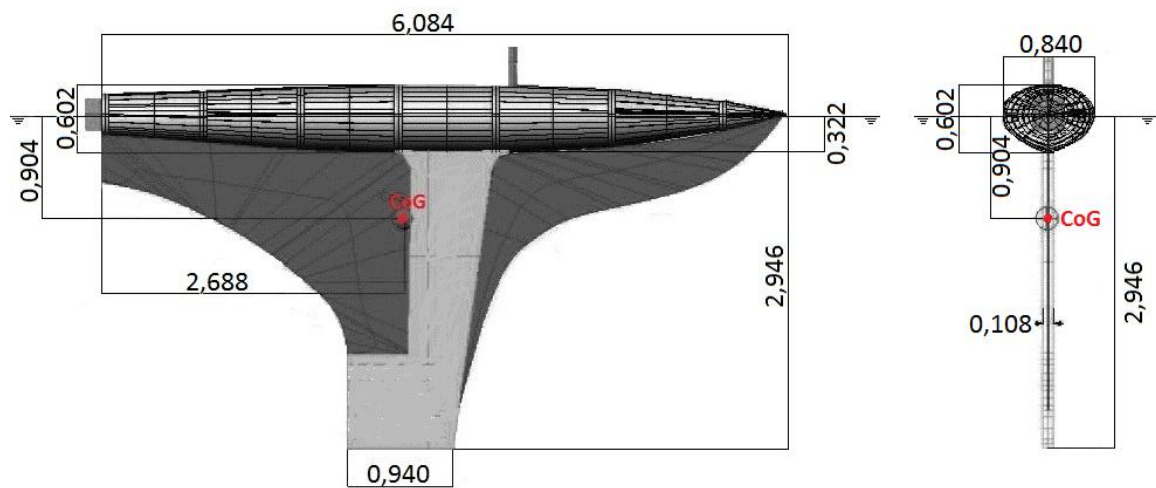
- [1] „Protei - Open Source Sailing Drone,” [Online]. Available: <http://protei.org/download/20120201%20Business%20Plan.pdf>. [Geopend September 2012].
- [2] Kuiper, G., Hydromechanica III, Delft: Tu Delft, 2007.
- [3] Paffett J., 12th ITTC Report of the Resistance Committee, International Towing Tank Conference, 1972.
- [4] Hoerner, Dr. Sighard F, Fluid-Dynamic Drag, Hoerner Fluid Dynamics, New Jersey: Bricktown , 1965.
- [5] Klein Woud, H. & Stapersma, D., Marine Engineering: Design of Propulsion and Electric Power Generation Systems, 2003.
- [6] Oossanen, P. van, Predicting the Speed of Sailing Yachts, Wageningen, 1993.
- [7] Wolfson Unit, „WinDesing6 VPP,” [Online]. Available: <http://www.wumtia.soton.ac.uk/software/WinDesign6-vpp>. [Geopend September 2012].
- [8] VanDoClean, [Online]. Available: <http://www.vandoclean.nl/>. [Geopend September 2012].
- [9] Dekking, F.M. & Kraaijkamp, C. & Lopuhaa, H.P. & Meester, L.E., A Modern Introduction to Probability and Statistics, Londen: Springer, 2005.
- [10] Harara, C., „Protei Handbook,” Protei, 2011. [Online]. Available: [http://www.protei.org/download/20110830-Protei-Handbook-final\\_A4.pdf](http://www.protei.org/download/20110830-Protei-Handbook-final_A4.pdf). [Geopend September 2012].
- [11] „FormSys - Formation Design Systems,” FormSys, [Online]. Available: <http://www.formsys.com/>. [Geopend September 2012].

# Bijlagen

## Bijlage 1: Specificaties Protei

Tabel 1.1: Hoofdafmetingen Protei

Length Overall	[m]	6,084	Midship section area	[m <sup>2</sup> ]	0,20
Length Waterline	[m]	6,046	Wetted area canoe	[m <sup>2</sup> ]	6,153
Breadth max	[m]	0,8458	Fin area	[m <sup>2</sup> ]	6,200
Breadth waterline	[m]	0,838	Midship coefficient	[-]	0,741
Draft design	[m]	2,946	Block coefficient	[-]	0,588
Draft canoe	[m]	0,322	Prismatic coefficient	[-]	0,794
Displacement	[kg]	984	Mainsail area	[m <sup>2</sup> ]	12,4
Volume	[m <sup>3</sup> ]	0,960	Jib area	[m <sup>2</sup> ]	6,6
Waterplane area	[m <sup>2</sup> ]	3,76			



Figuur 1.1: Afmetingen romp Protei

## Bijlage 2: Planning onderzoek

PLANNING BACHELOR ONDERZOEKSPROJECT - Sailing Robot Tug						
Kwartaal 1						
	To Do	Afspraken/deadlines		To Do	Afspraken/deadlines	
<b>wk 1</b>	ma 3-sep di 4-sep wo 5-sep do 6-sep vr 7-sep za 8-sep zo 9-sep		<b>wk 6</b>	ma 8-okt Model zeilboot + onderz.ontw. di 9-okt Model zeilboot + onderz.ontw. college wo 10-okt Model zeilboot + onderz.ontw. pres do 11-okt vr 12-okt za 13-okt zo 14-okt	gesprek Peter Naaijen	
<b>wk 2</b>	ma 10-sep di 11-sep opstarten wo 12-sep opstarten do 13-sep vr 14-sep za 15-sep zo 16-sep	eerste college	<b>wk 7</b>	ma 15-okt Model van de zeilboot + presentatie di 16-okt Model zeilboot + metingen voorbereiden PS2: Onderzoeksontwerp wo 17-okt Model zeilboot + metingen voorbereiden do 18-okt vr 19-okt za 20-okt zo 21-okt	gesprek Peter Naaijen	
<b>wk 3</b>	ma 17-sep di 18-sep literatuur onderzoek + presentatie wo 19-sep literatuur onderzoek + presentatie do 20-sep vr 21-sep za 22-sep zo 23-sep	gesprek Peter Naaijen	<b>wk 8</b>	ma 22-okt di 23-okt wo 24-okt do 25-okt vr 26-okt za 27-okt zo 28-okt	college gesprek Peter Naaijen	
<b>wk 4</b>	ma 24-sep Onderzoeks ontwerp di 25-sep lit. onderz + model zeilboot wo 26-sep lit onderz + model zeilboot do 27-sep vr 28-sep za 29-sep zo 30-sep	college gesprek Peter Naaijen	<b>wk 9</b>	ma 29-okt di 30-okt wo 31-okt toets methodologie 14h-16h do 1-nov vr 2-nov za 3-nov zo 4-nov	gesprek Peter Naaijen	
<b>wk 5</b>	ma 1-okt Model zeilboot + presentatie di 2-okt Model zeilboot wo 3-okt Model zeilboot do 4-okt vr 5-okt za 6-okt zo 7-okt	PS1: Vraagstelling & hypothese gesprek Peter Naaijen	<b>wk 10</b>	ma 5-nov di 6-nov Metingen Voorbereiden wo 7-nov Metingen Voorbereiden do 8-nov Metingen Voorbereiden vr 9-nov Metingen Voorbereiden za 10-nov zo 11-nov	gesprek Peter Naaijen	
Kwartaal 2						
	To Do	Afspraken/deadlines		To Do	Afspraken/deadlines	
<b>wk 1</b>	ma 12-nov metingen/verwerken di 13-nov metingen/verwerken wo 14-nov metingen/verwerken do 15-nov metingen/verwerken vr 16-nov metingen verwerken za 17-nov zo 18-nov	gesprek Peter Naaijen	<b>wk 5</b>	ma 10-dec Minipaper + conclusie + presentatie di 11-dec Onderzoeks dossier wo 12-dec Onderzoeks dossier do 13-dec Onderzoeks dossier vr 14-dec Minipaper aanpassen + OnderzoeksDossier za 15-dec zo 16-dec	10h inleveren: concept minipaper PS4: Data verwerken & interpretatie gesprek Peter Naaijen	
<b>wk 2</b>	ma 19-nov Meting uitwerken di 20-nov Meting uitwerken wo 21-nov Meting uitwerken do 22-nov Meting uitwerken vr 23-nov Meting uitwerken za 24-nov zo 25-nov	college gesprek Peter Naaijen	<b>wk 6</b>	ma 17-dec Minipaper aanpassen + OnderzoeksDossier di 18-dec Minipaper aanpassen + OnderzoeksDossi college wo 19-dec Minipaper aanpassen + OnderzoeksDossi do 20-dec Minipaper aanpassen + OnderzoeksDossier vr 21-dec Minipaper aanpassen + OnderzDoss za 22-dec zo 23-dec	gesprek Peter Naaijen	
<b>wk 3</b>	ma 26-nov Onderzoeks dossier di 27-nov Onderzoeks dossier wo 28-nov Onderzoeks dossier do 29-nov Onderzoeks dossier vr 30-nov Onderzoeks dossier za 1-dec zo 2-dec	PS3: Experiment & meting gesprek Peter Naaijen	<b>wk 7</b>	ma 7-jan Eindpresentatie Voorbereiden di 8-jan Eindpresentatie Voorbereiden wo 9-jan Eindpresentatie Voorbereiden do 10-jan Eindpresentatie Voorbereiden vr 11-jan Eindpresentatie Voorbereiden za 12-jan zo 13-jan	10h inl: MiniPaper + onderz.doss gesprek Peter Naaijen Symposium	
<b>wk 4</b>	ma 3-dec Minipaper di 4-dec Minipaper wo 5-dec Minipaper do 6-dec Minipaper + presentatie vr 7-dec Minipaper + presentatie za 8-dec zo 9-dec	college gesprek Peter Naaijen				

### Bijlage 3: Samenvatting besprekingen

In de loop van het bachelor eindproject zijn er een aantal besprekingen geweest met de begeleidende docenten. Daarnaast zijn er een viertal plenaire sessies geweest. Hieronder is een tabellarisch overzicht van deze besprekingen en de conclusies hieruit opgenomen. In dit overzicht zijn daarnaast ook een aantal milestones van het onderzoek opgenomen.

Datum	Aanwezig	Inhoud
11-9-12	A, I, J	Eerste opzet project, onderwerp doorgesproken, afspraken gemaakt met betrokken docenten
12-9-12	A, I, J	Langs bij Peter Naaijen, onderzoeksvraag en hypothese besproken (dynamisch model), sleepproeven gepland,
18-9-12	A, I, J, N	Planning gemaakt + literatuuronderzoek besproken
19-9-12	A, I, J, N	Bespreking met Peter Naaijen, literatuuronderzoek doorgesproken
26-9-12	A, J, N	Literatuuronderzoek besproken + presentatie maken voor PS1
2-10-12	A, I, J, N	Plenaire Sessie 1 feedback: onderzoek omvat te veel aspecten, te weinig tijd, andere opzet noodzakelijk
3-10-12	A, I, J, N	Bespreking met Lex Keuning, feedback PS1 besproken, overlegd over andere opzet (stationair met VPP), sleepproeven besproken
8-10-12	A, I, J, N	Update ToDo's, plan van aanpak gemaakt, taken verdeeld
10-10-12	A, I, J, N	Update ToDo's, staart opgehaald, drijfvermogen getest en afgezonken
16-10-12	A, I, J, N	Plenaire Sessie 2 feedback: onderzoeksontwerp goed, afbakening beter onderbouwen, randvoorwaarden niet duidelijk
17-10-12	A, I, J, N	Laatste bespreking voor tentamenperiode, planning besproken, onderzoeksontwerp besproken, ToDo's afgerond
6-11-12	A, I, J	Bespreking met Peter Naaijen: planning besproken, onderzoeksontwerp definitief, metingen voorbereiden, opstelling en staart klaarmaken
12-11-12	A, I, J, N	Meetopstelling besproken en opgebouwd met Peter Poot (sleeptank)
13-11-12	A, I, J, N	Start metingen
19-11-12	A, I, J, N	Bespreking met Lex Keuning en Peter Naaijen, meetresultaten voorgelegd, overleg over hoe de metingen te verwerken
20-11-12	A, I, J, N	Planning gemaakt, taken verdeeld m.b.t. metingen verwerken
27-11-12	A, I, J, N	Plenaire Sessie 3 feedback: focus op weerstand staart, discussie over statistiek bij verwerken metingen, vertellen wat je zeker weet
28-11-12	A, I, J, N	Bespreking met Lex Keuning en Peter Naaijen: verwerking meetresultaten voorgelegd, extrapolatie besproken, opstellen hypothese met VPP besproken
10-12-12	A, I, J, N	Inleveren concept minipaper
11-12-12	A, I, J, N	Plenaire Sessie 4 feedback: meer focussen op de weerstand van de staart en de theorie er achter, deel je onderzoek in twee delen
13-12-12	A, I, N	Bespreking met Peter Naaijen over concept minipaper: tips gekregen om de minipaper te verbeteren
19-12-12	A, I, J	Bespreking met Lex Keuning over concept minipaper: feedback gekregen op de minipaper

## Bijlage 4: Cd-rom met meetdata