



Het zijwaard is omgeven door een waas van geheimzinnigheid. Iedereen weet er het zijne van - maar wie weet het ware?

Zonder enige theoretische kennis van de stromingsleer werd het door opeenvolgende generaties scheepsbouwers ontwikkeld tot het meest effectieve middel om de drift van een zeilvaartuig te beperken. Louter aan de hand van praktische ervaring.

Maar, trots als we zijn op onze huidige theoretisch-technische kennis, willen wij daarmee ook het zijwaard doorgronden en ontleden. Om te beginnen om het „waarom” te achterhalen van de vormen die de klassieke scheepsbouwers eraan gaven. En vervolgens om na te gaan, of het met de hedendaagse kennis van de stromingsleer nog verder kan worden geperfectioneerd.

Er zijn al enige malen sleepproeven gedaan met zijzwaarden. Maar de resultaten daarvan zijn slechts gedeeltelijk gepubliceerd.

Nu heeft ir. H. Vreedenburgh, een groot liefhebber van de ronde- en platbodemjachten, zich op het fenomeen „zijwaard” gestort. Hij heeft het zwaard ontleed en de werking ervan getoetst aan de moderne draagvleugel-theorie. Vervolgens heeft hij een computerprogramma ontwikkeld om daarmee bij een bepaald platbodemjacht een goed zwaard te ontwerpen.

In enige afleveringen brengt hij verslag uit over zijn diepgaande studie van dit veelbesproken onderwerp: het zijwaard.

1. INLEIDING

Als een zeilschip niet pal voor de wind vaart, wordt het naar lij gedrukt door de kracht die de wind uitoefent op de zeilen. Bij veel schepen kan de rompvorm maar in beperkte mate de tegenkracht leveren die nodig is om dit verlijeren tegen te gaan, vooral als zij een geringe diepgang hebben.

Het is niet precies bekend wie het eerste op de gedachte is gekomen een plank langs zij te hangen om te helpen dat zijdelings wegdrijven te beperken en ook niet wanneer dit heeft plaatsgehad. Het moet iemand uit onze streken zijn geweest en in de middeleeuwen. Het lijkt wel vast te staan dat vanaf het eind van de 16e eeuw het zijwaard in de lage landen algemeen in gebruik was.

Daarbij is het merkwaardig dat het verspreidingsgebied zo klein is gebleven. Voor zover kan worden nagegaan werden en worden zijzwaarden, behalve op de Zuiderzee en de Nederlandse binnenwateren, vrijwel alleen toegepast langs de Noordzeekust tussen Nieuwpoort en de Elbe en aan de overkant tussen Thames en Humber. Elders op de wereld behielp

men zich, op enkele uitzonderingen na, zo nodig met midzwaarden.

Daar komt dan nog bij dat de zijzwaarden van de randgebieden in hydrodynamisch opzicht vaak niet optimaal waren. Zo hadden de bom-schuiten langs de Nederlandse Noordzeekust zijzwaarden waarvan het profiel vrijwel rechthoekig was, terwijl aan de onderzijde een dubbeling was aangebracht die het profiel nog ongunstiger maakte. De Blankenbergse schuiten, die ook vanaf het strand visten en wel enige overeenkomst vertoonden met de bom-schuiten, hadden gelijksoortige zijzwaarden.

Tussen de Belgische en de Nederlandse stranden hadden we de Zeeuwse zeegaten, waar de hoogaars en de hengst inheems waren. Ook deze hadden oorspronkelijk zijzwaarden met een rechthoekig profiel, hoogstens aan de uittredende kant enigszins afgeschuind. De zijzwaarden van de schepen van de Engelse zeegaten waren al even weinig verijnd.

Al deze zijzwaarden hadden niet alleen een weinig efficiënt profiel, maar hun kwaliteit werd nog verder verminderd door ijzeren strippen die de afzonderlijke planken verbonden waarvan de zwaarden waren gemaakt. Deze strippen waren niet in het hout ingelaten en daardoor veroorzaakten zij een aanzienlijke vergroting van de weerstand.

Men kan zich afvragen waarom sommige schepen bleven varen met zulke ietwat primitief aandoende en niet erg efficiënte zijzwaarden. Mogelijk komt dit doordat het in vaargebieden met sterke getijstromen voor zeilschepen vrijwel onmogelijk is om tegen wind en stroom op te werken, terwijl bij laveren met stroom mee en wind tegen de snelheid voor het grootste deel door de stroming wordt geleverd. Maximale prestaties hoog-aan-de-wind hebben dan maar een beperkt nut. Dit zou tevens kunnen verklaren waarom bij de genoemde schepen ook de tuigage niet erg efficiënt was. Dat geldt zowel voor de hoogaars als voor

de Thamesbarge met hun spriettuig, en meer nog voor de Humber keel met een bijna vierkant razeil.

Op de kanalen en meren daarentegen speelde stroming geen rol en ook op de Zuiderzee stelden de getijstromen niet veel voor. Hier was snelheid in de wind-op dus wél van belang en dit leidde tot de ontwikkeling van zijzwaarden met een gunstiger hydrodynamisch profiel.

Aan het zijzwaard worden tal van eisen gesteld.

- In de eerste plaats moet het dwarskracht leveren om het grootste deel van de zijdelingse windkracht te compenseren. Deze dwarskrachtproduktie gaat onvermijdelijk gepaard met een toename van de weerstand in voorwaartse richting die het zijzwaard ondervindt en natuurlijk wensen wij dat die weerstandsvergroting zo klein mogelijk blijft.
- Ook zal het zeilschip varen met een zekere drift, dat is de hoek tussen de koers en het vlak door kiel en stevens. De grootte van die drift wordt onder andere beïnvloed door de stand van het zwaard ten opzichte van de romp, het „toespoor”.
- Vanzelfsprekend moet het zwaard sterk genoeg zijn om de erop werkende krachten te kunnen verdragen zonder te breken; maar het is wel prettig als het niet te zwaar is, want anders vraagt het ophalen meer kracht.
- En tenslotte is het wenselijk dat het zwaard bij het laten vallen meteen netjes tegen de strijklamp gaat aanliggen en dat het niet op onverwachte ogenblikken zal uitscheren of „opstromen”.

Rond de Zuiderzee zijn in de praktijk zwaarden ontwikkeld die redelijk tot goed aan al deze eisen voldeden, al waren er wel verschillen tussen de ene werf en de andere. Ook de bouwers van traditionele jachten in Friesland zijn erin geslaagd zijzwaarden te maken die optimaal waren aangepast aan die scheepstypen. Men moet bewon-

dering hebben voor deze scheepsbouwers die zonder theoretische kennis zo'n goed resultaat wisten te behalen.

Dat sluit evenwel niet uit dat het mogelijk is om, gebruik makend van gegevens uit de aëro- en hydrodynamica (dat is de leer van de lucht- en waterbeweging) een beter inzicht te verkrijgen in het hoe en waarom van de werking van de zijzwaarden en mogelijk de ontwerpprocedure te verbeteren. Maar voorzichtigheid is daarbij geboden: sommige pogingen in die richting in het verleden waren niet in alle opzichten een succes.

In hetgeen hier volgt heb ik getracht de problematiek van het ontwerpen van een zijzwaard te ontleden, uitgaande van eenvoudige theoretische en uit ervaring verkregen gegevens. Daarbij gaat het in eerste aanleg over zijzwaarden van het type dat op boters en aanverwante schepen wordt gebruikt. Deze zijzwaarden komen wat vorm en verhoudingen betreft voldoende overeen met vliegtuigvleugels om gebruik te kunnen maken van het zeer uitgebreide onderzoek dat daarvoor is verricht.¹⁾

Hierbij is het de kunst om de zaken zodanig voor te stellen dat zij voor de gemiddelde zeiler begrijpelijk zijn zonder in ontoelaatbare vereenvoudigingen te vervallen. Veel dank ben ik verschuldigd aan Jan Kooijman, die mij op duistere passages heeft gewezen en mij heeft geholpen om die te verhelderen.

Een ander probleem, helaas nog altijd actueel, is het te gebruiken eenhedenstelsel. Ofschoon het SI-stelsel al bestaat sinds 1960 en het vanaf 1978 in sommige gevallen zelfs wettelijk is voorgeschreven, is de vertrouwdheid daarmee in niet-wetenschappelijke kringen nog altijd beperkt. Daarom, en omdat platbodem-enthousiasten - althans in hun hobby - behoudsgezinde lieden zijn, heb ik mij in dit verhaal aan het MKS-stelsel gehouden. En omdat hier geen midzwaarden aan de orde komen maar uitsluitend zijzwaarden, zullen wij verder schrijven over het „zwaard”.

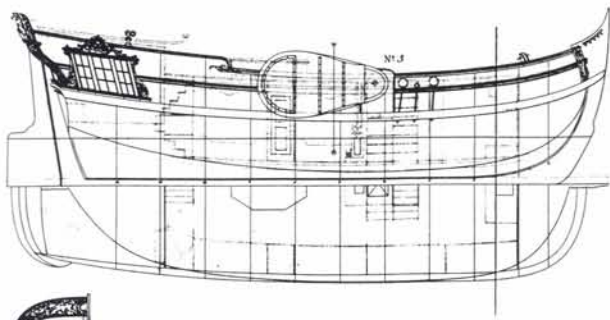
2. DE VORM VAN HET ZWAARD

De vorm van het zwaard is in hoofdzaak bepaald door de omtreksvorm, kortweg te noemen de „omtrek”, en door de doorsnede loodrecht op de langas die wordt aangeduid als het „profiel”.

Het lijkt nuttig om vast te leggen hoe wij een zwaard verder zullen beschrijven. Gaat het over het zwaard als geheel, dan noemen wij de naar de romp toegekeerde zijde de „binnenkant” en de van de romp afgekeerde zijde de „buitenkant”. Bij de bespreking van het profiel daarentegen worden dit respectievelijk de bovenzijde en de onderzijde van dat profiel, zulks in navolging van de aërodynamici. Verder hebben zowel zwaard als profiel een voorkant en een achterkant, terwijl het zwaard ook nog een bovenkant of „kop” heeft en een onderkant. De hoek tussen het zwaard en een verticale lijn noemen wij de „pijlhoek”; hoe steiler het zwaard staat, des te kleiner is die pijlhoek.

De grondvorm van de omtrek van het zwaard bestaat uit een grote cirkelboog aan de onderkant en een kleine boven, verbonden door rechte of licht gebogen lijnen. Deze vorm werd al afgebeeld door Chapman in zijn „Architectura Navalis Mercatoria” van 1775. Maar voor zover dat uit de tekeningen van Chapman en zijn tijdgenoten valt af te leiden, is het profiel sindsdien sterk veranderd. Dit type zwaard vond zijn uiteindelijke vorm op de schepen in Friesland, die ik gemakshalve zal samenvatten onder de benaming „boeiers”.

Vermoedelijk heeft men reeds vroeg ervaren dat lange, smalle zwaarden efficiënter waren dan korte brede - vooropgesteld dat de waterdiepte toeliet om ze diep te steken. Zulke zwaarden, weliswaar klein in verhouding tot het schip, zijn reeds te zien op het schilderij „Gezicht op Hoorn” van H. C. Vroom, gedateerd 1622, en op andere werken van dezelfde schilder. Dit type zwaard be-



Afb. uit Chapman.

reikte zijn hoogtepunt op vissersschepen van de Zuiderzee, waarvan de botter de meest volmaakte vertegenwoordiger is.

In de basisvorm komen kleine varianten voor: de onderste cirkelboog is soms een ellips, eventueel zelfs met een recht stuk; de bovenste cirkelboog kan ietwat zijn toegespitst, maar is ook wel afgeplat. Ook de mate waarin naar boven toe de breedte afneemt kan verschillen, evenals de wijze waarop: de voorkant is meestal recht, de achterkant soms recht, soms gebogen. In „Ronde- en Platbodemjachten” van mr. dr. T. Huitema zijn al deze varianten te vinden.

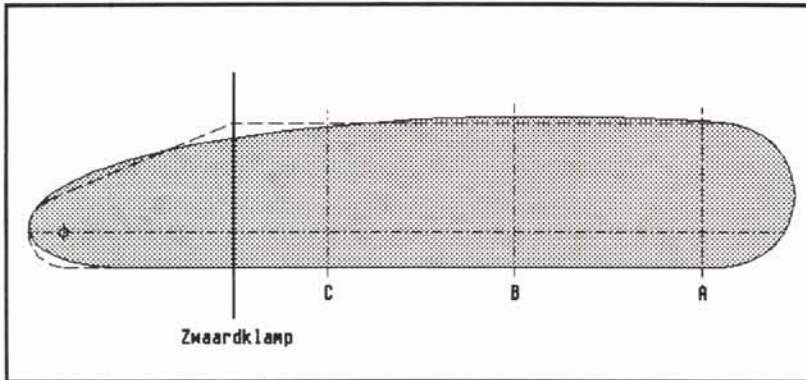


Fig. 1. WERKELIJKE EN GESCHEMATISEERDE ZWAARDVORM

Wij kunnen de vorm van het onderwaterdeel schematisch voorstellen door een halve cirkel en twee evenwijdige lijnen. Dit heeft het voordeel dat het verband tussen lengte, breedte, diepgang, oppervlak en pijlhoek van het zwaard eenvoudig in formules is vast te leggen. In het definitieve ontwerp kan de vorm dan worden aangepast, om praktische en eventueel zelfs om esthetische redenen. Die werkelijke vorm kan worden gedefinieerd door drie doorsneden of profielen van verschillende lengte op 1/6, 1/2 en 5/6 van de „Lok”, de „Lengte onder de klamp”. Zie fig. 1; daarin is gestippeld aangegeven de „kwart-koorde lijn”.

Over het profiel van zwaarden is weinig bekend. Bij het opmeten van

schepen is hieraan zelden aandacht besteed. Zoals in „Ronde- en Platbodemjachten” te lezen staat, zijn hierover tal van theorieën ontwikkeld, vaak zonder aan te geven wat men precies nastreefde. Ook verschilde het profiel nogal van streek tot streek en van werf tot werf - en dat is nog steeds zo. Enkele algemene kenmerken van het profiel van botterzwaarden, op het oog vastgesteld, zijn aangegeven in fig. 2.

Overigens zal de profielvorm meestal niet constant zijn over de lengte van

3. DE KRACHTEN OP HET SCHIP EN HET ZWAARD

De combinatie van zeilen, romp en zwaarden vormt een systeem waarop krachten worden uitgeoefend door de wind, het water en de zwaartekracht. Elk van die krachten kan worden ontbonden in drie onderling loodrecht op elkaar staande richtingen, namelijk horizontaal in de richting van de koers die het schip vaart; horizontaal loodrecht op de koers, dus ongeveer

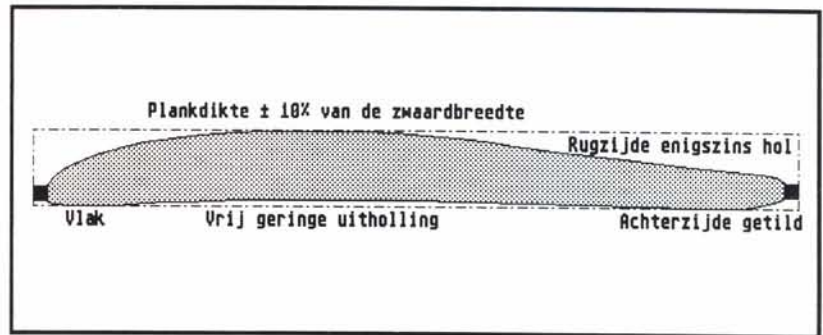


Fig. 2. DOORSNEDE BOTTERZWAARD

dwarsscheeps; en verticaal. Wanneer het schip met constante koers en snelheid vaart, zijn die krachten in elk der drie richtingen in evenwicht. De ontbondenen van de water- en luchtkrachten en van de zwaartekracht, die in elk der drie richtingen werken, zijn weliswaar paarsgewijs gelijk en evenwijdig, maar gaan niet door één punt. Daardoor vormen zij ook nog drie koppels of momenten.

- Het hellend moment wordt gevormd door de dwarsscheepse luchtkrachten en de dwarskracht van het water. Deze laatste wordt voor het grootste deel geleverd door het zwaard en voor de rest door de romp. Dit hellend moment maakt evenwicht met het stabiliteitsmoment, geleverd door de neerwaartse luchtkrachten plus het scheepsgewicht enerzijds en de opdrijvende kracht van het water anderzijds.
- Het giermoment (ook wel stuurmoment genoemd), ontstaat als de genoemde dwarsscheepse krachten niet in hetzelfde verticale vlak liggen. Dit giermoment bepaalt of het schip loef- of lijgierig is. Door een juiste keuze van het ophangpunt van het zwaard in langsscheepse richting kan worden bereikt dat er een klein loefgierig moment overblijft, waardoor het schip prettig bestuurbaar is. Door

het zwaard. Dat zal dikwijls wel het geval zijn voor de dikte van de omgeschreven rechthoek, dus de dikte van de planken waaruit het zwaard is gemaakt.

Ook de stand van het zwaard ten opzichte van het schip is van belang. Deze stand kan worden gedefinieerd door drie hoeken: het toespoor, de inclinatie en de pijlhoek. Het „toespoor” is de hoek die de strijklamp maakt met de hartlijn van het schip.

De hoek tussen het vlak van het zwaard en het langsscheepse symmetrievlak van het schip is de „inclinatie”. De pijlhoek tenslotte, de hoek tussen het zwaard en de verticaal, of exacter: de hoek tussen de kwart-koorde lijn en de verticaal.

het zwaard meer of minder diep te steken, dus door het wijzigen van de pijlhoek, komt het zwaartepunt van het zwaardoppervlak meer naar voren of naar achteren; daarmee kan de mate van loef- of lijgerigheid worden beïnvloed. Dit is dus een voordeel ten opzichte van schepen met een vaste kiel.

- Tenslotte is er nog een vertrimmend moment, gevormd door de langsscheepse krachten, te weten: de voortstuwende kracht op de zeilen en de scheepsweerstand. Dit vertrimmend moment kantelt het schip als het ware voorover. Meestal merkt men er weinig van. Alleen bij korte, brede scheepjes met een lage kop kan het wel eens aanleiding geven tot het overnemen van groen water.

4. DE AFMETINGEN VAN HET ZWAARD

Het spreekt vanzelf dat er een relatie bestaat tussen de grootte van het zwaard en de grootte van het schip. Men zou ook kunnen veronderstellen dat er een verband is tussen het zwaardoppervlak en het zeiloppervlak.

Het is interessant om het verband na te gaan tussen de verschillende maten van zwaarden bij originele gebruiksschepen en daarvan afgeleide jachten. Jammer genoeg worden schepen nogal eens afgebeeld met neergelaten zwaard, zodat de lengte daarvan niet kan worden bepaald. De dikte van de plank wordt zeer zelden vermeld en de profielvorm wordt vrijwel nooit gegeven.

Voor het nuttig effect van het zwaard is alleen het deel van belang dat zich onder water en tevens onder de strijklamp bevindt. Bij berekeningen zullen wij er daarom gemakshalve van uitgaan dat de strijklamp zich op of onder het wateroppervlak bevindt, hetgeen vaak het geval zal zijn wanneer er een frisse bries staat.

Een aantal gegevens is opgenomen in Tabel 1. De zwaardmaten zijn hierin gerelateerd aan de Lwl, de lengte op de waterlijn, dat is hier de lengte van de romp zonder stevens, ter hoogte van de waterlijn. Het zeiloppervlak is dat van het grootzeil en de grootste stafok tezamen.

In fig. 3 zijn enkele verbanden tussen de maten grafisch weergegeven en in

TABEL 1. GEGEVENS VAN ZWAARDEN

No	Schip	Lwl m	Lok/ Lwl%	B/ Lok%	Opvl/ Lwl ² %	Asp verh	Zeil opvl	Opvl/ zeil%
1	Lemsteraak 'De Groene Draeck'	12,94	27,3	21,4	1,56	4,8	120,0	2,17
2	Botterjacht 'Brandaris'	11,01	27,8	21,7	1,64	4,7	81,0	2,46
3	Wieringeraak 'Vlieter'	10,22	27,6	25,6	1,89	4,0	54,0	3,65
4	Motor-mosselaak	12,47	27,7	21,3	1,59	4,8	-	-
5	Botter 'Vrouw Cornelie'	10,76	27,4	25,6	1,88	4,0	77,5	2,80
6	Bons EB 69	9,19	25,2	27,5	1,70	3,7	55,4	2,59
7	Pluut VD 23	7,25	29,9	24,0	2,09	4,3	38,3	2,87
8	Zeeschouw 'Tadorna'	6,48	30,8	26,7	2,45	3,9	38,5	2,67
9	Hoogaars 'Aladdin'	9,04	31,5	27,0	2,61	3,8	74,1	2,87
10	Sopers schokker	7,95	31,5	24,0	2,32	4,3	-	-
11	Schokker 'Albatros' 1956	7,21	33,3	22,6	2,48	4,5	45,5	2,83
12	Idem 1975	7,21	30,5	25,0	2,26	4,1	45,5	2,59
13	Vollenhovese schuit VS86	8,22	29,8	23,9	2,07	4,3	51,9	2,70
14	Tholense hoogaars TH 35	9,72	25,2	26,1	1,61	3,9	59,2	2,57
15	Hengst CLM 1	8,73	27,5	32,2	2,36	3,2	46,5	2,18
16	Zeeuwse schouw BZ 1	9,39	26,9	28,1	1,98	3,7	33,4	5,22
17	Boeier 'Phoenix'	7,70	26,5	-	-	-	57,4	-
18	Boeier 'Constanter'	6,90	23,6	81,6	3,68	1,57	58,0	3,00
19	Visaak 'Dolphijn'	5,61	27,1	74,0	4,69	1,57	37,0	4,00
20	Fries jacht 'Nut en nocht'	5,23	29,6	77,0	5,74	1,53	34,0	4,62
21	Fries jacht 'Mercurius'	6,12	22,1	96,0	3,87	1,26	47,0	3,12
22	Fries jacht 'Poseidon'	4,65	21,5	107,0	4,12	1,12	-	-
23	Fries jacht 'Argo'	5,66	25,8	94,3	5,28	1,26	40,0	4,23
24	Tjotter 'Albert en Nelly'	4,21	24,4	105,4	5,36	1,11	26,4	3,65

Lwl = Lengte waterlijn zonder stevens (deplacementslengte)
 Lok = Lengte onder de zwaardklamp bij pijlhoek 0°
 B = Breedte op de halve lengte onder de zwaardklamp
 Opvl = Zwaardoppervlak onder de zwaardklamp
 Zeil opvl. = Oppervlak grootzeil + (botter)fok

formules vastgelegd. Daarbij blijkt dat er een duidelijk verschil bestaat tussen vissersschepen enerzijds en boeiers (met inbegrip van Friese jachten en tjotters) anderzijds, maar ook dat de individuele afwijkingen vrij groot zijn. In fig. 3a is de lengte van het zwaard uitgezet op basis van de lengte op de waterlijn. Voor de vissersschepen blijkt er een rechtlijnig verband te zijn. Bij de boeiers is er een duidelijke invloed van de beperkte waterdiepte in Friesland. Merkwaardig is daarbij dan weer de geringe lengte bij de allerkleinste schepen. Fig. 3b geeft het verband tussen lengte waterlijn en zwaardoppervlak, terwijl fig. 3c laat zien dat in het algemeen een groot zwaardoppervlak samengaat met een groot zeiloppervlak.

In Tabel 1 is ook het verschil in aspectverhouding (B/Lok in %, 3e kolom) tussen bidders en boeiers zeer uitgesproken. Hierop zal later worden teruggekomen.

Niet in de tabel vermeld, maar wel merkwaardig, is het grote verschil in inclinatie. Terwijl deze voor tjalken praktisch nul is en voor bidders ongeveer 15° bedraagt, is die bij boeiers 30° of meer.

5. EEN STUKJE DRAAGVLEUGELTHEORIE

Een draagvleugel kunnen wij omschrijven als een lichaam dat, geplaatst in een stroming, een kracht loodrecht op die stroming (liftkracht) kan ondervinden die veel groter is dan de gelijktijdig optredende kracht evenwijdig aan die stroming (weerstandskracht).

Draagvleugels zijn erg belangrijk voor de scheepvaart. Immers:

- * Zeilen zijn draagvleugels.
- * Schroefbladen zijn draagvleugels.
- * Roeren zijn draagvleugels.
- * Kielen zijn draagvleugels.
- * En natuurlijk is ook een zwaard een draagvleugel.

Zodra het schip vaart maakt, wordt de druk van het water aan beide zijden van het zwaard verschillend. Dat komt doordat het langsstromende water aan de ene zijde, meestal de bolle binnenkant, wordt versneld, waardoor daar volgens de Wet van Bernouilli een drukverlaging ontstaat, terwijl aan de andere zijde, de buitenkant, het water minder versneld of zelfs vertraagd wordt, hetgeen daar een drukverhoging veroorzaakt. De

Zwaardlengte onder de klamp m

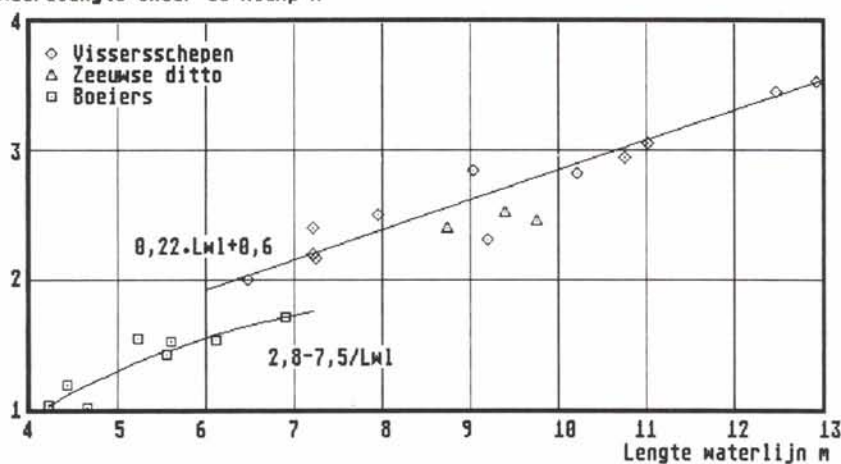


Fig. 3a VERBAND TUSSEN ZWAARD- EN SCHEEPSLENGTE

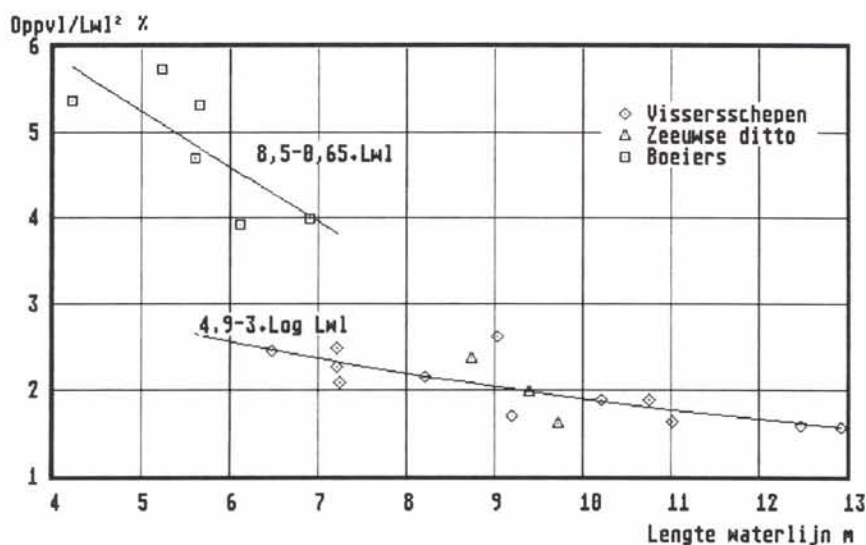


Fig. 3b VERBAND TUSSEN LENGTE EN ZWAARDOPPERVLAK

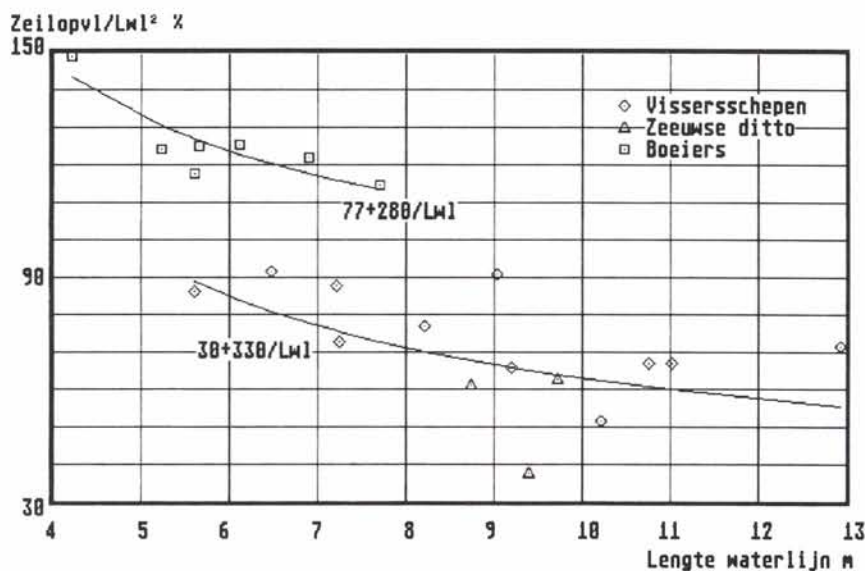


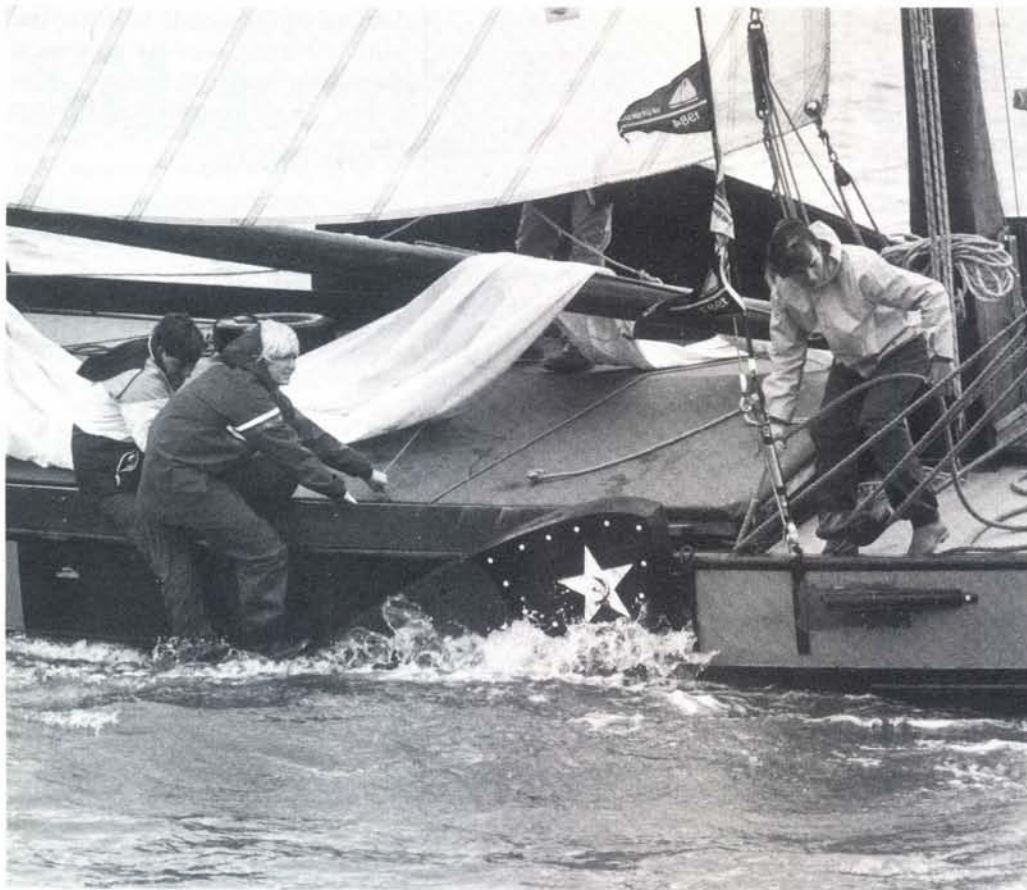
Fig. 3c VERBAND TUSSEN LENGTE EN ZEILOPPERVLAK

de drukverhoging aan de buitenkant veroorzaken op elk punt van het zwaard een krachtje loodrecht op het oppervlak, afgezien van een kleine afwijking door de wrijving. Al die krachtjes samen leveren een totaal-kracht; die kan worden ontbonden in een component loodrecht op de stromingsrichting die „lift” wordt genoemd, en een component evenwijdig aan de stromingsrichting, de „weerstand”.

Veelal rekenen wij niet met krachten maar met coëfficiënten, bijvoorbeeld de liftcoëfficiënt C_l . Dat is de lift, gedeeld door het werkzame oppervlak en de stuwdruk van het water, $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2$. Op soortgelijke wijze definiëren wij de weerstandscoëfficiënt C_w . Bij een zwaard is de stromingsrichting tegengesteld aan de koers en de lift is de gewenste dwarskracht.²⁾ Bij een draagvleugel heet de doorsnede in de stromingsrichting het „profiel”. De eigenschappen van dat profiel bepalen voor een belangrijk deel het gedrag van de draagvleugel. Deze profieieigenschappen kunnen afzonderlijk worden bestudeerd. Wij doen dan alsof de draagvleugel oneindig lang is en een constant profiel heeft.

Een vleugelprofiel heeft een bepaalde invalshoek waarbij de lift = 0 wordt. Dat noemen wij de „nullifhoek”. Als de invalshoek groter wordt, neemt de lift in het begin ongeveer recht evenredig toe met de invalshoek en bereikt een maximum. Wordt de invalshoek daarna nog groter, dan neemt de lift min of meer abrupt zelfs enigszins af, terwijl de weerstand heel sterk toeneemt. Wij zeggen dat het profiel „overtrokken” raakt. Zowel bij een vliegtuigvleugel als bij een zwaard treedt dit ook op, maar meer geleidelijk, want door diverse oorzaken begint het overtrokken raken meestal niet gelijktijdig op elke doorsnede.

Het drukverschil tussen de boven- en de onderzijde van de draagvleugel veroorzaakt ook een omstroming aan de beide uiteinden ervan, de vleugeltips; daardoor neemt dat drukverschil - en daarmee ook de lift - naar de einden toe af. Deze omstroming gaat gepaard met energieverlies; dat veroorzaakt een weerstandsvergroting, die de „geïnduceerde weerstand” wordt genoemd. Het spreekt wel haast vanzelf dat de grootte van deze geïnduceerde weerstand relatief kleiner wordt naarmate de vleugel slanker is of, anders gezegd,



Het is de kunst het zwaard direct omlaag te krijgen voor er druk op staat.
Foto: Theo Kampa.

naarmate die een grotere aspectverhouding heeft.

Die „aspectverhouding” van een draagvleugel wordt gedefinieerd als de spanwijdte - kortweg „span” genoemd - gedeeld door de gemiddelde breedte. Dit komt overeen met $\text{span}^2/\text{oppervlak}$.

Voor een zwaard is de „span” gelijk aan de diepgang ervan, dus niet aan de lengte. De aspectverhouding wordt aangeduid als A_g ; de „g” duidt op „geometrisch”, ter onderscheiding van de „effectieve” aspectverhouding A_e . Bij een zwaard is immers aan de bovenzijde geen omstroming. Daardoor is de A_e (ongeveer) tweemaal zo groot als de A_g .

De omstroming van de uiteinden neemt natuurlijk toe als het drukverschil tussen de beide zijden groter wordt, dus bij groter wordende liftcoëfficiënten. Proefondervindelijk is vastgesteld dat die toename van de omstroming en daarmee van de geïnduceerde weerstand, evenredig is met het kwadraat van de liftcoëfficiënt.

De omstroming heeft nog een ander effect: de invalshoek, nodig voor het verkrijgen van een bepaalde lift, wordt groter. Als de liftcoëfficiënt nul is, is er ook geen omstroming, dus de nulliftheok verandert niet.

Met behulp van deze elementaire begrippen kunnen wij nu trachten inzicht te verkrijgen in een probleem waarover al veel te doen is geweest, namelijk het uitscheren of opstromen van het zwaard.

6. HET UITSCHEREN OF OPSTROMEN VAN HET ZWAARD

Onder „opstromen” verstaat men het verschijnsel dat het zwaard, zelfs bij aan-de-wind varen, los komt van de strijklamp en dwars uitscheert. Het kan dan alleen weer diep worden gestoken door het eerst op te halen. Intussen verliest het schip vaart en hoogte. Veel jachtschippers hebben hiermee te kampen.

Ook bij het door-de-wind gaan zijn er dan problemen. Valt het zwaard te vroeg, dan scheert het uit. Valt het later, dan wordt het meteen zo hard tegen de strijklamp gedrukt dat het alleen nog met de pikhaak naar beneden kan worden geduwd. De verklaring van dit fenomeen werd tenslotte gevonden aan de hand van een boek bestemd voor piloten in opleiding.³⁾ Dat uitscheren blijkt samen te hangen met de langsscheepse ligging van het „drukpunt”, dat is het aan-

grijpingspunt van de dwarskracht, de lift.

Bij symmetrische profielen zoals een kiel, een midzwaard of het zwaard van een tjalk, ligt het druppunt op ongeveer 25 % à 30 % van de profiellengte, van voren af gerekend; het blijft vrijwel op die plaats, ongeacht de invalshoek, zolang het profiel niet overtrokken raakt. Zo'n profiel noemen wij „drukpuntvast”.

Vooraf bij lange, slanke zwaarden zijn de profielen echter vaak sterk asymmetrisch met een bolle en een holle zijde. Zulke profielen zijn in het algemeen niet druppuntvast. Zolang de liftcoëfficiënt C_l positief en tamelijk groot is, dus bij hoog-aan-de-wind varen, is er geen probleem; het druppunt ligt ook dan ongeveer op een kwart tot een derde van de lengte van het profiel. Bij varen met ruime wind is de benodigde dwarskracht echter kleiner. Ook is de snelheid dan groter dan bij hoog-aan-de-wind varen; daardoor kan die kleinere dwarskracht worden bereikt met een veel kleinere liftcoëfficiënt. Daarbij verplaatst het druppunt zich naar achteren. Wordt de liftcoëfficiënt heel klein, dan ligt het druppunt zelfs ver achter het zwaard; daardoor kantelt het en nu wordt uitscheren onvermijdelijk.

Als een zwaard bij het door-de-wind gaan iets te vroeg wordt neergelaten, dan kan op dat moment de dwarskracht nog van het schip af gericht, dus negatief zijn, zodat het zwaard niet tegen de strijklamp zal gaan liggen. Maar bij een niet druppuntvast zwaard ligt het druppunt dan juist ver voor het zwaard. Zodoende wordt het zwaard niet alleen van het schip los gedrukt, maar het kantelt ook nog met de voorkant naar buiten en scheert helemaal uit. Omdat het zwaard bij een negatieve liftcoëfficiënt niet tegen de strijklamp wordt gedrukt, wordt het kantelen nu alleen bepaald door de relatieve plaatsen van druppunt en ophangpunt ten opzichte van elkaar. Als het druppunt zich achter het ophangpunt bevindt, zal het zwaard naar het schip toe kantelen. Inderdaad zien we bij botterzwaarden vaak dat het ophangpunt zich voor het midden bevindt, ongeveer op het verlengde van de kwartkooorde lijn.

Dat het druppunt buiten het zwaard kan liggen, hetzij er voor of er achter, zal op het eerste gezicht vreemd lijken. Het volgt echter uit de definitie van het druppunt. Dat is namelijk het

punt waardoor een denkbeeldige kracht gaat die even groot is als de som van alle waterkrachtjes, maar die ook hetzelfde moment uitoefent ten opzichte van een vast punt, bijvoorbeeld de voorkant van het profiel, als alle waterkrachtjes samen. Nu werkt bij een kleine liftcoëfficiënt de waterdruk meestal niet meer over het hele oppervlak in dezelfde richting. Als we dan te maken krijgen met twee krachten die bijna even groot zijn, dan vormen die een groot koppel terwijl zij maar een kleine resultante hebben. Vervangen we de tegengestelde krachten door hun resultante, dus hun verschil, dan moet dat kleine verschil toch een groot moment leveren. Dat kan alleen als de arm lang is en die lange arm is dan al gauw groter dan de breedte van het zwaard. Als de drukverdeling echter zo is dat er feitelijk drie krachten zijn, één in het midden in één richting en aan elk uiteinde één in de tegengestelde richting, dan zal het resulterend moment maar klein zijn en het aangrijpingspunt van de resultante blijft vrijwel op zijn plaats.

Dat is het geval bij symmetrische profielen. Maar bij de voor botterzwaarden gewenste grote liftcoëfficiënten zijn die ongunstig uit een oogpunt van weerstand, terwijl ze bovendien een grote invalshoek nodig hebben. Een betere oplossing is dus om asymmetrische profielen te ontwerpen die wel drukpuntvast zijn.

Verklarende woordenlijst

A_g : geometrische aspectverhouding

A_e : effectieve aspectverhouding

C_l : liftcoëfficiënt

C_w : weerstandcoëfficiënt

aspectverhouding: spanwijdte/gemiddelde breedte = $\text{span}^2/\text{oppervlak}$

dikteverhouding t/c: grootste dikte/lengete koorde

drift: de hoek tussen de gevaren koers en het l.s.v.

geïnduceerde weerstand: extra weerstand door zijdelingse omstroming van een vleugeltip

inclinatie: de hoek tussen het vlak van het gestoken zwaard en het l.s.v.

koorde: de lengte van het profiel

kwart-koorde-lijn: lijn evenwijdig aan de lengte-as van het zwaard, op 1/4 van de lengte vanaf de voorzijde

langsscheeps symmetrievlak (l.s.v.): het vlak door kiel en stevens

liftkracht: opgewekte kracht, loodrecht op de stroming

Lok: Lengte onder de (strijk-)klamp

l.w.l.: lengte op de waterlijn = lengte van de romp op de waterlijn, zonder de stevens

nullifhoek: invalshoek waarbij de lift van een profiel = 0

omtrek: de omtreksvorm van een zijzwaard, in het zijaanzicht van een schip

opstromen: door uitscheren gaat het zwaard opdrijven

profiel: doorsnede, loodrecht op de lengte-as van het zwaard

pijlhoek: de hoek tussen de voorzijde van het zwaard en de verticaal

span: bij een zwaard: de diepgang ervan (niet de lengte)

toespoor: de hoek tussen de buitenkant van de strijkklamp en het l.s.v.

uitscheren: het zwaard beweegt zich van de strijkklamp af

weerstandskracht: opgewekte kracht in de richting van de stroming

Volgens het genoemde boek kan dat worden bereikt door de achterrand enigszins omhoog te buigen of te „tillen”. De aërodynamica bevestigt daarmee wat de oude botterbouwers in de praktijk hadden gevonden. Anderzijds mag de intreekant juist niet getild zijn. Ook dat klopt dus met het profiel volgens fig. 2.

De vraag is echter: hóveel opbuigen? Brouwer zegt daar niets over en in het genoemde standaardwerk van Abbott & Van Doenhoff wordt het begrip „drukpuntvast” zelfs niet genoemd. toch is het mogelijk met behulp van de daarin gepubliceerde gegevens tot een oplossing te komen die bruikbaar is voor het ontwerpen van zijzwaarden.

¹⁾ Vrijwel alle gebruikte informatie is ontleend aan „Theory of Wing Sections including a summary of Airfoil Data, by Ira H. Abbott and Albert E. von Doenhoff”, een uitgave van Dover Publications Inc., New York, 1959.

²⁾ Voor wie graag rekt maar in deze materie niet zo goed thuis is: ρ is de dichtheid (de massa). In het MKS-stelsel is dat het soortelijk gewicht gedeeld door de versnelling van de zwaartekracht. Voor zoet water is $\frac{1}{2}\rho = 51$ en voor zeewater $2\frac{1}{2}\%$ meer. De formules gelden eveneens voor lucht; dan is $\frac{1}{2}\rho = 0,0625$. (Althans voor de standaardatmosfeer op zeeniveau.) V is de stromingssnelheid in m/s.

³⁾ C. H. Brouwer: Aërodynamica Voor Vliegtuigen, een uitgave van Delta Press B.V.

(wordt vervolgd)