

# LABORATORIUM VOOR SCHEEPSBOUWKUNDE

TECHNISCHE HOGESCHOOL DELFT

LIFT EN WEERSTAND VAN DRAAGVLAKKEN MET  
KLEINE SLANKHEID

door

Prof.Ir.J.Gerritsma

januari 1970

Lift en weerstand van draagvlakken met kleine slankheid.

Prof.Ir. J. Gerritsma.

Vinkielen en vrij opgehangen roeren van zeiljachten hebben een betrekkelijk kleine slankheid, bijv.:  $a = 1/4$  tot 3.

De omstroming van de tip heeft daarom een relatief grote invloed op het stromingsbeeld en de lift-weerstand karakteristieken. Dit heeft tot gevolg dat een berekening van de lift-weerstand, uitgaande van 2-dimensionale profielmetingen niet altijd betrouwbaar wordt geacht.

Het "Naval Research and Development Centre" te Washington heeft daarom een vrij uitvoerige serie draagvlakken met kleine slankheid (ook wel aspectverhouding genoemd) beproefd. De effectieve aspectverhouding varieerde daarbij van 1 tot 3, de pijlstelling varieerde van  $-8^{\circ}$  tot  $+22,5^{\circ}$ . De tapsheid was 0,45.

Aanvullende proeven zijn o.a. uitgevoerd door de University of Maryland (Tapsheid 0,20 - 0,80).

De resultaten van deze proeven zijn met voldoende nauwkeurigheid samen te vatten in een benaderingsformule die hieronder besproken zal worden.

De gebruikte definities zijn gedeeltelijk samengevat in Figuur 1.

De liftkracht en weerstandscoefficienten zijn als volgt gedefinieerd:

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

$$\text{Weerstandscoefficient} \quad C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A_T}$$

De resultante van de krachten op het draagvlak grijpt aan op een afstand  $CP_c$  van de voorkant van de gemiddelde koorde

Voor zoet water is  $\frac{1}{2}\rho = 51 \text{ kgsec}^2 \text{ m}^{-1}$

Voor zout water is  $\frac{1}{2}\rho = 52 \text{ kgsec}^2 \text{ m}^{-1}$

$$\text{Er volgt: } L = 51 C_L V^2 A_T$$

$$D = 51 C_D V^2 A_T$$

(V in m/s,  $A_T$  in  $\text{m}^2$ , zoet water)

Een voorbeeld van meetresultaten is gegeven in Figuur 2.

Het draagvlak is daarbij aan één zijde door een vlakke plaat begrensd.

In het algemeen neemt daardoor de effectieve slankheid of aspectverhouding toe en wel met 70% à 100%.

Vergroting van de effectieve slankheid heeft grote invloed op de liftkracht en weerstand.

In Figuur 3 is die invloed kwalitatief aangegeven (berekenningsresultaat).

Voor hoeken tot ongeveer  $10^{\circ}$  kan op grond van de bovengenoemde proeven gesteld worden:

$$C_L = P \cdot \beta$$

waarin:

$\beta$  - de invalshoek in graden

P - een factor afhankelijk van de effectieve slankheid en de pijlstelling

P is de liftcoëfficiënt per graad invalshoek

Tot de genoemde  $10^{\circ}$  is de liftcoëfficiënt rechtevenredig met de invalshoek  $\beta$ .

Er geldt:

$$P = \frac{0.1 a}{1,8 + \cos \Lambda \sqrt{\frac{a^2}{\cos^4 \Lambda} + 4}}$$

waarin:

a - de effectieve slankheid

$\Lambda$  - de pijlstelling in graden

P is gegeven in Figuur 4 als functie van a en  $\Lambda$ .

We vinden nu gemakkelijk de lift op een draagvlak:

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

Voorbeeld: Kiel 3 van "Stormy"

$$A_T = 2,81 \text{ m}^2$$

geometrische aspectverhouding  $a_G = 1,08$

effectieve aspectverhouding  $a = 2,16$

$P = 0.045$  (zie Figuur 4)

Bij deze aspectverhouding is de pijlstelling van weinig belang (althans tot de onderzochte waarde  $\Lambda = 22,5^{\circ}$ ).

Bij  $V = 4$  m/s (ongeveer 8 knopen) in zout water en  $\beta = 6^\circ$  is nu:

$$L = 52 \times 4^2 \times 2,81 \times 0,045 \times 6 = 630 \text{ kg.}$$

Iets genuanceerder en geldend tot grotere hoeken is de formule voor  $C_L$  waarbij rekening wordt gehouden met de tapsheid en de afwerking van de tip.

$$C_L = P\beta + Q\beta^2$$

waarin:

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

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

In de meeste gevallen is deze verfijning voor het analyseren van kielen en roeren in het ontwerpstadium onnodig gecompliceerd.

Het aangrijpingspunt van de resultante op het draagvlak wordt gegeven door de formule:

$$CP_c = \left(0,25 - \frac{R}{\beta} + \frac{Q}{2P}\beta\right)$$

waarin:

$$R = -0,25 + \frac{1,11(a^2 + 4)^{\frac{1}{2}} + 2}{4(a+2)}$$

Voorbeeld:

voor  $\Lambda = 0$ ,  $\lambda = 0$  vinden we:

Tabel 1.

	$(CP)_c$						
a	1	2	3	4	5	6	$\infty$
$\beta = 5^\circ$	0,28	0,26	0,26	0,25	0,25	0,25	0,25
$\beta = 10^\circ$	0,34	0,27	0,26	0,26	0,25	0,25	0,25

In hoogte ligt het aangrijpingspunt ongeveer 40% onder de romp van het jacht, dus  $(CP)_s = 0,4$ .

Weerstand van kielen en roeren.

Naast de wrijvingsweerstand, die evenredig is met het natte oppervlak, en de vormweerstand, is van grote betekenis de z.g. geïnduceerde weerstand. Deze hangt samen met de aspectverhouding en vindt zijn oorsprong in de omstroming van de tip.

Er geldt:

$$D = D_o + D_i$$

of

$$C_D = C_{D_o} + C_{D_i}$$

waarin:

$D_o$  de profielweerstand (in hoofdzaak wrijving)

$D_i$  de geïnduceerde weerstand

$C_D$  wordt geschat uit het wrijvingsaandeel.

Voor de kiel III van Stormy is bij  $V = 4$  m/s  $C_{D_o} \approx 0,0035$  ( $Re \approx 6 \times 10^6$ )

De theoretische geïnduceerde weerstandscoefficient volgt uit:

$$C_{D_i} = \frac{C_L^2}{\pi a}$$

In de praktijk blijkt de volgende waarde te voldoen:

$$C_{D_i} = \frac{C_L^2}{0,9\pi a} = \frac{C_L^2}{2,8a}$$

of

$$C_{D_i} = \frac{P^2 \beta^2}{2,8a}$$

De geïnduceerde weerstand volgt uit:

$$D_i = \frac{1}{2} \rho V^2 A_T C_{D_i} = 51 V^2 A_T P^2 \beta^2 / 2,8a$$

of

$$D_i = 18,2 \frac{V^2 A_T P^2}{a} \cdot \beta^2 \quad (\text{zout water } 18,5)$$

Uit de volgende berekening blijkt het belang van de geïnduceerde weerstand voor kiel III van Stormy bij  $\beta = 6^\circ$  en  $V = 4$  m/s.

$$D_o \approx 2 \times \frac{1}{2} \rho V^2 A_T C_{D_o} = 52 \times 16 \times 2,81 \times 0,0035 \times 2 = 16 \text{ kg}$$

N.B. voor de berekening van de wrijvingsweerstand moet  $2A_T$  als oppervlak genomen worden

$$D_i \approx 18,5 \cdot \frac{V^2 A_T P^2}{a} \beta^2 = \frac{18,2 \times 16 \times 2,81 \times 0,045^2 \times 36}{2,16} = 28 \text{ kg}$$

De invloed van de aspectverhouding op de weerstand kan op de volgende manier verduidelijkt worden.

Stel dat de kiel dezelfde lift  $L = 630$  kg bij  $\beta = 6^\circ$  blijft ontwikkelen, maar dat de aspectverhouding gewijzigd wordt en het oppervlak daarbij aangepast wordt.

In de volgende tabel is het dan benodigde oppervlak, de wrijvingsweerstand en de geïnduceerde weerstand gegeven, afhankelijk van de aspectverhouding.

Tabel 2.

Kiel voor  $L = 630$  kg bij  $\beta = 6^\circ$  en  $V = 4$  m/s.

a	P	$A_T$ (m <sup>2</sup> )	$D_o$ (kg)	$D_i$ (kg)	D (kg)
1	0,0250	5,04	30	33	63
2	0,0425	2,97	18	28	46
3	0,0550	2,29	14	24	38
4	0,0630	2,00	12	21	33
5	0,0690	1,83	10	18	28
6	0,0730	1,73	10	16	26

De berekening is als volgt uitgevoerd:

$$L = 52V^2 A_T P \cdot \beta$$

waaruit:

$$630 = 52 \times 16 \times 6 \times A_T P$$

en

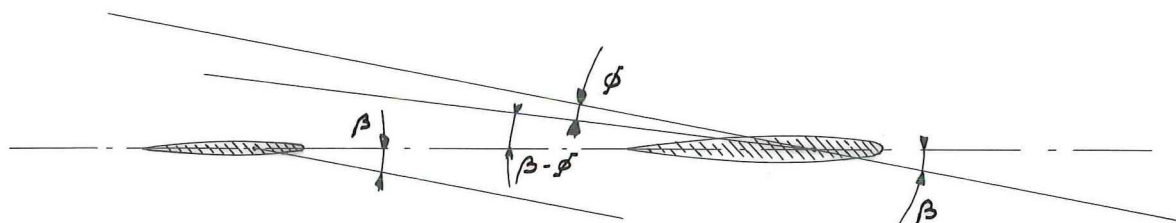
$$A_T P = 0,126 \text{ m}^2/\text{graad}$$



Met Figuur 4 zijn bij een aantal waarden van  $a$  de bijbehorende  $P$  waarden bepaald waaruit met  $A_{TP} = 0,126$  de waarde van  $A_T$  volgde.

Met de formules voor  $D_i$  en  $D_o$  is daarna de weerstand berekend.

De afbuiging van de stroming door de kiel.



Bij een invalshoek  $\beta$  op de kiel treedt een afbuiging  $\phi$  (side wash) op. Daardoor is de invalshoek van roer, als dat in de middenstand staat kleiner en wel  $\beta - \phi$ .

De hoek  $\phi$  is op voldoende afstand van de kiel:

$$\phi \approx 1,6 C_L / \pi a \quad (\text{rad})$$

of

$$\phi = 29P\beta/a \quad (\text{graden})$$

Voor kiel III van Stormy is bij  $\beta = 6^\circ$ :

$$\phi = 29 \times 0,045 \times 6 / 2,16 = 3,6^\circ$$

d.w.z. het roer moet  $3,6^\circ$  verdraaid worden om dezelfde invalshoek als de kiel te ondervinden.

Naar de kiel toe vermindert de hoek  $\phi$ .

Kwaliteitscijfer voor kiel en roer.

Voor één ontwerp kan men verschillende roerkiel configuraties vergelijken door de dwarskracht bij een drifthoek van één graad en een snelheid van 1 m/s te berekenen.

Voorbeeld.

Drie kielen voor Stormy.

Voor elk van de kielen was het totale natte oppervlak vrijwel gelijk.

Het effectieve oppervlak is voor de kielen met bulb kleiner.

Tabel 3.

	kiel 1	kiel 2	kiel 3	roer
effectief oppervlak $A_T$	1,90 m <sup>2</sup>	1,81 m <sup>2</sup>	2,80 m <sup>2</sup>	1,62 m <sup>2</sup>
effectieve aspectverh. a	2,36	2,60	2,16	2,72
P	0,0475	0,0510	0,0450	0,0525

De dwarskracht bij  $\beta = 1^\circ$  en  $V = 1\text{m/s}$  is:

$$52(P_K A_{TK} + P_R A_{TR})$$

We vinden:

Tabel 4.

	$52(P_K A_{TK} + P_R A_{TR})$
kiel 1 + roer	4,7 + 4,4 = 9,1 kg
kiel 2 + roer	4,8 + 4,4 = 9,2 kg
kiel 3 + roer	6,6 + 4,4 = 11,0 kg

Hierbij is aangenomen dat de aanstroomsnelheid voor kiel en roer gelijk is aan de scheepssnelheid. Uit de proeven met het halfton jacht bleek dat de snelheid t.p.v. de kiel 5% hoger en t.p.v. het roer ongeveer 10% lager is. Dit scheelt resp. 10% en + 20% in de dwarskracht.

#### Vorm van kiel en roer.

Uit theoretische overwegingen zou een ellipsvormig draagvlak een optimale lift verdeling over de spanwijdte bezitten. Uit metingen achter draagvlakken is gebleken dat bij een dergelijke vorm de afgaande stroming insnoert waardoor een minder gunstige lift verdeling wordt geïnduceerd.

Een zo lang mogelijke achterrand blijkt voordelig te zijn.

De voorrand kan enigszins afgerond zijn. Voor grote aspectverhoudingen moet de pijlstelling zo klein mogelijk zijn.



Profielen.

Voor de invloed van het profiel wordt verwezen naar Figuur 5.

Bij relatief dunne profielen verloopt het drukpunt bij kleine invalshoeken sterk met de invalshoek. Ook is de maximale lift geringer dan bij dikkere profielen.

Voor roeren wordt een dikte van 15% - 20% aanbevolen met een NACA 00 profiel, zie Tabel 5, en de profielen volgens Thieme (Tabel 6).

De NACA 63 profielen hebben bij kleine invalshoeken een steiler verloop van de liftkracht - invalshoek kromme.

Deze profielen, waarvan de maximale dikte ongeveer op 40% ligt worden voor vinkielen aanbevolen.

Literatuur.

1. Abbot and Doenhof  
Theory of Wing Sections, Dover publications
2. Hoerner  
Fluid Dynamic Drag
3. Society of Naval Architects  
Principles of Naval Architecture

COÖRDINATEN VOOR SYMMETRISCHE NACA PROFIELEN

Profiel		100 x/c										neus- straal
		0	1,25	2,5	5,0	7,5	10	15	20	25	30	
NACA												
0006	100 y/c	0	0,947	1,307	1,777	2,100	2,341	2,613	2,869	2,971	3,001	0,40
0009		0	1,420	1,961	2,666	3,150	3,512	4,009	4,303	4,456	4,501	0,89
0012		0	1,894	2,615	3,555	4,200	4,683	5,345	5,738	5,941	6,002	1,59
0015		0	2,367	3,268	4,443	5,250	5,853	6,681	7,172	7,421	7,502	2,48
0018		0	2,841	3,922	5,332	6,300	7,024	8,018	8,606	8,912	9,003	3,56

Profiel		100 x/c									neus- straal
		40	50	60	70	80	90	95	100	100	
NACA											
0006	100 y/c	2,902	2,641	2,282	1,832	1,312	0,724	0,403	(0,063)	0	0,40
0009		4,352	3,971	3,423	2,748	1,967	1,086	0,605	(0,095)	0	0,89
0012		5,803	5,294	4,563	3,664	2,623	1,448	0,807	(0,126)	0	1,59
0015		7,254	6,618	5,704	4,580	3,279	1,810	1,008	(0,158)	0	2,48
0018		8,705	7,941	6,845	5,496	3,935	2,172	1,210	(0,189)	0	3,56

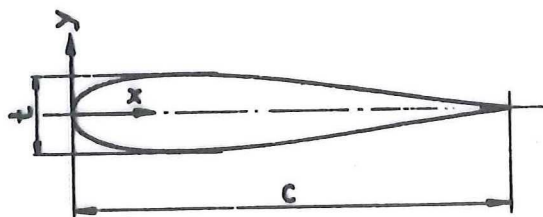
(W&S 5169/2)

TABEL. 5

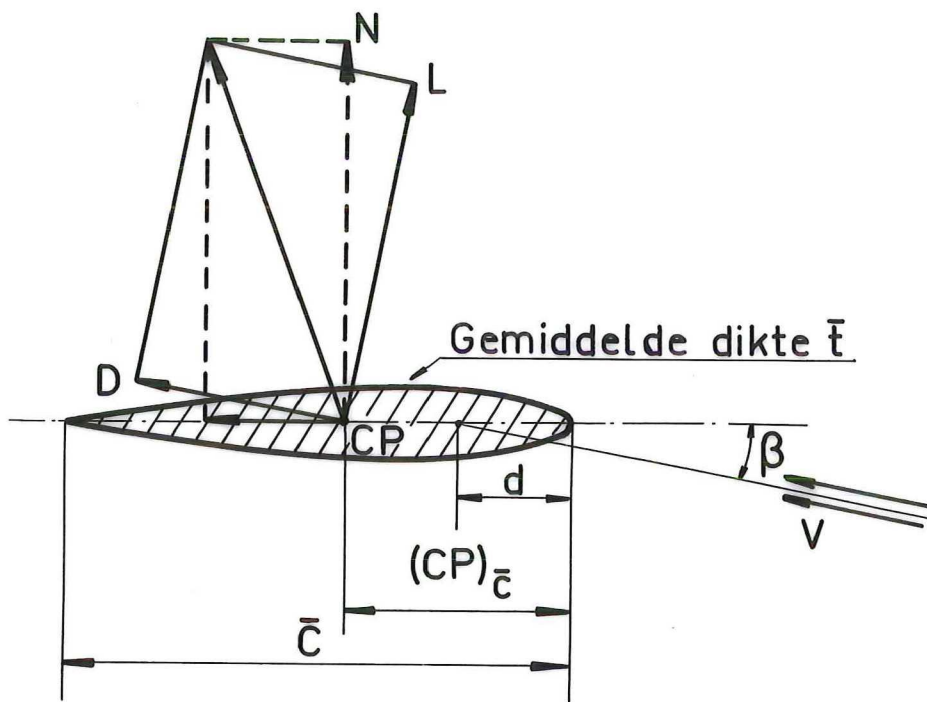
ROERPROFIELEN

PROFIEL COÖRDINATEN VOOR NORMALE BALANSROEREN VOLGENS THIEME

x/c	y/c		
	t/c = 0,12	t/c = 0,15	t/c = 0,18
0,005	0,0163	0,0203	0,0244
0,0125	0,0245	0,0306	0,0368
0,025	0,0327	0,0409	0,0490
0,05	0,0424	0,0530	0,0636
0,10	0,0524	0,0655	0,0786
0,15	0,0572	0,0715	0,0858
0,20	0,0593	0,0742	0,0891
0,25	0,0600	0,0750	0,0900
0,325	0,0589	0,0736	0,0883
0,40	0,0508	0,0696	0,0834
0,475	0,0512	0,0636	0,0760
0,55	0,0454	0,0510	0,0666
0,625	0,0387	0,0509	0,0556
0,70	0,0315	0,0376	0,0438
0,775	0,0238	0,0277	0,0316
0,85	0,0160	0,0179	0,0199
0,925	0,0080	0,0085	0,0091
1,000	0,0000	0,0000	0,0000



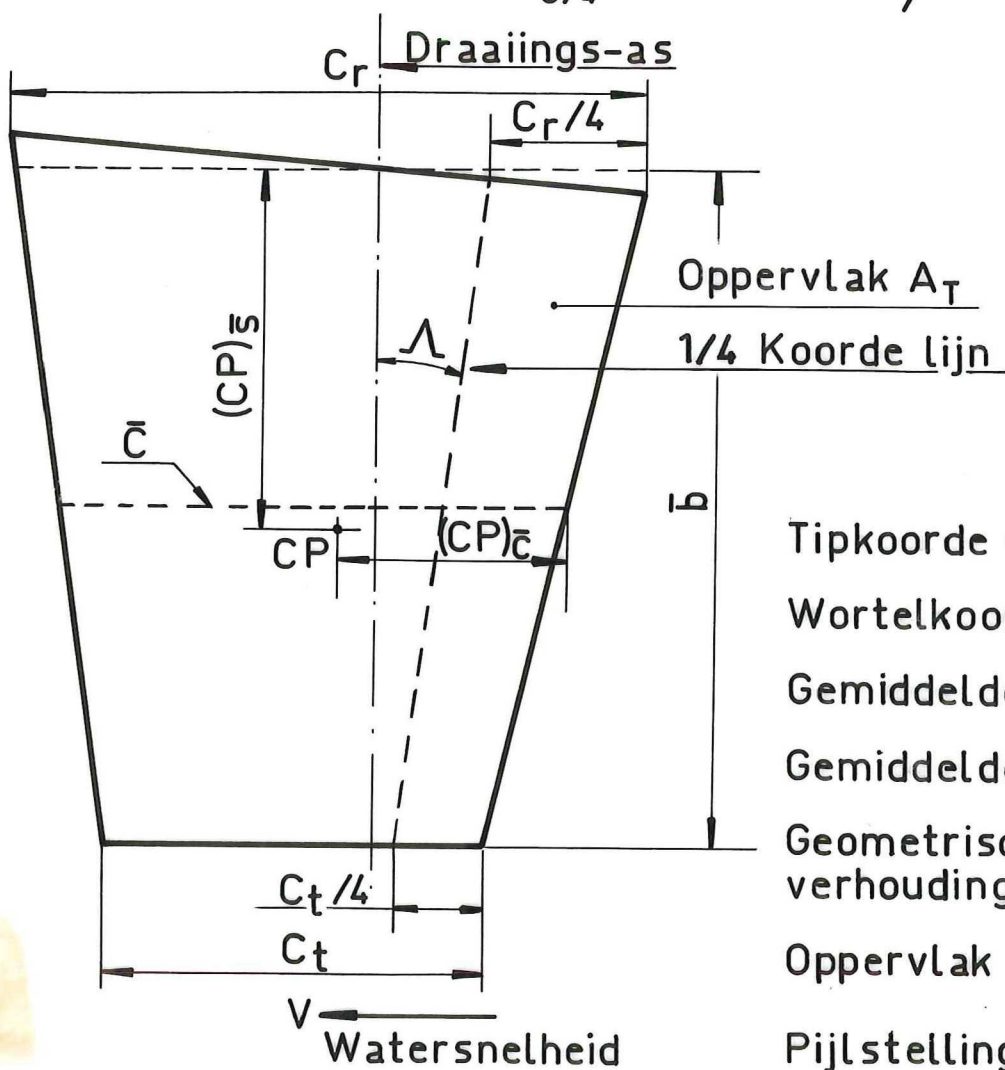
TABEL. 6



$$C_L = L / \frac{1}{2} \rho V^2 A_T \quad C_D = D / \frac{1}{2} \rho V^2 A_T$$

$$C_N = N / \frac{1}{2} \rho V^2 A_T = C_L \cos \beta + C_D \sin \beta$$

$$\text{Moment Coefficient: } C_{M_{\bar{c}/4}} = N(0.25 \bar{c} - CP_{\bar{c}}) / \frac{1}{2} \rho V^2 A_T \bar{c}$$



Tipkoorde  $C_t$

Wortelkoorde  $C_r$

Gemiddelde koorde  $\bar{c} = \frac{C_t + C_r}{2}$

Gemiddelde spanwijdte  $\bar{b}$

Geometrische Aspect -  
verhouding  $a_g = \bar{b} / \bar{c} = \bar{b}^2 / A_T$

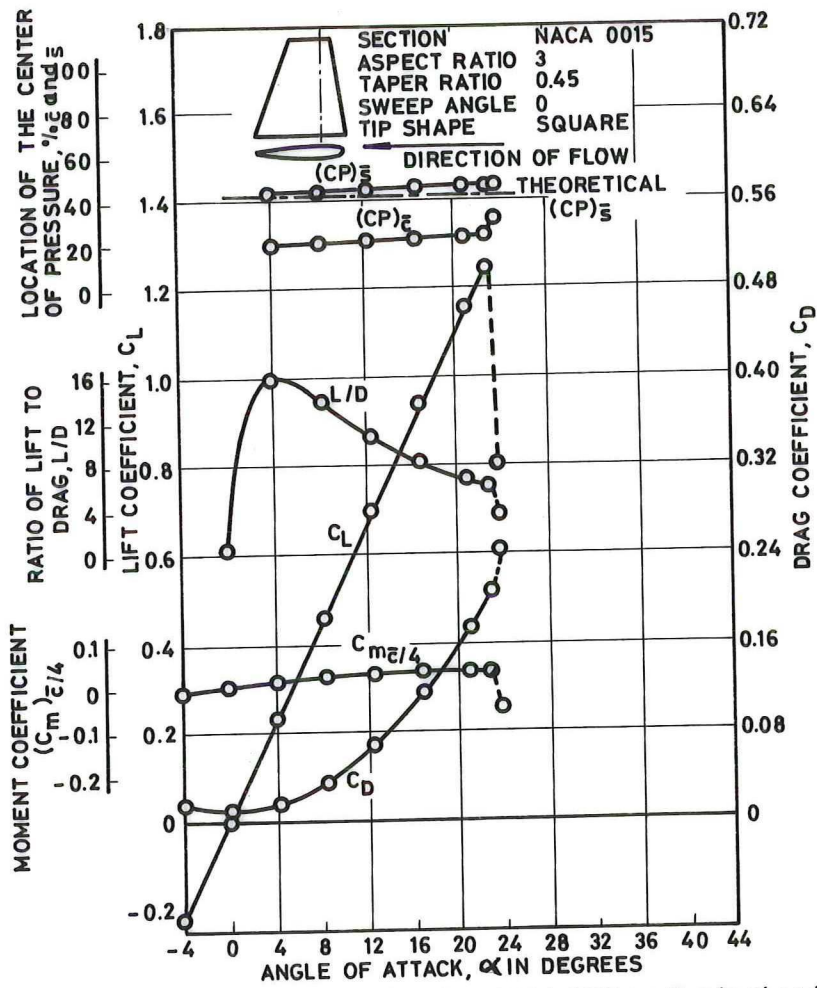
Oppervlak  $A_T = \bar{b} \times \bar{c}$

Pijlstelling  $\Lambda$

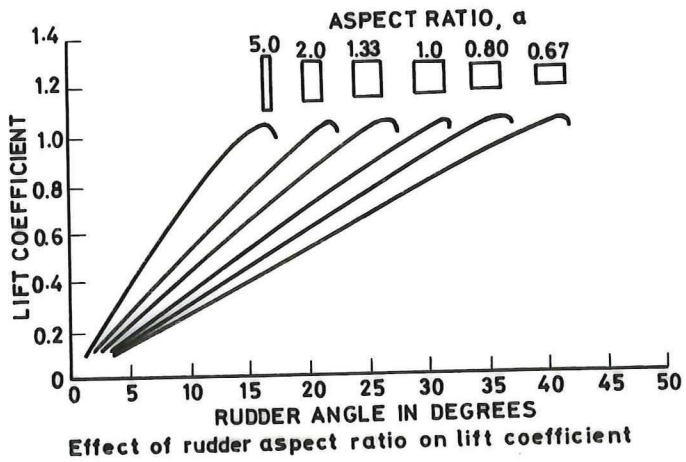
Tapsheid  $\lambda = C_t / C_r$

Figuur. 1

# SHIP MANEUVERING AND CONTROL

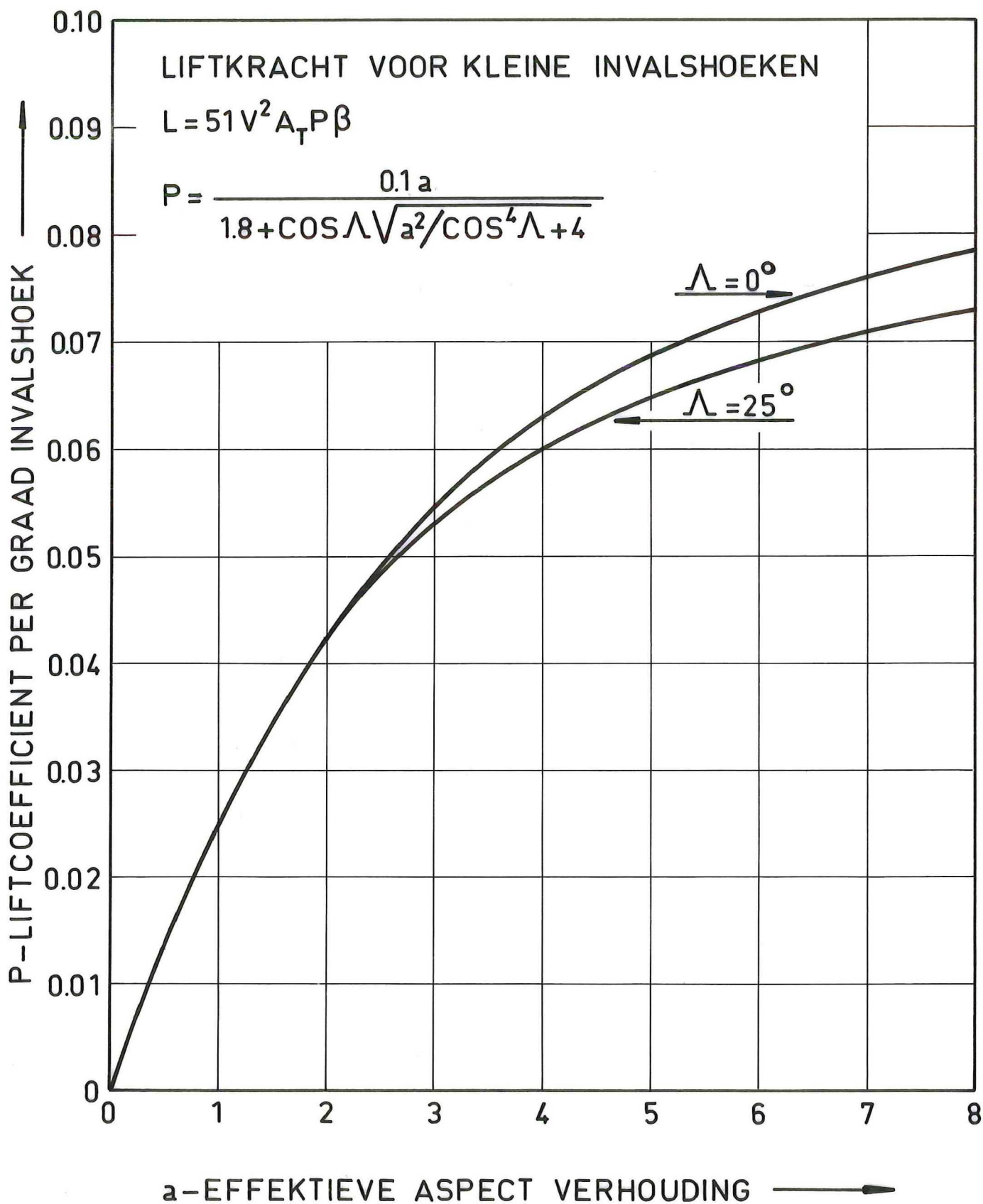


Figuur. 2



Figuur. 3





Figuur. 4



Nr	$d/b$
1	0.05
2	0.10
3	0.15
4	0.20
5	0.25

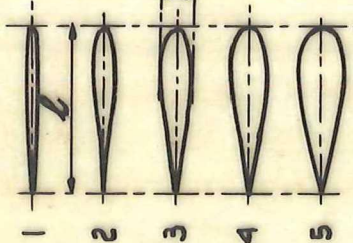


FIG: a

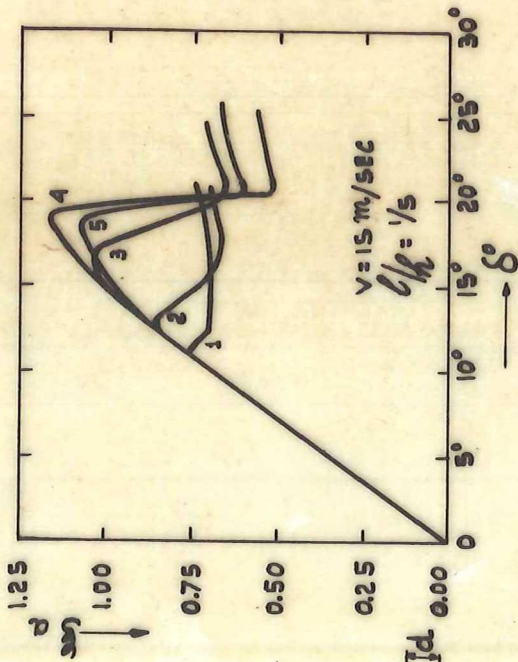


FIG: b

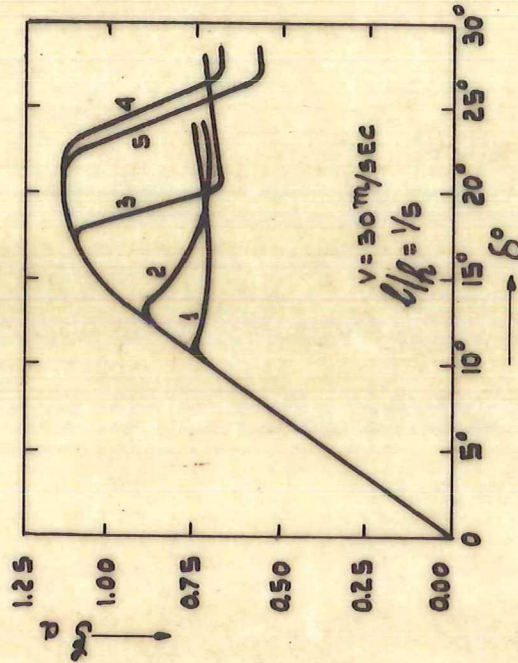


FIG: c

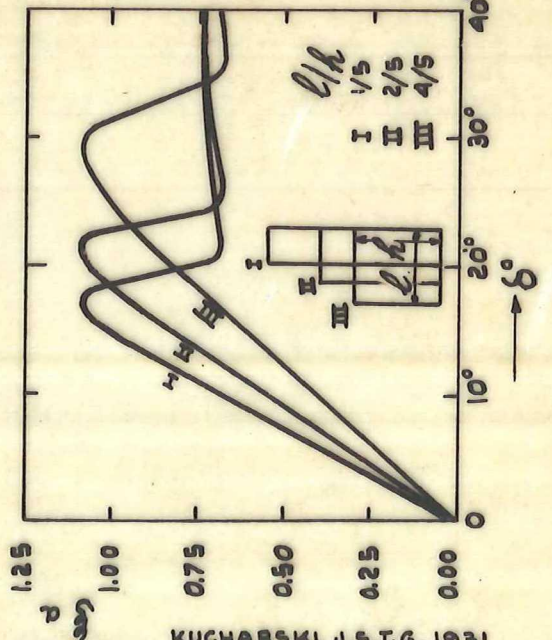


FIG: d

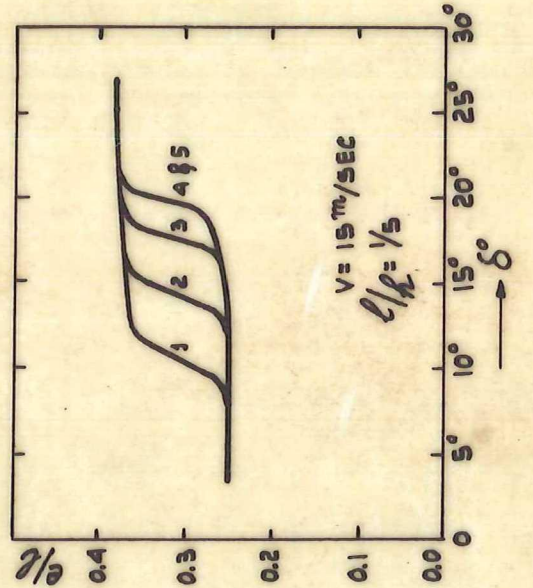


FIG: e

