

# STABILITEIT, LEKBEREKENING EN SCHOTTENKROMME

WITDRUKKEN BEHOREND BIJ K1-COLLEGE

PROF. IR. J. GERRITSMa

Stabiliteit, lekberekening en schottenkromme.

Indeling van het college.

1. Inleiding.
  - 1.1. Algemene beschouwingen.
  - 1.2. Geschiedenis.
2. De evenwichtstoestand van een drijvend schip.
  - 2.1. De metacentrische straal.
  - 2.2. De aard van het evenwicht.
  - 2.3. Het dwarsscheepse evenwicht.
3. Aanvangsstabiliteit.
  - 3.1. De dwarsscheepse aanvangsstabiliteit.
  - 3.2. De invloed van vrije vloeistofoppervlakken op de aanvangsstabiliteit.
4. Stabiliteit bij eindige hoekverdraaiing t.o.v. het evenwicht.
  - 4.1. Dwarsscheepse stabiliteit bij eindige slagzij.
  - 4.2. De kromme van drukingspunten  $B_{\phi}(\phi)$ .
  - 4.3. Het kernvlak van de lastlijnen en de metacentrische kromme.
  - 4.4. De kromme van armen van statische stabiliteit.
  - 4.5. De dynamische stabiliteit.
  - 4.6. De dynamische stabiliteit rechtstreeks berekend.
5. De aard van het evenwicht bij uitwendige belasting.
6. De berekening van de kromme van armen van statische stabiliteit.
  - 6.1. De formules van Scribanti. (witdrukken 6.1 t/m 6.1i).
  - 6.2. Willekeurige scheepsvormen.
    - 6.2.1. De formules van Atwood en Moseley.
    - 6.2.2. De methode van Barnes.
    - 6.2.3. De methode van Kriloff.
    - 6.2.4. De integratormethode van Fellow.
    - 6.2.5. De planimetermethode van Doyère, Middendorf en Liddel.
  - 6.3. Benaderingsmethoden voor het berekenen van de kromme van armen.
    - 6.3.1. De 1e methode van Prohaska.
    - 6.3.2. De 2e methode van Prohaska.
    - 6.3.3. Japanse benaderingsmethode.
  - 6.4. Benaderingsmethode voor het bepalen van  $\overline{KB}$  en  $\overline{BM}$ .

- 6.5. Het uitzetten van de kromme van armen van statische stabiliteit.
- 6.6. De experimentele bepaling van de kromme van armen.
- 6.7. De hellingproef.
7. Het slingeren van een schip.
  - 7.1. De slingerperiode bij grote slingerhoeken.
  - 7.2. Versnellingen als gevolg van de slingerbeweging.
8. Toepassingen. (witdrukken 8.1 t/m 8.4).
  - 8.1. Het berekenen van de metacentrumhoogte bij gegeven slagzij.
  - 8.2. Het berekenen van slagzij door asymmetrische lading.
  - 8.3. De invloed van vloeibare lading bij grote slagzij.
  - 8.4. De invloed van winddruk.
  - 8.5. Hangende lading.
  - 8.6. Aan de grond gelopen schepen; het dokken.
  - 8.7. Superpositie van kenterende momenten.
  - 8.8. De invloed van vrijboord en bovenbouwen.
  - 8.9. Het verschuiven van lading.
9. Beoordeling van de dwarsscheepse stabiliteit. (witdrukken 9.1 t/m 9.3; bijlagen 9A, 9B, 9C en 9D).
  - 9.1. Inleiding.
  - 9.2. Verantwoordelijkheid voor de stabiliteit.
  - 9.3. Stabiliteitscriteria.
10. Langsscheepse stabiliteit. (witdruk 10.1).
  - 10.1. Het verplaatsen van kleine gewichten aan boord.
  - 10.2. Het moment van 1 cm totale trimverandering.
  - 10.3. Het laden en lossen van kleine gewichten.
  - 10.4. De trimverandering bij het laden en lossen van grote gewichten.
  - 10.5. Een universeel trimdiagram.
  - 10.6. Trimdiagram volgens v, d. Ham.
11. Lekberekeningen. (Bijlage 11A).
  - 11.1. Inleiding.
  - 11.2. Eenvoudige benaderingen.
    - 11.2.1. Evenwijdig inzinken.
    - 11.2.2. Benadering van het algemene geval.
  - 11.3. De methode Kriloff.
  - 11.4. De methode Knüpfker.

12. Schottenkromme. (witdrukken 12.1 t/m 12.10).

12.1. Enkele begrippen.

12.2. Vulbare lengte.

12.3. De bepaling van de permeabiliteit.

12.4. De bepaling van de toelaatbare lengte.

12.5. Benaderingsmethode.

12.5.1. De methode van Webster.

12.5.2. De methode van de Board of Trade.

12.5.3. Skinner en Philips.

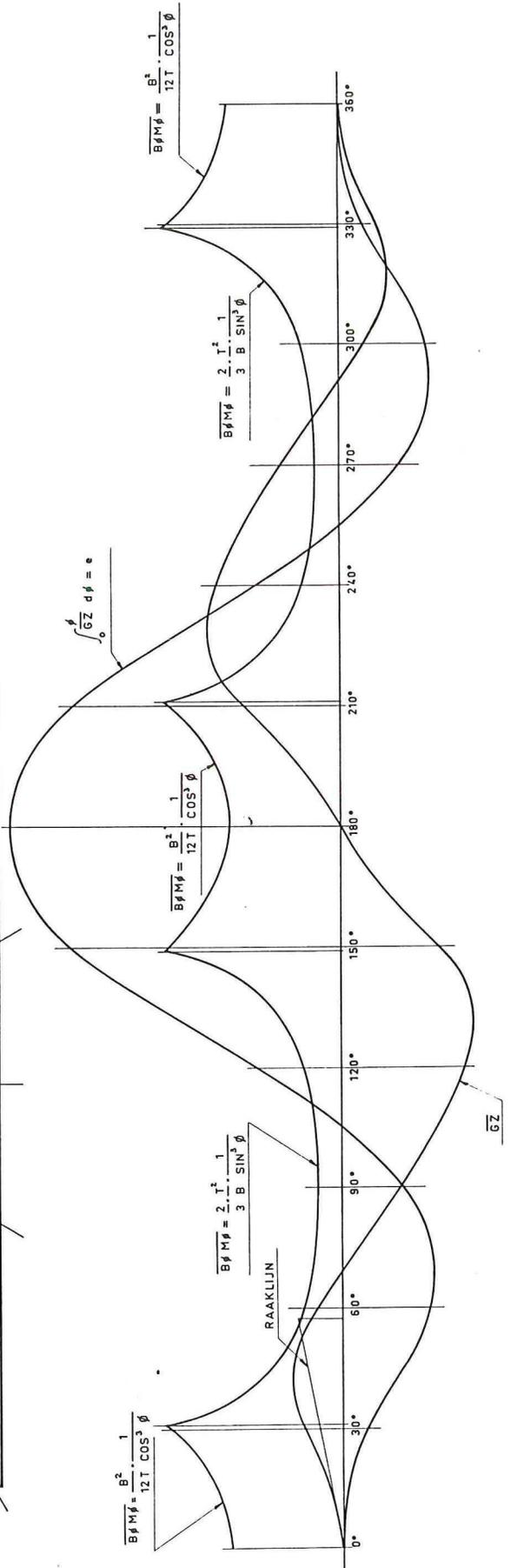
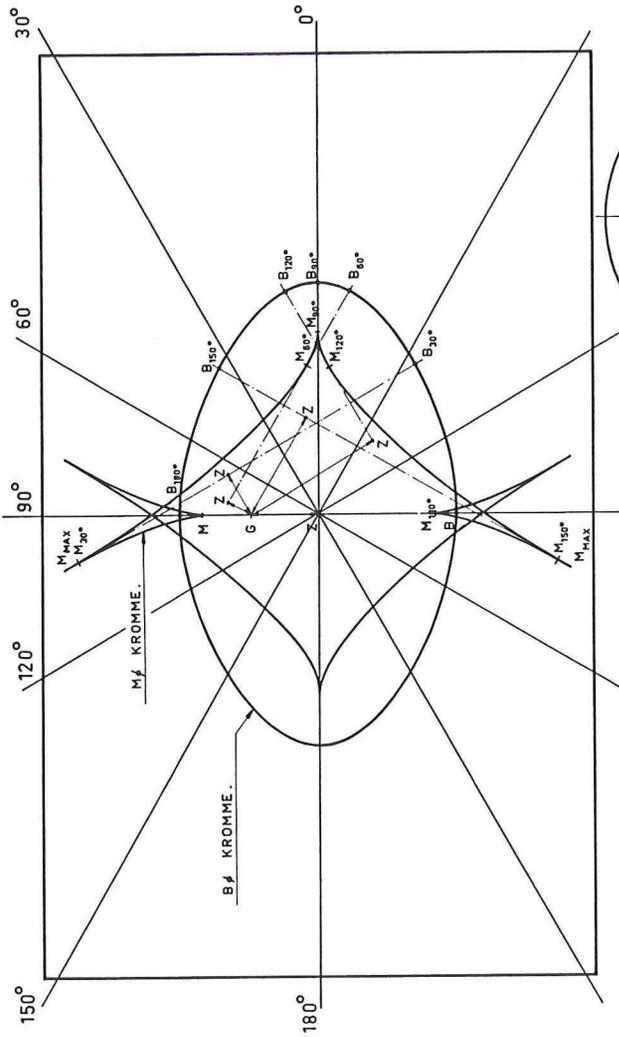
LIJST VAN SYMBOLEN.

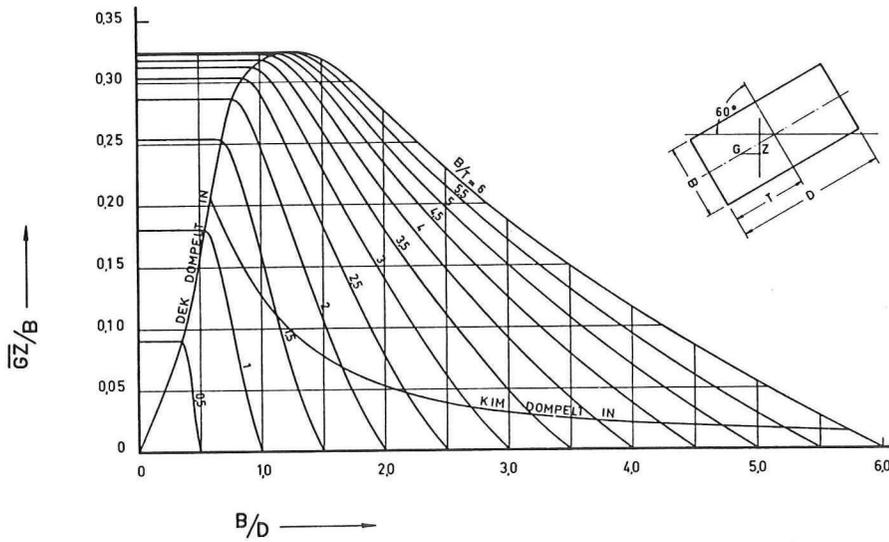
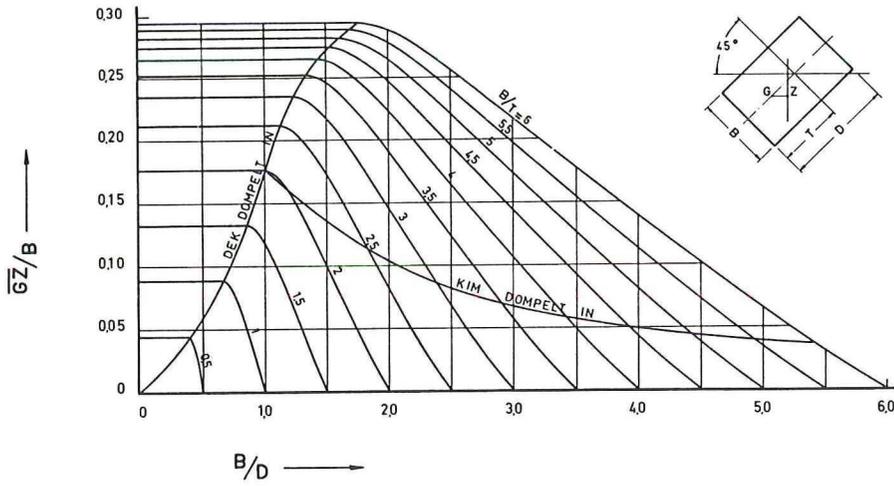
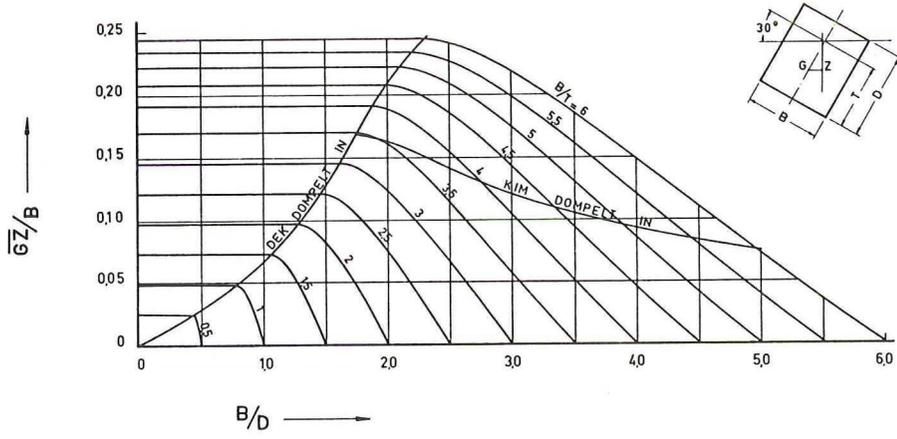
<u>Symbool</u>	<u>Betekenis.</u>
$A_m$	Grootspant oppervlak
$A_w$	Waterlijn oppervlak.
$A_x$	Ordinaat oppervlak ter plaatse x.
$\overline{AB}$	Afstand drukkingspunt uit a.l.l.
$\overline{AG}$	Afstand systeemzwaartepunt uit a.l.l.
B	Scheepsbreedte op de mal; drukkingspunt.
$\overline{BM}$	Metacentrische straal (afstand drukkingspunt B tot het dwarsmetacentrum M).
$\overline{BM}_1$	Afstand drukkingspunt B tot het langsmetacentrum $M_1$ .
$C_{b,\delta}$	Blokcoëfficiënt.
$C_{m,\beta}$	Grootspantcoëfficiënt.
$C_{p,\phi}$	Langsscheepse prismatische coëfficiënt.
$C_{wp,\alpha}$	Coëfficiënt van de ontwerplastlijn.
D	Holte uit de basis.
$D_{st}$	Dynamische stabiliteit.
e	Dynamische weg.
F	Vrijboord.
$F_n$	Getal van Froude.
$\overline{FB}$	Drukkingspunt in lengte uit v.l.l.
$\overline{FG}$	Systeemzwaartepunt uit v.l.l.
G	Gewichtszwaartepunt.
g	Versnelling van de zwaartekracht.
$\overline{GM}$	Metacentrumhoogte.
$\overline{GM}_1$	Langsmetacentrumhoogte.
$\overline{GZ}$	Arm van statische stabiliteit (h).
$I_1$	Langstraagheidsmoment van de waterlijn.
$I_t$	Dwarstraagheidsmoment van de waterlijn.
K	Kielpunt.
$k_\phi$	Dwarstraagheidsstraal.
$\overline{KB}$	Drukkingspunt boven basis.
$\overline{KG}$	Systeemzwaartepunt boven basis.
$\overline{KM}$	Metacentrum boven basis.
$\overline{KM}_1$	Langsmetacentrum boven basis.
$K_w$	Windkracht.
$L_{o.a}$	Lengte over alles.
$L_{pp}$	Scheepslengte tussen de loodlijnen.
$L_{cwl}$	Lengte van de waterlijn gemeten op de c.w.l.
$L_{wl}$	Lengte van de waterlijn in het algemeen.

M	Metacentrum.
$M_l$	Moment, nodig voor 1 cm totale trimverandering op de loodlijnen.
$M_k$	Kenterend moment.
$M_l$	Langsmetacentrum.
$M_{st}$	Moment van statische stabiliteit.
$M_w$	Windmoment.
N	Valse metacentrum.
$S_a$	Zeeg achter.
$S_f$	Zeeg voor.
T	Diepgang uit basis.
$T_a$	Diepgang achter.
$T_f$	Diepgang voor.
$T_\phi$	Slingerperiode.
$T_k$	Dimensieloze slingerperiode.
$T_m$	Maximale diepgang (tot onderkant kiel).
t	Totale trim.
$x_A$	Zwaartepunt waterlijn t.o.v. ord. 10.
$x_B$	Drukkingspunt in lengte t.o.v. ord. 10.
$\gamma$	Soortelijk gewicht vloeistof.
$\Delta$	Opdrijvende kracht (displacement).
$\Delta_1$	Displacement met huid en aanhangsels in zoet water.
$\Delta_2$	Displacement met huid en aanhangsels in zeewater.
$\Delta\Delta_2$	Gewicht, nodig voor 1 cm diepgangsverandering in zeewater.
$\nabla$	Volume; waterverplaatsing.
$\theta$	Trimhoek.
$\mu$	Permeabiliteit.
$\rho$	Soortelijke dichtheid.
$\phi$	Dwarsscheepse hellingshoek.
$\phi_d$	Dwarsscheepse hellingshoek waarbij dek te water; dynamische taludhoek.
$\phi_k$	Dwarsscheepse hellingshoek waarbij arm=0 (range).
$\phi_m$	Dwarsscheepse hellingshoek waarbij arm=maximaal.
$\phi_s$	Statische taludhoek.

METACENTRISCHE KROMME EN KROMME VAN DRUKKINGSPUNTEN  
VAN EEN BAK MET DE VOLGENDE AFMETINGEN:

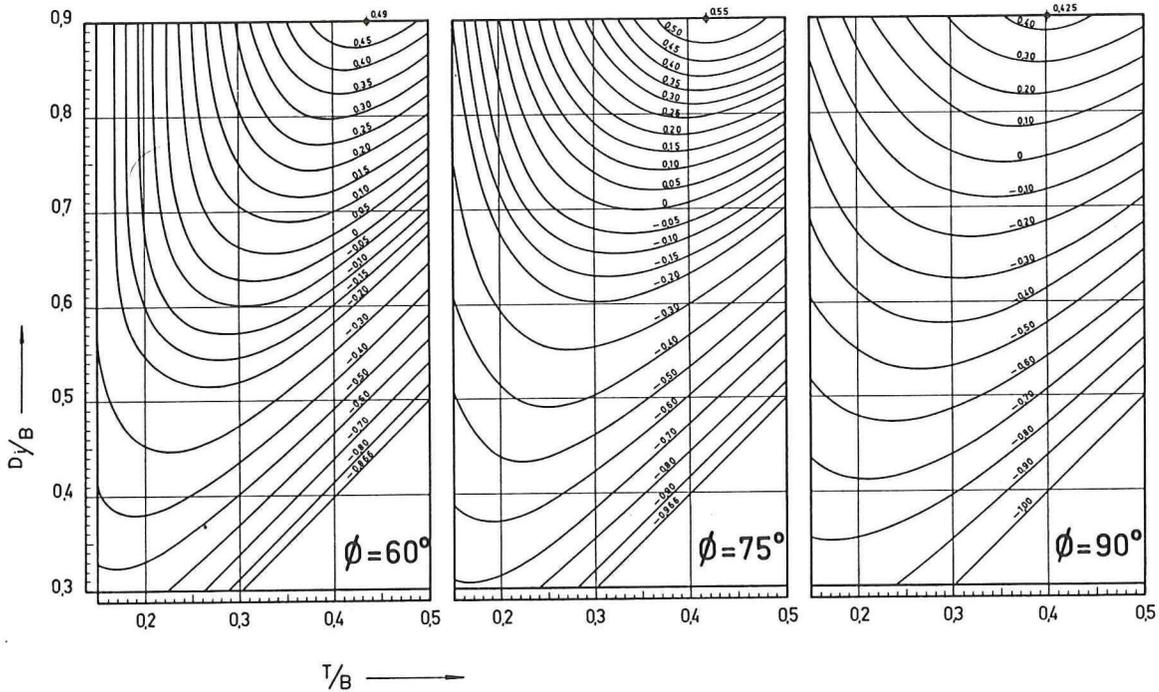
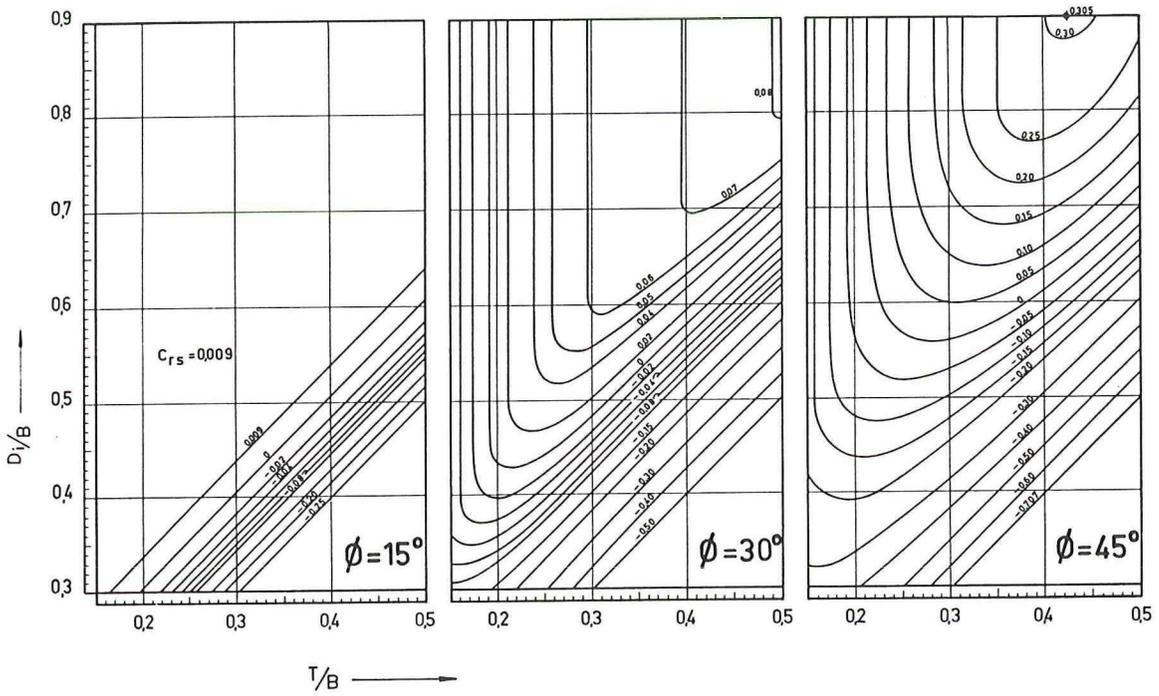
- $L = X \text{ m}$
- $B = 10 \text{ m}$
- $D = 6 \text{ m}$
- $T = 3 \text{ m}$
- $\overline{GM} = 0,50 \text{ m}$





ARMEN VAN STATISCHE STABILITEIT ( $\overline{GZ}$ ) VOOR EEN BAK

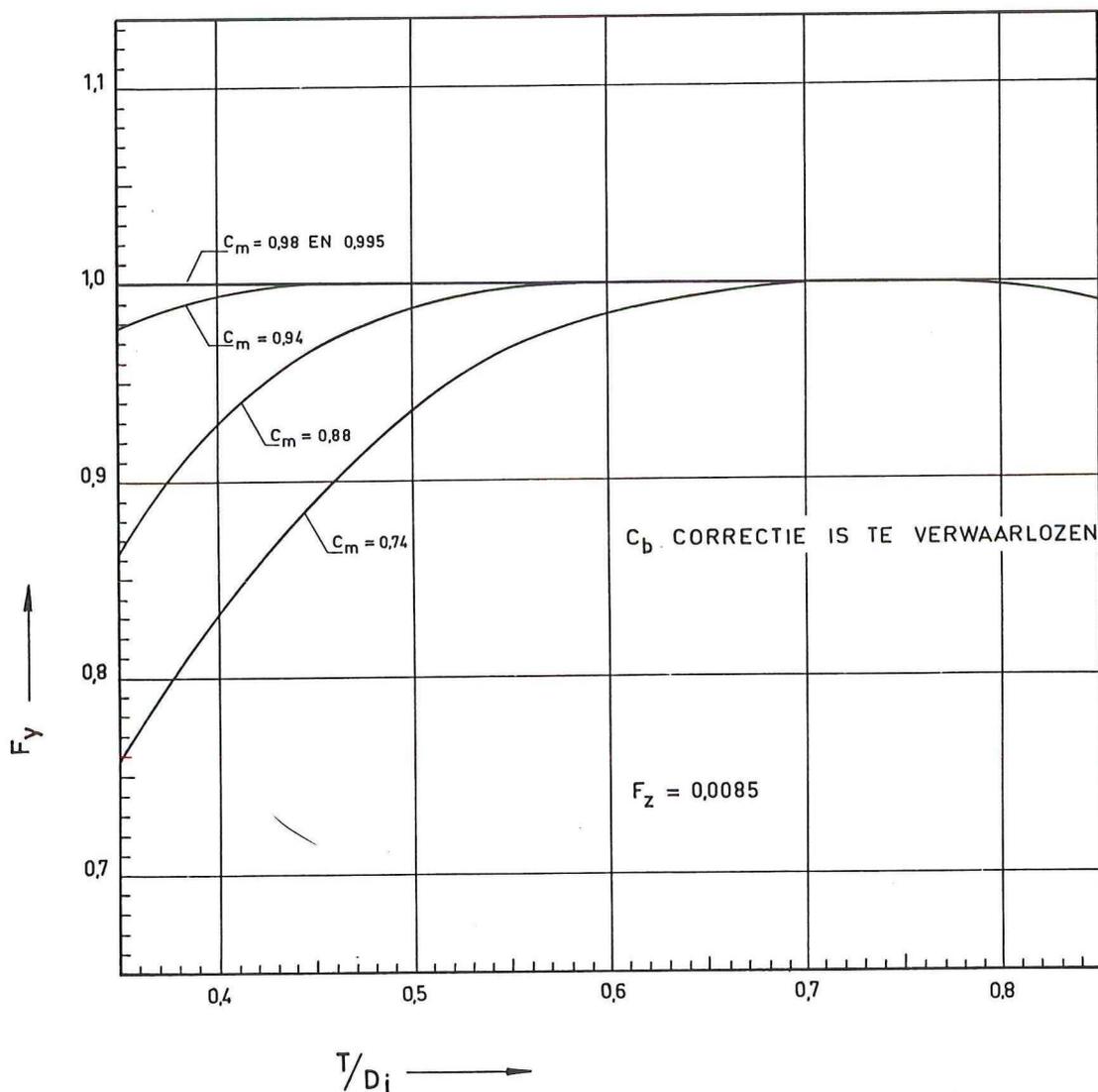
$$D_i = D + \frac{S_f + S_a}{6}$$



$C_{rs}$  - DIAGRAM

$$C_{rs} = \frac{MN_{\phi} \sin \phi}{BM}$$

$$\phi = 7,5^\circ$$



DIT DIAGRAM EN DE VOLGENDE GELDEN VOOR HELLINGSHOEKEN DIE OVEREENKOMEN MET :

$$\operatorname{tg} \phi' = \frac{D_i/B}{0,6} \cdot \operatorname{tg} \phi.$$

DE FAKTOREN  $F_y$  EN  $F_z$  WORDEN BEPAALD M.B.V.  $\phi$ ,  $T/D_i$  EN  $C_m$ . TUSSEN  $C_m$  EN  $C_{bs}$  BESTAAT DE VOLGENDE RELATIE :

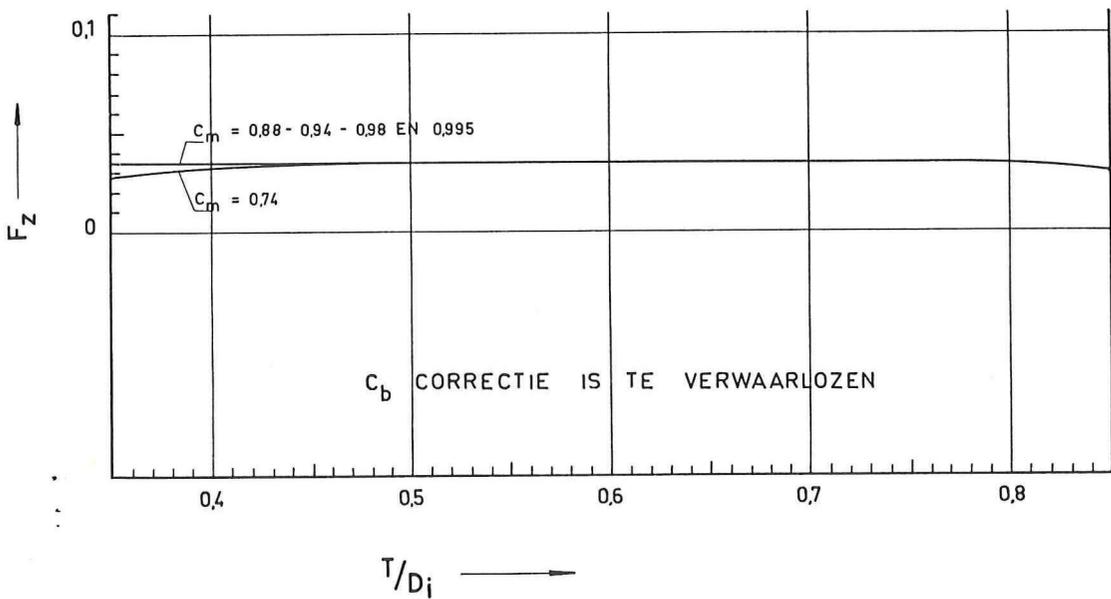
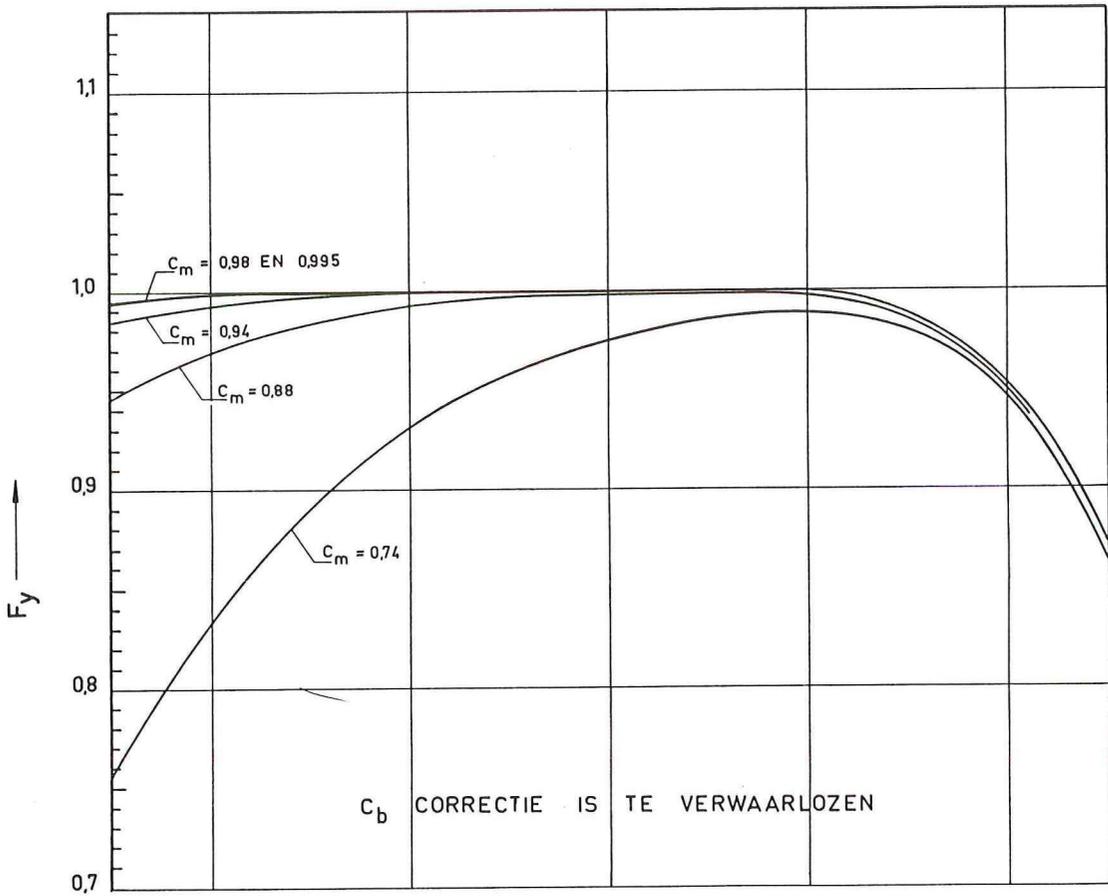
$$C_{bs} = 0,35 + \frac{0,025}{1,05 - C_m}.$$

KOMEN  $C_b$  EN  $C_{bs}$  NIET OVEREEN, DAN DIENEN DE FAKTOREN  $f_y$  EN  $f_z$  BEPAALD TE WORDEN.

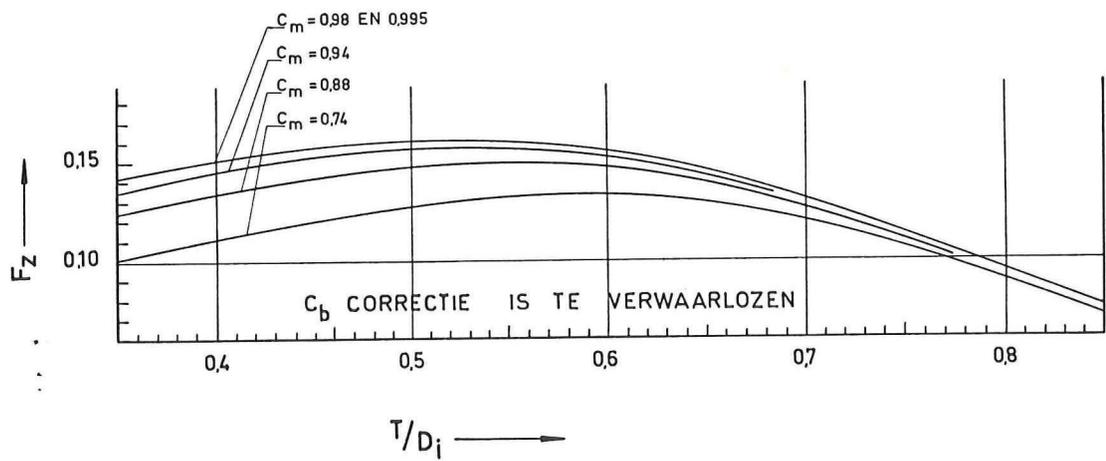
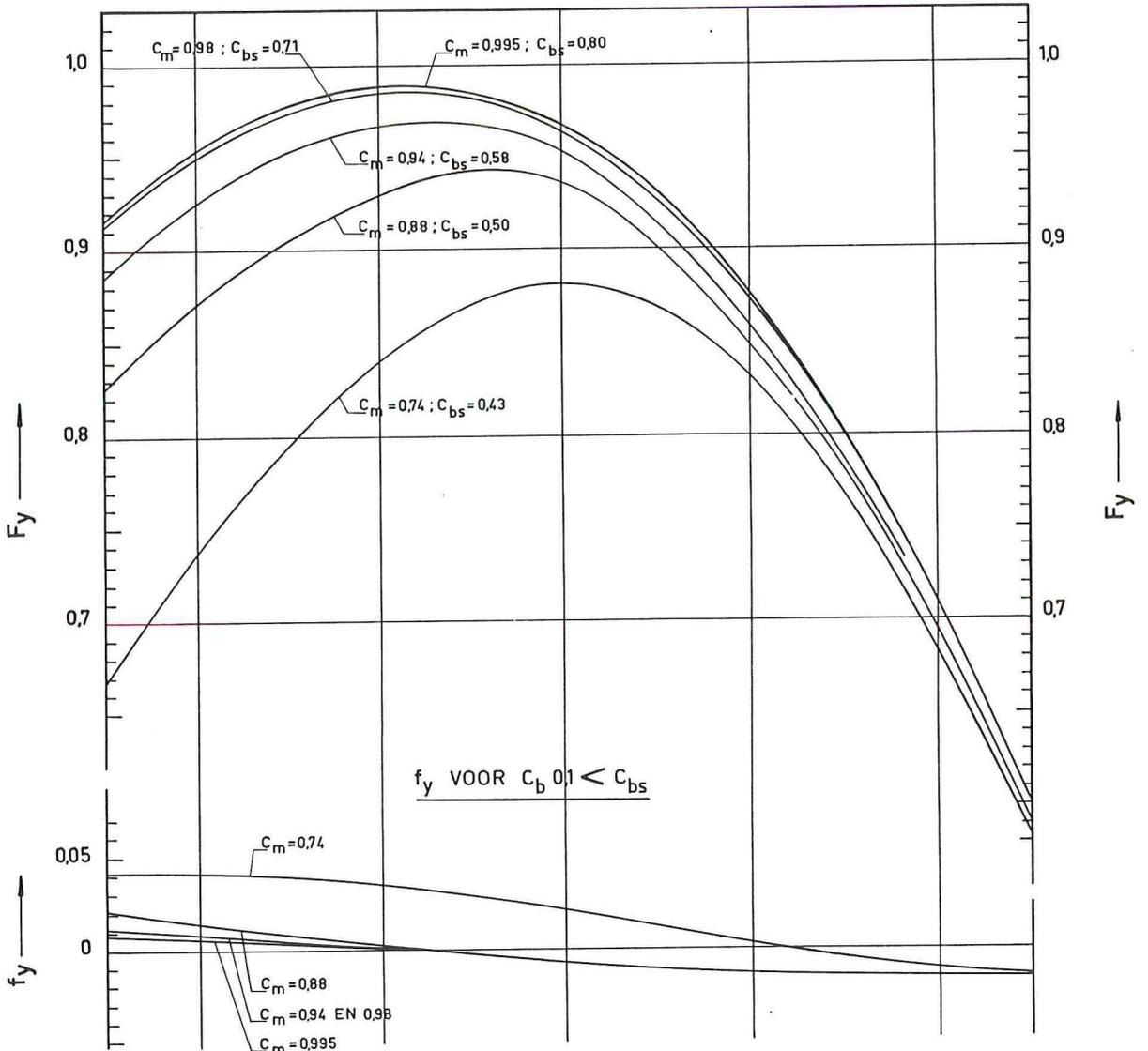
DE DIMENSIELOZE TOEGEVOEGDE STABILITEIT IS,

$$C_{rs} = \frac{\overline{MN}_{\phi'} \sin \phi'}{BM} = \left[ \left( B/B_{wl} \right)^2 \left\{ F_y + \frac{C_{bs} - C_b}{0,1} \cdot f_y + \left( \frac{D_i/B}{0,6} \right)^2 \left( F_z + \frac{C_{bs} - C_b}{0,1} \cdot f_z \right) \right\} - 1 \right] \sin \phi'$$

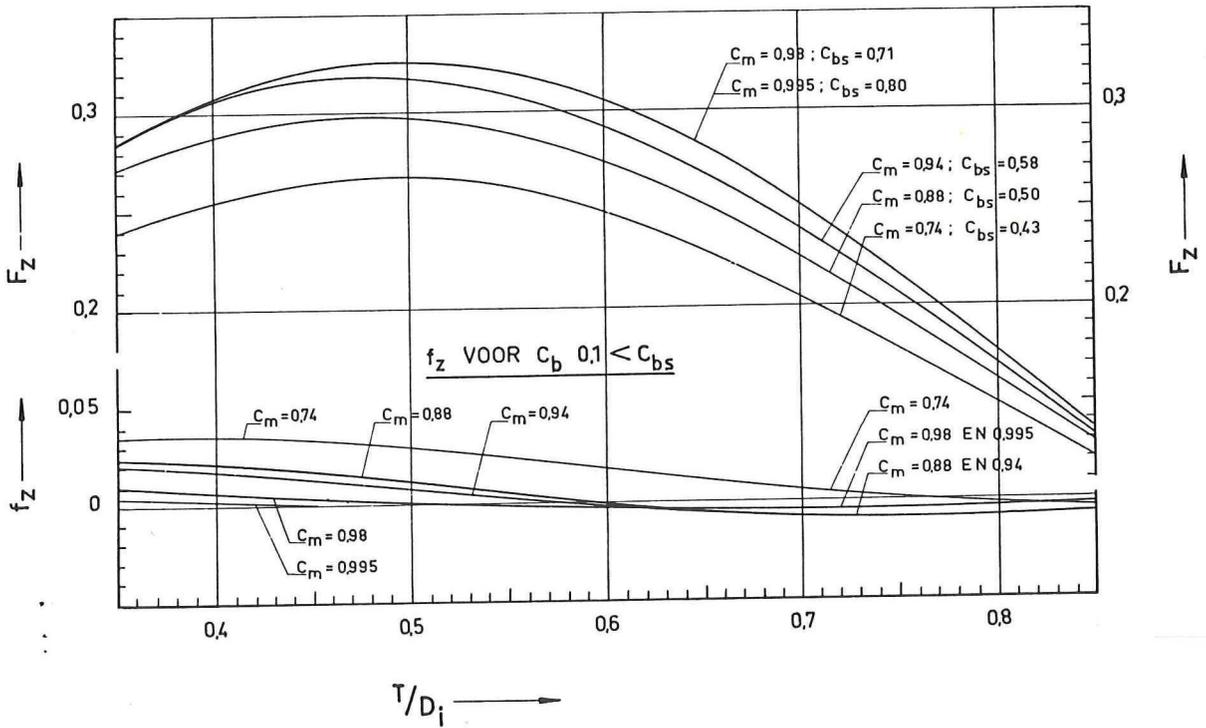
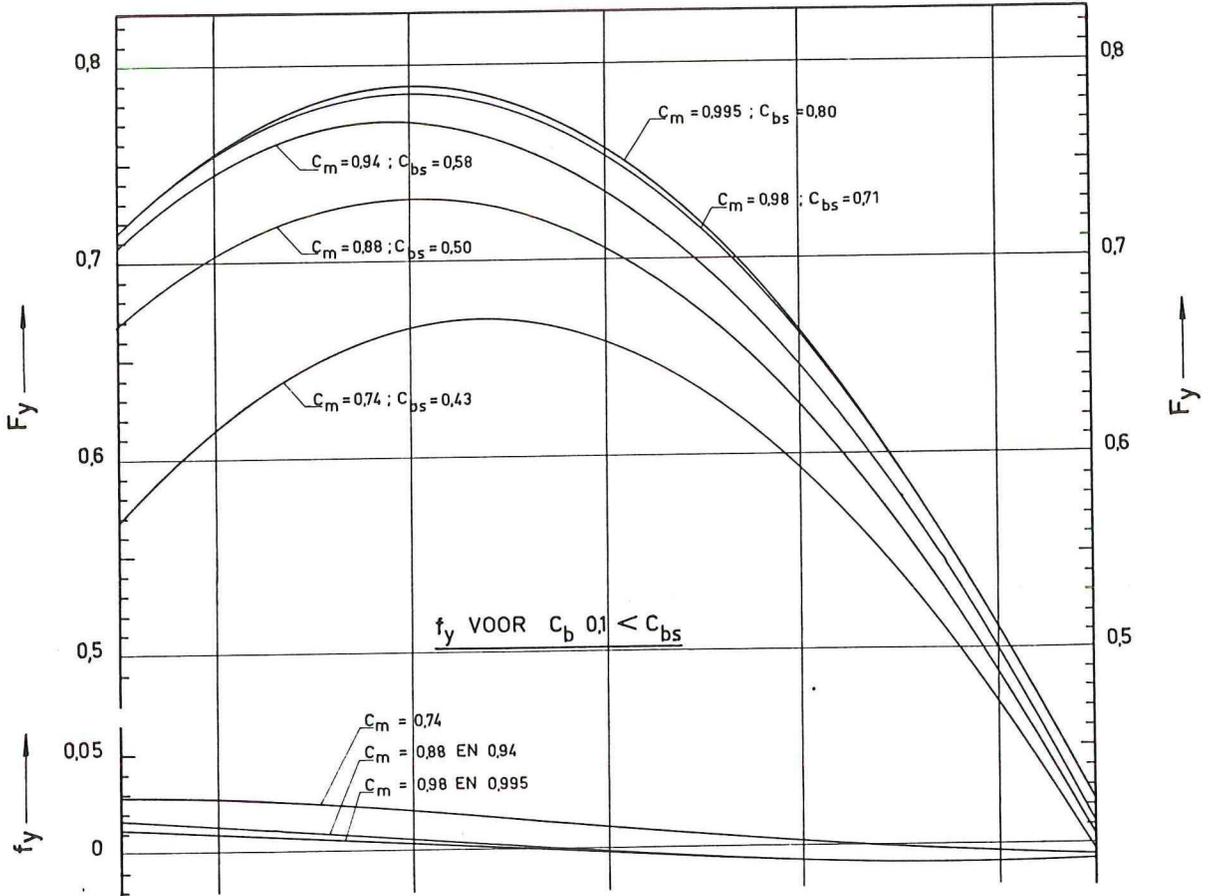
$$\phi = 15^\circ$$



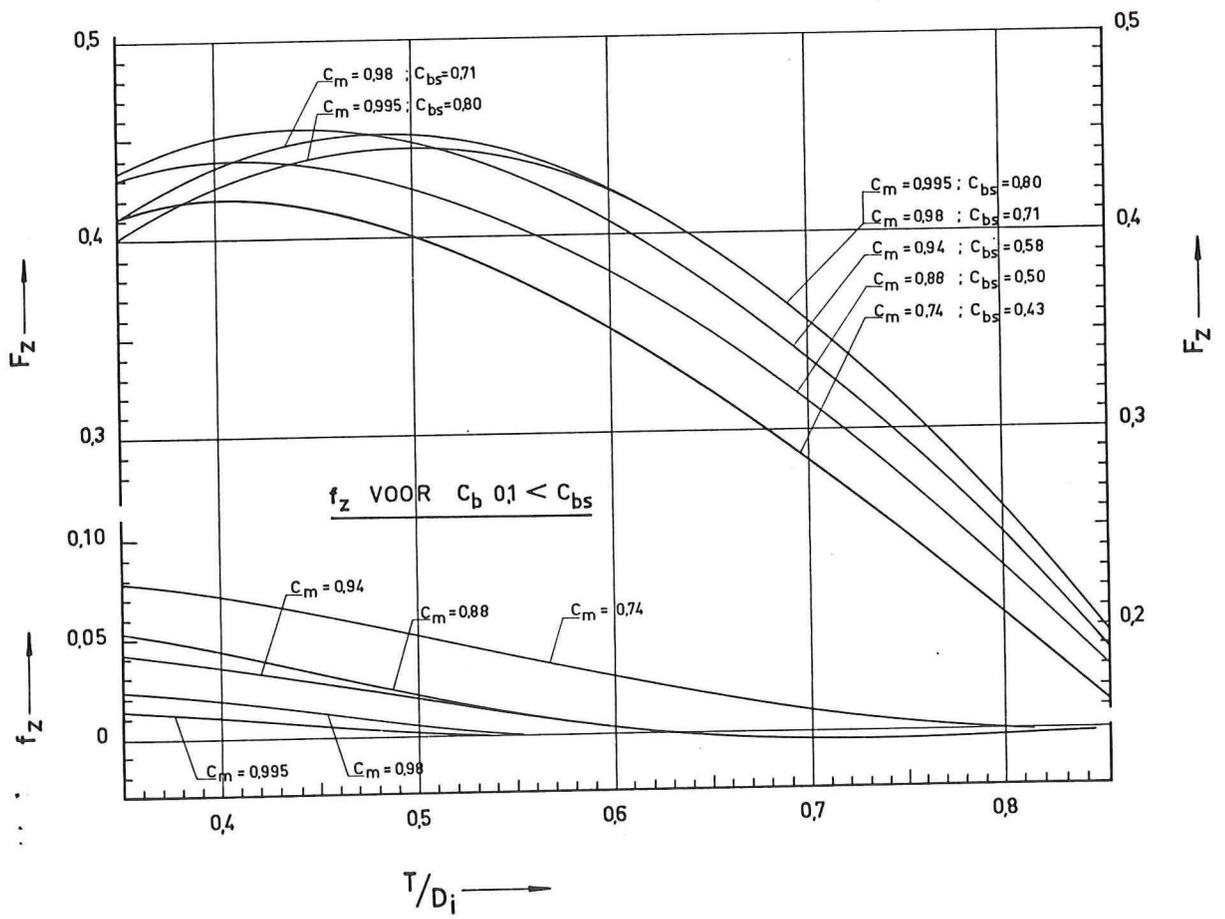
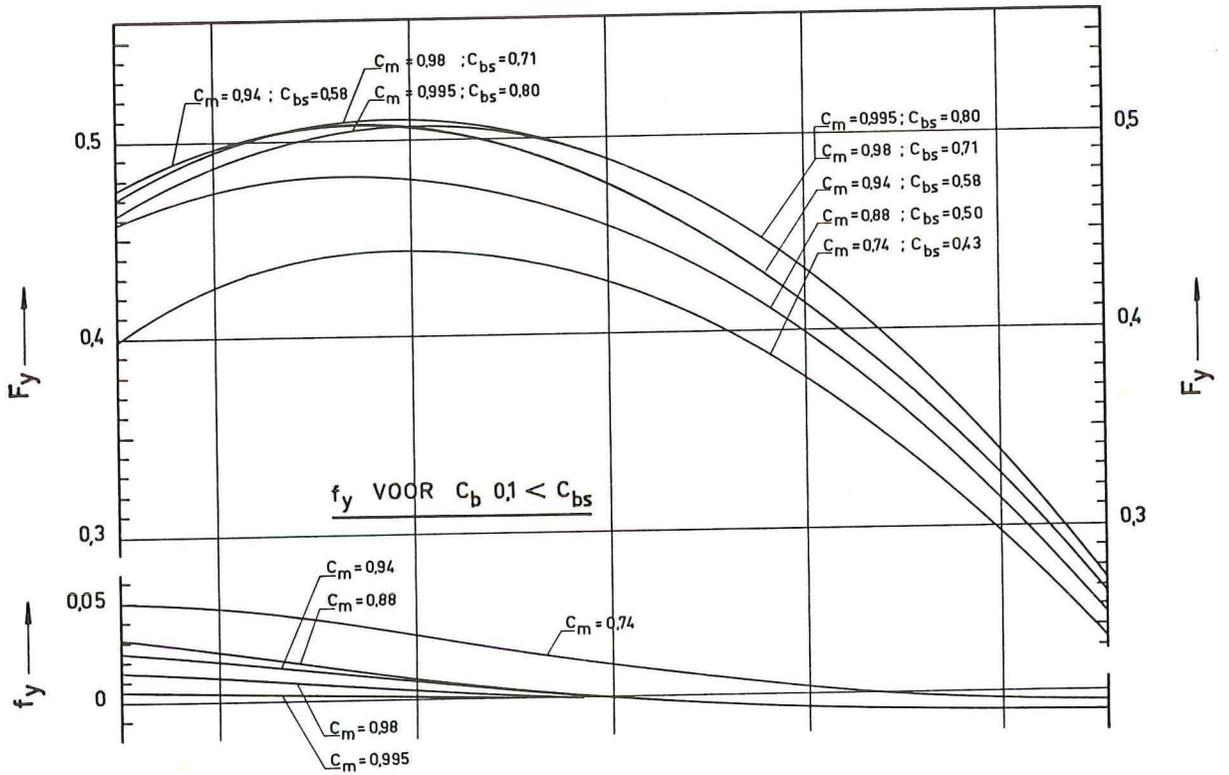
$\phi = 30^\circ$



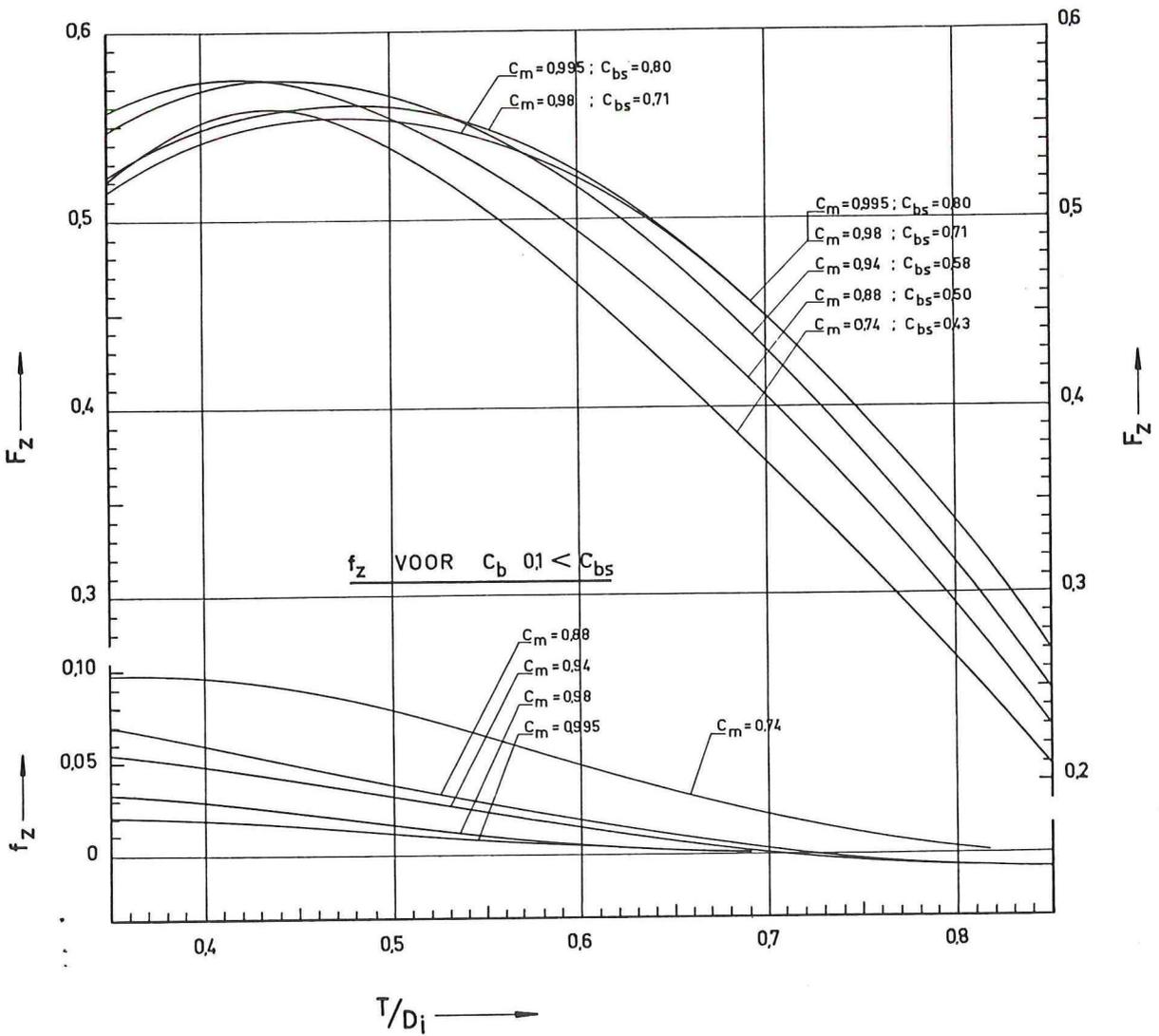
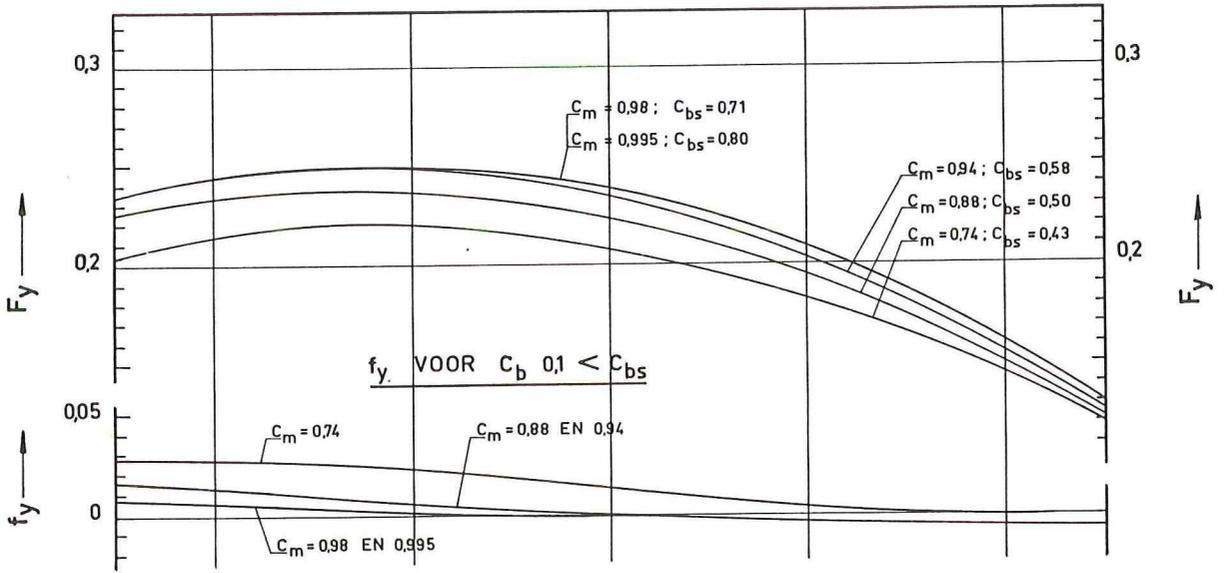
$\phi = 45^\circ$



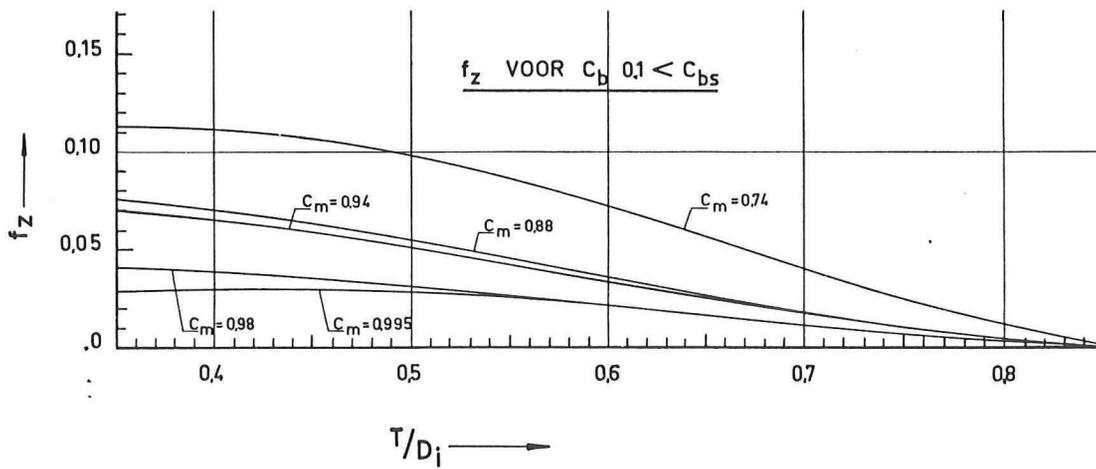
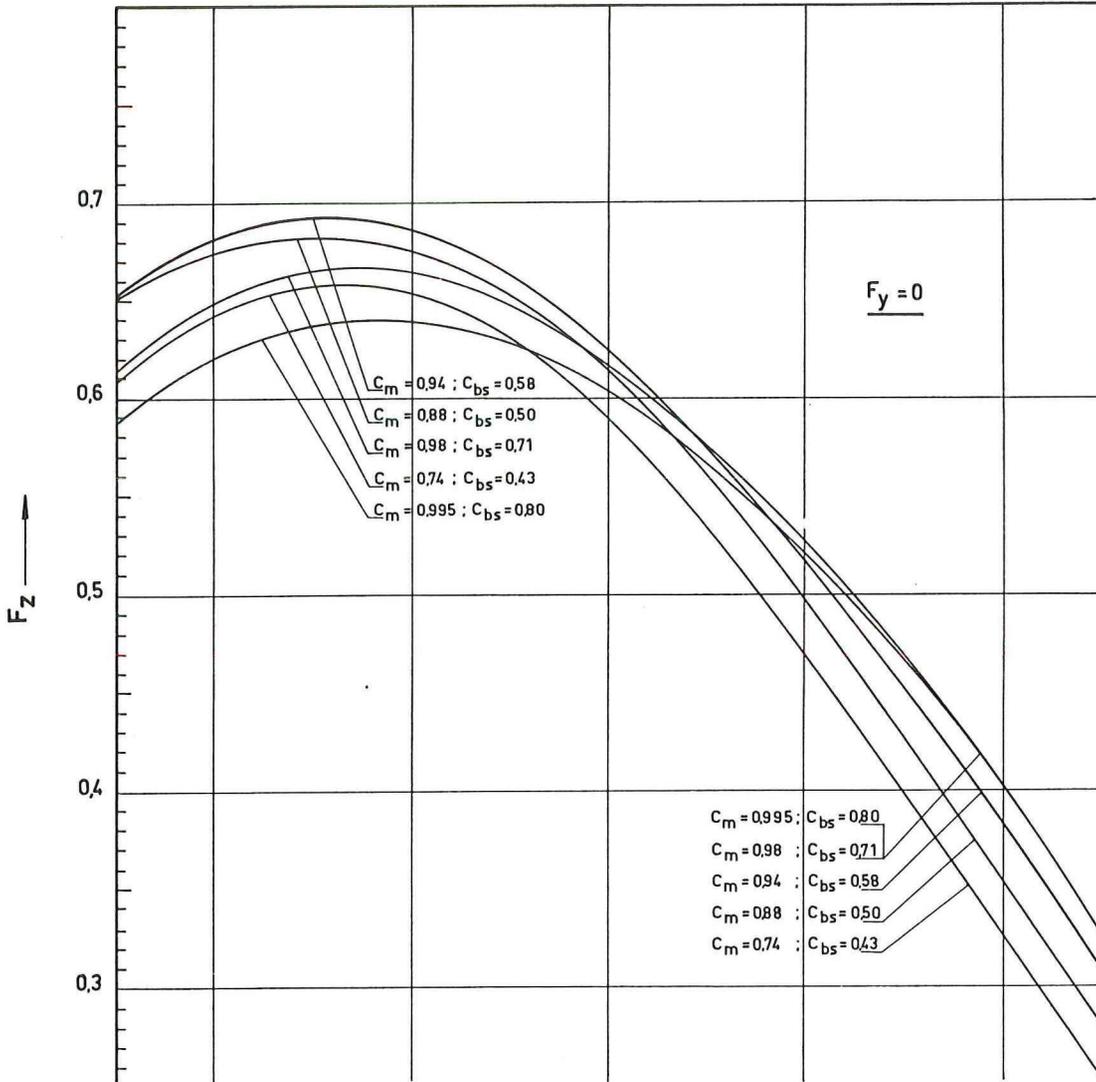
$\phi = 60^\circ$



$\phi = 75^\circ$

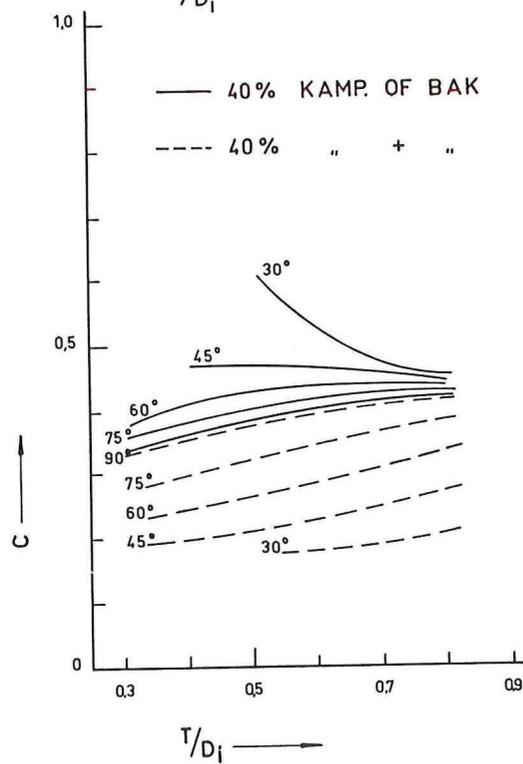
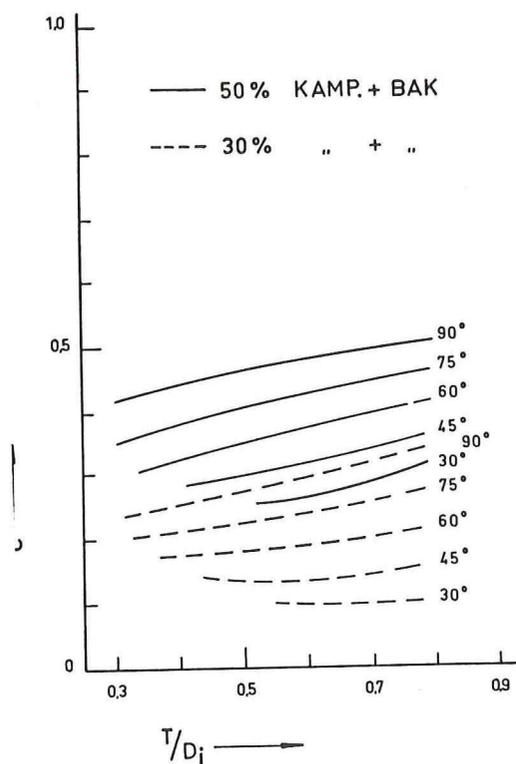
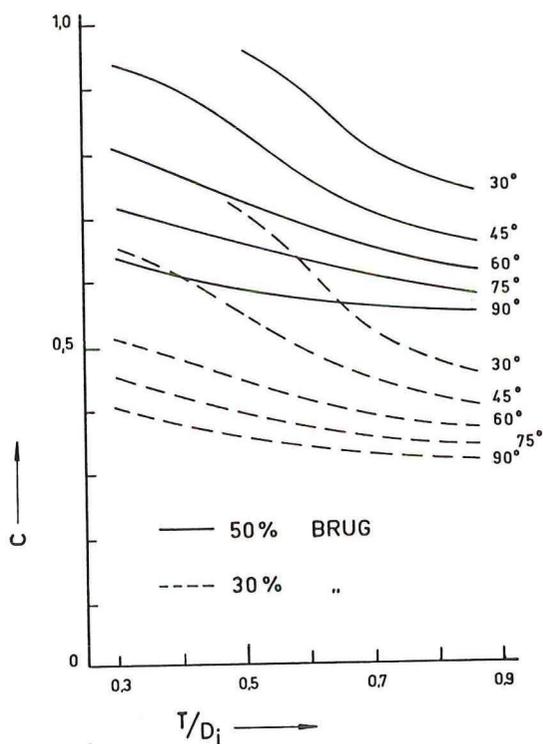


$\phi = 90^\circ$

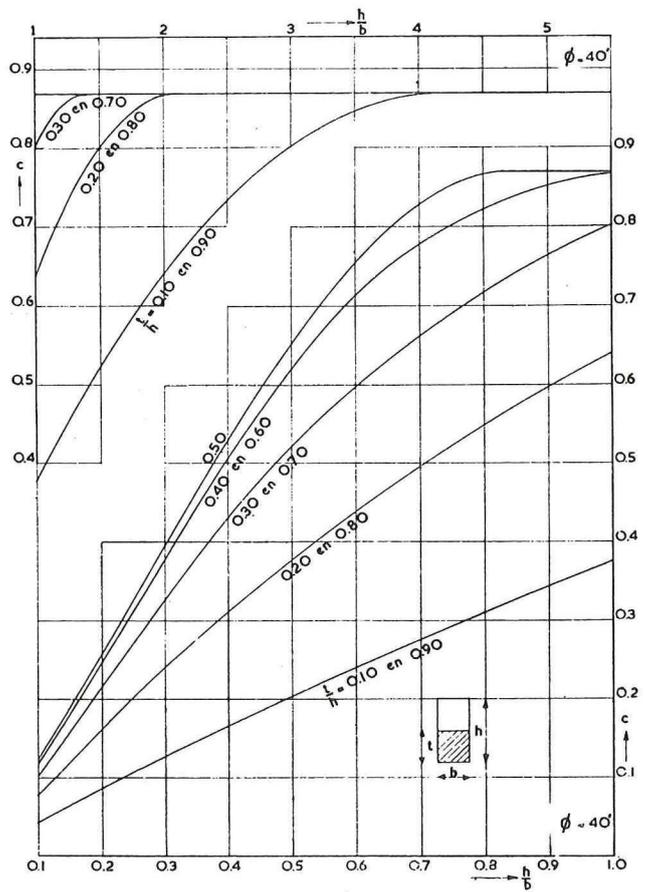
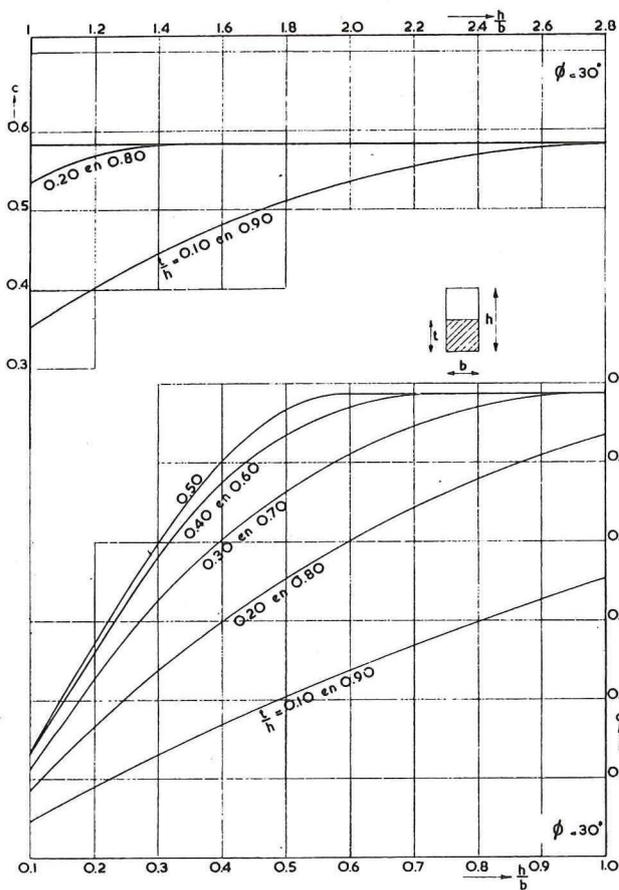
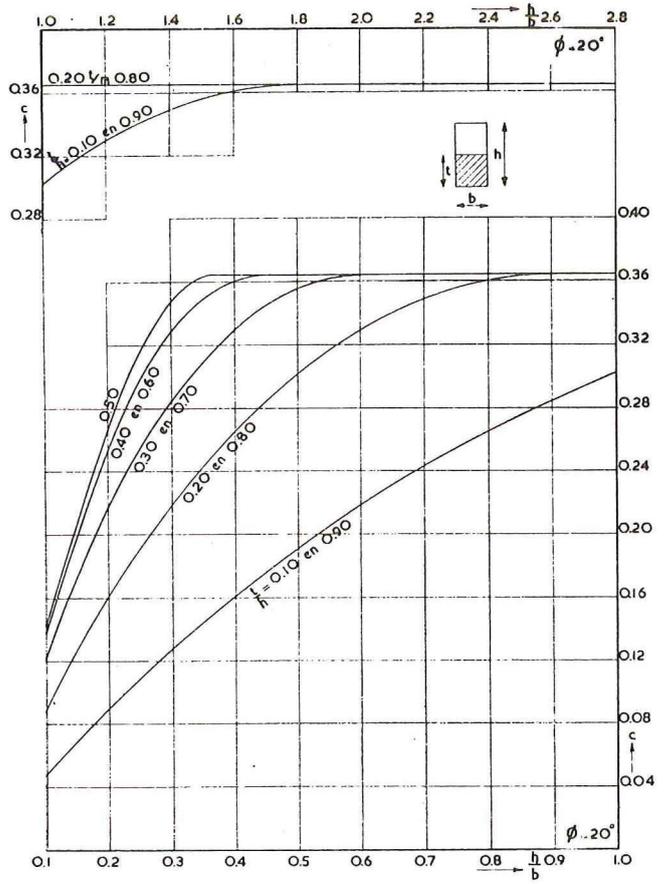
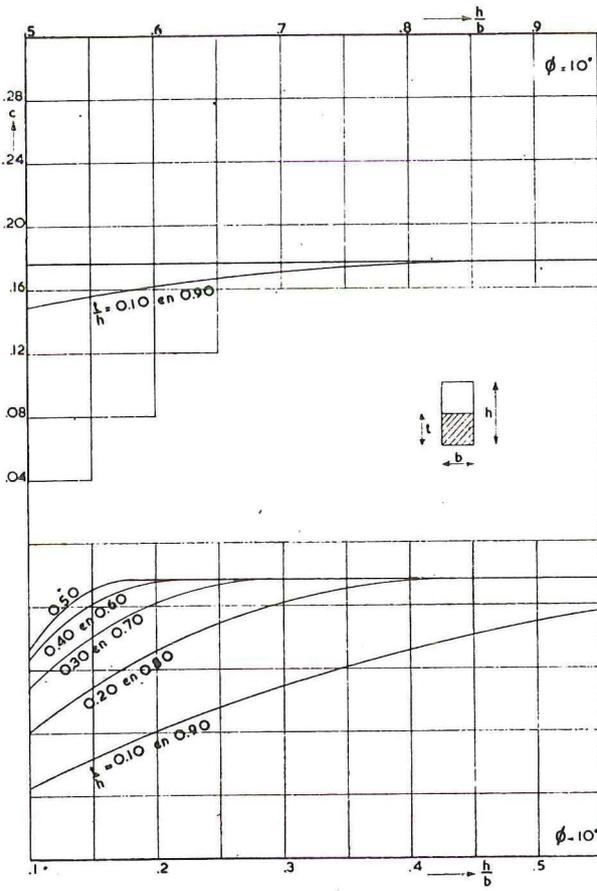


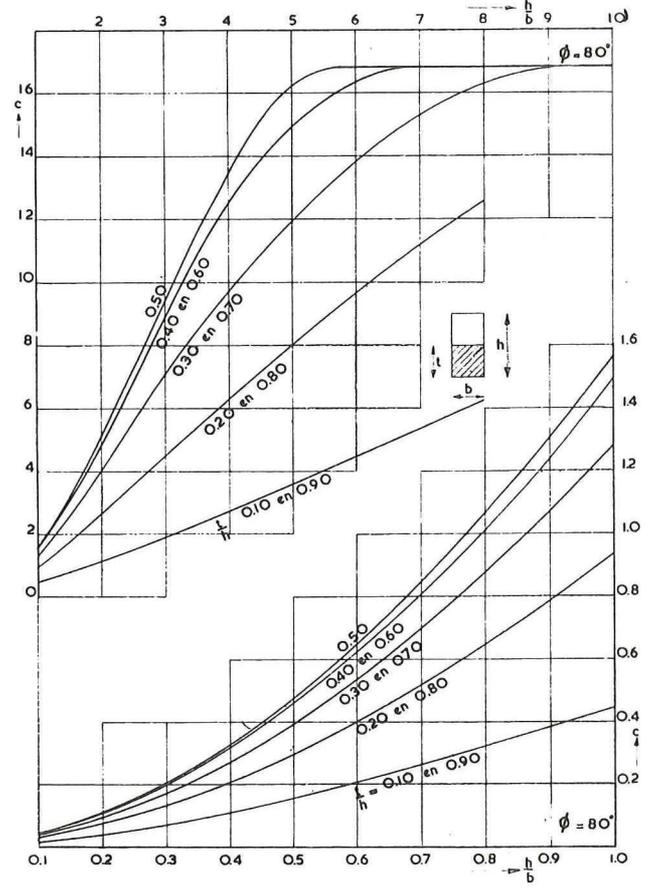
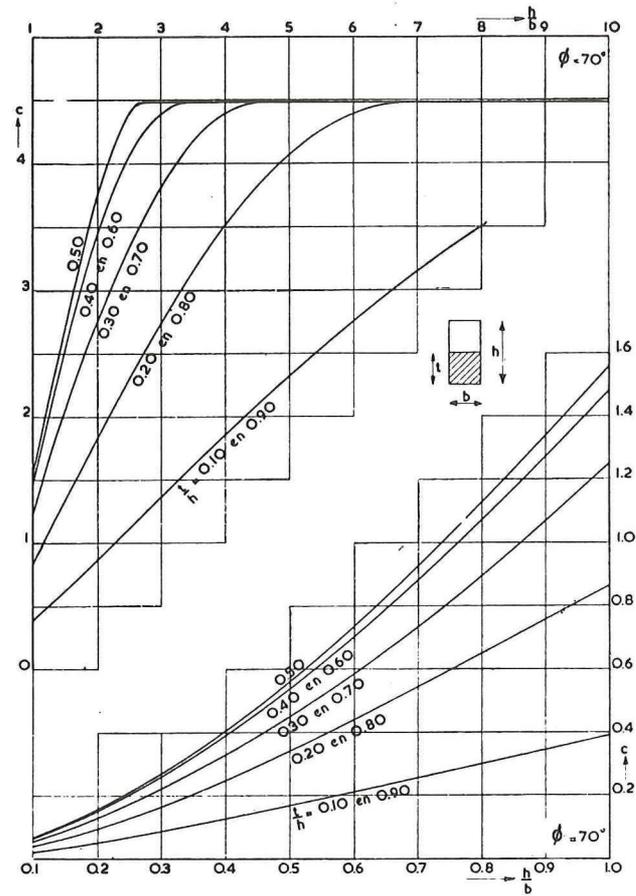
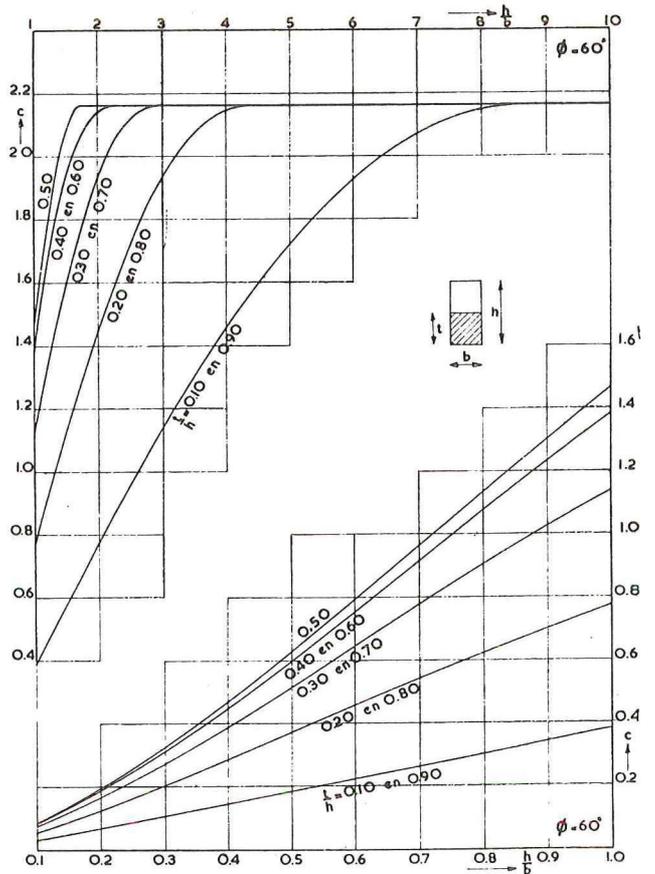
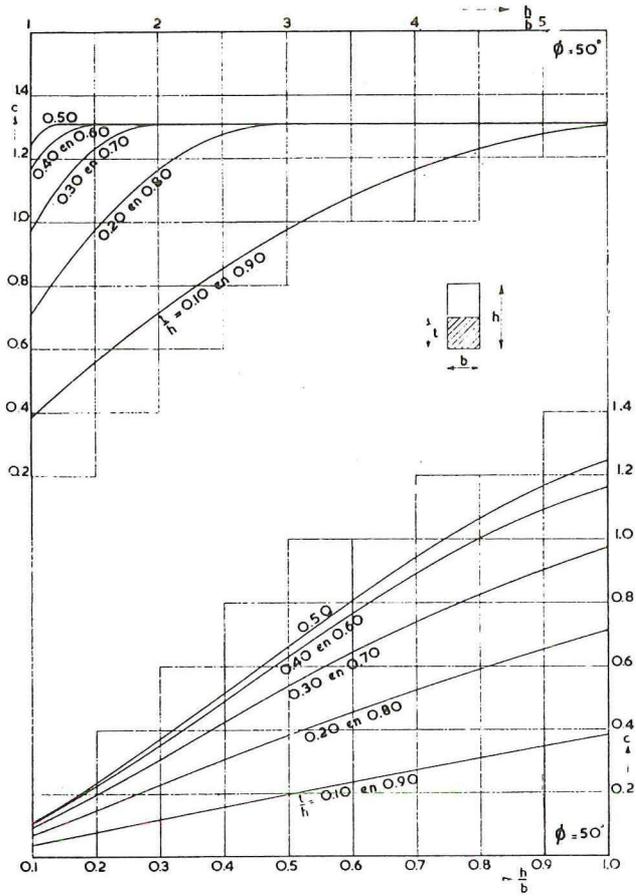
KAMPANJE + BRUG + BAK

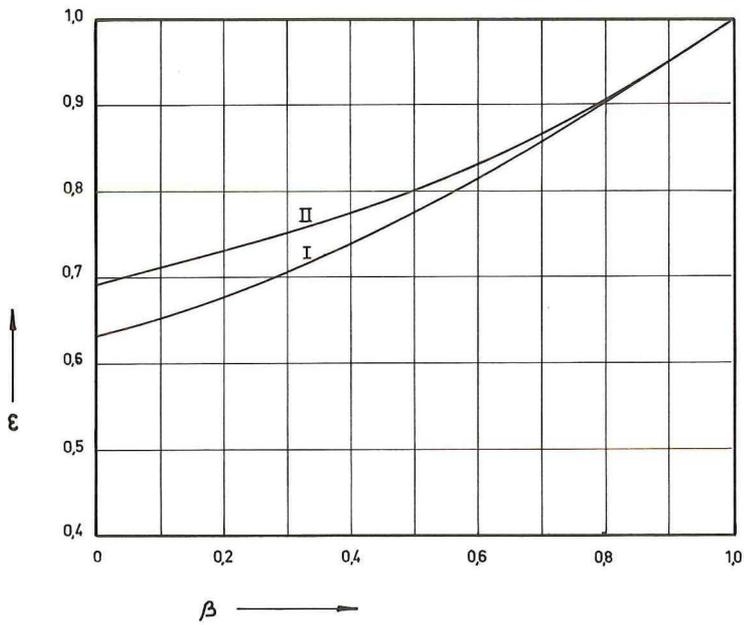
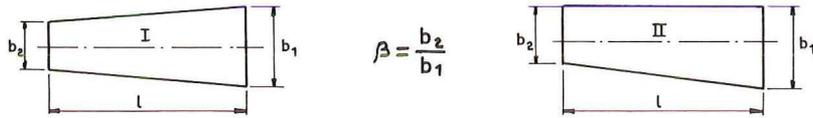
$$C \approx \frac{\text{PERC. BOVENBOUW}}{100}$$



VOORLOPIGE BENADERINGSWAARDEN VAN DE INTERPOLATIE-FAKTOR C  
 VOOR HET BEPALEN VAN DE INVLOED VAN DE BOVENBOUWEN BIJ  
 DIVERSE HELLINGSHOEKEN

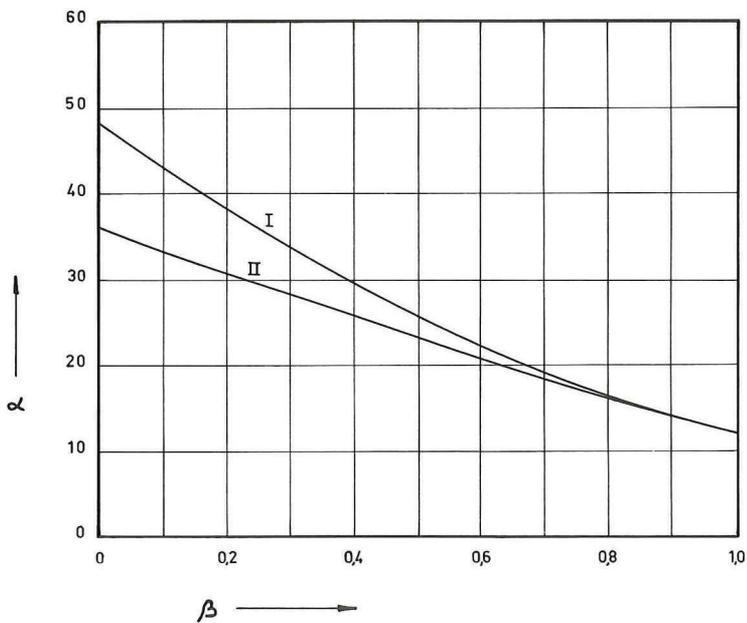






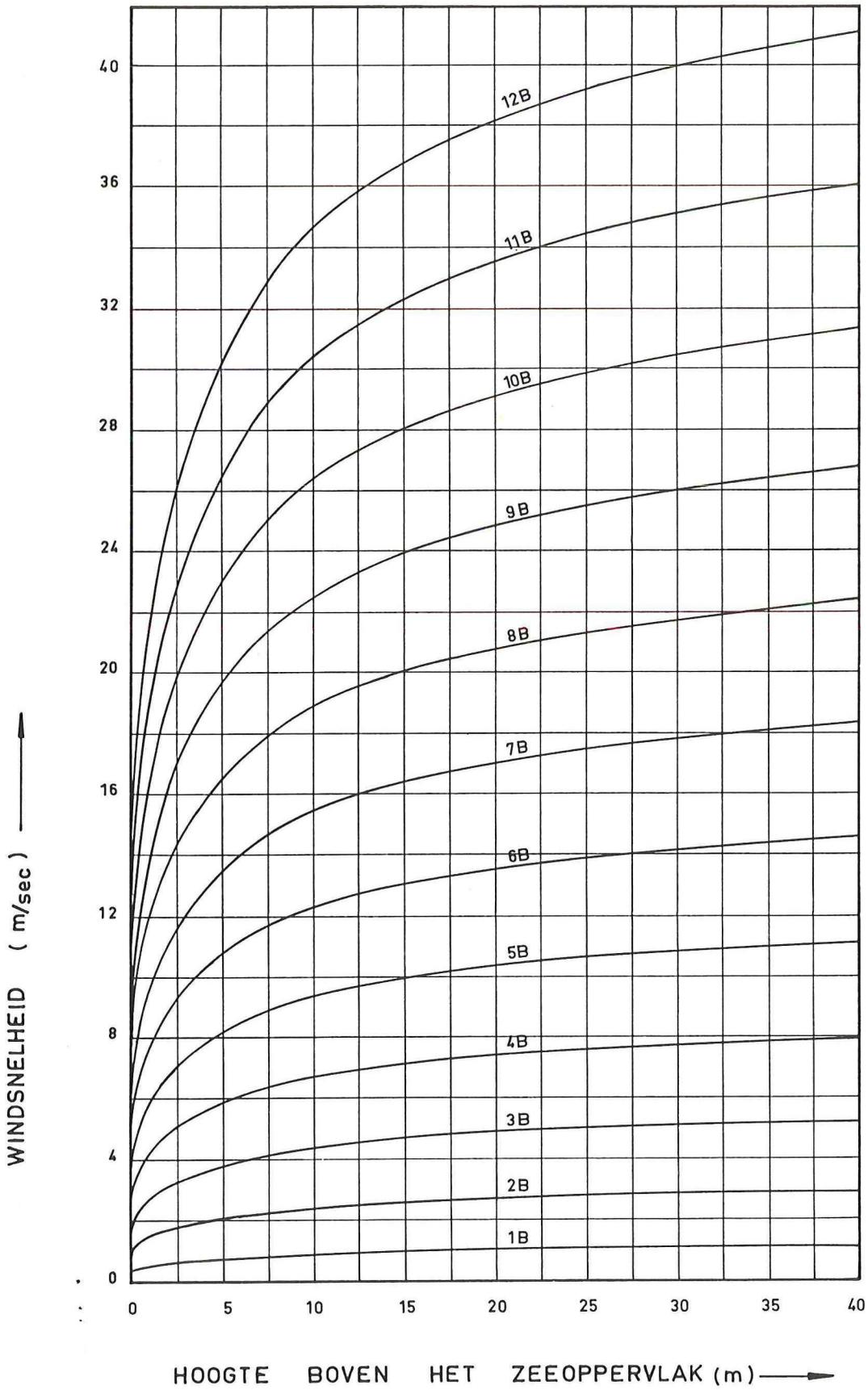
$b = \epsilon \cdot b_1$

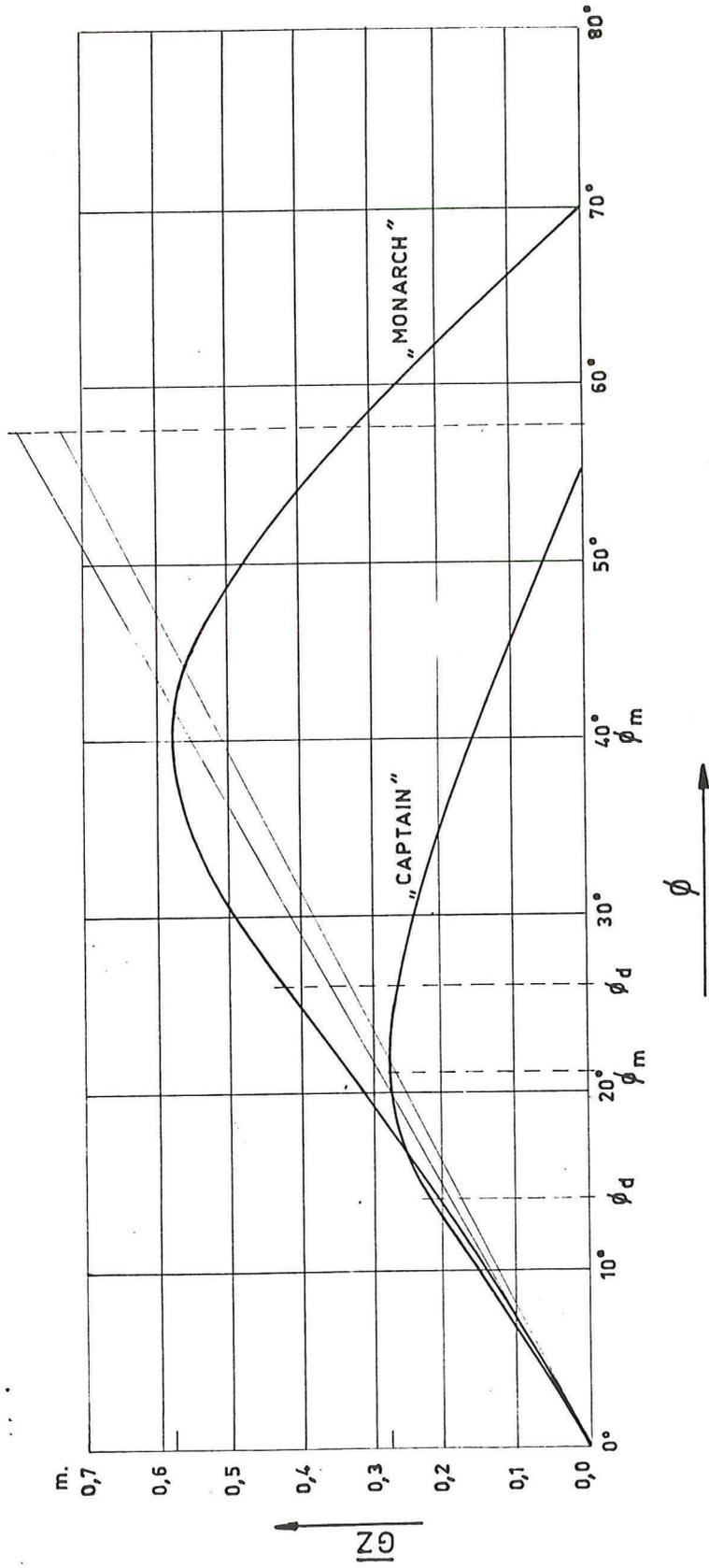
VORMCOËFFICIËNT  $\epsilon$  VOOR EEN RECHTHOEKIG OF GELJKBENIG TRAPEZIUM



$i = \frac{l \cdot b^3}{\alpha}$

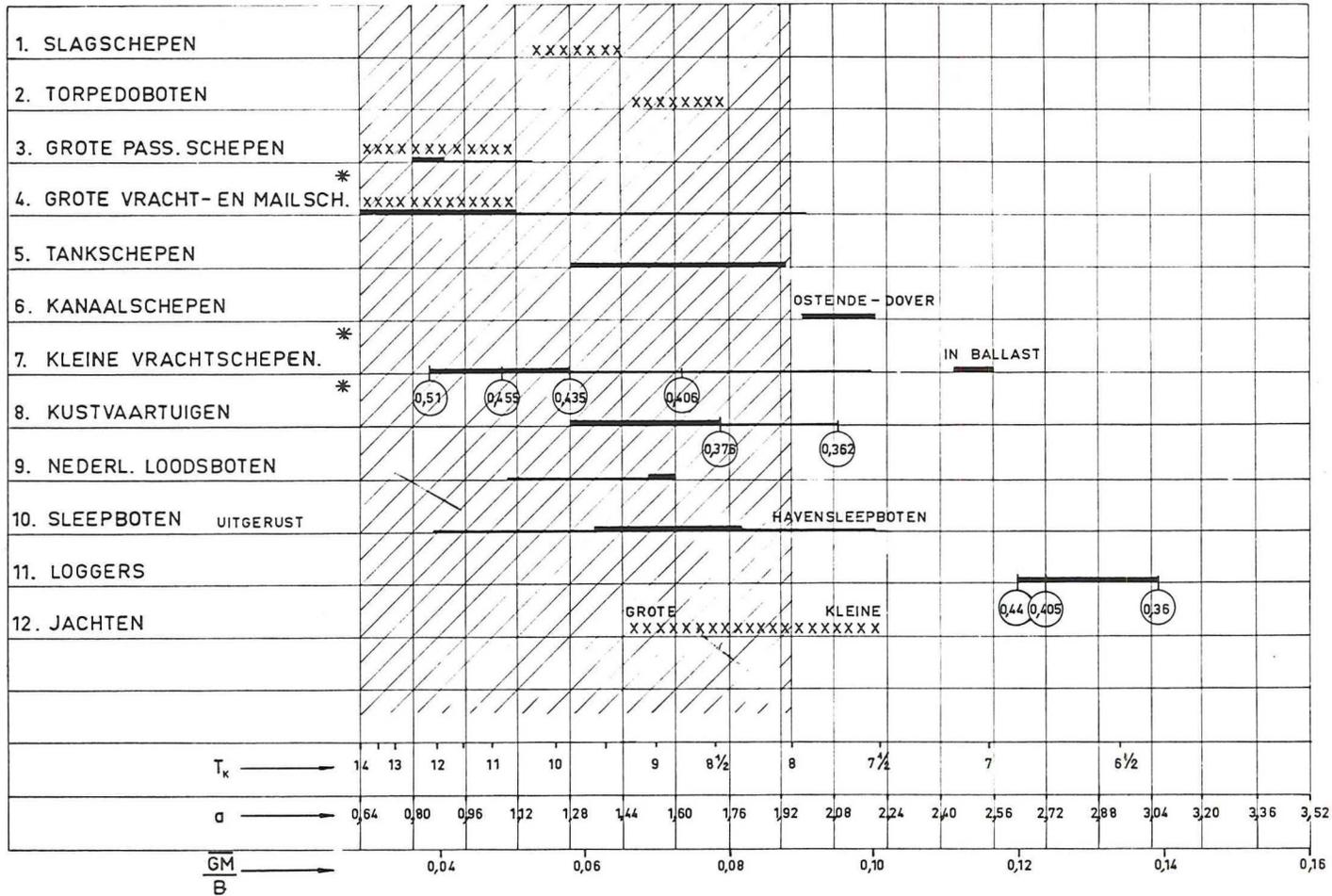
TRAAGHEIDSMOMENT VAN EEN GELJKBENIG OF RECHTHOEKIG TRAPEZIUM





DE KROMMEN VAN ARMEN VAN STATISCHE STABILITEIT  
VAN "CAPTAIN" EN "MONARCH"

SLINGERTJUDEN EN  $\frac{\overline{GM}}{B}$  WAARDEN VAN VERSCHILLENDE SCHEEPSTYPEN



VERKLARING

T<sub>k</sub> = DIMENSIELOZE SLINGERTJUD ( KEMPF )

$$T_k = T_{\phi} \sqrt{\frac{g}{B}} = 2,38 \sqrt{\frac{B}{GM}}$$

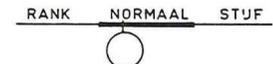
a = LINEAIRE VERSNELLING

$$a = 4 \frac{\pi^2}{T_{\phi}^2} h \cdot \sin \phi = 22 \frac{GM}{B} \quad \text{WANNEER}$$

h TER HOOGTE PROM.-OF BRUGDEK=0,65 B.

$$k_{\phi} = 0,38 B \quad \text{EN} \quad \phi = 30^{\circ}$$

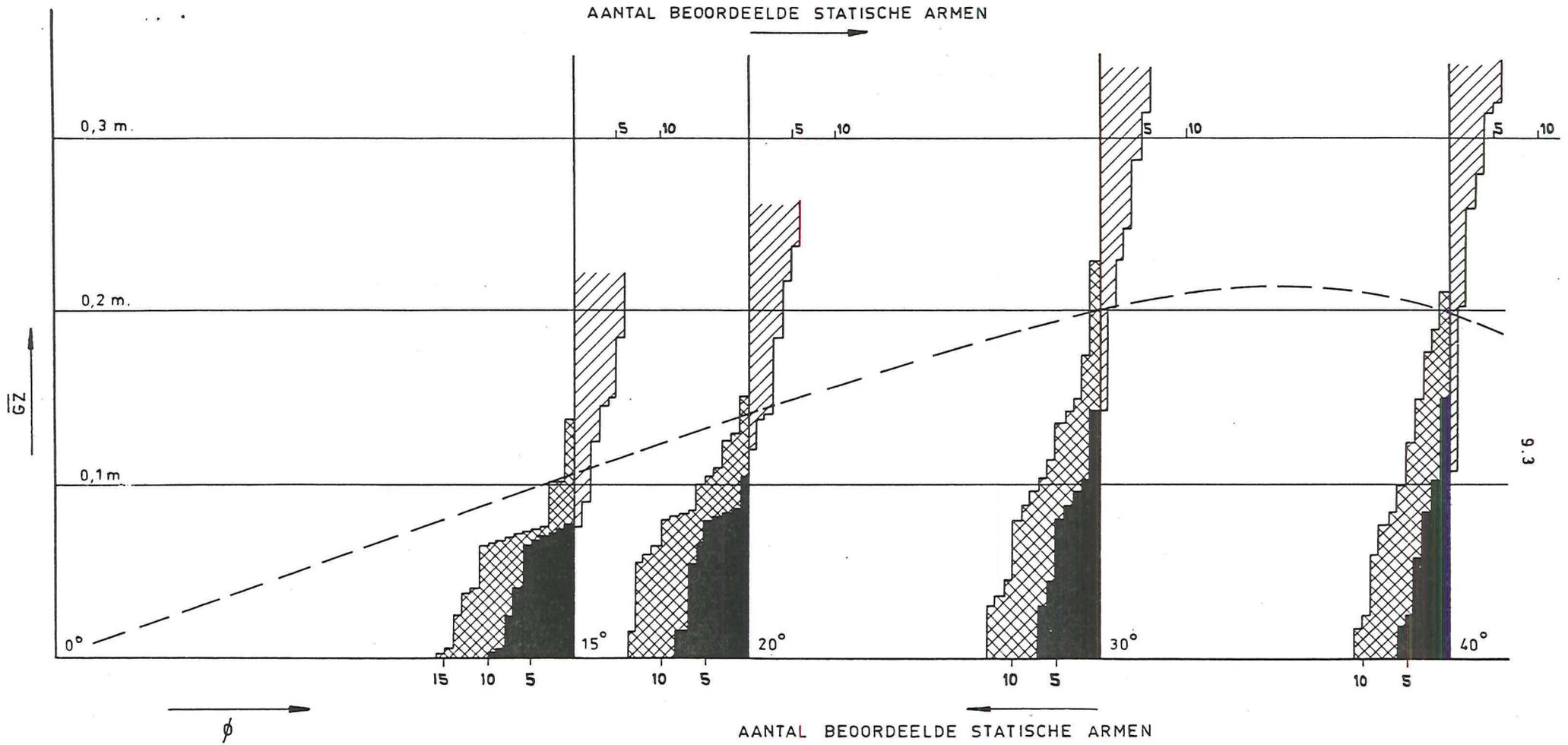
HET GEARCEERDE IS HET GEBIED WAARBINNEN VOLGENS KEMPF GOEDE SCHEPEN MOETEN LIGGEN.



IN DE CIRKEL  $\frac{I}{B}$  WAARDE VAN BESTAANDE SCHEPEN.

-XXXXXX- GEGEVENS VOLGENS JAMES BATES "BASIC DESIGN" THE SHIPB. CYCLOPEDIA PAG.152.

\* HOMOGEEN GELADEN



UIT: THE JUDGING OF THE STABILITY OF SHIPS  
AND THE DETERMINATION OF THE MINIMUM  
AMOUNT OF STABILITY.  
DOOR J. RAHOLA .

- VOLDOENDE WAARDEN VAN  $\bar{GZ}$
- KRITIEKE WAARDEN VAN  $\bar{GZ}$
- ONVOLDOENDE WAARDEN VAN  $\bar{GZ}$

BIJLAGE 9.A.

Voorschriften volgens het Schepenbesluit 1965 betreffende de stabiliteit in het algemeen.

Hellingproef; Hoofdstuk II, art. 9.

1. Elk schip moet, voordat het in dienst wordt gesteld, onderworpen worden aan een hellingproef.
2. De resultaten van de in het eerste lid van dit artikel genoemde proef, alsmede voldoende gegevens betreffende de stabiliteit voor verschillende hellingen van het schip, moeten worden overgelegd aan het Hoofd van de Scheepvaartinspectie.

Omschrijving; Hoofdstuk I, art. 1, lid 2.

2. Voor de toepassing van dit besluit wordt onder "schip" begrepen een vaartuig, een sleepschip, een dok en elk ander dergelijk drijvend voorwerp, dat over zee naar zijn bestemming wordt gesleept.

Stabiliteitsgegevens; Hoofdstuk X, art. 135.

1. De kapitein van een schip, geen passagiersschip zijnde, van 200 ton of meer en voor een passagiersschip is verplicht zorg te dragen dat bij het ondernemen van een reis voldoende gegevens betreffende de stabiliteit van het schip in onbeschadigde toestand aan boord zijn.
2. De kapitein van een passagiersschip is verplicht zorg te dragen dat bij het ondernemen van een reis de gegevens betreffende de stabiliteit van het schip in beschadigde toestand, als bedoeld in het zevende lid van artikel 8 van Bijlage II van dit Besluit, aan boord zijn.

Voorschriften volgens de Bekendmaking aan de Scheepvaart No. 22/1965 betreffende stabiliteitsgegevens van schepen, geen passagiersschepen zijnde, van minder dan 500 ton.

De Inspecteur-Generaal voor de Scheepvaart,

Overwegend:

dat het nodig is voor schepen, geen passagiersschepen zijnde, van minder dan 500 ton aan te geven welke gegevens betreffende de stabiliteit voor verschillende hellingen van het schip moeten worden overgelegd bij de aanvraag voor het eerste certificaat van deugdelijkheid;

dat het bovendien nodig is voor schepen, geen passagiersschepen zijnde, van 200 ton en meer, doch minder dan 500 ton aan te geven welke gegevens betreffende de stabiliteit van het schip in onbeschadigde toestand aan boord moeten zijn;

Maakt bekend:

1. a. Voor schepen, geen passagiersschepen, sleepboten, vissersvaartuigen of baggermateriaal zijnde, van 200 ton en meer doch minder dan 500 ton, moeten bij de aanvraag voor het eerste certificaat van deugdelijkheid de volgende gegevens in 4-voud worden ingediend:
  - (i) Een protocol van de hellingproef en de berekening van de aanvangsmetacentershoogte ( $\overline{GM}$ ) en van de ligging van het gewichtszwaartepunt in hoogte boven de basislijn ( $\overline{KG}$ ), beide van het ledige bedrijfsklare schip.
  - (ii) Een langdoorsnede van het schip, waarin de verschillende ruim- en tankinhouden, zomede de ligging van de betreffende zwaartepunten in hoogte boven de basislijn zijn aangegeven. Op de tekening moeten twee tabellen voorkomen; één dezer tabellen moet de verschillende ruiminhouden (balen en graan) met de ligging van de bijbehorende zwaartepunten in hoogte boven de basislijn vermelden. Op de andere tabel moet de maximum vermindering voorkomen van de dwarsmetacentershoogte door een vrij vloeistofoppervlak in elk der tanks afzonderlijk bij verschillende deplaceringen bij gelijklastig schip, welke onderling zoveel verschillen als overeenkomt met een diepgangverschil van ongeveer 20 centimeter.

De vorm van de tabellen is in witdruk 9.A.1. aangegeven.

(iii) Een diagram van de z.g. dwarskrommen van statische stabiliteit voor hellingen van  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $50^\circ$  en  $60^\circ$ , zijnde de grafieken van  $\overline{KN}\sin.\phi$ , uitgezet op de waterverplaatsing in kubieke meters, gemeten op spanten, zomede op het displacement in zout water met een soortelijk gewicht van 1,025 op buitenkant huid met aanhangsels in metrieke tonnen. Hierin is  $\overline{KN}\sin.\phi$  de afstand van het kielpunt (K) -het snijpunt van de hartlijn van het grootspant met het basisvlak- tot de lijn van opdrijvende kracht bij de betreffende helling (schaal voor  $\overline{KN}\sin.\phi = 1:20$ , schaal voor waterverplaatsing:  $1\text{cm}=50\text{m}^3$  waaruit die voor het displacement volgt).

Om praktische redenen dient hier de invloed van het verschil in vorm van het schip op spanten en op buitenkant huid met aanhangsels verwaarloosd te worden, zodat  $\overline{KN}\sin.\phi$  voor een waterverplaatsing op buitenkant spanten van  $500\text{m}^3$  dezelfde is als voor een waterverplaatsing op buitenkant huid van bijv.  $505\text{m}^3$  hetgeen overeenkomt met een displacement in zee-water met een s.g. van 1,025 van 517 ton.

(iv) Een diagram, bevattende de kromme van de waterverplaatsing op spanten in kubieke meters, welke het verband aangeeft tussen die waterverplaatsing en de diepgang t.o.v. het kielpunt K (schalen - abscissen: 1 centimeter =  $50\text{m}^3$  - ordinaten 1:20), zomede de kromme van  $\overline{KM}$ , welke de hoogte van het aanvangsmeta-center M boven het kielpunt K geeft (schalen - abscissen:  $\overline{KM}$ , 1:10 - ordinaten: diepgang boven basis, 1:20), zie witdruk 9.A.1.

Dit diagram is niet nodig indien een carènediagram wordt ingediend dat de kromme van waterverplaatsing en de kromme van  $\overline{KM}$  bevat.

(v) De kromme van de armen van statische stabiliteit voor het schip, homogeen beladen, liggende op het zomeruitwateringsmerk, met zoveel mogelijk ballasttanks ledig, met de berekening van de hoogte van het gewichtszwaartepunt van het geladen schip boven de basislijn ( $\overline{KG}$ ) en van de aanvangsmeta-centerhoogte ( $\overline{GM}$ ) in die toestand (schalen - abscissen: 1 centimeter = 2 graden - ordinaten: 1:5).

(vi) Een als voorbeeld ingevuld berekeningsformulier voor het bepalen van de ligging van het zwaartepunt in hoogte boven de basis ( $\overline{KG}$ ) en van de aanvangsmeta-centerhoogte ( $\overline{GM}$ ) voor een bepaalde beladingstoestand van het onderhavige schip, zie witdruk 9.A.2.

- (vii) Een displacementsschaal waaruit afgelezen kan worden het verband tussen het displacement in tonnen van 1000kg op buitenkant huid met aanhangsels in zout water met een s.g. van 1,025, het displacement in tonnen van 1000kg op buitenkant huid met aanhangsels in zoet water en de diepgang in meters t.o.v. de onderkant van de kielplaat, zie witdruk 9.A.2.
- (viii) Een kromme van  $\overline{KM}$  uitgezet op het displacement op buitenkant huid met aanhangsels in zout water met een s.g. van 1,025, waarbij om praktische redenen dient te worden aangenomen dat  $\overline{KM}$  voor een waterverplaatsing van bijv.  $500\text{m}^3$  even groot is als voor een displacement van omstreeks 517 ton (zie onder iii) (schalen - abscissen: 1cm = 50 metrieke tonnen - ordinaten: 1:20), zie witdruk 9.A.3.
- (ix) Een stabiliteitsdiagram op millimeterpapier (Ir J.A. Schepers-diagram), waarin de krommen van de armen van statische stabiliteit voor een aantal daarvoor in aanmerking komende displacements zijn getekend, alle voor één bepaalde hoogteligging van het gewichtszwaartepunt. Mede moeten in dit diagram stervormig uit de oorsprong een aantal sinuslijnen zijn getekend, aangevende het verloop van  $\overline{GG'} \sin. \phi$ , waarmede de armen van statische stabiliteit moeten worden verkleind of vergroot, wanneer het gewichtszwaartepunt  $G'$  hoger dan wel lager ligt dan het gewichtszwaartepunt  $G$  dat als basis voor de ingetekende stabiliteitskrommen heeft gediend. De sinuslijnen moeten zijn ingetekend voor een aantal zwaartepuntsliggingen welke onderling 10 centimeter in hoogte verschillen (schalen - abscissen: 1 centimeter = 2 graden - ordinaten: 1:5), zie witdruk 9.A.3.
- b. De gegevens, genoemd in de punten (i) tot en met (ix) moeten niet later dan twee dagen vóór de proeftocht worden ingediend. Indien blijkt dat het voor een of meer van de gegevens, genoemd in (i), (vi), (ix) onmogelijk is aan deze voorwaarde te voldoen, kan na verkregen toestemming van het hoofd van de Scheepvaartinspectie voor deze gegevens hiervan worden afgeweken, in welk geval de ontbrekende gegevens binnen veertien dagen na de datum, waarop de hellingproef gehouden werd moeten zijn ingediend.
- c. Gelijk met het als voorbeeld ingevulde berekeningsformulier, genoemd in (vi) moeten tenminste 10 dezer formulieren, waarin slechts het gewicht en de ligging van het gewichtszwaartepunt ( $G$ ) van het ledige bedrijfsklare schip zijn ingevuld, worden ingediend.

2. Voor schepen geen passagiersschepen, sleepboten, vissersvaartuigen of baggermateriaal zijnde, van minder dan 200 ton moeten bij de aanvraag voor het eerste certificaat van deugdelijkheid de volgende gegevens in viervoud worden ingediend.
  - (i) Die, genoemd in punt 1a onder (i), (ii), (iii) en (iv),
  - (ii) De berekening van de hoogte van het gewichtszwaartepunt boven de basislijn, van de aanvangsmetacenterhoogten van enige kenmerkende beladingstoestanden van het schip en van de bijbehorende krommen van armen van statische stabiliteit.
3. Voor sleepboten, vissersvaartuigen en baggermateriaal van minder dan 500 ton moeten bij de aanvraag voor het eerste certificaat van deugdelijkheid de gegevens genoemd in punt 2 in viervoud worden ingediend <sup>Ⓜ</sup>.
4. Aan boord van schepen, geen passagiersschepen, sleepboten, vissersvaartuigen of baggermateriaal zijnde, van 200 ton en meer, doch minder dan 500 ton moet zich een mapje bevinden, niet meer bevattend dan de documenten genoemd in punt 1a onder (ii), (vi), (vii), (viii) en (ix), benevens de 10 formulieren als bedoeld in punt 1c. Het mapje moet zodanig zijn ingericht dat de bladen gemakkelijk kunnen worden opengeslagen en gebruikt.
5. Aan boord van sleepboten, vissersvaartuigen en baggermateriaal van 200 ton en meer, doch minder dan 500 ton moet zich een mapje bevinden, niet meer bevattend dan de tekening, genoemd in punt 1a onder (ii) en de berekeningen genoemd in punt 2 onder (ii). Het mapje moet zodanig zijn ingericht dat de bladen gemakkelijk kunnen worden opengeslagen en gebruikt.
6. Het bepaalde in de punten 1 en 4 is alleen van toepassing voor schepen waarvan de kiel na 31 maart 1956 is gelegd.
7. Het bepaalde in de punten 2, 3 en 5 is alleen van toepassing voor schepen waarvan de kiel na 30 september 1965 is gelegd.
- Ⓜ. Voor een schema van de berekening van de stabiliteit van schepen die voor verschillende beladingstoestanden belangrijke trimveranderingen ondergaan, in het bijzonder vissersvaartuigen, zie Bijlage 9.C.

Voorschriften volgens het Schepenbesluit 1965 betreffende de stabiliteit van schepen welke een deklast vervoeren.

Algemene eisen; Hoofdstuk IX, art. 127, lid 1.

1. Het beladen en het stuwen moeten voldoen aan de eisen van goede zee-manschap, zó dat de stabiliteit noch te gering noch te groot wordt en de lading of een gedeelte daarvan niet levendig kan worden.

Deklasten; Hoofdstuk IX, art. 132, lid 2.

2. De deklast mag niet zo zwaar zijn, dat de stabiliteit van het schip erdoor in gevaar wordt gebracht. Bij deklast die door het overnemen van water in gewicht toeneemt, moet met die gewichtstoename rekening worden gehouden.

Sterkte en stabiliteit; Bijlage I, Hoofdstuk V, art. 72.

Het schip moet voldoende sterk zijn met het oog op het gewicht van de deklast en redelijke waarborgen bieden voor voldoende stabiliteit bij het vervoeren van deklasten hout. In verband daarmee kan het Hoofd van de Scheepvaartinspectie de hoogte van de deklast die een schip mag vervoeren, beperken. Deze beperking wordt op het "certificaat voor de houtvaart" aangegeven.

Een deklast van onbeperkte hoogte in de zomer kan slechts worden toegerekend, indien het schip van een dubbele bodem is voorzien. Een dubbele bodem moet, over tenminste de halve scheepslengte, midscheeps van een waterdicht zaathout zijn voorzien.

Stuwen; Bijlage I, Hoofdstuk V, art. 81, lid 2.

2. De deklast mag op generlei wijze de navigatie en het verrichten van noodzakelijke werkzaamheden aan boord belemmeren of gevaar opleveren voor de stabiliteit gedurende de reis, waarbij rekening moet worden gehouden met het verbruik van brandstoffen en voorraden en met het toenemen van het gewicht van de deklast door het opnemen van water. Indien het compenseren van het verbruik geschiedt door het vullen van dubbele bodem tanks, moeten deze gezamenlijk een gewicht aan zeewater kunnen bevatten, dat tenminste gelijk is aan het gehele gewicht van het te verwachten verbruik van de in de dubbele bodem medegevoerde brandstoffen en water, vermeerderd met de helft van het gedurende de reis te verwachten verbruik van vloeistoffen en

vaste brandstoffen uit ruimten tussen het botendek en de dubbele bodem en vervolgens verminderd met de helft van het gewicht van het gedurende de reis te verwachten verbruik van vloeistoffen en vaste brandstoffen uit ruimten boven het bovendek. Ter compensatie voor nat worden van de deklading zal zo nodig bij de aanvang van de reis een speciaal daartoe bestemde dubbele bodemtank van geëigende inhoud ledig moeten worden gehouden.

De indeling van de dubbele bodem moet zodanig zijn, dat aan bovenstaande eisen gemakkelijk kan worden voldaan.

Voorschriften volgens de Bekendmaking aan de Scheepvaart No. 23/1965 betreffende de stabiliteit van kustvaartuigen die een deklast vervoeren.

De Inspecteur-Generaal voor de Scheepvaart,

Overwegende:

dat in de praktijk is gebleken dat de stabiliteit van kustvaartuigen die een deklast vervoerden, in bepaalde gevallen onvoldoende was;

dat dit in het bijzonder het geval was wanneer de deklast op de luikhoofden was geplaatst en de gangboorden niet of niet geheel waren opgevuld;

dat het daarom gewenst is richtlijnen te geven voor het vervoer van dergelijke deklast;

Maakt bekend:

dat bij homogene belading van een kustvaartuig van het "gladdek type" (één-dek schepen met bak en kampanje) en van het "verhoogd halfdek type", waarbij het ruim en de luikhoofden zijn volgestuwd en een deel van de lading als deklast op de luiken is geplaatst, terwijl de gangboorden niet, of niet geheel zijn opgevuld, met de stabiliteit de uiterste voorzichtigheid moet worden betracht;

dat in verband daarmee, behalve de hoeveelheid waterballast in de dubbele bodemtanks, die nodig is voor voldoende stabiliteit van het schip in homogeen beladen toestand zonder deklast, bovendien nog zoveel waterballast in genoemde tanks aanwezig moet zijn als het gewicht van de deklast bedraagt, tenzij de benodigde hoeveelheid waterballast meer nauwkeurig

is vastgesteld aan de hand van stabiliteitsgegevens van het schip, indien deze aan boord beschikbaar zijn.

dat de aanvangsmetacenterhoogte tenminste even groot moet zijn als die welke in volbeladen toestand zonder deklast nodig zou zijn;

Maakt voorts bekend:

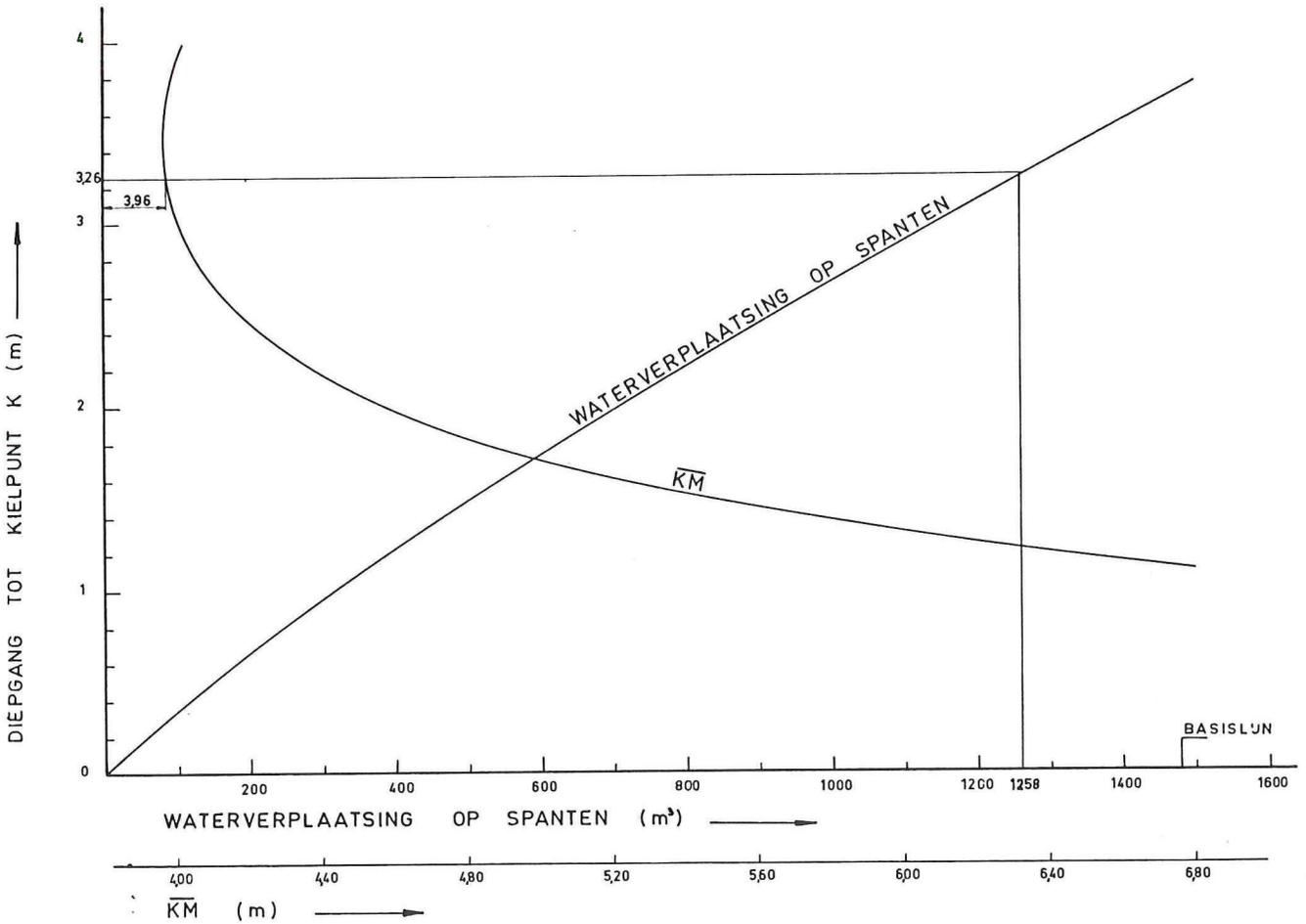
dat indien een wateropzuigende stof zoals bijvoorbeeld cellulose (houtpulp) aan dek is gestuwd, men erop bedacht dient te zijn dat nat en daardoor zwaarder worden van de deklast de stabiliteit in ongunstige zin beïnvloedt. Wateropzuigende ladingen moeten dan ook zoveel mogelijk worden afgedekt met waterdichte kleden, terwijl gewichtstoename van de deklast moet kunnen worden gecompenseerd door het vullen van één of meer dubbele bodemtanks, zonder dat daarbij het maximum draagvermogen wordt overschreden.

INHOUDEN EN ZWAARTEPUNTEN VAN TANKS EN RUIMEN

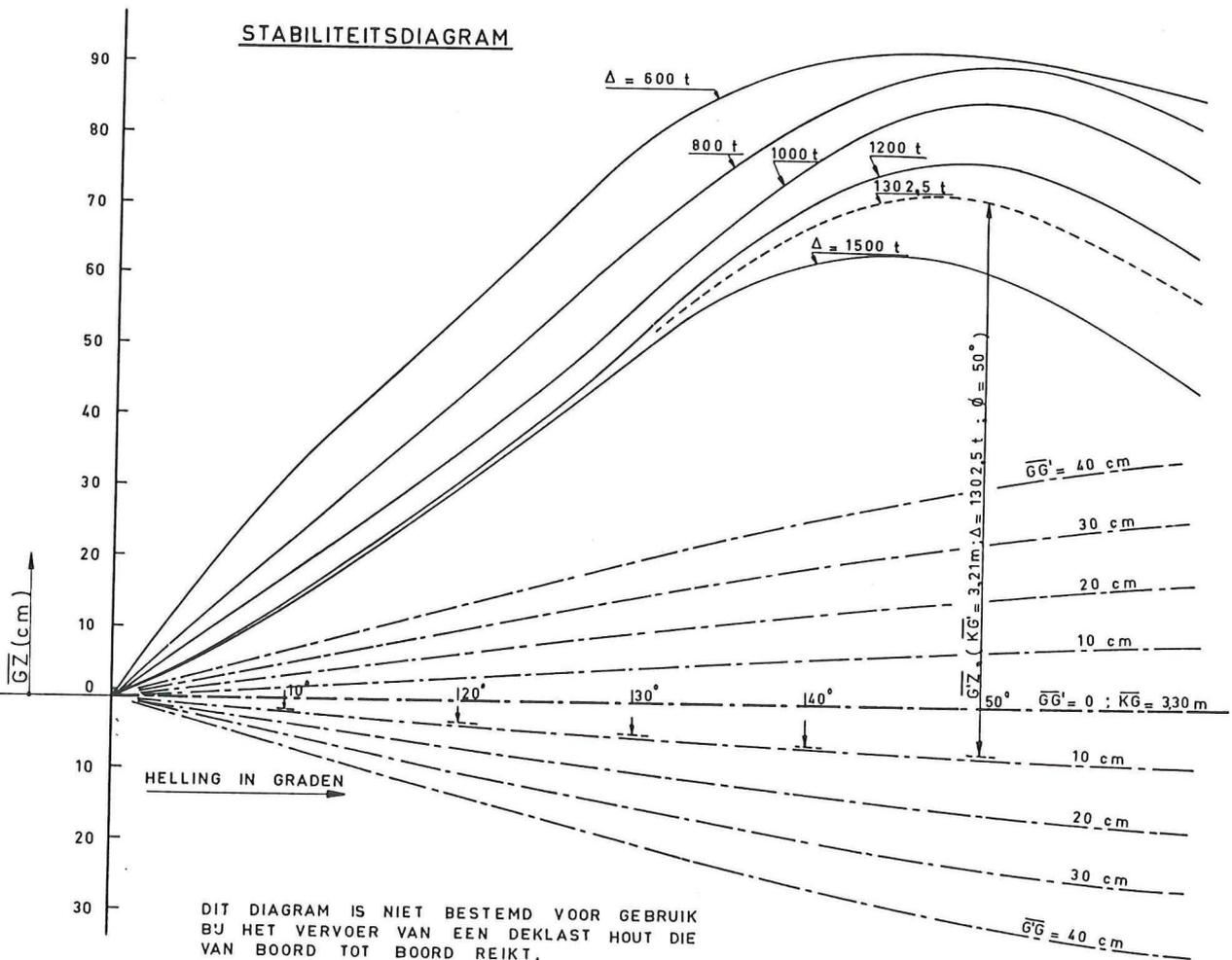
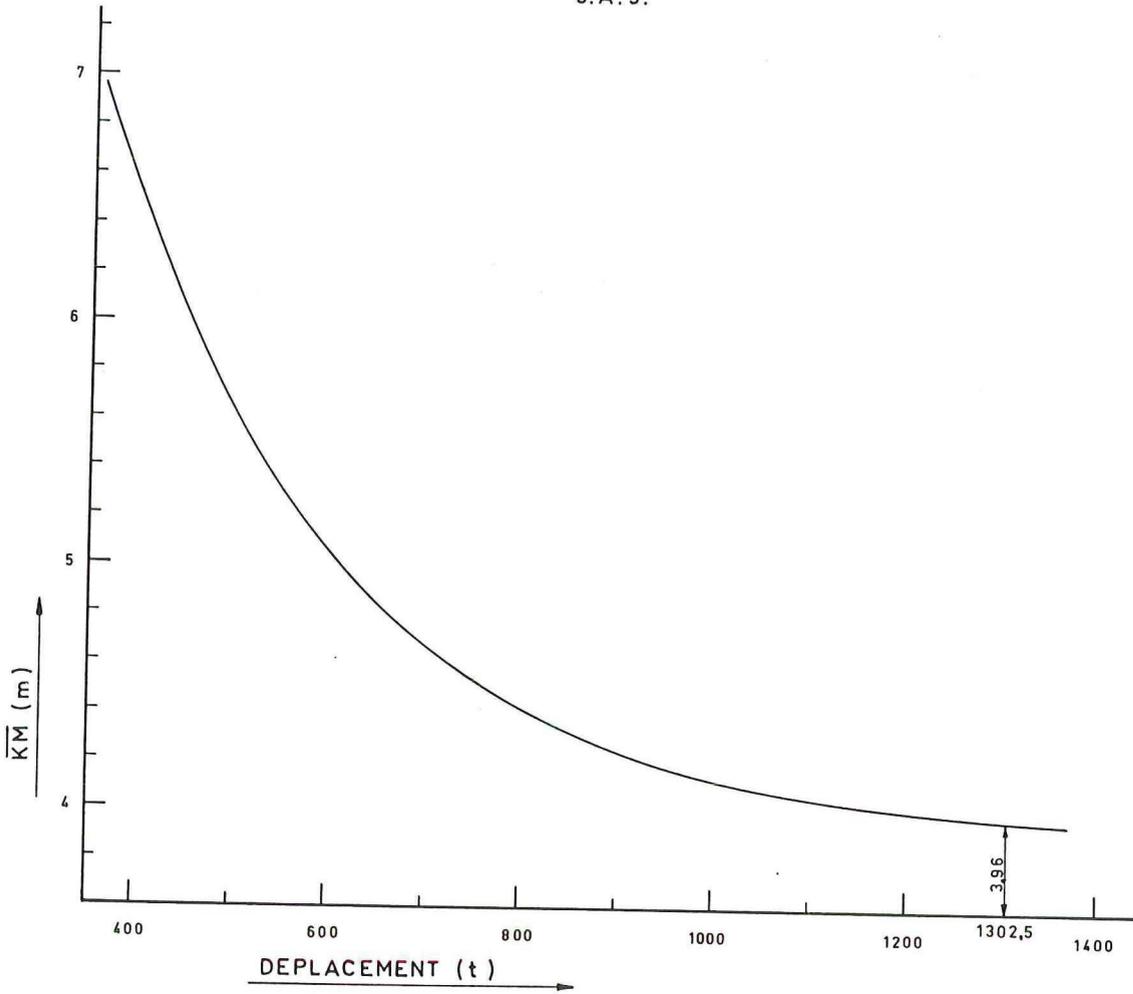
MAXIMALE VERMINDERING VAN  $\overline{GM}$  DOOR VRIJ VLOEISTOFOPPERVLAK IN TANKS BIJ DIVERSE DEPLACEMENTEN

TANK OF RUIM	INHOUD m <sup>3</sup>	⊙ BOVEN BASIS m	BALEN		GRAAN	
			INHOUD m <sup>3</sup>	⊙ BOVEN BASIS m	INHOUD m <sup>3</sup>	⊙ BOVEN BASIS m
VOORPIEKTANK						
D.B. TANK I						
" " II S.B.						
" " II B.B.						
" " III S.B.						
" " III B.B.						
TUNNELTANK						
ACHTERPIEKTANK						
HEKTANK						
RUIM 1						
" 2						
<u>TUSSENDEK</u>						
RUIM 1						
" 2						
LAADHOOFD 1						
" 2						

DEPLACEMENT GELUKLASTIG SCHIF	TANK	MAXIMALE	VERMINDERING	VAN	$\overline{GM}$	(mm)
D.B. TANK I						
" " II S.B.						
" " II B.B.						
" " III S.B.						
" " III B.B.						
TUNNELTANK						
ACHTERPIEKTANK						
HEKTANK						







BIJLAGE 9.B.Voorschriften volgens het Schepenbesluit 1965 betreffende de stabiliteit van passagiersschepen.a. Passagiersschepen.Stabiliteit van schepen in beschadigde toestand, Bijlage II, art. 8.

1. De stabiliteit in onbeschadigde toestand moet in alle voorkomende bedrijfstoestanden toereikend zijn, opdat het schip de eindtoestand kan doorstaan na het lek worden van enige hoofdafdeling, waarvan wordt vereist dat de lengte binnen die van de vulbare lengte blijft.

Wanneer twee aan elkaar grenzende hoofdafdelingen zijn gescheiden door een schot dat trapsgewijze verspringt volgens de bepalingen onder a van het vijfde lid van art. 7, bijlage II, moet de stabiliteit in onbeschadigde toestand voldoende groot zijn om het hoofd te kunnen bieden aan het vollopen van deze twee aan elkaar grenzende hoofdafdelingen.

Wanneer de voorgeschreven indelingsfactor gelijk aan of kleiner dan 0,50 is maar groter dan 0,33, moet de stabiliteit in onbeschadigde toestand voldoende groot zijn, opdat het schip het vollopen van elke twee aan twee aan elkaar grenzende hoofdafdelingen kan doorstaan.

Wanneer de voorgeschreven indelingsfactor gelijk aan of kleiner dan 0,33 is moet de stabiliteit in onbeschadigde toestand voldoende groot zijn, opdat het schip het vollopen van elke drie opeenvolgende hoofdafdelingen kan doorstaan.

2. Ter voldoening aan het bepaalde in het voorgaande lid moeten volledige berekeningen, in overeenstemming met het bepaalde in het derde, vierde en zesde lid van dit artikel, aan het Hoofd van de Scheepvaartinspectie in viervoud ter goedkeuring worden ingezonden. In deze berekeningen moeten de bijzondere kenmerken van het schip, zomede de inrichting en de vorm van de beschadigde afdelingen, in aanmerking worden genomen.

Voorts moet worden aangenomen dat het schip in de voor de stabiliteit meest ongunstige bedrijfstoestand verkeert die kan voorkomen.

Wanneer wordt voorgesteld dekken, een dubbele huid of langsschotten aan te brengen, die het overvloeien van water in ernstige mate zouden belemmeren, moet de invloed hiervan op de berekeningen nauwkeurig worden nagegaan.

3. Voor het maken van berekeningen voor lekstabiliteit moeten in het algemeen de volgende inhouds- en oppervlaktepermeabiliteiten worden toegepast.

In ruimten:

bestemd voor lading, kolen of voorraden	60;
ingenomen door verblijven	95;
ingenomen door machines	85;
bestemd voor vloeistoffen	0 of 95;
welke van de twee de ongunstigste invloed heeft.	

Inhouden en oppervlakken worden berekend tot buitenkant spanten en verstijvingen.

Voor ruimten waarin zich ongeveer ter plaats van de waterlijn na beschadiging geen verblijven of machines van enige omvang bevinden en voor ruimten die in het algemeen niet door hoeveelheden lading of voorraden van enig belang zijn ingenomen, moeten hogere oppervlaktepermeabiliteiten, die ten genoegen zijn van het Hoofd van de Scheepvaartinspectie, worden aangenomen.

4. Als omvang van de beschadiging moet worden aangenomen;

Langsscheeps:

een lengte van 3,05m, vermeerderd met 3% van de lengte van het schip, of een lengte van 10,67m, welke van de twee de kleinste is. Indien de voorgeschreven indelingsfactor gelijk is aan of kleiner is dan 0,33 moet de aangenomen lengte van de beschadiging zoveel groter worden aangenomen, als nodig is opdat elke twee opeenvolgende waterdichte dwarsschotten van waterdichte hoofdafdelingen daarbij zijn betrokken.

Dwarsscheeps:

(binnen boord gemeten vanaf de sloopshuid loodrecht op het vlak van kiel en stevens ter hoogte van de hoogst gelegen indelingslastlijn): een afstand van één vijfde van de breedte van het schip, zoals deze laatste is omschreven in artikel 2 van Bijlage II.

Verticaal:

van de lijn van onderkant spanten naar boven zonder begrenzing.

Indien op een bepaalde plaats een beschadiging van kleinere omvang dan hierboven wordt verondersteld, een gevaarlijker toestand zou veroorzaken met betrekking tot slagzij of verlies aan metacenterhoogte, moet deze beschadiging aan de berekeningen ten grondslag worden gelegd.

5. Onsymmetrisch vollopen moet zoveel mogelijk worden beperkt als in overeenstemming is te brengen met een doelmatige indeling. Wanneer het noodzakelijk is om grote hellingshoeken te corrigeren, moeten de middelen daartoe, indien zulks uitvoerbaar is, automatisch werken, doch wanneer bedieningsmiddelen voor overvloei-inrichtingen aanwezig zijn, moeten deze in ieder geval van boven het schottendek kunnen worden behandeld. Deze overvloei-inrichtingen met hun bedieningsmiddelen, evenals de maximum slagzij die voor het overvloeien ontstaat, moeten de goedkeuring van het Hoofd van de Scheepvaartinspectie kunnen wegdragen. Indien overvloei-inrichtingen nodig zijn, mag de tijd die het overvloeien in beslag neemt niet meer zijn dan 15 minuten. Aan de kapitein van het schip moet een doelmatige gebruiksaanwijzing van overvloei-inrichtingen ter beschikking worden gesteld.

6. Ten aanzien van de toestand waarin het schip zich bevindt na de beschadiging en bij onsymmetrische vollopen nadat overvloeimaatregelen zijn getroffen, geldt het volgende:

- a. bij symmetrische vollopen moet de metacenterhoogte in de eindtoestand tenminste 0,05m bedragen, berekend volgens de methode van constante waterverplaatsing
- b. bij onsymmetrisch vollopen mag de slagzij niet groter zijn dan 7 graden, doch het Hoofd van de Scheepvaartinspectie kan in bijzondere gevallen een grotere slagzij toestaan indien het kenterend moment daartoe noodzaakt; in geen geval mag deze slagzij in de eindtoestand echter groter zijn dan 15 graden;
- c. onder geen voorwaarde mag de indompelingsgrenslijn in de eindtoestand na het vollopen onder water komen. Indien met de mogelijkheid rekening moet worden gehouden dat de indompelingsgrenslijn gedurende het vollopen tijdelijk onder water komt, kan het Hoofd van de Scheepvaartinspectie een onderzoek naar deze mogelijkheid gelasten en zulke maatregelen voorschrijven, als hij voor de veiligheid van het schip noodzakelijk acht.

7. Aan de kapitein van het schip moeten de gegevens ter beschikking worden gesteld die nodig zijn, om in alle voorkomende bedrijfsomstandigheden voor een voldoende stabiliteit in onbeschadigde toestand te kunnen zorgdragen, opdat het schip de meest gevaarlijke beschadiging zal kunnen doorstaan.

De kapitein van een schip waarvan in geval van beschadiging dwars-scheeps overvloeien noodzakelijk is, moet worden ingelicht omtrent de stabiliteitstoestanden waarop de slagzij berekeningen zijn gebaseerd en worden gewaarschuwd dat, in geval van ongunstiger toestand, bij beschadiging een overmatige slagzij zal kunnen optreden.

8. Het Hoofd van de Scheepvaartinspectie is bevoegd verzachtingen van de eisen voor lekstabiliteit in overweging te nemen, indien kan worden aangetoond dat de metacenterhoogte van het onbeschadigde schip in enige toestand van beladen, die noodzakelijk is om te kunnen voldoen aan die eisen te groot zou zijn voor de voorgenomen dienst.

Deze verzachting zal echter slechts in uitzonderingsgevallen mogen worden toegestaan indien aan genoemd Hoofd kan worden aangetoond, dat de afmetingen, inrichting en andere bijzondere kenmerken van het schip de meest gunstige voor de stabiliteit na beschadiging zijn, die op praktische en aannemelijke gronden kunnen worden aanvaard.

9. Indien het noodzakelijk is waterballast in te nemen, moeten hiervoor in het algemeen geen brandstof olietanks worden gebruikt.

Indien om redenen van praktische aard niet kan worden voorkomen dat brandstof olietanks voor ballast water moeten worden gebruikt, moet een olieseparator-installatie aan boord aanwezig zijn, of moeten andere vervangende middelen aanwezig zijn die door het Hoofd van de Scheepvaartinspectie voor het verwerken van met olie vermengd water kunnen worden aanvaard.

Hellingproef; stabiliteitsgegevens voor het schip in onbeschadigde toestand, Bijlage II, art. 21.

1. Elk passagiersschip moet na voltooiing aan een hellingproef worden onderworpen, waarvan de resultaten moeten worden overgelegd. Voorts moeten voldoende nauwkeurige en betrouwbare gegevens betreffende de stabiliteit bij hellingen van het schip worden ingediend, op grond waarvan op een snelle en eenvoudige wijze de stabiliteit van het schip in verschillende gebruikstoestanden kan worden beoordeeld. Deze gegevens moeten aan de kapitein ter beschikking worden gesteld.

2. Indien een schip wijzigingen heeft ondergaan, die van enige invloed zijn op de aan de kapitein afgegeven stabiliteitsgegevens, moeten gewijzigde gegevens ter beschikking worden gesteld. Zonodig moet het schip opnieuw aan een hellingproef worden onderworpen.

Documenten voor het gebruik bij beschadiging van het schip, instructies voor lekstabiliteit, Bijlage II, art. 22.

1. Tekeningen die van elk dek en ruim duidelijk aangeven de begrenzen- de schotten van de waterdichte afdelingen, de openingen daarin met de mid- delen tot sluiting en de bedieningsplaatsen hiervan, zomede de inrichtingen voor de correctie van slagzij als gevolg van vollopen, moeten aan boord blijvend zijn opgehangen ter voorlichting van de officieren van de wacht. Bovendien moeten instructieboekjes die de genoemde gegevens bevatten, ter beschikking van de officieren worden gesteld.

2. Behalve de gegevens als bedoeld in het zevende lid van artikel 8, Bijlage II, moet een instructie ter beoordeling of het schip, in welke bedrijfsomstandigheid ook, kan voldoen aan de eisen die in deze bijlage aan de lekstabiliteit zijn gesteld, aan de kapitein van elk passagiers- schip aan boord ter beschikking staan.

b. Passagiersschepen die in bepaalde gebieden pelgrims of grote aantal- len passagiers, voor wie geen vaste slaapplekken aanwezig zijn, ver- voeren.

Stabiliteit van schepen in beschadigde toestand, Bijlage V, art. 6.

Het gestelde in artikel 8 van Bijlage II van dit besluit moet als volgt worden gelezen:

Indien waterdichte dekken, een dubbele huid of langsschotten worden aangebracht, die het overvloeien van water in ernstige mate zouden belemmeren, moet ten genoegen van het Hoofd van de Scheepvaartinspectie worden aangetoond dat de veiligheid van het schip daardoor in geen enkel opzicht zal worden verminderd. Daarbij moet in het bijzonder acht worden geslagen op de mogelijkheid van het ontstaan van slagzij ten gevolge van het vollopen van gedeelten van het schip ter plaatse van dergelijke constructiedelen.

Hellingproef, stabiliteitsgegevens van het schip in onbeschadigde toestand.

Zie bij passagiersschepen, Bijlage II, art. 21.

Documenten voor het gebruik bij beschadiging van het schip, instructies voor lekstabiliteit, Bijlage V, art. 11,

Het gestelde in artikel 22 van Bijlage II van dit besluit moet als volgt worden gelezen:

Indien het bepaalde in artikel 6 van Bijlage V van dit besluit van toepassing is, moeten tekeningen die voor elk dek en ruim duidelijk aangeven de begrenzendende schotten van de waterdichte afdelingen, de openingen daarin met de middelen tot sluiting en de bedieningsplaatsen hiervan, zomede de inrichtingen voor de correctie van slagzij als gevolg van vollopen, aan boord blijvend zijn opgehangen ter voorlichting van de officieren van de wacht. Bovendien moeten instructieboekjes die de genoemde gegevens bevatten, ter beschikking van de officieren worden gesteld.

Bijlage 9.C.

Voorschriften betreffende het schema voor de berekening van de stabiliteit van schepen die voor verschillende beladingstoestanden belangrijke trimveranderingen ondergaan, in het bijzonder vissersvaartuigen volgens de Voorschriften voor Vissersschepen.

Voor deze schepen voldoen het carènediagram en de crosscurves als regel niet omdat al deze krommen voor de gelijklastige toestand worden bepaald.

Het gaat er dus om, het carènediagram op een zodanige wijze om te werken dat het geschikte en betrouwbare gegevens oplevert voor de stabiliteitsberekening. Hoe dit kan gebeuren blijkt uit bijgaande witdrukken 9.C.1 en 9.C.2.

Dit carènediagram is gebaseerd op de Bonjean-krommen en het spantenraam waarmee voor tenminste 4 verschillende trimtoestanden, die zo gekozen moeten worden, dat elke te verwachten trimligging er ruimschoots binnenvalt, de volgende krommen worden bepaald: waterverplaatsing, drukkingpunt in hoogte en lengte en de hoogte van het metacenter.

Met behulp van de vier hulpdigrammen wordt vervolgens bepaald: het verband tussen de diepgang op de ALL, trim en waterverplaatsing, drukkingpunt in lengte en metacenter boven de kiel. Wanneer nu, zoals bijvoorbeeld bij de hellingproef, de diepgangen voor en achter bekend zijn, kan men aan de hand van deze gegevens de waterverplaatsing,  $B$  in lengte en  $\overline{KM}$  bepalen.

Gaat men vervolgens vanuit de hellingproeftoestand verschillende beladingstoestanden berekenen, waarbij men dan door berekening de nieuwe waterverplaatsing en plaats van het drukkingpunt in lengte vindt, dan kan men uit het carènediagram aflezen: diepgang op ALL, de trim en  $\overline{KM}$ . Het verloop van de berekening van de stabiliteit kan dus als volgt zijn:

1. Carènediagram volgens bijgaand voorbeeld.
2. Hellingproef waarvan protocol moet worden opgemaakt.
3. Berekening waterverplaatsing en drukkingpunt van diverse en in het volgende aan te geven beladingstoestanden.
4. Voor de sub 3 genoemde beladingstoestanden op de gebruikelijke wijze de krommen van armen van statische stabiliteit bepalen.

Ad 3 en 4.

Daar de gegevens niet voor alle schepen aan boord behoeven te zijn en dus van de kapitein niet altijd verwacht wordt, dat hij met de stabiliteitsgegevens gaat werken, dienen de stabiliteitsgegevens zó te zijn dat de Scheepvaartinspectie een zo goed mogelijk inzicht krijgt in de normaal voorkomende omstandigheden. Als zodanig dienen van de volgende kenmerkende bedrijfstoestanden de armen van statische stabiliteit te worden bepaald:

I. Uitvaart haven met bestemming visgronden.

Voor deze toestand moet gerekend worden dat het schip volledig is uitgerust, alle brandstoftanks of bunkers, voedingwatertanks en drinkwatertanks geheel gevuld zijn en dat het schip de voor de betreffende categorie schepen gebruikelijke hoeveelheid ijs of zout aan boord heeft.

II. Aankomst op visgronden.

Het verschil tussen deze toestand en toestand I bestaat uitsluitend in het verbruik van brandstof, voedingwater, drinkwater voorraden enz. en ook in het smelten van ijs. Dit verbruik is afhankelijk van de duur van de reis. Daar deze factor zelfs voor gelijke schepen sterk kan variëren, dient hiervoor een waarde te worden aangenomen. Deze waarde wordt het beste bepaald door de maximaal te verwachten reisduur.

Deze dient te worden gesteld op 7 dagen, tenzij kan worden aangetoond dat het schip nimmer reizen zal maken naar visgronden die zó ver van de thuishaven verwijderd zijn.

Het smelten van ijs dient voor deze toestand gesteld te worden op een gewichtsverlies van 10%.

III. Vertrek van visgronden.

De duur van het verblijf op de visgronden is vaak wel met enige zekerheid vast te stellen. Voor het doel van de stabiliteitsberekening dient rekening te worden gehouden met een extreme toestand, namelijk een verblijf op de visgronden, dat zó lang is, dat met een reserve van 2 dagen de thuishaven kan worden bereikt.

Uitgaande van de reisduur van 7 dagen moet dus voor toestand III gerekend worden met een resterende hoeveelheid brandstof, voedingwater, drinkwater en voorraden voor 9 dagen. Ook in deze toestand is weer meer ijs gesmolten zodat gerekend moet worden met een verlies van 30% ten opzichte van toestand I.

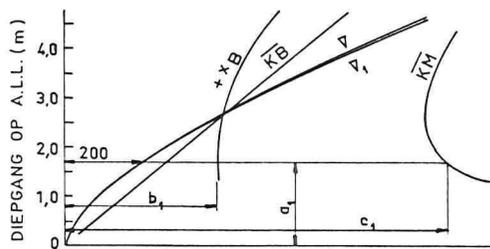
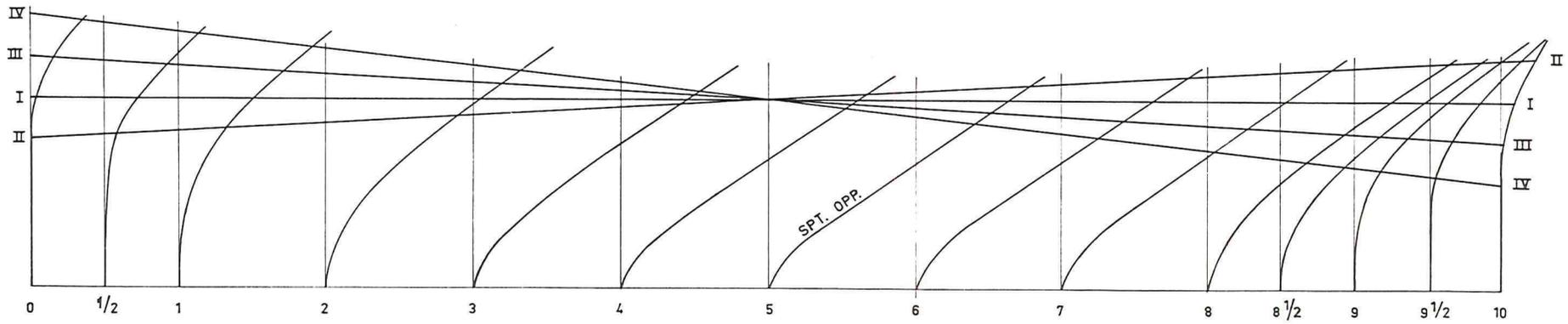
Bovendien moet het resterende gewicht van het ijs over het gehele visruim verdeeld worden. Bij schepen die geen ijs doch zout gebruiken, moet in deze toestand het gewicht van het zout eveneens over het gehele ruim worden verdeeld.

Tijdens het verblijf op de visgronden komt er lading in het ruim. Ook hiervoor moet weer met het "ongunstigste" worden gerekend, namelijk dat het ruim gedurende het verblijf op de visgronden geheel gevuld wordt dat wil zeggen dat het ruim zoveel manden vis of kantjes bevat als waarvoor het werd ontworpen.

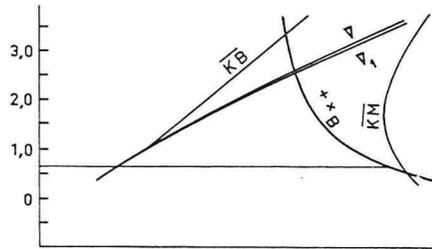
IV. Aankomst thuishaven.

Deze toestand onderscheidt zich van toestand III alleen door nog verder verbruik van brandstof, voedingwater, drinkwater en voorraden en door nog verder gaand gewichtsverlies door het smelten van ijs. Voor deze toestand moet gerekend worden met een rest aan brandstof e.d. voor 2 dagen.

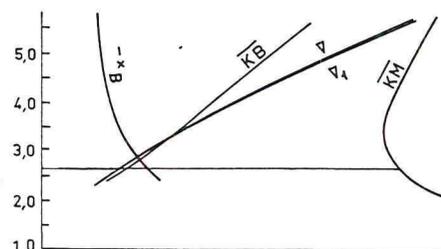
Van het ijs moet men aannemen, dat nu 45% van de oorspronkelijke hoeveelheid (toestand I) is gesmolten.



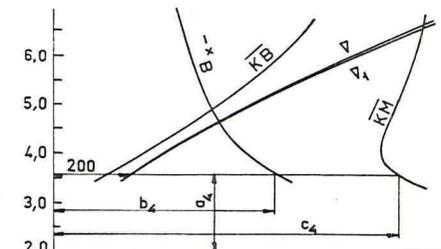
GELUKLASTIG W.L. I-I



2,0m KOPLASTIG W.L. II-II



2,0m STUURLASTIG W.L. III-III



4,0m STUURLASTIG W.L. IV-IV

∇ = VOLUME

∇₁ = VOLUME MET AANHANGSELS

DIAGRAM TER BEPALING VAN  $\nabla_1$  BU GEGEVEN DIEPGANG OP ALL. EN TRIM.

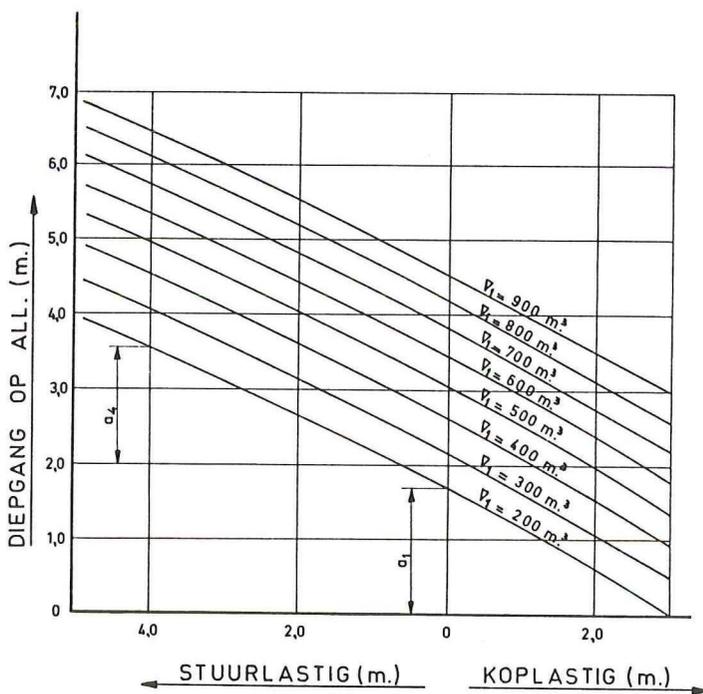
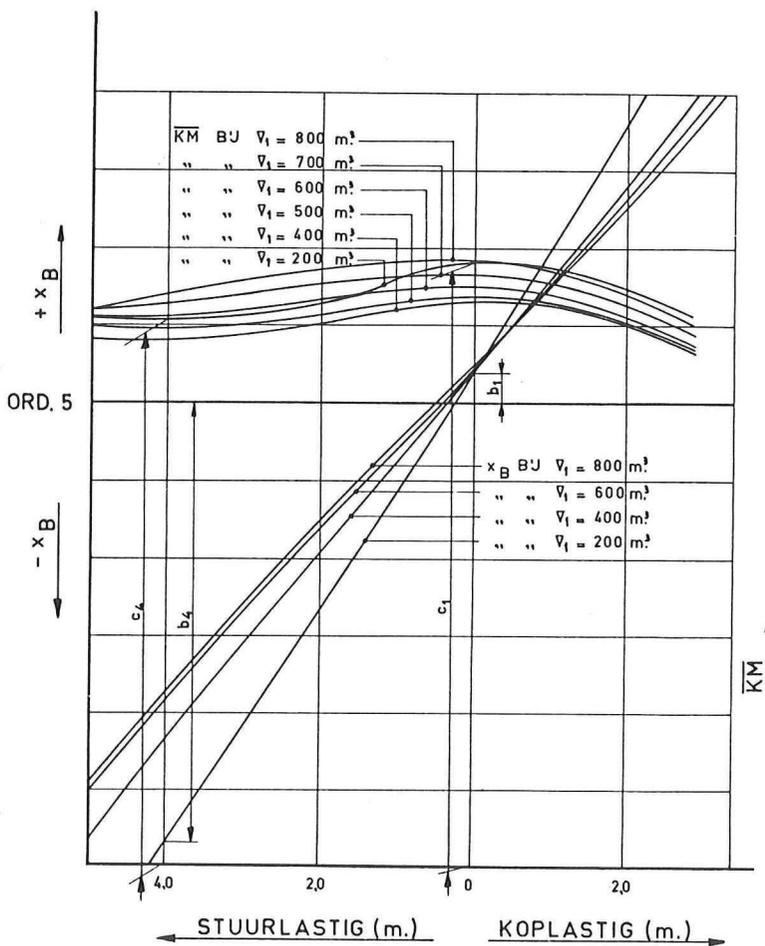
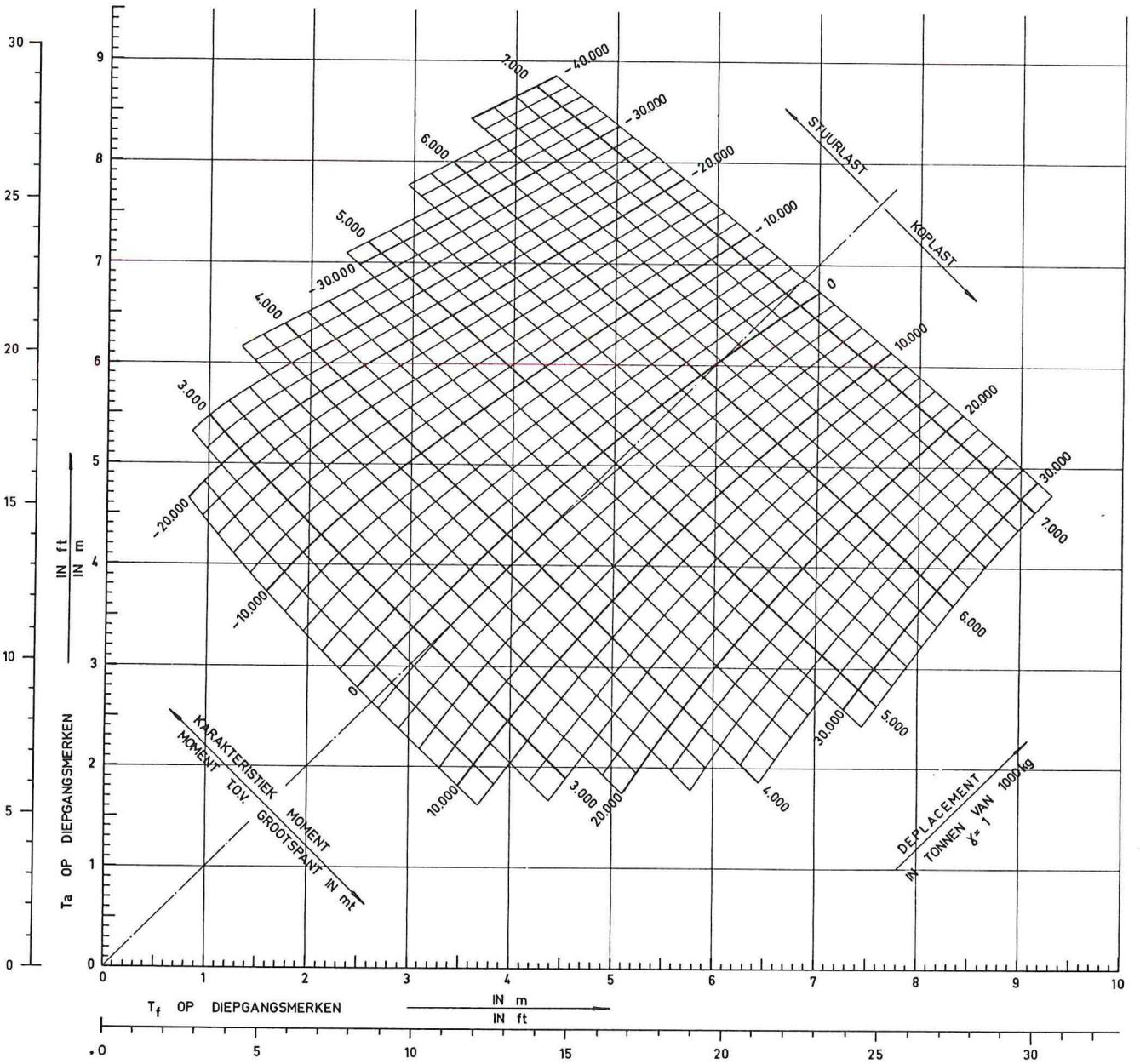
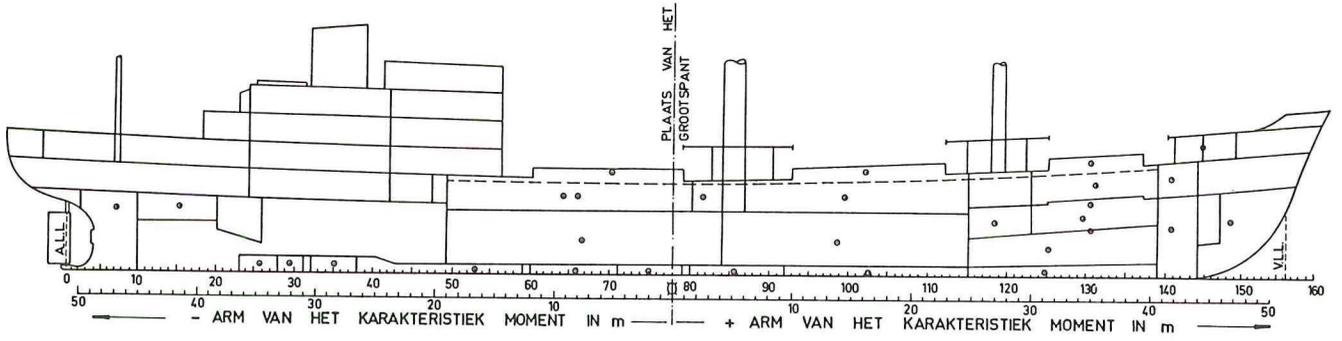


DIAGRAM TER BEPALING VAN  $\overline{KM}$  EN  $x_B$  T.O.V. ORD. 5 BU GEGEVEN  $\nabla_1$  EN TRIM.





TRIMDIAGRAM

# Die Durchführung von Leckrechnungen im Schiffsentwurf

Dipl.-Ing. K. Knüpfner, Hannover \*)

*Leckrechnungen geben Aufschluß über das Verhalten eines Schiffes in beschädigtem Zustand. Man führt sie für eine Anzahl von angenommenen Leckfällen des Schiffes durch, um dessen Sicherheit gegen Sinken und Kentern beurteilen und danach beeinflussen zu können. Leckrechnungen sind wegen ihres erheblichen numerischen Aufwandes unübersichtlich und äußerst langwierig. Zudem liefern sie erst in einem weit fortgeschrittenen Entwurfsstadium ausreichend genaue und vollständige Ergebnisse.*

*Im vorliegenden ersten Teil dieser Arbeit wird nach einer Übersicht über die bekannten Methoden der Leckrechnung beschrieben, wie durch den Einsatz elektronischer Rechenanlagen (IBM 650) der Zeit- und Arbeitsaufwand bei Leckrechnungen weitgehend wegfällt.*

*Mit den im Rahmen dieser Arbeit aufgestellten Programmen für den Elektronenrechner wurden systematische Leckrechnungen an verschiedenen normalen Schiffen durchgeführt, deren Auswertung zur Aufstellung von Entwurfsdiagrammen geführt haben.*

*Diese Entwurfsdiagramme für das Leckverhalten von Schiffen ermöglichen bereits in einem frühen Stadium des Entwurfes praktisch ohne Rechnung eine Beurteilung der wasserdichten Unterteilung im Hinblick auf Lecks. Die Diagramme, ihre Aufstellung und Handhabung, Betrachtungen über die durch sie erreichbare Genauigkeit sowie zahlreiche Beispiele sind der Inhalt des zweiten Teils dieser Arbeit, der demnächst ebenfalls in dieser Zeitschrift erscheinen wird.*

## I. Einleitung

Wird ein Schiff beschädigt, so ist die Wahrscheinlichkeit, daß es auch bei Wassereintrich schwimmfähig gehalten werden kann, abhängig von der wasserdichten inneren Unterteilung des Schiffskörpers. Eine solche Unterteilung, insbesondere durch wasserdichte Querschotte, ist für die Sinksicherheit des Schiffes nur dann wirksam, wenn nachgewiesen werden kann, daß nach Überflutung einzelner wasserdicht begrenzter Abteilungen oder Abteilungsgruppen das Schiff noch stabil schwimmen kann. Diesen Nachweis, der fast immer rechnerisch geführt wird, nennt man Leckrechnung.

Die Aufgabe, das Verhalten eines teilweise überfluteten Schiffes vorauszubestimmen, scheint nach den Hinweisen im Schrifttum zuerst von Middendorf in der uns heute geläufigen Weise untersucht worden zu sein. Nach dem Untergang des Schnelldampfer „Elbe“ 1895 hat Middendorf in [1]<sup>1)</sup> bereits die bei Flutung von Räumen mit verschiedenartig zusammengesetztem innerem Aufbau auftretenden gefährlichen Erscheinungen angegeben und vernünftige Gegenmaßnahmen vorgeschlagen. 1897 erschienen die Vorschriften der Deutschen Seeberufsgenossenschaft über wasserdichte Schotte für Post- und Passagierdampfer (beschrieben in [2]). Hiernach wird die Stellung der Schotte beim Entwurf bestimmter Schiffstypen nicht mehr der Willkür überlassen, sondern es müssen festgelegte Bedingungen über höchstens zulässige Eintauchung des Schiffes berücksichtigt werden. Dies geschieht in einer Sonderaufgabe der Leckrechnung, die als „Schottenrechnung“ bekannt ist. Sie besteht in der Aufstellung der „Kurve der flutbaren Längen“ (Schottkurve). Der Vorteil dieser Art der Leckuntersuchung ist die Eindeutigkeit, mit der sich zulässige Schottstellungen ohne großen Aufwand und ohne genaue Kenntnis der inneren Gestaltung der Einzelräume im Vorwege

bestimmen lassen. Ihr Nachteil ist die Vernachlässigung der Querneigungen und der Querstabilität des Schiffes. Sie lassen sich allerdings nur bei bereits festgelegter Schottstellung und Anordnung der Einzelräume im Schiff genügend genau bestimmen, was mit sehr viel größerem Aufwand verbunden ist. Dieser Mangel war bereits Middendorf bekannt. In den Jahren 1912 bis 1915 wies Flämm in einer Reihe von Arbeiten [2, 3, 4] und Diskussionsbeiträgen immer wieder auf die Unzulänglichkeiten der Schottenrechnung hin und forderte ausführlichere Leckrechnungen. Trotzdem verging noch fast ein halbes Jahrhundert, bis schließlich im Internationalen Schiffssicherheitsvertrag von 1948 [6] der Nachweis ausreichender Schwimmfähigkeit und Stabilität von beschädigten Fahrgastschiffen vorgeschrieben wurde.

Es wäre übertrieben, die verhältnismäßig späte Einführung der Berechnung der Stabilität beschädigter Schiffe mit der Scheu vor allzu großem Rechenaufwand erklären zu wollen. Doch kann man sicher annehmen, daß die Schwierigkeiten der praktischen Durchführung von vollständigen Leckrechnungen bei den meisten der um die Schiffssicherheit bemühten Fachleute Unsicherheiten über die etwaigen Auswirkungen von Stabilitätsforderungen hervorriefen. Diese Leckrechnungen, deren Grundlagen zwar längst bekannt waren, ließen sich nicht so leicht überblicken wie etwa die Schottkurve. Es war unklar, was man fordern sollte, um befriedigende Sicherheit im Leckfall zu erreichen, und auch, was man fordern konnte, ohne die Wirtschaftlichkeit der Schiffe und ihr Seeverhalten zu sehr zu beeinträchtigen.

In diesem Sinne muß man die mit dem Untergang des Schnelldampfers „Titanic“ im Jahre 1912 einsetzenden Bemühungen um ein internationales Übereinkommen zum

<sup>1)</sup> Die eckigen Klammern beziehen sich auf das Schrifttumsverzeichnis am Schluß der Arbeit.

\*) Von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Hochschule Hannover genehmigte Dissertation. Bericht: Prof. Dr.-Ing. K. Wendel, Prof. Dr.-Ing. e. h. Dr.-Ing. G. Weinblum. Eingereicht am 10. Januar 1961, mündliche Prüfung am 8. März 1961.

Schutze des menschlichen Lebens auf See betrachten. Es fanden internationale Schiffssicherheitskonferenzen in den Jahren 1913, 1929, 1948 und 1960 statt. Keine von ihnen vermochte es, alle an sie herangetragenen Probleme zu lösen, alle Wünsche und Forderungen zu erfüllen. Wenn seit 1948 ungefähr all das eine internationale gesetzliche Regelung erfahren hat, was Flamm seinerzeit forderte, so ist das weniger ihm als den Arbeiten der Amerikaner Niedermair [7], Macmillan und Comstock [8] sowie Russo und Robertson [9] zu verdanken, die neben einer übersichtlichen Darstellung der auftretenden Erscheinungen im Leckfall in Bildern und Diagrammen erstmalig genaue Rechenanleitungen zur praktischen Durchführung von Leckrechnungen angaben. Auch die Erfahrungen mit der großen Zahl von Schiffsuntergängen im zweiten Weltkrieg haben dazu beigetragen, daß Leckstabilitätsvorschriften in den Vertragstext des Jahres 1948 aufgenommen wurden.

Nachdem jetzt auch in den Internationalen Schiffssicherheitsvertrag die Bestimmung eingefügt wurde, daß eine Beschädigung des Doppelbodenbereiches der Schiffe in die Leckrechnungen einzubeziehen ist, — hierdurch müssen die Untersuchungen auch der ganzen Vielfalt unsymmetrischer Tankflutungen Rechnung tragen — kann man die heute an den Entwurfsingenieur gestellte Aufgabe, ein Schiff richtig zu unterteilen, wohl als die umfangreichste und schwierigste Teilarbeit im Schiffsentwurf ansehen.

Dabei ist die Leckrechnung selbst eine recht einfache Aufgabe der Mechanik. Sie besteht lediglich aus Betrachtungen über das Gleichgewicht der auf das Schiff wirkenden Kräfte und deren Momente. Einzig die Durchführung solcher Rechnungen ist schwierig und zeitraubend wegen der Eigentümlichkeiten der Schiffsform, wegen der inneren baulichen Gestaltung der überfluteten Bereiche des Schiffskörpers und schließlich wegen der Mannigfaltigkeit der möglichen Flutungen.

Es ist das Ziel dieser Arbeit, den mit einer Leckrechnung verbundenen Aufwand zu verringern. Darüber hinaus soll sie dem Entwurfsingenieur Anhaltspunkte für eine möglichst wirksame Unterteilung der Schiffe liefern und ihn damit in die Lage versetzen, die Schotte bereits in einem früheren Entwurfsstadium richtig zu stellen.

Es sei betont, daß die Leckrechnung und damit auch die vorliegende Arbeit im Hinblick auf die Beurteilung und die Bemessung der Sicherheit eines Schiffes bei Beschädigungen eine Teilaufgabe darstellt, deren Lösung allein nicht ausreicht, über die tatsächlich vorhandene Sicherheit eines Schiffes auszusagen. Den Rahmen für eine umfassende Behandlung der Sicherheit verletzter Schiffe im Sinne einer Wahrscheinlichkeit des Überstehens von Verletzungen hat Wendel in seiner grundlegenden Arbeit [10] gesteckt. In diesem größeren Zusammenhang gesehen, ist die Leckrechnung nichts weiter als eine Nebenrechnung, die ärgerlicherweise mehr Zeit in Anspruch nimmt, als ihr zukommt.

## II. Übersicht über die Methoden der Leckrechnung

### 1. Grundlagen

In einer Leckrechnung wird untersucht, wie sich eine angenommene Schwimmelage eines Schiffes ändert, wenn eine Abteilung oder Abteilungsgruppe überflutet wird. Hierin ist für die neue Schwimmelage die Untersuchung der Stabilität eingeschlossen.

In einem stabil schwimmenden Schiff herrscht bezüglich aller wirkenden Kräfte und Momente Gleichgewicht in einer bestimmten Schwimmelage. Die bei Beschädigung eindringende Leckwassermenge führt einen neuen Gleichgewichtszustand in einer anderen Schwimmelage — der Endschwimmelage — herbei, in der die Wasseroberfläche im Leckraum ebenso hoch wie

der äußere Wasserspiegel liegt. Auf dem Wege bis dahin werden mehr oder weniger rasch Zwischenzustände der Flutung durchlaufen. Die Änderung der wirkenden Gewicht- und Auftriebskräfte während des Flutvorgangs hat eine zusätzliche Eintauchung des Schiffskörpers zur Folge. Die Änderung der wirkenden Momente dieser Kräfte ist im allgemeinen mit Drehungen des Schiffskörpers um die Längs- und Querachse verbunden.

Zur Ermittlung der Schwimmelage während und nach angenommenen Flutungen geht man zweckmäßig schrittweise vor. Zunächst werden Eintauchung und Drehungen um die Querachse (Vertrimmungen) behandelt. Anschließend wird die Querstabilität des Schiffes in der neuen Schwimmelage behandelt, woraus sich Neigungen um die Längsachse (Krängungen) bestimmen lassen.

Ein Teil der hierbei auftretenden Kräfte und ihre Angriffspunkte hängen lediglich von der Form des Schiffes und der inneren Raumaufteilung ab. Sie können eindeutig bestimmt werden. Die Lage des Gewichtsschwerpunktes  $G$  dagegen hängt von der Verteilung der Gewichte im Schiff ab. Die genaue Bestimmung der Lage von  $G$  ist im Entwurfsstadium so gut wie unmöglich. Zudem ist sie, selbst beim fertigen Schiff, beträchtlichen Schwankungen unterworfen, je nach dem Beladungszustand des Schiffes.

Daher geht man bei Leckrechnungen in der Regel so vor, daß man die Lage von  $G$  nicht zu einer Voraussetzung der Rechnung, sondern zu ihrem Ergebnis macht. D. h. man berechnet Grenzlagen des Gewichtsschwerpunktes, bei denen gewisse vorgegebene Bedingungen über Eintauchung, Neigung und Stabilität im Leckfall gerade erfüllt sind. Auf diese Weise wird die ganze Leckrechnung zu einer rein geometrischen Aufgabe, was der praktischen Durchführung sehr zugute kommt. Ob die errechnete Grenzlage für  $G$  bei der praktischen Bauausführung sowie im Betrieb des Schiffes eingehalten werden kann, ist eine Frage, die nicht mehr zur Leckrechnung gehört.

Im einzelnen ergibt sich daraus folgendes: Die Koordinate des Punktes  $G$  in Schiffslängsrichtung ist durch die Wahl der Ausgangsschwimmelage  $WL_0$  eindeutig festgelegt. Sie stimmt mit der Längskoordinate des Formschwerpunktes  $F$  überein; anderenfalls würde zwischen den beiden in der Ausgangslage  $WL_0$  einzig betrachteten Kräften  $P$  und  $A$  ein Kräftepaar entstehen und  $WL_0$  wäre keine Gleichgewichtslage. Der Punkt  $F$  aber kann aus der Form des eintauchenden Schiffskörpervolumens berechnet werden.

Die zulässige größte Koordinate des Punktes  $G$  der Höhe nach erhält man durch die Untersuchung der Querstabilität des lecken Schiffes. Dabei sind symmetrische und unsymmetrische Überflutungen zu unterscheiden. Bei Flutungen symmetrisch zur Symmetrieebene des Schiffes wird eine mindestens erforderliche Stabilität des lecken Schiffes in aufrechter Lage vorgegeben, bei unsymmetrischen Flutungen werden der Rechnung höchstens zulässige Krängungen zugrunde gelegt.

Zur Beurteilung der Querstabilität sowie zur Berechnung von Neigungswinkeln eines Schiffes dient die Hebelarmkurve  $h(\varphi)$ .  $h$  ist für jede Neigung  $\varphi$  der Hebelarm des aufrichtenden Kräftepaars zwischen Gewichtsvektor  $P$  und Auftriebsvektor  $\gamma \cdot V$ . Im Bereich kleiner Neigungswinkel  $\varphi$  läßt sich die Hebelarmkurve durch ihre Tangente im Ursprung  $\overline{MG} \cdot \varphi$  ersetzen. Die Metazentrische Höhe  $\overline{MG}$  ist also annähernd proportional dem rückdrehenden Moment, welches das Schiff einer kleinen Neigung entgegengesetzt.  $\overline{MG}$  ist somit ein Maß für die Stabilität des Schiffes in aufrechter Schwimmelage. Für die Bestimmung von  $\overline{MG}$  gilt:

$$\overline{MG} = \overline{KF} + \overline{MF} - \overline{KG}. \quad (1)$$

Hierin ist:

$$\overline{KF} = \frac{M_H}{V}$$

$$\overline{MF} = \frac{J_B}{V}$$

Eine symmetrische Überflutung von Abteilungen eines Schiffes hat eine Änderung von  $\overline{MG}_0$  um den Betrag  $\Delta\overline{MG}$  zur Folge.  $\Delta\overline{MG}$  ist in vielen Fällen negativ, d. h.  $\overline{MG}_1$  des beschädigten Schiffes in der Endschwimmlage ist oft wesentlich kleiner als  $\overline{MG}_0$  der Ausgangsschwimmlage: Legt man einen Grenzwert für  $\overline{MG}_1$  fest —  $\overline{MG}_{1\text{mind}}$  —, so kann Gleichung (1) geschrieben werden:

$$\overline{KG}_1 \leq \overline{KF}_1 + \overline{MF}_1 - \overline{MG}_{1\text{mind}}. \quad (2)$$

Hierin können die Strecken  $\overline{KF}_1$  und  $\overline{MF}_1$  der Endschwimmlage aus der Geometrie des Schiffskörpers berechnet werden.  $\overline{MG}_{1\text{mind}}$  wird vorgegeben. Damit ist für die Höhenlage des Gewichtsschwerpunktes  $\overline{KG}_1$  ein Grenzwert angegeben.

Handelt es sich um unsymmetrische Flutungen oder werden sonstige kippende Momente (Winddruck, Ladungsverschiebung, Überlaufen von Personen usw.) berücksichtigt, so sind Krängungen des Schiffes zu erwarten. Die geneigte Lage des Schiffes ist eine Gleichgewichtslage, in der die Summe der kippenden Momente  $M_k$  gleich dem aufrichtenden Moment  $M_a$  ist. Die Momente ersetzt man gern durch ihre auf das Schiffsgewicht  $P$  bezogenen Hebelarme. Man kann also den sich einstellenden Neigungswinkel bestimmen, indem man die Hebelarmkurve der kippenden Momente  $k(\varphi) = \frac{M_k(\varphi)}{P}$  mit der

Hebelarmkurve der aufrichtenden Momente  $h(\varphi) = \frac{M_a(\varphi)}{P}$  zum Schnitt bringt.

Bei Leckrechnungen ist oft ein Grenzneigungswinkel  $\varphi_G$  vorgegeben, über den hinaus das Schiff nicht krängen darf, z. B. damit die Oberkanten der Schotte an der eintauchenden Schiffseite nicht überspült werden. Damit wird eine bestimmte Hebelarmkurve  $h(\varphi)$  erforderlich, welche die vorgegebene Kurve der krängenden Hebelarme  $k(\varphi)$  gerade in dem gewünschten Punkte  $\varphi_G$  schneidet. Die Gestalt der Hebelarmkurve  $h(\varphi)$  für einen bestimmten Schwimmlagezustand ist aber nur abhängig von der Steigung ihrer Tangente im Ursprung. Die Hebelarmkurve, die gerade den Schnittpunkt  $\varphi_G$  ergibt, sei durch  $\overline{MG}_\varphi$  gekennzeichnet. Man kann dann in Gleichung (2)  $\overline{MG}_{1\text{mind}}$  ersetzen durch  $\overline{MG}_\varphi$  und erhält für diesen Leckfall mit der gewünschten Grenzneigung  $\varphi_G$  einen Grenzwert für die Höhenlage des Gewichtsschwerpunktes  $\overline{KG}_1$ :

$$\overline{KG}_1 \leq \overline{KF}_1 + \overline{MF}_1 - \overline{MG}_\varphi. \quad (3)$$

Leckrechnungen lassen sich nach zwei voneinander abweichenden Vorstellungen durchführen, die mit „wegfallender Auftrieb“ und „hinzukommendes Gewicht“ bezeichnet werden.

## 2. Wegfallender Auftrieb

Bei der Anschauung wegfallender Auftrieb stellt man sich vor, daß die überfluteten Räume zum Auftrieb des Schiffes keinen Beitrag mehr leisten; hingegen bleiben das Gewicht des Schiffes und die Lage seines Gewichtsschwerpunktes unverändert. Die eigentlichen Berechnungen beziehen sich auf den verbliebenen Restschiffskörper.

Zunächst sei die erste Teilaufgabe, die Bestimmung von Eintauchung und Vertrimmung nach dieser Anschauung betrachtet. Man kann dabei auf verschiedene Weise vorgehen [7, 8, 9, 11] [12, 13, 31]. Die meisten dieser Methoden sind mehr

oder weniger genaue Näherungslösungen. Die genaueste Methode ist in [8], Seite 184, angegeben. Es handelt sich um ein Iterationsverfahren, bei dem zunächst die vermutliche Endschwimmwasserlinie geschätzt oder durch ein Näherungsverfahren bestimmt wird. Für diese Wasserlinie  $WL_1$  werden die Verdrängung des Restschiffskörpers  $V_1 - \alpha v_1$  und das Volumenmoment des Restschiffskörpers bezogen auf eine beliebige vertikale Achse in der Symmetrieebene des Schiffes  $M_{L1} - \alpha m_{L1}$  bestimmt. Da das Schiffsgewicht sowie der Gewichtsschwerpunkt unverändert bleiben, muß im neuen Gleichgewichtszustand gelten:

$$\begin{aligned} V_1 - \alpha v_1 &= V_0 \\ M_{L1} - \alpha m_{L1} &= M_{L0}. \end{aligned} \quad (4)$$

Ist in der angenommenen Schwimmwasserlinie  $WL_1$  noch kein Gleichgewicht erreicht, also Gleichung (4) noch nicht hinreichend genau erfüllt, so muß man die Rechnung für eine neue korrigierte Schwimmlage  $WL_2$  und notfalls für weitere Schwimmlagen wiederholen. Diese Korrekturen werden je nach Größe und Vorzeichen der Abweichungen sowohl in einer vertikalen Verschiebung als auch in einer Verdrehung des Schiffes bestehen müssen.

Diese Methode ist als Probe für alle auf andere Weise ermittelten Leckschwimmlagen zu empfehlen. Dabei genügt meist ein Schritt der Iteration. Häufig zeigen sich dabei überraschend große Ungenauigkeiten der angewandten üblichen Näherungsmethoden, etwa bei Benutzung des sogenannten Einheitstrimmomentes [31]. Man sollte deshalb die meisten der gebräuchlichen Methoden lediglich als Hilfe zur besseren Schätzung der Endschwimmlage für diese genaue Rechnung ansehen, sofern es auf die Genauigkeit der Resultate ankommt.

Es sei hier noch ein Verfahren des Verfassers erwähnt, mit dem sich eine ähnliche Genauigkeit für Eintauchung und Trimm erzielen läßt [13]. Es ist dies ein mehr graphisches Verfahren, das ebenfalls auf einer Iterationsrechnung beruht.

Die zweite Teilaufgabe der Leckrechnung, die Untersuchung von Stabilität und Krängungen in der eingetauchten und vertrimmten Schwimmlage wird nach der Vorstellung wegfallender Auftrieb wie folgt bearbeitet:

Zunächst fragt man nach dem Einfluß der Überflutung auf  $\overline{MG}$ .  $\overline{MG}$  ändert sich um die Strecke  $\Delta\overline{MG}$ , die sich wegen der unveränderten Lage des Gewichtsschwerpunktes  $G$  allein aus der Veränderung der Lage des Metazentrums  $M$  ergibt. Es gilt:

$$\Delta\overline{MG} = \Delta\overline{MF} + \Delta\overline{KF} \quad (5)$$

Mit den Beziehungen  $\overline{MF} = J_B/V$ ;  $\overline{KF} = M_H/V$  gilt für die Änderung dieser Größen:

$$\begin{aligned} \Delta\overline{MF} &= \frac{J_{B1} - \alpha_F \cdot i_{B1} - J_{B0}}{V_0} \\ \Delta\overline{KF} &= \frac{M_{H1} - \alpha_V \cdot m_{H1} - M_{H0}}{V_0} \end{aligned}$$

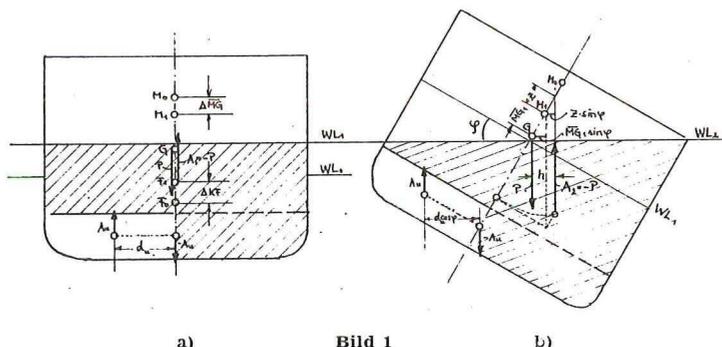
so daß man Gleichung (5) schreiben kann:

$$\Delta\overline{MG} = \frac{1}{V_0} (J_{B1} - \alpha_F \cdot i_{B1} - J_{B0} + M_{H1} - \alpha_V \cdot m_{H1} - M_{H0}). \quad (6)$$

War die metazentrische Höhe vor der Überflutung  $\overline{MG}_0$ , so wird sie nach der Beschädigung  $\overline{MG}_1 = \overline{MG}_0 + \Delta\overline{MG}$ . Wird gefordert, daß sie einen bestimmten Wert nicht unterschreitet, so darf die metazentrische Höhe des unbeschädigten Schiffes nicht kleiner werden als

$$\overline{MG}_0 \geq \overline{MG}_{1\text{mind}} - \Delta\overline{MG}. \quad (7)$$

Unsymmetrische Überflutungen ergeben sich, wenn Teile innerhalb des Überflutungsbereiches unverletzt oder weniger



**Bild 1**  
 a) Vor der Beschädigung:  
 Wasserlinie  $WL_0$ , Formschwerpunkt  $F_0$ , Metazentrum  $M_0$   
 Ungekrängte Zwischenlage nach der Beschädigung:  
 Wasserlinie  $WL_1$ , Formschwerpunkt  $F_1$ , Metazentrum  $M_1$ .  
 Es wirkt das Moment:  $d_u \cdot A_u$ . Es herrscht kein Gleichgewicht  
 Gekrängte Endlage nach der Beschädigung:  
 Wasserlinie  $WL_2$ , Formschwerpunkt  $F_2$ . Es wirken die Momente:  
 $A_u \cdot d_u \cdot \cos \varphi = h \cdot P$ . Es herrscht Gleichgewicht

stark durchflutet werden, die nicht symmetrisch zur Symmetrieebene des Schiffes liegen. Dadurch ist der Auftriebsvektor des Restschiffkörpers nach der Seite verschoben. In der aufrechten Lage ist dann kein Gleichgewicht möglich. Bestimmt man für den Restschiffkörper die Hebelarmkurve des aufrichtenden Momentes, so ist ihr Ursprung auf der Abszisse bis zu einem Winkel  $\varphi \neq 0$  verschoben, der die neue gekrängte Gleichgewichtslage angibt.

Es ist eine sehr mühselige Arbeit, Hebelarmkurven für derartige Restschiffkörper zu bestimmen, die in der Regel auch noch stark vertrimmt sind. Sie ist bei der großen Anzahl der zu untersuchenden Leckfälle kaum gerechtfertigt, wenn man auf normale Hilfsmittel angewiesen ist. Für mittschiffs gelegene Überflutungen, bei denen kein nennenswerter Trimm auftritt, wird diese Arbeit jedoch gelegentlich durchgeführt. Um auch hier von der Lage des Gewichtsschwerpunktes unabhängig zu sein, bestimmt man nicht die Hebelarme  $h$  des aufrichtenden Kräftepaares, sondern die Abstände  $w$  des Auftriebsvektors von einer auf der Wasserlinie senkrecht stehenden Achse durch den festen Kielpunkt  $K$ , also die „Pantokarenen“ des Restschiffkörpers. Wird nach der metazentrischen Höhe  $\overline{MG}_\varphi$  in Gleichung (3) gefragt, die erforderlich ist, um einen Grenzneigungswinkel einzuhalten, so kann man schreiben:

$$h = w_{rest}(\varphi_G) - \overline{KG} \cdot \sin \varphi_G = 0$$

und mit Gleichung (1):

$$w_{rest}(\varphi_G) - (\overline{KF}_{rest} + \overline{MF}_{rest} - \overline{MG}_\varphi) \cdot \sin \varphi_G = 0$$

$$\overline{MG}_\varphi = \overline{KF}_{rest} + \overline{MF}_{rest} - \frac{w_{rest}(\varphi_G)}{\sin \varphi_G} \quad (8)$$

$w_{rest}$  erhält man, indem man das Moment der wegfallenden Verdrängung bezogen auf die senkrechte Achse durch  $K$  von dem Moment der Gesamtverdrängung abzieht und die Differenz durch die Restverdrängung dividiert.

Dieses Vorgehen hat neben dem erforderlichen erheblichen Aufwand noch den Nachteil, daß die Pantokarenenwerte  $w_{rest}$  für kleine Winkel, um die es sich hier meistens handelt, nicht sehr genau ermittelt werden können. Deshalb zieht man in den meisten Fällen nicht exakte Lösungen vor, die oft sogar größere Genauigkeit aufweisen.

Man kann den krängenden Einfluß aus dem Gesamtauftrieb heraustrennen, wie aus Bild 1 zu ersehen ist. Es entsteht ein Kräftepaar  $A_u \cdot d_u$  (Bild 1a), welches das Schiff wie ein von außen wirkendes Moment krängt. Im übrigen ist die Betrachtung so, als läge Symmetrie vor. Für den nach Eintritt der Krängung erreichten Gleichgewichtszustand nach Bild 1b kann man schreiben:

$$\begin{aligned} \kappa_v \cdot A_u \cdot d_u \cdot \cos \varphi &= P \cdot h = \\ &= P \left( \overline{MG}_1 + \zeta \frac{\overline{MF}_{rest}}{2} \operatorname{tg}^2 \varphi \right) \sin \varphi. \end{aligned} \quad (9)$$

Setzt man den Neigungswinkel  $\varphi$  gleich dem höchstens zulässigen Grenzneigungswinkel  $\varphi_G$  und löst man Gleichung (9) nach  $\overline{MG}_1 = \overline{MG}_\varphi$  auf, so gilt:

$$\overline{MG}_\varphi = \frac{\kappa_v \cdot A_u \cdot d_u}{P \cdot \operatorname{tg} \varphi_G} - \zeta \frac{\overline{MF}_{rest}}{2} \operatorname{tg}^2 \varphi_G. \quad (10)$$

Die Berechnung des Beiwertes  $\zeta$ , der ebenfalls eine Funktion von  $\varphi$  ist, ist bereits für unbeschädigte Schiffe mit beträchtlichem Aufwand verbunden, vergleiche [14, 15]. Es wird jedoch meist eine Schätzung von  $\zeta$  genügen (vgl. [16]), da bei kleinen Winkeln  $\varphi$ , um die es sich hier zumeist handelt, das Quadrat des Tangens klein von zweiter Ordnung ist, ein falsch geschätzter Wert wohl kaum ins Gewicht fällt.

Die metazentrische Höhe des unbeschädigten Schiffs in der Ausgangsschwimmlage darf nach Gleichung (7) nicht kleiner werden als

$$\overline{MG}_0 \geq \overline{MG}_\varphi - \Delta \overline{MG}. \quad (11)$$

Zwischenzustände der Überflutung können bei der Vorstellung wegfallender Auftrieb berücksichtigt werden, indem man innen im Leckraum den Wasserspiegel entsprechend tiefer annimmt als außen. Der Bereich des Leckraumes zwischen Innen- und Außenwasserspiegel trägt also noch zur Auftriebsbildung bei. An den Gleichungen und der Durchführung der Berechnungen ändert sich dabei nichts. Es muß allerdings für jeden Zwischenzustand eine eigene Leckrechnung durchgeführt werden.

### 3. Hinzukommendes Gewicht

Werden Leckrechnungen nach der Anschauung hinzukommendes Gewicht durchgeführt, so stellt man sich das eindringende Wasser als zusätzlichen Gewichtsanteil vor, der wie eine flüssige Ladung zu handhaben ist. Dabei ändert sich das Schiffsgewicht sowie die Lage des Gewichtsschwerpunktes.

Bei der ersten Teilaufgabe der Leckrechnung, der Bestimmung von Eintauchung und Vertrimmung, geht man hierbei in der Regel so vor, daß man einen angenommenen Wasserspiegel im Leckraum nacheinander von unten schrittweise erhöht. Für jede der so entstehenden Leckwassermengen wird Eintauchung und Trimm berechnet. Man erfaßt damit nebenbei die Zwischenzustände der Überflutung. Der Gleichgewichtszustand, bei dem Außen- und Innenwasserspiegel gleich hoch stehen, wird durch Interpolation gefunden.

Da hierbei immer der Auftrieb des ganzen Schiffes dem Gewicht des eindringenden Leckwassers gegenübergestellt wird,



#### 4. Auftragung der Ergebnisse von Leckrechnungen

Leckrechnungen für eine überflutet angenommene Abteilung oder Abteilungsgruppe werden in der Regel für mehrere parallele Ausgangswasserlinien durchgeführt, von denen die oberste etwa dem größten im Schiffsbetrieb zu erwartenden Tiefgang entspricht. Die Ergebnisse jedes Leckfalles werden zweckmäßig entsprechend Bild 2 aufgetragen, worin die kritische Endschwimmlage der obersten Ausgangswasserlinie angegeben und die Leckstabilitätsuntersuchungen als sogenannte Stabilitätsgrenzkurven abhängig vom Ausgangszustand aufgetragen werden. In diesem Diagramm können die Betriebszustände des Schiffes als Punkte eingezeichnet werden. Liegen sie rechts der Grenzkurve, so kann die Stabilität im Rahmen der gemachten Voraussetzungen als ausreichend angesehen werden. Liegen sie links der Grenzkurve, so genügt die Stabilität in diesem Leckfalle nicht. In unserem Beispiel ist das bei Fall IV — leeres Schiff — der Fall. Im Schiffsbetrieb sind also bestimmte Anweisungen über Ballastübernahmen zu beachten.

#### 5. Variable Raumlängen

Die bisherigen Betrachtungen setzen eine festgelegte wasserdichte Einteilung des Schiffskörpers voraus. Die Leckrechnung dient also lediglich zur Nachprüfung, ob diese Einteilung hinsichtlich der Sinksicherheit des Schiffes vertretbar ist. Ist sie es nicht, muß mit geänderten Größen eine neue Rechnung durchgeführt werden.

Es ist einzusehen, daß der umgekehrte Weg, bei dem von festgelegten Grenzbedingungen ausgehend charakteristische Größen der Raumordnung — beispielsweise die Länge des überfluteten Bereiches — berechnet werden, für den Entwerfenden angenehmer wären. Beschränkt man sich bei solchen Betrachtungen auf Tauchung und Trimm, so ist dieser Weg der Lösung, allerdings nach Einführung gewisser vereinfachender Annahmen, gangbar und unter der Bezeichnung „Schottenrechnung“ seit Ende des vorigen Jahrhunderts bekannt [2]. In dieser Berechnung wird eine fiktive Raumlänge — die „flutbare Länge“ — als die Länge eines Teils des Schiffskörpers definiert, nach dessen Überflutung die Wasserlinie der Endschwimmlage einen vertraglich festgelegten Sicherheitsrand gerade berührt. Jeder Endschwimmlage ist eine bestimmte Leckwassermenge und deren Moment der Länge nach zugeordnet, woraus sich bei mehreren angenommenen Endschwimmlagen flutbare Längen an verschiedenen Stellen des Schiffes berechnen lassen [18, 19]. Über der Längskordinate aufgetragen, ergibt sich daraus die Kurve der flutbaren Längen (Bild 3).

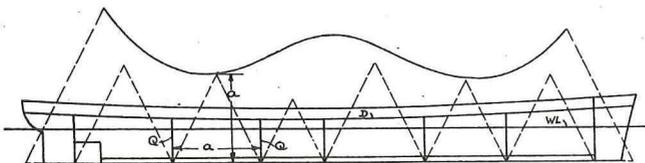


Bild 3 Kurve der zulässigen Längen, „Schottkurve“

- Q Wasserdichte Querschotte
- D Schottendeck
- a Höhe des Schottendreiecks = größter zulässiger Schottenabstand
- WL Schottenladelinie

Es kann hierbei dem inneren Aufbau des Schiffskörpers in nur sehr unvollkommener Weise Rechnung getragen werden. Einzige Kenngröße hierzu ist die Flutbarkeit, für die für größere Bereiche des Schiffskörpers mittlere Werte bestimmt werden.

Die flutbaren Längen werden für ein bestimmtes Schiff nur vom Ausgangstiefgang und dem Flutbarkeitsfaktor beeinflusst, wobei der größte Ausgangstiefgang und die größte zu erwartende Flutbarkeit bei vollständig überflutetem Leckraum die größte Gefährdung des Schiffes im Hinblick auf Tauchung und Trimm ergibt. Hierfür aufgestellt soll die Kurve der flutbaren Längen eine Grenzkurve der größtmöglichen Raumlängen sein. Berücksichtigt man jedoch die Erscheinungen, die mit der Querstabilität des Schiffes zusammenhängen, so erweist sie sich nur noch als ein recht mangelhaftes Hilfsmittel, das lediglich für die erste Annahme der Schottstellung helfen mag.

Wollte man nun das Prinzip der Schottenrechnung auch auf die Fragen der Querstabilität des beschädigten Schiffes ausdehnen, also diejenige flutbare Länge bestimmen, nach deren Überflutung festgelegte Grenzbedingungen bezüglich Anfangsstabilität und Neigungswinkel gerade erfüllt sind, treten Schwierigkeiten auf, da hierbei viel mehr als nur zwei Einflußgrößen zu berücksichtigen sind, von denen noch nicht einmal immer feststeht, in welcher Richtung sie sich auswirken. Weder für den Ausgangstiefgang noch für Flutbarkeit und Ausmaß der Überflutung noch für die Endschwimmlage gibt es Annahmen, die den gefährlichsten Zustand eindeutig kennzeichnen. Selbst der Begriff flutbare Länge versagt als Kennzeichen für die Wirksamkeit der Unterteilung, da Fälle denkbar sind, bei denen die Überflutung eines kurzen Raumes für das Schiff gefährlicher ist als die eines längeren Raumes an der gleichen Stelle im Schiff. Andere Parameter treten in den Vordergrund, die sich auf die Unterteilung innerhalb des überfluteten Bereiches beziehen, wie z. B. die Lage wasserdichter Längswände bzw. Decks, die Flutbarkeiten einzelner Raumeile oder Querflutungsmöglichkeiten innerhalb der Raumeile. Es bedarf kaum der Erwähnung, daß es sinnlos erscheint, durch Rechnung die Größe einer wasserdichten Abteilung im Hinblick auf die Schiffssicherheit bestimmen zu wollen, deren innere Struktur in allen Einzelheiten eben dieser Rechnung zugrunde gelegt werden muß, ganz abgesehen davon, daß eine solche Rechnung einen unverantwortlichen Aufwand erfordern würde.

#### 6. Allgemeine Gesichtspunkte für den Rechnenden

Die vorangegangenen Abschnitte versuchen, einen Überblick über die möglichen Arten von Leckrechnungen zu vermitteln. Nicht erörtert oder nur angedeutet wurden die eigentlichen Schwierigkeiten der Durchführung solcher Berechnungen, die sich ausschließlich aus dem Umfang der notwendigen numerischen Rechnungen ergeben. Es wäre nun immerhin denkbar, daß bei Vorlage eines vernünftigen Berechnungsschemas auch angelegte Hilfskräfte zu einer solchen Arbeit eingesetzt werden könnten, die lediglich ein gewisses Maß von Sorgfalt erfordert. Obgleich solche vernünftigen Berechnungsblätter mehrfach veröffentlicht worden sind [9, 11, 12], ist der Einsatz von Hilfskräften, die mit dem Entwurf des Schiffes nicht vertraut sind, doch problematisch. Die wasserdichte Unterteilung eines Schiffes ist eine der einschneidendsten Entwurfsarbeiten überhaupt. Insbesondere gilt dies für reine Fahrgastschiffe, bei denen die innere bauliche Gestaltung einer Fülle von Gesichtspunkten Rechnung zu tragen hat, entsprechend der großen Zahl verschiedenartigster Aufgaben, die ein solches Schiff hat. Es wurde bereits betont, daß gerade die innere Aufgliederung des Schiffskörpers auf das Leckverhalten stärksten Einfluß haben kann. Jeder, der Leckrechnungen durchgeführt hat, weiß, wie ungünstig sich beispielsweise wasserdichte Decks oder wasserdichte Längsschotte im Überflutungsbereich auf die Stabilität in der Endschwimmlage sowie auf Endneigungen auswirken können. Es ist also die aus verschiedensten Gründen notwendige Einteilung immer im Hinblick auf das Leckverhalten des Schiffes vorzunehmen. Es sind Kompromisse ein-

zugehen zwischen zweckmäßiger und zulässiger Anordnung der Räume und Raumgruppen. Erschwerend kommt hinzu, daß gerade bei Fahrgastschiffen größter Wert auf ein angenehmes Seeverhalten des Schiffes in unbeschädigtem Zustand zu legen ist. Ein zu „steifes“ Schiff, bei dem die große Stabilität in aufrechter Lage zu erheblichen Winkelbeschleunigungen beim „Rollen“ führt, ist unbeliebt, auch wenn es größte Sicherheit im Leckfall bietet. Oft ist der mögliche Spielraum, der dem Entwerfenden zwischen allen zu beachtenden Gesichtspunkten verbleibt, sehr gering, und er muß zusätzliche Maßnahmen, wie künstliche Querflutungsanlagen einerseits und Schlingerdämpfungsanlagen andererseits, vorsehen. Selbst die Anordnung von festem Ballast im Schiff kann sich als lohnend erweisen, um allen widerstrebenden Forderungen, die an den Entwurf gestellt werden, gerecht zu werden. Alle getroffenen Maßnahmen aber sind im Hinblick auf das Leckverhalten des Schiffes rechnerisch zu überprüfen, und es würde keinen Gewinn bedeuten, für diese Rechnungen Hilfskräfte heranzuziehen, die den Gesamtüberblick nicht haben.

Man hat häufig versucht, wenigstens einen Teil der rein mechanischen Arbeit herauszutrennen, den man dann von weniger qualifizierten Kräften durchführen lassen konnte. Am weitgehendsten ist dies wohl bei der Bestimmung der Kurve der flutharen Längen der Fall. Früher war der vorschriftsmäßige Nachweis ausreichender Schwimmfähigkeit in der Tat eine Angelegenheit für gewandte Hilfskräfte. Die eigentliche Entwurfsarbeit konnte sich auf die fertig vorliegende Schottkurve stützen. Auch heute, wo wir anstreben, den sich tatsächlich nach einer angenommenen Überflutung von Räumen einstellenden Schwimmzustand des Schiffes möglichst genau zu berechnen, wird versucht — beispielsweise durch die Vorwegnahme der Aufstellung eines Trimmkurvenblattes —, denjenigen Teil der Arbeit, der in der Regel öfter zu wiederholen ist, möglichst einzuschränken.

Es bleibt aber für den Entwerfenden die Aufgabe bestehen, die Schottstellung und die innere Einteilung zunächst willkürlich bzw. seinen Erfahrungen und den sonstigen Erfordernissen entsprechend vorzunehmen, da es sich gezeigt hat, daß die Kurve der zulässigen Längen oft nur für kleine Bereiche des Schiffskörpers richtige Anhaltspunkte für die Unterteilung gibt. Darin liegt eben eine Hauptschwierigkeit für den Entwurfsingenieur: es ist bei der vollständigen Leckrechnung im Gegensatz zur bequemen Schottenrechnung bis jetzt nicht möglich, die hauptsächliche Rechenarbeit zum Nachweis ausreichender Sinksicherheit der Wahl der wasserdichten Unterteilung voranzustellen. Wenn es auch kaum gelingen dürfte, diesen Umstand zu ändern, so sollte es immerhin möglich sein, dem Entwurfsingenieur wenigstens Anhaltspunkte für den Vorentwurf zu geben, die ihn vor Fehlern in der Unterteilung bewahren und ihm als Hilfe bei der Wahl der Hauptabmessungen des Schiffes dienen können.

Die vorliegende Arbeit hat sich zum Ziel gesetzt, in dieser Richtung einen Beitrag zu leisten. Dem Entwurfsingenieur soll die Möglichkeit gegeben werden, bereits in einem frühen Stadium seines Entwurfs praktisch ohne Rechenarbeit das Leckverhalten des Schiffes in Abhängigkeit von der gewählten inneren Unterteilung sicher abschätzen zu können.

Dadurch wird sich jedoch eine genaue Leckrechnung, der die endgültig gewählte Unterteilung des Schiffskörpers zugrunde gelegt ist, keinesfalls erübrigen. Hierfür stehen uns jedoch heute „Hilfskräfte“ zur Verfügung, die derartige Rechnungen schneller, zuverlässiger und genauer ausführen können, als es der Mensch jemals vermag. Gemeint sind elektronische Rechenanlagen, die man auch für die schiffbaulichen Rechnungen einzusetzen beginnt. Auch hierzu möchte diese Arbeit einen Beitrag leisten.

### III. Behandlung von Leckrechnungen mit einem Digitalrechner

#### 7. Vorbemerkungen

Der Anlaß zur Aufstellung eines Programms zur Durchführung von Leckrechnungen mit einem Digitalrechner ergab sich aus dem Wunsche, möglichst schnell eine große Zahl von Leckrechnungen mit systematisch variierten Parametern durchführen zu können. Diese Rechnungen sowie die Auswertung ihrer Ergebnisse werden in Teil IV und V erörtert.

Zur Durchführung dieser systematischen Rechnungen stand der im Institut für praktische Mathematik der Technischen Hochschule Hannover aufgestellte Magnettrommelrechner IBM 650 zur Verfügung. Daher beschränkten sich die Bemühungen um eine geeignete Programmierung auf diesen Typ eines Elektronenrechners allein. Inwieweit sich andere Geräte ebenso gut oder besser zur Bewältigung von schiffbaulichen Routinerechnungen, insbesondere von Leckrechnungen eignen, wurde nicht untersucht. Der größte Teil der im Folgenden erörterten Gesichtspunkte ist jedoch von allgemeiner Natur und hat demnach für jeden speicherprogrammierten Digitalrechner Gültigkeit. Das für die Rechnungen aufgestellte Programm zur Durchführung vollständiger Leckrechnungen wurde allerdings auf die Möglichkeiten der IBM 650, wie sie in Hannover verfügbar ist, also ohne Zusatzeinrichtung für Gleitkomma und Indexregister, abgestimmt. Das Programm belegt sämtliche 2000 Speicherzellen zu 10 Dezimalziffern.

Zum Zeitpunkt des Beginns der Programmierarbeiten im Frühjahr 1959 lagen von der IBM schiffbauliche Programme für Kurvenblattrechnung und die Berechnung der statischen Querstabilität vor, aus deren Programmbeschreibung [20] jedoch hervorging, daß sie sich nicht ohne weiteres auf die Belange der Leckrechnung erweitern ließen. Auch die von der IBM angewendete Anordnung der Koordinaten zur Kennzeichnung der Schiffsoberfläche auf den Lockarten wurde aus Gründen der Zweckmäßigkeit nicht übernommen, obgleich dies vom Standpunkt der Einheitlichkeit der Bearbeitung vielleicht erwünscht gewesen wäre<sup>2)</sup>. Es wurde vielmehr ein vollständig neues Programm entwickelt, welches die Maschine veranlaßt, für ein bestimmtes Schiff eine vollständige Leckrechnung für einen festgelegten, beliebig gestalteten Leckbereich einschließlich möglicher unsymmetrischer Überflutungen in einer einzigen ununterbrochenen Folge durchzuführen.

Während der Arbeiten an diesem Programm gab Prohaska die Erfolge des Rechenzentrums Kopenhagen bei der Programmierung von schiffbaulichen Problemen bekannt [21]. Einige Einzelheiten über diese Programme, einschließlich eines für Leckstabilität, werden in [22] mitgeteilt. Leider handelt es sich in Kopenhagen um eine Rechenanlage des Typs DASK, deren Programme für die IBM 650 natürlich nicht verwendbar sind. Nach Fertigstellung unseres Programms ergab sich die Gelegenheit, Leckrechnungen für ein Schiff, die sowohl mit DASK als auch mit IBM 650 gerechnet worden waren, gegenüberzustellen. Dies geschah anläßlich einer Testrechnung in Hannover am 10. 11. 1959 im Beisein von Vertretern des Germanischen Lloyd. Die Übereinstimmung der Ergebnisse war sehr erfreulich. Der Verlust an metazentrischer Höhe  $\Delta MG$  (Gleichung (6)) wurde praktisch ohne Differenz auf den Zentimeter genau berechnet; die Endschwimmlagen differieren um 0 bis 2 cm im Tiefgang, an den Loten gemessen.

Aus dem Vorstehenden geht bereits hervor, daß sich das Programm, obwohl als Hilfe für systematische Leckrechnungen im Rahmen dieser Arbeit aufgestellt, durchaus für end-

<sup>2)</sup> Es ist ohne weiteres möglich, Koordinatenkarten des einen Systems in solche des anderen Systems durch ein geeignetes Programm von der Maschine selbst umrechnen zu lassen.

gültige Leckrechnungen spezieller Entwürfe mit festgelegter innerer Unterteilung eignet. Es wird zu zeigen sein, wie bei Verwendung der hierdurch gebotenen Möglichkeiten, das unangenehme Problem der langwierigen und komplizierten Leckrechnungen praktisch aufhört zu existieren.

**A. Fehlerbetrachtungen bei der numerischen Integration von Schiffslinien**

*8. Integrationsmethode*

Soll die Berechnung des Inhalts und der Momente von Flächen — beispielsweise eines Spantquerschnittes — programmiert werden — auf diese Aufgabe lassen sich die meisten mit der Leckrechnung zusammenhängenden Arbeiten letztlich zurückführen —, so stellt sich sofort die Frage nach der günstigsten Methode und nach der gewünschten bzw. erzielbaren Genauigkeit. Es handelt sich bei den zu integrierenden Flächen um graphisch vorliegende Funktionen — die Schiffslinien —, deren mathematische Darstellung näherungsweise durch Polynomansatz zwar möglich ist, doch zeigt eine kürzlich erschienene Arbeit von Kervin [23], mit wie großem rechnerischem Aufwand eine solche analytische Nachbildung eines vorliegenden Linienrisses verbunden ist. Erst Polynome über 100sten Grades ergeben eine befriedigende Übereinstimmung im Verlauf der Spanten. Für die erwähnte Arbeit [23] wurde eine der größten überhaupt verfügbaren elektronischen Rechenanlagen, die IBM 704, benutzt. Eine rechnerische Bewältigung mit der IBM 650 wäre wohl kaum möglich, und zusammen mit der umfangreichen Aufgabe, eine vollständige Leckrechnungen durchzuführen völlig ausgeschlossen.

Besonders einfach und, wie sich zeigen wird, ausreichend genau ist der Weg, die zu integrierende Funktion in Teilbereichen durch einfache Polynome anzunähern und diese stückweise zu integrieren. Berücksichtigt man im Polynomansatz Glieder bis zum dritten Grade, so ergibt sich die bekannte Simpsonsche Regel für die Integration. So oft diese Regel im Schiffbau angewandt wird, so selten macht man sich Gedanken über die Genauigkeit, die hierbei erzielt werden soll und kann.

Dies ist verständlich; denn der Aufwand, der durch eine Fehlerabschätzung entsteht, hat etwa die Größenordnung des Aufwandes der ganzen Rechnung und würde eine nicht zu rechtfertigende Belastung des Rechnenden darstellen. Arbeiten wir hingegen mit einem Elektronenrechner, so fallen solche Bedenken fort, zumal es sich zeigen wird, daß eine Programmierung einer Fehlerrechnung nicht nur ein Maß für die Ungenauigkeiten der numerischen Integration liefert, sondern jegliche Art von Fehlern an den Tag bringt, als da sind: Ordinatenmeßfehler, Einteilungsfehler, Schreibfehler, fehlerhafte Kartenlochung usw. Dies aber ist gerade bei Rechnungen, die eine elektronische Rechenanlage durchführt, von entscheidender Wichtigkeit. Rechenfehler üblicher Art gibt es hier nicht, wenn das Programm einwandfrei ist. Die einzige Möglichkeit, fehlerhafte Resultate zu erhalten, kann durch fehlerhaft gemessene oder gelochte Angaben eintreten. Gelingt es, dies auszuschließen, so können die Ergebnisse eines Elektronenrechners als absolut richtig angesehen werden.

*9. Zweckmäßige Teilung*

Die zu integrierende Funktion sei durch Ordinaten  $y_i$  gegeben. Der Ordinatenabstand innerhalb eines „Doppelstreifens“ sei  $h = \text{konstant}$ . Für die Fläche eines Doppelstreifens der Länge  $2h$  ergibt sich:

$$\int_{-h}^{+h} y \, dx = \frac{h}{3} (y_{n-1} + 4y_n + y_{n+1}) - \underbrace{\frac{1}{90} \cdot h^5 \cdot y^{IV}(\xi)}_R \quad (18)$$

Die Herleitung des Restgliedes  $R$  aus dem Glied vierter Ordnung der nach Potenzen von  $x$  entwickelten Funktion ist in den Handbüchern für Praktische Mathematik zu finden [24, 25]. Die Größe des Restgliedes  $R$ , also des bei Anwendung der Simpsonschen Regel entstehenden Fehlers — des sogenannten Ersatzfehlers  $F_0$  —, wird durch  $h^5$  sehr stark von der Schrittweite der Ordinaten beeinflusst. Andererseits ist  $y^{IV}(\xi)$ , die 4. Ableitung der Funktion nach  $x$  an der Stelle  $\xi$  des Integrationsintervalls abhängig von der jeweiligen Form des zu integrierenden Bereichs bzw. ihrem Grade.

Somit stehen Schrittweite  $h$  und Gestalt der Funktion bei konstant gehaltenem Ersatzfehler in engem Zusammenhang, und es muß möglich sein, Schiffslinien ihrer Gestalt entsprechend mit der gerade zweckmäßigsten Schrittweite zu teilen. Das bedingt von Doppelstreifen zu Doppelstreifen einen unterschiedlichen Abstand  $h$ . Eine solche Teilung mag für den manuell Rechnenden unbequem erscheinen, für die Programmierung bietet sie keinerlei Schwierigkeiten, so daß die Vorteile dieser Teilung bei weitem überwiegen.

Zunächst ist festzulegen, wie groß der zugelassene Ersatzfehler höchstens werden darf. Ein Maß hierfür ist in dem sogenannten Funktionsfehler  $F_f$  gegeben, der alle unvermeidlichen, durch die Grenzen der Zeichen- und Ablesegenauigkeit bedingten Fehler sowie Rundungsfehler der Funktionsaufmaße enthält. Mit Hilfe des Fehlerfortpflanzungsgesetzes von Gauß ist es möglich, die Auswirkung des unvermeidlichen mittleren Ordinatenfehlers  $m_y$ , mit dem jedes Aufmaß  $y$  behaftet ist, auf das zu bildende Integral zu bestimmen (vgl. [24]):

Das Gaußsche Fehlerfortpflanzungsgesetz lautet allgemein, wenn  $S = f(y_1, y_2, y_3 \dots y_n)$

$$m_S = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial y_1}\right)^2 m_{y1}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y_2}\right)^2 m_{y2}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y_3}\right)^2 m_{y3}^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial y_n}\right)^2 m_{yn}^2}$$

Nach der Simpsonschen Regel ist

$$S = \frac{h}{3} (y_{n-1} + 4y_n + y_{n+1})$$

also, wenn der mittlere Funktionsfehler  $m_y$  bei den einzelnen Aufmaßen gleich groß ist:

$$m_S = \frac{h}{3} \cdot m_y \sqrt{1 + 16 + 1} = m_y \cdot h \cdot \sqrt{2}$$

Der mittlere Ordinatenfehler eines speziellen Doppelstreifens soll entsprechend [24] mit  $F_f$  bezeichnet werden, also:

$$F_f = m_y \cdot h \cdot \sqrt{2} \quad (19)$$

Die Schrittweite  $h$  ist dann hinreichend klein gewählt, wenn der Ersatzfehler  $F_0$  bei der Simpson-Rechnung kleiner als der Funktionsfehler  $F_f$  wird. In der Bedingung  $F_0/F_f \leq 1$  haben wir somit ein Kriterium, mit dem beurteilt werden kann, ob die Aufmaße für die Integration genügend dicht gewählt sind.

Setzt sich ein Gesamtintegral  $S$  aus Teilintegralen  $S = S_1 + S_2 + S_3 + \dots$  zusammen, wie es bei der Summierung mehrerer Doppelstreifen mit unterschiedlicher Schrittweite der Fall ist, ergibt sich nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz:

$$m_S^2 = 2h_1^2 m_{y1}^2 + 2h_2^2 m_{y2}^2 + 2h_3^2 m_{y3}^2 + \dots$$

$$m_S = m_y \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{h_1^2 + h_2^2 + h_3^2 + \dots}$$

$$m_S = m_y \sqrt{2 \sum_{i=1}^n h_i^2}$$

Der mittlere Funktionsfehler einer speziellen Spantfläche sei mit  $F_F$  bezeichnet, also:

$$F_F = m_y \sqrt{2 \cdot \sum_1^n h_i^2} \quad (20)$$

Werden solche Gesamtintegrale (Spantflächen) über eine neue Koordinatenrichtung  $x$  zu räumlichen Gebilden (Verdrängung) integriert, so gilt für einen Doppelstreifen der neuen Koordinatenrichtung:

$$S_x = \frac{h_x}{3} (S_{n-1} + 4S_n + S_{n+1})$$

und für den mittleren Fehler:

$$m_{Sx} = \frac{h_x}{3} \sqrt{m_{S_{n-1}}^2 + 16m_{S_n}^2 + m_{S_{n+1}}^2} \quad (21)$$

$$y^{(m)}(\xi) = m! [x_0 x_1 \dots x_m]$$

also in unserem Falle

$$y^{IV}(\xi) = 24 [x_{n+2} x_{n+1} x_n x_{n-1} x_{n-2}]$$

und damit

$$|F_e| = \frac{12}{45} h_n^5 [x_{n+2} x_{n+1} \dots x_{n-2}] \quad (23)$$

Es werden also außer den Ordinaten des zu integrierenden Doppelstreifens  $y_{n-1}$ ,  $y_n$  und  $y_{n+1}$  noch aus den Nachbar-doppelstreifen die Ordinaten  $y_{n+2}$  und  $y_{n-2}$  benötigt. Die Schrittweite  $h$  kann aber von einem zum anderen Doppelstreifen verschieden sein. Ein veränderliches  $h$  ist aber in Gleichung (23) ohne weiteres zulässig. Zur Auswertung der eckigen Klammer dient ein erweitertes Differenzenschema (vgl. [26]), entsprechend folgendem Beispiel:

4 h	3 h	2 h	h	x	y = f(x)	$\Delta y$	$[\Delta x]$	$\Delta[\Delta x]$	$[\Delta x]$	$\Delta[\Delta x]$	$[\Delta x]$	$\Delta[\Delta x]$	$[\Delta x]$
			1	0	0								
		3	2 = h	1	2,35	2,35	2,350	-1,170	-0,3900	0,2637	+0,05274	-0,04404	-0,00489
9	5	4		3	4,71	2,36	1,180	-0,505	-0,1263	0,0696	+0,00870		
	8	6	2 = h	5	6,06	1,35	0,675	-0,340	-0,0567				
		4	4	9	7,40	1,34	0,335						

Sind da mehrere solcher Doppelstreifen unterschiedlicher Schrittweiten  $h_x$ :

$$S_v = S_{x1} + S_{x2} + S_{x3} + \dots$$

dann ergibt sich für den mittleren Gesamtfehler

$$m_v = \sqrt{\sum_1^n m_{Sx_i}^2} \quad (22)$$

den wir für einen speziellen Schiffskörper mit  $F_v$  bezeichnen können. Um diesen mittleren Gesamtfehler  $F_v$  wird die berechnete Verdrängung eines Schiffskörpers im Mittel fehlerhaft sein, wenn die Ordinatenenteilung richtig gewählt ist, also so, daß gilt:

$$\frac{F_e}{F_f} \leq 1$$

### 10. Zahlenmäßige Ermittlung des Ersatzfehlers

Nach Gleichung (18) ist

$$F_e = -\frac{h^5}{90} y^{IV}(\xi)$$

$y^{IV}(\xi)$  ist die 4. Ableitung unserer Funktion an einer nicht bestimmten Stelle  $\xi$ , von der aber nachgewiesen werden kann, daß sie im Inneren des Integrationsbereichs liegt (vgl. [26]). Für eine Fehlerabschätzung mag die Kenntnis der 4. Ableitung auf der Mitte des Intervalls  $2h$  genügen. Differentialquotienten lassen sich bekanntlich mit guter Näherung durch die Differenzenquotienten — die sogenannten Steigungen — bestimmen (vgl. [24, 25, 26]). Man schreibt:

Die Steigung 1. Ordnung:

$$[x_{n+1} x_n] = \frac{y_{n+1} - y_n}{x_{n+1} - x_n} = \frac{\Delta y}{h}$$

die Steigung 2. Ordnung

$$[x_{n+1} x_n x_{n-1}] = \frac{[x_{n+1} x_n] - [x_n x_{n-1}]}{x_{n+1} - x_{n-1}} = \frac{\Delta[\Delta x]}{2h}$$

die Steigung 4. Ordnung:

$$[x_{n+2} x_{n+1} x_n x_{n-1} x_{n-2}] = \frac{[x_{n+2} \dots x_{n-1}] - [x_{n+1} \dots x_{n-2}]}{x_{n+2} - x_{n-2}}$$

Es ist allgemein für die  $m$ -te Ableitung einer  $m$  mal differenzierbaren Funktion  $y(x)$  an einer Zwischenstelle  $\xi$ :

Der Ersatzfehler im Intervall  $2h = 4$  beträgt

$$F_e = -\frac{12}{45} \cdot 32 \cdot -0,00489 = +0,0417$$

Dies wird bestätigt, wenn man die Simpson-Rechnung mit der Teilung  $h = 2$ :

$$S_{h=2} = \frac{2}{3} \cdot 27,25 + F_e = 18,167 + 0,0417$$

mit einer zweiten vergleicht, der eine sehr enge Teilung  $h = 0,5$  zugrunde liegt:  $S_{h=0,5} = 18,215$ . Der Unterschied beider Resultate ist 0,048, was ausreichend genau mit dem errechneten Ersatzfehler von 0,042 übereinstimmt.

### 11. Zahlenmäßige Bestimmung des Funktionsfehlers

In den Gleichungen (19) und (20) ist  $m_y$  der mittlere Ordinatenfehler. Er ist definiert zu

$$m_y = \sqrt{\frac{\sum f^2}{n}}$$

$f$ : Abweichungen der einzelnen Messungen vom exakten Wert (wahrer Fehler) —  $n$ : Anzahl der Meßpunkte.

Nun sind die folgenden zwei Fälle denkbar:

1. Die Maße enthalten nur Rundungsabweichungen;
2. die Maße enthalten Rundungs-, Ables- und Zeichenungenauigkeiten.

Einen Zahlenwert für den Fall 1 erhält man, wenn man die Treffwahrscheinlichkeit für jeden Abschnitt  $dx$  des Rundungsintervalls gleich groß annimmt; das trifft zu, wenn hinreichend viele fehlerlose Meßwerte gerundet werden. Das Rundungsintervall beträgt  $-0,5 \leq x \leq +0,5$  der letzten Stelle.

Es mögen für jeden Abschnitt  $dx$  des Intervalls  $m$  Messungen vorliegen. Das Fehlerquadrat  $f^2$  einer Messung an der Stelle  $x$  des Intervalls beträgt  $x^2$ . Damit wird die Quadratsumme aller Messungen

$$\sum f^2 = m \int_{-0,5}^{+0,5} x^2 dx = m \frac{2 \cdot 0,125}{3}$$

Die Anzahl aller Messungen beträgt  $n = \int_{-0,5}^{+0,5} m dx = 1,0 \cdot m$ .

Der mittlere Fehler wird:

$$m_y = \sqrt{\frac{\sum f^2}{n}} = \sqrt{0,08333} = 0,2887 \text{ der letzten Stelle.}$$

Für den Fall 2, daß noch andere Fehlerursachen wirksam sind, wurde eine Reihe von Probemessungen an Funktionen

mit bekannten Ordinatenwerten durchgeführt, beispielsweise an Geraden. Hierbei wurde die Funktion möglichst genau auf Millimeterpapier aufgezeichnet, worauf eine Reihe von Ordinaten möglichst auf 0,1 mm genau gemessen wurde. Die gerechneten fehlerlosen Werte dienen zur Aufstellung der wahren Fehlergrößen  $f$ . Es ergaben sich mittlere Fehler  $m_y$  zwischen 0,1 mm und 0,2 mm, wobei der kleinere Wert offenbar etwa die in einer Zeichnung überhaupt erreichbare Genauigkeit darstellt. Am häufigsten traten Fehlergrößen von etwa 0,12 mm auf. Hierbei ist beachtenswert, daß der Einfluß der Rundung allein nach den vorausgegangenen Überlegungen lediglich 0,02887 mm, also 24% des mittleren Gesamtfehlers von 0,12 mm ausmacht.

Der absolute Wert des mittleren Ordinatenfehlers  $m_y$  des Schiffes ist vom Maßstab der zur Messung benutzten Zeichnung abhängig. Ist  $a = L/L'$  der Maßstab ( $L$ : Schiffslänge;  $L'$ : Schiffslänge in der Zeichnung), so ist der kleinste mittlere Fehler

$$m_y = 0,00012 a \text{ m} \quad (24)$$

oder, wenn man sich auf Rundungsfehler beschränkt, wobei wir auf 1 cm runden wollen

$$m_y = 0,00288 \text{ m}, \quad (25)$$

je nach dem, welches von beiden das größere Maß ist. Beide mittleren Fehler sind gleich bei  $a = 24$ .

Da wir es in der Regel mit größeren Zeichnungsmaßstäben zu tun haben ( $a = 100; 50; 25$ ), legen wir den folgenden Fehlerbetrachtungen das Fehlermaß nach Gleichung (24) zugrunde. Auch ergibt sich daraus, daß es für Maßstäbe  $a > 24$  sinnlos ist, das Maß der Ordinaten bei einem Schiff auf 1 mm genau anzugeben.

In den im folgenden zu beschreibenden Programmen für Leckrechnungen werden daher die Schiffsaufmaße in Zentimetern angegeben.

Als Kriterium für ausreichende Teilung der Funktion für die Integration eines Doppelstreifens nach Simpson haben wir  $\frac{|F_e|}{F_f} \leq 1$  gewählt, was mit Gleichung (26) ergibt:

$$\frac{|F_e|}{F_f} = 1571 \cdot \frac{h^4}{a} [x_{n+2} x_{n+1} x_n x_{n-1} x_{n-2}] \quad (28)$$

Für das Beispiel im Abschnitt 10 ergibt sich mit  $a = 50$ :

$$\frac{|F_e|}{F_f} = 1571 \cdot \frac{16}{50} \cdot 0,00489 = 2,5 > 1$$

also war die Teilung nicht eng genug.

Als Überschlagsformel für ein mindestens erforderliches  $h$  kann man schreiben

$$h_{\text{erf}} = \sqrt[4]{\frac{a}{1571 \cdot [x_{n+2} x_{n+1} \dots x_{n-2}]}} \quad (29)$$

oder

$$h_{\text{erf}} = \sqrt[4]{\frac{h^4}{|F_e|/F_f}}$$

In unserem Beispiel:

$$h_{\text{erf}} \leq 1,60 \text{ m}^3$$

### 12. Entdeckung von „echten“ Fehlern

Solche Fehlerüberlegungen gewinnen erheblich an praktischem Wert, wenn neben den unvermeidlichen Maßungengenauigkeiten echte, vermeidbare Aufmaßfehler vorliegen. Derartige Fehler müssen unbedingt gefunden werden. Hierzu ist bekanntlich das bereits verwendete Differenzenschema ein sehr geeignetes Werkzeug. Wir wollen die Auswirkung eines Fehlers  $\epsilon$  auf die 4. Steigung der Funktion an Hand des Differenzenschemas verfolgen.

Fall 1: Die mittlere Ordinate des Doppelstreifens sei um den Betrag  $\epsilon$  fehlerhaft. Dann wird das Differenzenschema:

4 h	3 h	2 h	h	x	f(x)	[xx <sub>1</sub> ]	[xx <sub>1</sub> x <sub>2</sub> ]	[xx <sub>1</sub> x <sub>2</sub> x <sub>3</sub> ]	[xx <sub>1</sub> x <sub>2</sub> x <sub>3</sub> x <sub>4</sub> ]
				$x_{n-2}$	0	0	$+\frac{\epsilon}{h(h_u+h)}$	$-\frac{\epsilon}{h^2(h_u+h)}$	$+\frac{\epsilon}{h^2} \cdot \frac{1}{(h_u+h)(h_0+h)}$
				$x_{n-1}$	0	$+\epsilon/h$	$-\frac{2\epsilon}{h \cdot (2h)}$	$+\frac{\epsilon}{h^2(h_0+h)}$	
$h_u + h_0 + 2h$	$h_u + 2h$ $h_0 + 2h$	$h_u + h$ $2h$ $h_0 + h$	$h_u$ $h$ $h$ $h_0$	$x_n$	$\epsilon$	$-\epsilon/h$	$-\frac{2\epsilon}{h \cdot (2h)}$	$+\frac{\epsilon}{h^2(h_0+h)}$	
				$x_{n+1}$	0	0	$+\frac{\epsilon}{h(h_0+h)}$		
				$x_{n+2}$	0	0			

Den durch  $\epsilon$  bedingten Fehler im Integral nennen wir  $F_\epsilon$ . Er wird mit Gleichung (23):

$$F_\epsilon = \frac{12}{45} h^3 \frac{\epsilon}{(h_u+h)(h_0+h)} \quad (30)$$

Fall 2: Die äußere Ordinate des Doppelstreifens sei um den Betrag  $\epsilon$  fehlerhaft. Dann wird das Differenzenschema:

4 h	3 h	2 h	h	x	f(x)	[xx <sub>1</sub> ]	[xx <sub>1</sub> x <sub>2</sub> ]	[xx <sub>1</sub> x <sub>2</sub> x <sub>3</sub> ]	[xx <sub>1</sub> x <sub>2</sub> x <sub>3</sub> x <sub>4</sub> ]
				$x_{n-2}$	0	$+\epsilon/h_u$	$+\frac{\epsilon}{h_u \cdot h}$	$-\frac{\epsilon}{2h^2 \cdot h_u}$	$+\frac{\epsilon}{2h^2} \cdot \frac{1}{h_u(h_0+2h)}$
				$x_{n-1}$	$\epsilon$	$-\epsilon/h$	$-\frac{\epsilon}{h \cdot 2h}$	$+\frac{\epsilon}{2h^2(h_0+2h)}$	
$h_u + h_0 + 2h$	$h_u + 2h$ $h_0 + 2h$	$h_u + h$ $2h$ $h_0 + h$	$h_u$ $h$ $h$ $h_0$	$x_n$	0	0			
				$x_{n+1}$	0	0			
				$x_{n+2}$	0	0			

In diesem Fall wird  $F_\epsilon$ :

$$F_\epsilon = \frac{12}{45} h^3 \frac{\epsilon}{2h_u(h_0+2h)} \quad (31)$$

Die Frage ist nun: Wie groß muß der Fehler  $\epsilon$  sein, wenn bei einer ausreichend engen Teilung  $\frac{|F_e|}{F_f} \leq 1$  das Gesamt-

Gleichung (24) in Gleichung (19) eingesetzt, ergibt für den Funktionsfehler der Fläche eines Doppelstreifens nach Simpson:

$$F_f = 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot a \sqrt{2} \cdot h = 1,697 \cdot 10^{-4} \cdot a \cdot h \text{ [m]} \quad (26)$$

und mit Gleichung (20) für  $n$  Doppelstreifen:

$$F_{F'} = 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot a \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n h_i^2} = 1,697 \cdot 10^{-4} \cdot a \sqrt{\sum_{i=1}^n h_i^2} \text{ [m]} \quad (27)$$

3) vgl. das neue Differenzenschema auf Seite 61 mit  $h = 1,60 \text{ m}$ .

fehlerverhältnis  $\frac{F_e + F_f}{F_f} \geq 1$  wird?  $F_e$  und  $F_f$  können verschiedene Vorzeichen haben, so daß im ungünstigsten Falle  $\frac{F_e}{F_f} \geq 2$  werden muß, damit  $\frac{F_e + F_f}{F_f} \geq 1$  wird.

Es wird also entsprechend Gleichung (28) mit den Gleichungen (30) und (31) für einen Fehler  $\epsilon_n$  der mittleren Ordinate n

$$\epsilon_n \geq 0,0012 \cdot a \cdot \frac{(h_u + h)(h_o + h)}{h^2} \quad (32)$$

für einen Fehler  $\epsilon_{n \pm 1}$

der äußeren Ordinaten n + 1 oder n - 1 ;

$$\epsilon_{n \pm 1} \geq 0,0024 \cdot a \cdot \frac{h_{u.o.}(h_{u.o.} + 2h)}{h^2} \quad (33)$$

Jeder größere Fehler wird nach der beschriebenen Methode der Fehlerbestimmung auf jeden Fall angezeigt (vgl. Abschnitt 20).

Zur Beurteilung der Gleichungen (32) und (33) möge ein Beispiel dienen: Die Funktion des Beispiels im Abschnitt 10 sei ausreichend eng geteilt, also  $h = 1,60$  m. Der Maßstab sei  $a = 50$ . Das Differenzenschema lautet

4 h	3 h	2 h	h	x · y = f(x)	$\Delta y$	[xx <sub>1</sub> ]	$\Delta[xx]$	[xx <sub>1</sub> x <sub>2</sub> ]	$\Delta[xxx]$	[xx <sub>1</sub> x <sub>2</sub> x <sub>3</sub> ]	$\Delta[xxxx]$	[xx <sub>1</sub> x <sub>2</sub> x <sub>3</sub> x <sub>4</sub> ]
				0 0	2,97	2,121						
			1,4	1,4 2,97	1,74	1,087	-1,034	-0,3447				
8,0	4,6	3,0	1,6	3 4,71	1,12	0,700	-0,387	-0,1209	0,2238	+ 0,04865		
	6,6	5,0	1,6	4,6 5,83	1,35	0,397	-0,303	-0,0606	0,0603	+ 0,00914	- 0,03951	- 0,00494
			3,4	8 7,18								

Es werden:

$$\epsilon_n \geq 0,060 \cdot \frac{15}{256} = 0,35 \text{ m}$$

$$\epsilon_{n-1} \geq 0,120 \cdot \frac{9,24}{256} = 0,47 \text{ m}$$

$$\epsilon_{n+1} \geq 0,120 \cdot \frac{15,64}{256} = 0,73 \text{ m.}$$

Wir wollen prüfen, wie stark sich diese Abweichungen in den Simpson-Summen auswirken:

	Simpsonintegral	Abweichung	% von
$\epsilon = \epsilon$	$\epsilon = 0$		147,41 m <sup>2</sup>
$\epsilon_n = - 35 \text{ cm}$	154,87 m <sup>2</sup>	7,46 m <sup>2</sup>	5,1 %
$\epsilon_{n-1} = + 47 \text{ cm}$	149,91 m <sup>2</sup>	2,50 m <sup>2</sup>	1,7 %
$\epsilon_{n+1} = - 73 \text{ cm}$	151,30 m <sup>2</sup>	3,89 m <sup>2</sup>	2,6 %

Dieses Beispiel ist zwar nur ein Einzelfall, man erkennt jedoch, daß es möglich ist, Ordinatenfehler zu finden, die auf den Wert des Teilintegrals von  $-h \leq x \leq +h$  größenordnungsmäßig einen Einfluß von 5 % haben.

Die in den vorigen Abschnitten beschriebene Fehlerrechnung läßt sich für den Digitalrechner programmieren, wodurch es möglich wird, sämtliche Aufmaße, durch die die Oberfläche des Schiffes beschrieben wird, nacheinander zu prüfen, wobei alle möglichen Fehler, soweit sie von merklichem Einfluß auf die Summe aller Teilintegrale sind, gefunden werden können. Näheres hierüber ist auch aus Abschnitt 20 zu entnehmen.

### 13. Fehler durch Interpolation

Da die Integrationsgrenzen in der Regel nicht mit den Begrenzungen der Doppelstreifen in den Schiffsaufmaßen zusammenfallen, sind Zwischenordinaten durch Interpolation zu finden. Es wird bei den Integrationen jeder Doppelstreifen getrennt behandelt, so daß es nahe liegt, ein Interpolationspolynom zweiten Grades durch die jeweils 3 Punkte eines Doppelstreifens zu legen. Der Grad dieser Funktion ist allerdings um eins niedriger als bei der Integration nach Simpson. Dies gibt zu Fehlerbetrachtungen Anlaß.

Der Fehler bei der Anwendung der Newtonschen Interpolationsformel kann durch das sogenannte Restglied angegeben werden. Man gewinnt es, indem man das nächsthöhere Glied des Näherungspolynoms so bildet, daß die Abszisse des zu

interpolierenden Punktes gerade zu einer Stützstelle wird, für die der Fehler ja verschwindet. Auf diese Weise gibt das Restglied den Fehler exakt an. In Fällen quadratischer Interpolation, worauf die folgenden Ausführungen beschränkt sein sollen, lautet das so aufgestellte Restglied R in der Schreibweise der bereits verwendeten „Steigungen“:

$$R = (x - x_{n-1})(x - x_n)(x - x_{n+1}) [x x_{n-1} x_n x_{n+1}]$$

Führen wir die Schrittweite h des untersuchten Doppelstreifens ein  $h = x_{n+1} - x_n = x_n - x_{n-1}$  und setzen wir  $x/h = \bar{x}$  ( $0 \leq \bar{x} \leq 1$ ), so wird:

$$R = h^3 \bar{x} (1 - \bar{x}) (2 - \bar{x}) [x x_{n-1} x_n x_{n+1}] = Q(\bar{x}) \cdot h^3 [ \dots ] \quad (34)$$

Normalerweise wird R am größten, wenn

$$Q(\bar{x}) = \bar{x} (1 - \bar{x}) (2 - \bar{x})$$

ein Maximum wird. Dies ist bei  $\bar{x} = \frac{1}{2}$  der Fall;  $Q_{\max} = 3/8$ .

Also wird der Fehler auf der Hälfte der Schrittweite h

$$R_{h/2} = 3/8 h^3 [x x_{n-1} x_n x_{n+1}] \quad (35)$$

Die dritte Steigung in der eckigen Klammer kann für den Fall  $x = h/2$  unter Benutzung des bekannten Schemas für die Steigungen ermittelt werden:

3 h	2 h	h	x	y = f(x)	$\Delta y$	[xx <sub>1</sub> ]	[xx <sub>1</sub> x <sub>2</sub> ]	[xx <sub>1</sub> x <sub>2</sub> x <sub>3</sub> ]
			$x_2$	$y_2$	$\Delta \frac{h}{2} 2$	$2h \Delta \frac{h}{2} 2$	$\frac{2}{h^2} (\Delta \frac{h}{2} 1 - \Delta \frac{h}{2} 2)$	
			x	y	$\Delta \frac{h}{2} 1$	$2h \Delta \frac{h}{2} 1$	$\frac{3}{2h^2} (\Delta h_0 - 2 \Delta \frac{h}{2} 1)$	$\frac{1}{h^3} (\frac{\Delta h_0}{3} - \frac{5}{3} \Delta \frac{h}{2} 1 + \Delta \frac{h}{2} 2)$
2 h	h	h/2	$x_1$	$y_1$	$\Delta h_0$	1 h $\Delta h_0$		
	3/2 h	h	$x_0$	$y_0$				

Es wird also mit Gleichung (35):

$$R \frac{h}{2} = \frac{1}{6} (\Delta_{h_0} - 5 \Delta_{\frac{h}{2} 1} + 3 \Delta_{\frac{h}{2} 2}). \quad (36)$$

Auch diese sehr einfache Formel gibt den Fehler an der Stelle  $h/2$ , also in der Regel den größten Fehler, exakt an. Aus Symmetriegründen ist es gleichgültig, ob der Punkt  $(x; y)$  in der oberen oder in der unteren Intervallhälfte  $h$  liegt. Wie die Indices in beiden Fällen zu setzen sind, macht Bild 4 deutlich.

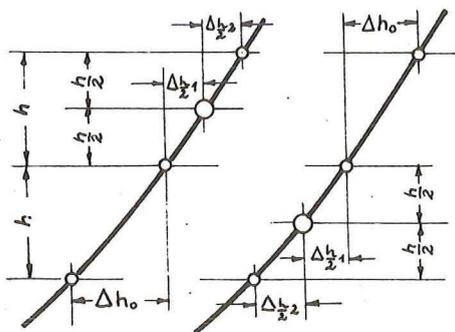


Bild 4 Differenzen  $\Delta$  aus Gleichung (36)

Wie wirkt sich dieser Fehler auf das Gesamtergebnis, beispielsweise auf die Fläche der Wasserlinien, aus, deren Ordinaten ausschließlich aus interpolierten Punkten bestehen? Der interpolierte Zwischenwert kann mit gleicher Wahrscheinlichkeit an jeder beliebigen Stelle des jeweiligen Doppelstreifens liegen. Es interessiert also die Größenordnung des mittleren Fehlers bei Interpolation aller Ordinaten.

Hierbei ist eine zweifache Mannigfaltigkeit der Möglichkeiten zu beachten. Einmal ist, wie gesagt, jede beliebige Treffstelle innerhalb des Einzeldoppelstreifens zu berücksichtigen, andererseits kann jeder Doppelstreifen anders aussehen, d. h. die Fehler  $R$  verschiedener Doppelstreifen sind einer Streuung entsprechend der besonderen Merkmale jedes Streifens unterworfen. Ist  $n$  die Zahl der Möglichkeiten innerhalb eines Streifens und  $m$  die Zahl der Doppelstreifen, so muß gelten:

$$m_R = \sqrt{\frac{\sum^m \sqrt{\frac{\sum^n R^2}{n}}}{m}} \quad (37)$$

Betrachten wir zunächst beliebige Treffstellen in einem der insgesamt  $m$  Doppelstreifen, so können wir sagen, innerhalb des Gesamtintervalls  $0 \leq \bar{x} \leq 1$  wird die zu interpolierende Ordinate wahrscheinlich in jedem Teilintervall  $d\bar{x}$  gleich oft, etwa  $v$  mal, auftreten. Die Summe der Fehlerquadrate wird also für das Intervall  $dx$  mit Gleichung (34)

$$f^2 = v \cdot \bar{x}^2 (1 - \bar{x})^2 (2 - \bar{x})^2 h^6 [x_{x_{n-1}} x_n x_{n+1}]^2. \quad (38)$$

Die 3. Steigung  $[xxxx]$  ist von der Gestalt der zu interpolierenden Funktion abhängig und damit eigentlich auch von  $\bar{x}$ . Da wir im ganzen jedoch  $m$  verschiedene Doppelstreifen betrachten und wahrscheinlich ist, daß für  $[xxxx]$  ebenso oft ein Anstieg mit  $\bar{x}$  wie ein Abfall mit  $\bar{x}$  eintritt, kann man annehmen, daß im Mittel  $[xxxx]$  von  $\bar{x}$  unabhängig sein wird. Damit wird die Summe der Fehlerquadrate in allen Teilintervallen  $d\bar{x}$ :

$$\sum^n R^2 = v \cdot h^6 [x_{x_{n-1}} x_n x_{n+1}]^2 \cdot \int_0^1 \bar{x}^2 (1 - \bar{x})^2 (2 - \bar{x})^2 d\bar{x}. \quad (39)$$

Die Zahl der Fälle ist  $n = v \int_0^1 d\bar{x} = v$ , somit wird:

$$\begin{aligned} \sqrt{\frac{\sum^n R^2}{n}} &= h^3 [x_{x_{n-1}} x_n x_{n+1}] \sqrt{\int_0^1 \bar{x}^2 (1 - \bar{x})^2 (2 - \bar{x})^2 d\bar{x}} \\ &= h^3 [x_{x_{n-1}} x_n x_{n+1}] \cdot \sqrt{\frac{8}{105}} = 0,276 \cdot h^3 [x_{x_{n-1}} x_n x_{n+1}]. \end{aligned} \quad (40)$$

Zur Berechnung der Streuung dieses mittleren Fehlers bei  $m$  verschiedenen Doppelstreifen wäre  $[xxxx]$  für eine möglichst große Zahl von vorkommenden Doppelstreifen zu bestimmen. Wir hatten festgestellt, daß im Mittel eine Abhängigkeit von  $\bar{x}$  zu vernachlässigen ist, so daß wir für  $[xxxx]$   $(\bar{x}) \approx \text{konst} = [xxxx] \frac{h}{2}$  setzen können. Es ist aber nach Gleichung (35) und (36):

$$[x_{x_{n-1}} x_n x_{n+1}] \frac{h}{2} = \frac{1}{3 h^3} (\Delta_{h_0} - 5 \Delta_{\frac{h}{2} 1} + 3 \Delta_{\frac{h}{2} 2}).$$

Damit geht mit Gleichung (40) die Gleichung (37) über in:

$$m_R = \sqrt{\frac{\sum^m (\Delta_{h_0} - 5 \Delta_{\frac{h}{2} 1} + 3 \Delta_{\frac{h}{2} 2})^2}{m}} \quad (41)$$

Um für den konkreten Fall von Wasserlinienaufmaßen zu einem Zahlenwert des mittleren Fehlers  $m_R$  zu kommen, wurde für eine größere Zahl von Höhendoppelstreifen aller Spanten eines für den Elektronenrechner aufgemessenen Schiffes der Klammerausdruck in Gleichung (41) bestimmt. Es erwies sich dabei als nicht möglich, Gesetzmäßigkeiten über eine besondere Verteilung im Kollektiv aufzuspüren. Die Zahlenwerte streuten ziemlich gleichmäßig. Irgendwelche Häufungspunkte konnten nicht festgestellt werden. Für das untersuchte Kollektiv ergab sich der mittlere Fehler zu  $m_R = 0,006$  m. Im untersuchten Bereich — es handelte sich um Doppelstreifen im Bereich der Seitenwand, in dem normalerweise die Wasserlinie liegt — waren demnach die Wasserlinienordinaten auf etwa 0,6 cm genau interpoliert worden. Die größte im Kollektiv auftretende Abweichung betrug 1,5 cm.

Man kann nun noch bei bekannten mittleren Fehler den voraussichtlichen Gesamtfehler bei der Integration der Ordinaten zur Wasserlinienfläche bestimmen. Wenn die Schrittweite in  $x$ -Richtung für die Simpson-Rechnung  $h_x$  konstant ist, geht Gleichung (20) über in

$$F_{FWL} = m_y \cdot h \sqrt{2n} = m_y \frac{2n \cdot h}{\sqrt{2n}} = m_y \cdot \frac{L}{\sqrt{2n}} \quad (42)$$

mit  $n$ , der Anzahl der Doppelstreifen. In unserem Falle ist beim gerechneten Beispiel  $m_y = m_R = 0,006$  m;  $n = 12$ ;  $L = 140$  m, und es ergibt sich für den mittleren Fehler

$$F_{FWL} = 0,006 \cdot \frac{140}{\sqrt{24}} = 0,17 \text{ m}^2 \text{ (für eine Schiffshälfte).}$$

Die Wasserlinienfläche betrug in diesem Falle etwa 2000 m<sup>2</sup>. Es ergibt sich demnach ein prozentualer Fehler von 0,017 % der Wasserlinienfläche. Es ist einzusehen, daß diese Genauigkeit ausreicht. Damit zeigt dieses Beispiel, daß es durchaus gerechtfertigt ist, die Interpolation quadratisch durchzuführen.

#### 14. Spantteilung an den Schiffsenden

Ein weiterer Anlaß zu Fehlerbetrachtungen bei numerischen Integrationen von Schiffslinien ergibt sich an den Schiffsenden. Beginnt oder endet ein Integrationsintervall der Länge nach nicht gerade an einem der gewählten Spantquerschnitte, so entstehen „Endstücke“, für die die Einteilung in Längsdoppelstreifen nicht zutrifft. Beide möglichen Wege,

diese Endstücke genau zu berücksichtigen, sie getrennt zu integrieren oder die Spantteilung entsprechend zu verändern, wurden bei der Programmierung der Leckrechnung nicht beschritten, da der Aufwand mit dem erreichbaren Vorteil in einem Mißverhältnis bestanden hätte, was aus folgender Betrachtung hervorgeht:

Es soll der Fehler abgeschätzt werden, der bei der Integration eines Doppelintervalls entsteht, bei dem die Funktion nur in einem Teil Werte aufweist, die von Null verschieden sind, d. h. die Funktion läuft an einer beliebigen Stelle des Doppelintervalls in die Abszisse ein. Der Einfachheit halber sei zur Fehlerabschätzung ein linearer Verlauf der einlaufenden Funktion angenommen. Mit den Bezeichnungen von Bild 5 lassen sich für den Fehler F folgende einfache Beziehungen anschreiben:

- 1) für  $1 \leq \bar{x} \leq 2 \dots \dots F = \text{tg } \alpha \cdot h^2 (\frac{5}{3}\bar{x} - \frac{1}{2}\bar{x}^2 - \frac{4}{3}) \cdot \frac{a_y}{a_x}$
- 2) für  $0 \leq \bar{x} \leq 1 \dots \dots F = \text{tg } \alpha \cdot h^2 (\frac{1}{3}\bar{x} - \frac{1}{2}\bar{x}^2) \cdot \frac{a_y}{a_x}$

$a_y$ : Maßstab der Ordinate  
 $a_x$ : Maßstab der Abszisse.

Die Ausdrücke in den Klammern sind in Bild 5 ausgewertet. Der größte Fehler ergibt sich bei  $\bar{x} = 1$ , also wird

$$F_{\max} = -\frac{1}{6} \cdot \text{tg } \alpha \cdot h^2 \cdot \frac{a_y}{a_x} \quad (43)$$

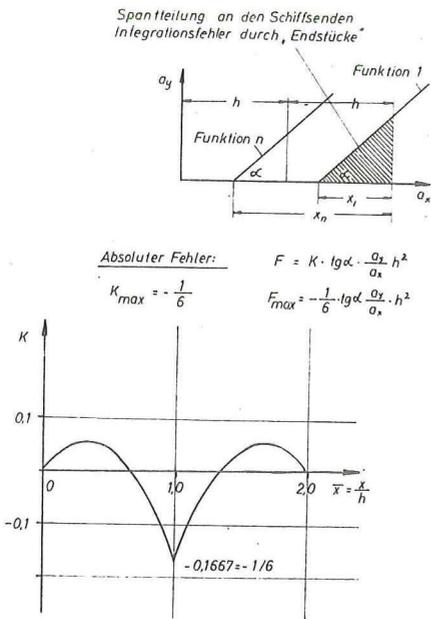


Bild 5

Für schwach konkav oder konvex gekrümmte Funktionläufe ergeben sich Fehlerwerte der gleichen Größenordnung, wenn man für  $\alpha$  den Neigungswinkel der Einlauf tangente einsetzt.

Offenbar wird sich ein solcher Fehler besonders stark auswirken, wenn er in Gestalt eines Längenmomentes, also multipliziert mit der halben Schiffslänge als Hebelarm, in Erscheinung tritt. Daher wollen wir Fehler im Längenmoment der Verdrängung abschätzen:

Es wird mit Gleichung (43):

$$|F_{ML}| \leq \frac{1}{6} \cdot \text{tg } \alpha \cdot h^2 \cdot \frac{L}{2} \cdot \frac{a_y}{a_x} \quad (44)$$

Dieser Fehler wird hinreichend klein, wenn die durch ihn entstehende Ein- und Austauschung infolge Trimm an den Schiffsenden  $t_h \approx t_v \leq 0,5$  cm beträgt. Hierfür gilt:

$$t = t_h + t_v = 0,01 \text{ m} \approx \frac{F_{ML}}{J_L} \cdot L.$$

Für das Längenträgheitsmoment der Wasserlinienfläche  $J_L$  kann man grob schreiben:

$$J_L \approx 0,05 \cdot L^3 \cdot B.$$

Dies alles in Gleichung (44) eingesetzt und nach h aufgelöst, ergibt:

$$h \approx 0,077 \sqrt{\frac{L \cdot B \cdot a_x}{\text{tg } \alpha_v \cdot a_y}} \quad (45)$$

Hierin bedeuten  $\alpha_v$  den Einlaufwinkel der Verdrängungskurve in die Abszisse am betrachteten Schiffsende und  $a_x$  und  $a_y$  die Zeichnungsmaßstäbe der Koordinatenachsen. Der Winkel  $\alpha_v$  wird allerdings für größere Tiefgänge nicht ohne weiteres bekannt sein; daher wurden von einigen Schiffen die Werte  $\text{tg } \alpha_v \cdot \frac{a_y}{a_x}$  festgestellt und für Vorschiff und Hinterschiff abhängig vom Quotienten  $\frac{T}{T_{CWL}}$  aufgetragen (Bild 6). Im Hinblick auf Gleichung (45) erscheint in diesem Bilde die Wurzel des Kehrwertes

$$0,077 \sqrt{\frac{a_x}{\text{tg } \alpha_v \cdot a_y}} = c_x,$$

so daß wir jetzt für h schreiben können:

$$h = c_x \cdot \sqrt{L \cdot B} \quad (46)$$

In Bild 6 streuen die  $c_x$ -Werte etwa innerhalb des schraffierten Gebietes. Als Richtwerte für die Spantteilung im Bereich ausfallender Steven könnte man verwenden:

für das Hinterschiff  $c_{xh} \approx 0,03 - 0,04$

für das Vorschiff  $c_{xv} \approx 0,04 - 0,05$ .

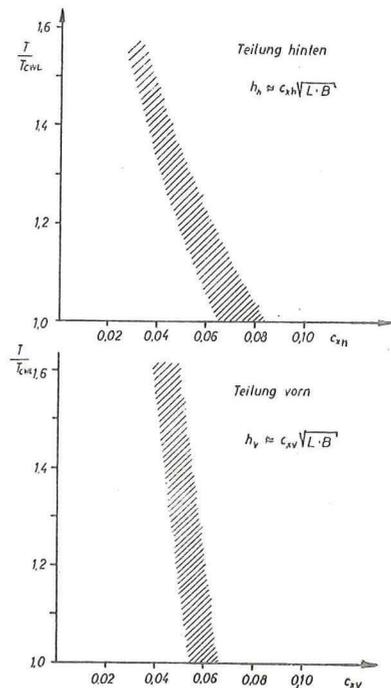


Bild 6

Damit würde sich z. B. für ein 140 m langes und 20 m breites Schiff

für die hintere Spantteil:  $1,60 \text{ m} \leq h \leq 2,10 \text{ m}$

für die vordere Spantteil:  $2,10 \text{ m} \leq h \leq 2,70 \text{ m}$

ergeben. Das sind Schrittweiten  $h$ , die für praktische Fälle ohne weiteres realisierbar sind. Das bedeutet, daß es tatsächlich nicht nötig ist, die Endstücke durch eine übrigens recht komplizierte Programmierung genau zu erfassen.

**B. Programme zur Durchführung von Leckrechnungen**

**15. Programmablauf**

Für den Benutzer eines fertig vorliegenden Programms für einen Digitalrechner sind irgendwelche Kenntnisse über dessen Ablauf im einzelnen nicht erforderlich. Die ihn interessierenden Angaben sind in der „Programmbeschreibung“ zusammengestellt. Es ist deshalb unnötig, die im folgenden erläuterten Programme vollständig zu analysieren. Lediglich auf das Rechenprinzip, welches bei dieser Art der Leckrechnung angewendet wird und das sich in manchem vom Gewohnten unterscheidet, soll eingegangen werden.

Um einen Überblick zu erhalten, sei zunächst der Ablauf der Rechnung, wie sie die Maschine durchführt, in groben Zügen skizziert:

1. Berechnung der geometrischen Größen der Schiffssform für die Ausgangsschwimmlage.
2. Abzug der geometrischen Größen des Leckbereiches von denen des Schiffes nach der Vorstellung wegfallender Auftrieb, ebenfalls für die Ausgangsschwimmlage.
3. Aus der Differenz der geometrischen Größen nach 1 und 2 wird näherungsweise Tauchung und Vertrimmung bestimmt. Mit der entstehenden neuen Schwimmlage wird eine neue Rechnung nach 1, 2 und 3 durchgeführt. Diese Iterationsrechnung läßt das Schiff sozusagen in die Endschwimmlage einpendeln.
4. Nach jedem Iterationsschritt wird geprüft, ob Verdrängung und Längenmoment der Verdrängung der Ausgangslage erreicht sind. Ist dies genügend genau der Fall, werden
5. die interessierenden Daten der Endschwimmlage errechnet und als Resultat ausgeworfen. Das Programm geht zum nächsten Leckfall über.
6. Falls unsymmetrische Überflutungen vorliegen, werden entstehende Neigungen mit benötigter Anfangsstabilität näherungsweise in Beziehung gesetzt und in geeigneter Weise kenntlich gemacht. Entsprechende Angaben werden dem Resultat nach 5 hinzugefügt.

Bei den unter Ziffer 1 bis 6 zu berechnenden geometrischen Größen der Schiffssform und des Leckraumes handelt es sich im einzelnen um die Grundgrößen:

$V, M_L, M_B$ : zur Berechnung des Gleichgewichtszustandes des Schiffes,

$M_H, J_B$ : zur Berechnung der Querstabilität in aufrechter Lage und um die Hilfsgrößen:

$F_{WL}, M_{WL}, J_L$ : zur Durchführung der Schwimmlagenkorrektur für die Iterationsrechnung nach Ziffer 3.

**16. Berechnung der geometrischen Größen der Schiffssform für beliebige aufrechte Schwimmlagen (Teilprogramm: Trimmkurvenblatt)**

Das Programm veranlaßt die Maschine, so vorzugehen, wie es etwa der Schiffbauer bei der Berechnung eines Kurvenblattes tut. Nacheinander werden die einzelnen Spantquerschnitte numerisch integriert. Die entstehenden Spantflächen und Spantmomente werden in Teilabschnitten der Länge nach zum Gesamtvolumen und den Volumenmomenten aufintegriert.

Der Maschine stehen hierfür die Schiffsaufmaße zur Verfügung, deren Anordnung nach den Erfordernissen der Simpson'schen Regel in den Abschnitten 7 bis 13 erörtert wurde.

Die Koordinaten  $(x; y; z)$  sämtlicher Aufmaßpunkte sind auf der Magnettrommel gespeichert und stehen jederzeit auf Anruf für die Berechnung zur Verfügung. Die obere Integrationsgrenze ist die Wasserlinie. Ihre Lage ist definiert durch den mittleren Tiefgang  $T_m$  und  $\text{tg } \psi$  ( $\psi$ : Trimmwinkel). Damit ist die Integrationsgrenze an einer Stelle  $x$ :

$$T_x = x \cdot \text{tg } \psi + T_m$$

Da  $T_x$  in der Regel nicht mit der oberen Begrenzung eines Höhendoppelstreifens übereinstimmt, muß der Schnittpunkt zwischen Spantumriß und Wasserlinie  $z = T_x$  durch Interpolation bestimmt werden. Es wurde in Abschnitt 12 gezeigt, daß eine quadratische Interpolation ausreichend genau ist. Das Programm bildet sich oberhalb des letzten vollständigen Doppelstreifens unter der Wasserlinie  $T_x$  durch Interpolation die Ordinaten für einen weiteren Doppelstreifen, bei dem die dritte Stützstelle  $z_{n+1} = T_x$  wird. Der so entstandene künstliche Doppelstreifen wird darauf wie die anderen nach Simpson integriert.

Aus einem vereinfachten Flußdiagramm geht der Ablauf des Programms zur Ermittlung der gewünschten geometrischen Größen hervor (Bild 7). Zum Verständnis dieser Darstellung sei lediglich bemerkt, daß Partien mit arithmetischen Operationen durch rechteckige Umrandung, dagegen logische Entscheidungen des Programms durch ovale Umrandungen gekennzeichnet sind. Die Richtung des Ablaufs ist durch Pfeile angegeben.

Dieses Teilprogramm kann auch für sich allein benutzt werden und liefert eine vollständige Kurvenblattrechnung für beliebig vertrimmte Schwimmlagen. Für diesen Zweck wird in einem ergänzenden Programmteil, der im Flußdiagramm zwischen (22) und (24) eingeschoben wird, eine Reihe zusätzlicher Angaben über Schwerpunktabstände, Völligkeitsgrade und Einheitstrimmoment hergestellt, die mit ausgestanzt werden.

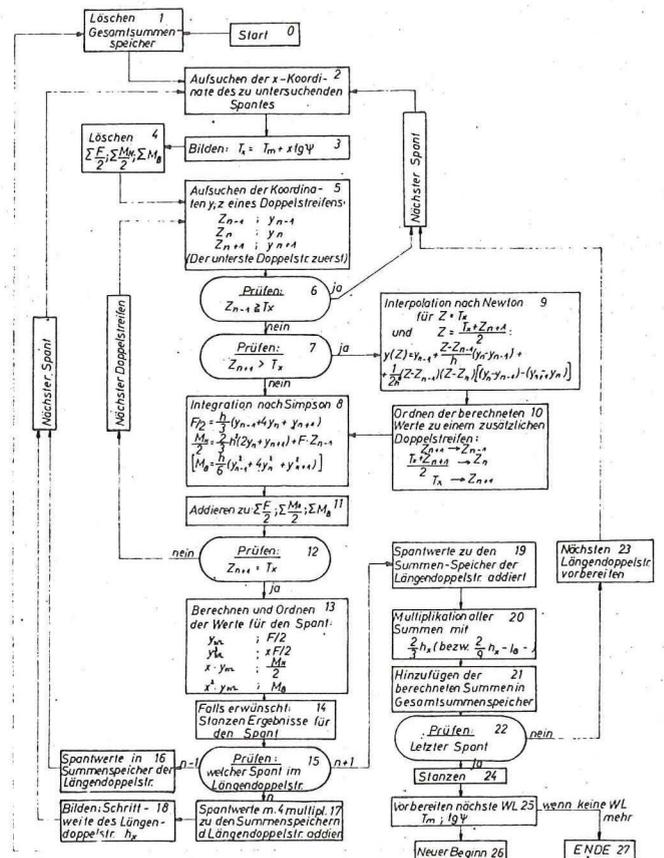


Bild 7

Eine weitere Ergänzung zur Berücksichtigung von gekrümmten oberen Begrenzungsflächen ist möglich. Es kann sich hierbei beispielsweise um die Berücksichtigung eines Decksprungs handeln, wenn bis zu einem Deck mit Sprung integriert werden soll, oder es soll der Einfluß des Seegangs abgeschätzt werden, wobei die Wasserlinie die Gestalt einer Trochoiden- oder Sinuoidenwelle annimmt. Im letzteren Falle kann allerdings das dynamische Verhalten einer Welle nicht erfaßt werden, doch ist es üblich, dies in einer entsprechenden Korrektur der Wellenamplitude näherungsweise zu berücksichtigen und im übrigen statisch zu rechnen. Für solche gekrümmten oberen Integrationsgrenzen wird im Flußdiagramm (3) nach Maßgabe der jeweils vorliegenden Funktion  $T_x = f(x)$  verändert.

17. Berechnung der geometrischen Größen des Leckbereichs für beliebige aufrechte Schwimmlagen

Ein Programm für den Elektronenrechner soll im Rahmen der Aufgabenstellung möglichst allgemeingültig verwendbar sein. Das bedeutet für das Programm zur Durchführung von Leckrechnungen: es soll jede beliebige Leckraumgestalt samt ihrer inneren Aufgliederung richtig erfassen. Dies ist nun, soweit sich das nach den bisherigen Erfahrungen mit dem Programm beurteilen läßt, fast ohne merkliche Einschränkungen gelungen. Auf solche Einschränkungen wird besonders hingewiesen.

Der zu behandelnde Leckbereich wird in Teilräume mit jeweils konstant angenommener Flutbarkeit aufgegliedert. Jeder Teilraum wird durch folgende Einzelgrößen eindeutig gekennzeichnet (vgl. auch Bild 8):

- Lage  $x_h$  der hinteren Begrenzungswand
- Lage  $x_v$  der vorderen Begrenzungswand
- Höhe  $z_{uh}$  der unteren Begrenzung vorn  $z_{uv}$  und hinten  $z_{uh}$
- Höhe  $z_{oh}$  der oberen Begrenzung vorn  $z_{ov}$  und hinten  $z_{oh}$
- Flutbarkeit des Raumes  $\kappa$  sowie die Flutbarkeit des darüber und darunter liegenden Raumes,  $\kappa_o$  und  $\kappa_u$ , wenn die Möglichkeit besteht, daß bei Querneigungen Teile dieser Räume geflutet werden
- (Näheres hierzu Abschnitt 19)

Angaben über die seitliche Begrenzung  $y$  des Raumes, welche die Behandlung der ganzen Vielfalt der möglichen unsymmetrischen Flutungen ermöglichen.

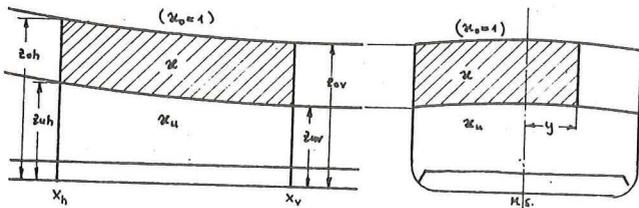


Bild 8 Kennzeichnung eines Teileckraumes

Diese zahlenmäßigen Angaben jedes vorkommenden Einzelraumes werden zusammen mit einer den jeweiligen Raum bezeichnenden Kennzahl auf der Magnettrommel geladen wie die Schiffsaufmaße und stehen wie diese für die Rechnung jederzeit zur Verfügung. Dadurch wird ermöglicht, die Maschine durch den Aufruf mehrerer Leckraumkennzahlen zu veranlassen, gewünschte Kombinationen aus den Einzelräumen herzustellen und mit ihnen eine Leckrechnung durchzuführen.

Da die Begrenzungsflächen solcher Teilräume völlig unabhängig von den Schiffsaufmaßen sind, müssen durch das Programm an allen Integrationsgrenzen Ordinatenwerte aus den Aufmaßen interpoliert werden, wie das im Falle der Integrationsgrenze  $T_x$  im vorigen Abschnitt bereits erwähnt wurde.

Die Integration innerhalb eines Spantes im Leckraum zwischen den Grenzen  $z_u$  und  $z_o$  bzw.  $T_x$  erfolgt in Teilschritten: zunächst wird, wie im vorigen Abschnitt beschrieben, bis  $z_u$  integriert, sodann nochmals von unten an bis  $z_o$  bzw.  $T_x$ , je nachdem, welches die geringere Höhe darstellt, worauf die Werte beider Durchläufe voneinander subtrahiert werden. Dieses umständlich erscheinende Vorgehen hat den Vorteil, daß größere Teile des Programms in verschiedenem Zusammenhang immer wieder benutzbar werden, was letzten Endes eine Einsparung an benötigten Speicherplätzen bedeutet. Dies war aber dringend erforderlich, da die verfügbare Kapazität von 2000 Speichern für das vollständige Programm, die Aufmaße des Schiffes sowie die Kennzeichen der Leckräume sehr knapp war.

Zur Integration der Länge nach stellt das Programm aus jedem Teileckraum einen „Längendoppelstreifen“ her. Es wird also neben  $x_h$  und  $x_v$  noch ein Abszissenwert  $\frac{x_h + x_v}{2}$

gebildet. An diesen drei Stellen stehen in der Regel keine Aufmaß-Spantquerschnitte. Eine Interpolation zwischen den Aufmaßen ( $y; z$ ) der verschiedenen Spanten macht wegen des in Abschnitt 2 bis 12 begründeten, für richtig gehaltenen Prinzips der individuellen Einteilung jedes Spantes Schwierigkeiten. Daher läßt das Programm die Maschine folgendermaßen verfahren: Die drei Spanten, in deren Doppelintervall der Zwischenwert  $x$  liegt, werden nacheinander integriert und die Ergebnisse gespeichert. Zwischen diesen Ergebnissen wird sodann die Interpolation durchgeführt. Dazu ist es erforderlich, daß  $z_u$  und  $z_o$  für die Lagen der drei zu integrierenden Spanten des Doppelstreifens berechnet werden, was aber keine Schwierigkeiten bereitet. Um also die geometrischen Größen eines Teilraumes zu berechnen, ist es normalerweise notwendig,  $3 \times 3 = 9$  Spantquerschnitte zu integrieren und von ihnen auch noch jeden praktisch zweimal — nämlich bis  $z_u$  und  $z_o$  —. Bei kompliziert gestalteten Leckbereichen mit vielen Teilräumen dauert demnach das Berechnen der Leckraumgrößen meist wesentlich länger als die Integration des unbeschädigten Schiffes.

Schwierigkeiten bereitet noch die Entscheidung darüber, ob die obere Integrationsgrenze durch die Wasserlinie ( $T_x$ ) oder durch  $z_o$  gebildet wird. Im ersten Falle sind „Flächenwerte“:  $f; m; i_L; i_B$  zu bestimmen, im zweiten Falle nicht. Nun kommt es auch vor, daß innerhalb des Teilraumes zwischen der Wasserlinie und  $z_o$  bzw.  $z_u$  Schnittpunkte etwa nach Bild 9 auftreten. Links vom Durchstoßpunkt  $x_o$  sind Flächenwerte zu berücksichtigen, da die freie Wasseroberfläche die obere Integrationsgrenze darstellt, rechts von  $x_o$  nicht, da die Wasserlinie hier bereits im Teilraum darüber liegt. Das Programm bestimmt in jedem Falle die Durchstoßpunkte der Wasserlinie mit oberer und unterer Raumbegrenzung nach der Beziehung

$$x_o = \frac{T_m - a_o}{\text{tg } \psi_o - \text{tg } \psi} \quad \text{bzw.} \quad x_u = \frac{T_m - a_u}{\text{tg } \psi_u - \text{tg } \psi}$$

wobei zunächst  $\text{tg } \psi_{o,u}$  und  $a_{o,u}$  aus  $z_h, z_v$  und  $x_h, x_v$  bestimmt werden müssen. Darauf erfolgt eine Prüfung, die feststellt, welcher von den neun möglichen Fällen nach Bild 10 vorliegt. Das Flußdiagramm Bild 11 zeigt, wie die Maschine dabei vorgeht. In den Fällen 4, 5, 8 und 9 wird  $x_v$  bzw.  $x_h$  durch  $x_{o,u}$  ersetzt und der Raum somit in zwei Doppelstreifen aufgeteilt, die nacheinander bearbeitet werden (Bild 9).

Zur Integration der Teilräume selbst, einschließlich der notwendigen Interpolationen, greift das Programm im großen Umfang auf Programmteile des in Abschnitt 15 besprochenen Teilprogramms zurück, die den Charakter von Unterprogrammen erhalten. Die Ergebnisse sämtlicher Teilräume werden aufsummiert und zuletzt von den gespeicherten Größen des unbeschädigten Schiffes für die jeweilige Schwimmelage sub-

trahiert. Auf die Wiedergabe eines Flußdiagrammes, aus dem die vollständige Integration des Leckbereiches hervorgeht, wird verzichtet, da es eher verwirrend wirken würde, als der Übersicht zu dienen.

18. Bestimmung der Endschwimmlage durch Iteration

Die im Abschnitt 14 bereits angedeutete iterative Berechnung der Endschwimmlage hat den Vorteil einer beliebig zu steigenden Genauigkeit. Davon abgesehen eignet sich aber der

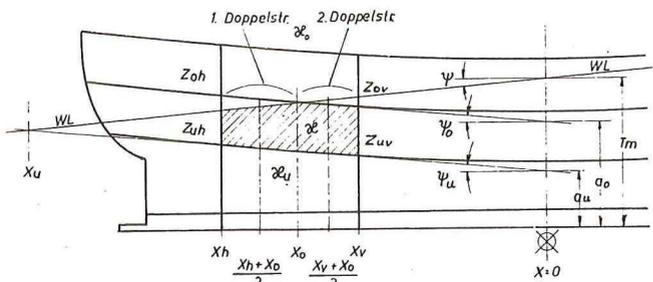


Bild 9 Rechengrößen bei der Bearbeitung eines Teilleckraumes

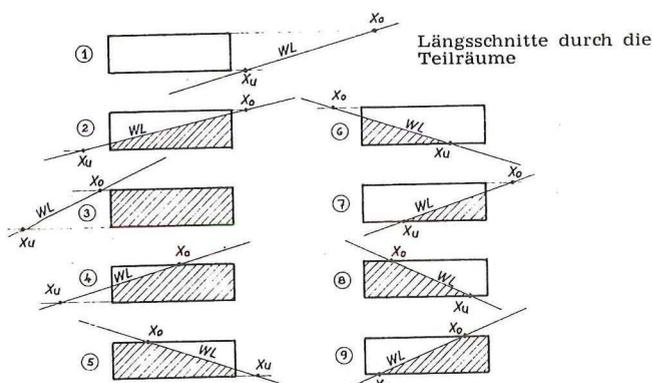


Bild 10 Mögliche Fälle in einem Teilleckraum

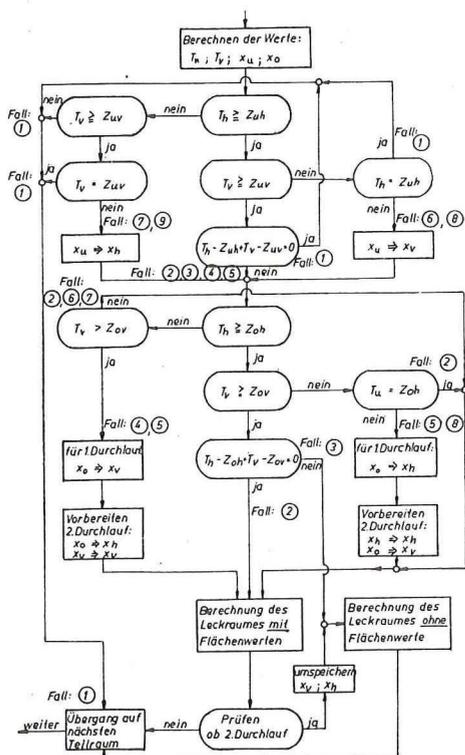


Bild 11

Teil-Flußdiagramm: Auswahl der 9 möglichen Fälle nach Bild 10

Elektronenrechner gerade besonders gut für Iterationsrechnungen. Das liegt bekanntlich daran, daß ja nur ein Iterationsschritt programmiert zu werden braucht und die Maschine dank ihrer Eigenschaft logische Entscheidungen — die Alternative ja oder nein — zu treffen in der Lage ist, selbst das Ende der Rechnungen zu erkennen und darauf zu reagieren. Man nennt solche Iterationsschritte „Schleifen“, und man kann sich kaum ein Programm für einen Digitalrechner vorstellen, das nicht solche Schleifen enthält. In jeder Schleife muß ein Programmteil vorhanden sein, der eine Konvergenz des Ergebnisses herbeiführt, und außerdem muß die Schleife einen Ausgang haben, d. h. ein logischer Befehl muß dabei jeden Durchlauf prüfen, ob die gewünschte Konvergenzbedingung erfüllt ist. Ist dies der Fall, verläßt der Programmablauf die Schleife. Dieses einfache Prinzip ermöglicht beliebige Schleifenkombinationen, Mehrfachschleifen usw.

Die größte im vorliegenden Programm auftretende Schleife umspannt praktisch den ganzen Programmablauf, wie er bisher beschrieben wurde: Integration des unbeschädigten Schiffskörpers für eine Schwimmlage, Integration des gesamten Leckbereiches für die gleiche Schwimmlage, Subtraktion beider Gruppen, was die geometrischen Größen des beschädigten Schiffes für diese Schwimmlage ergibt. Es bleibt noch die Wasserlinienkorrektur sowie den Programmschluß zu erwählen.

Mit den zu Anfang gespeicherten Werten  $V_0$  und  $M_{L0}$  des unbeschädigten Schiffes für die Ausgangslage kann nach jedem Durchgang die Verdrängungsdifferenz  $\Delta V$  und die Momentendifferenz  $\Delta M_L$  gebildet werden. Mit den errechneten geometrischen Größen des beschädigten Schiffes gilt für Tauchung und Trimm näherungsweise

$$\Delta \text{tg } \psi \approx \frac{\Delta M_L - \Delta V \cdot s_{WL \text{ rest}}}{J_{L \text{ rest}} - F_{WL \text{ rest}} \cdot s_{WL \text{ rest}}^2} \quad (47)$$

$$\Delta T \approx \frac{\Delta V}{F_{WL \text{ rest}}} - s_{WL \text{ rest}} \cdot \text{tg } \psi \quad (48)$$

so daß der neue mittlere Tiefgang  $T_{m1}$  und der neue Trimmwinkel  $\text{tg } \psi_1$

$$T_{m1} = T_m + \Delta T \quad (49)$$

$$\text{tg } \psi_1 = \text{tg } \psi + \Delta \text{tg } \psi \quad (50)$$

werden.

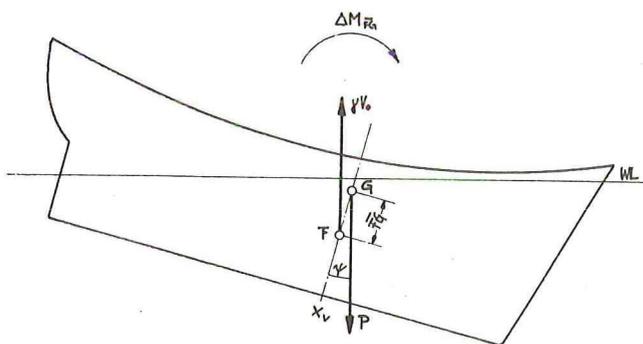
Es sei darauf hingewiesen, daß in der Größe  $\Delta M_L$  der Einfluß der ungleichen Höhenlage der Angriffspunkte der Auftriebs- und Gewichtskraft  $F$  und  $G$  eingearbeitet ist. Nach Bild-12 entsteht ein Kräftepaar  $\Delta M_{FG} = \gamma \cdot V_0 \cdot \overline{FG} \cdot \sin \psi$ , welches das Schiff weitertrimmen will, obgleich  $F$  und  $G$  im Schiffskoordnatenystem die gleiche  $x$ -Koordinate haben. Auf diese Erscheinung ist öfters — auch vom Verfasser in [13] — hingewiesen worden. Meist wird sie jedoch wegen der kleinen Trimmwinkel  $\psi$  vernachlässigt. Wenn im Endzustand der Flutung  $\overline{MG}_1 \geq \overline{MG}_{1 \text{ mind}} \approx 0$  sein darf, kann man  $\overline{FG}$  ersetzen durch  $\overline{MF}$ . Man erfaßt damit den ungünstigsten Fall. Es ist aber

$$\overline{MF}_{1 \text{ rest}} = \frac{J_{B \text{ rest}}}{V_0}$$

somit wird das Kräftepaar mit  $\gamma = 1 \frac{\text{m}^3}{\text{t}}$

$$\Delta M_{FG} \leq J_{B1 \text{ rest}} \cdot \sin \psi.$$

Als weitere Einzelheit sei noch erwähnt, daß eine Korrektur nach Gleichung (47) beim ersten Iterationsschritt meist zu große Trimmänderungen ergibt. Es kann sogar leicht vorkommen, daß eine Wasserlinie berechnet wird, die die oberen Spantbegrenzungen eintauchen läßt, obwohl diese Gefahr in Wirklichkeit nicht besteht. Daher wurde das Programm so



$$\Delta M_{\overline{FG}} = \gamma \cdot V_0 \cdot \overline{FG} \cdot \sin \psi$$

Beim beschädigten Schiff:

$$\Delta M_{\overline{FG}} \approx J_{B \text{ rest}} \cdot \sin \psi$$

**Bild 12 Berücksichtigung ΔM**

eingrichtet, daß es bei der Korrektur des ersten Durchlaufes den Nenner der Gleichung (47) durch die Größe  $J_L$  der unbeschädigten Anfangslage ersetzt. Es ergibt sich durch den somit vergrößerten Nenner ein kleinerer Trimm, der meist wesentlich näher am Ziel liegt. Dieses Vorgehen ist mit der Wirkung eines Stoßdämpfers zu vergleichen, und hat wie dieser eine schnellere Konvergenz zur Folge.

$\Delta T$  und  $\Delta \tan \psi$  verringern sich nach jedem Durchlauf und konvergieren gegen Null. Sind sie klein genug, verläßt das Programm die Schleife. Dies ist meist schon nach drei Durchläufen der Fall. Die Zahl der Durchläufe kann noch weiter verringert werden, wenn für einen gleichbleibenden Ausgangszustand mehrere Leckraumkombinationen untersucht werden sollen. Das Programm kann die Ausgangswerte des unbeschädigten Schiffes für diesen Tiefgang auch über mehrere Leckrechnungen hinweg fest speichern, so daß in jedem Einzelleckfall von einer geschätzten, dem vermutlichen Endzustand ähnlichen Schwimmlage ausgegangen werden kann. Je besser geschätzt wird, desto geringer ist die Zahl der Durchläufe. Es ist bei geschickter Schätzung möglich — insbesondere bei Anwendung der unter V angegebenen Entwurfsdiagramme —, daß bereits nach einem einzigen Durchlauf das Resultat vorliegt.

### 19. Behandlung unsymmetrischer Überflutungen

In Abschnitt 16 wurde bereits darauf hingewiesen, daß auch unsymmetrische Überflutungen vom Programm erfaßt werden können. Wir wollen auf das Vorgehen der Maschine in solchen Fällen kurz eingehen.

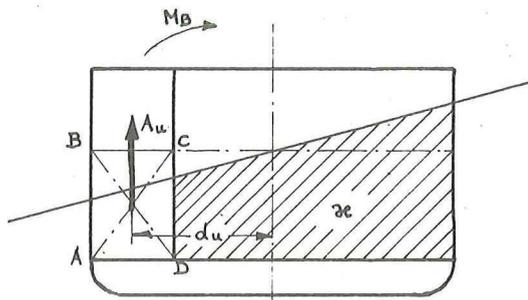
Alle Integrationen werden für die aufrechte Lage des Schiffes durchgeführt. Das gilt auch für die sich einstellende Endschwimmlage. Bei unsymmetrischer Flutung wird — ebenfalls für die aufrechte Lage — aus der Differenz der Breitenmomente beider Schiffshälften ein resultierendes Kippmoment berechnet. Bis hierher sind alle Berechnungen exakt.

Da nun der aufrechte Schwimmzustand des Schiffes bei Vorhandensein von Momenten  $M_B$  nicht realistisch ist, müssen auch die entstehenden Querneigungen in die Berechnung aufgenommen werden. Diese behandelt das Programm aber nur näherungsweise. Das hat im wesentlichen zwei Gründe: Einmal wäre für die exakte Erfassung von Schiffsneigungen eine wesentlich größere Zahl von Durchläufen erforderlich, deren jeder wegen des sehr viel komplizierteren Programms wesentlich längere Zeit in Anspruch nehmen würde. Es wäre durchaus denkbar, daß durch die längere Rechenzeit die Wirtschaftlichkeit der Rechnung verlorengehen würde. Der Nutzen hingegen wäre kaum groß genug, da sich, wie wir sehen werden, für sehr viele Fälle auch näherungsweise die Verhältnisse bei Neigungen durchaus befriedigend erfassen lassen. Zum anderen aber würde ein Programm, welches sämtliche Ände-

rungen der Schwimmlage bei Überflutung einschließlich der Querneigungen exakt berechnet, zu umfangreich für den uns zur Verfügung stehenden Elektronenrechner IBM 650. Hieraus folgt, daß es zweckmäßig wäre, will man auf eine exakte Behandlung von Querneigungen nicht verzichten, die Gesamtarbeit auf zwei Programme aufzuteilen, von denen das erste Tauchung und Trimm, das zweite, ausgehend von dieser Endschwimmlage, die Querneigung, d. h. die Pantokarenen des verletzten und vertrimmt eingetauchten Schiffes für einige besonders kritische Fälle berechnet. Dies ist durchaus möglich. Die Arbeiten an diesem zweiten Programm sind bereits abgeschlossen. Die Programmierung führte can. arch. nav. H. Söding aus. Im Rahmen dieser Arbeit ist von diesem zweiten Programm bereits in Teil V F Gebrauch gemacht worden.

Die erwähnte näherungsweise Bearbeitung von Querneigungen wird vom hier beschriebenen Programm in folgender Weise vorgenommen: Unter Verwendung der Gleichung (10) wird berechnet, wie groß das verbleibende  $\overline{MG}_\varphi$  sein muß, damit sich gerade ein bestimmter Neigungswinkel  $\varphi_G$  des Schiffes einstellt. Dies ist in jedem unsymmetrischen Leckfall für drei vorgesehene Neigungswinkel, z. B.  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$  oder  $4^\circ$ ,  $7^\circ$ ,  $12^\circ$  durchgeführt, wobei als Faktor  $\zeta$  ein mittlerer Wert  $\zeta = 0,8$  eingesetzt wird. Es werden in Teil V F noch Untersuchungen angestellt, die diese Wahl rechtfertigen.

Das krängende Moment  $M_B = \kappa_v \cdot A_u \cdot d$  in Gleichung (10) wird in jedem Falle als unabhängig vom Neigungswinkel betrachtet, was auch richtig ist, solange die bei Querneigungen ein- und austauchenden Keilvolumen in den Leckräumen der Höhe nach homogen durchflutbar sind, entsprechend Bild 13.



**Bild 13**

In diesem Falle wird das aufrichtende Moment der Keilvolumen über das Breitenträgheitsmoment der Wasserlinienrestfläche des beschädigten Schiffes nach der Anschauung wegfallender Auftrieb vollständig erfaßt<sup>4)</sup>.  $M_B$  wird berechnet:

$$M_B = \kappa_v \cdot A_u \cdot d_u = \kappa_v \int_0^l F_{ABCD} \cdot d_u \cdot dx$$

In anderen Fällen, etwa nach Bild 14, können die Keilvolumen der Höhe nach ungleichmäßig flutbar sein. Man kann solche Leckfälle behandeln, indem man  $M_B$  um die Anteile

$$\int_0^l [(\kappa_1 - \kappa_2) \cdot F_{EFG} \cdot d_1 + (\kappa_3 - \kappa_2) \cdot F_{HIJK} \cdot d_3] dx$$

vergrößert nach der Auffassung, es handele sich bei den stärker durchfluteten Teilen der Keilvolumen um hinzukommende Gewichtsanteile, die das krängende Moment vergrößern.

Man kann aber auch in konsequenter Beibehaltung der Anschauung wegfallender Auftrieb das Breitenträgheitsmoment der Wasserlinienrestfläche jeweils für die betrachteten Neigungswinkel und damit das aufrichtende Moment der Keilvolumen entsprechend verändern.

<sup>4)</sup> Wobei  $J_{B \text{ rest}}$  auf die Schwerpunktschwerachse der Wasserlinienrestfläche zu beziehen ist, die bei unsymmetrischer Überflutung im allgemeinen nicht mehr mit der Mittschiffslängsachse zusammenfällt.

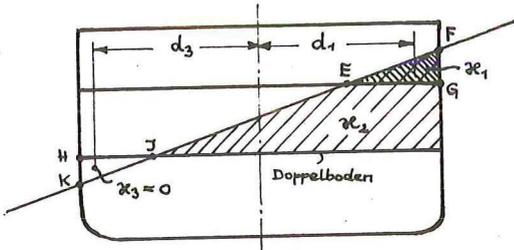


Bild 14

Zunächst war nicht daran gedacht worden, auch derartige recht komplizierte Leckzustände bei der Programmierung zu berücksichtigen.

Es entstand ein erstes Programm, bei dem Fälle nach Bild 14 nicht richtig erfaßt werden, sondern es wird  $\xi_1 = \xi_2 = \xi_3 = 0$  gesetzt. Das reicht für viele einfach gestaltete Leckräume auch vollkommen aus. Für Leckbereiche jedoch, die der Höhe nach stark unterteilt sind, kann man auf eine Beachtung der geschilderten komplizierteren Flutungszustände kaum verzichten. So wurde ein zweites Programm entworfen, welches bei der Berechnung jedes Leckraumquerschnittes prüft, ob Schnittpunkte E bzw. J innerhalb der Schiffsbreite existieren und, wenn nötig, das Breitenträgheitsmoment  $i_B$  entsprechend verändert. Wie dies im einzelnen geschieht, soll nicht näher erörtert werden. Nur sei erwähnt, daß bei der Berechnung der Keilvolumen EFG und HJK an der betreffenden Stelle des Schiffes senkrechte Seitenwände angenommen werden. Mit Ausnahme dieser Vereinfachung ist die Rechnung aber exakt.

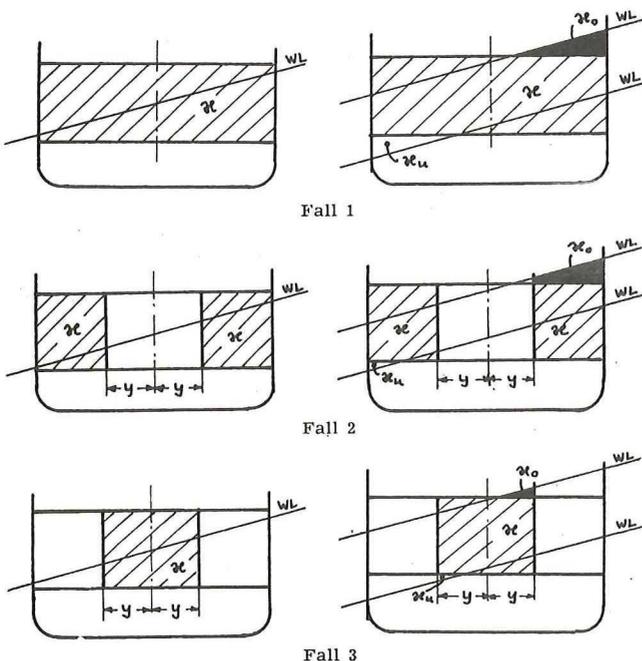
Diese recht umfangreiche Erweiterung des Programms machte es jedoch erforderlich, verschiedene Teile wesentlich zu verändern, um die nötige Zahl an Speicherplätzen freizubekommen. Dies ließ sich nur auf Kosten der benötigten Rechenzeit erreichen. Das zweite Programm benötigt daher für irgendeine Leckrechnung wesentlich mehr Zeit als das erste. Das schnelle aber einfache Programm wird mit L I, das langsamere und vollständige Programm mit L II bezeichnet.

In Bild 15 sind die verschiedenen Anordnungen von Einzelräumen gezeigt, die von den Programmen L I und L II als Leckräume bearbeitet werden können. Jeder Fall wird dem Programm durch ein verschlüsseltes Kennwort mitgeteilt.

**A. Symmetrische Leckräume**

Es rechnet L I

Es rechnet L II mit  $\xi_0$  u.  $\xi_{II}$



**B. Unsymmetrische Leckräume**

Es rechnet L I

Es rechnet L II mit  $\xi_0$  u.  $\xi_{II}$

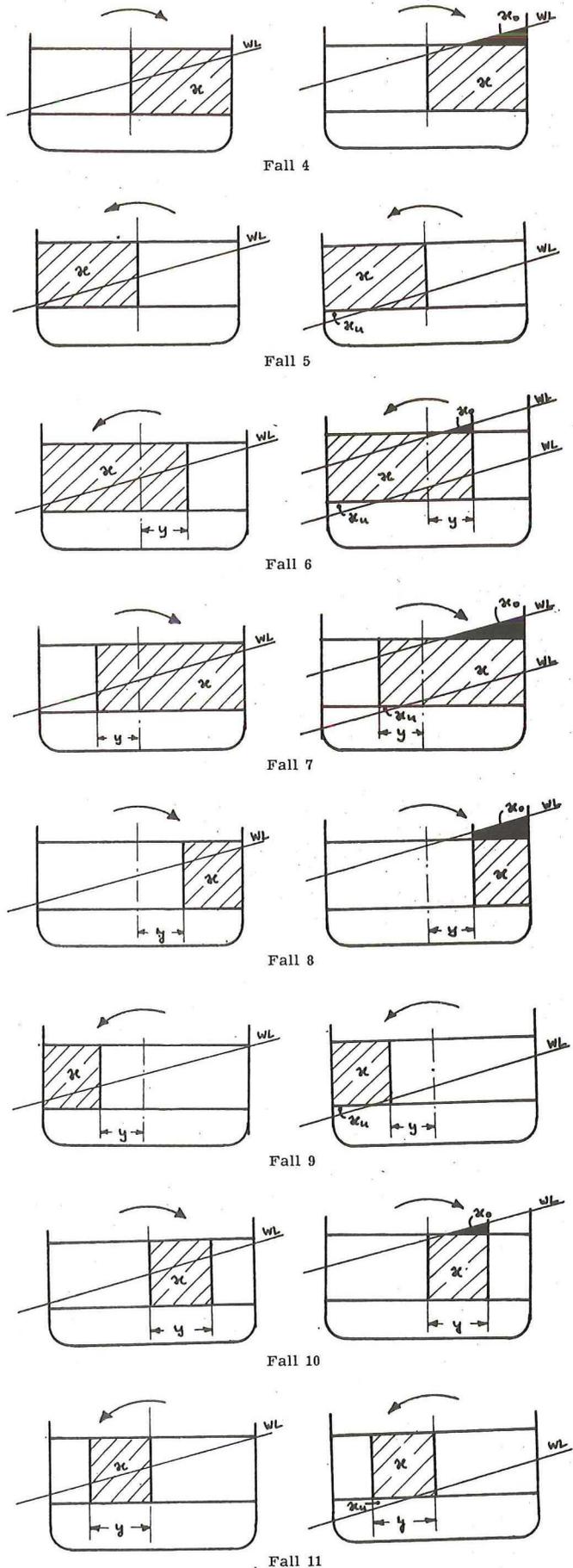


Bild 15 Mögliche Raumanordnungen und Lagen der Endwasserlinie bei Leckrechnungen mit den Programmen L I und L II

Ein wesentliches Merkmal beider Programme ist es, daß das Moment  $M_B$  aus der Flutung jedes Teilraumes vorzeichenbehaftet ist. Daher werden alle wirkenden kippenden Momente schließlich zu einem resultierenden Moment zusammengefaßt. Momente anderer Ursachen als durch Flutung, wie Windmoment, Personmoment, Moment aus übergegangener Ladung usw. können den Programmen gesondert zugeführt werden. Sie addieren sich zum resultierenden Moment aus der Flutung. Es ergibt sich damit eine Vielzahl von Möglichkeiten und Kombinationen, von denen Bild 16 einen Eindruck vermittelt.

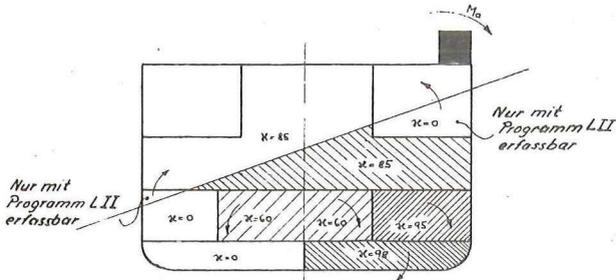


Bild 16 Zusammengesetzter Leckbereich

Es sei noch kurz der Zeitbedarf für eine Leckrechnung mit den beschriebenen Programmen erwähnt:

L I benötigt für das Berechnen der geometrischen Größen des unbeschädigten Schiffes bei einer normalen Anzahl von Aufmaßen (380 Aufmaßpaare, 34 Spantquerschnitte) etwa 45 Sekunden. Das Berechnen der geometrischen Größen eines Teilleckraumes dauert etwa 40 Sekunden. In der Regel sind drei Iterationsschritte erforderlich, so daß eine Leckrechnung

$$T \approx 3 (45 + n \cdot 40) = 135 + n \cdot 120 \text{ sek}$$

dauert, wenn  $n$  die Anzahl der Teilleckräume angibt.

Für das Programm L II lauten diese Zahlenangaben:

$$T \approx 3 (80 + n \cdot 45) = 240 + n \cdot 135 \text{ sek.}$$

### C. Hilfsprogramme

#### 20. Prüfprogramme zur Feststellung fehlerhafter Aufmaße

Es wurde ein Programm P 1 aufgestellt, welches die Aufmaße, durch die die Schiffsoberfläche beschrieben wird, nach den verschiedensten Gesichtspunkten prüft und in kurzer Zeit alle darin enthaltenen Fehler, soweit sie von merklichem Einfluß auf das Resultat irgendwelcher geometrischer Berechnungen sind, angibt. Hierbei werden u. a. die in den Abschnitten 7 bis 13 beschriebenen Fehlerbetrachtungen angewendet, d. h. jede Spantkontur wird auf Grund der von ihr vorliegenden Aufmaßkoordinaten überprüft, ob sie gut strakt und ob die gewählte Teilung den Linienzug des Spantes genau genug wiedergeben kann. Dabei werden Kurvenstücke mit jeweils fünf Aufmaßen betrachtet, aus denen in einem Differenzenschema die 4. Steigung der Funktion gebildet wird. Die betrachteten einzelnen Teilfunktionen überlappen sich gegenseitig. Das Programm geht also ähnlich vor wie der Zeichner, der mit Hilfe eines Satzes von Kurvenlinealen stückweise einen Kurvenzug zusammensetzt. Auch er merkt sofort, wenn ein Aufmaßpunkt „springt“, also fehlerhaft ist.

Beim Einteilen und Messen der Schiffsaufmaße sowie beim Lochen der Maße in Karten sind die folgenden Fehlermöglichkeiten gegeben:

1. Fehlende Lochungen oder Doppellochungen
2. Schrittweite der Höhe nach  $h_x$  innerhalb eines Doppelstreifens fehlerhaft:  $h_x \neq \text{const.}$
3. Doppelstreifen der Höhe nach unvollständig Aufmaße fehlen.

4. Schrittweite der Länge nach  $h_x$  innerhalb eines Doppelstreifens fehlerhaft:  $h_x \neq \text{const.}$
5. Doppelstreifen der Länge nach unvollständig, Spanten fehlen.
6.  $\frac{F_e}{F_f} > 1$ : Teilung der Höhe nach bei einem Doppelstreifen nicht eng genug gewählt oder Aufmaße  $y$  unrichtig.
7.  $\frac{\sum F_e}{F_f} > 1$ : Teilung eines ganzen Spantes nicht eng genug gewählt.

Außerdem ist von Interesse:

8.  $\frac{F_e}{F_f} \ll 1$ : Teilung unnötig eng gewählt.
9.  $F_f$  jeder einzelnen Spantfläche als Kenngröße für die erreichte Genauigkeit der Querschnitte.
10.  $F_v$  des ganzen Schiffes als Kenngröße für die erreichte Genauigkeit im Gesamtvolumen.

Das Prüfprogramm ist so aufgebaut, daß bei Erfüllung jeder dieser Bedingungen mit Ausnahme von 1 eine Karte gestanzt wird, die den Ort, die Art und die Größe des Fehlers sowie Angaben über die Möglichkeiten zu ihrer Behebung enthält.

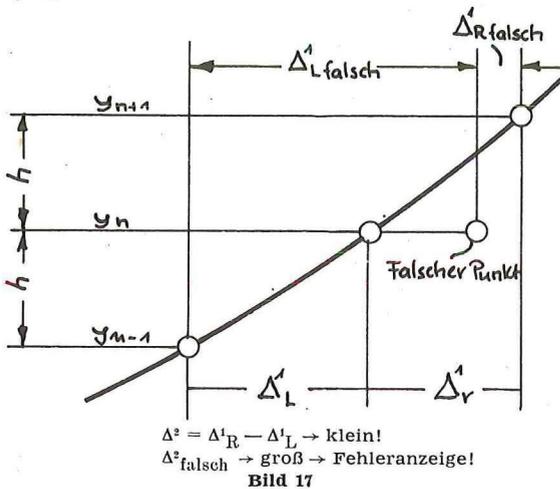
Eine solche Fehlerrechnung ergab für ein Schiff von 140 m Länge, 20 m Breite und 7,41 m Tiefgang einen mittleren Gesamtfehler in der Verdrängung von  $F_v \approx 6 \text{ m}^3$ , das sind etwa 0,02 % der Gesamtverdrängung. Durch dieses Beispiel ist die erreichbare Größenordnung des Fehlers angegeben, mit der wir bei solcherart elektronisch durchgeführten schiffbaulichen Rechnungen rechnen müssen.

Bei der Benutzung dieses Fehlersuchprogramms sind einige besondere Gesichtspunkte zu berücksichtigen. Das beschriebene Prinzip der Fehlerrechnung bringt es mit sich, daß jeder Spant aus mindestens zwei Doppelstreifen bestehen muß. Es ergeben sich sonst keine 4. Steigungen. Sollte ein Spant nur einen Doppelstreifen aufweisen, wird lediglich der Funktionsfehler  $F_f$  berechnet, und das Programm geht zum nächsten Spant über. Sind in den Spantkonturen Knickstellen vorgesehen, wird das Programm in der Regel wie auf einen Aufmaßfehler reagieren, da ja gerade die Stetigkeit der Krümmung der Funktion geprüft wird, die im Knick nicht erfüllt ist. Der jeweils erste und letzte Doppelstreifen eines jeden Spantes kann nicht ganz korrekt erfaßt werden. Bei ihm wird mit jeweils der ersten bzw. letzten vierten Steigung gerechnet, die sich eigentlich auf einen Punkt zwischen dem äußeren und dem daran anschließenden Doppelstreifen bezieht. Das könnte im Bereich der senkrechten Seitenwand bei großer Schrittweite  $h$  zu ganz falschen Fehlerangaben führen. Doch veranlaßt in diesem Fall das Programm von sich aus die Berechnung eines weiteren künstlichen Doppelstreifens, der den senkrechten Verlauf über die obere Begrenzung des Spants hinaus fortsetzt. Dadurch ist gewährleistet, daß auch für den letzten eigentlichen Doppelstreifen der Ersatzfehler richtig berechnet wird. Der künstliche Doppelstreifen wird bei der Fehlerberechnung nicht berücksichtigt. Allerdings sind bezüglich der Genauigkeit der Berechnung des Ersatzfehlers trotzdem Vorbehalte am Platze, besonders, wenn die Schrittweite  $h$ , die mit ihrer 5. Potenz in die Rechnung eingeht, groß ist. In diesem Fall wird der Wert der 4. Steigung sehr klein und dementsprechend nicht genau genug, zumal in der Berechnung des Fehlergliedes der Simpson-Rechnung die Stelle  $\xi$  (vgl. Gleichung (18)) nicht bekannt ist; sie ist einfach auf die Mitte des Intervalls gelegt worden. So kommt es, daß gelegentlich Anzeigen erfolgen, die auf Fehler hinzuweisen scheinen, die sich

bei Prüfung der betreffenden Aufmaße als übertrieben herausstellen, sozusagen als „Übereifer“ der Maschine. Der umgekehrte Fall, daß Fehleranzeigen aus den eben angedeuteten Gründen unterbleiben, ist nicht zu befürchten.

Das sind offensichtlich Nachteile, die aber bei einem anderen, ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit aufgestellten Prüfprogramm P 2 nicht auftreten. Dafür ist die Empfindlichkeit, mit der der Aufmaßfehler angezeigt wird, bei ihm wesentlich geringer. Die Fehlerarten 1—5 der vorstehenden Aufzählung werden von P 2 ebenso behandelt wie von P 1. Bei der Beurteilung der Ordinaten zieht P 2 jedoch nur jeweils 3 benachbarte Punkte in Betracht. Es wird die zweite Differenz  $\Delta^2$  des Doppelstreifens gebildet (siehe Bild 17) und geprüft, ob ein bestimmtes vorgegebenes Maß überschritten wird. Damit besteht die Möglichkeit, den Spielraum, in dem keine Anzeige erfolgt, größer oder kleiner zu machen, je nach gewünschter Empfindlichkeit.

Die Regelung der Empfindlichkeit beim Programm P 1 erfolgt über die Angabe des Zeichnungsmaßstabes  $a$  (vgl. Abschnitt 10). Ist  $a$  groß, so ist mit Gleichung (28) die Empfindlichkeit gering. Ist  $a$  klein, werden an die Teilung hohe Ansprüche gestellt.



21. Umrechnungsprogramm für affine Verzerrungen des Schiffskörpers (U 1) und zur Änderung der Völligkeit durch ein paralleles Mittelschiff (U 2)

Ein weiteres Hilfsprogramm trägt dem Wunsche Rechnung, aus einem Aufmaßkartensatz eines Schiffes bestimmter Hauptabmessungen einen zweiten Kartensatz zu erhalten, bei der die Koordinaten der Länge, Breite und Höhe ( $x; y; z$ ) mit entsprechenden Verzerrungsfaktoren  $k_x, k_y, k_z$  multipliziert sind. Diesem Programm (U 1) werden lediglich die drei Werte  $k_x, k_y, k_z$  mitgeteilt, und innerhalb knapp einer Minute liegt der neue umgerechnete Kartenstoß fertig zur weiteren Verwendung im Leckrechnungsprogramm vor.

Gelegentlich besteht die Aufgabe, die Völligkeit eines vorliegenden Linienrisses zu verändern. Am einfachsten geschieht dies durch Einsetzen eines parallelen Mittelstücks und eine anschließende affine Verzerrung auf die ursprüngliche Länge. Dies hat eine Vergrößerung der Völligkeit zur Folge.

Das Programm U 2 besorgt dies selbsttätig, ausgehend vom Kartensatz der Aufmaße eines weniger völligen Schiffes. Dem Programm muß dafür der Völligkeitsgrad des alten Schiffes sowie der gewünschte Völligkeitsgrad des neuen Schiffes angegeben werden. Auch bei U 2 entsteht ein neuer Kartensatz zur direkten weiteren Verwendung in den Leckprogrammen. Die Hauptabmessungen des neuen Schiffes sind die des alten. Die Änderung des Völligkeitsgrades soll aber nicht zu groß sein, da sich sonst recht unerfreuliche Schiffslinien ergeben würden. Dies ist aus der angewendeten Methode ohne weiteres einzusehen.

Die beiden Programme U 1 und U 2 versetzen einen in die Lage, von einigen in Karten gelochten Standardschiffsformen verschiedener Völligkeiten ausgehend, auf automatischem Wege fein abgestuft abweichende Schiffsformen zu gewinnen, deren Völligkeit und Hauptabmessungen jeden gewünschten Wert annehmen können. Dies könnte für schnelle Projektarbeiten von Nutzen sein. Die ganze Prozedur hierzu würde etwa 3 Minuten dauern.

IV. Systematische Leckrechnungen

22. Vorbemerkungen

In der Technik werden häufig Probleme, die sich einer exakten Berechnung entweder ganz entziehen oder bei denen diese aus Gründen des allzu großen Aufwandes ungern durchgeführt wird, in systematischer Form bearbeitet, etwa durch systematische Modellversuche; und nicht selten erlaubt die zweckmäßige Aufzeichnung der so gewonnenen Ergebnisse für die interessierenden speziellen Fälle wenigstens eine Abschätzung der Lösung, wenn nicht sogar die näherungsweise numerische Lösung des Problems selbst. Im schiffbaulichen Bereich sei nur auf die systematischen Versuche mit Schiffsmodellen bzw. Modellpropellern hingewiesen, deren Auftragungen für den Schiffbauer die überschlägige Bestimmung des Schiffswiderstandes ermöglichen bzw. bei der Propellerauswahl helfen.

Auf dem Gebiete der Leckrechnung hat es bereits Ende des vorigen Jahrhunderts ähnliche Bestrebungen gegeben. Ein vom British Board of Trade eingesetztes „Subdivision Committee“ hatte 1890 die Aufstellung der Kurve der flutbaren Längen — „Schottkurve“ — vorgeschlagen, jedoch kein Rechenverfahren für ihre Bestimmung angegeben; stattdessen wurden an Hand von Modellversuchen Diagramme aufgestellt, die eine wenn auch nur rohe Schätzung der Schottkurve für Entwurfszwecke erlaubten (vgl. Hinweis in [8], Seite 159). Im Jahre 1897 führte Middendorf nach einem von ihm angegebenen Rechenverfahren systematische Schottrechnungen durch, deren Ergebnisse zu den Standardschottkurven der Deutschen Seeberufsgenossenschaft verarbeitet wurden [2]. Im Jahre 1912 folgten die von Welch in England durchgeführten systematischen Schottrechnungen, die zu dem „Standard Diagrams of Floodable Lengths“ führten [27]. Sie sind als Bestandteil der vom Ministry of Transport aufgestellten nationalen Sicherheitsvorschriften in Großbritannien noch heute im Gebrauch. In letzter Zeit sind diese englischen Standardkurven in eine besonders übersichtliche Form gebracht worden, die in [28] veröffentlicht worden ist. In Deutschland verzichtet man für endgültige Rechnungen auf die Anwendung von Standardschottkurven und zieht die exakten Methoden — etwa nach Schirokauer [19] — vor. Der hierzu notwendige Rechenaufwand wird als erträglich empfunden. Außerdem ergeben sich nach den Standardkurven etwas zu kleine flutbare Längen, da sie für die älteren Schiffe mit wesentlich schwächer ausfallenden Spantformen an den Schiffsenden aufgestellt waren. Die Methode von Schirokauer unterscheidet sich im übrigen nicht wesentlich von der von Middendorf 1897 in [2] angegebenen.

Systematische Leckrechnungen unter Berücksichtigung weiterer Einflüsse sind bisher noch nicht bekannt geworden. Eine englische Arbeit [29] zeigt Ansätze dazu, doch sind diese Untersuchungen über Leckstabilität auf mittschiffs gelegene Leckräume beschränkt. Zudem fehlt die Berücksichtigung einiger besonders wichtiger Einflüsse. Auf analytischem Wege kommt Mandelli zu einem Entwurfsdiagramm für den MG-Verlust [30]. Auch diese Arbeit beschränkt sich auf mittschiffs gelegene Flutungen und kann nicht mehr bieten als einen rohen Anhalt. Allerdings ist sein Entwurfsdiagramm sehr übersichtlich und einfach zu handhaben. Inwieweit sich für systematische Leckuntersuchungen der Modellversuch eignet, soll hier nicht erörtert werden. Eine kürzlich erschienene Arbeit

von Völker [32] läßt aber vermuten, daß sich Modellversuche für systematische Leckuntersuchungen besser eignen könnten als für spezielle Rechnungen, für die sie in der Arbeit vorgeschlagen werden. Dieser Weg ist aber in dieser Arbeit nicht ins Auge gefaßt worden.

23. Gewählte Schiffformen und ihre Varianten

Die Fragen der wasserdichten Unterteilung werden bis heute hauptsächlich für Fahrgastschiffe untersucht. So liegt es nahe, die systematischen Leckrechnungen zunächst für Schiffformen durchzuführen, wie sie heute für Fahrgastschiffe und schnelle Frachtschiffe mit Passagiereinrichtungen üblich sind. Als Grundform A eines solchen Schiffstyps wurden die Linien nach Bild 18 angesehen. Sie entsprechen denen des Fahrgastschiffes „Bergensfjord“ [33]. Die absoluten Werte der Haupt-

abmessungen des Schiffes sind hier ohne Belang, sie können durch affine Verzerrungen des Schiffskörpers jeden beliebigen Wert annehmen.

Um von dieser Grundform zu Schiffkörperformen mit anderer Völligkeit oder anderen Schwerpunktlagen zu kommen, kann man die Spantquerschnitte der Ausgangsform nach den Schiffsenden oder nach der Schiffsmitte hin ungleichmäßig verschieben. Es wurde je eine Form mit nach den Enden linear abnehmendem und nach den Enden linear zunehmendem Abstand der Grundspanten entwickelt. Aus den so entstehenden neuen Wasserlinien wurden die neuen Spantrisse B (Bild 19) und C (Bild 20) aufgestellt. Diese Formen lassen sich noch untereinander verändern, indem man Vor- und Hinterschiff gegenseitig austauscht. So entstehen die Formen AB, BA, BC, CB und schließlich noch AC und CA, wobei der erste Buchstabe das Hinterschiff, der zweite das Vorschiff kennzeichnet. Die letzten beiden Kombinationen ergeben unrealistische Schiffformen und wurden nicht verwendet. Auch die Formen BC und CB wurden in den systematischen Leckrechnungen nicht herangezogen.

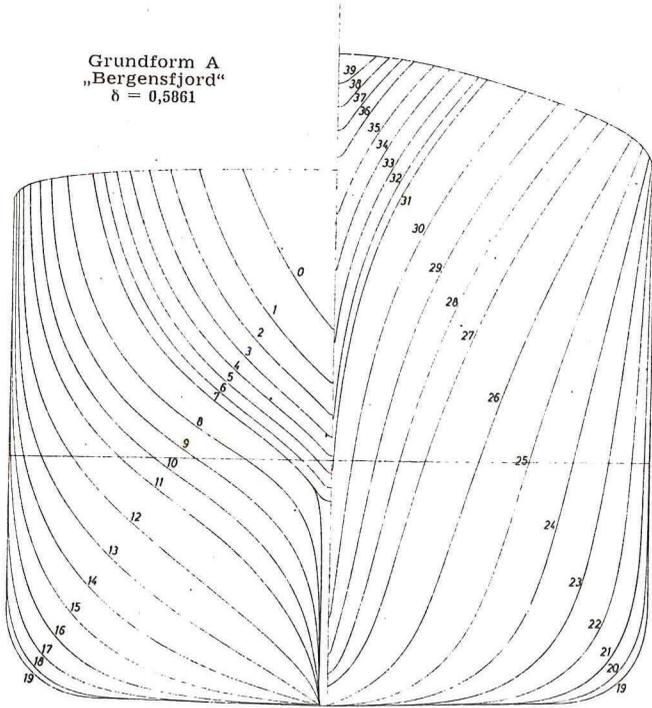


Bild 18

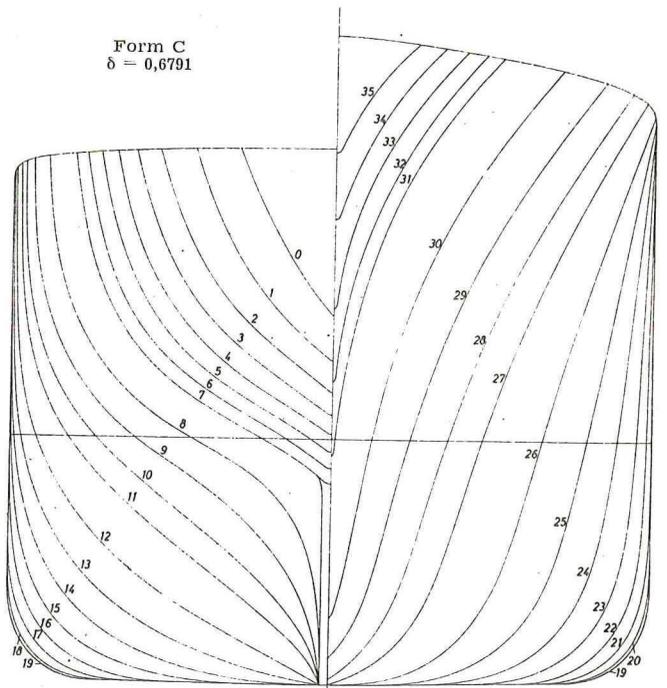


Bild 20

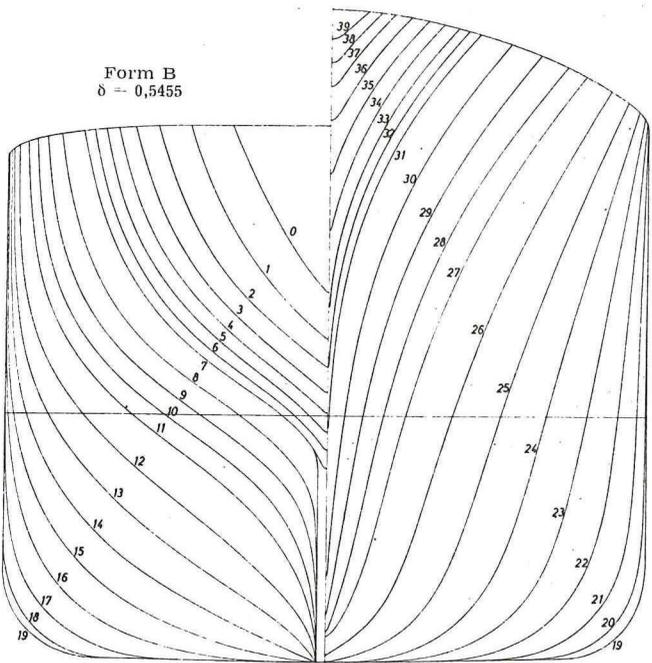


Bild 19

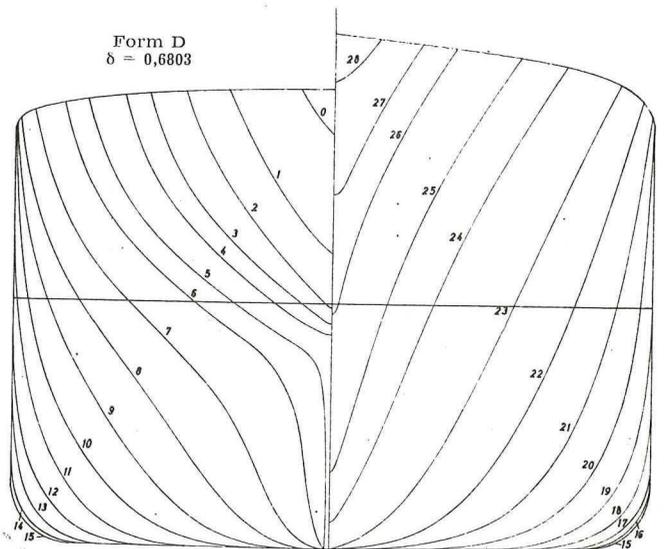


Bild 21

Es lag die Befürchtung nahe, daß die aus der Form A völlig schematisch abgeleiteten anderen Formen manchen Gesichtspunkten der Entwurfspraxis nicht mehr ganz entsprechen würden. Deshalb wurde eine zweite Grundform, Bild 21, herangezogen. Diese Form D entspricht den Linien eines ausgeführten schnellen Frachtschiffes.

Es ist vorgesehen, systematische Leckrechnungen noch an weiteren Schiffen durchzuführen. Es kämen hierzu in erster Linie die völligeren Frachtschiffe mit längerem parallelen Mittelteil in Frage. Solche Schiffen sind bereits mehrfach von den Schiffbauversuchsanstalten veröffentlicht worden, z. B. [34, 35]. Diese Modellserien haben allerdings den Nachteil, daß auf die Überwasserform des Schiffskörpers nur wenig Wert gelegt ist. Bei Leckrechnungen kommt es aber in erster Linie auf den Teil über der Wasserlinie an. Dies ist auch der Grund, weshalb für die hier beschriebenen systematischen Rechnungen auf gebaute Schiffe mit bekannter Überwasserform zurückgegriffen wurde. Auf diese Weise kommen die Ergebnisse der Rechnungen den Verhältnissen beim praktischen Entwurf am nächsten.

#### 24. Art und Umfang der Rechnungen

Es wurden in den systematischen Leckrechnungen zunächst folgende Haupteinflußgrößen verändert:

1. Schiffenform — 6 Schiffe + Stichproben an 3 weiteren
2. Leckraumlänge  $0 \leq \ell/L \leq 0,30$
3. Flutbarkeiten  $0,6 \leq \kappa \leq 1,0$
4. Leckraumlage in Längsschiffichtung  
—  $-0,35 \leq x_L/L \leq +0,35$
5. Ausgangstiefgang  $2,7 \leq B/T \leq 3,7$
6. Höhe eines wasserdichten Decks (Doppelboden)  
 $0 \leq h/B \leq 0,15$ .

Dies sind allerdings keineswegs alle für einen Leckfall wichtigen Einflüsse. Es fehlen die vielfachen und zum Teil besonders gefährlichen Einflüsse aus verschiedenartig durchfluteten Leckraumteilen, die im allgemeinen zu unsymmetrischen Flutungen führen. Doch dürfte es kaum gelingen, auch diese Einflüsse systematisch so zu erfassen, daß aus den Ergebnissen quantitative Schlüsse zu ziehen sind. Zudem ist im frühen Projektstadium die innere Unterteilung der Abteilungen meist noch gar nicht zu übersehen. Es scheint deshalb gerechtfertigt, die Untersuchungen zunächst auf symmetrische Flutungen zu beschränken und anschließend unsymmetrische Einflüsse gesondert zu betrachten.

Eine vollständige Durchrechnung aller Variationen mit beispielsweise 6 Schiffenformen, 3 Leckraumängen, 3 Flutbarkeiten, 7 Leckraumlagen, 3 Ausgangstiefgängen und 4 Doppelbodenhöhen würde insgesamt 4536 einzelne Leckrechnungen ergeben, für die die Rechenmaschine etwa 300 Stunden Rechenzeit beansprucht hätte. Nun waren aber die zu erwartenden Tendenzen der Rechenergebnisse bereits vorher bekannt und auch gewisse Vorstellungen über eine zweckmäßige Art der Auftragung zu Entwurfsdiagrammen vorhanden. So dienten die Rechnungen eigentlich nur dazu, die Überlegungen über eine mögliche Auftragung entweder zu bestätigen oder zu widerlegen. Zur Widerlegung einer Überlegung genügt bekanntlich ein einziges gegenteiliges Ergebnis; zur Bestätigung einer Überlegung begnügt man sich in der Regel mit einer Anzahl von Aussagen, die ebenfalls nicht in die Tausende zu gehen braucht. Immerhin wurden zur Aufstellung der Entwurfsdiagramme insgesamt 1374 einzelne Leckrechnungen durchgeführt. Sie nahmen etwa 100 Stunden Rechenzeit der Maschine in Anspruch. Sie wurden größtenteils am Institut für Praktische Mathematik der Technischen Hochschule Hannover durchgeführt. Als aber wegen allzu starker Belegung

der Rechenanlage durch andere Institute der Hochschule die Zuteilung an Rechenzeit knapp wurde, stellte das Institut für Angewandte Mathematik der Universität Hamburg ihre Rechenanlage mehrere Tage lang für unsere Rechnungen zur Verfügung.

Auf eine Beschreibung der Berechnungen im einzelnen wird verzichtet.

(Eingegangen am 21. März 1961)

Teil II dieser Arbeit folgt im nächsten Heft.

#### Zusammenstellung der wichtigsten Formelzeichen — Teil I

A	Auftriebsvektor	
$A_u$	Unsymmetrischer Auftriebsteil	
a	Zeichnungsmaßstab	
$a_x, a_y$	Maßstäbe in x- und y-Richtung	
$a_v$	Maßstab der Ordinaten der Spantflächenkurve (Abschnitt 14)	
$a_0, a_{II}$	Hilfsgrößen (Abschnitt 17)	
B	Schiffsbreite auf Spanten	
$B_x$	Schiffsbreite an der Stelle x	
$c_x$	Beiwert für die Spantteilung an den Schiffsenden (Abschnitt 14)	
$d_{II}$	Hebelarm eines unsymmetrischen Auftriebsteils	
F	Formschwerpunkt der Verdrängung	
f	Formschwerpunkt des Leckraumes	
$F_{WL}$	Fläche der Wasserlinie eines Schiffes	
$f_{WL}$	Fläche der Wasserlinie des Leckraumes	
F	Fehler	
$F_c$	Ersatzfehler	} (Abschnitt 9—12)
$F_f$	Funktionsfehler	
$F_F$	Mittlerer Fehler einer Spantfläche	
$F_v$	Mittlerer Fehler einer Schiffsverdrängung	
$F_{FWL}$	Mittlerer Fehler einer Wasserlinienfläche (Abschnitt 12)	
$F_{ML}$	Mittlerer Fehler im Längenmoment der Verdrängung (Abschnitt 13)	
f	Wahrer Fehler (Abschnitt 10)	
G	Gewichtsschwerpunkt	
h	Hebelarm des aufrichtenden Momentes	
$h(\varphi)$	Hebelarmkurve des aufrichtenden Momentes	
h	Ordinatenabstand einer Funktion (Abschnitt 9—14)	
$J_B$	Breitentragheitsmoment der Wasserlinienfläche des Schiffes	
$i_B$	Breitentragheitsmoment der Wasserlinienfläche des Leckraumes	
$J_L$	Längentragheitsmoment der Wasserlinienfläche des Schiffes	
$i_L$	Längentragheitsmoment der Wasserlinienfläche des Leckraumes	
K	Kielpunkt	
$\overline{KF}$	Höhenlage des Formschwerpunktes über Kiel	
$\overline{KG}$	Höhenlage des Gewichtsschwerpunktes über Kiel	
k	Auf das Schiffsgewicht bezogener Hebelarm des krängenden Momentes	
$k(\varphi)$	Hebelarmkurve des bezogenen Krängungshebelarmes	
$k_x, k_y, k_z$	Faktoren für eine affine Verzerrung	
L	Schiffslänge zwischen den Loten ( $L_{pp}$ )	
$L'$	Schiffslänge in der Zeichnung	
$\ell$	Länge des Leckbereiches	
M	Metazentrum des Schiffes	
m	Metazentrum des Leckraumes	
$\overline{MG}$	Metazentrische Höhe	
$\overline{MF}$	Metazentrischer Radius	
$M_a$	Aufrichtendes Moment des Schiffes	
$M_k$	Krängendes Moment des Schiffes	
$M_H$	Höhenmoment der Verdrängung	

$M_L$	Längenmoment der Verdrängung	
$M_{WL}$	Längenmoment der Wasserlinienfläche des Schiffes	
$m_H$	Höhenmoment des Leckraums	
$m_L$	Längenmoment des Leckraums	
$m_y$	Unvermeidlicher mittlerer Ordinatenfehler	
$m_s$	Mittlerer Fehler eines Integralwertes S	
$m_R$	Streuung der Werte von Restgliedern R	
P	Schiffsgewicht	
Q	Zwischenfunktion (Abschnitt 13)	
R	Restglied	
S	Abkürzung eines Integralwertes (Abschnitt 9)	
$s_{WL}$	Abstand des Wasserlinienschwerpunktes vom Hauptspant	
T	Tiefgang	
$T_h, T_m, T_v$	Tiefgang hinten (H. L.), Mitte, vorn (V. L.)	
$T_x$	Tiefgang an der Stelle x	
t	Vertrimmung an den Loten gemessen	
V	Verdrängung des Schiffes	
v	Leckraumvolumen	
w	Abstand des Auftriebsvektors V vom Kielpunkt K (Pantokarene)	
WL	Abkürzung für Wasserlinie	
x	Längenkoordinate (Ursprung auf Hauptspant)	
$x_L$	Abstand der Mitte eines Leckraumes vom Hauptspant auf der x-Koordinate	
$x_V$	Abstand des Verdrängungsschwerpunktes vom Hauptspant	
$x_h; x_v$	Lage der hinteren, vorderen Begrenzung des Leckraumes auf der x-Koordinate	
$\bar{x}$	Auf die Schrittweite h bezogene Längenkoordinate (Abschnitt, 13, 14)	
y	Breitenkoordinate (Ursprung auf Mitte Schiff)	
$y_i$	Ordinaten einer zu integrierenden Funktion	
$y_{n-1}$ $y_n$ $y_{n+1}$	} Ordinaten eines Doppelstreifens	
y		Abstand einer Wand im Leckraum von Mitte Schiff
z		Höhenkoordinate (Ursprung im Kielpunkt K)
$z_u; z_o$	Höhe der unteren, oberen Begrenzung des Leckraumes	
$\alpha$	Völligkeitsgrad der Wasserlinienfläche, bezogen auf $L_{pp} \cdot B$	
$\alpha$	Einlaufwinkel einer Funktion in die Abszisse	
$\gamma$	Spezifisches Gewicht des Wassers	
$\delta$	Völligkeitsgrad der Verdrängung, bezogen auf $L_{pp} \cdot B \cdot T$	
$\Delta$	Differenz	
$\epsilon$	Vorhandener Fehler	
$\zeta$	Formbeiwert des aufrichtenden Hebelarms h	
$\kappa_v$	Flutbarkeitsfaktor eines Raumes	
$\kappa_f$	Flutbarkeitsfaktor einer freien Oberfläche	
$\varphi$	Krängungswinkel	
$\varphi_G$	Grenzkrängungswinkel	
$\varphi$	Schärfegrad des Schiffes	
$\psi$	Trimmwinkel	
$\psi_o; \psi_u$	Neigungswinkel eines oberen, unteren Decks im Leckraum (Abschnitt 17)	
$\Sigma$	Summe	
$\xi$	Zwischenstelle innerhalb des Integrationsintervalls (Abschnitt 9, 10)	

Indizes:

o	Auf die Ausgangsschwimmlage $WL_o$ bezogen
1	Auf die eingetauchte und vertrimmte Schwimmlage $WL_1$ bezogen
$\varphi$	Auf die um den Winkel $\varphi$ gekrängte Endschwimmlage $WL_\varphi$ bezogen
v	vorn
m	Mitte
h	hinten

o	oben
u	unten
rest	Auf den Restschiffkörper bezogen (Methode des wegfallenden Auftriebes)
n-1	} Bezeichnen die Lage der Ordinaten innerhalb eines Doppelstreifens einer Funktion
n	
n+1	
CWL	Auf die Konstruktionswasserlinie bezogen

Schrifttum

(Teil I und II)

- [1] Middendorf, F. L.: Gutachten über „Einrichtung, Vermehrung und Verstärkung der Querschotte auf Post- und Passagierdampfern“, 1895, unveröffentlicht.
- [2] Middendorf, F. L.: Z-VDI, 1897, Bd. 41, S. 609: „Vorschriften der Seberufsgenossenschaft über wasserdichte Schotte für Post- und Passagierdampfer.“
- [3] Flamm, O.: „Über Stabilität des lecken Schiffes“, Schiffbau, Jahrgang XIV (1913), S. 265.
- [4] Flamm, O.: „Beitrag zur Frage der Unsinkbarkeit moderner Seeschiffe“, Schiffbau, Jahrgang XVI (1914), S. 41.
- [5] Flamm, O.: „Beitrag zur Frage der Leckstabilität“, Schiffbau, Jahrgang XVI (1914), S. 681.
- [6] „Internationales Übereinkommen zum Schutze des menschlichen Lebens auf See“, London, 1948; in Deutschland: Bundesgesetzblatt Teil II (1953) Nr. 21.
- [7] Niedermair, I. C.: „Stability of Ships after Damage“, TSNAME 1932, S. 216.
- [8] Macmillan, J. F., und Comstock, J. P.: „Subdivision of Ships“ in „Principles of Navel Architecture, herausgegeben von SNAME 1939, S. 159.
- [9] Russo, V. L., und Robertson, J. B.: „Standarts for Stability of Ships of Damaged Condition“, TSNAME 1950, S. 478.
- [10] Wendel, K.: „Die Wahrscheinlichkeit des Überstehens von Verletzungen“, Schiffstechnik: Bd. 7 (1960), S. 47.
- [11] Brockmann, W.: „Zur Stabilität der Fahrgastsschiffe“, Hansa 1956, S. 2012.
- [12] Dankwardt, E.: „Die Verwendung des Trimmkurvenblattes bei der Leckrechnung“, Schiffbautechnik 1956, S. 380.
- [13] Knüpfner, K.: „Ein Beitrag zur Berechnung der Trimmlagen beschädigter Schiffe“, Hansa 1958, S. 2266.
- [14] Horn, F.: „Neue praktische Aufgaben der Stabilitätstheorie“, im Band „Erkenntnisse und Erfahrungen auf dem Gebiete der Schiffsstabilität“, STG 1953, S. 1—128.
- [15] Jens, J.: „Genauere Errechnung der Hebelarme der statischen Stabilität“, Schiffstechnik 1955, S. 142.
- [16] Jens, J.: „Bestimmung des Verhältniswertes  $\xi_o$  für Stabilitätsrechnungen“, Schiffstechnik 1957, S. 429.
- [17] Dankwardt, E.: „Die zweckmäßige Auftragung des Trimmkurvenblattes“, Schiffbautechnik 1956, S. 317.
- [18] Schirokauer, F.: „Vereinfachtes Verfahren zur exakten rechnerischen Ermittlung von Schottkurven“, Schiffbau 1928, S. 321.
- [19] Schirokauer, F.: „Berechnung der Schottkurve“, Handbuch der Werften 1950, S. 119.
- [20] „Berechnung der statischen Querstabilität und des Formkurvenblattes für ein Schiff auf dem Magnettrommelrechner IBM 650“, Programmbeschreibung EDPM 650, Praxis Nr. 36.
- [21] Prohaska, C. W.: „Ship Design by Computer“, The Shipping World 1959, S. 220.
- [22] Prohaska, C. W.: „Das elektronische Rechenverfahren im Schiffbau“, Schiff und Hafen 1959, S. 957.
- [23] Kervin, J. E.: „Polynomial Surface Representation of Arbitrary Shipforms“, Journal of Ship Research Volume 4 (June 1960), S. 12.
- [24] von Sanden, H.: „Praktische Mathematik“, Teubners mathematische Leitfäden, Bd. 44, 1958.
- [25] Zurmühl, R.: „Praktische Mathematik für Ingenieure und Physiker“. 2. Auflage 1957.
- [26] Willers, F. A.: „Methoden der Praktischen Analysis“, 3. Auflage 1957.

- [27] Ministry of Transport: „Survey of Passenger Ships, Instructions to Surveyors“, Volume I und II, London 1956.
- [28] Henschke, W.: „Schiffbautechnisches Handbuch“, Bd. 1, 2. Auflage, 1957.
- [29] Corlett, E. C. B., und Foulger, K.: „Stability Losses on Flooding“, TINA, 1947, S. 112.
- [30] Mandelli, A.: „Estimation of Stability after Flooding“, Shipbuilder 1960, S. 530.
- [31] Herner, H., und Rusch, K.: „Die Theorie des Schiffes“, Leipzig 1952.
- [32] Völker, H.: „Schiffsmodell-Waage zur Messung der Längs-, Quer- und Leckstabilität“, Schiffstechnik Bd. 7, 1960, S. 47.
- [33] Haug, K., und Carter, N.: „MS Bergensfjord“, Trans. North East Coast Institution of Engineers and Shipbuilders, Vol. 73, 1957, S. 113.
- [34] Todd, F. H.: „Some further Experiments of Single-Screw Merchant Ship Forms Series 60“, TSNAME 1953, S. 516.
- [35] Ferguson, J. M., und Meek, M.: „Model Experiments on a Series of 0,65-Block Coefficient Forms“, TINA 1954, S. 428.
- [36] Bauer, H. M.: „Annäherungsformel im Schiffbau“, Schiffbau Bd. IV (1902/03), S. 375.
- [37] Knüpfner, K.: „Verfahren zur Bestimmung der Leckstabilität in einem frühen Entwurfsstadium“ (unveröffentlicht).
- [38] Diercks, H., Euler, H.: „Praktische Nomographie“, Düsseldorf 1942.

# Die Durchführung von Leckrechnungen im Schiffsentwurf

Dipl.-Ing. K. Knüpfner, Hannover

Der vorliegende zweite Teil dieser Arbeit\*) behandelt Entwurfsdiagramme über das Leckverhalten von Schiffen. Es wird gezeigt, nach welchen Überlegungen die Diagramme entstanden sind, wie man sie benutzt und welche Genauigkeit durch sie erzielt werden kann.

Die Anwendung dieser Diagramme ermöglicht es dem Entwurfsingenieur, praktisch ohne Rechnung im voraus das Leckverhalten seines Projektes zu beurteilen und damit rechtzeitig zu beeinflussen. Sie geben einem den nötigen Überblick über die im Leckfall zu erwartenden Verhältnisse und können einen vor Fehlern in der wasserdichten Unterteilung von Schiffen bewahren.

Die Anleitung zur Benutzung der Diagramme wird durch eine Reihe von Beispielen ergänzt, die den Lösungsgang bei den verschiedenen möglichen Aufgabenstellungen erläutern.

## V. Aufstellung von Entwurfsdiagrammen über das Leckverhalten von Schiffen

### 25. Vorbemerkungen

Die in Kapitel IV des 1. Teiles der Arbeit beschriebenen systematischen Leckrechnungen wurden durchgeführt mit dem Ziel, die Ergebnisse in so allgemeingültiger Form aufzutragen, daß dem Entwurfsingenieur die Möglichkeit gegeben wird, im Vorwege ohne Rechnung das voraussichtliche Leckverhalten seines Schiffes einigermaßen zuverlässig beurteilen und damit rechtzeitig beeinflussen zu können. Der hierbei beschrittene rein empirische Weg hat den Vorteil, daß von absolut zuverlässigen Rechenergebnissen ausgegangen werden kann, die aus heute üblichen Schiffen gewonnen wurden. Die Näherung beginnt also erst bei der Auftragung, bei der es sich allerdings als unumgänglich erwies, durch Zusammenfassung gleichsinniger Größen oder durch Bildung einfacher Kennwerte, beispielsweise zur Charakterisierung der Eigentümlichkeiten der Schiffenform, Kompromisse zwischen angestrebter Genauigkeit und einfacher Handhabung der Diagramme zu finden.

Folgende Einschränkungen allgemeiner Art erwiesen sich als notwendig:

1. Der Schiffskörper muß „normale“ Linien aufweisen, in Anlehnung an die den systematischen Rechnungen zugrunde liegenden Schiffenformen, wie sie in Kapitel IV beschrieben wurden.
2. Für den Leckbereich wird eine einheitliche mittlere Volumenflutbarkeit angenommen. Die Flutbarkeit im Bereich, den die freie Flüssigkeitsoberfläche einnimmt, darf jedoch einen davon abweichenden Wert haben.
3. Es wird angenommen, daß der Leckbereich an den Enden durch ebene Querschotte begrenzt wird.
4. Es werden nur Leckbereiche berücksichtigt, deren Mitte zwischen  $-35\%$  L und  $+35\%$  L vom Hauptspant  $\boxtimes$  entfernt liegen.

In den Kurvenblättern, die im Anhang der Arbeit wiedergegeben sind, erscheinen grundsätzlich nur Größen, die sich auf die Ausgangsschwimmlage des Schiffes vor der Flutung beziehen. Dieser Umstand wurde als besonders wichtig angesehen, da somit dem Gebrauch der Diagramme keinerlei Berechnungen vorausgehen brauchen. Es wird dadurch allerdings eine gewisse zusätzliche Ungenauigkeit in Kauf genommen, da die Charakterisierung einer tief eingetauchten Endschwimmlage allein durch Größen des Unterwasserschiffes in Normallage eigentlich nur möglich ist, wenn im Über-

wasserbereich keine größeren Abweichungen gegenüber den systematisch berechneten Schiffenformen vorhanden sind. Dies ist mit einer Begründung für Punkt 4 der angeführten Einschränkungen; denn bei Leckräumen weiter an den Schiffsenden wirken sich jegliche Unterschiede der Schiffenformen besonders stark aus. Die Ungenauigkeit wird zu groß.

Die zum Gebrauch der Diagramme benötigten Entwurfsdaten des Schiffes sind in Tafel I zusammengestellt:

Tafel I Benötigte Entwurfsdaten

L	Länge zwischen den Loten ( $L_{pp}$ )
B	Breite auf Spanten
T	Mittlerer Ausgangstiefgang
$T_{CWL}$	Konstruktionstiefgang
$s_{WL}$	Abstand Wasserlinienschwerpunkt vom Hauptspant
$x_v$	Abstand Verdrängungsschwerpunkt vom Hauptspant
$\delta$	Völligkeitsgrad der Verdrängung, bezogen auf $L_{pp} \cdot B \cdot T$
$\varphi$	Schärfegrad, bezogen auf $L_{pp} \cdot F_{\boxtimes}$
$\alpha$	Völligkeitsgrad der Wasserlinie, bezogen auf $L_{pp} \cdot B$
$\varphi_{v, h}$	Schärfegrad vor, hinter Hauptspant, bezogen auf $\frac{1}{2} L_{pp} \cdot F_{\boxtimes}$
$\alpha_{v, h}$	Völligkeitsgrad der Wasserlinie vor, hinter Hauptspant, bezogen auf $\frac{1}{2} L_{pp} \cdot B$ , entspr. Gleichung (51) u. (52)
$\bar{\varphi}_{v, h}$	Schärfegrad vor, hinter Wasserlinienschwerpunkt, entspr. Gleichung (61) u. (62)
$\bar{\delta}_{v, h}$	Völligkeitsgrad der Verdrängung vor, hinter Wasserlinienschwerpunkt, entspr. Gleichung (61) u. (62)
$l$	Länge des Leckbereichs
$x_L$	Abstand Mitte Leckraum bis Hauptspant
$h$	Höhe eines wasserdichten Decks im Leckraum (Doppelboden)
$\kappa_v$	Volumenflutbarkeit
$\kappa_F$	Flutbarkeit im Bereich der freien Flüssigkeitsoberfläche im Leckraum

Die zur besseren Charakterisierung der Schiffenform benötigten Völligkeitsgrade des Vor- und Hinterschiffes lassen sich für den Fall, daß noch kein Kurvenblatt, wohl aber die vielleicht geschätzten Schwerpunktslagen  $x_v$  bzw.  $s_{WL}$  vorliegen, sehr einfach näherungsweise bestimmen:

$$\varphi_v \approx \varphi + 2 \frac{x_v}{L}; \quad \varphi_h \approx \varphi - 2 \frac{x_v}{L} \quad (51)$$

$$\alpha_v \approx \alpha + 2 \frac{s_{WL}}{L}; \quad \alpha_h \approx \alpha - 2 \frac{s_{WL}}{L} \quad (52)$$

Gleichung (51) und (52) ergeben sich unter der Annahme, daß der Schwerpunkt einer Funktion diese in zwei annähernd flächengleiche Teile teilt. Dies trifft natürlich keineswegs immer zu. In Fällen von „normalen“ Spantflächen- und Wasserlinienkurven sind die entstehenden Fehler jedoch gering. In jeweils 23 verschiedenen durchgerechneten Fällen mit zum Teil übermäßig großen Schwerpunktsabständen ergab sich ein mittlerer Fehler von

0,33 % der richtigen Werte bei Gleichung (51)  
(größter Fehler hierbei 0,77 %)

0,57 % der richtigen Werte bei Gleichung (52)  
(größter Fehler hierbei 1,10 %).

Die Formeln (51) und (52) sind übrigens einfacher und genauer als die von Bauer [36]<sup>1)</sup> aufgestellten.

In den Diagrammen erscheinen ausschließlich dimensionslose Kennwerte. Man ist dadurch unabhängig von der Schiffsgröße und vom verwendeten Maßsystem. Auf die einzelnen Kennwerte und ihre Bedeutung wird bei der Erörterung der Diagramme noch näher eingegangen. An dieser Stelle sei lediglich auf einen von ihnen:  $\kappa_v \cdot \ell/L$  hingewiesen. Er enthält den grundsätzlichen Entschluß, den Einfluß der Volumenflutbarkeit mit dem Einfluß der Leckraumlänge zusammenzufassen. Das bedeutet beispielsweise: Verdoppelt man die Leckraumlänge und halbiert gleichzeitig die Volumenflutbarkeit, so ändert sich das Leckverhalten eines Schiffes nicht. Für Leckräume mit parallelen Seitenwänden gilt das exakt. Für spitz zulaufende Räume gilt es mit recht guter Näherung, wie die diesbezüglichen Rechnungen übereinstimmend bestätigt haben. Wenn man bedenkt, daß die Raumflutbarkeit in der Regel nur zwischen 0,6 und 1,0 schwankt und die systematischen Berechnungen größtenteils für eine Flutbarkeit von 0,8 durchgeführt wurden, werden die normalerweise auftretenden Abweichungen im Tiefgang nur wenige Zentimeter betragen, während sie beim Verlust an metazentrischer Höhe vollends zu vernachlässigen sind.

Es sei in diesem Zusammenhang daran erinnert, daß die angenommene Flutbarkeit eines Raumes ja eine denkbar willkürliche Größe ist. Es erscheint somit wenig sinnvoll, die Genauigkeit der Rechnung, insbesondere die einer Näherungsrechnung mit Hilfe von Entwurfsdiagrammen, allzu weit treiben zu wollen. Es ist verständlich, daß die durch die Internationale Schiffssicherheitskonferenzen festgelegten Werte für die Flutbarkeiten der einzelnen Räume für diejenigen, die Leckrechnungen durchzuführen haben, allzu leicht zu einem Dogma werden können. Selbst wenn man sich bewußt bleibt, wie unsicher diese willkürlich festgelegten Mittelwerte sind, wird man doch in Erfüllung der Buchstaben des Gesetzes bestrebt sein, gerade für diese Flutbarkeiten befriedigendes Leckverhalten des Schiffes nachzuweisen. Es soll an diesen festgelegten Flutbarkeitswerten, besonders an denen für Leckstabilität, wie sie seit 1948 vorgeschrieben sind, keine Kritik geübt werden; denn der genaue Nachweis der Flutbarkeit im Einzelfall ist praktisch in erschöpfender Weise gar nicht möglich, zumal die Flutbarkeit einer Reihe von Raumtypen (Laderäume, Gepäck- und Vorratsräume) einem ständigen Wechsel unterworfen ist. Dieses Dilemma ist ein weiterer Grund dafür, weshalb die Leckrechnung, wie schon in Abschnitt I ausgeführt, nicht den tatsächlichen Zustand des Schiffes nach angenommenen Flutungen angeben kann, sondern die Flutungsannahmen sind eigentlich nicht viel mehr als nur Symbole, die wir benutzen, um die Erfüllung von Vorschriften nachzuweisen, und wir müssen in Kauf nehmen, daß der tatsächliche Ernstfall aus verschiedenen Gründen unter Umständen mit der Rechnung nur unvollkommen übereinstimmt.

Wenn allerdings die rechnerisch angenommene Flutung einen strengeren Maßstab anlegt als die wahrscheinlich eintretende Flutung, so ist alles in Ordnung. Was den Flutbarkeitsfaktor angeht, sind hierzu die Forderungen nicht ganz eindeutig. Wir müssen unterscheiden zwischen

Tauchung und Trimm:

ungünstigster Fall, wenn die Raumflutbarkeit möglichst groß ist.

Querstabilität:

Der Fall wird um so ungünstiger, je größer die Flutbarkeit im Bereich freier Flüssigkeitsoberflächen (Flächenflutbarkeit  $\kappa_f$ ) gegenüber der Raumflutbarkeit ist.

Eine gegenüber der Raumflutbarkeit vergrößerte Flächenflutbarkeit kann einmal dadurch bedingt sein, daß sich in höher gelegenen Teilen eines Raumes tatsächlich weniger oder keine nichtdurchflutbaren Gegenstände befinden, oder diese Gegenstände können in Schiffsmitte konzentriert sein, was sich für die bei Neigungen entstehenden Keilvolumen in gleicher Weise auswirkt, oder die vorhandenen Gegenstände schwimmen auf. Auch das kann auf einer Vergrößerung der Wirksamkeit der Keilvolumen und damit auf einen zusätzlichen Stabilitätsverlust hinauslaufen.

Die Frage nach dem „ungünstigsten Fall“ ist noch in anderer Beziehung zu stellen, z. B. welches Ausmaß der Flutung in einem Raum ist am gefährlichsten? Oder für das frühe Entwurfsstadium anders formuliert: Wie ist der Leckbereich im Inneren zu gestalten, damit keine gefährlichen Überflutungszustände möglich sind? Die Beantwortung ist meist in eindeutiger Weise nicht möglich. Sie richtet sich nach den besonderen Gegebenheiten des Einzelfalles. Oft kommt man erst durch Probieren und mehrfache Leckrechnung zu einem befriedigenden Ergebnis. Hierbei könnten die vorgeschlagenen Entwurfsdiagramme eine wesentliche Hilfe sein, da aus ihnen sehr schnell die Auswirkungen geplanter Änderungen in der Unterteilung zu ersehen sind. Näheres hierüber ist den Abschnitten 35 und 44 sowie aus den Beispielen Abschnitt 47 bis 50 zu entnehmen.

Von einem „ungünstigsten Fall“ im Zusammenhang mit der möglichen Ausdehnung der Beschädigungszone zu sprechen, ist nicht mehr berechtigt. Hier spricht man vom „zumutbaren Fall“ oder vom „wahrscheinlichen Fall“. Eine Definition solcher Fälle ist schwierig. Bisher erfolgt sie über den Unterteilungsfaktor, der jedoch ein recht willkürliches Maß für die gewünschte Sicherheit des Schiffes darstellt. Eine nicht willkürliche Betrachtung dieser Fragen führt auf Wahrscheinlichkeitsüberlegungen, wie sie kürzlich Wendel in [10] durchgeführt hat. Diese Fragen werden hier jedoch nicht weiter erörtert.

Es wurde festgestellt, daß die bei Flutung eines Raumes „ungünstigsten Verhältnisse“ für Tauchung und Trimm andere sind als für die Querstabilität. Daher ist es naheliegend, auch in den Entwurfsdiagrammen zwischen diesen beiden Erscheinungen zu unterscheiden und Diagramme für die Bestimmung der Leckstabilität sowie andere für die Bestimmung von Tauchung und Trimm aufzustellen.

#### D. Diagramme zur Abschätzung des Stabilitätsverlustes in aufrechter Lage ( $\Delta\overline{MG}$ -Diagramme)

##### 26. Allgemeines

In amerikanischen Veröffentlichungen, erstmals wohl in [8], finden sich Diagramme, die auf anschauliche Weise den Einfluß einiger wichtiger Größen auf den Stabilitätsverlust  $\Delta\overline{MG}$  eines Schiffes mit symmetrisch überflutetem Mittschiffsbereich zeigen. Es erscheinen in dieser Darstellung die dimensionslosen Größen  $B/T$ ;  $\ell/L$ ; und als gesuchte Größe  $\Delta\overline{MG}/B$ . Alle anderen Einflußgrößen sind dabei konstant gehalten. Obwohl diese Diagramme für quantitative Ermittlungen nicht geeignet sind, geben sie doch eine gute Übersicht über die Auswirkung der betrachteten Größen.

Diese einfachen Diagramme regten zu Überlegungen an, wie durch Variation möglichst aller Einflußgrößen zu einer allgemeingültigen Darstellung zu gelangen sei, wobei eine ähnliche Übersichtlichkeit angestrebt und nur von den bereits in

<sup>1)</sup> Die eckigen Klammern beziehen sich auf das Schriftumsverzeichnis am Schluß des ersten Teiles der Arbeit im vorigen Heft 41.

frühen Entwurfsstadien bekannten Schiffsdaten, wie sie im vorigen Abschnitt aufgezählt sind, Gebrauch gemacht werden sollte. Trotzdem aber sollten die entstehenden Diagramme zuverlässige quantitative Aussagen ermöglichen. Bevor die Möglichkeit bestand, systematische Rechnungen in großem Umfang durch den Elektronenrechner durchzuführen, wurde bereits versucht, derartige Diagramme aufzustellen. Der dimensionslos gemachte Stabilitätsverlust  $\overline{\Delta MG/B}$  läßt sich entsprechend Gleichung (5) aus den Anteilen  $\overline{\Delta MF/B}$  und  $\overline{\Delta KF/B}$  zusammensetzen, für die, beschränkt man sich auf Flutungen mittschiffs, relativ einfache Ausdrücke angeschrieben werden können. Zur Berechnung dieser Ausdrücke wurden Nomogrammtafeln aufgestellt, die als Parameter dimensionslos gemachte Kennwerte enthielten [37]. Es war also lediglich die numerische Rechnung durch eine graphische ersetzt, was allerdings den Vorteil hatte, daß sofort zu überblicken war, wie sich Änderungen von Einflußgrößen auf das Endergebnis auswirken.

Ein ausgesprochener Mangel dieser Tafeln war die Beschränkung auf mittschiffs gelegene Räume, die ja nicht unbedingt die gefährlichsten zu sein brauchen. Flutungen, die mit starkem Trimm und dazu mit Querneigungen verbunden sind, können bekanntlich wesentlich kritischere Fälle abgeben.

Den neuen  $\overline{\Delta MG}$ -Diagrammen (Diagramm I—VIII) liegen nun die Rechenergebnisse zugrunde, die die IBM 650 lieferte. Sie umfassen demgemäß auch Leckräume zu den Schiffsenden hin, die starken Trimm hervorrufen. Unsymmetrische Überflutungen sind allerdings nicht direkt erfaßt. Hierüber wird unter F, Abschnitt 45 und 46 zu berichten sein. Die sieben Hauptdiagramme (I—VII) enthalten in ihrem oberen Teil jeweils ein Grunddiagramm  $\overline{\Delta MG/B} = f(B/T; \kappa_v \cdot \ell/L)$ , das den erwähnten amerikanischen Auftragungen entspricht, und außerdem Korrekturdiagramme für die anderen Einflußgrößen. Auf die Handhabung der Diagramme wird in dem Abschnitt 35 noch eingegangen.

Die Art der Auftragungen soll an Hand von Betrachtungen über die einzelnen Einflußgrößen erläutert werden.

27. Einfluß des Völligkeitsgrades der Verdrängung  $\delta$

Nach der Vorstellung wegfallender Auftrieb können wir die dimensionslos gemachte Gleichung (6) auch schreiben:

$$\frac{\overline{\Delta MG}}{B} = \frac{1}{\delta} \cdot \frac{\kappa_F i_{B1} - \Delta J_B - \Delta M_H - \kappa_v m_{H1}}{L \cdot B^2 \cdot T} \quad (53)$$

Es ist also  $\overline{\Delta MG/B} \sim 1/\delta$ , da im Zähler nur Größen erscheinen, die sich entweder auf den Leckraum oder auf Teile des Schiffskörpers im Bereich der Wasserlinie beziehen, also  $\delta$  nicht enthalten.

In den Diagrammen erscheint diese lineare Abhängigkeit in Gestalt einer affinen Verzerrung des Ablesemaßstabes in Abhängigkeit von  $\delta$ . Um eine Auftragung in Kurvenform aus den verschiedenen systematischen Rechnungen zu ermöglichen, wurden deren Ergebnisse auf ein gemeinsames  $\delta = 0,6$  umgerechnet.

28. Einfluß der Lage des Leckraumes  $x_1/L$

In Bild 22 ist  $\overline{\Delta MG/B} = f(x_1/L; \kappa_v \cdot \ell/L)$  für zwei B/T-Werte und  $h/B = 0,10$  für die Grundform A aufgetragen. Es wird deutlich, daß die größten  $\overline{MG}$ -Verluste nicht mittschiffs, sondern etwa 5% L vor Hauptspant auftreten. Obgleich diese Darstellung für ein spezielles Schiff gilt, ist dies offenbar ein allgemeingültiges Kennzeichen der den Untersuchungen zugrunde liegenden „normalen“ Schiffsformen. Dies wird durch entsprechende Auftragungen für die anderen untersuchten Schiffsformen deutlich, auf deren Wiedergabe hier verzichtet

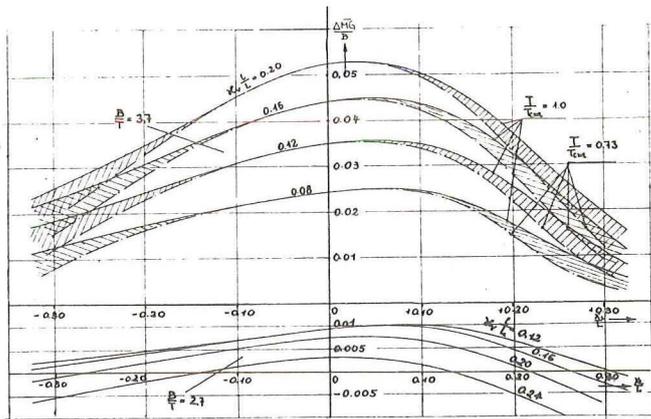


Bild 22

wird. Entgegen den anfänglichen Vermutungen, erwies sich die Schwerpunktlage der Länge nach hierbei von untergeordneter Bedeutung. Ihrem Einfluß ist durch kennzeichnende Größen für die Schiffsform Rechnung getragen, auf die weiter unten eingegangen wird. Vielmehr verursacht das durch vorlastigen Trimm bei Eintauchung nur kaum anwachsende bzw. sogar abfallende Breitenenträgheitsmoment  $J_{B1}$  den unerwarteten Anstieg. Andererseits sind beim Vergleich derartiger Auftragungen verschiedener Schiffe, besonders für Lagen  $x_1/L$  weiter vom Hauptspant entfernt, so starke Abweichungen im  $\overline{\Delta MG/B}$  festzustellen, daß der Gedanke an einfache Korrekturwerte, mit denen von den für mittschiffs gelegene Leckräume gewonnenen Ergebnissen auf die anderer Räume geschlossen werden sollte, fallengelassen werden mußte. Ein solches Vorgehen wäre mit zu großen Ungenauigkeiten verbunden gewesen.

Daher sind für sieben verschiedene Lagen  $x_1/L$ -Diagramme aufgestellt worden, die für  $x_1/L$ -Intervalle von 10% L den Bereich zwischen  $-30\% L - +30\% L$  überstreichen. Für Zwischenlagen muß interpoliert werden, wobei Bild 22 Anhaltspunkte für die Tendenz im betreffenden Bereich des Schiffes liefern kann.

29. Einfluß von B/T

Unterschiedliche B/T-Werte können bei einem bestimmten Schiff durch Änderung des Tiefganges entstehen (konstante Breite) oder bei verschiedenen Schiffen infolge unterschiedlicher Schiffsbreite (konstanter Tiefgang). Bei Leckfällen mittschiffs ohne nennenswerten Trimm ergeben sich in beiden Fällen, wen man sich entsprechend Gleichung (53) auf gleiches  $\delta$  bezieht, nahezu gleiche Stabilitätsverluste  $\overline{\Delta MG/B}$ , worauf schon in [8] hingewiesen wird. Bei Veränderung von B/T durch affine Verzerrung des Schiffskörpers bleibt es gleichgültig, ob die Breite B durch den Verzerrungsfaktor  $k_v$  oder der Tiefgang T durch den Verzerrungsfaktor  $k_z$  verändert wird. Dies geht aus folgenden Betrachtungen hervor.

Allgemein gilt entspr. Gleichung (6) und (53):

$$\frac{\overline{\Delta MG}}{B} = \frac{1}{VB} (\kappa_F \cdot i_{B1} - \Delta J_B - \Delta M_H)$$

Wir wollen die folgenden beiden Fälle unterscheiden:

a) Die Breite B wird konstant gehalten. Die z-Koordinaten werden mit  $k_z$  affin verzerrt ( $k_z \neq 1$ ).

Damit wird  $V \sim k_z$ , Tauchung und Trimm  $\sim k_z$ ,  $B = \text{konst.}$

$$\kappa_F i_{B1} = \text{konst.}, \Delta J_B = \text{konst.}$$

und es ergibt sich für das neue Schiff:

$$\frac{\overline{\Delta MG}_{k_z}}{B} = \frac{1}{k_z \cdot V \cdot B} (\kappa_F i_{B1} - \Delta J_B) - \frac{k_z}{V \cdot B} \cdot \Delta M_H$$

oder

$$\frac{\overline{\Delta MG}_{k_z}}{B} = \frac{\overline{\Delta MF}}{k_z \cdot B} - k_z \frac{\overline{\Delta KF}}{B} \quad (54)$$

b) Der Tiefgang T wird konstant gehalten. Die y-Koordinaten werden mit  $k_y$  affin verzerrt ( $k_y \neq 1$ ).

Damit wird  $V \sim k_y$ ;  $B \sim k_y$ ;  $\alpha_F i_{B1} \sim k_y^3$ ;  $\Delta J_B \sim k_y^3$ ;  
 $\Delta M_H \sim k_y$

und es ergibt sich für das neue Schiff:

$$\frac{\Delta \overline{MG}_{k_y}}{B} = \frac{k_y^3}{k_y^2 \cdot V \cdot B} (\alpha_F i_{B1} - \Delta J_B) - \frac{1}{k_y \cdot V \cdot B} \Delta M_H$$

oder

$$\frac{\Delta \overline{MG}_{k_y}}{B} = k_y \frac{\Delta \overline{MF}}{B} - \frac{\Delta \overline{KF}}{k_y \cdot B} \quad (55)$$

Setzen wir  $\Delta \overline{MG}_{k_y}/B = \Delta \overline{MG}_{k_z}/B$ , so muß sein:  $k_z = 1/k_y$ ,

d. h. aber:  $\frac{k_y \cdot B}{T} = \frac{B}{k_z \cdot T}$  oder  $B/T = \text{konst.}$

Die Beziehungen (54) und (55) sind bei der Aufstellung der B/T-Kurvenscharen in sämtlichen Diagrammen benutzt worden. Bei verändertem Tiefgang ein und desselben Schiffes finden wir, je weiter der Leckraum nach den Schiffsenden zu liegt, immer weniger Übereinstimmung mit den durch affine Verzerrung entstandenen Resultaten, da infolge Abweichungen im Trimm und sonstiger Ursachen weitgehend veränderte Verhältnisse vorliegen. In Bild 22 sind diese Abweichungen angedeutet. In den Diagrammen  $-30\%L$ ,  $-20\%L + 20\%L$  und  $+30\%L$  ist eine Korrektur hierfür vorgesehen, in der der Faktor  $T/T_{CWL}$  erscheint.

### 30. Einfluß der Höhe eines wasserdichten Deck's (Doppelboden)

Ein unter einem solchen Deck unbeschädigt gebliebener Auftriebsteil wirkt sich in erster Linie auf  $M_H$ , das Höhenmoment der Verdrängung, aus, also auf den Wert  $\Delta \overline{KF}$ . In zweiter Linie ruft das durch ihn erzeugte Längenmoment der Verdrängung eine Trimmänderung hervor und beeinflusst so indirekt den Wert  $J_{B1}$  bzw.  $\alpha_F \cdot i_{B1}$  also  $\Delta \overline{MF}$ .

Wenn wir zunächst den Trimmeinfluß vernachlässigen, ändert sich der  $\overline{MG}$ -Verlust  $\Delta \overline{MG}$  infolge des Höhenmomentes  $M_{HD}$  des unbeschädigten Doppelbodenbereiches um den Betrag  $M_{HD}/V$ . Dieser Wert ist unabhängig von der Schiffsbreite, da ein Verzerrungsfaktor  $k_y$  im Zähler und Nenner erscheinen würde. Bei konstanter Doppelbodenhöhe  $h$  wäre  $M_{HD}/V$  auch weitgehend unabhängig vom Tiefgang; denn ein Verzerrungsfaktor  $k_z$  wäre im Zähler lediglich im wirksamen Hebelarm des Momentes  $M_{HD}$  enthalten und ebenfalls wieder im Nenner. Das Volumen des unbeschädigten Doppelbodenbereiches würde etwa konstant bleiben. Da aber das Moment von der Doppelbodenhöhe  $h$  abhängt, würde die durch den Einfluß des Doppelbodens hervorgerufene Änderung des interessierenden Wertes  $\Delta \overline{MG}/B$  nur abhängig der Größe  $h/B$  sein, die sich somit als weitgehend unabhängig von  $B/T$ , der Haupteinflußgröße, erweist und sich deshalb sehr gut zur Charakterisierung dieses Einflusses eignet. Bei den weiter an den Schiffsenden gelegenen Leckräumen, bei denen sich der erwähnte Trimmeinfluß und nun doch eine wenn auch geringe Abhängigkeit von  $B/T$  bemerkbar macht, muß mit Ungenauigkeiten gerechnet werden.

Die bereits erwähnten Grunddiagramme  $\Delta \overline{MG}/B = f(B/T, \alpha_v \cdot \ell/L)$  sind für eine Doppelbodenhöhe<sup>2)</sup>  $h/B = 0,1$  aufgestellt. Für davon abweichende Höhen  $h/B$  sind ebenfalls von  $\alpha \cdot \ell/L$  abhängige Korrekturkurvenscharen gebildet worden, die als Parameter  $h/B$  enthalten ( $0 \leq h/B \leq 0,18$ ).

### 31. Einfluß der Schiffsform

Auch wenn zwei Schiffe gleiche Hauptabmessungsverhältnisse und Völligkeitsgrade  $\delta$  aufweisen, können die trotzdem noch vorhandenen Unterschiede in den Schiffslinien deutliche Abweichungen in den Ergebnissen der Leckrechnungen hervorrufen. Solche Unterschiede in der Schiffsform sind in erster Linie durch verschiedenartige Verdrängungsverteilung gegeben, die der Höhe nach durch die Charakteristik der Spanten (U-Spanten, V-Spanten) der Länge nach durch die Schwerpunktslage sowie durch die Länge des parallelen Mittelschiffes repräsentiert werden.

Zur Kennzeichnung der Verdrängungsverteilung der Höhe nach wird zunächst die Größe  $\varphi/\alpha$  eingeführt. Sie kann etwa als Maß für die mittlere Spantneigung angesehen werden. Für mittschiffs gelegene Flutungen reicht diese Kenngröße aus, um abweichende Ergebnisse für verschiedenartige Schiffe durch die Entwurfsdiagramme zu erfassen. In den entsprechenden Korrekturkurven erscheint demnach  $\varphi/\alpha$  als Parameter. Es ergibt sich für größere  $\varphi/\alpha$  ein vergrößerter  $\overline{MG}$ -Verlust und umgekehrt. Dies erklärt sich dadurch, daß in diesem Falle  $\alpha_F i_{B1} = \text{konstant}$  und  $\Delta J_B$  stark von der mittleren Spantneigung abhängig ist. Sind die Spanten im Tauchbereich im Mittel steil, also  $\varphi/\alpha$  groß, wird der Abzug  $\Delta J_B/V$  vom Stabilitätsverlust klein. Andere Einflüsse treten dabei offenbar in den Hintergrund.

Bei Leckräumen, etwa  $\pm 10\%L$  vom Hauptspant entfernt, beginnt sich der Trimm auszuwirken. Der Schiffsteil, in dem der Leckraum liegt, taucht kräftig ein, und es erweist sich als zweckmäßig,  $\varphi/\alpha$  durch den Kennwert  $\varphi_v/\alpha_v$  bzw.  $\varphi_h/\alpha_h$  zu ersetzen; denn einmal wird die Änderung  $\Delta J_B$  jetzt hauptsächlich im eintauchenden Teil erzeugt, zum anderen wird damit auch die Gestalt des Leckraums, der sich unter Umständen bereits beginnt nach einem Ende hin zuzuschärfen, grob gekennzeichnet.

Solange der Leckwasserspiegel rechteckig ist und im Bereich der größten Schiffsbreite  $B$  liegt, ist der Einfluß der Schiffsform, den wir mit  $\varphi/\alpha$  bzw.  $\varphi_v/\alpha_v$  bzw.  $\varphi_h/\alpha_h$  erfaßt haben, glücklicherweise kaum abhängig von der Haupteinflußgröße  $B/T$ . Es zeigt sich, daß beispielsweise bei steigendem  $\varphi/\alpha$  die Größen  $\Delta J_B$  und  $\Delta M_H$  gerade um so viel kleiner werden, daß beim Übergang auf ein anderes  $B/T$  — etwa nach Gleichung (54) — die Differenzen in den Ergebnissen zweier in  $\varphi/\alpha$  voneinander abweichender Schiffe annähernd konstant bleiben. Diese in allgemeiner Form schwerlich zu begründende, aber durch zahlreiche Rechnungen bestätigte Erscheinung sei an einem Zahlenbeispiel dargestellt. Es werden zwei Schiffe mit stark abweichendem  $\varphi/\alpha$  verglichen. Es ist damit ein besonders ungünstiger Fall dargestellt.

Beispiel:

Leckraumlage  $10\%L$  hinter Hauptspant,  $\alpha_v \cdot \ell/L = 0,20$ ,  $h/B = 0,1$ .

$B/T = 2,7$

1. Schiff: $\varphi_h/\alpha_h = 0,7917$	2. Schiff: $\varphi_h/\alpha_h = 0,7077$
$\frac{\alpha_F i_{B1}}{VB} = 0,0750$	$\frac{\alpha_F i_{B1}}{VB} = 0,0745$
$\frac{\Delta J_B}{VB} = 0,0200$	$\frac{\Delta J_B}{VB} = 0,0310$
$\frac{\Delta M_H}{VB} = 0,0335$	$\frac{\Delta M_H}{VB} = 0,0420$
$\frac{\Delta \overline{MG}}{B} = 0,0215$	$\frac{\Delta \overline{MG}}{B} = 0,0015$

Differenz der beiden  $\Delta \overline{MG}/B : 0,0200$

Diese Schiffe werden durch affine Verzerrung auf ein  $B/T = 3,7$  umgerechnet ( $k_z = 0,73$ );  $h/B = k_z \cdot 0,10 = 0,073$ .

<sup>2)</sup> Da die Rechnungsgrößen ohne Ausnahme dimensionlos gemacht sind, wird im folgenden der Einfachheit halber jede dieser Größen im Text nach ihrem Zähler benannt, also Doppelbodenhöhe:  $h/B$ , Leckraumgröße:  $\alpha \cdot \ell/L$ , Stabilitätsverlust:  $\Delta \overline{MG}/B$  usw.

B/T = 3,7

1. Schiff: $\varphi_h/\alpha_h = 0,7917$	2. Schiff: $\varphi_h/\alpha_h = 0,7077$
$\frac{\kappa_F \cdot i_{B1}}{V \cdot B \cdot k_z} = 0,1030$	$\frac{\kappa_F \cdot i_{B1}}{V \cdot B \cdot k_z} = 0,1020$
$\frac{\Delta J_B}{V \cdot B \cdot k_z} = 0,0275$	$\frac{\Delta J_B}{V \cdot B \cdot k_z} = 0,0425$
$k_z \cdot \frac{\Delta M_{II}}{V \cdot B} = 0,0245$	$k_z \cdot \frac{\Delta M_{II}}{V \cdot B} = 0,0305$
$\frac{\Delta \overline{MG}}{B} = 0,0510$	$\frac{\Delta \overline{MG}}{B} = 0,0290$

Differenz der beiden  $\Delta \overline{MG}/B : 0,0220$

Die Differenzen weichen voneinander um 0,0020 ab. Das wäre bei B = 20 m ein Unterschied von 4 cm im  $\Delta \overline{MG}$ , was noch als tragbar angesehen werden kann.

Im Falle, daß der Leckraum weiter nach den Schiffsenden hin liegt, erscheint eine stärkere Abhängigkeit der  $\varphi/\alpha$ -Formkorrektur von B/T, die nicht mehr vernachlässigt werden kann.  $\kappa_F \cdot i_B$  ist hierbei infolge ausfallender Spanten im Überwasserbereich von Schiff zu Schiff starken Schwankungen unterworfen. Es wächst in der Regel mit wachsendem  $\varphi_{v,h}/\alpha_{v,h}$ . Es versagen auch hier die Bemühungen um eine Deutung der allgemeinen Zusammenhänge, die wohl den Benutzer der Tafeln auch kaum interessieren würde. Wie stark diese B/T-Abhängigkeit werden kann, sei an einem weiteren Beispiel gezeigt.

Beispiel:

Leckraumlage 30 % L vor Hauptspant  $\kappa_v \cdot \ell/L = 0,20$ ,  $h/B = 0,15$

B/T = 2,7

1. Schiff $\varphi_v/\alpha_v = 0,8781$	2. Schiff $\varphi_v/\alpha_v = 0,8378$
$\frac{\kappa_F \cdot i_{B1}}{V \cdot B} = 0,0500$	$\frac{\kappa_F \cdot i_{B1}}{V \cdot B} = 0,0230$
$\frac{\Delta J_B}{V \cdot B} = 0,0060$	$\frac{\Delta J_B}{V \cdot B} = 0,0025$
$\frac{\Delta M_{II}}{V \cdot B} = 0,305$	$\frac{\Delta M_{II}}{V \cdot B} = 0,0175$
$\frac{\Delta \overline{MG}}{B} = 0,0135$	$\frac{\Delta \overline{MG}}{B} = 0,0030$

Differenz der beiden  $\Delta \overline{MG}/B : 0,0105$

Diese Schiffe werden durch affine Verzerrung auf ein B/T = 3,7 ungerechnet ( $k_z = 0,73$ );  $h/B = k_z \cdot 0,15 = 0,11$ .

B/T = 3,7

1. Schiff $\varphi_v/\alpha_v = 0,8781$	2. Schiff $\varphi_v/\alpha_v = 0,8378$
$\frac{\kappa_F \cdot i_{B1} - \Delta J_B}{V \cdot B \cdot k_z} = 0,0605$	$\frac{\kappa_F \cdot i_{B1} - \Delta J_B}{V \cdot B \cdot k_z} = 0,0280$
$k_z \cdot \frac{\Delta M_{II}}{V \cdot B} = 0,0225$	$k_z \cdot \frac{\Delta M_{II}}{V \cdot B} = 0,0130$
$\frac{\Delta \overline{MG}}{B} = 0,0380$	$\frac{\Delta \overline{MG}}{B} = 0,0150$

Differenz der beiden  $\Delta \overline{MG}/B : 0,0230$

Die Abweichung in den Differenzen von 0,0125, entsprechend 25 cm im  $\Delta \overline{MG}$  bei 20 m Schiffsbreite, ist zu groß. Diese starke Abweichung der Differenzen ist die Begründung für den Umstand, daß in den Diagrammen für  $\pm 20\%$  L und  $\pm 30\%$  L zur Berücksichtigung abweichender Schiffsformen ein Kennwert erscheint, der sowohl  $\varphi_{v,h}/\alpha_{v,h}$  als auch B/T enthält.

Allen Diagrammen (I—VII) ist die Form des Grundtyps A (Bergensfjord) mit  $\varphi_h/\alpha_h = 0,753$  und  $\varphi_v/\alpha_v = 0,876$  zugrunde gelegt worden. Für diese Form muß die  $\varphi/\alpha$ -Korrektur unabhängig von B/T zu Null werden. Dies ist der Fall, wenn der Kennwert  $f(B/T, \varphi/\alpha)$  selbst für diesen Fall Null wird.

Das bedingt folgenden Aufbau des Kennwertes, der im übrigen auf rein empirischem Wege an Hand zahlreicher Rechenresultate aufgestellt wurde.

$$10 \cdot (B/T - 2) (\varphi_v/\alpha_v - 0,876) \text{ bzw. } 10 \cdot (B/T - 2) (\varphi_h/\alpha_h - 0,753)$$

In Bild 23 sind über diesem Kennwert die erforderlichen Korrekturen der Ergebnisse für verschiedene Schiffe aufgetragen. Diese Schiffe erscheinen durch affine Verzerrung mit jeweils verschiedenen B/T-Werten. Die Punkte, die zu einem so verzerrten Schiff gehören, sind durch eine Linie verbunden. Die durchgezogene Linie stellt die gewählte Korrekturfunktion für  $\kappa_v \cdot \ell/L = + 0,20$  dar.

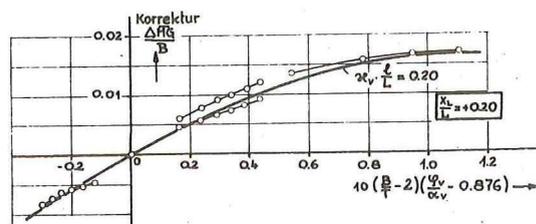


Bild 23 Typische Korrekturkurve zur Berücksichtigung abweichender Schiffsformen

Es ist aus dieser Darstellung ersichtlich, daß der Einfluß von B/T durch den gewählten Kennwert gut erfaßt wird. Dagegen können die durch abweichende Schiffsformen hervorgerufenen Fehler größer sein, woraus deutlich wird, daß der Wert  $\varphi_{v,h}/\alpha_{v,h}$  zur Charakterisierung von Leckfällen, die mit stärkerer Änderung der Schwimmlage verbunden sind, eigentlich nicht ausreicht. In Abschnitt 34 über die erzielbare Genauigkeit wird aber gezeigt werden, daß sich diese Abweichungen noch in erträglichen Grenzen halten.

### 32. Einfluß abweichender Flächenflutbarkeit

In Abschnitt 25 ist auf mögliche Unterschiede zwischen Volumenflutbarkeit  $\kappa_v$  und Flächenflutbarkeit  $\kappa_F$  und auf die Tatsache hingewiesen worden, daß hierdurch hinsichtlich der Stabilität im Leckfall besonders kritische Fälle entstehen können. Dieser wichtige Einfluß ist in die  $\Delta \overline{MG}$ -Diagramme nicht aufgenommen. Für ihn wurde ein eigenes Diagramm ausgearbeitet (Diagramm VIII), aus dem man für Flutungen beliebiger Lage im Schiff den Anteil

$$\frac{\Delta \overline{MG}_{\kappa_F}}{B} = f \left( \kappa_v \cdot \frac{\ell}{L}; \frac{\kappa_v}{\kappa_F}; \frac{B}{T}; c_i; \delta \right)$$

ermitteln kann, der zu dem aus den  $\Delta \overline{MG}$ -Diagrammen gewonnenen Wert  $\Delta \overline{MG}/B$  hinzuaddiert werden muß. Folgende Überlegungen führten zur Aufstellung dieses Diagramms.

Ein von  $\kappa_v$  abweichendes  $\kappa_F$  wirkt sich so gut wie ausschließlich im Breitenträgheitsmoment  $\kappa \cdot i_{B1}$  des Leckraums aus. Der zu ermittelnde Unterschied im Stabilitätsverlust beträgt

$$\frac{\Delta \overline{MG}_{\kappa_F}}{B} = \frac{(\kappa_F - \kappa_v) \cdot i_{B1}}{V \cdot B} \quad (56)$$

Beschränken wir uns zunächst wieder auf Überflutungen mit rechteckiger Wasserspiegelfläche im Leckraum  $f_{WL} = \ell \cdot B$  so ist

$$i_{B1} = \frac{\ell \cdot B^3}{12}$$

Mit  $V = L \cdot B \cdot T \cdot \delta$  in Gleichung (56) eingesetzt, ergibt sich daraus

$$\frac{\Delta \overline{MG}'_{\kappa_F}}{B} = \left( \frac{\kappa_F}{\kappa_v} - 1 \right) \cdot \kappa_v \cdot \frac{\ell}{L} \cdot \frac{B}{T} \cdot \frac{1}{12 \delta} \quad (57)$$

Bei Flutungen, für die  $f_{WL} < \ell \cdot B$  ist, verringert sich  $\frac{\Delta \overline{MG}'_{\kappa_F}}{B}$  um den Faktor

$$c_i = \frac{i_{Bx}}{i_{B\Box}} \approx f\left(\frac{x_L}{L}; \alpha_{v,h}, \kappa_v \cdot \frac{\ell}{L}; \frac{h}{T}\right)$$

$i_{Bx}$ : Breitenträgheitsmoment der Leckwasserfläche  $i_L$  eines Leckraums an der Stelle  $x$ .

Für den Ausdruck

$$\frac{\Delta MG_{xL}}{B} = c_i \left(\frac{\kappa_v}{\kappa_v} - 1\right) \kappa_v \cdot \frac{\ell}{L} \cdot \frac{B}{T} \cdot \frac{1}{12\delta} \quad (58)$$

ist, da alle anderen Lösungen auch graphisch gewonnen wurden, ein Nomogramm aufgestellt worden (Diagramm VIII untere Hälfte). Es wurde hierbei die in [38] beschriebene Methode der Netztafeln mehrerer Veränderlicher gewählt. Die Handhabung des Nomogramms geht aus einem Beispiel hervor (Abschnitt 48), das in das Diagramm eingezeichnet ist.

Die Größe des Faktors  $c_i$  ist in erster Linie durch die Lage des Leckraumes  $x_L/L$  gekennzeichnet. Außerdem ist sie bei ausfallenden Spanten stark von Tauchung und Trimm abhängig. Tauchung und Trimm ihrerseits sind abhängig von der Raumlänge  $\kappa_v \cdot \ell/L$  sowie von der Doppelbodenhöhe  $h/T$ . Zur Kennzeichnung der Gestalt der Wasserlinie und damit der Spantbreiten an der Stelle  $x$  können die Wasserlinienvölligkeiten  $\alpha_v, \alpha_h$  einen Anhalt geben. In Bild 24 und 25 sind  $c_i$ -Werte für verschiedene Lagen  $x_L/L$  über einem Kennwert aufgetragen, der diese Abhängigkeiten enthält. Zur Aufstellung dieses Kennwertes dienten folgende Überlegungen:

Für kleine Raumlängen  $\kappa_v \cdot \ell/L \approx 0$  gilt  $c_i \approx (B_x/B)^3$ . Bei größerem  $\kappa_v \cdot \ell/L$  taucht das Schiff mehr ein. Bei ausfallenden Spanten vergrößert sich daraufhin die Fläche der Wasserlinie, was einem Anstieg der Völligkeiten  $\alpha_v$  bzw.  $\alpha_h$  entspricht. Die systematischen Leckrechnungen zeigten, daß man diesen Anstieg hinreichend genau durch eine lineare Vergrößerung der Wasserlinienvölligkeiten, d. h. der Abszissenwerte, in Bild 24 und 25, erfassen kann. Es wird

die Abszisse vorn:  $\alpha_v + 0,4 \kappa_v \ell/L$

die Abszisse hinten:  $\alpha_h + 0,6 \kappa_v \ell/L$

Der Einfluß der Doppelbodenhöhe kann in ähnlicher Weise berücksichtigt werden, wenn man die für kleine Raumlängen gültige Annahme trifft, daß bei  $h/T \approx 1$  und bei  $\kappa_v \cdot \ell/L \approx 0$  die  $c_i$ -Werte etwa gleich groß sind, da Tauchung und Trimm verschwinden. Wenn außerdem aus dieser Einfluß linear angenommen wird, so ergibt sich als endgültiger Kennwert für

die Abszisse vorn:  $\alpha_v + 0,4 \kappa_v \ell/L \left(1 - \frac{h}{T}\right)$

die Abszisse hinten:  $\alpha_h + 0,6 \kappa_v \ell/L \left(1 - \frac{h}{T}\right)$

Die in Bild 24 und 25 erkennbaren gerechneten Einzelpunkte stellen einen repräsentativen Querschnitt der an 6 Schiffsförmungen durchgeführten systematischen Rechnungen dar, wobei Ausgangstiefgang, Raumlänge und Flutbarkeit sowie die Doppelbodenhöhe verändert wurden. Es zeigt sich, daß die Abweichungen von den durch die Punkte gelegten Kurven erträglich sind.

In der oberen Hälfte von Diagramm VIII ist  $c_i$  über  $x_L/L$  aufgetragen, wobei die beschriebenen Kennwerte Parameter sind.  $c_i$  kann somit sehr einfach abgelesen werden.

### 33. Gegenseitige Beeinflussung der Korrekturgrößen

Ohne Zweifel beeinflussen sich einige der beschriebenen Größen noch untereinander. Auf den Einfluß von  $B/T$  bei der Kennzeichnung der Schiffsförmung ist bereits hingewiesen worden. Er wurde im entsprechenden Kennwert berücksichtigt. Es ist weiterhin zu erwarten, daß sich Unterschiede in der Schiffsförmung (U-, V-Spanten) auf den Einfluß des Doppelbodens  $h/B$  oder auf den Einfluß eines geringeren Ausgangstiefgangs  $T/C_{WL}$  auswirken werden. Auch ist der Einfluß von  $h/B$

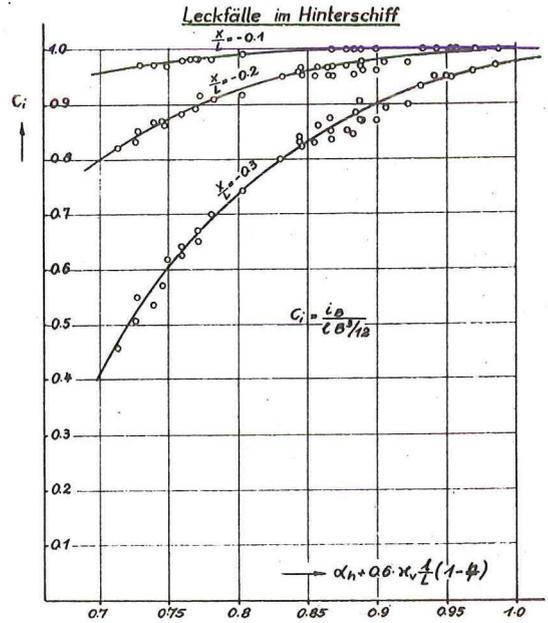


Bild 24 Abnahme des Breitenträgheitsmoments im Hinterschiff

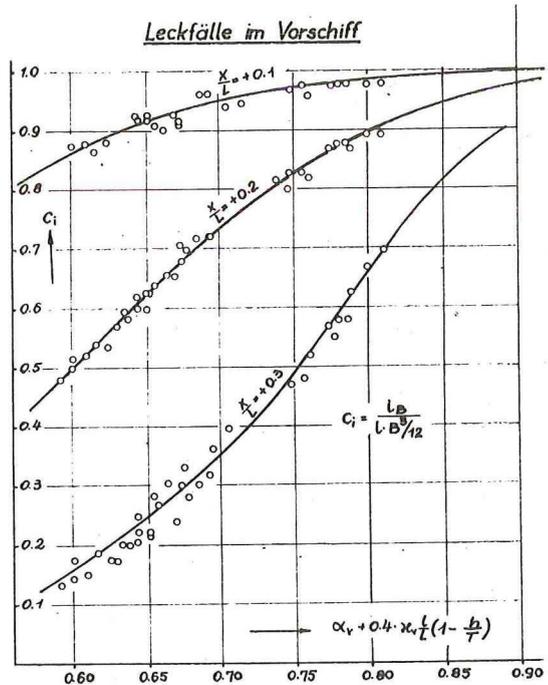


Bild 25 Abnahme des Breitenträgheitsmoments im Vorschiff

wenn auch geringfügig, abhängig von  $B/T$ . Auf die Berücksichtigung dieser und weiterer Abhängigkeiten „höherer Ordnung“ mußte verzichtet werden, da einerseits jede weitere Komplizierung der Diagramme ihren Wert für die Praxis herabsetzen würde, zum anderen bereits Einflüsse „erster Ordnung“, wie z. B. der der Schiffsförmung, nur unvollkommen berücksichtigt worden sind und damit Abweichungen der Ergebnisse hervorgerufen werden, die die hier angedeuteten Einflüsse übertreffen.

### 34. Rechengenauigkeit bei Anwendung der $\Delta MG$ -Diagramme

Fehlerbetrachtungen auf analytischem Wege, etwa wie in Abschnitt 8—14 sind für die Beurteilung der vorstehend beschriebenen Entwurfsdiagramme nicht möglich; denn die Abweichungen der Schiffsförmungen untereinander lassen sich ebenso schwer analytisch angeben, wie die Einzelheiten der Schiffsförmungen selbst. Die stellenweise beträchtlichen Verein-

fachungen der eigentlich nicht sehr einfachen Zusammenhänge zwischen Leckverhalten und Schiffsform wurden bewußt getroffen und empirisch durch Vergleichsrechnungen begründet.

In diesen zahlreichen Vergleichsrechnungen — die den Vorzug absoluter Zuverlässigkeit haben — ist uns ein Mittel in die Hand gegeben, Aussagen über die zu erwartenden Fehler auf statistischem Wege zu gewinnen. Die Brauchbarkeit dieser Fehlerstatistik wird allerdings durch die Tatsache eingeschränkt, daß ein Kollektiv von Rechenergebnissen lediglich von Schiffsformen vorliegt, die auch zur Aufstellung der Diagramme herangezogen sind. Hierin braucht nicht unbedingt ein Mangel der Fehleraussagen zu liegen, wenn man sich auf die den Rechnungen zugrunde liegenden „normalen“ Schiffsformen ohne paralleles Mittelschiff beschränkt, wie sie im Teil IV beschrieben wurden. Eine mehr stichprobenartige Hinzuziehung von Ergebnissen abweichender Schiffsformen brachte übrigens eine noch recht befriedigende Übereinstimmung. Eine systematische Erfassung anderer Schiffsformen hätte einen zusätzlichen Aufwand erfordert, der wohl kaum gerechtfertigt gewesen wäre.

Es wird im folgenden aus etwa 500 repräsentativen Einzelrechnungen an 10 verschiedenen Schiffsformen (5 Grundformen, 5 affin verzerrte Formen) jeweils für 3 Tiefgänge auf statistischem Wege die Fehlerverteilung sowie der mittlere Fehler jedes der 7  $\Delta MG$ -Diagramme ermittelt. Hierbei sind nur Ergebnisse mit  $-\Delta MG/B > 0$  herangezogen worden, da nur sie den Entwurfsingenieur interessieren dürften.

Aus der großen Zahl systematisch ermittelter Rechendaten wurde für die Statistik insofern eine Auswahl getroffen, als für jede untersuchte Schiffsform etwa gleich viele und gleichgeartete Ergebnisse herangezogen wurden, die den durch die Diagramme erfaßten Bereich möglichst gleichmäßig überstreichen. Die Verwertung aller vorhandenen Daten hätte ein zu günstiges Bild ergeben; denn zur Aufstellung der Grundkurven in den Diagrammen waren sehr viel mehr Rechnungen mit der Grundform A durchgeführt worden als für die anderen Typen. Naturgemäß sind aber die Abweichungen für die Grundform besonders klein.

In Bild 26 sind die Verteilungen der Fehlerbeträge aufgetragen sowie die Streuung der jeweiligen Kollektive für die einzelnen Diagramme angegeben. Es wäre nicht richtig, statt der absoluten Abweichungen die relativen Fehler anzugeben, da nicht der Verlust an metazentrischer Höhe, sondern die verbleibende metazentrische Resthöhe  $\overline{MG}_{1\text{rest}} = \overline{MG}_0 - \Delta MG \geq \overline{MG}_{1\text{min}}$  letztlich interessiert. Diese Bedingung ist für große  $\Delta MG$  sehr viel schwerer zu erfüllen als für kleine. Daher muß angestrebt werden, die großen Werte  $\Delta MG/B$  möglichst genau zu erhalten, während  $\Delta MG/B \approx 0$  ruhig mit größeren Fehlern behaftet sein darf. Darauf ist bei der Aufstellung der Diagramme geachtet worden.

Aus Bild 26 geht hervor, daß die erzielbare Genauigkeit bei mitschiffs gelegenen Überflutungen am größten ist. Um die Abweichungen der Größe  $\Delta MG/B$  anschaulich zu machen, sei ein Schiff mit der Breite  $B = 20$  m betrachtet. Dann ergeben sich die folgenden mittleren Abweichungen im  $\overline{MG}$ -Verlust:

$\frac{x_L}{L}$	mittlerer Fehler im $\overline{MG}$
-0,30	± 4,4 cm
-0,20	± 3,5 cm
-0,10	± 3,6 cm
0	± 2,8 cm
+0,10	± 3,5 cm
+0,20	± 3,5 cm
+0,30	± 3,8 cm

B = 20 m

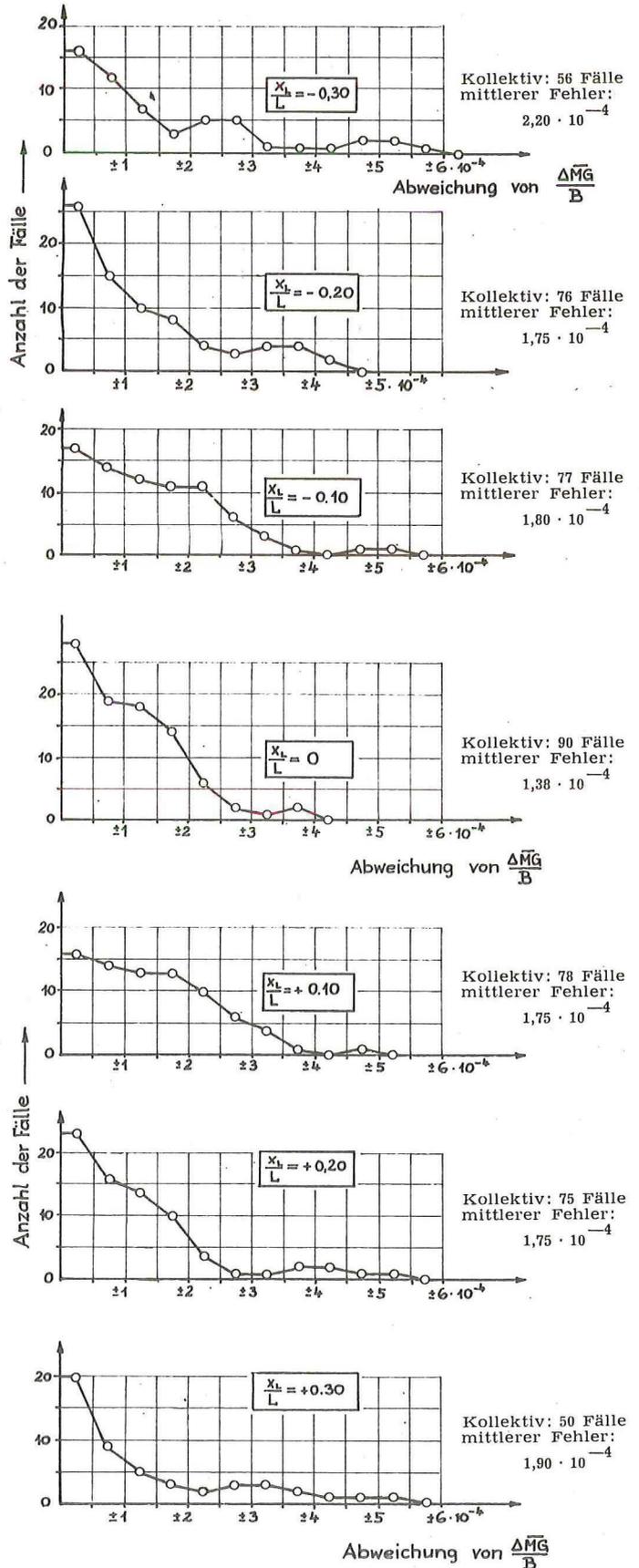


Bild 26 Statistische Fehlerermittlung bei Anwendung der  $\Delta MG$ -Diagramme

### 35. Handhabung der $\Delta MG$ -Diagramme

Aus den in Tafel I aufgezählten Größen sind zunächst die in den vorigen Abschnitten erläuterten und in Tafel II zusammengestellten dimensionslosen Kenngrößen zu bilden.

Tafel II

Dimensionslose Kennwerte der  $\overline{\Delta MG}$ -Diagramme

a) Kennzeichnung der Schiffsform und der Ausgangsschwimmlage:

$$\frac{B}{T}; \frac{T}{T_{CWL}}; \delta$$

Hinterschiff  $\frac{\varphi_h}{\alpha_h}$  <sup>3)</sup> oder  $10 \left( \frac{B}{T} - 2 \right) \left( \frac{\varphi_h}{\alpha_h} - 0.753 \right)$

Mittelschiff  $\frac{\varphi}{\alpha}$

Vorschiff  $\frac{\varphi_v}{\alpha_v}$  oder  $10 \left( \frac{B}{T} - 2 \right) \left( \frac{\varphi_v}{\alpha_v} - 0.876 \right)$

b) Kennzeichnung des Leckbereichs ( $\kappa_v = \kappa_T$ ) Diagramm I bis VII

$$\frac{x_L}{L}; \kappa_v \frac{\ell}{L}; \frac{h}{B}$$

c) Berücksichtigung  $\kappa_T > \kappa_v$  :  $\frac{\kappa_v}{\kappa_T}; \frac{h}{T}$  (Diagramm VIII)

Hinterschiff  $\alpha_h + 0.6 \cdot \kappa_v \frac{\ell}{L} \left( 1 - \frac{h}{T} \right)$

Vorschiff  $\alpha_v + 0.4 \cdot \kappa_v \frac{\ell}{L} \left( 1 - \frac{h}{T} \right)$

d) Resultat:  $\frac{\overline{\Delta MG}}{B}; \frac{\overline{\Delta MG}}{B} \kappa_T$

Aus diesen Größen, die sich als Parameter der einzelnen Kurvenscharen in den Diagrammen wiederfinden, lassen sich die einzelnen Anteile von  $\overline{\Delta MG}/B$  abgreifen. Da die Ordinatenwerte sämtlicher Kurvenscharen im gleichen  $\delta$ -abhängigen Maßstab aufgetragen sind, können die einzelnen Anteile ohne weiteres zu einem Gesamtwert aufsummiert werden. Dies geschieht am besten mit einem Stechzirkel, dessen Spitzenabstand, je nach dem Vorzeichen der einzelnen Anteile entsprechend verändert, zuletzt das Abgreifen des Ergebnisses am linken Rand der Blätter erlaubt. Da während einer Rechnung die Abszisse  $\kappa_v \cdot \frac{\ell}{L}$ -konstant ist, bewegt sich der Stechzirkel

in einer Vertikalen. Für ein bestimmtes  $x_L/L$  muß zwischen den einzelnen Diagrammen interpoliert werden. Hierzu sei auf die Beispiele Abschnitt 48 bis 50 verwiesen.

Da den Entwerfenden in erster Linie ein  $\overline{MG}$ -Verlust interessiert, also der Fall, wenn  $\overline{\Delta MG}$  negativ ist, sind in den Diagrammen die negativen Einflüsse auf  $\overline{\Delta MG}$  nach oben, die positiven nach unten aufgetragen (vgl. auch [8, 9]). In der Praxis wird oft  $\overline{\Delta MG}$  ein Plus-Vorzeichen gegeben, wenn es sich um einen  $\overline{MG}$ -Verlust handelt und ein Minus-Zeichen, wenn sich ein  $\overline{MG}$ -Anstieg ergibt. Da in dieser Arbeit die  $\overline{MG}$ -Änderung vorzeichenbehaftet ist ( $\overline{MG}$ -Verlust durch  $-\overline{\Delta MG}/B$  ausgedrückt), muß beim Arbeiten mit den Diagrammen auf richtige Vorzeichen geachtet werden.

Abweichend vom Normalfall, bei dem  $\overline{\Delta MG}/B$  gesucht ist, kann aber auch ein Grenzwert für  $\overline{\Delta MG}/B$  vorgegeben sein, und es wird gefragt, wie groß einzelne der Kennwerte höchstens werden dürfen. Die Lösungen solcher Aufgaben sind bisher mit besonders großem Aufwand verbunden; denn man müßte so gut wie die ganze Rechnung mehrfach durchführen. Das ist bei Verwendung der Entwurfsdiagramme nicht nötig.

Ist  $\overline{\Delta MG}/B$ ,  $x_L$ ,  $\kappa_v \cdot \frac{\ell}{L}$ ,  $\delta$  sowie der Formwert  $\varphi_{v,h}/\alpha_{v,h}$

gegeben, können wahlweise die folgenden Größen direkt bestimmt werden:  $h/B$ ,  $B/T$ ,  $\kappa_v/\kappa_T$ . Man muß lediglich die einzelnen Kurvenscharen in umgekehrter Richtung durchlaufen,

wobei sich der gesuchte Parameter zuletzt unmittelbar ablesen läßt. Auch hierbei bedient man sich zweckmäßigerweise eines Stechzirkels.

Ist hingegen die Raumlänge bzw. die Raumflutbarkeit:  $\kappa_v \cdot \frac{\ell}{L}$  die gesuchte Größe bei vorgegebenem  $\overline{\Delta MG}/B$ , so sind

die Diagramme etwa für drei Werte  $\kappa_v \cdot \frac{\ell}{L}$  zu durchlaufen,

wobei sämtliche anderen Kennwerte konstant gehalten werden. Trägt man die sich jeweils ergebenden  $\overline{\Delta MG}/B$  über  $\kappa_v \cdot \frac{\ell}{L}$  auf, so läßt sich der gewünschte Wert sofort graphisch

interpolieren. Dieses Vorgehen macht kaum mehr Mühe, da das Durchlaufen der Diagramme bei bekannten Kennwerten nur eine sehr kurze Zeit in Anspruch nimmt.

Bei der zuletzt erwähnten Aufgabenstellung ist es möglich, daß es keine Raumgröße  $\kappa_v \cdot \frac{\ell}{L}$  gibt, mit der das vorgegebene

$\overline{\Delta MG}/B$  erreicht wird. Doch auch dieses nicht reelle Ergebnis kann im Einzelfall nützlich sein.

Durch die additive Verknüpfung der einzelnen Einflüsse können diese auch getrennt für sich bestimmt oder sogar mit einem Blick überschaut werden. Das ist für die Festlegung der Einzelheiten in einem ganz frühen Entwurfsstadium von Nutzen und gibt dem Entwurfsingenieur den nötigen Überblick.

### E. Diagramme zur Abschätzung der Eintauchung des Schiffes (T-Diagramme)

#### 36. Vorbemerkungen

Zu jeder Leckrechnung gehört die Bestimmung der Endschwimmlage des Schiffes. Ihre Kenntnis ist erforderlich, um nachzuweisen, daß das Wasser an keiner Stelle von oben her in unbeschädigte Abteilungen eindringen kann.

Die Umkehrung dieser Aufgabe ist die „Schottenrechnung“ (Kurve der flutbaren Längen). Es wurde in Abschnitt 22 bereits darauf hingewiesen, daß zur Bestimmung der flutbaren Längen schon mehrfach Standarddiagramme aufgestellt wurden. Trotzdem wurde es für nützlich gehalten, neue Entwurfsdiagramme zu entwickeln, die zwar auch die Bestimmung der flutbaren Längen erlauben, in erster Linie jedoch für den einzelnen Leckfall die Eintauchung an den Schiffsenden liefern sollen. Der Entwurfsingenieur benötigt Angaben über Tauchung und Trimm u. a. auch, um beurteilen zu können, ob für mögliche Querneigungen des Schiffes im Leckfall noch ein genügend großer Restfreibord vorhanden ist. In der Regel werden Querneigungen durch unsymmetrische Überflutungen hervorgerufen. Solche aber sind in den zu beschreibenden Diagrammen nicht enthalten. Trotzdem können sie aber auch in diesen Fällen, wie in Abschnitt 45 gezeigt wird, nützliche Anhaltspunkte liefern.

Der grundsätzliche Aufbau der T-Diagramme ist folgender: Sie erlauben die Ablesung der Eintauchung mittschiffs — auf Hauptspant  $\otimes$  — und an den Schiffsenden für gegebene Flutungen. Auf der Abszisse ist die Lage des Leckraums gekennzeichnet  $\frac{x_L - s_{WL}}{L}$ ; nach unten ist die Eintauchung mitt-

schiffs  $\Delta T/T$ , nach oben der halbe Trimm  $\frac{t/2}{T}$  aufgetragen.

Hauptparameter ist die Raumgröße  $\kappa_v \cdot \frac{\ell}{L}$ . Am eintauchenden Schiffsende ergibt sich die Tiefgangsdifferenz

$$\frac{T_{h,v} - T}{T} = \frac{\Delta T}{T} + \frac{t/2}{T}$$

3) Ermittlung nach Gleichung (51) und (52).

am austauchenden Schiffsende:

$$\frac{T_{v,h} - T}{T} = \frac{\Delta T}{T} - \frac{t/2}{T}$$

Es wurde je ein Diagramm für Vor- bzw. Hinterschiffsüberflutungen aufgestellt. Auch hier, wie bei der Beschreibung der ΔMG-Diagramme, mag eine Erörterung der einzelnen Einflußgrößen zur näheren Erläuterung der Diagramme folgen.

### 37. Einfluß der Hauptabmessungen

Denken wir uns eine beliebige Veränderung der Hauptabmessungen, durch affine Verzerrung eines Grundschiffstyps hervorgerufen, so bedarf es keiner weiteren Erläuterungen, daß im Falle dimensionsloser Koordinaten  $x/L$ ;  $y/B$ ;  $z/T$  die in diesem Koordinatensystem ausgedrückten Ergebnisse  $\Delta T/T$  und  $\frac{t/2}{T}$  praktisch unabhängig von den Hauptabmessungen  $L$ ;  $B$ ;  $T_{CWL}$  sind. Ganz korrekt ist das allerdings nicht, da sich bei affiner Verzerrung von  $x$  und  $z$  Winkeländerungen zwischen Wasserlinie und den Wirkungslinien der auftretenden Kräfte ergeben, so daß die Kräfte nicht mehr ganz senkrecht auf der Wasseroberfläche stehen. Diesen Einfluß können wir hier vernachlässigen<sup>4)</sup>. Kenngrößen wie  $B/T$ ,  $L/B$  usw. erscheinen also in den T-Diagrammen nicht.

### 38. Einfluß der Lage des Leckraums und des Wasserlinienswerpunktes

Zur Aufstellung der Diagramme können wir die allgemein gebräuchliche Näherungsannahme heranziehen, daß der Momentenbezugspunkt für das trimmende Moment im Wasserlinienswerpunkt liegt. Aus diesem Grunde wurde der Koordinatenursprung in den Wasserlinienswerpunkt verlegt, wodurch die  $x/L$ -Koordinate durch  $\frac{x_L - s_{WL}}{L}$  ersetzt wird und alle  $\frac{t/2}{T}$ -Kurven im Ursprung mit Null beginnen. Da mit aber ist der überaus wichtige Einfluß des Schwerpunktes der Länge nach auf den Trimm bereits recht gut erfaßt. Der Wert  $\frac{x_L - s_{WL}}{L}$  kennzeichnet definitionsgemäß die Mitte des betrachteten Leckbereiches.

Die Leckräume können in einem Bereich zwischen etwa  $-0,38 \leq \frac{x_L - s_{WL}}{L} \leq +0,38$  liegen. Die möglichen Leckräume überstreichen somit bei nicht zu kleinen Leckraumlängen an den Schiffsenden  $\kappa_v \cdot \ell/L$  nahezu die ganze Schiffslänge. Lediglich über die sogenannten „Endräume“ sind aus den T-Diagrammen keine Aussagen zu gewinnen. Sie sind aber in den meisten Fällen für die Leckbetrachtungen von weniger großem Interesse, zumal sie im Hinblick auf die Querstabilität fast immer ungefährlich sind. Falls es im Einzelfall nötig erscheint, können für ihre Erfassung die bekannten veröffentlichten Standardschottkurven [27], [28] herangezogen werden. Es sei aber darauf hingewiesen, daß sich nahe den Schiffsenden Unterschiede in der Schiffsförmung besonders stark bemerkbar machen und somit bei sämtlichen bekannten Auftragungen gerade bei den Endräumen die Genauigkeit erheblich zu wünschen übrig läßt.

### 39. Einflüsse der Schiffsförmung

Bei der Auswertung der systematisch gewonnenen Ergebnisse zeigte es sich, daß sich Unterschiede in der Verdrängungsverteilung der verschiedenen Schiffsförmungen sehr stark auf Tauchung und Trimm auswirken. Besonders empfindlich

<sup>4)</sup> In den vorangehenden Überlegungen zu den ΔMG-Diagrammen war dies jedoch wegen der größeren Bedeutung der Neigungswinkel  $\alpha$  nicht möglich.

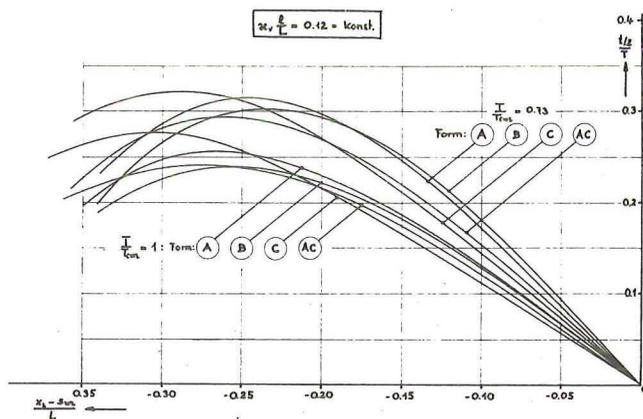


Bild 27 Verdrängung bei Leckfällen im Hinterschiff

reagiert hierbei der Trimm, was aus Bild 27 hervorgeht. Hierin ist  $\frac{t/2}{T} = f\left(\frac{x_L - s_{WL}}{L}\right)$  für verschiedene untersuchte Schiffe und einer Leckraumgröße  $\kappa_v \cdot \ell/L = 0,12$  aufgetragen. Es stellt sich nun für die Aufstellung der T-Diagramme die Aufgabe, die Maßstäbe beider Koordinatenachsen in Abhängigkeit charakteristischer Formgrößen veränderlich zu machen, so daß alle  $\frac{t/2}{T}$  und  $\Delta T/T$ -Kurven für  $\kappa_v \cdot \ell/L = \text{konstant}$  möglichst in einer einzigen Kurve zusammenfallen.

Zur Ermittlung der erforderlichen Änderungen der Abszissen treffen wir mit der Vorstellung wegfallender Auftrieb die für kleine Raumlängen zulässigen Näherungsannahmen:

$$\frac{v}{\ell} \approx f_x \tag{59}$$

und 
$$\frac{m_L}{\ell} \approx f_x (x - s_{WL}) \tag{60}$$

- mit
- $v$  Leckraumvolumen bis Tiefgang  $T$
  - $m_L$  Längenmoment des Leckraums, bezogen auf Hauptspant  $\otimes$
  - $f_x$  Spantfläche an der Stelle  $x$  bis zum Tiefgang  $T$ .

Da bei einem Schiff zwischen Verdrängung  $t$  und trimmendem Moment  $m_L \kappa$  und zwischen Tauchung mittschiffs  $\Delta T$  und wegfallendem Auftrieb  $\kappa \cdot v$  ein etwa linearer Zusammenhang besteht, können wir durch Auftragung von  $f_x$  bzw.  $f_x (x - s_{WL})$  Ersatzdarstellungen für  $\Delta T$  bzw.  $t$  gewinnen, aus denen die erforderliche Abszissenänderung für verschiedene Schiffe unmittelbar und mit ausreichender Genauigkeit hervorgeht. Bei dieser Ersatzdarstellung, Bild 28 und 29, wird vorausgesetzt, daß es gelingt, durch einen Korrekturfaktor die in den eigentlichen T-Diagrammen ebenfalls erscheinenden Ordinatenmaxima der verschiedenen Kurven gleich groß zu machen. Daher werden  $f_x$  und  $f_x (x - s_{WL})$  jeweils durch  $f_{x \max}$  bzw.  $f_x (x - s_{WL})_{\max}$  dividiert. Es ist ohne weiteres einzusehen, daß die in Bild 28 und 29 anschauliche Abszissenverschiebung für  $f_x$  eine andere als für  $f_x (x - s_{WL})$  werden muß. Für die T-Diagramme würden sich daher verschiedene Abszissenkorrekturen für  $\frac{t/2}{T}$  und für  $\Delta T/T$  ergeben, die die Handhabung erheblich erschweren würde. Da aber die Steigung der Funktion  $\Delta T/T = f\left(\frac{x_L - s_{WL}}{L}\right)$  relativ gering ist, wirken sich hier unrichtige Abszissenverschiebungen so wenig aus, daß im Interesse einer einfachen Darstellung die Abszissenkorrektur allein im Hinblick auf den Trimm  $t$  bzw. in der Ersatzdarstellung auf  $f_x (x - s_{WL})$  vorgenommen wurde.

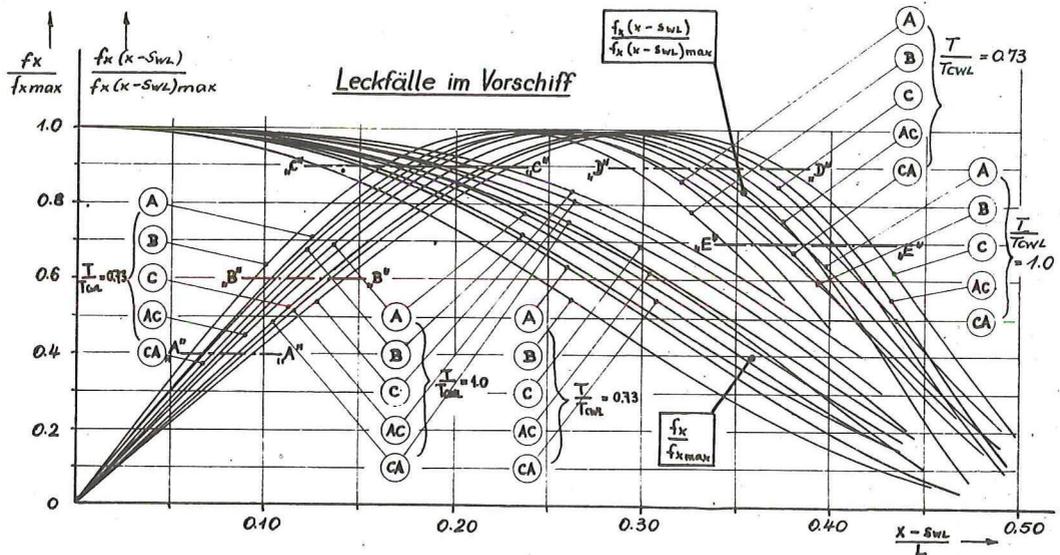
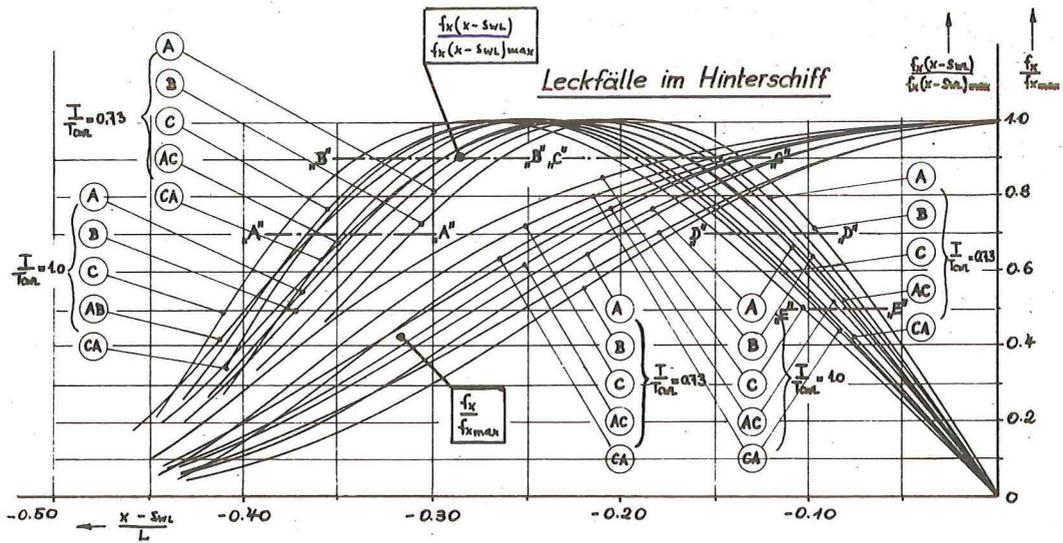


Bild 28 und 29 Ersatzdarstellung zur Abszissenverschiebung in den T-Diagrammen

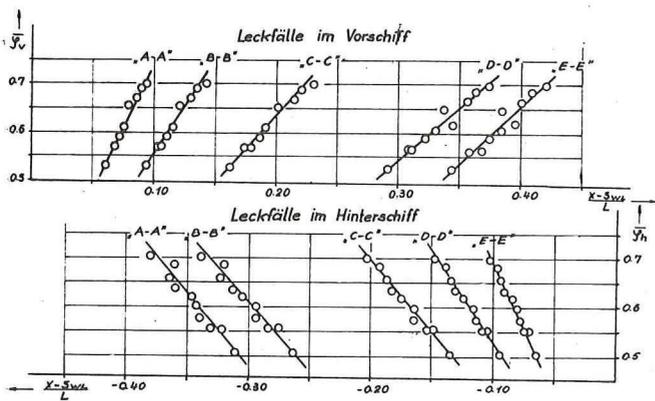


Bild 30 Abszissenverschiebung in den T-Diagrammen durch waagerechte Schnitte in den Bildern 28 und 29

Die Spantflächen  $f_x$  hängen von der Verdrängungsverteilung der Länge nach ab, die ihrerseits durch den Völligkeitsgrad der Spantflächenkurve  $\varphi$  gekennzeichnet werden kann. Da wir den Koordinatenursprung in den Wasserlinienswerpunkt gelegt haben, sind die von diesem Punkte nach vorn und hinten gerechneten Völligkeiten des Vor- und Hinterschiffes  $\bar{\varphi}_v$  und  $\bar{\varphi}_h$  besonders geeignet zur Kennzeichnung der Verdrängungsverteilung. Um das deutlich zu machen, braucht man nur in Bild 28 und 29 einige horizontale Schnitte zu

legen und die Abszissen der entstehenden Schnittpunkte in Abhängigkeit von  $\bar{\varphi}_v$  und  $\bar{\varphi}_h$  aufzutragen (Bild 30). Die Abhängigkeit zeigt sich recht deutlich und kann etwa als linear angenommen werden.

$\bar{\varphi}_{v,h}$  und  $\delta_{v,h}$  lassen sich ähnlich wie in Gleichung (51) und (52) näherungsweise nach folgenden Beziehungen ermitteln:

$$\bar{\varphi}_h \approx \frac{\varphi + \frac{2(s_{SWL} - x_v)}{L}}{1 + \frac{2s_{SWL}}{L}}; \quad \bar{\varphi}_v \approx \frac{\varphi - \frac{2(s_{SWL} - x_v)}{L}}{1 - \frac{2s_{SWL}}{L}} \quad (61)$$

$$\delta_h \approx \frac{\delta + \frac{2(s_{SWL} - x_v)}{L}}{1 + \frac{2s_{SWL}}{L}}; \quad \delta_v \approx \frac{\delta - \frac{2(s_{SWL} - x_v)}{L}}{1 - \frac{2s_{SWL}}{L}} \quad (62)$$

oder, wenn  $\varphi_{v,h}$  und  $\delta_{v,h}$  bereits bekannt sind:

$$\bar{\varphi}_{h,v} = \frac{\varphi_{h,v} \pm \frac{2s_{SWL}}{L}}{1 \pm \frac{2s_{SWL}}{L}} \quad (63)$$

$$\bar{\delta}_{h,v} = \frac{\delta_{h,v} \pm \frac{2 s_{WL}}{L}}{1 \pm \frac{2 s_{WL}}{L}} \quad (64)$$

( $x_v$  Abstand des Verdrängungsschwerpunktes vom Hauptspant.)

Es bleibt die schon angedeutete Aufgabe, die  $\frac{t/2}{T}$  bzw.

$\Delta T/T$ -Ordinaten nach Maßgabe eines geeigneten Formwertes so zu korrigieren, daß die Kurvenmaxima gleich hoch werden. Gelingt dies, so müßten zusammen mit der Abszissenkorrektur die entsprechenden Kurven verschiedener Schiffsformen wie gefordert in eine einzige Kurve zusammenfallen.

Auf der Suche nach einem geeigneten Formwert betrachten wir in groben Zügen die bei Tauchung und Trimm zu erwartenden Abhängigkeiten.

Für den Trimm gilt

$$M_{LK} = \kappa_v \cdot m_L$$

Das stabilisierende Moment der Keilvolumen  $M_{LK}$  ist etwa

$$M_{LK} \sim \frac{J_L \cdot t}{L} = \frac{J_L}{L} \cdot \frac{t}{T} \cdot T$$

mit  $J_L \sim L^3 \cdot B \cdot f(\alpha)$

$$\text{also } M_{LK} \sim L^2 B T \cdot \frac{t}{T} \cdot f(\alpha) \quad (65)$$

Das trimmende Moment ist  $\kappa_v m_L \sim \kappa_v \ell \cdot f_x(x_L - s_{WL})$

mit  $f_x \sim B \cdot T \cdot f\left(\frac{x_L - s_{WL}}{L}\right) \cdot f(\bar{\delta}_{v,h})$

$$\text{also } \kappa_v \cdot m_L \sim L^2 \cdot B \cdot T \cdot \kappa_v \cdot \frac{\ell}{L} \cdot f\left(\frac{x_L - s_{WL}}{L}\right) \cdot f(\bar{\delta}_{v,h}) \quad (66)$$

Gleichung (65) und (66) gleichgesetzt ergibt:

$$\frac{t}{T} \sim \kappa_v \cdot \frac{\ell}{L} \cdot f\left(\frac{x_L - s_{WL}}{L}\right) \cdot \frac{f(\bar{\delta}_{v,h})}{f(\alpha)} \quad (67)$$

Für die Tauchung gilt  $V_1 - V_0 = \Delta V = \kappa_v v_0$

Das eintauchende Volumen  $\Delta V$  ist etwa  $\sim F_{WL} \cdot \Delta T = F_{WL} \cdot \Delta T/T \cdot T$  mit  $F_{WL} \sim L \cdot B \cdot f(\alpha)$

$$\text{also } \Delta V \sim L B T \cdot \frac{\Delta T}{T} f(\alpha) \quad (68)$$

Der wegfallende Auftrieb  $\kappa_v \cdot v_0$  ist etwa  $\sim f_x \cdot \kappa_v \cdot \ell =$

$$= f_x \cdot \kappa_v \cdot \frac{\ell}{L}$$

$$\kappa_v \cdot v_0 \sim L \cdot B \cdot T \cdot \kappa_v \cdot \frac{\ell}{L} \cdot f\left(\frac{x_L - s_{WL}}{L}\right) \cdot f(\bar{\delta}_{v,h}) \quad (69)$$

Gleichung (68) und (69) gleichgesetzt ergibt:

$$\frac{\Delta T}{T} \sim \kappa_v \cdot \frac{\ell}{L} \cdot f\left(\frac{x_L - s_{WL}}{L}\right) \cdot \frac{f(\bar{\delta}_{v,h})}{f(\alpha)} \quad (70)$$

Es wird darauf verzichtet, auf die in Wirklichkeit sehr viel komplizierteren Zusammenhänge genauer einzugehen. Wir gehen im Gegenteil noch einen Schritt weiter in der Vergrößerung und setzen:

$$\frac{f(\bar{\delta}_{v,h})}{f(\alpha)} \approx f\left(\frac{\bar{\delta}_{v,h}}{\alpha}\right), \quad (71)$$

ohne die einzelnen funktionalen Abhängigkeiten näher zu analysieren. Für die untersuchten Schiffsformen zeigt es sich, daß  $\bar{\delta}_{v,h}/\alpha$  und  $\bar{\delta}_{h,h}/\alpha$  Kennwerte sind, durch die Tauchung und Trimm bei ähnlichen Verhältnissen von Schiff zu Schiff recht gut charakterisiert werden. Sie erscheinen deshalb als Parameter bei der erwähnten Ordinatenkorrektur.

#### 40. Einfluß abweichender Ausgangstiefgänge ( $T/T_{CWL} < 1$ )

Der soeben abgeleitete Formwert  $\bar{\delta}_{v,h}/\alpha$  kennzeichnet Tauchung und Trimm verschiedener Schiffe nur bei ähnlichen Verhältnissen, d. h. beispielsweise für die CWL als Ausgangswasserlinie. Dies wäre ausreichend, wenn lediglich eine Aufgabenstellung nach Art der Bestimmung der Kurven der flutbaren Längen in Betracht zu ziehen wäre. In unserem Fall jedoch, wo es sich um die Bestimmung der Endschwimmlage konkreter Leckfälle handelt, ist eine Berücksichtigung kleinerer Ausgangstiefgänge durchaus angebracht und wünschenswert, zumal es häufig gerade auf die Bestimmung des Restfreibordes für die stabilitätskritischen Fälle mit großem  $B/T$  ankommt.

Bei Ausgangstiefgängen  $T < T_{CWL}$  ist sowohl im Trimm  $\frac{t/2}{T}$  als auch in der Tauchung  $\Delta T/T$  gegenüber  $T_{CWL}$  als

Ausgangslage ein Anstieg festzustellen, obgleich Abszissen- und Ordinatenkorrektur nach den für  $T$  geltenden Kenngrößen durchgeführt werden. Dies erklärt sich leicht dadurch, daß die im Überwasserbereich stark ausfallenden Spanten und besonders das ausladende Heck des Schiffes überhaupt nicht oder zumindest weniger stark eintauchen. Reserve- und Reserveverdrängung sind entsprechend geringer, was relativ größere Änderungen der Schwimmlage zur Folge hat. Es sei nochmals betont, daß dies nicht für einen durch affine Verzerrung verringerten Ausgangstiefgang gilt. Es wurde im Abschnitt 37 bereits darauf hingewiesen, daß keine  $B/T$ -Abhängigkeit für  $\Delta T/T$  und  $\frac{t/2}{T}$  besteht.

In den  $T$ -Diagrammen ist ein Teilnomogramm eingearbeitet, welches in Abhängigkeit von  $T/T_{CWL}$  diesen Einfluß näherungsweise zu bestimmen erlaubt. Dieses Teilnomogramm ist auf rein empirischem Wege aus den Rechenergebnissen aufgestellt worden.

#### 41 Einfluß der Höhe eines wasserdichten Decks $h/T$ (Doppelboden)

Bleibt der Raum unterhalb eines wasserdichten Decks unbeschädigt, so müssen sich Tauchung und Trimm kleiner ergeben als bei völlig überflutetem Raum. Vom Standpunkt der Bestimmung der flutbaren Längen wäre das wiederum kaum von Belang; doch sind hochliegende Tankdecken ja für die Querstabilität gefährlich, insbesondere, wenn der darunterliegende Raum teilweise doch überflutet wird. In diesem Falle können wegen der Unsymmetrie der Flutung erhebliche kippende Momente entstehen, die in Verbindung mit dem oft beträchtlichen  $\overline{MG}$ -Verlust starke Querneigungen des beschädigten Schiffes hervorrufen können. Daher ist die Abschätzung von Tauchung und Trimm und damit des verbleibenden Restfreibords gerade bei größeren Doppelbodenhöhen wichtig. Insbesondere wird der besonders stabilitätsungünstige Fall interessieren, wenn der Tankbereich zur Hälfte — bis Mitte Schiff — geflutet wird, während die andere Hälfte unbeschädigt und leer bleibt.

Wenn man die durch Doppelbodeneinfluß verringerten Rechenergebnisse für Tauchung und Trimm durch die Ergebnisse für den Fall  $h/T = 0$  dividiert, erhält man den Doppelbodeneinfluß in Form einer Verhältniszahl  $c'_h < 1$ . Es zeigt sich, daß  $c'_h$  sowohl für Tauchung  $\Delta T/T$  als auch für den Trimm  $\frac{t/2}{T}$  die gleichen Werte annimmt. Außerdem kann

man erwarten, daß die erwähnte Abhängigkeit von  $\frac{x_L - s_{WL}}{L}$

und  $\bar{\varphi}_{v,h}$  etwa die gleiche ist, wie wir sie für die Abszisse der  $T$ -Diagramme in Abschnitt 39 ermittelt haben. So wurde  $c'_h$  für verschiedene Doppelbodenhöhen  $h/T$  über der  $\bar{\varphi}_{v,h}$ -abhän-

gigen Abszisse  $\frac{x_L - s_{WL}}{L}$  jeweils im oberen Teil der T-Diagramme aufgetragen, und es zeigte sich, daß damit der Doppelbodeneinfluß gut erfaßt werden kann. Man muß  $\Delta T/T$  und  $\frac{t/2}{T}$  lediglich mit  $c'_h$  multiplizieren. Diese Multiplikation erfolgt zweckmäßig ebenfalls graphisch in einem Nomogramm im rechten Teil des T-Diagramms.

Für eine einseitige Doppelbodenflutung nur bis Mitte Schiff ist der Wert  $(1 - c'_h)$  zu halbieren. Zur Vereinfachung ist nun  $c_h = (1 - c'_h)$  gesetzt, und es erscheint in dem Diagramm nur  $c_h$ . Ihn kann man unmittelbar je nach der Eindringtiefe der Doppelbodenflutung mit  $1/2$  oder z. B. bei  $1/5$  B Eindringtiefe mit  $\approx 1/5$  multiplizieren.

42 Einfluß eines parallelen Mittelschiffes

Es wurde schon erwähnt, daß Tauchung und Trimm infolge Flutung sehr empfindlich auf Unterschiede in der Schiffsförm reagieren. Die Verdrängungsverteilung der Länge nach, bezogen auf den Wasserlinienschwerpunkt, wurde durch  $\bar{\varphi}_{v,h}$  (Abszisse) bzw.  $\bar{\delta}_{v,h}/\alpha$  (Ordinate) sehr roh gekennzeichnet, was nur vertretbar ist, solange die Schiffe für eine bestimmte Völligkeit des Vor- und Hinterschiffes eine gleichartige Verdrängungsverteilung der Länge nach aufweisen. Das ist etwa der Fall, wenn die Länge des parallelen Mittelschiffsbereichs übereinstimmt. Bei den hier untersuchten „Normalformen“ war diese Länge Null. Viele kombinierte Fracht-Fahrgast-schiffe jedoch und die meisten Frachtschiffe, für die Untersuchungen über das Leckverhalten durchaus erwünscht, wenn auch noch nicht vorgeschrieben sind, haben in der Regel ein mehr oder weniger langes paralleles Mittelstück und müssen dementsprechend an den Enden schlanker sein als Schiffe gleicher Völligkeit ohne paralleles Mittelstück.

Leckrechnungen mit Schiffen, die ein längeres paralleles Mittelschiff aufweisen, zeigten Abweichungen von den aus den T-Diagrammen gewonnenen Werten für Tauchung und Trimm. Es wurde deshalb begonnen, für Schiffe unterschiedlicher Verdrängungsverteilung der Länge nach ebenfalls systematische Leckrechnungen durchzuführen. Kennzeichnender Parameter hierbei kann die Größe  $L_m/L$  sein ( $L_m$ : Länge des parallelen

Mittelschiffes); d. h. für verschiedene  $L_m/L$ -Werte werden weitere T-Diagramme der beschriebenen Art aufgestellt werden. Über sie wird zu gegebener Zeit berichtet werden.

43. Rechengenauigkeit bei Anwendung der T-Diagramme

Wie bei der Beurteilung der  $\Delta MG$ -Diagramme (Abschnitt 34) sind Aussagen über die erzielbare Genauigkeit bei Anwendung der T-Diagramme auf analytischem Wege nicht möglich. Auch hier werden statistische Überlegungen angestellt, für die das in Abschnitt 34 Gesagte gilt. Auch hier sind die absoluten Fehler in Abhängigkeit ihrer Häufigkeit aufgetragen (Bild 31).

Es ergeben sich folgende mittlere Fehler  $f_m = \sqrt{\frac{\sum f^2}{n}}$

	mittlerer Fehler der Größe	
	$\frac{\Delta T}{T}$	$\frac{t/2}{T}$
Leckfälle im Hinterschiff	$\pm 1,0 \cdot 10^{-3}$	$\pm 0,9 \cdot 10^{-3}$
Leckfälle im Vorschiff	$\pm 0,6 \cdot 10^{-3}$	$\pm 1,1 \cdot 10^{-3}$

Um die Abweichungen in den dimensionslosen Größen  $\Delta T/T$  und  $\frac{t/2}{T}$  anschaulich zu machen, sei ein Schiff mit einem Tiefgang von  $T = 7$  m betrachtet. Dann werden die mittleren absoluten Fehler:

	mittlerer Fehler der Größe	
	$\Delta T$	$t/2$
Leckfälle im Hinterschiff	$\pm 6,7$ cm	$\pm 6,3$ cm
Leckfälle im Vorschiff	$\pm 4,2$ cm	$\pm 7,7$ cm

44. Handhabung der T-Diagramme

Die zur Benutzung dieser Diagramme benötigten dimensionslosen Kennwerte sind in Tafel III zusammengestellt.

Tafel III

Dimensionslose Kennwerte der T-Diagramme

a) Kennzeichnung der Schiffsförm und der Ausgangsschwimmlage:

$$\bar{\varphi}_h; \bar{\varphi}_v; \frac{\bar{\delta}_h}{\alpha}; \frac{\bar{\delta}_v}{\alpha}; \frac{T}{T_{\text{GWL}}}$$

b) Kennzeichnung des Leckbereiches:

$$\kappa_v \cdot \frac{\ell}{L}; \frac{x_L - s_{WL}}{L}; \frac{h}{T}$$

c) Ergebnisse:

$$\frac{\Delta T}{T}; \frac{t/2}{T}$$

$\Delta T$  : Eintauchung auf Hauptspant

$t/2$  : Halber Trimm, an den Loten gemessen

$\Delta T + t/2$  : Eintauchung, an den Schiffsenden

Folgende Aufgaben können mit den T-Diagrammen auf einfache Weise und mit guter Näherung bearbeitet werden:

1. Ermittlung der Endschwimmlage, gekennzeichnet durch den Tiefgang am eintauchenden und austauchenden Ende für einen bestimmten Leckraum, ausgehend von einer bestimmten Ausgangsschwimmlage. Dies können wir als die Normalaufgabe betrachten.

Der Lösungsweg dieser Aufgabe sei in Stichworten angegeben:

a) Mit  $\frac{x_L - s_{WL}}{L}$  und  $\bar{\varphi}_{v,h}$  liegt im linken unteren Teil des

Diagrammes der Abszissenwert fest. Es empfiehlt sich, ihn bis zum oberen Rand des Diagrammes senkrecht durchzuziehen.

b) Abhängig von  $\kappa_v \cdot \frac{\ell}{L}$  oberhalb und unterhalb der mitt-

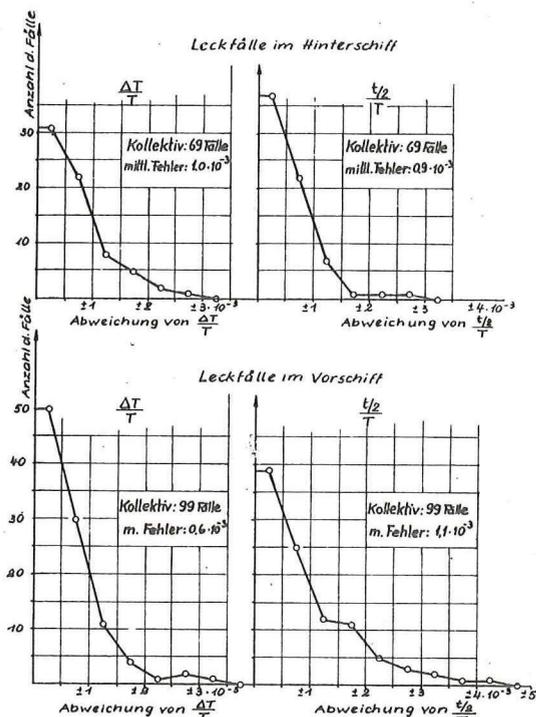


Bild 31 Statistische Fehlerermittlung bei Anwendung der T-Diagramme

5) Ermittlung nach Gleichung (61) bis (64).

leren Trennungslinie geht man waagrecht in die Geradenbüschel im rechten Teil des Diagramms hinüber bis zur strichpunktierten Leitlinie „L“.

- c) Abhängig von  $h/T$  ist mit dem gleichen Abszissenwert ganz oben im Diagramm ein  $c_h$ -Wert abzulesen, der bei teilweiser Doppelbodenflutung mit dem Faktor

$$\frac{\text{Eindringtiefe des Wassers}}{\text{Schiffsbreite}}$$

zu multiplizieren ist.

- d) In den beiden Geradenbüscheln rechts über und unter der Trennungslinie sind die  $T/T_{CWL}$ - und  $c_h$ -Korrekturen vorzunehmen, wie es der eingezeichnete Linienzug eines Beispiels angibt. Die Beispiele sind in den Abschnitten 48 und 49 beschrieben.

- e) Die Geradenbüschel werden waagrecht verlassen, und es können mit  $\bar{\delta}_{v,h}/\alpha$  am rechten Rand über der Trennungslinie der Wert  $\frac{t/2}{T}$ , unter der Trennungslinie der Wert  $\Delta T/T$  abgelesen werden.

- f) Es wird bei Flutung im Vorschiff (Diagramm IX)

$$\frac{T_v}{T} = 1 + \frac{\Delta T}{T} + \frac{t/2}{T} \quad \text{Endtiefgang vorn}$$

$$\frac{T_h}{T} = 1 + \frac{\Delta T}{T} - \frac{t/2}{T} \quad \text{Endtiefgang hinten}$$

bei Flutung im Hinterschiff (Diagramm X)

$$\frac{T_h}{T} = 1 + \frac{\Delta T}{T} + \frac{t/2}{T} \quad \text{Endtiefgang hinten}$$

$$\frac{T_v}{T} = 1 + \frac{\Delta T}{T} - \frac{t/2}{T} \quad \text{Endtiefgang vorn}$$

2. Die zweite Aufgabe, die man mit den T-Diagrammen lösen kann, ist die Bestimmung der größten flutbaren Raumlängen (Kurve der flutbaren Längen). Diese Umkehrung der Normalaufgabe läßt sich ohne weiteres durchführen, nur lassen sich, wie bereits angedeutet, die Endräume nicht immer bestimmen.

Auch hierfür sei der Lösungsweg in Stichworten angegeben:

- a) Festlegung einiger Wasserlinien, die den „Sicherheitsrand“ gerade berühren.
- b) Bestimmung von Tauchung  $\Delta T/T$  und Trimm  $\frac{t/2}{T}$  dieser

Wasserlinien gegenüber dem Ausgangstiefgang T.

- c) Eingehen in das entsprechende Diagramm von rechts. Einzeichnen waagerechter Linien in Höhe der Werte  $\frac{t/2}{T}$  oberhalb und  $\Delta T/T$  unterhalb der Trennungslinie, nachdem eine eventuelle Korrektur für  $T/T_{CWL}$  in den Geradenbüscheln vorgenommen ist.

- d) Aufsuchen desjenigen  $\kappa_v \cdot \frac{\ell}{L}$ , dessen Schnittpunkte mit

der oberen und unteren Waagerechten gerade übereinanderliegen. Dieser Teil der Aufgabe kommt auf ein Probieren heraus. Es zeigt sich aber, daß man bei etwas Übung und „Augenmaß“ den Abszissenwert sehr sicher und schnell finden kann.

- e) Damit ist mit  $\bar{\varphi}_{v,h}$  auch  $\frac{x_L - s_{WL}}{L}$  festgelegt und ein

Punkt der Kurve der flutbaren Längen bestimmt. In Abschnitt 50 ist ein Beispiel durchgerechnet und mit den Bildern 42, 43 und 44 anschaulich gemacht.

## F. Behandlung von unsymmetrischen Flutungen im Entwurfsstadium

### 45. Angenäherte Berechnung

Die in dieser Arbeit angegebenen Entwurfsdiagramme für Leckrechnungen sind in erster Linie zur Abschätzung des Verhaltens eines symmetrisch überfluteten Schiffes geeignet.

Zweifellos wird man sich aber beim Schiffsentwurf schon frühzeitig Gedanken über unvermeidliche Möglichkeiten unsymmetrischer Flutungen machen müssen. In erster Linie wird es sich hierbei um die Anordnung der Tankgruppen im Schiff handeln. Bekanntlich ist es aus verschiedenen Gründen notwendig, Tanks in sich wasserdicht zu unterteilen. Die Auswirkungen der dadurch möglichen unsymmetrischen Flutungen sollten von vornherein berücksichtigt werden. Im folgenden wird gezeigt, wie man hierbei vorgehen kann.

Für unsymmetrische Flutungen gilt Gleichung (11) (Abschnitt 2)

$$\overline{MG} \geq \overline{MG}_q - \Delta \overline{MG}$$

Für  $\overline{MG}_q$  kann man nach Gleichung (10) schreiben:

$$\overline{MG}_q = \frac{\kappa_v \cdot V_u \cdot d_u}{V_o \cdot \text{tg } \varphi_G} - \zeta \frac{\overline{MF}_{1 \text{ rest}}}{2} \cdot \text{tg}^2 \varphi_G$$

In einem frühen Entwurfsstadium macht die Bestimmung der Größen  $\zeta$  und  $\overline{MF}_{1 \text{ rest}}$  Schwierigkeiten. Weil aber  $\text{tg}^2 \varphi_G$  meist sehr klein ist, kann man  $\zeta$  schätzen und  $\overline{MF}_{1 \text{ rest}}$  näherungsweise bestimmen.

Ein Prinzip der hier angegebenen Entwurfsdiagramme ist es, daß lediglich von Größen Gebrauch gemacht wird, die sich auf die Ausgangsschwimmlage des Schiffes beziehen. Daliert wurde ein Diagramm aufgestellt (Diagramm XI), aus dem man

mit den bekannten Kennwerten  $\frac{x_L - s_{WL}}{L}$ ,  $\kappa_v \cdot \frac{\ell}{L}$  und  $\alpha$  einen

Faktor  $\zeta_L$  abgreifen kann, für den gilt:

$$\zeta_L = \frac{1}{2} \zeta \frac{\overline{MF}_{1 \text{ rest}}}{\overline{MF}_o}$$

also wird

$$\zeta \frac{\overline{MF}_{1 \text{ rest}}}{2} = \zeta_L \overline{MF}_o$$

$\overline{MF}_o$ , der Ausgangslage ist aus dem Kurvenblatt abzulesen.

Bei der Aufstellung dieses  $\zeta_L$ -Diagramms wurde allerdings für  $\zeta$  der feste Wert  $\zeta = 0,8$  eingesetzt, was für ein Näherungsverfahren als vertretbar angesehen wurde. Näheres hierüber ist im folgenden Abschnitt 46 ausgeführt.

Die Größe des krängenden Momentes  $\kappa_v \cdot V_u \cdot d_u$  wird sich meist leicht bestimmen lassen. Oft wird ja überhaupt vom gewünschten Tankinhalt ausgegangen. Der Hebel  $d_u$  läßt sich angeben oder schätzen. Erleichtert wird die Bestimmung des Momentes durch die in vielen Fällen geraden Begrenzungsflächen von Tanks.

Ragt der unsymmetrische unbeschädigte Raumteil über die Wasserlinie heraus, z. B. ein Seitentank entsprechend Bild 32,

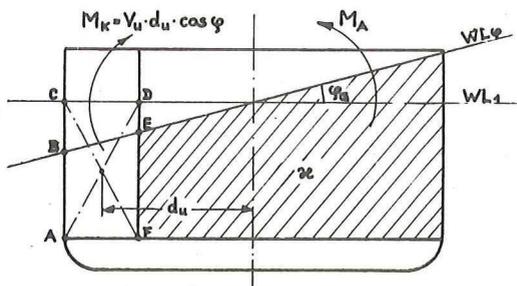


Bild 32 Unsymmetrische Überflutung mit austauchendem unverletztem Auftriebsteil

so richtet sich die Bearbeitung des Leckfalles danach, wie das aufrichtende Moment  $M_u$  der ein- und austauchenden Keilvolumen berechnet ist. Ist der durch die Fläche B-C-D-E in Bild 32 gekennzeichnete unverletzte Rauminhalt als Bestandteil der Keilvolumen in das aufrichtende Moment einbezogen, so muß das krängende Moment mit dem ganzen Volumen A-C-D-F unabhängig vom jeweiligen Neigungswinkel gerechnet werden. Ist dies nicht der Fall, so ist der unverletzte Volumenanteil um das durch die Fläche B-C-D-E gekennzeichnete Stück zu verringern.

Das aufrichtende Moment der Keile ist etwa proportional dem Flächenträgheitsmoment  $J_B$  der jeweiligen Schwimmwasserfläche. Hiervon wird häufig, z. B. in den Gleichungen (6), (9) und (10), Gebrauch gemacht. Es ist also bei den Berechnungen darauf zu achten, ob das Trägheitsmoment der durch die Strecke C-D gekennzeichneten Fläche dem  $J_{B1 \text{ rest}}$  des Restschiffkörpers hinzugefügt wird, wobei streng genommen auf eine aus Mitte Schiff seitlich verschobene Schwerpunktsachse der Wasserlinienfläche zu beziehen ist, oder ob die Fläche der Schwimmwasserlinie auch in solchen Fällen als symmetrisch zur Symmetrieachse betrachtet wird. Im ersten Falle, der vom Standpunkt der Vorstellung wegfallender Auftrieb der konsequenteren ist, ist das krängende Moment unabhängig vom Neigungswinkel  $M_K = \text{konstant}$ . Im anderen Falle ist die erwähnte Verringerung des krängenden Momentes vorzunehmen. Auf diese notwendige Unterscheidung ist im Schrifttum bisher nicht deutlich genug hingewiesen worden. So könnte der falsche Eindruck entstehen, daß bei austauchendem unbeschädigten Auftrieb in jedem Falle eine Verringerung des krängenden Einflusses bei Neigungen in Rechnung zu stellen sei. Das kann zu Fehlern führen, die unglücklicherweise nach der unsicheren Seite gerichtet sind.

Wie würde man nun im frühen Entwurfsstadium bei der Behandlung unsymmetrischer Überflutungen etwa vorgehen? Gesucht sind in jedem Falle Eintauchung einschließlich Vertrimmung,  $\overline{MG}$ -Verlust sowie  $\overline{MG}_q$ . Es soll bei den krängenden Einflüssen unterschieden werden zwischen vollständig getauchten (Bild 33) und über die Wasserlinie herausragenden (Bild 32) unsymmetrischen Auftriebsteilen. Diese Unterscheidung spielt bereits bei der Ermittlung der Endschwimmlage  $WL_1$  mit den T-Diagrammen und des Stabilitätsverlustes mit den  $\overline{\Delta MG}$ -Diagrammen eine Rolle. Im Falle Bild 33 kann die einseitige Überflutung durch eine Verringerung des Einflusses der Doppelbodenhöhe in den Entwurfsdiagrammen erfaßt werden. Hinsichtlich der T-Diagramme ist auf diese Möglichkeit bereits in Abschnitt 41 hingewiesen. Es kann hierbei der Faktor  $c_{11}$ , der den Einfluß des Doppelbodens angibt, bei halber Flutung des Doppelbodenbereiches halbiert werden.

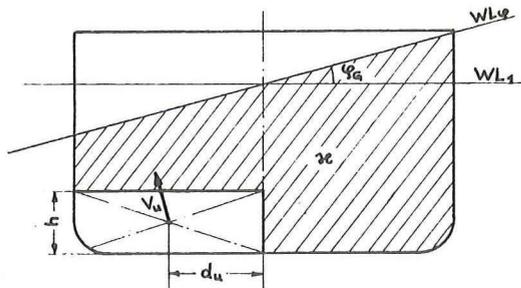


Bild 33 Unsymmetrische Überflutung mit vollständig getauchtem unverletztem Auftriebsteil

Bei der Anwendung der  $\overline{\Delta MG}$ -Diagramme ist im Falle Bild 33 jeweils im zweiten Kurvenbüschel von oben der Einfluß des Doppelbodens für die vorliegende Höhe h zu halbieren.

Im anderen Falle (Bild 32) ist der Einfluß des einseitig unbeschädigten Auftriebsteiles durch eine Korrektur der Volumenflutbarkeit zu erfassen. Man bildet mit dem nicht durchfluteten und dem durchfluteten Teil des Raumes eine mittlere Flutbarkeit, mit der man in die Diagramme eingehen kann. Meist wird man diese mittlere Flutbarkeit aus den Querschnitten des Leckbereiches schätzen können. In Tafel VIII darf man aber für die Flächenflutbarkeit  $\alpha_F$  die so erhaltene mittlere Flutbarkeit nicht einsetzen, da der außen liegende Flächenteil auf das Breitenträgheitsmoment  $i_B$  natürlich einen ungleich stärkeren Einfluß hat, als eine mittlere Flutbarkeit angeben würde. Setzt man nun die Flächenflutbarkeit  $\alpha_F$  so fest, wie sie wäre, wenn symmetrische Überflutung herrschen würde, so ist, wie weiter oben angeführt wurde, das krängende Moment entweder entsprechend dem Anteil der Fläche B-C-D-E zu verringern, oder es ist eine Korrektur des Breitenträgheitsmomentes um den Anteil der herausragenden Fläche  $f_u \approx \ell \cdot b$  vorzunehmen, für die gilt:

$$\Delta J_B \approx \frac{b^3 \ell}{12} + b \ell \cdot d_F^2 = b \cdot \ell \left( \frac{b^2}{12} + d_F^2 \right)$$

Im letzteren Falle gilt dann mit Gleichung (10) und (11) für  $\overline{MG}_0$ :

$$\overline{MG}_0 \geq -\overline{\Delta MG} - \frac{\alpha_F b \cdot \ell \left( \frac{b^2}{12} + d_F^2 \right)}{V_0} + \frac{\alpha_v \cdot V_u \cdot d_u}{V_0 \cdot \text{tg } \varphi_G} - \zeta_L \overline{MF}_0 \cdot \text{tg}^2 \varphi_G \quad (72)$$

Hierin ist  $\overline{\Delta MG}$  aus den Entwurfsdiagrammen bestimmt, wobei für die Flächenflutbarkeit auf die Fläche  $f_u = b \cdot \ell$  keine Rücksicht genommen ist.  $V_u$  ist der unbeschädigte Raum bis zur eingetauchten und vertrimmten Endlage  $WL_1$  ohne Krängung. Dazu ist  $WL_1$  aus den T-Diagrammen zu bestimmen.  $d_u$  und  $d_F$  sind die Schwerpunktabstände in y-Richtung von M. S. Für  $V_u$  und die Fläche  $f_u = b \cdot \ell$ ;  $\zeta_L$  ist aus dem besonderen Diagramm XI zu entnehmen.  $\overline{MF}_0$  und  $V_0$  der Ausgangslage müssen aus dem Kurvenblatt bekannt sein.  $\varphi_G$  ergibt sich aus dem Restfreibord in der Lage  $WL_1$  bzw. aus den geltenden Vorschriften. Ragt kein unbeschädigter Auftrieb aus dem Wasser (Bild 33), fällt das 2. Glied von Gleichung (72) wegen  $b = 0$  weg. Die Gleichung gilt auch für diesen Fall. Ein Beispiel ist in Abschnitt 49 angegeben.

Die Auswertung von Gleichung (72) erfordert nun doch etwas Rechenarbeit, die aber in Kauf genommen werden kann, da alle vorkommenden Größen bekannt bzw. leicht zu bestimmen sind. Weitere Vereinfachungen erscheinen nicht vertretbar, da ein gewisses Maß an Genauigkeit und eine Anpassung an die große Mannigfaltigkeit der Möglichkeiten der inneren Gestaltung unumgänglich ist. Gleichung (72) bietet die Möglichkeit, bei genauerer Bestimmung von  $\overline{\Delta MG}$ ,  $V_u$ ,  $d_u$  und  $\zeta_L$ ,

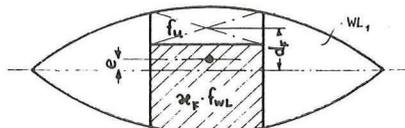


Bild 34

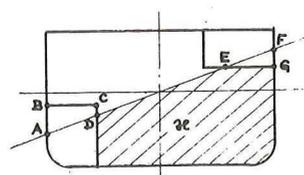


Bild 35

auch genauere Ergebnisse zu erhalten. Dazu allerdings sind im Einzelfall noch mehr Einflüsse zu beachten, die hier nur kurz aufgezählt seien:

1. Durchstößt der unsymmetrische Auftrieb die Wasserlinie  $WL_1$ , so verschiebt sich die Schwerachse der Restwasserfläche um das Stück 
$$e = \frac{\kappa_F \cdot f_u \cdot d_F}{F_{WL} - \kappa_F f_{WL}} \quad (\text{Bild 34})$$
 Auf diese neue Achse ist das Trägheitsmoment  $J_B$  zu beziehen.
2. Bereiche anderer Flutbarkeit, die erst bei Neigungen eintauchen, erfordern Korrekturen im krängenden Moment, die je nach dem Vorzeichen der Flutbarkeitsdifferenzen positiv oder negativ sein können (Bild 35).
3. Über die  $WL_1$  hinaus gefüllte Seitentanks, die bei Beschädigung einseitig auslaufen, ergeben ebenfalls Krängungsmomente. Das Schiff wird dadurch außerdem entlastet und taucht geringfügig aus.
4. Taucht ein unbeschädigter Auftriebsteil erst infolge Krängung weiter aus, so ist damit ein wenn auch geringes Nachtauchen und Nachtrimmen verbunden, das rechnerisch erfaßt werden kann. Dieser Einfluß kann bei Leckrechnungen vernachlässigt werden, wenn die ein- oder austauchenden Auftriebsteile, wie meist der Fall, klein gegenüber den übrigen Abmessungen des Schiffes sind.

Auf alle diese Einflüsse ist im Schrifttum ausführlich hingewiesen, und es sind Anleitungen zu ihrer Beachtung gegeben (vgl. [8], [11]). Die genauen Leckrechnungen mit Hilfe der beschriebenen Programme auf dem Elektronenrechner IBM 650 tragen den meisten von ihnen genügend Rechnung (vgl. Abschn. 19).

46. Änderung des Beiwertes  $\zeta$  infolge Überflutung des Schiffes

Es wird im Schrifttum [11], in der Rechenpraxis und auch in dieser Arbeit vorgeschlagen, den  $\zeta$ -Wert des unbeschädigten Schiffes auch für den Leckfall zu übernehmen (vgl. z. B. Gleichung (10)), da man für vertrimmte und teilüberflutete Schiffskörper eine Bestimmung von  $\zeta$  bisher nicht durchführen konnte, andererseits der Wunsch besteht, sich  $\zeta$  als einfaches Hilfsmittel zur Vergrößerung der Genauigkeit bei der Berücksichtigung von Neigungen zu bedienen. Für unbeschädigte Schiffe in horizontaler Schwimmelage liegen einige Angaben über den Verlauf von  $\zeta$  abhängig von der Verdrängung  $V$  und vom Neigungswinkel  $\varphi$  vor [11, 14, 28], so daß es möglich ist, den  $\zeta$ -Wert ungefähr richtig zu schätzen [16]. Die genaue Bestimmung ist für den Praktiker meist zu mühselig. Die Frage, ob dieser geschätzte oder für das unbeschädigte Schiff berechnete  $\zeta$ -Wert seine Größenordnung auch bei Überflutung des Schiffes beibehält, ist bisher unbeantwortet geblieben.

Dank einem bereits in Abschnitt 19 erwähnten Programm für den Elektronenrechner IBM 650 ist es nun möglich, diese Frage wenigstens teilweise zu beantworten. Dieses Programm berechnet für ein beliebig überflutetes Schiff in beliebiger vertrimmter Schwimmelage die bei Krängungen wirkenden Hebel des aufrichtenden Momentes des Restschiffkörpers, bezogen auf den Kielpunkt  $K$  — also die Pantokarenenwerte  $w_{rest}$ . Mit diesem Programm erzielt man entsprechend der großen Zahl der Spantquerschnitte (meist mehr als 30) und der sonstigen Möglichkeiten elektronischen Rechnens eine ungewöhnlich hohe Genauigkeit, so daß es gerechtfertigt erscheint, den Verlauf von  $\zeta$  für einen Neigungsbereich  $\varphi \leq 20^\circ$  aus den von der Maschine berechneten Pantokarenenwerten zu bestimmen.

Es gilt allgemein (vgl. [14], Seite 9):

$$z_{h1} = \frac{w}{\sin \varphi} - \overline{KM}$$

und mit

$$\zeta = \frac{z_{h1}}{\frac{MF}{2} \operatorname{tg}^2 \varphi} = \frac{\frac{w}{\sin \varphi} - \overline{KM}}{\frac{MF}{2} \operatorname{tg}^2 \varphi} \quad (73)$$

Die hierin auftretenden Größen werden alle von der Maschine sehr genau bestimmt, und zwar für jeden Überflutungszustand und jede beliebige Schwimmelage, natürlich auch für das unverletzte Schiff.

Für sehr kleine Winkel  $\varphi$  liefert selbst der Elektronenrechner keine zuverlässigen  $\zeta$ -Werte mehr. Da aber leider noch kein Programm zur Ermittlung des  $\zeta_0$ -Wertes für  $\varphi = 0$  vorliegt — dies wird baldmöglichst nachgeholt werden —, mag eine grobe Fehlerbetrachtung angeben, bis zu welchem Winkel  $\varphi$  es noch einen Sinn hat, nach Gleichung (73) aus den Pantokarenenwerten die Größe  $\zeta$  zu bestimmen.

Die in Gleichung (73) vorkommenden Strecken  $w$ ,  $\overline{KM}$  und  $\overline{MF}$  seien mit prozentualen Fehlern  $\pm p \cdot w$ ,  $\pm p \cdot \overline{KM}$ ,  $\pm p \cdot \overline{MF}$  behaftet; dann wird der größte auftretende Fehler  $F_{\zeta \max}$  des gesuchten Wertes  $\zeta$  offenbar dann auftreten, wenn

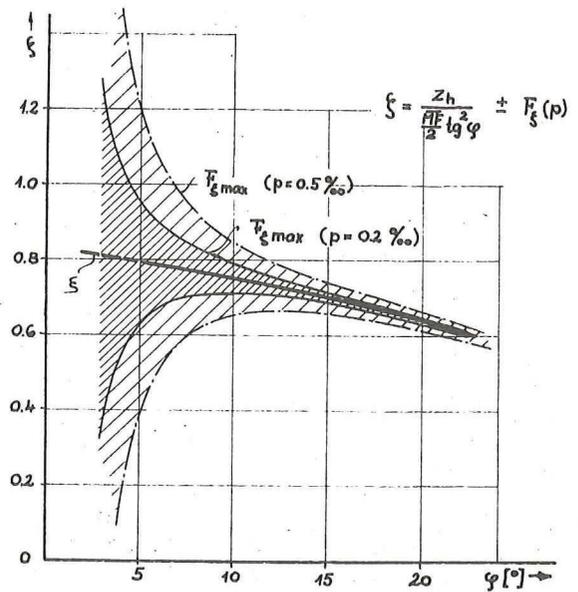


Bild 36 Fehler bei der Berechnung des Beiwertes  $\zeta$  nach Gleichung (73)

der Zähler in Gleichung (73) möglichst groß, der Nenner möglichst klein wird, oder umgekehrt. Man kann also schreiben:

$$F_{\zeta \max} = \frac{w + p w}{\sin \varphi} - (\overline{KM} - p \overline{KM}) \cdot \frac{w}{\sin \varphi} - \overline{KM} \cdot \frac{MF}{2} \operatorname{tg}^2 \varphi - p \overline{MF} \operatorname{tg}^2 \varphi$$

Daraus ergibt sich nach Umformung:

$$F_{\zeta \max} = \frac{4 \cdot \frac{w}{\sin \varphi} \cdot p}{MF \operatorname{tg}^2 \varphi \cdot (1 - p)} \quad (74)$$

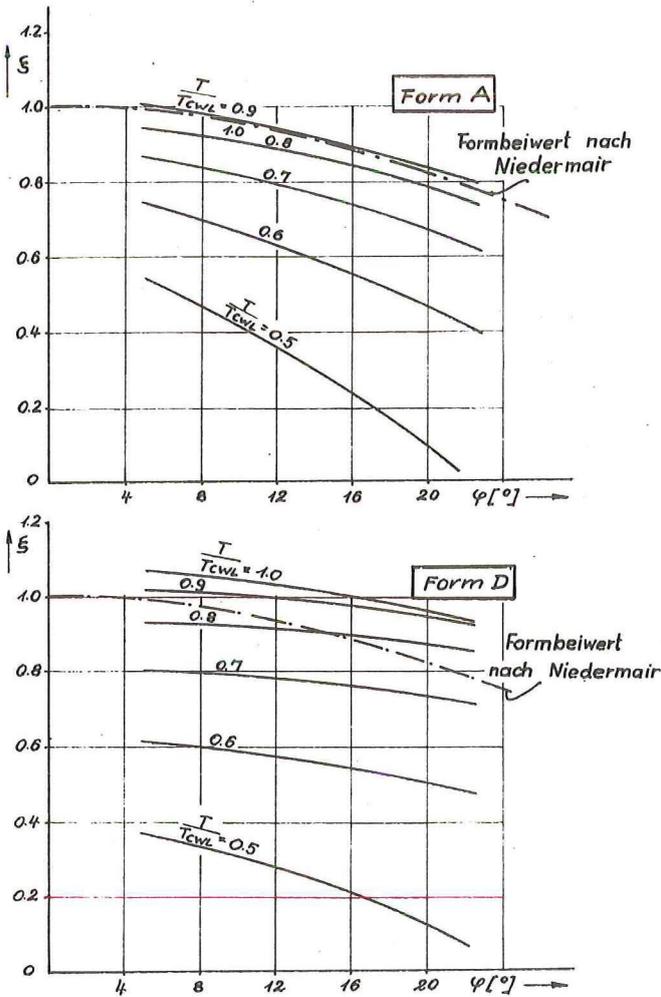


Bild 37 Formbeiwert  $\zeta$  ermittelt nach Gleichung (73)

Es hat sich gezeigt (vgl. auch Abschnitt 8 — 14), daß die Ergebnisse, die der Elektronenrechner liefert, auf etwa 4 Ziffernstellen genau sind, so daß es berechtigt erscheint,  $p < 0,0005$  anzusetzen. In Bild 36 ist für ein gerechnetes Beispiel die Formel (74) für  $p = 0,2 \text{ ‰}$  und  $p = 0,5 \text{ ‰}$  ausgewertet. Man erkennt — schraffiertes Streuungsfeld —, daß selbst bei einer solchen Genauigkeit der Rechnung bei Neigungen bis etwa  $\varphi < 8^\circ$  Fehler möglich sind, die das Resultat unbrauchbar machen.

Trotz der beschränkten erreichbaren Genauigkeit wurde es aber für nützlich gehalten, auf diese Weise berechnete  $\zeta$ -Werte von Schiffen vor und nach einer Teilüberflutung einander gegenüber zu stellen. Es wurden daher für die Grundform A (Bild 18) für jeweils 4 Neigungen:  $8^\circ, 12^\circ, 16^\circ, 20^\circ$ ,  $\zeta$ -Werte bestimmt, wobei der Ausgangstiefgang, die Lage und die Länge des symmetrisch überfluteten Leckbereiches systematisch variiert wurden. Die Ergebnisse für das unbeschädigte Schiff sind in Bild 37 in der von Horn in [14] angegebenen Art aufgetragen. Auch für das unbeschädigte Schiff der Form „D“ wurde eine solche Rechnung durchgeführt, was ebenfalls aus Bild 37 zu ersehen ist. Parameter ist hierin nicht  $V$  wie bei Horn, sondern der dimensionslose Wert  $T/T_{CWL}$ .

Um den Vergleich zwischen dem unbeschädigten Schiff in der Ausgangslage  $WL_0$  und dem beschädigten in der Endlage  $WL_1$  anschaulich zu machen, wurde der Quotient  $\zeta_b/\zeta_u$  gebildet.

$\zeta_b$ : Formbeiwert des beschädigten Schiffes in der Endschwimmlage  $WL_1$ .

$\zeta_u$ : Formbeiwert des unbeschädigten Schiffes in der Ausgangsschwimmlage  $WL_0$ .

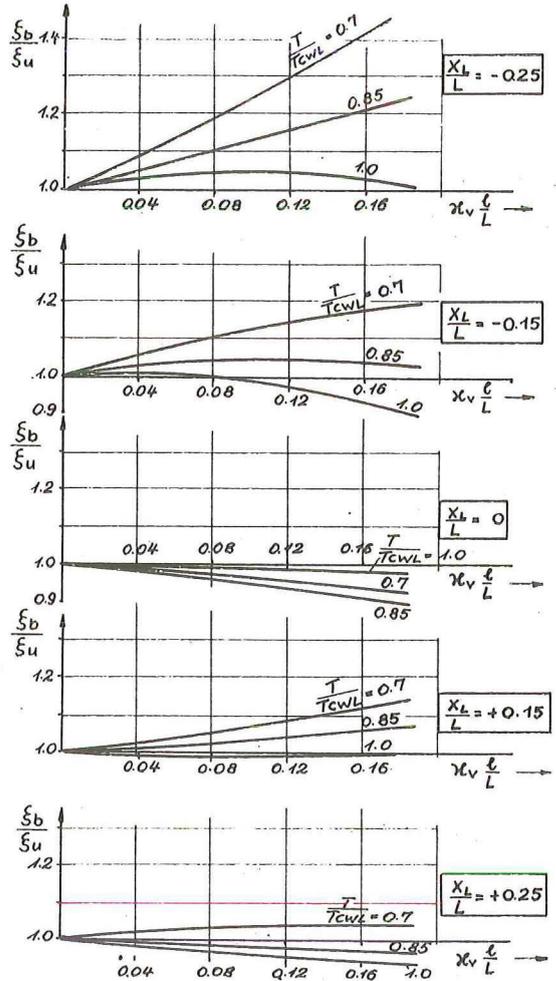


Bild 38 Vergleich des Beiwertes  $\zeta_b$  des beschädigten Schiffes mit dem Beiwert  $\zeta_u$  des intakten Schiffes für verschiedene Ausgangstiefgänge  $\frac{T}{T_{CWL}}$  und konstante Doppelbodenhöhe  $\frac{h}{B} = 0,10$  für Schiffesform „A“

Die Größe  $\zeta_b/\zeta_u$  erwies sich als weitgehend unabhängig vom Neigungswinkel  $\varphi$ . Jedenfalls wurde eine solche Abhängigkeit infolge der Streuung der Werte nicht erkennbar. In Bild 38 sind für verschiedene Leckraumlagen  $x_L/L$  die Quotienten  $\zeta_b/\zeta_u$  über der Leckraumgröße  $\kappa_v \cdot l/L$  aufgetragen. Die Doppelbodenhöhe war in allen Fällen  $h/B = 0,10$ . Als Parameter erscheint  $T/T_{CWL}$ , wobei  $T$  den Ausgangstiefgang bezeichnet.

Man erkennt in Bild 38, daß der  $\zeta$ -Wert nach Überflutung meist etwas ansteigt, im übrigen aber seine Größenordnung etwa beibehält. Damit ist die von Brockmann in [11] vorgeschlagene Übernahme von  $\zeta$  des unbeschädigten Schiffes auf Leckfälle bestätigt. Bei Überflutungen im Hinterschiff ergibt sich ein stärkerer Anstieg von bis etwa auf das  $1\frac{1}{2}$ fache von  $\zeta_u$ . Auf die Ursache der hierbei auftretenden Tendenzen soll nicht näher eingegangen werden. Nur eines sei erwähnt, was nicht aus Bild 38 hervorgeht: Die Rechnungen zeigten, daß der Einfluß des Leckbereiches auf den  $\zeta$ -Wert weniger stark ist als die Schwimmlagenänderung, insbesondere die achterlastige Vertrimmung, d. h. in ein und derselben Schwimmlage ergibt sich nichtgeflutet etwa das gleiche  $\zeta$  wie bei Berücksichtigung einer Überflutung.

Nach den Darstellungen in Bild 37 und 38 scheint es gerechtfertigt, für Überschlagsrechnungen einen mittleren Wert  $\zeta = 0,8$  zugrunde zu legen (vgl. Abschnitt 19). Man dürfte damit für unbeschädigte Schiffe oberhalb etwa  $T \geq$

0,7 T<sub>CWL</sub> auf der sicheren Seite liegen. Bei beschädigten Schiffen, insbesondere bei Leckfällen im Hinterschiff hat man dann noch mehr Sicherheit.

In Bild 37 ist noch zum Vergleich ein Beiwert eingetragen, der sich aus der Niedermairschen Formel für die Formanteil [7] angeben läßt.

Es gilt nach Niedermair:

$$h(\varphi) = \left[ \overline{MG} + \left( 0,5 - \frac{0,222}{1000} \cdot \varphi^2 [^\circ] \right) \cdot \overline{MF} \cdot \text{tg}^2 \varphi \right] \sin \varphi$$

Damit kann man setzen:

$$\zeta = 1,0 - \frac{0,444}{1000} \cdot \varphi^2 [^\circ]$$

Dieser Wert ist in Bild 37 eingetragen. Man sieht, daß er für unbeschädigte Schiffe für die Tiefladelinie etwa zutrifft, für geringere Tiefgänge, die hinsichtlich Leckstabilität oft besonders gefährlich sind, liefert er offenbar zu große, also zu günstige Werte.

**G. Beispiele**

**47. Abmessungen des in den Beispielen behandelten Schiffes (Form A)**

L = 140,00 m  
 B = 20,00 m  
 T<sub>CWL</sub> = 7,41 m

Ausgangstiefgänge	T = 5,41 m	T = 6,41 m	T = 7,41 m
<b>Tabelle I</b>			
(Abschnitt 25)			
$s_{WL}$	3,41 m	4,59 m	5,88 m
$x_V$	0,73 m	1,36 m	2,02 m
$\delta$	0,5402	0,5640	0,5862
$q$	0,5602	0,5820	0,6018
$a$	0,6745	0,7099	0,7457
$\varphi_h$	0,5703	0,6003	0,6291
$\varphi_v$	0,5498	0,5630	0,5746
$a_h$	0,7296	0,7816	0,8353
$a_v$	0,6223	0,6395	0,6562
$\bar{\varphi}_h$	0,5485	0,5724	0,5950
$\bar{\varphi}_v$	0,5704	0,5896	0,6067
$\bar{\delta}_h$	0,5281	0,5533	0,5772
$\bar{\delta}_v$	0,5532	0,5743	0,5938
<b>Tabelle II</b>			
(Abschnitt 35)			
$\frac{B}{T}$	3,70	3,12	2,70
$\frac{T}{T_{CWL}}$	0,730	0,865	1,000
$\frac{\varphi_h}{a_h}$	0,7817	0,7680	0,7531
$\frac{\varphi_v}{a_v}$	0,8302	0,8200	0,8070
$\frac{\varphi_v}{a_v}$	0,8835	0,8803	0,8756
$10 \left( \frac{B}{T} - 2 \right) \left( \frac{\varphi_h}{a_h} - 0,753 \right)$	0,4879	0,1680	0,0007
$10 \left( \frac{B}{T} - 2 \right) \left( \frac{\varphi_v}{a_v} - 0,876 \right)$	0,1275	0,0482	0,0028
<b>Tabelle III</b>			
(Abschnitt 44)			
$\frac{\bar{\delta}_h}{a}$	0,7829	0,7797	0,7739
$\frac{\bar{\delta}_v}{a}$	0,8187	0,8087	0,7962

**48. Symmetrisch überfluteter Leckraum im Hinterschiff**

Die Länge einer Abteilung beträgt  $\ell = 22,4$  m. Ihre Mitte liegt  $x_L = -36$  m hinter Hauptspant. Als mittlere Flutbarkeit wird  $\kappa_v = 0,70$  angenommen, die Tankdecke im Leckraum ist  $h = 2,80$  m hoch. Es ist also:

$$\frac{x_L}{L} = -0,257$$

$$\kappa_v \cdot \frac{\ell}{L} = 0,112$$

$$\frac{h}{B} = 0,140$$

Frage 1: Wie groß wird der  $\overline{MG}$ -Verlust:  $-\Delta\overline{MG}$  bei unbeschädigter Tankdecke?

Der Raum liegt zwischen  $x_L/L = -0,3$  (Diagramm I) und  $x_L/L = -0,2$  (Diagramm II). Der Vollständigkeit halber wird noch ein  $\Delta\overline{MG}/B$ -Wert aus Diagramm III ( $x_L/L = 0,10$ ) abgegriffen. Die Summenbildung in den einzelnen  $\Delta\overline{MG}$ -Diagrammen ist in Abschnitt 35 näher erläutert. Aus den so erhaltenen 3 Summenwerten wird graphisch interpoliert, etwa nach Bild 39.

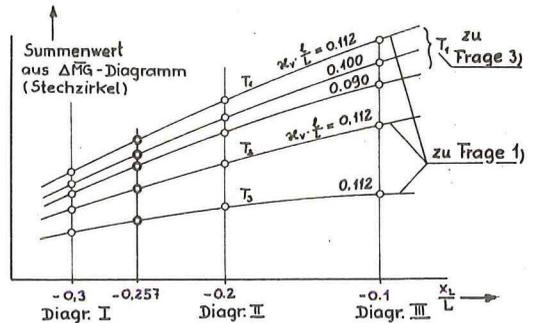


Bild 39 Interpolation zwischen den  $\Delta\overline{MG}$ -Diagrammen

Zur praktischen Durchführung ist es zweckmäßig, den aus den Diagrammen abgegriffenen Summenwert direkt zur graphischen Interpolation zu benutzen, d. h. den Spitzenabstand des Stechzirkels unmittelbar in die Darstellung nach Bild 39 zu übertragen. Mit dem interpolierten Wert geht man dann in den  $\delta$ -abhängigen Maßstab am linken Rand der  $\Delta\overline{MG}$ -Diagramme zurück, der übrigens bei allen Diagrammen identisch ist.

Die Interpolation ergibt

$-\frac{\Delta\overline{MG}}{B}$	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>
	0,025	0,016	0,010

Nimmt man an, daß sich im Bereich des freien Wasserspiegels keine Einbauten befinden, so setzt man  $\kappa_F = 1,0$ . Es wird:  $\kappa_v/\kappa_F = 0,70$ . Der dadurch bedingte zusätzliche  $\overline{MG}$ -Verlust  $-\Delta\overline{MG}_{\kappa_F}/B$  ist aus Diagramm VIII zu ermitteln. Dazu benötigt man noch:

$a_h + 0,6 \cdot \kappa_v \cdot \frac{\ell}{L} \left( 1 - \frac{h}{T} \right)$	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>
	0,7620	0,8194	0,8771

Aus Diagramm VIII liest man ab:

$\frac{\Delta\overline{MG}_{\kappa_F}}{B}$	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>
	0,0202	0,0190	0,0175

Für Tiefgang T<sub>2</sub> = 6,41 m ist der Durchlauf zur Orientierung in das Diagramm VIII eingezeichnet.

Es ergibt sich somit als Lösung:

	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>
$\Delta\overline{MG}$	0,50 m	0,32 m	0,20 m
$\Delta\overline{MG} + \Delta\overline{MG}_{\kappa_F}$	0,90 m	0,70 m	0,55 m
Die genaue Nachrechnung ergab:			
$\Delta\overline{MG}$	0,48 m	0,30 m	0,17 m
$\Delta\overline{MG} + \Delta\overline{MG}_{\kappa_F}$	0,89 m	0,68 m	0,50 m

Frage 2: Wie hoch darf die unbeschädigte Tankdecke höchstens liegen, damit für die Ausgangsschwimmlage I ( $T_1 = 5,41$  m) der  $\overline{MG}$ -Verlust nur  $\Delta\overline{MG} = -0,40$  m beträgt?

Zur Lösung dieser Aufgabe kann man in den  $\Delta\overline{MG}$ -Diagrammen genau so vorgehen wie unter Frage 1, nur läßt man das Kurvenbüschel  $h/B$  bei der Summenbildung aus. Man liest links einen Wert  $\Delta\overline{MG}/B$  ab, der größer oder kleiner ist als der vorgegebene ( $\Delta\overline{MG}/B = 0,02$ ). Man nimmt die Differenz in den Zirkel und geht damit in das  $h/B$ -Büschel, wo sich das gewünschte  $h/B$  direkt abgreifen läßt. Auf richtige Vorzeichen ist dabei zu achten! Diese Werte können wiederum der Länge nach graphisch interpoliert werden, entsprechend Bild 40.

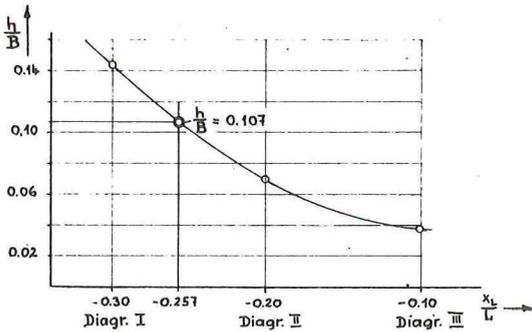


Bild 40 Interpolation zwischen den  $\Delta\overline{MG}$ -Diagrammen

Es ergibt sich für die gesuchte Höhe:  $h/B = 0,107$ , also:  $h = 2,14$  m.

Die genaue Rechnung mit  $h = 2,14$  m ergibt  $\Delta\overline{MG} = -0,37$  m.

Frage 3: Wie lang darf der Leckraum höchstens sein, damit für die Ausgangsschwimmlage I ( $T_1 = 5,41$  m) der  $\overline{MG}$ -Verlust nur  $\Delta\overline{MG} = -0,42$  m beträgt? ( $h = 2,80$  m, wie bei Frage 1).

Die Lösung erfolgt wie bei Frage 1, nur werden weitere Werte für  $\kappa_v \cdot \ell/L$  ermittelt ( $\kappa_v \cdot \ell/L = 0,10; 0,09$ ) und in Bild 39 eingetragen. Die Interpolation (Bild 41) ergibt für das gewünschte  $\kappa_v \cdot \ell/L$

$$\kappa_v \cdot \ell/L = 0,094$$

Damit wird mit  $\kappa_v = 0,70$ :  $\ell = 18,80$  m.

Die genaue Rechnung mit  $\ell = 18,80$  m ergibt:  $\Delta\overline{MG} = -0,40$  m.

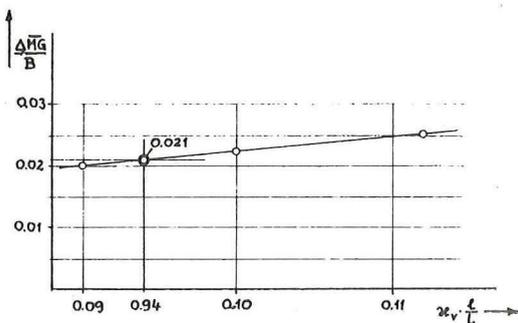


Bild 41 Interpolation zu Frage 3

Frage 4: Wie groß werden die Tiefgänge an den Loten  $T_h$  und  $T_v$  für den größten Ausgangstiefgang  $T_3 = 7,41$  m und den in Frage 1 behandelten Leckfall?

Benötigt wird noch die Größe  $\frac{x_L - s_{WL}}{L} = -0,2151$  und  $h/T = 0,3778$ .

Der Gang der Lösung mit Hilfe der T-Diagramme ist in Abschnitt 44 in Stichworten angegeben. Nach Durchlauf des T-Diagramms IX — der Durchlauf ist zur Orientierung in das Diagramm eingezeichnet — ergibt sich:

$$\frac{t/2}{T} = 0,175$$

$$\Delta T/T = 0,080$$

und es wird:

$$T_h/T = 1 + 0,080 + 0,175 = 1,255$$

$$T_v/T = 1 + 0,080 - 0,175 = 0,905$$

also:

$$T_h = 9,30 \text{ m}$$

$$T_v = 6,75 \text{ m.}$$

Die genaue Nachrechnung ergab:

$$T_h = 9,28 \text{ m}$$

$$T_v = 6,70 \text{ m.}$$

Frage 5: Wie lang darf der Leckraum höchstens sein, damit für den größten Ausgangstiefgang ( $T_3 = 7,41$  m) der Tiefgang am hinteren Lot nicht größer als  $T_h = 9,50$  m wird? Dabei soll eine vollständige Überflutung des Raumes einschließlich Bodentanks angenommen werden. Die Raumflutbarkeit erhöht sich dadurch auf etwa  $\kappa_v = 0,75$ .

Es wird

$$T_h/T = 1,282$$

$$\frac{t/2}{T} + \Delta T/2 = 0,282.$$

Das Diagramm IX wird für drei bis vier Leckraumgrößen  $\kappa_v \cdot \frac{\ell}{L}$  durchlaufen, etwa für

$$\kappa_v \cdot \frac{\ell}{L} = 0,08; 0,10; 0,12; 0,14.$$

$\kappa_v \cdot \frac{\ell}{L}$	$\frac{t/2}{T}$	$\frac{\Delta T}{T}$	$\frac{t/2}{T} + \frac{\Delta T}{T}$
0,08	0,155	0,070	0,225
0,10	0,190	0,085	0,275
0,12	0,235	0,114	0,349
0,14	0,275	0,132	0,407

Es ergibt sich durch Interpolation für  $\kappa_v \cdot \ell/L = 0,101$  und damit:

$$\ell = 18,84 \text{ m.}$$

Die genaue Rechnung mit  $\ell = 18,84$  m ergibt:

$$T_h = 9,52 \text{ m}$$

$$(T_v = 6,62 \text{ m}).$$

#### 49. Unsymmetrisch überfluteter Leckraum im Vorschiff

Länge des Raumes  $\ell = 20,00$  m  
 Lage der Leckraummitte  $x_L = 14,00$  m vor Hauptspant  
 mittlere Flutbarkeit  $\kappa_v = 0,85$   
 Höhe der Tankdecke  $h = 2,00$  m

Frage 1: Wie groß muß  $\overline{MG}$  des unbeschädigten Schiffes sein, wenn die Bodentanks einseitig zur Hälfte mitüberflutet werden und ein Grenzneigungswinkel  $\varphi_G = 7^\circ$  nicht überschritten werden darf?

a)  $\Delta\overline{MG}$  aus Diagramm V: Es wird mit verringerter Doppelbodenhöhe von  $h = 1$  m gerechnet ( $h/T = 0,05$ ):

Man erhält aus Diagramm V:

	$T_1$	$T_2$	$T_3$
$\Delta\overline{MG}/B$	0,0300	0,0125	0,0001
(1) $\Delta\overline{MG}[\text{m}]$	-0,60	-0,25	-0,01

b) Überschlägige Ermittlung von  $\overline{MG}_0$  nach Gleichung (72):

	$T_1$	$T_2$	$T_3$	
aus Spt.-Riß (Bild 18) geschätzt:	$V_0 [m^3]$	8183	10 122	12 162
	$M_B = V_{II} \cdot d_{II} \cdot \kappa_V [m^4]$	1100,0		
	$\overline{MF}_0 [m]$	7,15	5,04	4,49
	$tg \varphi_G$	0,12278		
	$tg^2 \varphi_G$	0,01507		
mit:	$\frac{x_L - s_{WL}}{L}$	0,124	0,133	0,142
aus Diagramm XI:	$\zeta_L$	0,340	0,341	0,342
(2)	$\frac{\kappa_V \cdot V_{II} \cdot d_{II}}{V_0 \cdot tg \varphi_G}$	1,09	0,88	0,75
(3)	$\zeta_L \cdot \overline{MF}_0 \cdot tg^2 \varphi_G$	0,04	0,03	0,02
nach Gleichung (72):	$\overline{MG}_0 [m]$	1,65	1,10	0,72
— (1) + (2) — (3)				
Die genaue Nachrechnung ergab:	$\overline{MG}_0 [m]$	1,60	1,06	0,75

Frage 2: Wie hoch muß das Schottendeck im Bereich des Leckraums liegen, damit bei  $\varphi_G = 7^\circ$  das Deck in keinem Fall eintaucht?

In Diagramm X ist der Durchlauf für  $T_3 = 7,41$  m eingetragen. Für die Doppelbodenhöhe  $h/T = 0,27$  ergibt sich  $c_h = 0,22$ . Davon wird wegen der halben Doppelbodenflutung nur die Hälfte  $c_h/2 = 0,11$  genommen.

Es ergibt sich:

$$\frac{t/2}{T} = 0,210$$

$$\frac{\Delta T}{T} = 0,177$$

Der Tiefgang am vorderen Begrenzungsschott auf  $x = + 24,00$  m wird:

$$\frac{T_{x=24}}{T} = 1 + \frac{\Delta T}{T} + \frac{24}{70} \cdot \frac{t/2}{T} = 1,249$$

$$T_{x=24} = 9,26 \text{ m.}$$

Der erforderliche Freibord bei  $\varphi_G = 7^\circ$  und  $B/2 = 10$  m beträgt  $F_b = B/2 \cdot tg \varphi_G = 1,23$  m. Die Seitenhöhe bei  $x = 24$  m muß demnach  $H_{x=24} \geq 10,49$  m betragen.

Die genaue Rechnung ergibt für

$$x = 24 \text{ m} : H_{x=24m} \geq 10,47 \text{ m.}$$

50. Aufstellung der Kurve der Flutbaren Längen mit den T-Diagrammen

Wie man hierbei vorgeht, ist in Abschnitt 44 in Stichworten angegeben. Es ist zweckmäßig, die an den „Sicherheitsrand“

gelegten Tangenten in einem Diagramm:  $\frac{t/2}{T} = f(\Delta T/T)$  aufzutragen (Bild 42). Damit stehen für die Rechnung die entsprechenden Wertepaare  $\frac{t/2}{T}$  und  $\Delta T/T$  übersichtlich zur Verfügung.

Es wurde die Kurve der Flutbaren Längen für das Hinterschiff mit einer Flutbarkeit von  $\kappa_V = 0,8$  nach folgendem Schema berechnet:

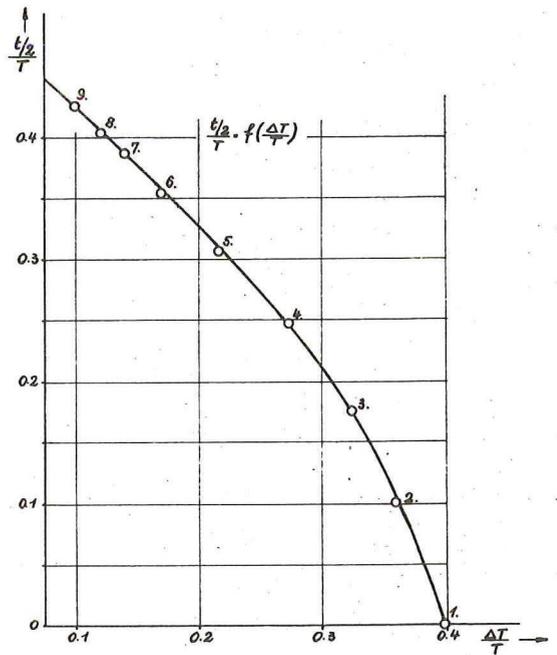


Bild 42 Tangenten an den „Sicherheitsrand“ zur Ermittlung der Kurve der Flutbaren Längen

Punkt	$\Delta T$	$\Delta T/T$	$t/2$	Ablesung			Ergebnis	
				$\frac{t/2}{T}$	$\frac{x_L - s_{WL}}{L}$	$\kappa_V \cdot \frac{\ell}{L}$	$\frac{x_L}{L}$	$\frac{\ell}{L}$
1	3,35	0,400	0	0	0	0,240	-0,042	0,300
2	3,10	0,369	0,84	0,100	-0,040	0,230	-0,082	0,288
3	2,75	0,327	1,48	0,176	-0,078	0,221	-0,120	0,276
4	2,33	0,277	2,03	0,242	-0,113	0,205	-0,155	0,256
5	1,81	0,215	2,55	0,303	-0,167	0,181	-0,209	0,226
6	1,34	0,170	3,02	0,359	-0,227	0,168	-0,269	0,210
7		0,140		0,388	-0,270	0,169	-0,312	0,211
8		0,120		0,406	-0,319	0,180	-0,361	0,225
9		0,100		0,425	-0,380	0,222	-0,422	0,278

Die Punkte 1 bis 9 sind in das T-Diagramm Bild 43 eingezeichnet. Die Punkte lassen sich strakend verbinden, woraus beliebig viele Punkte der „Schottkurve“ abzugreifen sind. Die entstehende Kurve der Flutbaren Längen ist in Bild 44 dargestellt. Es zeigt sich, daß sich in diesem Falle sogar noch ein Punkt ergibt, der außerhalb der Schiffslänge liegt. Auf diese Weise erübrigt sich die Bestimmung der „Endräume“.

Soll eine Schottkurve für kleinere Ausgangstiefgänge  $T < T_{CWL}$  bestimmt werden, so ist die  $T/T_{CWL}$ -Korrektur vorzunehmen.

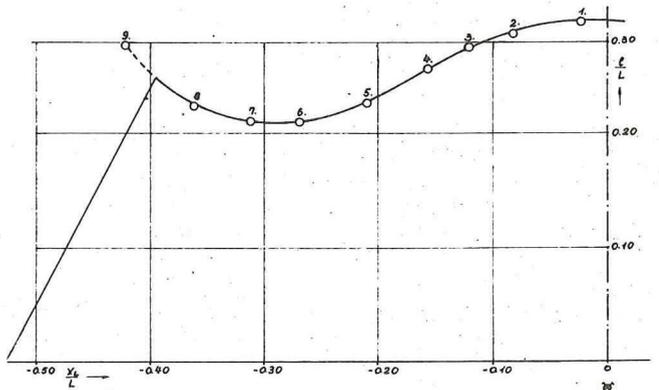


Bild 44 Kurve der Flutbaren Längen ermittelt mit den T-Diagrammen ( $\mu = 0,80$ )

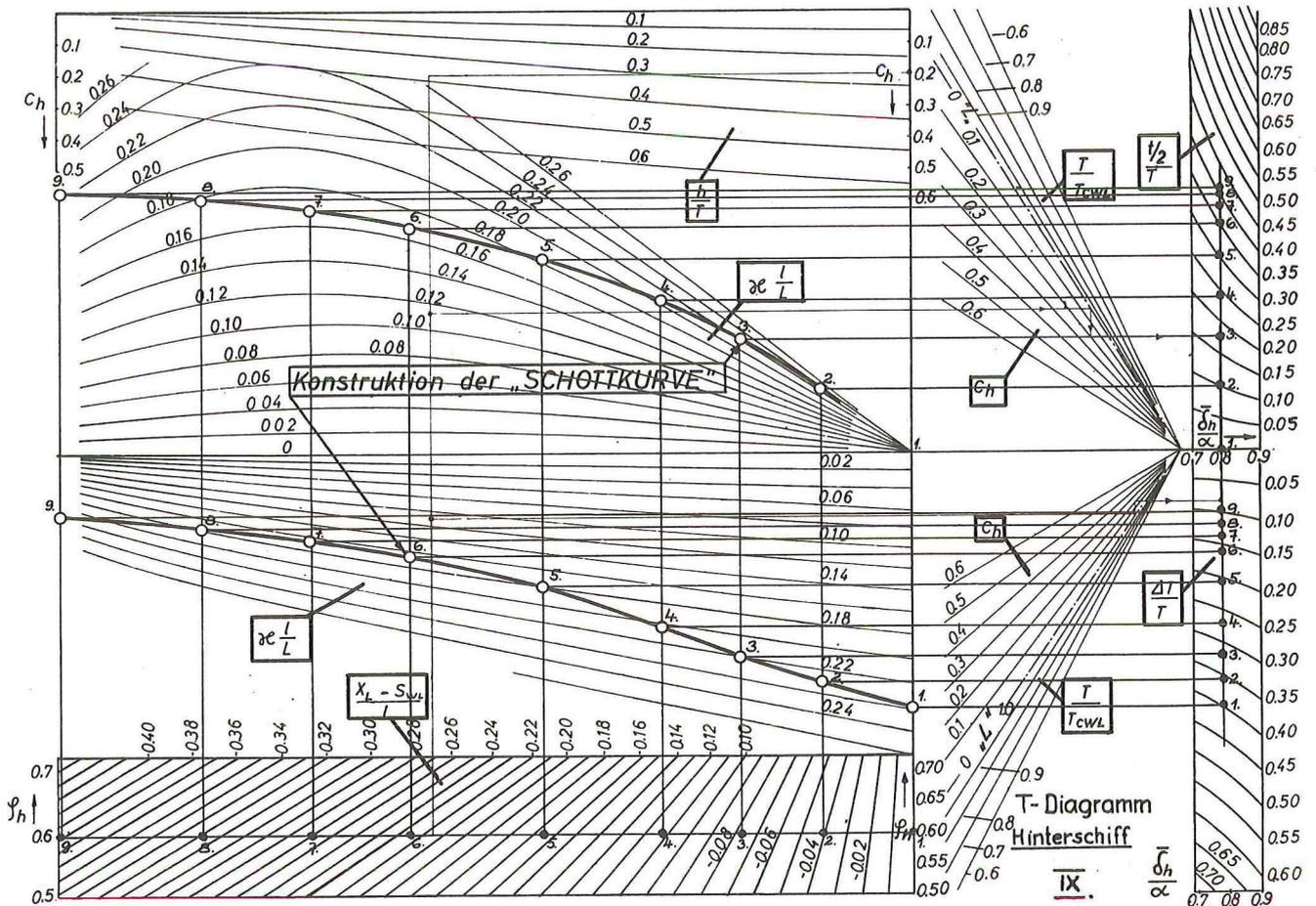


Bild 43 Konstruktion der Kurve der Flutbaren Längen im T-Diagramm

## VI. Zusammenfassung

Ein Grund dafür, daß es bis jetzt so schwierig ist, ein Schiff so zu entwerfen, daß es als genügend sicher gegen die Auswirkungen möglicher Beschädigungen anzusehen ist, liegt darin, daß die dazu erforderlichen Leckrechnungen mit großem Zeit- und Arbeitsaufwand verbunden sind. Es ist nicht zu vermeiden, daß eine günstige und wirksame wasserdichte Unterteilung des Schiffes, die auch den Internationalen Sicherheitsvorschriften genügt, kaum anders als durch Probieren gefunden werden kann. Das hat eine große Zahl von Einzelrechnungen für jedes Schiff zur Folge, von denen jede schwierig und unübersichtlich ist. Neuerdings bieten sich zur Bewältigung solcher Arbeiten elektronische Rechenanlagen als Hilfe an. Es fehlt bisher an geeigneten Programmen, um Leckrechnungen auf den bei uns vorhandenen Anlagen bearbeiten zu können.

Die vorliegende Arbeit beschreibt solche Programme für den Magnettrommelrechner IBM 650, mit deren Hilfe die Durchführung von Leckrechnungen auf einen Bruchteil der früher benötigten Zeit zusammenschrumpft. Diese Programme erleichtern zwar die Einzelrechnungen beträchtlich, sie machen jedoch das Probieren nach einer zweckmäßigen und ausreichend sicheren Unterteilung eines Schiffes leider nicht überflüssig. Es ist aber vom Standpunkt eines wirtschaftlichen Einsatzes solcher teurer Anlagen nicht zweckmäßig, alle Proberechnungen auf Elektronenrechnern durchzuführen, zumal die meisten Betriebe überhaupt nicht selbst über so große Anlagen verfügen und die Leckrechnungen an Rechenzentren vergeben müssen.

Es muß also für die Praxis erwünscht sein, Entwurfsunterlagen in die Hand zu bekommen, mit deren Hilfe schnell und sicher eine vorläufige Wahl der Unterteilung erfolgen kann,

von der man annehmen kann, daß bei der endgültigen Leckrechnung keine überraschenden Fehler oder Unzulänglichkeiten dieser Einteilung zutage treten. Die Ausarbeitung derartiger Entwurfsunterlagen ist bis jetzt unterblieben, da es schwierig schien, auch nur die Haupttendenzen der zahlreichen maßgeblichen Parameter in allgemeingültiger Form für eine quantitative Abschätzung aufzuzeigen. Dies ist offenbar in befriedigender Weise nur durch zahlreiche systematische Leckrechnungen möglich. Hierzu lassen sich aber wiederum die Elektronenrechner besonders nutzbringend einsetzen.

Es wurden mit der uns zur Verfügung stehenden Anlage der Technischen Hochschule Hannover systematisch variierte Leckrechnungen an verschiedenen als „normal“ angesehenen Schiffen durchgeführt. Der Umfang dieser Rechnungen übertrifft bei weitem die Möglichkeiten einer manuellen Bearbeitung. Gegenüber bisherigen Leckrechnungen haben die maschinell gewonnenen Ergebnisse noch den Vorteil, daß sie als unbedingt zuverlässig anzusehen sind, da die Maschine „fehlerlos“ arbeitet. Ausführliche Fehlerrechnungen zeigen, daß die erreichbare Genauigkeit der Berechnung mit den beschriebenen Programmen diejenige der manuellen Rechnungen erheblich übertrifft.

Die Auswertung des umfangreichen Materials an Ergebnissen führte zu Entwurfsdiagrammen (Anhang <sup>6)</sup>, die es ermöglichen, ohne nennenswerte Rechenarbeit das Verhalten des Schiffes im angenommenen Leckfall zu überblicken. Dazu sind für das Schiff lediglich eine Reihe von dimensionslosen Kenngrößen zu ermitteln (Tafel I—III), die sich durchweg auf den Schwimmzustand vor der Flutung beziehen. Nach welchen Überlegungen diese Kenngrößen gewählt wurden, geht aus Teil V der Arbeit hervor. Hat man sie bestimmt, so ist die

<sup>6)</sup> Die Entwurfsdiagramme sind über die Technische Hochschule, Hannover, im Format DIN A3 erhältlich.

Hauptarbeit bereits getan; die Benutzung der Entwurfsdiagramme ist dann sehr einfach und führt in kurzer Zeit zum gewünschten Ergebnis.

Entsprechend der üblichen Aufteilung der Leckrechnung in einzelne Teilaufgaben wurden verschiedene Arten von Entwurfsdiagrammen aufgestellt. Mit den „T-Diagrammen“ kann die Eintauchung und die Vertrimmung des überfluteten Schiffskörpers bestimmt werden. Es ergeben sich hierbei für überflutet angenommene Leckräume die Tiefgangsdifferenzen gegenüber der Ausgangslage an den Loten bzw. auf Hauptspant des Schiffes. Auch die Umkehrung dieser Aufgabe ist möglich, d. h. man kann mit den T-Diagrammen auch „Schottkurven“ aufstellen (vgl. Abschnitt 44). Mit anderen Entwurfsdiagrammen, den „ΔMG-Diagrammen“, kann man die Änderung der metazentrischen Höhe des Schiffes infolge Flutung bestimmen. Hierbei läßt sich in besonders übersichtlicher Weise der Einfluß jedes einzelnen der wirksamen Parameter verfolgen, so daß sehr schnell optimale Verhältnisse gefunden werden können (vgl. Abschnitt 35).

Wie man auch unsymmetrische Überflutungen im Entwurfsstadium unter Verwendung der Entwurfsdiagramme auf relativ einfache Weise bearbeiten kann, geht aus Abschnitt 45 hervor.

Die Handhabung aller Diagramme ist an Beispielen erläutert (vgl. Abschnitt 47 bis 50).

Die Schwierigkeiten bei der Aufstellung der Entwurfsdiagramme bestanden hauptsächlich in der ausreichenden Kennzeichnung der Besonderheiten der Schiffsform durch einfache Kenngrößen. Die erreichte Genauigkeit der Ergebnisse bei Anwendung der Entwurfsdiagramme wurde auf statistischem Wege durch Vergleichsrechnungen an „normalen“ Schiffsformen aufgezeigt (vgl. Abschnitt 34 und 43). Als normale Schiffsform sind die in den Bildern 18, 19, 20, 21 dargestellten Schiffsformen anzusehen, die etwa der heute bevorzugten Formgebung für Fahrgastschiffe und schnelle Frachtschiffe entspricht. Eine Erweiterung auf andere Formen, insbesondere solchen mit mehr oder weniger langem parallelen Mittschiffsbereich, ist vorgesehen.

In Abschnitt 46 ist noch kurz auf den Formanteil des aufrichtenden Hebels bei Neigungen verletzter Schiffe eingegangen. In vergleichenden Darstellungen (Bild 37 und 38) sind  $\zeta$ -Werte des unbeschädigten Schiffes denen nach Beschädigung in der Endschwimmlage gegenübergestellt. In diesen Untersuchungen wurde ebenfalls von den Möglichkeiten des Elektronenrechners Gebrauch gemacht.

Zum Schluß möchte der Verfasser seinen Dank allen jenen Herren aussprechen, deren Rat und fördernde Kritik das Entstehen dieser Arbeit wesentlich unterstützt haben. An erster Stelle steht Professor Dr.-Ing. K. Wendel, in dessen umfangreiche Forschungsarbeiten über die Sicherheit von Schiffen sich diese Arbeit als Teil einfügt. Professor Wendel hat sie in jeder Weise gefördert. Seine wertvollen Anregungen und Ratschläge bedeuteten einen steten Ansporn. Durch ihn wurde dem Verfasser ermöglicht, in Schiffssicherheitsausschüssen, u. a. zur Vorbereitung der Internationalen Schiffssicherheitskonferenz in London, mitzuwirken. Im Rahmen dieser Tätigkeit kam er mit Dipl.-Ing. F. Seefisch, Ing. W. Brockmann und Ing. J. Jens zusammen, deren hervorragende Sachkenntnis auf dem Gebiete des Leckverhaltens von Schiffen eine Fülle von Anregungen und Hinweisen vermittelte. Besonders gebührt in diesem Zusammenhang Dr.-Ing. O. Krappinger Dank für sein Interesse, seine fördernde Kritik und seine hilfreichen Ratschläge. Professor Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. G. Weinblum sei für seine Anteilnahme am Fortgang der Arbeit und für seinen häufigen wohlwollenden Zuspruch gedankt.

Die Arbeit wurde finanziell durch den Bundesminister für Verkehr unterstützt und damit in dieser Form erst ermöglicht. Weitere geldliche Zuwendungen erfolgten durch den Niedersächsischen Minister für Wirtschaft und Verkehr. Dafür sagen wir unseren besonderen Dank.

Weiter gebührt dem Institut für praktische Mathematik der Technischen Hochschule Hannover Dank, besonders Dipl.-Math. Petri und Dipl.-Math. Esch, die die Grundlagen der Programmiertechnik vermittelten und bei der Entwicklung der Programme mit guten Ratschlägen halfen; und auch dem Institut für angewandte Mathematik der Universität Hamburg, das durch Dr. Albrecht längere Rechenzeiten an der Hamburger Rechenanlage zur Verfügung stellte. Der Deutschen Forschungsgemeinschaft sei besonders gedankt, daß sie durch Übernahme der beträchtlichen Kosten der Elektronenrechner es der Forschung ermöglichten, kostenlos die an den deutschen Hochschulen aufgestellten Elektronenrechner zu benutzen.

Erfreulich war die Zusammenarbeit mit cand. arch. nav. H. Söding, aus der die praktische Arbeit an den Rechenprogrammen manchen Nutzen zog. Auch ihm möchte der Verfasser seinen Dank aussprechen.

(Eingegangen am 23. Mai 1961)

## Zusammenstellung der wichtigsten Formelzeichen – Teil II

A	Auftriebsvektor	$f_x$	Spantfläche an der Stelle x (Abschnitt 39)
$A_u$	Unsymmetrischer Auftriebsteil	h	Höhe eines Doppelbodens im Leckraum (Abschnitt 30 und 41)
B	Schiffsbreite auf Spanten	$J_B$	Breitenträgheitsmoment der Wasserlinienfläche des Schiffes
$b_u$	Breite eines unsymmetrischen nicht durchfluteten Raumteils (Abschnitt 45)	$i_B$	Breitenträgheitsmoment der Wasserlinienfläche des Leckraumes
$c_i$	Beiwert zur Bestimmung des Breitenträgheitsmomentes (Abschnitt 32)	$J_L$	Längenträgheitsmoment der Wasserlinienfläche des Schiffes
$c'_h$	Verhältniszahl für Einfluß h/T auf Tauchung und Trimm	$i_L$	Längenträgheitsmoment der Wasserlinienfläche des Leckraumes
$c_h$	Parameter in den T-Diagrammen für den Doppelbodeneinfluß	$k_x, k_y, k_z$	Faktoren für eine affine Verzerrung
$d_u$	Hebelarm eines unsymmetrischen Auftriebsteils	L	Schiffslänge zwischen den Loten ( $L_{pp}$ )
$d_F$	Hebelarm der Fläche eines unsymmetrischen Auftriebsteils	ℓ	Länge des Leckbereiches
e	Schwerpunkt Abstand einer unsymmetrischen Wasserlinie von der Symmetrieachse (Abschnitt 45)	M	Metazentrum des Schiffes
F	Formschwerpunkt der Verdrängung	$\overline{MG}$	Metazentrische Höhe
f	Formschwerpunkt des Leckraumes	$\overline{MF}$	Metazentrischer Radius
$F_{WL}$	Fläche der Wasserlinie eines Schiffes	$M_a$	Aufrichtendes Moment des Schiffes
$f_{WL}$	Fläche der Wasserlinie des Leckraumes	$M_k$	Krängendes Moment des Schiffes

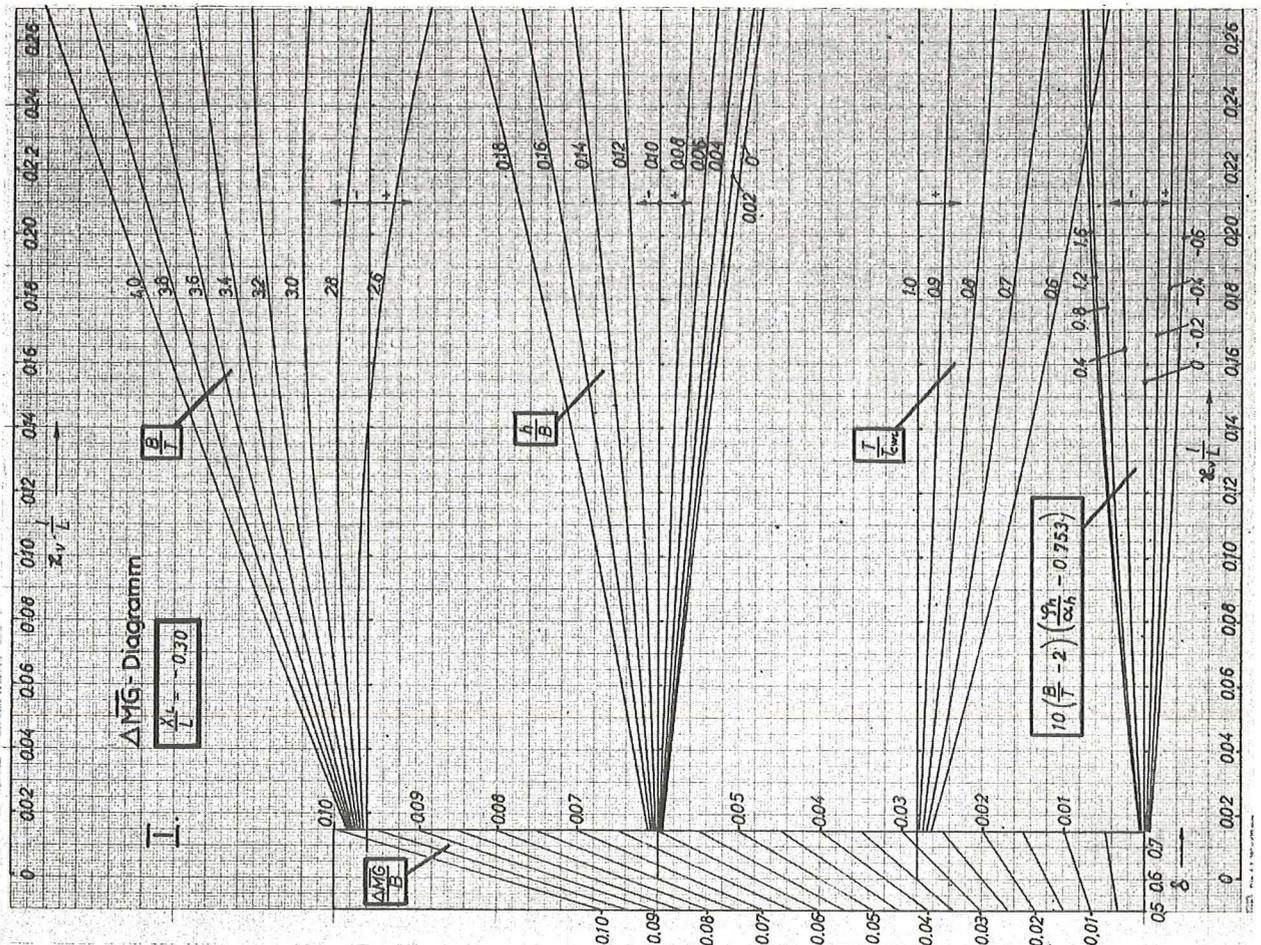
$M_H$	Höhenmoment der Verdrängung	$\delta$	Völligkeitsgrad der Verdrängung, bezogen auf $L_{pp} \cdot B \cdot T$
$M_L$	Längenmoment der Verdrängung	$\delta_v; \delta_h$	Völligkeitsgrad der Verdrängung vor, hinter Hauptspant (Gleichung (51))
$M_{WL}$	Längenmoment der Wasserlinienfläche des Schiffes	$\bar{\delta}_v; \bar{\delta}_h$	Völligkeitsgrad der Verdrängung vor, hinter Wasserlinienschwerpunkt (Gleichung (62))
$M_{L,K}$	Längenmoment der Keilvolumen bei Trimm (Abschnitt 39)	$\Delta$	Differenz
$m_H$	Höhenmoment des Leckraums	$\xi$	Formbeiwert des aufrichtenden Hebelarms h
$m_L$	Längenmoment des Leckraums	$\xi_b$	Formbeiwert des beschädigten Schiffes
$P$	Schiffsgewicht	$\xi_u$	Formbeiwert des unbeschädigten Schiffes
$s_{WL}$	Abstand des Wasserlinienschwerpunktes vom Hauptspant	$\kappa_v$	Flutbarkeitsfaktor eines Raumes
$T$	Tiefgang	$\kappa_F$	Flutbarkeitsfaktor einer freien Oberfläche
$T$	Mittlerer Ausgangstiefgang (Abschnitt 25—46 und in den Entwurfsdiagrammen I—X)	$\varphi$	Krängungswinkel
$T_h, T_m, T_v$	Tiefgang hinten (H.L.), Mitte, vorn (V.L.)	$\varphi_G$	Grenzkrängungswinkel
$t$	Vertrimmung an den Loten gemessen	$\varphi$	Schärfegrad des Schiffes
$v$	Verdrängung des Schiffes	$\varphi_v; \varphi_h$	Schärfegrad vor, hinter Hauptspant (Gleichung (51))
$v$	Leckraumvolumen	$\bar{\varphi}_v; \bar{\varphi}_h$	Schärfegrad vor, hinter Wasserlinienschwerpunkt (Gleichung (61))
$w$	Abstand des Auftriebsvektors A vom Kielpunkt K (Pantokarene)	$\psi$	Trimmwinkel
$WL$	Abkürzung für Wasserlinie	$\Sigma$	Summe
$x$	Längenkoordinate (Ursprung auf Hauptspant)		
$x_L$	Abstand der Mitte eines Leckraumes vom Hauptspant auf der x-Koordinate		
$x_v$	Abstand des Verdrängungsschwerpunktes vom Hauptspant		
$y$	Breitenkoordinate (Ursprung auf Mitte Schiff)		
$y$	Abstand einer Wand im Leckraum von Mitte Schiff		
$z$	Höhenkoordinate (Ursprung im Kielpunkt K)		
$z_u, z_o$	Höhe der unteren, oberen Begrenzung des Leckraumes		
$\alpha$	Völligkeitsgrad der Wasserlinienfläche, bezogen auf $L_{pp} \cdot B$		
$\alpha_v; \alpha_h$	Völligkeit der Wasserlinienfläche vor, hinter Hauptspant (Gleichung (52))		
$\gamma$	Spezifisches Gewicht des Wassers		

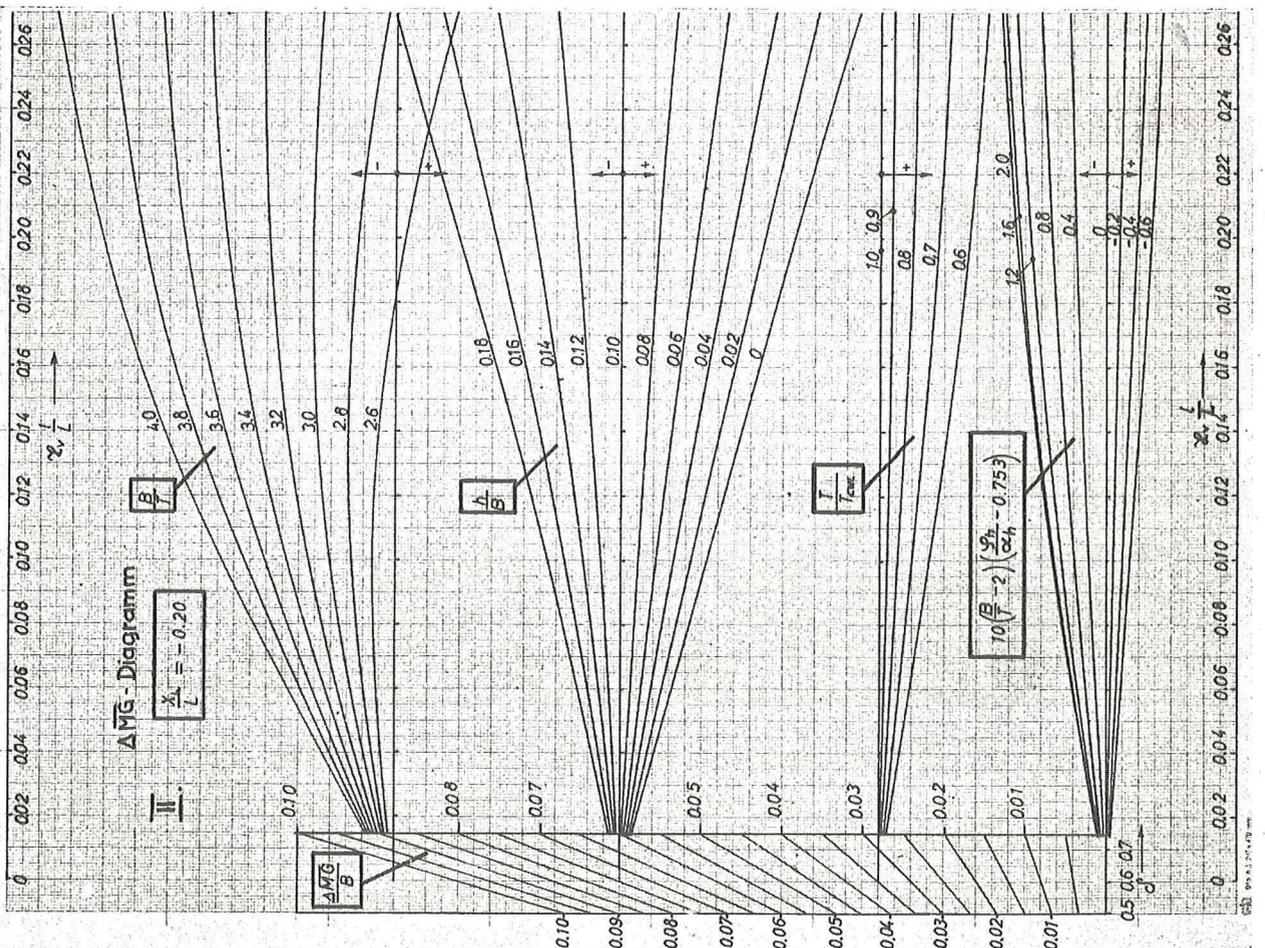
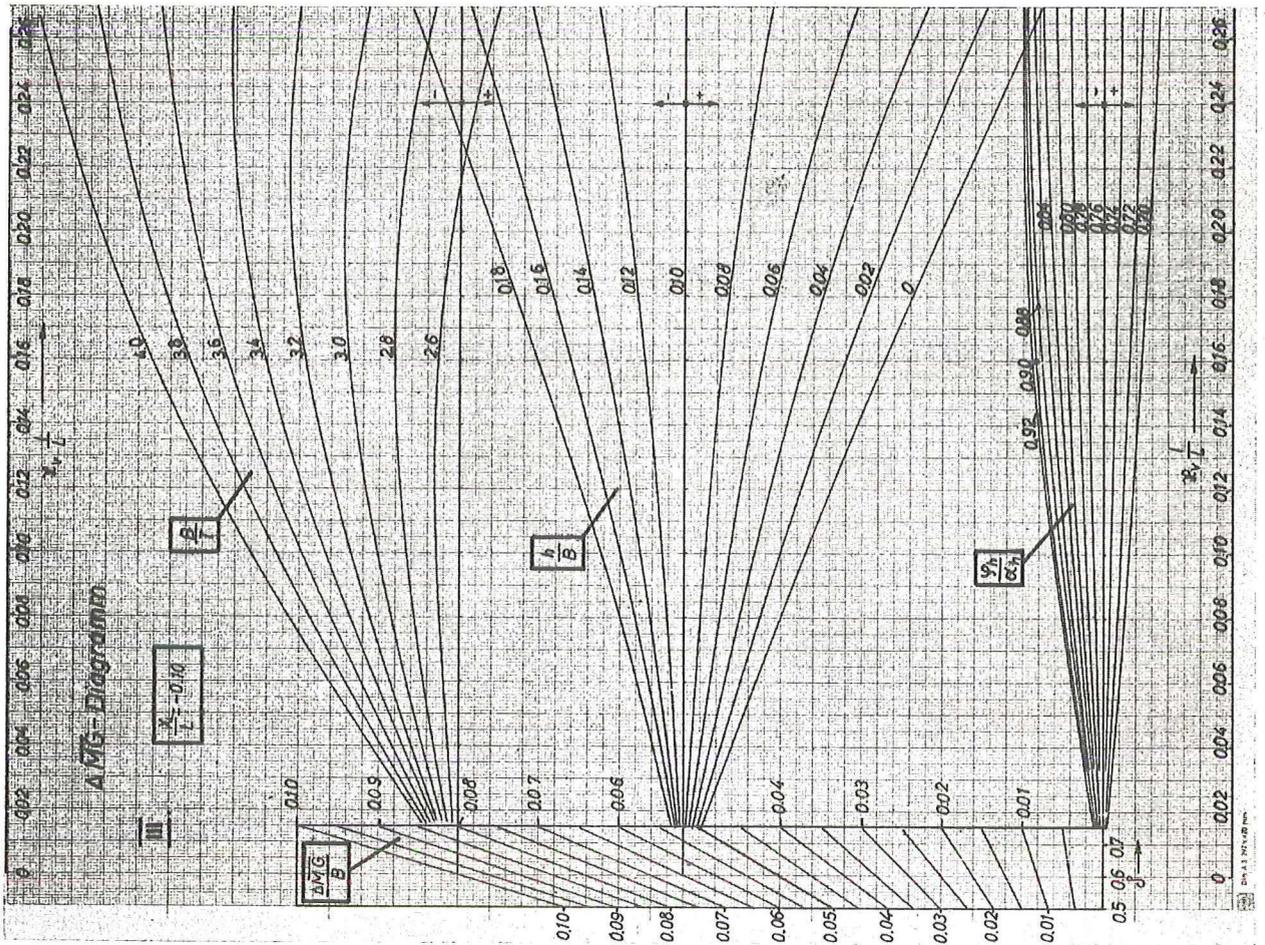
Indizes

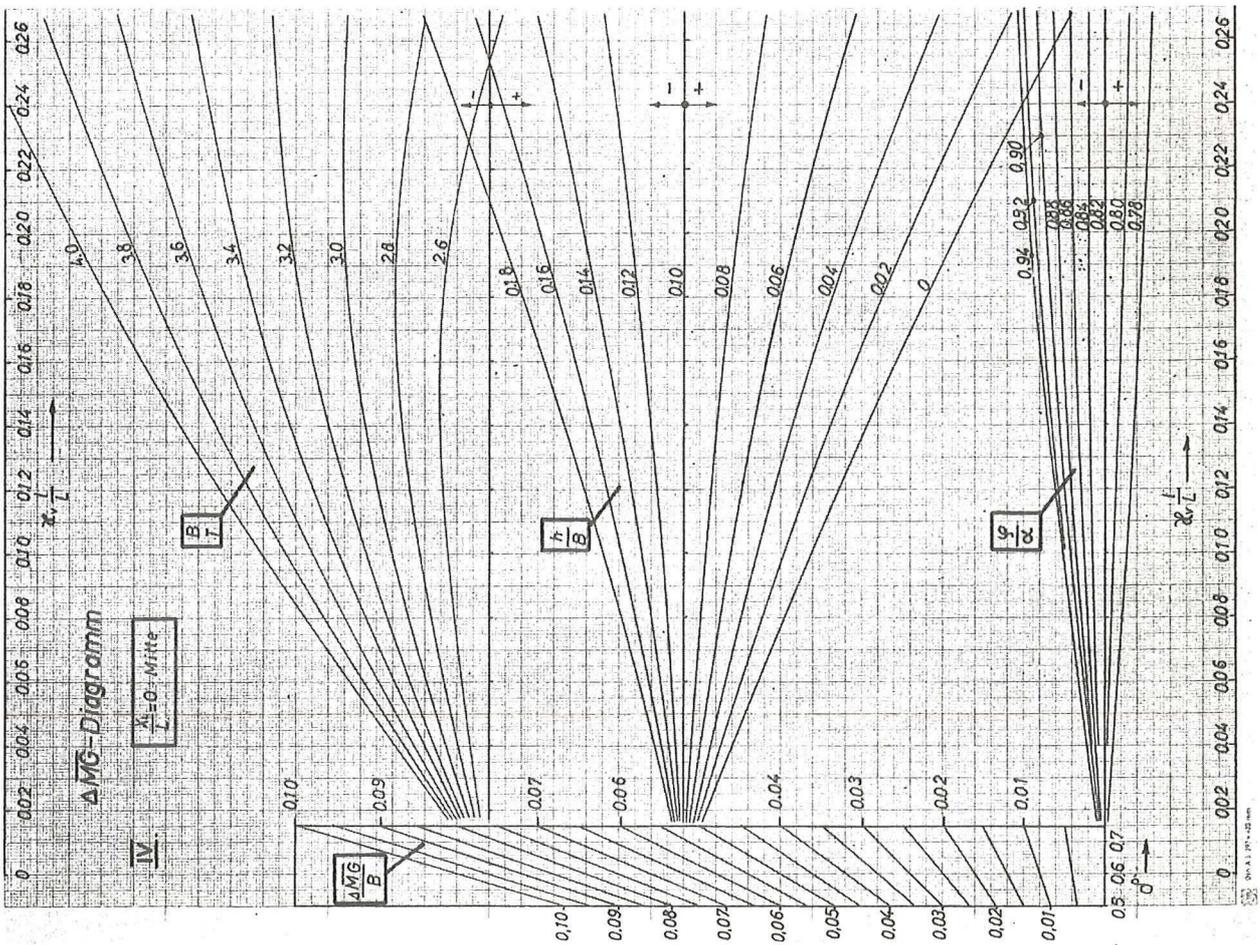
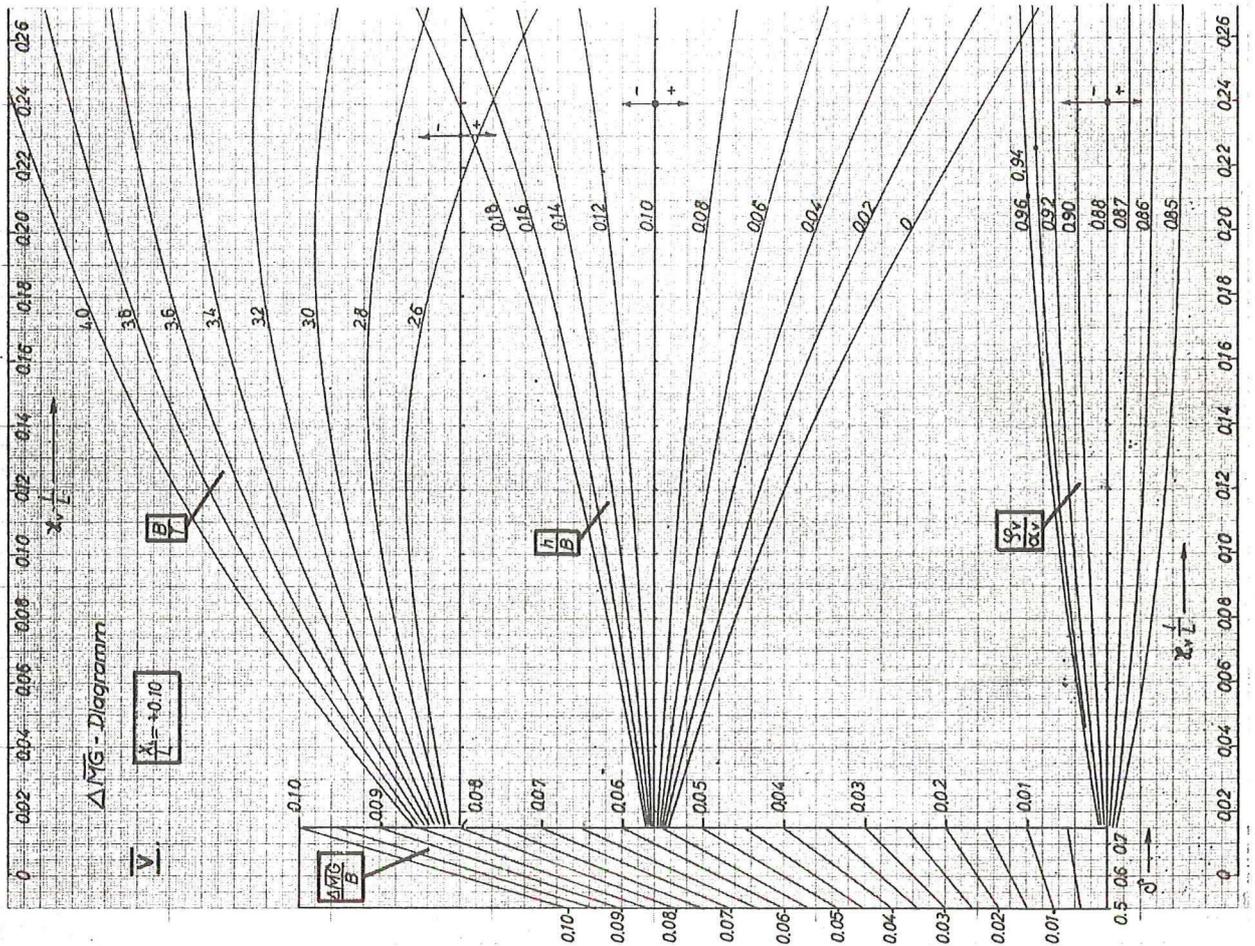
0	Auf die Ausgangsschwimmlage $WL_0$ bezogen
1	Auf die eingetauchte und vertrimmte Schwimmlage $WL_1$ bezogen
$\varphi$	Auf die um den Winkel $\varphi$ gekrängte Endschwimmlage $WL_\varphi$ bezogen
v	vorn
m	Mitte
h	hinten
o	oben
u	unten
rest	Auf den Restschiffkörper bezogen (Methode des wegfallenden Auftriebs)
CWL	Auf die Konstruktionswasserlinie bezogen

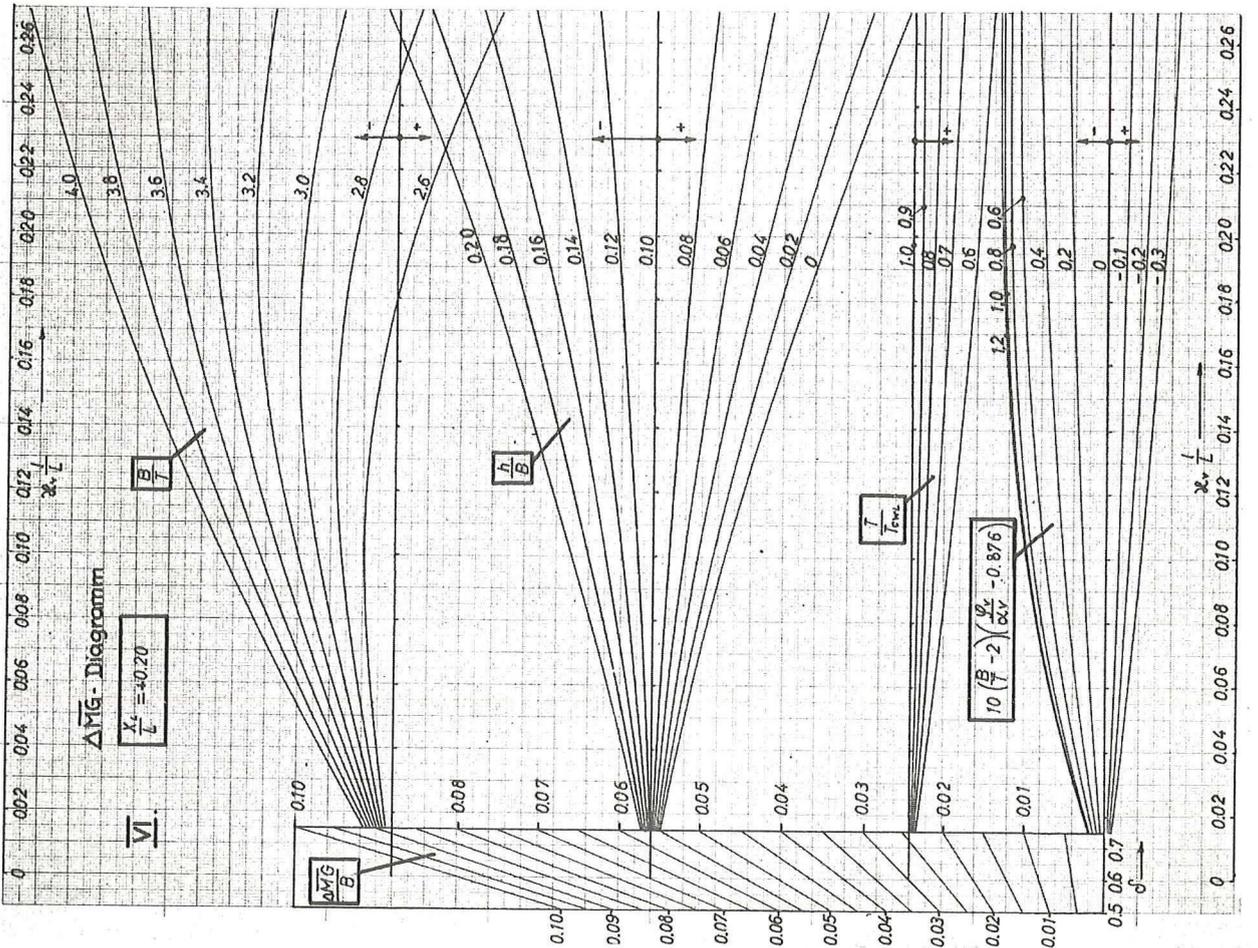
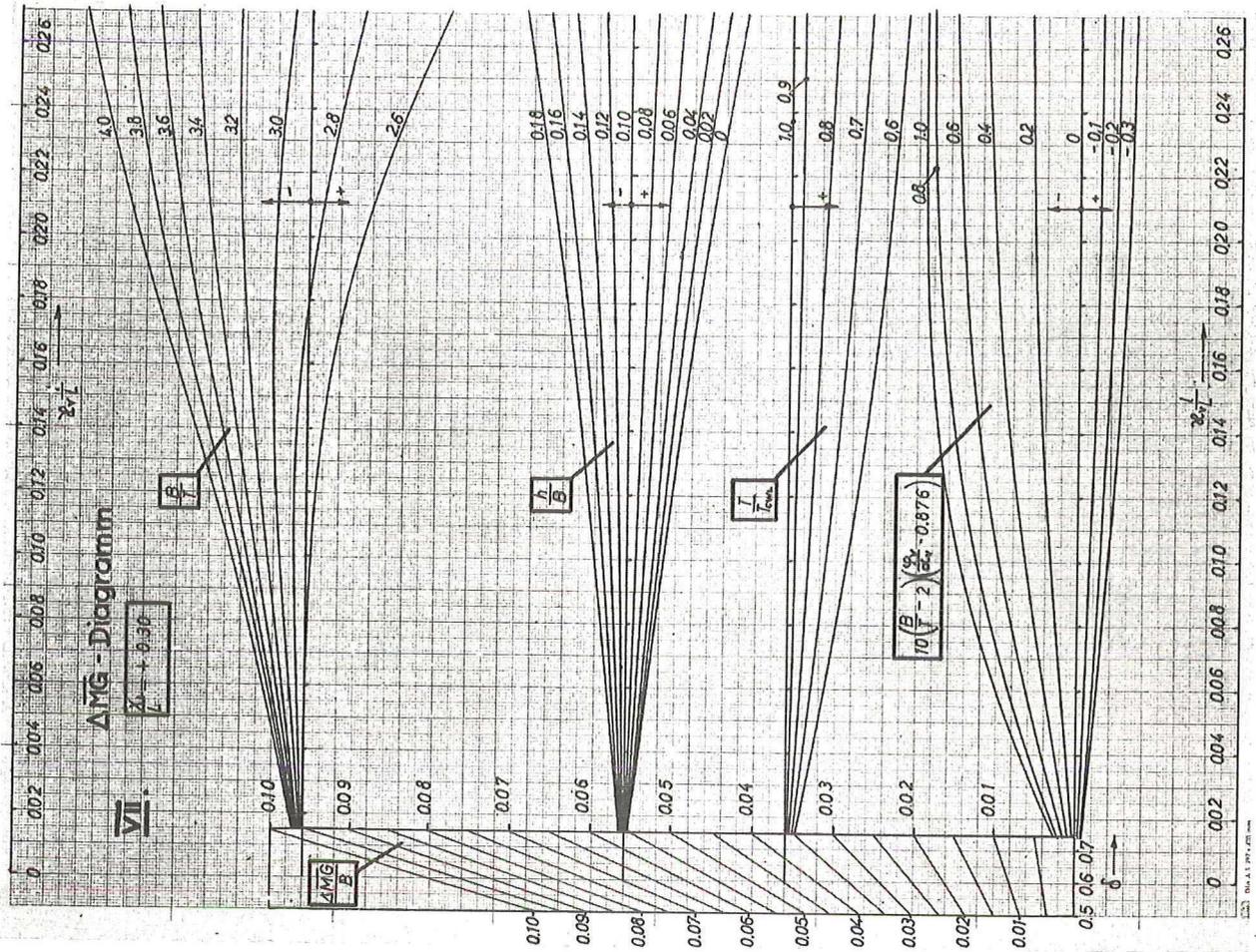
Anhang

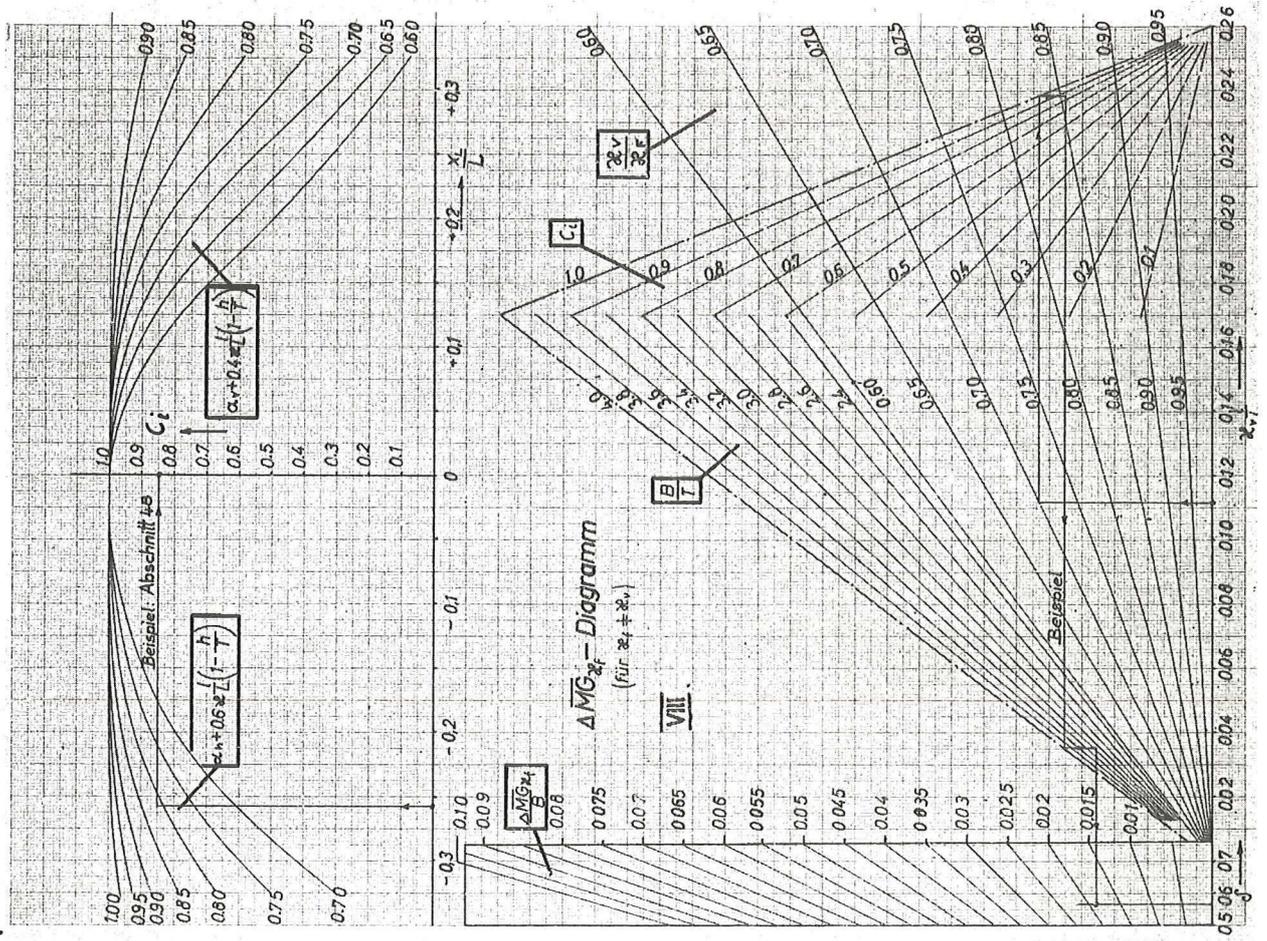
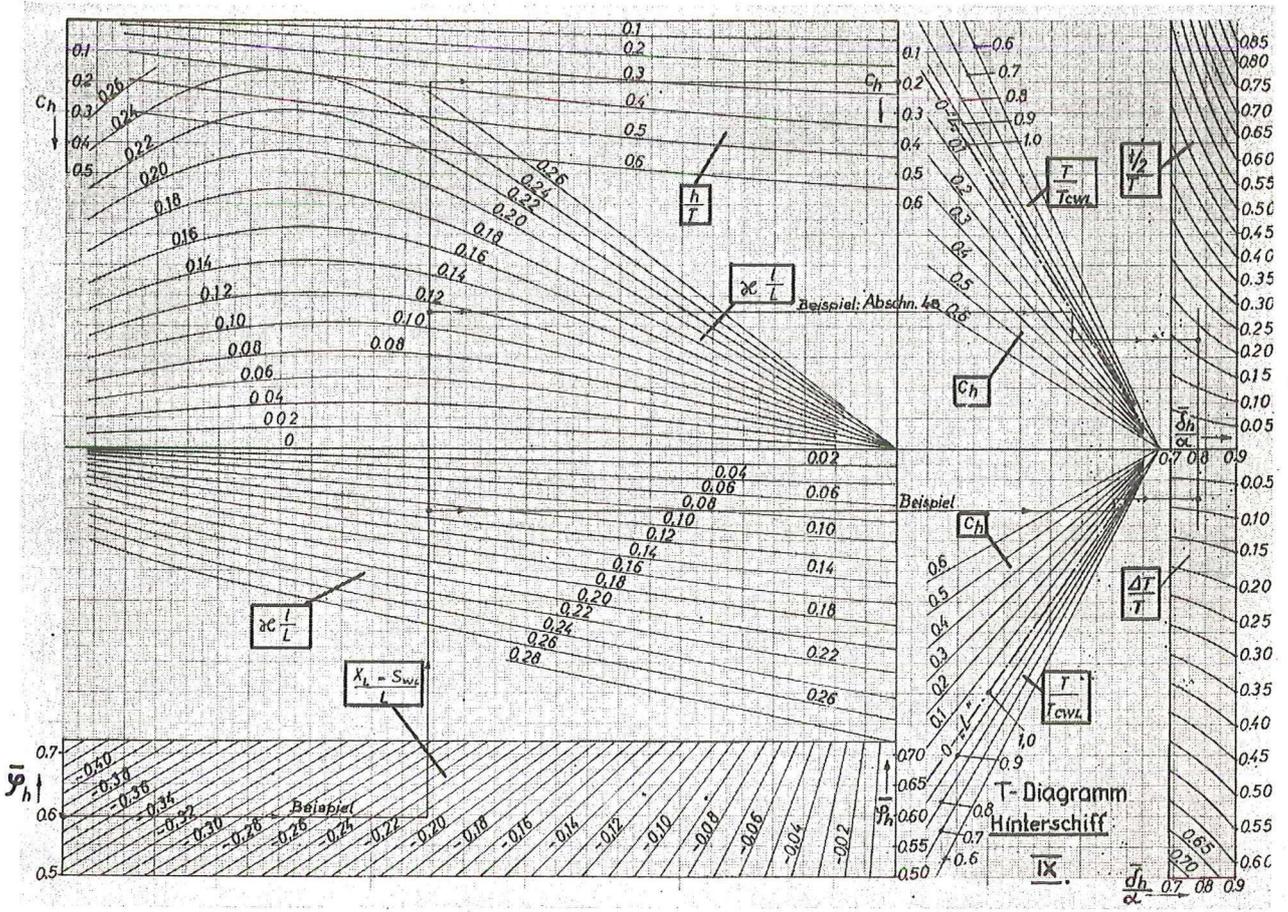
Entwurfsdiagramme über das Leckverhalten von Schiffen  
(Diagramm I bis XI)













## FACTOREN VOOR DE VULBARE LENGTE IN HET ACHTERSCHIP

C <sub>b</sub>	S <sub>a</sub> /D	All		15% L <sub>pp</sub>		20% L <sub>pp</sub>		30% L <sub>pp</sub>		40% L <sub>pp</sub>		45% L <sub>pp</sub>	
		m.	a.	m.	a.	m.	a.	m.	a.	m.	a.	m.	a.
0.60	0.15	41.2	0.275	57.4	0.077	57.7	0.045	66.9	0.021	96.3	-0.013	104.9	-0.020
	0.08	40.0	0.250	55.9	0.044	55.2	0.018	63.7	0.001	92.0	-0.017	104.3	-0.022
0.62	0.15	40.9	0.268	56.6	0.072	56.8	0.044	66.0	0.024	95.3	-0.008	105.1	-0.017
	0.08	39.4	0.248	54.9	0.041	54.2	0.017	62.8	0.004	91.2	-0.013	104.3	-0.019
0.64	0.15	40.6	0.261	55.9	0.067	55.9	0.043	65.1	0.027	94.4	-0.004	105.2	-0.014
	0.08	39.0	0.244	53.9	0.037	53.2	0.016	62.1	0.006	90.4	-0.009	104.3	-0.016
0.66	0.15	40.4	0.253	55.2	0.062	55.1	0.041	64.4	0.029	93.6	0.000	105.2	-0.012
	0.08	38.6	0.238	53.1	0.033	52.4	0.015	61.5	0.008	89.6	-0.005	104.2	-0.013
0.68	0.15	40.2	0.245	54.5	0.056	54.4	0.039	63.8	0.032	92.8	0.004	105.2	-0.009
	0.08	38.3	0.229	52.2	0.028	51.6	0.014	61.0	0.009	88.9	-0.001	104.1	-0.010
0.70	0.15	40.0	0.235	53.9	0.051	53.6	0.037	63.3	0.035	92.1	0.008	105.2	-0.006
	0.08	38.1	0.219	51.5	0.023	50.9	0.013	60.7	0.011	88.2	0.003	104.1	-0.007
0.72	0.15	39.9	0.225	53.2	0.046	53.0	0.036	62.9	0.038	91.5	0.012	105.2	-0.003
	0.08	38.0	0.207	50.7	0.018	50.2	0.012	60.6	0.012	87.6	0.007	104.2	-0.004
0.74	0.15	39.8	0.215	52.6	0.042	52.3	0.036	62.6	0.041	91.1	0.016	105.4	0.000
	0.08	38.0	0.194	49.9	0.015	49.5	0.012	60.5	0.014	87.2	0.011	104.4	-0.001
0.76	0.15	39.7	0.203	51.9	0.040	51.7	0.038	62.5	0.044	90.9	0.020	105.7	0.002
	0.08	38.0	0.180	49.1	0.013	49.0	0.013	60.5	0.017	86.9	0.015	104.7	0.001
0.78	0.15	39.7	0.190	51.2	0.040	51.1	0.041	62.5	0.048	90.9	0.023	106.1	0.005
	0.08	38.1	0.166	48.2	0.013	48.4	0.015	60.5	0.020	86.7	0.018	105.1	0.004
0.80	0.15	39.8	0.176	50.3	0.041	50.5	0.046	62.6	0.052	91.0	0.027	106.7	0.008
	0.08	38.2	0.152	47.2	0.015	47.9	0.018	60.6	0.024	86.7	0.021	105.7	0.006

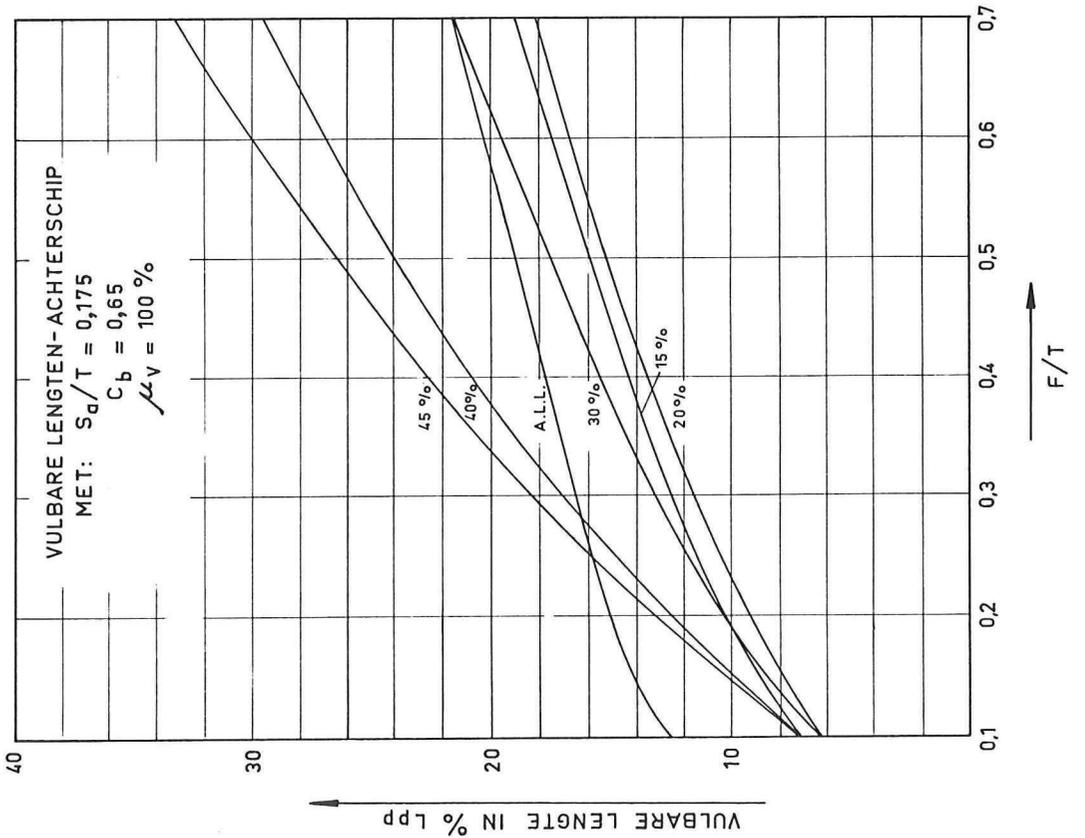
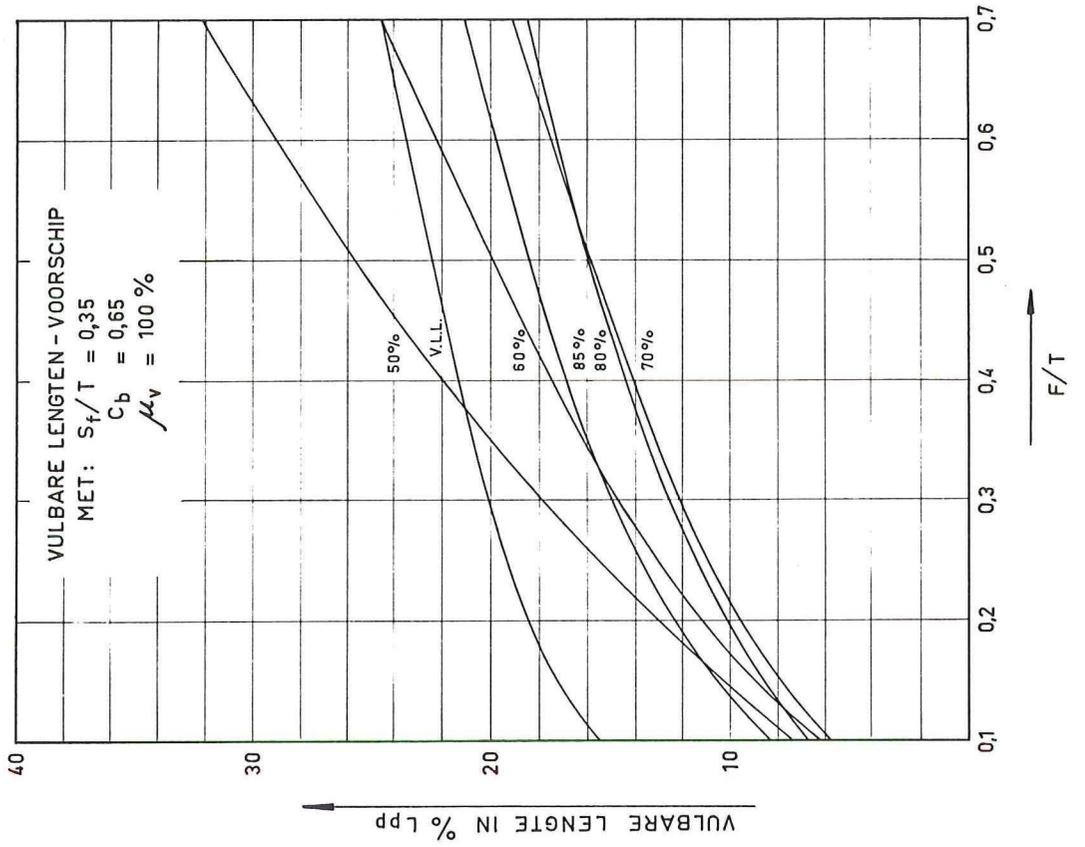
## FACTOREN VOOR DE VULBARE LENGTE IN HET VOORSCHIP

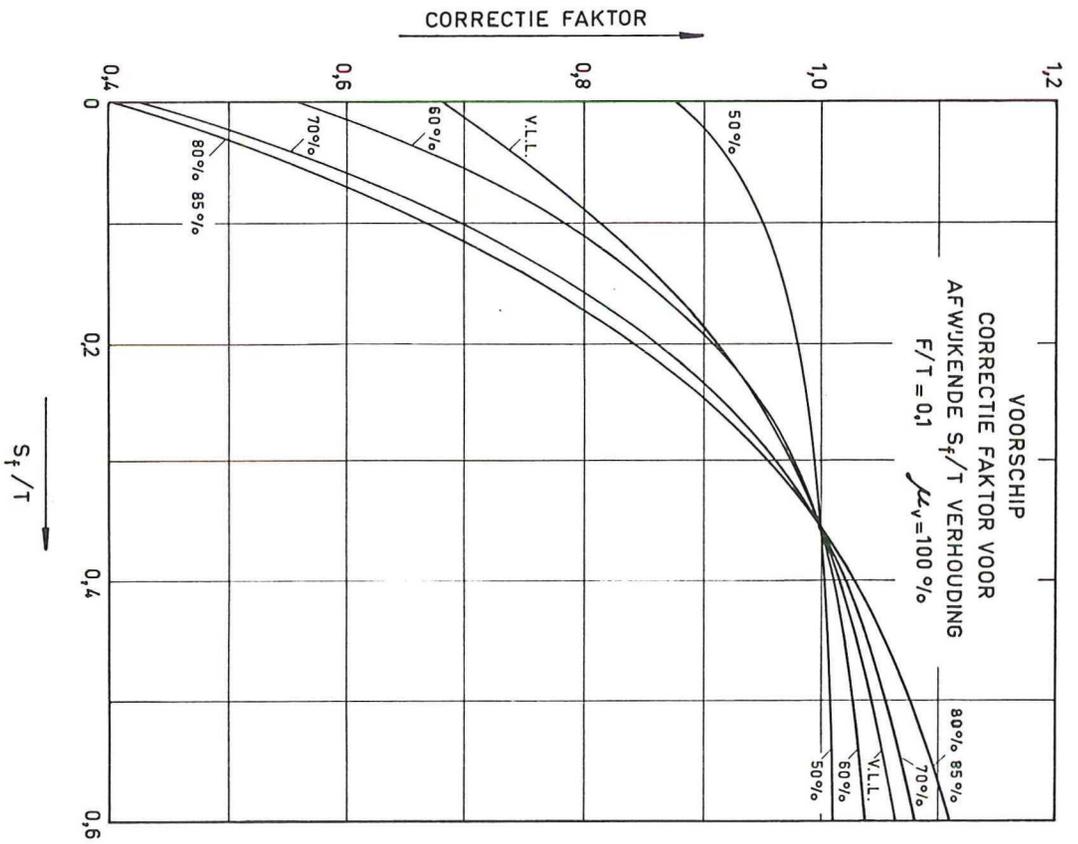
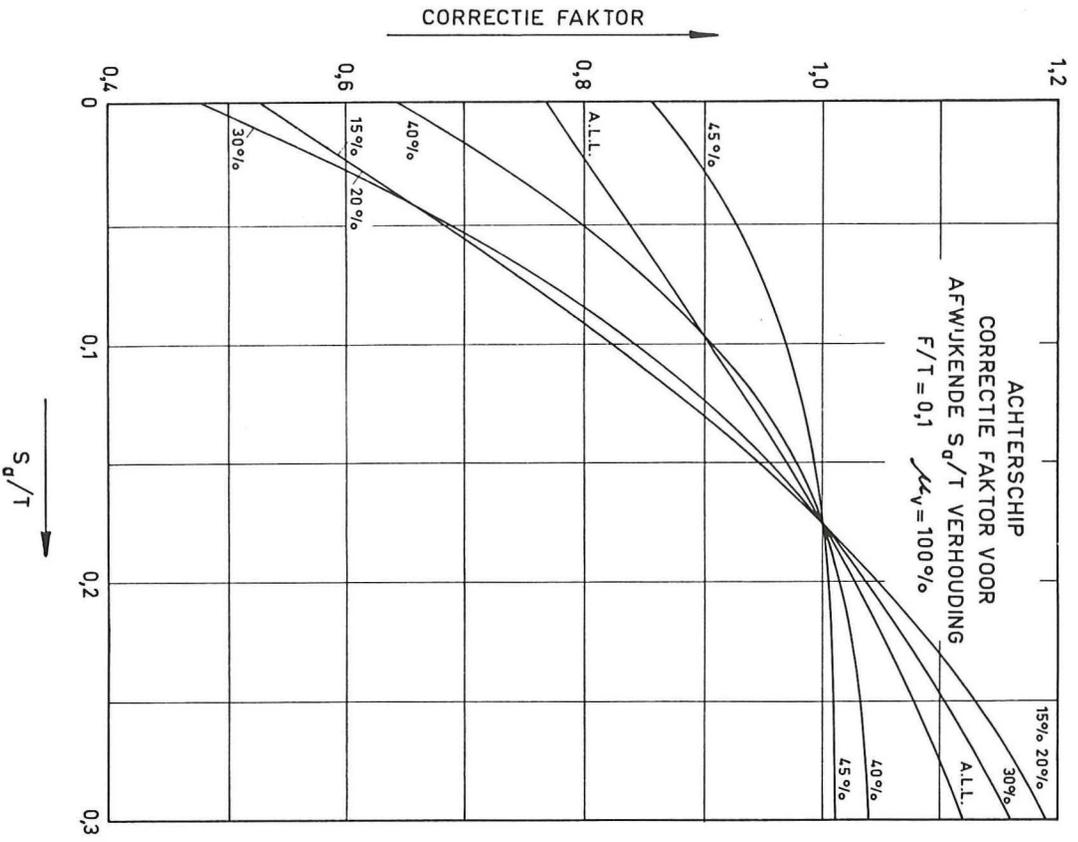
C <sub>b</sub>	S <sub>f</sub> /D	50% L <sub>pp</sub>		60% L <sub>pp</sub>		70% L <sub>pp</sub>		80% L <sub>pp</sub>		85% L <sub>pp</sub>		V11	
		m.	a.	m.	a.	m.	a.	m.	a.	m.	a.	m.	a.
0,60	0.30	98.5	-0.017	72.9	0.012	55.7	0.048	56.3	0.080	61.7	0.115	40.2	0.379
	0.16	97.0	-0.017	68.4	0.006	51.2	0.035	49.1	0.077	56.9	0.091	36.8	0.379
0,62	0.30	99.4	-0.015	74.2	0.012	56.0	0.045	55.4	0.077	60.8	0.110	40.1	0.368
	0.16	98.2	-0.015	69.5	0.007	51.4	0.032	48.4	0.073	55.8	0.087	36.8	0.365
0,64	0.30	100.3	-0.012	75.3	0.013	56.2	0.044	54.7	0.074	59.9	0.104	39.9	0.359
	0.16	99.2	-0.012	70.4	0.009	51.6	0.031	47.8	0.069	54.6	0.083	36.8	0.353
0,66	0.30	101.1	-0.009	76.2	0.015	56.3	0.044	53.9	0.071	59.0	0.098	39.6	0.350
	0.16	100.2	-0.010	71.0	0.012	51.8	0.031	47.3	0.065	53.4	0.079	36.7	0.341
0,68	0.30	101.9	-0.005	76.9	0.018	56.4	0.046	53.2	0.068	58.2	0.093	39.4	0.342
	0.16	101.0	-0.006	71.6	0.015	52.0	0.032	46.7	0.062	52.3	0.076	36.6	0.330
0,70	0.30	102.6	-0.002	77.6	0.022	56.6	0.048	52.5	0.066	57.3	0.087	39.1	0.333
	0.16	101.8	-0.004	72.1	0.019	52.2	0.034	46.2	0.059	51.2	0.072	36.5	0.319
0,72	0.30	103.5	0.001	78.4	0.025	56.9	0.050	52.0	0.065	56.4	0.082	38.8	0.324
	0.16	102.7	-0.001	72.8	0.023	52.5	0.037	45.8	0.057	50.1	0.069	36.4	0.308
0,74	0.30	104.4	0.004	79.5	0.028	57.4	0.053	51.5	0.064	55.6	0.076	38.6	0.314
	0.16	103.6	0.002	73.9	0.026	52.9	0.039	45.4	0.056	49.0	0.066	36.3	0.296
0,76	0.30	105.6	0.006	81.0	0.029	58.2	0.056	51.0	0.064	54.9	0.070	38.4	0.303
	0.16	104.8	0.004	75.3	0.028	53.6	0.042	45.1	0.054	48.0	0.062	36.2	0.283
0,78	0.30	107.0	0.008	83.1	0.030	59.4	0.059	50.7	0.065	54.2	0.065	38.4	0.288
	0.16	106.3	0.006	77.2	0.028	54.5	0.046	44.9	0.054	47.1	0.059	36.2	0.269
0,80	0.30	108.6	0.009	85.6	0.030	60.9	0.062	50.4	0.066	53.5	0.059	38.5	0.272
	0.16	108.0	0.007	79.5	0.028	55.6	0.049	44.8	0.054	46.3	0.055	36.2	0.253

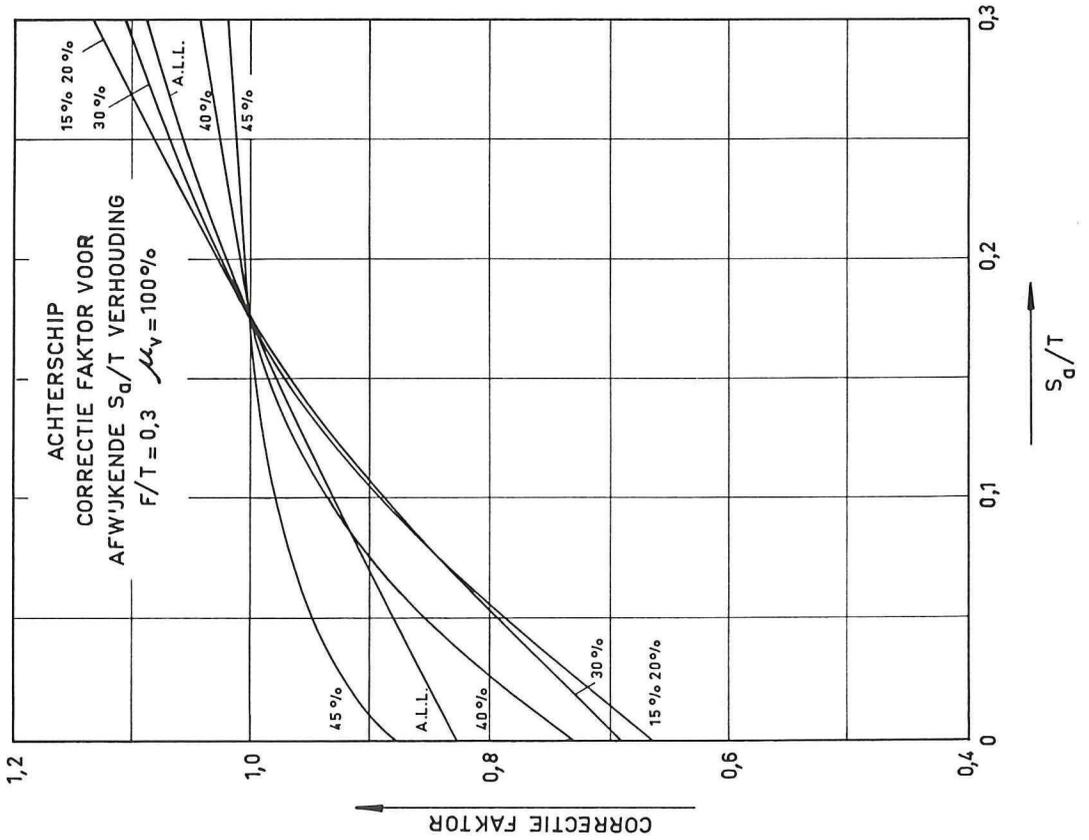
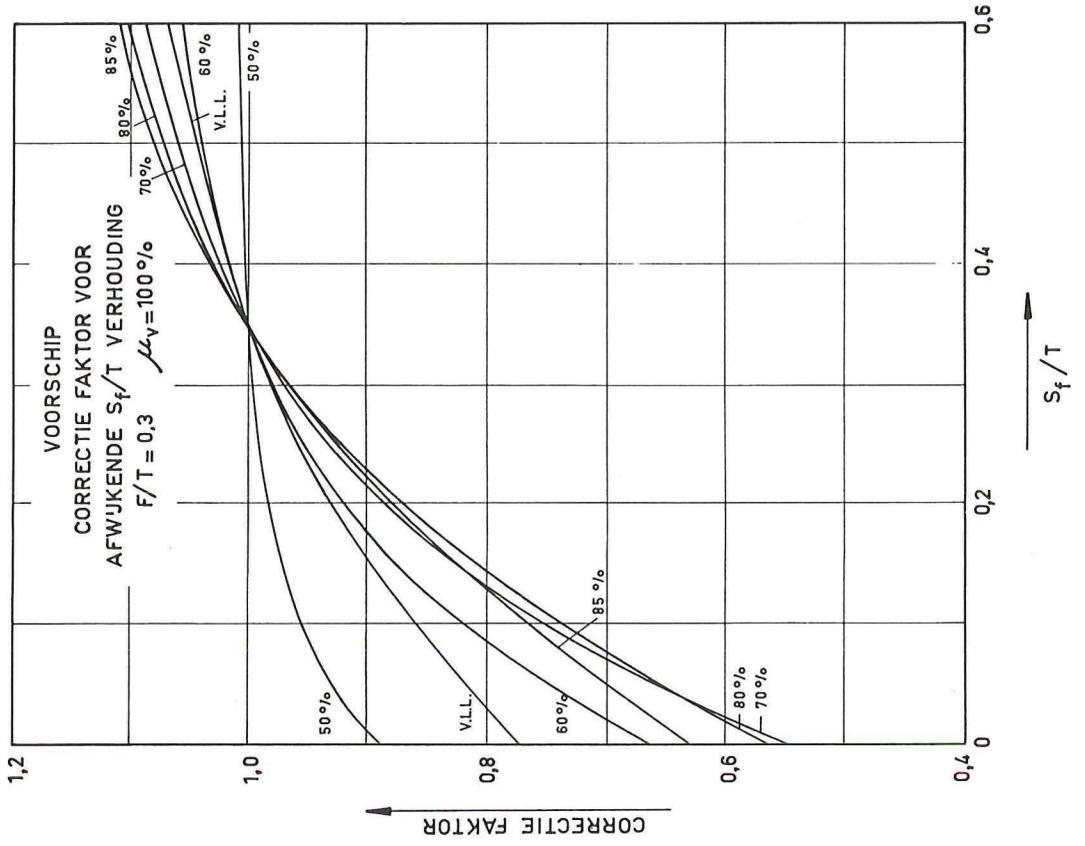
vulbare lengte  $l = \frac{80}{\mu} \cdot m (a + f)$ .

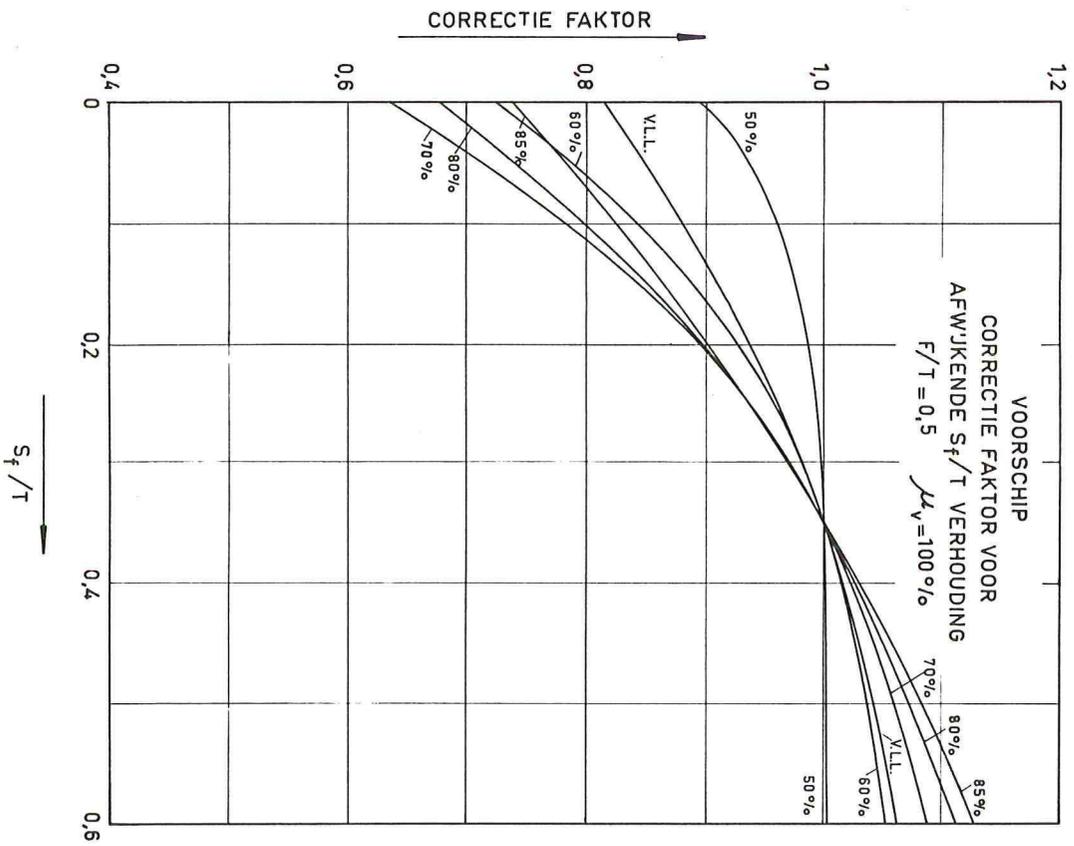
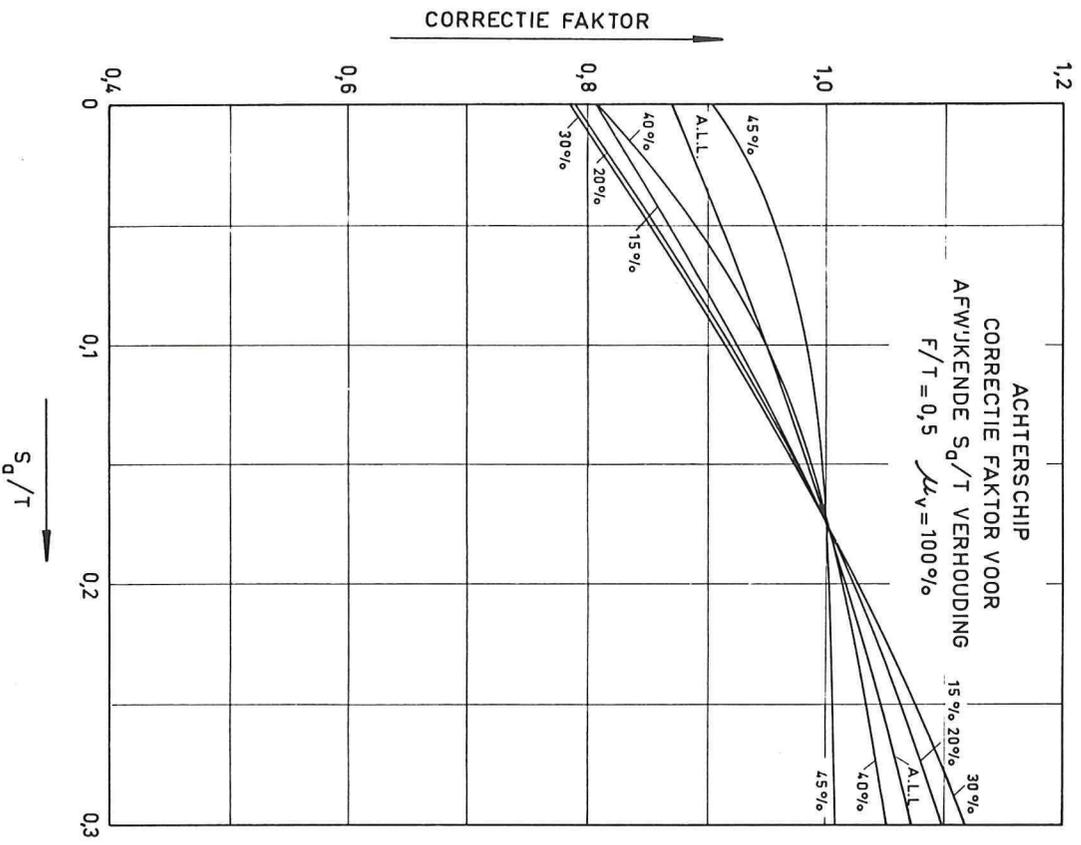
tabellen gelden voor  $0,18 \leq f = \frac{F}{D} \leq 0,38$ .

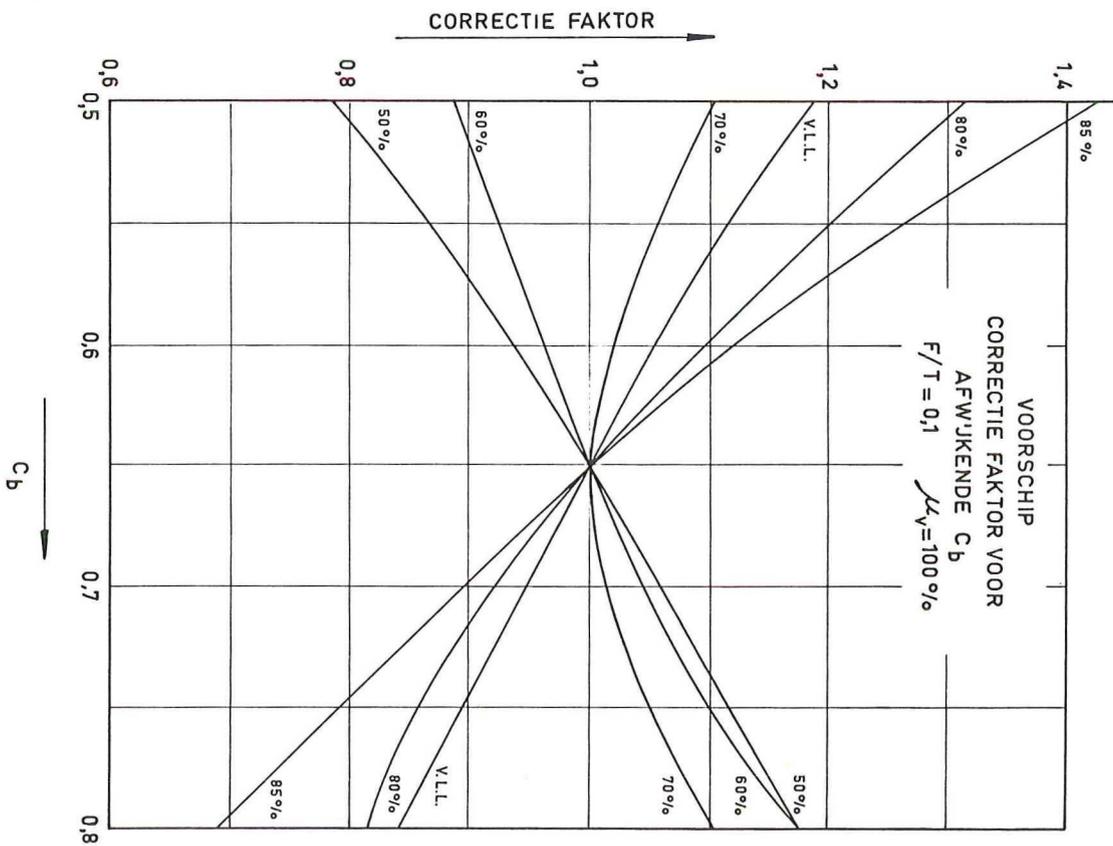
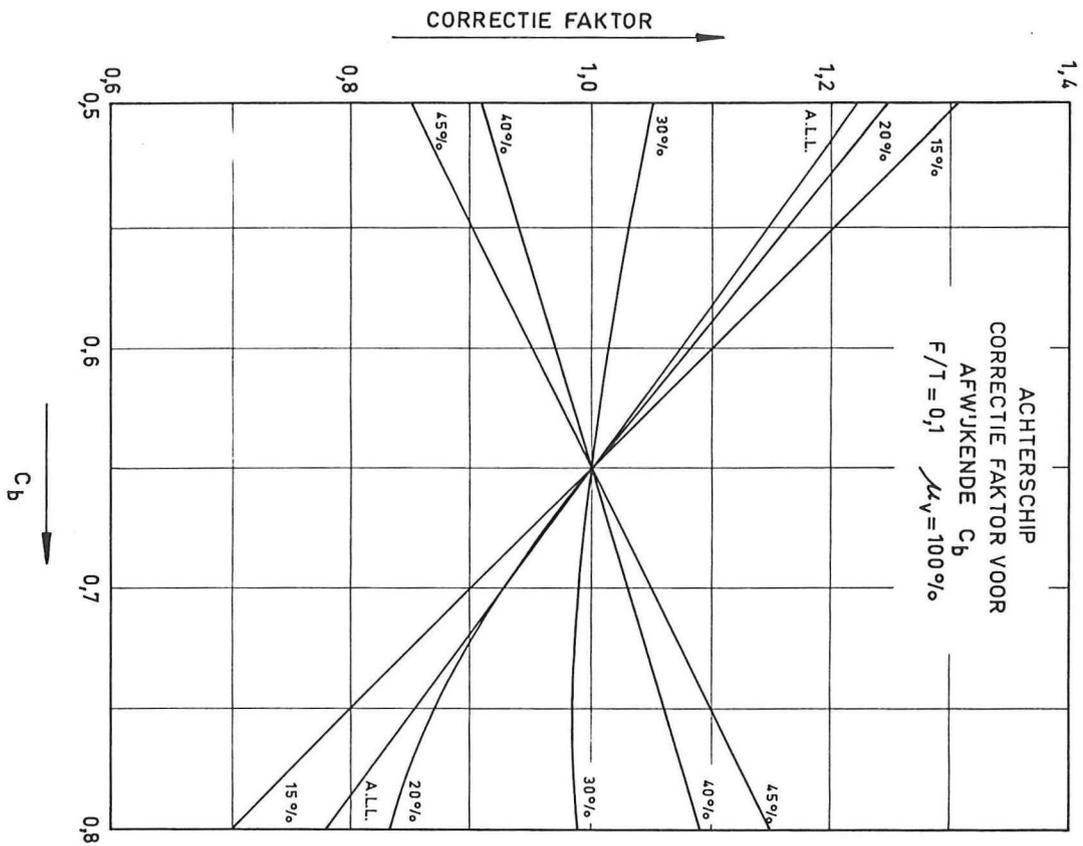
Uit: "Subdivision of Passenger Vessels"  
TINA 1920  
door: G. Webster.

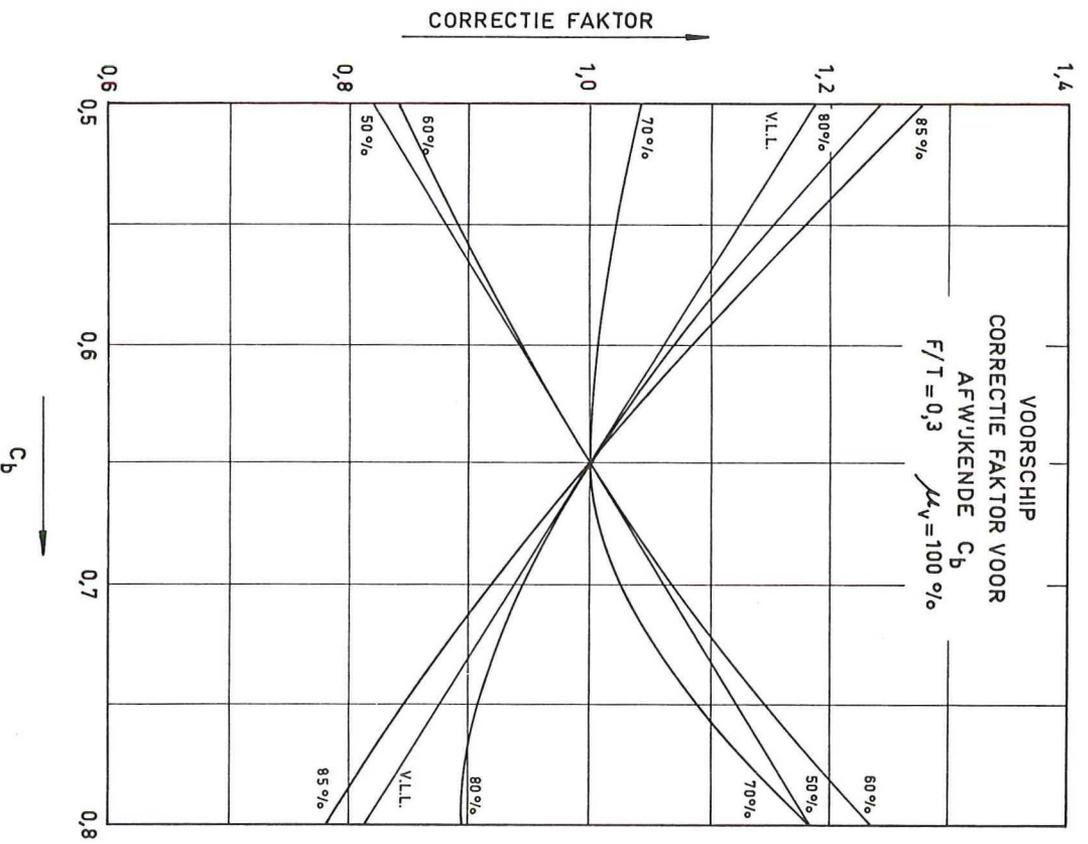
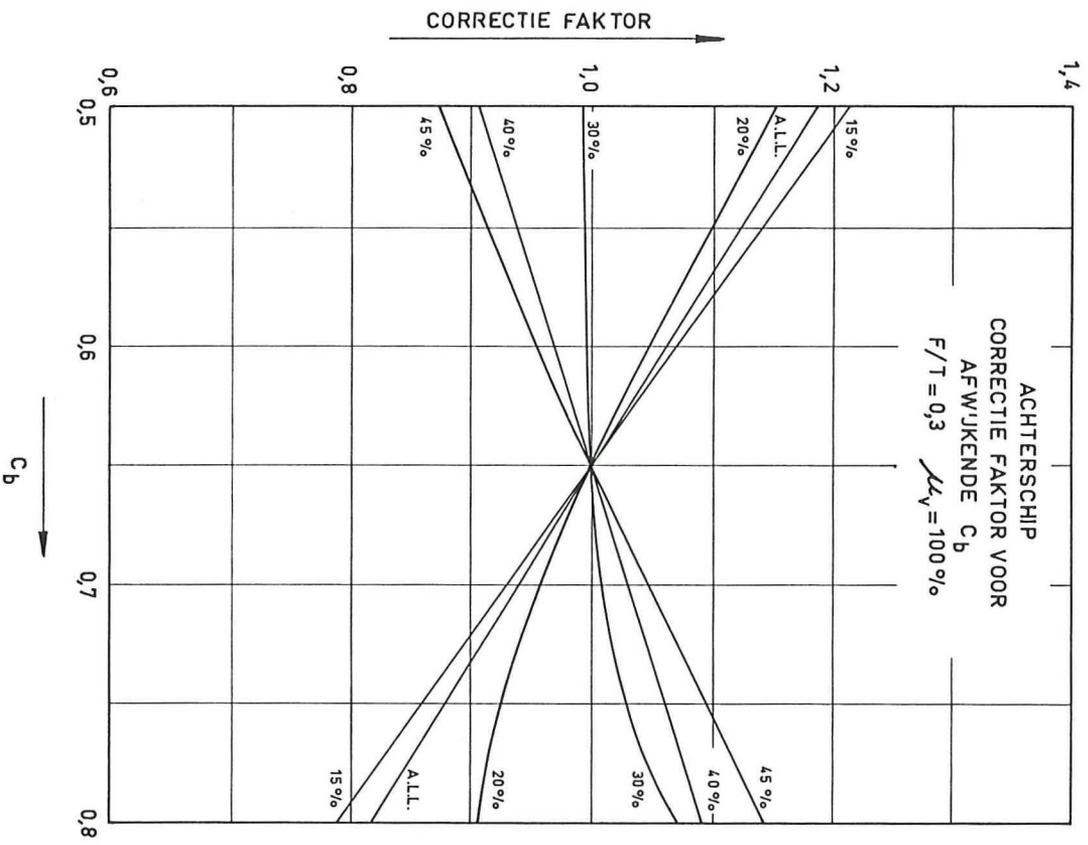


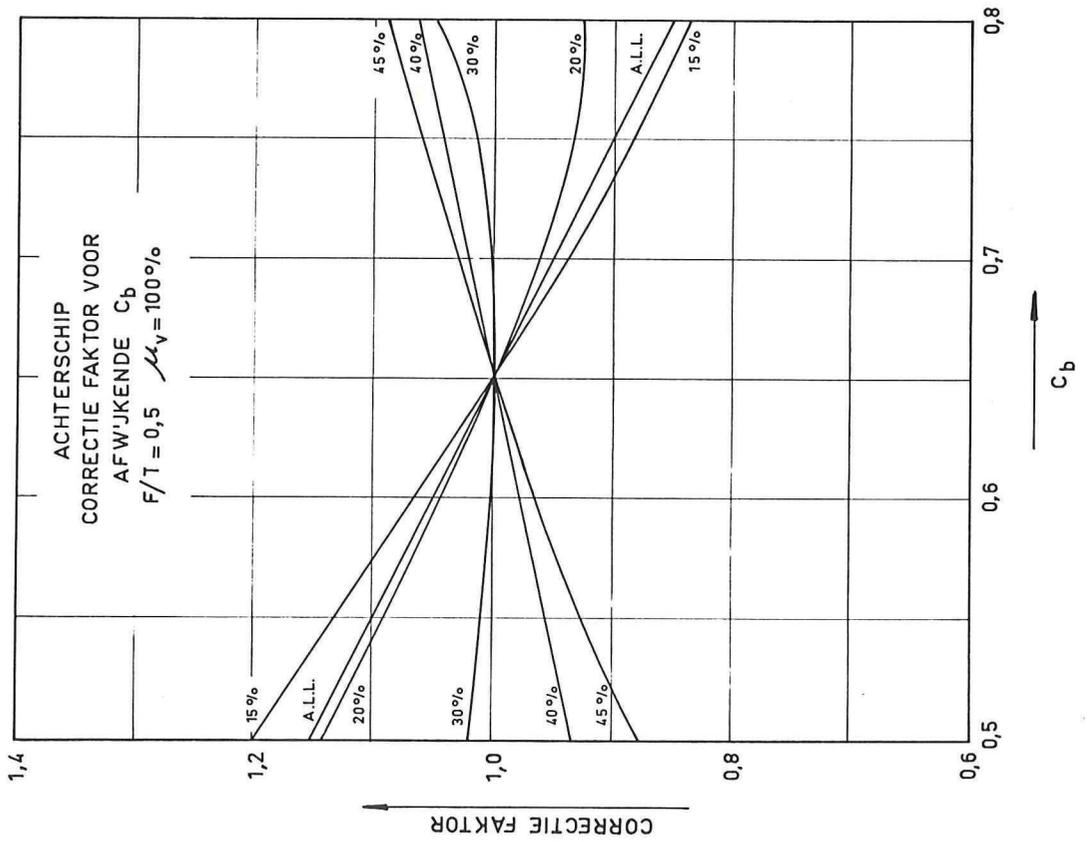
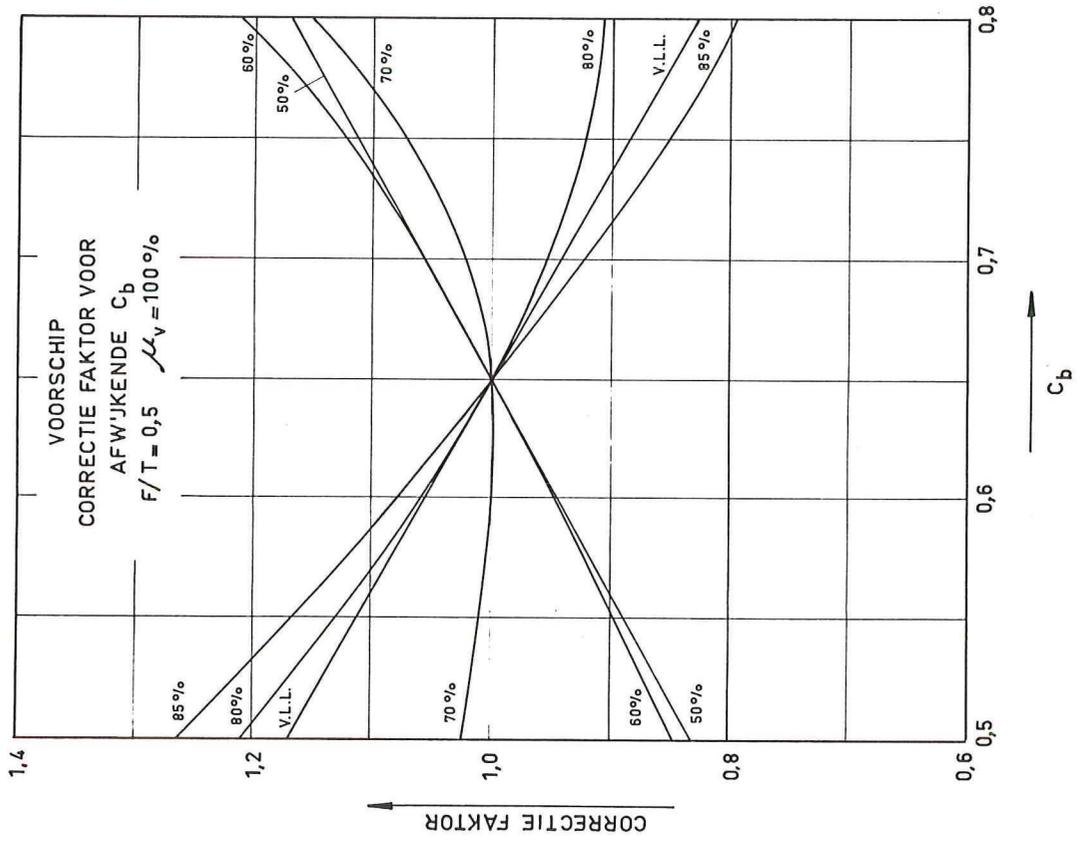


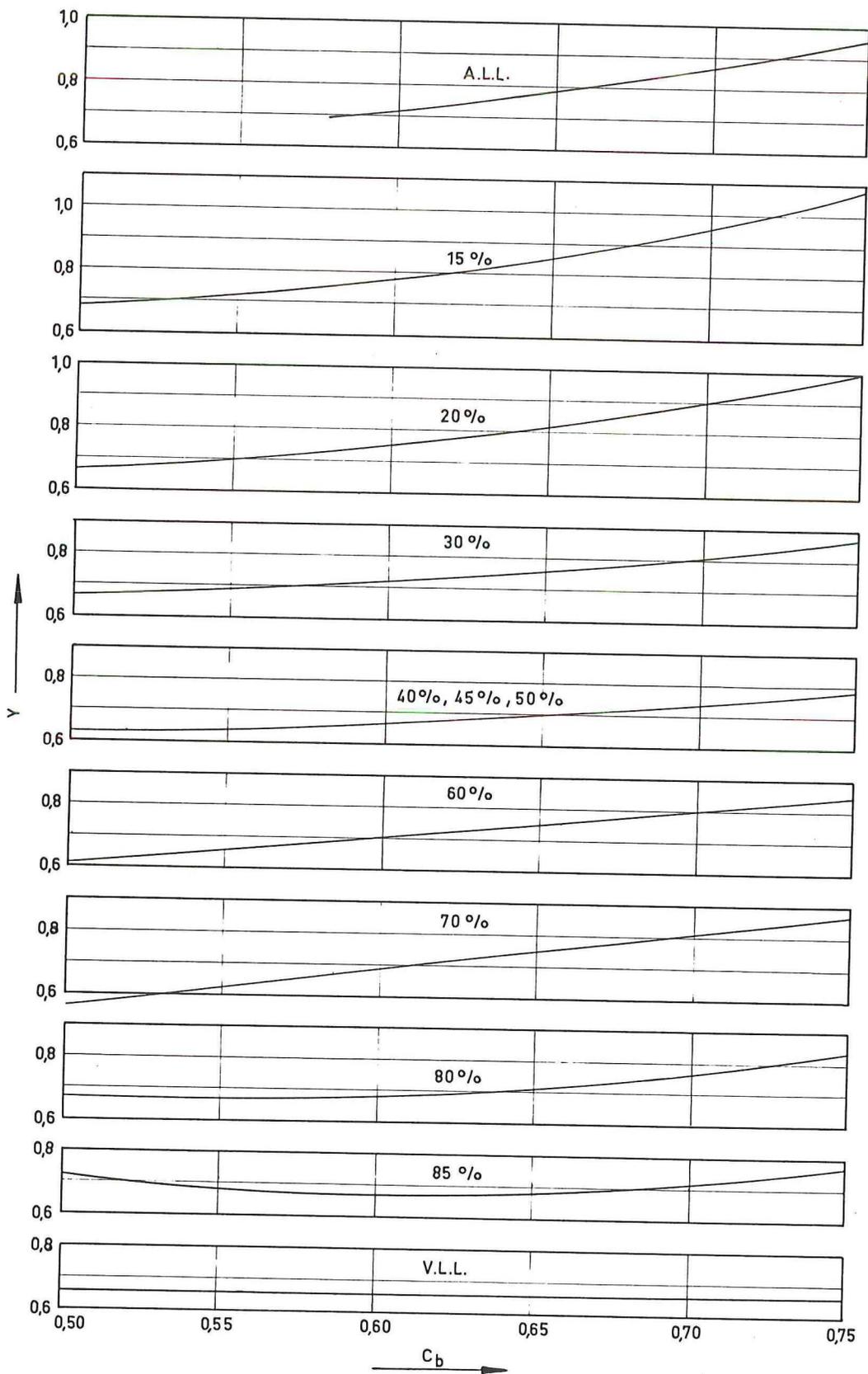












$$\text{VORMFAKTOR} = y \cdot \left( \frac{C_{wp}}{C_b} \right)^2$$