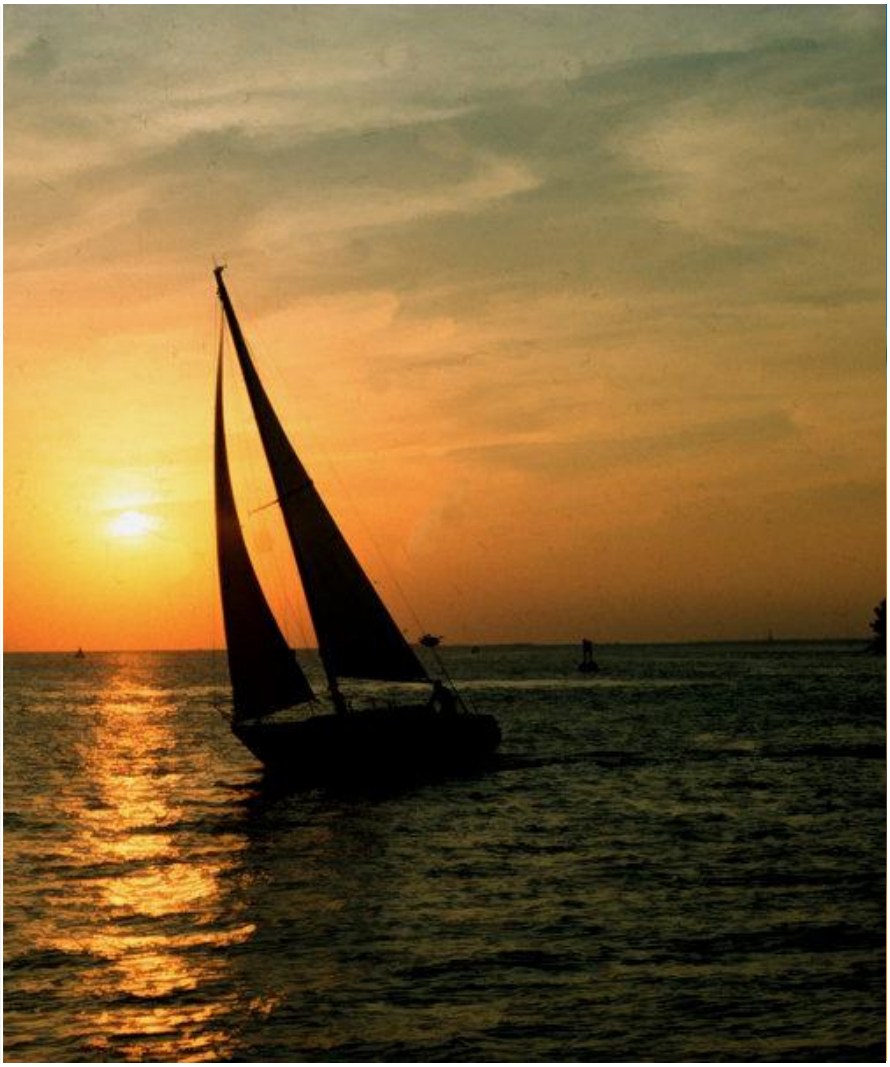
# Profielwerkstuk zeilen

Allard de Boeij en Ires van Veen

2015



Een onderzoek naar de invloed van verschillende aspecten op de snelheid van de zeilboot.

**Van Maerlant Lyceum, Eindhoven**
**Vak: Natuurkunde**
**Begeleider: J. van Heugten**
**VWO 6**

## Inhoudsopgave

Samenvatting ..... 3
Inleiding ..... 4
Literatuuronderzoek ..... 5
Hypotheses op basis van het literatuuronderzoek ..... 15
Experiment 1 ..... 15
Experiment 2 ..... 15
Experiment 3 ..... 15
Methode en materialen ..... 16
Windtunnel ..... 16
Meetopstelling ..... 17
Resultaten en discussie ..... 21
Experiment 1: Invloed van zeilstand en koers op de krachten in de boot ..... 21
Experiment 2: Invloed van helling op de krachten in de boot ..... 26
Experiment 3: Invloed van de zeiltrim op de krachten in de boot ..... 30
Conclusies ..... 34
Experiment 1 ..... 34
Experiment 2 ..... 34
Experiment 3 ..... 34
Samenvatting conclusies ..... 34
Suggesties voor nader onderzoek ..... 35
Slotwoord ..... 36
Bronvermelding ..... 37
Bijlagen ..... 39
Bijlage I: Zeiltrim ..... 39
Bijlage II: Benamingen van onderdelen op de boot ..... 41
Bijlage III: Begrippenlijst ..... 42
Bijlage IV: Resultaten experiment 1 ..... 44
Bijlage V: Resultaten experiment 2 ..... 45
Bijlage VI: Resultaten experiment 3 ..... 46
Bijlage VII: Foto’s van de uitvoering van de experimenten ..... 47
Bijlage VIII: Model van de voorwaartse kracht ..... 48
Bijlage IX: Verschil tussen plat vlak en bol zeil ..... 51
Bijlage X: Logboek ..... 53

## Samenvatting

Door middel van een drietal experimenten is er kennis vergaard over de invloed van de zeilstand, helling en zeiltrim op de snelheid van een zeilboot. Hiervoor is een zelfgemaakte windtunnel en meetopstelling gebruikt. De gebruikte modelboot, een MicroMagic, is geleend van een fanatiek MicroMagic zeiler.

In het eerste experiment werd er gekeken naar de invloed die de zeilstand uitoefent op de voorwaartse kracht, oftewel de snelheid. Er is gebleken dat elke koers een optimale zeilstand heeft waarbij de voorwaartse snelheid het grootst is. Er geldt: hoe hoger de koers, hoe strakker het zeil moet staan voor een maximale voorwaartse snelheid.

In het tweede experiment is onderzocht wat de invloed is van een helling op de boot. Een gewichtje is geplaatst op vijf plaatsen op de boot. Er bleek dat de helling zowel de voorwaartse als zijwaartse krachten kan beïnvloeden. Bij aan de wind is de meest gunstige helling over de breedte van het schip een helling naar lij en over de lengte van het schip een helling naar de achterkant. Bij ruime wind is over de breedte van het schip een helling aan loef het voordeligste en over de lengte van het schip een helling naar de voorkant. Vermoedelijk zal bij beide koersen een combinatie van de twee genoemde gunstigste hellingen de meest gunstige helling opleveren, wat betekent dat de snelheid het grootst is.

Uit experiment 3 is gebleken dat hoe hoger de koers, hoe minder nadelig het is als de zeilen strak getrimd zijn. Bij aan de wind is een strakke zeiltrim zelfs de meest voordelige zeiltrim. Bovendien geldt dat hoe lager de koers, hoe minder nadelig een losse zeiltrim is en hoe nadeliger een strakke zeiltrim is. Dit geldt niet alleen voor de voorwaartse kracht, maar ook van de zijwaartse krachten.

# Inleiding

Wat het onderwerp zou worden van ons profielwerkstuk was snel duidelijk, namelijk zeilen. Wij beiden hebben al flink wat uren op een zeilboot doorgebracht en wat ons daarbij vooral interesseert is de theorie die achter het varen van de prachtige zeilboten zit. De vraag die vooral naar voren kwam was: Hoe kun je nou als zeiler er voor zorgen dat je boot zo hard mogelijk vaart? Naar aanleiding van deze vraag is de volgende onderzoeksvraag geformuleerd: *Wat is de invloed van verschillende aspecten op de snelheid van de zeilboot?*

Om de lezer een handje te helpen, is in bijlage II en III een overzicht gegeven van zeiltermen en zeilonderdelen. Verder bevatten de bijlagen enkele aanvullende informatie. Het literatuuronderzoek bevat bovendien de informatie die benodigd was om conclusies te trekken. Ons doel is om door middel van de experimenten meer inzicht te krijgen in de werking van de zeilboot.

De aspecten die wij wilden onderzoeken met betrekking tot de hoofdvraag zijn de zeiltrim, zeilstanden en helling van de boot. Om de invloed van deze aspecten te meten zijn een aantal experimenten uitgedacht en zijn deelvragen geformuleerd, namelijk:

- *Wat gebeurt er met de snelheid van een boot als je de zeilstand verandert bij een gelijke windrichting?*
- *Welke invloed heeft de helling op de snelheid van de boot?*
- *Wat gebeurt er met de snelheid van de boot bij verschillende zeiltrim?*

Natuurlijk hadden wij zelf al ideeën over de beantwoording van de vragen, die met behulp van de experimenten kunnen worden beantwoordt. Wij dachten namelijk vooraf dat hoe hoger de koers is die gevaren wordt, hoe kleiner de zeilstand moet zijn voor een zo groot mogelijke voorwaartse kracht. Bovendien dachten wij dat helling zowel draaiing als snelheid kan beïnvloeden en dat voor een hoge koers geldt dat een strakke zeiltrim voordelig is en voor een lage koers een losse zeiltrim. We hopen dat door middel van de experimenten meer duidelijk wordt over de invloed op de snelheid van verschillende aspecten.

## Literatuuronderzoek

Voordat er experimenten gedaan kunnen worden aan de boot, is het belangrijk te weten hoe het eigenlijk kan dat een boot vooruit gaat. Want is het eigenlijk niet gek, hoe het kan dat een boot vooruit vaart terwijl het aan de wind vaart? Hoort de wind de zeilboot dan niet naar de zijkant te blazen? In dit gedeelte van het onderzoek zal antwoord worden gegeven op dit soort vragen.

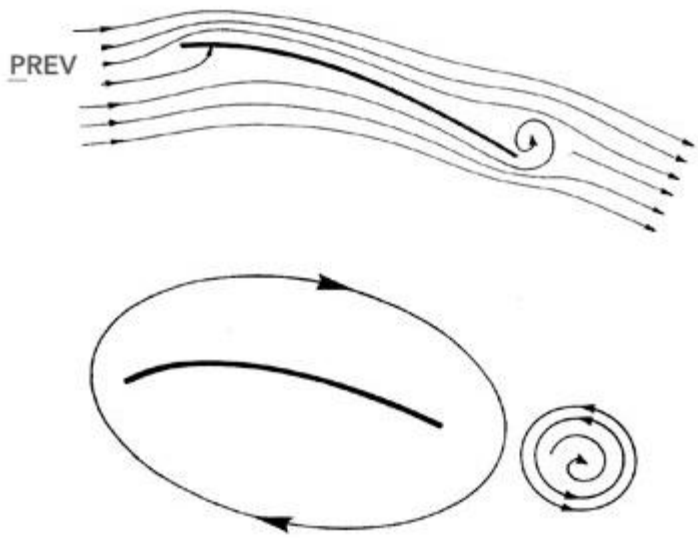
Er zijn verschillende theorieën bekend die kunnen verklaren waarom er een kracht werkt op het zeil. De kracht die dan in het zeil werkt, wordt de 'liftkracht' genoemd. Wat liftkracht precies inhoudt zal later worden toegelicht. Er zijn twee theorieën die een goede uitleg geven, die besproken zullen worden.

### Newtontheorie

De Newtontheorie is een van de oudste theorieën die te maken heeft met het zeilen en is daarom ook het bekendste. Luchtdeeltjes verplaatsen zich door de lucht heen en hebben een kinetische energie. Wanneer deze luchtdeeltjes botsen met je zeil, brengen zij een reactie voort, de derde wet van Newton schrijft immers voor: actie = reactie. Bij een voor de windse koers wordt dit ook wel het weerstandsprofiel genoemd. Door die reactie ontstaat er een kracht in het zeil. Echter, er is weinig te rekenen aan deze theorie. De enige formule die er bestaat rond de Newtontheorie is $F = m \times a$. Maar het is erg moeilijk om de versnelling van lucht te meten. Ook is het bekend dat bij het zeilen een hele hoop wervels rond het zeil ontstaan, die niet kunnen worden verklaard met de Newtontheorie. Daardoor kwam Prandtl met een nieuwe theorie, de circulatietheorie.

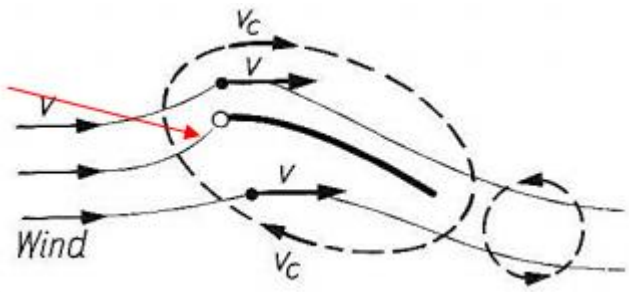
### Circulatietheorie

Wanneer er wind tegen het zeil aan komt splitst de windstroom zich in tweeën, namelijk een windstroom aan loef en een windstroom aan lij. Er stroomt dan meer wind aan de loefzijde van het zeil dan aan de lijzijde van het zeil. Wanneer de windstroom aan loef het uiteinde van het zeil bereikt, wil deze afbuigen naar de lijzijde, want de windstroom aan loefzijde heeft een hogere snelheid en zal dus eerder de achterkant van het zeil bereiken. Vervolgens ontstaat er een wervel aan de achterkant van het zeil (zie afbeelding 1).




Afbeelding 1: Starting vortex

Deze wervelingen worden ook wel de 'starting vortex' genoemd. Op het bovenstaande plaatje draait de starting vortex linksom. De lucht die hierna nog vanaf de loefzijde aankomt zal hierdoor worden afgewend en daarom zal er een luchtstroom ontstaan die rechtsom draait. Dit zorgt voor een rechtsdraaiende circulatie rond het zeil die er weer voor zorgt dat er een snelheidsverhoging komt aan de lijzijde en een snelheidsvertraging aan loef (zie afbeelding 1). Bernoulli zei in zijn stroomleer (en lucht is immers stroom): een snelheidsverhoging zorgt voor een drukverlaging, en een snelheidsverlaging voor een drukverhoging. De druk aan loefzijde is dus hoger dan de druk aan de lijzijde van het zeil. Een hogere druk wil altijd naar een lagere druk toe, wat zorgt voor de eerdergenoemde liftkracht in het zeil.




Afbeelding 2: Kutta Conditie

De circulatie rond het zeil vindt niet constant plaats: het is een potentiële stroom. De circulatiestroom rond het zeil is dus niet constant zichtbaar. Voor die uiteindelijke situatie geldt de Kutta-conditie, wat inhoudt dat er een uiteindelijke evenwicht ontstaat door de starting

vortex, die een snelheidsverhoging aan lij tot zijn gevolg heeft. Deze starting vortex blijft ver achter de boot achter en wordt ook wel eens de 'vuile wind' van een boot genoemd.

Maar hoe groot is die liftkracht nou eigenlijk? Ludwig Prandtl stelde de volgende formule op waarmee de grootte van de liftkracht kan worden bepaald:

**L** = (½) x $\rho$ x **v**$^2$ x **S** x $C_L$
(Poelgeest, E. en van de Steen, M (2006))
Waarvoor geldt:

- L is de liftkracht in N
- $\rho$ is de dichtheid van lucht in kg/m³
- **v** is de luchtsnelheid (in m/s) ten opzichte van het vlak waar de liftkracht op werkt
- **S** is het oppervlak (in m$^2$) van het vlak waar de liftkracht op werkt
- $C_L$ is de liftcoëfficiënt (geen eenheid)

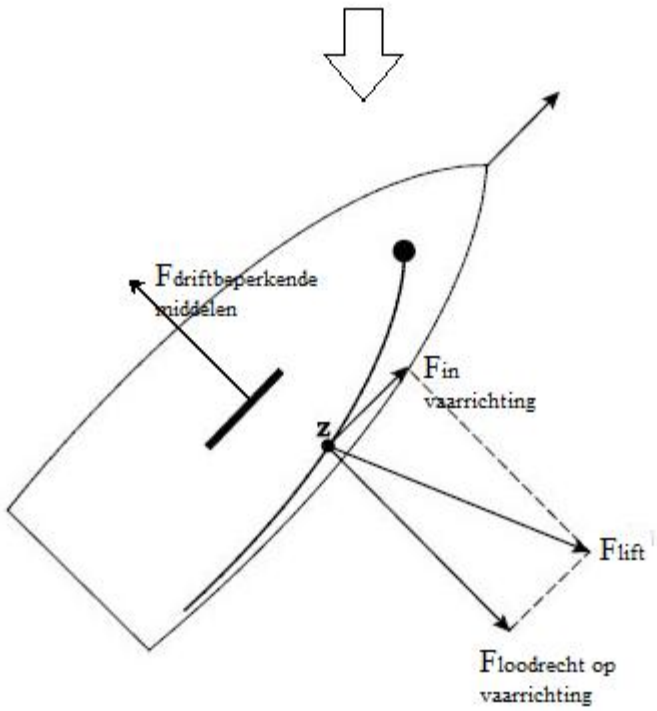
De liftcoëfficiënt is afhankelijk van de aanstroomhoek en is te bepalen door middel van de volgende formule:

$C_L$ = L / (q x A)
(www.learningaboutelectronics.com)
Waarvoor geldt:

- L is de liftkracht in Newton
- q is de druk in Pa
- A is het oppervlak (in m$^2$) van het opgelifte deel;

**Circulatietheorie of de wetten van Newton?**
Maar welk van deze theorieën is nou juist? Het antwoord is eigenlijk heel erg simpel: beide. De basis van beide theorieën ligt bij de basisprincipes van de natuurkunde, waarvan bewezen is dat deze juist zijn.

**Richting van de liftkracht**
De liftkracht levert een kracht loodrecht op de richting van de wind. De liftkracht is dus geen voorwaartse kracht op de boot. Wel kan de liftkracht worden ontbonden in verschillende krachtvectoren, namelijk een kracht in de vaarrichting van de boot en een kracht loodrecht op de vaarrichting van de boot.




Afbeelding 3: Het ontstaan van de liftkracht

Waarom gaat de boot dan vooruit en niet vooral naar de zijkant? Daar is iets op gevonden, namelijk de driftbeperkende middelen. Hieronder vallen de kiel of het zwaard (afhankelijk van type boot), het roer en de romp van de boot. Deze zogenaamde driftbeperkende middelen zorgen ervoor dat de boot minder gemakkelijk opzij kan bewegen, omdat zij een tegendruk uitoefenen op het water. Hierdoor wordt de resulterende kracht loodrecht op de vaarrichting kleiner en zal de totale resulterende kracht meer naar voren gericht zijn.

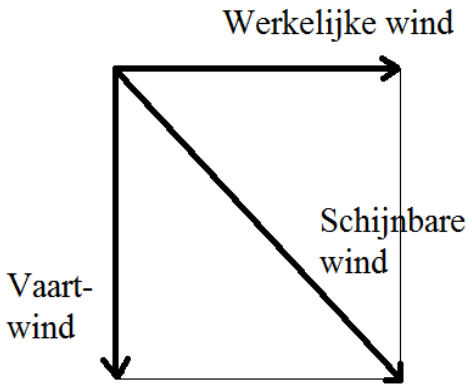
De kiel, zwaard en roer zijn loodrecht geplaatst op het zijwaartse component van de liftkracht, waardoor een tegenkracht (driftbeperkende kracht) ontstaat en de resulterende kracht loodrecht op de vaarrichting kleiner wordt en de boot dus minder zal verlijeren. Ook het onderwaterschip zorgt er voor dat de boot minder sterk wordt beïnvloed door de zijwaartse component van de liftkracht.

De driftbeperkende middelen zullen de werking van de liftkracht, loodrecht op de vaarrichting, nooit in zijn geheel opheffen, waardoor een boot niet helemaal rechtdoor vaart maar altijd een afwijking zal hebben naar lij.

**Werkelijke wind en vaartwind**

Zoals je leest heeft de wind veel invloed op de werking van de boot. Maar over welke wind hebben we het dan? Wanneer een boot vaart ondervindt hij twee verschillende soorten wind, namelijk de werkelijke wind en de vaartwind. De werkelijke wind is de wind die je voelt als je stil staat. Deze wind is ontstaan door bewegingen van drukgebieden in de lucht. Ook de vaartwind heeft invloed op de boot. Vaartwind is de wind die ontstaat door te bewegen door lucht. Je kunt vaartwind beschouwen als tegenwind. Wanneer je op je fiets zit en het windstil is, voel je immers ook de wind door je haren gaan! Dit is jouw vaartwind.

De wind waarop een boot vaart is de resultante van deze twee soorten wind. Dit wordt de schijnbare wind genoemd. De liftkracht werkt dus loodrecht op de resultante van de werkelijke wind en de vaartwind, en niet alleen op de werkelijke wind.




Afbeelding 4: Ontbinding van de schijnbare wind in werkelijke wind en vaartwind

Wind is nooit constant, dus soms zullen er vlagen voorkomen. Wanneer er een vlaag is, zal de vaartwind zich anders verhouden tegenover de werkelijke wind, waardoor de invalshoek van de schijnbare wind verandert. De werkelijke wind wordt groter en de schijnbare wind zal lager invallen.

**Koppels en krachten en de sturende werking van de zeilen**

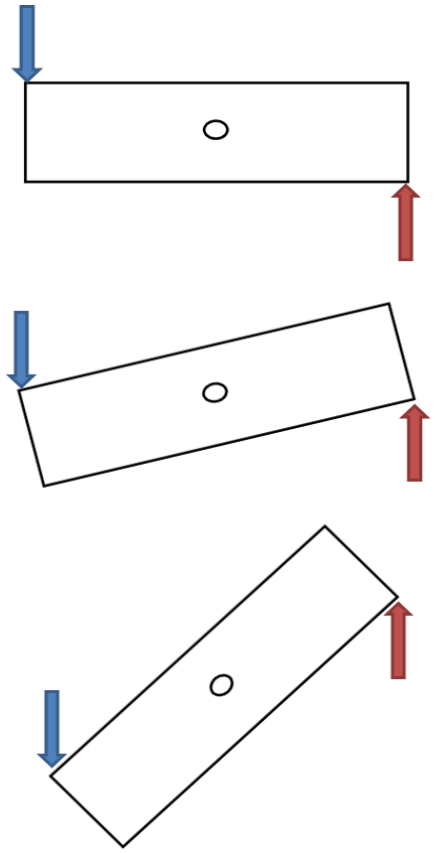
Verschillende krachten kunnen tegelijk werken om zo een koppel te vormen. Een koppel is een draaiing die twee krachten veroorzaakt op een voorwerp. Dit voorwerp zal dan om een bepaald punt draaien, het draaipunt. Als je een plank met een spijker in een bepaalde ondergrond slaat zal deze plank kunnen ronddraaien met de spijker als draaipunt. Als we nu een kracht uitoefenen op de uiteinden van de plank, zoals te zien in afbeelding 5 en zal deze gaan draaien. De afstand van de geleverde kracht tot  een evenwijdige lijn door het draaipunt heet de arm. Hoe groter deze arm, hoe groter het moment. Een moment is een kracht rond een draaipunt.

De formule is dan ook :

**M = F x r**

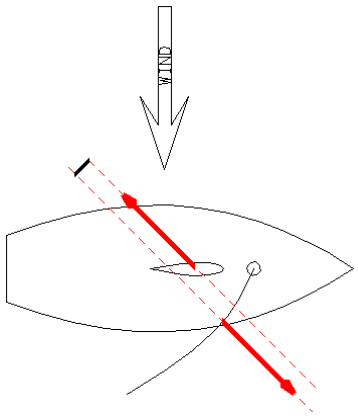
Waarvoor geldt:

- M is het Moment in NewtonMeter ( Nm)
- F is de kracht in Newton (N)
- r is de arm in meter (m)



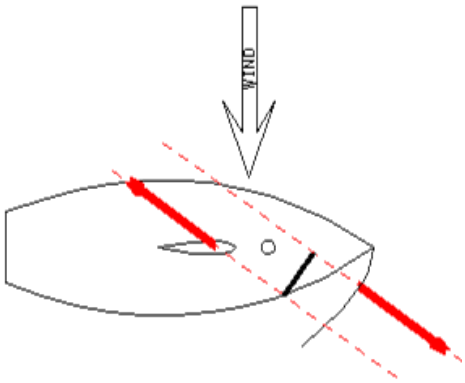
Afbeelding 5: Momenten van een draaiende plank

Natuurlijk kunnen we deze momenten ook toepassen op een zeilboot. Op een zeilboot werken een heleboel verschillende krachten die op verschillende plaatsen aangrijpen, bijvoorbeeld krachten in het zeil en de wrijvingskracht op de romp. Om te begrijpen wat er gebeurt moet er worden bepaald wat het resulterende koppel van deze krachten is. Hiervoor moeten we eerst weten waar het draaipunt van de boot ligt. Deze bevindt zich net iets achter de mast. Er zijn op een boot ook een aantal mechanismen die ervoor zorgen dat de boot minder snel gaat. Dit zijn de kiel, het roer en de romp die wrijving onderwater veroorzaken. De zeilen vangen wind die de boot vooruit blaast en dus een kracht naar voren uitoefent op de boot. Een vereenvoudigde versie hiervan is te zien in de onderstaande figuur:



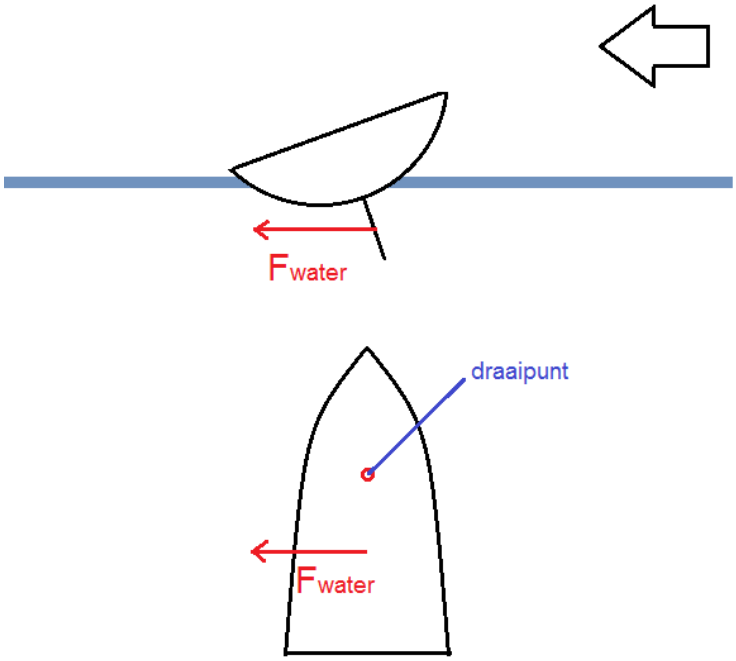

Afbeelding 6: Draaiend koppel van het grootzeil en de kiel

De rode pijl naar achter gericht geeft hier de wrijvingskracht van het water op de kiel weer. De andere pijl is de kracht die de wind in ze zeilen blaast. Zoals eerder gezegd geven twee krachten samen een koppel. dat is hier ook het geval. Het zwarte balkje geeft het verschil in afstand weer tussen de twee aangrijpingspunten van de zeilboot. Zij veroorzaken samen een draaiing en de boot zal dus langzaam links draaien en in dit geval naar de wind te draaien: oploeven.
De fok heeft een precies tegenovergestelde werking. deze zorgt in plaats van een draaiing naar links, een draaiing naar rechts (in afbeelding 6) en zal dus afvallen. Door de juiste verhouding te vinden in gebruik van beide zeilen kun je dus een zo recht mogelijke koers varen zonder al te veel hoeven bij te sturen.




Afbeelding 7: Draaiend koppel van de fok en de kiel

Ook wanneer de boot onder een helling zal gaan varen zal er een moment ontstaan die de boot wil laten oploeven of afvallen. Het water zal namelijk een druk gaan uitoefenen op de kiel of zwaard van de boot om de boot weer recht te drukken. Zo ontstaat er een kracht, die achter het draaipunt van de boot zijn aangrijpingspunt heeft.



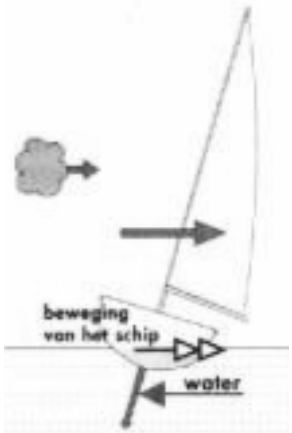

Afbeelding 8: Draaiing bij helling

Zoals te zien in afbeelding 8 resulteert een gewichtsverplaatsing naar lij dus een kracht die de boot zal laten oploeven, omdat de boot op het plaatje met de punt naar rechts zal willen draaien en zo dus een hogere koers gaat varen.
Bij een loefhelling werkt het precies hetzelfde, alleen zal er een kracht de andere kant op komen, waardoor de boot zal afvallen.

De grootte van het zogenoemde 'onderwaterschip' kan ook veel invloed uitoefenen op de snelheid van de boot. Het onderwaterschip is het deel van de boot dat onder water is. Hoe kleiner dit is, hoe kleiner de weerstand en hoe groter de snelheid is. Elke boot heeft een helling waaronder hij het beste vaart.

**Stabiliteit van een boot**

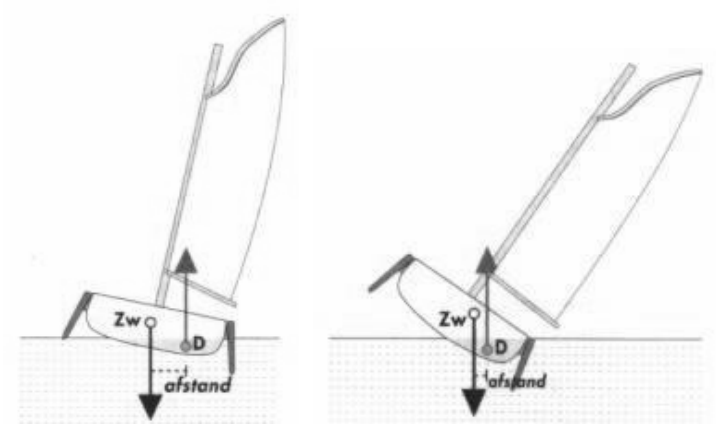
Onder de stabiliteit van de boot wordt verstaan: de mate waarin een boot weer overeind wil komen. Zoals in het plaatje hieronder te zien wordt de zeilboot eigenlijk omvergeblazen door de wind en tegengehouden door het water. Dit noemen we het hellend koppel. Omdat het niet handig is om met een boot omver geblazen te worden door het water heb je een manier nodig om overeind te blijven. Bij stabiliteit onderscheiden we meestal twee types, vormstabiel en gewichtsstabiel.




Afbeelding 9: Stabiliteit bij een boot

**Vormstabiel**

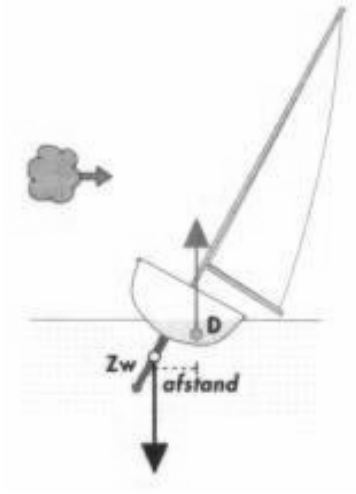
In de figuren op de volgende pagina is een boot weergegeven in twee verschillende situaties. In situatie twee is de helling van de boot beduidend groter dan die in situatie een. “Zw” betekend in deze figuur het zwaartepunt, en we mogen stellen dat de zwaartekracht in dit punt aangrijpt. “D” is het drijfpunt, kortweg het punt waarop het water kracht uitoefent. Deze vormen samen een koppel en zorgen ervoor dat de boot naar links draait ( weer rechtop komt te staan). Ook is te zien dat naarmate de helling groter wordt, de afstand tussen de twee krachten steeds kleiner wordt. Dit zorgt er voor dat het moment kleiner wordt en het rechtop komen van de boot minder wordt. Als de boot een extreem grote helling ondervindt, kan het zwaartepunt verder komen te liggen dan het drijfpunt. Het draaiend koppel zorgt nu niet voor een rechtop komende draaiing, maar voor een draaiing die de boot juist om laat slaan. We spreken hierdoor van een grote beginstabiliteit en een lage eindstabiliteit. Wat vaak wordt gedaan met dit soort boten, is dat de mensen in de boot op de rand gaan zitten, waardoor het zwaartepunt verder naar buiten verschuift, en de boot dus sneller recht gaat.




Afbeelding 10: Vormstabiel beginfase en eindfase

**Gewichtsstabiel**

De tegenhanger van vormstabiliteit is gewichtsstabiliteit. In dit geval zie je dat door een zwaar voorwerp ( de kiel) onder aan de boot, het zwaartepunt van de boot een stuk lager komt te liggen. De afstand tussen het zwaartepunt en het drijfpunt bepaalt de mate van draaiing. Als de boot recht is zal het drijfpunt recht boven het zwaartepunt zitten, en is er dus geen koppel dat voor een rechtop komende draaiing zorgt. Naarmate de boot schuiner gaat, zal de afstand tussen beide punten steeds groter worden, en de draaiing ook steeds groter worden. Deze boot heeft dus een lage beginstabiliteit en een hoge eindstabiliteit.




Afbeelding 11: Gewichtsstabiliteit

# Hypotheses op basis van het literatuuronderzoek

## Experiment 1

*Wat gebeurt er met de snelheid van een boot als je de zeilstand verandert bij een gelijke windrichting?*

Elke koers heeft een andere zeilstand waarbij de voorwaartse kracht het grootst is. Hoe lager de koers, hoe groter de zeilstand is voor een zo groot mogelijke voorwaartse kracht. Bij aan de wind zal het maximum liggen bij ongeveer 22.5°, bij halve wind bij ongeveer 45°, bij ruime wind bij ongeveer 67.5° en bij voor de wind bij 90°. Zie bijlage VIII voor een toelichting en een model.

## Experiment 2

*Welke invloed heeft de helling op de snelheid van de boot?*

Ten eerste geldt dat hoe kleiner het onderwaterschip, hoe groter de snelheid. Het onderwaterschip is het kleinste bij een bepaalde helling. De helling die zal ontstaan en de ideale helling van de gebruikte modelboot zijn echter niet bekend, dus hier kan geen uitspraak over gedaan worden.

Ten tweede zal een lijhelling er voor zorgen dat de boot oploeft. Een loefhelling zal zorgen dat de boot afvalt. Over de invloed van een gewicht aan de voorkant of achterkant van de boot kan weinig worden gezegd, omdat niet bekend is wat de plaatsing van de gewichten zal doen met de grootte van het onderwaterschip.

## Experiment 3

*Wat gebeurt er met de snelheid van de boot bij verschillende zeiltrim?*

Bij een hoge koers is een strakke zeiltrim voordelig, omdat het zeiloppervlak dan het grootste is en de krachten in het zeil dan het grootste zullen zijn. Bij lage koersen is een losse zeiltrim voordelig, want daarbij zal het meeste wind worden gevangen in de zeilen.

## Methode en materialen

Hieronder zal worden beschreven hoe de experimenten exact zijn uitgevoerd. Allereerst is de windtunnel gebouwd, om vervolgens metingen te gaan doen met de boot in het water.

### Windtunnel

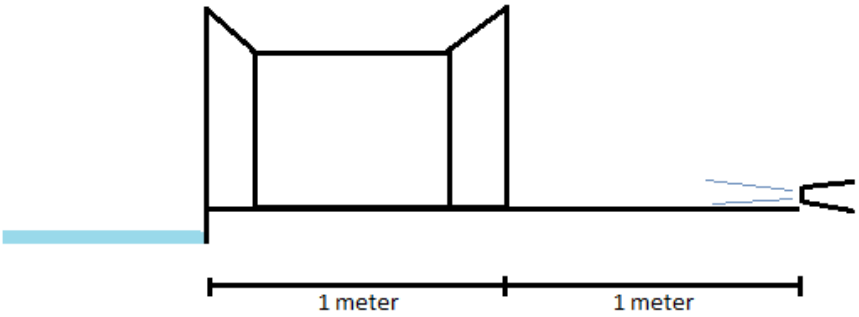
**Materialen:**

- Gardena Ergojet 3000
- 3 kartonnen verhuisdozen
- Duct tape
- Dun karton
- Schaar
- Meetlint

**Methode:**

Om de windtunnel te bouwen zijn grote kartonnen dozen gebruikt, die door middel van duct tape aan elkaar zijn verbonden. Aan de kant waar de wind als eerst binnen komt in de tunnel is een trechtervorm gemaakt, om alle wind rondom de tunnel door de tunnel heen te bewegen. Ook aan de kant waar de wind de tunnel verlaat, is een trechtervorm gemaakt, om de wind in een goede stroom rond de boot te leiden. Alle gaten in de kartonnen verhuisdozen zijn afgedicht met dun karton en duct tape.

In eerste instantie was het plan om de boot in het bad te leggen met de windtunnel op ondersteuning voor het bad. Later kwam het idee op om de boot in de vijver te plaatsen en vervolgens daar de experimenten uit te voeren, omdat daar meer ruimte beschikbaar was. Deze ruimte was hard nodig, want de gebruikte windbron (bladblazer) had een erg grote windsnelheid, die te hard was om de experimenten uit te voeren. Door de windblazer een bepaalde afstand voor de windtunnel te plaatsen, werd een goede windsnelheid bereikt aan het einde van de tunnel. Zie bijlage 7 voor foto's van de windtunnel. Hier onder een schematische weergave.




Afbeelding 12: Schematische opstelling windtunnel

Op deze manier is een gemiddelde windsnelheid van 4,8 m/s bereikt aan het uiteinde van de tunnel. In het midden van de tunnel was de windsnelheid 5,5 m/s, helemaal onderaan 3,8 m/s en bovenaan 4,9 m/s. Een goede windsnelheid om metingen mee uit te voeren.

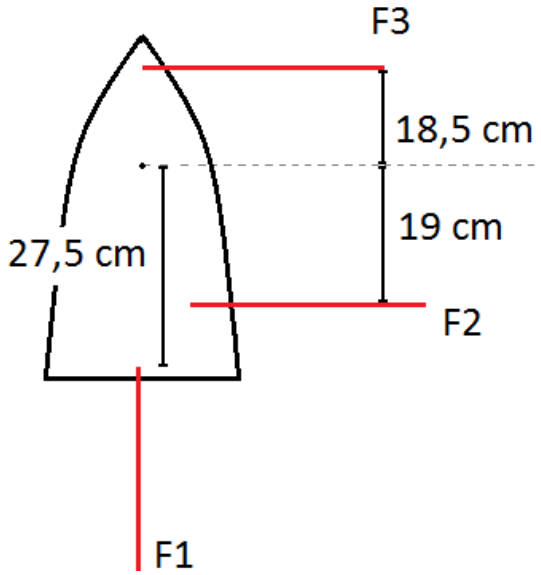
## Meetopstelling

### Materialen

- MicroMagic boot
- 3 Newtonmeters met bereik 0-2 Newton en nauwkeurigheid 0,02 Newton
- Gewichtje van 0,2 kg
- Lijntje
- Windmeter
- Geodriehoek
- Dubbelzijdig tape
- Afstandsbediening van de MicroMagic boot
- Vijver

### Methode

Allereerst zijn op de boot een drietal Newtonmeters geplaatst. Eén om de voorwaartse kracht te meten, één om de zijwaartse kracht achter het draaipunt te meten en één om de zijwaartse kracht voor het draaipunt te meten. De meter om F1 te meten is geplaatst om het ringetje van het roer heen, de meter om F2 te meten werd bevestigd met dubbelzijdig tape en de meter om F3 te meten werd om de bevestigingshaak van de fok gevestigd.




Afbeelding 13: Opstelling Newtonmeters met afstanden tot mast

Zie voor foto's van de opstelling bijlage VII.
De Newtonmeters werden vastgehouden om zo bij verschillende koersen de krachten te kunnen meten. Elke Newtonmeter leverde de grootte van de bijgenoemde kracht (van boven naar beneden F3, F2 en F1). De zeilstand kon worden ingesteld met een afstandbediening en werd opgemeten met een geodriehoek om bij elk experiment de juiste hoek in te kunnen stellen en te meten.

De windtunnel werd aangezet, nadat de boot in de goede hoek was geplaatst en werd vastgehouden op zijn plek. Vervolgens werden alle krachten afgelezen en genoteerd. Belangrijk is dat de boot recht voor de uitgang van de windtunnel wordt gehouden en tijdens de meting de goede hoek heeft t.o.v. de wind.

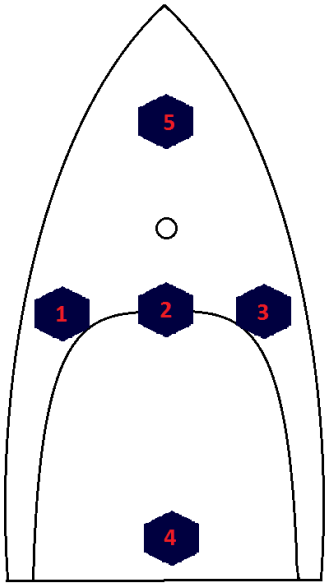
**Uitvoering experiment 1: Invloed van de zeilstand en koersen op de krachten op de boot**
Bij dit experiment moesten de krachten bij verschillende windrichtingen en zeilstanden worden gemeten. De volgende stappen zijn ondernomen om tot de verkregen resultaten te komen:

1. Er werd begonnen bij een hoek van het zeil van 0° bij aan de wind. Met behulp van de afstandsbediening werd het zeil onder minimale hoek geplaatst.
2. De boot werd op de te meten koers gelegd, vastgehouden en de windtunnel aangezet.
3. Alle krachten, F1, F2 en F3, werden afgelezen en genoteerd.
4. Het zeil werd op 22.5° graden ingesteld. Hierbij was het belangrijk om het zeil uit te duwen wanneer de hoek werd ingesteld, omdat anders de hoek niet overheen komt met de uiteindelijke hoek als er wind in het zeil staat.
5. Stap 2 en 3 werden herhaald.
6. Herhaal stap 3, 4 en 5 voor een zeilstand van 45°, 67.5° en 90°.
7. Stappen 2 tot en met 7 werden herhaald voor respectievelijk halve wind, ruime wind en voor de wind.
8. Ten slotte werd voor elke koers de hoek van het zeil gemeten die de grootste voorwaartse kracht opleverde. Dat werd gedaan door de boot op de desbetreffende koers te leggen, de blazer aan te zetten en de zeilstand te variëren. Wanneer de waarde voor de voorwaartse kracht het grootste was, werd de bladblazer uitgezet en de hoek opgemeten. Noteer bij de ideale zeilstand F1.

**Uitvoering experiment 2: invloed van helling op de krachten op de boot**

Bij dit experiment moesten de verschillende krachten op de boot worden gemeten bij een verschillende gewichtsverdeling. Er werd een gewichtje van 0,2 kg gebruikt bij alle metingen. De volgende stappen zijn ondernomen om tot de resultaten te komen:

1. Er werd een lijntje vastgemaakt aan het ringetje van het gewichtje, zodat wanneer het gewichtje van de boot zou vallen deze gemakkelijk uit het water kon worden gehaald (dit is meerdere malen nuttig gebleken)
2. Bepaal de 5 plaatsen op de boot waar de gewichtjes geplaatst moeten gaan worden. Zie afbeelding 14.



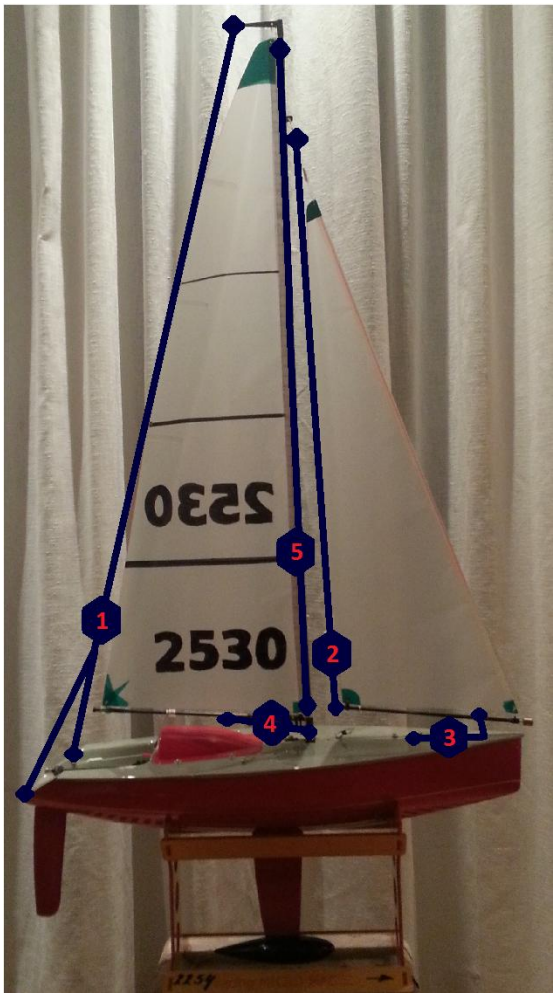

Afbeelding 14: Gewichtsposities

3. Leg de boot aan de wind (bladblazer nog uit) en plaats het gewichtje op plek 1 (zie afbeelding 14). Zet vervolgens de bladblazer aan en noteer F1, F2 en F3. Herhaal dit voor plek 2 tot en met 5.
4. Leg de boot op ruime wind (bladblazer nog uit) en plaats het gewichtje op plek 1 (zie afbeelding 14). Zet vervolgens de bladblazer aan en noteer F1, F2 en F3. Herhaal dit voor plek 2 tot en met 5.

**Uitvoering experiment 3: Invloed van zeiltrim op de krachten op de boot**

Bij dit experiment moesten de verschillende krachten op de boot worden gemeten bij verschillende zeiltrim. De volgende stappen zijn ondernomen om tot de resultaten te komen:

1. Voor 'normale zeiltrim' namen we de bepaalde gegevens bij stap 8 van experiment 1.
2. De zeilen werden strak getrimd. Dat werd gedaan op de volgende punten:

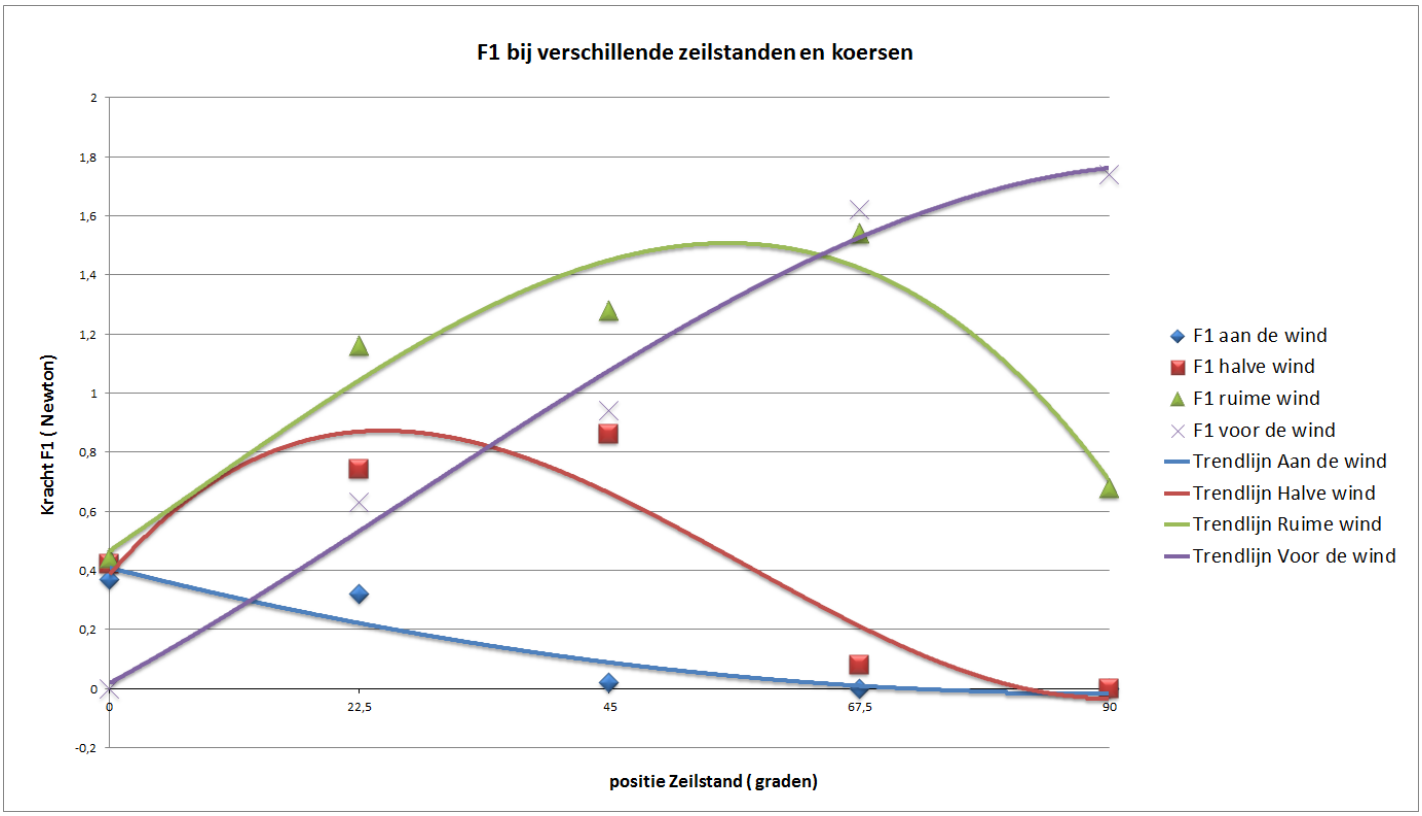



Afbeelding 15: Zeiltrim aanpassen (zie voor een toelichting op hoe de zeiltrim is aangepast bijlage I).

3. Meet vervolgens de krachten F1, F2 en F3 voor alle koersen (behalve in de wind) met de voor de koers eerder bepaalde ideale zeilstand uit experiment 1.
4. Zorg voor een losse zeiltrim. Hoe dat is gedaan is te lezen in bijlage I.
5. Herhaal stap 3 voor de los getrimde zeilen.

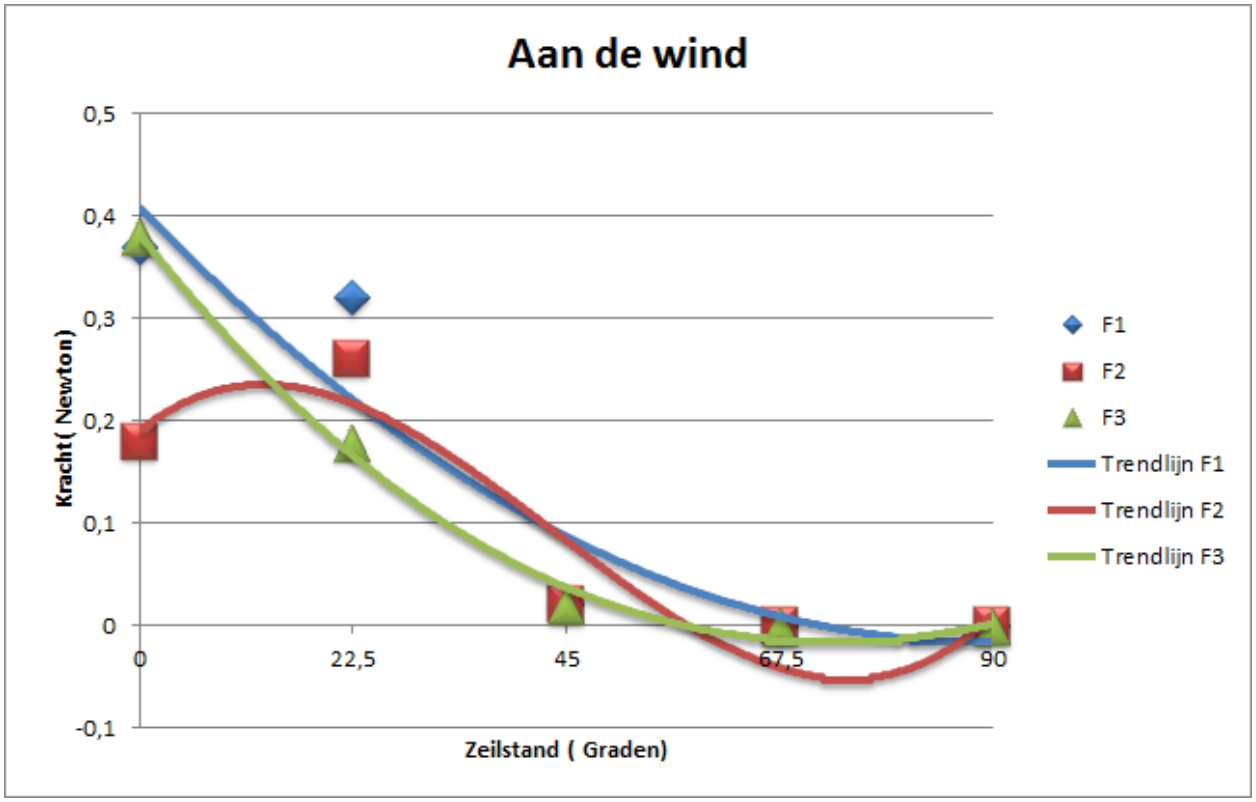
## Resultaten en discussie

### Experiment 1: Invloed van zeilstand en koers op de krachten in de boot




Figuur 1: F1 bij verschillende zeilstanden en verschillende windrichtingen

In de bovenstaande figuur, figuur 1, is te zien hoe de voorwaartse kracht verandert bij verschillende zeilstanden en windrichtingen. De resultaten die bij deze grafiek horen zijn in bijlage IV te vinden. Ook de tabellen die bij de andere diagrammen horen zijn terug te vinden in de bijlagen. Alleen de voorwaartse kracht, F1, is afgebeeld in figuur 1. De verschillende lijnen staan allemaal voor een andere koers (zie legenda). Bij een zeilstand van 0°, 22.5° en 45° heeft ruime wind de grootste waarde voor de voorwaartse kracht van alle windrichtingen.
Wat meteen opvalt is dat de verschillende koersen allemaal hun top hebben bij een verschillende zeilstand. Ook is te zien in het figuur dat de maximale F1 hoger wordt, naarmate er een lagere koers wordt gevaren.

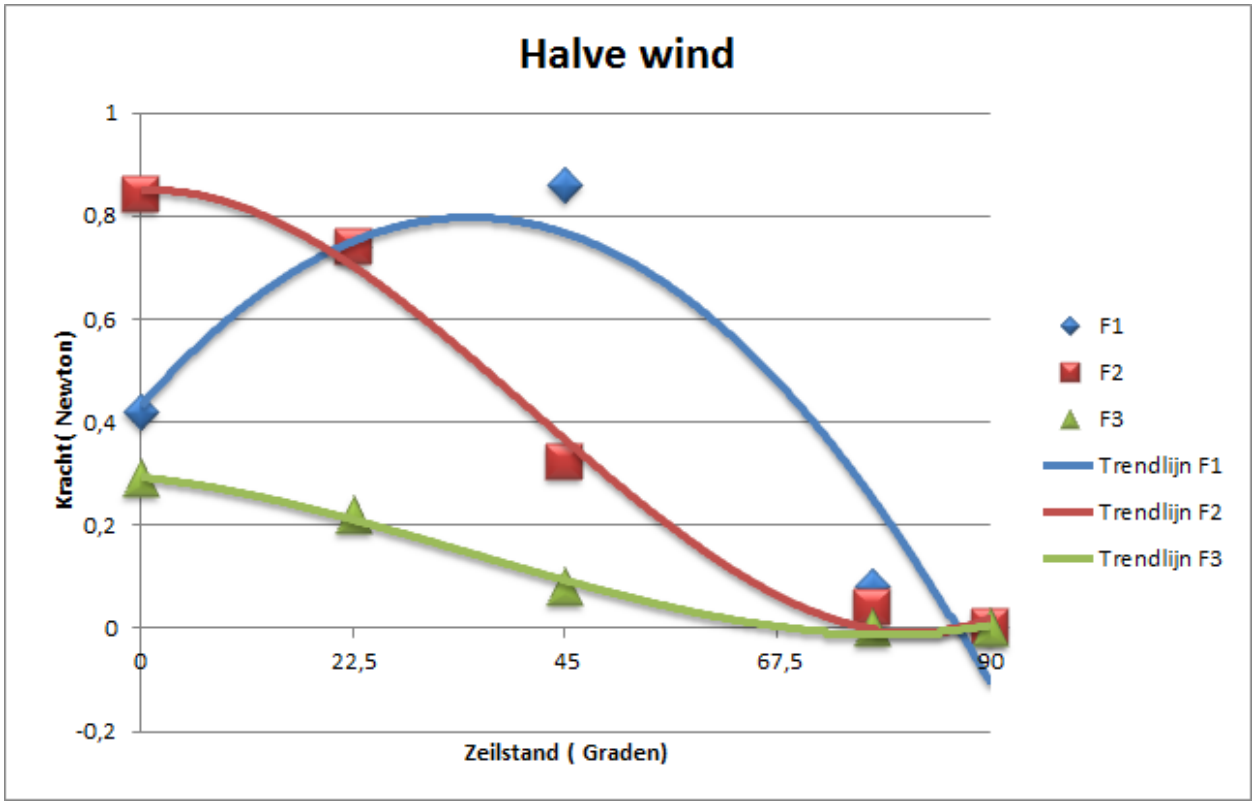



Figuur 2: De drie krachten bij aan de wind bij verschillende zeilstanden.

<u>Aan de wind:</u>

- De grafiek van aan de wind heeft zijn piek op 12,5° (zie bijlage IV)
- Bij deze windsnelheid is de F1 het kleinst van alle koersen
- Vanaf een zeilstand van 67.5° is er geen voorwaartse kracht meer
- Grootste zijwaartse krachten bij 22.5°

Wanneer er wordt gekeken naar de resultaten bij aan de wind is te zien dat de maximale voorwaartse kracht het laagst is van alle vier de windrichtingen. Dit is te verklaren doordat de boot bij aan de wind de meeste tegenwind ondervindt. Hierdoor wordt de boot sterk naar achter geblazen en zal voorwaartse kracht kleiner zijn. Daarentegen zijn de zijwaartse krachten erg hoog in vergelijking tot de andere zeilstanden. Deze krachten zijn het grootst bij de zeilstanden van 0° en 22.5°. Dit komt doordat het zeil nu nog veel wind vangt, maar wanneer er een zeilstand van 45° wordt gevoerd, het zeil in dezelfde richting als de wind staat en het dus geen wind meer vangt. De voorwaartse kracht is dan dus ook erg klein. Voor een zeilstand van 67.5° en 90° geldt zelfs dat de voorwaartse kracht 0 is.

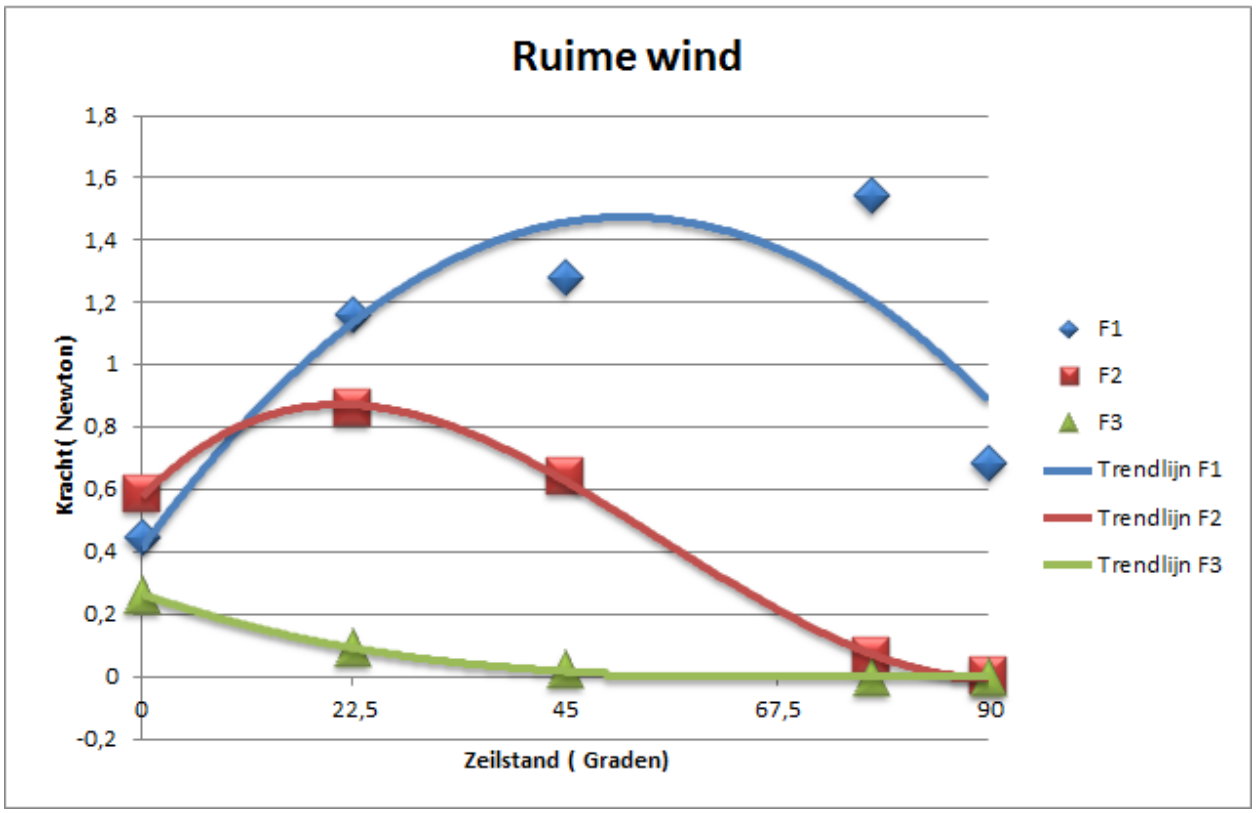



Figuur 3: De drie krachten bij halve wind bij verschillende zeilstanden.

<u>Halve wind:</u>

- De grafiek van halve wind heeft zijn piek rond de 45°
- Bij een zeilstand van 90° is er geen voorwaartse kracht meer
- De zijwaartse kracht is het grootst bij 0°

Wanneer er wordt gekeken naar de resultaten bij halve wind is te zien dat de voorwaartse kracht het grootst bij 45°. Omdat een boot bij een halve windse koers dwars op de windrichting staat zal deze een grote zijwaartse kracht ondervinden. Als het zeil helemaal dicht is en dus een hoek van 0° maakt, zal de zijwaartse kracht alleen maar groter worden. Bij 22.5° is vrijwel hetzelfde te zien, maar F2 en F3 zijn wel al afgenomen. Ook is bij 22.5° de voorwaartse kracht al duidelijke groter dan bij 0°. Dit zien we ook terug in de grafiek. Bij een zeilstand van 90° staat het zeil weer evenwijdig met de windrichting en kan het geen wind vangen. De voorwaartse kracht is daarom ook nul. Ook bij een zeilstand van 67.5° zijn alle krachten klein, omdat er nauwelijks wind wordt gevangen in de zeilen.

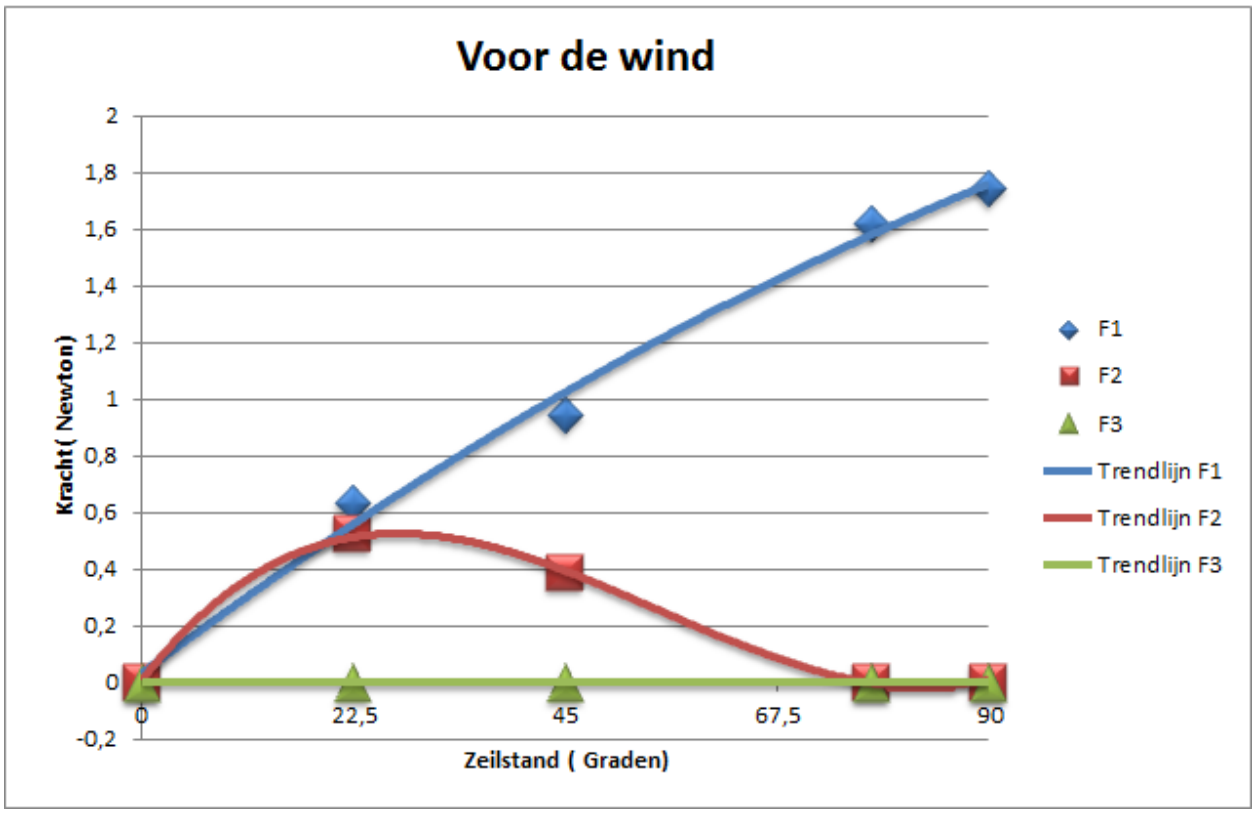



Figuur 4: De drie krachten bij ruime wind bij verschillende zeilstanden.

<u>Ruime wind:</u>

- De grafiek van ruime wind heeft zijn piek rond de 67.5°
- Grote waarden voor F1 in vergelijking tot de andere koersen
- De grafiek daalt sterk bij een zeilstand van 90°

Wanneer er wordt gekeken naar de resultaten bij ruime wind is te zien dat de voorwaartse kracht het grootst is bij 67.5°. Dit is de hoek waarbij het zeil loodrecht op de windrichting staat. Door deze stand heeft de boot een maximaal zeiloppervlak dat wind vangt en zal de voorwaartse kracht het grootst zijn. Als het zeil verder dicht wordt gedaan en dus een kleinere hoek maakt, zal de voorwaartse kracht niet sterk afnemen, omdat de wind schuin van achter komt en de boot dus alsnog naar voren wordt geblazen. Net als bij de vorige windrichtingen is te zien, dat een te grote zeilstand (in dit geval 90°) er voor zal zorgen dat de F1 een heel stuk kleiner wordt. F3 is bij alle zeilstanden gering, omdat de boot door de wind een neiging heeft om op te loeven (zie begrippenlijst en literatuuronderzoek), omdat de wind als eerst tegen het achterschip aankomt en de boot daardoor naar de wind toe zal laten draaien. Het is ook te zien dat F2 redelijk groot is bij strakke zeilstanden. Dit komt door de oploevende werking van het grootzeil.



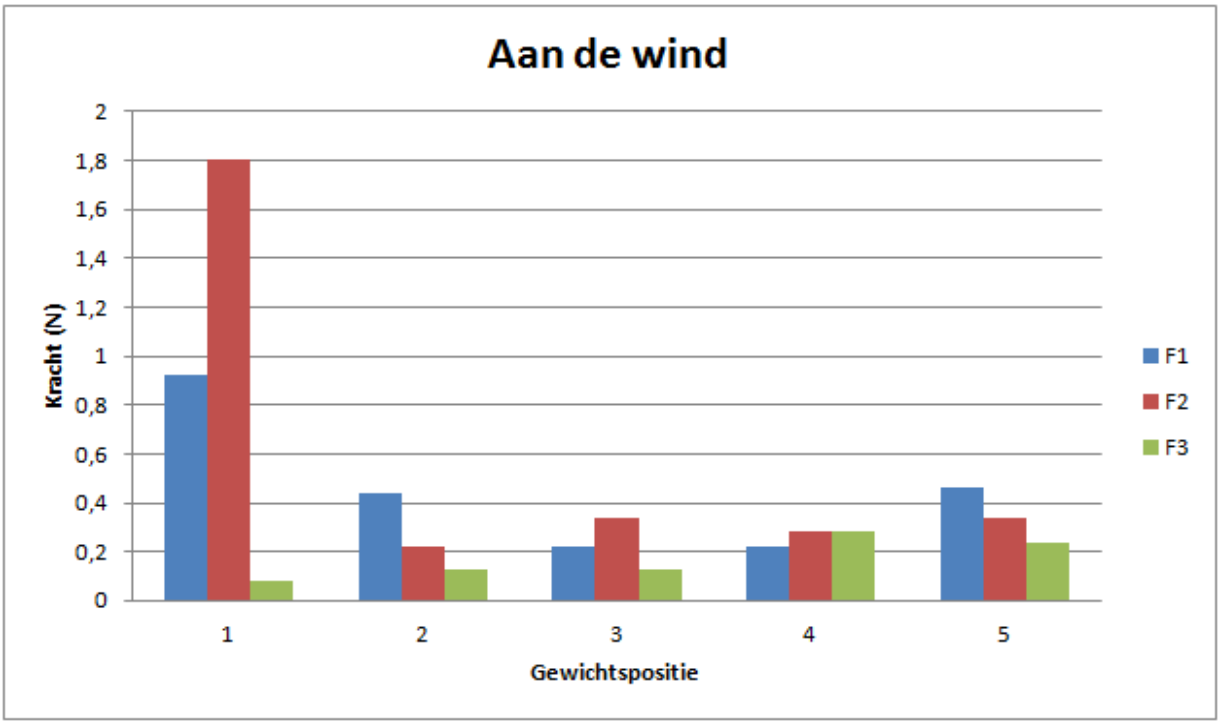

Figuur 5: De drie krachten bij voor de wind bij verschillende zeilstanden.

<u>Voor de wind:</u>

- De grafiek van aan de wind heeft zijn piek op 90°
- De maximale voorwaartse kracht is bij deze koers het grootst
- De grafiek is de enige die bij 0° geen voorwaartse kracht heeft
- Er is bij voor de wind geen sprake van zijwaartse kracht op de voorkant van de boot.

Wanneer er wordt gekeken naar de resultaten bij voor de wind is er duidelijk te zien dat de voorwaartse kracht steeds groter wordt naarmate de zeilstand groter wordt. Bij voor de wind komt de wind recht van achter en word je door de wind in de goede richting geblazen. Hoe meer zeiloppervlak wind kan vangen, hoe groter de voorwaartse kracht wordt. Wanneer het zeil volledig uitstaat en dus een hoek van 90° maakt, is de voorwaartse kracht het grootst van alle 4 de koersen. De zijwaartse kracht is alleen te meten aan de achterkant van de boot, en niet aan de voorkant. Als het zeil een klein beetje uit staat zal het niet alleen veel kracht naar voren, maar ook een draaiende kracht om het draaipunt heen ontstaan (zie koppels en krachten). Naarmate de zeilstand groter wordt verdwijnt dit effect. Door deze draaiende werking zal er een kracht in de tegenovergestelde richting zijn van F3, en is deze daarom 0. Het zeil vangt helemaal geen wind bij een zeilstand van 0°, waardoor de voorwaartse kracht 0 is.

## Experiment 2: Invloed van helling op de krachten in de boot




Figuur 6: Krachten aan de wind bij verschillende gewichtsposities

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| **F1 (N)** | 0,92 | 0,44 | 0,22 | 0,22 | 0,46 |
| **F2 (N)** | 1,8 | 0,22 | 0,34 | 0,28 | 0,34 |
| **F3 (N)** | 0,08 | 0,13 | 0,13 | 0,28 | 0,24 |

Tabel 1: Tabel behorende bij figuur 6

In figuur 6 zijn de krachten bij een aan de windse koers bij de vijf verschillende gewichtsposities afgebeeld. Per gewichtsposities zullen de opvallende resultaten worden besproken. De verschillende gewichtsposities zijn te vinden in de methode.

<u>Gewichtspositie 1:</u>

- Grote voorwaartse kracht (F1)
- Erg grote F2
- Kleine F3

<u>Gewichtspositie 2:</u>

- Vrijwel dezelfde voorwaartse kracht als wanneer de boot een aan de windse koers vaart zonder gewichtje (afwijking 0.02 N, zie resultaten experiment 1).

Gewichtspositie 3:

- Kleine voorwaartse kracht
- Grotere F2 dan bij gewichtspositie 2
- F3 gelijk aan F3 van gewichtspositie 2

Gewichtspositie 4:

- Kleine F1
- F3 is relatief groot in vergelijking tot de andere posities

Gewichtspositie 5:

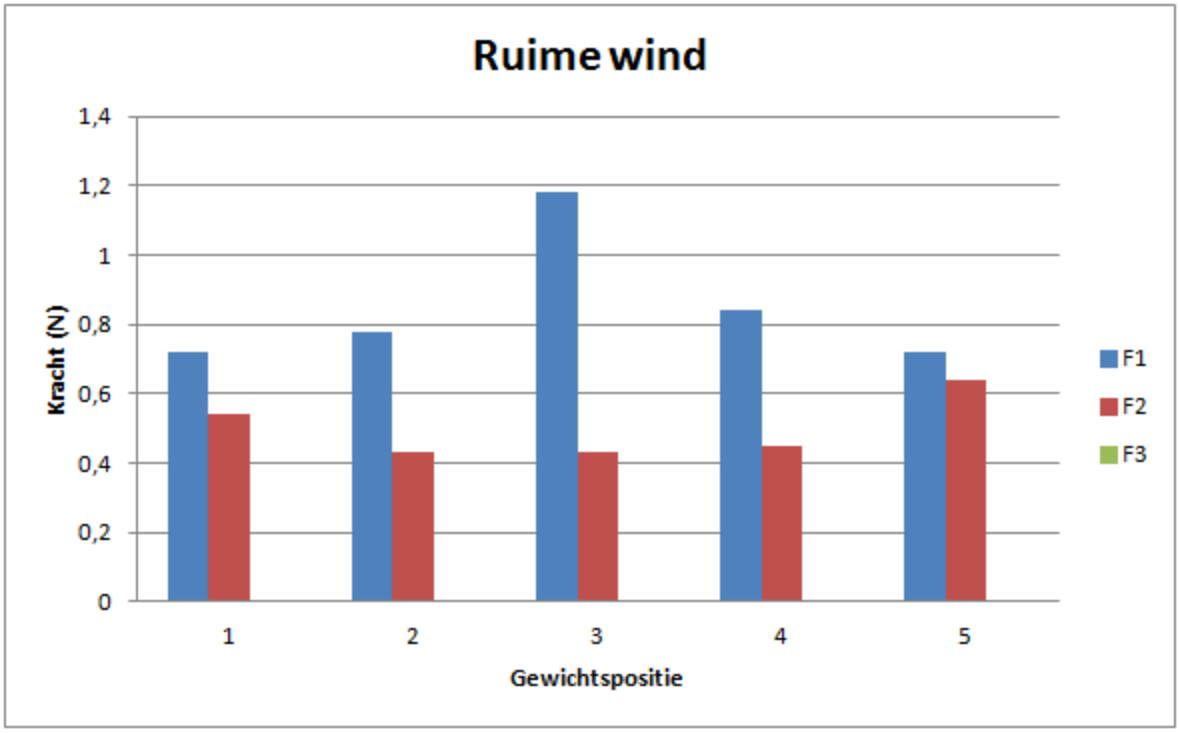
- Vrijwel dezelfde voorwaartse kracht als gewichtspositie 2 (wel zijn zowel F2 als F3 groter bij deze gewichtspositie)

Wanneer er wordt gekeken naar zijwaartse gewichtsverplaatsing is de voorwaartse kracht op aan de windse koers duidelijk het grootste bij een gewicht aan lij. Dit is te verklaren doordat het onderwaterschip dan kleiner is, waardoor de weerstand door het water kleiner is en de voorwaartse kracht groter is. De piek bij F2 kan komen doordat door de helling er een kracht geleverd wordt door het water bij de kiel, waardoor er een kracht ontstaat achter het draaipunt. Dit zorgt voor een oploevend effect en F2 is dus groot. Hierdoor is ook te verklaren waarom bij gewichtspositie 1 F3 zo klein is.

Een gewicht aan loef zorgt bij aan de wind voor een kleine voorwaartse kracht.

Wanneer er wordt gekeken naar de gewichtsverplaatsing over de lengte van de boot kan er worden geconcludeerd dat de voorwaartse kracht het grootste is bij gewichtspositie 4, namelijk een gewicht aan de achterkant van de boot. Dit is echter wel maar een klein verschil ten opzichte van een gewicht in het midden van de boot. Dit kan mogelijk komen, doordat het onderwaterschip dan kleiner is dan wanneer er een gewichtje aan de voorkant van de boot wordt geplaatst. Dit zorgt voor een kleinere weerstand en een grotere voorwaartse snelheid.

De grote waarde voor F3 bij gewichtspositie 5 kan worden verklaard, doordat de gehele boot naar voren kantelt het aangrijpingspunt van de krachten op het zeil zich meer naar voren verplaatsen. Zo wordt F2 kleiner en F3 groter.




Figuur 7: Krachten ruime wind bij verschillende gewichtsposities

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| **F1 (N)** | 0,72 | 0,78 | 1,18 | 0,84 | 0,72 |
| **F2 (N)** | 0,54 | 0,43 | 0,43 | 0,45 | 0,64 |
| **F3 (N)** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabel 2: Resultaten behorende bij figuur 7

In figuur 7 zijn de krachten bij een ruime koers bij de vijf verschillende gewichtsposities afgebeeld. Per gewichtsposities zullen de opvallende resultaten worden besproken.

<u>Gewichtspositie 1:</u>

- F2 is groter dan bij gewichtsposities 2, 3 en 4.

<u>Gewichtspositie 2:</u>

- Kleine verandering in F1 t.o.v. gewichtspositie 1
- Kleine F2

<u>Gewichtspositie 3:</u>

- Grote F1
- Kleine F2

Gewichtspositie 4:

- Grotere F1 dan bij gewichtspositie 1, 2 en 5
- Ongeveer dezelfde F2 als bij gewichtspositie 2 en 3

Gewichtspositie 5:

- Dezelfde voorwaartse kracht als bij gewichtspositie 1
- Grootste F2 van alle gewichtsposities

Bij elke gewichtspositie is er geen F3. Het is vanzelfsprekend dat er geen F3 is bij alle gewichtsposities. Dit is ook al gebleken uit de resultaten bij experiment 1, zie voor uitleg experiment 1.

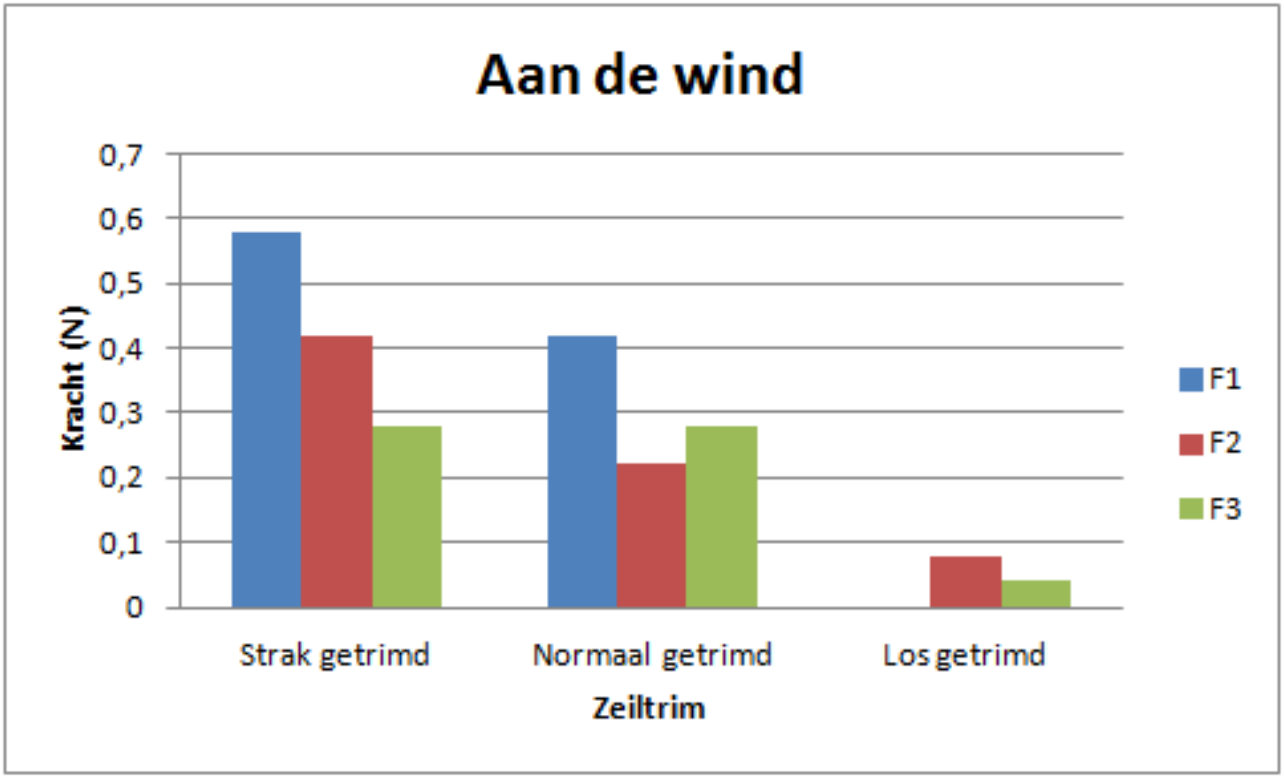
Wanneer er wordt gekeken naar zijwaartse gewichtsverplaatsing is de voorwaartse kracht het grootst bij een gewicht aan loef. Dit is te verklaren doordat het aangrijpingspunt van de krachten in het zeil dan dichterbij het draaipunt gaan liggen, waardoor de oploevende werking van het grootzeil minder wordt. Bovendien levert de kiel bij een loefhelling een afvallende werking. Door de twee genoemde redenen wordt de druk op de kiel kleiner en is de voorwaartse kracht het grootste. Ook is het onderwaterschip kleiner dan bij gewichtspositie 2, wat ook een grotere F1 op kan leveren.

Een gewicht aan lij zorgt er voor dat het aangrijpingspunt van de krachten verder van het draaipunt af komt te liggen, waardoor het moment groter wordt en de oploevende werking van het grootzeil groter wordt. Dit resulteert tot een kleine F1 en een grote F2.

Wanneer er wordt gekeken naar de gewichtsverplaatsing over de lengte van de boot kan er worden geconcludeerd dat de voorwaartse kracht het grootste is bij gewichtspositie 4. Het verschil is echter klein ten opzichte van de resultaten bij gewichtspositie 5. Vermoedelijk zijn de resultaten over gewichtsverplaatsing over de lengte van de boot anders bij ruime wind dan bij aan de wind, omdat bij aan de wind de wind het eerst aan komt aan de voorkant van de boot en bij ruime wind aan de achterkant van de boot. Hierdoor is gewichtspositie 5 bij aan de wind voordeliger en gewichtspositie 4 bij ruime wind.

## Experiment 3: Invloed van de zeiltrim op de krachten in de boot

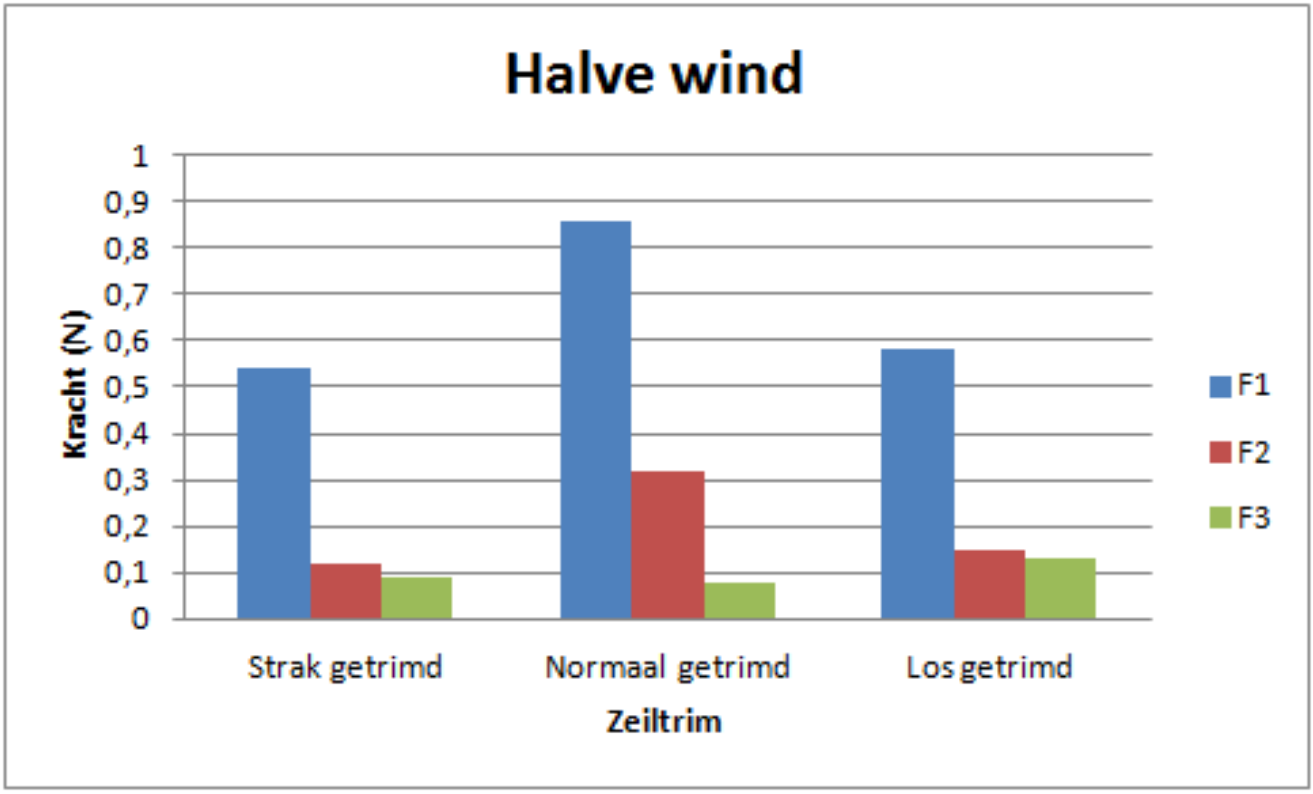
De resultaten van experiment 3 zullen per koers worden besproken.




Figuur 8: Krachten bij verschillende zeiltrim bij aan de wind

<u>Aan de wind:</u>

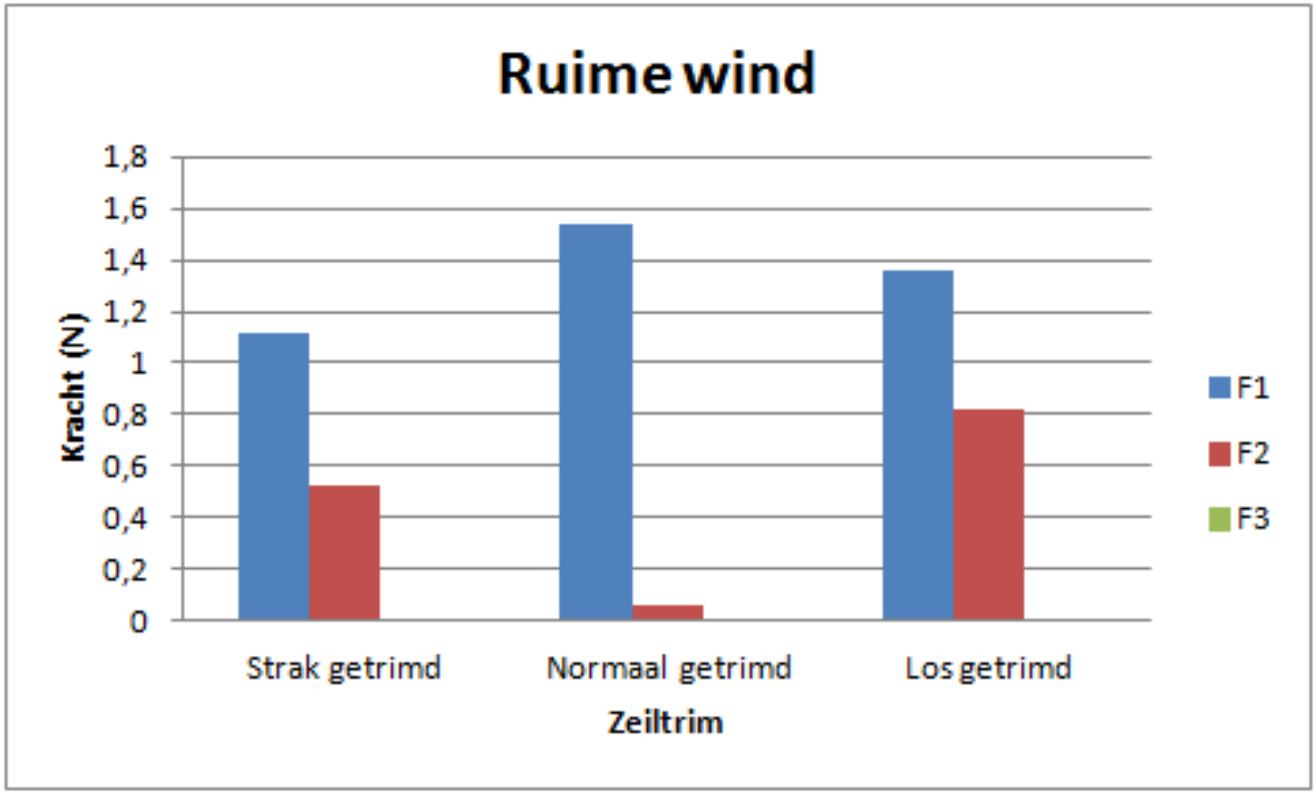
Het is duidelijk te zien dat bij aan de wind de voorwaartse kracht afneemt bij los getrimde zeilen en toeneemt bij strak getrimde zeilen. Voor de zijwaartse krachten geldt hetzelfde. Verklaringen hiervoor zijn, dat wanneer een hoge koers als aan de wind wordt gevaren, er meer wind wordt gevangen in de zeilen en alle krachten in het zeil dus groter worden.




Figuur 9: Krachten bij verschillende zeiltrim bij halve wind

<u>Halve wind:</u>

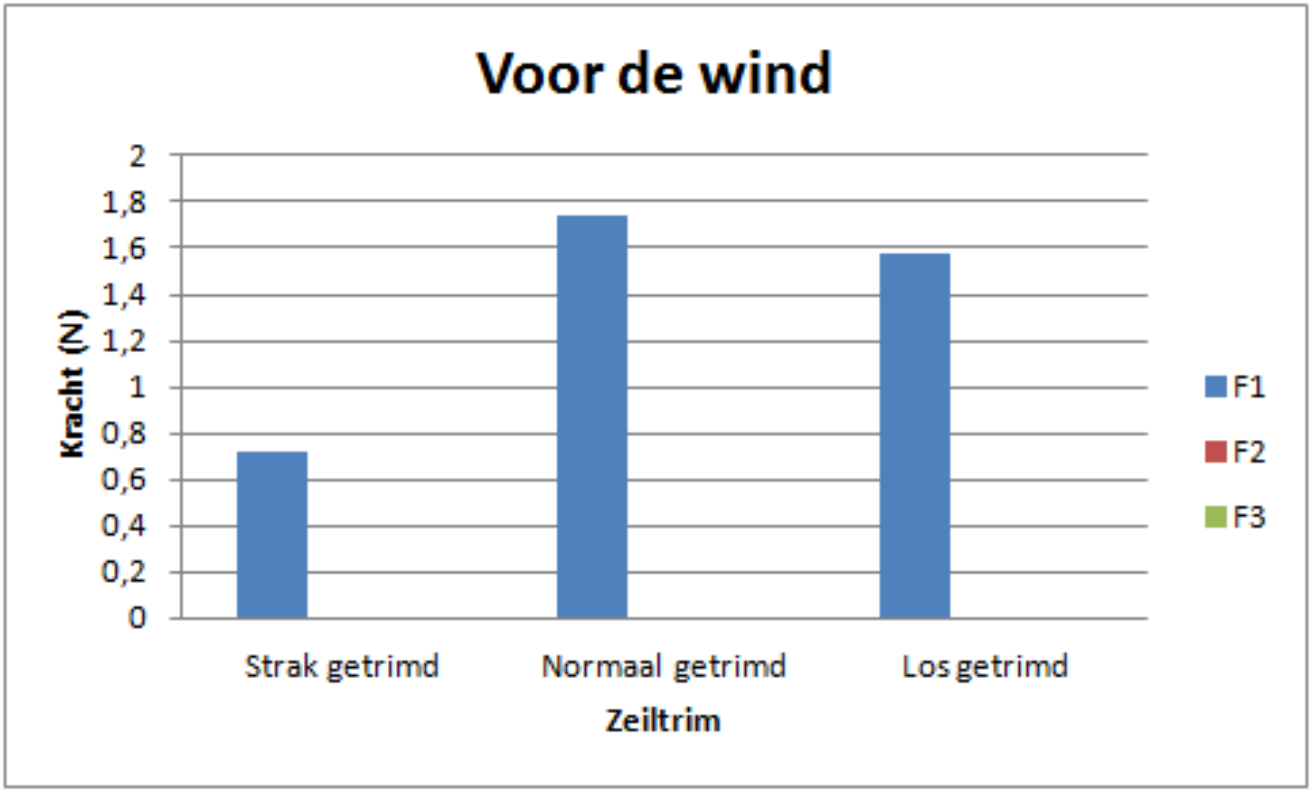
Bij halve wind is te zien dat de voorwaartse kracht het grootste is bij normaal getrimde zeilen. De verklaring hiervoor kan zijn dat bij deze zeiltrim de zeilen het meeste wind vangen. Bij een andere zeiltrim zullen de krachten dus als vanzelfsprekend afnemen. De afneming in kracht is bij los getrimde zeilen vrijwel even groot als bij strak getrimde zeilen.




Figuur 10: Krachten bij verschillende zeiltrim bij ruime wind

<u>Ruime wind:</u>

De voorwaartse kracht is, net als bij halve wind, het grootste bij normaal getrimde zeilen. Wel is het verschil tussen de voorwaartse kracht bij normaal getrimde zeilen en los getrimde zeilen kleiner dan bij halve wind en is de voorwaartse kracht bij los getrimde zeilen ook duidelijk groter dan die bij strak getrimde zeilen. Dit geeft aan dat bij een lage koers een strakke zeilstand nadeliger werkt dan bij een hoge koers en dat een losse zeilstand voordeliger is dan bij een hoge koers.




Figuur 11: Krachten bij verschillende zeiltrim bij voor de wind

<u>Voor de wind:</u>

De voorwaartse kracht is opnieuw het grootste bij de normaal getrimde zeilen. Wel is duidelijk te zien in figuur 14 dat er een groot verschil is tussen de F1 bij strak getrimde zeilen en los getrimde zeilen. Bovendien is het verschil tussen de F1 bij normaal en los getrimde zeilen kleiner geworden, wat aangeeft dat los getrimde zeilen bij voor de wind voordeliger kunnen werken dan bij ruime wind.

## Conclusies

### Experiment 1

De vraag die door middel van experiment 1 beantwoord moet worden is: *Wat gebeurt er met de snelheid van een boot als je de zeilstand verandert bij een gelijke windrichting?*
Na het uitvoeren van experiment 1 is gebleken dat elke koers een optimale zeilstand heeft waarvoor de voorwaartse snelheid het grootst is. Hieruit is op te merken dat de zeilstand wel degelijk invloed heeft op de voorwaartse kracht en dat deze de snelheid enorm kan verhogen of juist de boot stil kan laten staan. Uit de metingen bleek dat de ideale zeilstand voor aan de wind 12,5° is, voor halve wind 45°, voor ruime wind 67.5° en voor voor de wind 90°. Er geldt in het algemeen: hoe hoger de koers, hoe strakker het zeil moet staan voor een maximale voorwaartse snelheid.

### Experiment 2

De vraag die door middel van experiment 2 beantwoord moet worden is: *Welke invloed heeft de helling op de snelheid van de boot?*
De helling kan zowel de voorwaartse als zijwaartse krachten beïnvloeden. Bij aan de wind is de meest gunstige helling over de breedte van het schip een helling naar lij en over de lengte van het schip een helling naar de achterkant van het schip. Bij ruime wind is over de breedte van het schip een helling aan loef het voordeligste en over de lengte van het schip een helling naar de voorkant. Vermoedelijk zal bij beide koersen een combinatie van de twee genoemde gunstigste hellingen de meest gunstige helling opleveren en zal die meest gunstige helling zorgen voor de grootste snelheid. Bovendien zorgt een lijhelling voor een oploevend effect.

### Experiment 3

De vraag die door middel van experiment 3 beantwoord moet worden is: *Wat gebeurt er met de snelheid van de boot bij verschillende zeiltrim?*
Uit experiment 3 is gebleken dat hoe hoger de koers, hoe minder nadelig het is als de zeilen strak getrimd zijn. Bij aan de wind is een strakke zeiltrim zelfs de meest voordelige zeiltrim. Bovendien geldt dat hoe lager de koers, hoe minder nadelig een losse zeiltrim is en hoe nadeliger een strakke zeiltrim is. Dit geldt niet alleen voor de voorwaartse kracht, maar ook voor de zijwaartse krachten.

### Samenvatting conclusies

De hoofdvraag die in dit profielwerkstuk centraal staat is: *Wat is de invloed van verschillende aspecten op de snelheid van de zeilboot?*
Uit onze experimenten is gebleken dat de drie te onderzoeken aspecten, namelijk zeilstand, helling en zeiltrim, van grote invloed kunnen zijn op de voorwaartse kracht van de boot waardoor zij de snelheid van de boot beïnvloeden. De invloed van de genoemde aspecten is verschillend, dus er is geen algemene conclusie te geven.

## Suggesties voor nader onderzoek

In nader onderzoek zou onderzoek gedaan kunnen worden naar de andere aspecten die invloed uit kunnen oefenen op de snelheid van de zeilboot. Een zeilboot heeft namelijk veel aspecten waar rekening mee gehouden kan worden. Echter was het in dit profielwerkstuk slechts mogelijk om een beperkt aantal aspecten uit te lichten, dus is het aantal aspecten beperkt tot die waar de zeiler zelf invloed op heeft. Ook zijn er enkele dingen die op een andere manier kunnen worden onderzocht of aangepakt in een volgend onderzoek naar dezelfde aspecten:

- De boot zelf lag onder de rand van de vijver en ving dus geen wind, wat de resultaten beïnvloed kan hebben. Bij een volgend onderzoek zal dus een andere opstelling gebouwd kunnen worden, die er voor zorgt dat de romp wel wind vangt.
- Op een bepaald moment ging er een flap van de windtunnel een andere kant op staan waardoor enkele metingen opnieuw moesten worden gedaan, dit kan onnauwkeurigheden hebben veroorzaakt.
- De schijnbare wind is helemaal niet meegenomen in het onderzoek, er is namelijk enkel gemeten op de werkelijke wind, omdat de boot stil lag in het water. Dit kan ook verklaren waarom de F1 bij aan de wind altijd kleiner was dan bij bijvoorbeeld voor de wind, terwijl bij het varen op een zeilboot de snelheid net zo groot kan zijn bij de twee eerdergenoemde koersen. Het is echter lastig om metingen uit te voeren op een varende boot.
- Het uitvoeren van metingen was lastig, want soms was het moeilijk om de waarden af te lezen van de Newtonmeters, waardoor er snel meetonnauwkeurigheden ontstaan. Ook zorgden de hele lage waardes voor F ervoor dat de kracht af en toe moeilijk te bepalen was. In het vervolg zou er een manier gevonden kunnen worden om de krachten nauwkeuriger te bepalen, bijvoorbeeld door het gebruik van meer nauwkeurige meetinstrumenten.

## Slotwoord

Ten eerste willen wij graag een aantal personen bedanken. Namelijk Joris van Heugten die ons heeft begeleid bij het plannen en maken van het werkstuk. Ook willen wij Wijbrand Siedenburg bedanken voor het lenen van zijn zeilboot.

Het maken van dit werkstuk heeft ons veel geleerd. We hebben kennisgemaakt met het maken van een wetenschappelijk onderzoek en met het zelfstandig uitvoeren van experimenten. Bovendien hebben we leren omgaan met Excel en hebben we geleerd hoe we een grote hoeveelheid informatie netjes kunnen ordenen.

Hoewel we beide al veel wisten van het onderwerp zeilen, hebben de experimenten ons toch veel geleerd. Het was ook erg leuk om al onze theoretische kennis te testen en terug te zien in de praktijk. De samenwerking was prettig. Samen zorgden we voor veel plezier tijdens het werken en hebben we ook goede afspraken gemaakt over wie wat moest doen. De planning hierbij was erg goed, waardoor we stressvolle situaties aan het eind hebben vermeden.

Wij hebben het werken aan ons profielwerkstuk als positief ervaren.

## Bronvermelding

### Boeken en wetenschappelijke artikelen

Poelgeest, E. en van de Steen, M (2006). *De aëro- en hydrodynamica van het zeilen.* Verkregen van http://www.zeiltheorie.nl/plaatjes/pwserikvpoelgeestmaartenvdsteen.pdf

Hoefnagels, J. Peter (2001) (tekeningen van Pieter Berkel), Het zeilboek, de nieuwe leidraad voor zeilers. Uit Huizen, uitgeverij Het Goede Boek

### Internet

Zeiltheorie.nl. *Koppels en krachten*. Geraadpleegd op 8 oktober van http://zeiltheorie.nl/menf.html

Learning about Electronics*. Lift Coefficient Calculator*. Geraadpleegd op 29 september 2014 van http://www.learningaboutelectronics.com/Articles/Lift-coefficient-calculator.php#answer

Hyperphsics. *Bernoulli or Newton's Laws for Lift?* Geraadpleegd op 29 september 2014 van http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/fluids/airfoil.html

Av8n.nl. *How Much Circulation? The Kutta Condition*. Geraadpleegd op 29 september 2014 van http://www.av8n.com/how/htm/airfoils.html#sec-Kutta

FoilSim III. *Wind simulator*. Geraadpleegd op 6 februari 2015 van http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/foil3.html

### Personen

| | |
|---|---|
| W. Siedenburg | Lenen boot en informatie zeiltrim |
| J. van Heugten | Begeleiding, van Maerlant Lyceum |

**Afbeeldingen**

Voorblad
ForwallPaper. Geraadpleegd op 10 februari 2015 van
http://es.forwallpaper.com/wallpaper/sailing-in-morning-dusk-269666.html

Afbeelding 1
Langsgetuigd.nl (2010*). Newton, Bernoulli, circulatietheorie, loevend koppel, schijnbare wind, lateraalpunt.* Geraadpleegd op 29 september 2014
van http://www.langsgetuigd.nl/nl/zeiltheorie.htm

Afbeelding 2
Poelgeest, E. en van de Steen, M (2006*). De aëro- en hydrodynamica van het zeilen*. Bladzijde 24.

Afbeelding 3
Een bewerking van de afbeelding van Examenopgave VWO, natuurkunde, 20313 tijdvak 1, opgave 5: zeilen. Geraadpleegd op 29 september 2014 van
http://www.natuurkunde.nl/artikelen/view.do?supportId=942906

Afbeelding 6
Zeiltheorie.nl. *Koppels en krachten*. Geraadpleegd op 8 oktober van
http://zeiltheorie.nl/menf.html

Afbeelding 7
Zeiltheorie.nl. *Koppels en krachten*. Geraadpleegd op 8 oktober van
http://zeiltheorie.nl/menf.html

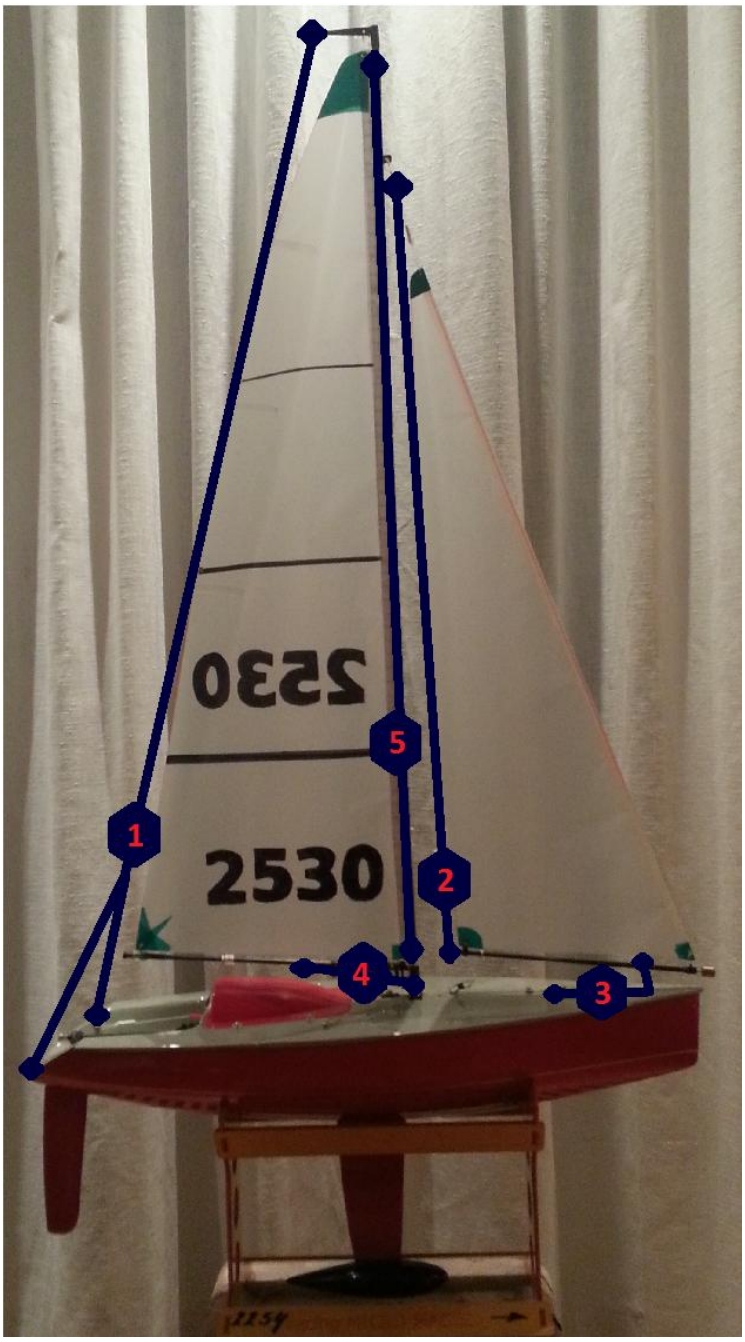
Afbeelding 9, 10 en 11
Hoefnagels, J. Peter (2001) (tekeningen van Pieter Berkel), Het zeilboek, de nieuwe leidraad voor zeilers. Uit Huizen, uitgeverij Het Goede Boek

Afbeelding 21 en 22
FoilSim III. *Wind simulator*. Geraadpleegd op 6 februari 2015 van
http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/foil3.html

# Bijlagen

## Bijlage I: Zeiltrim

Bij experiment 3 is de zeiltrim van de boot veranderd. In de onderstaande afbeelding is te zien op welke plekken we deze standen hebben aangepast. De bolletjes geven de aangrijpingspunten van de lijnen aan. De nummers worden in de legenda verder uitgelegd:




Afbeelding 16: zeiltrim zelfgemaakt

**Verschillende zeiltrim:**

1. Deze lijn trekt de mast naar achter waardoor het zeil boller komt te staan en meer wind vangt.
2. Deze lijn trekt de fok omhoog zodat deze boller komt te staan en meer wind vangt.
3. Deze lijn zorgt ervoor dat de fok losser kan bewegen en dus veel boller komt te staan en meer wind vangt.
4. Dit balkje kan de giek verder omhoog duwen zodat het zeil boller komt te staan en het grootzeil meer wind vangt.
5. Als dit lijntje losser wordt gedaan staat het voorlijk boller waardoor het zeil meer wind vangt.

**Strakke zeiltrim:**

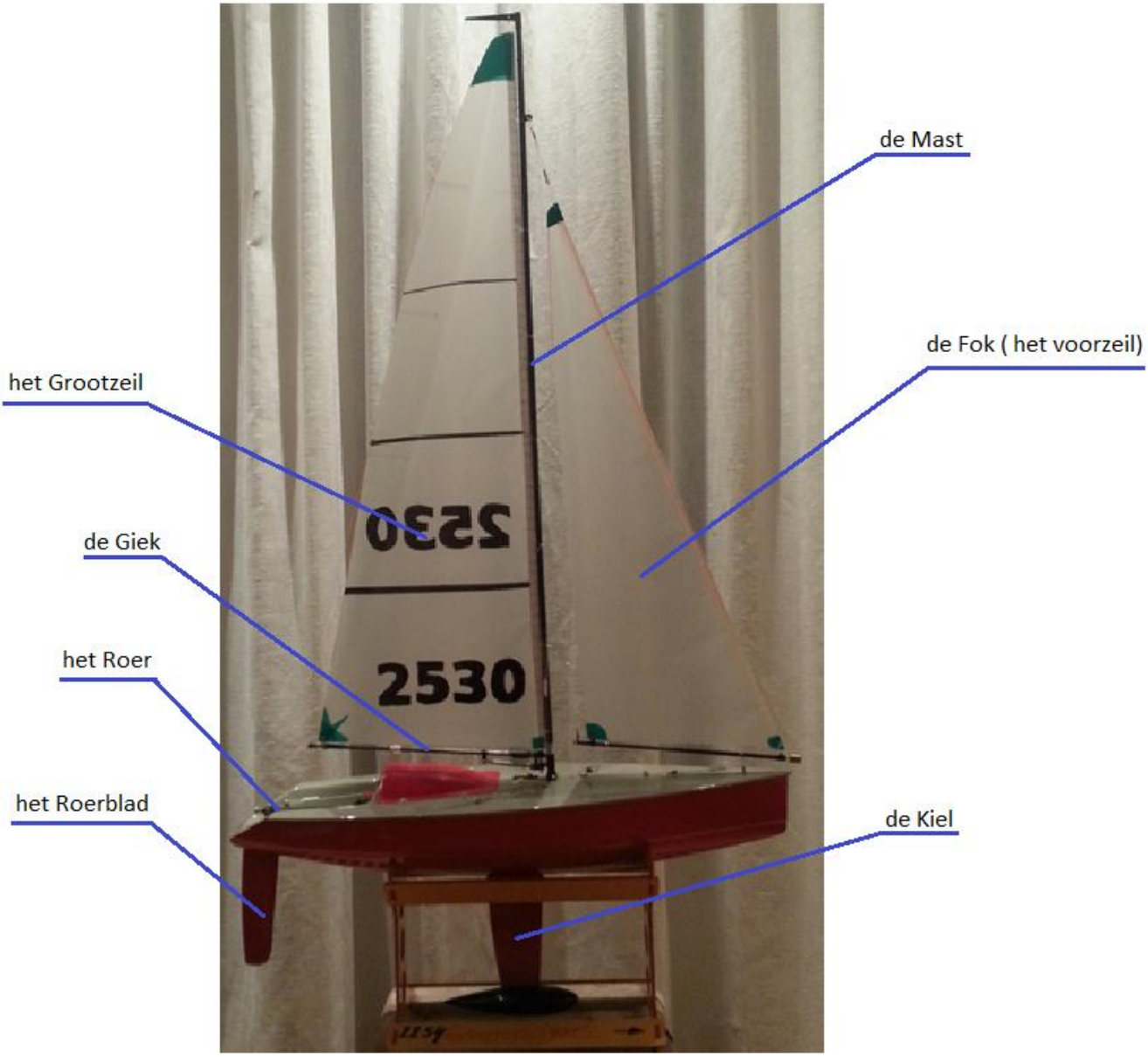
1. Lijntje los gezet
2. Lijntje los gezet
3. Strakker gezet
4. Ingedraaid: giek meer naar beneden
5. Lijntje strak gezet

**Losse zeiltrim:**

1. Lijntje strak gezet
2. Lijntje strak gezet
3. Losser gezet
4. Uitgedraaid: giek meer omhoog
5. Lijntje los gezet

**Bijlage II: Benamingen van onderdelen op de boot**

In de onderstaande afbeelding is door middel van pijlen weergegeven hoe verschillende onderdelen op de boot heten en waar ze zitten. Dit is aangegeven op de modelboot die is gebruikt voor de experimenten:




Afbeelding 17: Benamingen zeilboot

## Bijlage III: Begrippenlijst

In dit werkstuk komen enkele begrippen voor die voor een niet-zeiler niet te begrijpen zijn. Daarom is er een begrippenlijst gemaakt, om deze begrippen duidelijk te maken:

**Afvallen**

Een lagere koers gaan varen, van de wind af draaien. (Zie: koersen)

**Bakboord**

Als je op een boot staat met je gezicht naar de voorkant op de boot, dan is de linkerkant van de boot bakboord.

**Drift**

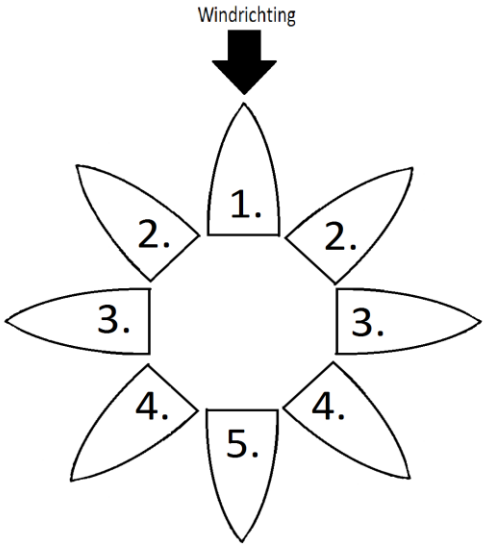
Het verlijeren van een schip door de zijwaartse kracht van de wind.

**Koersen (windrichtingen)**

In het zeiljargon zijn er verschillende benamingen voor hoe de wind invalt in de boot. we onderscheiden hier vijf koersen:

1. In de wind (recht tegen de wind in varen)
2. Aan de wind (de wind valt in met een hoek van 45 graden op de vaarrichting)
3. Halve wind (de wind waait nu loodrecht op de vaarrichting van de boot)
4. Ruime wind (de wind valt in met een hoek van 135 graden op de vaarrichting)
5. Voor de wind (de wind komt nu recht van achter)

Hoe meer de wind van achter komt, hoe lager de koers. En andersom: hoe meer de wind van voren komt, hoe hoger de koers. Aan de wind is dus bijvoorbeeld een hogere koers dan ruime wind.




Afbeelding 18: Uitleg windroos

**Lij**
De kant van de boot waar de wind de boot verlaat.

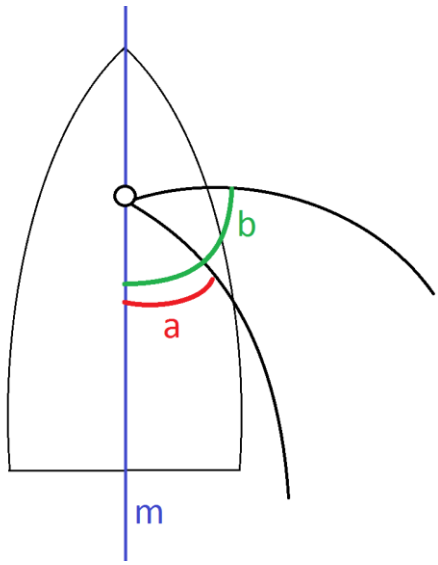
**Loef**
De kant van de boot waar de wind de boot binnen komt

**Oploeven**
Een hogere koers gaan varen, naar de wind toe draaien. (Zie: koersen)

**Stuurboord**
Als je op een boot staat met je gezicht naar de voorkant op de boot, dan is de rechterkant van de boot stuurboord.

**Verlijeren**
Verlijeren betekent dat de wind een schip opzij beweegt in de lijrichting, doordat de boot een zijwaartse kracht ondervindt door de wind.

**Zeilstand**
De zeilstand is de mate waarop het zeil is aangetrokken. Zie afbeelding X. Als de hoek met de middenas m kleiner is dan is het zeil strakker aangetrokken. Het zeil in stand a is dus strakker aangetrokken dan het zeil in stand b.




Afbeelding 19: Uitleg zeilstand

**Zeiltrim**
De manier waarop het zeil van de boot is gehesen. Dit kan bijvoorbeeld heel strak zijn of heel los, waardoor het zeil meer mee bolt.

## Bijlage IV: Resultaten experiment 1

**Experiment 1: invloed van zeilstand en koers**
**Bereik Newtonmeter: 2 N Nauwkeurigheid Newtonmeter: 0,02 N**
**Alle gemeten krachten zijn in Newton(N)**

**hoek van het zeil: 0°**

| | Aan de Wind | Halve wind | Ruime wind | Voor de wind |
|---|---|---|---|---|
| **F1** | 0,37 | 0,42 | 0,44 | 0 |
| **F2** | 0,18 | 0,84 | 0,58 | 0 |
| **F3** | 0,38 | 0,29 | 0,26 | 0 |

**hoek van het zeil: 22.5°**

| | Aan de Wind | Halve wind | Ruime wind | Voor de wind |
|---|---|---|---|---|
| **F1** | 0,32 | 0,74 | 1,16 | 0,63 |
| **F2** | 0,26 | 0,74 | 0,86 | 0,52 |
| **F3** | 0,18 | 0,22 | 0,09 | 0 |

**hoek van het zeil: 45°**

| | Aan de Wind | Halve wind | Ruime wind | Voor de wind |
|---|---|---|---|---|
| **F1** | 0,02 | 0,86 | 1,28 | 0,94 |
| **F2** | 0,02 | 0,32 | 0,64 | 0,38 |
| **F3** | 0,02 | 0,08 | 0,02 | 0 |

**hoek van het zeil: 67.5°**

| | Aan de Wind | Halve wind | Ruime wind | Voor de wind |
|---|---|---|---|---|
| **F1** | 0 | 0,08 | 1,54 | 1,62 |
| **F2** | 0 | 0,04 | 0,06 | 0 |
| **F3** | 0 | 0 | 0 | 0 |

**hoek van het zeil: 90°**

| | Aan de Wind | Halve wind | Ruime wind | Voor de wind |
|---|---|---|---|---|
| **F1** | 0 | 0 | 0,68 | 1,74 |
| **F2** | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **F3** | 0 | 0 | 0 | 0 |

| **Windrichting:** | **optimale hoek:** | **F1** | | |
|---|---|---|---|---|
| **aan de wind** | 12,5° | 0,42 | | |
| **halve wind** | 45° | 0,92 | | |
| **ruime wind** | 67.5° | 1,58 | | |
| **voor de wind** | 90° | 1,74 | | |

## Bijlage V: Resultaten experiment 2

**Experiment 2: invloed van helling**

**Bereik newtonmeter: 2 N**
**Nauwkeurigheid newtonmeter: 0,02 N**

**Massa gewichtje: 0,2 kg**
**Alle gemeten krachten zijn in Newton (N)**

**Gewichtspositie 1**

| | Aan de wind | Ruime wind |
|---|---|---|
| **F1** | 0,92 | 0,72 |
| **F2** | 1,8 | 0,54 |
| **F3** | 0,08 | 0 |

**Gewichtspositie 2**

| | Halve wind | Voor de wind |
|---|---|---|
| **F1** | 0,44 | 0,78 |
| **F2** | 0,22 | 0,43 |
| **F3** | 0,13 | 0 |

**Gewichtspositie 3**

| | Halve wind | Voor de wind |
|---|---|---|
| **F1** | 0,22 | 1,18 |
| **F2** | 0,34 | 0,43 |
| **F3** | 0,13 | 0 |

**Gewichtspositie 4**

| | Halve wind | Voor de wind |
|---|---|---|
| **F1** | 0,22 | 0,72 |
| **F2** | 0,28 | 0,64 |
| **F3** | 0,28 | 0 |

**Gewichtspositie 5**

| | Halve wind | Voor de wind |
|---|---|---|
| **F1** | 0,46 | 0,84 |
| **F2** | 0,34 | 0,45 |
| **F3** | 0,24 | 0 |

## Bijlage VI: Resultaten experiment 3

**Bereik newtonmeter:** **2 Newton**
**Nauwkeurigheid Newtonmeter:** **0,02 N**
**Alle gemeten krachten zijn in Newton (N)**

**Strak getrimde zeilen**

| | Aan de wind | Halve wind | Ruime wind | Voor de wind |
|---|---|---|---|---|
| **F1** | 0,58 | 0,54 | 1,12 | 0,72 |
| **F2** | 0,42 | 0,12 | 0,52 | 0 |
| **F3** | 0,28 | 0,09 | 0 | 0 |

**Normaal getrimde zeilen**

| | Aan de wind | Halve wind | Ruime wind | Voor de wind |
|---|---|---|---|---|
| **F1** | 0,42 | 0,86 | 1,54 | 1,74 |
| **F2** | 0,22 | 0,32 | 0,06 | 0 |
| **F3** | 0,28 | 0,08 | 0 | 0 |

**Los getrimde zeilen**

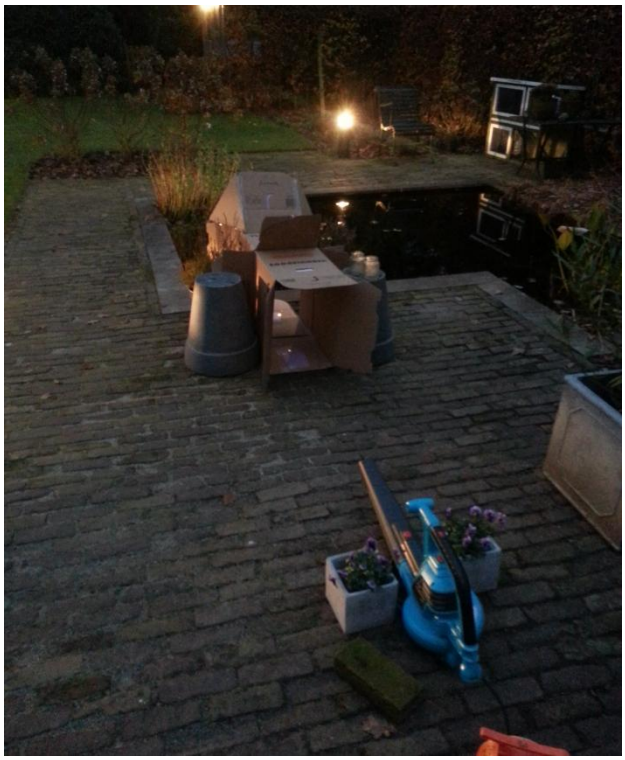
| | Aan de wind | Halve wind | Ruime wind | Voor de wind |
|---|---|---|---|---|
| **F1** | 0 | 0,58 | 1,36 | 1,58 |
| **F2** | 0,08 | 0,15 | 0,82 | 0 |
| **F3** | 0,04 | 0,13 | 0 | 0 |

## Bijlage VII: Foto's van de uitvoering van de experimenten

De boot inclusief Newtonmeters, ligt in het water!

Experimenteren met de windblazer

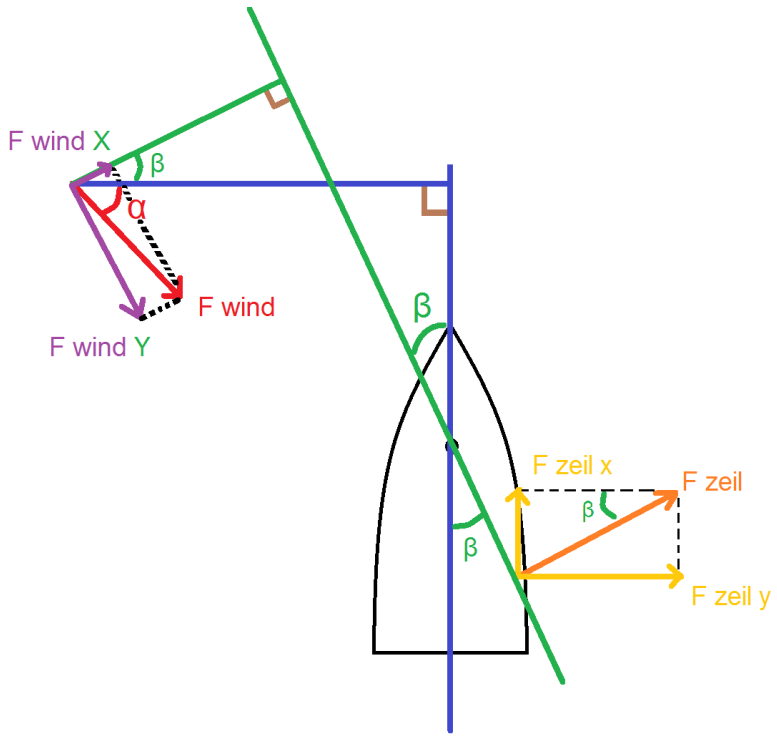
De badkamer was toch wat klein



's Avonds laat was de meetopstelling klaar!

## Bijlage VIII: Model van de voorwaartse kracht

Om tot de hypothese van experiment 1 te komen is een model gemaakt. Het model is als volgt tot stand gekomen:




Afbeelding 20: model voor de bepaling van $F_{zeil,x}$ bij verschillende koersen en zeilstanden

Hoek α is de invalshoek van de wind
Hoek β is de hoek van het zeil ( zeilstand)

Opmerkingen over het model:

- Hoek β is op meerdere plekken terug te vinden in het model, zie afbeelding 20. Dit komt door middel van overstaande hoeken en de hoekensom van een driehoek. Hierdoor is de hoek tussen $F_{wind}$ en $F_{wind,x}$ te defineren als α+β.
- De windkracht is ontbonden in een kracht in de x richting en een in de Y richting (Groen assenstelsel).
- Als de wind in het zeil komt levert het een kracht, loodrecht op het zeil.
- Ontbind deze kracht in een kracht in de X richting en een op de Y richting ( Blauw assenstelsel).
- $F_{wind,y}$ blaast recht langs het zeil en zal dus geen effect hebben op het zeil.
- $F_{wind,x}$ is evenwijdig met $F_{zeil}$ en zijn dus van gelijke grootte dus $F_{wind,x} = F_{zeil}$.
- De voorwaartse kracht van de boot is $F_{zeil,x}$, omdat $F_{zeil,y}$ grotendeels wordt opgeheven door de kiel ( zie literatuuronderzoek).

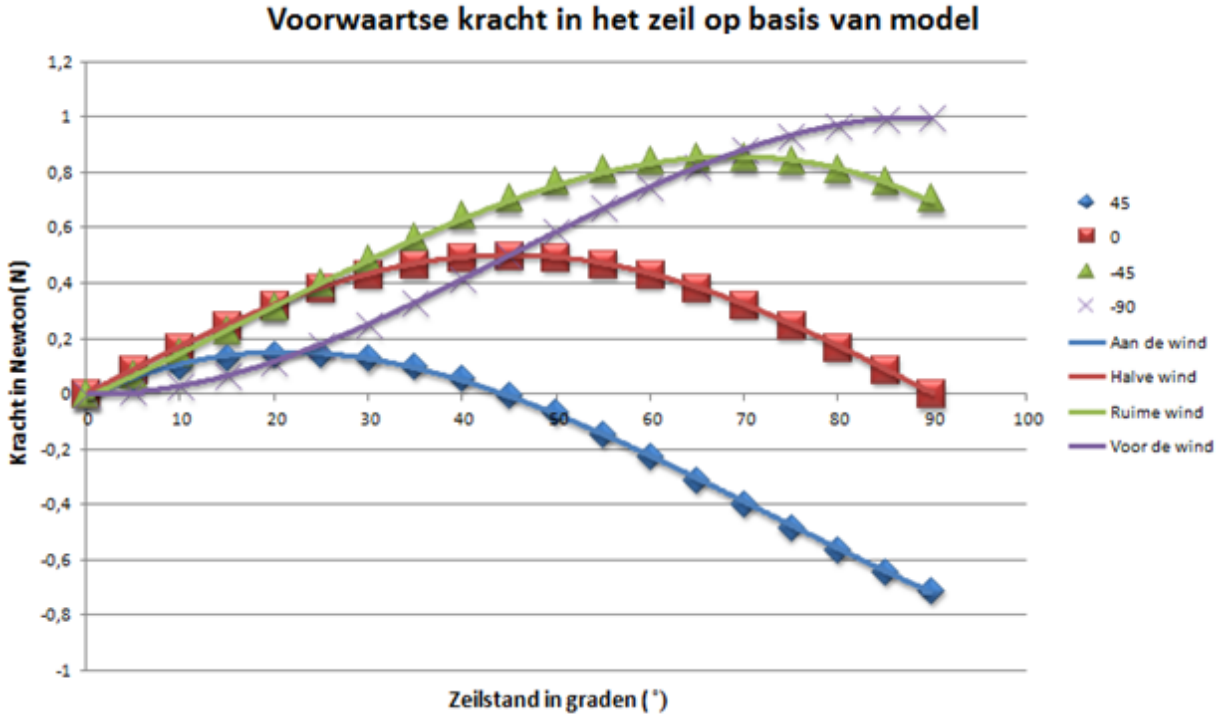
Door middel van goniometrie kan tot de volgende formule worden gekomen:

$$\left.\begin{array}{l} \cos(\alpha+\beta) = F_{wind,x} / F_{wind} \\ F_{wind,x} = \cos(\alpha+\beta) * F_{wind} \\ \\ \sin(\beta) = F_{zeil,x} / F_{zeil} \\ F_{zeil,x} = F_{zeil} * \sin(\beta) \\ \\ F_{wind,x} = F_{zeil} \end{array}\right\} \quad F_{zeil,x} = F_{wind} * \cos(\alpha+\beta) * \sin(\beta)$$

In deze formule is $F_{wind}$ een constante, omdat er van uit wordt gegaan dat er in de proef een constante windsnelheid is. Omdat deze constant is, is er steeds een waarde van 1 N aangehouden in dit model, omdat dit model er alleen voor dient om te laten zien waar de maxima zitten in de grafieken.

Voor hoek α, koers, zijn de volgende hoeken ingevuld:
Aan de wind: 45°
Halve wind: 0°
Ruime wind: -45°
Voor de wind: -90°

Door hoek β te laten variëren tussen 0° en 90° is het volgende figuur ontstaan:




Figuur 12: Voorwaartse kracht in het zeil op basis van model bij verschillende koersen en zeilstanden

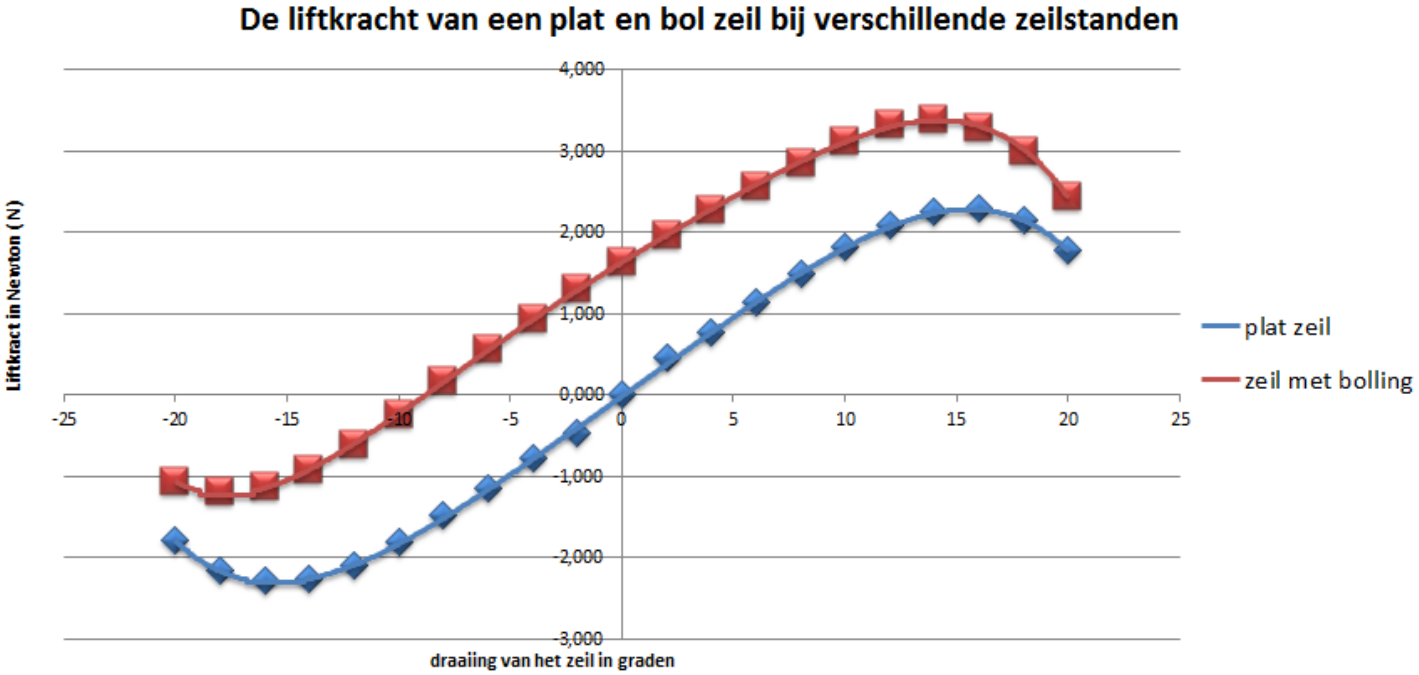
In het model wordt er van uit gegaan dat het zeil uitgeduwd wordt naar de genoemde zeilstand. Daardoor is de negatieve kracht te verklaren in de grafiek voor aan de wind, omdat het zeil aan de lijzijde wind gaat vangen en daardoor een kracht naar de achterkant van de boot al ontstaan.

De zeilstand met de maximale voorwaartse kracht voor alle koersen volgens het model zijn:
Aan de wind: 22.5°
Halve wind: 44,5°
Ruime wind: 67.5°
Voor de wind: 90°

In dit model is uitgegaan van een vlak zeil. Hierdoor zullen de waarden niet helemaal kloppen met de werkelijkheid. In de volgende bijlage, bijlage IX, zal worden gekeken naar het verschil tussen een vlak zeil en een bol zeil.

## Bijlage IX: Verschil tussen plat vlak en bol zeil

Bij het model in bijlage VIII is het zeil beschouwd als een plat vlak. In werkelijkheid is het zeil bol en zal het dus ook meer liftkracht genereren dan het platte vlak. Het varen van hogere koersen is makkelijker, omdat de wind beter in je zeil valt. In het figuur hieronder zie je dat de liftkracht bij een bol zeil groter is dan deze bij een plat vlak. Bij een draaiing van het zeil ten opzichte van de wind van 0° is te zien dat het platte zeil geen liftkracht heeft terwijl een zeil met bolling dit dus wel heeft. De gegevens in deze grafiek zijn berekend met het programma FoilSim III. In de figuren 14 en 15 is het programma te zien en ook hoe de gegevens zijn verkregen. De ingevoerde windsnelheid is 5 m/s en de zeilbolling is 7,76%.

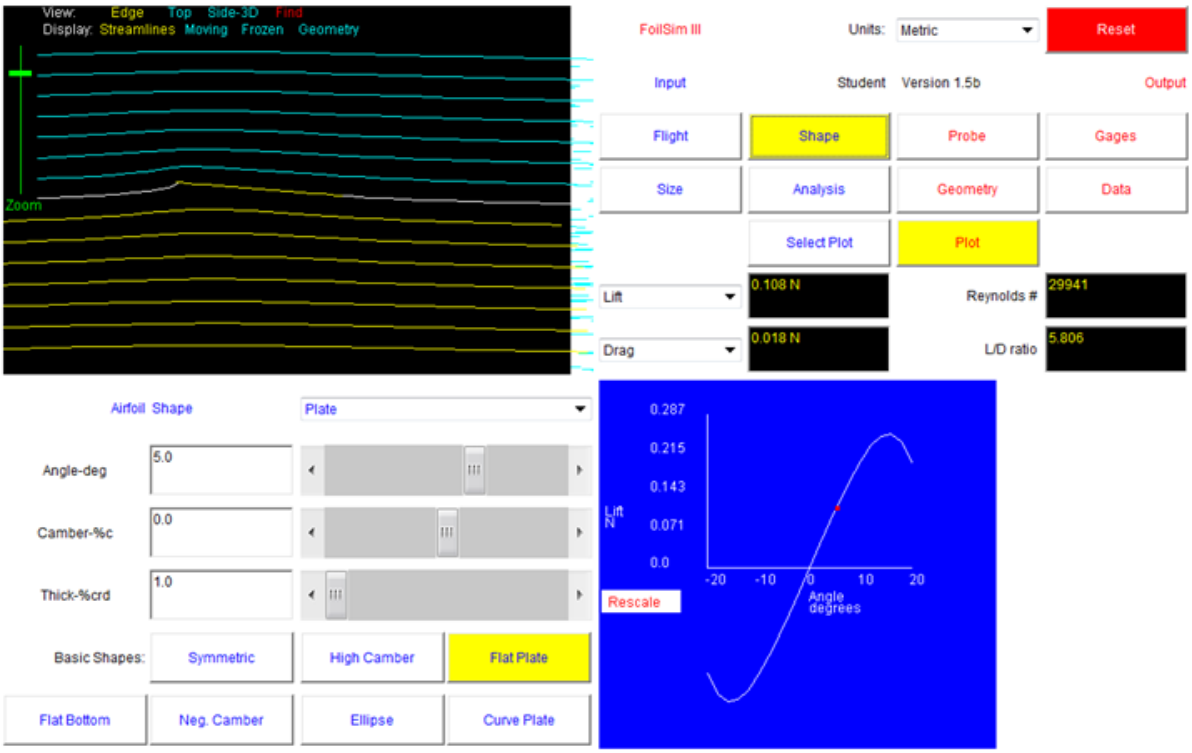



Figuur 13: De liftkracht bij een plat vlak en een bol zeil

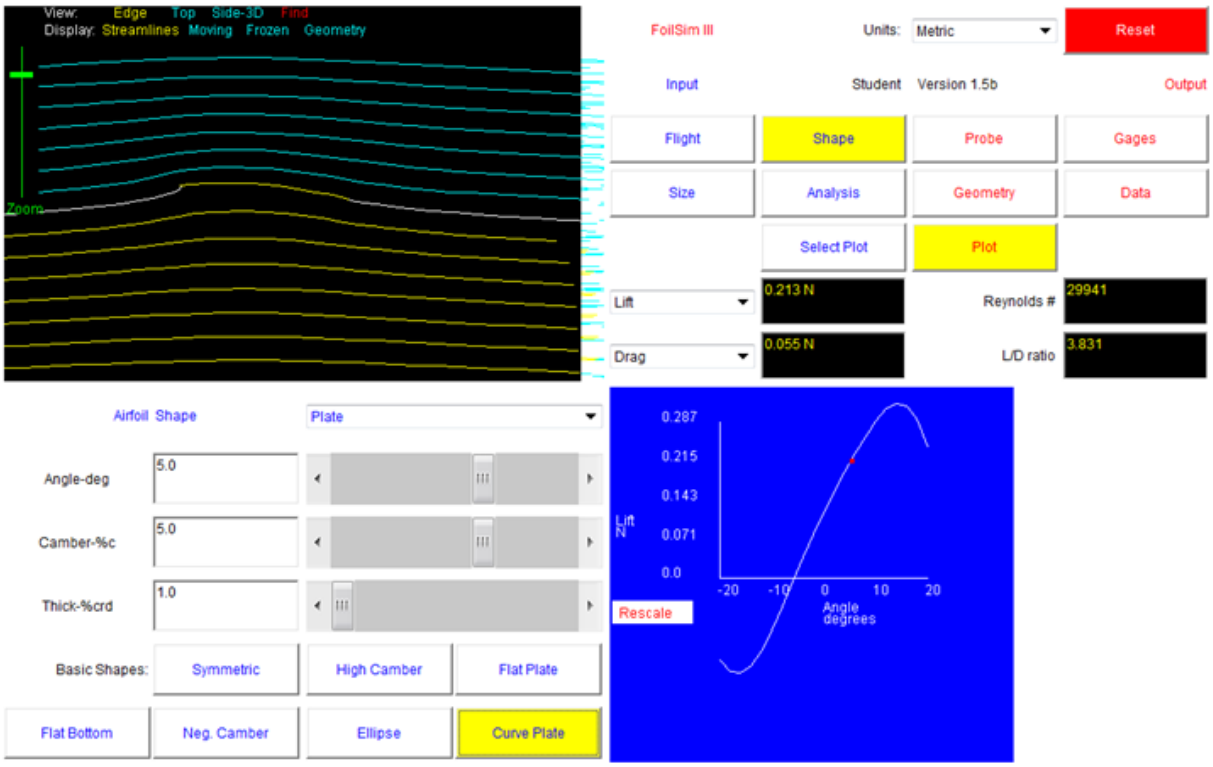
| | -20 | -18 | -16 | -14 | -12 | -10 | -8 | -6 | -4 | -2 | 0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| plat | -1,789 | -2,148 | -2,289 | -2,259 | -2,091 | -1,814 | -1,485 | -1,139 | -0,777 | -0,459 | 0 |
| bol | -1,073 | -1,192 | -1,130 | -0,927 | -0,618 | -0,230 | 0,167 | 0,562 | 0,938 | 1,297 | 1,639 |

| | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| plat | 0 | 0,459 | 0,777 | 1,139 | 1,485 | 1,814 | 2,091 | 2,259 | 2,289 | 2,148 | 1,789 |
| bol | 1,639 | 1,965 | 2,276 | 2,573 | 2,855 | 3,125 | 3,326 | 3,392 | 3,294 | 2,998 | 2,445 |

Tabel 3: Gegevens horend bij figuur 13




Afbeelding 21 : Simulatie in FoilSim III met een plat vlak




Afbeelding 22: Simulatie in FoilSim III met een bol zeil

## Bijlage X: Logboek

Tijdens het werken aan dit profielwerkstuk is een logboek bijgehouden. In totaal is er 155 uur aan dit profielwerkstuk gewerkt. De tijden in dit logboek zijn vaak verdubbeld, omdat de activiteiten door twee personen zijn uitgevoerd.

| Datum: | Activiteit: | Werktijd: ( uur) |
|---|---|---|
| | | |
| 12-9-2014 | Onderwerpkeuze: 'zeilen' | 5 |
| 12-09-2014: | Brainstormen over onderwerp ‘zeilen’ | 6 |
| | Onderzoeksvraag vastgesteld | 2 |
| 22-09-2014: | Onderzoeksmogelijkheden en experimenteermogelijkheden onderzocht | 4 |
| | Contact opgenomen met MicroMagic voor eventuele modelboot | 1 |
| | Deelvragen opgesteld | 2 |
| 29-9-2014 | Ires: Literatuuronderzoek | 4 |
| 8-10-2014 | Allard: Literatuuronderzoek | 4 |
| | 1e afspraak | 2 |
| 11-9-2014 | Onderzoek modelboot | 2 |
| 12-9-2014 | Literatuuronderzoek Ires | 3 |
| | Literatuuronderzoek Allard | 3 |
| 17 tot 30-11-14 | Zoeken naar een modelboot | 10 |
| | Contact opgenomen met W. Siedenburg | 1 |
| 30-11-2014 | Bouwen windtunnel | 8 |
| | Experimenten plannen | 5 |
| 8-12-2014 | Ophalen modelzeilboot | 2 |
| 10-12-2014 | 2e afspraak | 2 |
| 12-12-2014 | Experimenten uitvoeren | 14 |
| 17-1-2015 | Methode beschrijven en andere dingen in het bestand | 12 |
| 20-1-2015 | Uitwerken resultaten en conclusie exp. 2 | 6 |
| 22-1-2015 | Uitwerken resultaten en conclusie exp. 1 | 6 |
| 2-1-2015 | 3e afspraak | 2 |
| 23-1-2015 | Verder uitwerken resultaten en conclusie exp. 1 | 3 |
| 26-1-2015 | Grafieken in Excel verbeteren | 1 |
| 27-1-2015 | Resultaten controleren en ordenen | 2 |
| 30-1-2015 | Opmaak en suggesties voor nader onderzoek | 5 |
| 2-1-2015 | Conclusisies afgemaakt | 8 |
| 2-2-2015 | Slotwoord en samenvatting | 2 |
| 4t/m7-2-2015 | Hypotheses op basis van literatuuronderzoek | 10 |
| 5t/m10-2-2015 | Controle | 14 |
| 10-2-2015 | Laatste controle en inleveren | 2 |
| 13-3-2015 | Reflectie verwerken | 2 |