

92 | September 1962

SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

B. Arndt

Einige Berechnungen der Seegangsstabilität

TUHH

Technische Universität Hamburg-Harburg

Einige Berechnungen der Seegangsstabilität

B. Arndt

In den letzten Jahren erschienen einige Veröffentlichungen, in denen zu der Beurteilung der Kintersicherheit von Schiffen die Änderung der Hebelarmkurve durch den Einfluß des Seegangs herangezogen wurde [1, 2, 3]. Wenn man bedenkt, daß noch nicht einmal für alle Schiffe die allgemein als Sicherheitsausweis angesehene Glatwasserhebelarmkurve bekannt ist, und daß erst für wenige Schiffe die krängenden Momente mehr oder minder vollständig bei der Beurteilung der Kintersicherheit berücksichtigt werden, so kann man diese Erweiterung als einen wesentlichen Schritt auf dem Wege zur vollständigen zahlenmäßigen Erfassung der für die Kintersicherheit wichtigen Einflüsse ansehen.

Die nähere Beschäftigung mit dem Seegang führt fast immer zu umfangreichen Rechnungen, und man muß sich also hinsichtlich des zu erwartenden Arbeitsaufwandes die Frage stellen, ob die Ausweitung des Problems wünschenswert oder gar notwendig ist und ob eine ausreichende Genauigkeit der Aussage erreicht werden kann.

Die Anwendung theoretischer Überlegungen auf ein praktisches Beispiel liefert meist schon wertvolle Hinweise für die Weiterarbeit, die Untersuchung ist daher zumindest für den Einzelfall zu bejahen. Hier wurde außerdem ein Anstoß gegeben durch den Untergang der „Irene Oldendorff“ in der Nacht vom 30. zum 31. Dezember 1951. Erst durch Berücksichtigung der Seegangshebelarme gelang es Wendel, den wahrscheinlichen Hergang des Unglücks zu rekonstruieren [1]. Dieser Erklärungsversuch wurde dadurch gestützt, daß das Wrack der Untersuchung durch Taucher zugänglich war und keine Hinweise auf ursächliche Beschädigungen des Schiffes gefunden werden konnten.

Seitdem wurde von mehreren Auftraggebern die Untersuchung der Kintersicherheit einzelner Schiffe gewünscht, erfreulicherweise betraf nur eins dieser Gutachten ein Schiff, das bereits gekentert war, nämlich die „Pamir“ [2, 4]. In allen diesen Fällen wurden die Seegangshebelarme berechnet und bei der Aufstellung von Momentenbilanzen mitverwendet. Die Ergebnisse dieser Rechnungen waren zum Teil überraschend und hatten bei der Mehrzahl der Schiffe einen wesentlichen Einfluß auf die Beurteilung der Kintersicherheit. Ein gewisses Bedürfnis für die Anwendung dieser Methode liegt demnach wohl auch von seiten der Schifffahrt und der Werften vor.

Schwieriger ist der Nachweis ausreichender Genauigkeit der so gewonnenen Aussagen. Es wurden bereits einige Messungen der Hebelarmänderungen an Bord von Schiffen vorgenommen [3, 5], der eindeutige Effekt, das Kentern, konnte aber noch nicht meßtechnisch registriert werden.

Auf die Auswirkungen der Änderung der Auftriebsverteilung und der Auftriebsrichtung in einer Welle wurde u. a. hin-

gewiesen in dem Werk von Pollard und Dubebout: „Théorie du Navire“ [6], von Kempf [7] und Grim [8]. Auf Grund dieser Hinweise wurden einige grundsätzliche Überlegungen angestellt.

In Bild 1 ist ein durch drei Spanten repräsentiertes Schiff in Längsrichtung in einen Wellenberg gelegt. Für den mittleren Schiffsteil (Spant 2), gilt die obere, für Vor- und Hinterschiff (Spant 1 und 3) die untere Wasserlinie.

Der mittlere Schiffsteil liefert also den weitaus größten Teil des Auftriebs. Da Seite Deck aber schon bei kleinen Krängungen zu Wasser kommt, ist das aufrichtende Moment verhältnismäßig klein. Die Schiffsenden dagegen können möglicherweise schon weiterdrehend wirken und damit das gesamte aufrichtende Moment weiter verringern.

Aus dieser Überlegung kann man folgern, daß die Größe der Hebelarmänderung abhängig ist vom Niveauunterschied mittschiffs und an den Schiffsenden. Da es sich bei der Beurteilung der Kintersicherheit um ein Sicherheitsproblem handelt, sind zunächst die Grenzwerte interessant. Es wurde also in jedem praktisch bearbeiteten Fall anhand der zur Verfügung stehenden Unterlagen über Meereswellen [9—12] geprüft, ob das betreffende Schiff in dem vorgesehenen Einsatzgebiet Wellen von $\lambda = L$ begegnen kann, und welche größte Steilheit diesen Wellen zugeordnet werden kann. Es wurden dabei allerdings nicht die steilsten Wellen, die nur mit einer Häufigkeit von 0,1‰ registriert sind, gewählt, sondern meist die Wellen, die mit 1‰ Häufigkeit auftreten.

In den Fällen, in denen von der Fortschrittsrichtung der Wellen abweichende Kurse untersucht wurden, wurden die Schiffe in Wellen mit $\lambda = L \cdot \cos \alpha$ und der sich aus den Seegangstatistiken ergebenden zugehörigen Amplitude gelegt.

Zur Ermittlung der Seegangspantokarenen wurde das Integratorverfahren nach Schulz-Fellow angewendet, nur daß statt der ebenen Wasserlinien gekrümmte bzw. für schräg zur Schiffs-längsachse verlaufende Wellen verwundene Wasserlinien in den Spantenplan eingetragen wurden. Grundsätzlich sind auch andere von der Berechnung der Glatwasser-Pantokarenen her bekannte numerische Integrationsverfahren anwendbar und auch in Einzelfällen angewendet worden. Der Zeitaufwand und die gewünschte Genauigkeit der Ergebnisse mögen entscheidend sein für die Wahl des Verfahrens.

Bild 2 zeigt die auf diese Weise ermittelten Hebelarmkurven für vier Lagen der „Irene Oldendorff“ in Längsrichtung in einer Welle sowie die Glatwasserhebelarmkurve, die zugehörigen MG-Werte und eine Hebelarmkurve, die gemittelt wurde aus den für die Lagen Hauptspant im Wellental, Hauptspant auf dem Wellenberg und die bei den Zwischenlagen gültigen Hebelarmwerten. Diese „Mittelwertkurve“ wird für die Momentenbilanz verwendet, die für Wellenberglage geltende Hebelarmkurve nur bei den Schiffen, deren Dienstgeschwindigkeit gleich oder größer ist als die Fortschrittsgeschwindigkeit der Wellen, die etwa so lang sind wie das Schiff. Bei gewöhnlichen Frachtschiffen ist dies nicht der Fall. Über die Verwendung der Mittelwertkurve, die in einer früheren Veröffentlichung begründet wird [13], soll hier nur gesagt werden, daß die jeweils wirksame Hebelarmkurve um diesen Wert oszillieren muß, und zwar um so schneller, je größer die Begegnungsfrequenz ist.

In bezug auf die Änderung des MG-Wertes ist bemerkenswert, daß auch in der Wellenberglage das MG größer ist als für glattes Wasser.

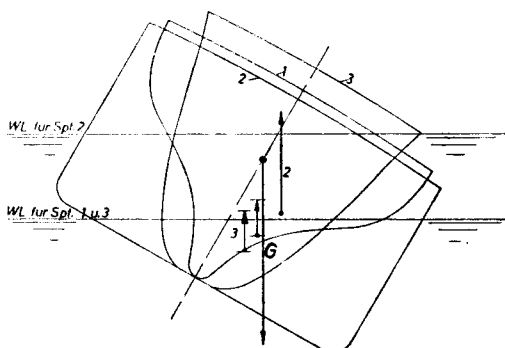


Bild 1 Prinzip der Seegangseinwirkung auf den Hebelarm eines in Wellenrichtung liegenden gekrängten Schiffes

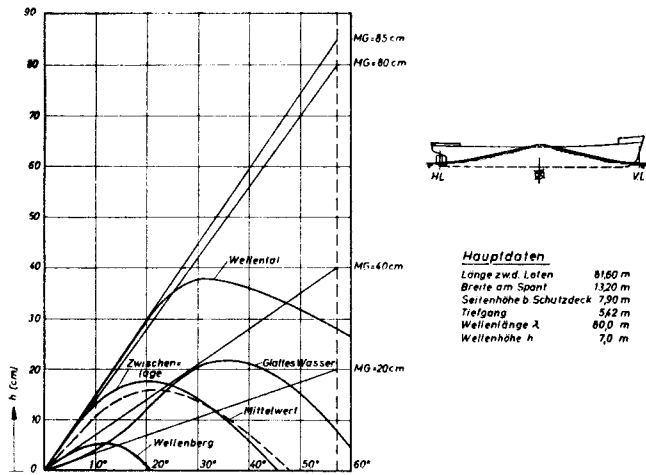


Bild 2 Hebelarme der „Irene Oldendorf“

Die Änderungen des MG-Wertes können im Prinzip leicht erklärt werden:

$$MG = KF - M_B F - KG$$

KG Die Lage des Gewichtsschwerpunkts wird nicht beeinflusst;

$M_B F = \frac{J_B}{V}$ bei normalen Frachtschiffen ist wegen der ausfallenden Spanten an den Schiffsenden J_B und damit $M_B F$ im Wellental etwas größer, im Wellenberg etwas kleiner als in glatttem Wasser, es überwiegt aber die Vergrößerung von

KF Der Verdrängungsschwerpunkt F liegt in jedem Falle höher als in glatttem Wasser, daher ergibt sich insgesamt eine Vergrößerung von KM und damit von MG.

Diese Aussage gilt aber nicht für Schiffe wie das in Bild 3 gezeigte. Es tritt schon bei mäßigen Wellenhöhen durch das Austausch des Hecks eine wesentliche Verringerung von J_B und damit auch von $M_B F$ ein. Hier ist auch im Wellenberg eine Verkleinerung von MG möglich. Der MG-Wert ist als allgemeine kennzeichnende Größe für die Sicherheit gegen Kentern also noch weniger geeignet als beim Vergleich von Glattwasserwerten.

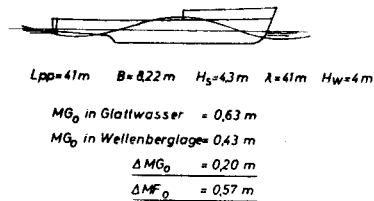


Bild 3 Geringer Tiefgang in einem großen Bereich des Hinterschiffs führt auch im Wellenberg zur Verringerung von MG_0

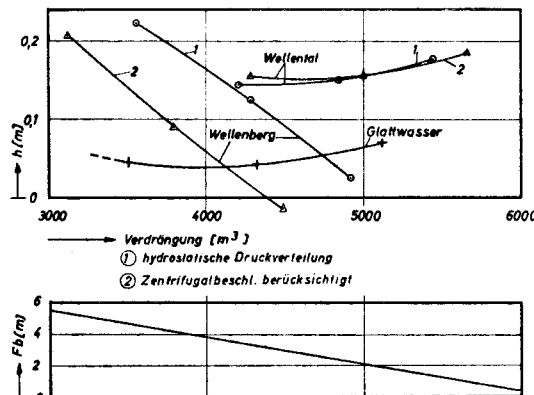


Bild 5 Pantokarenen für $\varphi=30^\circ$ für den schiffsähnlichen geometrischen Körper

Bei den ersten Rechnungen wurde hydrostatische Druckverteilung im Wasser angenommen. Infolge der Orbitalbewegung der Wasserteilchen in der Welle treten jedoch Änderungen des spezifischen Gewichts des Wassers auf, die als Smith-Effekt bekannt sind. Bei der Längsfestigkeitsrechnung wird diese Erscheinung dadurch berücksichtigt, daß man die Wellenhöhe geringer wählt, als sie dem Schiff tatsächlich begegnen könnte. Diese Maßnahme wird dadurch begründet, daß im Wellenberg der Auftrieb geringer ist, da die Zentrifugalkraft der Erdbeschleunigung entgegenwirkt, und im Wellental durch Addition beider Beschleunigungen ein größerer Auftrieb vorhanden ist als in glatttem Wasser. Wendet man diese Begründung auf das in Bild 1 durch drei charakteristische Spanten vertretene Schiff an, so muß man schließen, daß das von der Mittschiffssektion gelieferte aufrichtende Moment noch kleiner ist als es nach Verdrängung und Hebelarm sein müßte, die von den Schiffsenden hervorgerufenen weiterdrehenden Momente

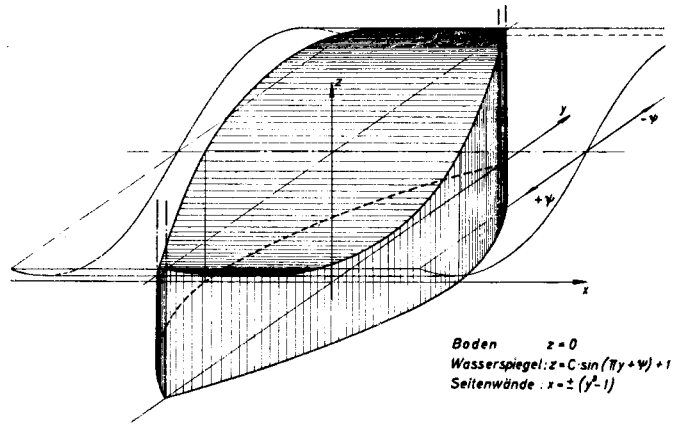


Bild 4 Schiffsähnlicher geometrischer Körper

durch den größeren Auftrieb im Wellental dagegen noch vergrößert werden. Es ist also insgesamt eher eine Verstärkung des Seegangseinflusses zu erwarten.

Derartige Schlüsse sind aber gerade in diesem Arbeitsgebiet sehr vorsichtig zu bewerten. Es wurde also zunächst für einen schiffsähnlichen Körper (Bild 4) eine Rechnung unter der Berücksichtigung der überlagerten Zentrifugalkräfte durchgeführt [14]. Der Arbeitsaufwand wird dadurch gegenüber einer Rechnung unter Annahme gleichbleibenden spezifischen Gewichts vervielfacht, da der Flächen- bzw. Momentenwert mit einem sich mit der Wassertiefe kontinuierlich ändernden Koeffizienten

$$c_b = \frac{g}{g} \frac{b \uparrow}{\dots}$$

multipliziert werden muß. $b \uparrow$ ist hier die Vertikalkomponente der Zentrifugalbeschleunigung, deren Größe außer von der Wellenlänge, der Wellenhöhe und der Lage innerhalb der Welle noch von der Wassertiefe abhängig ist. Um die Rechen-

zeit in erträglichen Grenzen zu halten, wurden Flächenstreifen von z. B. 1 m Höhe planimetriert und die Werte mit den für diese Streifen geltenden mittleren c_s -Koeffizienten multipliziert. Für eine Krängung von $\varphi = 30^\circ$ sind die Pantokarenen in Bild 5 dargestellt. Für die Lage auf dem Wellenberg erhält man bei Berücksichtigung des Smith-Effekts tatsächlich wesentlich kleinere Hebelarmwerte, der Unterschied bei der Wellentallage ist hier unbedeutend. Bemerkenswert ist ferner, daß bei sehr großem Freibord bei dieser Krängung sich auch für die Wellenberglage größere Hebelarme ergeben als für glattes Wasser.

Für einen Linienriß (Bild 6), der für die weiteren Untersuchungen verwendet wurde, ergaben sich die in Bild 7 gezeichneten Hebelarmbereiche. Die Schraffur soll die durch Vereinfachungen verursachte Fehlergröße andeuten. Die eingetragenen Punkte sind berechnet aus gemessenen aufrichtenden Momenten eines Modells, das in regelmäßigen Wellen in Wellenrichtung mit verschiedenen Geschwindigkeiten und mit mehreren vorgegebenen Krängungen geschleppt wurde [13]. Das Modell entsprach dem in Bild 6 gezeigten Linienriß. Ähnliche Versuche wurden unabhängig davon mit anderen Modellen von Paulling [15] durchgeführt.

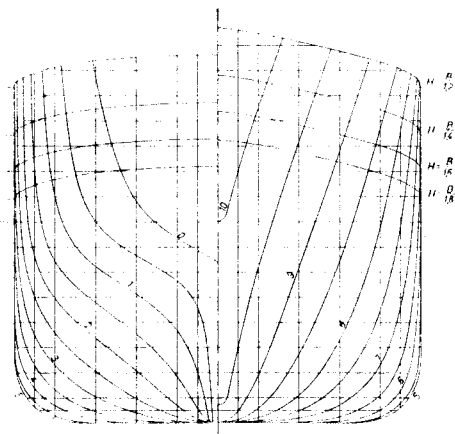


Bild 6 Spantenplan

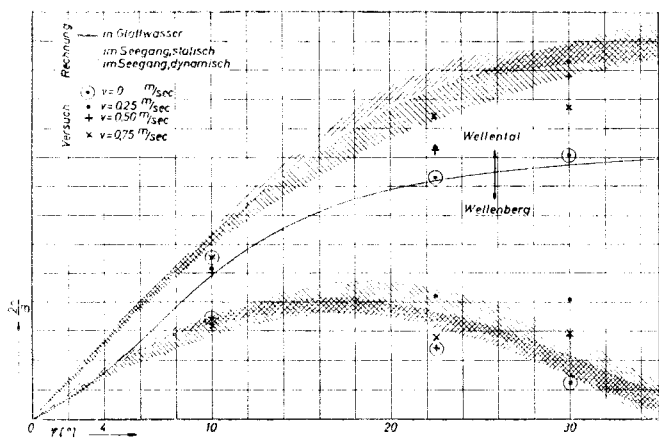


Bild 7 Hebelarmkurven und Meßpunkte für ein Modell nach Bild 6

Auf Grund dieser Ergebnisse schien es gerechtfertigt, für praktische Untersuchungen weiterhin mit hydrostatischer Druckzunahme zu rechnen, da der Einfluß des Smith-Effekts hier in der Größenordnung der Rechenungenauigkeit lag und auch für die Störung der Welle durch das Schiff keine wesentlichen Änderungen aus den Versuchsergebnissen zu entnehmen waren. Inzwischen sind durch Arbeiten von Abels und Grim [16, 17] die Voraussetzungen geschaffen worden, auch diese Frage näher zu untersuchen.

Durch die große Zahl der Parameter, von denen die Größe der Hebelarmänderungen abhängt, wird die Voraussage der

zu erwartenden Hebelarmkurven sehr erschwert. Es wurde daher ein Rechenprogramm aufgestellt, das dazu dienen sollte, einen gewissen Überblick zu verschaffen. Folgende Stufung der Parameter wurde gewählt:

- $B/H_{\text{schiff}} = 1,2; 1,4; 1,6; 1,8$ (s. Bild 6)
- $H_{\text{welle}}/\lambda = 0,050; 0,0750; 0,100; 0,125; 0,150$
- $\varphi = 10^\circ; 20^\circ \dots \dots \dots 80^\circ; 90^\circ$
- $V = 2000 \text{ m}^3; 3000 \text{ m}^3 \dots \dots \dots 10\,000 \text{ m}^3$
(bezogen auf $L = 100 \text{ m}$)

Phasenlage $\psi =$ Hauptspant im Wellental; Hauptspant im Wellenberg
 $\lambda/L = 1$

Leider ist dieses Rechenprogramm noch nicht beendet. In Bild 8 wird ein Teilergebn gezeigt. Es ist ein kleiner Trost, wenn Paulling zu einem ähnlichen Programm äußert: „Obgleich diese Versuche ursprünglich nur die Richtigkeit des Rechenverfahrens beweisen sollten, erschien es wegen der Umständlichkeit der Rechnungen zweckmäßiger, einen Bereich der Schiffs- und Wellenparameter experimentell zu untersuchen“ [15]. Inzwischen können auch Elektronenrechner für diese Aufgabe eingesetzt und die Rechenzeiten dadurch erheblich verkürzt werden.

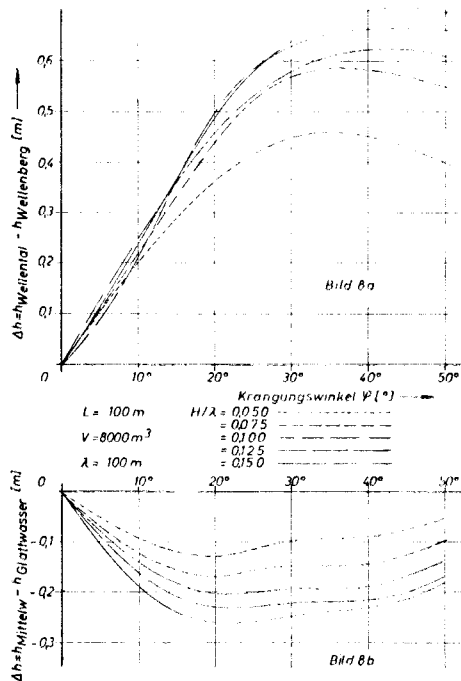


Bild 8 Teilergebn aus systematischen Rechnungen für den Spantenplan nach Bild 6
 a) Hebelarmdifferenz zwischen Wellental- und Wellenbergwert
 b) Hebelarmdifferenz zwischen Glattwasser- und Seegangsmittelwert

Weitere Parameter, die noch variiert werden müßten, sind u. a. die Völligkeit δ , die charakteristische Spantform, Verteilung der Aufbauten und die Veränderung der Wasserlinienlänge in Abhängigkeit vom Tiefgang. Solange diese Systematik noch nicht vorliegt, bleibt kein anderer Weg, als im Bedarfsfalle spezielle Rechnungen durchzuführen, wie es für die in Bild 9 skizzierten Schiffe bereits geschehen ist. Die in Bild 10 aufgetragenen Hebelarmdifferenzen sollen das Ausmaß der Schwankungen zeigen. Diese Schwankungen lassen Schlüsse auf das Seeverhalten zu. Die Hebelarmdifferenzen in Bild 11 kennzeichnen die Lage der Mittelkurve gegenüber der Glattwasserkurve. Absichtlich sind die Schiffe nicht näher bezeichnet, soweit nicht vorher eingehend über sie berichtet wurde, da vermieden werden soll, daß die Folgerungen auf andere Schiffe übertragen werden. Die Mittelkurve liegt für die Segelschiffe beispiels-

weise recht nahe an der Glattwasserkurve, bei anderen Schiffen liegt sie jedoch weit darunter. In einem Falle (Personenfähre) liegt sogar schon die im Wellental geltende Hebelarmkurve unterhalb der Glattwasserkurve. Die Ursache dafür sind die außergewöhnliche Breite und der geringe Tiefgang des Schiffes.

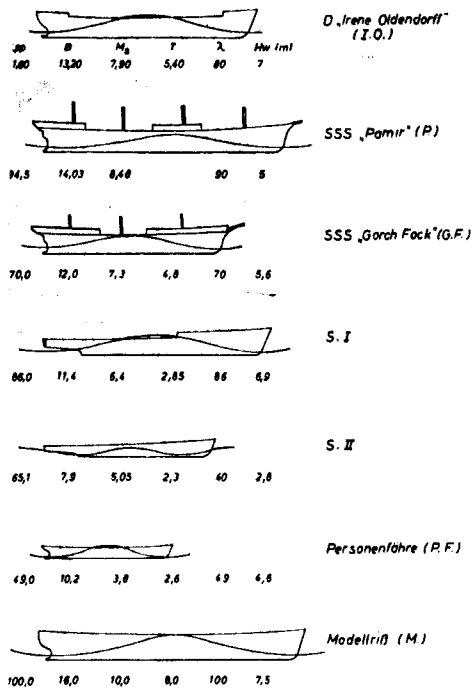


Bild 9 Skizzen und Hauptabmessungen untersuchter Schiffe

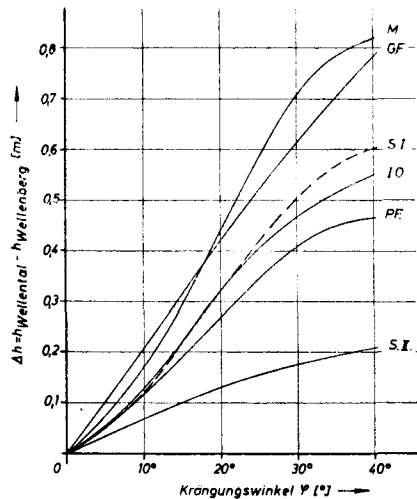


Bild 10 Hebelarmdifferenz zwischen Wellentalwert und Wellenbergwert

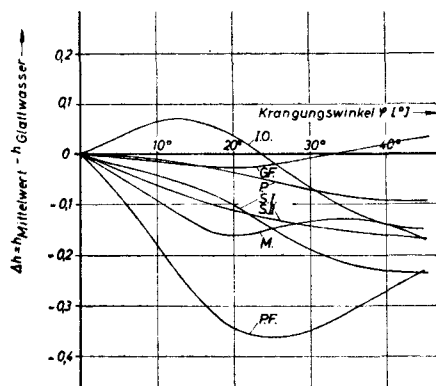


Bild 11 Hebelarmdifferenz zwischen Glattwasser- und Seegangsmittelwert

Trotz all der beschriebenen Rechnungen und Versuche muß zugegeben werden, daß die Frage, wie groß die kennzeichnenden Werte MG und h_p sein müssen, damit ein Schiff normalerweise einwirkenden krängenden Momenten widersteht, noch nicht mit völliger Sicherheit beantwortet werden kann. Vermutlich wird diese Frage auch vorläufig nicht allgemein beantwortet werden können, sondern man wird jeden Einzelfall besonders untersuchen müssen. Allenfalls wird die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf sehr ähnliche Schiffe möglich sein, wenn wesentlich mehr Material vorliegt.

Das Ziel der durchgeführten Untersuchungen war zunächst, festzustellen, welche Kräfte auf ein bestimmtes Schiff in einer bestimmten Lage wirken, die gekennzeichnet ist durch Kurswinkel α , Krängungswinkel φ , Wellenlänge λ , Wellenhöhe H_w und Phasenlage ψ . Weiterhin mußte versucht werden, auf die eine oder andere Weise Klarheit zu schaffen über die Umstände, die in natürlichem unregelmäßigem Seegang wirklich zum Kentern führen, und über den Bewegungsablauf beim Kentern.

Über die in dieser Richtung fortgeführten Arbeiten berichten S. Kastner und S. Roden auf den folgenden Seiten.

An der Durchführung der Untersuchungen, die auf Anregung und unter Leitung von Prof. Wendel erfolgten, waren außer dem Verfasser maßgeblich beteiligt cand. ing. Härtel, Dipl.-Ing. Kastner und Dipl.-Ing. Roden. Das Bundesverkehrsministerium und die Deutsche Forschungsgemeinschaft, die wesentliche Teile des Arbeitsprogrammes finanziell unterstützt haben, möchte der Verfasser an dieser Stelle dankbar erwähnen.

(Vorgetragen am 27. Januar 1962)

Schrifttum

- [1] Wendel, K.: Stabilitätseinbußen im Seegang und durch Koksdeckslast. Hansa 91 (1954) S. 2009/22.
- [2] Wendel, K., und Platzöder, W.: Der Untergang des Segelschiffes „Pamir“. Hansa 95 (1958) S. 367 ff.
- [3] Arndt, B., Kastner, S., und Roden, S.: Die Stabilitätsprüfung des Segelschiffes „Gorch Fock“. Schiffstechnik Band 7 (1960), Heft 39, S. 177/190.
- [4] Roden, S.: Beeinflussung der Stabilität der „Pamir“ durch Seegang. Hansa 95 (1958), S. 435/437.
- [5] Arndt, B., Kastner, S., und Roden, S.: Stabilitätsmessung auf Schiffen. Hansa 97 (1960), S. 2441/2446.
- [6] Pollard, S., und Dubeout, A.: Théorie du Navire. Paris 1892.
- [7] Kempf, G.: Die Stabilitätsbeanspruchung der Schiffe durch Wellen und Schwingungen. Werft, Reederei, Hafen 1938, S. 200ff.
- [8] Grim, O.: Rollschwingungen, Stabilität und Sicherheit im Seegang. Schiffstechnik 1952, Heft 1, S. 18 ff.
- [9] S. S. Ocean Vulcan Sea Trials. London 1953. S. 10.
- [10] Roll, H. U.: Höhe, Länge und Steilheit der Meereswellen im Nordatlantik. Seewetteramt Hamburg 1953.
- [11] Roll, H. U.: Die Meereswellen in der südlichen Nordsee. Seewetteramt Hamburg 1956.
- [12] Petri, O.: Statistik der Meereswellen in der Nordsee. Seewetteramt Hamburg 1958.
- [13] Arndt, B., und Roden, S.: Stabilität bei vor- und achterlichem Seegang. Schiffstechnik Band 5 (1958) Heft 29, S. 192/199.
- [14] Roden, S.: Änderung der Stabilität eines Schiffes im Seegang. Anlage 8 zum Bericht an die DFG über Forschungsarbeiten auf dem Gebiete der Schiffsstabilität, 1955, nicht veröffentlicht.
- [15] Paulling, J. R.: The Transverse Stability of a Ship in an Longitudinal Seaway. Journal of Ship Research, Vol. 4, Nr. 4, März 1961, S. 37/49.
- [16] Abels, F.: Die erregenden Kräfte und der Druckverlauf an einem Schiff im Seegang. Jahrbuch STG 53 (1959).
- [17] Grim, O.: Die Berechnung von Hydrodynamischen Kräften an dreidimensionalen Schiffskörpern. HSWA-Bericht Nr. 1122.