

230 | 1964

## SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

J. Bakenhus

### Untersuchung über die Sicherheit lecker Schiffe

**TUHH**

*Technische Universität Hamburg-Harburg*

Untersuchungen über die Sicherheit leerer Schiffe

Abschlußbericht zu den Forschungsvorhaben der Deutschen Forschungsgemeinschaft We 112/24 und 25

Sachbearbeiter

J. Bakenhus

Leiter der  
Forschungsaufgabe

K. Wendel

Hamburg 1964

## I. Einleitung und Inhaltsübersicht

Von einem Aufsatz von Wendel [1] ausgehend, sind in der vorliegenden Arbeit einige Untersuchungen über die Sicherheit lecker Schiffe angestellt worden. Es wird gezeigt, wie man auf dem Begriff der mathematischen Wahrscheinlichkeit basierende Bewertungsmaße für die Sicherheit lecker Schiffe finden kann, wenn man außer Lecklänge und Treffstelle noch andere zufällige Veränderliche berücksichtigt. Solche Veränderliche sind Seegang, krängende Momente und verschiedene den Betriebszustand eines Schiffes kennzeichnende Größen, von denen im Leckfall der Restfreibord und die verbleibende metazentrische Höhe abhängen.

Diese Fragen haben ein gewisses aktuelles Interesse: Seit der Internationalen Konferenz zum Schutze menschlichen Lebens auf See, die 1960 in London stattgefunden hat, ist man an vielen Stellen dabei, nach besseren Grundlagen für Sicherheitsvorschriften zu suchen. Bei solchen Vorschriften muß einer Vielzahl von Einflüssen Rechnung getragen werden. Dabei genügt es nicht, sich auf die Untersuchung gewisser physikalischer Zusammenhänge zu beschränken. Dies würde nur zu der Feststellung führen, daß ja nach den jeweils vorliegenden Umständen (die alle auftreten können), ganz verschiedene Resultate zu erwarten sind. Mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsrechnung

lassen sich logische Zusammenhänge angeben, die in solchen Fällen weiterhelfen: . Zwar führen sie in vielen Fällen noch nicht zu konkreten Aussagen, weil es noch an statistischen Ausgangsdaten mangelt. Sie zeigen aber einerseits, welche statistischen Untersuchungen notwendig sind, um zu geeigneten Daten zu kommen. Andererseits ist aber auch die Kenntnis solcher logischen Zusammenhänge an sich für die Aufstellung von Sicherheitsvorschriften schon sehr nützlich.

In Abschnitt II wird untersucht, wodurch leckere Schiffe gefährdet werden und welche Bedingungen erfüllt sein müssen, damit sie nicht sinken, kentern oder übermäßig krängen. Fragen der Auswirkung verschiedener Betriebszustände werden in Abschnitt III behandelt.

Leckere Schiffe können u.a. auch durch Bewegungen des Wassers im geöffneten Raum und durch krängende Momente, die durch Seegang bzw. Wind hervorgerufen werden, gefährdet werden. In Abschnitt IV werden einige Betrachtungen über die Häufigkeitsverteilungen von Wind und Seegang bei Schiffsunfällen angestellt. Entsprechend den Seegangs- und Windverhältnissen sind auch die Amplituden der Leckwasserbewegung und die Winddruckmomente zufällig verteilt. Für Schiffe, die in einem bestimmten Zustand schwimmen, kann man deshalb als Maß für die Sicherheit die Wahrscheinlichkeit ermitteln, mit der die Sicherheitsanforderungen erfüllt sind. Berechnungen

solcher Art werden in Abschnitt V angestellt. Zunächst wird dort unter der Annahme, daß Seegang und Wind nicht gleichzeitig auftreten, für beide Arten der Gefährdung der Einfluß von Leckgröße, Restfreibord und Rest- $\overline{MG}$  auf die Sicherheit bestimmt. Auch der Fall, daß außer dem Winddruckmoment ein weiteres konstantes Moment auftritt, wird untersucht. Ferner wird gezeigt, wie die Sicherheit ermittelt werden kann, wenn Wind und Seegang gleichzeitig auftreten. Schließlich wird noch darauf eingegangen, wie die in Abschnitt III näher untersuchte Veränderlichkeit von Restfreibord und Rest- $\overline{MG}$  berücksichtigt werden kann.

In Abschnitt VI wird an einem Beispiel gezeigt, wie die Wahrscheinlichkeit berechnet werden kann, wenn das Schiff außer durch Querschotte noch durch Längsschotte unterteilt ist.

## II. Aufstellung von Sicherheitskriterien und Ermittlung einiger gefährdender Einflüsse

1.) Sicherheitsvorschriften: Es ist heute noch üblich, ein leckes Schiff dann als sicher anzusehen, wenn bestimmte Bedingungen erfüllt sind. Z.B. wird im ISSV [5] gefordert, daß ein Restfreibord  $Fb_r$ <sup>1)</sup> von mindestens 3" und ein Rest-MG  $\overline{MG}_r$ <sup>1)</sup> von 0,05 m vorhanden sein müssen. Diese Bedingungen sind aber nur bedingt als Kriterium für die Sicherheit brauchbar, weil sie eine willkürliche Vereinfachung sind.

In Wirklichkeit sind die Zusammenhänge komplizierter. Es ist zweifellos nicht richtig anzunehmen, daß ein Schiff, welches die genannten Bedingungen gerade erfüllt, sicher ist und eines, das die Mindestforderungen nur wenig unterschreitet, unsicher ist. Ebenso verfehlt wäre die Folgerung, daß eine Verdoppelung von  $\overline{MG}_r$  bzw.  $Fb_r$  auch eine doppelt so große Sicherheit bewirkt.

2.) Sicherheit lecker Schiffe in glattem Wasser, wenn keine krängenden Momente wirken: Um die Frage nach der Sicherheit leck gewordener Schiffe beantworten zu können, muß zunächst bekannt sein, wodurch sie gefährdet werden.

a) Bei Schiffen, deren Schottendeck innerhalb von Aufbauten liegt, besteht die Gefahr, daß sie nach einer Beschädigung soweit eintauchen, bzw. infolge unsymmetrischer Überflutung soweit krängen, daß Öffnungen im Deck zu Wasser kommen, durch die Wasser in unbeschädigte Abteilungen eindringen kann. Dieses Überlaufen von Wasser kann schließlich zum Sinken oder Kentern führen.

1) Unter Restfreibord  $Fb_r$  ist hier der kleinste Abstand des Schottendecks von der Schwimmwasserlinie zu verstehen.  $\overline{MG}_r$  ist die im Leckfall verbleibende metazentrische Höhe.

Ob es zum Verlust des Schiffes kommt oder nicht, hängt wesentlich davon ab, wieviel Wasser in der Zeiteinheit in den intakten Teil des Schiffes strömt und wie groß die Leistungsfähigkeit der Lenzpumpen ist. Für die weiteren Untersuchungen wird angenommen, daß das Rohrsystem beim Unfall verletzt worden ist oder die Pumpen aus anderen Gründen nicht mehr wirksam eingesetzt werden können. Ebenfalls unbeachtet bleiben die Maßnahmen, die getroffen werden können, wenn das Schiff langsam sinkt, - z.B. das Fluten einiger Zellen, um einen günstigeren Trimm zu erlangen.

Die zulässige Eintauchung bzw. Neigung im Leckfall hängt außer vom Freibord bzw. der Stabilität noch von einigen baulichen Gegebenheiten und von der Lage des Leckraumes ab. So tragen z.B. je nach Konstruktion und Anordnung der Treppenhäuser, Schächte usw. evtl. vorhandene Sülle, Flügelschotte und die Decksbucht zur Vergrößerung des Abstandes der Wasserlinie von der Decksöffnung bei. Wenn Endräume leck werden, kann sich der Sprung ebenfalls günstig

auswirken. Der Einfachheit halber sollen auch diese Einflüsse unberücksichtigt bleiben.

Unter diesen Annahmen lassen sich die Bedingungen, die erfüllt sein müssen, damit solche Schiffe im Leckfall sicher sind, sehr einfach angeben: Das Schiff darf nur bis zu einer

Tauchgrenze eintauchen, die unterhalb des Schottendecks verläuft; außerdem muß sich im Bereich der Neigungen, bei denen Seite Schottendeck noch nicht zu Wasser kommt, ein stabiles Momentengleichgewicht einstellen.

Da im Rahmen dieser Arbeit hauptsächlich Fahrgastschiffe behandelt werden, wird noch als zusätzliche Bedingung ein höchstens zulässiger Neigungswinkel eingeführt. Wenn der Restfreibord so groß ist, daß bis zum Eintauchen von Seite Deck größere Neigungswinkel auftreten können, erscheint eine Begrenzung der Neigung auf etwa  $12^{\circ}$  sinnvoll, da Fahrgäste bei größeren Winkeln erfahrungsgemäß leicht von einer Panik erfaßt werden und so sich selbst und das Schiff in unberechenbarer Weise gefährden. Ein weiterer Grund zur Beschränkung der Neigung ist darin zu sehen, daß bei Kränkungen  $\approx 12^{\circ}$  das Aussetzen der Rettungsboote Schwierigkeiten bereiten kann.

b) Für Schiffe, deren Schottendeck gleichzeitig Wetterdeck ist, können entsprechende Bedingungen formuliert werden. Wenn man annimmt, daß die Festigkeit der Schiffsverbände auch im Leckfall bei allen auftretenden Beanspruchungen ausreichend ist und daß die Schotte, die den Leckraum begrenzen sowie Luken, Einsteigschächte usw. wasserdicht sind, lassen sich die Bedingungen, die erfüllt sein müssen, damit

solche Schiffe nicht sinken, kentern oder übermäßig krängen, in der folgenden Form angeben: Die Reserveschwimmfähigkeit muß größer Null sein und das Momentengleichgewicht muß bei einer Neigung  $\approx 12^\circ$  stabil sein. Auf diese Schiffe soll hier jedoch nicht näher eingegangen werden; die folgenden Untersuchungen beziehen sich ausschließlich auf Schiffe, deren Schottendeck innerhalb von Aufbauten liegt.

3.) Sicherheit leerer Schiffe bei Seegang und krängenden Momenten.

- a) Unter Wirkung des Seegangs wird das Schiff zu Tauch-, Stampf- und Rollbewegungen angeregt. Die Amplituden dieser Bewegungen können so groß werden, daß bei Lecks, die auch den Raum über dem Schottendeck geöffnet haben, das Deck überspült wird.
- b) Weiterhin wird durch den Seegang und die Schiffsbewegungen das im Leckraum stehende Wasser zu Schwingungen angeregt. Diese Schwingungen können so groß werden, daß Wasser durch evtl. vorhandene Öffnungen im Deck, - Schächte, Treppenhäuser und dergl. in unbeschädigte Nachbarabteilungen eindringt und so das Schiff zum Sinken bringt [ 10 ].
- c) Durch krängende Momente kann die Neigung so groß werden, daß das Schottendeck z.Teil unter Wasser kommt und Wasser in unverletzte Abteilungen läuft.

Im Rahmen dieser Arbeit werden nur die Punkte b und c behandelt.

Mit dem oben eingeführten Sicherheitskriterium ist ein leckes Schiff, das nur durch Leckwasserschwingungen gefährdet wird, solange als sicher anzusehen, wie die Amplituden der Leckwasserbewegung kleiner sind als der Restfreibord  $Fb_r$ .

Wenn nur krängende Momente wirken, hängt die Sicherheit von der Größe des Hebelarms ab, der sich bei  $12^\circ$  Neigung bzw. der Neigung ergibt, bei der Seite Deck eintaucht. Es sei  $h_{a0}$  der Hebel des aufrichtenden Moments bei der kritischen Neigung  $\theta_0$ . Beurteilt man die Sicherheit aufgrund einer Momentenbilanz, so sind lecke Schiffe solange ungefährdet, wie der krängende Hebel bei der Neigung  $\theta_0$  kleiner oder höchstens gleich  $h_{a0}$  ist.

4.) Leckwasserbewegungen, krängende Momente und ihre Ursachen.

a) Um einen Überblick über das Verhalten von Leckwasser zu bekommen, sind einige systematische Versuche an einem Modell durchgeführt worden, über die im Anhang B berichtet wird. - Die Amplitude der Leckwasserbewegung hängt in einem bestimmten Leckfall nur von der Wellenlänge (bzw. -periode) und der Wellenhöhe ab.

b) Da die in dieser Arbeit angestellten Untersuchungen sich hauptsächlich auf lecke Fahrgastschiffe beziehen, werden als wesentliche krängende Momente nur das Winddruckmoment und das Personenmoment beachtet [ 11,12 ]. Das Winddruckmoment läßt sich nach der Formel berechnen

$$M_w = p_w \cdot F_L \cdot a \cdot f_w(\theta)$$

$$p_w = \xi_w \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} = \text{Winddruck [ kg/m}^2 \text{ ]}$$

$$F_L = \text{Überwasserlateralplan [ m}^2 \text{ ]}$$

a = Abstand der Schwerpunkte von Überwasserlateralplan und Unterwasserlateralplan [ m ]

$f_w(\theta) = 0,25 + 0,75 \cdot \cos^3 \theta$  = Funktion, die die Veränderlichkeit des Winddruckmoments mit der Neigung berücksichtigt. Bei kleinen Neigungen kann man  $f_w(\theta) = 1$  setzen und mit konstantem Winddruckmoment rechnen.

Der krängende Hebel des Winddruckmoments ist

$$h_w = \frac{M_w}{D}$$

D = Verdrängung des Schiffes [ t ]

Um einen Einblick in die Größenordnung von  $h_w$  zu bekommen, sind mit den aus einer Statistik gewonnenen Mittelwerten für  $F_L$ ,  $a$  und  $D$  einige Winddruckhebelarme bestimmt worden. Sie sind in Bild 1 in Abhängigkeit von der Schiffsgröße und der Windgeschwindigkeit aufgetragen.

c) Das kippende Moment, das durch die sich auf einer Schiffseite zusammendrängenden Fahrgäste entsteht, ergibt sich zu

$$M_p = P_p \cdot e \cdot \cos \theta$$

$$P_p \approx N \cdot 75 = \text{Gewicht der Personen [ kg ]}$$

$N$  = Anzahl der Personen

$e$  = Abstand des Angriffspunktes von  $P_p$  von der Schiffsmitte.

Für kleine Winkel kann  $\cos \theta = 1$  gesetzt werden. Der krängende Hebel des Personenmoments beträgt  $h_p = \frac{M_p}{D}$ .

Einen Anhalt über die Größe des krängenden Hebels  $h_p$  gibt Bild 2 .

Unter der Annahme, daß die Amplituden der Leckwasserbewegung und die krängenden Momente konstant sind, kann man sehr einfach berechnen, ob lecke Schiffe, die in einem bestimmten Zustand schwimmen, die aufgestellten Sicherheitsanforderungen erfüllen oder nicht. Es ist jedoch nicht ausreichend, die Sicherheit der Schiffe aufgrund willkürlich festgesetzter

Größen für den Restfreibord, den im Leckfall vorhandenen Hebelarm, die Amplituden der Leckwasserbewegung und die krängenden Momente zu beurteilen, da die angenommenen Größen bei verschiedenen Schiffen mit verschiedener Häufigkeit vorkommen können. Umfassendere Aussagen über die Sicherheit lassen sich deshalb erst machen, wenn man sowohl über die bei den verschiedenen Schiffen im Leckfall zu erwartenden Restfreiborde und Hebelarme als auch über die Amplituden der Leckwasserschwingung und über die krängenden Momente Wahrscheinlichkeitsaussagen macht.

Hierfür muß einerseits bekannt sein, welche Größen den Leckzustand beeinflussen und mit welcher Häufigkeit verschiedene Restfreiborde und Leckhebelarmkurven vorkommen. Auf diese Fragen wird in Abschnitt III näher eingegangen. Andererseits muß bekannt sein, welche Seegangsverhältnisse und Windstärken auftreten bzw. welche Wahrscheinlichkeit ihnen zukommt. Hierüber werden in Abschnitt IV Untersuchungen angestellt.

### III. Kennzeichnung und Häufigkeit von Leckzuständen

1. Die Sicherheit eines lecken Schiffes hängt u.a. von dem Zustand ab, in dem ein Schiff nach einer Verletzung schwimmen bleibt. Dieser Zustand wird durch den Restfreibord und die Reststabilität gekennzeichnet. Mit Reststabilität sind metazentrische Höhe und Hebelarme des aufrichtenden Moments im Leckfall gemeint.

Es gibt eine Reihe von Verfahren (z.B. [2,3,4] ) zur Bestimmung der Endschwimmlage und des Verlustes an metazentrischer Höhe, wenn eine Abteilung oder Abteilungsgruppe eines bestimmten Schiffes leck wird. Um einen Überblick über die Hebelarme lecker Schiffe zu bekommen, sind einige systematische Rechnungen angestellt worden; sie werden im Anhang A gebracht. Diese Untersuchungen zeigen, daß die Hebel lecker Schiffe in dem für diesen Fall interessierenden Bereich im wesentlichen von der verbleibenden metazentrischen Höhe abhängen. Es wird deshalb im folgenden von der Näherung  $h_a = \overline{MG}_r \cdot \theta$  Gebrauch gemacht. Mit den in Abschnitt II eingeführten Bedingungen erhält man dann für den größten aufrichtenden Hebel  $h_{a0} = \overline{MG}_r \cdot \theta_0$ , wobei  $\theta_0 = \arctg \frac{Fb_r}{B/2}$ , höchstens jedoch  $\arctg 12^\circ$  ist.

2. Größen, die den Leckzustand beeinflussen: Betrachtet man das Leckwerden einer bestimmten Abteilung oder Abteilungsgruppe eines Schiffes, so ist der Restfreibord eine Funktion folgender Größen:

- $l$  = Länge der betrachteten Abteilung oder Abteilungsgruppe
- $x_L$  = Lage der betrachteten Abteilung oder Abteilungsgruppe
- $T$  = Tiefgang des intakten Schiffes
- $t$  = Trimm des intakten Schiffes
- $\alpha_v$  = Volumenflutbarkeit der betrachteten Abteilung oder Abteilungsgruppe.

Die metazentrische Höhe des lecken Schiffes hängt außerdem noch ab von

- $\overline{MG}$  = Metazentrische Höhe des intakten Schiffes und
- $\alpha_f$  = Oberflächenflutbarkeit der betrachteten Abteilung oder Abteilungsgruppe

Einige dieser Größen sind nicht konstant. So ändern sich während des Schiffsbetriebes  $T$ ,  $t$ ,  $\overline{MG}$ ,  $\alpha_v$  und  $\alpha_f$ . Von der Wahl dieser Größen hängt es ab, welche Werte man bei vorgegebener Leckraumlänge und Leckraumlage mit Hilfe der Leckrechnung für Restfreibord und Rest- $\overline{MG}$  erhält. Für die Beurteilung der Sicherheit bei Beschädigung einer Abteilung, bzw. Abteilungsgruppe, ist also die Berechnung eines einzigen Leckzustandes nicht ausreichend. Zur Zeit wird dies nicht genügend beachtet. So wird z.B. im JSSV [5] gefordert die Rechnung für den jeweils ungünstigsten Betriebszustand durchzuführen. Das kann zur Folge haben daß der Zustand von zwei in ihrem Verwendungszweck verschiedenen Schiffen nach Leckwerden einer bestimmten Abteilung als gleich sicher

zu betrachten ist, da sich für Restfreibord und Rest- $\overline{MG}$  im ungünstigsten Fall gleiche Werte ergeben. In Wirklichkeit können sich jedoch recht verschiedene Zustände einstellen, die ihrer seits unterschiedliche Sicherheiten ergeben.

Dies sei am Beispiel zweier Schiffe erläutert, die entsprechend den Vorschriften als gleich sicher angesehen werden:

Schiff A sei ein reines Fahrgastschiff. Flutbarkeit und Tiefgang können als nahezu konstant angenommen werden.

Schiff B möge außer Fahrgästen noch größere Mengen Fracht befördern. Flutbarkeit und Tiefgang sind während der Gesamtfahrzeit des Schiffes großen Schwankungen unterworfen.

Bei Schiff A werden sich die veränderlichen Größen, insbesondere die, die den Restfreibord beeinflussen, nur wenig von den der Rechnung zugrunde gelegten ungünstigsten Werten entfernen; im Leckfall ist also zu erwarten, daß der Restfreibord wenig von dem berechneten Wert abweicht.

Dagegen wird sich bei Schiff B der Betriebszustand, mit dem die Rechnung durchgeführt wurde, nur sehr selten einstellen. Da die am häufigsten vorkommenden Wert für Tief-

gang und Flutbarkeit zu einem höheren Freibord im Leckfall führen, ist die Sicherheit dieses Schiffes anders zu beurteilen als die von Schiff A.

Diese Gegebenheiten kann man berücksichtigen, indem man über die beim Leckwerden einer bestimmten Abteilung bzw. Abteilungsgruppe zu erwartenden Restfreiborde und verbleibenden metazentrischen Höhen Wahrscheinlichkeitsaussagen macht.

3.) Berechnung der Häufigkeitsverteilungen von Restfreibord und Rest- $\overline{MG}$ . Die Häufigkeitsverteilungen von Restfreibord ( $Fb_r$ ) und Rest- $\overline{MG}$  ( $\overline{MG}_r$ ) hängen von der Häufigkeitsverteilung der folgenden Variablen ab:

- T = Tiefgang des unverletzten Schiffes
- t = Trimm " " "
- $\overline{MG}$  = Anfangsstabilität des unverletzten Schiffes
- $\alpha_{kv}$  = Volumenflutbarkeit einer Abteilung k
- $\alpha_{kf}$  = Oberflächenflutbarkeit einer Abteilung k
- k = 1, 2, ..., n
- n = Anzahl der wasserdichten Abteilungen.

Die Wahrscheinlichkeitsdichte für das Auftreten irgendeiner Kombination dieser Größen sei gegeben durch:

$$f(T, t, \overline{MG}, \alpha_{kv}, \dots, \alpha_{kf}, \dots) = f(\mathcal{U}^*),$$

( $\mathcal{U}^*$  bedeutet eine n-dimensionale zufällige Variable mit den Komponenten T, t,  $\overline{MG}$ ,  $\alpha_{kv}, \dots, \alpha_{kf}, \dots$ ).

Betrachtet man nur das Leckwerden einer Abteilung  $i$ , genügt die Kenntnis der Dichtefunktion

$$f_i(T, t, \overline{MG}, \alpha_{iv}, \alpha_{if}) = f_i(\mathcal{N}).$$

Sie ergibt sich als Randverteilung durch Integration von  $f(\mathcal{N}^*)$  über alle  $\alpha_{kv}$  und  $\alpha_{kf}$ , für die  $k + i$  ist.

Im folgenden wird nur das Leckwerden einer Abteilung  $i$  betrachtet.

Restfreibord  $Fb_r$  und nach der Verletzung verbleibende metazentrische Höhe  $\overline{MG}_r$  sind Funktionen der fünfdimensionalen Größe  $\mathcal{N}$  :

$$Fb_r = g_1(\mathcal{N})$$

$$\overline{MG}_r = g_2(\mathcal{N}).$$

Um aus der Verteilungsdichte von  $\mathcal{N}$  die <sup>jene</sup> von  $Fb_r$  und  $\overline{MG}_r$  zu erhalten, wird zunächst die ebenfalls fünfdimensionale Größe  $\mathcal{B} = (Fb_r, \overline{MG}_r, b_3, b_4, b_5)$  eingeführt, wobei für  $b_3, b_4$  u.  $b_5$  willkürlich

$$b_3 = g_3(\mathcal{N}) = \overline{MG}$$

$$b_4 = g_4(\mathcal{N}) = \alpha_{iv}$$

$$b_5 = g_5(\mathcal{N}) = \alpha_{if}$$

gesetzt wird. Man kann also auch schreiben

$$\mathcal{B} = g(\mathcal{N})$$

Mit der Umkehrung dieser Funktion

$$\alpha = \bar{g} (b)$$

findet man für die Verteilungsdichte von  $b$

$$\varphi_i (b) = f_i (\bar{g} (b)) \cdot \left| \frac{\partial \alpha}{\partial b} \right|$$

$\left| \frac{\partial \alpha}{\partial b} \right|$  ist dabei die Jacobische Determinante (siehe z.B. [7])

Die Wahrscheinlichkeitsdichte von Restfreibord und verbleibender metazentrischer Höhe erhält man nun als Randverteilung von  $\varphi_i (b)$ :

$$\varphi_i^* (Fb_r, \overline{MG}_r) = \iiint \varphi_i (b) \cdot d\overline{MG}_r \cdot d\alpha_{iv} \cdot d\alpha_{if}$$

Das Integral ist über alle  $\overline{MG}_r$ ,  $\alpha_{iv}$  und  $\alpha_{if}$  zu erstrecken. Auf entsprechende Weise erhält man die Verteilungsdichte des Restfreibordes.

$$\varphi_i^{**} (Fb_r) = \int_0^{\overline{MG}_r \max} \varphi_i^* (Fb_r, \overline{MG}_r) d\overline{MG}_r$$

und die der verbleibenden metazentrischen Höhe  $\overline{MG}_r$

$$\varphi_i^{***} (\overline{MG}_r) = \int_0^{Fb_r \max} \varphi_i^* (Fb_r, \overline{MG}_r) dFb_r$$

Diese Integrale sind über alle Werte von  $\overline{MG}_r$  bzw.  $Fb_r$  zu erstrecken.

Mit den angegebenen Formeln kann man für jedes Schiff und jede Abteilung berechnen, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, mit der ein bestimmter Zustand erreicht oder überschritten wird. Voraussetzung hierfür ist, daß die Dichtefunktion  $f_i(\mathcal{M})$  und die Funktion  $\beta = g(\mathcal{M})$  mit ihrer Umkehrung bekannt ist.

Zu dem gleichen Ergebnis kommt man, indem man zur Ermittlung der Dichtefunktionen von Restfreibord und verbleibender metazentrischer Höhe in der folgenden Weise verfährt [6,9]

Zunächst wird ermittelt, bei welchen Werten von  $\mathcal{M}$ , - d.h. bei welchen Kombinationen von  $T, t, \overline{MG}, \alpha_v, \alpha_f$ , der Restfreibord zwischen  $Fb_{r1}$  und  $Fb_{r1} + dFb_r$  und die verbleibende metazentrische Höhe zwischen  $\overline{MG}_{r1}$  und  $\overline{MG}_{r1} + d\overline{MG}_r$  liegt. Die Integration der Dichtefunktion  $f(\mathcal{M})$  über diese Werte von  $\mathcal{M}$  ergibt die Wahrscheinlichkeit  $dF_1$ , mit der  $Fb_r - \overline{MG}_r$  - Wertepaare in das Gebiet  $(Fb_{r1} < Fb_r \leq Fb_r + dFb_r; \overline{MG}_{r1} < \overline{MG}_r \leq \overline{MG}_{r1} + d\overline{MG}_r)$  fallen. Bestimmt man  $dF$  für alle  $Fb_r - \overline{MG}_r$  - Kombinationen, die innerhalb des gesamten n-dimensionalen Bereiches  $\mathcal{M}$  möglich sind, so erhält man die Verteilungsdichte  $\varphi_i^*(\overline{MG}_r, Fb_r) = \frac{dF}{d\overline{MG}_r \cdot dFb_r}$

Die Verteilungsdichten für den Restfreibord und die verbleibende metazentrische Höhe können auf entsprechende Weise oder durch Bildung der Randverteilungen von  $\varphi_i^*(Fb_r, \overline{MG}_r)$  bestimmt werden:

$$\varphi_i^{**}(Fb_r) = \int_0^{\overline{MG}_r \max} \varphi_i^*(Fb_r, \overline{MG}_r) \cdot d\overline{MG}_r$$

$$\varphi_i^{***}(\overline{MG}_r) = \int_0^{Fb_r \max} \varphi_i^*(Fb_r, \overline{MG}_r) \cdot dFb_r$$

Die beschriebenen Methoden sind mathematisch gleichbedeutend. Je nachdem in welcher Form  $f(\mathcal{N})$  gegeben ist, - in analytischer oder graphischer - , sind sie zur Behandlung solcher Probleme verschieden gut geeignet. Letztere empfiehlt sich, wenn  $f(\mathcal{N})$  in graphischer Form vorliegt. Dabei ist anstatt des infinitesimal kleinen  $Fb_r - \overline{MG}_r$  - Gebietes mit endlichen  $Fb_r$ - und  $\overline{MG}_r$  - Intervallen zu rechnen.

#### 4. Beispiele für die Bestimmung der Häufigkeitsverteilungen

von Restfreibord und Rest  $\overline{MG}$ . Am Beispiel von zwei Schiffen A und B soll im folgenden die Bestimmung der Dichtefunktionen  $\varphi_i^{**}(Fb)$ ,  $\varphi_i^{***}(\overline{MG}_r)$  und  $\varphi_i^*(Fb_r, \overline{MG}_r)$  gezeigt werden. Hierbei wird nach der zuletzt beschriebenen Methode vorgegangen. Die dem Beispiel zugrundegelegten Schiffe haben folgende Hauptabmessungen:

|                    | <u>Schiff A</u> | <u>Schiff B</u> |
|--------------------|-----------------|-----------------|
| L =                | 120 m           | 120 m           |
| B =                | 17,5 m          | 16,8 m          |
| T <sub>CWL</sub> = | 5,6 m           | 6,8 m           |
| H =                | 6,95 m          | 8,4 m *)        |
| d =                | 1,1 m           | 1,1 m           |
| D =                | 8250 t          | 9600 t          |
| $\delta$ =         | 0,7             | 0,7             |

\*) Daß die Freibordvorschriften bei diesen Abmessungen nicht erfüllt sind, ist in diesem Zusammenhang ohne Belang.

Der Einfachheit halber wird nur der Einfluß veränderlicher Tiefgänge und Flutbarkeiten auf die Häufigkeitsverteilungen von Restfreibord und Rest-MG untersucht. Ferner wird vorausgesetzt:

Der lecke Raum ist bei beiden Schiffen mittschiffs gelegen.

Die Länge des verletzten Raumes beträgt  $l = 0,15 \text{ .L.}$

Das Schiff ist im unverletzten Zustand unvertrimmt.

Der Tiefgang des intakten Schiffes ist entsprechend Bild 3 verteilt.

Die Volumenflutbarkeit ist entsprechend Bild 4 verteilt und unabhängig vom Tiefgang.

Die Oberflächenflutbarkeit ist gleich der Volumenflutbarkeit.

Der Doppelboden ist unverletzt bzw. gefüllt.

Die metazentrische Höhe des intakten Schiffes ist nur vom Tiefgang abhängig. (vgl. Bild 5)

Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten irgend einer Kombination von T und  $\alpha$  ergibt sich in diesem Fall zu

$$f(T, \alpha) = f_1(T) \cdot f_2(\alpha).$$

Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von T- $\alpha$ -Kombinationen, die zu Restfreiborden führen, die zwischen  $Fb_{rj}$  und  $Fb_{rj} + \Delta Fb_r$  liegen, erhält man durch Integration über das Gebiet G :

$$\Delta \phi_{ij}^{*+}(Fb_{rj}) = \iint_{\substack{Fb_{rj} + \Delta Fb_r \\ Fb_{rj} - g_1(T, \alpha)}} f(T, \alpha) \cdot dT \cdot d\alpha.$$

(Siehe das in Bild 6 eingezeichnete Beispiel für Schiff A. Die entsprechende Darstellung für Schiff B ist aus Bild 8 ersichtlich).

Berechnet man  $\Delta\phi_{ij}^{**}$  für alle Intervalle ( $Fb_{rj} < Fb_r \leq Fb_{rj} + \Delta Fb_r$ ), die innerhalb des gesamten Tiefgangs- und Flutbarkeitsbereiches möglich sind, so erhält man die in Bild 12 dargestellten Dichtefunktionen für den Restfreibord:

$$\psi_i^{**}(Fb_r) = \frac{\Delta\phi_i^{**}(Fb_r)}{\Delta Fb_r}$$

Auf entsprechende Weise ergeben sich die Dichtefunktionen (vergl. dazu die Bilder 7 und 9)

$$\psi_i^{***}(\overline{MG}_r) \quad \text{s. Bild 13}$$

Nach dem gleichen Prinzip kann auch aus Bild 6 u. 7 für Schiff A und aus Bild 8 u.9 für Schiff B

$$\psi_i^{*}(\overline{MG}_r, Fb_r) = \frac{\Delta^2 \phi(\overline{MG}_r, Fb_r)}{\Delta \overline{MG}_r \Delta Fb_r} = \frac{\Delta^2 \iint_{(\overline{MG}_r, Fb_r) = g(T, \alpha)}^{(\overline{MG}_r + \Delta \overline{MG}_r, Fb_r + \Delta Fb_r)} f(T, \alpha) dT d\alpha}{\Delta \overline{MG}_r \Delta Fb_r}$$

bestimmt werden (s. Bild 14 u.15).

Die Verteilungsfunktionen des Restfreibords und der verbleibenden metazentrischen Höhe sind in den Bildern 10 u.11 aufgetragen.

#### 5. Vergleich der Schiffe A und B aufgrund der ermittelten

Häufigkeitsverteilungen von  $Fb_r$  und  $\overline{MG}_r$ : Es zeigt sich,

daß der Restfreibord bei Schiff A Werte zwischen 0,3 und 1,75 m annehmen kann. Für Schiff B liegt dagegen der Bereich der möglichen Restfreiborde zwischen 0,3 und 4,3 m, wobei 60% aller Freiborde größer als 1,75 m sind. Unter der Annahme, daß gleiche Freiborde gleiche Sicherheit bedeuten, muß Schiff B im Hinblick auf die Schwimmfähigkeit, die durch Freibord erreicht wird, günstiger beurteilt werden als Schiff A.

Um hierüber weitere Aussagen machen zu können, werden in den folgenden Abschnitten u.a. Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen Freibord und Sicherheit angestellt.

Die Werte für  $\overline{MG}_r$  schwanken bei Schiff A zwischen 0,05 und 1,0 m; bei Schiff B zwischen 0,05 und 0,5 m. Eine ähnliche Betrachtung wie früher ergibt, daß Schiff A im Hinblick auf die Anfangsstabilität günstiger ist als Schiff B.

Da die Stabilität des lecken Schiffes sowohl vom Restfreibord als auch vom Rest- $\overline{MG}_r$  abhängt, wird sie durch  $\overline{MG}_r$  allein nicht ausreichend gekennzeichnet. Zur Beurteilung der Stabilität muß deshalb der Zusammenhang zwischen  $\overline{MG}_r$  und  $Fb_r$  und evtl. auftretenden krängenden Momenten berücksichtigt werden. Diese Frage wird in den folgenden Abschnitten näher untersucht. Mit Hilfe dieser Untersuchungen und  $\varphi_i^*(Fb_r, \overline{MG}_r)$  sind weitergehende Angaben über die Sicherheit im Hinblick auf Kentern und das Auftreten zu großer Neigungen möglich.

IV. Häufigkeitsverteilungen der Ursachen von Leckwasserbewegung  
und krängenden Momenten bei Kollisionen.

1.) Häufigkeitsverteilungen für Wind und Seegang, die bei Kollisionen herrschen, kann man dadurch erlangen, daß man bei solchen Unfällen die entsprechenden Daten aufzeichnet und sammelt . Das so gefundene Material ist jedoch sehr gering und die hieraus ermittelten Verteilungsfunktionen für Wind (s. Bild 17) und Seegang sind sehr unsicher. Es sollen deshalb noch einige andere Betrachtungen über die Wind- und Seegangsverhältnisse angestellt werden, die bei Unfällen herrschen können. [ 13 ].

In verkehrsreichen Gewässern kommt es leichter zu Kollisionen als in verkehrsarmen. Zu den verkehrsreichen Gewässern kann man im allgemeinen die hafennahen Seegebiete und enge Wasserstraßen zählen. Betrachtet man ein fiktives Kollektiv von bestimmten Linienschiffen, die auf ihrer Reise zwischen den Häfen X und Y gerammt werden, so könnte die Unfallhäufigkeit in Abhängigkeit vom Ort der Kurve in Bild 16 entsprechen. Die Wahrscheinlichkeit daß ein Schiff dieses Typs zwischen  $s_1$  und  $s_1 + ds$  getroffen wird, ist dabei

$$dK_1 = k(s_1) \cdot ds, \quad s = \text{Ort zwischen X und Y}$$

$k(s) = \text{Verteilungsdichte der Unfälle.}$

Die Verteilungen von Wind und Seegang, die an jedem Ort entlang der Schiffsroute zwischen X und Y gelten, kann man aus den Beobachtungen von Wetterschiffen ermitteln [ 13, 14, 15 ]. In

Küstennähe treten weniger häufig große Windgeschwindigkeiten und starker Seegang auf als auf offener See. Die Dichtefunktion  $\psi$  der Wetterverhältnisse, die durch die Windgeschwindigkeit  $v$ , die Wellenlänge  $\lambda$  und die Wellenhöhe  $2r_0$  beschrieben werden können, hängen deshalb auch vom Ort  $s$  ab:

$$\psi = \psi(v, \lambda, r_0; s)$$

$s$  bedeutet hierin einen Parameter der Dichtefunktion. Unter der Annahme, daß Kollisionen unabhängig vom Wetter sind, erhält man die Dichtefunktion für die Wetterverhältnisse, die bei Kollisionsfällen herrschen zu

$$\psi_1(v, \lambda, r_0) = \int_x^y k(s) \cdot \psi(v, \lambda, r_0; s) \cdot ds$$

Die Annahme, daß Kollisionen wetterunabhängig sind, trifft in Wirklichkeit sicher nicht zu. Vielmehr ist die Gefahr eines Zusammenstoßes bei Nebel sehr viel größer als bei klarer Sicht. Die Dichtefunktion für das Ereignis einer Kollision ist also außer vom Ort noch von den Sichtverhältnissen abhängig. Sie sei durch

$$k^* = k^*(s, s_w)$$

gegeben; wobei  $s_w$  die Sichtweite bedeutet.

Da bei Nebel im allgemeinen weder Sturm noch starker Seegang herrschen, ist die Dichtefunktion der Wetterverhältnisse ebenfalls eine Funktion der Sichtweite.

$\psi^* = \psi^*(v, \lambda, r_0; s; s_w)$  hierin sind  $s$  und  $s_w$  Parameter der Dichtefunktion.

Wenn diese Funktionen bekannt sind, ergibt sich die Dichte von Wind und Seegang, die bei Kollisionen herrschen, zu

$$\begin{aligned} \psi_1^* &= \int_x^y \int_0^\infty k^*(s, s_w) \cdot \psi^*(v, \lambda, r_0; s; s_w) \cdot ds \cdot ds_w \\ &= \psi_1^*(v, \lambda, r_0) \end{aligned}$$

Die Dichtefunktionen von  $v, \lambda, r_0$  bei Kollisionsfällen erhält man als Randverteilungen von  $\psi^*$ :

$$\psi_2^*(v) = \int_x^y \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty k^* \cdot \psi^* \cdot ds \cdot ds_w \cdot d\lambda \cdot dr_0$$

$$\psi_3^*(\lambda) = \int_x^y \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty k^* \cdot \psi^* \cdot ds \cdot ds_w \cdot dv \cdot dr_0$$

$$\psi_4^*(r_0) = \int_x^y \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty k^* \cdot \psi^* \cdot ds \cdot ds_w \cdot dv \cdot d\lambda$$

$$\psi_5^*(\lambda, r_0) = \int_x^y \int_0^\infty \int_0^\infty k^* \cdot \psi^* \cdot ds \cdot ds_w \cdot dv$$

Da bisher keine oder nur sehr unvollständige Statistiken über die Unfallhäufigkeit und die Wetterverhältnisse als Funktionen des Ortes und der Sichtweite vorliegen, können die Dichtefunktionen für Wind und Seegang bei Kollisionsfällen nicht in der beschriebenen Weise ermittelt werden. Aufgrund der angestellten Überlegungen kann man nur schließen, daß bei Seeunfällen solcher Art häufiger mit geringeren

Wellenhöhen, Wellenlängen und Windstärken zu rechnen ist, als sie sich aus den Dichtefunktionen ergeben, die generell für bestimmte Seegebiete gelten. Genaue quantitative Aussagen lassen sich hierüber noch nicht machen. Im folgenden wird deshalb von den in den Bildern 17-20 dargestellten Verteilungen der Seegangsverhältnisse und Windstärken im Nordatlantik bzw. der Nordsee Gebrauch gemacht. Die mit diesen Funktionen in Abschnitt V gewonnenen Ergebnisse über die Sicherheit von Schiffen geben deshalb nicht die wirklichen Verhältnisse wieder; man kann jedoch erwarten, daß sie wenigstens eine tendenzmäßig richtige quantitative Beurteilung der Sicherheit lecker Schiffe ermöglichen.

2.) Über die Veränderlichkeit des Moments, das durch Personen hervorgerufen wird, die sich an einer Schiffseite aufhalten, lassen sich entsprechende Betrachtungen anstellen. Hierauf soll jedoch nicht näher eingegangen werden.

In den folgenden Untersuchungen wird der Einfachheit halber angenommen, daß entweder kein oder ein konstantes krängendes Moment auftritt.

## V. Bewertung der Sicherheit von querunterteilten Schiffen

1) In den vorstehenden Abschnitten ist bereits darauf hingewiesen worden, daß man aufgrund der Tatsache, daß in einem bestimmten Fall gewisse Sicherheitskriterien erfüllt sind, meist nur wenig über die Sicherheit, die ein Schiff im Hinblick auf Kollisionen hat, aussagen kann. Um zu weitergehenden Aussagen zu kommen, ist es notwendig, alle möglichen Verhältnisse (Betriebszustände des Schiffes, Leckgrößen und Treffstellen, Windstärken, Seegänge usw.) zu berücksichtigen. Dabei kommt es nicht <sup>nur</sup> darauf an, zu untersuchen, was in den einzelnen Fällen passiert, sondern auch darauf, welche Wahrscheinlichkeit diesen Fällen zukommt.

Wenn man alle Zusammenhänge genau kennen würde und auch genügend statistische Angaben zur Verfügung hätte, könnte man sehr leicht die Wahrscheinlichkeit dafür berechnen, ob bei einem bestimmten Schiff nach einer Beschädigung bestimmte Kriterien für Schwimmfähigkeit und Stabilität erfüllt sind (vergl. Abschnitt II).

Es sei  $\mathcal{Q} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  eine n-dimensionale Größe, deren Komponenten  $x_1, x_2, \dots, x_n$  alle diejenigen Einflüsse bedeuten, von denen es abhängt, ob das Schiff nach einer Beschädigung bestimmte Bedingungen erfüllt oder nicht. Solche Einflüsse sind z.B. Leckgröße und Treffstelle, den Betriebszustand kennzeichnende Größen (z.B. Tiefgang, Trimm,

Flutbarkeit usw.), Wetterverhältnisse usw.  $f(\varphi)$  sei die Verteilungsdichte von  $\varphi$ . Sie ist ein Maß dafür, wie häufig verschiedene Werte  $\varphi$ , (d.h. Wertekombinationen von  $x_1, x_2, \dots$ ) auftreten. Alle diejenigen Werte  $\varphi$ , bei denen nach einer Beschädigung bestimmte Kriterien erfüllt werden, mögen in einem n-dimensionalen Gebiet liegen. Die Wahrscheinlichkeit dafür, daß bei einer Beschädigung die Kriterien erfüllt sind, ist dann

$$W = \int_G f(\varphi) d\varphi .$$

Es handelt sich hierbei um ein n-faches Integral. Es wird im folgenden als Wahrscheinlichkeitsintegral bezeichnet.

In den vorstehenden Abschnitten sind die Schwierigkeiten aufgezeigt worden, die es macht, einerseits die Wirkung aller Einflüsse richtig zu erfassen (d.h. das Gebiet G richtig zu bestimmen) und andererseits auch die relative Häufigkeit der Einflüsse abzuschätzen (d.h.  $f(\varphi)$  zu ermitteln). Es ist deshalb aussichtslos, zu versuchen, das obenstehende Integral zu berechnen. Man kann jedoch erwarten, daß man auch dann, wenn man das Integral unter Voraussetzung von weitgehenden Vereinfachungen annähert, zu einer brauchbaren Bewertung der Sicherheit kommt. Insbesondere dürfte es auf diesem Wege auch möglich sein, die tendenzmäßigen Einflüsse der verschiedenen Größen zu ermitteln .

Eine Vereinfachung, die im folgenden immer vorausgesetzt wird, ist, daß die Schiffe durch Querschotte unterteilt sind und daß der Inhalt der Abteilungen (d.h. der zwischen Querschotten liegenden Räume) homogen ist. Weitere Einschränkungen werden im folgenden erwähnt.

2) Berechnung des Wahrscheinlichkeitsintegrals, wenn Leckgröße, krängende Momente und Betriebszustände voneinander unabhängig sind: Es werden die folgenden Einflüsse berücksichtigt:

Leckgrößen: Wegen der Annahme, daß die Schiffe nur durch Querschotte unterteilt sind und daß der Inhalt der Abteilungen homogen ist, genügt es, die Lecks durch Angabe von Treffstelle  $x$  und Lecklänge  $y$  zu beschreiben. Ihre Verteilungsdichte wird mit  $f_1(x,y)$  bezeichnet (Siehe hierzu auch [16] ).

Krängende Momente: Die Summe der im Leckfall wirkenden krängenden Momente sei  $M_k$ , ihre Verteilungsdichte wird mit  $f_2(M_k)$  bezeichnet.

Betriebszustände: Es werden der Tiefgang  $T$ , Flutbarkeiten

$\alpha_{vi} = \alpha_{fi}$  (der Index  $i$  weist darauf hin, daß die Flutbarkeiten für eine Abteilung bzw. Abteilungsgruppe  $i$  gelten) und metazentrische Höhe  $\overline{MG}$  als die Betriebszustände kennzeichnende zufällige Veränderliche angenommen. Für das

hier verfolgte Ziel ist es zweckmäßig, nicht mit der Verteilung der Betriebszustände zu arbeiten sondern mit der der Leckzustände. Entsprechende Überlegungen sind bereits in Abschnitt III angestellt worden. Zur Kennzeichnung des Leckzustandes soll hier außer dem Rest- $\overline{MG}$   $\overline{MG}_r$  und dem Restfreibord  $Fb_r$  auch noch der zugehörige Ausgangs-Tiefgang verwendet werden. Er kennzeichnet die Verdrängung auch des lecken Schiffes.

Ähnlich wie in Abschnitt III gezeigt, kann aus der Verteilungsdichte der Betriebszustände  $f_{Bi}(T, x_i, \overline{MG})$  die Verteilungsdichte der Leckzustände  $f_{3i}(Fb_r, \overline{MG}_r, T)$  bestimmt werden.

Damit erhält man die jeweils für Abteilungen bzw. Abteilungsgruppen  $i$  geltenden Verteilungsdichte aller berücksichtigten Einflüsse. (Es wird stochastische Unabhängigkeit der Leckgrößen, krängenden Momente und Betriebszustände vorausgesetzt):

$$f_i(\mathcal{V}) = f_1(x, y) \cdot f_2(M_k) \cdot f_{3i}(Fb_r, \overline{MG}_r, T).$$

Es muß nun noch das Integrationsgebiet, über das das Wahrscheinlichkeitsintegral zu erstrecken ist, bestimmt werden.  $G_{1i}$  sei das Gebiet, das alle diejenigen Lecks (gekennzeichnet durch  $x$  und  $y$ ) umfaßt, die eine Abteilung bzw. Abteilungsgruppe  $i$  öffnen.  $G_{1i}$  ist unabhängig von den

übrigen betrachteten Einflüssen. Seine Bestimmung macht keinerlei Schwierigkeit (siehe [16]).

Den für eine Abteilung bzw. Abteilungsgruppe  $i$  geltenden Teil des Wahrscheinlichkeitsintegrals kann man damit schreiben:

$$W_{1i} = \iint_{G_{11}} f_1(x, y) \cdot dx \cdot dy \cdot \iiint_{G_{23}} f_2(M_k) \cdot f_{3i}(Fb_r, \overline{MG}_r, T) \cdot \underbrace{dM_k \cdot dFb_r}_{d\overline{MG}_r \cdot dT}$$

$$= W_{11} \cdot \iiint_{G_{23}} f_2(M_k) \cdot f_{3i}(Fb_r, \overline{MG}_r, T) \cdot dM_k \cdot dFb_r \cdot d\overline{MG}_r \cdot dT$$

Zur Veranschaulichung des obenstehenden Integrals wird zunächst  $T = \text{const}$  gesetzt und ein dreidimensionales Koordinatensystem  $Fb_r - \overline{MG}_r - M_k$  gezeichnet (Bild 21). Die Punkte in diesem Raum sind beziffert: jedem Tripel  $(Fb_r, \overline{MG}_r, M_k)$  entspricht ein ganz bestimmter Wert  $f_2(M_k) \cdot f_{3i}(Fb_r, \overline{MG}_r, T)$ . Das Gebiet  $G_{23}^*$  (es gilt für jeweils bestimmte Werte  $T$ , ist also eine Funktion von  $T$ :  $G_{23}^* = G_{23}^*(T)$ ).

Da die untere Grenze von  $M_k$  gleich Null ist, stellt die durch die  $\overline{MG}_r$  und  $Fb_r$ -Achse gehende Ebene eine Begrenzungsfläche des Integrationsgebiets dar.

Unter der in Abschnitt II eingeführten Annahme, daß für das aufrichtende Moment gilt

$M_a = D \cdot \overline{MG}_r \cdot \vartheta_0$  mit  $\vartheta_0 = \text{Min}(\text{arc tg } \frac{Fb_r}{B/2}; \text{arc } 12^\circ)$  dürfen sowohl  $\overline{MG}_r$  als auch  $Fb_r$  nicht kleiner als Null werden, damit die in Abschnitt II erwähnten Schwimmfähigkeits- und Stabilitätsbedingungen erfüllt werden. Es sind deshalb auch

$\overline{MG}_r = 0$ , d.i. die durch die  $M_k$  und  $Fb_r$ -Achse gehende Ebene und  $Fb_r = 0$ , d.i. die durch  $M_k$  und  $\overline{MG}_r$ -Achse gehende Ebene eine Begrenzungsfläche für das Gebiet  $G_{23}^*$ .

Für die Begrenzung des Integrationsgebietes nach oben findet man aus der Bedingung, daß die krängenden Momente höchstens gleich den aufrichtenden sein dürfen bzw. wie im Abschnitt II eingeführt, daß ein bestimmte Neigung nicht überschritten werden darf :

$$M_k^1) = D(T) \cdot \overline{MG}_r \cdot \frac{Fb_r}{B/2} \quad \text{für } Fb_r < Fb_{\text{grenz}} = B/2 \cdot \text{tg } 12^\circ$$

$$M_k = D(T) \cdot \overline{MG}_r \cdot \text{arc } 12^\circ \quad \text{für } Fb_r > Fb_{\text{grenz}} = B/2 \cdot \text{tg } 12^\circ$$

(D(T) ist die Verdrängung):

Aufgrund vorstehender Überlegungen und wegen  $T_{\min} \leq T \leq T_{\max}$  kann man für  $W_i$  schreiben :

$$W_i = W_{1i} \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} \iiint_{G_{23}^*(T)} f_2(M_k) \cdot f_{3i}(Fb_r, \overline{MG}_r, T) dM_k dFb_r d\overline{MG}_r dT$$

Es ist dies die Wahrscheinlichkeit, daß in einem Leckfall die Abteilung bzw. Abteilungsgruppe  $i$  geöffnet wird und danach die vorausgesetzten Bedingungen erfüllt werden.

---

<sup>1)</sup>  $M_k$  wird von der Neigung unabhängig angenommen. Diese Annahme ist zulässig, da sich  $M_k$  ähnlich  $\cos \vartheta$  ändert und nur ein kleiner Neigungsbereich  $0 \leq \vartheta_0 \leq 12^\circ$  betrachtet wird.

Die Wahrscheinlichkeit, daß im Leckfall eine beliebige Abteilung geöffnet wird und dabei die zugrundegelegten Bedingungen erfüllt werden, ist

$$W = \sum_i W_i,$$

wobei die Summe über alle Abteilungen und Abteilungsgruppen zu erstrecken ist.

Die Ermittlung von  $W$  in der beschriebenen Weise ist sehr aufwendig. Auf die Berechnung solcher Zahlen wird deshalb verzichtet, zumal sie zur Klärung grundsätzlicher Zusammenhänge nicht bekannt zu sein brauchen .

Berechnungsbeispiele:

Die im folgenden angestellten Untersuchungen werden auf das Leckwerden einer Abteilung  $i$  beschränkt. Unter der Annahme, daß die Lecks für die hier betrachteten Schiffe A und B gleich verteilt sind, bedeutet  $W_{1i}$  für beide Schiffe die gleiche Konstante.  $W_{1i}$  braucht deshalb zur Aufzeigung tendenzmäßiger Abhängigkeiten nicht bestimmt zu werden.

Zur rechnerischen Behandlung des verbleibenden Integrals

$$W_{23i} = \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} \iiint_{G_{23}^*(T)} f_2(M_k) \cdot f_{3i}(Fb_r, \overline{MG}_r, T) \cdot dM_k \cdot dFb_r \cdot d\overline{MG}_r \cdot dT$$

wird folgende Vereinfachung vorgenommen:

$$\begin{aligned} & \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} \iiint_{G_{23}^*(T)} f_2(M_k) \cdot f_{3i}(Fb_r, \overline{MG}_r, T) \cdot dM_k \cdot dFb_r \cdot d\overline{MG}_r \cdot dT \\ & \approx \iiint_{G_{23}^*(T=T_m)} f_2(M_k) \cdot f_{3i}(Fb_r, \overline{MG}_r) \cdot dM_k \cdot dFb_r \cdot d\overline{MG}_r \end{aligned}$$

Diese Vereinfachung bedeutet, daß im Mittel für alle Leckzustände und Ausgangstiefgänge die gleiche für den Tiefgang  $T_m$  ermittelte Begrenzungsfläche  $M_k$  gilt.

Berechnung der Wahrscheinlichkeit, wenn nur krängende Winddruckmomente wirken.

Hierfür werden die folgenden Annahmen getroffen:

Der Wind trifft seitlich auf den Schiffskörper.

Berechnungsbeispiele:

Die im folgenden angestellten Untersuchungen werden auf das Leckwerden einer Abteilung  $i$  beschränkt. Unter der Annahme, daß die Lecks für die hier betrachteten Schiffe A und B gleich verteilt sind, bedeutet  $W_{1i}$  für beide Schiffe die gleiche Konstante.  $W_{1i}$  braucht deshalb zur Aufzeigung tendenzmäßiger Abhängigkeiten nicht bestimmt zu werden.

Zur rechnerischen Behandlung des verbleibenden Integrals

$$W_{23i} = \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} \iiint_{G_{23}^*(T)} f_2(M_k) \cdot f_{3i}(Fb_r, \overline{MG}_r, T) \cdot dM_k \cdot dFb_r \cdot d\overline{MG}_r \cdot dT$$

wird folgende Vereinfachung vorgenommen:

$$\begin{aligned} & \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} \iiint_{G_{23}^*(T)} f_2(M_k) \cdot f_{3i}(Fb_r, \overline{MG}_r, T) \cdot dM_k \cdot dFb_r \cdot d\overline{MG}_r \cdot dT \\ & \approx \iiint_{G_{23}^*(T=T_m)} f_2(M_k) \cdot f_{3i}(Fb_r, \overline{MG}_r) \cdot dM_k \cdot dFb_r \cdot d\overline{MG}_r \end{aligned}$$

Diese Vereinfachung bedeutet, daß im Mittel für alle Leckzustände und Ausgangstiefgänge die gleiche für den Tiefgang  $T_m$  ermittelte Begrenzungsfläche  $M_k$  gilt.

Berechnung der Wahrscheinlichkeit, wenn nur krängende Winddruckmomente wirken.

Hierfür werden die folgenden Annahmen getroffen:

Der Wind trifft seitlich auf den Schiffskörper.

Die krängenden Winddruckhebelarme  $h_w$  sind für beide Schiffe gleich groß. (Für die Rechnungen werden die in Bild 1 aufgetragenen Hebelarme verwendet).

Der Einfluß verschieden großer Restfreiborde bzw. Lecktiefgänge auf den krängenden Hebel wird nicht berücksichtigt. Damit kann man für die obige Gleichung schreiben:

$$W_{23im} = \iiint G_{23}^*(T=T_m) f_2^*(h_w) \cdot f_{3i}(Fb_r, \overline{MG}_r) \cdot dh_w \cdot dFb_r \cdot d\overline{MG}_r$$

Die Verteilungsdichte  $f_2^*(h_w)$  ist in Bild 23 aufgetragen. Sie gilt für  $T_{mA} \approx 0,92 T_{CWL}$  und  $T_{mB} \approx 0,86 T_{CWL}$ .

Um eine Übersicht über die Einflüsse von  $Fb_r$  und  $\overline{MG}_r$  auf den Wert des Integrals zu bekommen, wird zunächst untersucht, welche Wahrscheinlichkeit sich ergibt, wenn die Schiffe in einem bestimmten Leckzustand schwimmen. Hierzu ist für verschiedene Werte von  $Fb_r$  und  $\overline{MG}_r$  folgendes Integral zu lösen:

$$W_{2im}^* = \int f_2^*(h_w) \cdot dh_w$$

$$G_2^*(T=T_m; Fb_r = \text{const}; \overline{MG}_r = \text{const})$$

Wegen der Bedingung, daß der krängende Hebel  $h_w$  höchstens gleich dem aufrichtenden Hebel  $h_{ao} = \frac{\overline{MG}_r \cdot Fb_r}{B/2}$  bzw.  $\overline{MG}_r \cdot \text{arc } 12^\circ$  sein darf, erhält man bei gegebenem Leckzustand die Wahrscheinlichkeit, mit der die Sicherheitsbedingungen erfüllt sind, durch Integration der Verteilungsdichte  $f_2^*(h_w)$ :

$$W_{2im}^* = \int_0^{h_w = h_{ao}} f_2^*(h_w) \cdot dh_w \quad \text{mit } h_{ao} = \frac{\overline{MG}_r \cdot Fb_r}{B/2} \text{ höchstens jedoch } \overline{MG}_r \cdot \text{arc } 12^\circ$$

oder durch Integration der Verteilungsdichte der Windgeschwindigkeiten  $v$

$$W_{2im}^* = \int_0^{v_{\text{grenz}}} \psi_{2im}^*(v) \cdot dv, \text{ wobei sich } v_{\text{grenz}} \text{ aus der Bedingung}$$

$$v_{\text{gr}} = \sqrt{\frac{\overline{MG}_r \cdot Fb_r \cdot S/2}{B/2 \cdot \xi_w \cdot F_L \cdot a}} \quad \text{für } \arctg \frac{Fb_r}{B/2} < \arccos 12^\circ \quad \text{und}$$

$$v_{\text{gr}} = \sqrt{\arccos 12^\circ \frac{\overline{MG}_r \cdot S/2}{\xi_w \cdot F_L \cdot a}} \quad \text{für } \arctg \frac{Fb_r}{B/2} \geq \arccos 12^\circ \quad \text{ergibt.}$$

$W_{2im}^*$  ist in Bild 26 für Schiff A in Abhängigkeit vom Restfreibord und Rest- $\overline{MG}$  aufgetragen. Der Darstellung liegen die Windverhältnisse des Nordatlantik zugrunde. Die Wahrscheinlichkeiten  $W_{2im}^*$  in Bild 27 ergeben sich für Schiff A mit den in der Nordsee vorkommenden Windgeschwindigkeiten. Die Darstellungen gelten mit guter Näherung auch für Schiff B; man erhält bei  $\overline{MG}_r = \text{const}$  den gleichen Wert für  $W_{2im}^*$  mit um etwa 3 - 4% verringerten Restfreiborden.

Entsprechend den Dichtefunktionen der Windgeschwindigkeiten (Bild 18) ergeben sich für die Nordsee größere Werte für  $W_{2im}^*$  als für den Nordatlantik.

Für  $W_{23im}$  erhält man unter den genannten Voraussetzungen und unter Zugrundelegung der im Atlantik herrschenden Windverhältnisse

$$W_{23imA} = 0,944$$

$$W_{23imB} = 0,990.$$

Es sind dies die Wahrscheinlichkeiten, mit denen im Falle der Verletzung der Abteilung i die Sicherheitsbedingungen erfüllt sind, wenn nur krängende Winddruckmomente auftreten.

Der Einfluß von Restfreibord und Rest- $\overline{MG}$  auf die

Wahrscheinlichkeit  $W_{2im}$  —:

Aus den Darstellungen (Bild 26 und 27) ist ersichtlich, daß die Wahrscheinlichkeit  $W_{2im}^*$  mit größer werdendem Restfreibord zunimmt. Wenn im Leckfall kein Restfreibord vorhanden ist, ergibt sich für  $W_{2im}$  ein sehr geringer Wert, der für alle  $\overline{MG}_r$  gleich ist. Er ist identisch mit der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Windstille. Eine geringe Erhöhung des Restfreibordes von 0 auf z.B. 0,2 m bewirkt eine relativ große Steigerung der Wahrscheinlichkeit, da dann schon die häufig auftretenden kleineren Windstärken ertragen werden können. Dies gilt besonders für die Nordsee. Wenn größere Restfreiborde vorhanden sind, bewirkt eine Freiborderhöhung geringere Steigerungen der Wahrscheinlichkeit, obgleich der ertragbare Hebelarm linear mit dem Restfreibord zunimmt. Die Ursache liegt darin, daß Änderungen des ertragbaren kippenden Winddruckhebels eine um so kleinere Änderung der Wahrscheinlichkeit bewirken, je näher diese bei 1 liegt (s. Bild 22).

Für den Einfluß von  $\overline{MG}_r$  auf die Wahrscheinlichkeit  $W_{2im}$  gilt das Entsprechende, da die Fähigkeit, krängende Hebel zu ertragen, vom Produkt  $Fb_r \cdot \overline{MG}_r$  abhängig ist.

Um einen bestimmten Wert für  $W_{2im}$  zu erreichen, gibt es deshalb viele Möglichkeiten von  $Fb_r - \overline{MG}_r$  - Kombinationen. Wenn jedoch so große Restfreiborde vorhanden sind, daß bis zum Fintauchen von Seite Deck Neigungswinkel  $> 12^\circ$  möglich sind, kann die Sicherheit unter den in Abschnitt II gemachten Finschränkungen  $r$  durch eine Erhöhung von  $\overline{MG}_r$  gesteigert werden.

Vergleich Schiffe A und B :

Da angenommen wurde, daß die kippenden Hebel des Winddruckmoments für beide Schiffe im Mittel gleich sind, ergibt sich bei gleichen Werten für  $Fb_r$  und  $\overline{MG}_r$  nahezu die gleiche Wahrscheinlichkeit. Unter Berücksichtigung der Dichtefunktionen  $f_{3i}(Fb_r, \overline{MG}_r)$  erhält man für Schiff B den größeren Sicherheitswert. Obwohl durch einen Vergleich der Verteilungsdichten von  $\overline{MG}_r$  allein (Bild 13) leicht ein gegenteiliger Eindruck entsteht, ist Schiff B sicherer als Schiff A. Diese Tatsache ist darauf zurückzuführen, daß bei Schiff B in etwa 60% aller Fälle wegen des hohen Restfreibordes die zulässige Neigung  $12^\circ$  beträgt; bei Schiff A ist die zulässige Neigung stets kleiner als  $12^\circ$ .

Berechnung der Wahrscheinlichkeit, wenn außer dem Winddruckmoment ein konstantes Moment auftritt:

Hierfür wird angenommen, daß außer dem im vorstehenden näher beschriebenen Winddruckmoment immer auch ein konstantes Moment wirkt, das bei Schiff A einen krängenden Hebel von  $h_{pA} = 0,02$  m, bei Schiff B einen krängenden Hebel von  $h_{pB} = 0,018$  m ergibt. Dieses Moment kann man sich beispielsweise durch 250 Personen, die sich an einer Schiffseite aufhalten, hervorgerufen denken; - grundsätzlich ist es jedoch gleichgültig, wodurch es entsteht - .

Die Wahrscheinlichkeit ( $W_{2im}^*$ ), mit der in einem bestimmten Leckzustand, der sich nach der Verletzung der Abteilung  $i$  einstellt, die Sicherheitsbedingungen erfüllt sind, ergibt sich durch Integration der Verteilungsdichte  $f_{21}^*(h_w + h_p)$

$$(W_{2im}^*) = \int_0^{h_w + h_p = h_{ao}} f_{21}^*(h_w + h_p) \cdot d(h_w + h_p)$$

$f_{21}^*(h_w + h_p)$  ist hierbei die Summenverteilungsdichte von  $h_w$  und  $h_p$ . Sie ist für die Schiffe A und B bei den im Atlantik vorkommenden Windverhältnissen ermittelt worden (s. Bild 24 und 25).

Die Wahrscheinlichkeiten ( $W_{2im}^*$ ) sind in den Bildern 28-31 aufgetragen.

Die unter Berücksichtigung der Verteilungsdichten  $f_{3i}(Fb_r, \overline{MG}_r)$  und den im Atlantik auftretenden Windstärken bestimmten Wahrscheinlichkeiten ( $W_{23im}$ ) ergeben für die vorliegenden Schiffe die Werte

$$\begin{aligned} (W_{23im})_A &= 0,874 \\ (W_{23im})_B &= 0,945. \end{aligned}$$

Sie geben an, mit welcher Wahrscheinlichkeit die Schiffe den Sicherheitsanforderungen genügen, wenn die Abteilung  $i$  geöffnet wird und danach Winddruck- und Personenmomente wirken.

Der Einfluß von Reistfreibord und Rest- $\overline{MG}_r$  auf die Wahrscheinlichkeit ( $W_{2im}^*$ )

Bei einem bestimmten  $\overline{MG}_r$  ergibt sich mit zunehmendem Restfrei-

bord so lange die Wahrscheinlichkeit  $(W_{2im}^*) = 0$ , bis der Wert  $Fb_{ro} = \frac{B \cdot h_p}{2 \cdot \overline{MG}_r}$  erreicht ist. Wegen der Annahme, daß der Hebel  $h_p$  immer auftritt, können bei kleineren Freiborden als  $Fb_{ro}$  die Sicherheitsbedingungen nicht erfüllt werden. Von  $Fb_{ro}$  an steigt die Wahrscheinlichkeit mit größer werdendem Restfreibord so, wie sie in Bild 26 und 27 von  $Fb_r = 0$  an zunimmt. Der Wert  $Fb_{ro}$  wird mit zunehmendem  $\overline{MG}_r$  kleiner. Für  $\overline{MG}_r = 0$  ergibt sich  $Fb_{ro} = \infty$ ; bei  $\overline{MG}_r = \infty$  ist  $Fb_{ro} = 0$ . Unter Beachtung eines zulässigen Krängungswinkels von  $12^\circ$ , der bei den hier untersuchten Schiffen mit einem Restfreibord von etwa  $Fb_r \approx 1,75$  m erreicht werden kann, beträgt die Wahrscheinlichkeit  $(W_{2im}^*) = 0$  bei Werten für  $\overline{MG}_r \approx 0,1$  m.

Wenn man annimmt, daß die metazentrische Höhe intakter Fahrgastschiffe aus Gründen des Seegangsverhaltens 1-2 m nicht übersteigt, wird auch die metazentrische Höhe des lecken Schiffes diesen Wert im allgemeinen nicht überschreiten. Aus Bild 28-31 ergibt sich, daß bei diesen  $\overline{MG}_r$ -Werten die Wahrscheinlichkeit  $(W_{2im}^*) = 0$  ist, wenn Restfreiborde  $Fb_r \approx 0,1$  m vorhanden sind. Damit wird durch die im JSSV geforderten Mindestwerte für  $\overline{MG}_r$  und  $Fb_r$  (0,05m und 3") unter den hier angenommenen krängenden Momenten für die betrachteten Schiffe keine Sicherheit erreicht.

#### Vergleich der Schiffe A und B

Da der kippende Hebel des konstanten Momentes bei Schiff A größer ist als bei Schiff B, ergeben sich für das letztere

bei gleichen Werten für  $Fb_r$  und  $\overline{MG}_r$  die größeren Wahrscheinlichkeiten ( $W_{2mi}^*$ ). Ebenso ergibt sich für Schiff B die größere Wahrscheinlichkeit ( $W_{23mi}^*$ ); dieses Schiff ist somit im Hinblick auf die Sicherheit bei den hier untersuchten Krängungsmomenten günstiger zu beurteilen als Schiff A.

3.) Berechnung des Wahrscheinlichkeitsintegrals, wenn Leckwasserbewegungen auftreten, die von der Leckgröße und dem Leckzustand abhängig sind.

Außer von krängenden Momenten hängt es von evtl. auftretenden Leckwasserbewegungen ab, ob ein Schiff verloren geht oder nicht. In den folgenden Untersuchungen soll gezeigt werden, wie solche Einflüsse berücksichtigt werden können:

Zur Kennzeichnung des Lecks müssen in diesem Zusammenhang außer Treffstelle und Ausmaß der Länge nach auch die Lage und die Ausmaße des Lecks der Höhe und Breite nach aufgeführt werden. Die Gesamtheit dieser Größen sei mit  $\mathcal{L}$  bezeichnet.

Zur Beschreibung des Leckzustandes soll neben  $\overline{MG}_R$  anstatt des Restfreibords  $Fb_R$  der Lecktiefgang  $T_L$  und der Trimm nach der Verletzung  $t_L$  verwendet werden; außerdem wird noch die zugehörige Flutbarkeit  $\alpha_{vi}$  berücksichtigt.

Die im Leckfall auftretenden Amplituden der Leckwasserbewegung werden mit  $z_0$  bezeichnet.  $z_0$  ist u.a. eine Funktion von  $\mathcal{L}$ ,  $T_L$ ,  $t_L$ ,  $\alpha_{vi}$ ,  $\overline{MG}_R$ .

Die für die Abteilung  $i$  geltende Verteilungsdichte aller hier berücksichtigten Größen sei

$$f_{iL}(\varphi) = f_i(z_0(\mathcal{L}, T_L, t_L, \alpha_{iv}, \overline{MG}_R); \mathcal{L}; T_L, t_L, \alpha_{iv}, \overline{MG}_R)$$

Wenn alle diejenigen Größen, bei denen im Falle des Auftretens von Leckwasserbewegungen die in Abschnitt II eingeführten Sicherheitsbedingungen erfüllt sind, in dem Gebiet  $G$  liegen, so erhält

man für das Wahrscheinlichkeitsintegral

$$W_{iL} = \int_G f_{iL}(\varrho) \cdot d\varrho$$

Berechnet man  $W_{Li}$  für alle Abteilungen und Abteilungsgruppen, so erhält man die Wahrscheinlichkeit  $W_L$ , daß das Schiff verletzt wird und daß es danach den Sicherheitsanforderungen genügt

$$W_L = \sum W_{Li}$$

Da die Verteilungsdichte  $f_{iL}(\varrho)$  nicht bekannt ist, kann das Wahrscheinlichkeitsintegral in der vorliegenden Form nicht gelöst werden. Um dennoch einige tendenzmäßige Zusammenhänge aufzuzeigen, werden im folgenden weitgehende Vereinfachungen vorgenommen.

### Berechnungsbeispiele

Am Beispiel der in Abschnitt III eingeführten Schiffe A und B soll der Einfluß von Restfreibord und Leckgröße zahlenmäßig ermittelt werden. Dazu werden die nachstehenden Einschränkungen gemacht:

Der lecke Raum  $i$  liegt mittschiffs.

Das Schiff ist nach der Verletzung unvertrimmt; dabei gibt es zu jedem Lecktiefgang  $T_L$  nur einen Restfreibord  $Fb_r$ :

$$T_L + Fb_r = H.$$

Das Schiff liegt quer zu den Wellen.

Die Leckmitte ist gleichzeitig Raummitte.

Es gelten die in Anhang B (Bild B 37) angenommenen Abhängigkeiten zwischen der Amplitude der Leckwasserbewegung und der Wellenlänge, der Leckgröße und dem Lecktiefgang für beide Schiffe. Da hier nur Lecks betrachtet wurden, die den Raum über die ganze Höhe öffneten, genügt zur Kennzeichnung des Lecks die Lecklänge  $y$ .

Der Einfluß der Flutbarkeit  $\alpha_v$  auf die Leckwasserbewegung wird nicht berücksichtigt.

Die verbleibende metazentrische Höhe hat keinen Einfluß auf die Leckwasserschwingung.

Unter diesen Voraussetzungen ergibt sich für das Wahrscheinlichkeitsintegral

$$W_{Li} = \iiint_G f_{iL}(z_0, y, Fb_r) \cdot dz_0 \cdot dy \cdot dFb_r$$

Dieses Integral kann in einem dreidimensionalen Koordinatensystem veranschaulicht werden. Jedem Aufpunkt in diesem Koordinatensystem entspricht ein bestimmter Wert  $f_{iL}(z_0, y, Fb_r)$ . Die Grenzen des Integrationsgebietes  $G$  werden gebildet durch die Ebenen  $z_0 = 0$ ;  $y = 0$  und die durch die  $y$ -Achse gehende Ebene  $z_0 = Fb_r$ . (s. Bild 32).

Um den Einfluß von Leckgröße und Restfreibord auf die Wahrscheinlichkeit zu ermitteln, wird für verschiedene Werte von  $y$  und  $Fb_r$  der Wert des Integrals

$$W_{iL1} = \int_G f_{iL1}(z_0) \cdot dz_0 \quad \text{bestimmt.}$$

$G(y=\text{const.}, Fb_r=\text{const.})$

Wegen der Bedingung, daß  $z_0$  nicht größer werden darf als  $Fb_r$ , ergibt sich  $W_{iL1}$  durch Integration der Verteilungsdichte  $f_{iL1}(z_0)$  zu

$$W_{iL1} = \int_0^{Fb_r} f_{iL1}(z_0) \cdot dz_0$$

oder durch Integration der Verteilungsdichte von Wellenlängen und Wellenhöhen

$$W_{iL1} = \iint \psi_5^*(\lambda, r_0) \cdot d\lambda \cdot dr_0,$$

wobei das Integral über diejenigen Wellen zu erstrecken ist, die Amplituden der Leckwasserbewegung  $0 \leq z_0 \leq Fb_r$  hervorrufen. Da die Lösung des 2. Integrals am wenigsten aufwendig ist, wurde hier danach verfahren.

In den Bildern 33 und 34 sind für verschiedene Leckgrößen und Restfreiborde diejenigen Kombinationen von Wellenlängen und Wellenamplituden dargestellt, die zu Leckwasseramplituden der Größe  $z_0 = Fb_r = \text{const.}$  führen. Hiermit und mit der in Bild 19 angegebenen Verteilungsdichte der Wellen im Nordatlantik kommt man zu den in den Bildern 35 und 36 aufgetragenen Wahrscheinlichkeiten  $W_{iL1}$ , mit der die Schiffe A und B bei bestimmten Leckgrößen und Restfreiborden den Sicherheitsanforderungen genügen, wenn nur Leckwasserbewegungen auftreten.

Zu umfassenderen Aussagen über die Sicherheit kommt man, indem man als weitere Variable den Restfreibord  $Fb_r$  berücksichtigt. Unter der Voraussetzung, daß der Raum  $i$  nur durch ein bestimmtes Leck geöffnet wird, erhält man für das Wahrscheinlichkeitsintegral

$$W_{iL2} = \iint_{G(y=\text{const.})} f_{iL2}(z_0, Fb_r) \cdot dz_0 \cdot dFb_r$$

$W_{iL2}$  ist die Wahrscheinlichkeit, mit der im Falle des Auftretens von Leckwasserbewegungen das Schiff die Sicherheitsbedingungen erfüllt, wenn es durch ein bestimmtes Leck geöffnet ist.

Da  $f_{iL2}(z_0, Fb_r)$  nicht bekannt ist, wird zur zahlenmäßigen Bestimmung des Wertes  $W_{iL2}$  in der folgenden Weise vorgegangen.

Die Wahrscheinlichkeit  $W_{iL1}$  ist bei konstanter Lecklänge eine Funktion des Restfreibords:  $W_{iL1}(Fb_r)$ .

Die Wahrscheinlichkeit, daß sich ein bestimmter Restfreibord einstellt und daß dabei das Schiff im Sinne des in Abschnitt II eingeführten Kriteriums sicher ist, ergibt sich dann zu

$$dW_{iL2} = W_{iL1}(Fb_r) \varphi_i^{**}(Fb_r).$$

Damit wird

$$W_{iL2} = \int_0^{Fb_r \max} W_{iL1}(Fb_r) \cdot \varphi_i^{**}(Fb_r) \cdot dFb_r.$$

Hierin ist  $\varphi_i^{**}$  die in Abschnitt III gefundene Verteilungsdichte des Restfreibords.

Für die vorliegenden Schiffe erhält man unter der Annahme, daß beide durch ein Leck der Länge  $y = 0,56 \text{ l} = 10 \text{ m}$  (s. Bild B9 Leck 3) an der gleichen Stelle geöffnet sind

$$W_{iL2A} = 0,86$$

$$W_{iL2B} = 0,96.$$

Auf eine Berechnung der Wahrscheinlichkeit  $W_{iL}$ , in der berücksichtigt wird, daß die Abteilung  $i$  durch Lecks verschiedener Größe verletzt werden kann, soll hier verzichtet werden. Wenn man annimmt, daß die Abmessungen der Lecks für die hier untersuchten Schiffe A und B gleich verteilt sind, und daß sich für eins der Schiffe bei allen Leckgrößen immer kleinere Wahrscheinlichkeiten  $W_{iL1}$  ergeben als für das andere, das den gleichen Restfreibord aufweist, so kommt man aufgrund von  $W_{iL}$  grundsätzlich zu den gleichen Aussagen über die Sicherheit wie durch  $W_{iL2}$ . Voraussetzung hierfür ist, daß zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit  $W_{iL2}$  für beide Schiffe von der gleichen Lecklänge ausgegangen wird.

Der Einfluß des Freibords auf die Sicherheit.

Die Darstellungen (Bild 35 und 36) zeigen, daß die Wahrscheinlichkeit  $W_{iL1}$  mit größer werdendem Freibord zunimmt. Die Zunahme ist umso größer, je kleiner der Restfreibord ist. Dies kann darauf zurückgeführt werden, daß kleine Wellenlängen und Wellenhöhen, die das Leckwasser kaum zu Schwingungen anregen, häufiger vorkommen als stärkerer Seegang. Eine geringe Wahrscheinlichkeit besteht auch beim Restfreibord 0; sie ist gleich der Wahrscheinlichkeit für das Vorkommen glatten Wassers.

### Der Einfluß der Leckgröße auf die Sicherheit

Da die Einflußfunktionen für die Leckwasseramplituden mit kleiner werdenden Lecks abnehmen (Bild B 37), ist die Wahrscheinlichkeit umso größer, je kleiner das Leck ist. Die untere Kurve in Bild 35 und 36 - Parameter "Leck 2" - stellt die Sicherheit dar, die vorhanden ist, wenn der betrachtete Raum über die ganze Länge geöffnet ist. Da dies bezüglich der Leckwasserbewegung der ungünstigste Fall ist, kann  $W_{iL1}$  keine kleineren Werte annehmen.

Durch kleine Lecks kann während einer Wellenperiode nur sehr wenig Wasser in den Leckraum eindringen bzw. aus dem Leckraum herauslaufen. In diesem Fall werden die Schiffe durch Leckwasserschwingungen nicht gefährdet. Die Wahrscheinlichkeit  $W_{iL1}$  bei Lecklängen  $y \approx 0$  ist deshalb auch für kleine Restfreiborde 1.

### Vergleich der Schiffe A und B

Bei gleichem Schwimmzustand und bei gleicher Lecklänge ergeben sich für Schiff A die größeren Werte für  $W_{iL1}$ . Die Ursache hierfür ist die kleinere Leckwasseramplitude bei Schiffen mit geringem Tiefgang.

Die Berücksichtigung der Verteilungsdichten des Restfreibords beider Schiffe führt jedoch wegen der häufig auftretenden hohen Restfreiborde zu einem günstigeren Ergebnis für Schiff B.

4.) Berechnung des Wahrscheinlichkeitsintegrals, wenn krängende Momente und Leckwasserbewegungen gleichzeitig auftreten.

Da Wind und Seegang im allgemeinen gleichzeitig vorkommen, werden lecke Schiffe sowohl durch krängende Winddruckmomente als auch durch Leckwasserbewegungen gefährdet.

Der Einfachheit halber wird hier nur untersucht, welcher Wert sich für die Wahrscheinlichkeit ergibt, wenn das Schiff durch ein bestimmtes Leck geöffnet ist und in einem bestimmten Zustand schwimmt.

Für das Wahrscheinlichkeitsintegral kann man dann schreiben:

$$W_{iWL1} = \iint_{G_1} f_{KL1}(h_w, z_0) \cdot dh \cdot dz_0$$

$f_{KL1}(h_w, z_0)$  ist hierin die Verteilungsdichte der krängenden Hebel und der Amplituden der Leckwasserbewegung. In dem Gebiet  $G$  liegen diejenigen  $h_w$ - $z_0$ -Kombinationen, bei denen das lecke Schiff den Sicherheitsanforderungen genügt.

Zu dem gleichen Ergebnis für  $W_{iWL1}$  kommt man, indem man über die Verteilungsdichte von Wind und Seegang  $\psi_1^*(\lambda, r_0, v)$  integriert:

$$W_{iWL1} = \iiint_G \psi_1^*(\lambda, r_0, v) \cdot d\lambda \cdot dr_0 \cdot dv,$$

wobei das Integral  $\int^G$  über diejenigen Kombinationen von  $\lambda$ ,  $r_0$  und  $v$  zu erstrecken ist, bei denen das Sicherheitskriterium erfüllt ist. Aus rechentechnischen Gründen wird diese Methode zur Bestimmung von  $W_{iWL1}$  verwendet.

Bestimmung der Verteilungsdichte  $\psi_1^*(\lambda, r_0, v)$ :

In Ermangelung von statistischen Unterlagen wird die Verteilungsdichte von Wind und Seegang näherungsweise ermittelt. Unter der Annahme, daß Wind und Seegang voneinander unabhängig sind, erhält man

$$\psi_1^*(\lambda, r_0, v) = \psi_5(\lambda, r_0) \cdot \psi_2(v)$$

Als weitere Vereinfachung werden den Berechnungen die für den Atlantik geltenden Verteilungsdichten des Seegangs und der Windstärken zugrunde gelegt.

Ermittlung der Integrationsgrenzen:

Bezeichnet man die Eintauchung der Leeseite des lecken Schiffs mit  $z$  ( $z$  wird an der Innenkante der Außenhaut gemessen), gilt

$$z = z_0 + z_1$$

$z_0$  ist gleich der Amplitude der Leckwasserbewegung,

$z_1$  ist der Anteil an der Gesamteintauchung, der sich aus der

Krängung ergibt: 
$$z_1 \approx \frac{h_w \cdot B/2}{MG_r}$$

Unter Berücksichtigung der in Abschnitt II angestellten Überlegungen sind lecke Schiffe solange sicher, wie  $z \leq Fb_r$  ist, wobei  $z_1$  den Wert  $B/2 \cdot \operatorname{tg} 12^\circ$  nicht überschreiten darf. Wirkt kein krägendes Moment, so erfüllt das lecke Schiff die Sicherheitsbedingungen bei solchen Wellen, die eine Leckwasserschwankung  $z_0 = Fb_r$  erzeugen. Wird das lecke Schiff durch ein Moment um den Winkel  $\theta = \operatorname{arctg} \frac{z_1}{B/2}$  geneigt, so können nur noch Leckwasserbewegungen mit der Amplitude  $Fb_r - z_1 = z_0$  ertragen werden. Wenn kein Seegang herrscht, kann das Schiff nur solche Windgeschwindigkeiten aushalten, die eine Neigung  $\theta = \operatorname{arctg} \frac{Fb_r}{B/2}$  bzw.  $\operatorname{arc} 12^\circ$  bewirken.

In einem dreidimensionalen  $\lambda$ - $r_0$ - $v$ -Koordinatensystem kann die aus diesen Bedingungen resultierende Integrationsgrenze durch eine Fläche  $F$  veranschaulicht werden.

Weitere Integrationsgrenzen in diesem Raum sind die Ebenen  $\lambda = 0$ ;  $r_0 = 0$  und  $v = 0$ .

In Bild 37 ist ein solches Integrationsgebiet dargestellt. Es gilt für den Fall, daß  $Fb_r/B/2$  kleiner gleich  $\arctg 12^\circ$  ist.

Zur Berechnung eines Zahlenwertes wird für die Schiffe A und B von folgenden Daten ausgegangen:

$Fb_r = 0,75$  m;  $\overline{MG}_r = 0,3$  m;  $y = 0,56$  l = 10 m ( $\hat{=}$  Leck 3 in Anhang B).

Außer den bereits bei der Ermittlung von  $W_{i2m}^*$  und  $W_{iL1}$  getroffenen Einschränkungen wird hier vorausgesetzt, daß Leckwasserbewegung und Krängung sich gegenseitig nicht beeinflussen. Es gelten dann die in den Bildern 38 und 39 dargestellten Abhängigkeiten zwischen Wellen und Leckwasserbewegung und die in Bild 40 aufgetragenen Zusammenhänge zwischen Windgeschwindigkeit und krängendem Winddruckhebelarm. Die Bilder 41 und 42 geben die hieraus resultierenden Integrationsgrenzen für die Bestimmung der Wahrscheinlichkeit  $W_{iWL1}$  für die Schiffe A und B. Es zeigt sich, daß mit zunehmender Wellenhöhe das Gebiet der nicht ertragbaren Wellenlängen und Windgeschwindigkeiten größer wird. Das sichere Gebiet ist bei Schiff A wegen der geringeren Leckwasserbewegungen größer

als bei Schiff B. Die Integration der Verteilungsdichte  $\Psi^*(\lambda, r_0, v)$  über das sichere Gebiet liefert die Wahrscheinlichkeiten

$$W_{iWL1A} = 0,49$$

$$W_{iWL1B} = 0,40.$$

#### Vergleich der Schiffe A und B.

Wenn beide Schiffe im gleichen Leckzustand schwimmen, ist somit A sicherer als B. Zu einem allgemeineren Urteil über die Sicherheit kann man jedoch erst kommen, wenn man bei der Berechnung des Wertes  $W_{iWL1}$  die Dichtefunktionen  $\varphi_i(Fb_r, \overline{MG}_r)$  der Schiffe berücksichtigt.

Bei den vorliegenden Schiffen kann A keine Leckwasserbewegungen ertragen, wenn infolge eines Winddruckmomentes das Deck gerade eintaucht. Da bei B 60% aller Restfreiborde größer als  $Fb_r = 1,75 \text{ m}$  ( $\approx 12^\circ$  mögliche Neigung) sind, steht für die Leckwasserbewegung z.T. noch sehr viel Freibord zur Verfügung, auch wenn das Schiff um  $12^\circ$  geneigt ist. Es ist deshalb zu erwarten, daß Schiff B bei Berücksichtigung dieser Gegebenheiten, mit größerer Wahrscheinlichkeit die Sicherheitsanforderungen erfüllt als Schiff A. Auf einen zahlenmäßigen Nachweis soll hier verzichtet werden.

die sich statistisch ermittelten Verteilungen besser anpassen, zu etwa den gleichen Ergebnissen führen. Die Verteilungsdichte für Treffstellen von Lecks mit jeweils bestimmter Länge ist über den Bereich der Schiffslänge konstant, in dem diese Lecklängen möglich sind. Der Zentralwert der Lecklängen wird mit  $y = 10$  angenommen (Bild 43 und [16]).

Mit diesen Voraussetzungen läßt sich für quer unterteilte Schiffe bestimmen, wieviel von allen möglichen Lecks das Schiff ertragen kann. Die Lecks sind zwar nicht einzeln abzählbar; es existiert aber der Quotient von ertragbaren Lecks zu der Gesamtheit aller Lecks. Er ergibt sich zu

$$W = \iint_G w(\xi, \eta) \cdot d\xi \cdot d\eta \quad (1)$$

Hierin bedeutet G das sich aus der Leckrechnung ergebende Gebiet der sicheren Abteilungen bzw. Abteilungsgruppen. Eine Abteilung bzw. Abteilungsgruppe wird im folgenden als sicher angesehen, wenn nach dem Leckwerden der betrachteten Abteilung bzw. Abteilungsgruppen der verbleibende Freibord nicht kleiner als 3" und die metazentrische Höhe nicht kleiner als 5 cm ist. Diese Werte stellen die Mindestforderung des ISSV dar.

Die Anwendung der Formel (1) auf ein quer- und längsunterteiltes Schiff ist nur möglich, wenn man die weiteren Annahmen trifft, daß im Leckfall unsymmetrische Überflutungen

## VI. Bewertung von längs- und querunterteilten Schiffen

Grundsätzlich unterscheidet sich die Berechnung der Wahrscheinlichkeit beliebig unterteilter Schiffe nicht von der querunterteilter Schiffe. Sie kann deshalb in der in Abschnitt V beschriebenen Weise ermittelt werden. Im folgenden wird nur der Einfluß der Seitenlängsschotte auf die Wahrscheinlichkeit an einem Beispiel gezeigt. Um den Rechenaufwand in Grenzen zu halten, werden weitgehende Vereinfachungen vorgenommen.

Das untersuchte Schiff ist gekennzeichnet durch die Größen

$$L = 155 \text{ m}, \quad B = 23 \text{ m}, \quad H = 14,5 \text{ m}.$$

Die Anordnung der Seitenlängsschotte ist den Bildern 46-48 zu entnehmen. Die Wahrscheinlichkeit wird für 3 verschiedene Betriebszustände bestimmt:

|                    |                      |                         |
|--------------------|----------------------|-------------------------|
| Betriebszustand a: | Fahrt mit Massengut, | $T_a = 9 \text{ m}$     |
| "                  | "                    | "                       |
| b:                 | " " Ballast,         | $T_b = 7,5 \text{ m}$   |
| "                  | "                    | "                       |
| c:                 | " " "                | $T_c = 9,2 \text{ m}$ . |

Um einen Vergleichswert für die Beurteilung der Längsunterteilung zu bekommen, werden zunächst die Seitenlängsschotte nicht berücksichtigt. Dazu werden folgende Annahmen gemacht:

1.) Die Verteilungsdichte für die Lecklängen, die an einer bestimmten Stelle auftreten können, nimmt linear mit der Lecklänge ab. Wie im JSTG [16] bewiesen worden ist, kann diese vereinfachende Annahme getroffen werden, da andere Verteilungsdichten

ausgeschlossen sind und daß das Seitenlängsschott beschädigt wird, so daß auch der Mittelraum überflutet wird. Die Leckrechnung entspricht in diesem Fall der Leckrechnung für ein Schiff, das nur quer/unterteilt ist und führt deshalb auch zu dem gleichen Gebiet der sicheren Abteilungen und Abteilungsgruppen.

Die Annahme, daß unsymmetrische Überflutungen nicht vorkommen, ist gerechtfertigt, wenn Querflutungseinrichtungen vorhanden sind. Die Voraussetzung, daß das Längsschott verletzt wird, ist jedoch nicht realistisch, wenn man den verschiedenen Möglichkeiten, wie Lecks auftreten können, Rechnung trägt. Es ist nötig, weitere Annahmen, insbesondere über die Eindringtiefe der Lecks zu machen.

2.) Von der Gesamtheit aller möglichen Lecks, deren Verteilung hinsichtlich Länge und Treffstelle, wie unter 1) beschrieben, festgelegt ist, wird angenommen, daß etwa 20% dadurch entstehen, daß das Schiff von einem Hindernis (Eisberg, Fels u.dgl.) seitlich aufgerissen wird. Die Eindringtiefe dieser Lecks ist im Verhältnis zur Lecklänge nur gering. Es wird angenommen, daß durch diese Lecks das Seitenlängsschott nicht beschädigt wird; die Eindringtiefe also nicht größer als etwa 5 m wird.

3.) Von den restlichen 80% aus der Gesamtheit aller möglichen Lecks wird angenommen, daß sie von Kollisionen her-

rühren. Es ist unwahrscheinlich oder gar unmöglich, daß bei kleinen Lecklängen die Eindringtiefe so groß wird, daß die Längsschotte verletzt werden.

Deshalb werden bei Lecklängen, die kleiner als 5 m sind, nur die Seitentanks als geöffnet angesehen, die Eindringtiefe wird gleich der Lecklänge angenommen.

Bei Lecks, die länger als 5 m sind, wird so gerechnet, daß Seiten- und Mitteltanks beschädigt sind und daher überflutet werden. Die überflutete Länge ist bei Seiten- und Mitteltanks gleich (siehe Bild 44 und 45).

Mit den aus Bild 45 und 46./48 ersichtlichen Bezeichnungen und vorstehenden Annahmen erhält man für die Wahrscheinlichkeit:

$$W = \iint_{G_1} w_1(\xi, \eta) \cdot d\xi \cdot d\eta + \iint_{G_2} w_2(\xi, \eta) \cdot d\xi \cdot d\eta + \iint_{G_2+G_3} w_3(\xi, \eta) \cdot d\xi \cdot d\eta$$

Hierin bedeutet  $G_1$  das Gebiet der Abteilungen bzw. Abteilungsgruppen, die von Kollisionslecks  $> 5$  m geöffnet und überflutet werden können, ohne daß die Mindestforderungen des ISSV bezüglich Restfreibord und Rest-MG unterschritten werden. Die hierzu erforderliche Leckrechnung kann so durchgeführt werden, als ob keine Längsschotte sondern nur Querschotte vorhanden wären.

$G_2$  ist das Gebiet der sicheren seitlichen Abteilungen bzw. Abteilungsgruppen, die von Kollisionslecks  $< 5m$  verletzt werden können und  $G_2 + G_3$  ist das Gebiet der sicheren Seitenabteilungen bzw. Abteilungsgruppen, die von seitlichen Aufreißen geöffnet werden können, ohne daß dadurch das Schiff sinkt oder kentert. Bei den Leckrechnungen zur Bestimmung der Gebiete  $G_2$  und  $G_3$  wurde angenommen, daß durch die Querflutungseinrichtungen unsymmetrische Überflutungen ausgeschlossen sind und daß die Seitenlängsschotte in den auf den Bildern 46 und 49 gekennzeichneten Räumen nicht verletzt werden.

Die Auswertung der Gleichung (1) ergibt den W-Wert des Schiffes unter der Voraussetzung, daß die Seitenlängsschotte verletzt wird, bzw. ergibt den W-Wert, den das Schiff haben würde, wenn die Längsschotte nicht vorhanden wäre. Man erhält für die Ladefälle

- |                       |               |
|-----------------------|---------------|
| 1.) Betriebszustand a | $W_a = 0,970$ |
| 2.) " " b             | $W_b = 0,994$ |
| 3.) " " c             | $W_c = 0,986$ |

Die Auswertung der Gleichung (2), die die vorhandene Seitenlängsschotte berücksichtigt, ergibt für die 3 betrachteten Fälle folgende W-Werte:

- |                       |               |
|-----------------------|---------------|
| 1.) Betriebszustand a | $W_a = 0,974$ |
| 2.) " " b             | $W_b = 0,987$ |
| 3.) " " c             | $W_c = 0,984$ |

Aus einem Vergleich der W-Werte, die sich ergeben, wenn das Schiff nur quer unterteilt wäre, mit denen, die unter Berücksichtigung der Längsunterteilung ermittelt wurden, zeigt sich, daß Längsschotte nicht immer einen positiven Einfluß auf den W-Wert haben. Für das Schiff im Betriebszustand a bedeutet die Anordnung der Längsschotte eine Erhöhung der Sicherheit. Dagegen bewirken sie in den Zuständen b und c eine Abminderung des W-Wertes. Dies ist als Folge davon anzusehen, daß die Seitenräume in diesen Fällen für sich alleine nicht über eine so große Länge geöffnet werden dürfen, wie Seiten- und Mittelräume gemeinsam. Aus den Bildern 47 und 48 geht deutlich hervor, daß das Gebiet der sicheren Abteilungen bzw. Abteilungsgruppen in den Fällen, wo nur die Seitentanks verletzt sind, sehr viel kleiner ist als in den Fällen, wo das Schiff symmetrisch über den ganzen Querschnitt geflutet ist.

## Schrifttum

- [ 1 ] Wendel, K.: "Die Wahrscheinlichkeit des Überstehens von Verletzungen". Schiffstechnik 1960
- [ 2 ] Knüpffer, K.: "Die Durchführung von Leckrechnungen im Schiffsentwurf". Schiffstechnik 1961
- [ 3 ] Schirokauer, F.: "Berechnung der Schottkurve". Handbuch der Werften. 1950
- [ 4 ] Ministry of Transport: "Survey of Passenger Ships, Instructions to Surveyors". Vol. I und II, London 1956
- [ 5 ] Bundesgesetzblatt. Teil II, 1953
- [ 6 ] Krappinger, O.: "Einfluß von Tiefgang, Flutharkeit, Stabilität und Seegang auf die Beurteilung von Unterteilungen". JSTG 1961
- [ 7 ] Schmetterer, L.: "Einführung in die mathematische Statistik". Wien 1956
- [ 8 ] Mises, R.v.: "Wahrscheinlichkeit, Statistik und Wahrheit". Wien 1951
- [ 9 ] Robertson, J.B.jr.: "Notes for Hamburg 1963 Meeting". Unveröffentlicht
- [ 10 ] Krappinger, O.: "Unterteilung und Stabilität". Hansa 1960
- [ 11 ] Wendel, K.: "Sicherheit gegen Kentern". VDI-Zeitschrift Bd.100, 1958
- [ 12 ] Arndt, B.: "Ermittlung von Mindestwerten für die Stabilität". Schiffstechnik 1960
- [ 13 ] Robertson, J.B.jr.: "An Estimate of the Relationship between Damaged Condition Freeboard, Metacentric Height and the Probability of Survival". IMCO SDS II/3 1963
- [ 14 ] Roll, H.W.: "Die Größe der Meereswellen in Abhängigkeit von der Windstärke". Seewetteramt, Publ.Nr.6, 1954
- [ 15 ] Roll, H.W.: "Höhe, Länge und Steilheit der Meereswellen im Nordatlantik". Seewetteramt, Publ.Nr.1, 1953
- [ 16 ] Wendel, K.: "Die Bewertung von Unterteilungen". JSTG 1961.

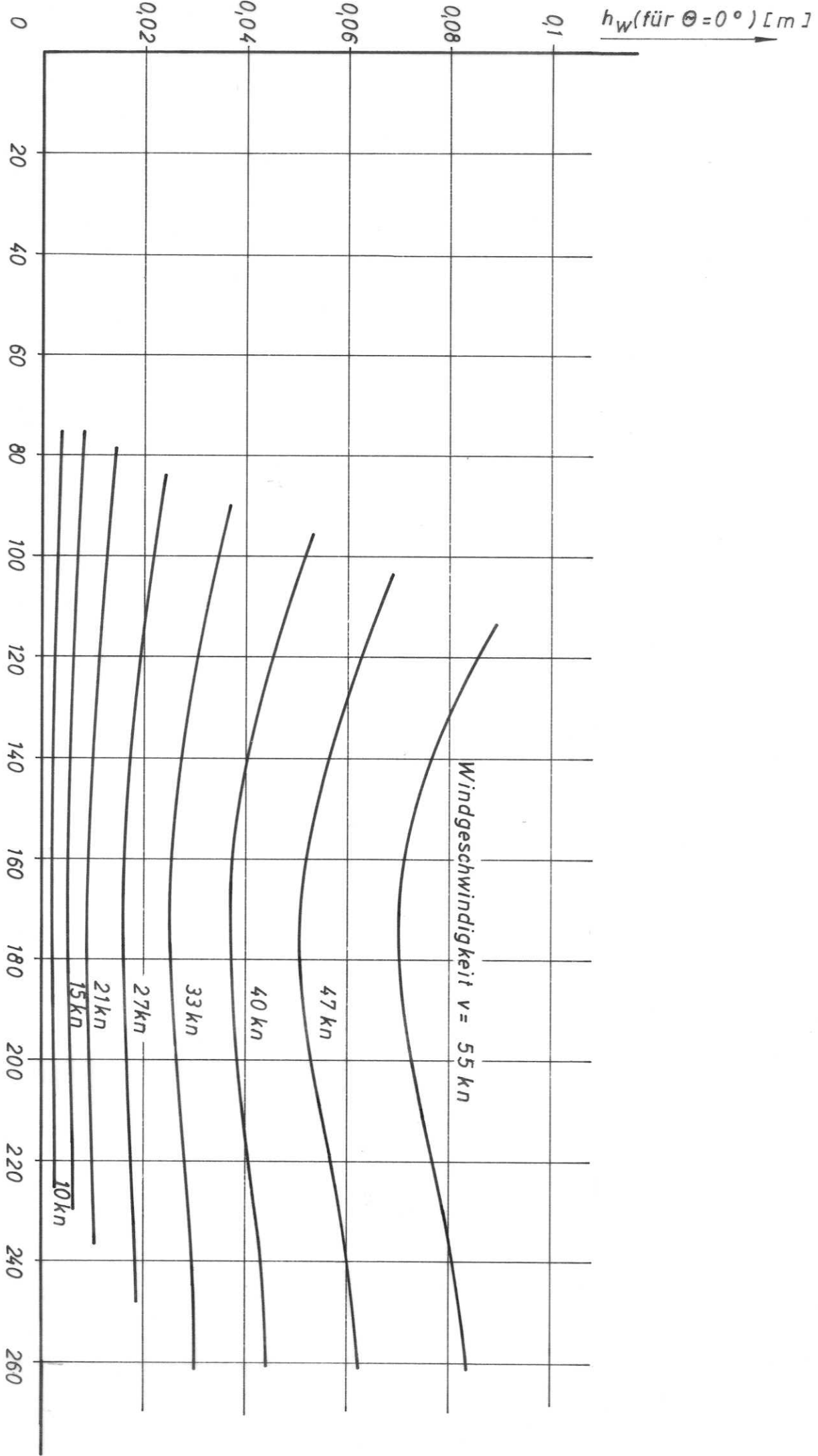
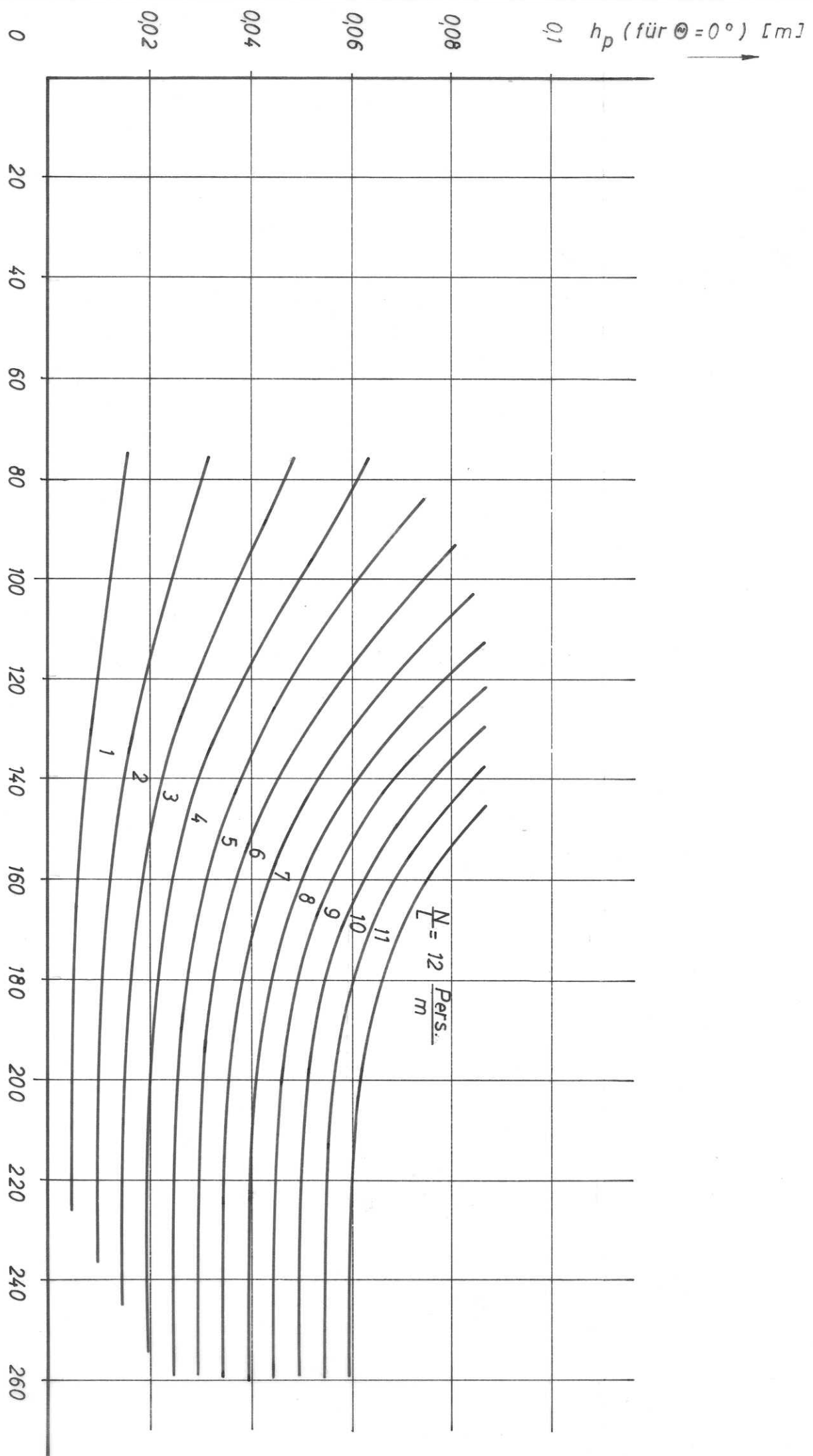


Bild 1 : Krän gende Winddruckhebelarme

Schiffslänge  $L$  [m] →



**Bild 2:** Krängende Hebel durch Personen, die sich an einer Schiffseite aufhalten.

Schiffslänge  $L$  [m]  $\longrightarrow$

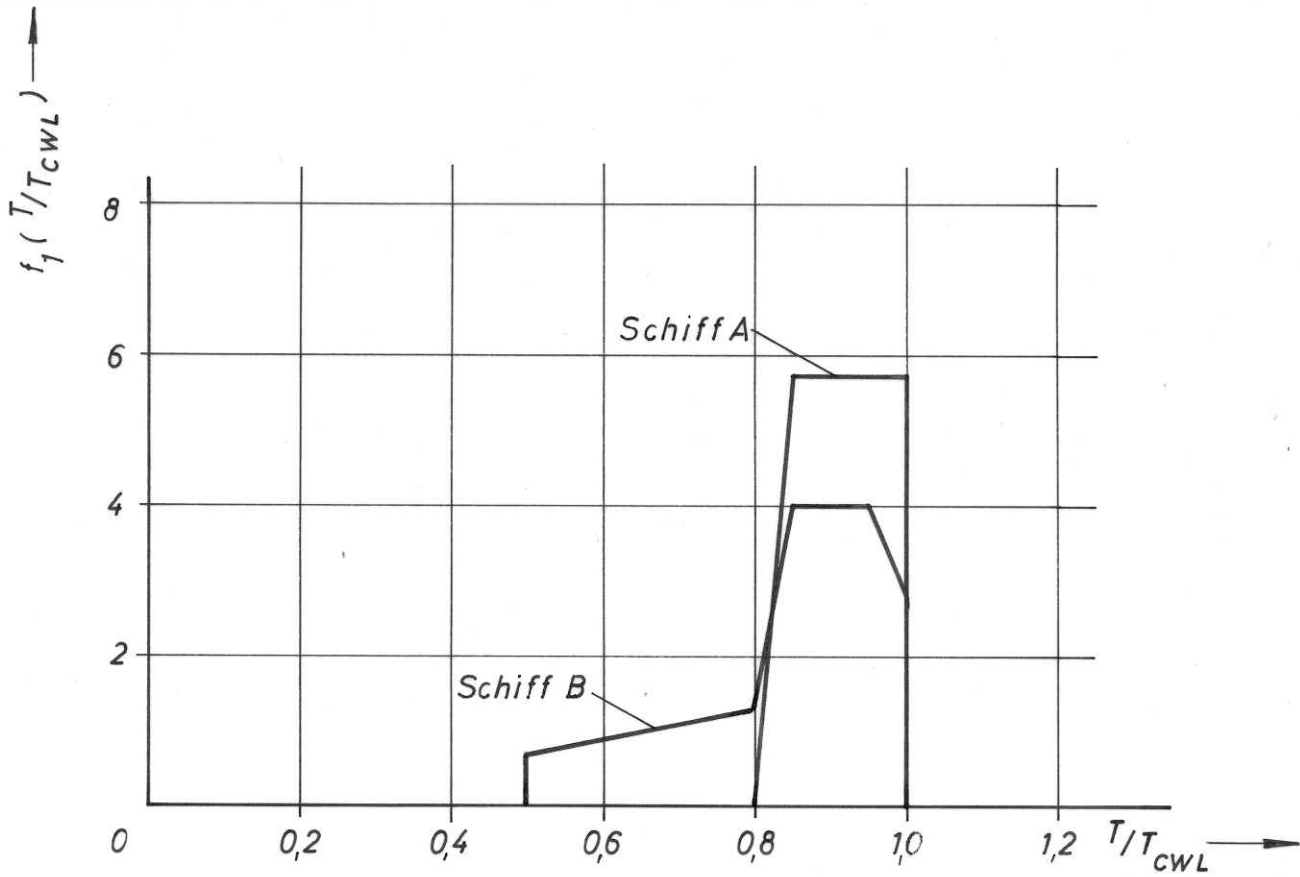


Bild 3: Verteilungsdichte des Tiefgangs

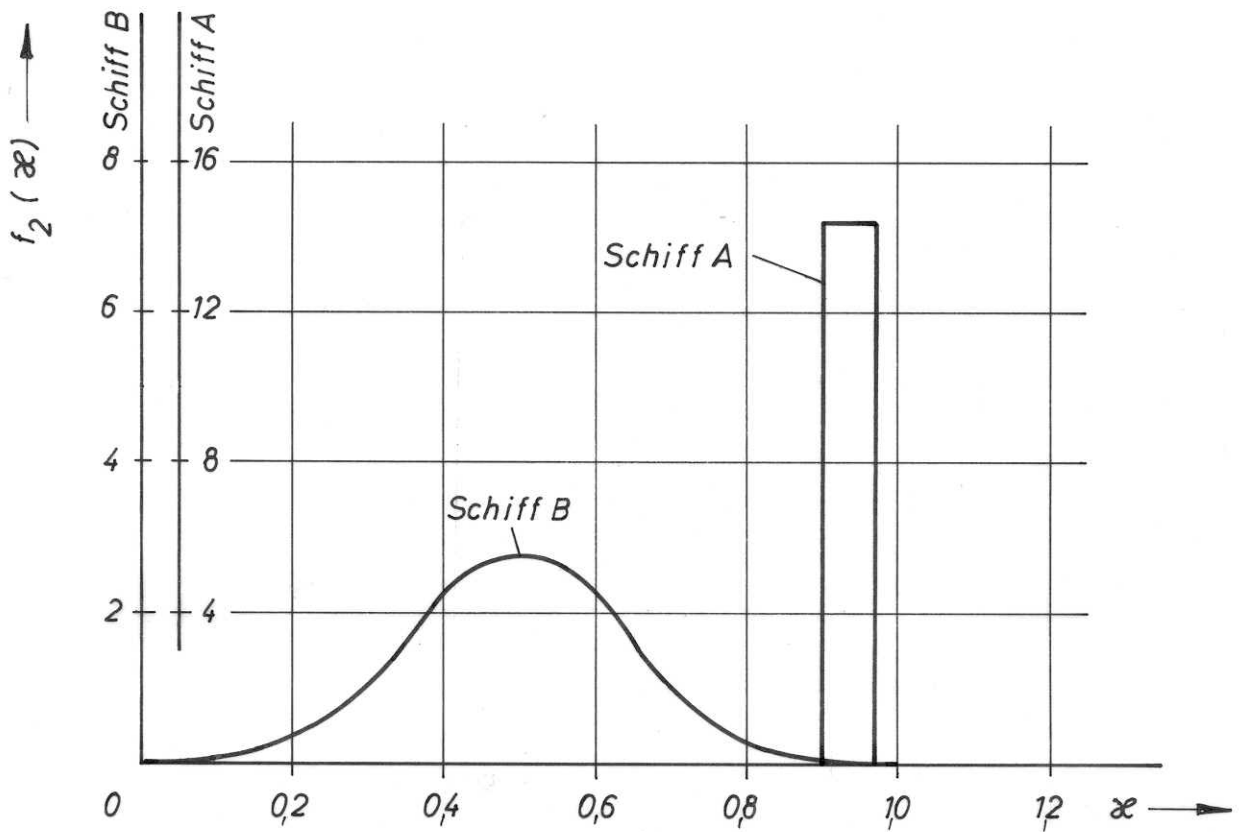


Bild 4: Verteilungsdichte der Flutbarkeit

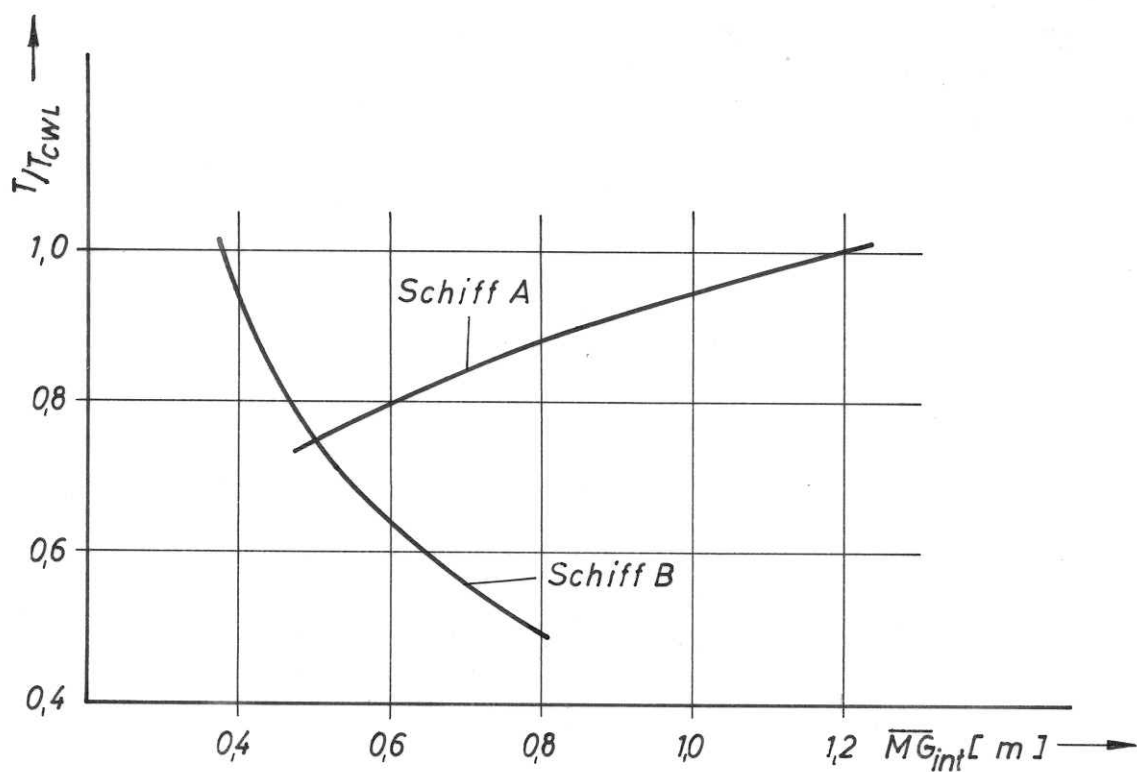
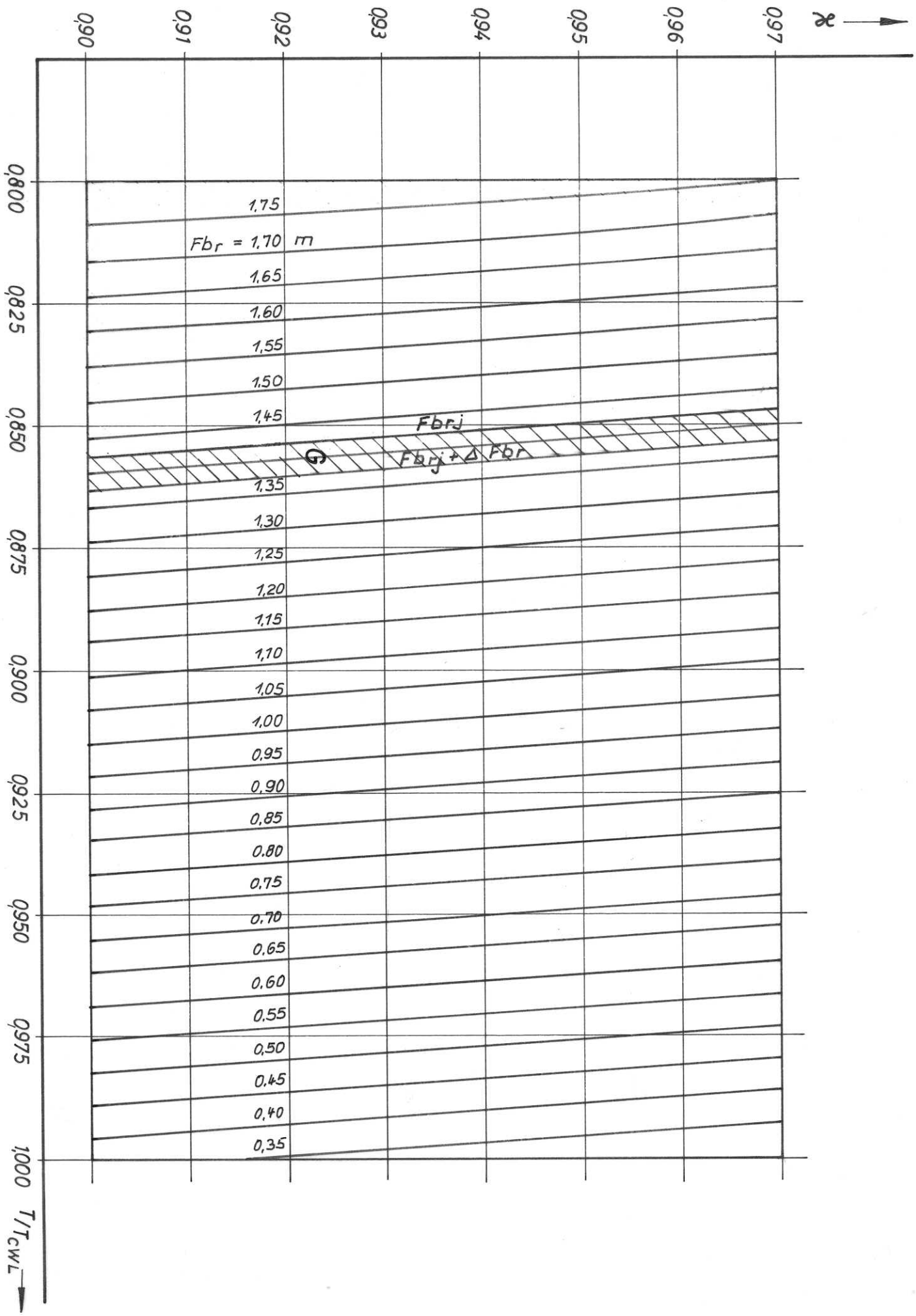


Bild 5:  $\overline{MG}_{int}$  in Abhängigkeit vom Tiefgang

Bild 6: Kombinationen von  $T/T_{cwl}$  und  $\alpha$ , die bei Schiff A zu gleichen Werten für  $F_{br}$  führen.



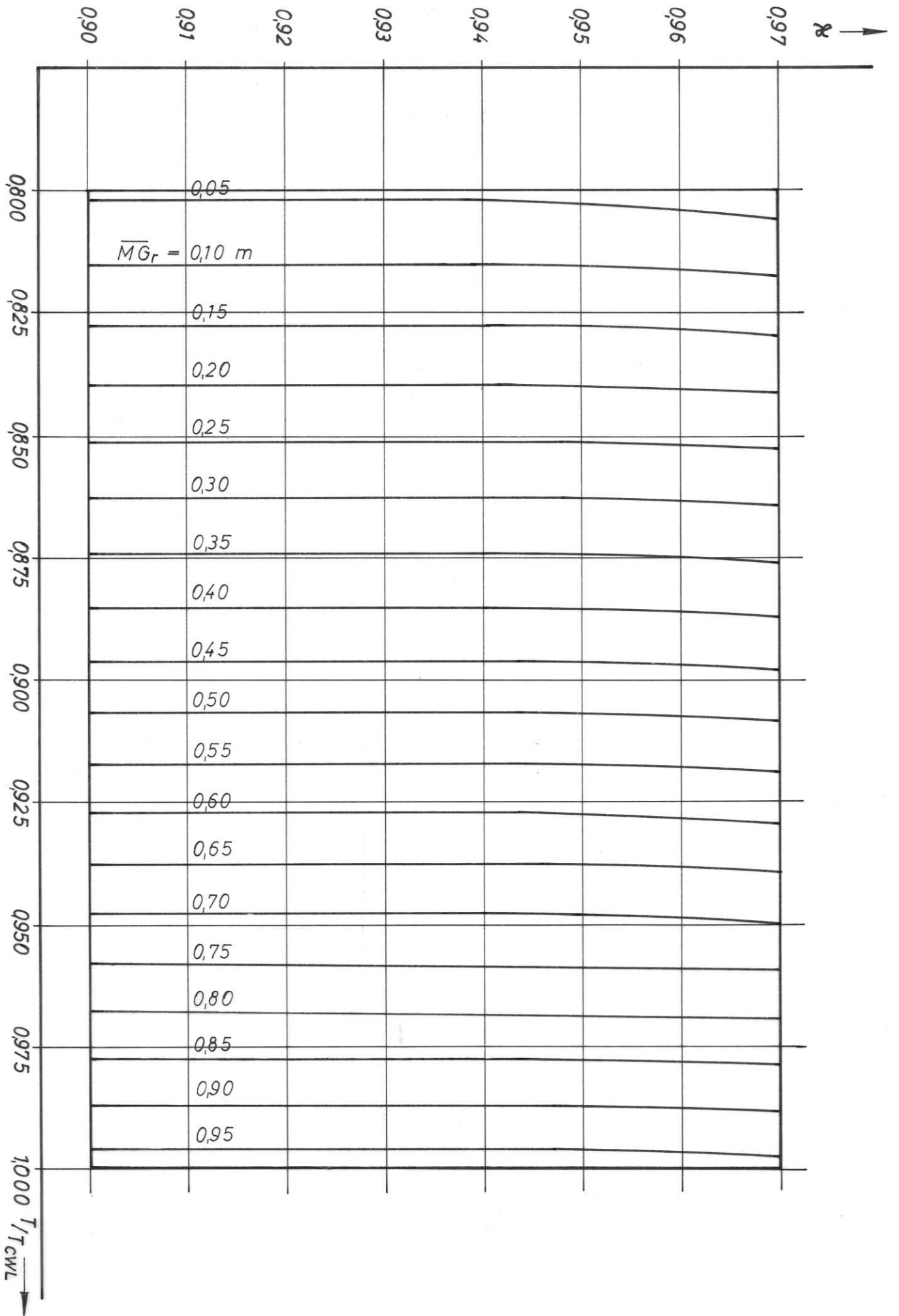


Bild 7 : Kombinationen von  $T/T_{cwl}$  und  $\alpha$ , die bei Schiff A zu gleichen Werten für  $\overline{MGr}$  führen.

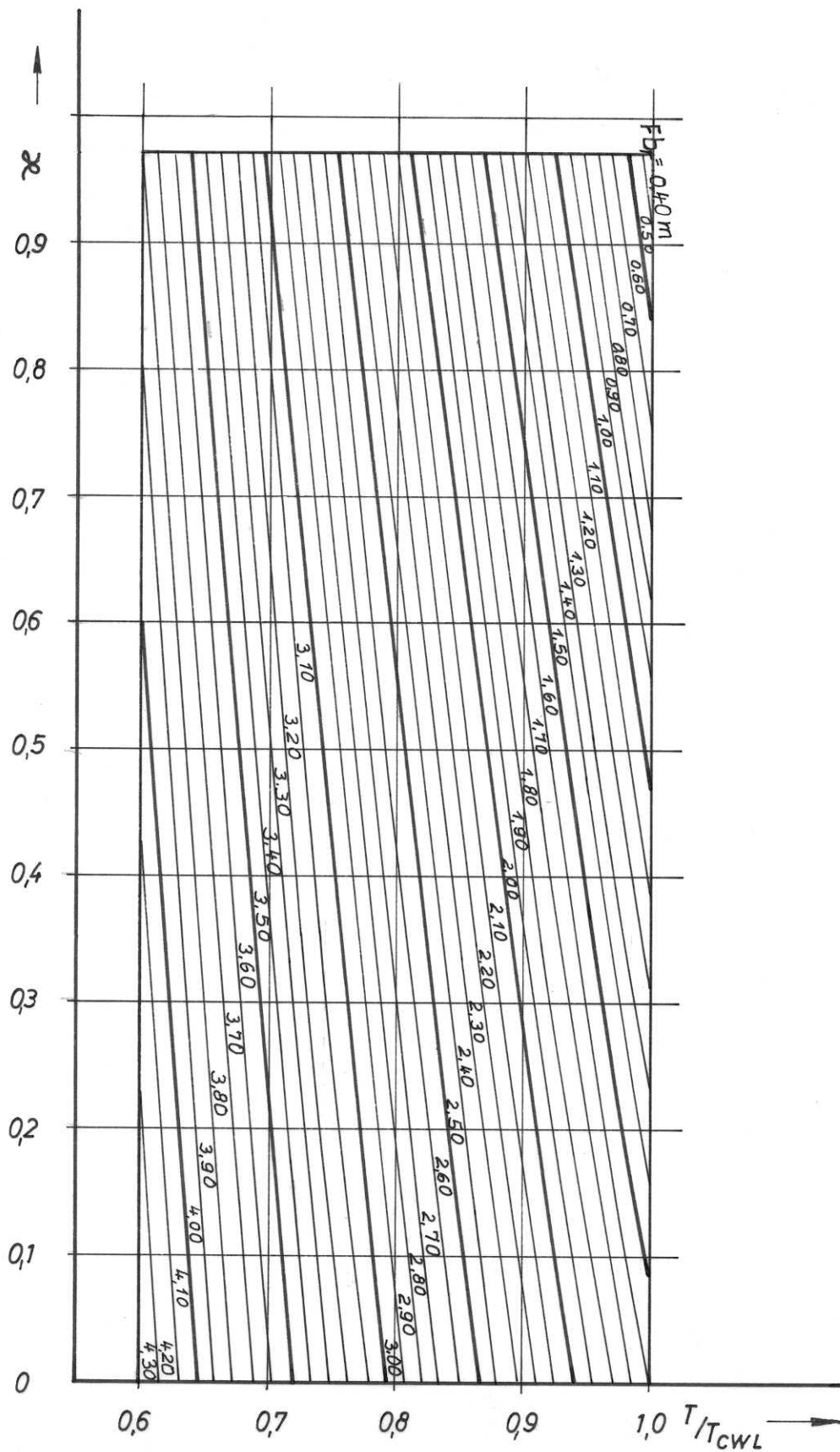


Bild 8: Kombinationen von  $T/T_{CWL}$  und  $z$ , die bei Schiff B zu gleichen  $Fb_r$ -Werten führen.

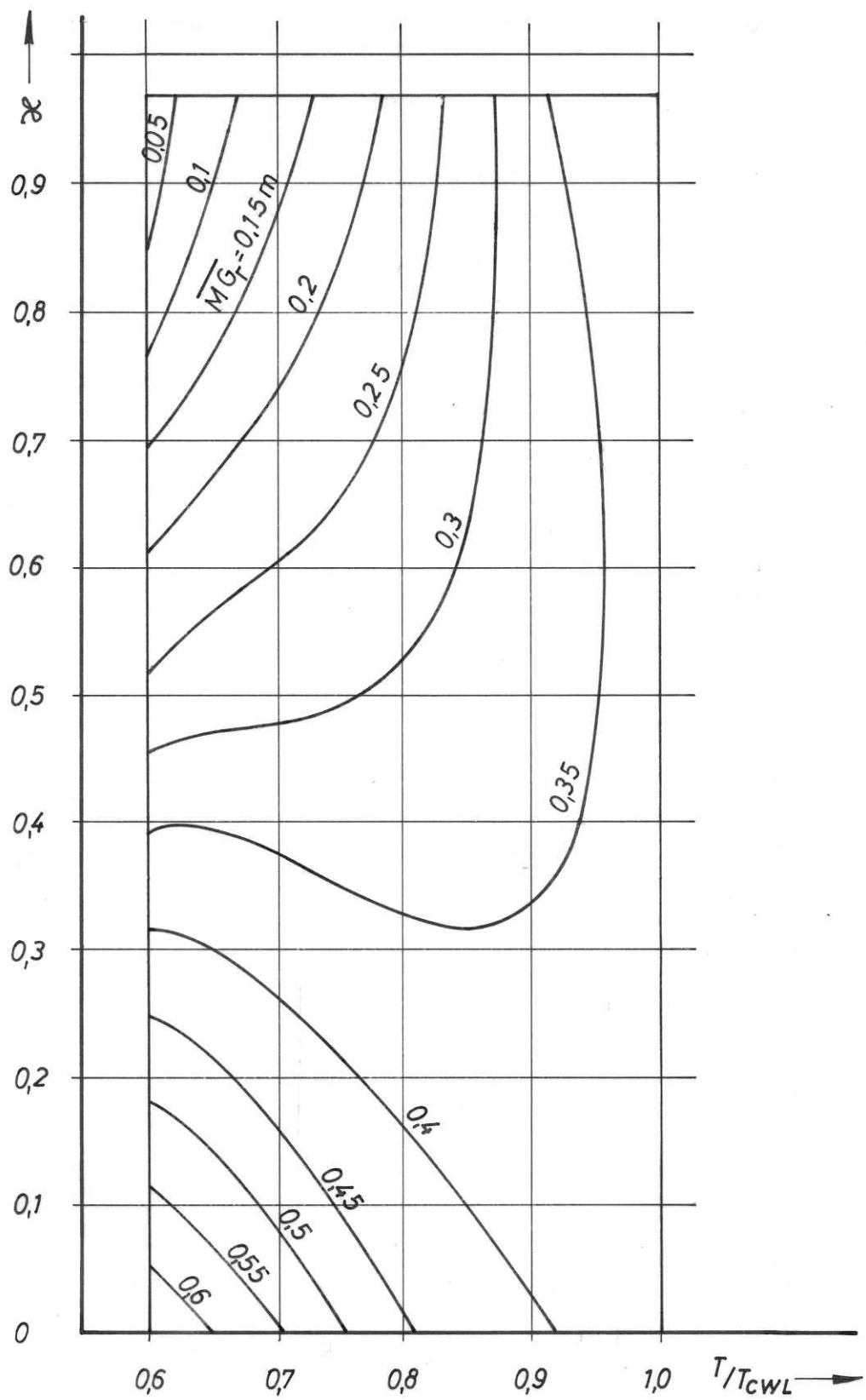


Bild 9: Kombinationen von  $T/T_{cwl}$  und  $x$ , die bei Schiff B zu gleichen  $\overline{MG}_f$ -Werten führen.

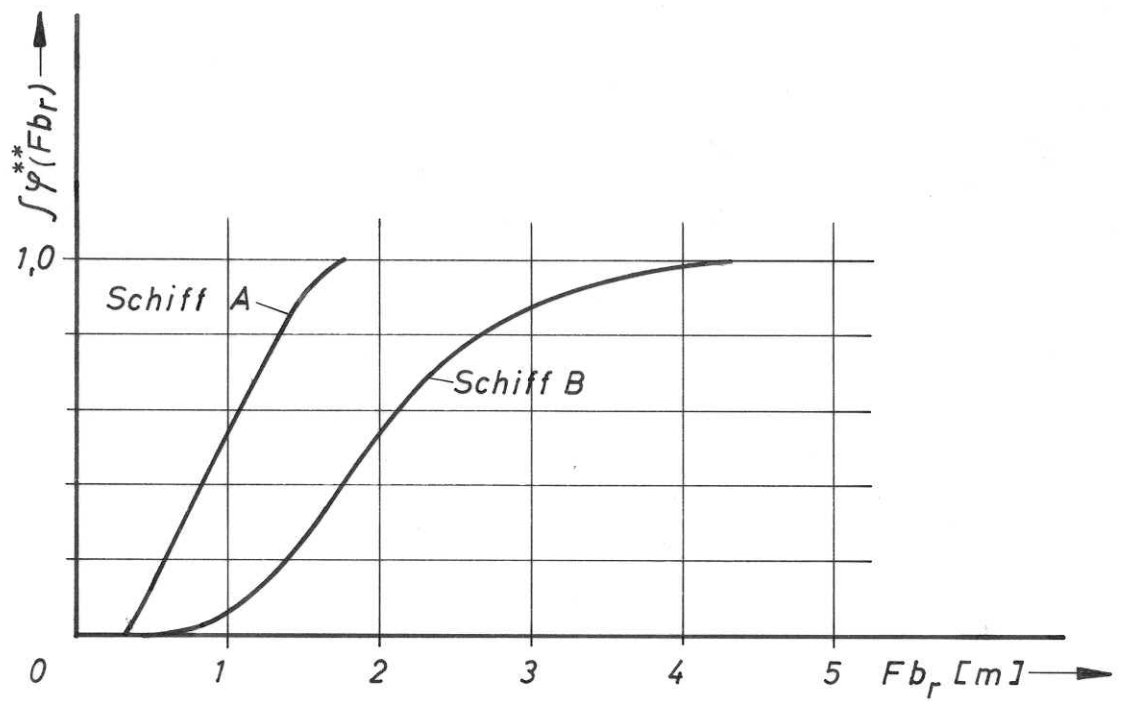


Bild 10: Verteilungsfunktion des Restfreibords

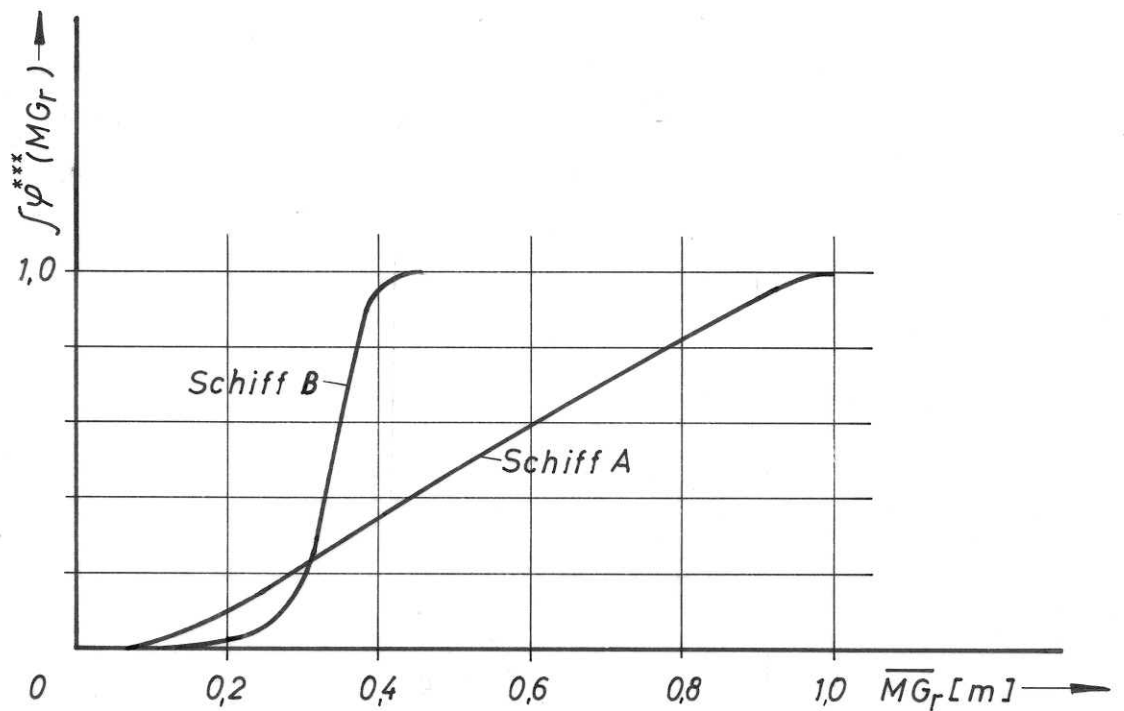


Bild 11: Verteilungsfunktion von  $\overline{MG}_r$

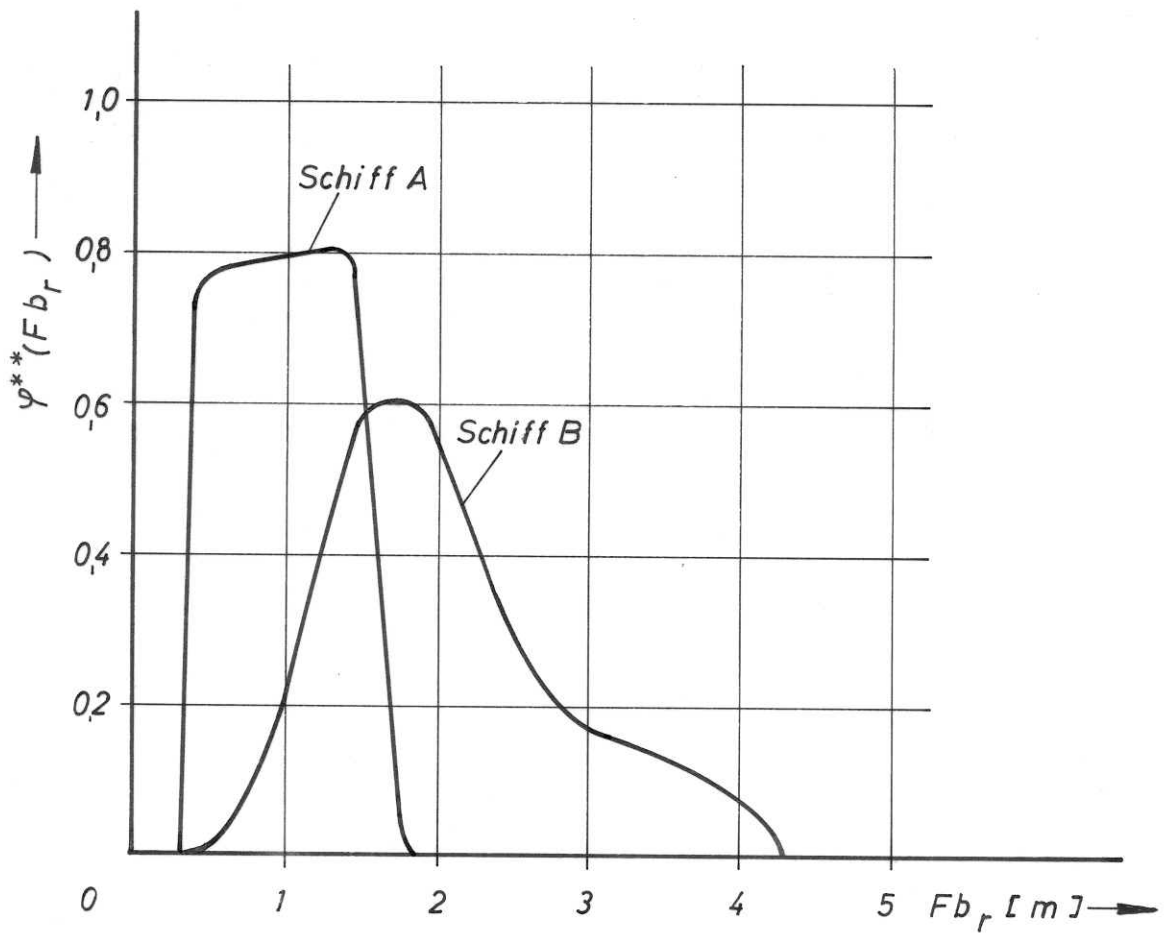


Bild 12: Verteilungsdichte des Restfreibords

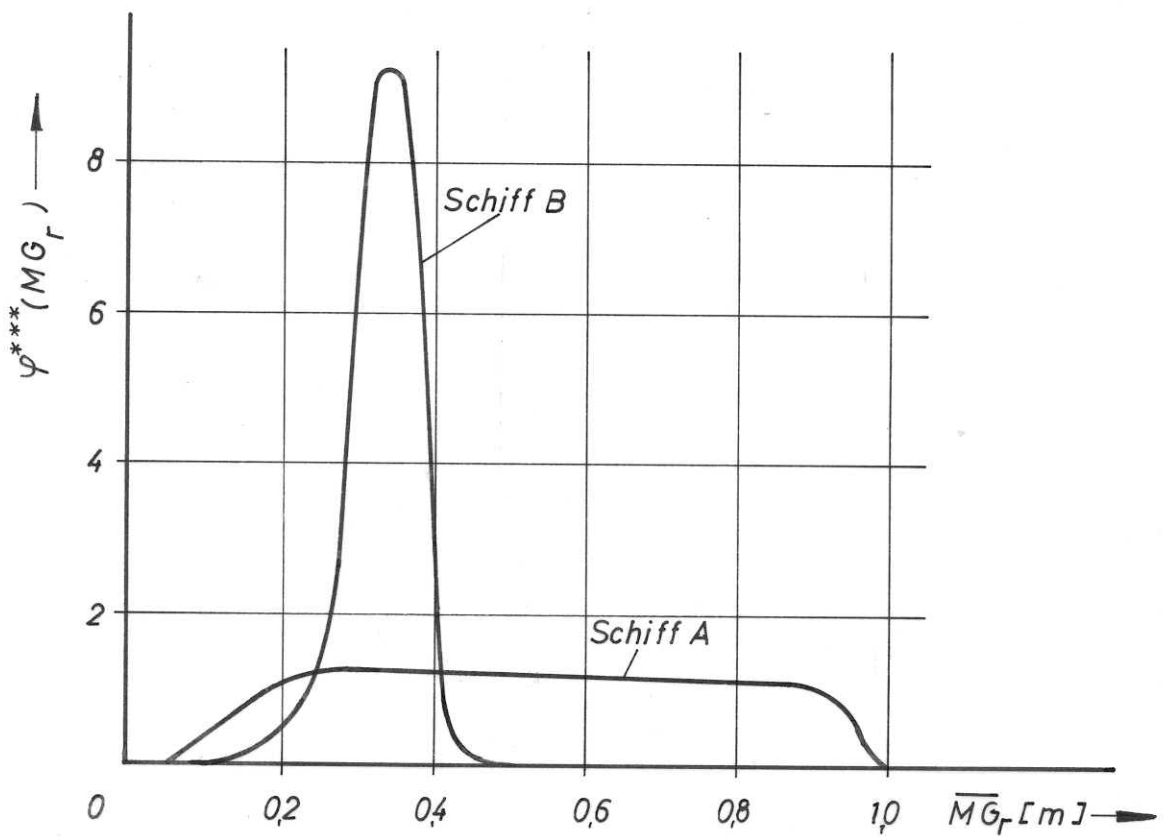
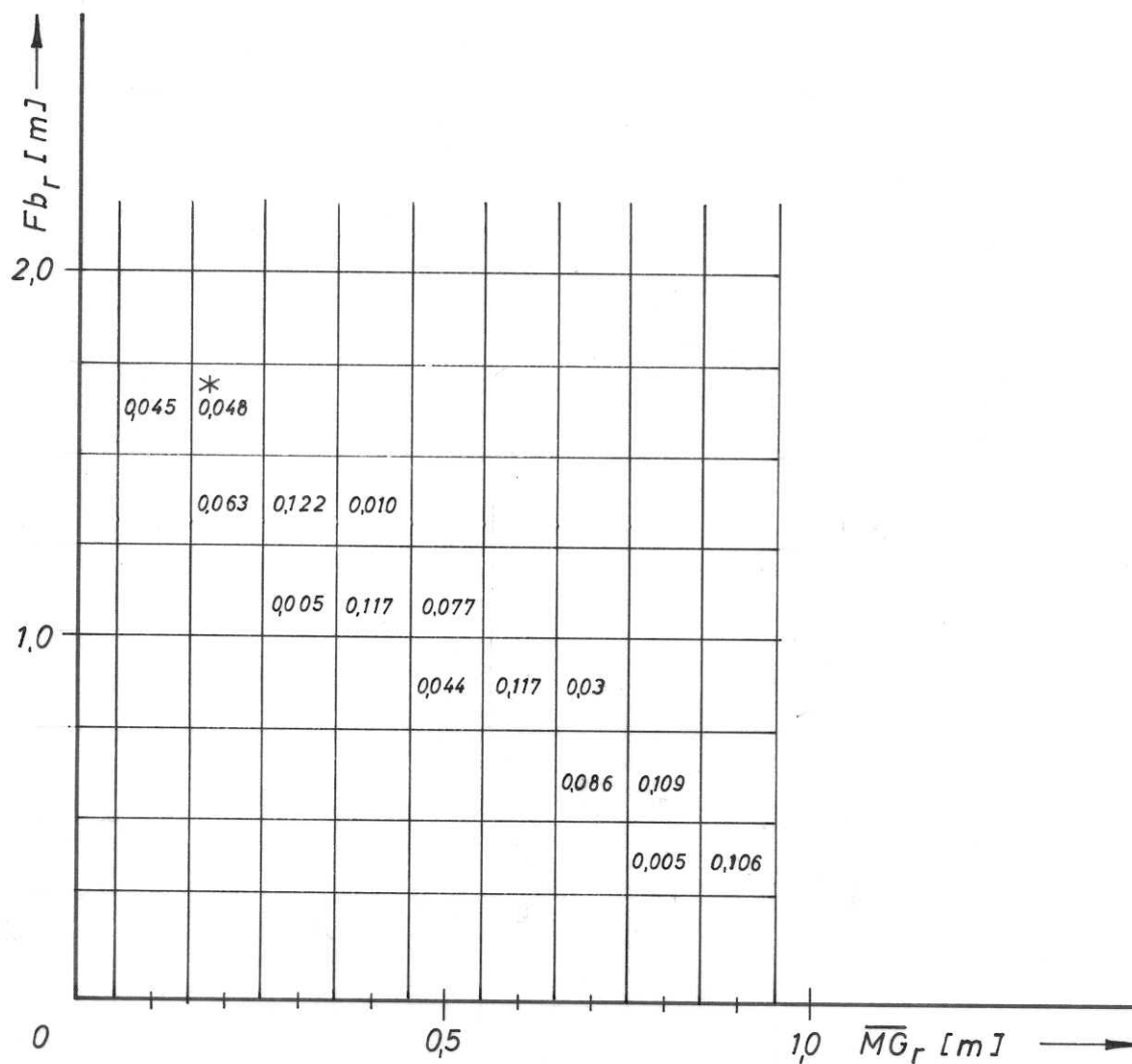


Bild 13: Verteilungsdichte von  $\overline{MG}_r$

Bild 14 : Verteilungsdichte  $\varphi_j^*(Fb_r, \overline{MG}_r)$  für Schiff A

\* Häufigkeit von  $Fb_r - \overline{MG}_r$  Kombinationen



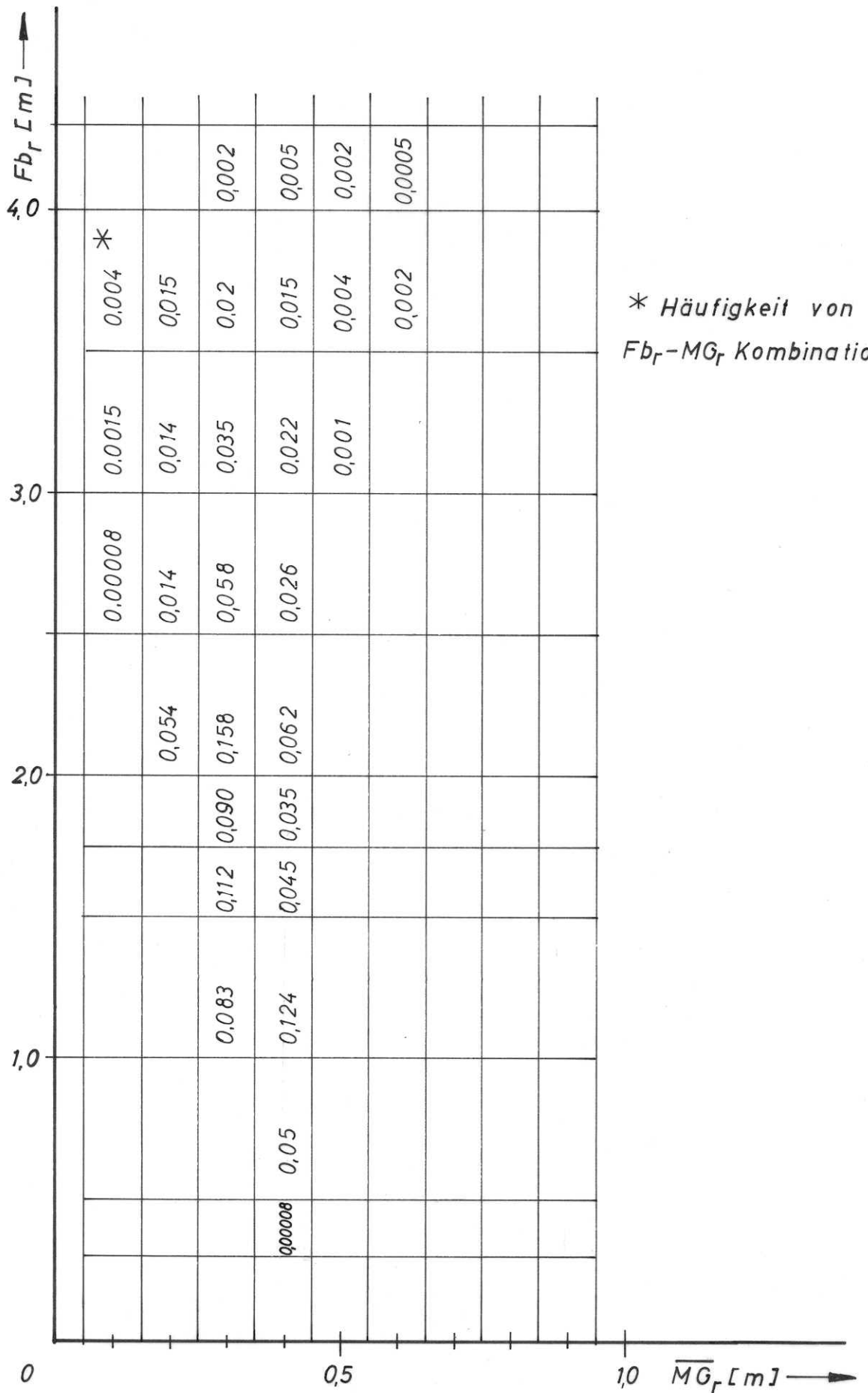
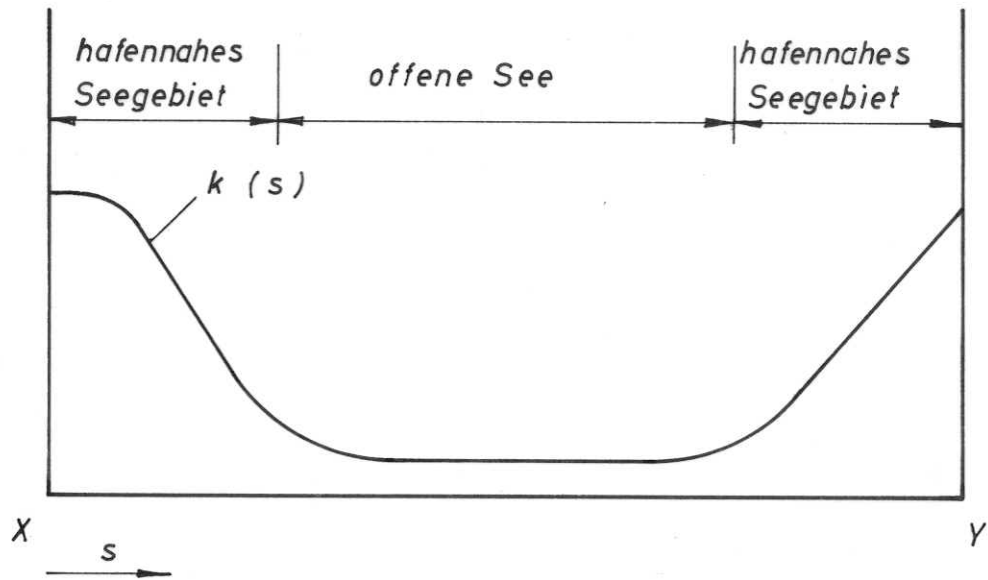


Bild 15: Verteilungsdichte  $\psi_i^*(Fb_r, MG_r)$  für Schiff B



**Bild 16** : Verteilungsdichte für das Ereignis einer Kollision zwischen zwei Häfen  $X$  und  $Y$

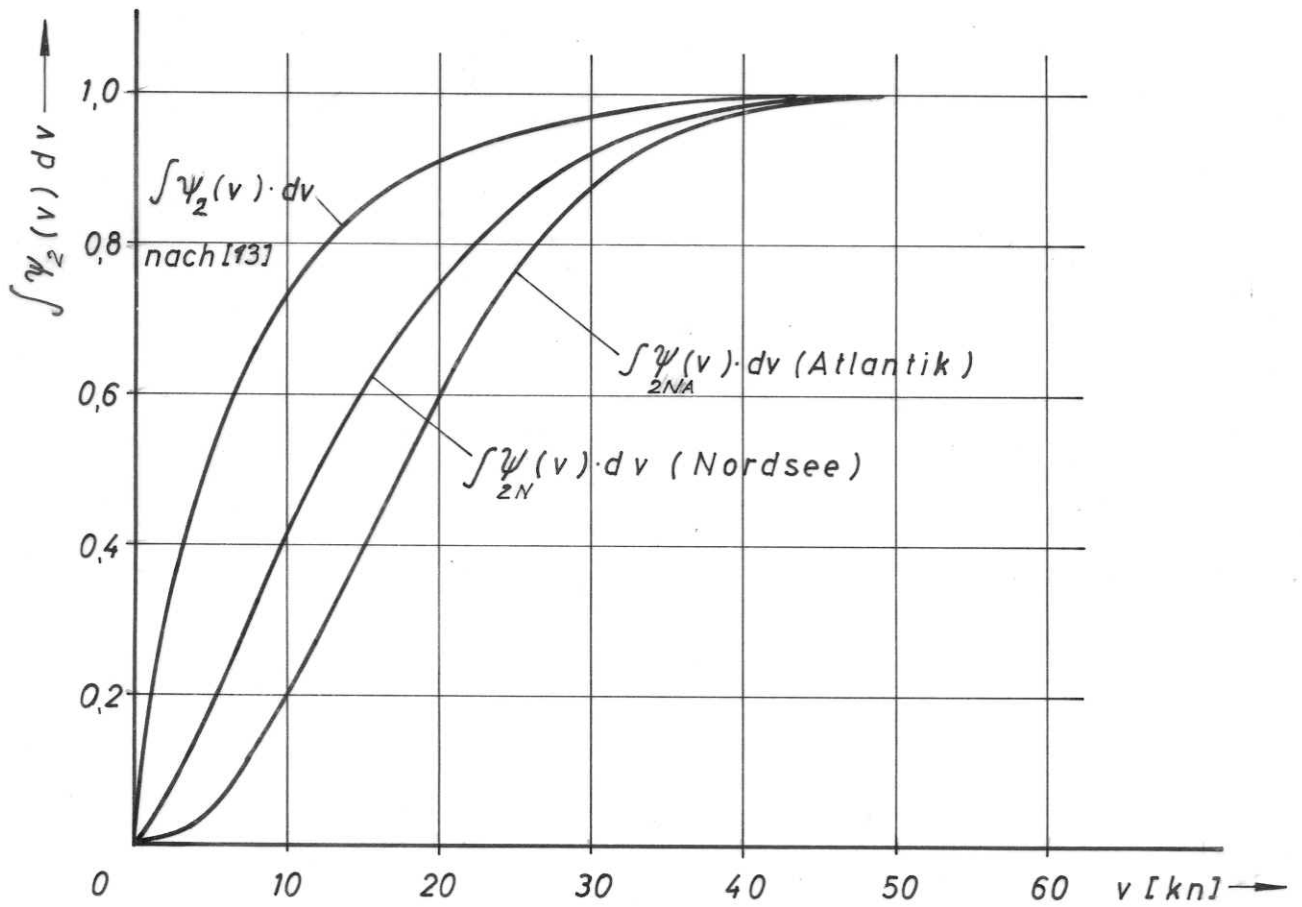


Bild 17: Verteilungsfunktionen von Windstärken

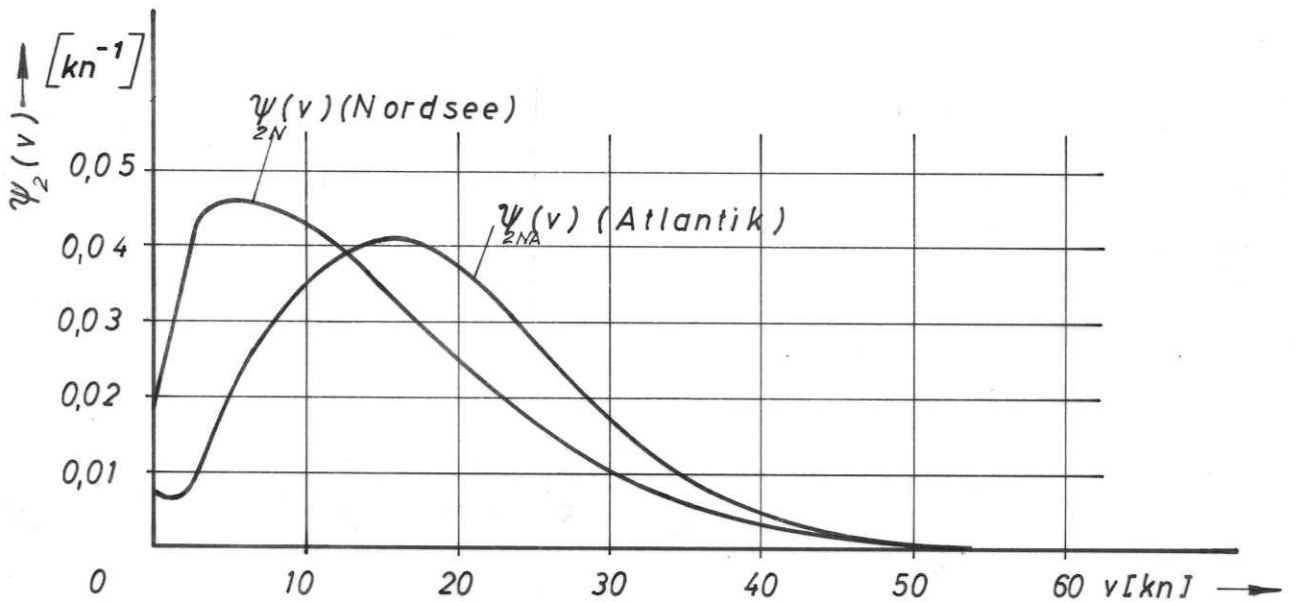


Bild 18: Verteilungsdichten von Windstärken

| Wellenamplitude $r_0$ [m] | Wellenlänge $\lambda$ [m] |       |       |       |       |      |      |      |     |     |     |     | $\Sigma$ |   |   |       |
|---------------------------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|----------|---|---|-------|
|                           | 0                         | 50    | 100   | 150   | 200   | 250  | 300  | 350  | 400 | 450 | 500 | 550 |          |   |   |       |
| 0,5                       | 3,1*                      | 0,1   | 0,2   | 0,1   | 0,1   | 0,1  | —    | —    | —   | —   | —   | —   | —        | — | — | 3,7   |
| 1,0                       | 113,9                     | 54,2  | 28,3  | 12,8  | 9,3   | 4,3  | 4,0  | 2,9  | 0,4 | —   | —   | —   | —        | — | — | 230,1 |
| 1,5                       | 52,4                      | 87,5  | 82,5  | 54,0  | 40,0  | 16,0 | 7,1  | 2,5  | 0,3 | —   | —   | —   | —        | — | — | 342,3 |
| 2,0                       | 7,9                       | 30,3  | 44,7  | 47,0  | 43,7  | 16,2 | 10,3 | 5,0  | 0,9 | —   | —   | —   | —        | — | — | 206,0 |
| 2,5                       | 1,9                       | 8,5   | 14,4  | 19,7  | 28,3  | 13,1 | 5,9  | 4,1  | 0,9 | —   | —   | —   | —        | — | — | 96,8  |
| 3,0                       | 0,4                       | 3,3   | 6,2   | 10,0  | 16,2  | 8,6  | 6,0  | 2,7  | 1,0 | —   | —   | —   | —        | — | — | 54,4  |
| 3,5                       | 0,2                       | 1,5   | 2,5   | 5,9   | 7,2   | 5,0  | 3,8  | 1,4  | 0,6 | —   | —   | —   | —        | — | — | 28,1  |
| 4,0                       | —                         | 0,5   | 0,8   | 2,6   | 3,5   | 3,0  | 1,7  | 1,4  | 0,3 | —   | —   | —   | —        | — | — | 13,8  |
| 4,5                       | —                         | 0,3   | 0,6   | 1,6   | 1,9   | 2,4  | 1,6  | 1,3  | 0,1 | —   | —   | —   | —        | — | — | 9,8   |
| 5,0                       | —                         | 0,1   | 0,1   | 0,7   | 1,0   | 1,4  | 0,8  | 1,0  | 0,2 | —   | —   | —   | —        | — | — | 5,3   |
| 5,5                       | —                         | —     | 0,2   | 0,4   | 0,5   | 0,9  | 0,6  | 1,0  | 0,4 | —   | —   | —   | —        | — | — | 4,0   |
| $\Sigma$                  | 179,8                     | 186,3 | 180,5 | 154,8 | 151,7 | 71,0 | 41,8 | 23,3 | 5,1 | —   | —   | —   | —        | — | — | 994,3 |

\* Häufigkeit  $r_0$  und  $\lambda$

Bild 19: Verteilungsdichte  $\psi_{5NA}$  von Wellenlängen und Wellenamplituden im Nordatlantik

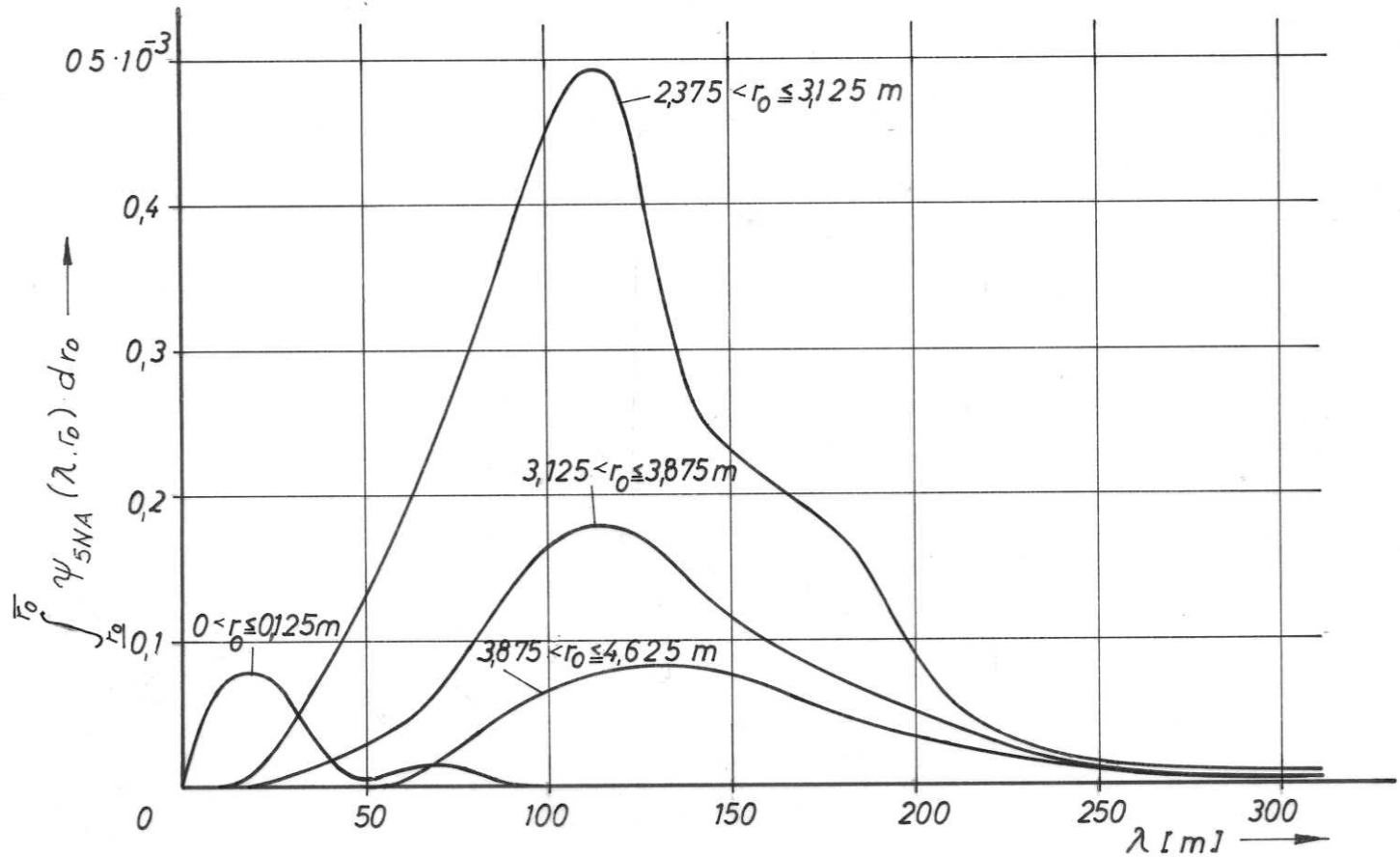
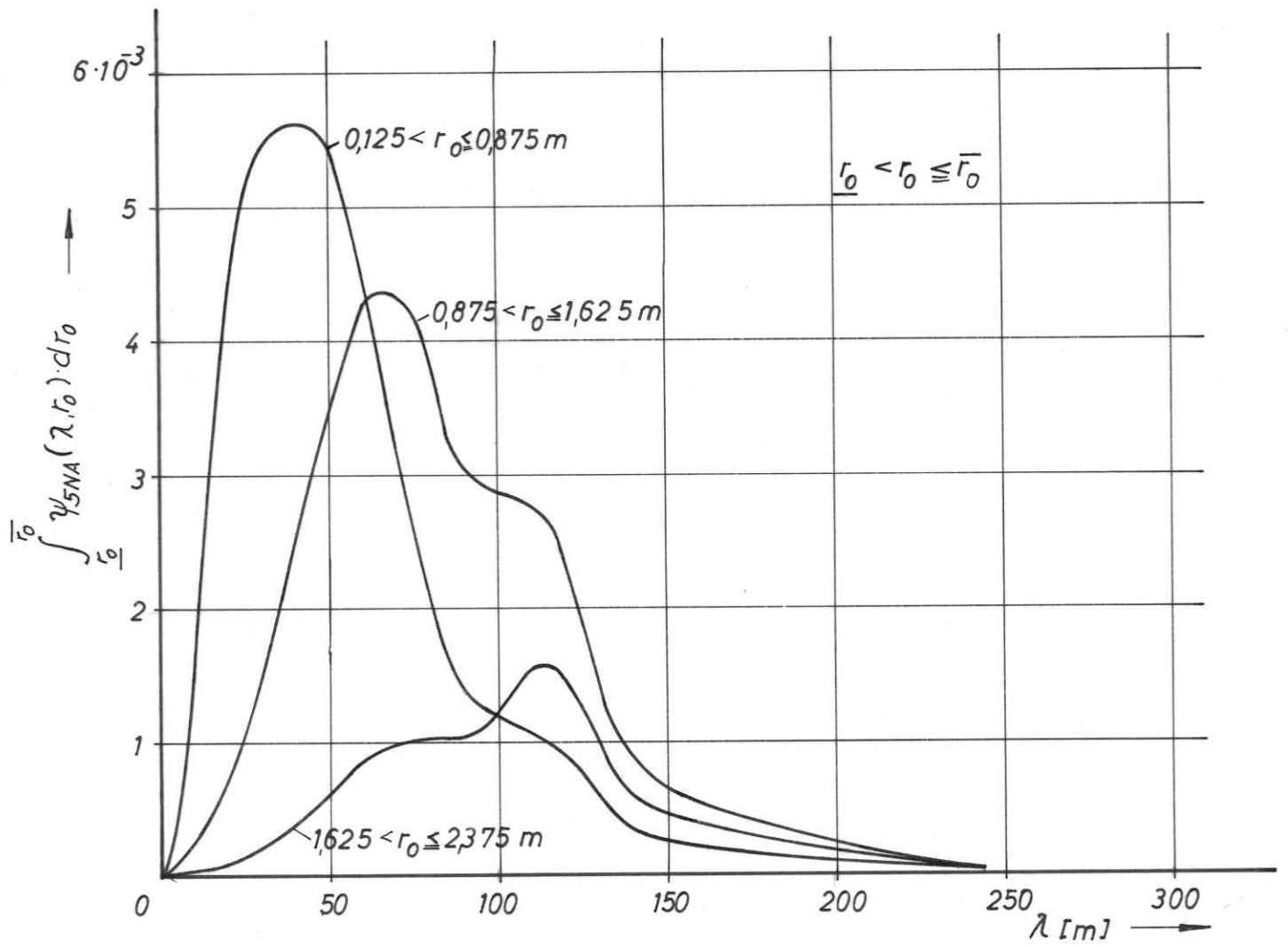
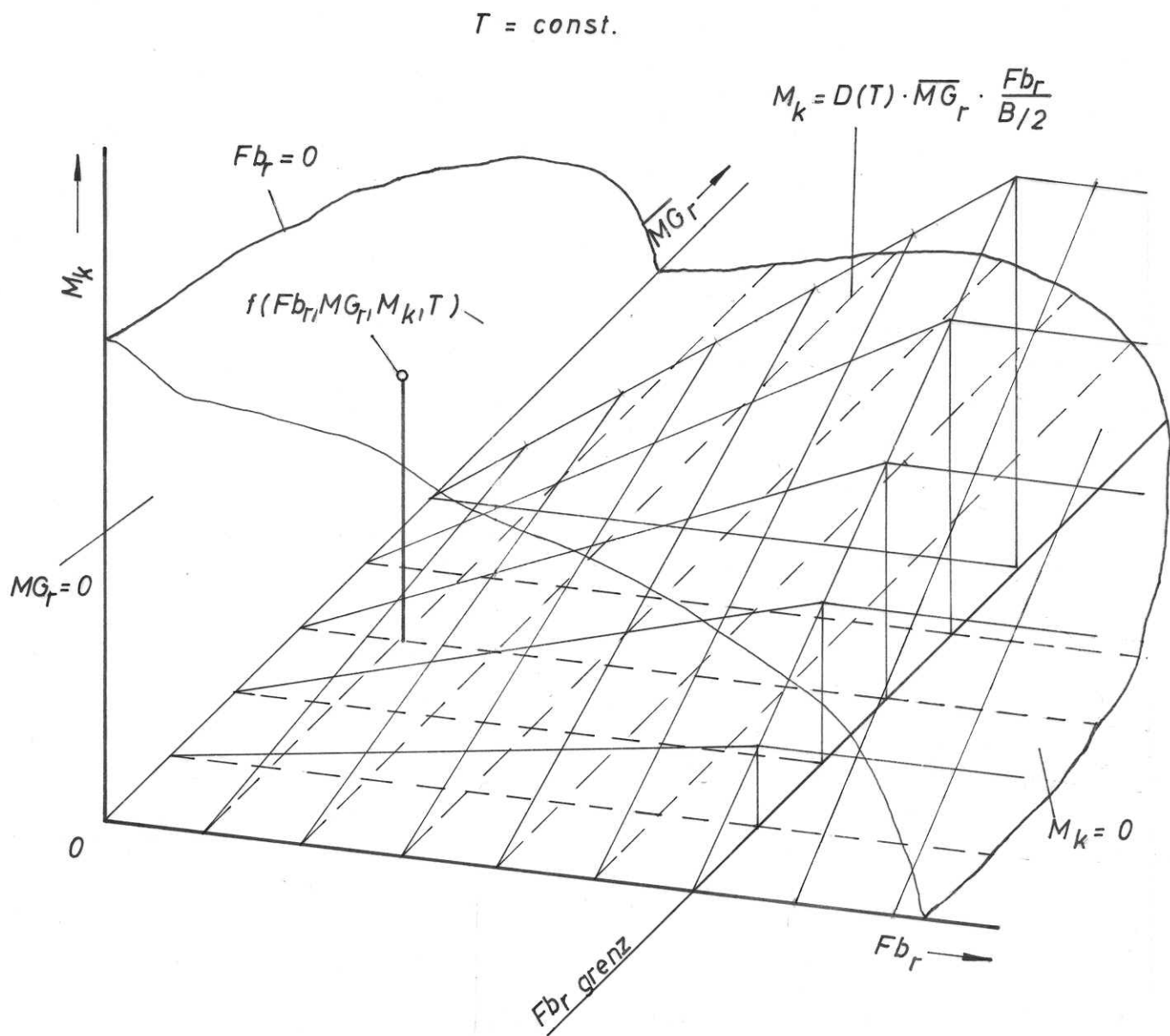
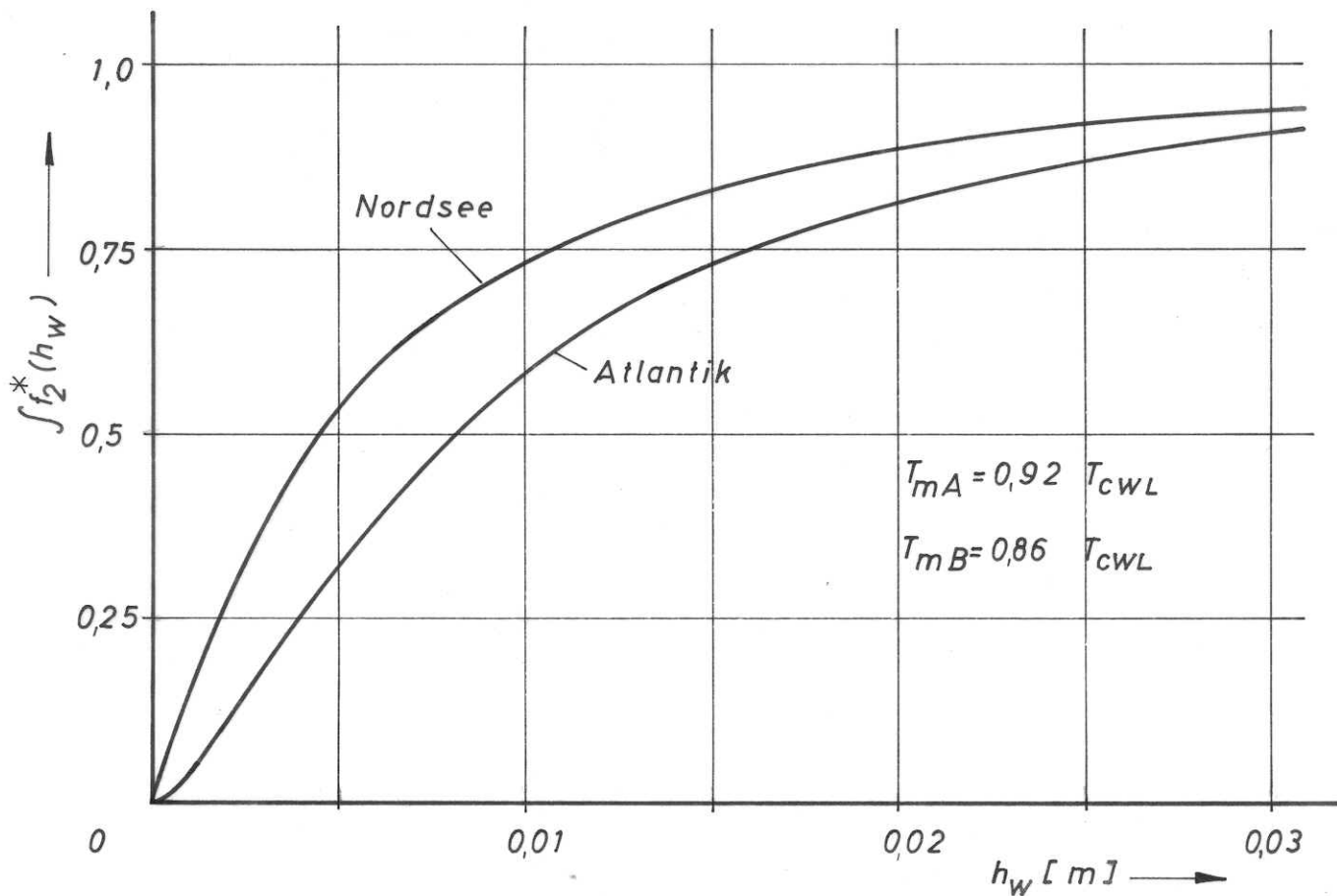


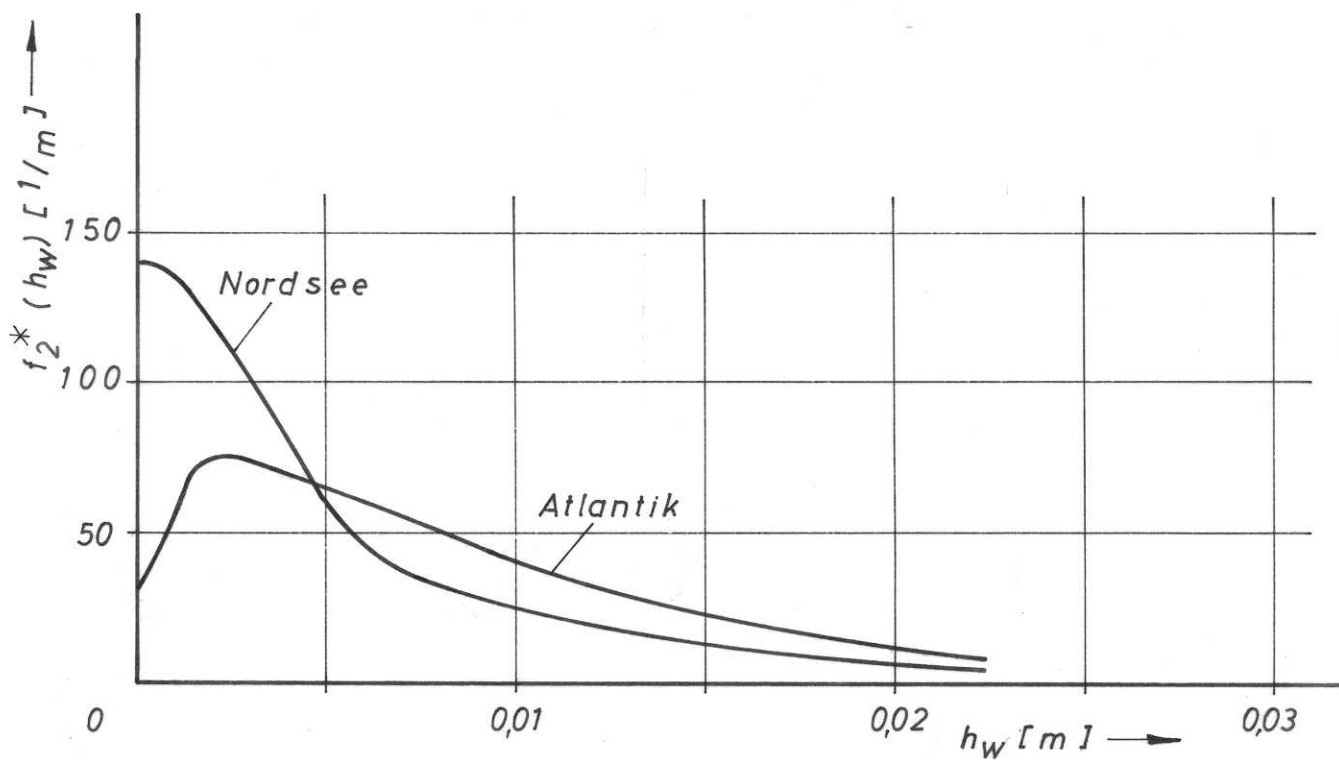
Bild 20: Verteilungsdichte von Wellenlängen bei verschiedenen Wellenamplituden im Nordatlantik



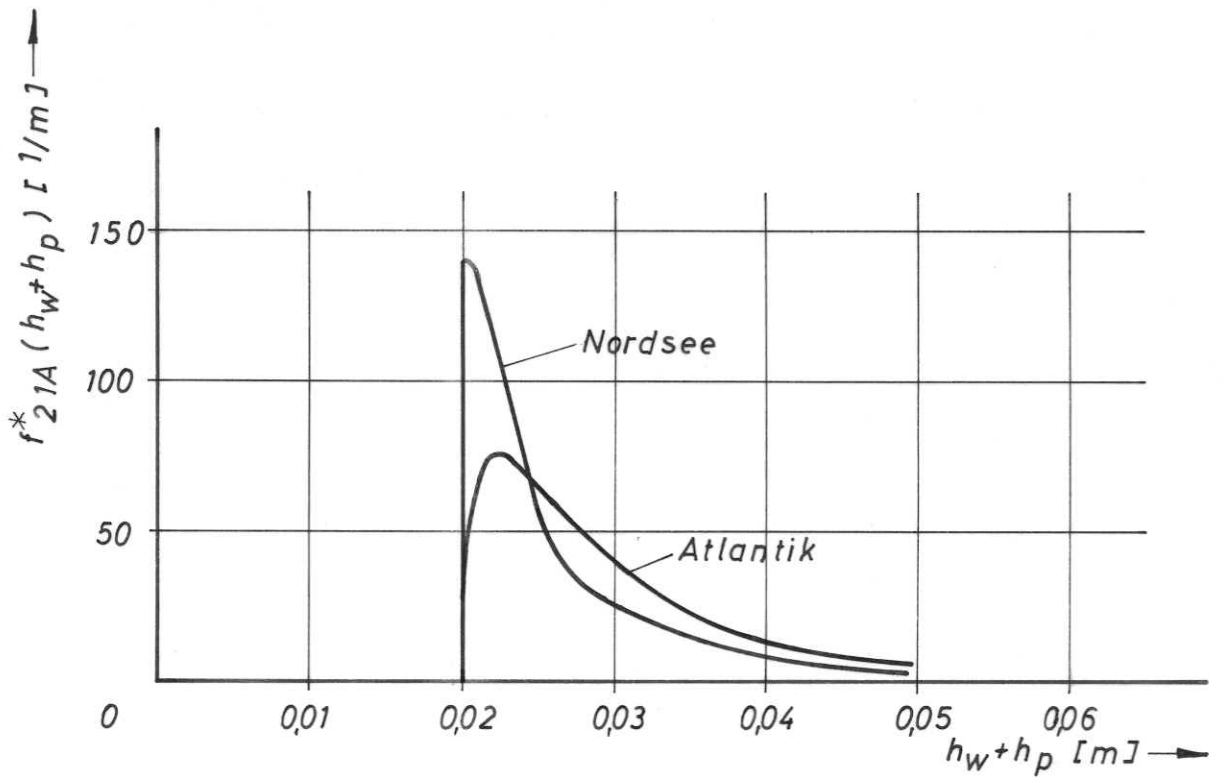
**Bild 21: Integrationsgebiet**



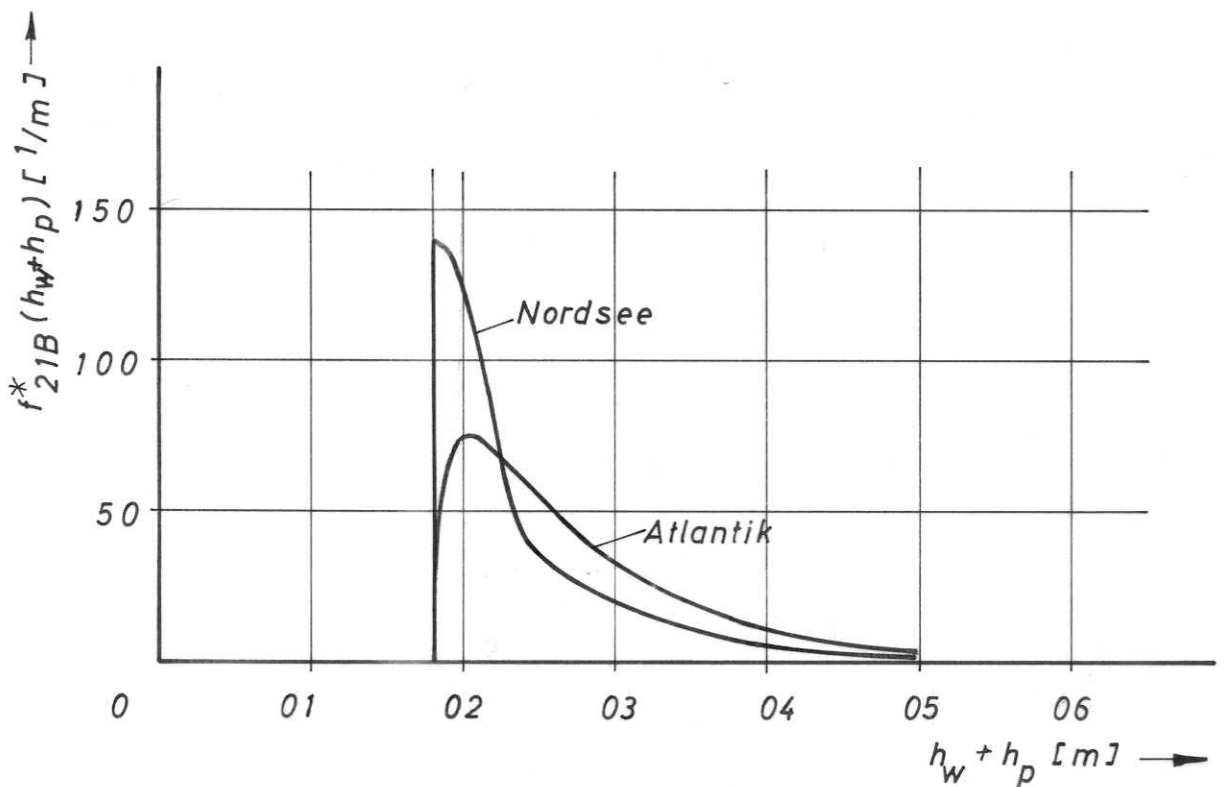
**Bild 22:** Verteilungsfunktion der krängenden Winddruckhebel für die Schiffe A und B bei einem mittleren Ausgangstiefgang



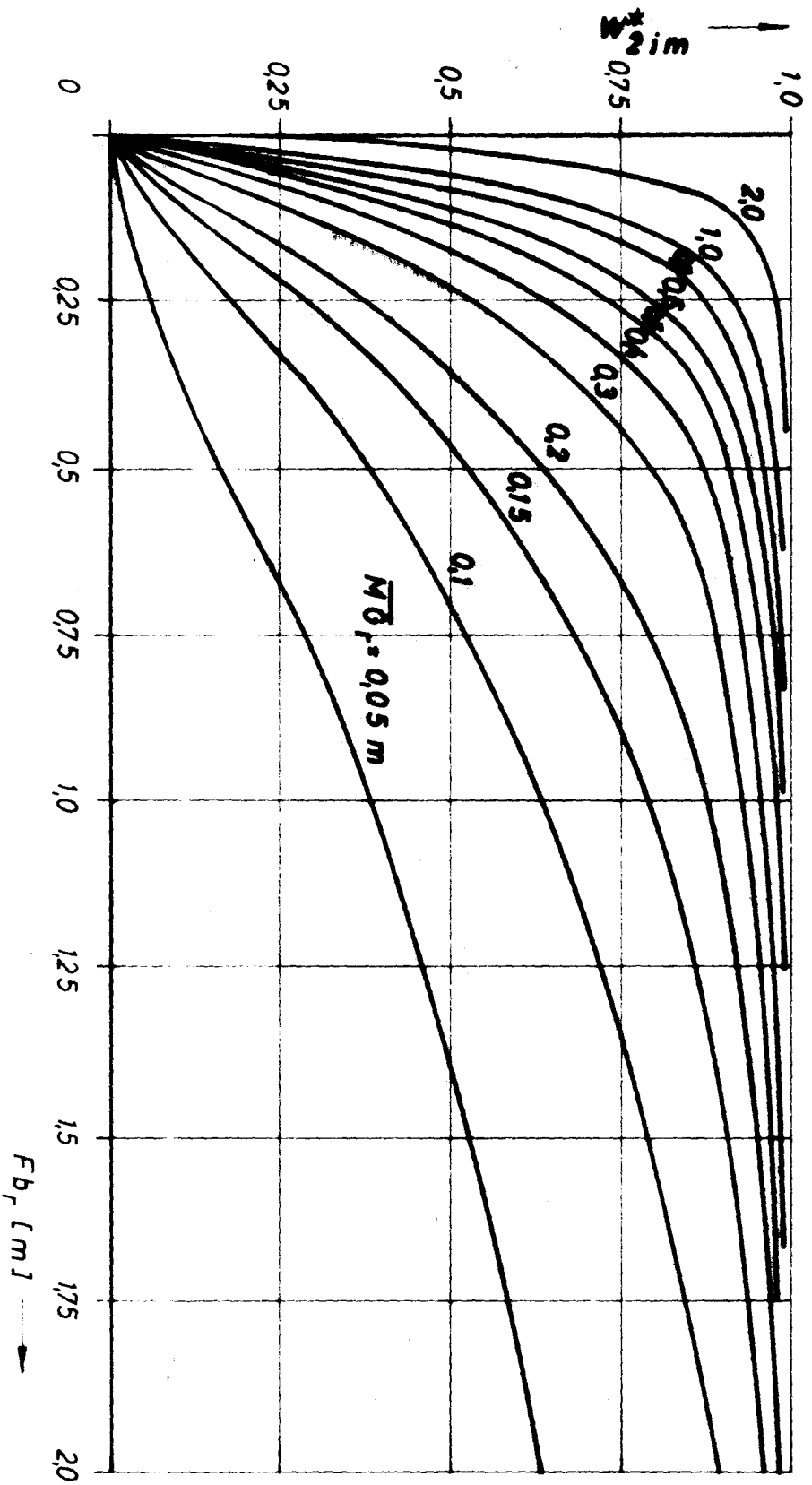
**Bild 23:** Verteilungsdichte der krängenden Winddruckhebel für die Schiffe A und B bei einem mittleren Ausgangstiefgang



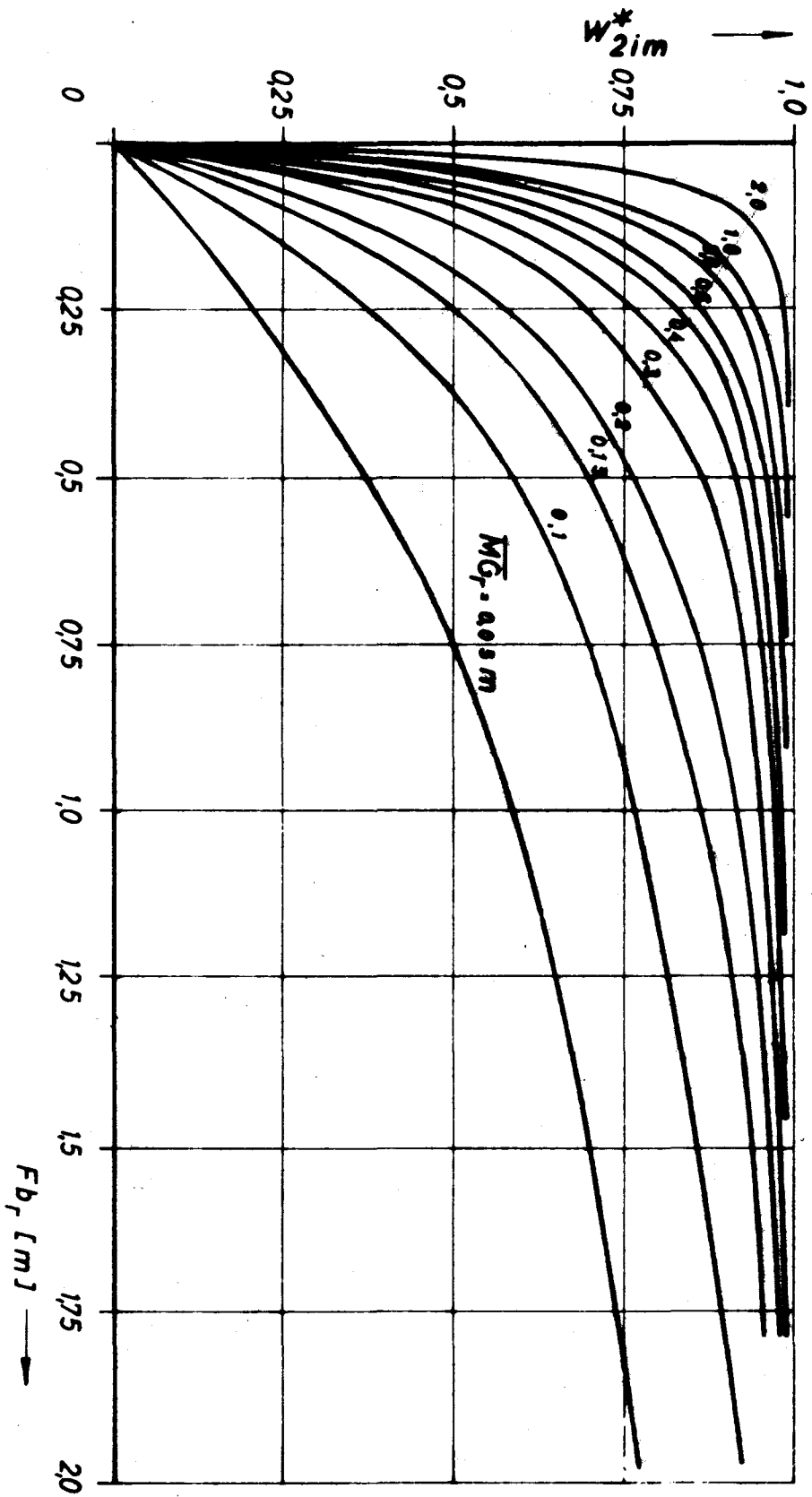
**Bild 24:** Summenverteilungsdichte von krängenden Hebeln (konst. Hebel und Winddruckhebel) für Schiff A



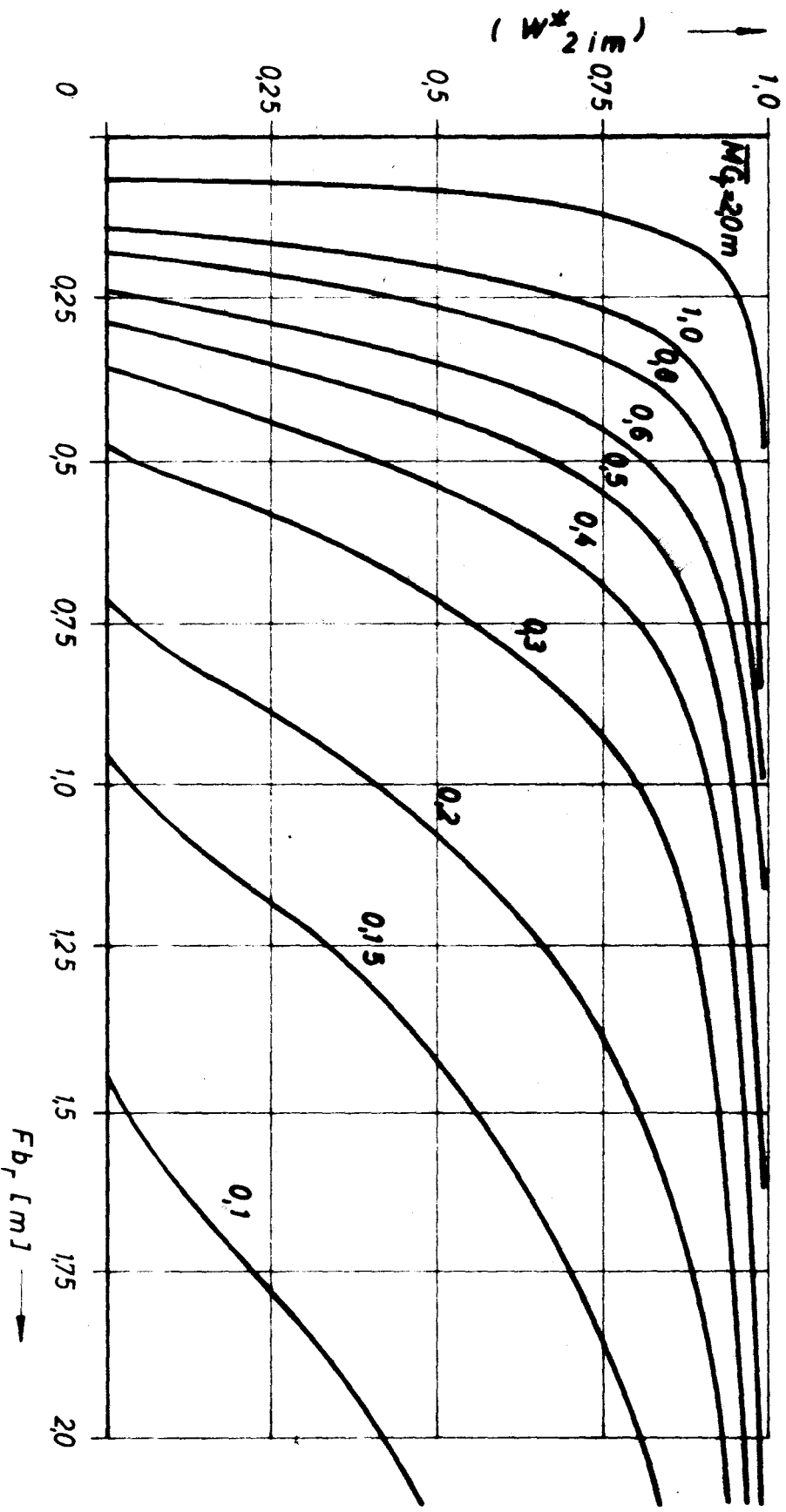
**Bild 25:** Summenverteilungsdichte von krängenden Hebeln (konst. Hebel und Winddruckhebel) für Schiff B



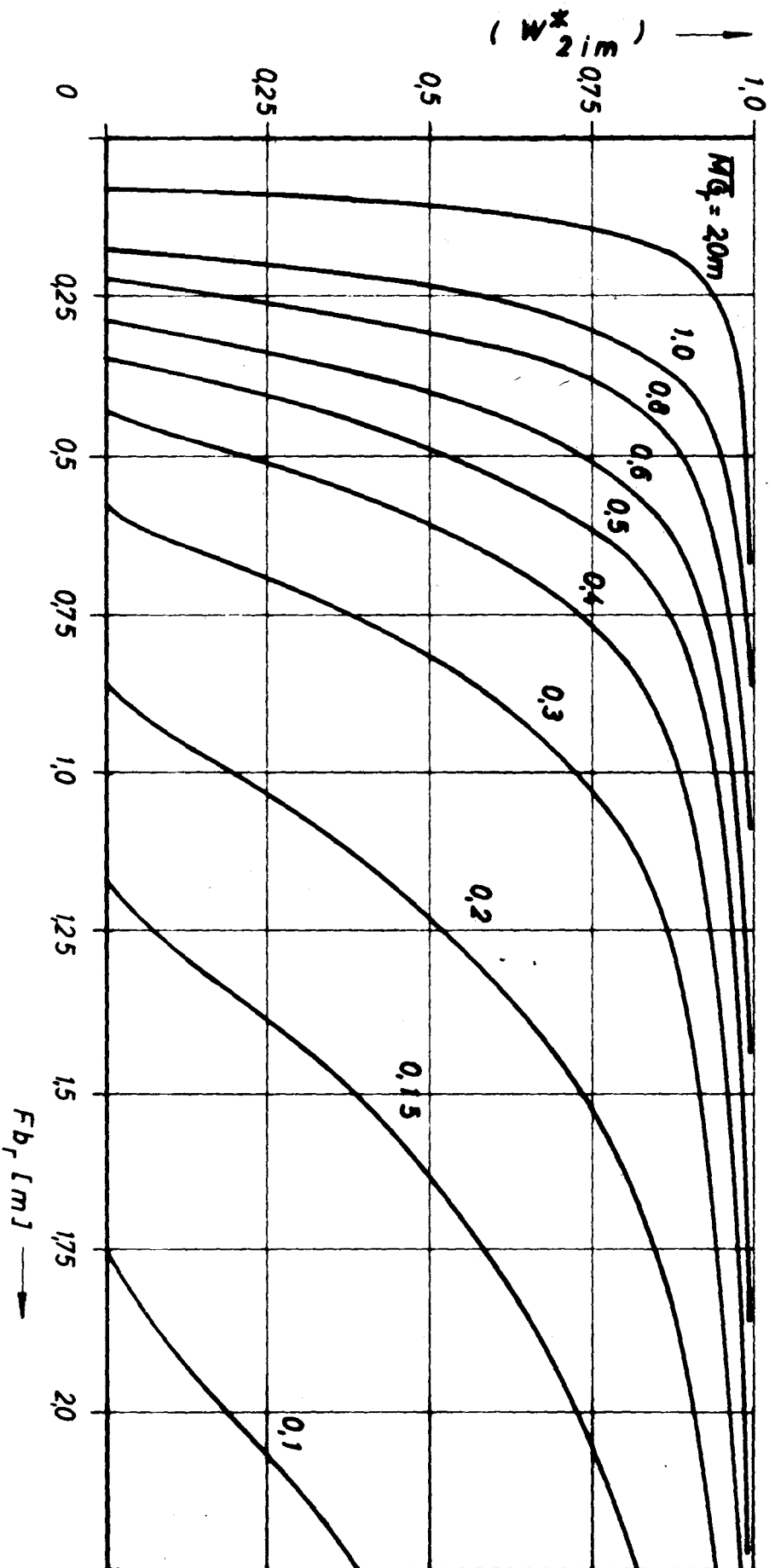
**Bild 26: Wahrscheinlichkeit, mit der die Sicherheitsbedingungen erfüllt sind, wenn nur kränkende Winddruckmomente auftreten. (Für Windverteilung im Atlantik)**



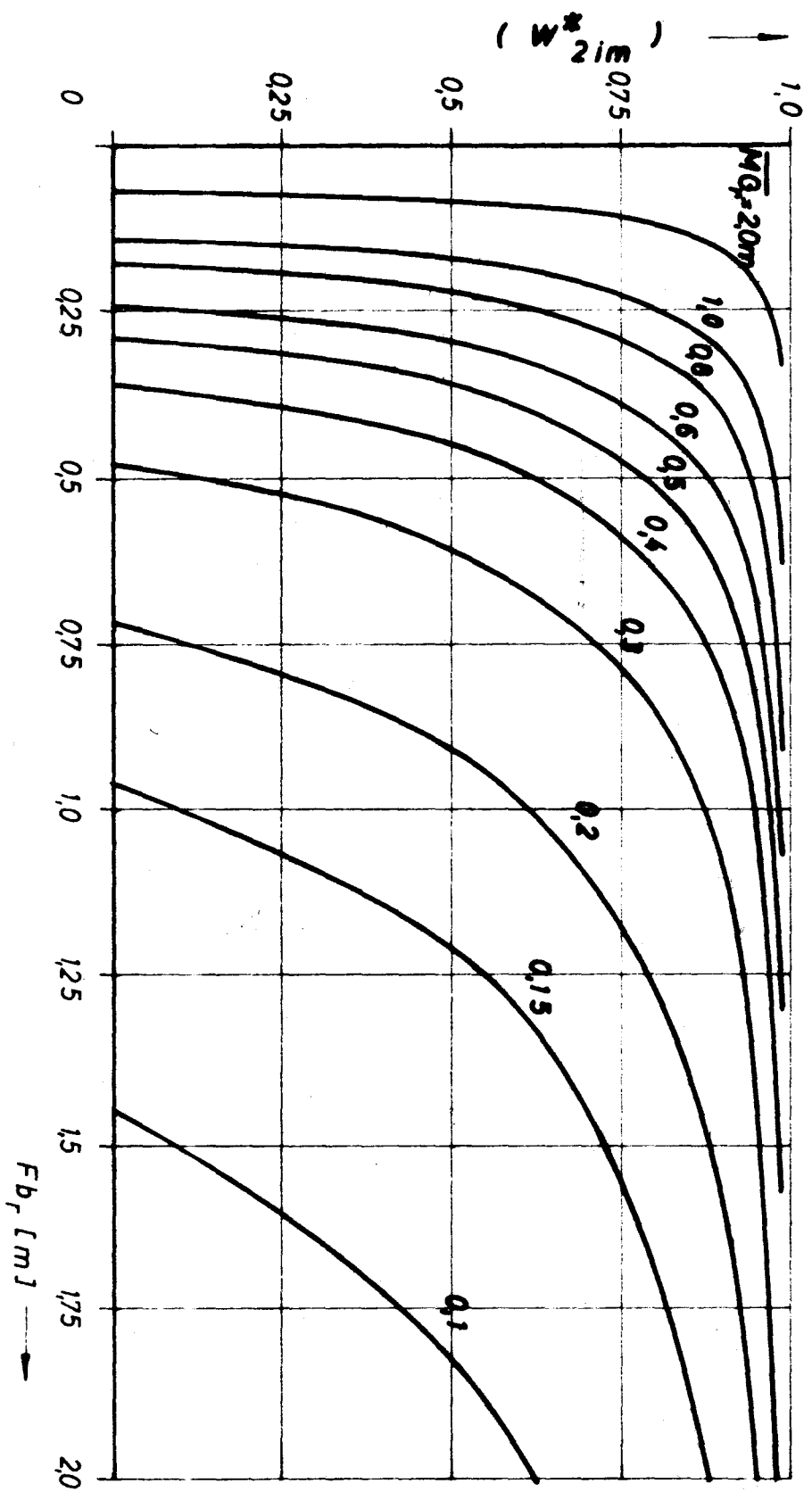
**Bild 27: Wahrscheinlichkeit, mit der die Sicherheitsbedingungen erfüllt sind, wenn nur krängende Winddruckmomente auftreten. (Für Windverteilung in der Nordsee)**



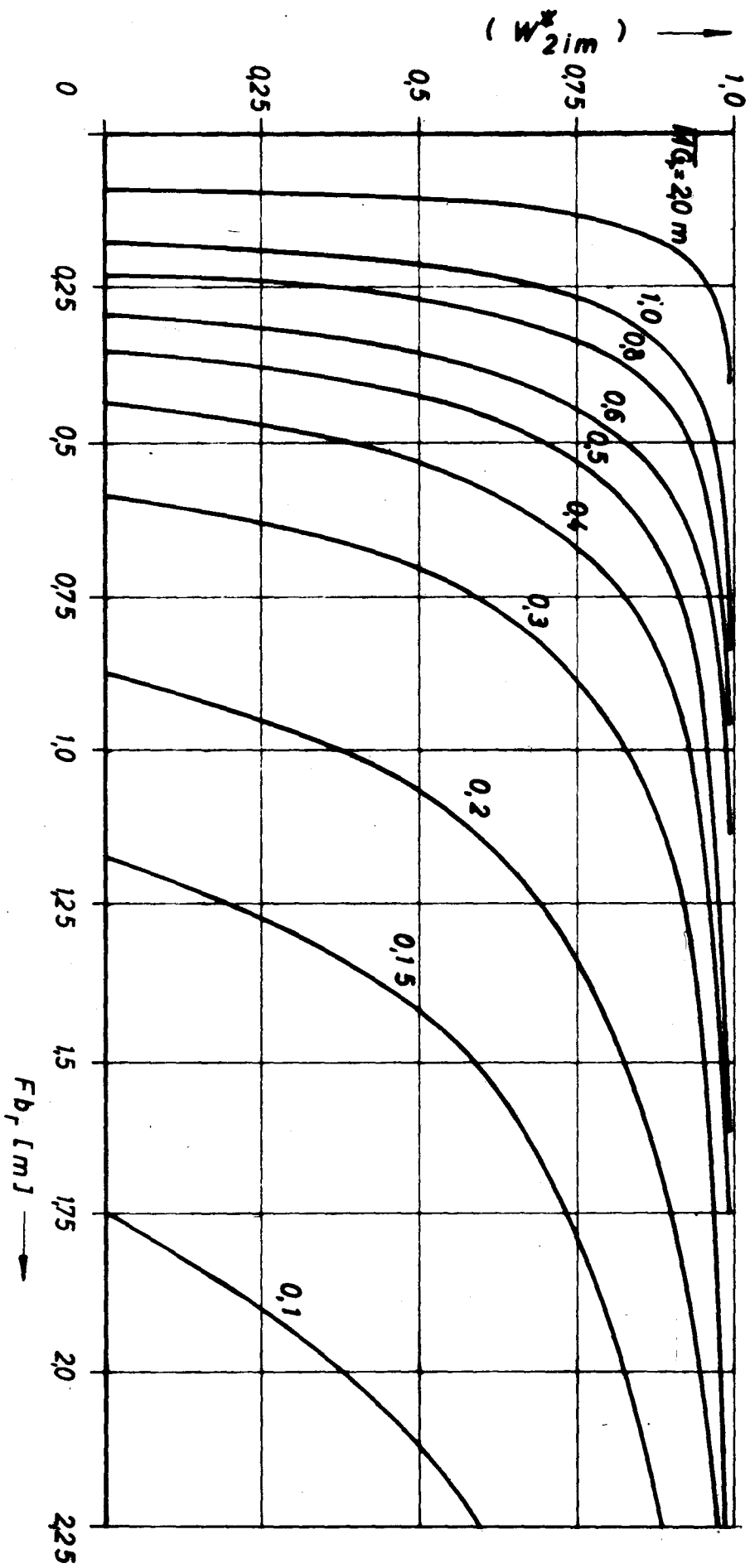
**Bild 20:** Wahrscheinlichkeit, mit der bei Schiff B die Sicherheitsbedingungen erfüllt sind, wenn ein konstantes Krängendes Moment und Winddruckmomente auftreten.  
 (Für Windverteilung im Atlantik)



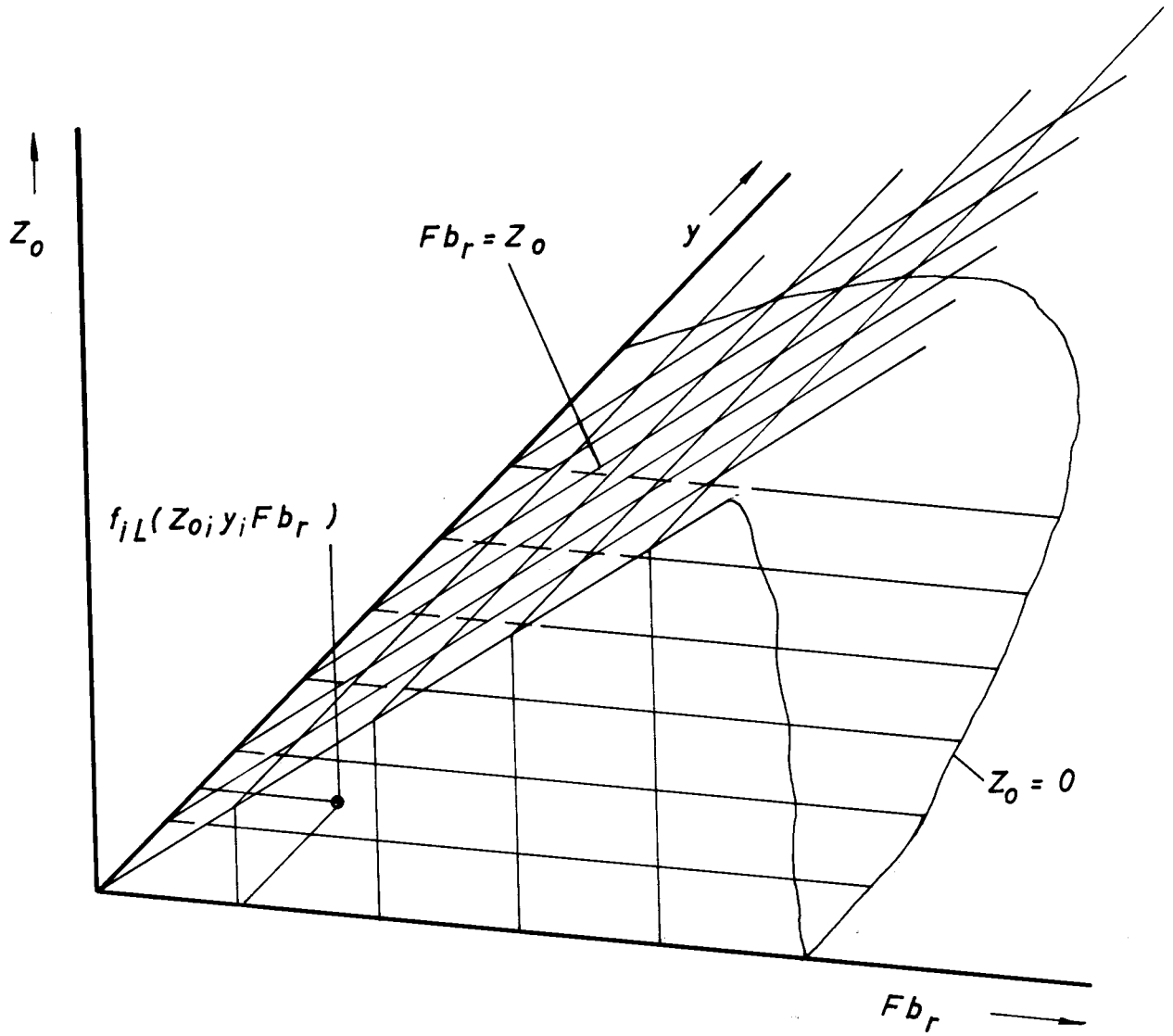
**Bild 29:** Wahrscheinlichkeit, mit der bei Schiff A die Sicherheitsbedingungen erfüllt sind, wenn ein konstantes krügendes Moment und Winddruckmomente auftreten. (Für Windverteilung im Atlantik)



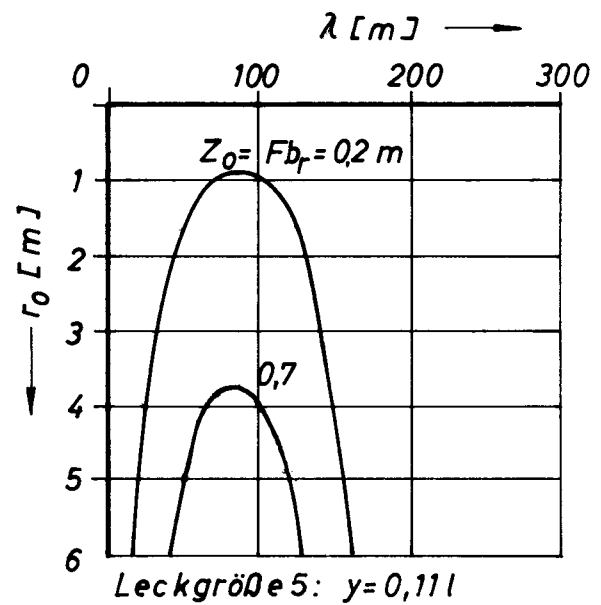
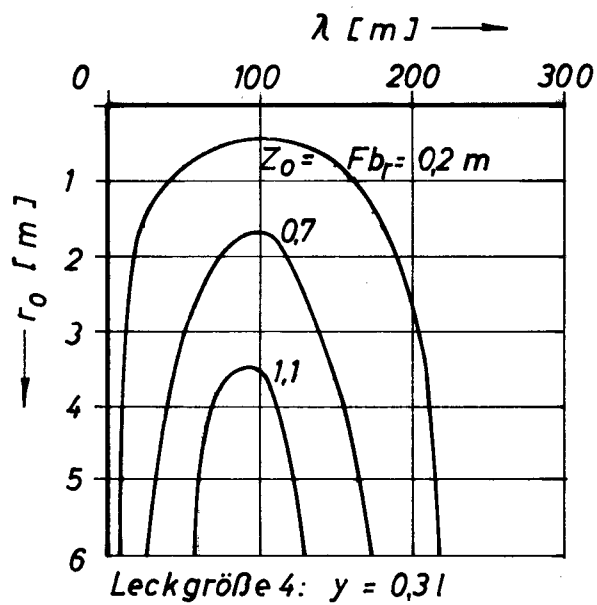
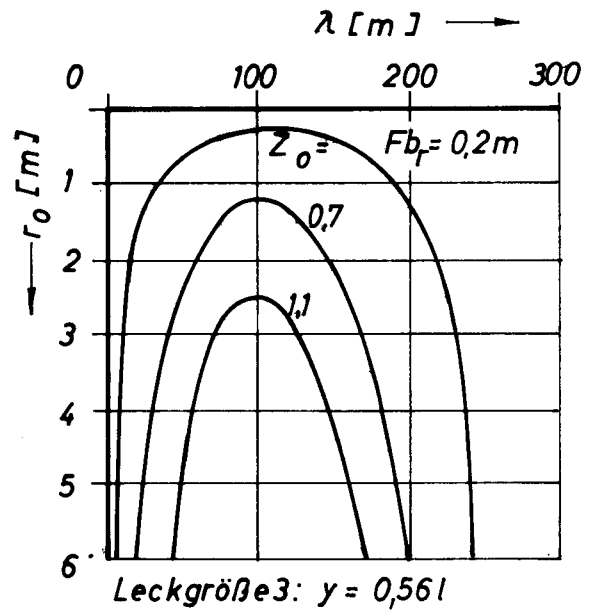
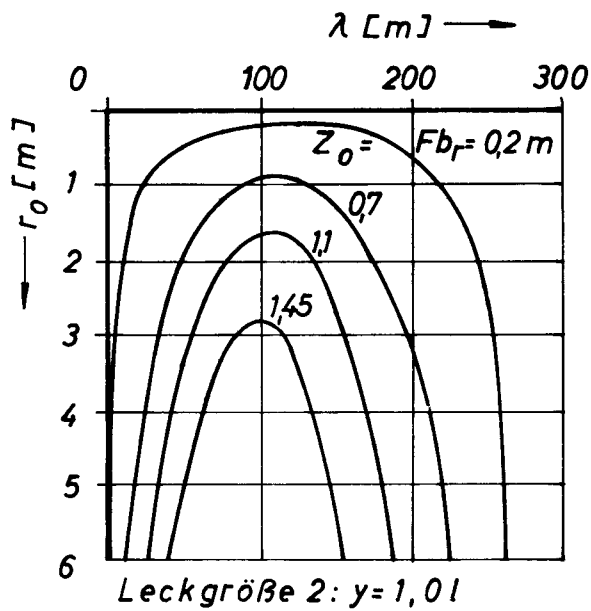
**Bild 30:** Wahrscheinlichkeit, mit der bei Schiff B die Sicherheitsbedingungen erfüllt sind, wenn ein konstantes krügendes Moment und Winddruckmomente auftreten.  
 (Für Windverteilung in der Nordsee)



**Bild 31:** Wahrscheinlichkeit, mit der bei Schiff A die Sicherheitsbedingungen erfüllt sind, wenn ein konstantes krängendes Moment und Winddruckmomente auftreten.  
(Für Windverteilung in der Nordsee)

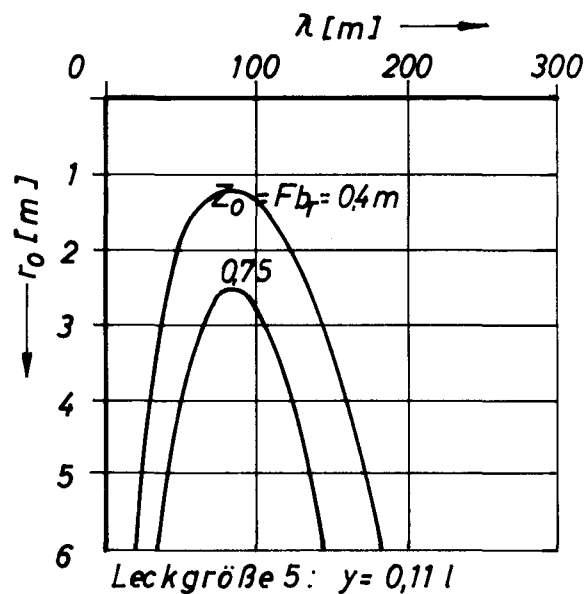
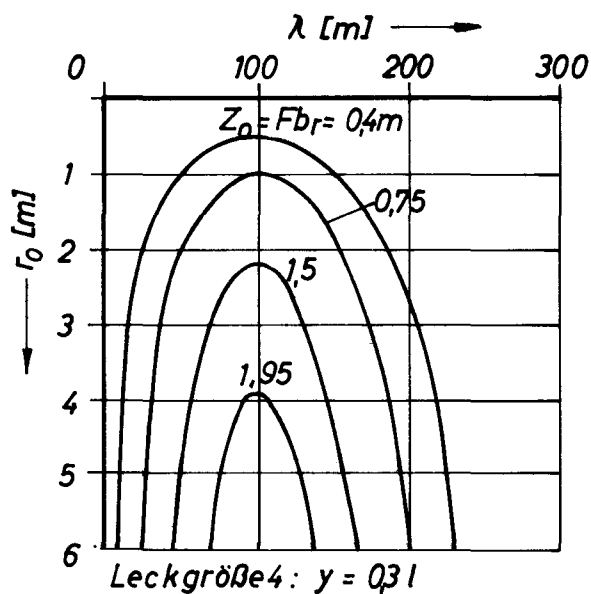
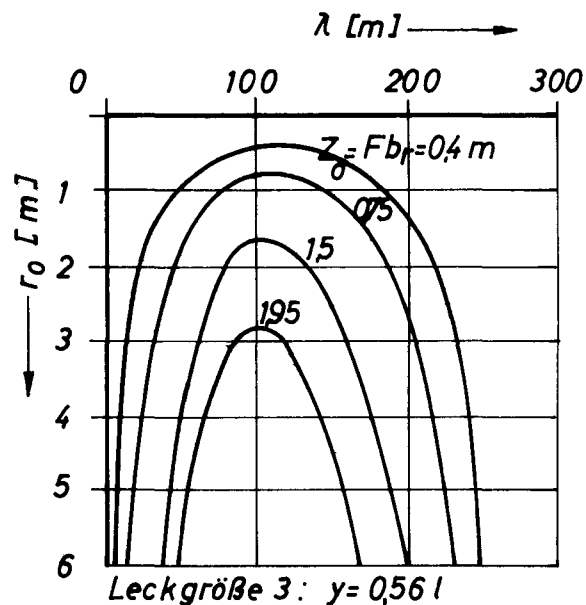
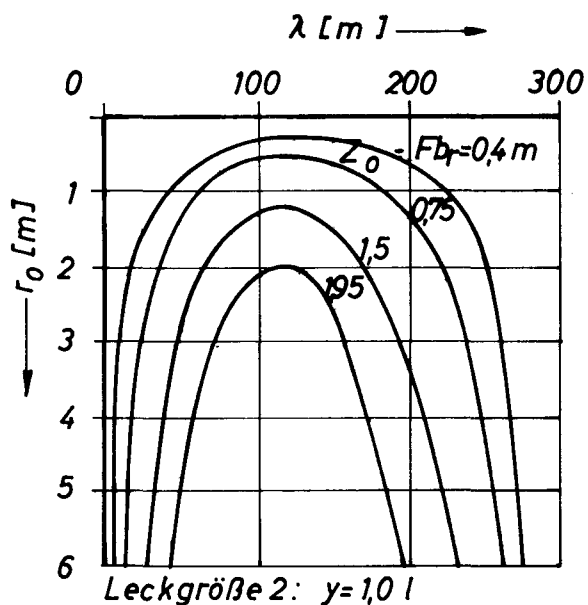


**Bild 32: Integrationsgebiet**



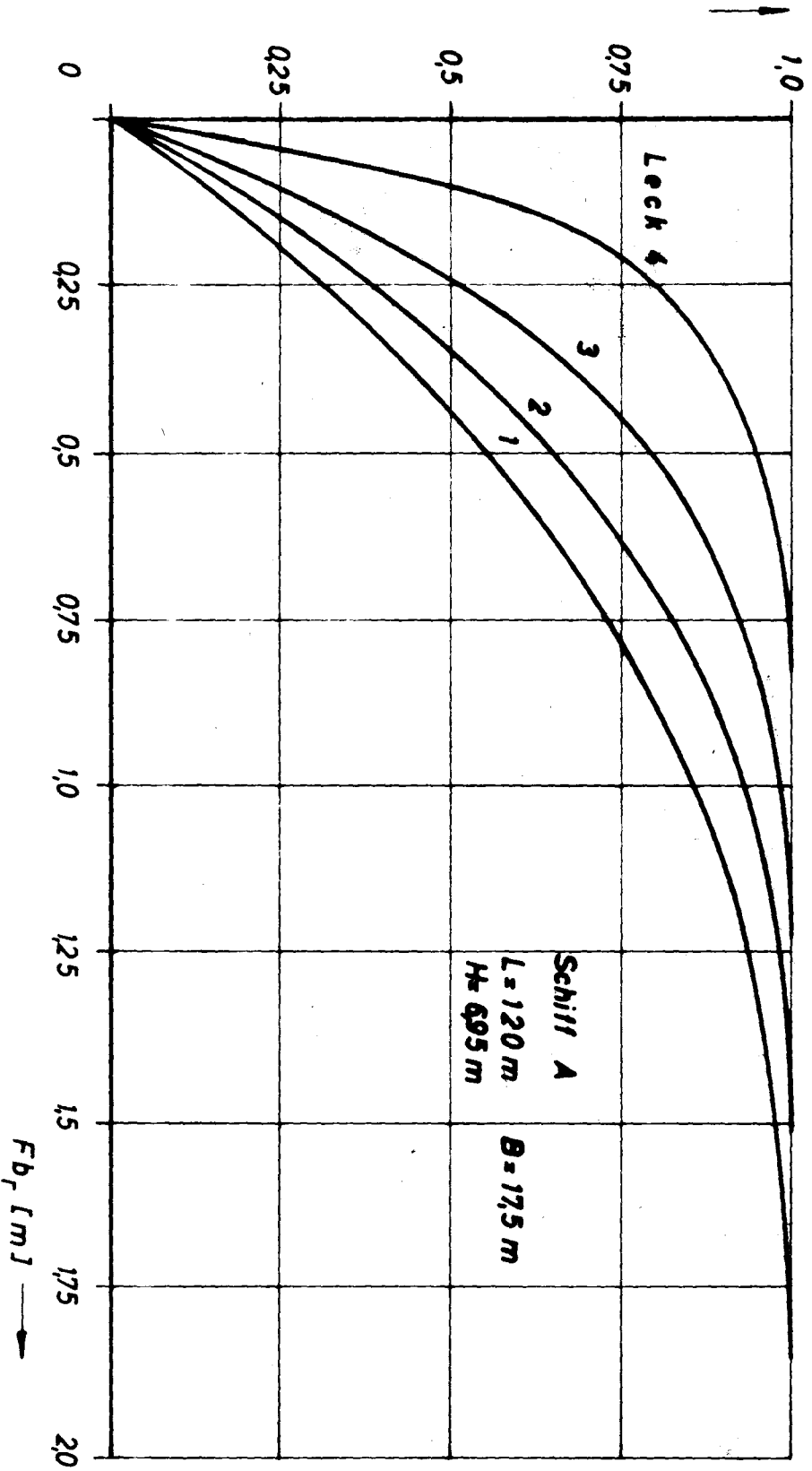
Schiff A :  $L = 120 \text{ m}$     $B = 17,5 \text{ m}$     $H = 6,95 \text{ m}$

**Bild 33:** Kombinationen von Wellenlängen und Wellenamplituden, die Leckwasserbewegungen mit der Amplitude  $Z_0 = Fb_r$  hervorrufen.

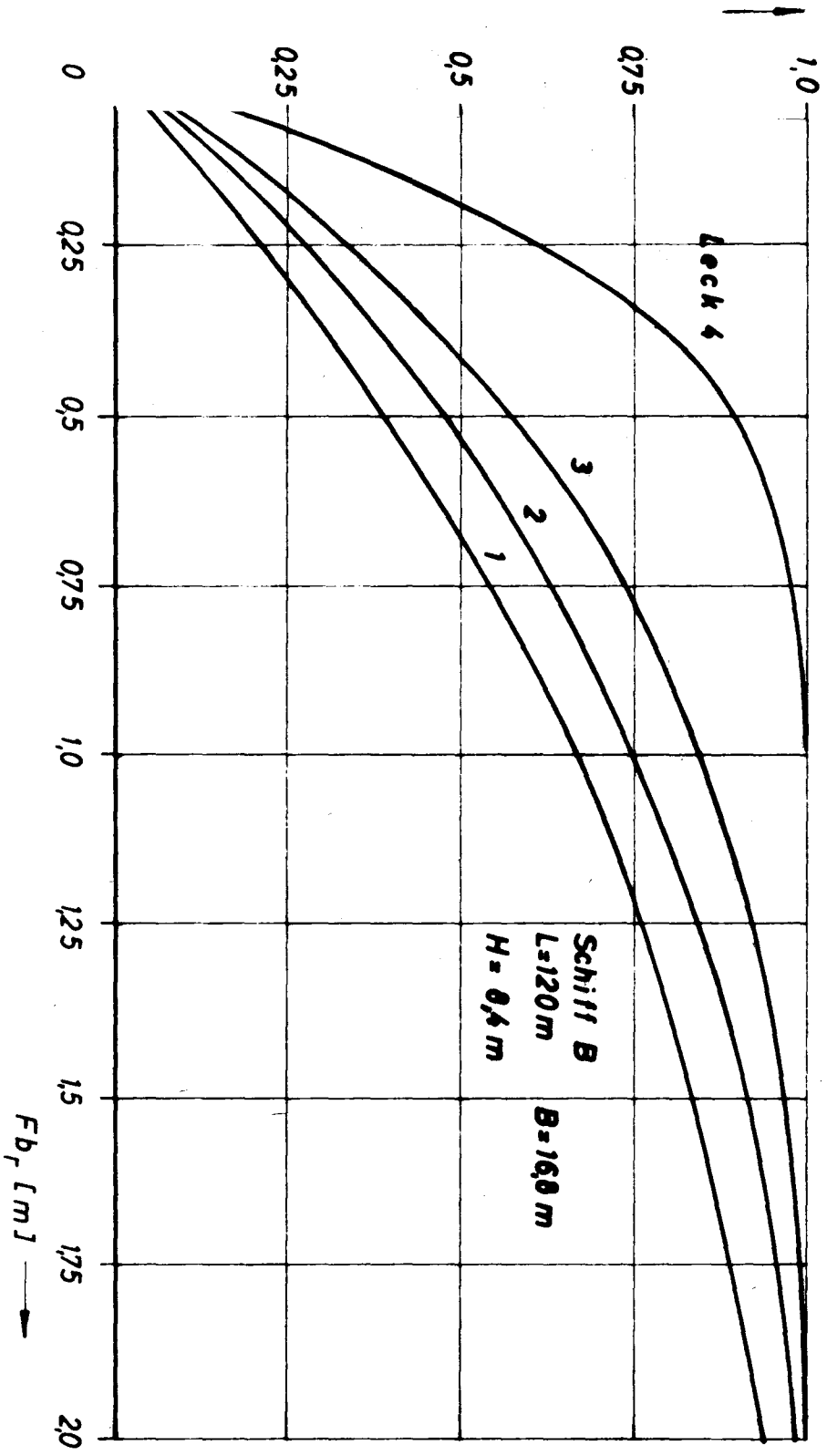


Schiff B:  $L = 120 \text{ m}$   $B = 16,8 \text{ m}$   $H = 8,4 \text{ m}$

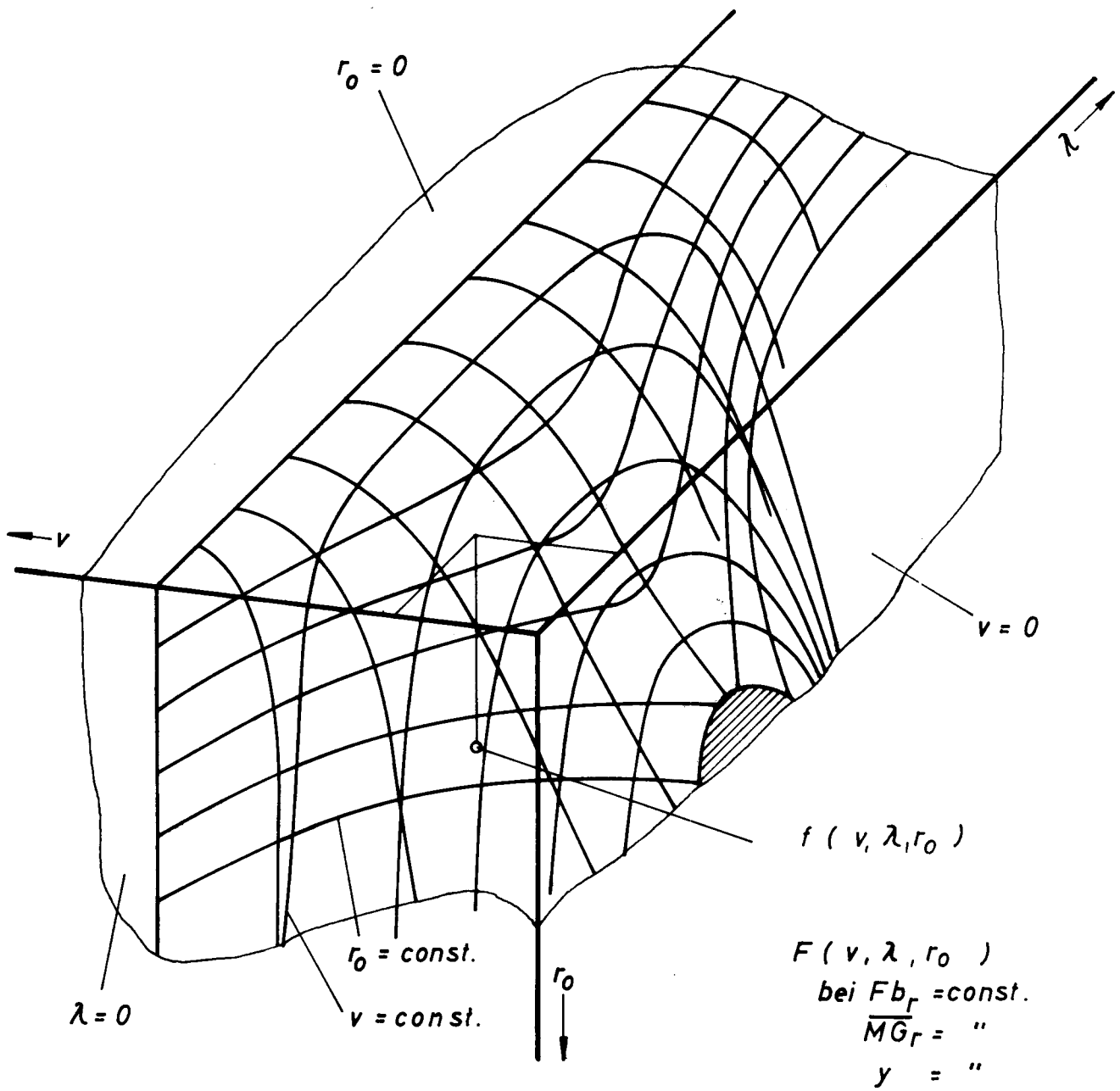
**Bild 34:** Kombinationen von Wellenlängen und Wellenamplituden, die Leckwasserbewegungen mit der Amplitude  $Z_0 = Fb_r$  hervorrufen.



**Bild 35: Wahrscheinlichkeit, mit der die Sicherheitsbedingungen bei Leckwasserbewegungen erfüllt sind. (Für Seegang im Atlantik)**



**Id 36: Wahrscheinlichkeit, mit der die Sicherheitsbedingungen bei Leckwasserbewegungen erfüllt sind. (Für Seegang im Atlantik)**



**Bild 37: Integrationsgebiet**

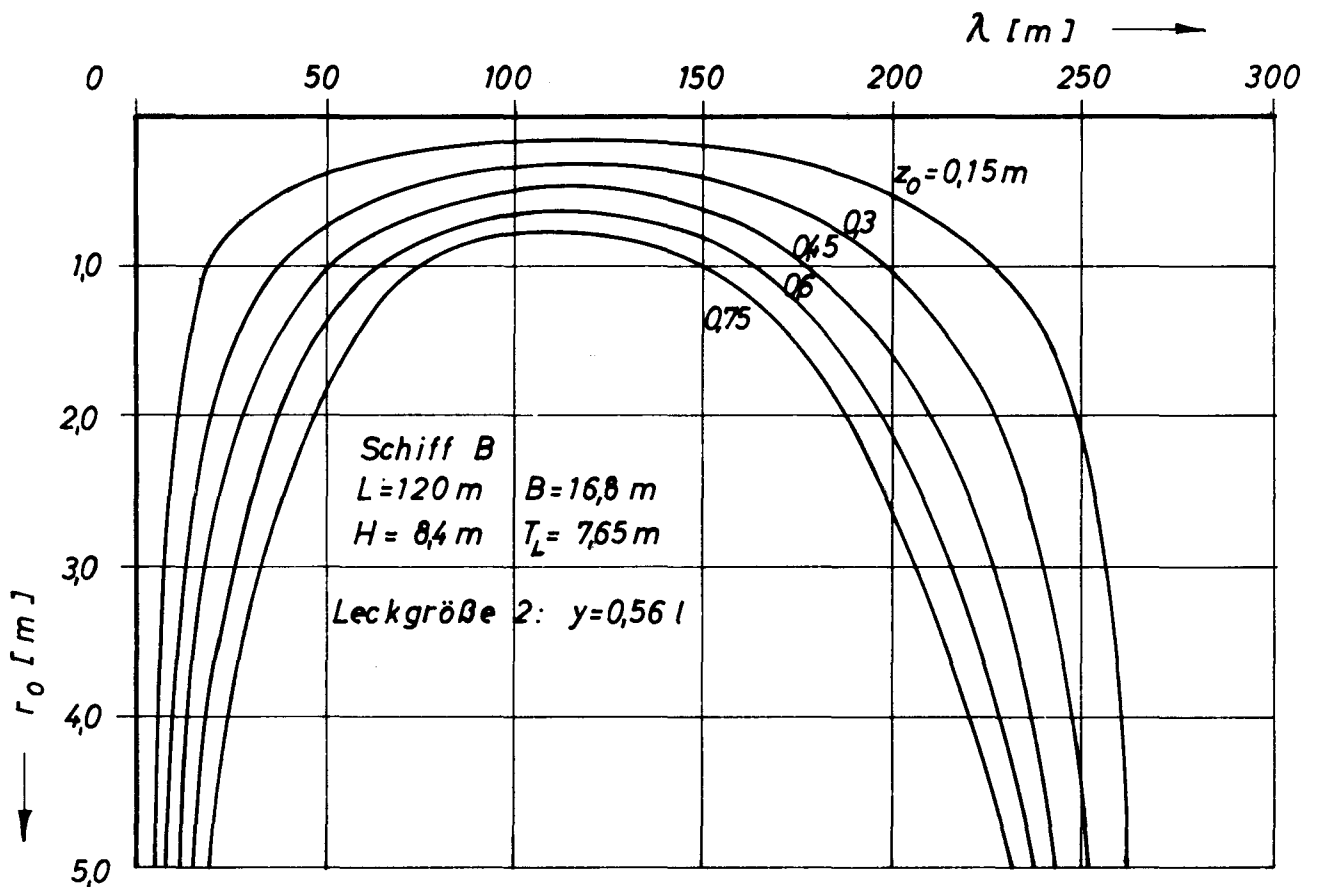
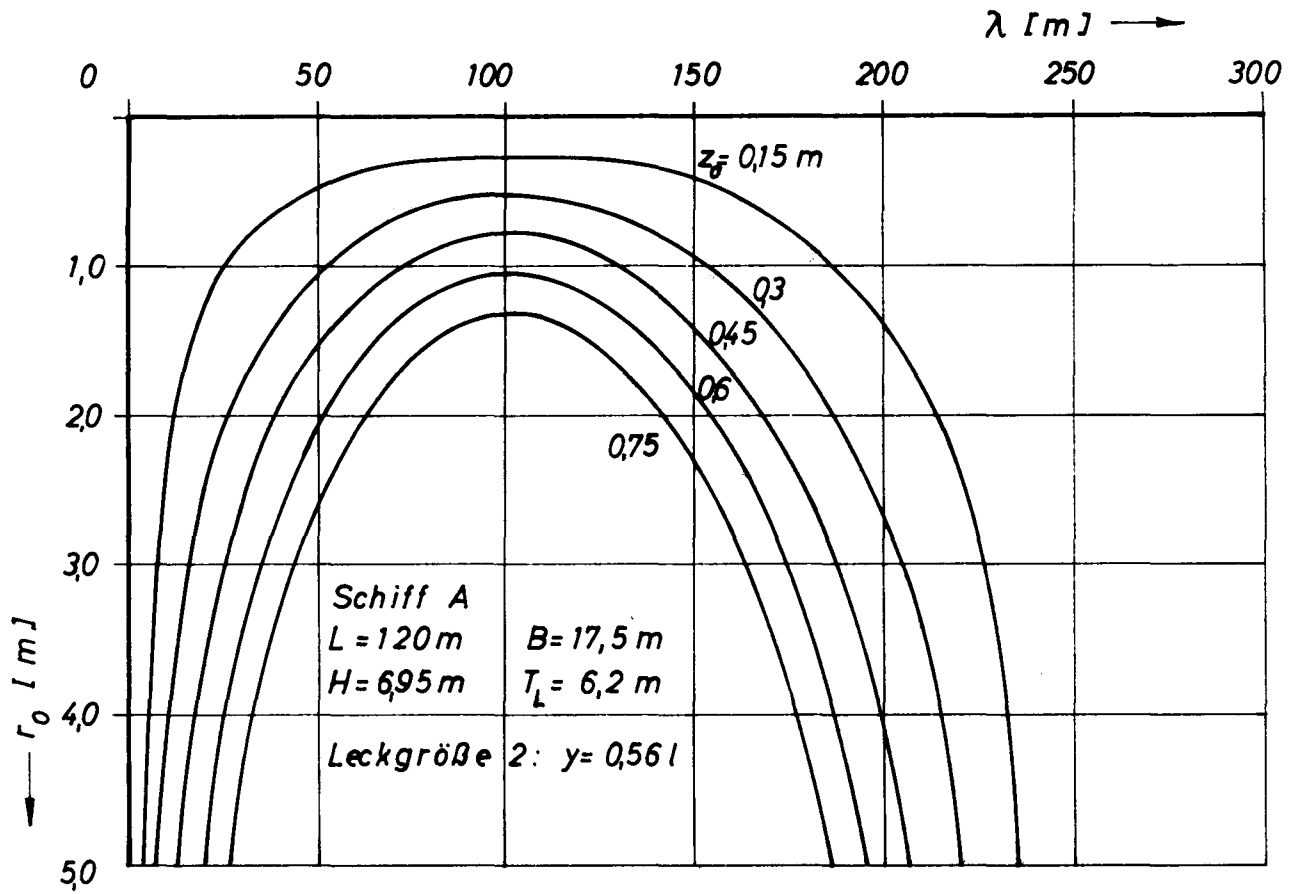
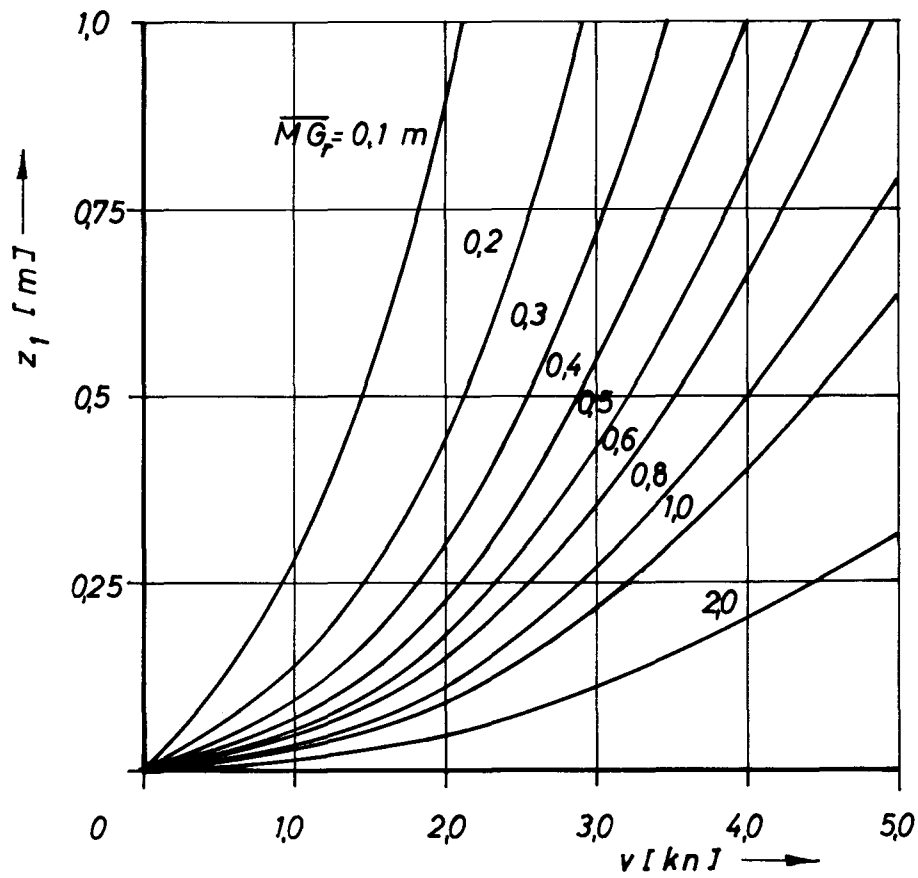
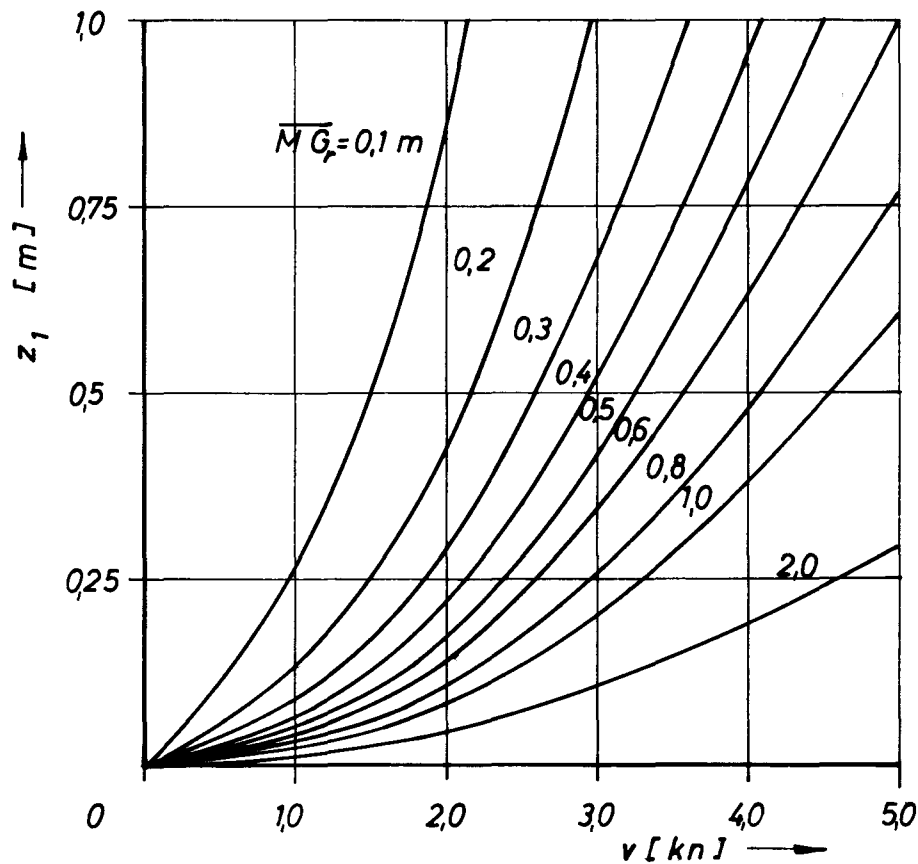


Bild 38 u. 39: Kombinationen von Wellenlängen und Amplituden, die Leckwasseramplituden der Größe  $Z_0$  hervorrufen.

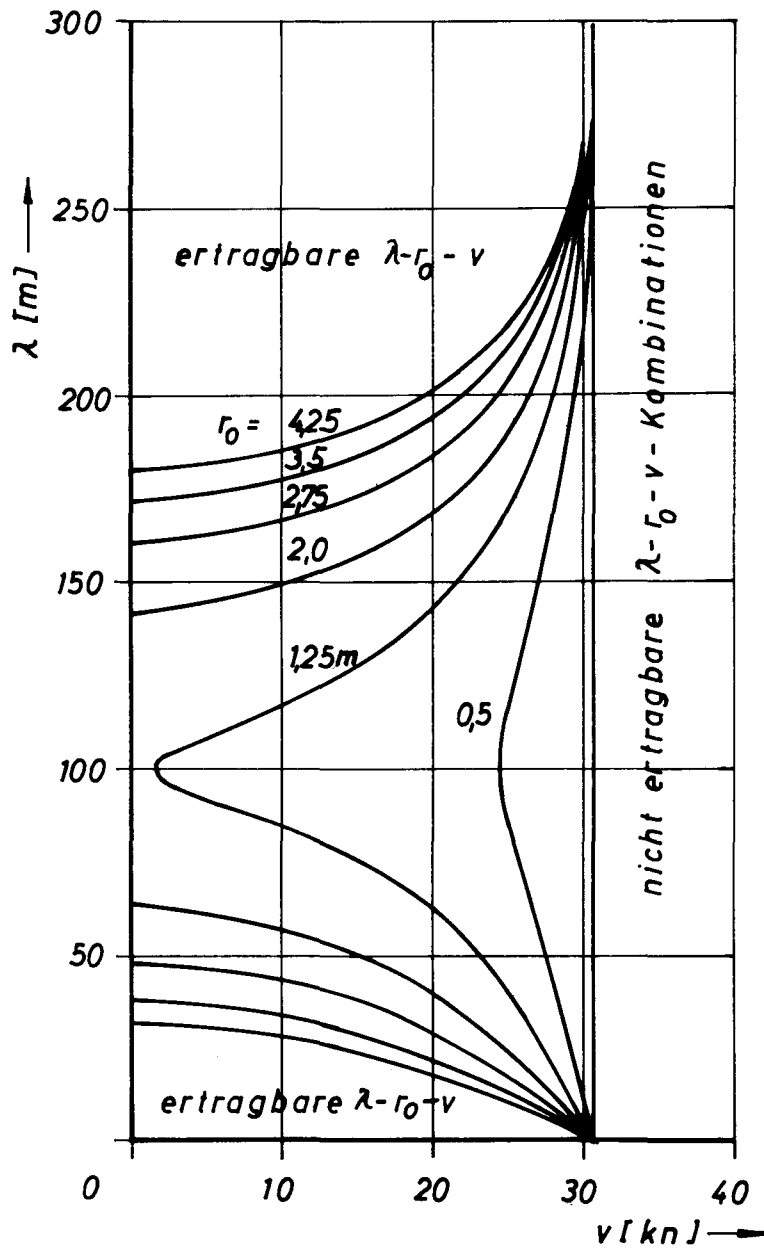


Schiff A



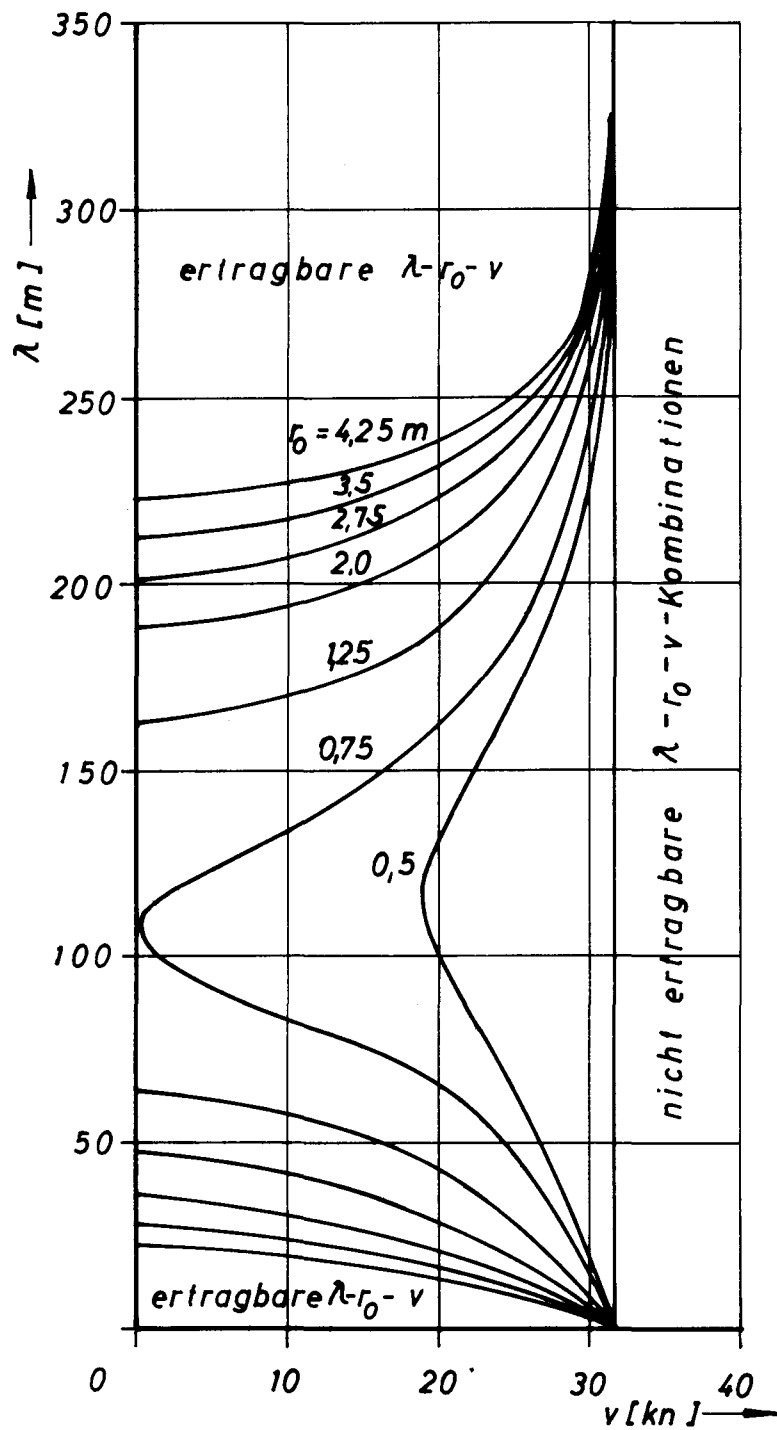
Schiff B

Bild 40: Eintauchung der Leeseite  $z_1$  bei krängenden Winddruckhebelarmen entsprechend der Windstärke  $v$ .



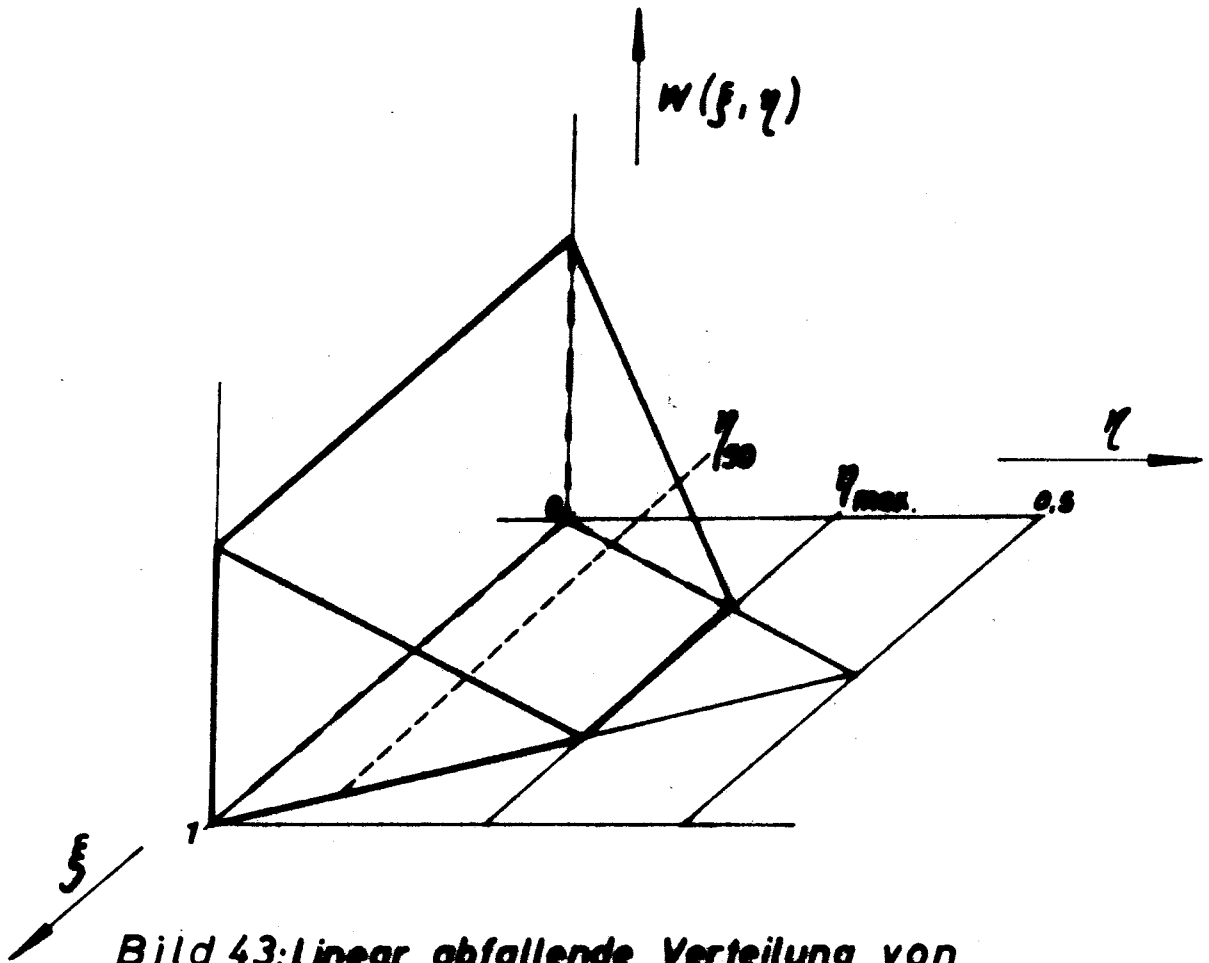
Schiff A

Bild 41: Integrationsgrenzen



Schiff B

Bild 42: Integrationsgrenzen



**Bild 43: Linear abfallende Verteilung von  
Lecklänge und Treffstelle**

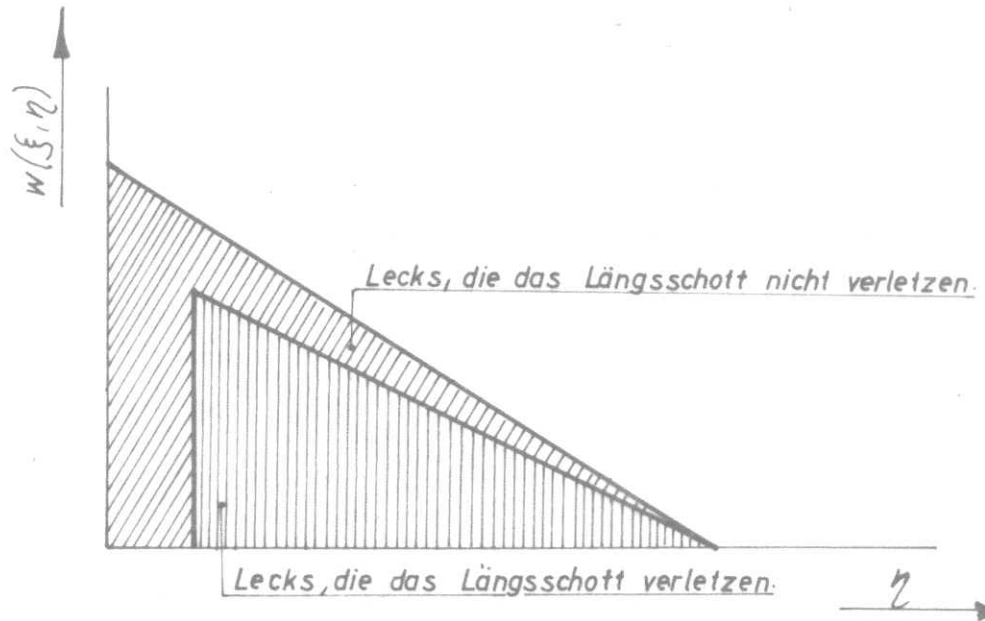
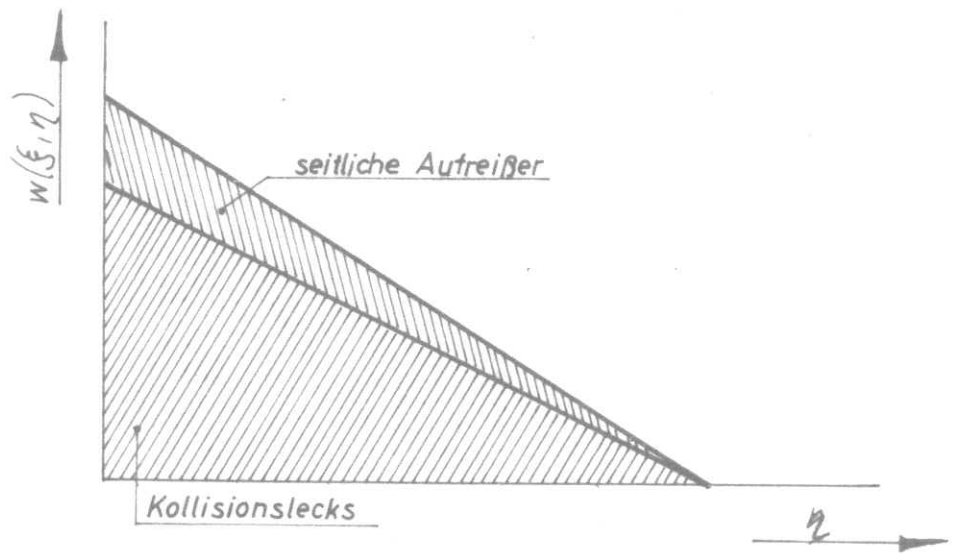


Bild 44 : Aufteilung der Gesamtheit aller Lecks

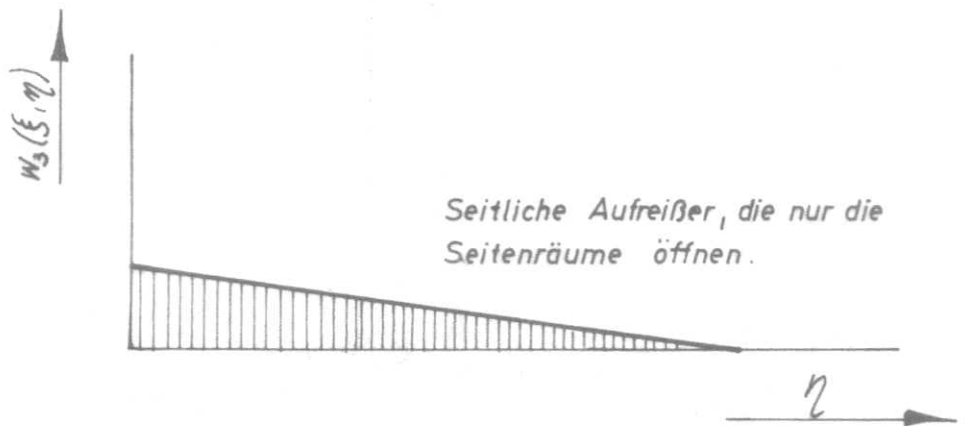
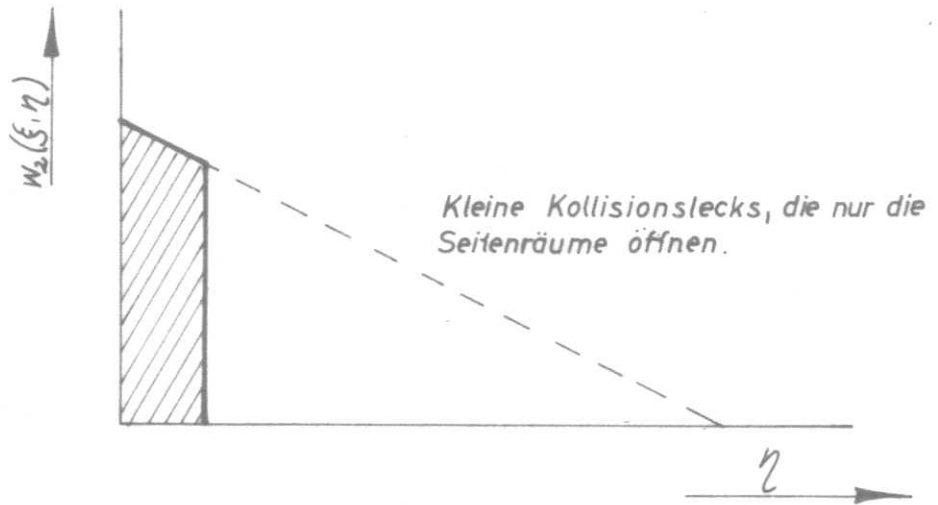
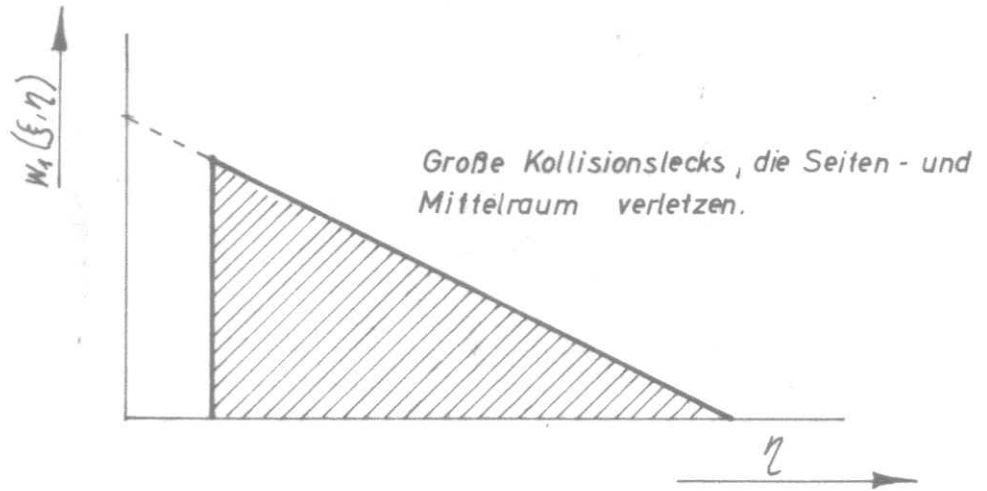
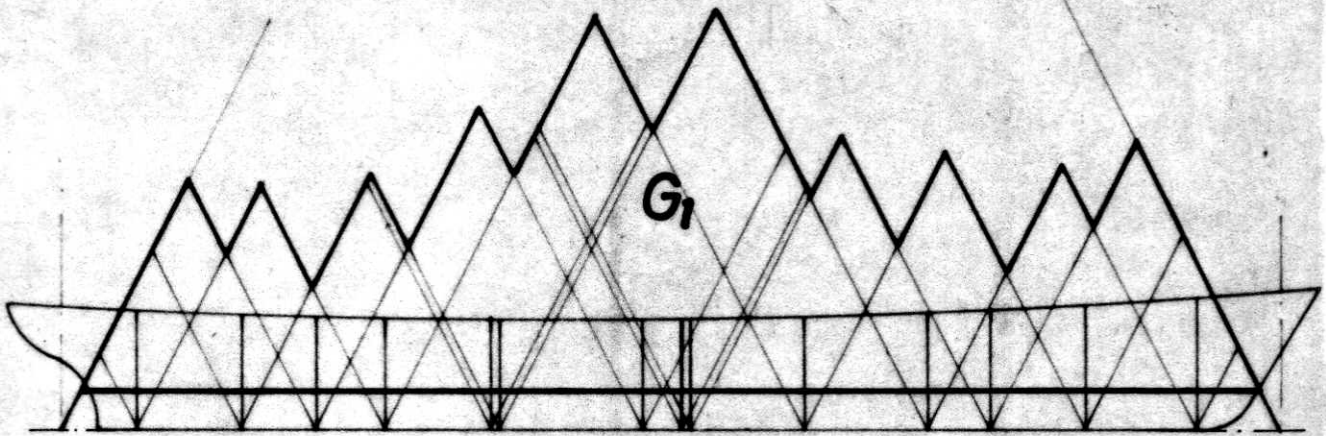
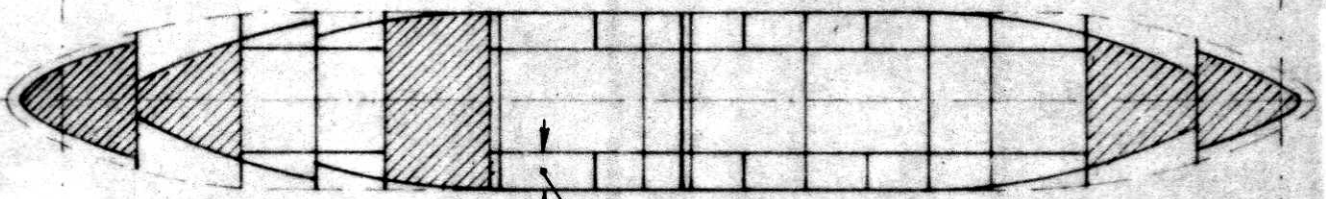


Bild 45: zur Erläuterung der Gleichung VI (2)

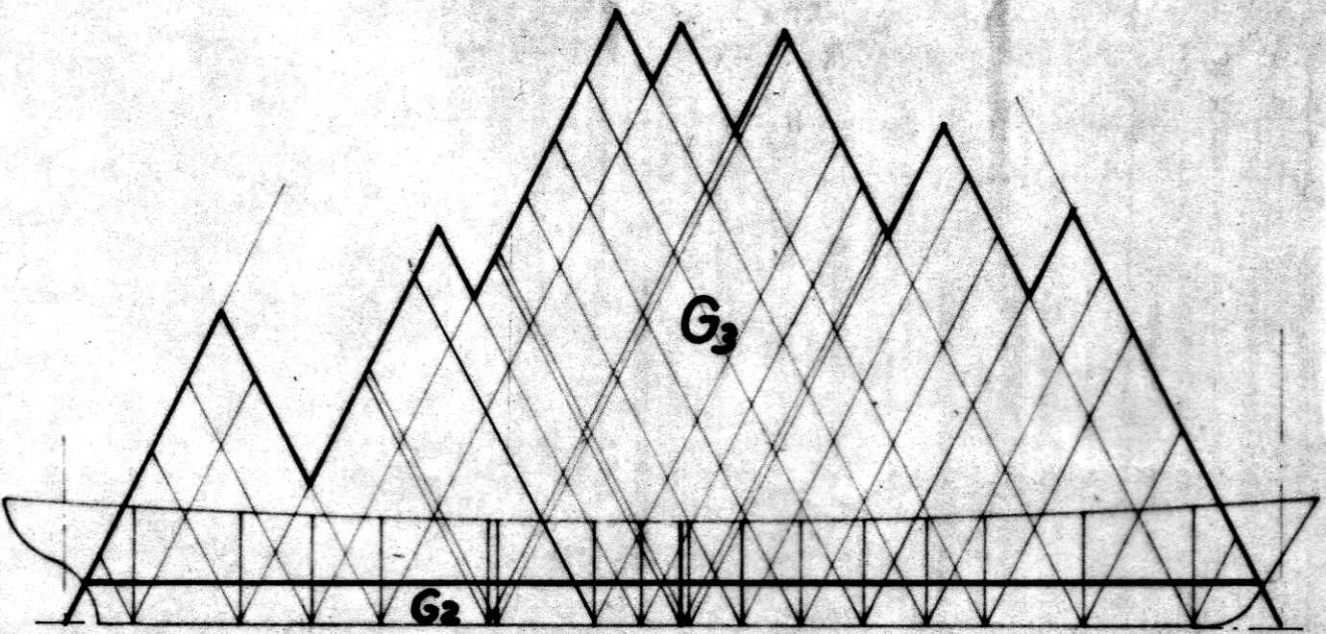


1. Für Lecks, die das Seitenlängsschott durchdringen.



\* Raumplan

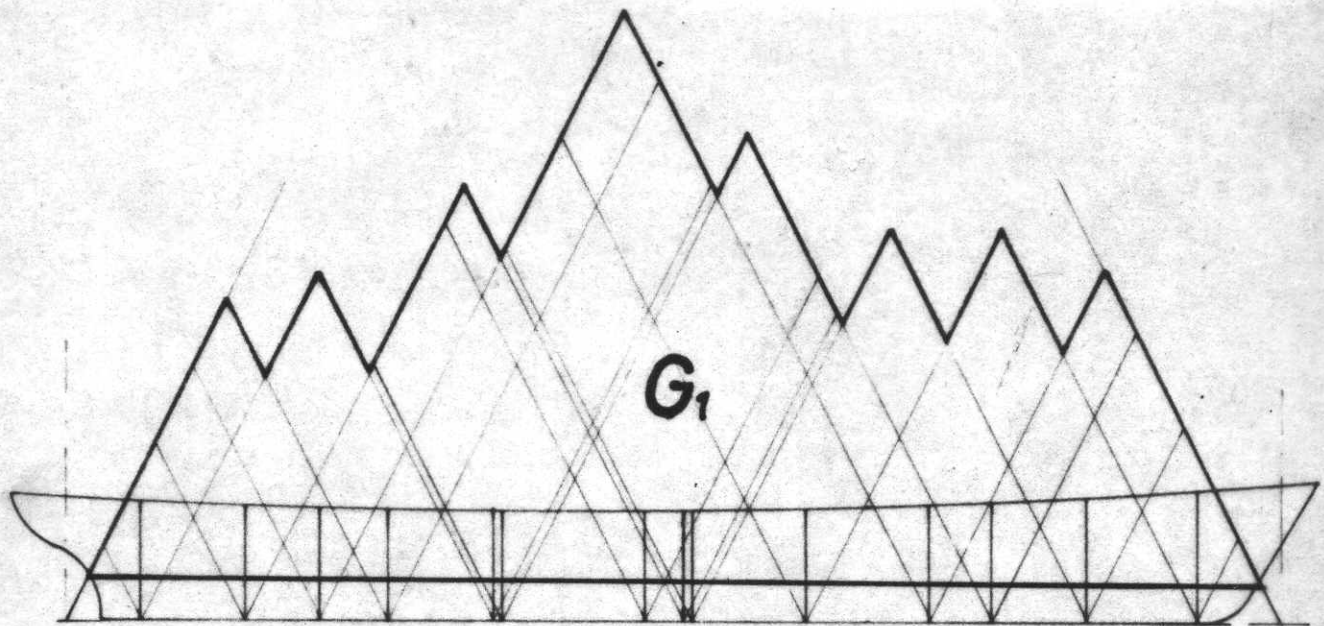
5 m



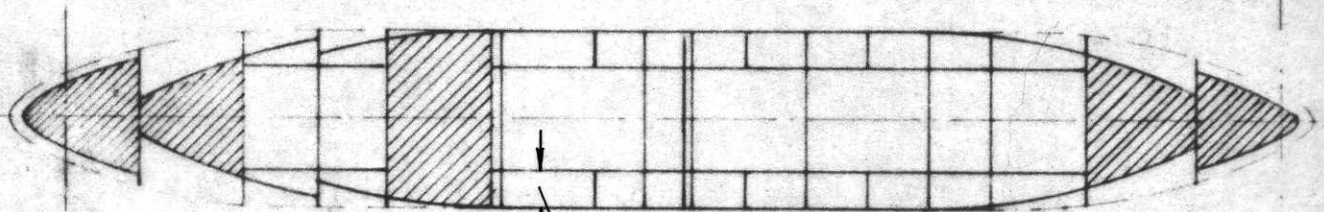
2. Für Lecks, die das Seitenlängsschott nicht durchdringen.

\* Die schraffierten Räume werden unabhängig von der Eindringtiefe der Lecks immer über die ganze Breite geflutet.

Bild 46: Sichere Gebiete im Zustand a .

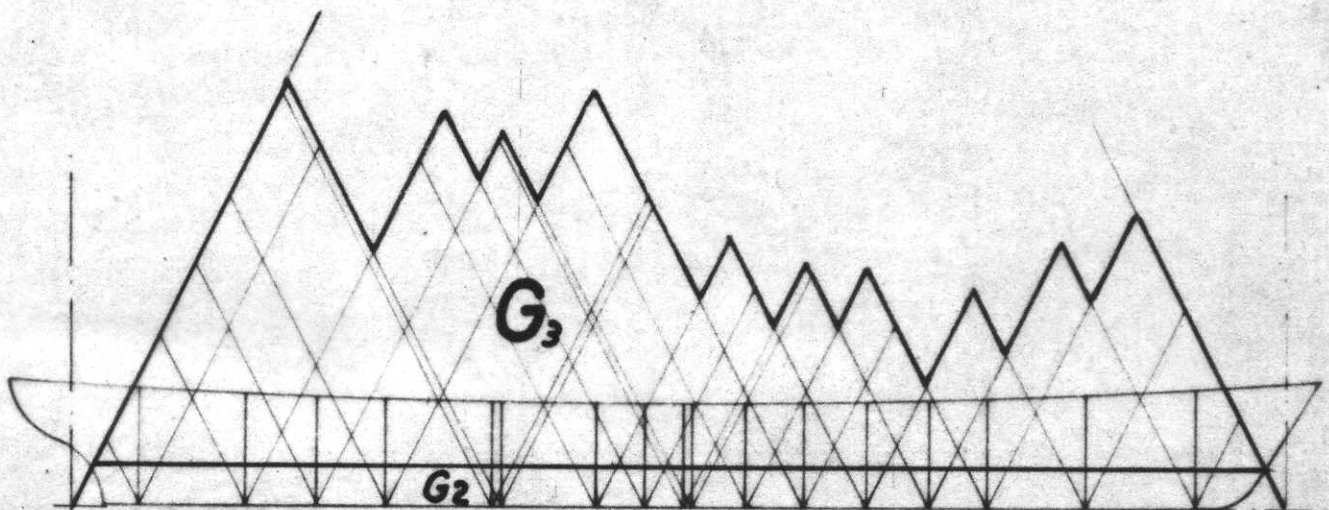


1 Für Lecks, die das Seitenlängsschott durchdringen.



\* Raumplan

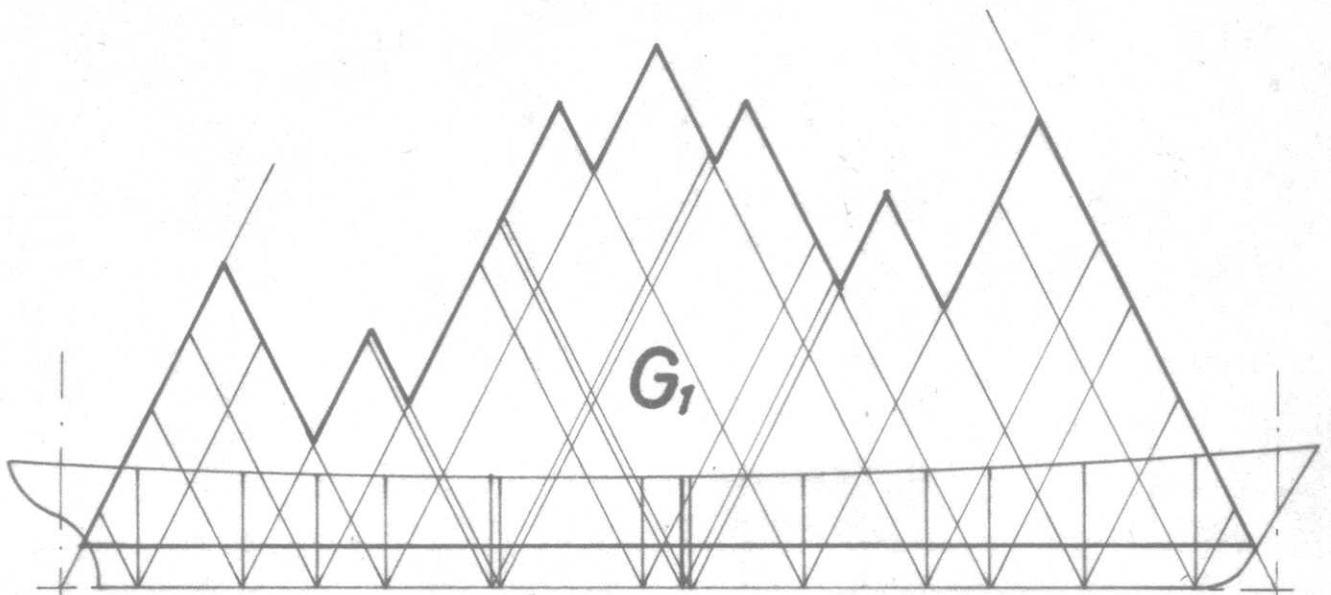
5m



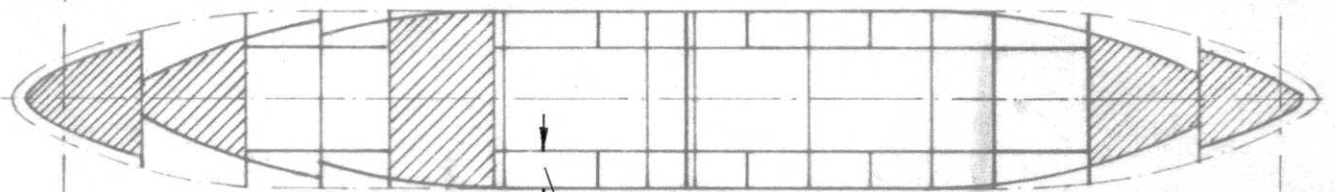
2. Für Lecks, die das Seitenlängsschott nicht durchdringen.

\* Die schraffierten Räume werden unabhängig von der Eindringtiefe der Lecks immer über die ganze Breite geflutet.

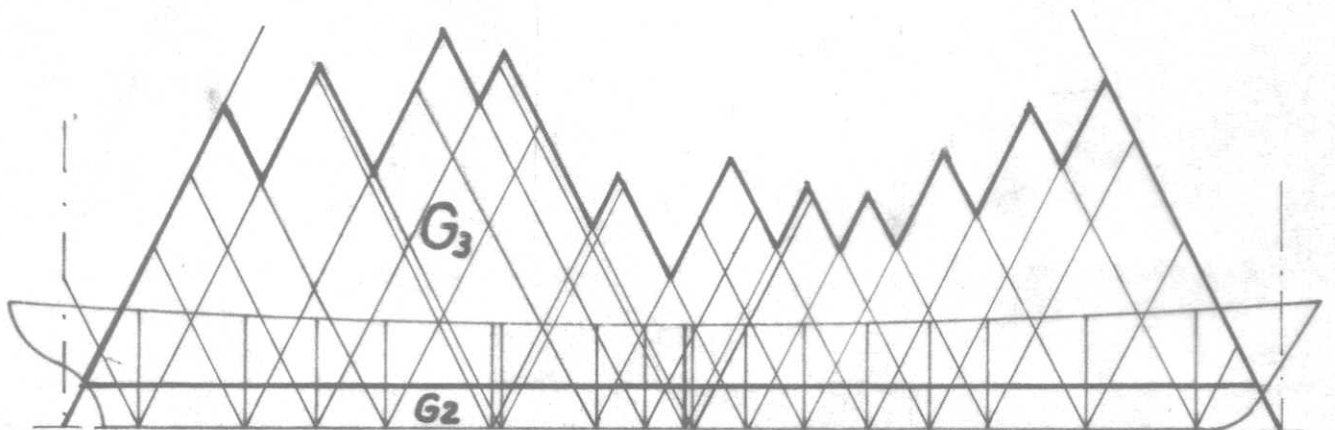
Bild 47: Sichere Gebiete im Zustand b .



1. Für Lecks, die das Seitenlängsschott durchdringen.



\* Raumplan



2. Für Lecks, die das Seitenlängsschott nicht durchdringen.

\* Die schraffierten Räume werden unabhängig von der Eindringtiefe der Lecks immer über die ganze Breite geflutet.

Bild 48: Sichere Gebiete im Zustand c .