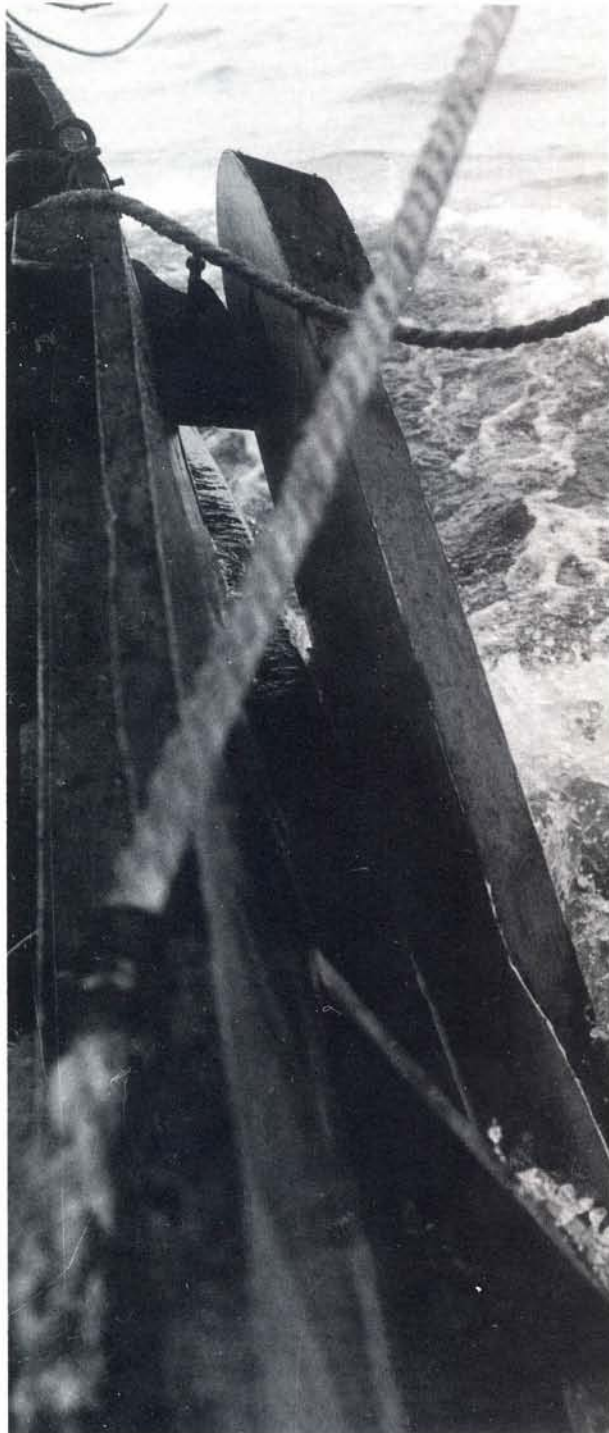


TEKST EN ILLUSTRATIES:
IR. H. VREEDENBURGH

deel 2

In twee afleveringen worden respectievelijk het ontwerpen van vleugelprofielen en mogelijke verbeteringen aan zwaarden behandeld. Geen eenvoudige materie, maar om goed te kunnen varen hebben we goede zwaarden nodig voor onze ronde- en platbodemjachten.



Foto's: Theo Kampa

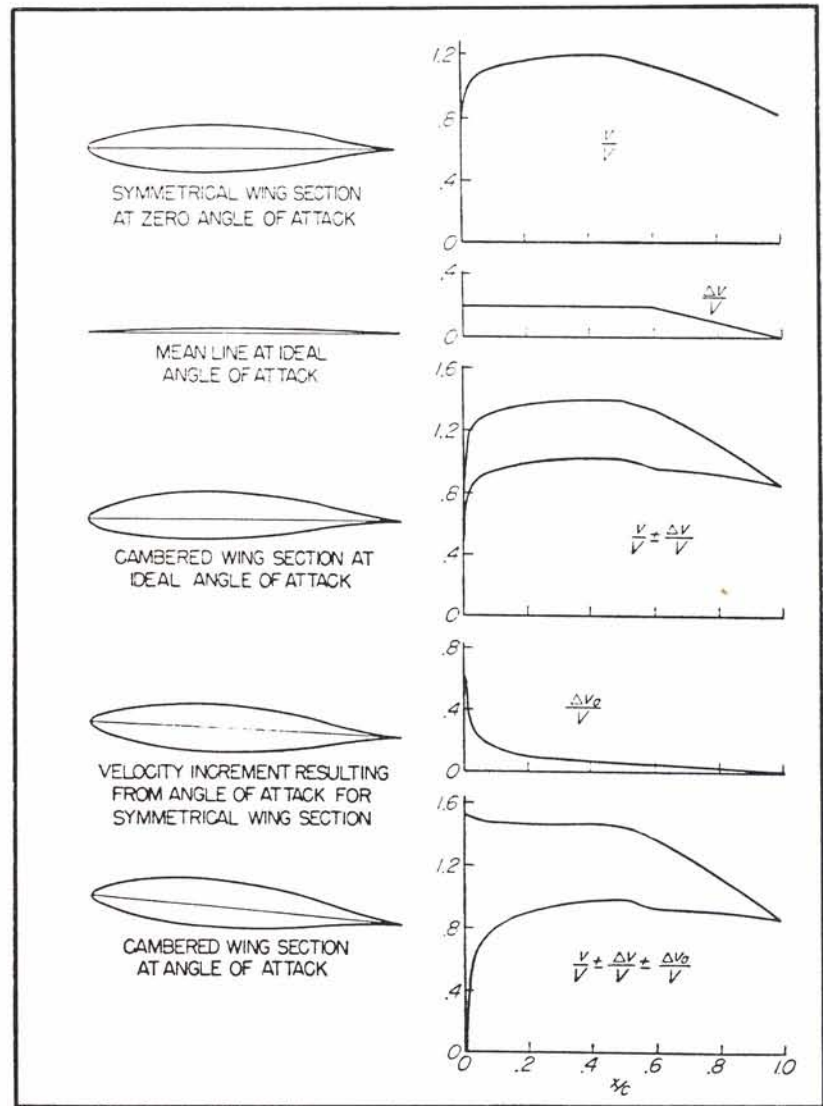


Fig. 4 SAMENSTELLING VAN DE DRUKVERDELING OVER EEN PROFIEL

7. ONTWERPEN VAN EEN VLEUGELPROFIEL

In een vleugelprofiel kan men zich een middellijn of „skeletlijn” denken; in een asymmetrisch profiel is die uiteraard gebogen. Rond 1930 heeft men vastgesteld dat de snelheidsverdeling over beide zijden van een willekeurig asymmetrisch profiel kan worden gevonden door drie componenten bij elkaar op te tellen, die men elk afzonderlijk kan meten en/of berekenen. Zie fig. 4.

* De eerste component wordt bepaald door de vorm van het sym-

metrische profiel in een stroming evenwijdig aan zijn symmetrielij. Het verloop van de druk - en daarmee van de snelheid - over de lengte van het profiel is dan uiteraard aan beide zijden gelijk.

* Vervolgens kunnen we de rechte middellijn vervangen door een gebogen skeletlijn. Deze haalt als het ware de snelheden op tegenover elkaar liggende punten uit elkaar.

* De derde component geeft de invloed van een wijziging in de invalshoek van de stroming.

* Drukken zijn evenredig met het kwadraat van de snelheden. De

plaatselijke drukverschillen zijn dus ook evenredig met het kwadraat van de plaatselijke snelheidsverschillen. Geïntegreerd over de lengte van het profiel geeft dat dan de totale druk.

Ook bleek dat de eigenschappen van een skeletlijn recht evenredig zijn met de welving daarvan en dat men de ordinaten en de snelheids- en drukverdelingen van verschillende skeletlijnen eenvoudig bij elkaar mag optellen. Dit gaf nieuwe mogelijkheden: uitgaande van een beperkt aantal skeletlijnen plus symmetrische profielen van oplopende dikteverhoudingen kan men een vrijwel oneindig aantal vleugelprofielen ontwerpen en hun drukverdeling bepalen. Windtunnelproeven hebben aangetoond dat deze methode voldoende nauwkeurig is voor technische toepassingen, althans voorzover het profiel niet „overtrokken” raakt. Voor het beoordelen van het al of niet opstromen van een zwaard lijkt deze werkwijze dan ook verantwoord.

Voor de praktische uitvoering heb ik een computerprogramma geschreven waarmee de gegevens van een groot aantal skeletlijnen en symmetrische profielen in elke willekeurige verhouding kunnen worden gemengd. Omdat een zwaardprofiel nu eenmaal in een gegeven plank moet passen, moet daarbij tevens worden voldaan aan de eis dat de omgeschreven rechthoek van het profiel een bepaalde dikte-lengteverhouding heeft. Het programma berekent dan de ordinaten van de skeletlijn en van de boven- en onderzijde van het profiel. Vervolgens wordt de drukverdeling over de lengte van het profiel berekend en daaruit dan weer de grootte van de resultante - dus de lift - en ook het aangrijpingspunt van die resultante, het drukpunt. Dat alles voor diverse liftcoëfficiënten van negatief tot positief.

Na veel gis- en miswerk bleek het tenslotte mogelijk drukpuntvaste profielen te ontwerpen met een voor zwaarden bruikbare vorm, uitgaande van slechts twee skeletlijnen en twee symmetrische profielen. Daarbij bleek echter dat de „mengverhou-

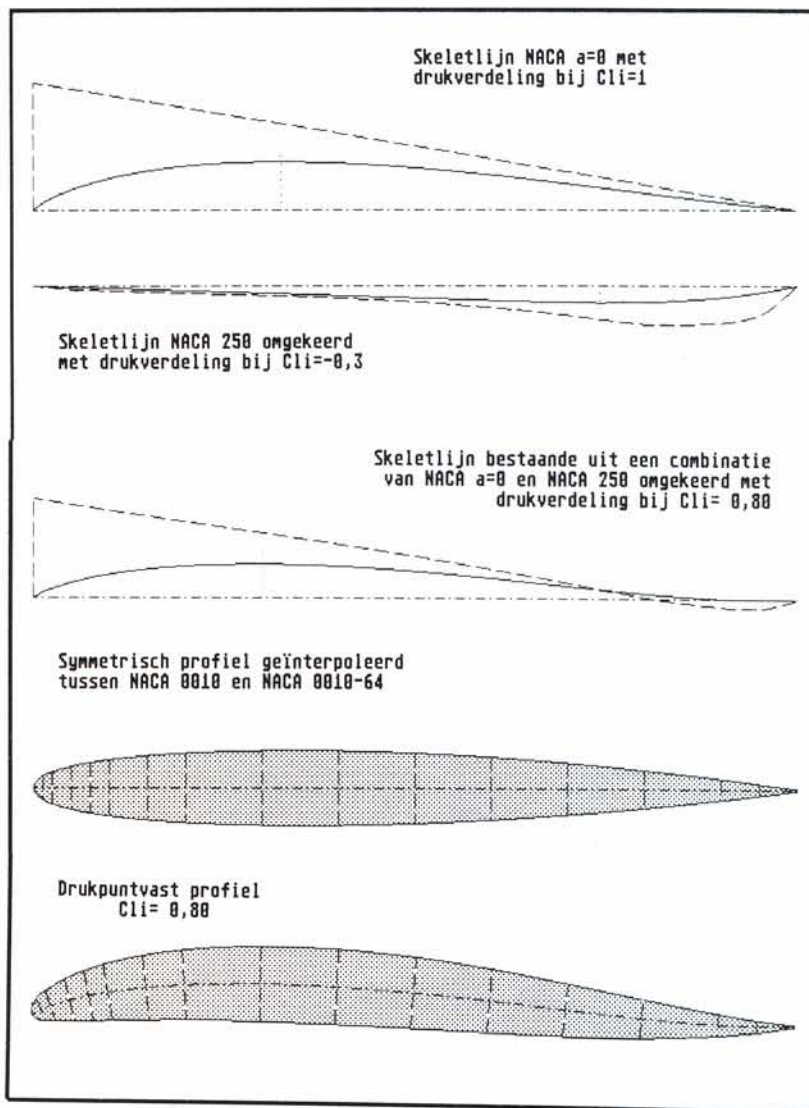


Fig. 5 HOE EEN DRUKPUNTVAST PROFIEL WORDT OPGEBOUWD

ding” van de twee skeletlijnen, waarbij het profiel drukpuntvast is, afhankelijk is van dikteverhouding t/c van het profiel en van de plaats van de grootste dikte. Deze mengverhouding kon in een formule worden vastgelegd en daarmee was de mogelijkheid geopend drukpuntvaste profielen te ontwerpen met willekeurige dikteverhoudingen en een willekeurige plaats van de grootste dikte.

In fig. 5 zijn de beide gebruikte skeletlijnen getekend en ook een gecombineerde skeletlijn. Daarbij is de zogenaamde ideale liftcoëfficiënt C_{li} vermeld. Deze C_{li} kunnen we in dit verband het best opvatten als een vormfactor van de skeletlijn: Hoe groter de C_{li} , hoe groter de welving. De uiteindelijk gekozen symmetrische profielen zijn NACA 0010 en NACA 0010-64. Deze hebben beide een t/c van 10 % en de grootste dikte respectievelijk op 30 % en 40 % van de

lengte. Voor andere dikteverhoudingen worden de eigenschappen van de profielen door extrapolatie bepaald. Hoewel dit theoretisch niet geheel juist is, lijkt het binnen de voor botterzwaarden gebruikelijke grenzen toelaatbaar. Eveneens in fig. 5 is een symmetrisch profiel getekend en hetzelfde profiel, gebogen rond de skeletlijn die drukpuntvastheid geeft. Fig. 6 geeft enkele voorbeelden van de dwarskrachtverdeling bij andere liftcoëfficiënten dan waarvoor de skeletlijn ontworpen is. Ofschoon de drukverdelingen onderling sterk verschillend zijn blijkt het drukpunt op zijn plaats te blijven. Een niet „getild” profiel gedraagt zich totaal anders. Dat is geïllustreerd in fig. 7.

Lang niet alle profielen die op deze wijze kunnen worden gemaakt zijn bruikbaar voor zwaarden. Zo is het zinloos een zwaard aan de buitenkant bol te maken. Dit bepaalt de mi-

nimumwaarde van C_{li} . Ook mag de uitholling niet te groot worden, want dan verzwakt het zwaard teveel. Zoals we nog zullen zien, is het nuttig de uitholling te laten toenemen van nul iets onder de zwaardklamp tot een maximum ter plaatse van doorsnede A. De waarde van C_{li} waarbij de uitholling een bepaald percentage van de plankdikte bereikt, blijkt te kunnen worden vastgelegd als eenvoudige functie van de verhouding van de plankdikte tot de gemiddelde zwaardbreedte. In fig. 8 zijn de drie profielen A, B en C getekend voor een bepaald zwaard, waarvan de gemiddelde breedte 586 mm bedraagt bij een plankdikte van 60 mm.

Profielen, zoals in fig. 5 en fig. 8 zijn aan de achterzijde erg dun en lopen vrijwel op nul uit. Bij zwaarden is dit moeilijk te realiseren. Men kan ze echter zonder bezwaar wat dikker

aanwijzingen dat de tilling kleiner kan worden naarmate de achterzijde dikker gemaakt wordt. Helaas ontbreken voldoende gegevens om dit te kwantificeren.

8. MAXIMUM LIFTCOËFFICIËNT

Een belangrijke vraag is bij welke liftcoëfficiënt een profiel overtrokken raakt. Nieuwere profielgegevens, zoals gepubliceerd in het boek van Abbott & von Doenhoff, hebben vooral betrekking op weinig gewelfde en niet getilde profielen. In een NACA-publicatie uit 1932, (REPORT No. 460) staan echter gegevens die het mogelijk maken de invloed van grotere welvingen na te gaan. Ook zijn daarin een tweetal getilde profielen opgenomen. Een voor zwaarden belangrijke conclusie uit dat oude onderzoek is dat bij sterk gewelfde profielen, zoals van

botterzwaarden, de maximum liftcoëfficiënt - aangeduid als C_{lm} - bereikt wordt bij een wat kleinere dikteverhouding dan bij de flauw gebogen profielen van moderne vliegtuigvleugels. Verder blijkt het volgende:

- * Bij 6 % welving ligt de C_{lm} bij een dikteverhouding t/c van circa 10 % en bedraagt 1,66.
- * Bij gelijkblijvende t/c daalt de C_{lm} met afnemende welving. Ook is de afname bij gelijke t/c sterker bij kleine dan bij grote welvingen.
- * Het getilde profiel heeft een C_{lm} die ongeveer 0,1 kleiner is dan van het niet getilde profiel met dezelfde t/c .
- * Verkleining van de afrondingsstraal aan de voorkant van het profiel ten opzichte van de standaardwaarde verlaagt de C_{lm} . Een vergroting heeft praktisch geen invloed op de C_{lm} . Dit is een nuttig gegeven bij

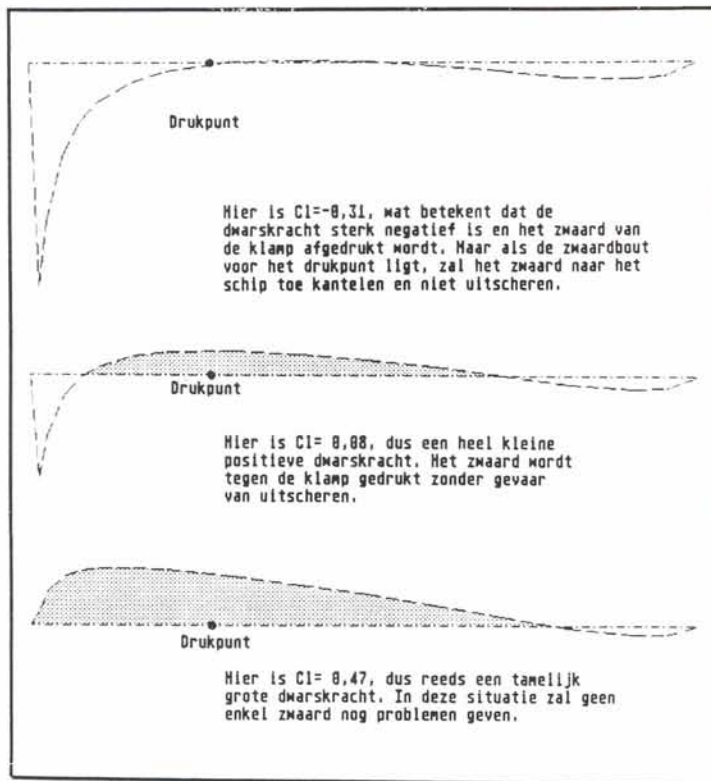


Fig. 6 DWARSKRACHTVERDELING VAN EEN DRUKPUNTVAST PROFIEL

maken, mits evenveel onder als boven de skeletlijn. Dit veroorzaakt slechts een relatief geringe toename van de totale weerstand en heeft geen nadelige invloed op de drukpuntvastheid. Eerder het tegendeel: er zijn

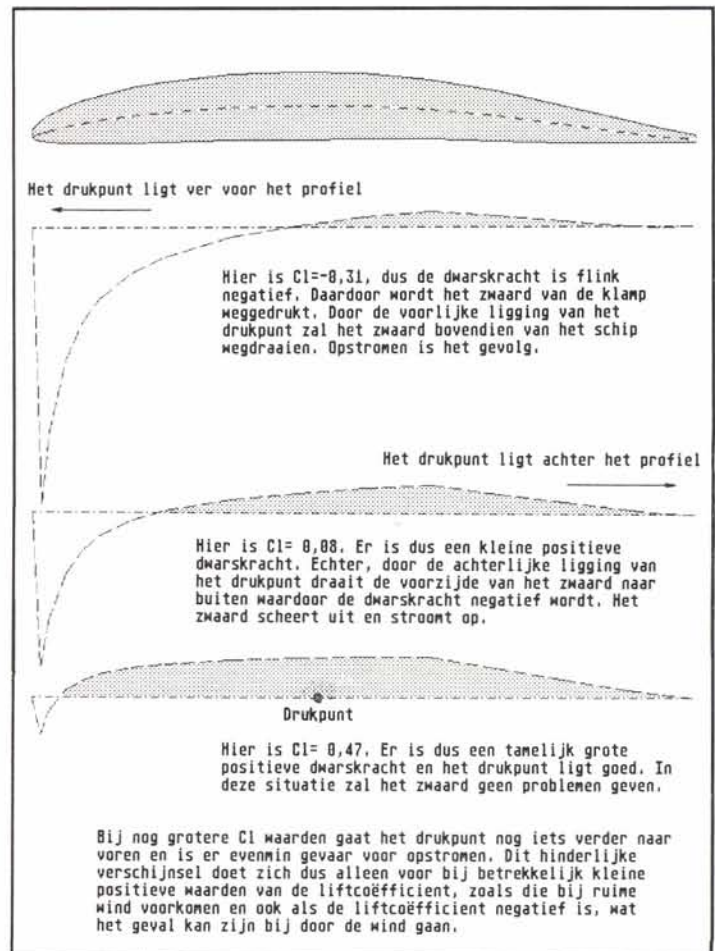


Fig. 7 NIET DRUKPUNTVAST PROFIEL EN DWARSKRACHTVERDELING

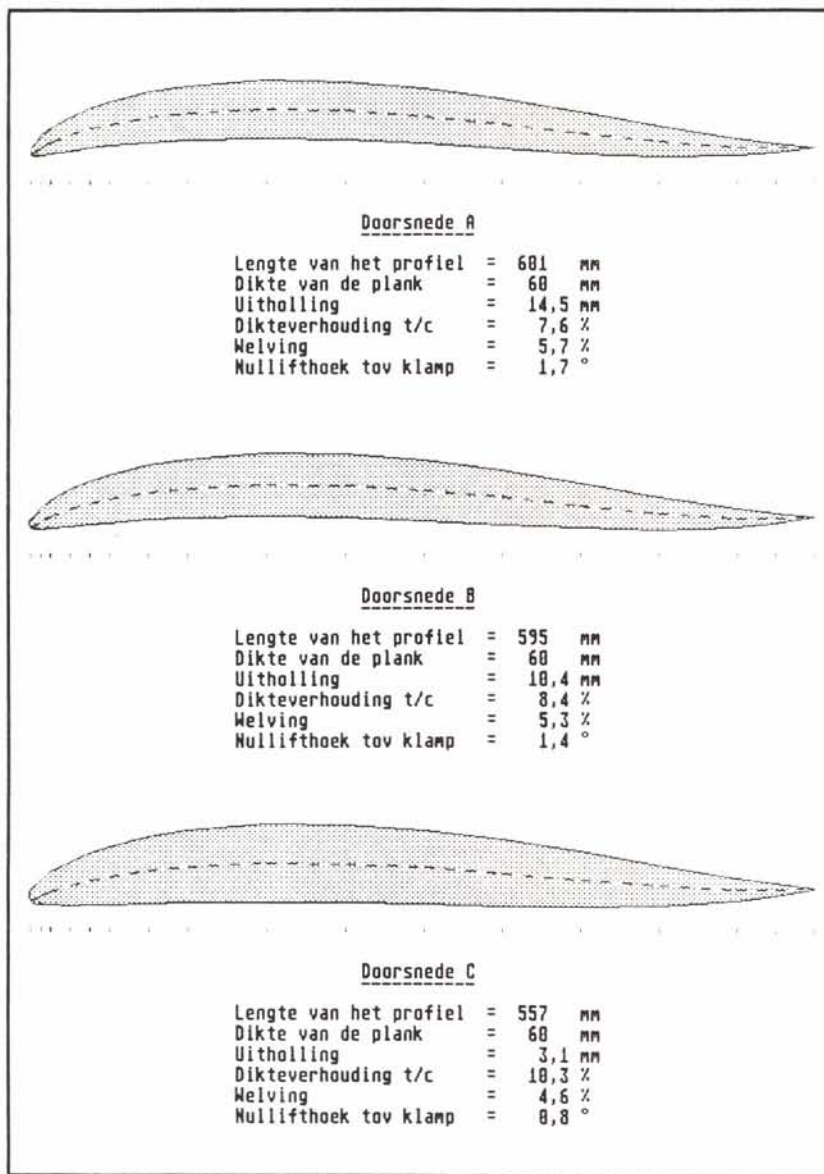


Fig. 8. ZWAARDPROFIELEN

de keuze van het beslag op de voorkant van het zwaard.

* Voor een symmetrisch profiel met een t/c van 6 % is een Cl_m van 0,86 gemeten.

In latere publikaties zijn naast de meetresultaten voor gladde profielen ook steeds de waarden vermeld met de zgn. „standard roughness”. In feite is deze ruwheid nog zeer gering en het is niet aan te nemen dat zwaarden gladder kunnen zijn. De reductie van de maximum liftcoëfficiënt door de „standard roughness” ligt voor 12 % t/c in de grootte-orde van 0,4 en neemt af tot vrijwel nul voor een symmetrisch profiel met t/c = 6 %.

Bij een zwaard is de liftcoëfficiënt niet constant over de lengte. Er is dus altijd een plaatselijk maximum dat groter is dan de gemiddelde waarde. We zullen nog zien dat het mogelijk is dit

plaatselijk maximum te beperken tot circa $1,1 \times$ de gemiddelde waarde.

Volledigheidshalve moet ook worden vermeld dat de geciteerde onderzoeken zijn uitgevoerd bij getallen van Reynolds die 3 tot $6 \times$ groter waren dan wat bij een zwaard is te verwachten. Dit zal een verdere, zij het geringe verlagings van de maximum liftcoëfficiënt ten gevolge hebben, doch de grootte daarvan is moeilijk te bepalen.

Uit het voorgaande kan worden besloten dat de gemiddelde liftcoëfficiënt waarbij een zwaard overtrokken begint te raken ten hoogste $(1,66 - 0,1 - 0,4) / 1,1 = 1,05$ zal bedragen, welke waarde bereikt wordt bij een t/c van 10 %. Voor dunnere profielen lijkt een rechtlijnige afname volgens de formule $Cl_m = 0,45 + 6 \cdot t/c$ tot een minimum van 0,78 een aanvaardbare veronderstelling.

Verder moeten we nog bedenken dat het water nagenoeg horizontaal stroomt, ook als het zwaard niet verticaal staat. Voor een waterdeeltje lijkt het profiel daardoor langer bij gelijke dikte. Daardoor wordt de schijnbare t/c kleiner. Dit heeft tot gevolg dat de maximum liftcoëfficiënt van een zwaard afneemt evenredig met de cosinus van de pijlhoek.

9. MEER OVER DE IDEËLE LIFTCOËFFICIËNT EN DE ONTWERP-LIFTCOËFFICIËNT

Zoals gezegd wordt de vorm van een zwaardprofiel onder andere bepaald door de welving van de skeletlijn, uitgedrukt door de waarde van de ideële liftcoëfficiënt Cl_i . Voor het profiel B op halve lengte van een botterzwaard is na enig proberen gebleken dat een goede vorm met een redelijke uitholling ontstaat als Cl_i voldoet aan de formule:

$$Cl_i = 7,4 \cdot p/c \quad (1)$$

Hierin is p/c de verhouding van de plankdikte tot de lengte van de profielkoorde. De uitholling bedraagt dan ongeveer 17 % van de plankdikte. De maximum liftcoëfficiënt van de doorsnede B, en daarmee van het zwaard, kan nu worden uitgedrukt als een functie van p/c in plaats van t/c:

$$Cl_{max} = (0,45 + 5 \cdot p/c) \cdot \cos(\text{pijlhoek}) \quad (2)$$

$$0,78 \leq Cl_{max} \leq 1,05$$

De minimumwaarde van p/c moet worden bepaald uit een oogpunt van sterkte. Anderzijds zal de pijlhoek zelden minder dan ongeveer 15° bedragen. Daarmee is de Cl_{max} bepaald. Het ligt voor de hand dat de ontwerpliftcoëfficiënt Cl_o van het zwaard lager moet liggen dan de Cl_{max} , om overtrekken van het zwaard te vermijden en een beperking tot 80 % van Cl_{max} lijkt een goed uitgangspunt. In tabel 2 zijn t/c, Cl_{max} , Cl_i en Cl_o gegeven als functie van p/c voor de genoemde pijlhoek en uitholling.

TABEL 2. AANGENOMEN LIFTCOEFFICIENTEN BIJ PIJLHOEK 15° EN 17% UITHOLLING

p/c%	t/c%	Clmax	Cl _i	Cl _o
6,0	5,0	0,78	0,44	0,62
6,5	5,4	0,78	0,48	0,62
7,0	5,8	0,78	0,52	0,62
7,5	6,2	0,79	0,56	0,63
8,0	6,6	0,82	0,59	0,65
8,5	7,0	0,84	0,63	0,67
9,0	7,4	0,87	0,67	0,69
9,5	7,8	0,89	0,70	0,71
10,0	8,3	0,91	0,74	0,73
10,5	8,7	0,94	0,78	0,75
11,0	9,1	0,96	0,81	0,77
11,5	9,5	0,99	0,85	0,79
12,0	9,9	1,01	0,89	0,81
12,5	10,3	1,03	0,92	0,83
13,0	10,7	1,05	0,96	0,84

p/c = Dikteverhouding v.d. plank
t/c = Idem v.h. profiel

Clmax = Maximum liftcoëfficiënt
= (0,45+5·t/c)·cos(pijlhoek)
0,78 ≤ Clmax ≤ 1,05

Cl_i = 7,4·p/c
= ontwerpliftcoëfficiënt van profiel B

Cl_o = 0,8·Clmax
= ontwerpliftcoëfficiënt van het zwaard

10. DE WEERSTAND VAN HET ZWAARD

Het zwaard levert dwarskracht, maar ondervindt daarbij weerstand. Die weerstand bestaat uit verschillende componenten.

- * In de eerste plaats is er de geïnduceerde weerstand, waarover reeds gesproken werd. Deze wordt enigermate beïnvloed door de eventuele wrong of twist, dat is het verschil in nullifthoek over de lengte van de draagvleugel. Bij een goed zwaard is deze invloed vrij gering.
- * Dan is er de profielweerstand. Deze bereikt een minimum bij een bepaalde waarde van de liftcoëfficiënt. Zowel bij kleinere als grotere liftcoëfficiënten neemt de profielweerstand enigszins toe, om bij overtrekken stijl omhoog te gaan.
- * Ook moet het onmisbare zwaardval door het water worden gesleurd. De weerstand daarvan kan vrij groot zijn, vooral wanneer het val van dik touw is gemaakt, zoals op botters gebruikelijk was.
- * Het zwaard doorsnijdt het wateroppervlak en zal daar golven veroorzaken: dat kost energie. Anders gezegd: er is golfweerstand. Deze is niet eenvoudig te berekenen. Uit een ruwe schatting bleek echter dat de golfweerstand relatief gering is.

De som van alle weerstandscomponenten gedeeld door de lift, aangeduid als W/D, is een maat voor de efficiency van het zwaard. In fig. 9 zijn de afzonderlijke weerstandcoëfficiënten en ook de W/D uitgezet op basis van de liftcoëfficiënt Cl. De krommen stoppen bij de maximum liftcoëfficiënt omdat daarboven het verloop onvoorspelbaar wordt. Het blijkt dat de W/D kromme naar ho-

gere waarden van Cl tamelijk vlak verloopt maar sterk toeneemt als Cl klein wordt. In dat gebied komen we als niet maximaal hoog aan de wind wordt gevaren. Immers, bij ruimere wind is er minder dwarskracht nodig terwijl de snelheid groter is. Het zwaard kan daardoor de benodigde dwarskracht leveren met een veel kleinere liftcoëfficiënt. Om deze redenen is de keuze van de ontwerpliftcoëfficiënt Cl_o belangrijk. Als de Cl_o te klein is gekozen komen we al gauw in het gebied waar de W/D sterk toeneemt. Maar bij een grote Cl_o lopen we het gevaar dat het zwaard reeds bij een kleine vermindering van snelheid overtrokken raakt. Daarbij neemt de weerstand zeer sterk toe. Deze situatie doet zich soms voor bij door de wind gaan en ook wel bij „knijpen“.

11. DE DWARSKRACHT-VERDELING OVER DE LENGTE VAN HET ZWAARD

Voor het zwaard als geheel is de dwarskracht evenredig met het product van het oppervlak en de gemiddelde liftcoëfficiënt. Evenzo geldt voor elke doorsnede dat de plaatselijke dwarskracht evenredig is met het product van de plaatselijke breedte en de plaatselijke liftcoëfficiënt. Het verloop van de liftcoëfficiënt over de lengte van het zwaard is weer afhankelijk van het verloop van de breedte, dus van de omtreksvorm, en van de werving van de skeletlijn, dus van de uitholling.

Met behulp van gegevens uit de aërodynamica, die in tabelvorm gegeven zijn, kan het verloop van de liftcoëfficiënt over de lengte van het zwaard worden berekend en zo is het mogelijk een inzicht te verkrijgen hoe dit verloop wordt beïnvloed door de twist. Fig. 10 geeft daarvan een voorbeeld voor verschillende waarden van de twist, waarbij de dikke lijnen overeenkomen met een twist van 0° en 2°. Een twist van rond 1° blijkt

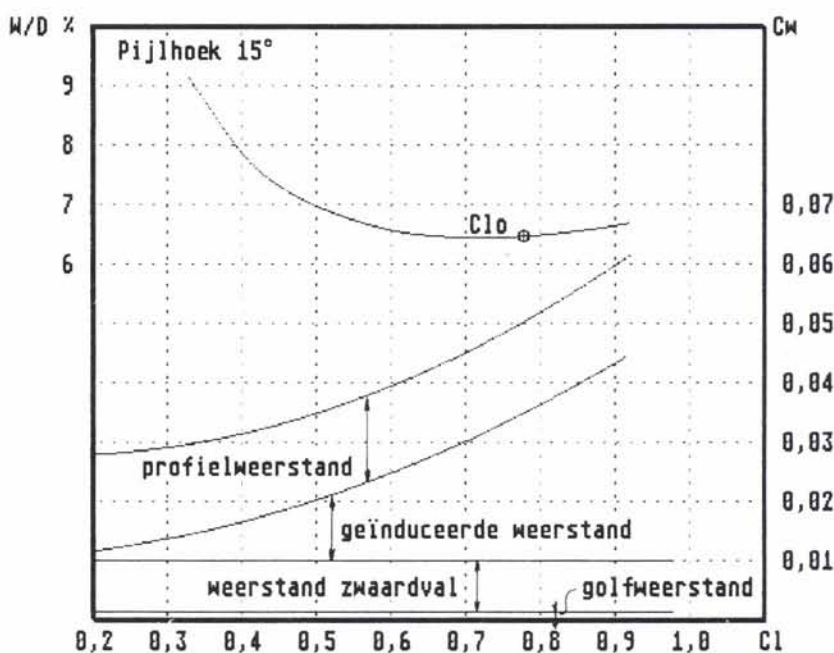


Fig. 9 COMPONENTEN VAN DE ZWAARDWEERSTAND

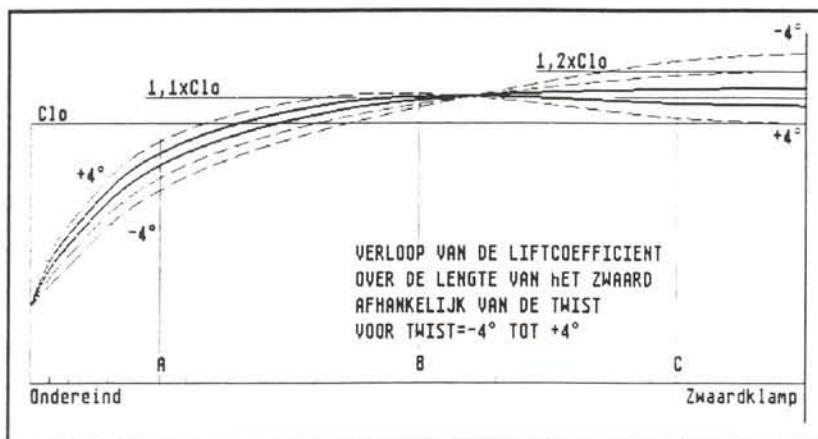


Fig. 10 INVLOED VAN DE TWIST OP HET VERLOOP VAN DE LIFTCOEFFICIENT

voldoende om de maximum liftcoëfficiënt te beperken tot $1,1 \times$ de gemiddelde waarde. Een grotere twist heeft geen nut, evenmin als een kleinere. Bij een zwaard ontstaat een twist van de gewenste grootte vanzelf wanneer de uitholling van boven naar onder toeneemt. Ook hier bevestigt de aërodynamica dus de oude praktijk. Twist kan echter ook worden veroorzaakt door scheluw trekken van het hout. Meestal is dit negatieve twist, dus tegengesteld aan die door de uitholling. Dit heeft een zeer ongunstige invloed op de werkzaamheid van het zwaard: niet alleen neemt de toelaatbare maximum liftcoëfficiënt af, maar de benodigde invalshoek voor een bepaalde Cl_0 neemt toe en daarmee de drifthoek.

12. TOESPOOR EN DRIFTHOEK

De mate waarin de liftcoëfficiënt toeneemt met de invalshoek wordt de lift-curve slope genoemd. Dit lift-curve slope is afhankelijk van diverse factoren, die zowel in verband staan met het profiel als met de omtreksvorm van een draagvleugel. Voor een theoretisch dun profiel kan worden afgeleid dat de lift-curve slope $0,109$ per graad bedraagt. Voor werkelijke profielen kan de waarde van de lift-curve slope zowel hoger als lager liggen, afhankelijk van de dikteverhouding en vooral van het dikteverloop nabij de achterkant. Van Oossanen heeft daarvoor een empirische formule ontwikkeld.⁵⁾ De lift-curve slope van een vleugel is lager dan die van het profiel. Eerst moet de waarde die voor het profiel geldt gedeeld worden door de zogenaamde „Jones edge-velocity factor”, dat is de verhouding van de halve omtrek tot de span, dus de diepgang van het zwaard.

Vervolgens moet de lift-curve slope gecorrigeerd worden voor de aspectverhouding. Ook hiervoor bestaat een formule waarin tevens de invloed van het breedteverloop is verwerkt. Voor een botterzwaard zal de lift-curve slope niet meer dan ongeveer $0,075^\circ$ bedragen en voor boeierzwaarden circa $0,055^\circ$.

Wanneer het schip vaart zonder drifthoek zal het zwaard, aangenomen dat het een asymmetrisch profiel heeft, meestal toch reeds dwarskracht ontwikkelen. Dit hangt samen met het toespoor en de nullifthoek. Over de nullifthoek werd reeds gesproken. In de aërodynamica wordt deze tegenwoordig meestal gedefinieerd ten opzichte van de verbindinglijn van de uiteinden van de skeletlijn. Voor een zwaard is het praktischer uit te gaan van de rugzijde van de plank waaruit het zwaard gemaakt is, of wat op hetzelfde neerkomt, van de strijkklamp die het toespoor definieert.

Bij varen met drifthoek=0 zal de liftcoëfficiënt van het zwaard gelijk zijn aan de som van toespoor een nullifthoek, maal de lift-curve slope, dus bijvoorbeeld:

$$Cl = (4 + 1,3) \times 0,075 \approx 0,4$$

Om een grotere liftcoëfficiënt te verkrijgen, moet de invalshoek groter worden. Dat kan op twee manieren: door meer toespoor of door meer drifthoek. De drifthoek mag nooit nul zijn als het schip overhelt, want dan worden de waterlijnen asymmetrisch. Daardoor gaat de romp als een draagvleugel werken en dwarskracht produceren, helaas naar lij. Dit nu moet in elk geval worden vermeden, want terwijl de dwarskracht van de romp die van het zwaard vermindert, wordt de daardoor veroorzaakte

geïnduceerde weerstand bij die van het zwaard opgeteld. Bij een helling van 15° zal een drifthoek van ongeveer 2° vaak juist voldoende zijn om deze negatieve rompdwarskracht=0 te laten worden.

Wordt de drifthoek groter dan gaat ook de romp positieve dwarskracht leveren en daarmee het zwaard ontlasten. Nu is de romp door zijn kleine aspectverhouding weliswaar geen efficiënte draagvleugel, maar omdat het zijdelings oppervlak van de romp veel groter is dan dat van het zwaard is reeds een kleine liftcoëfficiënt voldoende om een nuttige dwarskracht te leveren met een W/D die niet slechter hoeft te zijn dan die van het zwaard. Ooit heb ik een botterbouwer horen zeggen dat de romp een zesde van de totale dwarskracht zou moeten leveren. Het is niet duidelijk hoe men zo'n verhouding in de praktijk zou hebben kunnen schatten, laat staan meten. Des te merkwaardiger is het dat uit computerberekeningen blijkt dat de genoemde waarde vrijwel optimaal is.

13. HET SCHUIVEN VAN HET ZWAARD

Sommige schippers stellen vast dat hun zwaard soms schoksgewijs omhoog komt terwijl zij toch tamelijk hoog aan de wind varen. Zij vragen zich terecht af hoe dit komt en of er wat aan te doen is.

Op het zwaard werkt de dwarskracht die het tegen de strijkklamp drukt. Ook is er de zwaardweerstand die probeert het zwaard naar achteren te duwen. Dit wordt tegengewerkt door de wrijving tussen het zwaard en de klamp. De verhouding tussen beide krachten waarbij schuiven kan optreden is de wrijvingscoëfficiënt. Die kan allerlei waarden hebben. In „Spiegel der Zeilvaart” van oktober 1990 wordt vermeld dat vissers reuzel aan de klamp smeerden om de wrijving te verminderen. Mogelijk is de wrijvingscoëfficiënt dan niet meer dan $0,2$. Wordt de verhouding tussen weerstand en dwarskracht, dus de W/D, groter dan dit bedrag, dan kan het zwaard gaan schuiven. Zoals in fig. 9 te zien is moet de liftcoëfficiënt van het zwaard wel erg klein zijn om

een dergelijke hoge W/D waarde te bereiken, die bovendien ver boven het minimum ligt en dus ongunstig is voor de snelheid. Nu is zeilen geen statische aangelegenheid en de W/D kan dus sterk fluctueren door onregelmatige wind, slingeren of slordig sturen. Toch is het niet erg waarschijnlijk dat de W/D zo klein wordt wanneer de gemiddelde waarde in de buurt van het minimum ligt en het zwaard dus optimaal aan de dwarskracht bijdraagt. Schuiven is dus eigenlijk alleen te verwachten als het zwaard een kleiner aandeel aan de totale dwarskracht levert dan gewenst is. Daarvoor zou de romp een relatief grote lift-curve slope moeten hebben. Nu neemt de lift-curve slope van de romp sterk toe door de aanwezigheid van een kiel en een scheg, maar vooral van een loefbijter. Als het schip loefgierig is, moet er hard aan de helmstok worden getrokken, hetgeen betekent dat ook het roer veel dwarskracht levert. Uiteindelijk blijft er dan voor het zwaard te weinig te doen over, met schuiven als gevolg.

Het is niet waarschijnlijk dat deze manier van zeilen bevorderlijk is voor de snelheid en als het schuiven ook optreedt bij zorgvuldig sturen moet men zich afvragen of romp, zwaard en toespoor wel goed op elkaar zijn afgestemd en of de balans van het schip wel goed is.

14. DE STERKTE VAN HET ZWAARD

Het zwaard moet dwarskracht leveren. Daarvoor geldt de vergelijking:

$$\text{Dwarskracht} = \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot C_l \cdot \text{Oppervlak} \quad (3)$$

Hierin is $\frac{1}{2} \rho \cdot V^2$ de stuwdruk van het water bij de scheepssnelheid V en C_l is de gemiddelde liftcoëfficiënt van het zwaard. De dwarskracht is begrensd, want zowel voor de snelheid aan de wind als voor de C_l zijn er praktische maxima.

De dwarskracht veroorzaakt in het zwaard een buigend moment, van onder af toenemend tot een maximum ter plaatse van de strijklamp. Voor een diep gestoken zwaard, (pijlhoek

0 tot 15°), bedraagt dit maximum nagenoeg:

$$\text{Dwarskracht} \times (\text{Lengte onder de klamp})/2 \quad (4)$$

Voor lager gelegen doorsneden neemt het buigend moment snel af. Op halve lengte is het nog maar een kwart van het maximum.⁶⁾

Het buigend moment veroorzaakt een buigspanning σ_B in het hout, die gelijk is aan het buigend moment gedeeld door het weerstandsmoment van de doorsnede. In formule:

$$\sigma_B = M_b/M_w \quad (5)$$

De toelaatbare spanning ligt natuurlijk lager dan de breuksterkte. Botterzwaarden werden aan een enkel val opgehaald en moesten dus zo licht mogelijk zijn. Men accepteerde daarom dat oudere zwaarden wel eens braken. Welke spanningen daarbij optraden is echter onbekend.

Het weerstandsmoment is te berekenen als de vorm van de doorsnede gekend is. Voor een rechthoekige doorsnede bedraagt het:

$$M_w = 1/6 \times \text{breedte} \times \text{dikte}^2 \quad (6)$$

Onder de zwaardklamp is er een meestal snelle overgang naar een stroomlijnprofiel, waarvan het weerstandsmoment zelden groter is dan de helft van dat van de omgeschreven rechthoek. Weinig ontwerpers zullen de tijd nemen voor de berekening ervan. In de meeste gevallen zal het weerstandsmoment sneller afnemen dan het buigend moment. Daardoor ligt bij een botterzwaard de gevaarlijke doorsnede lager dan de zwaardklamp, naar schatting ongeveer in de doorsnede C op 1/6 van de lengte. Om de dikte van het zwaard te berekenen zouden we dus de toelaatbare buigspanning en het verloop van het weerstandsmoment van het zwaard onder de strijklamp moeten kennen.



Verkl. de woordenlijst

A_g : geometrische aspectverhouding

A_e : effectieve aspectverhouding

C_j : liftcoëfficiënt

C_w : weerstandcoëfficiënt

aspectverhouding: spanwijdte/gemiddelde

breedte = span²/oppervlak

dikteverhouding t/c : grootste dikte/lengte 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 zij-zwaard, in het zijaanzicht van een schip

opstroom: 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 strijkkamp en het l.s.v.

uitscheren: het zwaard beweegt zich van de strijkkamp af

weerstandskracht: opgewekte kracht in de richting van de stroming

Daar komt dan nog bij dat die berekening alleen mogelijk is voor een veronderstelde statische toestand, terwijl zeilen alles behalve statisch is. We hebben ook nog te maken met slingers en golfslag.

De sterkteberekening van een zwaard blijkt dus met zoveel onzekerheden te zijn omgeven dat deze eigenlijk niet te maken is. We moeten daarom anders te werk gaan, nl. door de factoren die de dikte van het zwaard bepalen samen te brengen in een formule, die hun relatieve invloed zo goed mogelijk weergeeft en deze formule vervolgens te ijken door vergelijking met zwaarden van bekende schepen. Hiervoor gaan we als volgt te werk:

* De pijlhoek wordt =0 verondersteld. De C_{lmax} bedraagt dan, zoals eerder afgeleid:

$$C_{lmax} = 0,45 + 5 \cdot p/c \quad (7)$$

* Blijkens vergelijking (3) speelt ook het kwadraat van de snelheid een

rol. Voor schepen van overeenkomstig type zal bij gelijke lengte de maximum snelheid hoog aan de wind ongeveer gelijk zijn; de verschillen in snelheid waarmee wedstrijden worden gewonnen of verloren zijn relatief klein, zodat zij hier kunnen worden verwaarloosd. Maar de snelheidsgraad neemt wel af met de lengte. Uit vroeger onderzoek bleek dat bij overigens gelijke omstandigheden V^2 ongeveer evenredig kan worden gesteld met de logaritme van de lengte op de waterlijn.

* Nu substitueren we vergelijking (7) in (3), (3) in (4) en (4) in (5).

* Voor het weerstandsmoment in de gevaarlijke doorsnede nemen we aan dat dit in een bepaalde, zij het onbekende relatie staat tot dat van de rechthoek gevormd door de gemiddelde zwaardbreedte en de plankdikte.

* Dit alles levert nu de formule:

$$\text{Plankdikte}^7 \text{ in mm} = C_e \times \frac{1}{\sqrt{\text{Log}(Lw1) \cdot \text{Oppvl} \cdot \text{Lok} \cdot C_{lmax}/B_g}} \quad (8)$$

Hierin is:

C_e een nader te bepalen empirische factor.

$Lw1$ de lengte op de waterlijn zonder stevens in m

Oppvl het oppervlak van het zwaard onder de klamp in m^2

Lok de lengte van het zwaard onder de klamp in m

C_{lmax} de grootste waarde bij pijlhoek=0

B_g de gemiddelde zwaardbreedte in m.

Het enige zwaard van een origineel vissersschip waarvan ik de dikte heb kunnen vinden is dat van de Pluut VD23, waarvan wordt opgegeven dat het 50 mm dik is. Invullen van de gegevens van dit schip in vergelijking (8) geeft voor C_e de waarde 850.

Jachten wijken in stabiliteit en tuigage soms aanzienlijk af van vissersschepen. Het is dus niet zo vanzelfsprekend maten van vissersmanszwaarden klakkeloos te gebruiken voor elk jacht. Maar anderzijds is het zeker niet zo dat de plankdikte door alle zwaardmakers volgens één en

dezelfde vuistregel op de millimeter nauwkeurig werd bepaald. Zo bleek pas na jaren dat van de zwaarden die Nieuwboer in Spakenburg in 1956 voor de schokker „Albatros” maakte volgens origineel bottermodel, het ene 60 en het andere 55 mm dik was! Volgens de formule had de dikte 57 mm moeten zijn. Voor de hoogaars „Aladdin” geeft de formule 70 mm, gelijk aan de uitgevoerde dikte.

Bij boeierzwaarden neemt de breedte onder de zwaardklamp snel toe terwijl de profielvorm weinig of niet verandert. Daardoor ligt de gevaarlijke doorsnede ter plaatse van de klamp. Ook is de breedte B_k ter hoogte van de klamp van schip tot schip sterk verschillend. Het is dan ook noodzakelijk in de formule B_g te vervangen door B_k . Eigenlijk min of meer toevallig blijkt de formule dan ook voor deze zwaarden uitkomsten te geven die goed met de praktijk overeenkomen. Enkele resultaten met tussen haakjes de opgemeten waarden:

Tjotter „Albert en Nelly” 19 mm (0,02 m). Visaak „Dolphijn” 34 mm (0,035 m). Fries jacht „Nut en Nocht” 33 mm (0,03 m). Boeier „Constanter” 42 mm (0,045 m).

⁴) De dikteverhouding t/c is de verhouding van de grootste dikte van een profiel tot de lengte van de koorde. Bij een uitgehoud zwaard is de profieldikte dus kleiner dan de plankdikte.

⁵) Dr. Peter van Oossanen. Method for the Calculation of the Resistance and Side Force of Sailing Yachts. Calculator and Computer aided Design for Small Craft. RINA 1981.

⁶) Er is een andere belasting denkbaar, nl. als het uiteinde van het zwaard de grond raakt. Dat kan bij een zachte bodem soms heel ongemerkt gebeuren. De dwarskracht kan dan veel groter worden en hangt af van de druk van de wind op de zeilen, de hoogte van het zeilpunt boven het onder-eind van het zwaard en het stabiliteitsmoment. In dat geval neemt het buigend moment van onder naar boven lineair toe. In fig. 11 is het verloop van de buigende momenten getekend voor beide gevallen.

⁷) Op te merken valt dat de plankdikte ook impliciet voorkomt in het rechterlid, nl. in C_{lmax} . De formule vereist daarom een iteratie.