

**WEERSTAND, STABILITEIT EN SNEL-
HEID VAN ZEILJACHTEN.**

Prof.ir.J. Gerritsma

Rapportnr. 789-P

Mei 1988

**17e Lustrum Scheepsbouwkundig
gezelschap "William Froude".**

WEERSTAND, STABILITEIT EN SNELHEID VAN ZEILJACHTEN.

Prof. Ir J. Gerritsma,
Hoogleraar Scheepshydronechanica.

Proeven met modellen van zeiljachten in een sleeptank zijn duur in vergelijking met de proeven die voor motorschepen gebruikelijk zijn. Immers bij zeilvoortstuwing is de weerstand niet alleen afhankelijk van de scheepssnelheid, maar ook de invloed van de helling en de drifthoek op de weerstand en de grootte van de dwarskracht is van belang.

Over het algemeen zijn jachten relatief kleine objecten in vergelijking met bijvoorbeeld vrachtschepen, zodat om financiële redenen slechts in uitzonderingsgevallen sleeptankonderzoek wordt uitgevoerd om de prestaties te bepalen.

Een uitzondering vormen de 12 meters, waarvoor vaak gebruik gemaakt wordt van modelexperimenten, maar de resultaten van dergelijk onderzoek worden over het algemeen niet gepubliceerd. Blijkbaar zijn de kosten van modelonderzoek voor de opdrachtgevers in dit geval geen probleem.

Voor de scheepsbouwkundige zijn de onderlinge verschillen in vorm en afmeting van deze jachten zeer gering en de interpretatie van die verschillen lijkt nauwelijks van belang voor andere typen zeiljachten.

In het geval van IOR jachten hebben de zeer gedetailleerde handicapregels een dominante invloed op de vormgeving van de romp en dat heeft tenslotte geleid tot een grote mate van uniformiteit in het ontwerp. De trend naar geringe displacement en relatief grote breedten is de oorzaak van platte spantvormen. Voor dit type schepen worden in enkele gevallen wel modelproeven uitgevoerd, maar ook hier zijn de marges waarbinnen gevarieerd kan worden gering en meestal vertrouwt de ontwerper op zijn eigen inzicht en ervaring om de kosten van modelonderzoek uit te sparen: het prototype moet bewijzen of zijn veronderstellingen juist waren. In het algemeen zijn de eigenaars van toerjachten minder geïnteresseerd in prestatieverbetering van enkele tienden van procenten, maar aan de andere kant is voor deze jachten een veel grotere variatie in vormgeving mogelijk of nodig (bijvoorbeeld door diepgangsbepalingen) zodat voor de grotere objecten een sleeptank onderzoek zinvol kan zijn. Een verbetering van 6% in de speed-made-good, zoals weleens voorgekomen is, kan tegen de kosten van dergelijk onderzoek afgewogen worden, want snelheid is óók voor een toerjacht van belang.

Systematisch modelonderzoek ten behoeve van zeiljachten heeft in het verleden vrijwel niet plaatsgevonden. De behoefte daaraan werd lang geleden al naar voren gebracht tijdens de discussie van Davidson's klassieke publicatie over model experimenten met zeiljacht modellen; er werd toen gesteld dat modelproeven voor individuele ontwerpen een onvoldoende basis geven voor de ontwikkeling van rationele ontwerpmethoden en de bepaling van de pres-

Weerstand, Stabiliteit En Snelheid Van Zeiljachten

tatie van jachten (1).

Een beperkt systematisch onderzoek naar de invloed van de rompvorm op de weerstand is uitgevoerd en gepubliceerd door Pierre de Saix, een medewerker van het Davidson Laboratory (2).

Hij onderzocht vijf breedte-diepgang (van de romp) variaties en drie variaties van de prismatische coëfficiënt, waarbij als moedermodel de NY 32, een ontwerp van Sparkman and Stephens, fungeerde. Verder is er systematisch onderzoek verricht op het gebied van vinkielen en roeren door de Saix (3), Herreshoff en Kerwin (4), Breukelman en Keuning (5), Gerritsma en Keuning (6). In deze laatste publicatie zijn 10 verschillende kielen op één bepaalde rompvorm beproefd. Deze opsomming is niet compleet, maar geeft enigszins een indruk van de omvang van het verrichte systematische onderzoek.

In 1950 begon in de sleeptank van het laboratorium voor Scheepshydropneumica te Delft het onderzoek van zeiljachten met modelproeven van de "Zeevalk", een voor die tijd zeer lichte oceaanracer ontworpen door van de Stadt. In de daarop volgende jaren is een aantal ontwerpen van deze ontwerper op modelschaal beproefd, waarbij een zekere systematiek in de romp en kiel niet ontbrak. Daarnaast is een vrij groot aantal modelproeven van individuele ontwerpen uitgevoerd.

In 1966 is een werkgroep van Nederlandse ontwerpers van zeiljachten en onderzoekers op het gebied van de scheepshydropneumica opgericht om de verschillende aspecten van het ontwerpen van zeiljachten onderling te bespreken en kennis uit te wisselen. Ook in deze werkgroep kwam de behoefte aan systematisch onderzoek, in het bijzonder met betrekking tot het weerstand-snelheid verband, naar voren.

Uiteindelijk leidde dit tot het plan om een serie van systematisch gevarieerde rompvormen van zeiljachten te onderzoeken op weerstand en stabiliteit. De serie omvatte variaties van de slankheidsgraad $L/V_c^{1/3}$, de langsscheepse ligging van het drukingspunt LCB, de prismatische coëfficiënt C_p , alsmede variaties van de lengte/breedte verhouding van de constructie waterlijn L_{w1}/B_{w1} en de breedte/diepgang verhouding van de romp B_{w1}/T_c . In totaal zijn er twee en twintig variaties beproefd die allen afgeleid zijn van de "Standfast 43" een Admiral Cupper uit 1970, ontworpen door Frans Maas.

Het eerste deel van het onderzoek omvatte negen modellen, inclusief het moedermodel, en de resultaten van de modelproeven zijn in samenwerking met het Massachusetts Institute of Technology te Boston geanalyseerd.

De belangstelling van het M.I.T. kwam voort uit hun interesse voor een meer rationele bepaling van de handicap voor wedstrijd-jachten: het zogenaamde Irving Pratt Ocean Handicap Project. De resultaten van de eerste negen modellen en het gebruik van deze gegevens ten behoeve van de bepaling van de snelheidspolaire van een jacht zijn gepubliceerd in 1976 en 1977 (7,8).

Weerstand, Stabiliteit En Snelheid Van Zeiljachten

De overige dertien modelproeven zijn voltooid en geanalyseerd in Delft en tenslotte gepubliceerd in 1981 (9).

Er is een zekere analogie met de systematische modelseries die bij het ontwerp van mechanisch voortgestuwde schepen gebruikt worden, met dien verstande dat, zoals reeds werd opgemerkt, de drifthoek, de helling en de op het onderwaterschip werkende dwarskracht een belangrijke rol spelen bij zeiljachten.

De snelheid van een zeiljacht hangt naast de eigenschappen van dat jacht af van de windsterkte en de windrichting. Om een prestatieberekening te kunnen maken, bijvoorbeeld in de vorm van een polair snelheidsdiagram, moeten de zeilkrachten berekend zijn. De prestatieberekening is gebaseerd op een stationaire evenwichtstoestand waarbij de voortstuwende en hellende zeilkrachten evenwicht maken met de overeenkomstige hydrodynamische weerstand en dwarskracht bij helling en drift van het jacht.

Ook moet het stabiliteitsmoment gelijk zijn aan het moment dat door de dwarskrachten op het onderwaterschip en op de zeilen wordt veroorzaakt.

Naast de hydrodynamische gegevens, die een modelproef met vele combinaties van hellingshoek, drift en stabiliteit oplevert, moeten dus voor iedere mogelijke windsterkte en windrichting de zeilkrachten bekend zijn.

Davidson heeft voor dat doel ware grootte proeven met het 6-meter jacht "Gimrack" uitgevoerd waarbij uitsluitend aan de windse koersen zijn gevaren. Proeven met een model van "Gimrack" met overeenkomstige snelheid, stabiliteit, helling en drift leverde de voortstuwende en hellende zeilkrachten die genormaliseerd zijn met het zeiloppervlak (1).

Eenzelfde procedure is gevolgd bij de experimenten met het Amerikaanse jacht "Bay Bea" (10) en met het Nederlandse jacht "Standfast" (11). In beide gevallen zijn nu alle mogelijke koersen ten opzichte van de wind beschouwd. Beide proeven hebben geleid tot zeilkrachtcoëfficiënten die gebruikt werden voor het berekenen van polaire snelheidsdiagrammen van jachten (7).

Een uitgebreide serie modelproeven met één zeilplan is uitgevoerd in de windtunnel van het Institut für Schiffbau van de Universiteit van Hamburg door Wagner en Boese (12). In verband met het ontwerp van 12 meter jachten heeft Herreshoff in de windtunnel van het M.I.T. vergelijkende proeven met een star modelgrootzeil uitgevoerd (13). Ook in Engeland maakt men gebruik van een windtunnel om de werking van jachtzeilen te onderzoeken. Voor een beschrijving van de daar aanwezige faciliteiten wordt verwezen naar het boek van Marchaj (14).

Tenslotte zijn pogingen ondernomen om met numerieke methoden de zeilkrachten te bepalen, bijvoorbeeld door Milgram (15,16). Voor praktisch gebruik lijken de empirisch bepaalde zeilkrachtcoëfficiënten zoals die van "Bay Bea" en "Standfast" het meest geschikt.

Jachten die op zee varen ondervinden uiteraard invloed van de zeegolven. In het bijzonder kan de weerstand bij resonantie van

Weerstand, Stabiliteit En Snelheid Van Zeiljachten

de stampbeweging zéér veel groter worden, hetgeen zich uit in drastische snelheidsvermindering. Het dynamisch gedrag in onregelmatige zeegang hangt mede af van het langsscheeps massa-traagheidsmoment van een jacht: een concentratie van massa in het midden van het jacht blijkt voordelig in verband met de extra weerstand die in zeegang ondervonden wordt. Systematische berekeningen van die extra weerstand, met behulp van de methode Gerritsma en Beukelman (17) toont inderdaad de voordelen aan van een kleine langstraagheidsstraal en dat principe is tegenwoordig kenmerkend voor wedstrijdjachten (18).

In verband met de vaak aanzienlijke asymmetrische zeilkrachten en de hydrodynamische reacties daarop is de koersstabiliteit van een zeiljacht van groot belang. Dat betreft niet alleen het stuurmoment dat door roergeven uitgeoefend kan worden, maar óók het dynamisch evenwicht van het systeem: jacht + zeilen. Bij de analyse van het dynamisch evenwicht is een bepaling van de krachten op romp, kiel en roer onder meer van belang. Een redelijke schatting van die dwarskrachten is mogelijk, in het bijzonder voor de moderne platte rompvormen met aangezette kiel en roer, waarbij uitgegaan wordt van de draagvlaktheorie [19]. De analyse van de dynamische stabiliteit bij het varen van een rechte baan is in principe analoog aan de methode die bij mechanisch voortgestuwde schepen wordt gebruikt, maar bij zeiljachten is de koppeling tussen gieren en hellen zeer belangrijk.

De dwarsstabiliteit speelt een grote rol bij het zeilen. Helling ontstaat door de dwarsscheepse zeilkracht en de corresponderende hydrodynamische dwarskracht veroorzaakt een geïnduceerde weerstand, waarvan de grootte mede bepalend is voor de snelheid van het jacht. Bovendien heeft de dwarsscheepse hellingshoek invloed op de grootte van de voortstuwende zeilkracht. Tenslotte is de dwarsscheepse stabiliteit bij grote hoeken van belang voor de veiligheid. De vorm van moderne wedstrijdjachten (grote breedte/holte verhouding) heeft geleid tot een kleinere stabiliteitsomvang in vergelijking met rompvormen die tien of meer jaren geleden gebruikelijk waren. Door Keuning is een systematisch onderzoek uitgevoerd naar de samenhang tussen de rompvorm en de aanvangsstabiliteit enerzijds en anderzijds de stabiliteitsomvang [20]. Die stabiliteitsomvang is belangrijk voor het gedrag van boten en jachten in brekende golven. Onderzoek op dit gebied is gerapporteerd [21,22].

De dwarsscheepse stabiliteit van een zeiljacht wordt beïnvloed door de voorwaartse snelheid, omdat de relatief grote oppervlakte verstoring de drukverdeling over het onderwater gedeelte beïnvloed. De proeven met de systematische serie hebben echter slechts een matige invloed van de snelheid aangetoond, zoals nader besproken zal worden. De resultaten van de Delftse systematische serie vormen een belangrijke basis van het nieuwe IMS systeem (International Measurement System), een handicap systeem voor wedstrijdzeiljachten dat rekening houdt met de invloed van de heersende windsterkte op de prestatie.

Weerstand, Stabiliteit En Snelheid Van Zeiljachten

Het IMS systeem gebruikt de gegevens van de Delftse serie om de weerstand van het jacht te bepalen als de vorm, de waterverplaatsing, de stabiliteit en het zeilplan gegeven zijn. Het is een vooruitgang ten opzichte van de bestaande methode (bijv. de IOR) waarbij, ongeacht de windsnelheid, de prestatie van het jacht in slechts één getal wordt uitgedrukt.

In verband met moderne ontwikkelingen in de jachtbouw, waarbij bijvoorbeeld door toepassing van vaak geavanceerde composiet materialen een zeer lichte constructie bereikt wordt, is het nodig de bestaande Delftse serie uit te breiden, waarbij met name veel grotere lengte/deplacement en breedte/diepgang verhoudingen van de romp beschouwd zullen worden. De uitbreiding zal in totaal 7 verschillende rompvormen omvatten, waarvan er twee kortgeleden óók in golven zijn beproefd. In een recente publicatie [23] is aangegeven op welke wijze ook de extra weerstand in golven in de prestatieberekening (het polaire snelheidsdiagram) opgenomen kan worden.

Literatuur.

- [1] Davidson, K.S.M.,
Some experimental studies on the sailing yacht,
Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1936.
- [2] de Saix, P.,
Systematic model series in the design of the sailing yacht hull,
Second HISWA Symposium, Amsterdam 1971.
- [3] de Saix, P.,
Yacht keels on experimental study,
"Sail", May 1974.
- [4] Herreshoff, H.C. and J.E. Kerwin,
Sailing yacht keels,
Third HISWA Symposium, Amsterdam 1973.
- [5] Beukelman, W. and J.A. Keuning,
The influence of fin keel sweep back on the performance of sailing yachts,
Fourth HISWA Symposium, Amsterdam 1975.
- [6] Gerritsma, J. and J.A. Keuning,
Further experiments with keel-hull combinations
First Tampa Bay Sailing Yacht Symposium 1986
St. Petersburg, Florida
- [7] Kerwin, J.E.,
A velocity prediction program for ocean racing yachts,
New England Sailing Symposium, New London, Connecticut 1976.
- [8] Gerritsma, J., G. Moeyes and R. Onnink,
Test results of a systematic yacht hull series,
Fifth HISWA Symposium, Amsterdam 1977.
- [9] Gerritsma, J., R. Onnink and A. Versluis,
Geometry, Resistance and Stability of the Delft Systematic Yacht Hull Series,
Seventh HISWA Symposium, Amsterdam 1981.

Weerstand, Stabiliteit En Snelheid Van Zeiljachten

- [10] Kerwin, J.E., B.W. Oppenheim, J.H. Mays,
a procedure for sailing performance analysis based on full
scale log entries and towing tank data,
M.I.T. Report nr. 74-17, 1974.
- [11] Gerritsma, J., G. Moeyes, J.E. Kerwin,
Determination of Sail forces based on full scale measure-
ments and model tests,
Fourth HISWA Symposium, Amsterdam 1975.
- [12] Wagner, B. en P. Boese,
Windkanal Untersuchungen einer Segelyacht,
Schiff und Hafen, 1986.
- [13] Herreshoff, H.C.,
12 meter yacht mainsail variations comparative wind tunnel
tests,
M.I.T. Report nr. 66-11, 1966.
- [14] Marchaj, C.A.,
Sailing theory and practice, Londen, 1964.
- [15] Milgram, J.H.,
The analytical design of yachts sails,
Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1968.
- [16] Milgram, J.H.,
Sailforce coefficients for systematic rig variations,
Society of Naval Architects and Marine Engineers,
Technical & Research Report R-10, 1971.
- [17] Gerritsma, J en W. Beukelman,
Analysis of the resistance increase in waves of a fast cargo
ship,
International Shipbuilding Progress, 1972
- [18] Gerritsma, J en G. Moeyes,
Seakeeping performance,
"Sail", April 1973,
Ook Third HISWA Symposium, Amsterdam 1973.
- [19] Gerritsma, J.,
Course keeping qualities and motions in waves of a sailing
yacht,
Proceeding of the Third AIAA Symposium on the Aero/Hydro-
nautics of Sailing, Redonde Beach, California, 1971.
- [20] Keuning, J.A.
On the stability of sailing yachts at large angles of heel.
Report 499 A, 1980, Delft Shiphydrodynamics Laboratory.
- [21] Matora, S., S. Shimamoto, M. Fujino
Second International Conference on Stability of Ships and
Ocean Vehicles, Tokyo 1982.
- [22] Kirkman, K.L., T.J. Nagle, J.O. Salsich,
Sailing Yacht Capsizing
Society of Naval Architects and Marine Engineers 1983.
- [23] Gerritsma, J. and J.A. Keuning
Speed Loss in Waves
Tenth HISWA Symposium 1988, Amsterdam.