

RAPPORT No. 350



# LABORATORIUM VOOR SCHEEPSBOUWKUNDE

TECHNISCHE HOGESCHOOL DELFT

SYMPOSIUM  
ONDERZOEK AAN ZEILJACHTEN

MAART 1972

In dit rapport vindt U de samenvatting van de tekst gelezen op het symposium "Onderzoek aan Zeiljachten" georganiseerd door het Scheepsbouwkundig Gezelschap "William Froude" op 11 november 1971.

Het Gezelschap was zo gelukkig de heren prof.ir. J. Gerritsma, lector ir. M.C. Meijer, ir. J.J. van den Bosch en ir. G. Moeyes, bekend op het gebied van onderzoek aan jachten, bereid te vinden een voordracht te houden op dit symposium.

Hoezeer de aard van het symposium en de voordrachten aangesproken hebben bleek uit het grote aantal deelnemers en uit het enthousiasme waarmee aan de na afloop gehouden discussie deelgenomen werd.

Het bestuur van het Gezelschap is er dan ook van overtuigd dat dit rapport aan de grote behoefte aan meer inzicht in deze materie zal voldoen.

Zij wil daarom allen die aan het slagen van het symposium en aan de tot standkoming van dit rapport hebben meegewerkt hartelijk danken voor hun bijdrage.

Het bestuur van "William Froude".

Voorwoord

Ir. G. Moeyes	: Het beoordelen van de zeil- prestaties van jachten met behulp van modelproeven	I.1
Prof.ir. J. Gerritsma	: Vinkielen en roeren van zeil- jachten	II.1
Ir. M.C. Meijer	: Zeilen en zeildoek	III.1
Ir. J.J.van den Bosch	: Over de weerstand van planerende boten	IV.1

## Samenvatting.

Uitgaande van het krachtenspel op een aan-de-wind zeilend jacht wordt de uitvoering van modelproeven en de daarbij behorende inrichting van het model verklaard.

Met het model worden proeven uitgevoerd zowel zonder als met helling en drift. Door de toepassing van een tuig met een standaardwerking qua optimale invalshoek en winddruk per  $m^2$  zeiloppervlak, kan een kromme van snelheid-in-de-wind tegen werkelijke-windsnelheid gekonstrueerd worden.

De resultaten van verschillende schepen worden getoond en besproken. Een verdergaande analysemogelijkheid biedt de konstruktie van krommen van gelijke snelheid-in-de-wind bij variabele masthoogte en stabiliteit. Deze mogelijkheid wordt gedemonstreerd aan de hand van een konkreet geval.

## HET BEOORDELEN VAN DE ZEILPRESTATIES VAN JACHTEN MET BEHULP VAN MODELPROEVEN

door

Ir. G. Moeyes

1.1

## 1. Krachtenspel

Fig. 1 laat de krachten, werkend op een aan-de-wind zeilend jacht, in een verticale dwarsdoorsnede zien. Verondersteld wordt dat de hellende komponent van de zeilkracht,  $F_H$ , loodrecht op de mast staat. Vanwege het vereiste krachtenevenwicht moet de horizontale komponent hiervan,  $F_H \cos \phi$ , gelijk zijn aan de door het onderwaterschip geleverde dwarskracht  $Y$ .

Met betrekking tot de door het onderwaterschip opgewekte liftkracht  $F_L$ , waarvan  $Y$  de horizontale komponent is, mag niet aangenomen worden dat deze kracht loodrecht op de hartlijn van het schip staat. De verticale komponent van de zeilkracht,  $F_H \sin \phi$ , moet daarom gekompenseerd worden door de verticale komponent  $Z_1$  van de liftkracht  $F_L$ , plus een toename van de waterverplaatsing  $Z_2$ . Ter wille van de eenvoud worden verder alle door het onderwaterschip geleverde hydrostatische en hydrodynamische verticale krachten samengevoegd tot één resultante die aangrijpt in wat het effectieve drukkingspunt  $B_e$  genoemd zou kunnen worden. Dit drukkingspunt is niet gelijk aan het inhoudszwaartepunt van het onderwaterschip.

Volgens het vereiste momentenevenwicht is het door de zeilkracht veroorzaakte hellend moment gelijk aan het stabiliteitsmoment.

In fig. 2 zijn de projecties van de krachten op een horizontaal vlak weergegeven. Behalve de dwarskrachten  $F_H \cos \phi$  en  $Y$  op zeilen, respectievelijk onderwaterschip verschijnen hier de scheepsweerstand  $R_T$  en de voortstuwende komponent van de zeilkracht  $F_D$ . Deze laatste is, bij een goed schip, naar voren gericht bij de gratie van de door de zeilen geproduceerde liftkracht  $L$ .

Bovendien wordt in zeilerskringen nogal eens vergeten dat een drifthoek  $\beta$  noodzakelijk is om een dwarskracht  $Y$  te veroorzaken.

Grootte en richting van de schijnbare wind zijn te bepalen door sloopssnelheid en werkelijke wind samen te stellen.

Het is uit geometrische overwegingen af te leiden dat de hoek tussen koers en schijnbare wind,  $\beta + \beta_{aw}$ , gelijk is aan de som van de hoeken  $\epsilon_A$  en  $\epsilon_W$ , welke een maat zijn voor de effectiviteit van respectievelijk zeilen en onderwaterschip.

Hoe groter de lift-weerstand-verhouding van een van beide, des te hoger kan het schip aan de wind varen en des te groter zal dan de komponent van de sloopssnelheid in de windrichting, de snelheid-in-de-wind,  $v_{mg}$ , zijn.

## 2. Modelproeven

De uitvoering van modelproeven en de bijbehorende uitrusting en inrichting van de modellen volgt grotendeels uit het hierboven geschetste krachtenspel. In het Laboratorium voor Scheepsbouwkunde worden in het algemeen twee soorten proeven uitgevoerd; t.w. :

1. Weerstandsmetingen zonder helling en drift.
2. Metingen van dwarskracht en weerstand onder helling en met drift.

Fig. 3 geeft schetsmatig de opstelling en uitrusting van het model. Twee uitgebalanceerde trimapparaten fixeren het model dwarsscheeps maar maken verder elke beweging in verticale of langsscheepse richting mogelijk. De bevestiging van de trimapparaten aan het model in  $S_V$  en  $S_A$  is scharnierend zodat hellen en slingeren niet belemmerd wordt.

De helling wordt gecontroleerd met een hoekmeter met waterpas.

Een bij het model behorend gewicht kan langsscheeps en dwarsscheeps verschoven worden om hierna te bespreken korrekties in het krachtenspel aan te brengen.

Ook de aanwezigheid van een gewichtenschaaltje zal dan verklaard worden.

De weerstand wordt bepaald door de kracht te meten in een "sleeptouw" wat bevestigd is tussen het scharnierpunt  $S_V$  en een op de sleepwagen bevestigde dynamometer.

De dwarskracht  $F_H \cos \phi$  wordt gemeten met twee aan de trimapparaten bevestigde dynamometers.

Met betrekking tot de kinematische en dynamische gelijkvormigheid tussen model en schip kan, naast de normaal geldende modelwet van Froude en de vereiste geometrische gelijkvormigheid het volgende opgemerkt worden :

ad 1 : Omdat het model in een punt S voortgetrokken wordt (fig. 4 en 5) moet voor dynamische gelijkvormigheid een extra vertrimmend moment aangebracht worden door een gewicht langsscheeps te verplaatsen.

ad 2 : De kinematische gelijkvormigheid eist dat hellings- en drifthoeken bij model en schip gelijk zijn. Meestal ligt het modelzwaartepunt niet op dezelfde hoogte als het omgeschaalde scheepszwaartepunt (fig. 4 en 5), zodat ter wille van de dynamische gelijkvormigheid op het model een extra stabiliteitsmoment uitgeoefend moet worden door een gewicht dwarsscheeps te verschuiven. In plaats van in het (omgeschaalde) effectieve zeilpunt wordt het model in dwarsrichting vastgehouden ter hoogte van het scharnierpunt S.

De hierdoor noodzakelijke korrektie van het hellende moment, ter grootte  $F_H \cdot h$ , wordt eveneens in de dwarsscheepse verschuiving van het gewicht verdiskonteert. De verticale komponent van de zeilkracht,  $F_H \sin\phi$ , wordt op het model aangebracht door een gewicht in S op te hangen (fig. 5).

Bovengenoemde, vóór de meting aan te brengen correcties zijn alle afhankelijk van de nog te meten krachten, dus het is duidelijk dat het meetprogramma in wezen een iteratief programma is.

Nadere bijzonderheden daarover zijn gegeven in [1].

Uit de eerstgenoemde serie proeven, de meting van de weerstand zonder helling en drift, wordt als volgt de snelheid-voor-de-wind bepaald. Aannemende dat op een voor-de-windse koers de zeilkracht in het middellangsvlak ligt, zodat geen drift-hoek optreedt en de roerhoek nul is, is de totale zeilkracht gelijk aan de gemeten weerstand. Bij een geschat effectief zeiloppervlak  $SA_{ed}$  is dan het verband tussen de snelheid-voor-de-wind  $v_d$  van het schip en de werkelijke-windsnelheid  $v_{tw}$  te bepalen als voor de weerstandscoefficient van het zeil eveneens een waarde aangenomen wordt ( $C_D = 1.2$ )

$$R_{TS}(v_d) = \frac{1}{2} \rho A \cdot v_{aw}^2 \cdot SA_{ed} \cdot C_D$$

$$v_{tw} = v_{aw} + v_d$$

Resultaten van deze berekening zullen in de volgende paragraaf getoond worden. In het algemeen dient de snelheid-voor-de-wind als een nevengegeven voor de beoordeling van de zeilprestaties van een jacht.

De proeven onder helling en met drift geven, na de bovenbesproken correcties, de krachten die op een aan-de-wind varende zeiljacht optreden. Voor een verdergaande analyse is het echter noodzakelijk dat deze krachten, met de daarbij behorende waarden van helling en drift, bij een gegeven zeiloppervlak gerelateerd worden aan richting en snelheid van de werkelijke wind.

Door het Stevens Institute is hiertoe een methode ontwikkeld die ook in het Laboratorium voor Scheepsbouwkunde gebruikt wordt. Rekenenderwijs worden de schepen voorzien van een stel zeilen met een gegeven werking, die terwille van de onderlinge vergelijkbaarheid als standaard aangenomen is. Deze zeilen hebben het plan van het betrokken ontwerp.

De effectieve oppervlakte wordt vastgesteld als de som van het geometrische oppervlak van het (driehoekige) grootzeil en 0.85 maal het geometrisch oppervlak van de voordriehoek. Ter bepaling van de ligging van het effectieve zeilpunt is de gewichtsfactor van het grootzeil eveneens 1.0 en die van de voordriehoek 1.7. De standaardwerking van de zeilen wordt vastgelegd door de door Davidson [2] bepaalde z.g. Gimcrackcoëfficiënten.

Deze omvatten een gegeven optimale (ruimte-)hoek tussen de totale zeilkracht  $F_T$  en de schijnbare wind, benevens de daarbij behorende zeilcoëfficiënt  $C_T$  (de standaardzeilkracht per  $m^2$  oppervlak is dan  $\frac{1}{2}\rho_A \cdot v_{aw}^2 \cdot C_T$ ).

Fig. 6 demonstreert dat de hoek  $\epsilon$  tussen totale zeilkracht en het vlak door de koerslijn en de mast bepaald wordt door de verhouding van de bij de proeven gemeten dwarskracht en weerstand,  $F_H \cos \phi$  en  $F_D$ .

Bij een door de Gimcrack-waarden voorgeschreven (ruimte-)hoek tussen de totale zeilkracht en de schijnbare wind  $v_{aw}$  is dus bij een uit de proeven berekende hoek ook de hoek tussen schijnbare wind en koers bekend.

Met betrekking tot de zeilen komt deze procedure er op neer dat bij een verandering van de door het onderwaterschip bepaalde dwarskracht-weerstand verhouding het gehele systeem van zeilen om de mast gedraaid wordt tot de zeilkrachten weer in evenwicht zijn met de hydrodynamische krachten. De richting van de schijnbare wind wordt aan deze draaiing aangepast.

Duidelijk is ook hier dat door een grotere dwarskracht/weerstand ( $F_H \cos \phi / F_D$ ) verhouding het schip hoger aan de wind zal varen.

Omdat de grootte van de totale zeilkracht uit de proeven bekend is, kan bij een door de Gimcrackwaarden gegeven zeilcoëfficiënt  $C_T$  en een bekend effectief zeiloppervlak de grootte van de schijnbare wind afgeleid worden :

$$F_T = \sqrt{F_H^2 + R_{TS}^2} = C_T \cdot \frac{1}{2} \rho_A \cdot v_{aw}^2 \cdot SA_{eb}$$

Met de schijnbare wind en de, eveneens uit de proeven bekende, scheepssnelheid  $v_s$ , is met het snelheidsdiagram uit fig. 2 eenvoudig richting en grootte van de werkelijke wind te bepalen. De komponent van de scheepssnelheid in deze richting, de snelheid-in-de-wind  $v_{mg}$ , bepaalt hoe snel het schip in de wind opwerkt, dus hoe de prestaties in het kruisrak zijn. Omdat een zeiljacht, bij normaal gebruik, meer dan de helft van z'n gezeilde tijd aan-de-wind vaart is de kromme van optimale snelheid-in-de-wind,  $v_{mg}$ , tegen werkelijke-windsnelheid  $v_{tw}$  het hoofdgegeven voor de beoordeling van de zeilprestaties.



Men kan zich afvragen in hoeverre de Gimcrackcoëfficiënten de effectiviteit van het gegeven tuigplan juist weergeven. Zeker is dat de waarden bij benadering goed zijn. Bovendien is het doel van prestatiemetingen de onderwatervormen van verschillende jachten te vergelijken, zodat de absolute waarden van de zeilcoëfficiënten minder belangrijk zijn zolang tendenzen nog juist worden weergegeven. Dit laatste is inderdaad het geval.

### 3. Resultaten

In fig. 7 en 8 zijn de uitgewerkte resultaten van metingen van dwarskracht en weerstand van vijf schepen gegeven die een gebied van de open tweemanskielboot tot de grote tweemastschoener bestrijken.

De snelheid-voor-de-wind als functie van de werkelijke windsnelheid, verkregen uit de weerstand zonder helling en drift, toont betrekkelijk weinig afhankelijkheid van de scheepsgrootte. Omdat de betrokken krommen bij lage windsnelheden bijna rechte lijnen zijn is de helling van de kromme in de oorsprong sterk maatgevend voor het verdere verloop. Theoretisch is af te leiden dat deze helling gelijk is aan :

$$\frac{dv_{tw}}{dv_d} = C \sqrt{\frac{S}{SA_{ed}}} + 1 \quad (3.1.)$$

waarin : S = nat oppervlak schip

$SA_{ed}$  = effectief zeiloppervlak voor-de-wind, inclusief de spinnaker.

De coëfficiënt C is in overwegende mate afhankelijk van de waterlijnlengthe en van de weerstandscoëfficiënt van het bovenwaterschip en in mindere mate van de verhouding tussen het nat oppervlak van romp, kiel en roer en de verhouding tussen de karakteristieke lengten van deze onderscheiden delen.

Hoe kleiner de helling, des te groter is bij een konstante windsnelheid de sloopssnelheid. Het schip is dus duidelijk gebaat bij een klein nat oppervlak en een groot effectief zeiloppervlak.

De uit bestaande schepen berekende waarden van  $\sqrt{S/SA_{ed}}$  nemen in het algemeen af met toenemende waterlijnlengthe. De uit experimenten berekende waarden van C nemen eveneens af met toenemende waterlijnlengthe zodat in het algemeen de helling van de sloopssnelheid-windsnelheid kromme bij toenemende sloopsgrootte zal afnemen. Deze gunstige invloed blijkt duidelijk uit Fig. 7, waar bij gelijke windsnelheid de grootste schepen de hoogste snelheden behalen.

Dat de kromme van de open kielboot een buigpunt vertoont bij een windsnelheid van ongeveer 7<sup>m</sup>/sec. komt omdat dit schip bij hogere snelheden gaat planeren.

Fig. 8 toont voor een vijftal schepen met sterk variabele lengten de kromme van snelheid-in-de-wind tegen windsnelheid.

Bij alle schepen, behalve de open kielboot is aangenomen dat ze hun stabiliteit alleen ontleen aan hun vorm en de ligging van het gewichtszwaartepunt in hoogte, en bij enige wind zullen gaan hellen. De proeven met de open kielboot zijn genomen zonder helling, uitgaande van de aanname dat het schip door de bemanning in de trapeze overeind gehouden wordt.

De helling en het verloop van de kromme is van een groot aantal factoren afhankelijk, te weten :

de waterlijnlengte

het nat oppervlak

de waterverplaatsing

de stabiliteit

het effectief zeiloppervlak

de ligging van het effectief zeilpunt

de effectiviteit van de kiel-roer-konfiguratie

Uit Fig. 8 blijkt dat ook hier de invloed van de absolute scheepsgrootte overheersend is.

Hoe groter het schip, des te hoger zijn de bereikbare snelheden.

De invloed van de verhouding van stabiliteitsmoment tot hellend moment

(dit laatste kan uitgedrukt worden in het effectief zeiloppervlak en de hoogte van het effectief zeilpunt boven de waterlijn) is duidelijk zichtbaar in het verloop van de kromme. De lijnen van schip 2 en 4 vertonen een maximum in  $v_{mg}$  bij lagere windsnelheden dan de overige, wat kan wijzen óf op een te hoog of te groot zeilplan, óf op een gebrek aan stabiliteit. Het grootste schip heeft bij lage windsnelheden duidelijk te weinig zeil maar kan daarentegen bij toenemende windsnelheid veel langer ongereefd doorvaren dankzij z'n lage, over twee masten gespreide, zeilen.

Het verloop van de kromme van de open kielboot is afwijkend van de andere (de helling verandert minder snel) omdat dit schip bij toenemende windsnelheid door de bemanning in de trapeze zonder helling gevaren wordt. De effectiviteit van de zeilen blijft dan gelijk.

De kromme 3 duidt op een all-round schip, met een voldoende groot zeiloppervlak voor de prestaties bij lagere windsnelheden en een stabiliteit die voldoende groot is om een terugval van de snelheid-in-de-wind bij hogere windsnelheden te voorkomen.

#### 4. Verdere analysemogelijkheden

Voor een beoordeling van een bepaald jacht zijn allereerst de krommes van snelheid-in-de-wind en snelheid-voor-de-wind, zoals ze in de vorige paragraaf reeds besproken zijn, belangrijk. Op grond van deze krommes alléén is het echter moeilijk een nadere en meer gespecificeerde aanduiding te verkrijgen over eventuele onvolkomenheden in het ontwerp. Voor een verdere analyse zijn daarom meerdere gegevens noodzakelijk. Zo kan de grootte van de drifthoek, die niet expliciet doorwerkt in de snelheid-in-de-wind, een belangrijke aanwijzing geven over de effectiviteit van de kiel-roer-konfiguratie.

Een grote drifthoek kan duiden op een te klein kiel- of roerooppervlak of een door loslating verminderde werking. De plaats van loslating van de stroming kan dan eventueel onderzocht worden door dunne draadjes op de romp te plakken en het stromingspatroon te fotograferen.

Een andere analysemogelijkheid zal gedemonstreerd worden aan de hand van een concreet voorbeeld, het jacht met 6.90 m. waterlijnlengthe. De snelheid-in-de-wind van dit jacht vertoont een maximum bij nogal lichte wind, 8 à 9  $\text{m}/\text{sec}$ , wat een gebrek aan stabiliteit of een overmaat aan zeil zou doen veronderstellen. De helling van de kromme in de oorsprong is niet groot.

Omdat juist deze de prestaties bij lage windsnelheden bepaalt, waar de stabiliteit nog geen grote rol speelt, boet de laatste veronderstelling al aan waarschijnlijkheid in.

Bij de uitwerking van de meetresultaten worden de hoogteligging van het gewichtszwaartepunt, het effectief zeiloppervlak en de hoogteligging van het effectief zeilpunt rekenenderwijs ingevoerd, dus het is mogelijk één serie metingen met verschillende waarden van genoemde variabelen uit te werken. Hiertoe is een computerprogramma ontwikkeld waarin systematisch de basisgrootheden gevarieerd zijn. Het effectief zeiloppervlak en de hoogteligging van het zeilpunt zijn afhankelijke variabelen, zodat in de plaats hiervan de onafhankelijke masthoogte gesteld is.

Alle andere grootheden als gieklengthe, basis van de voordriehoek en de hoogte van de giek boven dek zijn konstant gehouden zodat én het zeiloppervlak, én de positie van het zeilpunt in de masthoogte zijn uit te drukken. De tweede gevarieerde basisvariabele is de hoogteligging van het gewichtszwaartepunt, die een maat is voor de stabiliteit. Voor een groot aantal combinaties van stabiliteit en masthoogte is bij standaardwindsnelheden van 3.5, 7.0 en 10.0  $\text{m}/\text{sec}$  de snelheid-in-de-wind berekend.

Door interpolatie zijn daarna in dit stabiliteits-masthoogte veld krommes van gelijke snelheid-in-de-wind,  $v_{mg}$ , te trekken. (fig. 9a en b).

Uitgaande van het bestaande ontwerp kan in dit veld de richting waarin de toename van de snelheid-in-de-wind het grootst is door pijlen aangegeven worden. Uit fig. 9a en b blijkt dat bij het beschouwde schip een verlaging van het gewichtszwaartepunt, dus een vergroting van de stabiliteit, een zeer gunstige uitwerking heeft. In het algemeen zal juist bij lichte wind de invloed van het zeiloppervlak overwegen boven de invloed van de stabiliteit (de pijl staat dan meer vertikaal), zodat de aanvankelijke veronderstelling dat dit schip een gebrek aan stabiliteit heeft gerechtvaardigd is. Na de bouw bleek deze konklusie door de praktijk bevestigd te worden.

In fig. 9 b is te zien dat bij een windsnelheid van  $10 \text{ m/sec}$ . (d.i. ongeveer windkracht Beaufort 5) een verlaging van het zeiloppervlak de snelheid-in-de-wind vergroot, zodat het schip bij deze wind eigenlijk al moet reven.

Een uitwerking van de meetresultaten volgens bovengenoemde methode geeft de jachtbouwer de mogelijkheid veranderingen in zijn ontwerp kwantitatief te beoordelen.

Opgemerkt moet worden dat deze veranderingen slechts betrekking hebben op twee van de vele mogelijke parameters. Zou de ontwerper b.v. de weerstandseigenschappen willen verbeteren door een wijziging in het lijnenplan of de dwarskrachtopwekkende eigenschappen door een wijziging van de kielvorm en -afmetingen dan zijn weer nieuwe proeven met een nieuw model nodig om de juiste invloed van deze veranderingen vast te stellen.

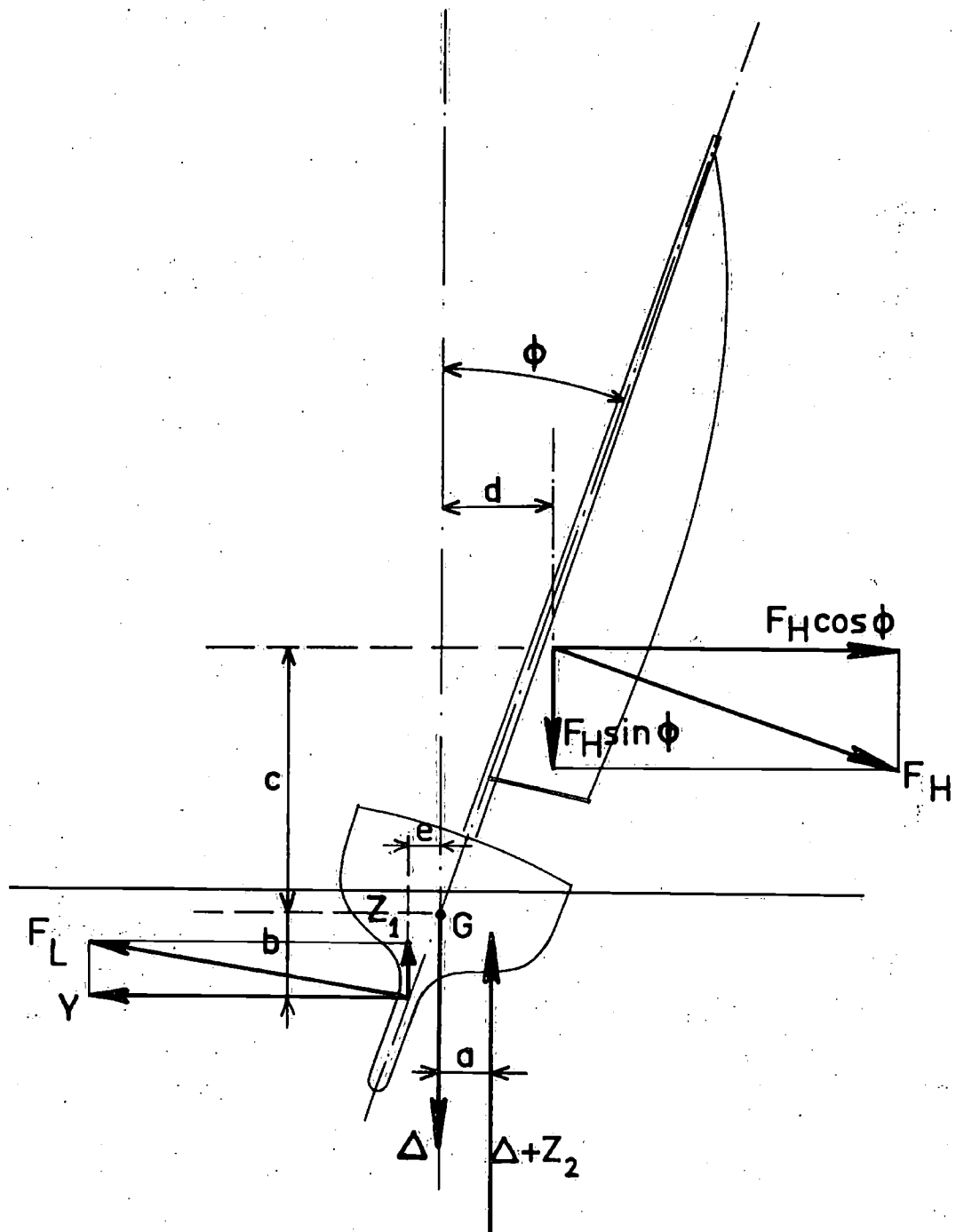
## 5. Literatuur

### 1. G. Moeyes

Het meten van de zeilprestaties van jachten door middel van modelproeven  
Laboratorium voor Scheepsbouwkunde T.H. Delft,  
rapport no. 286, dec. 1970.

### 2. K.S.M. Davidson

Some experimental studies of the sailing yacht  
Transactions Society of Naval Architects and Marine Engineers, Vol. 44, 1936,  
pag. 288-334.



$$Y = F_H \cos \phi$$

$$Z_1 + Z_2 = F_H \sin \phi$$

$$a (\Delta + Z_2) = bY + c F_H \cos \phi + d F_H \sin \phi + e Z_1$$

Fig.1 : Evenwicht van waterkrachten en windkrachten, geprojecteerd op een vertikaal vlak loodrecht op de koers

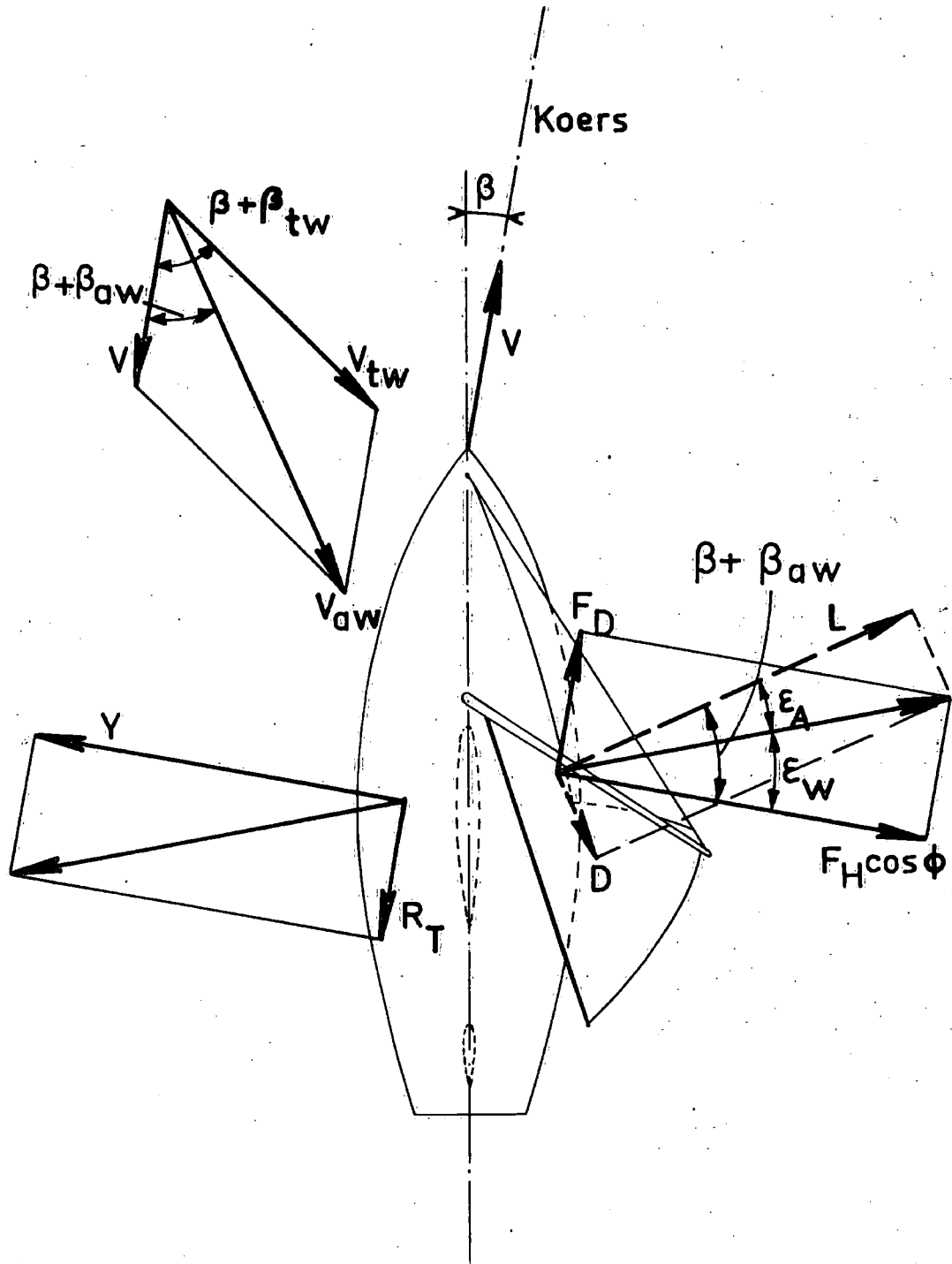


Fig. 2: Evenwicht van waterkrachten en windkrachten, geprojecteerd op een horizontaal vlak.



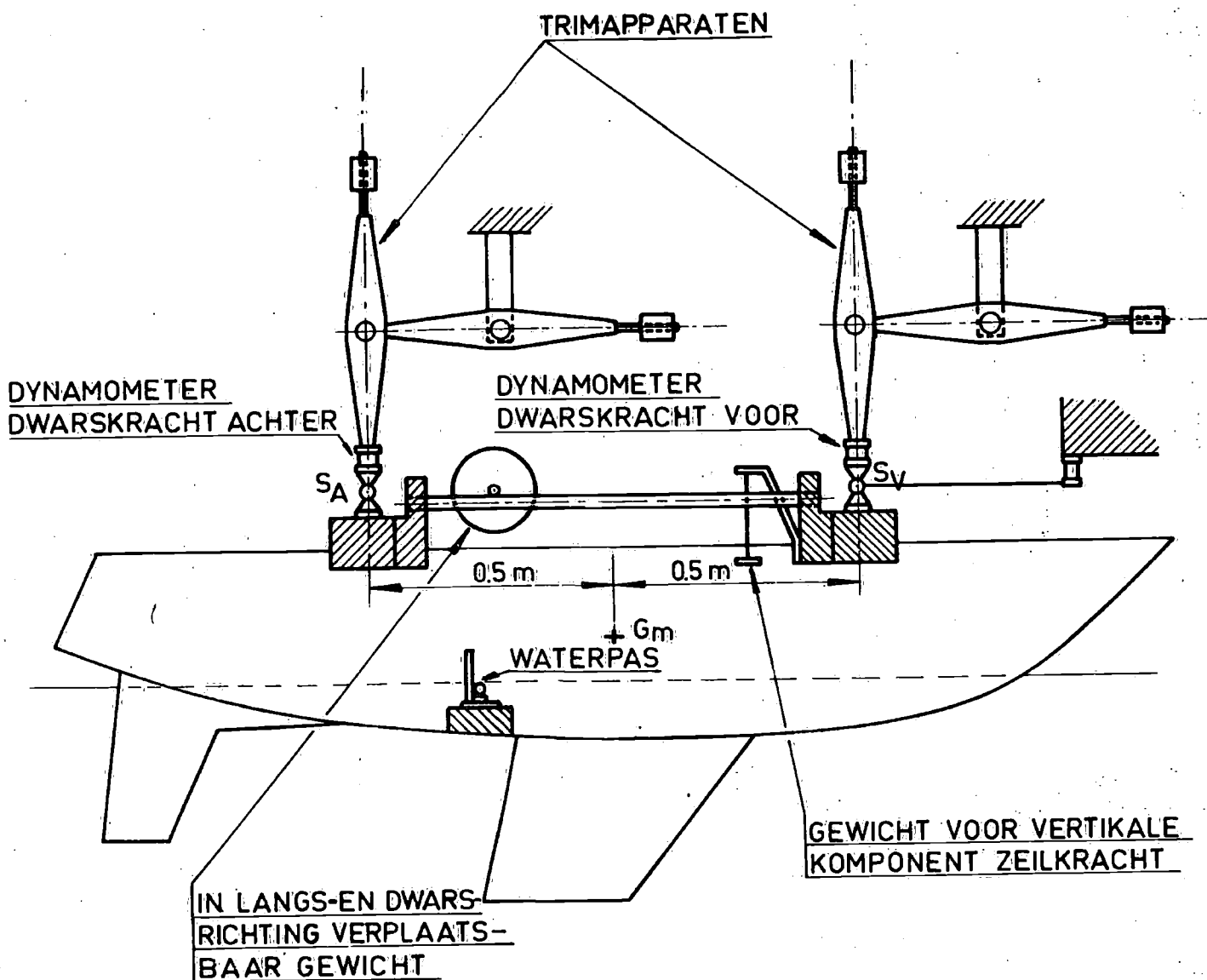


Fig. 3: Ophanging en uitrusting van het model

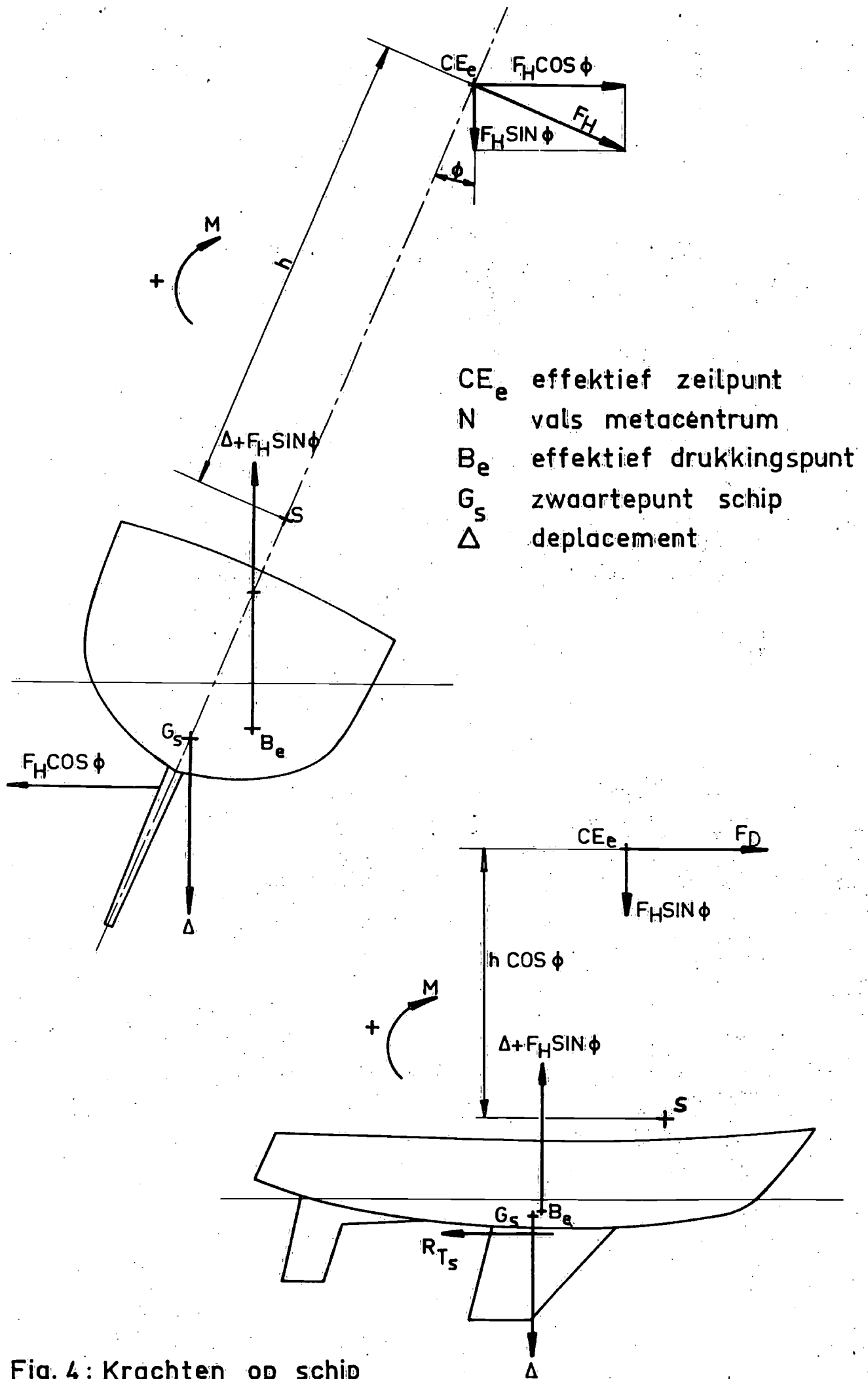


Fig. 4: Krachten op schip

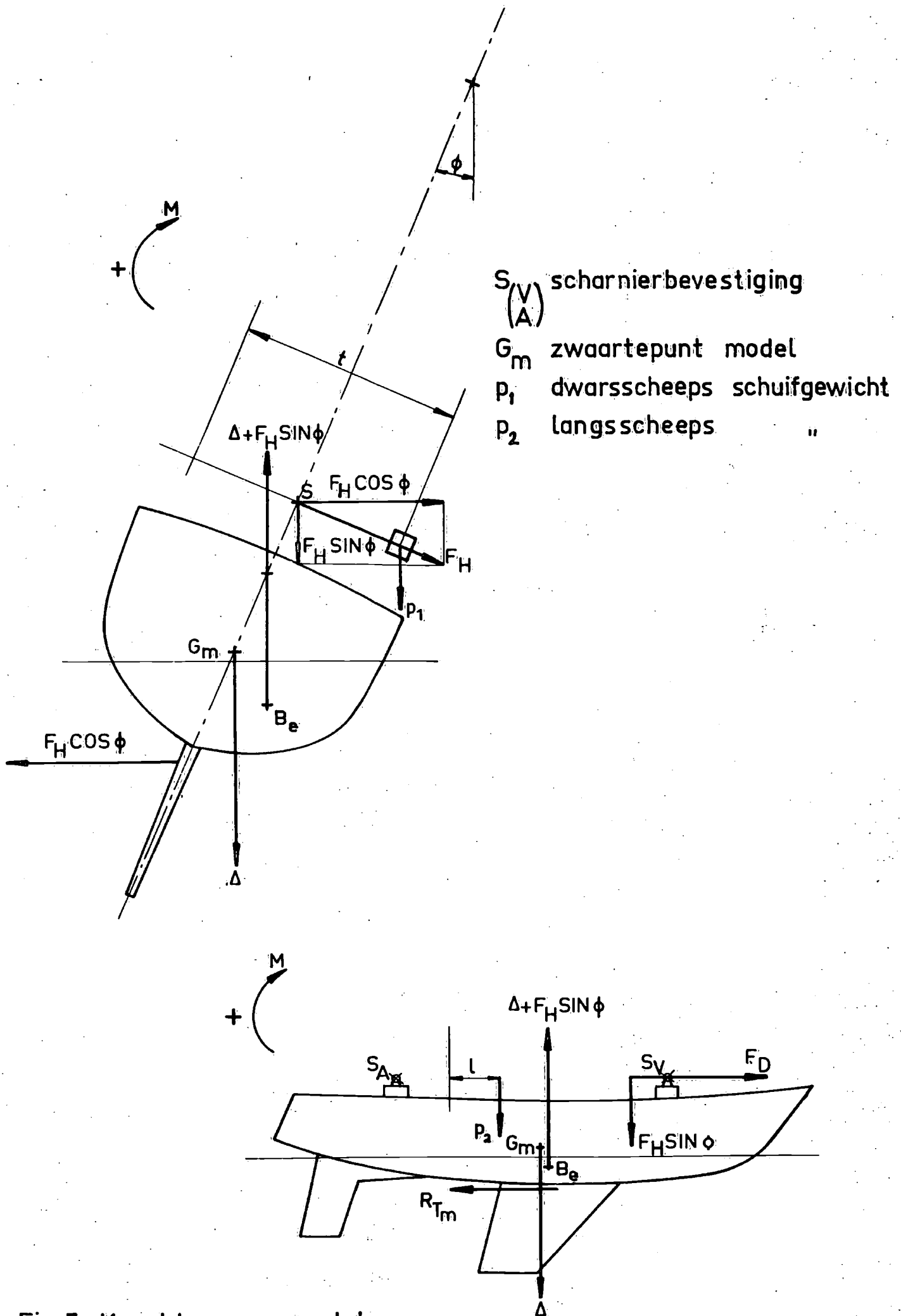


Fig.5: Krachten op model

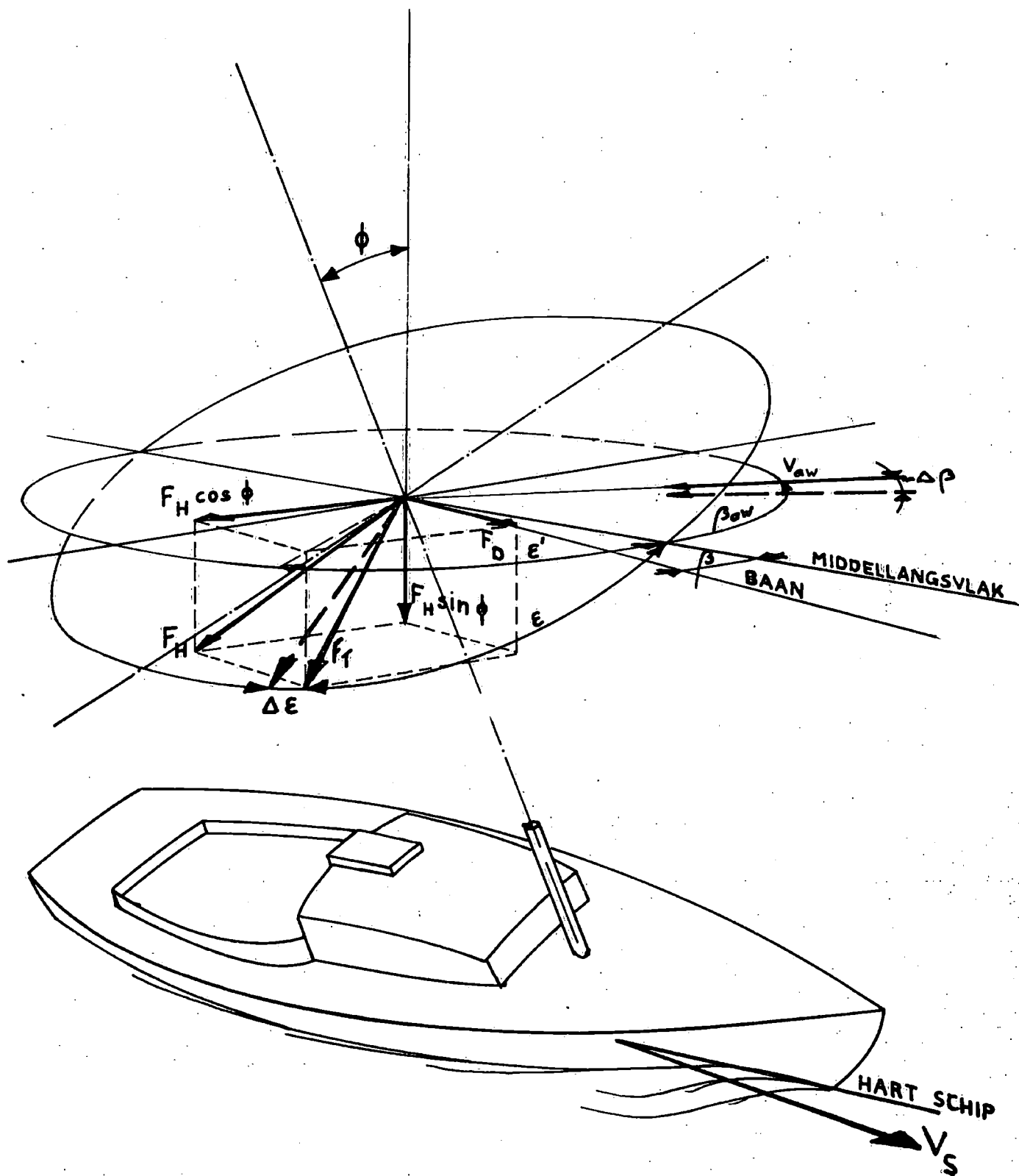


Fig. 6: Zeilkrachten op een aan-de-wind varend schip

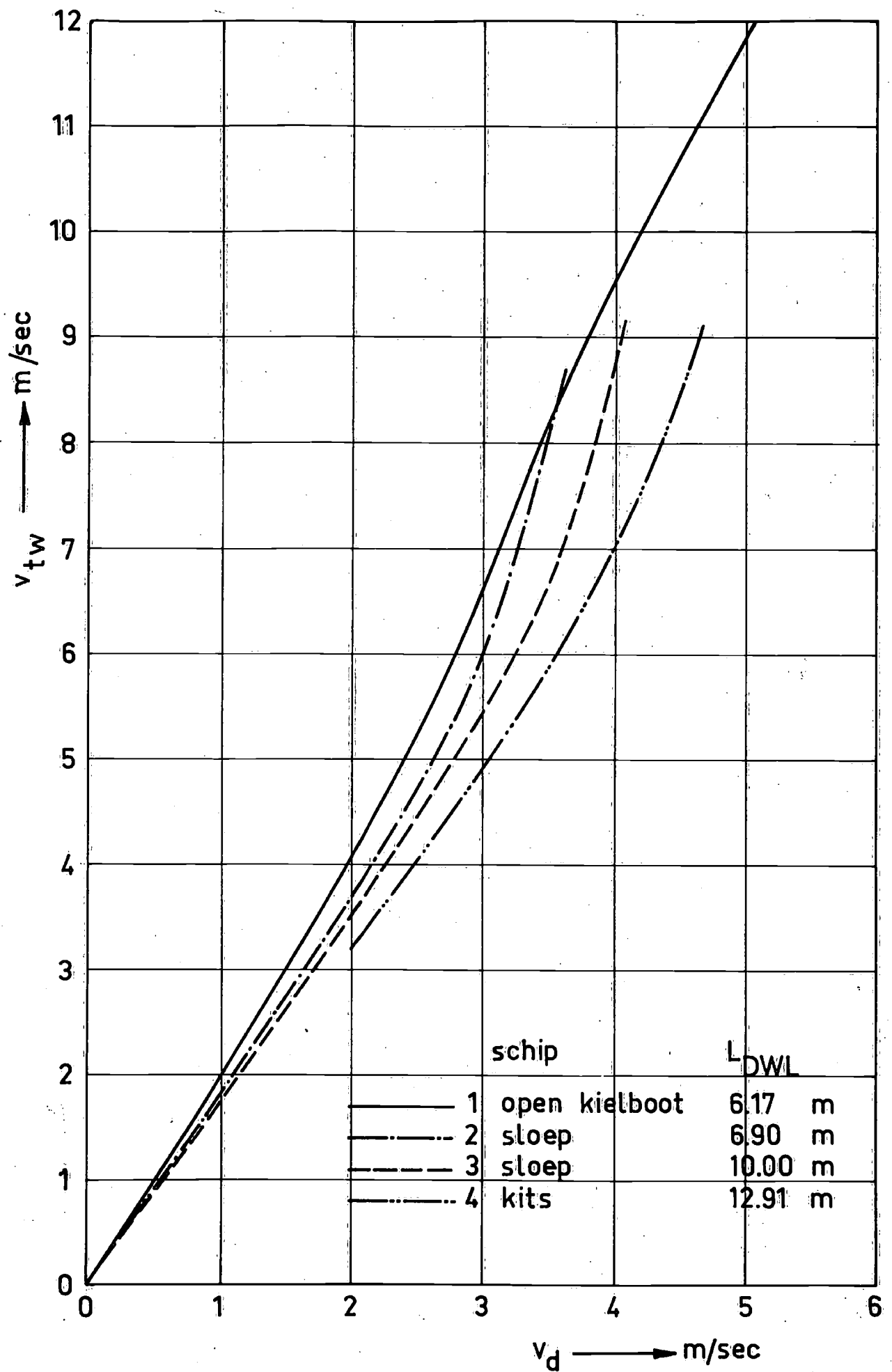


Fig. 7: Snelheid-voor-de-wind

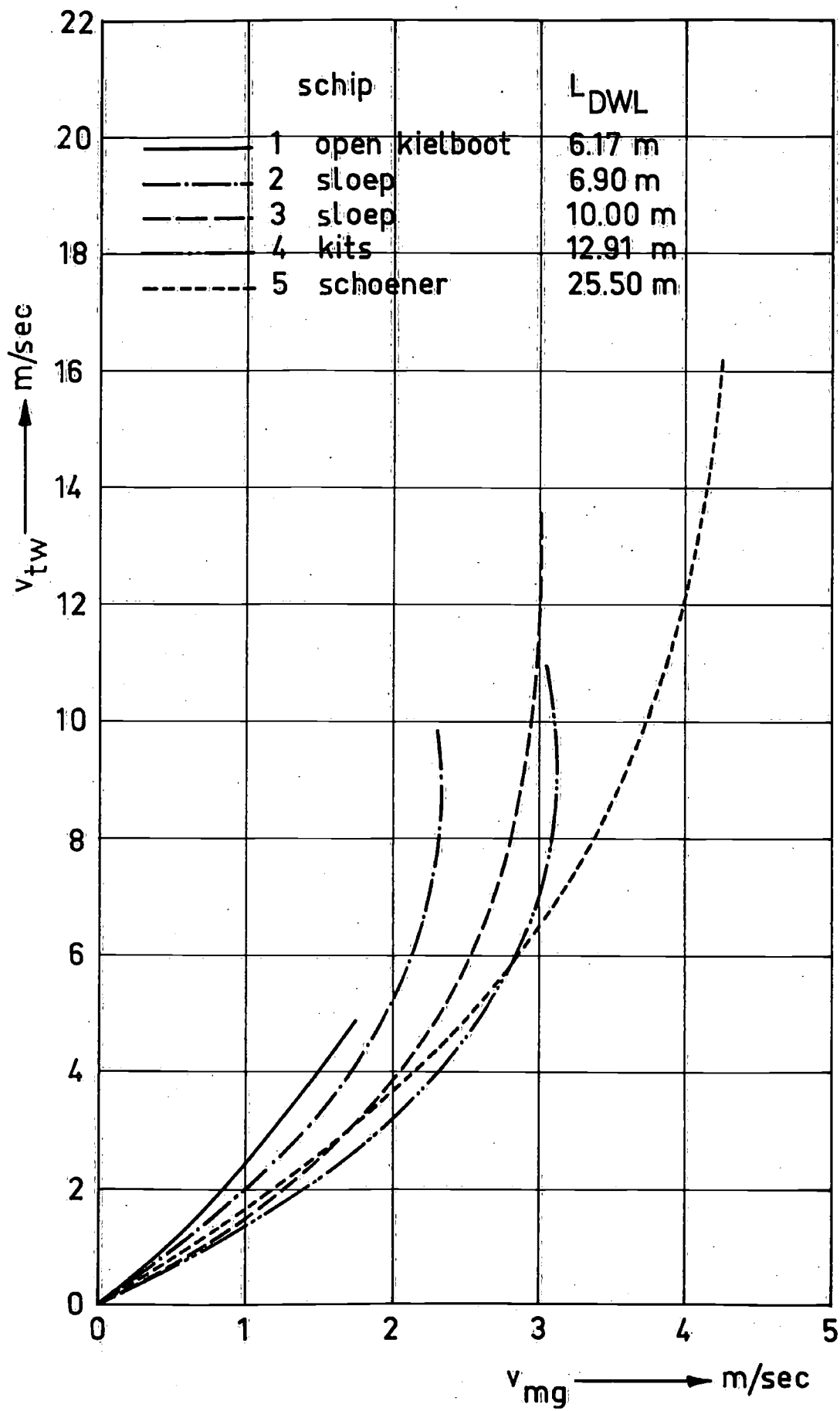


Fig. 8: Snelheid-in-de-wind

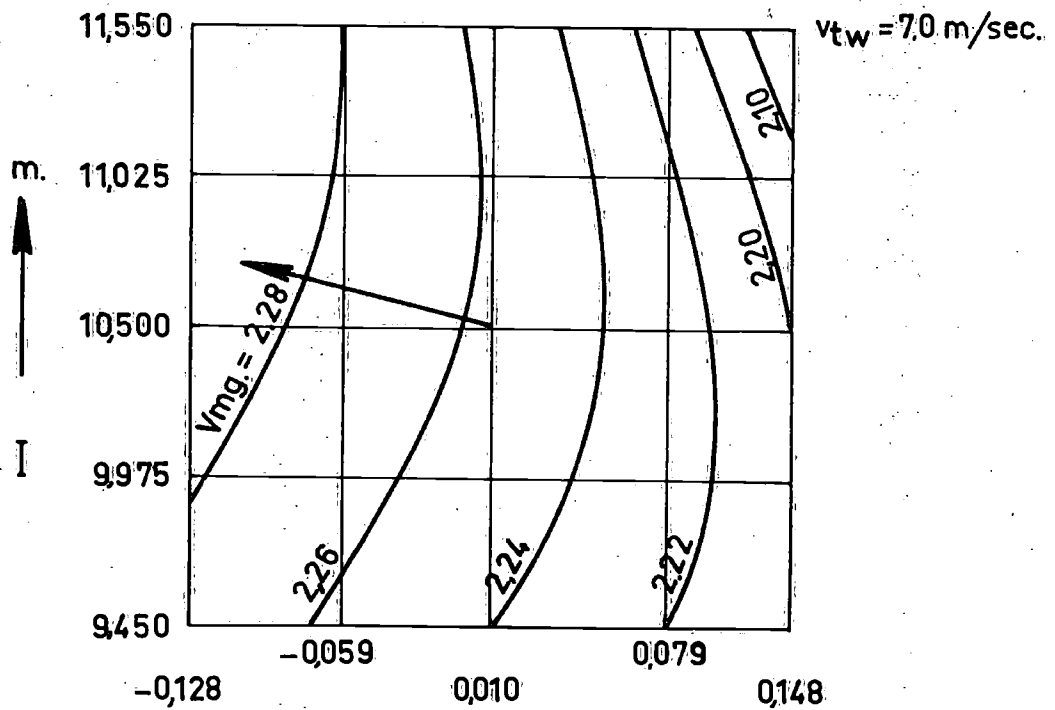
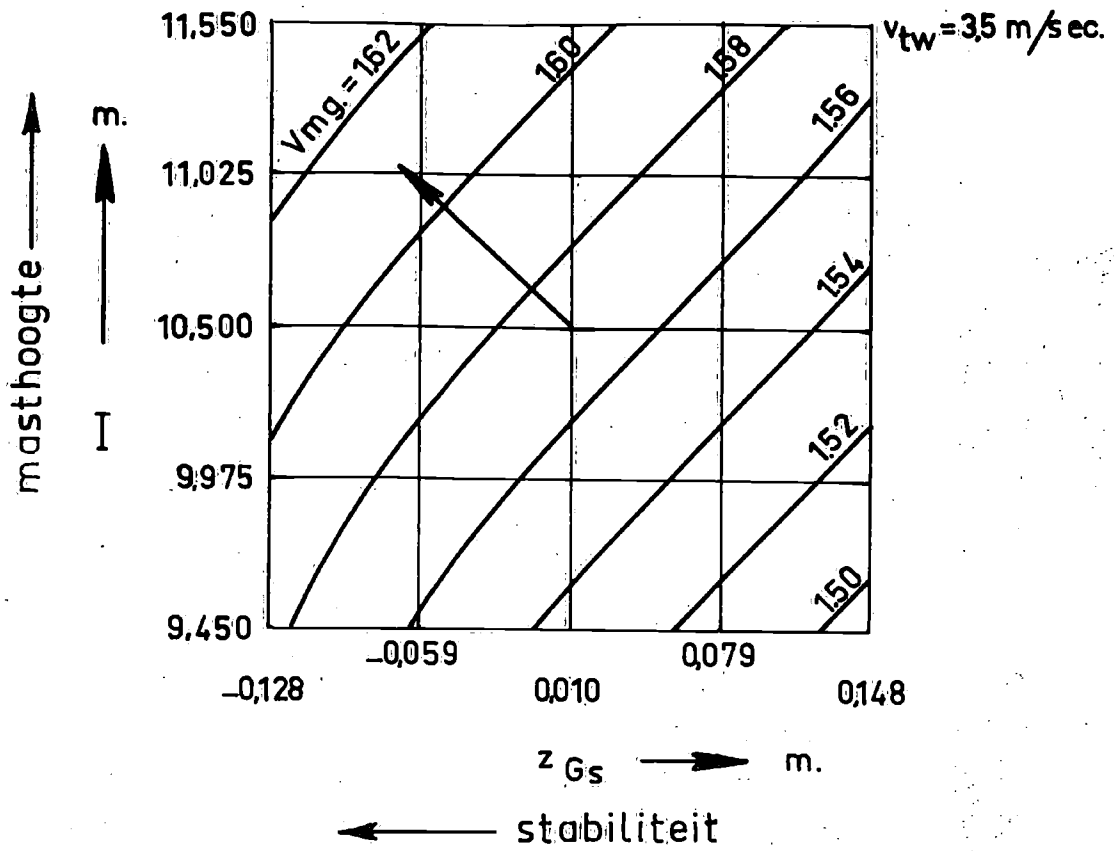


Fig.9a:  $V_{mg}$  bij variabele masthoogte en stabiliteit.

$v_{tw.} = 100 \text{ m./sec.}$

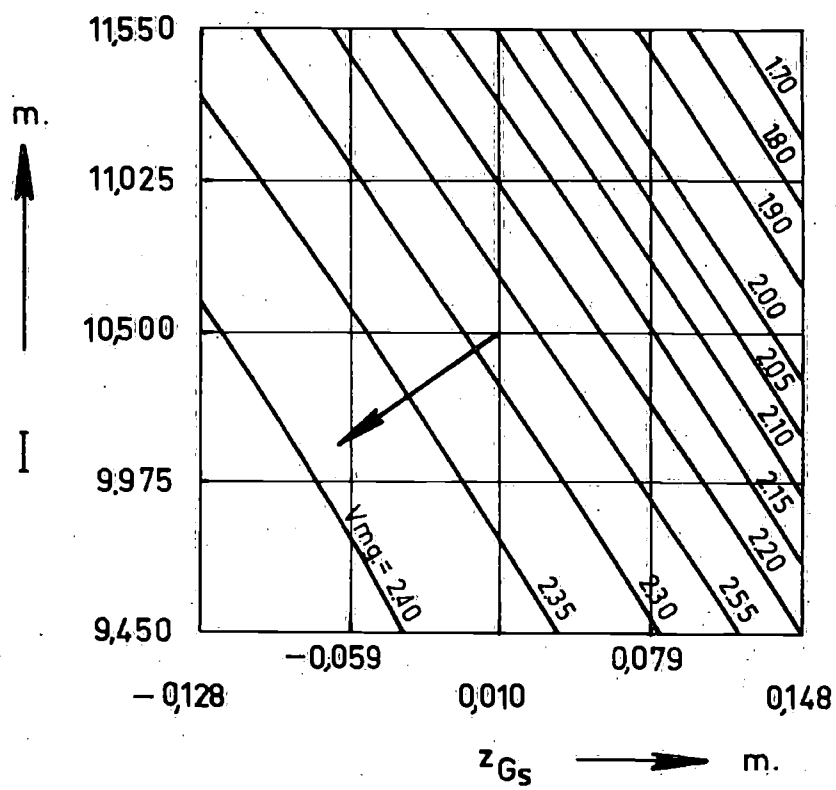


Fig. 9b:  $V_{mg}$ . bij variabele masthoogte en stabiliteit.



Samenvatting

De belangrijkste eigenschappen van vinkiel en roer van zeiljachten worden besproken, mede uit het oogpunt van het ontwerp.



VINKIELEN EN ROEREN VAN ZEILJACHTEN



II 1

door

Prof. ir. J. Gerritsma

## 1. Inleiding.

Vinkiel en roer van zeiljachten hebben gezamenlijk, of elk apart, een aantal functies die als volgt in 't kort zijn samen te vatten:

- a. Het leveren van een zodanige dwarskracht tegen zijdelings afdrijven, dat aan de wind zeilen mogelijk is.
- b. Het waarborgen van voldoende koersstabiliteit en bestuurbaarheid van het jacht.
- c. Het dempen van slingerbewegingen van het jacht als gevolg van zeegang of van instationnaire aerodynamische krachten op de zeilen.
- d. De vinkiel dient vaak als drager van vaste ballast, waarmee de gewichtsstabiliteit vergroot kan worden.

In Figuur 1 is aangegeven dat het windmoment evenwicht maakt met het stabiliteitsmoment van het jacht. De ballast in de vinkiel is mede bepalend voor de hoogteligging van het gewichtszwaartepunt  $G$  van het jacht en daarmee voor de grootte van het stabiliteitsmoment. Uit het evenwicht tussen stabiliteitsmoment en windmoment volgt de grootte van de hellingshoek  $\phi$ .

Dit evenwicht geldt als de toestand stationair is.

In dwarsscheepse richting loodrecht op de koers is de snelheid nul. Instationnaire verschijnselen en daarmee gepaard gaande traagheidskrachten worden hier buiten beschouwing gelaten.

De horizontale dwarskracht  $Y$ , die door het water op het jacht wordt uitgeoefend, verhindert het zijdelings afdrijven dat anders door de zeilkrachtkomponent  $F_H \cos \phi$  zou ontstaan. De kracht  $Y$  ontstaat doordat het systeem romp-vinkiel-roer met een drifthoek  $\beta$  door het water beweegt.

Een slingerend jacht induceert ter plaatse van kiel en roer een dwarsscheeps gerichte relatieve watersnelheid. Samengesteld met de watersnelheid die een gevolg is van de scheepssnelheid, ontstaat een wisselende aanstroming van vinkiel en roer, als aangegeven in Figuur 2. De kracht die daardoor ontstaat, hangt af van de snelheid waarmee het jacht slingert en werkt de slingerbeweging tegen. Deze reactie van kiel en roer heeft daarom het karakter van een demping, die vooral van belang is als het jacht vóór de wind vaart.

Bij een gescheiden vinkiel en roer configuratie is de zogenaamde natuurlijke koersstabiliteit positief en relatief groot. Dit is een gevolg van de langscheepse asymmetrie van een dergelijke opstelling, in tegenstelling tot sommige ontwerpen van oudere datum, waarbij kiel en roer vaak tot één geheel geïntegreerd zijn.

De natuurlijke koersstabiliteit karakteriseert het gedrag van het schip als het roer in de middenstand is vastgezet. Wordt bij het varen van een rechte baan na een kleine tijdelijke verstoring de baan na verloop van tijd weer een rechte, dan spreekt men van positieve natuurlijke stabiliteit.

Het probleem van het sturen van een zeiljacht is gecompliceerd, zodat niet alléén de natuurlijke koersstabiliteit bepalend is voor de stuureigenschappen. Bij het sturen is óók de grootte van de dwarsscheepse roerkracht van belang en bovendien speelt het gedrag van de roerganger een belangrijke rol.

In het volgende zal iets nader worden ingegaan op een aantal van de punten die hierboven aangestipt zijn.

## 2. Krachten op vinkiel en roer.

Figuur 3 geeft het krachten-evenwicht bij het aan de wind zeilen, waarbij een stationnaire toestand is verondersteld.

Voor goede aan-de-windse eigenschappen moet de hoek  $\beta + \beta_{aw} = \epsilon_A + \epsilon_W$  klein zijn, d.w.z.: zowel voor de zeilen ( $\epsilon_A$ ) als voor het systeem romp-kiel-roer ( $\epsilon_W$ ) moet de dwarskracht-weerstand verhouding optimaal zijn.

Voor het onderwatergedeelte van het jacht betekent dat een gunstige verhouding tussen de dwarskracht  $Y$  en de weerstand  $R$ .

Vergroting van de weerstand, bijvoorbeeld door aangroeiing of door zeegang heeft, bij overigens gelijke dwarskracht, onmiddellijk een vergroting van koershoek ten opzichte van de schijnbare windrichting  $V_{aw}$  als gevolg.

Er wordt hier op gewezen dat de drifthoek  $\beta$  de hoek waaronder aan-de-wind gevaren wordt op zichzelf niet beïnvloedt. Wel veroorzaakt een drifthoek een kleinere invalshoek van de wind op het zeil en kan als zodanig de voortstuwende kracht van het zeil verminderen.

In Figuur 3 staat niet expliciet aangegeven dat het roer ook dwarskracht levert. In feite is het roer óók in dit opzicht belangrijk, want de bijdrage van dit draagvlak bedraagt soms wel 40% van het totaal. Daarbij moet rekening gehouden worden met de afbuiging van de stroming door de kiel, het zogenaamde "Side-wash" effect, waardoor de invalshoek van het water op het roer in de middenstand belangrijk kleiner kan zijn dan de drifthoek  $\beta$ . Deze reductie kan wel 50% bedragen. Dat is in overeenstemming met het ervaringsfeit dat de helmstok bij het varen aan de wind vaak een hoek van enkele graden met de midscheeps maakt.

Aangezien het roer door zijn vaak grotere slankheid een grotere dwarskracht per oppervlakte eenheid ontwikkeld dan de kiel, is het niet raadzaam het zeil zodanig te trimmen dat de kracht op het roer zo klein mogelijk wordt. Immers de minder effectieve vinkiel wordt daardoor zwaarder belast, zodat een minder gunstige dwarskracht-weerstand verhouding van het totaal ontstaat. Uiterst ongunstig is een zodanige trim van het zeil, waarbij de dwarskracht op het roer tegengesteld van richting is aan die van de kiel.

De mate van loef- en lijgierigheid blijft hier in hoofdzaak onbesproken, maar het is vermeldenswaard dat de roerkracht en dus de kracht op de helmstok kwadratisch met de snelheid van het jacht toeneemt bij overigens gelijke aangrijpingspunten van zeilkracht en dwarskracht op het onderwaterschip en bij constante roerhoek.

## 2.1 Berekening van de krachten op kiel en roer.

Ten aanzien van de berekening van de krachten op kiel en roer zijn deze elementen op te vatten als draagvlakken, d.w.z. één van de afmetingen (in dit geval de dikte  $t$ ) is klein ten opzichte van de beide andere: de koorde  $c$  en de spanwijdte  $b$ .

Vinkielen en roeren van zeiljachten hebben over 't algemeen een betrekkelijk kleine slankheid of aspectverhouding  $a$ , bijvoorbeeld  $a = \frac{1}{4}$  tot  $a = 3$ ; voor jollen is soms  $a = 5$ .

In Figuur 4 zijn de diverse grootheden, die bij de beschrijving van kiel en roer een rol spelen samengevat.

Voor zeegaande zeiljachten is de geometrische slankheid van de kiel ongeveer  $a = 1$ , voor het roer ongeveer  $a = 2$ . Bij deze relatief kleine slankheden speelt de omstroming van de tip een belangrijke rol; deze heeft een grote invloed op de dwarskracht en de weerstand van het draagvlak. Een schatting van deze grootheden, uitgaande van 2-dimensionale profielmetingen is daarom niet altijd betrouwbaar te achten.

Het Naval Ship Research and Development Center (U.S.) heeft de resultaten van een uitvoerige serie proeven met draagvlakken met kleine slankheid gepubliceerd. De effectieve aspectverhouding  $a_e$  varieerde daarbij van 1 tot 3, de pijlhoek van  $-8^\circ$  tot  $11^\circ$  en de tapsheid  $\lambda$  (de verhouding van de tip koorde  $c_t$  tot de koorde aan de wortel van het draagvlak  $c_r$ ) was 0.45. Aanvullende proeven met tapsheden van 0,20 tot 0,80 en een groter bereik van slankheden zijn o.a. uitgevoerd door de Universiteit van Maryland. De beschouwde draagvlakken waren tijdens de meting aan één zijde begrensd door een vlakke plaat. De effectieve aspectverhouding was daardoor het dubbele van de geometrische aspectverhouding [1, 2]. In Figuur 5 is een tweetal voorbeelden van meetresultaten gegeven, waarbij de invloed van de slankheid duidelijk naar voren komt.

De resultaten van deze proeven kunnen met voldoende nauwkeurigheid voor praktische doeleinden samengevat worden in de volgende formules.

$$C_L = P_\beta + Q_\beta^2 \quad (1)$$

waarin:

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A_T}$$

$$P = \frac{\partial C_L}{\partial \beta} = \frac{0,1 a_e}{1,8 + \cos \Lambda \sqrt{\frac{a_e^2}{\cos^4 \Lambda} + 4}}$$

IV.5.

$$Q = \frac{0,0003 (0,1 + 1,6 \lambda)}{a_e} \quad (\text{rechthoekige tip})$$

$$Q = \frac{0,0003 (0,1 + 0,7 \lambda)}{a_e} \quad (\text{afgeronde tip})$$

- $\beta$  - invalshoek in graden  
 $a_e$  - effectieve slankheid  
 $\Lambda$  - pijlhoek in graden  
 $\lambda$  - tapsheid

Voor invalshoeken  $< 10^\circ$  en slankheden  $> 2$  kan formule (1) vereenvoudigd worden tot

$$C_L = P\beta \quad (2)$$

De draagkracht of lift  $L$  van een draagvlak met oppervlak  $A_T$  dat onder een hoek  $\beta$  wordt aangestroomd met een snelheid  $V$  volgt dan uit:

$$L = 51 V^2 \cdot A_T \cdot P \cdot \beta \quad (\text{voor zout water } 52) \quad (3)$$

waarin:

$L$  in kg,  $V$  in m/sec en  $A_T$  in  $m^2$ .

De waarde van  $P$  is in Figuur 6 gegeven als functie van de effectieve aspectverhouding  $a_e$  en voor  $\Lambda = 0$  en  $\Lambda = 25^\circ$ .

Om de invloed van de aspectverhouding te demonstreren is de dwarskracht berekend voor een kiel met een diepte  $b = 1$  m en een koorde  $c$  van respectievelijk 0,5 m, 1 m, 1,5 m en 2 m. Aangenomen is dat de kiel zich bevindt onder een vlakke ondiepe romp die als ideale eindplaat fungeert.

Bij een snelheid van 3 m/s (dat is ongeveer 6 knopen) en een drifthoek van 5 graden vinden we de volgende waarden.

Tabel 1.

b (m)	c (m)	$A_T$ ( $m^2$ )	$a_e$	P	L (kg)	$C_L$
1	0,5	0,5	4	0,063	72	0,31
1	1,0	1,0	2	0,043	99	0,22
1	1,5	1,5	1,33	0,032	110	0,16
1	2,0	2,0	1	0,025	115	0,13

II.6

Uit de tabel blijkt dat een vier maal zo groot kieloppervlak bij gelijke snelheid en drifthoek slechts 1,6 maal zo grote dwarskracht levert.

Een pijlhoek is ten aanzien van de dwarskracht alléén nadelig als de slankheid groter is dan 2, althans tot de beschouwde grens  $\Lambda = 25^\circ$  en voor zover de weerstand niet beschouwd wordt. In 't algemeen neemt de weerstand toe bij vergroting van de pijlhoek, indien men het draagvlak op zichzelf beschouwt.

Interferentie verschijnselen met de romp spelen in dit opzicht wel degelijk een rol.

Voor zeer kleine slankheden ( $a_e < 1$ ) komt formule (1) zeer goed overeen met het theoretisch af te leiden resultaat:

$$C_L = \frac{\pi a_e}{2} \cdot \beta \quad (\text{radialen})$$

$$\text{of } C_L = 0,0275 a_e \cdot \beta \quad (\text{graden}) \quad (4)$$

Een andere methode om de draagkracht of lift van een draagvlak met kleine slankheid te berekenen is afkomstig van [3].

Eerst wordt het aangrijpingspunt van de totale lift berekend met:

$$CP_b = \eta_{cp} = 0,42 + \frac{a_e}{10^3} \{(4,4 + 5\lambda)tg\Lambda + 10,4\lambda^2 - 6,7\} \quad (5)$$

De verdeling van de draagkracht volgt dan uit:

$$\frac{c_{l \cdot c}}{C_L \cdot \bar{c}} = \frac{4}{\pi} \sqrt{1 - \eta^2} + (\eta_{cp} - 0,425)Q(\eta) \quad (6)$$

waarin:

$$Q(\eta) = -6,35 + 14,13 \eta \quad \text{voor } \eta < 0,7$$

$$Q(\eta) = 4,25 - 53,8 (\eta - 0,815)^2 \quad \text{voor } \eta > 0,7$$

Hierin is  $c_L$  - de lift coefficient van een 2 dimensionale doorsnede  
 $C_L$  - de lift coefficient van het gehele draagvlak  
 $\eta$  - een dimensieloze coördinaat, uitgedrukt in fracties van de spanwijdte.

De formules zijn ontleend aan [3] door daarin het getal van Mach nul te stellen. Zij gelden voor slankheden groter dan 1 en voor pijlhoeken tot  $60^\circ$ .

Uit de formules blijkt dat een afnemende tapsheid (dus een toenemende  $\lambda$ ) en een toenemende pijlhoek de plaats van het aangrijpingspunt van de dwarskracht doet verschuiven naar grotere waarden van  $\eta$ .

Dit is nadelig uit het oogpunt van stabiliteit, immers bij gelijke dwarskracht vergroot daardoor het windmoment.

De twee dimensionale draagkracht coefficient  $c_l$  kan bepaald worden met de gegevens van systematische profielmetingen [4].

Indien deze niet ter beschikking staan dan kan  $c_l$  geschat worden met

$$\frac{\partial c_L}{\partial \beta} = 0.1096 + 0.082 \frac{t}{c} (1 + 0.00375 \psi) \quad \text{per graad} \quad (7)$$

waarin de staarhoek van het profiel  $\psi$  in graden is uitgedrukt;  $t$  is de dikte van het profiel.

Opgemerkt wordt dat de constante 0.1096 in formule (7) gelijk is aan  $2\pi/57.3$ ; dit is de theoretische helling van de liftkromme voor een 2-dimensionaal profiel. In [1] is deze constante met een empirische correctie factor (0.9) vermenigvuldigd.

Uit de reeds genoemde Amerikaanse proeven volgt het aangrijpingspunt van de resulterende kracht op het draagvlak uit de volgende formule:

$$(CP)_{\bar{c}} = 0,25 - \frac{C_m \bar{c}/4}{C_L \cos \beta + C_D \sin \beta} \quad (8)$$

en:

$$(CP)_b = \frac{C_L \left(\frac{4}{3\pi} \cdot b\right) \cos \beta + C_D \cdot b \cdot \sin \beta}{b(C_L \cos \beta + C_D \sin \beta)} \quad (9)$$

waarin:

$C_m \bar{c}/4$  = het moment van de resulterende kracht op het draagvlak t.o.v. het kwart koorde punt van de gemiddelde koorde, gedeeld door  $\frac{1}{2} \rho V^2 A_T \bar{c}$ .

$$C_D = C_{d_0} + \frac{C_L^2}{\pi a_e \cdot e}$$

$C_{d_0}$  is de minimum profiel weerstand, bestaande uit wrijvings- en vormweerstand.  
 $e = 0,90$ , een empirische correctiefactor.

$$C_{m\bar{c}/4} = \left[ 0,25 - \left(\frac{\partial C_m}{\partial C_L}\right) C_L = 0 \right] P_\beta - \frac{1}{2} Q \beta^2$$



en:

$$\left(\frac{\partial C_m}{\partial C_L}\right)_{C_L=0} = \frac{1}{2} - \frac{1,11 \sqrt{a_e^2 + 4} + 2}{4(a_e + 2)}$$

In de uitdrukking voor de weerstand van het draagvlak is de zogenaamde geïnduceerde weerstand van groot belang:

$$C_{Di} = \frac{C_L^2}{\pi a_e \cdot e}$$

Voor kleine invalshoeken (bijv.  $\beta < 10^\circ$ ) kan hiervoor geschreven worden:

$$C_{Di} = \frac{\rho^2 \beta^2}{2,8 a_e} \quad (10)$$

de geïnduceerde weerstand volgt dan uit:

$$D_i = \frac{1}{2} \rho V^2 A_T C_{Di} = 18,2 \frac{V^2 A_T P}{a_e} \cdot \beta^2 \text{ (kg)} \text{ (voor zoutwater 18,5)} \quad (11)$$

De formule voor de geïnduceerde weerstandscoefficient geldt voor zeer slanke draagvlakken. Voor zeer kleine slankheden vindt men echter uit theoretische overwegingen dezelfde uitdrukking, zodat toepassing in het geval van matige aspectverhoudingen zoals die bij vinkiel en roer toegepast worden, mogelijk lijkt. De invloed van de geïnduceerde weerstand wordt geïllustreerd in onderstaande Tabel 2 die betrekking heeft op hetzelfde voorbeeld als Tabel 1, dus  $V = 3 \text{ m/s}$ ,  $\beta = 5^\circ$ . De minimum weerstand van het draagvlak is geschat  $C_{d0} = 0,01$ .

Tabel 2.

b (m)	c (m)	$A_T$ (m <sup>2</sup> )	$a_e$	$D_0$ (kg)	$D_i$ (kg)	$C_D$	$C_L$
1	0,5	0,5	4	2.3	2.0	0,019	0,31
1	1,0	1,0	2	4.6	3.6	0,018	0,21
1	1,5	1,5	1.33	6.9	4.4	0,016	0,15
1	2,0	2,0	1	9.2	5.1	0,016	0,12

De totale weerstand blijft ongeveer evenredig met het natte oppervlak.

In dit voorbeeld neemt de dwarskracht toe met afnemende aspectverhouding. Bij constante dwarskracht is de geïnduceerde weerstand gelijk als de spanwijdte gelijk is.

Dat blijkt duidelijk uit het uitschrijven van de formule voor de geïnduceerde weerstand :

$$D_i = \frac{1}{2} \rho V^2 A_T \cdot \frac{C_L^2}{\pi a_e \cdot e} = \frac{L^2 \cdot A_T}{\frac{1}{2} \rho V^2 \cdot A_T \cdot \pi e \cdot 2b^2} = C \cdot \frac{L^2}{b^2} \quad (12)$$

want :  $a_e = 2 \frac{b}{c} = \frac{2b^2}{A_T}$

De coëfficiënt in formule (12) hangt slechts van de snelheid V af!

Uit de formule blijkt dat de geïnduceerde weerstand kwadratisch met de diepte b van de kiel of het roer afneemt; het is dus voordelig om steeds van de maximaal toelaatbare diepgang gebruik te maken.

Verder is de geïnduceerde weerstand evenredig met het kwadraat van de te leveren dwarskracht. Men kan dus met voordeel deze kracht verdelen over twee draagvlakken. Indien, in een extreem geval, beide de helft voor hun rekening nemen bij gelijke b, dan vermindert de geïnduceerde weerstand met 50% namelijk :

$$D_i = C \cdot \frac{(\frac{1}{2}L)^2 + (\frac{1}{2}L)^2}{b^2} = C \cdot \frac{L^2}{b^2}$$

Uit deze beschouwing blijkt nogeens het belang van het roer als dwarskrachtproducent: kiel en roer kunnen gezamenlijk minder geïnduceerde weerstand hebben dan wanneer de kiel alléén de gehele dwarskracht moet leveren.

De invloed van de effectieve aspectverhouding op  $C_L$ ,  $C_D$ ,  $C_{m_c/4}$ ,  $CP_c$  en  $CP_b$  blijkt uit de Figuren 5a, 5b.

Deze trend wordt vrij goed weergegeven door de hierboven gegeven formules.

In de literatuur zijn meer van dergelijke empirische formules te vinden; zij verschillen onderling niet veel en gezien de beïnvloeding van kiel en roer door de romp van het jacht is het nastreven van een grotere nauwkeurigheid weinig zinvol.

## 2.2. Onderlinge beïnvloeding van romp kiel en roer

Deze beïnvloeding is niet op eenvoudige wijze analytisch te berekenen. Wel is er voor relatief ondiepe rompen een vrij goede benadering beschikbaar. Ook kiel en roer beïnvloeden elkaar.

Als we veronderstellen dat de romp een te verwaarlozen invloed heeft op de afbuiging van de stroming door de kiel dan is de afbuigingshoek (de sidewash) te schatten met de volgende formule:

$$\beta_s = 1,6 \frac{C_L}{\pi a_e} \quad (\text{in radialen})$$

$$\text{of} \quad \beta_s = 29 P. \beta / a_e \quad (\text{in graden}) \quad (13)$$

In het geval :  $b = 1\text{m}$ ,  $c = 1\text{m}$ ,  $a_e = 2$ ,  $C_L = 0,21$ ,  $\beta = 5^\circ$ , vinden we  $\beta_s = 3^\circ$ , d.w.z. het roer moet  $3^\circ$  verdraaid worden om dezelfde invalshoek als de kiel te ondervinden. Naar de kiel toe vermindert volgens de theorie de afbuighoek tot de helft.

Formule (13) geldt slechts op voldoende afstand van de kiel, afhankelijk van de slankheid en de liftcoëfficiënt.

Van groot belang is de invloed van de romp op kiel en roer. De romp fungeert in vele gevallen als een goede eindplaat, waardoor de effectieve aspectverhouding soms het dubbele van de geometrische aspectverhouding bedraagt.

De romp alléén is in het geval van moderne "light displacement" jachten als een slechte dwarskracht leverancier op te vatten d.w.z. : de verhouding dwarskrachtweerstand is zéér klein t.o.v. de overeenkomstige verhouding voor kiel en roer.

Proeven met een model van "Stormy" toonden aan dat de naakte romp maar 10 à 15% van de dwarskracht van romp met kiel en roer levert. Een analoog resultaat werd gevonden met een International Canoe, op ware grootte beproefd in het National Physical Laboratory (England). De bijdrage van de romp alléén was slechts 2½%.

In het Davidson Laboratory van het Stevens Institute werd een, in dit opzicht interessante, proef door de Saix uitgevoerd met een model van een 5,5 m jacht. [5]

De kiel, met geïntegreerd roer, was vrij opgesteld t.o.v. de romp en men kon daardoor de dwarskracht van de romp in tegenwoordigheid van de kiel en de dwarskracht van de kiel in tegenwoordigheid van de romp meten. De romp fungeert als eindplaat voor de kiel en de kiel heeft invloed op de stroming om de romp.

Tevens werd de kiel apart gemeten op een vlakke eindplaat.

De resultaten van de metingen zijn samengevat in tabel 3.

Tabel 3

	$F_n = 0,36$			
helling	0	10°	20°	30°
1	52%	51%	49%	56%
2	28%	23%	20%	6%
3	6%	6%	6%	7%
4	14%	20%	25%	31%
5	100%	100%	100%	100%

waarin :

- 1- de kiel op een vlakke eindplaat
- 2- toename dwarskracht kiel door romp
- 3- de naakte romp
- 4- toename dwarskracht romp door kiel
- 5- het complete model

Uit deze tabel blijkt dat de romp meer doet dan alléén fungeren als eindplaat. Zoals gezegd is het moeilijk deze invloed te berekenen.

Een vrij goede benadering voor jachten met een relatief ondiepe romp is het fictief doortrekken van kiel en roer tot het wateroppervlak en dit oppervlak te beschouwen als een ideale eindplaat, zie Figuur 7.

Er wordt dan verondersteld dat de circulatie verdeling van de kiel en van het roer a.h.w. doorloopt tot aan het wateroppervlak als in de Figuur is aangegeven. Voor een aantal jachten bleken schattingen van de dwarskracht, gebaseerd op deze veronderstelling, slechts enkele procenten van de aan modellen gemeten waarden af te wijken, (Tempest,  $\frac{1}{2}$  ton jacht, Stormy), zodat deze methode voor ontwerp doeleinden betrouwbaar lijkt te zijn.

I-12

### 3. Vorm en afmetingen van kiel en roer.

#### 3.1 Bepaling van het benodigde kiel en roeroppervlak.

De afmetingen van kiel en roer zijn in de eerste plaats afhankelijk van de verlangde dwarskracht. De resultaten van sleepproeven met zeiljachten worden door het Laboratorium voor Scheepsbouwkunde gereduceerd tot standaardwaarden bij windsnelheden van respectievelijk: 3,5 m/s, 7 m/s en 10 m/s.

De bijbehorende dwarskrachten zijn met behulp van de "Gimcrack" coëfficiënten en het zeiloppervlak te schatten.

De Gimcrack coëfficiënten zijn in Tabel 4 gegeven.

Tabel 4.

$\phi$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°
$C_H$	1,54	1,35	1,19	1,04	0,90	0,78	0,67
$C_D$	0,46	0,42	0,38	0,34	0,31	0,27	0,24

Hierin is:

$$C_H = \frac{F_H}{\frac{1}{2}\rho_L V_{AW}^2 SA_{eb}}$$

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho_L V_{AW}^2 SA_{eb}}$$

- $\rho_L$  - de dichtheid van lucht = 0,125 kgsec<sup>2</sup>m<sup>-4</sup>
- $SA_{eb}$  - het effectieve zeiloppervlak aan de wind in m<sup>2</sup>
- $V_{AW}$  - de snelheid van de schijnbare wind in m/s
- $F_D$  - de voortstuwende kracht van de zeilen in kg
- $F_H$  - de dwarskracht van de zeilen in kg (loodrecht op de mast)

Om nu een schatting te kunnen maken van het benodigde oppervlak van kiel en roer moet de drifthoek ( $\beta$ ) en de verwachte snelheid ( $V$ ) van het jacht bekend zijn. Voor de genoemde standaardwindsnelheden zijn mogelijke waarden van de drifthoek, de hellingshoek, de snelheid (in de vorm van het getal van Froude) en de hoek waaronder aan de wind gezeild wordt ( $\beta + \beta_{TW}$ ) gegeven in Tabel 5.

Tabel 5.

$V_{TW}$ (m/s)	3,5	7,0	10,0
$\phi$	$6^\circ - 9^\circ$	$15^\circ - 20^\circ$	$23^\circ - 30^\circ$
$\beta$	$2^\circ - 3,8^\circ$	$4,5^\circ - 5,5^\circ$	$6,5^\circ - 8,5^\circ$
$\frac{V}{\sqrt{gL}}$	0,24 - 0,28	0,32 - 0,35	0,34 - 0,37
$\beta + \beta_{TW}$	$40^\circ$	$36^\circ$	$36^\circ$

waarin  $g = 9,81 \text{ m/sec}^2$ .

De snelheid van de schijnbare wind  $V_{AW}$  wordt bepaald met de geschatte scheeps-snelheid volgens Tabel 5, de gekozen werkelijke windsnelheid  $V_{TW}$  en de hoek  $\beta + \beta_{TW}$  waaronder aan de wind gezeild wordt (zie Figuur 3).

Er wordt op gewezen dat de verdeling van het totaal benodigde oppervlak over kiel en roer door de ontwerper wordt bepaald op grond van zijn ervaring. Elk van deze draagvlakken heeft een eigen waarde voor  $A_T$  en  $P$ , waarmee bij het bepalen van het benodigde oppervlak rekening gehouden moet worden, als de formule  $L = 51 V^2 A_T \cdot P \cdot \beta$  wordt gebruikt.

In verband met de toepasbaarheid van de geschetste methode lijkt het de voorkeur te verdienen bij de berekening uit te gaan van  $V_{TW} = 7 \text{ m/s}$ , de hellingshoek is daarbij meestal niet groot (ongeveer  $15^\circ$ ) en de golfvorming is niet zodanig dat de gemaakte veronderstellingen geweld aangedaan worden.

Bij de bepaling van het benodigde oppervlak hoeft geen rekening gehouden te worden met de afbuighoek; de roerganger compenseert deze zelf bij het zeilen.

Bij een proef in de sleeptank wordt het roer meestal in de middenstand gefixeerd. Dat betekent in feite dat de kiel zwaarder belast wordt dan in werkelijkheid, zodat i.v.m. formule (12) de prognoses gebaseerd op sleepproeven "aan de wind" uit dit oogpunt bezien waarschijnlijk aan de conservatieve kant zijn. Immers de kiel is over 't algemeen minder slank dan het roer en de belasting is hoger dan in werkelijkheid optreedt.

### 3.2 Aspectverhoudingen.

De aspectverhouding van de kiel wordt in hoge mate bepaald door de diepgangsbeperking. Men kiest de maximaal toelaatbare diepgang en dus de grootst mogelijke spanwijdte van de draagvlakken. Alléén voor het roer is men vaak begrensd door constructieve eisen en door het feit dat bij relatief grote slankheid overtrekken eerder optreedt dan bij roeren met kleinere aspectverhoudingen.

Een roer met  $a_e = 4$  overtrekt vaak al bij een roerhoek  $\delta_r < 16^\circ$ .

De invloed van de slankheid op het punt van overtrekken wordt duidelijk gedemonstreerd in de Figuren 5 a, b : voor  $a_e$  resp. 2, 1 is de overtrekhoek resp.  $28^\circ$  en  $39^\circ$ .

### 3.3 Vorm van het zij-aanzicht van kiel en roer.

Uit theoretische overwegingen zou een elliptische planform het hoogste rendement hebben.

In verband met visceuze verschijnselen van het wervelvlak dat van kiel en roer loslaat lijkt een zo lang mogelijke "trailing edge" (achterrاند) voordelig, zie Figuur 8. Daarbij zou een tapsheid van 0,35 de grootste lift-driftverhouding geven. Een dergelijke tapsheid wordt thans bij jachten vrijwel niet toegepast. Een mogelijk voordeel van tapsheid is de relatief hogere ligging van het aangrijpingspunt van de dwarskracht; deze ligt lager bij een meer rechthoekige vorm. In 't algemeen lijkt het voordeel van de grotere lift-drift verhouding niet van groot belang: de winst t.a.v. de totale weerstand van het jacht is zeer gering. Het toepassen van "sweep back" of een pijlhoek voor de kiel wordt wel verdedigd op grond van een veronderstelde gunstige interferentie tussen het golfsysteem van romp en kiel. Een voorlopige conclusie op grond van proeven in Southampton, is een optimale pijlhoek van  $30^\circ$ . Een praktisch voordeel van een naar achteren gerichte kiel is het afvoeren van wier e.d.

Voor roeren met een hogere aspectverhouding is een pijlhoek niet aan te bevelen. In 't algemeen neemt de lift af en neemt de weerstand toe bij toenemende pijlhoek. Bovendien ligt het aangrijpingspunt van de dwarskracht lager naarmate de pijlhoek toeneemt (zie formule 5) zodat bij overigens gelijke dwarskracht een groter windmoment ontstaat.

Een eensluidende conclusie t.o.v. de pijlhoek is blijkbaar niet voorhanden, Heel kritisch lijkt de keuze niet te zijn mits men niet vervalt in extreme waarden. Sommige ontwerpers rekenen de verticale dwarsdoorsneden van de kiel bij de dwarsdoorsneden van de romp bij het bepalen van de kromme van dwarsdoorsneden, en zorgen ervoor dat deze een strokend verloop heeft; anderen beschouwen de kiel als een aanhangsel dat bijvoorbeeld bij het bepalen van de prismatische coëfficiënt niet wordt meegerekend. In het eerste geval bestaat het gevaar dat de prismatische coëfficiënt van de romp alléén te groot wordt hetgeen weerstands verhogend kan werken. Vooral voor moderne rompvormen lijkt de tweede methode beter, te meer daar de golfopwekking door de kiel, recht op varend, van ondergeschikt belang is in vergelijking met die van de romp.

Aan de wind varende met een hellingshoek is de liftproductie van de kiel en het daarmee gepaard gaande druksysteem wel belangrijk in verband met de golfvorming en de daaruit voortvloeiende interferentie met de romp. Het volume van de kiel speelt daarbij echter een geringe rol.

### 3.4 Vorm van de tippen.

De vorm van de tippen van kiel en roer is van belang in verband met de omstroming daar ter plaatse, die uiteindelijk de oorzaak is van de geïnduceerde snelheid en de geïnduceerde weerstand.

Uit windtunnel proeven met vleugels blijkt dat een recht afgesneden tip voordelig is t.o.v. een afgeronde tip. Dit komt tot uiting in een hogere effectieve aspectverhouding.

Een dergelijk trend is óók te zien aan formule (1), waar de recht afgesneden tip, bij overigens gelijk draagvlak oppervlak, een hogere liftkracht blijkt te geven.

Bij kielen en soms ook bij roeren wordt in dit verband wel een driehoekige afschuining toegepast. Een bijkomend voordeel zou bestaan t.o.v. de rechthoekige afsnijding bij het varen in zeegang als het jacht verticale dompbewegingen uitvoert.

Het nut van een driehoekige tipvorm is problematisch bij kleine aspectverhoudingen omdat een gedeelte van het lift producerend oppervlak a.h.w. opgeofferd wordt. Een andere goede "afsluiting" van de tip is een bulbkiel waarmee tevens een laag zwaartepunt bereikt wordt. Een nadeel van de bulb is het relatief grote natte oppervlak, vooral als deze gecombineerd wordt met een dunne kiel. Een goed compromis is een flesvormige dwarsdoorsnede van de kiel met een niet te brede vlakke onderkant (zie Figuur 9). De aansluiting van het roer aan de romp is belangrijk: een spleet van  $1\frac{1}{2}$  cm bij een roer met een diepte van 1 m kan al 10% minder dwarskracht geven en 4% meer weerstand. Het is dus verstandig de nodige aandacht aan dit aspect te geven.

### 3.5 Profiel van kiel en roer.

Voor de horizontale doorsneden van kiel en roer zijn in hoofdzaak twee typen te onderscheiden n.l. het normale profiel, dat al lang in zwang is bij roeren van koopvaardij schepen, bijvoorbeeld vertegenwoordigd door de NACA 00 serie en het zogenaamde "low drag" profiel, bijvoorbeeld de NACA 66 serie. Het normale profiel heeft de grootste dikte op ongeveer  $\frac{1}{3}$  van de voorkant en het low drag profiel heeft dat ongeveer op de helft van de koorde.



De vorm en de voornaamste karakteristieken van een drietal profielen is gegeven in Tabel 6 en Figuur 10.

Tabel 6.  
Profieldoorsneden.

NACA 0010		NACA 63.010	NACA 66.010
x %c	y %c	y %c	y %c
0	0	0	0
0,5	-	0,829	0,759
1,25	1,578	1,275	1,141
2,5	2,178	1,756	1,516
5,0	2,962	2,440	2,087
7,5	3,500	2,950	2,536
10	3,902	3,362	2,917
15	4,455	3,994	3,530
20	4,782	4,445	4,001
25	4,952	4,753	4,363
30	5,002	4,938	4,636
40	4,837	4,938	4,953
50	4,412	4,496	4,971
60	3,803	3,715	4,665
70	3,053	2,712	3,787
80	2,187	1,618	2,494
90	1,207	0,604	1,054
95	0,672	0,214	0,408
100	0,105	0,000	0,000

Amerikaanse ontwerpers passen vaak het low drag profiel toe voor de kiel i.v.m. de lage weerstand bij geringe belasting. Bij de normale profielen is echter de helling van de liftkromme groter. Een goed compromis lijkt het NACA 63 profiel te zijn, vooral als het relatief vrij dik is.

De dikte van het profiel is van groot belang, zowel voor de kiel als voor het roer. Dunne profielen overtrekken sneller dan dikke profielen. Een verdubbeling van de dikte van 6% tot 12% van de koorde, kan de overtrekhoek vergroten van 9° tot 16° bij een slankheid van  $a_e = 4$ .

In 't algemeen is men in de jachtbouw te zuinig met profieldikte: een roerdikte van 15% lijkt heel geschikt en bij een kiel kan men wel tot 20% gaan, zeker voor het onderste deel van de kiel.

De weerstandstoename bij grotere profieldikte is tot deze grens van weinig betekenis voor het totaal.

Gunstige aan de windse eigenschappen zijn geconstateerd bij een verbouwing van een zeegaand wedstrijdjacht, waarbij de kioldikte tot iets meer dan 20% werd opgevoerd. Een NACA 63 werd toegepast met een matige pijlhoek ( $\sim 30^\circ$ ).

### 3.6 Scheggen.

Ondiepe scheggen tussen kiel en roer, of alleen vóór het roer, zijn in tegenstelling tot de algemeen heersende mening, niet voordelig voor de koersstabiliteit en óók niet voor de werking van kiel of roer in verband met dwarskracht productie. Dit is een gevolg van de geringe aspectverhouding waardoor de lift-drift verhouding van de romp met kiel en roer minder gunstig beïnvloed wordt. Roeren met een vaste leidkop worden wel toegepast uit het oogpunt van de koersstabiliteit. Een dergelijk roer heeft bij uitslag een hoge lift coëfficiënt, maar dat voordeel gaat vaak bij grote roerhoeken verloren als de stroming op de discontinue overgang van vast- naar draaibaargedeelte loslaat.

De aansluiting tussen beide delen moet zorgvuldig uitgevoerd worden omdat anders drukuitwisseling tussen beide zijden van het roer mogelijk is. Men experimenteert met een draaibare leidkop om bij grote roerhoeken en bij drift een betere aanstroming van de voorkant te krijgen.

Tegen het balansroer wordt vaak de grote gevoeligheid als een bezwaar aangevoerd, evenals het ontbreken van een aan de romp verbonden vast leid-vlak. Dat laatste wordt dan ten onrechte geïnterpreteerd als gebrek aan koersstabiliteit.

In verband met de in gebruik zijnde slankheden voor roeren treedt loslating al bij  $15^\circ$  roerhoek op, zodat voorzichtig roergeven nodig is. Een 1:2 overbrenging of een 2 x zo lange helmstok kan deze voorzichtigheid bevorderen. Het ontbreken van een vast leidvlak is misschien te ondervangen door een mechanische middenstand zoeker. (bijv. een veer met een hefboom aan de roerkonig verbonden)

### 3.7 Het "trim"vlak en de draaibare kiel.

Trimvlak is een onjuiste benaming voor een draaibaar gedeelte van de vinkiel. Het is beter om te spreken van een kiel met een flap. Uit Japanse onderzoeken is gebleken dat bij een flapuitslag die tweemaal zo groot is als de invalshoek, de lift kan verdubbelen. Voor kleine invalshoeken betekent dit dat de invalshoek de helft kleiner kan zijn voor dezelfde lift productie, zonder dat de weerstand toeneemt. Door de flapuitslag ontstaat een asymmetrisch profiel dat een gebogen skeletlijn heeft.

De nulliftlijn maakt bij uitslag van de flap een hoek met het langsscheeps-symmetrisch vlak van het jacht, waardoor de drifthoek bij het zeilen aan de wind kleiner wordt. Dit heeft tot gevolg:

- a. een grotere invalshoek van de wind in de zeilen
- b. een gedeeltelijke ontlasting van de romp voor het leveren van dwarskracht, waardoor de geïnduceerde weerstand van het deel met een ongunstige aspect-verhouding afneemt.

Er is een zekere analogie met het zwaard van een platbodem, dat vaak een asymmetrisch profiel heeft. Bovendien past men bij zwaarden toespoor toe waardoor de nullifthoek nog eens wordt vergroot, zie Figuur 11.

Met een om een verticale as draaibare kiel wordt hetzelfde effect beoogd. Constructief is dit lastig uit te voeren, maar men kan wellicht met een drifthoek nul of zelfs met een negatieve hoek varen.

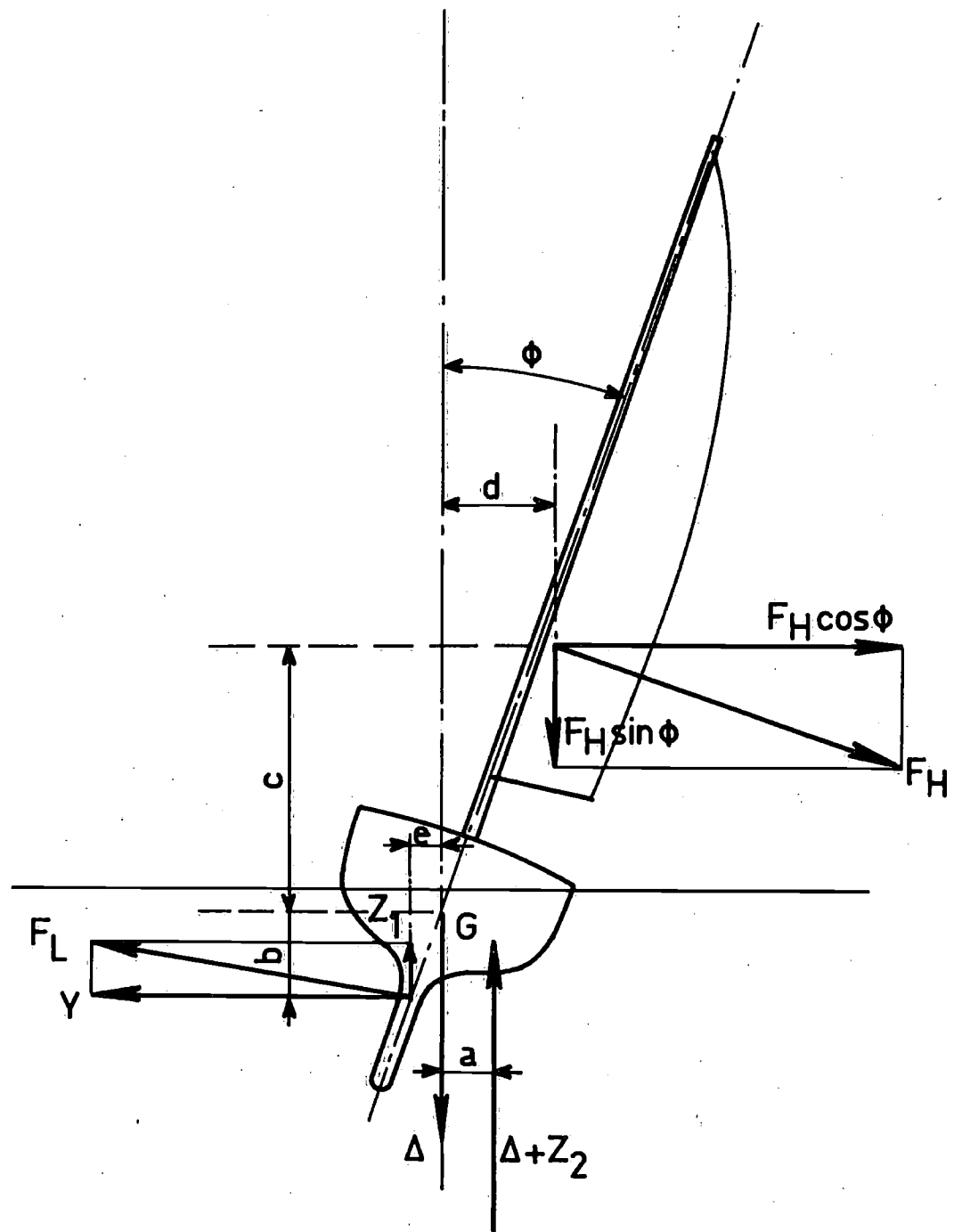
De flap is in vergelijking met de draaibare kiel in het nadeel omdat door het uitslaan van de flap het drukpunt van de dwarskracht naar achteren verschuift en daarmee de balans t.o.v. de zeilkrachten verstoort.

Men zou deze balans zoveel mogelijk door de stand van de zeilen moeten corrigeren. In geen geval moet de flap voor dat doel gebruikt worden.

Aanbevolen wordt de flap alleen bij het aan de wind zeilen te gebruiken en de uitslag in te stellen als functie van de hellingshoek  $\phi$ ; bijv. flapuitslag 4, 6, 8 graden bij  $\phi$  resp.  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ .

Referenties:

- 1 L. Folger Whicker and L.F. Fehlner:  
"Free stream characteristics of a family of low aspect-ratio, all  
movable control surfaces for application to ship design".  
Report 933, Naval Ship Research and Development Center, 1958.
- 2 Principles of Naval Architecture.  
The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1967.
- 3 R. Stauton-Jones:  
"An empirical method for rapidly determining the loading distribution  
on swept back wings"  
College of Aeronautics, Report no. 32, 1950.
- 4 Ira H. Abbott and Albert E. von Doenhoff:  
"Theory of wing sections"  
Dover Publications 1958
- 5 C.A. Marchaj:  
"Sailing theory and practice".



$$Y = F_H \cos \phi$$

$$Z_1 + Z_2 = F_H \sin \phi$$

$$a(\Delta + Z_2) = bY + cF_H \cos \phi + dF_H \sin \phi + eZ_1$$

Fig.1 Evenwicht van waterkrachten en windkrachten, geprojecteerd op een verticaal vlak loodrecht op de koers.

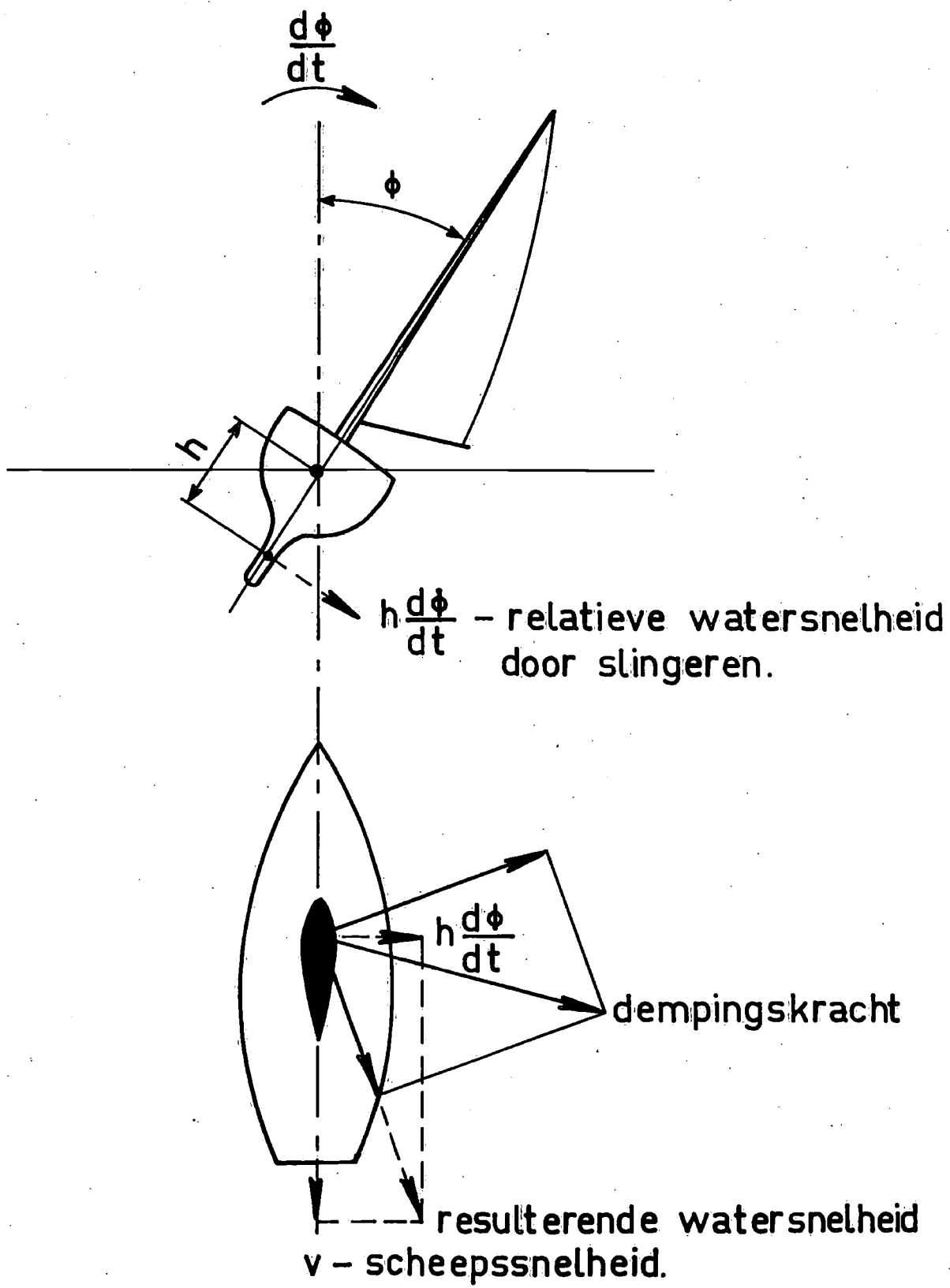


Fig. 2 Slingerende wordt gedempt door kiel en roer.

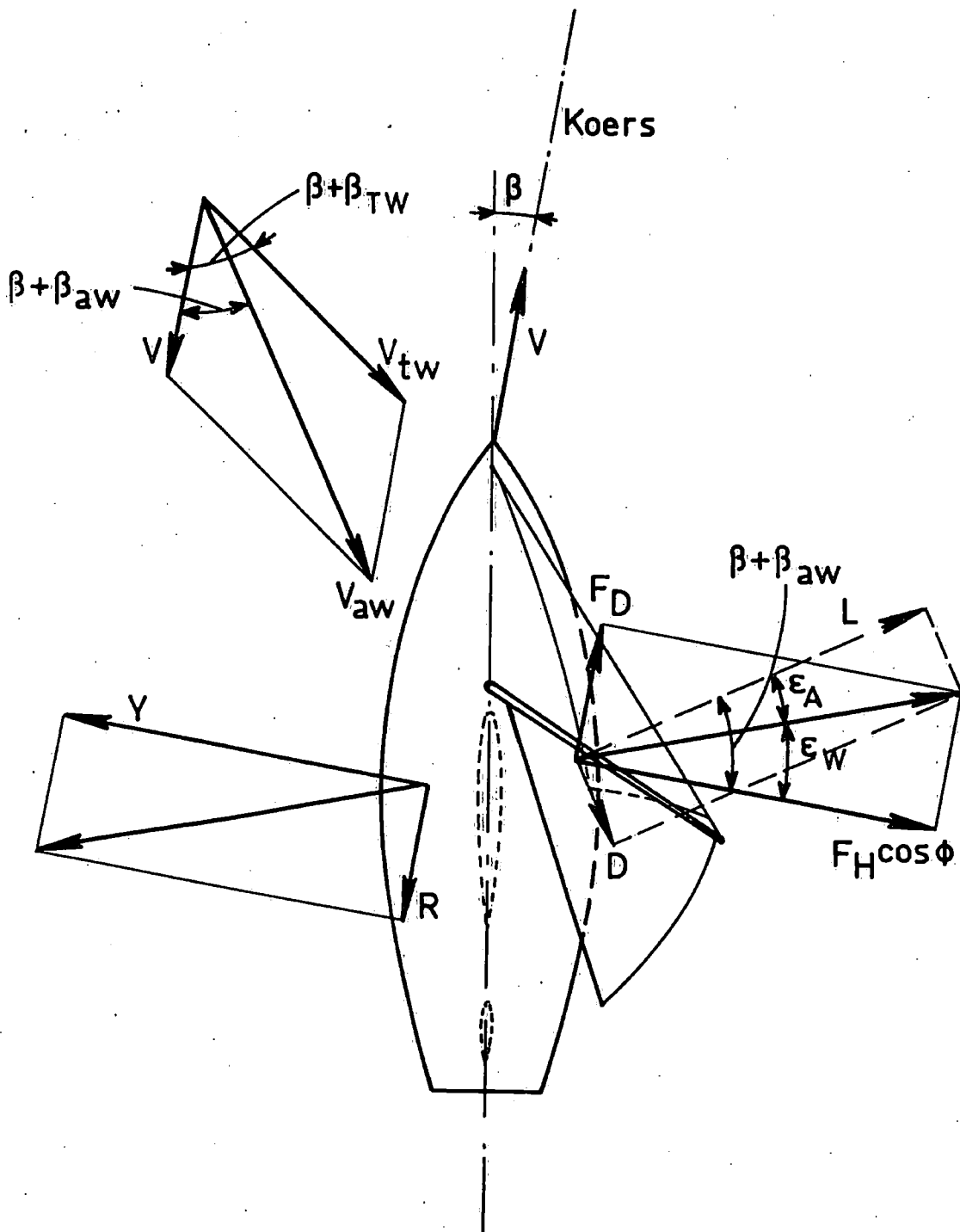
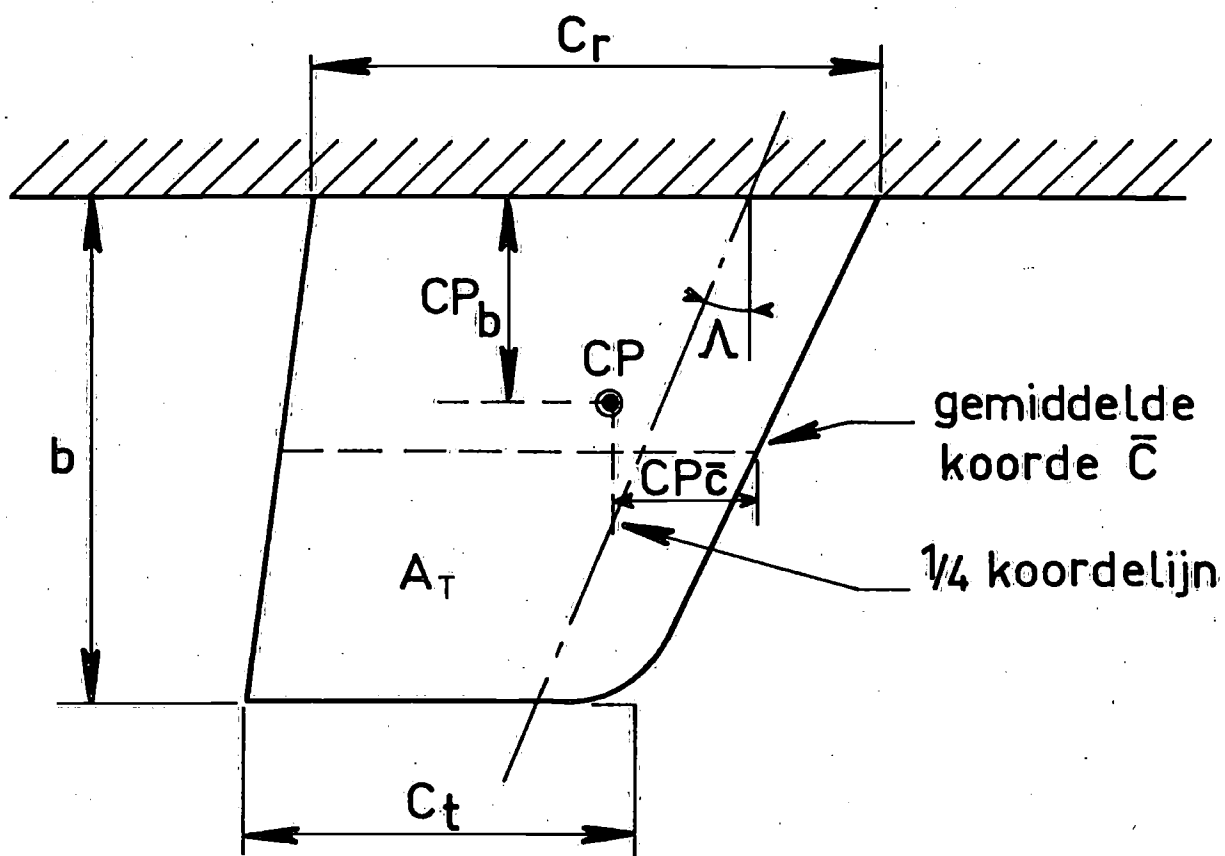


Fig. 3 Evenwicht van waterkrachten en windkrachten, geprojecteerd op een horizontaal vlak.



$A_T = b \cdot \bar{c}$  - oppervlak

$b$  - spanwijdte.

$c$  - koorde

$a = \frac{b}{\bar{c}} = \frac{b^2}{A_T}$  - slankheid of aspectverhouding.

$\Lambda$  - pijlhoek

$\lambda = C_t / C_r$  - tapsheid

Fig. 4 Geometrie van kiel en roer.



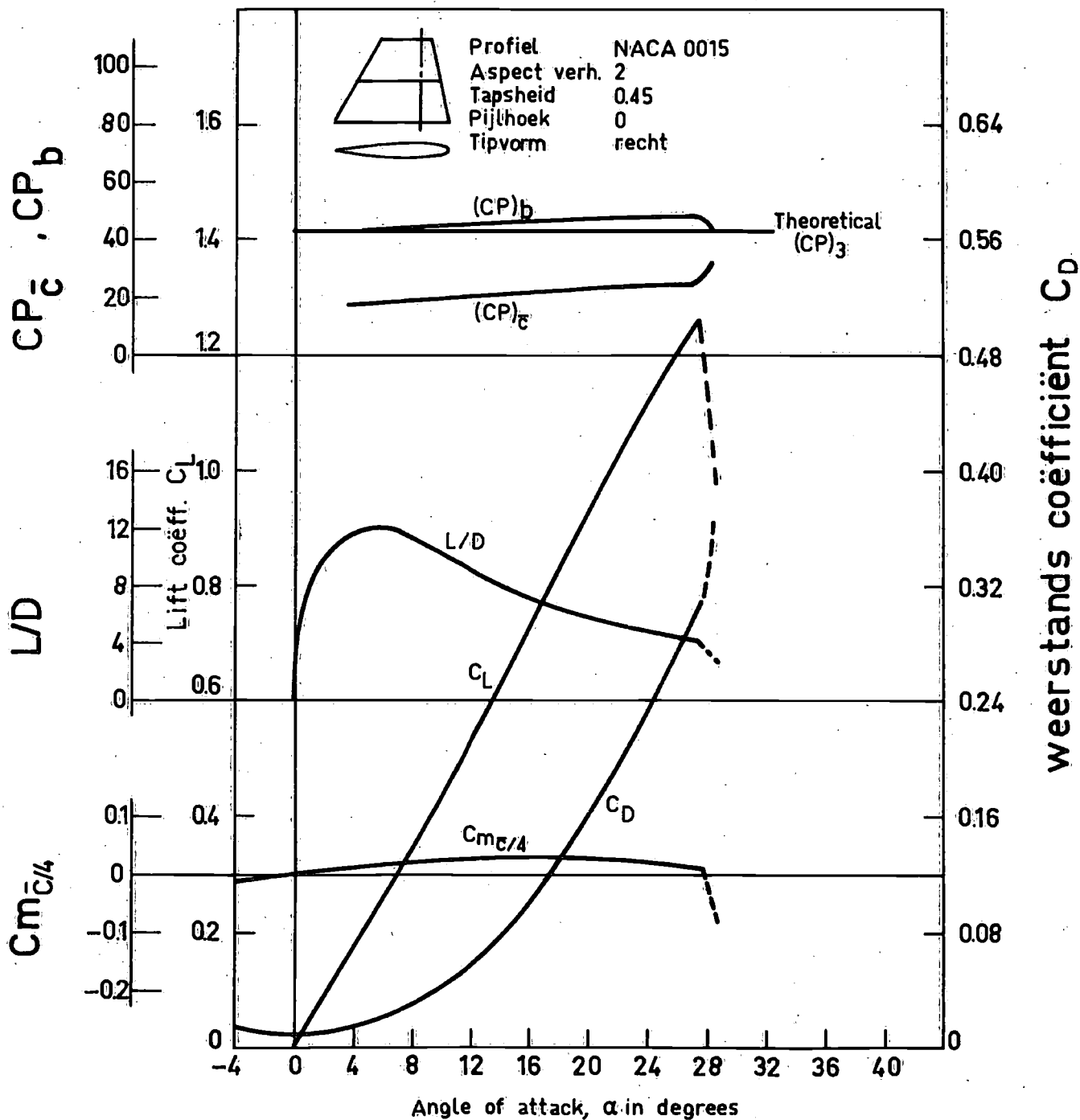


Fig. 5a Experimentele draagvlak gegevens.

$a_e = 2$

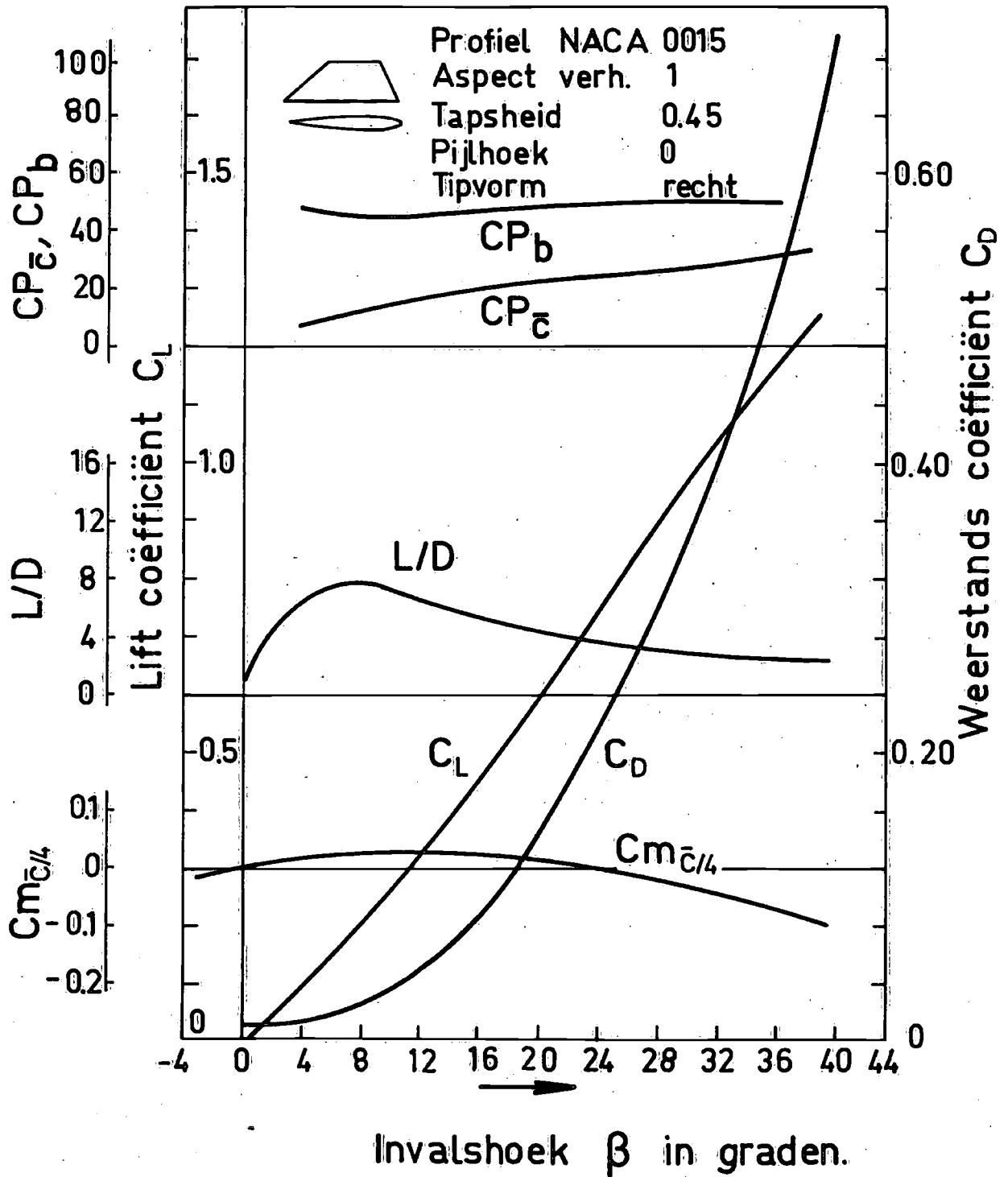


Fig. 5b

Experimentele draagvlak gegevens.

$a_e = 1$

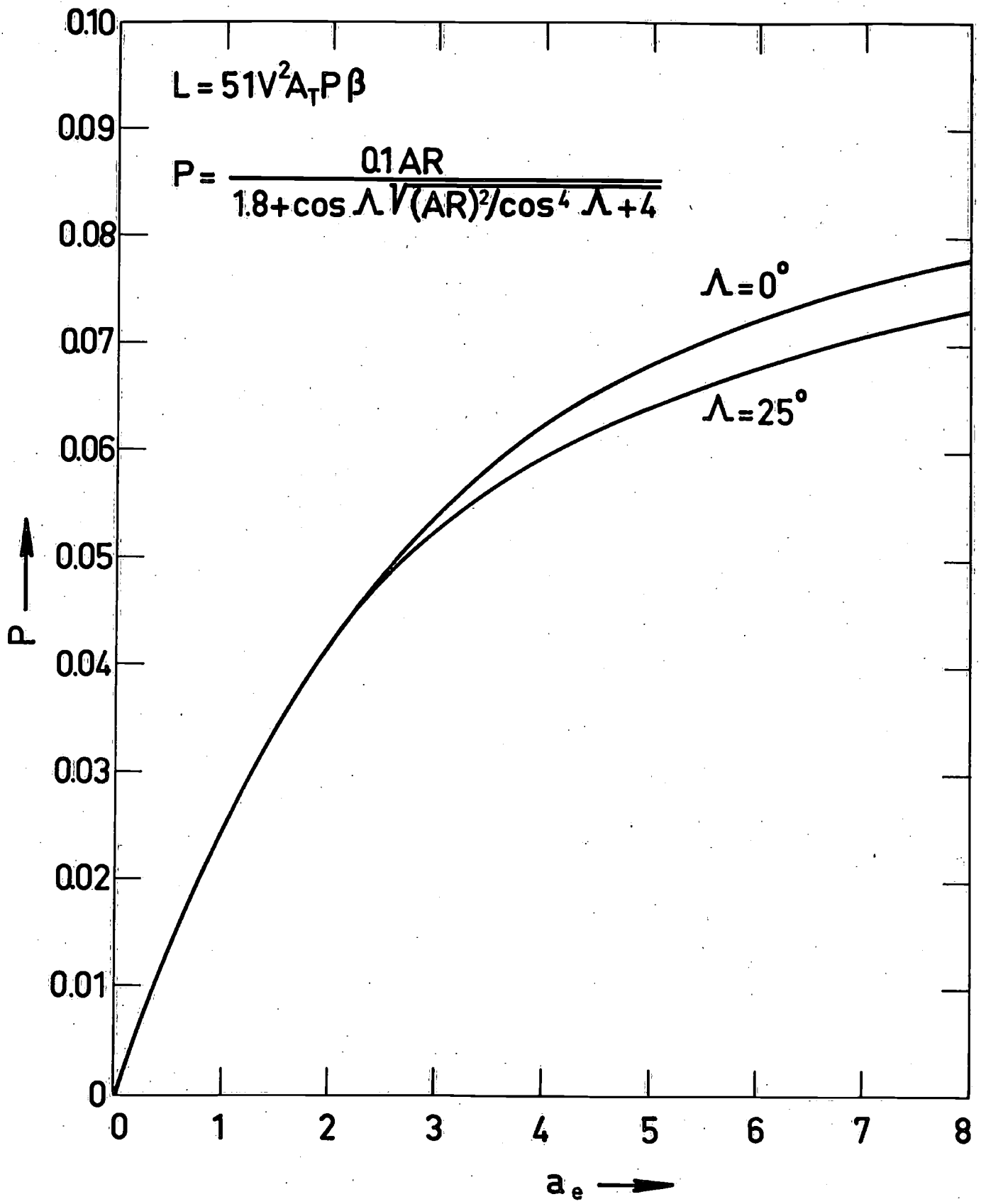


Fig. 6 Lift coëfficiënt per graad invalshoek als functie van de effectieve aspect verhouding.

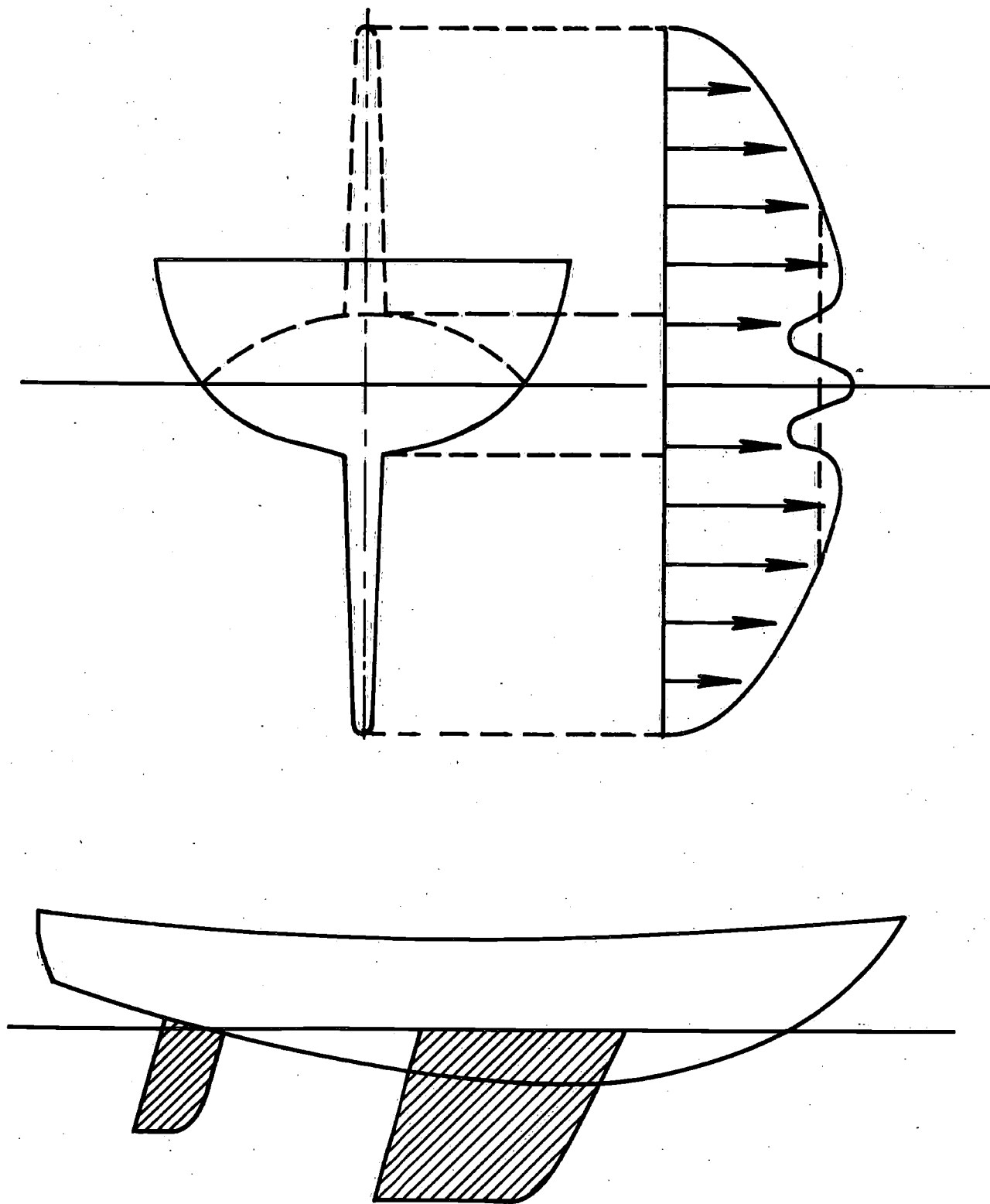


Fig. 7 Circulatieverdeling over kiel, roer en romp.

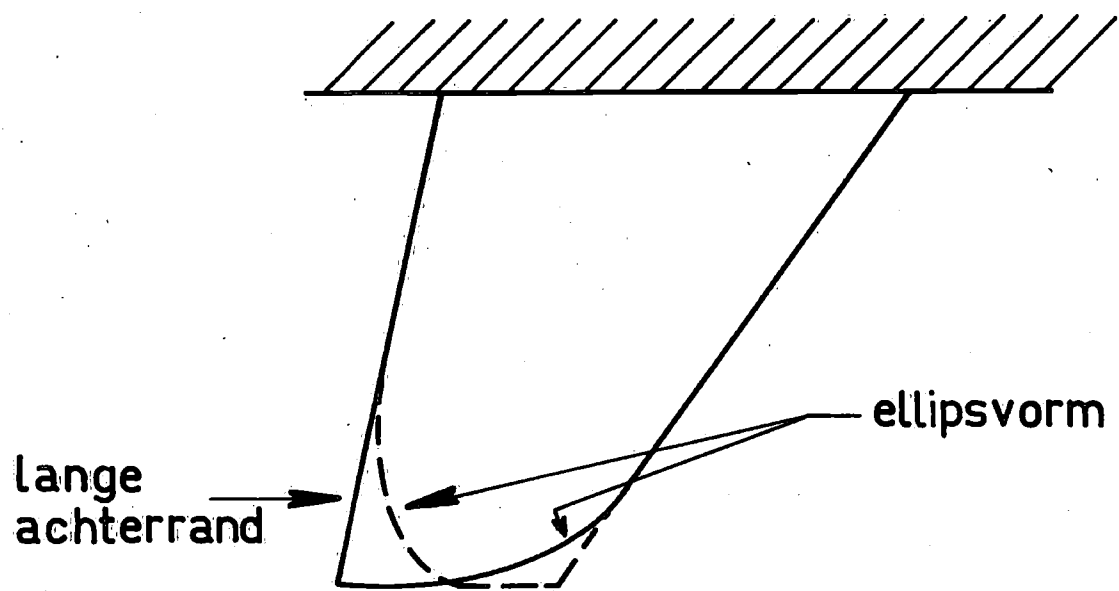


Fig.8 Zijaanzicht kiel en roer.

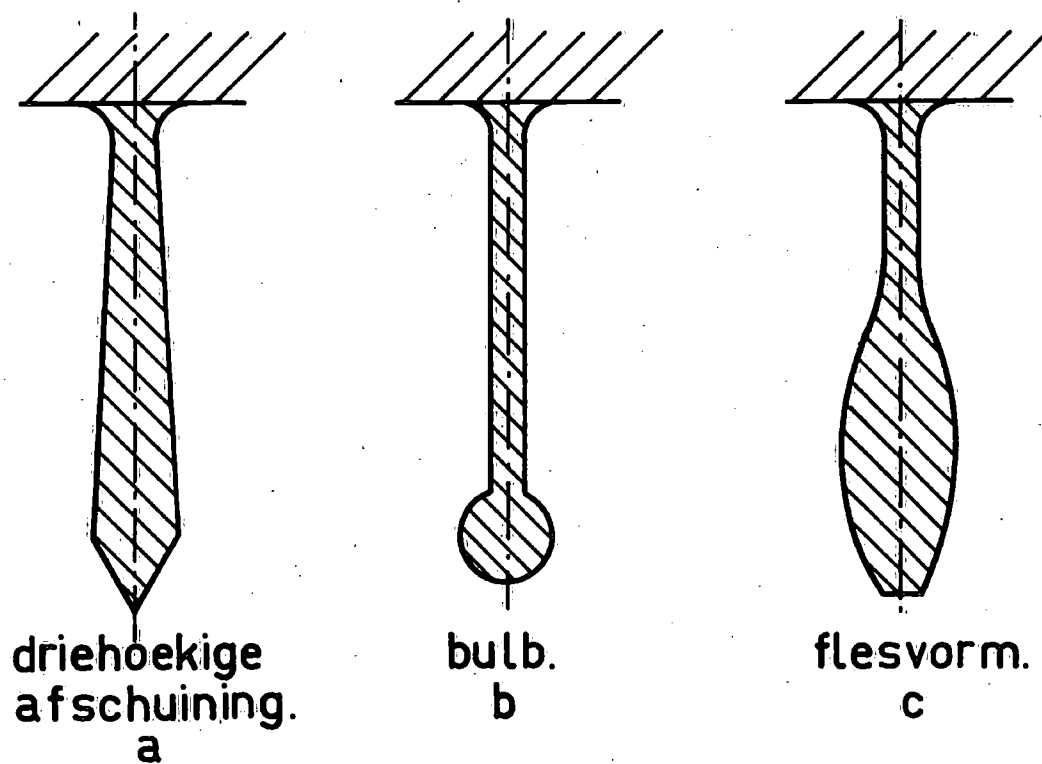


Fig.9 Verticale dwarsdoorsneden kiel.

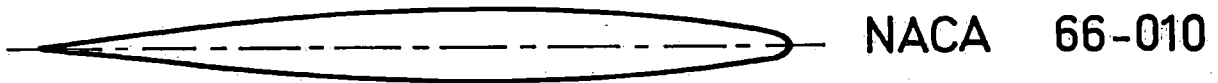
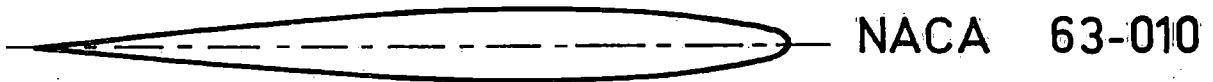
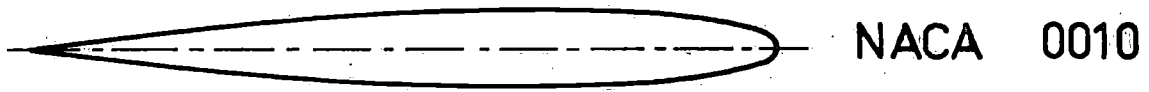
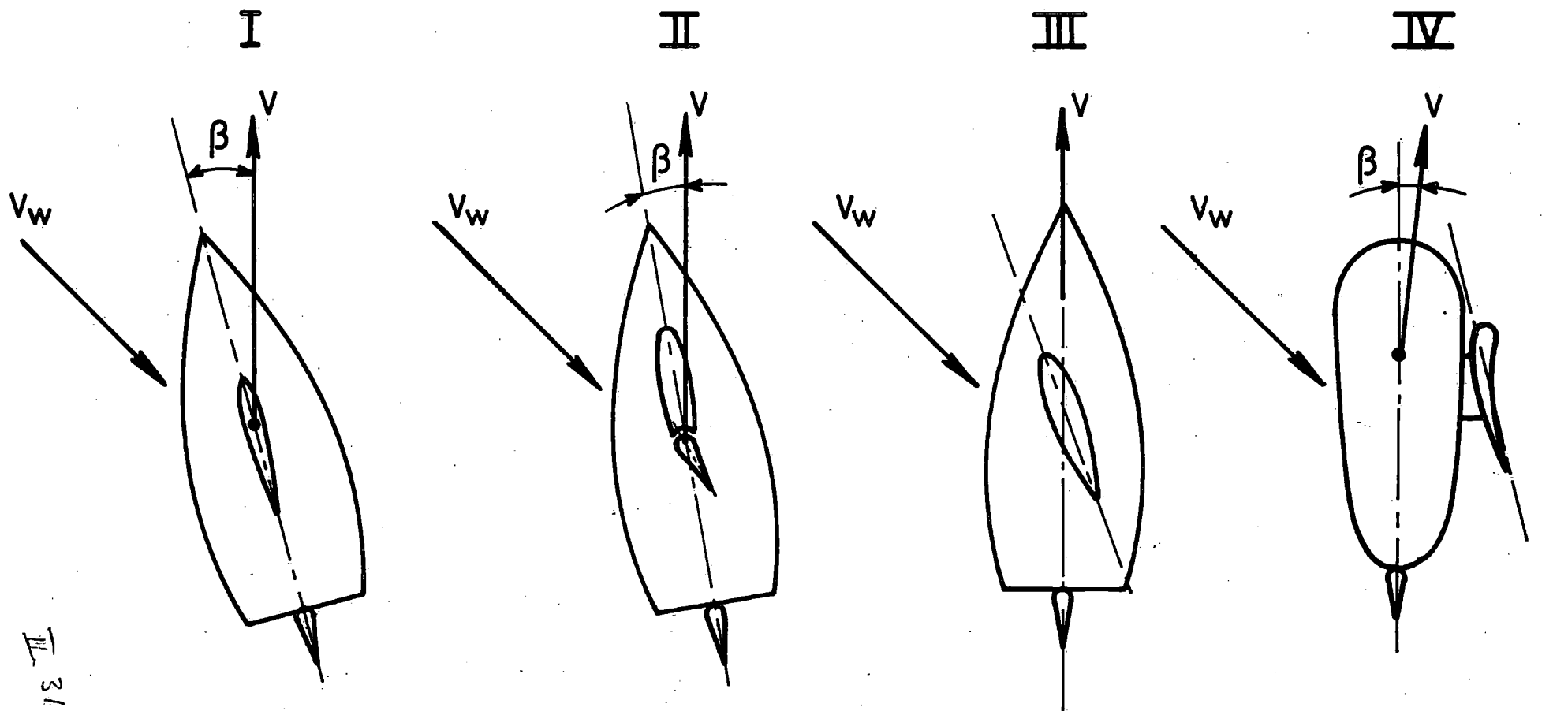


Fig.10 NACA profielen in gebruik voor kiel en roer.



III 31

vaste kiel

flap kleinere  $\beta$

draaibare kiel  
mogelijk  $\beta = 0$

rond en plat-  
bodem met  
asymmetrisch  
zwaard.

grotere invalshoek van wind en  
zeil.

Fig.11 Stand van kiel en zwaard.

## Samenvatting.

Aan de hand van polaire diagrammen van zeilkrachten wordt ingegaan op de wenselijkheid van toepassing van gewelfde profielen, van een enkel zeil of van een combinatie van grootzeil en fok.

Een samenvatting wordt gegeven van in hoofdzaak de door Milgram toegepaste optimaliseringstechniek van de welvingsverdeling van zeilen.

De huidige inzichten met betrekking tot de vervorming van zeildoek worden kort weergegeven.

## ZEILEN EN ZEILDOEK

door

Ir. M. C. Meijer

III.1



## Inleiding.

Jachtzeilen zijn vergelijkbaar met draagvleugels van vliegtuigen, voorzover ze gebruikt worden om een kracht op te wekken waarvan de belangrijkste component dwars op de windrichting staat. Voor de kwaliteit van een zeiljacht is deze toestand doorslaggevend.

Zelfs bij zeer ruime rakken is het vermogen van de zeilen om een krachtcomponent dwars op de windrichting te geven van betekenis, omdat hierdoor de afdrijvende kracht op het onderwaterschip en daarmee de geïnduceerde weerstand in het water kan worden geëlimineerd.

Het meest kritieke voor de kwaliteit van het jacht is echter zijn vermogen om "in de wind op te werken"; deze toestand zal in deze symposium bijdrage uitsluitend worden beschouwd.

## 1. Over polairen en zeilvormen.

### 1.1 Polairen

De dwars op de wind gerichte kracht wordt hier in analogie met het vliegtuig de "lift" genoemd (symbool : L), hoewel in het buitenland het woord "cross force" steeds meer in gebruik komt, daar de richting niet "naar boven" is.

Van elke draagvleugel of van elk tweedimensionaal draagvleugelprofiel kunnen in een windtunnel de lift en de weerstand als functie van snelheid en invalshoek worden gemeten. Hetzelfde geldt voor een compleet vliegtuig en het bovenwatergedeelte van een zeiljacht, waarbij dan echter de instelhoeken van remklappen, ailerons, roeren (vliegtuig) of van de zeilen (jacht), er als onafhankelijke variabelen bij komen.

Ook de helling die het jacht aanneemt tengevolge van de dwarsscheepse component van de zeilkracht, geeft een variabele. Deze laat men in eerste instantie buiten beschouwing, hoewel ze toch invloed heeft op de grootte der krachten. Marchaj, [1].

Milgram [4] heeft echter aangetoond dat de aerodynamica er overigens niet door verandert.

De krachten op een draagvleugel of tuigmodel, in de windtunnel gemeten, kunnen we in de vorm van een polair diagram weergeven. Dit is de meetkundige plaats van de eindpunten van de vectoren die de totale kracht op het model voorstellen bij variatie van één van de onafhankelijke variabelen (zie fig. 1). In een rechthoekig assenstelsel zet men hiervoor de liftcoëfficiënt als ordinaat en de weerstandcoëfficiënt langs de abscis af (in de aerodynamica is het gebruikelijk ongelijke schalen te gebruiken). Als parameter wordt de invalshoek of instelhoek op de kromme aangegeven.

Als we met een zeil en een scheepsromp te maken hebben, dan hebben we twee zulke parameters, namelijk de hoek tussen romp en wind, en die tussen zeil en wind. In de praktijk legt men de hoek van het zeil liever vast ten opzichte van de romp ( $\delta$ ). Heeft men twee zeilen, dan zijn er ook twee hoeken  $\delta$  (Marchaj:  $\delta_M$  en  $\delta_F$ ) en heeft men dus drie parameters. Dit is te veel om redelijk mee te kunnen werken; daarom elimineert men er graag één. Zo verwaarloost Marchaj in [1] de invloed van de romp en laat die weg, terwijl Wagner en Boese [2] de fok telkens optimaal instellen en zodoende van een onafhankelijke variabele een afhankelijke maken.

Door Croseck werd in 1925 het polairdiagram van figuur 2 ingevoerd, Hierin zijn de verschillende krommen voor constante koershoeken uitgezet. Met behulp van raaklijnen aan de krommen worden de maximale krachtvectoren in de vaartrichting aangegeven.

Men moet hierbij bedenken dat het resultaat bij windtunnelmetingen niet geheel correct kan zijn omdat de drifthoek  $\beta$  niet bekend is en daarom genegeerd wordt.

In verband met optimaal in de wind opkruisen moet men zich afvragen of de maximale stuwkracht wel maatgevend is; het hoogste rendement moet men immers verwachten bij de kleinste D/L verhouding zoals als volgt is in te zien (zie Moeyes, fig.2)

$$\frac{F_D}{F_H \cos \phi} = \text{tg} (\beta + \beta_{aw} - \text{bgtg} \frac{D}{L}) \quad (1)$$

Omdat  $F_H \cos \phi$  grote nadelige invloed heeft op de scheepsweerstand en dus op de benodigde stuwkracht  $F_D$ , moet de verhouding van vgl. (1) in principe maximaal zijn en dus D/L minimaal.

## 1.2 Gewelfd of symmetrisch?

Men hoort wel de vraag stellen of het niet beter zou zijn om in plaats van het slappe zeil met de voor de stijfheid noodzakelijke, maar aerodynamisch storende mast, een stijve vleugel op het schip te plaatsen. Als we de complicaties van flappen e.d. buiten beschouwing laten, is het duidelijk dat alleen een symmetrisch profiel in aanmerking kan komen. In het boek van Abbott en Von Doenhoff [3] vinden we vele polairen van NACA-profielen, in dit geval als  $C_D = f(C_L)$  uitgezet. Hieraan is fig. 3 ontleend, waarin we kunnen zien dat bij hogere  $C_L$  waarden, (voor zeilen gebruikelijk), de profielweerstand van het gewelfde profiel beduidend lager is dan van het symmetrische.

Daarbij komt het feit dat van een dunner profiel de minimum weerstand in het algemeen nog iets lager is dan bij een dik (het  $C_L$  bereik met gunstige weerstand is dan wel erg smal).

Voeg hierbij de handelbaarheid van het slappe zeil, dan is de keuze snel gemaakt.

### 1.3 Eén of twee zeilen?

Evenals Milgram [4] stellen we dat de combinatie: grootzeil en fok vergeleken mag worden met het dubbeldekkerprincipe uit de luchtvaart. Met behulp van de wervelijne theorie van Prandtl kan immers uit de afbuiging van de stroomlijnen oneindig ver van de zeilen een conclusie worden getrokken omtrent de geïnduceerde weerstand van het systeem, die een zeer groot deel van de totale weerstand uitmaakt.

Volgens Prandtl is nu :

$$C_{Di}(2) = \frac{C_L^2}{\pi a} \cdot \frac{1+\sigma}{2} \quad (2)$$

waarbij  $\sigma$  kleiner is dan 1.

We mogen hieruit afleiden dat waar hogere  $C_L$  waarden voorkomen, een tweede zeil een gunstige weerstand geeft. Het voordeel moet niet gezocht worden in het dicht bijeen brengen van de twee zeilen want dan neemt  $\sigma$  weer toe.

In fig. 4 is aangegeven dat ook een grotere L/D verhouding mag worden verwacht, vooral als mast, stagen en romp zorgen voor een grote parasitaire weerstand. Hierbij zien we een verdere belangrijke eigenschap van het tweede zeil aangegeven, n.l. dat het loslaten van de grenslaag van de stroming tegengegaan wordt, waardoor een belangrijk hogere liftcoëfficiënt kan worden bereikt ( $\sqrt{2}$  tegen 1,2 bij een enkele vleugel).

Deze hogere  $C_L$  waarde is vooral nuttig bij ruimere koersen, zoals fig. 2 al liet zien.

We moeten er nu voor oppassen de  $C_L$  en  $C_D$  niet te veel te vereenzelvigen met de eigenlijke lift (L) en weerstand (D).

In fig. 5 zijn twee boten geschetst met zeer verschillende stabiliteits-eigenschappen; a heeft grote, b heeft beperkte weerstand tegen het hellend koppel van de windkracht  $F_H$ . Neem aan dat het hellend moment :

$$M = F_H (h_o + h) \text{ bedraagt,}$$

$$\text{en} \quad h = c\sqrt{A}$$

$$\text{We vullen in : } F_H = C_H \frac{1}{2}\rho V^2 A$$

$$\text{dan is : } M = C_H \frac{1}{2}\rho V^2 A \cdot (h_o + c\sqrt{A}) \quad (3)$$

Wordt bij gelijke windsnelheid voor de twee schepen een zelfde kracht gevraagd, dan moet het product  $C_H \cdot A$  gelijk zijn. Bij het ranke schip is dan het hellend moment te beperken door het zeiloppervlak  $A$  klein te maken als dit door een grotere  $C_H$  te verwezenlijken is.

Samenvattend kunnen we stellen dat een groot enkel zeil samengaat met schepen met grote stabiliteit en schepen met grote snelheid (hoe dan ook bereikt) met geringe parasitaire weerstand die een zeer kleine hoek aan de wind ( $\beta + \beta_{aw}$ ) moeten varen. In andere gevallen zal men beter gebruik kunnen maken van een sloeptuig.

Met betrekking tot het snelheidsaspect is een verduidelijking op zijn plaats. Schrijven we de weerstand uit als som van wrijvings-, parasitaire en geïnduceerde weerstand, dan krijgen we :

$$D = (C_f^* + C_o^*) \frac{1}{2} \rho V^2 A + \frac{C_L^2}{\pi a} \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 A.$$

(waarin  $C_f^*$  en  $C_o^*$  zijn aangepast met betrekking tot het referentieoppervlak).

$$\text{of : } D = (C_f^* + C_o^*) \frac{1}{2} \rho V^2 A + \frac{L^2}{\pi a} \cdot \frac{1}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (4)$$

Uitgaande van gegeven lift ( $L$ ) zien we bij toenemende windsnelheid (waarin de eigen scheepssnelheid een toenemende rol speelt!) het aandeel van de geïnduceerde weerstand afnemen, terwijl dat van de overige componenten juist toeneemt. Hiermee kunnen de voordelen van de "tweedekker" geheel verloren gaan, zoals zonder twijfel bij het ijs-zeiljacht het geval is.

## 2. Optimalisering van de zeilen.

Als we er van uitgaan dat een bepaalde liftopbrengst van de zeilen gevraagd wordt, zal optimalisering altijd neerkomen op vermindering van de weerstand.

Volgens Milgram [4] verhouden de verschillende weerstandscomponenten zich globaal als volgt tot elkaar:

wrijving	:	$C_{DF}$	=	0,03
parasitair	:	$C_{DO}$	=	0,02
geïnduceerd	:	$C_{DI}$	=	0,225

Wat de wrijving betreft is een grote winst geboekt met de invoering van polyester doek in plaats van katoen, wat volgens Marchaj [5] in wedstrijden een tijdwinst van 7% heeft opgeleverd.

De zeilers en jachtontwerpers zullen in de praktijk het meest gevoelig zijn voor de parasitaire weerstand, die gereduceerd wordt door winches en mensen onder dek te brengen, vallen door de mast te voeren en dunne, hoogwaardig stalen stagen toe te passen.

De grote winst is echter te behalen in de geïnduceerde weerstand, die we misschien het beste kunnen karakteriseren als : een invalshoekverlies als gevolg van de beperkte hoogte van het tuig (eindige aspectverhouding).

Dit houdt direct al in, dat de aspectverhouding zo groot mogelijk moet worden gemaakt. Hoever we hiermee kunnen gaan is vooralsnog een kwestie van ervaring die weer verband houdt met de stabiliteit, maar ook met de eigenschappen van het zeildoek en de constructie van het tuig.

Als we verder van een gegeven aspectverhouding uitgaan, komt Prandtl's voorwaarde voor minimum energieverlies in aanmerking: de afbuiging van de stroming "down wash", "side wash" achter het stelsel van zeilen moet constant zijn over de spanwijdte (hoogte). Wat dit betekent voor een hellend zeil dicht boven het wateroppervlak in een met de hoogte variërende wind, heeft Milgram nagegaan met behulp van Prandtl's dragende lijn theorie. Het toegepaste model is geschetst in fig. 6. Het bleek, dat de invloeden op de gunstigste verticale liftverdeling gering zijn en dat dus in het algemeen de uit de aerodynamica reeds bekende conclusies, ook voor een zeil kunnen gelden. Met dit laatste in gedachten, vergelijkt Milgram de combinatie van grootzeil en fok met de dubbeldekker in de luchtvaart, waarvoor Prandtl ook een dragende lijn theorie heeft ontwikkeld. Hieruit is de conclusie afkomstig, dat als één van de twee zeilen lager is dan het andere (een kleinere spanwijdte heeft), zijn aandeel in de totale liftproduktie onevenredig klein moet zijn om een minimum weerstand te krijgen.

Als hij stelt, dat de grootste aspectverhouding en constante down wash optimaal zijn, neemt Milgram aan dat de stabiliteit steeds voldoende is. In dit verband is de opvatting van prof. Sparenberg interessant, die meent dat de stabiliteit in de optimalisering moet worden betrokken, dat wil zeggen, dat het denkbaar is dat een vermindering of zelfs omkering van de lift bovenin het zeil de stabiliteit zo gunstig kan beïnvloeden dat een netto voordeel kan worden geboekt.

De welvingsverdeling (in horizontale richting) wordt door Milgram berekend met de wervelvlaktheorie volgens een door Falkner (1943, 1947) voorgestelde methode die zich voor driehoekige zeilen beter leent dan de voor scheepsschroeven gebruikelijke. Een zeil wordt hierbij verdeeld in rechthoekige elementen die allen een enkele hoefijzerwervel dragen. Het aantal elementen langs de koorde is in hoogterichting constant. In de middens van de elementen wordt de geïnduceerde snelheidscomponent bepaald, die samengesteld met de hoofdstroomsnelheid de raaklijn ter plaatse aan het zeilprofiel oplevert.

Met een iteratieproces geeft de computer welvingsprofielen die vooraf ontworpen drukverdelingen moeten opleveren. Hiervoor worden in de praktijk haalbare hoge lift verdelingen gebruikt ( $C_L = 1,9$ ).

De welvingsverdeling wordt tenslotte gecorrigeerd voor de, voornamelijk aan de zuigzijde achter de mast en voor het achterlijk aanwezige grenslaag, die als een dikte-effect in rekening wordt gebracht.

### 3. Vervorming van jachtzeildoek.

Wil de optimalisering van de vorm van zeilen enige zin hebben, dan zal de vervorming onder windbelasting klein moeten blijven, of bekend moeten zijn, opdat er bij de optimalisering rekening mee gehouden kan worden.

Eén van de eerste eisen die men aan doek in het algemeen stelt, is dat het sterk en plooibaar moet zijn. Het wordt daarom geweven uit garens, die bestaan uit bundels zeer dunne en daardoor buigzame draden.

De constructie die de gewenste vervormbaarheid loodrecht op het vlak van het doek mogelijk maakt, heeft tot gevolg, dat ook in het vlak zelf extra vervormbaarheid optreedt. De verschillende oorzaken van rek en afschuiving in het vlak zijn in fig. 7 aangegeven.

De "finish" (fig. 7.5) wordt hoofdzakelijk aangebracht om de afschuivingsvervorming (fig. 7.4) tegen te gaan, die optreedt bij een trekbelasting onder een hoek (max.  $45^{\circ}$ ) met de richtingen van de garens.

#### Trekproeven.

De som van de verschillende vervormingen openbaart zich in de resultaten van trekproeven, uitgevoerd op stroken doek. Een voorbeeld van zo'n resultaat, waarin trekkrommen voor de drie belangrijkste richtingen (ketting, inslag en diagonaal) zijn aangegeven voor een veel verkocht doek, is fig. 8.

Dit (volgens Duin, Lab. v. Textieltechniek, T.H. Delft) specifieke voorbeeld is gekozen omdat er verschillende ongewenste eigenschappen op zijn af te lezen die de bespreking vergemakkelijken.

Het steile gedeelte dicht bij de onbelaste toestand is gunstig. De rek is in alle richtingen gering.

Wordt de rek groter dan ongeveer 2% dan breekt blijkbaar de "finish" en is het doek zijn vormvastheid volledig kwijt.

Verder valt op, dat het doek in kettingrichting veel stijver en ook sterker is dan in de inslagrichting, terwijl verreweg de grootste belasting door de schoot op het achterlijk en dus in inslagrichting wordt uitgeoefend.

Dit zal in onnodig zwaar doek resulteren. Uit publikaties blijkt dat de krommen voor de doeken die ontwikkeld werden voor de America's cup wedstrijden, het tegen-gestelde beeld vertonen.



### Dynamische trekproeven.

Om een inzicht te krijgen in het gedrag bij wisselende belastingen heeft Duin ook dynamische trekproeven uitgevoerd. Behalve met nieuw doek is dit ook gedaan met doek dat wapperend in de wind is verouderd. De maximale belasting is met 5 kgf (per 5 cm breedte) zo laag gehouden, dat mocht worden verwacht dat de eerste maal belasten geen schade zou toebrengen.

De resultaten voor het zelfde doek van figuur 8 zijn gegeven in figuur 9.

Het is duidelijk dat een zeil van dit doek vrij spoedig moet worden vervangen of bijgesneden.

### Verbeteringen.

Verbetering van het doek door fabrikanten of van de zeilen zelf, lijkt in vele gevallen mogelijk te zijn:

1. De grootste stijfheid leggen in de inslagrichting door twist en golving van garens in de inslagrichting te beperken en hier de dikste garens toe te passen.
2. Zeer compact weven met langzame getouwen zoals door de Amerikaan Hood wordt gedaan.
3. Extra zorgvuldig wassen en krimpen ten behoeve vooral van de hechting van de "finish".
4. Oppassen voor beschadiging van de vezels bij het "kalanderen" (d.i. persen bij hoge temperatuur ten behoeve van de diagonaalstijfheid).
5. Elastischer en beter hechtende "finish" toepassen of geen "finish" als de compactheid al goed is (Hood).
6. Het doek vermaken na het inzeilen.
7. Tijdens de fabricage in diagonaalrichting vóórvormd doek toepassen aan de hand van een berekende spanningsverdeling.

De laatste mogelijkheid is misschien een utopie. Hierbij zou uitgegaan kunnen worden van de evenwichtsvergelijkingen van membranen, die voor kleine afwijkingen van het platte vlak als volgt luiden:

$$\sigma_x \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \sigma_z \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} + 2\tau \frac{\partial^2 y}{\partial x \partial z} = -\Delta p$$

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau}{\partial x} = 0$$

Hierin zijn  $z$  en  $x$  de coördinaten van het vlak waarin mast en giek liggen;  $y$  staat hier loodrecht op.

$\sigma_x$  en  $\sigma_z$  zijn de trekspanningen in  $x$  en  $z$  richting,  $\tau$  is de schuifspanning.  $\Delta p$  is het drukverschil dat ter plaatse aan weerszijden van het zeil heerst.

De zeer moeilijke berekeningen kunnen misschien achterwege blijven als men zorgvuldig de vervormingen van oude zeilen registreert of als men modelproeven doet (zie [6]).

Een moeilijkheid is, dat het maken van zeilen en zeildoek economisch moet blijven en dat betekent voor de meeste fabrikanten dat snelle getouwen moeten worden gebruikt en dat de sortering garens beperkt is [7].

Bij alle verlangens die men omtrent de vormvastheid van zeilen mag koesteren, moet één ding echter niet uit het oog verloren worden en dat is, dat het zeil reefbaar en stouwbaar moet blijven.

Ten behoeve van hen die over het maken van zeilen willen weten, is referentie [8] aan de lijst toegevoegd.

Literatuur:

- 1 C.A. Marchaj:  
"Wind tunnel tests of a 1/3rd scale model of an X-one design yacht's sails".  
S.U.Y.R. Rep. no. 11, University of Southampton.
- 2 B. Wagner und P. Boese:  
"Windkanaluntersuchungen einer Segeljacht".  
Schiff und Hafen, Heft 9/1968, 20 Jahrgang, p. 619 - 624.
- 3 I.H. Abbott and A.E. von Doenhoff:  
"Theory of wing sections".  
Dover, Publ., Inc. New York, 1958
- 4 J.H. Milgram:  
"The analytical design of yacht sails".  
S.N.A.M.E. 1968.
- 5 C.A. Marchaj:  
"Sailing theory and practice".  
Dodd, Mead & co., New York 1964.
- 6 J.H. Milgram:  
"Symposium Yacht Architecture 1971"  
HISWA  
Uitg. Interdijk N.V. Schiphol-Oost, Holland.
- 7 M.J. Yendell:  
"Sail fabrics"  
Yachts and yachting, dec. 18, 1970 and jan. 1, 1971.
- 8 J. Howard Williams:  
"Sails"  
Coles, London 1967.

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A}$$

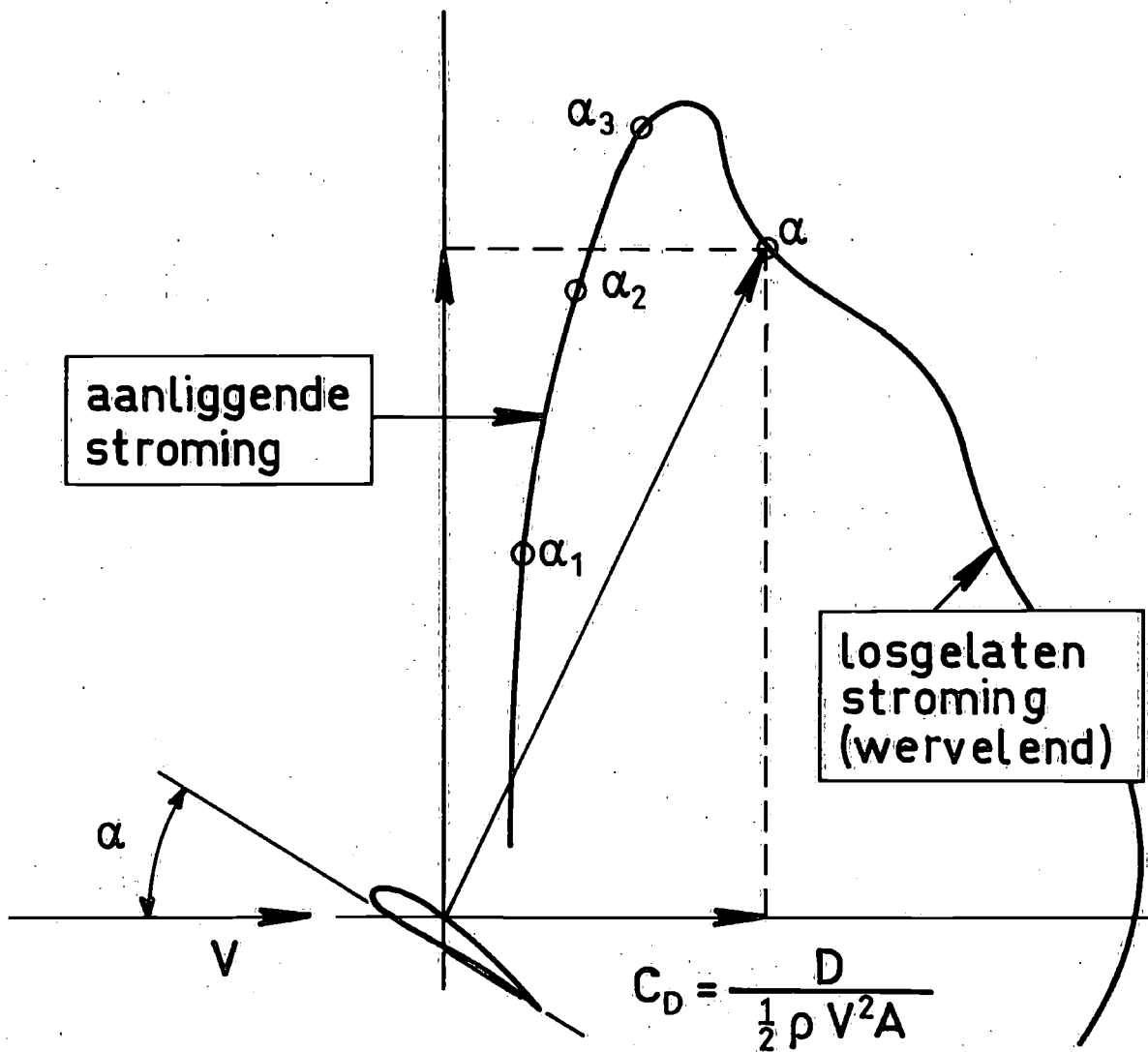


Fig.1 Polair diagram van een vleugel.

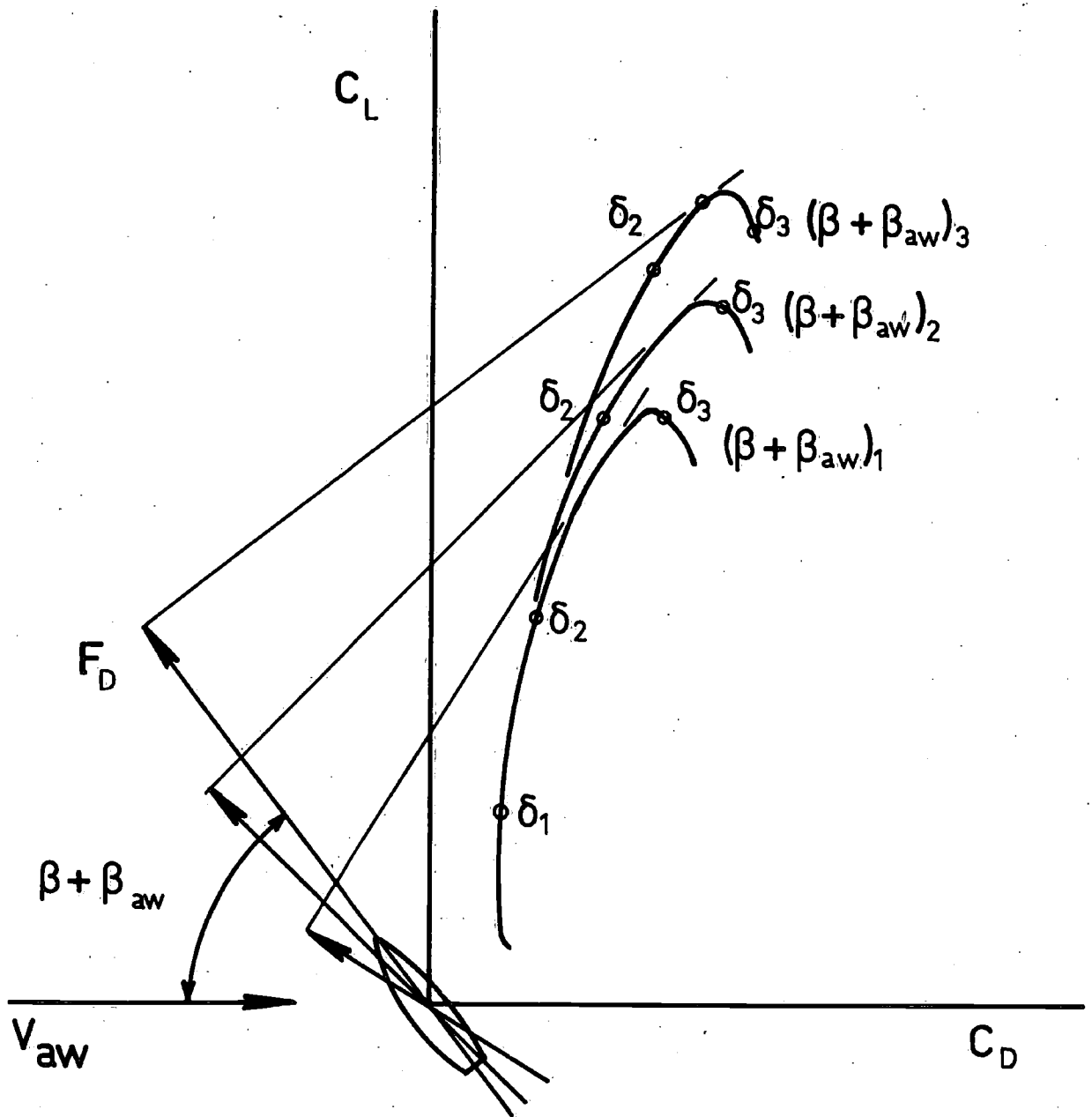


Fig. 2 Polairen voor constante koers volgens Croseck.

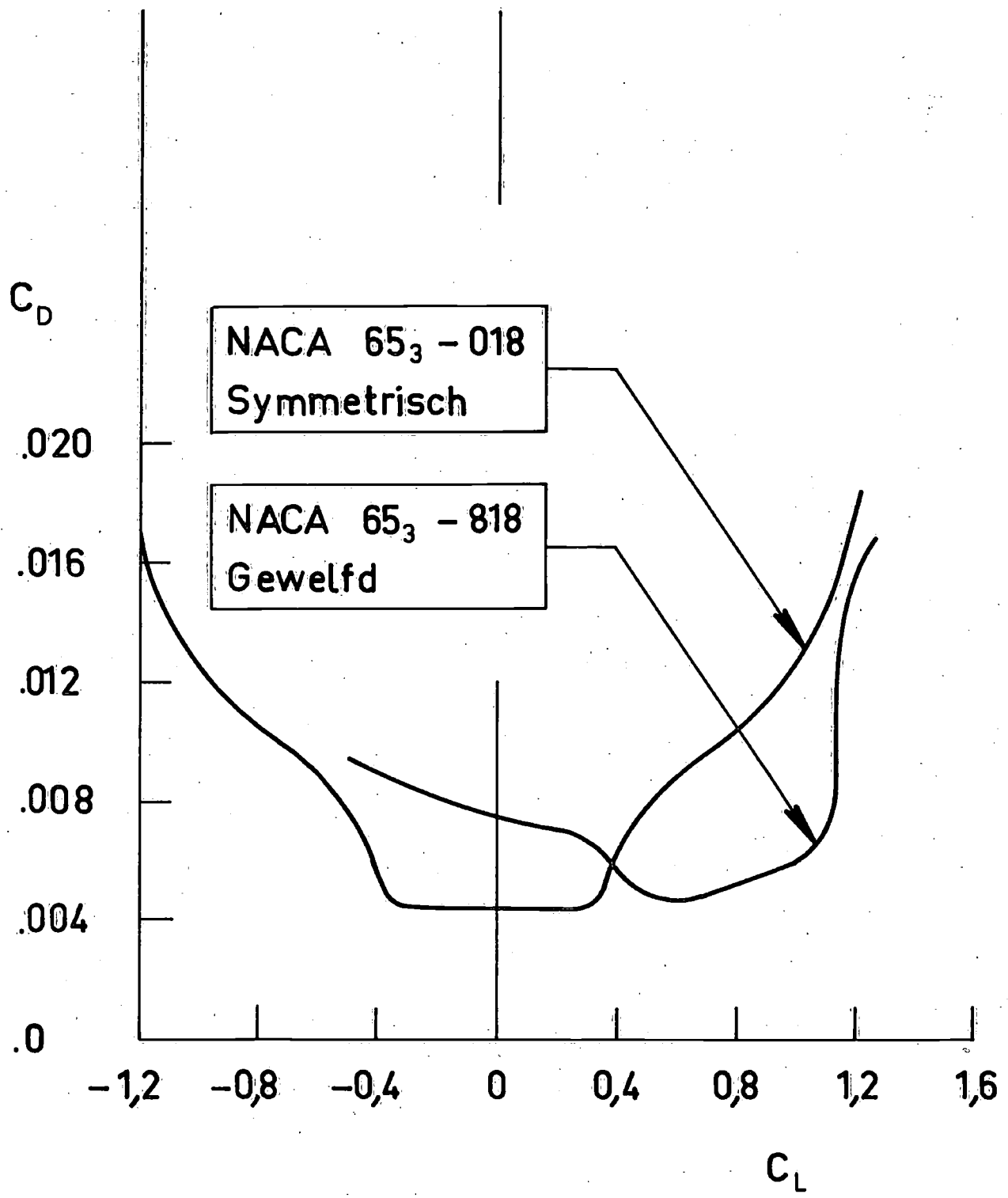


Fig. 3 Polairen voor symmetrisch en gewelfd NACA profiel (2D.)

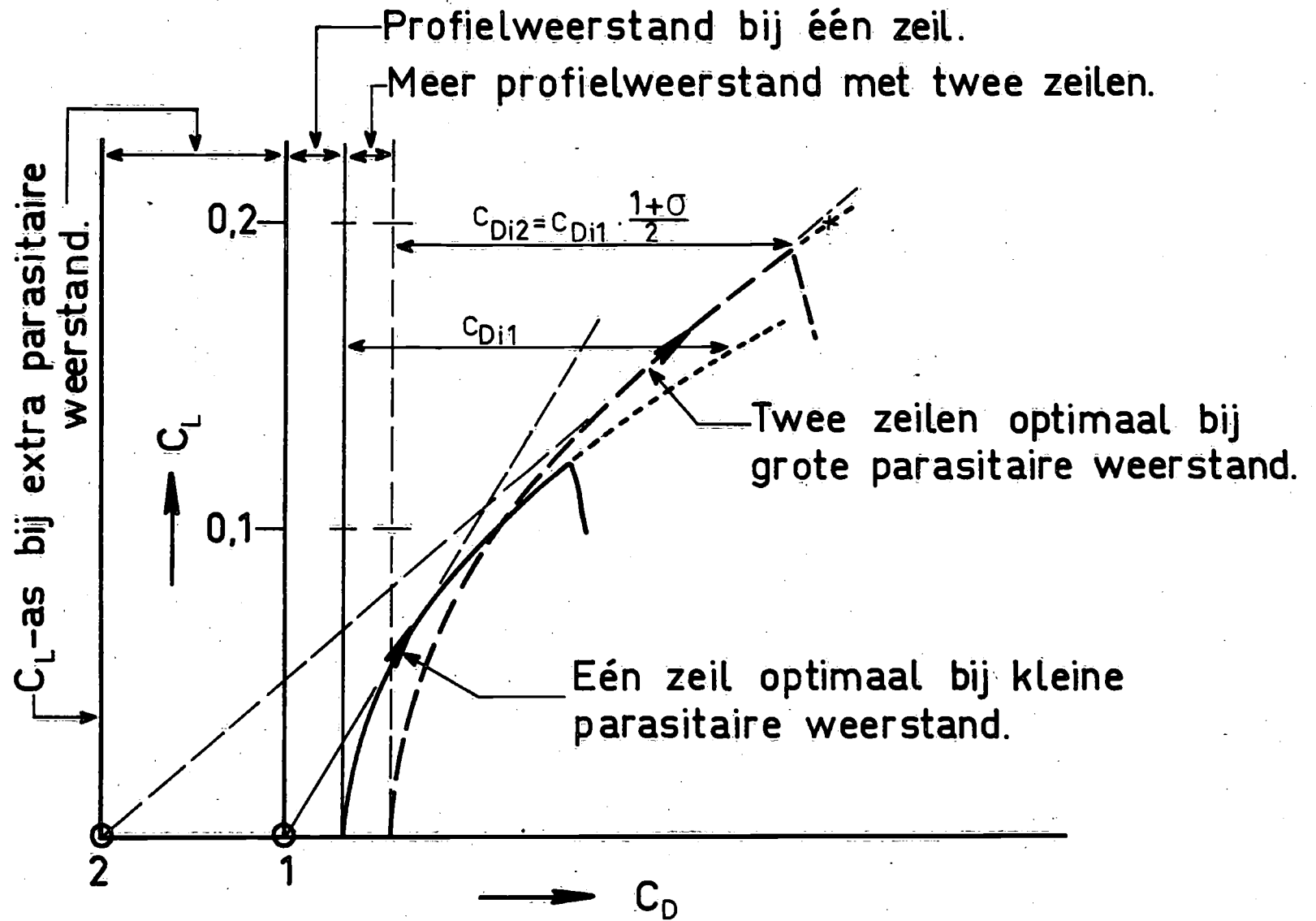


Fig. 4 Bij grote parasitaire weerstand kunnen twee zeilen gunstiger zijn. (aan de wind)

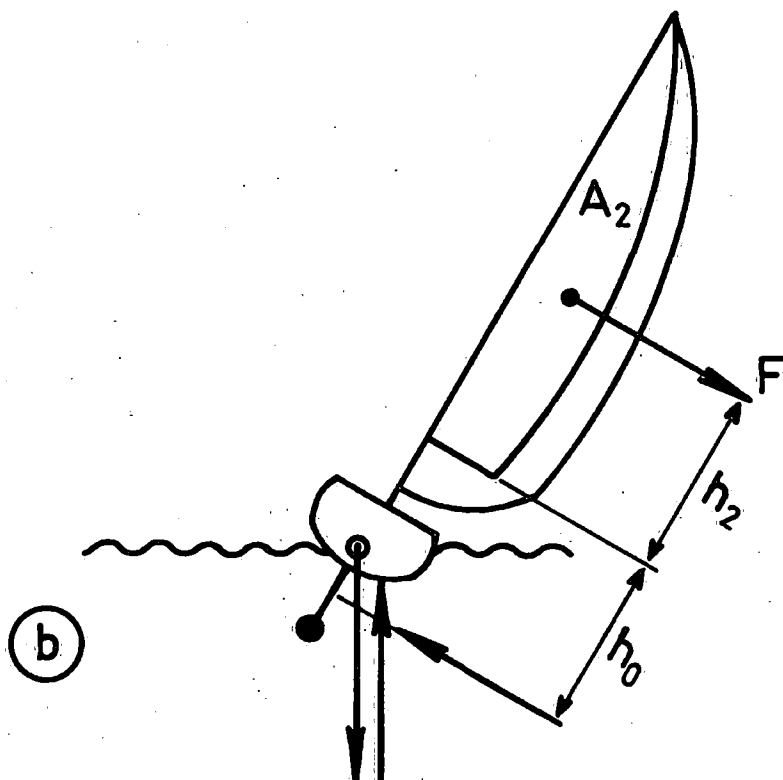
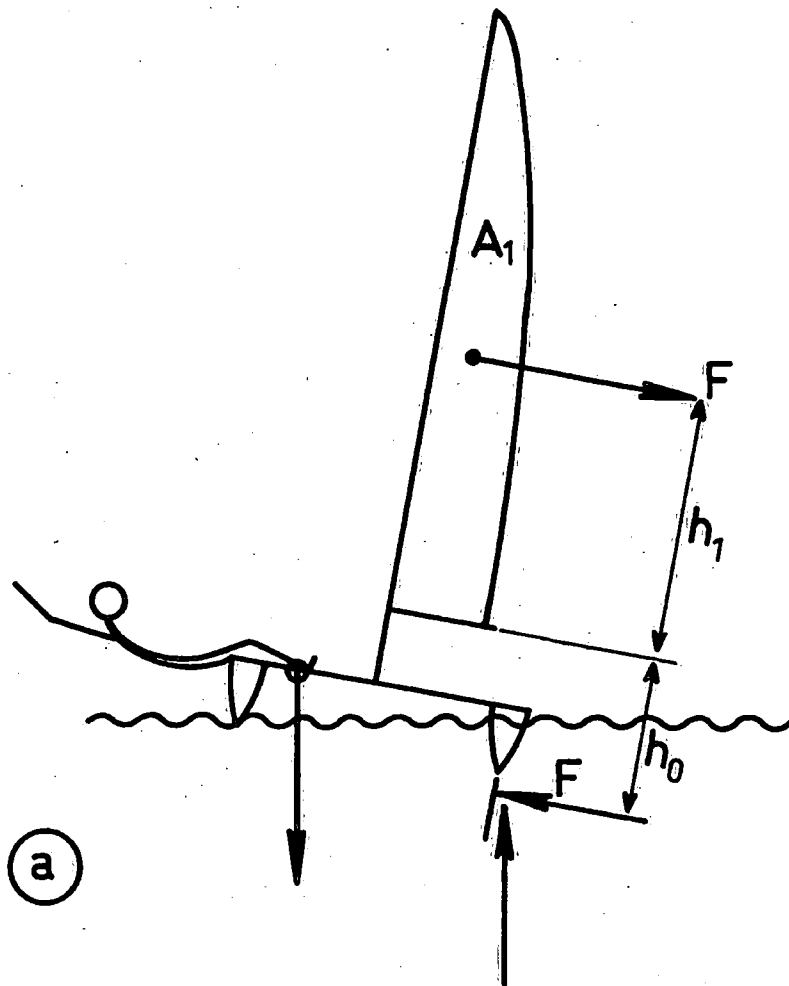


Fig.5 Invloed van stabiliteit op  
gewenste maximum  $C_F$



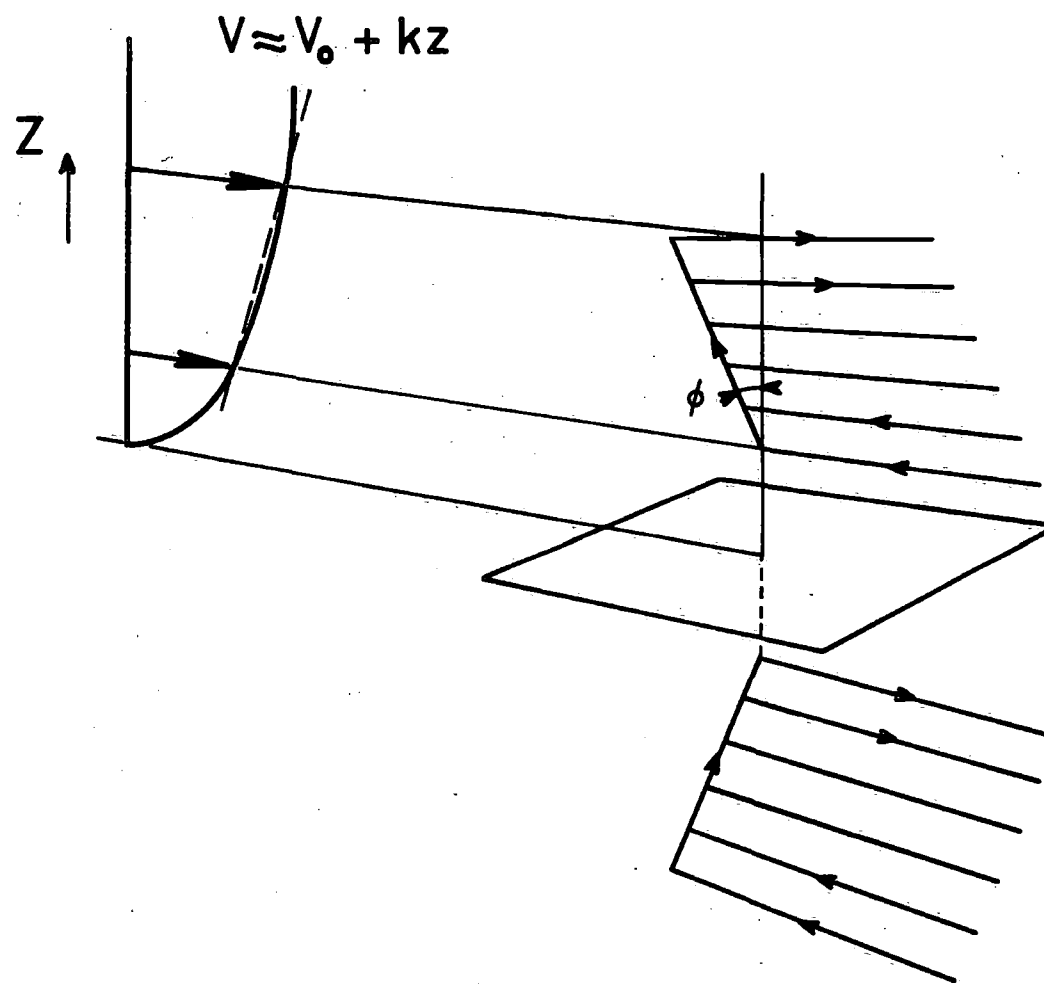


Fig.6 Het door Milgram toegepaste model van de dragende lijn met spiegelylak en windgradient.

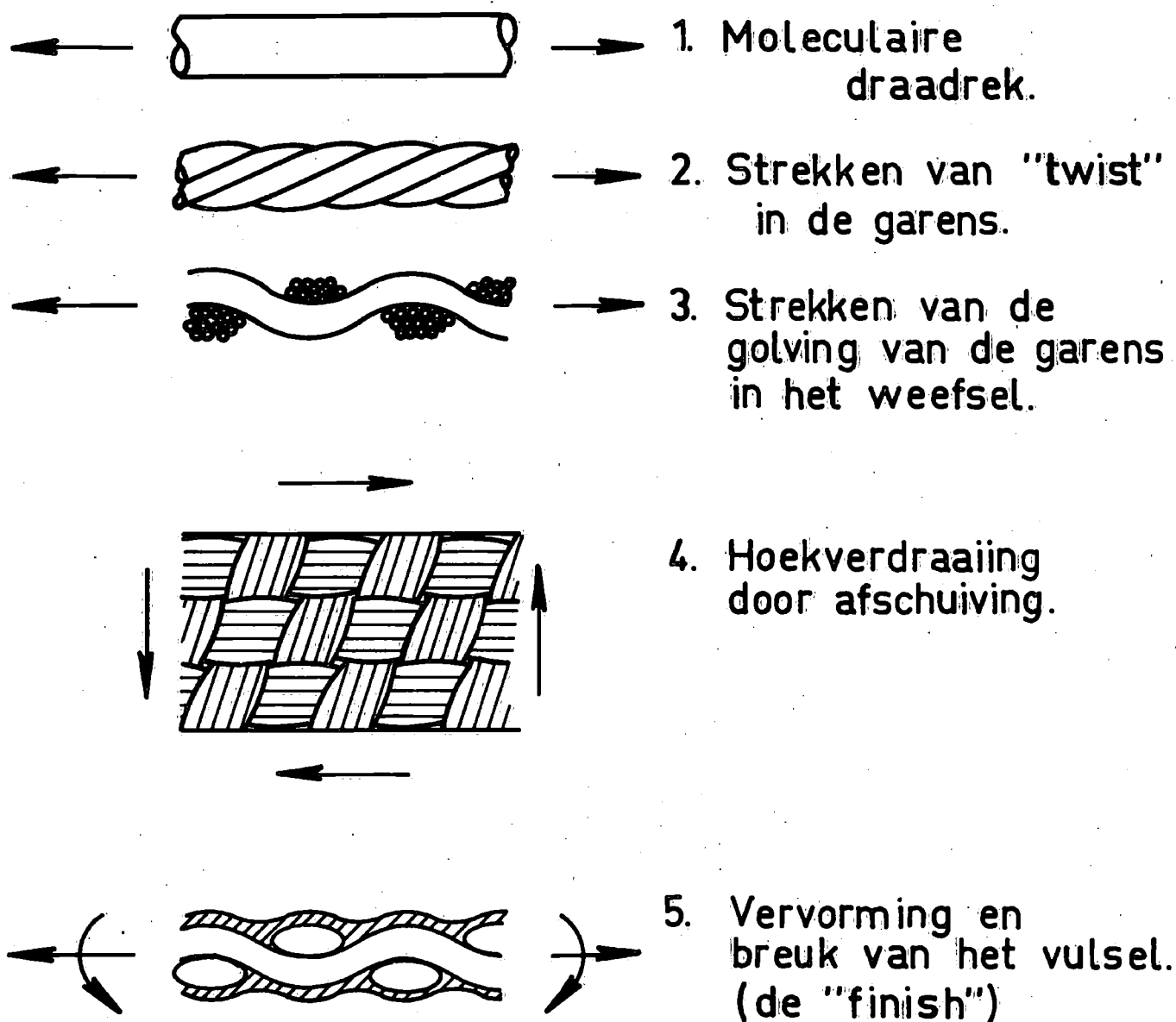


Fig.7 De belangrijkste oorzaken van vervorming van doek.

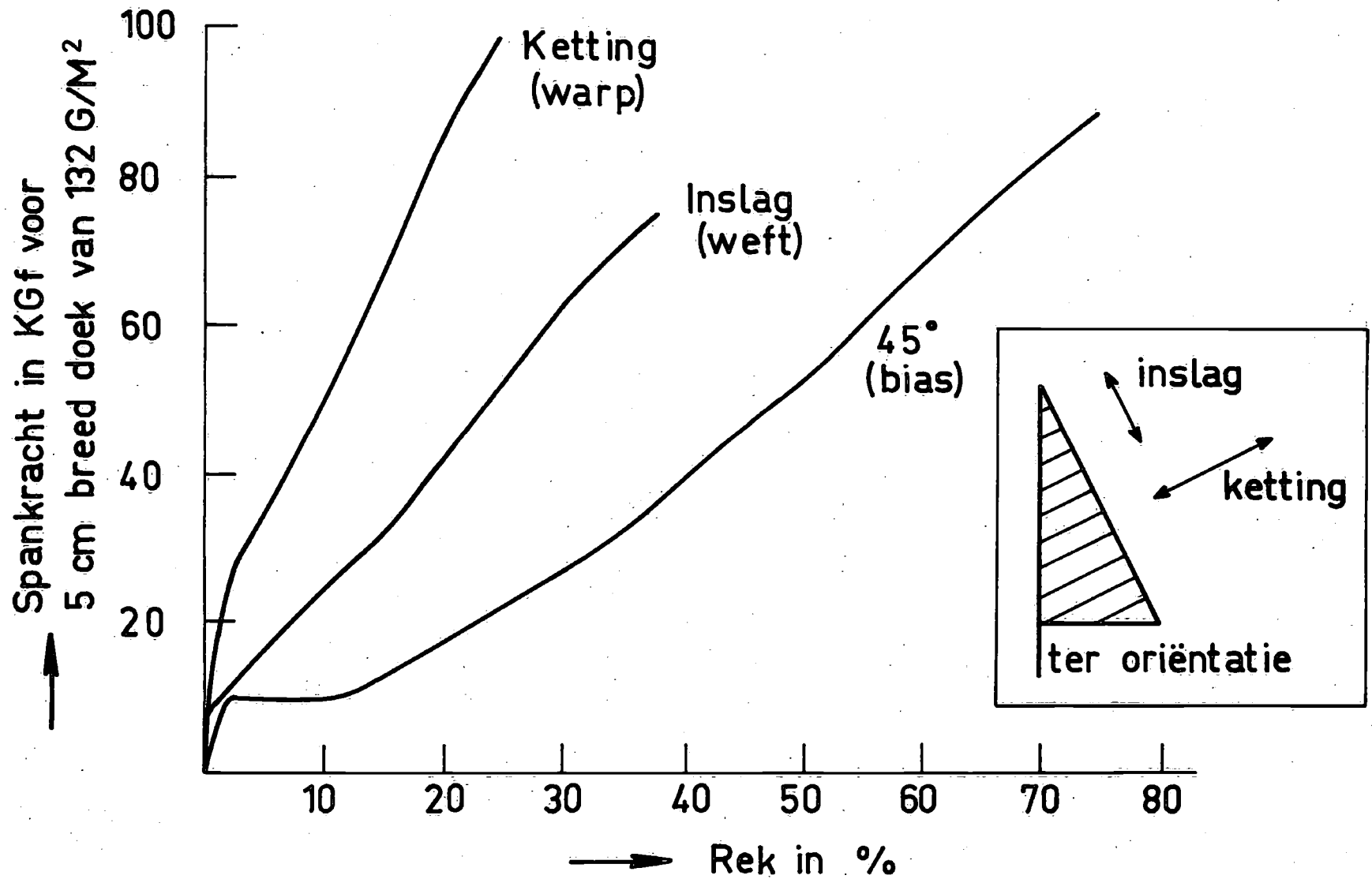


Fig.8

Trekproefresultaten van doek waarvan waarschijnlijk de "finish" brak.

nieuw doek  
1<sup>e</sup> en 2<sup>e</sup> cyclus

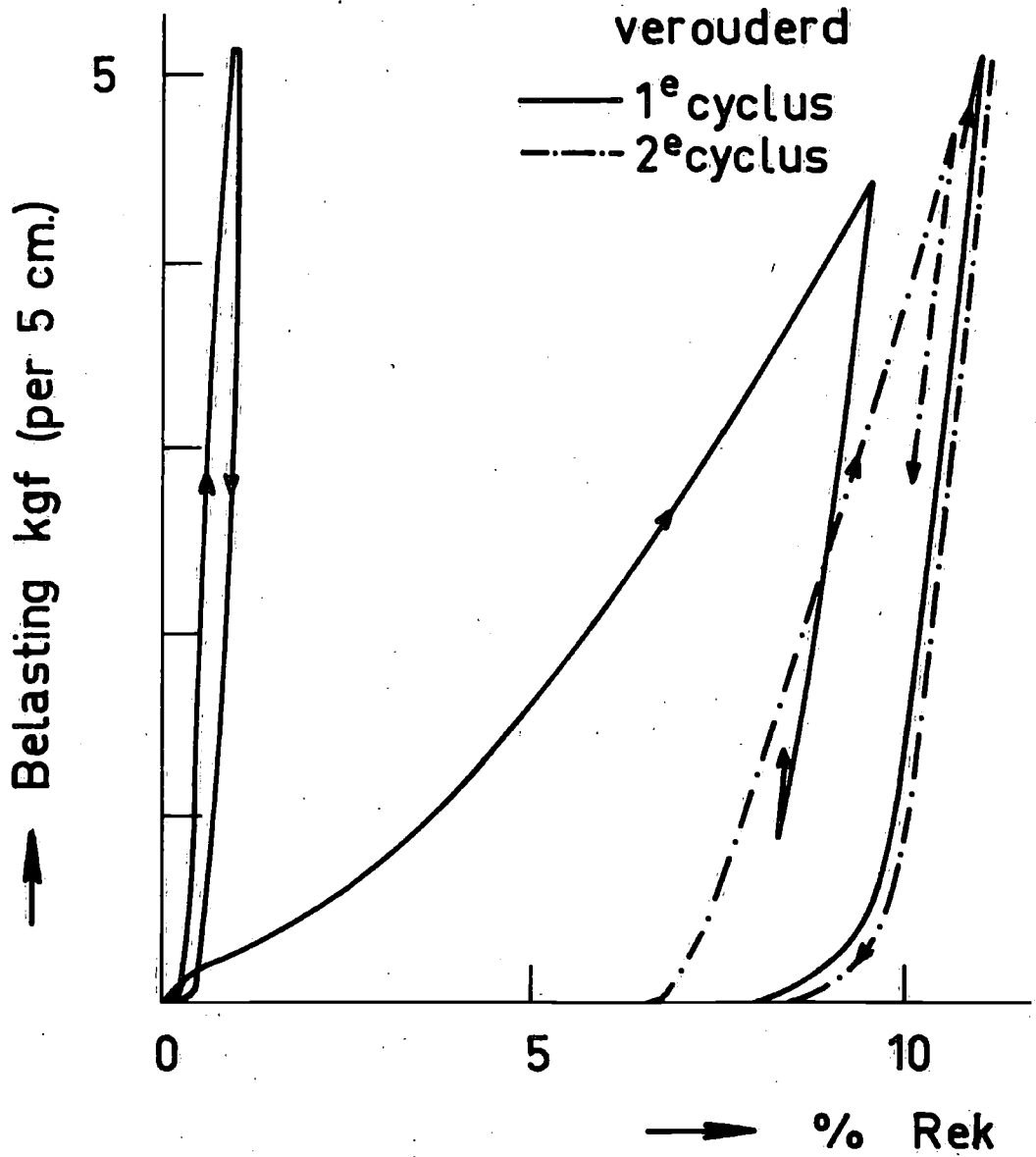


Fig.9 Dynamische trekkrommen.

Samenvatting.

De overeenkomst tussen een draagvleugel en een planerend vlak wordt gebruikt om de verschillende facetten van de weerstand van een planerend schip te belichten. Vervolgens wordt nagegaan in hoeverre de draagvleugelanalgie bruikbaar is bij het ontwerp. Er wordt melding gemaakt van de gepubliceerde resultaten van model-experimenten.

OVER DE WEERSTAND VAN PLANERENDE SCHEPEN

door

Ir. J. J. van den Bosch

IV. 1

## 1. Algemene Beschouwing.

Planeren is een vaartoestand waarbij een belangrijk gedeelte van het scheepsgewicht gedragen wordt door de dynamische druk van het water. De druk op elk punt van een stationair planerend schip kan gegeven worden door:

$$p = \frac{1}{2} \rho (V^2 - v^2) + \rho g z$$

waarin  $\rho$  - de dichtheid is

$V$  - de sloopssnelheid

$v$  - de stroomsnelheid op de beschouwde plaats

$g$  - de versnelling van de zwaartekracht

$z$  - de afstand onder het oorspronkelijke wateroppervlak

Dit is in figuur 1 verduidelijkt.

De integraal van de verticale component van de druk moet gelijk aan het scheepsgewicht zijn. Naarmate het dynamische gedeelte dat uit de eerste term van de vloeistofdruk voortkomt groter is, moet het statische gedeelte dat met de tweede term overeenstemt kleiner zijn. Het dynamische gedeelte zal hier de lift genoemd worden; het statische gedeelte de waterverplaatsing.

In figuur 2 is van een model deze verdeling gegeven afhankelijk van het getal van Froude.

Bij lage snelheden is de waterverplaatsing groter dan bij stilstand, hetgeen duidt op een negatieve lift. Zogauw de stroming aan de spiegel loslaat stijgt de lift snel totdat ook de stroming langs de gehele kim loslaat. Daarna gaat de stijging wat langzamer. De toename van de lift en de daarmee gepaard gaande afname van de waterverplaatsing beduidt dat het schip uit het water getild wordt; het nat oppervlak wordt daardoor kleiner, hetgeen leidt tot een lage wrijvingsweerstand. De "rest-weerstand" wordt kleiner met de snelheid. Door het optreden van de lift kan de weerstand bij hoge snelheden binnen redelijke grenzen gehouden worden. Daaraan ontlene planerende schepen hun bestaansrecht.

In figuur 3 wordt de weerstand getoond van twee modellen, het ene was een planerende knikspantboot, het tweede een rondspantboot. Beide hadden dezelfde lengte en dezelfde waterverplaatsing. De rondspantboot die door zijn vorm slechts een geringe neiging tot planeren vertoonde, heeft bij hoge snelheden een aanmerkelijk grotere weerstand.

## 2. De draagvleugel-analogie.

Het is nog niet mogelijk gebleken het probleem van het planeren theoretisch volledig te vatten. Wel is men er in geslaagd vele verschijnselen kwalitatief te verklaren door het probleem sterk te vereenvoudigen [1] en [2].

Laten we eerst het eenvoudige geval bekijken van de vlakke plaat met zeer grote breedte zodat we mogen aannemen met een vlakke (twee-dimensionale) stroming te doen te hebben. We veronderstellen dat de plaat met een zeer kleine invalshoek stationair planeert over het oppervlak van een wrijvingsloze vloeistof. We verwaarlozen ook de zwaartekracht, hetgeen betekent dat we alleen de term  $\frac{1}{2} \rho (V^2 - v^2)$  van de druk beschouwen, die voor hoge snelheden het belangrijkste is. Het stromingsbeeld ziet er dan ongeveer uit, zoals in figuur 4 getekend is. Ter plaatse van het stuwpunt treedt de druk  $\frac{1}{2} \rho V^2$  op. Achter het stuwpunt is de druk lineair van de invalshoek  $\alpha$  afhankelijk.

Wagner toonde in 1932 aan dat de drukverdeling onder een planerende vlakke plaat grote overeenstemming vertoont met de drukverdeling aan de onderzijde van een draagvleugel, afgezien van het kleine gebied voor het stuwpunt. De lift van de planerende plaat is dan de helft van die van de vleugel. Met deze wetenschap gewapend is het mogelijk een analyse te maken van de weerstand van een planerend schip.

### 3. De aard van de weerstand.

#### 3.1 De "spray"-weerstand.

Vóór het stuwpunt bij een planerend vlak ontstaat een dunne laag vloeistof die naar voren wordt geworpen en die hier "spray" wordt genoemd bij gebrek aan een passend Nederlands woord. Het gebied waar de spray ontstaat wordt "sprayroot" genoemd.

De spray bezit een zekere kinetische energie die door het schip geleverd wordt. Hiermee moet een weerstand corresponderen, waarvan de grootte geschat kan worden.

Laten we ons daartoe een zeer dun draagvlak voorstellen onder de zeer kleine invalshoek  $\alpha$  in een stroming die homogeen is ver voor en achter het draagvlak. Zie figuur 5.

Aan de achterzijde loopt de stroming glad af zonder discontinuïteit in de snelheid (Kutta-Youkowsky voorwaarde).

De kracht op de onder- en bovenzijde heeft de grootte  $2N$ . Aan de voorzijde van het draagvlak bestaat de zuigkracht  $S$  tengevolge van de onderdruk die ontstaat doordat de vloeistof met hoge snelheid de voorzijde omstroomt. Aangezien in een ideale vloeistof een lichaam geen weerstand ondervindt is de zuigkracht gelijk aan:

$$S = 2N \operatorname{tg} \alpha$$

Bij de planerende plaat valt de zuigkracht weg, en daarvoor in de plaats ontstaat de spray. De weerstand die de plaat dan ondervindt heeft de grootte:

$$R_S = \frac{S}{2} \cos \alpha = \Delta \operatorname{tga} \approx \Delta \cdot \alpha$$

waarin  $\Delta = N \cos \alpha$  de draagkracht van de plaat voorstelt.

Dit is in figuur 6 geschetst.

De snelheid van de wegschietende spray gerekend t.o.v. de plaat, is gelijk aan de stroomsnelheid  $V$ , aangezien de druk aan het oppervlak overal hetzelfde is. De dikte van de spray is te berekenen uit de impulsverandering van de vloeistof waaruit de spray bestaat. De dikte is

$$\delta \approx \frac{\Delta \cdot \alpha}{2\rho b V^2}, \text{ waarin } b \text{ de beschouwde plaatbreedte is.}$$



Voor de plaat van "oneindig" grote breedte is de sprayweerstand, onder de veronderstelde omstandigheden, de enige weerstand. Een mogelijkheid om de spray-weerstand te verminderen, althans in theorie, is de plaat een welling te geven, zoals in figuur 7 getekend is.

Een aan de onderzijde holle plaat kan lift geven zonder invalshoek, dus ook zonder spray-weerstand. Is de plaat aan de onderzijde bol, dan wordt de lift klein; soms zelfs negatief. Om in dit geval voldoende lift te krijgen moet men de plaat een grote invalshoek geven, hetgeen tot een grote sprayweerstand leidt.

### 3.2 De geïnduceerde weerstand

Als de breedte van het draagvlak eindig is kan de vloeistof om de tippen heen van de hoge-drukzijde naar de lage-drukzijde stromen. Er treedt daarbij in zekere mate een druk-vereffening op die de lift doet afnemen. Hoe kleiner de breedte, hoe groter relatief de afname van de lift is.

De omstroming veroorzaakt een naar beneden gerichte snelheid, die men de geïnduceerde snelheid noemt. De aan de vloeistof medegedeelde energie betekent een verlies. In het gunstigste geval is de geïnduceerde snelheid constant over de breedte en bedraagt ter plaatse van het draagvlak:

$$w_i = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V b^2}$$

en ver achter het draagvlak het dubbele. In deze uitdrukking stelt L de lift voor. In figuur 8 is de omstroming van de vleugeltippen getekend, en tevens is de analoge stroming bij de planerende plaat gegeven. Onder invloed van de wrijving en de zwaartekracht zal de hoge snelheidspiek (oneindig hoge snelheid) afgevlakt worden, zoals de linkerzijde van het beeld laat zien.

Het energieverlies komt te voorschijn als een weerstand. Het is alsof de draagvleugel de stroming ontmoet onder de hoek

$$\alpha = \alpha_0 - \frac{w_i}{V} \quad \text{zie figuur 9.}$$

Bij deze kleinere effectieve invalshoek is de draagkracht ook naar verhouding kleiner. Tevens is de krachtvector over de hoek  $\frac{w_i}{V}$  achterover gekanteld omdat hij loodrecht op de effectieve instroomrichting staat. Daardoor ontstaat een component in de oorspronkelijke stromingsrichting.

Deze noemt men de geïnduceerde weerstand. Een draagvlak van eindige breedte heeft dezelfde lift als een even breed stuk van de oneindig brede vleugel, als de invalshoek het bedrag  $\frac{w_i}{V}$  groter is. Dit geldt ook voor de planerende plaat.

De geïnduceerde weerstand van een planerende plaat is daaruit af te leiden en bedraagt:

$$R_i \approx \Delta \cdot \frac{w_i}{V} = \frac{4 \Delta^2}{\pi \rho V^2 b^2}$$

zolang de invalshoeken klein zijn, en de geïnduceerde snelheid hetzelfde is over de breedte van het vlak.

Ongelijkmatigheden in de snelheidsverdeling veroorzaken een grotere geïnduceerde weerstand. Dat is ook de reden dat een, van achter naar voren sterk veranderende vlaktilling de weerstand van een planerend schip ongunstig beïnvloedt.

De aan de vloeistofdeeltjes gegeven verticale snelheden, zijn bij een planerend schip terug te vinden als een verstoring van het vrije oppervlak. De geïnduceerde weerstand komt in dit geval dus als een golfweerstand tot uiting. Men kan dat ook goed zien; hoe hoger de snelheid is van een planerend schip, hoe lager de opgewekte golven zijn;  $R_i$  is immers omgekeerd evenredig met het kwadraat van de snelheid.

### 3.3 De invloed van de zwaartekracht. Golfweerstand.

De aanwezigheid van de zwaartekracht leidt tot een aantal verschijnselen die tot nu toe niet aan de orde gekomen zijn.

Tengevolge van het hoge-drukgebied aan de voorzijde van het schip ontstaat een opstuwning, gebonden aan het schip (primair golfsysteem).

De translatie van deze verstoring over het vloeistofoppervlak leidt tot het bekende golfsysteem dat bestaat uit dwarsgolven en divergerende golven, en dat zich naar achteren toe steeds uitbreidt. Hoe groter de primaire verstoring, hoe hoger het opgewekte golfsysteem en hoe groter de golfweerstand. Kleine scheepsbreedte en een scherpe intree, leiden tot een lage golfweerstand.

In de vorige paragraaf is al verteld dat de geïnduceerde weerstand tot uiting komt als een golfweerstand. Voor schepen met een kleine breedte is deze vorm van de golfweerstand bij hoge snelheden het belangrijkste.

De waterdeeltjes die in het geïnduceerde snelheidsveld een verticale snelheid hebben gekregen, worden door de zwaartekracht weer naar de middenstand teruggedrongen. De geïnduceerde snelheden worden dus door de zwaartekracht verminderd. Is deze invloed pas ver achter het schip merkbaar dan brengt dit geen verandering teweeg in de geïnduceerde weerstand. Is echter de scheepslengte niet zeer klein t.o.v. de golflengte van het golfsysteem, dan ondervindt het schip wel degelijk de invloed van de zwaartekracht op de verticale snelheden. De zwaartekracht veroorzaakt dan een vermindering van de geïnduceerde weerstand.

### 3.4 De wrijvingsweerstand.

Bij een schip dat planeert onder een kleine invalshoek is het hoge-druk gebied rond de stuwlijn zeer beperkt. Vlak achter de stuwlijn daalt de druk al vrij snel en neemt de snelheid weer toe tot bijna de scheeps-snelheid. De gemiddelde snelheid over het vlak wijkt hier dan ook niet veel van af. Aangezien een planerend schip grote overeenkomst vertoont met een vlakke plaat of met twee vlakke platen, is de wrijvingsweerstand ook praktisch gelijk aan de wrijvingsweerstand van een vlakke plaat in een homogene stroming.

Indien in het gebied vóór de stuwlijn, het watervlies dat de spray vormt, zijn snelheid t.o.v. het schip verliest door de wrijving tegen het vlak, wordt de halve spray-weerstand teruggewonnen.

### 3.5 De invloed van de vlaktilling.

Bij de oneindig brede planerende plaat staat de snelheidsvector loodrecht op de stuwlijn. De grootte van de druk is op de stuwlijn dan ook gelijk aan  $\frac{1}{2}\rho V^2$ .

Bij een schip met V-vormige spanten maakt de snelheidsvector een hoek met de stuwlijn die des te scherper is naarmate de vlaktilling groter en de invalshoek kleiner is. Op de stuwlijn komt de stroming niet tot stilstand omdat er een snelheidscomponent in de richting van de stuwlijn bestaat. De druk is niet gelijk aan  $\frac{1}{2}\rho V^2$  maar aan:

$$p = \frac{1}{2}\rho V_n^2 = \frac{1}{2}\rho(V^2 - V_t^2).$$

De snelheidscomponent  $V_n$  staat loodrecht op de stuwlijn en  $V_t$  is de component in de richting van de stuwlijn. Zie figuur 10.

Door de drukverlaging is de liftcoëfficiënt kleiner dan bij de vlakke plaat onder dezelfde omstandigheden. Het natte oppervlak is daardoor groter en dientengevolge de wrijvingsweerstand ook.

Een tweede gevolg van de vlaktilling is dat de spray niet vooruit maar zijdelings weggevoerd wordt zodanig dat de invallende en uitgaande stroming ongeveer gelijke hoeken maken met de stuwlijn. De spray-weerstand ligt vast en is gelijk aan de impulsverandering van de beschouwde vloeistof. De snelheidsverandering gezien in de hoofdstroomrichting is gelijk aan  $V(1 - \cos 2\phi)$  (zie figuur 10), hetgeen kleiner is dan bij de vlakke plaat. De massa moet dus groter zijn, de spray is dus dikker.

#### 4. De praktische waardering van de draagvleugelanalogie.

Oppervlakkig beschouwd zou de toepassing van de draagvleugelanalogie bij het ontwerp van een planerend schip moeten leiden tot een breed kort schip zonder vlaktilling maar wel met een welving in langsscheepse richting. Hoewel men wel getracht heeft de weerstand op deze wijze te verkleinen, heeft dat in het algemeen niet tot succesvolle schepen geleid. Hiervoor zijn een aantal oorzaken aan te wijzen, die gedeeltelijk verband houden met de te sterk vereenvoudigde voorstelling en gedeeltelijk met een aantal randvoorwaarden die hier ter sprake zullen komen.

##### 4.1 De zwaartekrachtsinvloed.

De beschouwingen over de draagvleugelanalogie gelden eigenlijk alleen voor snelheden die boven het normale gebruiksgebied liggen, uitgezonderd van de typische race-boten.

De snelheden van de motorjachten, en alle mogelijke werkbotten ligt over het algemeen beneden  $F_{N\bar{v}} = 3$ . In dat gebied is de invloed van de zwaartekracht van overwegend belang, d.w.z. dat het lange smalle schip in het voordeel is. In de eerste plaats door de kleine "gewone" golfweerstand en in de tweede plaats doordat de zwaartekracht de geïnduceerde golfweerstand vermindert. Zelfs voor snelheden die nog hoger liggen dan  $F_{N\bar{v}} = 3$ , blijkt dat vaak een betrekkelijk slank schip het voordeligst is [7].

##### 4.2 Verscheidenheid van functies.

Het probleem van de weerstand van een planerend schip is in werkelijkheid aanmerkelijk ingewikkelder dan van een simpele draagvleugel, die maar een onderdeel is van een vliegtuig. Bij een vliegtuig zijn de functies van de vleugel, de staart en de romp gescheiden, maar bij een planerend schip in zijn eenvoudigste vorm moet de romp lift produceren (vleugelfunctie), het schip langsscheeps stabiliseren (staartfunctie) en lading dragen (rompfunctie). Daarbij komt dan nog dat de grootte en vorm van het dragende vlak niet à priori vast liggen, maar bepaald worden door de belading en de snelheid. Het evenwicht van de planerende romp vereist niet alleen dat de som van alle krachten gelijk aan nul is, maar ook de som van de momenten.

Als men in eerste instantie de krachten op de schroef en de weerstand kan verwaarlozen wat betreft hun invloed op de trimligging van het schip, moet de verticale component van de resultante van de drukken op de bodem door het scheepszwaartepunt gaan, terwijl natuurlijk steeds deze resulterende verticale kracht gelijk moet zijn aan het scheepsgewicht. De verticale kracht kan geschreven worden in de vorm:

$$\Delta = C_{\Delta} \frac{1}{2} \rho V^2 S$$

waarin  $C_{\Delta}$  een soort liftcoëfficiënt voorstelt en  $S$  het effectieve natte oppervlak. Als we van een lage snelheid uitgaan en we laten de snelheid toenemen dan moet het product  $C_{\Delta} \cdot S$  afnemen want  $\Delta$  is constant (gelijk aan het scheepsgewicht). Als de snelheid toeneemt, komt het schip meer uit het water, het nat oppervlak neemt af, maar niet zo veel, omdat tegelijkertijd de invalshoek afneemt omdat aan het momentenevenwicht voldaan moet worden. Met de daling van de invalshoek daalt ook de liftcoëfficiënt.

In figuur 11 is op simpele wijze de weerstand gesplitst in een visceus gedeelte en een "restweerstand"

$$R = \Delta \operatorname{tg} \alpha + T \approx \Delta \cdot \alpha + T$$

waarin  $T$  de tangëntiaalkracht voorstelt langs het vlak.

Deze uitdrukking geldt alleen voor kleine invalshoeken.

De restweerstand  $\Delta \cdot \alpha$ , bestaande uit de golfweerstand en de sprayweerstand is dus practisch evenredig met de invalshoek. De tangentiële kracht  $T$  is identiek met de wrijvingsweerstand  $R_f$  die geschreven kan worden als:

$$R_f = C_f \frac{1}{2} \rho V^2 S$$

De wrijvingscoëfficiënt  $C_f$  is betrekkelijk weinig snelheidsafhankelijk. Een redelijke vermindering van de wrijvingsweerstand is dus slechts te verkrijgen door een verkleining van het natte oppervlak. Bij een bepaald schip is dat in principe te bereiken door het zwaartepunt naar achter te brengen waardoor de invalshoek groter wordt, de liftcoëfficiënt toeneemt en dientengevolge het nat oppervlak afneemt. De vermindering van de wrijvingsweerstand gaat echter ten koste van een vergroting van de restweerstand, die immers evenredig is met de invalshoek. De vraag is nu maar of de verkregen winst opweegt tegen het verlies. Bij een bepaalde invalshoek zal de weerstand minimaal zijn.

Deze optimale invalshoek is enigszins afhankelijk van de snelheid en de vorm van het schip en blijkt tussen 3 en 5 graden te liggen. Figuur 12.

De invalshoek neigt bij hoge snelheden naar kleine waarden, kleiner dan de optimale hoek. Het zou dus gunstig zijn het zwaartepunt meer naar achteren te brengen, maar er zijn natuurlijk grenzen aan deze mogelijkheid.

Tevens krijgen we te maken met een verschijnsel dat de Engelsen "Porpoising" noemen.

#### 4.3 "Porpoising".

Dit is een langsscheepse dynamische instabiliteit. Onder bepaalde omstandigheden kan bij hoge snelheden een gecombineerde stamp- en domposcillatie optreden die door het schip zelf in stand gehouden wordt. De beweging is hoogst vermoeiend, soms gevaarlijk, en kost energie die aan de voortstuwing onttrokken wordt. Zonder nu verder in te gaan op de oorzaken van dit merkwaardig verschijnsel, wordt in figuur 13 een indicatie gegeven in welk gebied van invalshoeken en snelheden porpoising optreedt, overgenomen uit [5].

De invalshoek die nodig is om het te vermijden is vaak belangrijk kleiner dan uit weerstandsogpunt gewenst is.

#### 4.4 Diversen.

Naast de genoemde problemen zijn er nog andere randvoorwaarden, b.v.

- a. Een te kleine vlaktilling heeft tot gevolg dat het schip in een bocht naar de buitenzijde van de bocht overhelt, hetgeen onplezierig en gevaarlijk kan zijn.
- b. Varen in golven eist een grote vlaktilling wegens het gevaar van paaltjes pikken.
- c. Een grote slankheid beperkt de bewegingen en verticale versnellingen in zeegang.

Als conclusie van deze paragraaf kan gezegd worden dat de analogie met de draagvleugel wel leidt tot een kwalitatieve verklaring van de opbouw van de weerstand, maar dat het ontwerp in het algemeen te zeer bepaald wordt door nevenvoorwaarden om veel aan de praktische toepassing van de draagvleugeltheorie te hebben.

Een nog vrijwel onontgonnen, maar toch veelbelovend gebied is het gebruik van de "step" op ongeveer halve lengte van het schip en het verstelbare planerende vlak aan de achterzijde.



## 5. Ontwerpgegevens.

Gegevens over de weerstand en de trim van planerende vlakken zijn voornamelijk gebaseerd op de talloze proeven die enkele tientallen jaren geleden uitgevoerd zijn ten behoeve van de luchtvaart met vliegboten [3] [4].

Het is jammer dat het gebied van de kleine invalshoeken er altijd een beetje bekaaid afgekomen is en dat het de vraag is of de meetresultaten voldoende nauwkeurig zijn.

Een benaderingsmethode zoals door Savitsky is gepubliceerd [5] berust op de bovengenoemde metingen.

Bij schrijver dezes bestaat enige twijfel aan de juistheid van de uitkomsten van deze methode. In het bijzonder lijken de invalshoeken te groot uit te vallen. Een serie van systematische modelproeven is de in 1949 gepubliceerde Series-50 [6]. Het gebruik van deze resultaten gaat wat onhandig, en de scheepsvorm is wat ouderwets.

De meest betrouwbare informatiebron lijkt op het ogenblik de Series-62 van Clement en Blount te zijn [7] die ook erg makkelijk in het gebruik is. Vijf modellen met verschillende  $L/B$ -verhoudingen werden gesleept onder zeer uiteenlopende beladingstoestanden. Het gekozen type is uitgesproken Amerikaans. Het is uit weerstandsoogpunt goed in het hoge snelheidsgebied maar bij wat geringere snelheden niet zo gunstig. Ook voor gebruik in golven is het type niet geschikt door de vrij kleine vlaktilling. De grote waarde van de serie is dat de invloed van de  $L/B$ -verhouding, de belading en de snelheid zo duidelijk naar voren komt.

Enige voorbeelden zullen hier nader bekeken worden maar eerst moeten enkele parameters die Clement gebruikt verduidelijkt worden. De "grootte" van het schip wordt aangeduid door de verticale projectie van het oppervlak binnen de kniklijn. Dit oppervlak is  $A_p$  genoemd en getoond in figuur 14. Een maat voor de belasting van het schip is de dimensieloze grootte  $\frac{A_p}{\nabla^2/3}$  waarin  $\nabla = \frac{\Delta}{\rho g}$  : het volume onder water van het schip in rust. De tweede parameter die met de belading te maken heeft, is de langsscheepse ligging van het zwaartepunt  $G$ . Clement geeft de ligging van  $G$  ten opzichte van het zwaartepunt  $X_p$  van het oppervlak  $A_p$ , in procenten van de lengte  $L$  van het oppervlak  $A_p$ .

De afstand van  $G$  tot  $X_p$  wordt hier  $l_{Gx}$  genoemd.

In figuur 15 is de invloed van  $L/B$  getoond.  $B$  is de grootste breedte van  $A_p$ . Het is duidelijk dat in het belangrijke snelheidsgebied beneden  $F_{n\gamma} = 3$  het langste en smalste schip in het voordeel is, en dat boven deze snelheid het verschil gering is, hoewel daar het breedste schip de geringste weerstand vertoont.

Men zal voor een ontwerp er naar moeten streven om "humps" in de weerstandscurve te vermijden. Over het gebied waarin de helling van de kromme negatief is, dus waar de weerstand afneemt bij toenemende snelheid kan men niet varen. Dit gebied is instabiel. De relatief brede modellen blijken een uitgesproken weerstands "hump" te vertonen.

In figuur 16 is de invloed van de coëfficiënt  $\frac{A_p}{\sqrt{2/3}}$  gegeven.

Het schip dat de grootste afmetingen heeft bij een gegeven gewicht, heeft beneden  $F_{nV} \approx 3$  de kleinste weerstand en geen hump. Bij hoge snelheden is echter dit relatief lichte schip in het nadeel door het grote natte oppervlak. In figuur 17 is de invloed van de zwaartepuntsligging getoond. Het schip met de achterste zwaartepunt heeft een zeer duidelijk weerstands "hump". Van het voordeel dat het kleine natte oppervlak bij hoge snelheden een lage weerstand zou veroorzaken, kan geen gebruik gemaakt worden, omdat het schip langsscheeps instabiel wordt. Dat is het z.g. "porpoising".

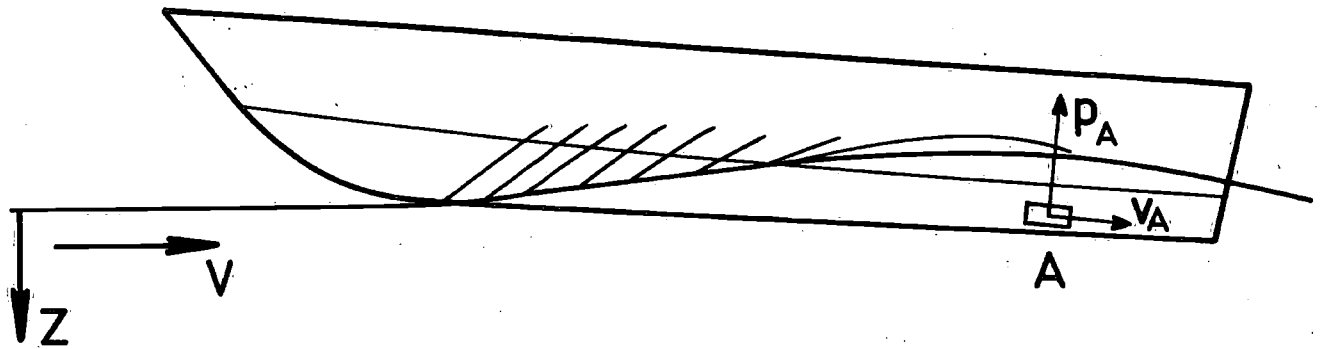
De voorbeelden van de figuren 15, 16 en 17 zijn een duidelijke demonstratie hoezeer de golfweerstand ("hump") en de randvoorwaarden het beeld beheersen. Het smalle niet te zware schip, waarvan het zwaartepunt niet bijzonder ver naar achteren ligt, blijkt de beste allrounder te zijn.

De artikelen van Hadler [9, 10, 11] over de voortstuwing van dit soort schepen zijn de moeite van het bestuderen zeer waard. Ze vormen een belangrijke aanvulling van het werk van Clement.

Litteratuur.

- 1 Wagner, H.:  
"Über Stoss- und Gleitvorgänge an der Oberfläche von Flüssigkeiten"  
Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik  
Band 12. Heft 4. August 1932
  
- 2 Wagner, H.:  
"Über das Gleiten von Wasserfahrzeugen"  
Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft 1933
  
- 3 Sottorf, W.:  
"Versuche mit Gleitflächen"  
Werft, Reederei, Hafen 10. Jahrgang, Heft 21, 7 Nov. 1929  
13. Jahrgang, Heft 19, 1 Oct. 1932  
14. Jahrgang, Heft 4, 15 Febr. 1933  
14. Jahrgang, Heft 5, 1 März 1933
  
- 4 Shuford, Ch.L.:  
"A theoretical and experimental study of planing surfaces including effects of cross section and plan form".  
N.A.C.A. Report 1355
  
- 5 Savitsky, D.:  
"Hydrodynamic Design of Planing Hulls".  
Marine Technology, vol. 1, 1964.
  
- 6 Davidson, K.S.M. and Suarez, A.:  
"Tests of Twenty Related Models of V-Bottom Motor Boats -  
EMB Series 50".  
DTMB Report R-47, March 1949.
  
- 7 Clement, E.P. and Blount, D.L.:  
"Resistance Tests of a Systematic Series of Planing Hull Forms".  
Transactions S.N.A.M.E. 1963

- 8 Murray, A.B.:  
"The Hydrodynamics of Planing Hulls".  
Transactions S.N.A.M.E. 1950
- 9 Hadler, J.B.:  
"The Prediction of Power Performance on Planing Craft".  
Transactions S.N.A.M.E. 1966
- 10 Hadler, J.B. and Hubble, N.:  
"Prediction of the Power Performance of the Series 62 Parent Hull".  
Symposium Yacht Architecture '71.
- 11 Hadler, J.B. and Hubble, N.:  
"Prediction of the Power Performance of the Series 62 Planing Hull  
Forms".  
Transactions S.N.A.M.E. 1971.



$$p_A = \frac{1}{2} \rho (V - v_A)^2 + \rho g z$$

Fig.1 De dynamische en statische druk.

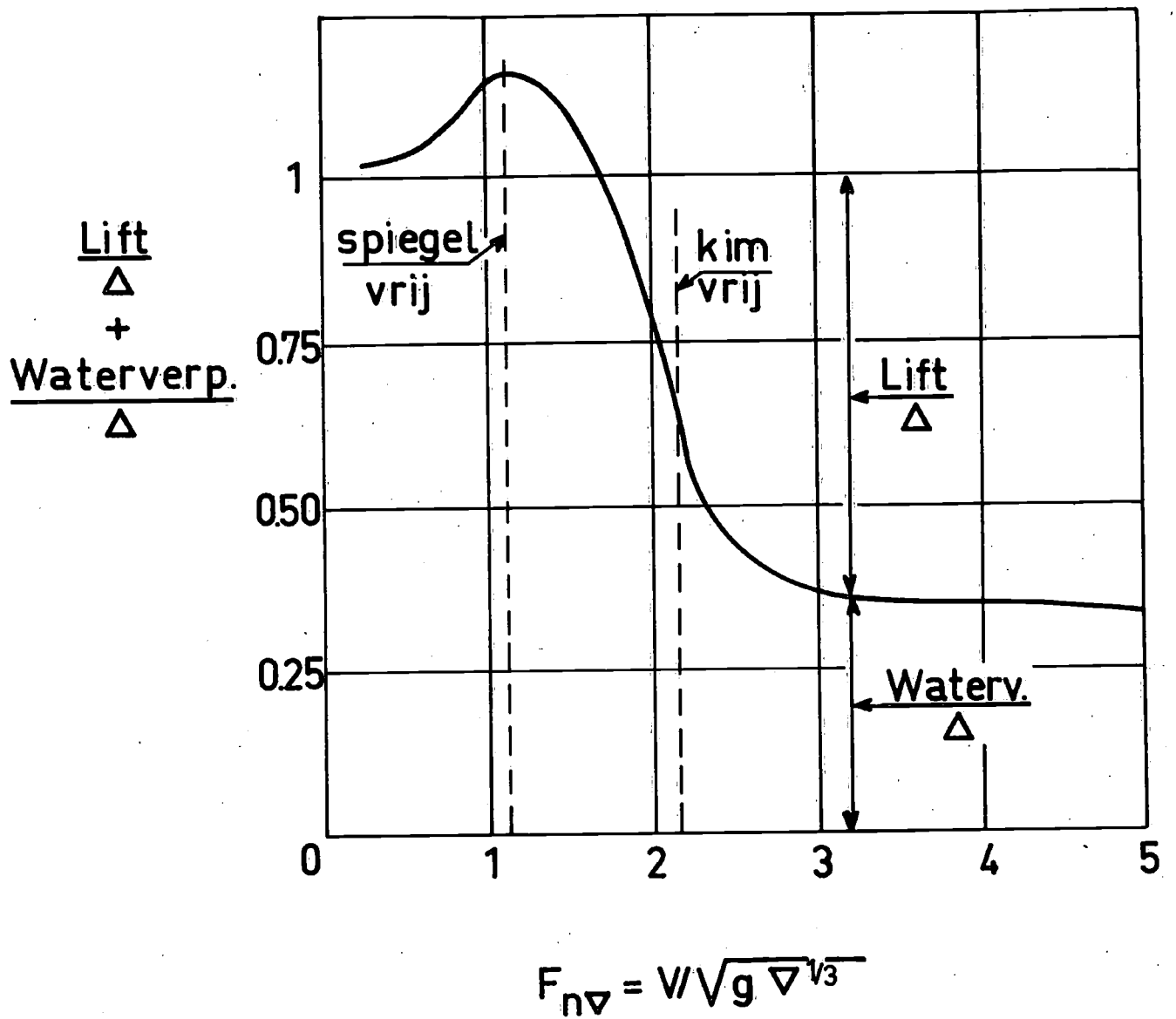


Fig. 2 De verdeling van het scheepsgewicht over lift en waterverplaatsing.

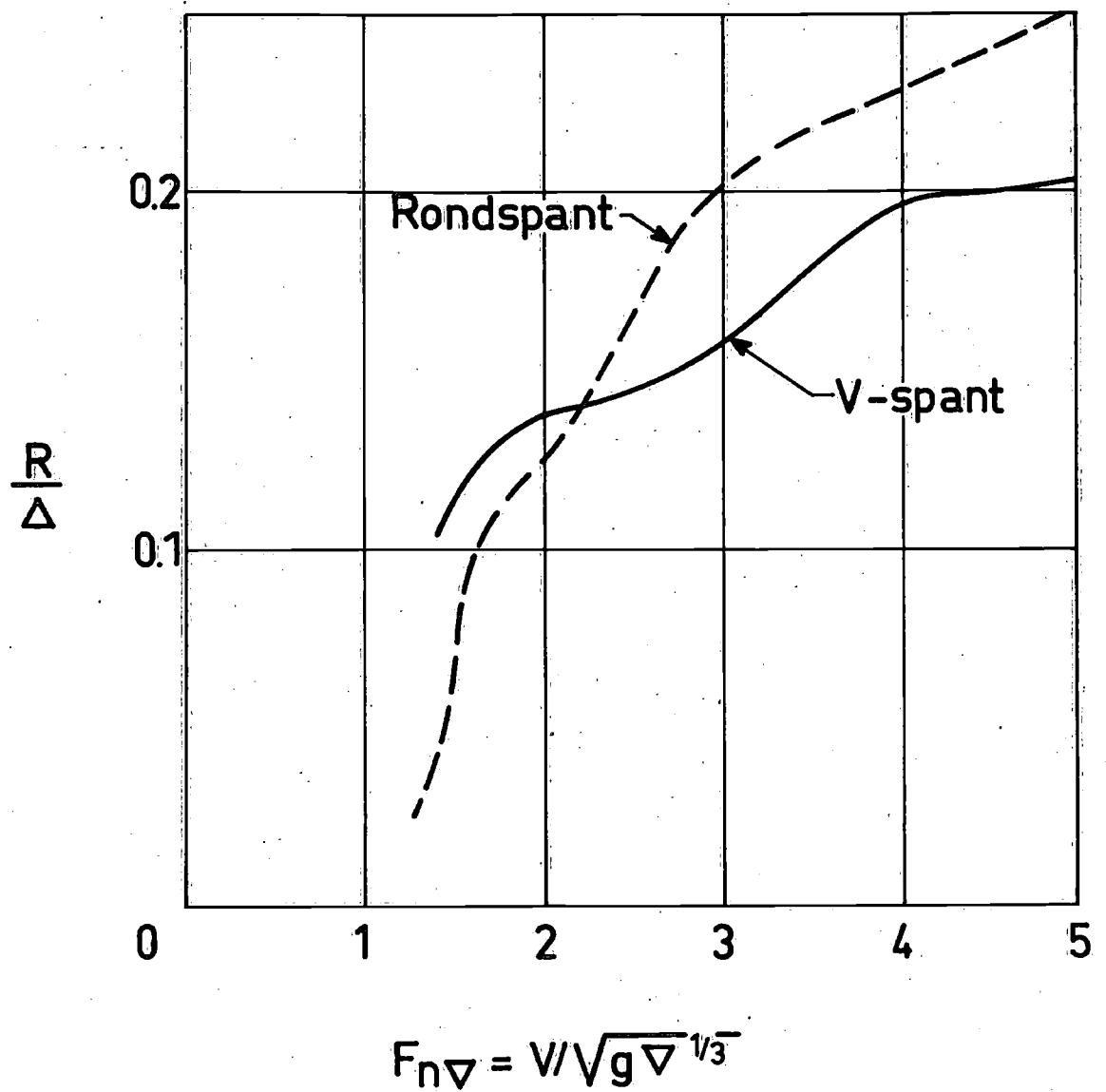


Fig. 3 De weerstand van een rondspant en een V-spant model

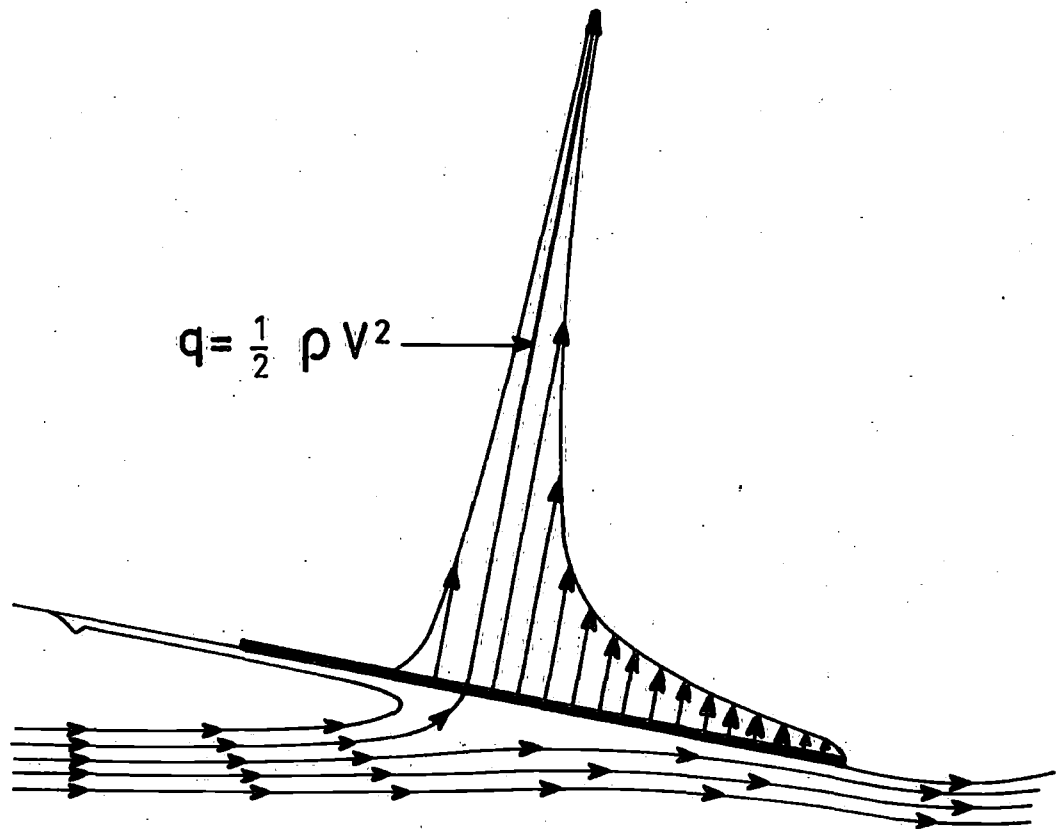


Fig. 4. Stromingspatroon en drukverdeling.



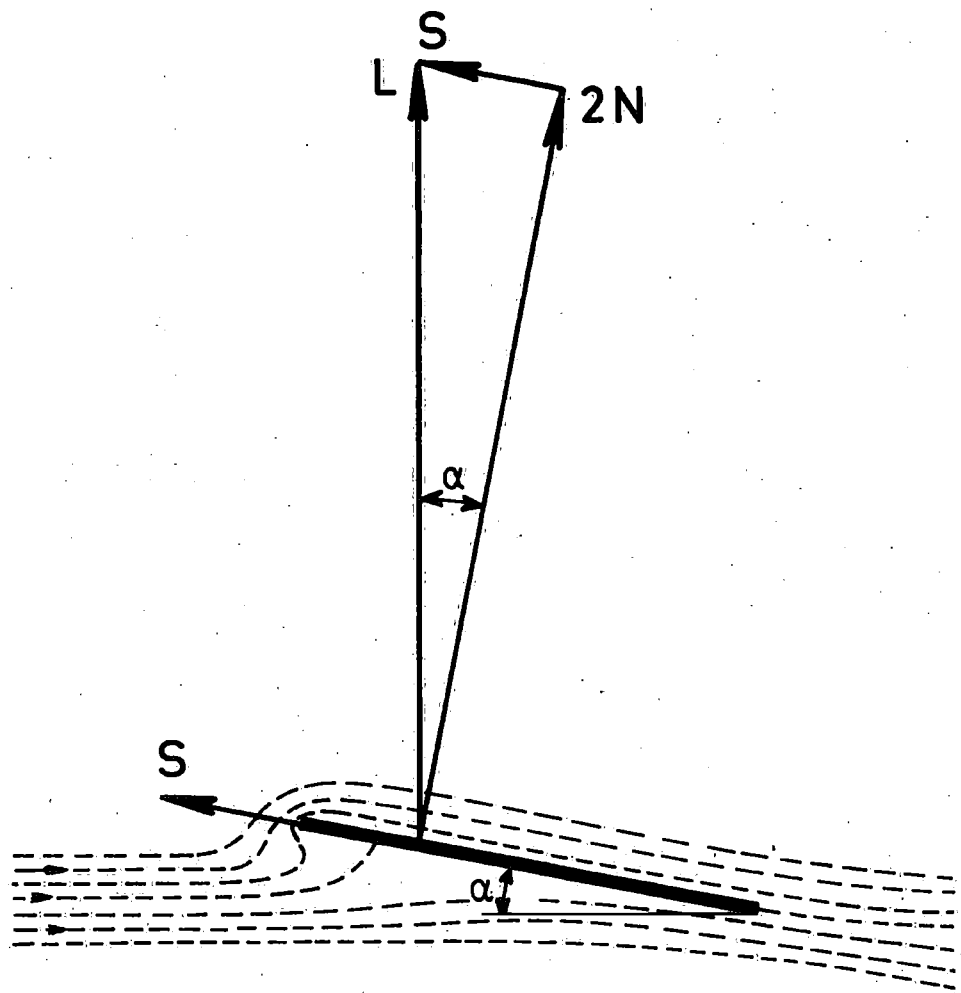


Fig.5 Normaalkracht en zuigkracht vormen tezamen de lift.

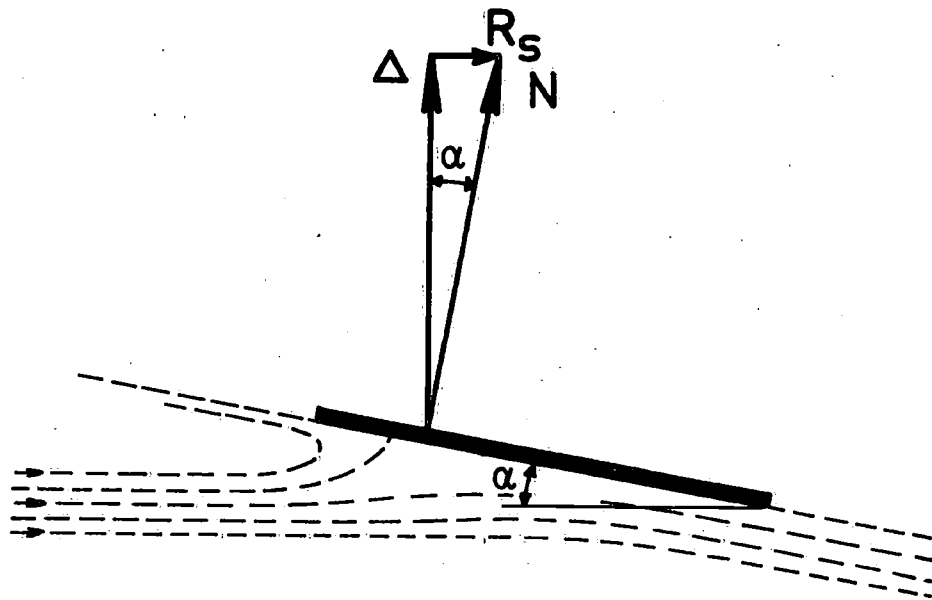


Fig.6 Door het wegvallen van de zuigkracht.  
ontstaat de spray-weerstand.  
De normaalkracht is gehalveerd.

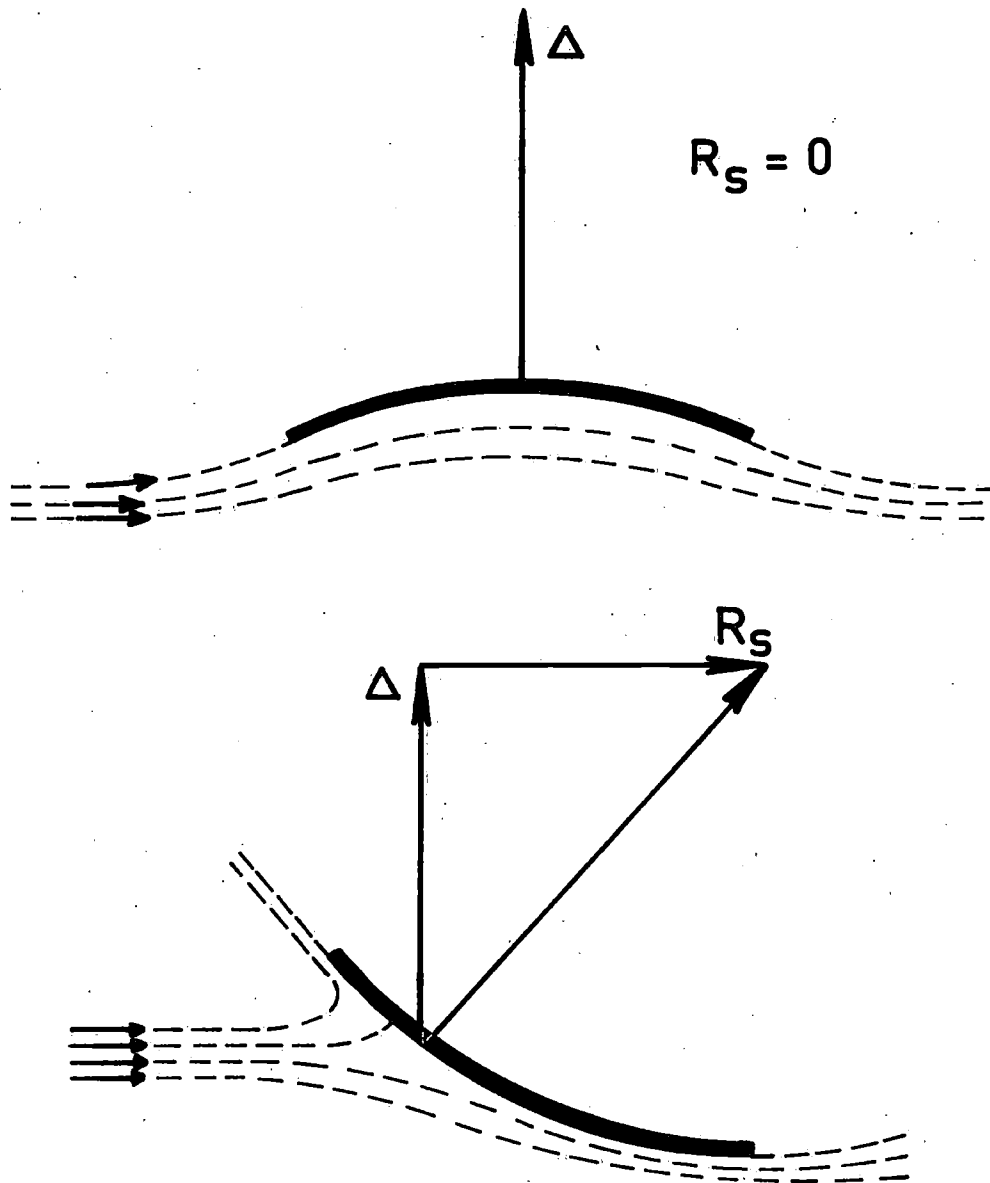
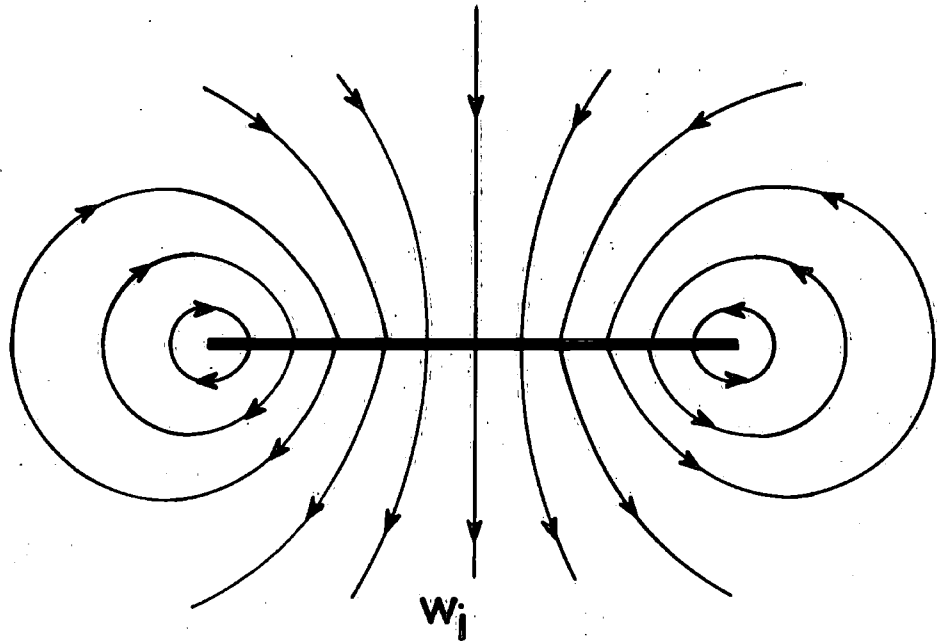


Fig. 7 Welving kan zowel gunstig als ongunstig zijn.



Invloed van viscositeit  
en zwaartekracht.

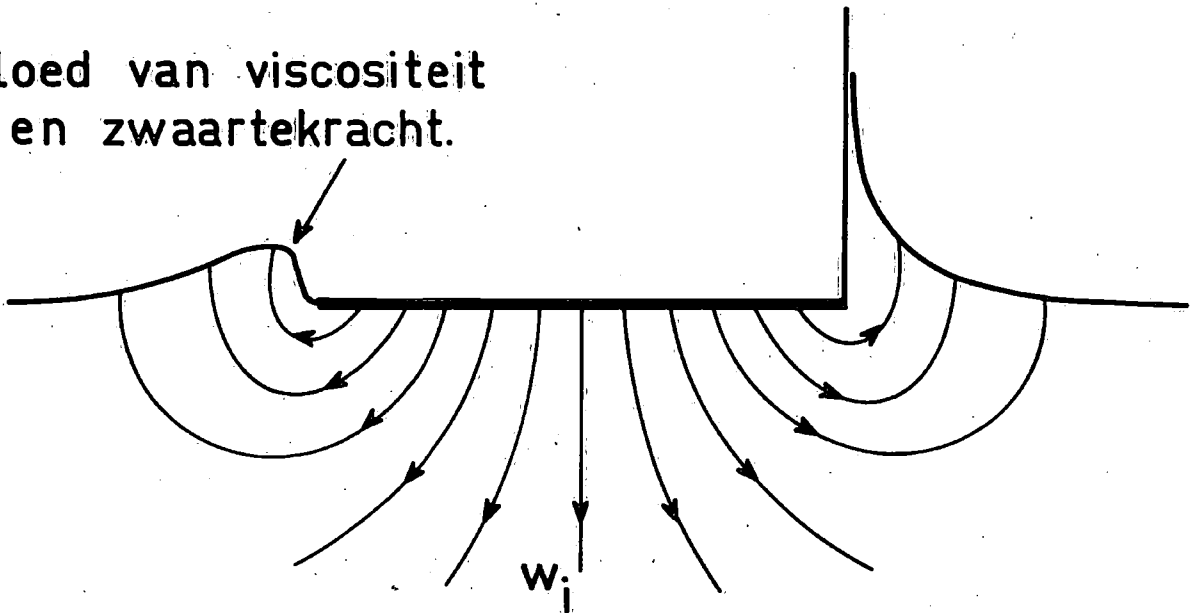
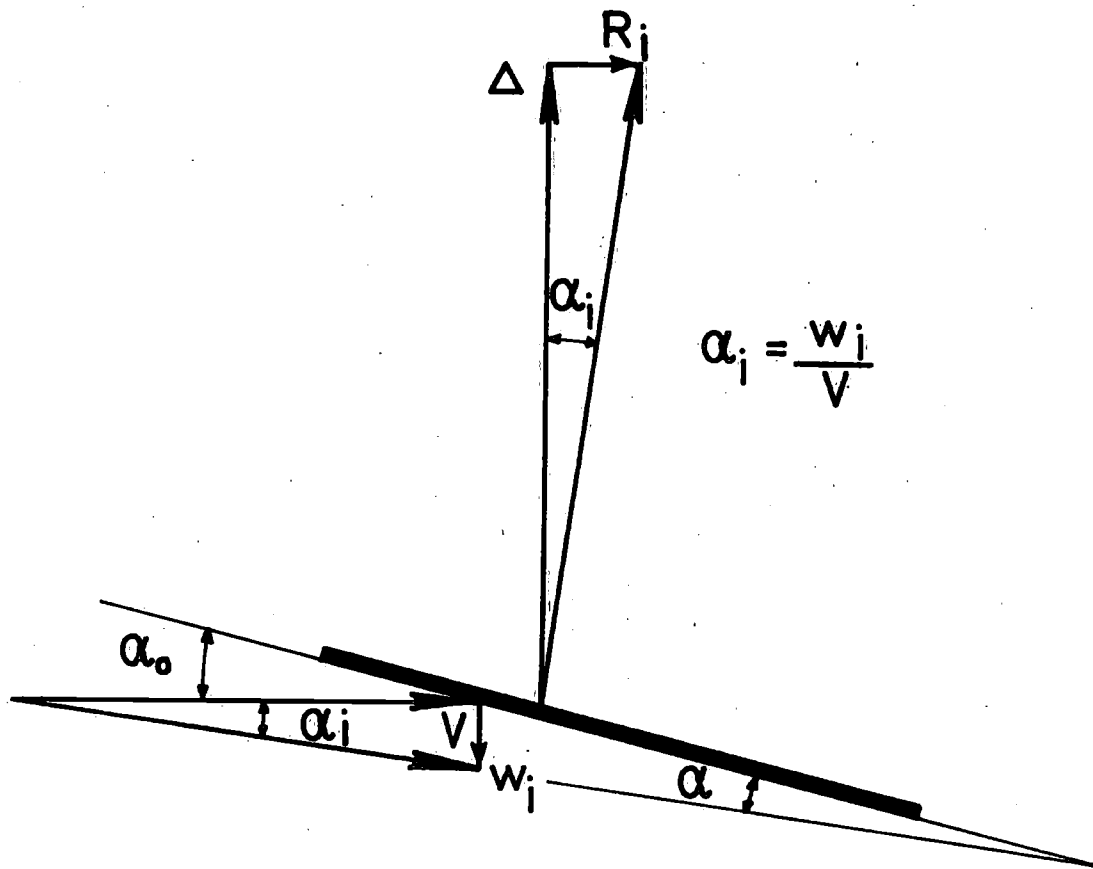


Fig. 8 Geïnduceerd snelheidsveld bij draagvleugel en planerende plaat.



$$\alpha = \alpha_0 - \frac{w_i}{V}$$

$$R_i = \frac{4\Delta^2}{\pi\rho V^2 b^2}$$

Fig.9 De geïnduceerde weerstand.

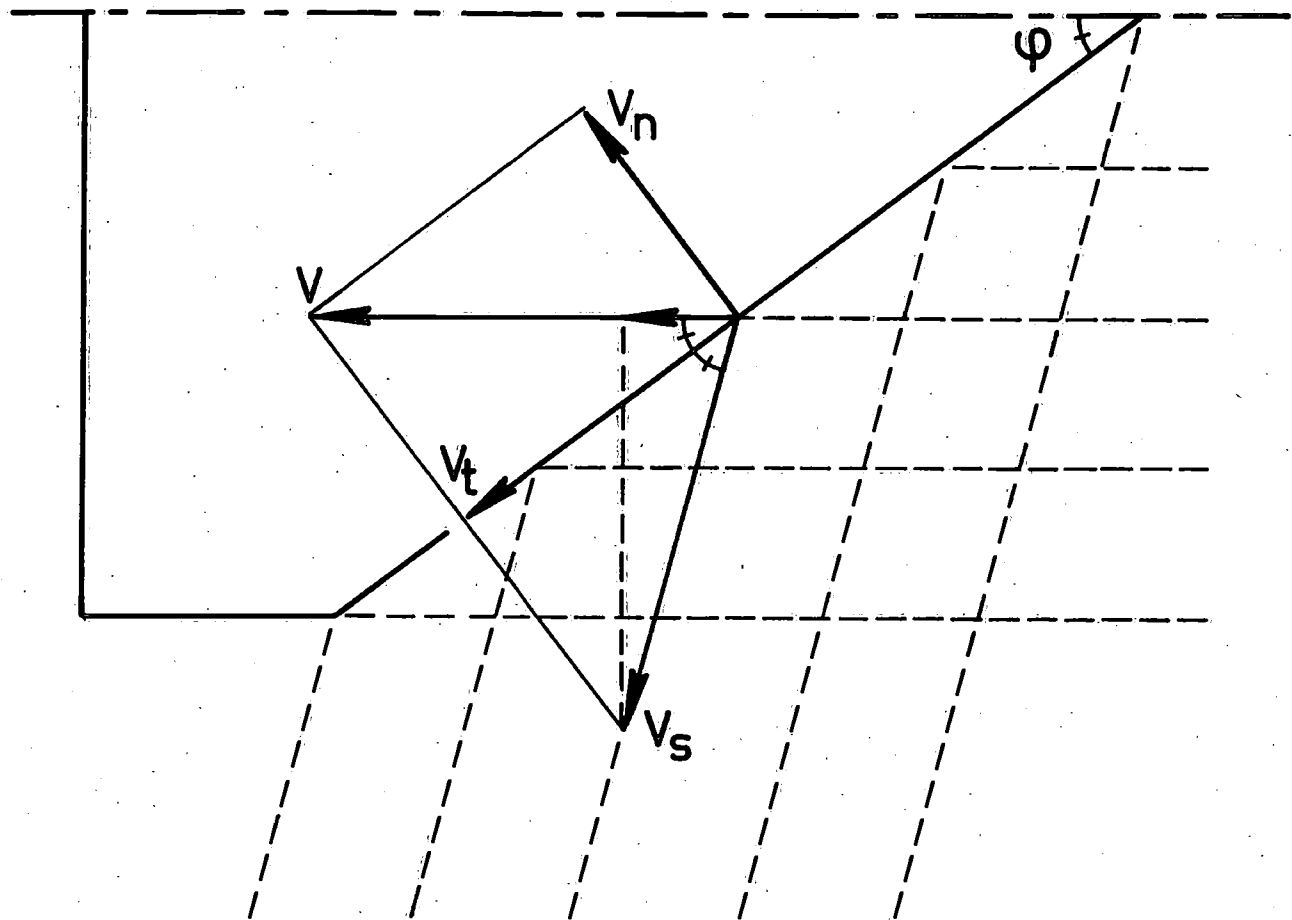
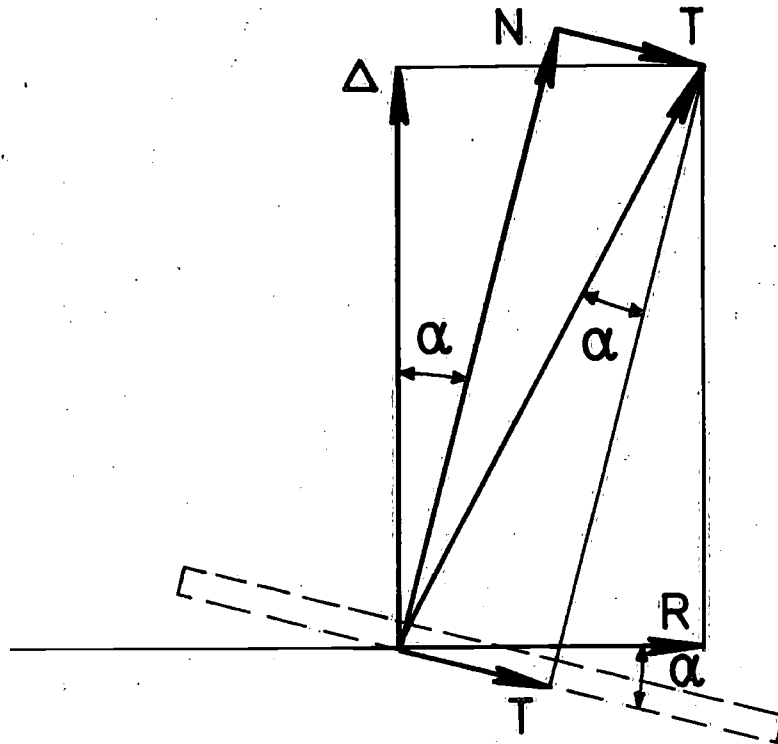


Fig. 10 Stuwlijn bij schip met vlaktilling.



$$R = \Delta \operatorname{tg} \alpha + \frac{T}{\cos \alpha}$$

of

$$R \approx \Delta \cdot \alpha + R_f$$

Fig. 11 De splitsing van de weerstand in een visceus - en een "rest"-gedeelte.

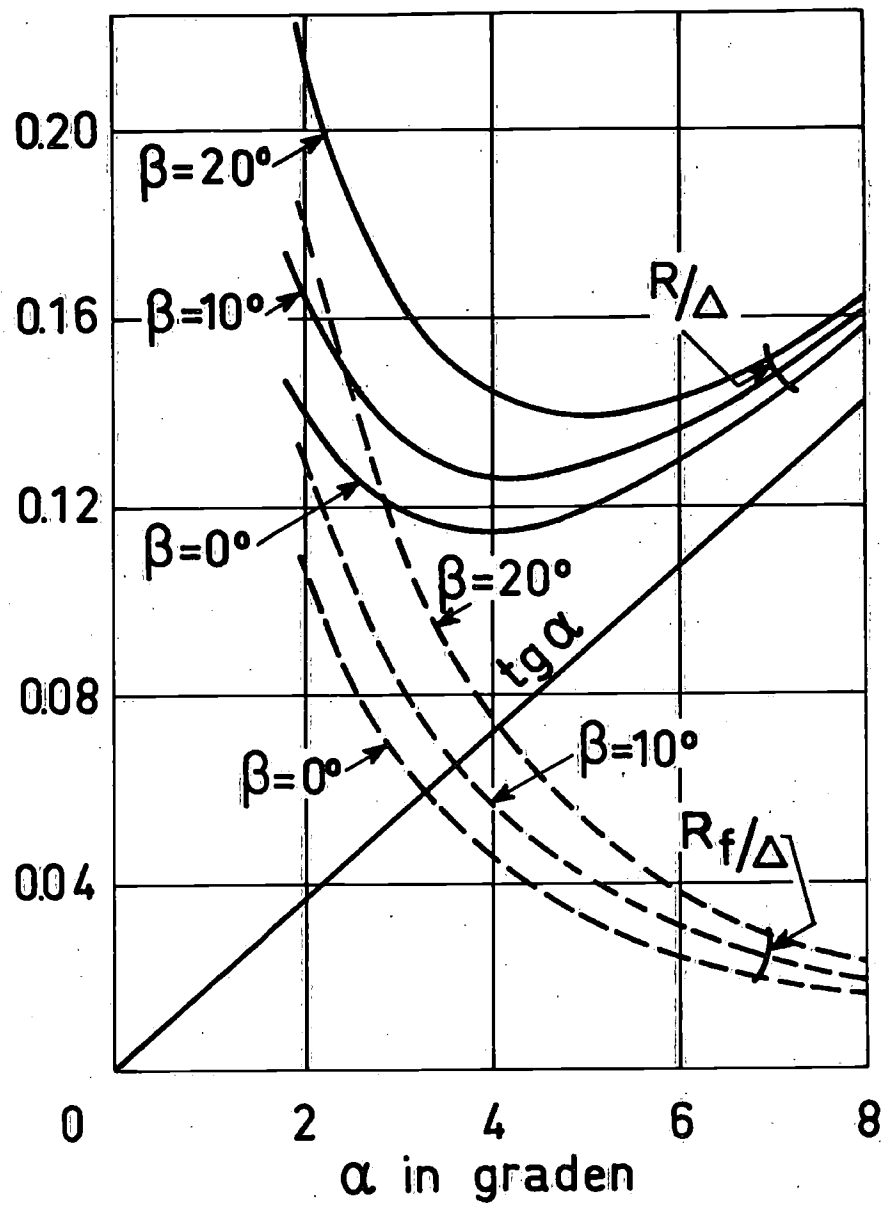


Fig.12 De optimale invalshoek.



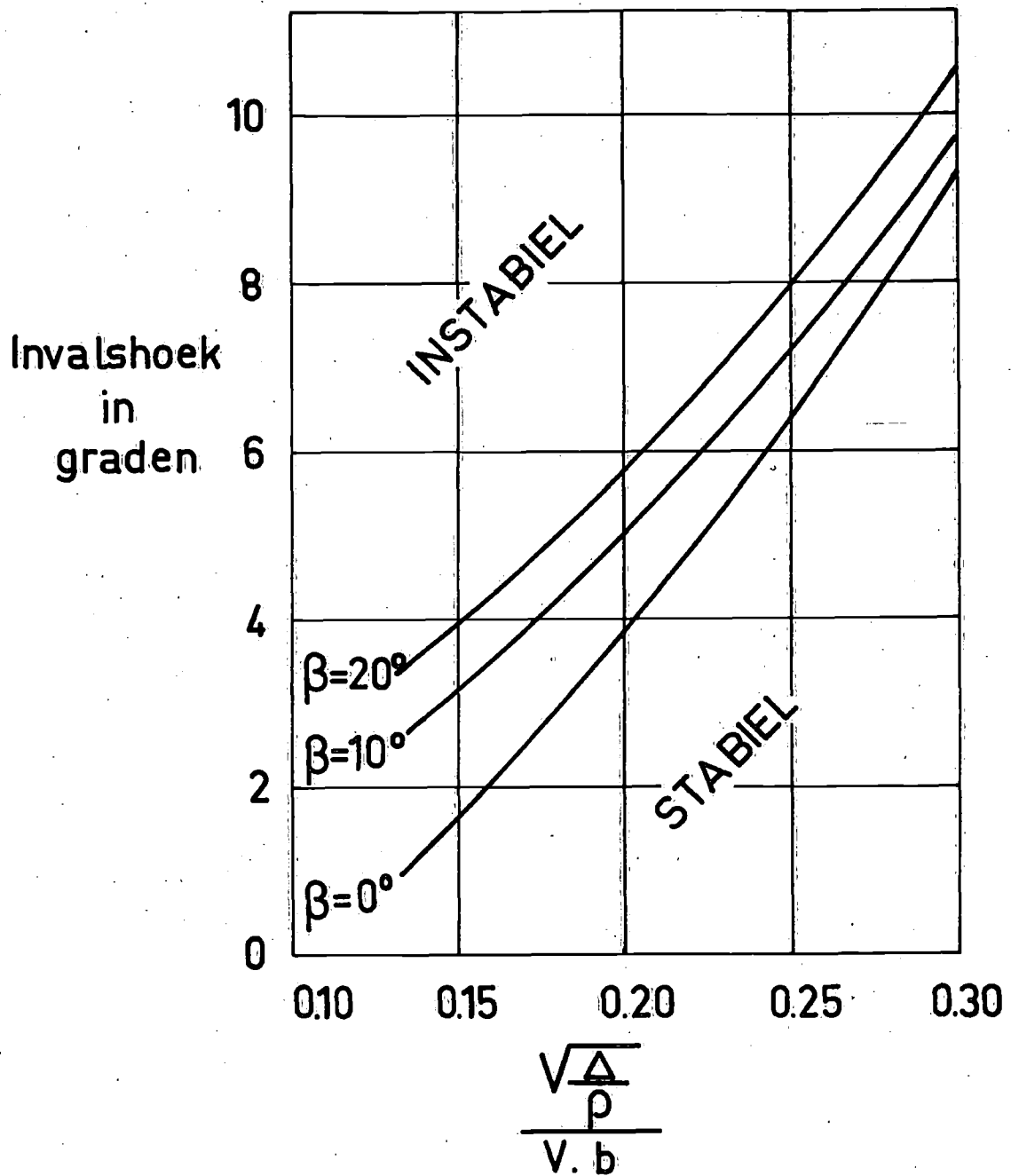


Fig.13 Stabiltiteitsgrenzen voor prismatische planerende rompen.

[5]

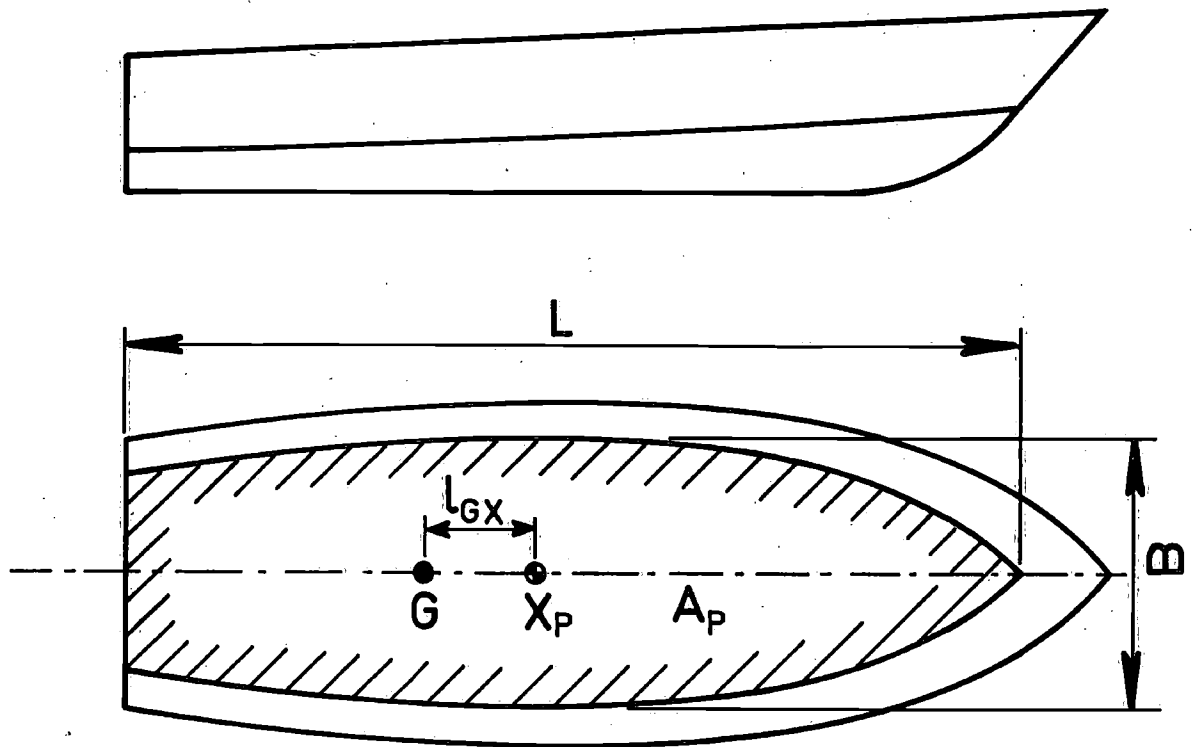


Fig.14

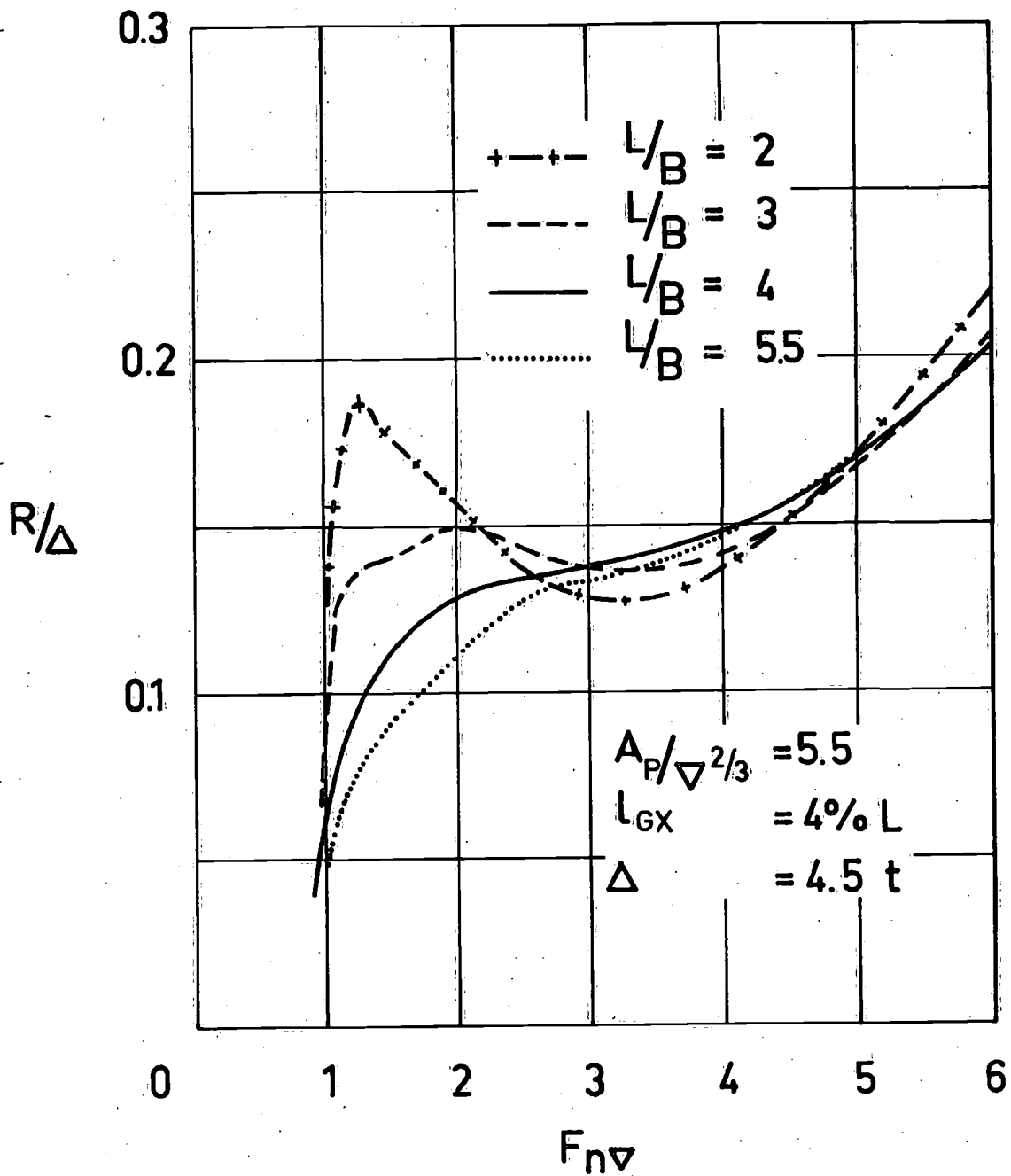


Fig.15 De invloed van de  $L/B$  verhouding op de weerstand.  
 Series 62 [7]

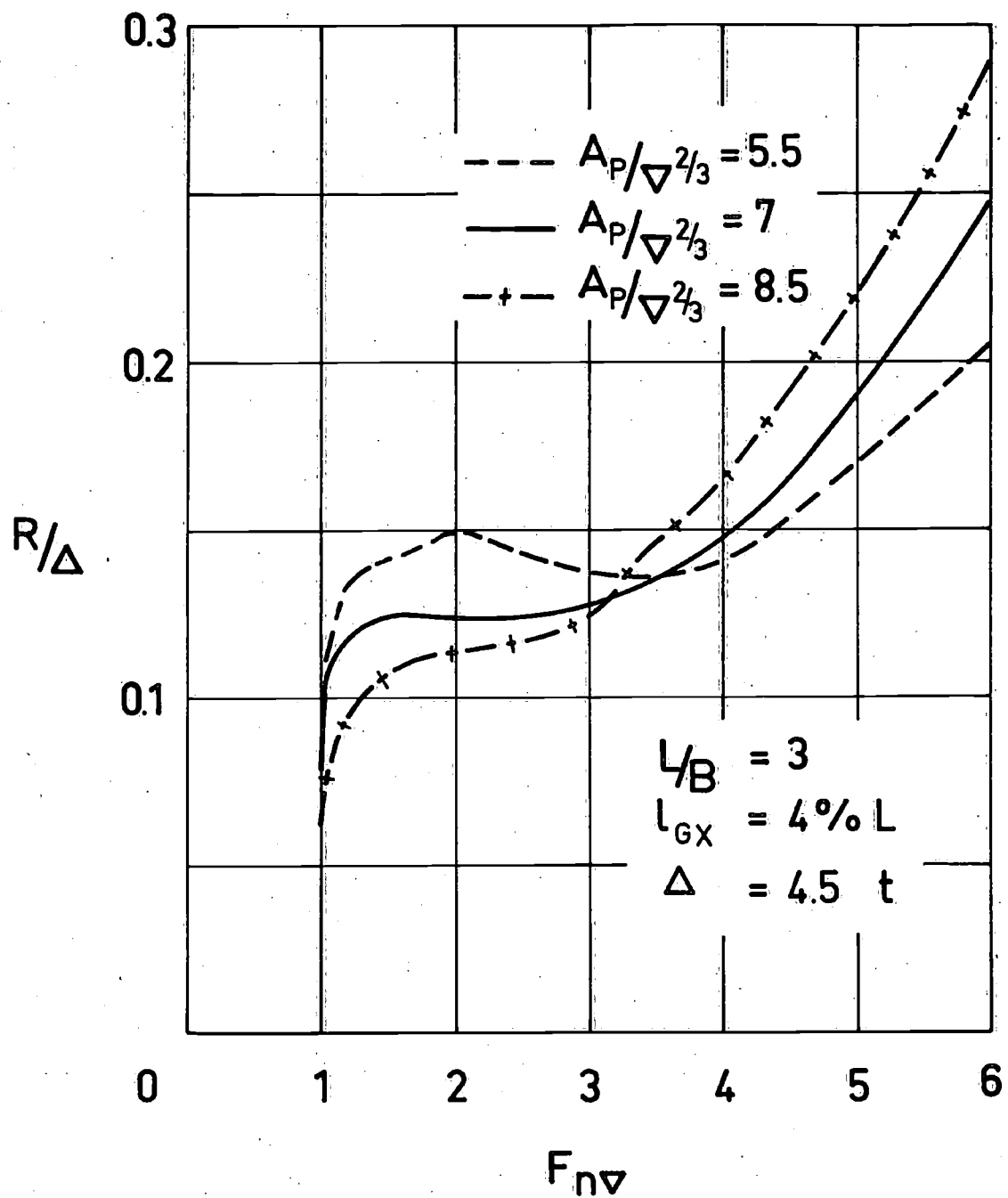


Fig.16 De invloed van de grootte van  $A_P$   
 op de weerstand.  
 Series 62 [7]

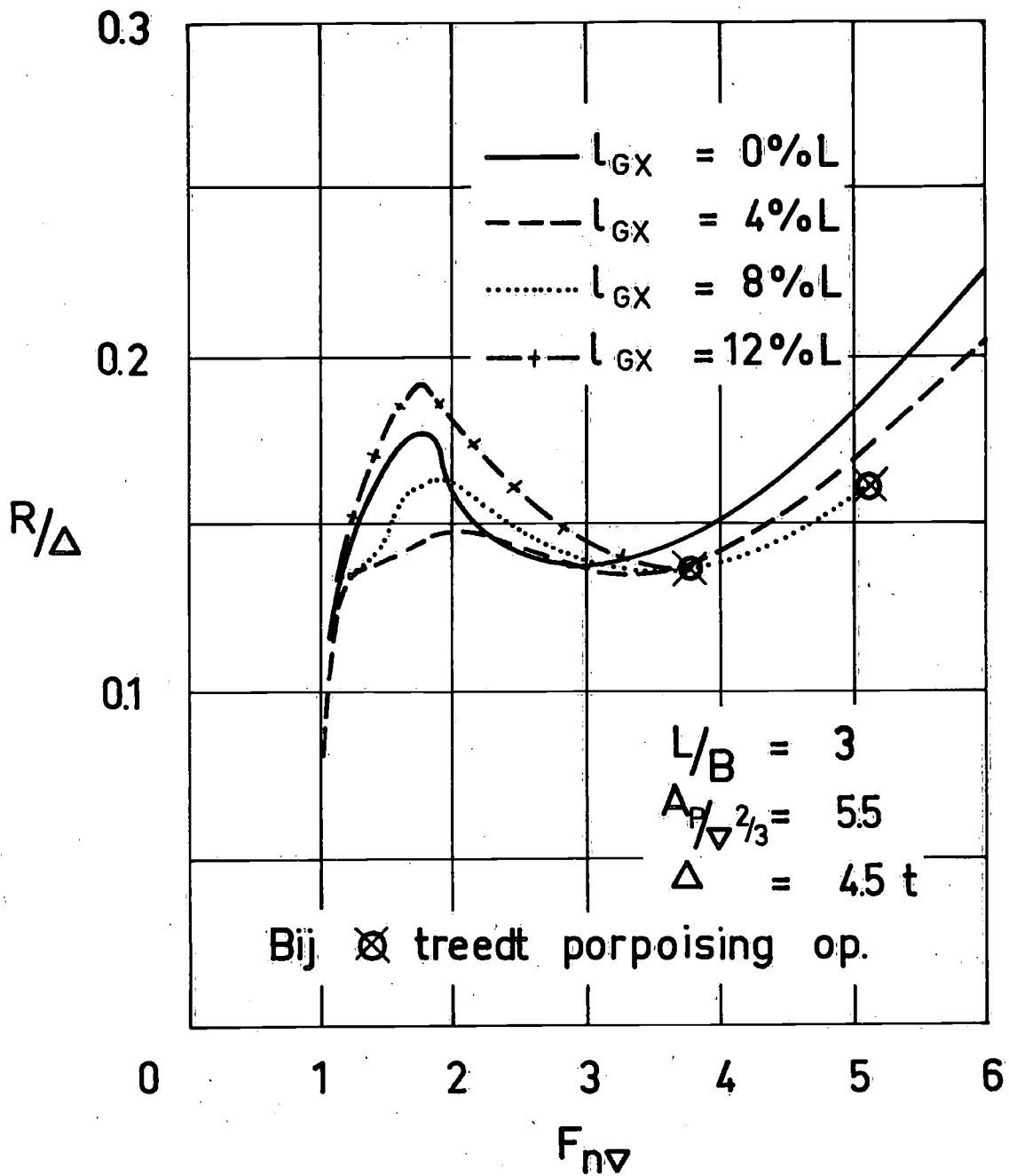


Fig.17 De invloed van de ligging van het zwaartepunt op de weerstand. Series 62 [7]