

Van Oossanen & Associates bv

NAVAL ARCHITECTS - HYDRODYNAMICISTS



**BEREKENING VAN DE INVLOED VAN
AFWIJKENDE WATERVERPLAATSING EN
STABILITEIT OP DE ZEILPRESTATIES VAN DE
REGENBOOG**

In opdracht van:

Werkgroep "Afwijkend materiaalgebruik en
snelheidsbeïnvloedende factoren" Regenboog Club

Uitgevoerd door:

Perry van Oossanen
Van Oossanen & Associates b.v.
Costerweg 1F
6702 AA, Wageningen
www.oossanen.nl

Datum: Februari 2008

Goedgekeurd: Dr. Ir. Piet van Oossanen

Inhoudsopgave

1.	Inleiding.....	3
2.	Validatie Wiskundig Model.....	4
3.	Uitgangspunten voor de VPP Berekeningen.....	5
4.	VPP Resultaten en Wedstrijdsimulatie	8
4.1	Resultaten voor de nominale Regenboog	8
4.2	Invloed van rompgewicht bij gelijkblijvend zwaartepunt.....	10
4.3	Invloed van zwaartepuntsligging bij gelijkblijvend rompgewicht.....	11
4.4	Invloed van het gewicht van de bemanning.....	12
4.5	Invloed van rompgewicht bij het actuele zwaartepunt.....	13
4.6	Invloed van rompgewicht inclusief effecten van het actuele zwaartepunt en bemanningsgewicht	14
5.	Conclusies.....	15
	Appendix A. Lijnenplan van de Regenboog.....	16

1. Inleiding

In opdracht van de werkgroep “Afwijkend materiaal gebruik en snelheidsbeïnvloedende factoren” van de Regenboog Club heeft Van Oossanen & Associates b.v. (VOA) een onderzoek uitgevoerd naar de invloed van een aantal factoren op de zeilprestaties van de Regenbogen. Deze factoren zijn:

- De invloed van een afwijkend materiaalgebruik in de rompconstructie, wat verschillen in waterverplaatsing en zwaartepuntsligging oplevert.
- De invloed van verschillende gewichten van de bemanningsleden.

Om de zeilprestaties van zeiljachten te berekenen heeft Van Oossanen & Associates b.v. een eigen zogenaamd VPP ontwikkeld. Een VPP (Velocity Prediction Program) is een wiskundig model in de vorm van een computer programma dat de snelheid van een zeiljacht voor verschillende windhoeken en windsnelheden kan berekenen. Dit wordt gedaan door het zoeken naar evenwicht tussen alle hydrodynamische en aerodynamische krachten die op een zeiljacht werken, zoals worden voorspeld door onderliggende wiskundige modellen. Deze wiskundige modellen zijn erg complex van aard en voor een hoge nauwkeurigheid is het vaak nodig voor verschillende typen jachten, verschillende modellen beschikbaar te hebben. Het VPP, als ontwikkeld door VOA, is al bijna 30 jaar onder constante ontwikkeling en bestrijkt momenteel een zeer grote variatie aan jachttypes.

Het totale project is uit de volgende stappen opgebouwd:

1. Het analyseren van de waterverplaatsing en gewichten van een flink aantal Regenbogen d.m.v. wegingen, ten einde inzicht te krijgen in de variatie aan waterverplaatsingen en zwaartepuntsliggingen. (Uitgevoerd door andere leden van de Werkgroep). (Zie Hoofdstuk 3 voor een overzicht hiervan.)
2. Modelleren van de rompvorm in 3-D, om te gebruiken in CFD (Computational Fluid Dynamics) berekeningen en om hydrostatische gegevens van de romp te kunnen berekenen;
3. Uitvoeren van een CFD berekening voor een Regenboog op diep en op ondiep water, als controle op de wiskundige krachtenmodellen in het VPP en om de invloed van ondiep water op de weerstand van het jacht goed te kunnen voorspellen. (Deze berekeningen worden beschreven in VOA-Rapport nummer 07-106-01.)
4. Het “fine-tunen” van de wiskundige modellen van het VPP. (Zie Hoofdstuk 4.)
5. Uitvoeren van VPP berekeningen voor een aantal waterverplaatsingen en zwaartepuntsliggingen. (Zie Hoofdstuk 4.)
6. Het analyseren van de gegevens aan de hand van het simuleren van een zeilwedstrijd op een Windward-leeward baan, waarbij 0.5 mijl aan de wind en 0.5 mijl voor de wind wordt gevaren. (Zie Hoofdstuk 4.) Bij de wedstrijdsimulatie is de nominale, gemiddelde, Regenboog als “trialhorse” genomen en zijn de gezeilde tijden relatief ten opzichte van deze trialhorse berekend, de zogenaamde delta's in seconden/mijl. Hierbij is op te merken dat een negatieve delta duidt op een kortere gezeilde tijd en een positieve delta op een langere gezeilde tijd.

2. Validatie Wiskundig Model

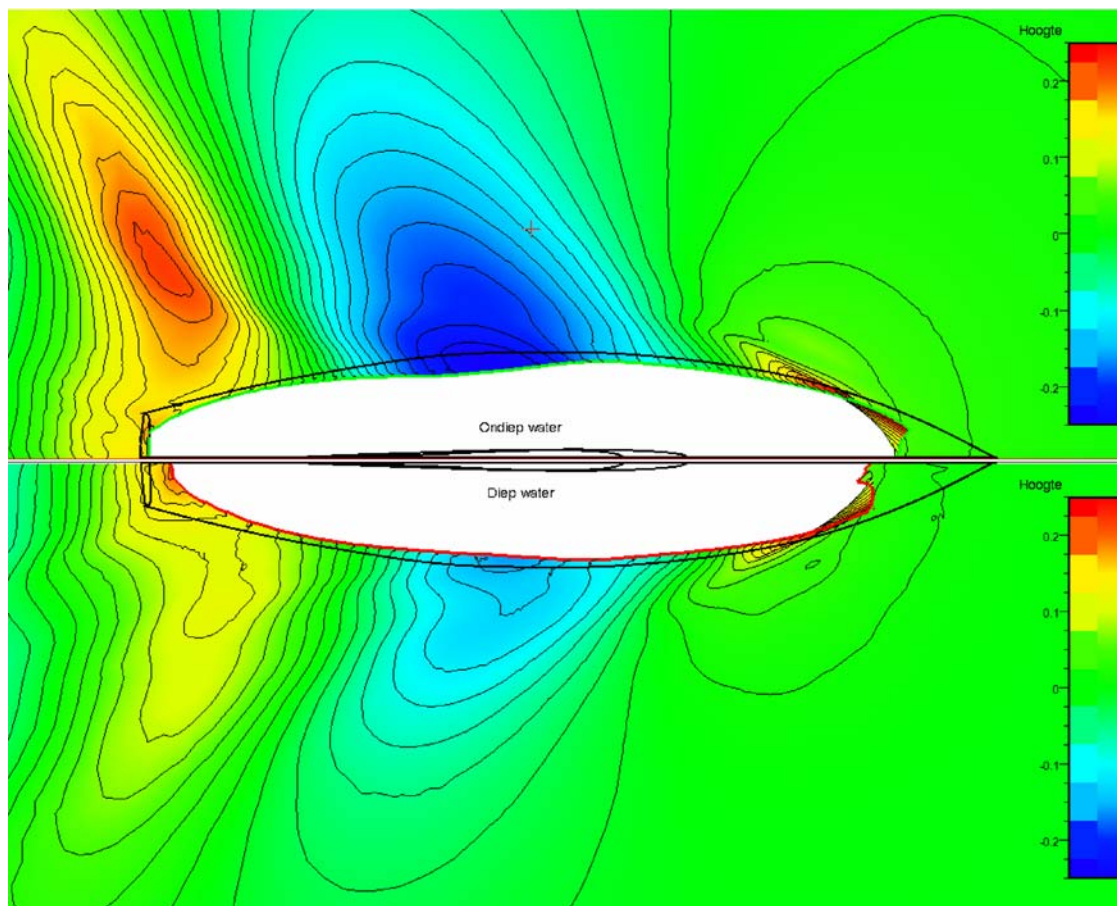
Ten behoeve van het controleren van de wiskundige modellen in het VPP zijn er CFD berekeningen uitgevoerd. Deze zijn eerder beschreven in VOA-Rapport 07-106-01. In figuur 1 is het berekende golfpatroon te zien voor de beide geanalyseerde gevallen: De Regenboog op diep water (onder) en op water met een waterdiepte van 1.5 meter (boven).

De belangrijkste eigenschappen waarin Regenbogen verschillen van meer moderne zeiljachten, zoals gebleken uit deze berekeningen, zijn als volgt samen te vatten:

- Een grote verlenging van de waterlijn onder snelheid. Door het grote golfdal midscheeps, dat wordt veroorzaakt door de diepe buik van het schip, zinkt het schip ver in, waardoor de volumineuze overhangen, in het bijzonder die van het achterschip, te water komen en zorgen voor een grote dynamische verlenging van de waterlijn.
- Door de geringe waterdiepte waarop Regenbogen vaak varen, wordt bovengenoemd effect nog versterkt.

In het verleden heeft VOA een methode ontwikkeld, de zogenaamde VOA/Classic methode in het VPP, die deze eigenschappen in kaart brengt en onder andere uitgebreid is beproefd voor J-Klasse jachten. Het bleek dat voor de Regenboog deze methode goed functioneert en enkel "getuned" behoefde te worden.

Om de extra weerstand ten gevolge van de geringe waterdiepte te berekenen (+53% volgens de CFD berekeningen, voor een snelheid van 2.932 m/sec) is gebruik gemaakt van een methode die gepubliceerd is door Landweber en Schlichting, zie: "*Principles of Naval Architecture, Volume II: Resistance, Propulsion and Vibration*", door J.D. van Manen, P. van Oossanen and William S. Vorus, Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1988. Deze methode bleek zeer goed overeen te komen met de berekende waardes.



figuur 1 Vergelijking van het golfpatroon voor een Regenboog op diep (onder) en op ondiep water (boven) (Uit: VOA-Rapport 07-106-01).

3. Uitgangspunten voor de VPP Berekeningen

Voor de VPP berekeningen is het belangrijk om de hydrostatica van de romp, zowel rechtop als onder helling, goed te kunnen analyseren. In een eerdere fase van het project was al een 3D-model van de Regenboog gemaakt. Dit model is ook gebruikt voor de berekening van de hydrostatica. In Appendix A is het lijnenplan, afgeleid van dit 3D model weergegeven.

Door de Werkgroep is de massa van een groot aantal rompen uit de Klasse bepaald. De resultaten hiervan zijn weergegeven in figuur 2. Er blijkt een sterke correlatie te bestaan tussen de massa van de romp en de ligging van het zwaartepunt. Tevens is de massa van de mast en tuigage bepaald. De gegevens hiervan staan in tabel 1. De positie van de bemanning zoals aangenomen ten behoeve van de VPP berekeningen is weergegeven in figuur 3, waarbij als “standaard” bemanning 3 personen van 90 kg is aangenomen.

tabel 1 Massa van mast en tuigage voor de Regenboog, zoals bepaald door de Werkgroep.

Item name	Total mass kg	Long.Arm m	Trans.Arm m	Vert.Arm m
Mast, inclusief vast beslag	55.2	-2.755	0.000	5.474
Giek, inclusief vast beslag	15.1	-5.621	0.000	2.334
Gaffel, inclusief vast beslag	10.8	-3.520	0.000	9.002
Grootzeil	11.0	-5.010	0.000	5.561
Genua	5.1	-2.069	0.000	4.073
Spinnaker	1.8	-0.829	0.000	5.927

Aangenomen is dat een “gemiddelde”, nominale Regenboog een massaverdeling heeft als is weergegeven in tabel 2. Deze gegevens zijn voor alle berekeningen gebruikt als referentie.

tabel 2 Aangenomen massa en zwaartepuntsligging voor de nominale Regenboog.

Item name	Total mass kg	Long.Arm m	Trans.Arm m	Vert.Arm m
Romp (en ballastblok)	1501.0	-4.073	0.000	0.680
Stuurman	90.0	-5.355	0.480	1.426
Middenman	90.0	-3.949	1.200	1.436
Voordekker	90.0	-3.461	1.200	1.436
Mast, inclusief vast beslag	55.2	-2.755	0.000	5.474
Giek, inclusief vast beslag	15.1	-5.621	0.000	2.334
Gaffel, inclusief vast beslag	10.8	-3.520	0.000	9.002
Grootzeil	11.0	-5.010	0.000	5.561
Genua	5.1	-2.069	0.000	4.073
Spinnaker	1.8	-0.829	0.000	5.927
Total Loadcase	1870.0	-4.067	0.115	1.035

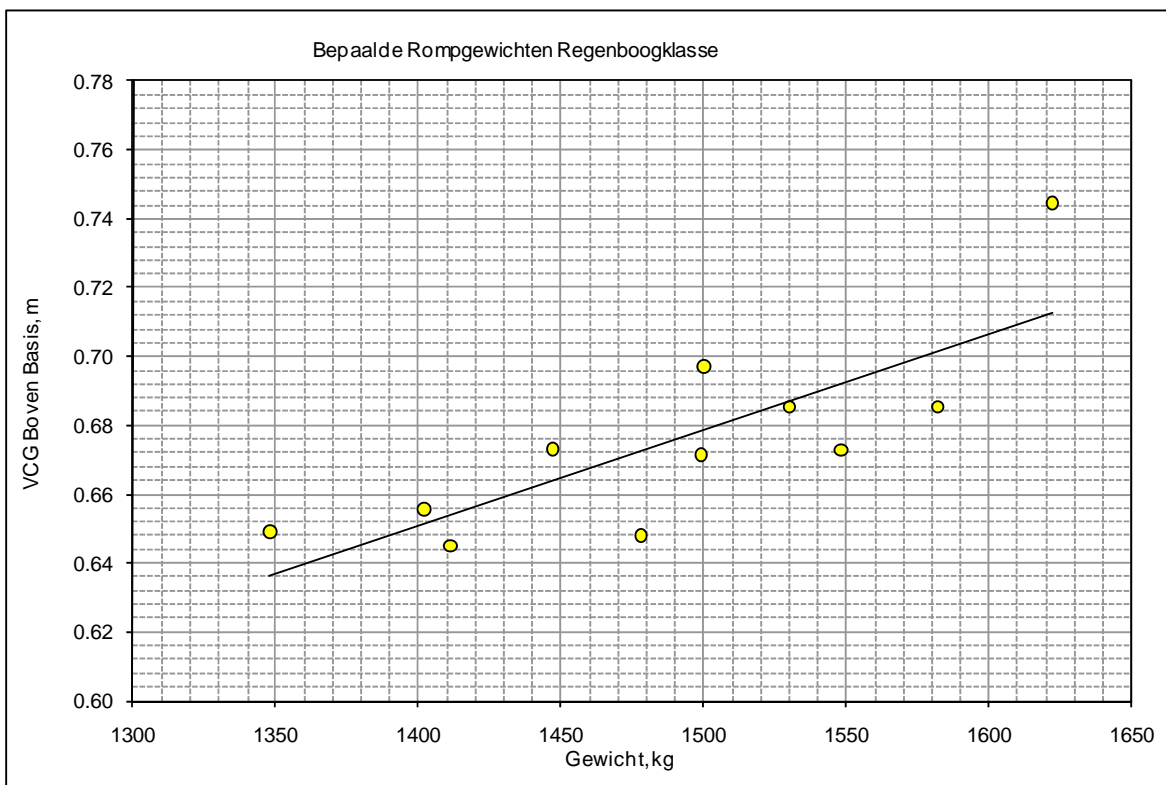
Er is, in overleg met de Werkgroep, besloten om de volgende gevallen te analyseren:

1. Invloed van het rompgewicht bij gelijkblijvende positie van het gewichtszwaartepunt. De te analyseren rompgewichten zijn hierbij: 1400, 1500 en 1600 kg, allen met een gewichtszwaartepunt van 0.68 meter boven de basislijn (onderkant kiel).
2. Invloed van de positie van het gewichtszwaartepunt bij gelijkblijvend rompgewicht. De te analyseren zwaartepuntsliggingen zijn 0.64, 0.68 en 0.72 meter boven de basislijn, bij een rompgewicht van 1500 kg.
3. Invloed van de massa van de bemanning. De te analyseren bemanningsmassa's zijn 3x 70 kg, 3x 90 kg en 3x 110 kg. Dit als variatie op de nominale Regenboog.
4. Invloed van het rompgewicht bij het actuele zwaartepunt om de effecten van punt 1 en 2 te combineren: 1400 kg rompgewicht op 0.64 meter boven de basislijn, 1500 kg op 0.68 meter en 1600 kg op 0.72 meter.

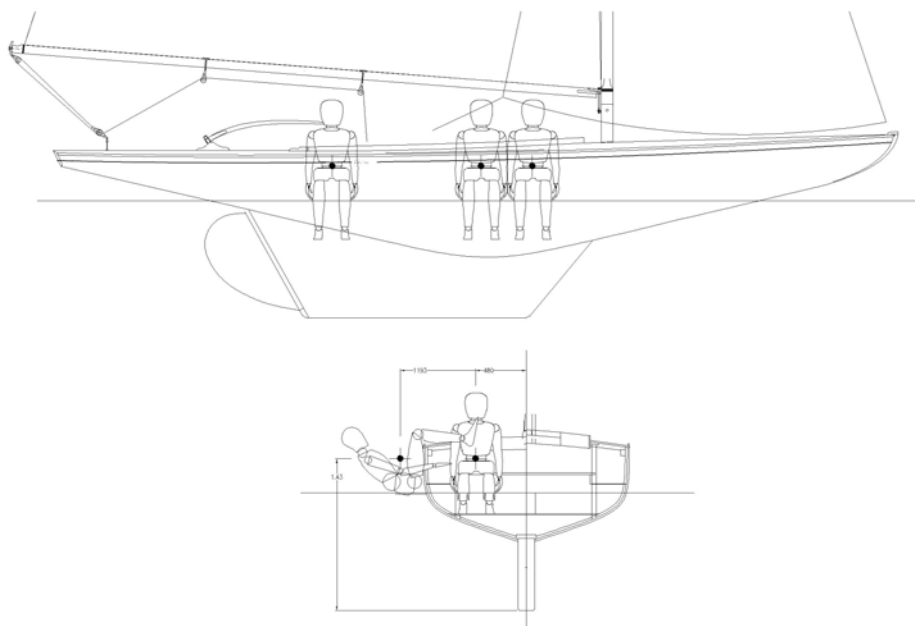
- Involed van het rompgewicht bij het actuele zwaartepunt, inclusief effecten van bemanningsgewicht, om de effecten van punt 1, 2 en 3 te combineren en de extremen uit de berekeningsmatrix te onderzoeken: 1400 kg rompgewicht met 3x 70 kg, 1500 kg met 3x 90 kg en 1600 kg met 3x 110 kg bemanning.

In figuur 4 zijn deze gevallen grafisch weergegeven.

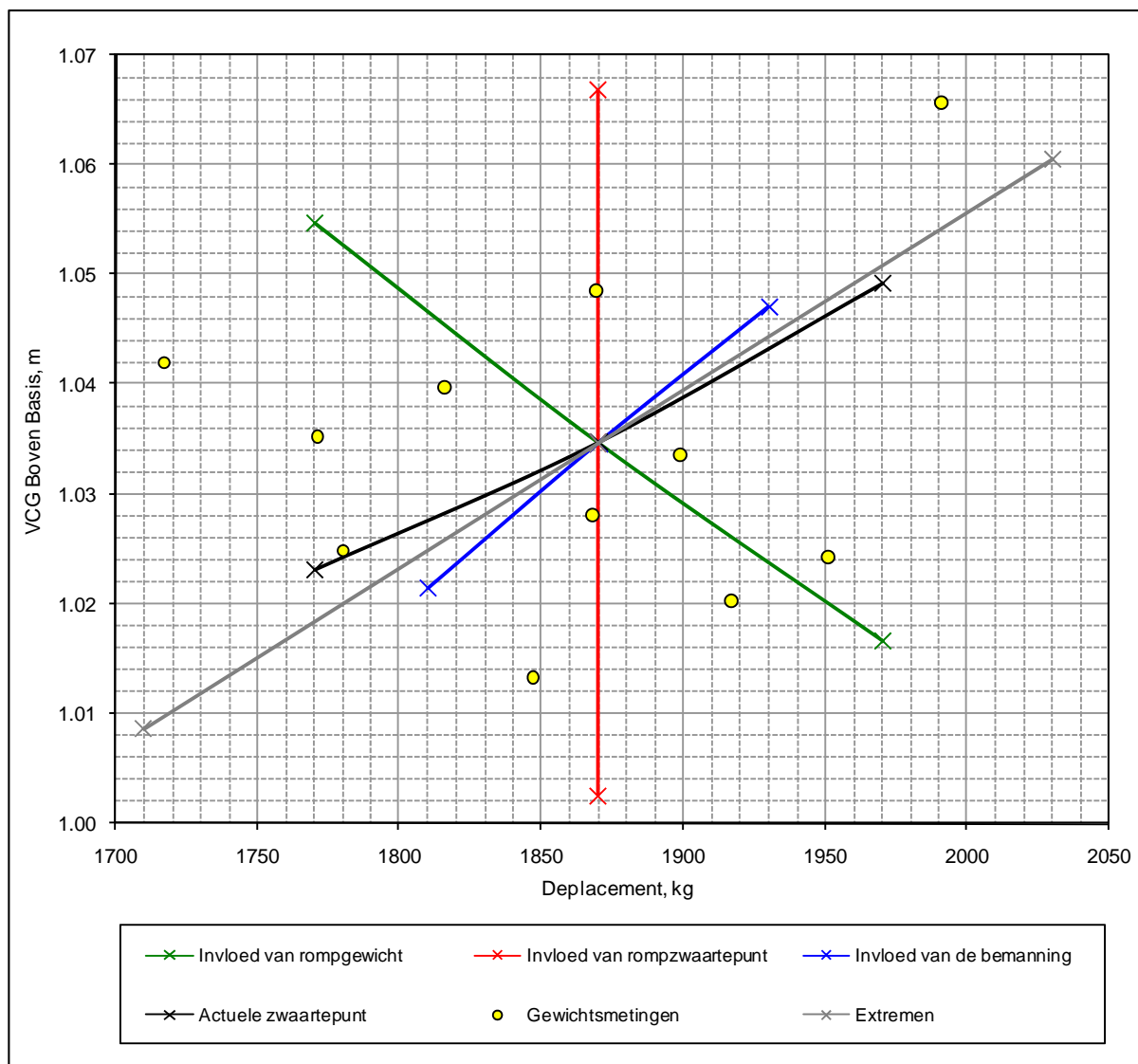
Tenslotte is nog op te merken dat ervan is uitgegaan dat bij elke variatie de romp exact gelijklastig ligt.



figuur 2 Metingen van het rompgewicht en bijbehorende zwaartepunten.



figuur 3 Aangenomen positie van de bemanning bij maximaal buitenboord hangen.



figuur 4 Berekeningsmatrix van gewichten en zwaartepunten voor de VPP Berekeningen. De door de Werkgroep gemeten Regenbogen zijn aangegeven als de zwarte cirkels met gele achtergrond; het aangegeven nummer is het zeilnummer. Hierbij is gerekend met het gemiddelde bemanningsgewicht en de tuigage zoals bepaald door de Werkgroep.

4. VPP Resultaten en Wedstrijdsimulatie

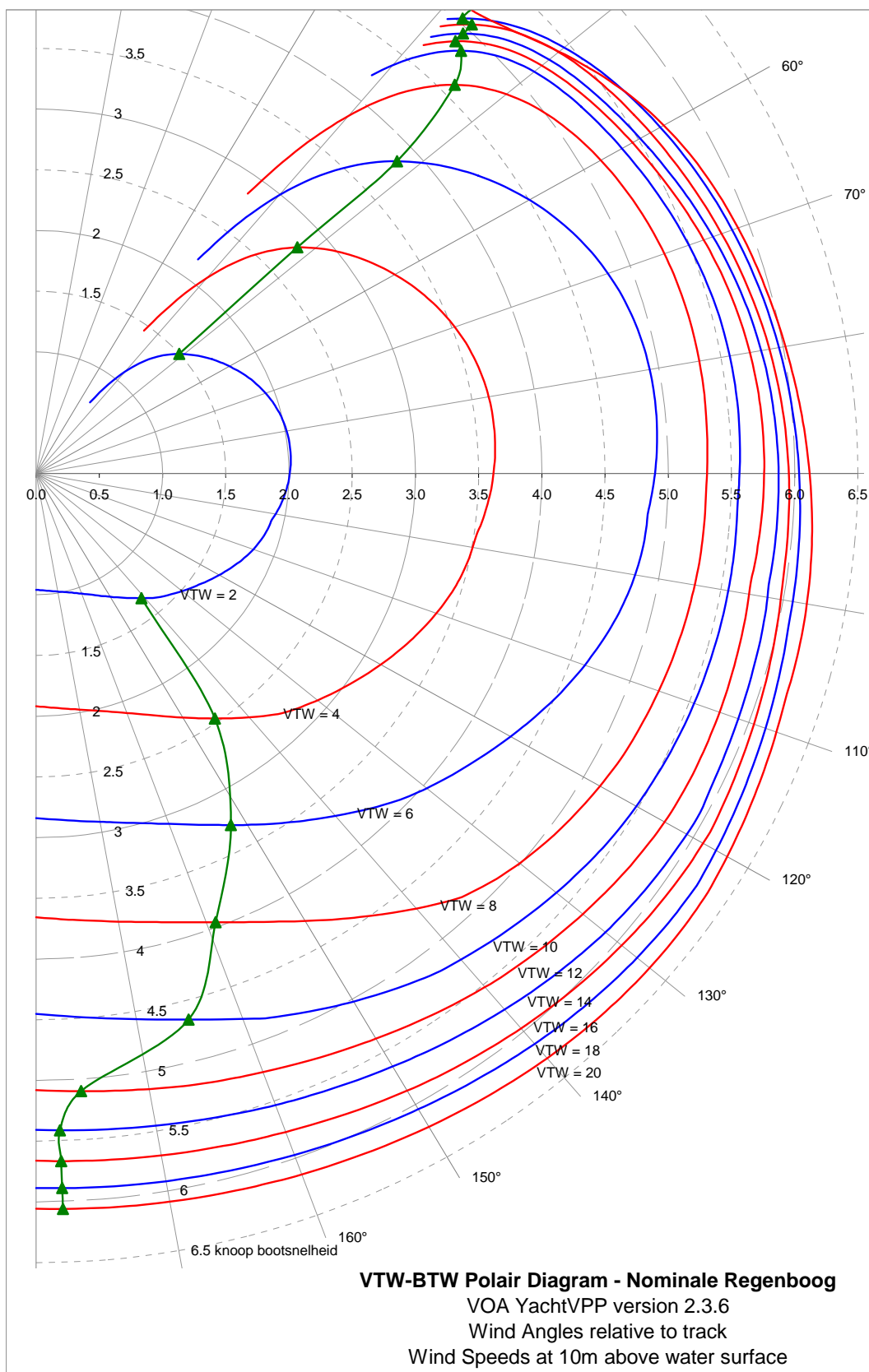
4.1 Resultaten voor de nominale Regenboog

Voor de nominale Regenboog is een uitgebreide studie verricht naar de beste uitgangspunten voor de berekeningen, inclusief een analyse van de stuurbalans van het jacht. Er is gekozen om te rekenen met de volgende uitgangspunten:

- Maximum hellingshoek = 30 graden;
- Flat = 0.9 voor alle windsnelheden (10% minder bolling in Regenbogen zeilen, t.o.v. VPP standaard);
- Delta (roerhoek) = 2.5 graden aan de wind en 0 graden vóór de wind;
- Maximum twist = 0.8 (twist in de zeilen bij veel wind).

Als simuleringsscenario is er voor gekozen om de bemanning zo lang mogelijk te laten proberen de boot rechtop te houden door te gaan hangen. Als dat niet meer lukt, kan er worden doorgehield naar 30 graden, waarbij de zeilen getwist kunnen worden tot een twist factor van 0.8.

Voorts is er een berekening gemaakt voor zowel de combinatie grootzeil met genua als grootzeil met spinnaker en zijn de resulterende polaires over elkaar heen gelegd om tot de beste bootsnelheid te komen. In figuur 5 is het polaire diagram voor de nominale Regenboog te zien. Hier valt nog op te merken dat de windhoeken op basis waarvan de polaire geplot is, de hoek is tot de koers van het schip (deze is dus inclusief de drifhoek) en de windsnelheden bepaald zijn op 10 meter hoogte, zoals ze voorspeld worden door het KNMI.



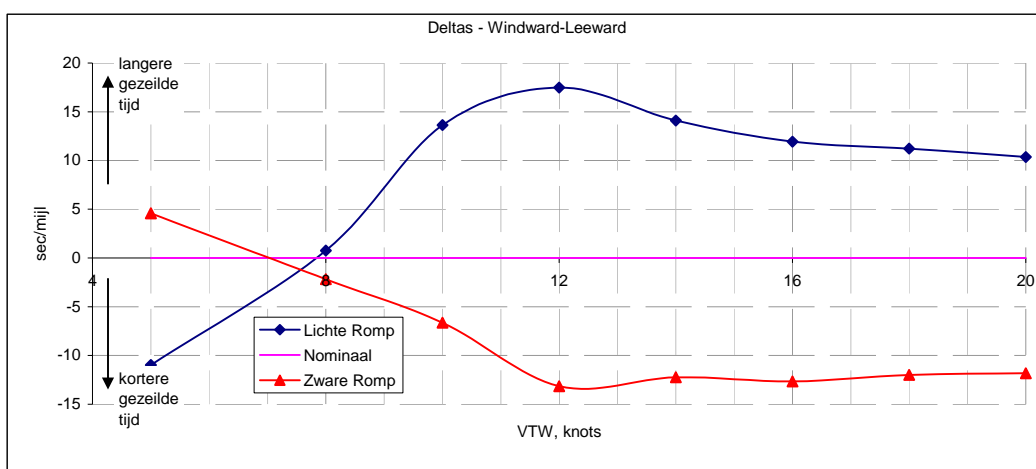
figuur 5 Polair diagram voor de nominale Regenboog.

4.2 Invloed van rompgewicht bij gelijkblijvend zwaartepunt

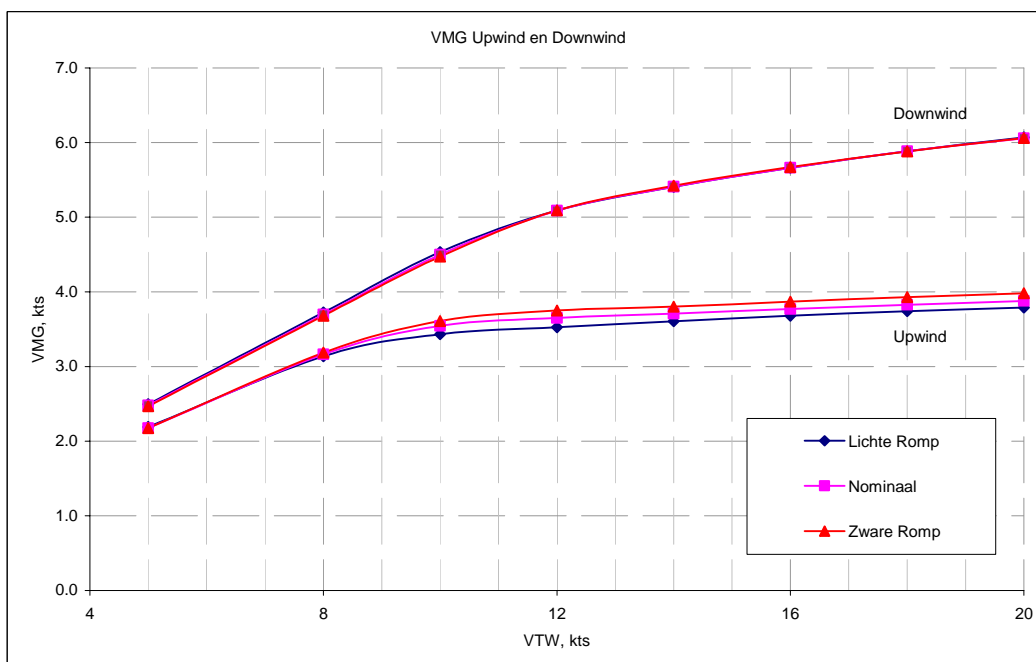
Voor de 3 gevallen om de invloed van het rompgewicht bij gelijkblijvende zwaartepuntsligging te beoordelen zijn de gewichtsgegevens weergegeven in tabel 3. De VPP resultaten en wedstrijd simulatie hebben geleid tot de delta's (seconden per gezeilde mijl verschil) als is te zien in figuur 6. Hieruit blijkt dat de lichte romp alleen bij heel licht weer (windsnelheden lager dan 8 knoop) sneller is dan de zware romp. Bij de zwaardere romp gaat het grotere oprichtende moment in haar voordeel werken. Uit figuur 7 blijkt dat het verschil gemaakt wordt op het aandewindse rak.

tabel 3 Gewicht en zwaartepuntsgegevens voor bepaling van invloed van rompgewicht bij gelijkblijvend zwaartepunt.

Lichte Romp (M - L)	Nominaal (M - M)	Zware Romp (M - Z)
romp: 1401 kg @ 0.680 m	romp: 1501 kg @ 0.680 m	romp: 1601 kg @ 0.680 m
tuig: 99 kg @ 5.326 m	tuig: 99 kg @ 5.326 m	tuig: 99 kg @ 5.326 m
crew: 270 kg @ 1.433 m	crew: 270 kg @ 1.433 m	crew: 270 kg @ 1.433 m
total: 1770 kg @ 1.055 m	total: 1870 kg @ 1.035 m	total: 1970 kg @ 1.017 m



figuur 6 Delta's voor de 3 variaties op een Windward-Leeward baan.

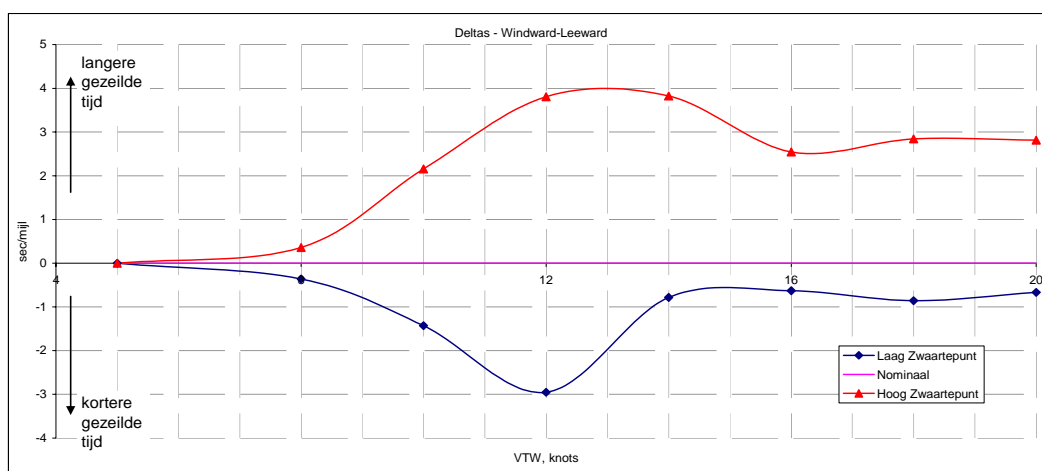


figuur 7 Beste VMG's voor de 3 variaties, op aandewindse en voordewindse koers.

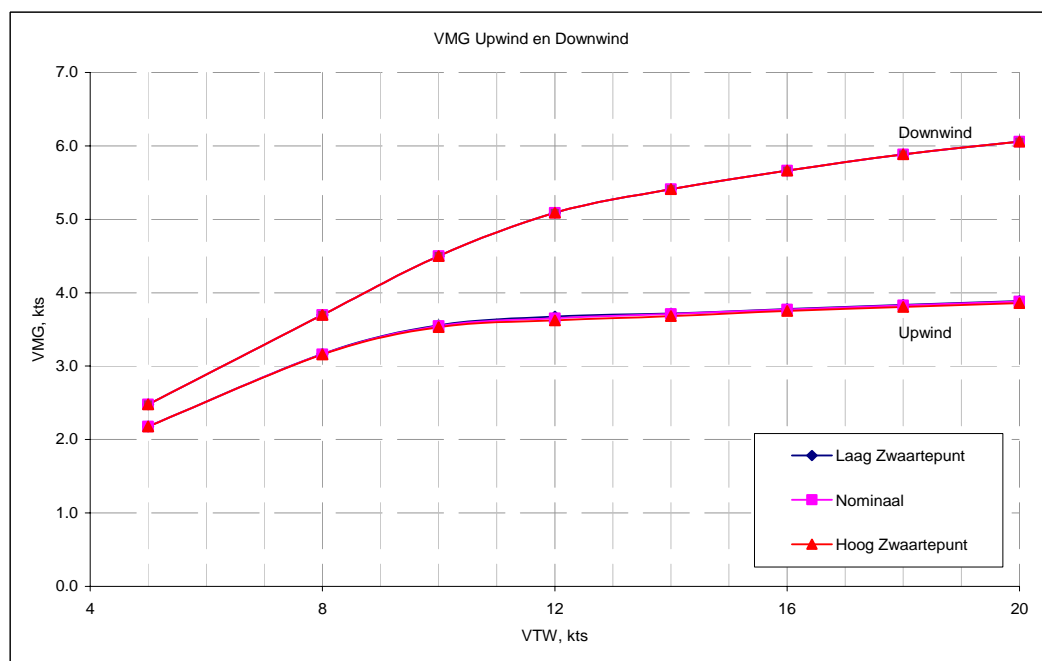
4.3 Invloed van zwaartepuntsligging bij gelijkblijvend rompgewicht

Voor de 3 gevallen om de invloed van het rompgewicht bij gelijkblijvende zwaartepuntsligging te beoordelen zijn de gewichtsgegevens weergegeven in tabel 4. De VPP resultaten hebben geleid tot de delta's als is te zien in figuur 8. Hieruit blijkt dat er slechts kleine verschillen optreden. Wel is de boot met hoog zwaartepunt in het nadeel. Uit figuur 9 blijkt dat het verschil wederom gemaakt wordt op het aandewindse rak.

tabel 4 Gewicht en zwaartepuntsgegevens voor bepaling van invloed van zwaartepuntsligging bij gelijkblijvend rompgewicht.



figuur 8 Delta's voor de 3 variaties op een Windward-Leeward baan.



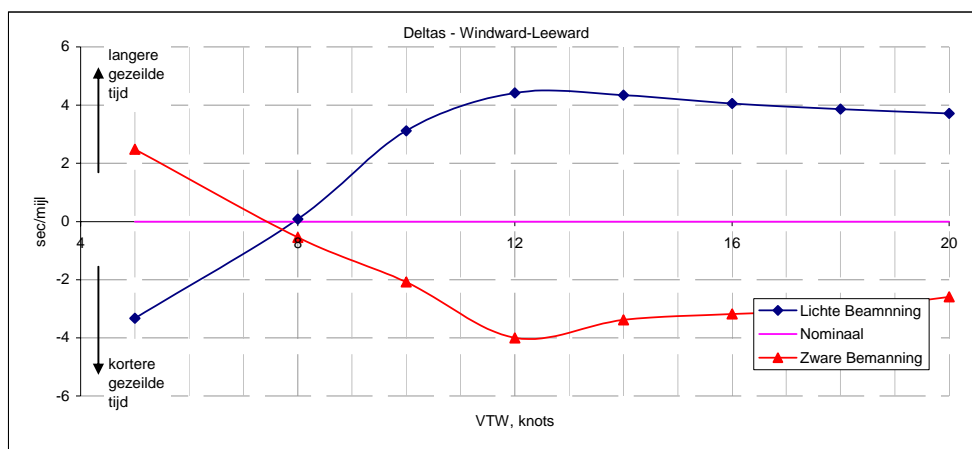
figuur 9 Beste VMG's voor de 3 variaties, op aandewindse en voordewindse koers.

4.4 Invloed van het gewicht van de bemanning

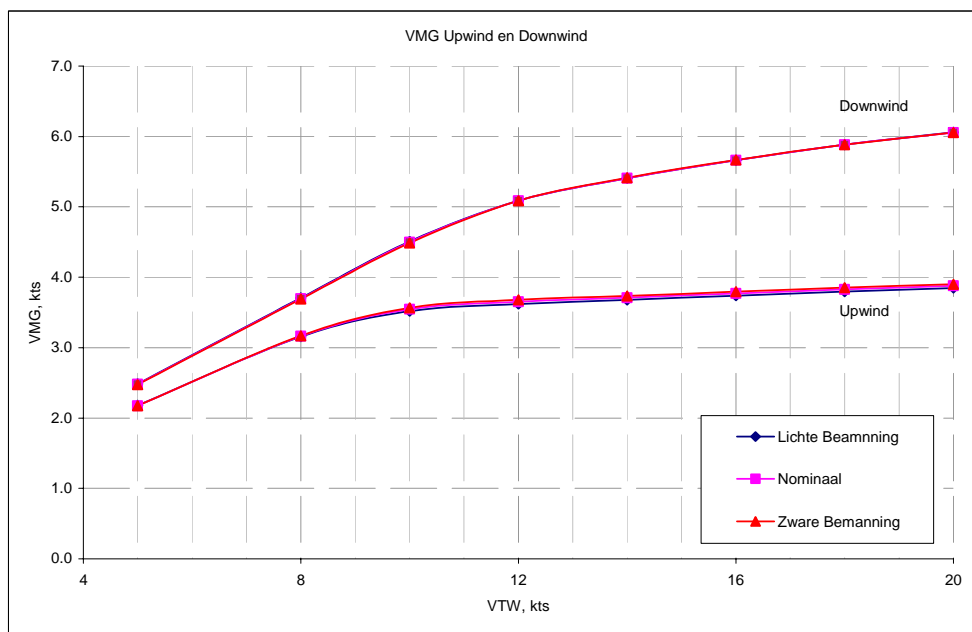
Voor de 3 gevallen om de invloed van het bemanninggewicht te beoordelen zijn de gewichtsgegevens weergegeven in tabel 5. De VPP resultaten en wedstrijdssimulatie hebben geleid tot de delta's als is te zien in figuur 10. Hieruit blijkt dat bij licht weer (windsnelheden lager dan 8 knoop) de boot met de lichtste bemanning in het voordeel is. Bij zwaarder weer, als stabiliteit een grotere rol gaat spelen, is de boot met zwaarste bemanning in het voordeel. Uit figuur 11 blijkt dat het grootste deel van het verschil gemaakt wordt aan de wind.

tabel 5 Gewicht en zwaartepuntsgegevens voor bepaling van invloed van het gewicht van de bemanning.

Lichte Romp	Nominaal	Zware Romp
romp: 1401 kg @ 0.680 m	romp: 1501 kg @ 0.680 m	romp: 1601 kg @ 0.680 m
tuig: 99 kg @ 5.326 m	tuig: 99 kg @ 5.326 m	tuig: 99 kg @ 5.326 m
crew: 270 kg @ 1.433 m	crew: 270 kg @ 1.433 m	crew: 330 kg @ 1.433 m
total: 1770 kg @ 1.055 m	total: 1870 kg @ 1.035 m	total: 2030 kg @ 1.029 m



figuur 10 Delta's voor de 3 variaties op een Windward-Leeward baan.



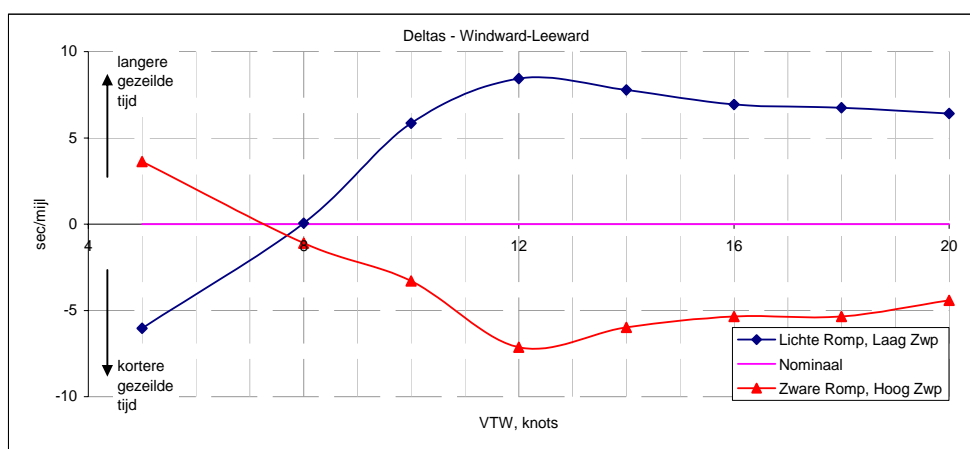
figuur 11 Beste VMG's voor de 3 variaties, op aandewindse en voordewindse koers.

4.5 Invloed van rompgewicht bij het actuele zwaartepunt

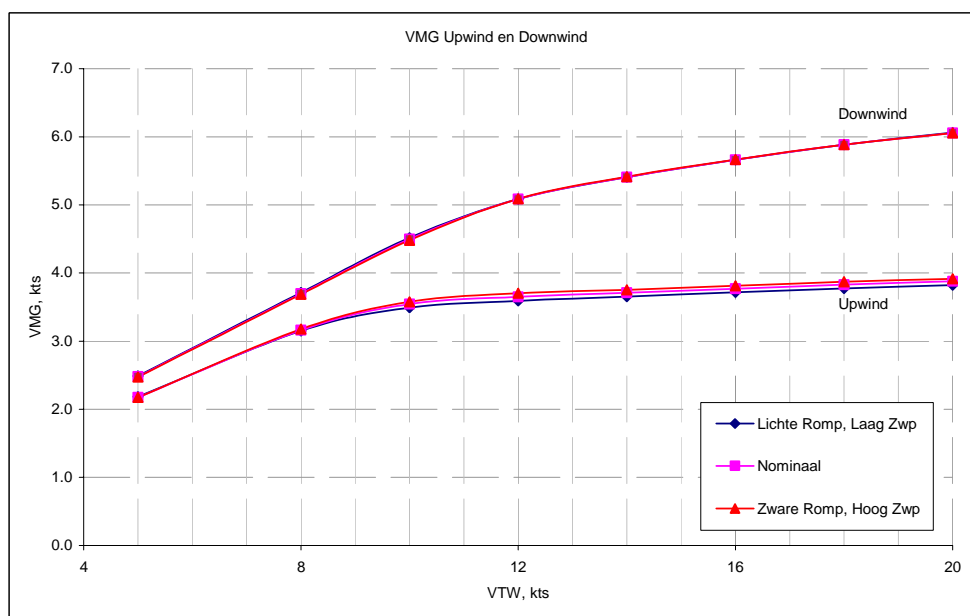
Voor de 3 gevallen om de invloed van het rompgewicht, in combinatie met actuele zwaartepunt, te beoordelen zijn de gewichtsgegevens weergegeven in tabel 6. De VPP resultaten en wedstrijd simulatie hebben geleid tot de delta's als is te zien in figuur 12. Hieruit blijkt dat bij licht weer (windsnelheden lager dan 8 knoop) de zwaarste boot in het nadeel is. Bij zwaarder weer, als stabiliteit een grotere rol gaat spelen is de zwaarste boot juist in het voordeel. Uit figuur 13 blijkt dat het grootste deel van het verschil gemaakt wordt aan de wind.

tabel 6 Gewicht en zwaartepuntsgegevens voor bepaling van invloed van rompgewicht bij het actuele zwaartepunt.

Laag zwaartepunt	Nominaal	Hoog Zwaartepunt
romp: 1501 kg @ 0.640 m	romp: 1501 kg @ 0.680 m	romp: 1501 kg @ 0.720 m
tuig: 99 kg @ 5.326 m	tuig: 99 kg @ 5.326 m	tuig: 99 kg @ 5.326 m
crew: 270 kg @ 1.433 m	crew: 270 kg @ 1.433 m	crew: 270 kg @ 1.433 m



figuur 12 Delta's voor de 3 variaties op een Windward-Leeward baan.



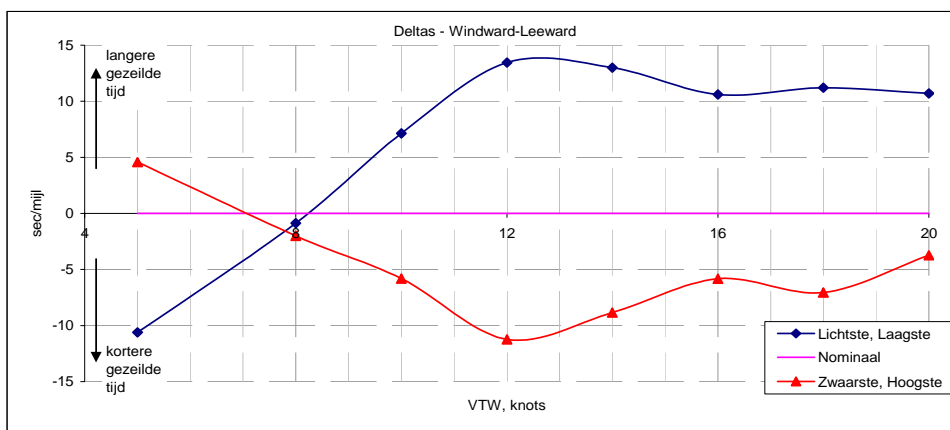
figuur 13 Beste VMG's voor de 3 variaties, op aandewindse en voordewindse koers.

4.6 Invloed van rompgewicht inclusief effecten van het actuele zwaartepunt en bemanningsgewicht

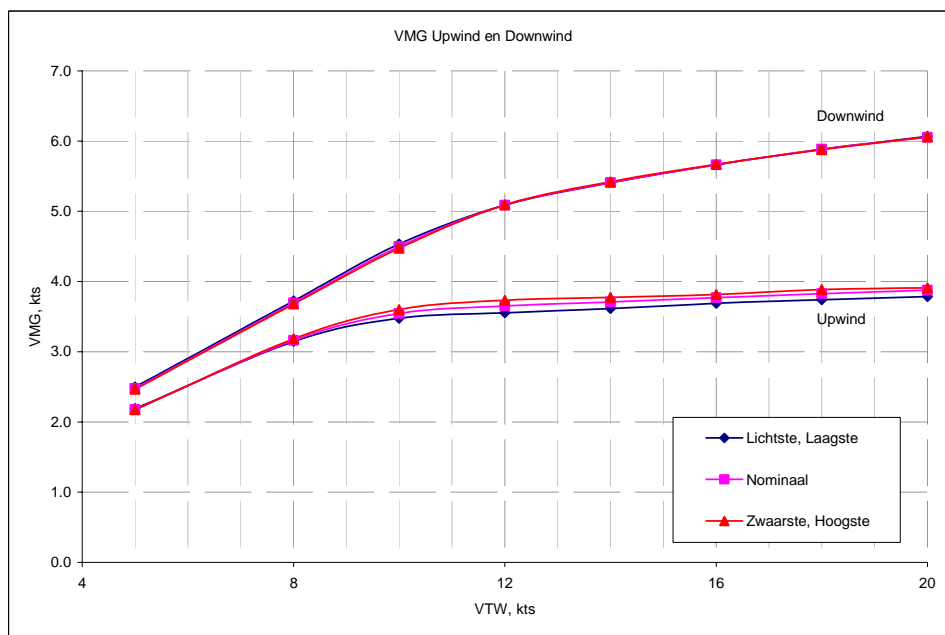
Voor de 3 gevallen om de invloed van het rompgewicht, in combinatie met actuele zwaartepunt en het bemanningsgewicht, te beoordelen zijn de gewichtsgegevens weergegeven in tabel 7. De VPP resultaten en wedstrijdssimulatie hebben geleid tot de delta's als is te zien in figuur 14. Hieruit blijkt dat bij licht weer (windsnelheden lager dan 8 knoop) de zwaarste boot in het nadeel is. Bij zwaarder weer, als stabiliteit een grotere rol gaat spelen is de zwaarste boot juist in het voordeel. Uit figuur 15 blijkt dat het grootste deel van het verschil gemaakt wordt aan de wind.

tabel 7 Gewicht en zwaartepuntsgegevens voor bepaling van invloed van rompgewicht bij actuele zwaartepunt, inclusief bemanningsgewicht variatie.

Lichte Bemanning	Nominaal (M - M)	Zware Bemanning
romp: 1501 kg @ 0.680 m	romp: 1501 kg @ 0.680 m	romp: 1501 kg @ 0.680 m
tuig: 99 kg @ 5.326 m	tuig: 99 kg @ 5.326 m	tuig: 99 kg @ 5.326 m
crew: 210 kg @ 1.433 m	crew: 270 kg @ 1.433 m	crew: 330 kg @ 1.433 m



figuur 14 Delta's voor de 3 variaties op een Windward-Leeward baan.



figuur 15 Beste VMG's voor de 3 variaties, op aandewindse en voordewindse koers.

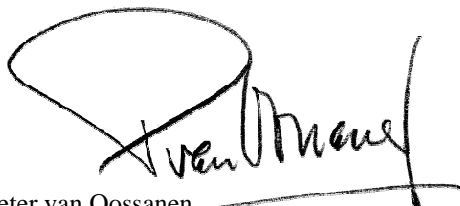
5. Conclusies

Uit de gedane VPP berekeningen en wedstrijdssimulaties blijkt dat voor windsnelheden hoger dan ca. 8 knoop, de zwaardere Regenbogen in het voordeel zijn. De onderliggende berekeningsresultaten laten zien dat dit het gevolg is van vooral de toename in stabiliteit die hiermee gepaard gaat. Echter, ook de waterlijnlengthe neemt toe bij een toename in waterverplaatsing.

Bij alle simulaties blijkt dat de boot met het grootste oprichtende moment (waterverplaatsing maal oprichtende arm) in het voordeel is. Omdat het verschil in waterverplaatsing tussen de boten in de vloot, in verhouding tot het verschil in zwaartepuntsligging, groter is, is de invloed van waterverplaatsing op het oprichtend moment van groter belang. De toename in hydrodynamische weerstand ten gevolge van het grotere displacement wordt hierdoor volledig gecompenseerd. Alleen bij zeer licht weer, als de ware windsnelheid lager is dan ca. 8 knoop, zijn de lichtere boten en de lichtere bemanningen in het voordeel.

Aangeraden wordt het effect van een toename in waterlijnlengthe, bij gelijkblijvende waterverplaatsing nog apart te onderzoeken om het effect op de zeilprestaties hiervan afzonderlijk te kunnen bepalen. Hiertoe moet een aparte VPP berekening worden uitgevoerd voor een Regenboog met de nominale romp- en bemanningsgewichten met een nader te bepalen trim achterover.

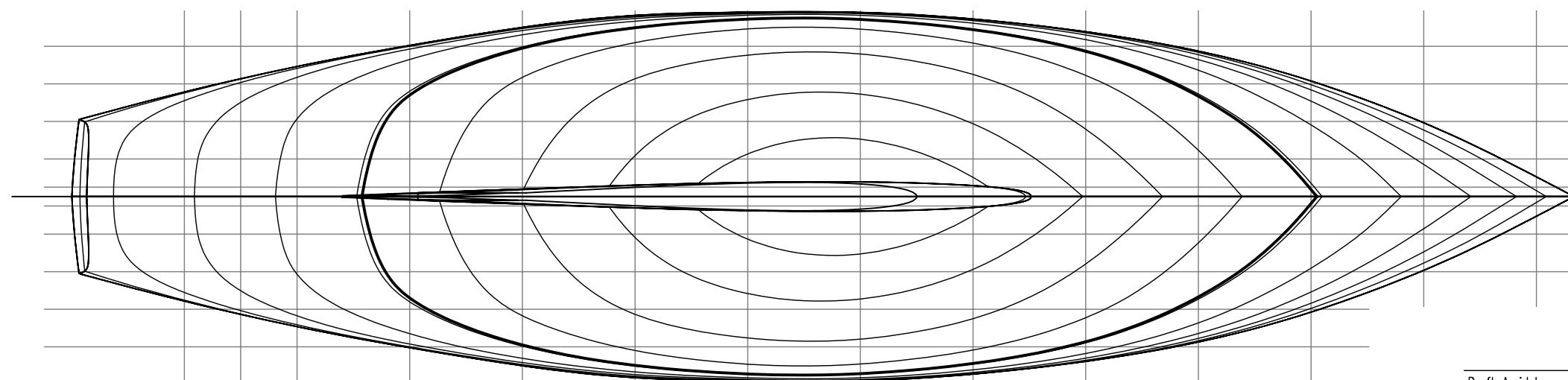
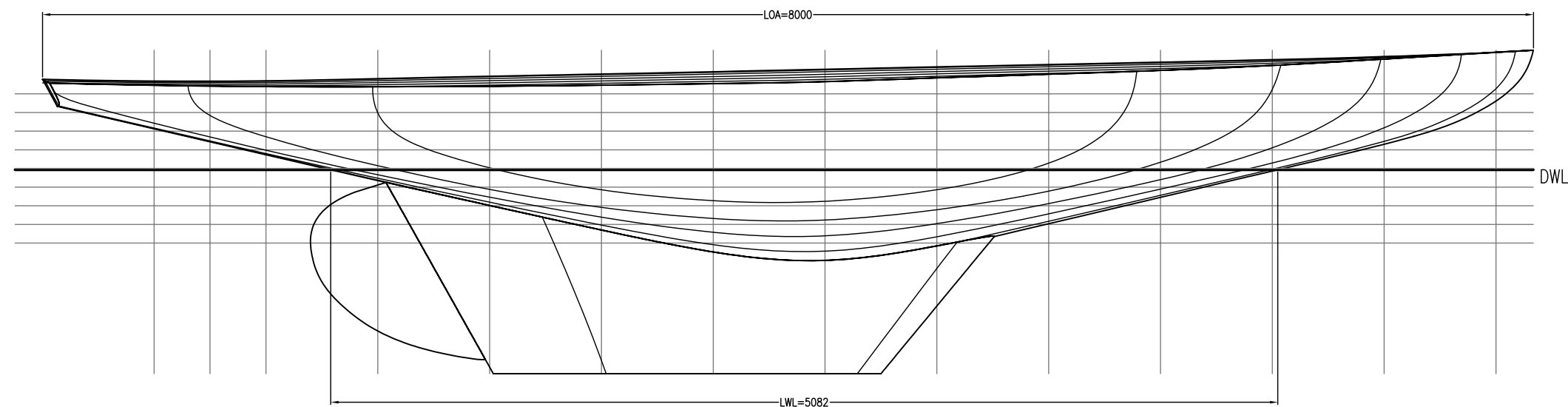
Wageningen, 21 februari 2008,



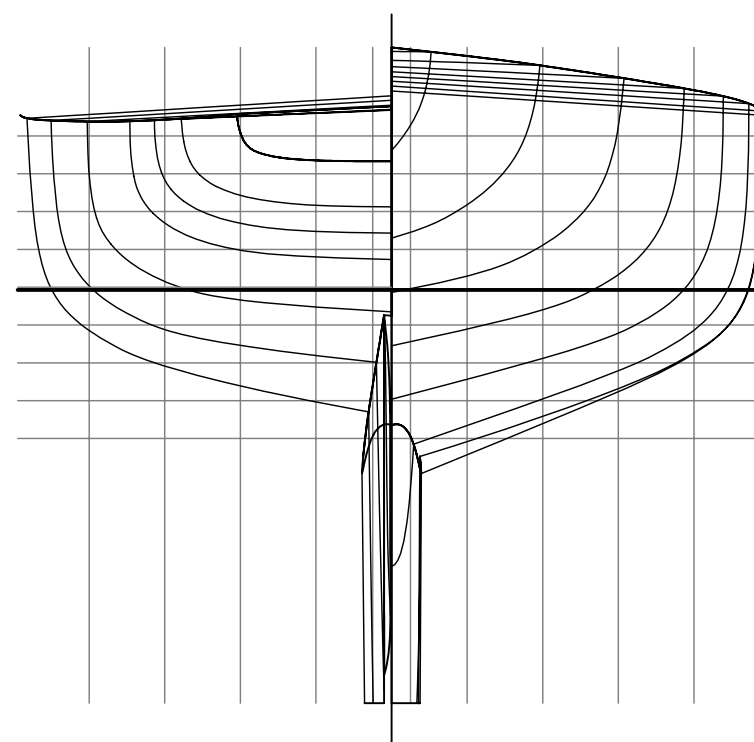
Dr. Ir. Pieter van Oossanen

Appendix A. Lijnenplan van de Regenboog

Regenboog – Ontwerpdiepgang
Verticalen en Waterlijnen



Spantenraam



	TOTAL	HULL	KEEL
Draft Amidsh.	1.093 m	1.093 m	1.093 m
Displacement	1800 kg	1579 kg	221.0 kg
WL Length	5.085 m	5.082 m	- m
WL Beam	1.901 m	1.901 m	- m
Wetted Area	12.955 m ²	8.305 m ²	5.416 m ²
Waterpl. Area	7.569 -	7.561 -	- -
Prismatic Coeff.	0.511 -	0.518 -	- -
Block Coeff.	0.170 -	0.315 -	- -
Midship Area Coeff.	0.333 -	0.613 -	- -
Waterpl. Area Coeff.	0.783 m	0.783 m	- m
LCB from zero pt., +ve fwd	-4.068 m	-3.999 m	-4.561 m
LCF from zero pt., +ve fwd	-4.044 m	-4.043 m	0.001 m
KB	0.884 m	0.951 m	0.397 m
BMt	0.967 m	1.101 m	- m
BML	6.662 m	7.568 m	- m
KMt	1.851 m	2.052 m	0.397 m
KML	7.546 m	8.518 m	0.397 m
TPc	0.076 tonne per cm	0.076 tonne per cm	- tonne per cm
MTC	0.022 tonne.m	0.026 tonne.m	- tonne.m

Van Oossanen & Associates b.v.

NAVAL ARCHITECTS – YACHT DESIGNERS – HYDRODYNAMICISTS – MARINE CONSULTANTS
Costerweg 1F, 6702 AA Wageningen The Netherlands
Tel.: (+31)317-416065 ; Fax.: (+31)317-424673 ; E-mail : info@oossanen.nl
Internet : WWW.Oossanen.NL

Regenboog

Lijnenplan op Ontwerpdiepgang

SHEET 1 of 1

Date: 13-02-2008	Scale: 1 : -	Size: A4	Drawn by: Perry van Oossanen	Alt. No. 001
---------------------	-----------------	-------------	---------------------------------	-----------------

Drawing No.
07-108-100

Reproduction in part or in whole of this drawing or design, in drawing form or 3-dimensional form, is prohibited without the express permission of Van Oossanen & Associates b.v.