

## Samenvatting

In dit onderzoek is de weerstand bepaald van een olie absorberende staart in water. Dit draagt bij aan het internationale open source project 'Protei', waarin een zeilboot met olie absorberende staart wordt ontworpen om olievlekken op te ruimen. De coëfficiënten voor viskeuze weerstand en restweerstand zijn bepaald als functie van het Reynoldsgetal en het Froudegetal. Met dit resultaat is voorspeld dat bij 8 knopen wind en een koers van 60 graden ten opzichte van de ware wind een stationaire scheepssnelheid van 2,5 knoop gehaald wordt wanneer de staartlengte 35 meter is.

## 1. Inleiding

Het doel van dit onderzoek is bij te dragen aan het project 'Protei'. In dit project wordt een concept ontwikkeld waarin autonome zeilbootjes door een olievlek varen met elk een olie absorberende staart achter zich. Zo wordt de olie milieuvriendelijk en zonder gevaar voor de menselijke gezondheid opgeruimd. [1] De haalbaarheid van dit concept hangt mede af van de staartlengte, omdat die de absorberende capaciteit per zeilboot bepaald. De maximale staartlengte wordt beperkt door de weerstand van de staart en de snelheid die een Protei zeilboot daarmee behoudt.

Er is literatuur beschikbaar over de weerstand van schepen en geometrische vormen in water, maar niet over vormen vergelijkbaar met de staart. Het eerste deel van dit onderzoek richt zich op het bepalen van de weerstand van de volledig met olie verzadigde staart. De onderzoeksvraag hierbij is: *Wat is het verband tussen de weerstand van een verzadigde staart (VanDoClean type 6016-B) en de staartlengte en snelheid?* De hypothese is: *De vormfactor van de viskeuze weerstandscoëfficiënt van de staart is 2 en de restweerstandscoëfficiënt heeft een lineair verband met het Froudegetal ( $F_n$ ) in het domein  $0,05 < F_n < 0,55$ .* Zie paragraaf 2 voor de onderbouwing van de hypothese.

In het tweede, exploratieve deel van het onderzoek wordt het eerste geëxtrapoleerde resultaat gebruikt in een voorspelling van de scheepssnelheid en daarmee van de maximaal haalbare staartlengte van de Protei. De Protei zeilboten varen volgens ontwerp een koers van 60 graden ten opzichte van de ware wind, waarbij de scheepssnelheid 2,5 knoop moet zijn bij 8 knopen wind. [1] Hiermee wordt de tweede onderzoeksvraag: *Bij welke lengte van een met olie verzadigde staart haalt de Protei bij 8 knopen wind en een koers van 60 graden ten opzichte van de ware wind een scheepssnelheid van 2,5 knoop?*

## 2. Methode: theorie

Volgens Froude bestaat de totale weerstand ( $R_t$  in Newton) van een voorwerp in water uit viskeuze weerstand ( $R_v$ ) en restweerstand ( $R_r$ ). [2] Om een verband tussen de weerstand en staartlengte en snelheid te vinden, wordt  $R_t$  onafhankelijk gemaakt van het nat oppervlak ( $A$  in  $m^2$ ) (dus staartlengte), scheepssnelheid ( $V$  in  $m/s$ ) en waterdichtheid ( $\rho$  in  $kg/m^3$ ) door hem uit te drukken in de dimensieloze coëfficiënt  $c_t$ , waarbij  $c_t = c_v + c_r$ . Nu is gevonden dat  $R_t = (c_v + c_r) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A$ . [2]

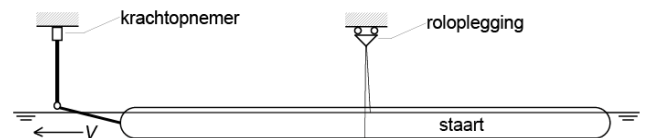
Tussen  $c_v$  en het Reynoldsgetal is het verband  $c_v = (k + 1) \cdot c_f$  bekend. Hierin is  $c_f$  de huidwrijvingscoëfficiënt en door ITTC bepaald als:  $c_f = \frac{0,075}{(\log_{10} Rn - 2)^2}$ . [2] Hierin is  $Rn = \frac{V \cdot L}{\nu}$  het Reynoldsgetal, met  $\nu$  de kinematische viscositeit van de vloeistof in  $m^2/s$  en  $L$  de waterlijnlengte in meter.

De waarde voor de vormfactor  $k$  wordt bepaald aan de hand van de verhouding  $c_t/c_f$  bij  $F_n = 0$ . Het Froudegetal  $F_n$  is de dimensieloze scheepssnelheid  $F_n = \frac{V}{\sqrt{g \cdot L}}$ . De waarde van de vormfactor in de hypothese is 15% boven die van een gladde cilinder met de verhoudingen van de staart. [3]

Behalve om de vormfactor te vinden, wordt  $F_n$  gebruikt om de restweerstand te schalen. De restweerstand wordt grotendeels veroorzaakt door het creëren van golven, een proces afhankelijk van  $F_n$ . [2] Vanwege het derde-machts-verband dat geldt tussen weerstand en snelheid [4], wordt er een lineair verband gezocht tussen  $c_r$  en  $F_n$  voor het domein  $0,05 < F_n < 0,55$ .

## 3. Methode: experiment

De weerstand van de staart wordt experimenteel gemeten. Hiervoor wordt de staart gesleept in de kleine sleeptank van het TU Delft Scheepshydraulica laboratorium. De staart wordt in de sleeptank gelegd en verbonden aan een geijkte krachtopnemer die de weerstand meet in axiale richting. Om een onderdompeling van 95% te verkrijgen, zoals bij volledige verzadiging, wordt de hydrofobe propyleenvulling vervangen door 90% water absorberend katoen en 10% polypropyleen. Halverwege de staart is een rolplegging bevestigd om de zijwaartse beweging te beperken. Zie figuur 1 voor een schematische weergave van de meetopstelling.



Figuur 1 – Schematische weergave van de meetopstelling

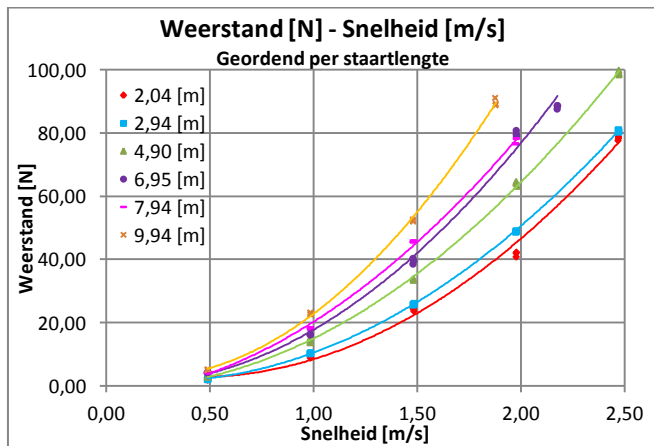
Staarten met lengtes van 10; 8; 7; 5; 3 en 2 meter worden gesleept met snelheden van 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 en 2,5 [m/s]. Tijdens een run worden samples van de weerstand genomen met een frequentie van 30 Hz. Het gemiddelde daaruit is één meting. Elke meting wordt 3 maal herhaald om de spreiding te kunnen bepalen.

Met behulp van de gemeten weerstand en de theorie worden  $c_v$  en  $c_r$  bepaald. Deze worden gebruikt om de weerstand te extrapoleren voor staarten met een lengte van 11 tot 50 meter.

De Protei is volgens ontwerpspecificaties [1] gemodelleerd in het Velocity Prediction Program 'WinDesign'. Het programma berekent de weerstand van de Protei. De gevonden staartweerstand wordt hierbij opgeteld. Het programma lost vervolgens het stationair krachteenwicht op. Hieruit volgt een voorspelling van de scheepssnelheid.

#### 4. Resultaten

In figuur 2 zijn de experimenteel gemeten weerstanden in Newton uitgezet tegen sleepsnelheid in meter per seconde. Om de leesbaarheid te vergroten zijn trendlijnen toegevoegd.

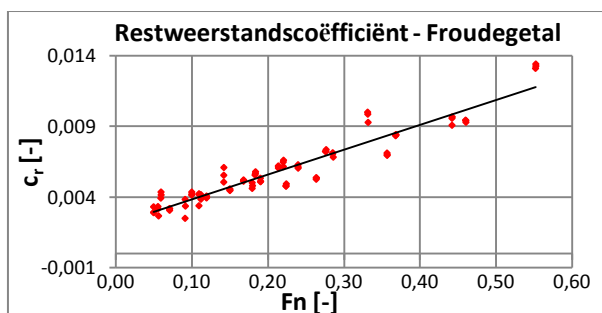


Figuur 2 - Gemeten weerstanden versus sleepsnelheid

De betrouwbaarheidsintervallen zijn berekend met 95% zekerheid. De intervallen zijn gemiddeld 3% van de gemeten waarden, met enkele uitschieters van maximaal 10% bij metingen onderin het bereik van de krachtopnemer. [3]

De vormfactor  $k$  blijkt het grootst bij kleine staartlengtes. Voor staartlengtes boven de 7 meter convergeert  $k$  naar een constante waarde van 2,7 met een 95% betrouwbaarheidsinterval van  $\pm 0,081$ . [3] Hiermee wordt de viskeuze weerstandscoefficient voor staartlengtes boven de 7 meter  $c_v = 3,7 \cdot \frac{0,075}{(\log_{10} Rn - 2)^2}$

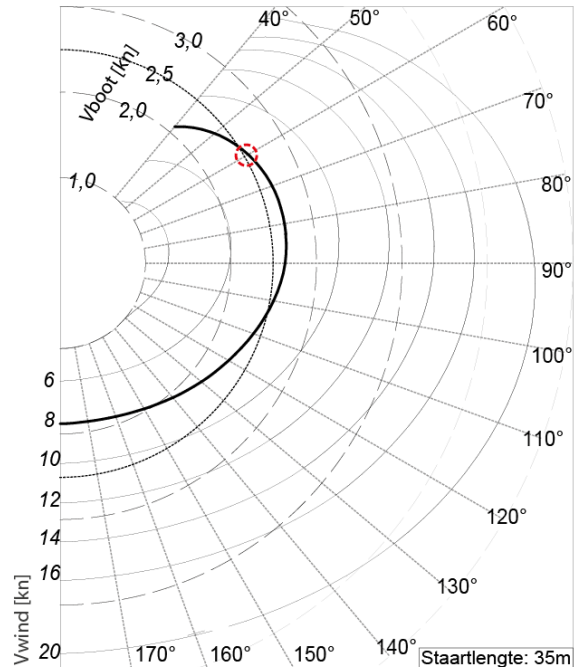
De restweerstandscoefficient  $c_r$  is uitgezet tegen het Froudegetal, waarbij met behulp van de kleinste kwadratenmethode het lineaire verband  $c_r = 0,0164 \cdot Fn + 0,0017$  met correlatiecoefficient 0,9 is gevonden, figuur 3.



Figuur 3 - Het verband tussen  $c_r$  en  $Fn$

Een opvallend waargenomen fenomeen is dat de staart bij een groot deel van de metingen niet recht lag. Tijdens het slepen nam de staart een C- of S-vormige kromming aan met een uitwijking van maximaal 30 centimeter uit de hartlijn.

Met de gevonden coëfficiënten volgt uit WinDesign dat bij een staartlengte van 35 meter de eisen uit de tweede onderzoeksvraag behaald worden. In figuur 4 is te zien dat bij de gekozen windsnelheid en koers de scheepssnelheid op 2,5 knoop wordt voorspeld.



Figuur 4 - De polaire plot uit het VPP - staartlengte 35 meter

#### 5. Discussie en conclusies

Het verloop van de vormfactor komt overeen met verloop van viskeuze weerstandscoefficienten uit de literatuur. [5] De waarde ervan is hoger dan in de hypothese. De onregelmatige vorm van de staart kan hiervoor de oorzaak zijn. Ook het krom liggen van de staart zal de viskeuze weerstand en daarmee de vormfactor verhogen. Er wordt verwacht dat dit fenomeen ook in de praktijk optreedt. De gevonden weerstand kan gebruikt worden bij vervolgonderzoek binnen het Protei project of erbuiten.

De voorspelde staartlengte van 35 meter geeft een eerste indicatie voor het ontwerp van de Protei. Er moet hierbij rekening gehouden worden met onzekerheden in het programma WinDesign.

Een aanbeveling voor vervolgonderzoek is het meenemen van dynamische effecten in de voorspelling van de staartlengte. Vanwege de grote massa van de staart wordt verwacht dat de invloed van de kracht die het kost deze te versnellen significant zal zijn.

#### Referenties

1. Harara C.N. et al, 2011, *Protei Handbook*
2. Kuiper G., 2007, *Hydromechanica III*
3. Groep B1-109, 2012, *Onderzoeksdossier*
4. Klein Woud J.& Stapersma D, 2003, *Marine Engineering*
5. Hoerner S.F., 1965, *Fluid-Dynamic Drag*