

## Abteilung II — Seeschifffahrt

### Thema 5b

**Verfahren zur Bestimmung der Entwurfsbedingungen, die für eine wirtschaftlich befriedigende Planung von Seebauwerken erforderlich sind, hinsichtlich Wahrscheinlichkeit der Beschädigung oder Zerstörung des Bauwerkes, bestimmt durch seine Merkmale in Abhängigkeit von Richtung und Dauer des Seeganges und der Wellen.**

von

Universitätsdozent Dr.-Ing. Alfred Führböter, Technische Universität Hannover, Franzius-Institut für Grund- und Wasserbau; Regierungsbaudirektor Dipl.-Ing. Martin Hager, Bundesverkehrsministerium, Bonn; o. Professor Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Walter Hensen, Technische Universität Hannover, Franzius-Institut für Grund- und Wasserbau; Regierungsdirektor Dr. Gerhard Tomczak, Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburg.

Thema: Messungen von Seegang und Seegangswirkungen

Inhalt	Seite
1. Zusammenfassung .....	285
2. Die Verschiedenheit des Seeganges in der Deutschen Bucht .....	286
3. Wellenhöhe und Wellendruck bei MACH-Reflexion-Messungen am Hafen Eckernförde .....	295
4. Der Druckschlag durch aufschlagendes Wasser als statistischer Vorgang — Untersuchungen im Naturmaßstab .....	303
5. Schriftumsverzeichnis .....	309

#### 1. Zusammenfassung

Im ersten Teil wird aus Seegangsmessungen an verschiedenen Stellen der Deutschen Bucht die hohe Abhängigkeit des Seeganges von der Wassertiefe und der Morphologie des Untersuchungsgebietes nachgewiesen. Insbesondere die Windrichtung hat entscheidenden Einfluß, wenn der Seegang in Wattengebieten aus großen Prielen einläuft; bei Tidehochwasser kann in Flachwassergebieten die Wellenhöhe über doppelt so hoch sein wie bei Tideniedrigwasser.

Der zweite Teil behandelt Naturmessungen an einem Hafen an der Ostsee, an dem starke MACH-Reflexionen festgestellt wurden. Die größte Aufsteilung entstand bei Wellen, deren Fortschrittsrichtung mit der Mole einen Winkel von  $10^\circ$  bis  $15^\circ$  einschloß. Es wurde die Druckverteilung gemessen und festgestellt, daß trotz des spitzen Winkels die Druckverteilung der einer totalreflektierten Welle näher als der einer fortschreitenden Welle ist.

Im dritten Teil werden Untersuchungsergebnisse über Druckschlag durch aufprallendes Wasser mitgeteilt. Im Naturmaßstabe wurden im Laboratorium Druckschläge untersucht; es wurde eine statistische Verteilung festgestellt. Wichtig ist das Ergebnis, daß schon eine dünne Wasserschicht auf der Aufprallfläche genügt, um die Druckschläge völlig zu unterdrücken (Wasserpolsterwirkung). Dies ist von Bedeutung für Böschungen von Deckwerken und Deichen, die durch schweren Seegang beansprucht werden.

## 2. Die Verschiedenheit des Seeganges in der Deutschen Bucht

Zur Beurteilung der Seegangsbelastung von Bauwerken sind zwei Fragen von Bedeutung:

Wie häufig treten Wellen von bestimmter Höhe und Periode am Ort auf?

Mit welcher voraussichtlich größten Wellenhöhe und welcher zugehörigen Periode ist zu rechnen?

Da Formeln zur Seegangsberechnung an Hand meteorologischer Daten sowohl für die freie See als auch für küstennahe Flachwassergebiete bestehen [4], kann man die obigen Fragen angenähert beantworten, wenn man für die in Frage kommenden Seegebiete aus langjährigen Beobachtungen statistisch gesicherte Angaben über die Häufigkeit bestimmter Windrichtungen und Windstärken besitzt und gut begründete Vorstellungen über die räumliche Ausdehnung eines Orkans und dessen Dauer hat.

Die Berechnungsverfahren gelten jedoch nicht für orographisch so schwierige Küstenzonen wie die durch Sandbänke, Watten und Priele charakterisierten Seegebiete der

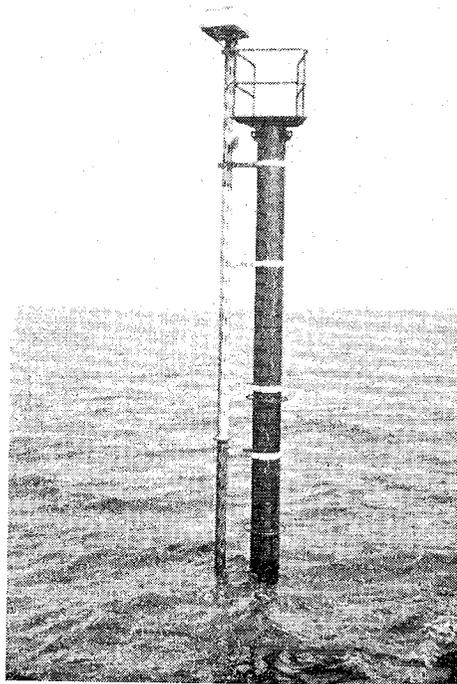


Bild 1

Deutschen Bucht, wie von H. Gienapp [8] am Beispiel einer Beobachtungsstation vor der Wesermündung nachgewiesen werden konnte. Außer durch Refraktion und Dämpfung werden die von der freien See hereinlaufenden Wellen in solchen Gebieten noch durch die Richtung und Stärke des Gezeitenstromes und die Höhe der Gezeit beeinflusst. Die erforderlichen Seegangdaten müssen in solchen Fällen unmittelbar durch Messung am Ort bestimmt werden. Dabei kann man sich nicht mit Einzelmessungen begnügen, sondern muß — dem statistischen Charakter der Fragestellungen entsprechend — eine Vielzahl von Messungen zugrundelegen, die sich möglichst gleichmäßig auf die verschiedenen meteorologischen Bedingungen erstrecken müssen.

Ein Gerät, das diese Forderungen erfüllt, wurde unter Anwendung eines von Wemelsfelder [17] angegebenen Prinzips beim Deutschen Hydrographischen Institut gebaut. In Abb. 1 ist eine Station dieses „Wellenpegels“ bei 13 m Wassertiefe abgebildet. Das Gerät ist an einem fest im Boden stehenden Trägerrohr montiert. In einem zweiten, durchbrochenen Rohr folgt ein Schwimmer frei den Wellenbewegungen. Seine Auf- und Abwärtsbewegung wird auf das Schreibgerät übertragen, das sich in einem wasserdichten Kasten am oberen Ende des Rohres befindet. Die Arbeitsweise des Registrierteiles ist rein mechanisch. Abb. 2 zeigt den Registriertisch, auf dem eine Schreibfeder die Bewe-

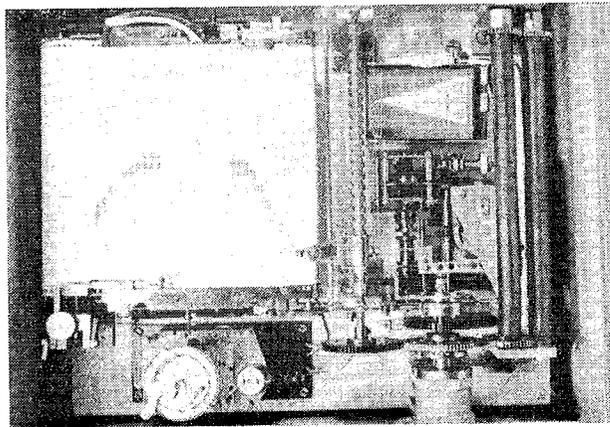


Bild 2

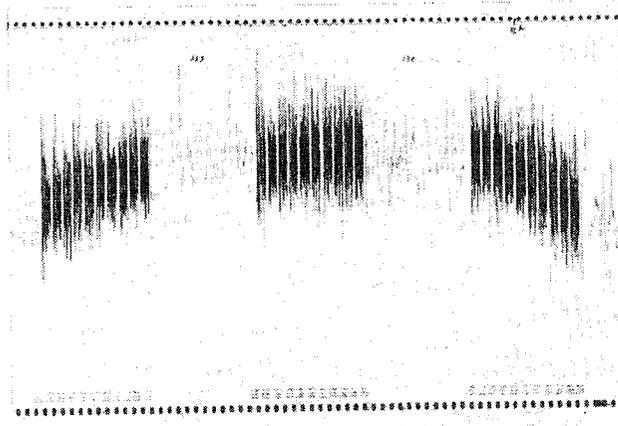


Bild 3

gungen des Schwimmers aufzeichnet, und einen Teil des Steuermechanismus. Dieser sorgt für eine automatische Auswahl der Registrierzeiten in Abhängigkeit von den Wellenhöhen. Eine geeignete Zählvorrichtung summiert die an der Station auftretenden Wellenhöhen und schaltet nach einer Summe von jeweils 3 000 m ein mit gleichmäßiger Geschwindigkeit ablaufendes Federtriebwerk ein, so daß die vom Seegang hervorgerufenen Auslenkungen der Schreibfeder für eine Dauer von 2 Minuten vollständig aufgezeichnet werden. In Abb. 3 ist eine Registrierung wiedergegeben. Die zwischen den ausführlichen Aufzeichnungen des Seegangs an der Station auftretenden Wellen gehen jedoch nicht völlig verloren. 10 Abschnitte mit einer Summe von je 60 m Wellenhöhe werden in den in Abb. 3 erkennbaren Blöcken bei nur geringem Papiervorschub aufgezeichnet. Sie geben einen Überblick über die in diesem Zeitraum aufgetretenen höchsten Wellenberge und -täler. Zugleich werden die für je 300 m Wellenhöhe benötigten Zeiten gedruckt (unterer Bildrand). Aus diesen Zeiten, der jeweiligen Summe der Wellenhöhen und der mittleren Periode, die aus dem Abschnitt der Schnellregistrierung bestimmt wird, läßt sich die mittlere Wellenhöhe im Zeitpunkt der Schnellregistrierung berechnen. Das Gerät bedarf außer einer Batterie für ein Uhrwerk, von dem die Zeiten für die Dauer der Blöcke und Zeitmarken gegeben werden, keiner besonderen Energiequelle. Die Energie für den Betrieb, und zwar für den Papiertransport, den Steuermechanismus und die Schnellregistrierung wird dem Seegang entnommen, indem die Bewegungen des Schwimmers alle diese Vorgänge steuern. Dadurch ist die Dauer, die der Wellenpegel sich selbst überlassen werden kann, lediglich eine Frage des Papiervorrates für die Registrierung. Dieser ist so gewählt, daß die Stationen in Abständen von etwa 2 Monaten besucht werden müssen. In dieser Zeit erfolgen bis zu 180 ausführliche Aufzeichnungen des Seeganges. In etwa 1½ Jahren kann man auf diese Weise eine ausreichende Anzahl von Einzelmessungen gewinnen, um statistische Aussagen über die Seegangswerte am Ort (Höhe, Periode) in Abhängigkeit von der Windrichtung und -stärke zu machen, die man für jede Schnellregistrierung aus meteorologischen Beobachtungen am Ort oder aus Wetterkarten bestimmt.

Die Bearbeitung einer genügend hohen Zahl von Einzelbeobachtungen — 1 500 bis 2 000 — führt zu einer „Seegangscharakteristik“ der betreffenden Station, die es gestattet, für jede Windrichtung und -geschwindigkeit den zugehörigen Mittelwert der charakteristischen Wellenhöhe und der Periode am Diagramm abzulesen. In den Abb. 4 a bis d sind die Charakteristiken von 4 Stationen dargestellt:

- Station Wangerooze: 7°55,7' E, 53°48,4' N, Wassertiefe bei K.N.: 6 m
- Station Mellum-Plate: 8° 5,6' E, 53°46,4' N, Wassertiefe bei K.N.: 13 m
- Station Außeneider: 8°30,5' E, 54°14,6' N, Wassertiefe bei K.N.: 7 m
- Station Westerland: 8°17,6' E, 54°54,9' N, Wassertiefe bei K.N.: 3 m

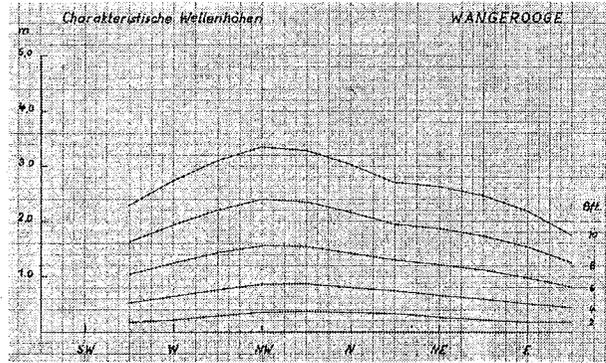


Bild 4 a

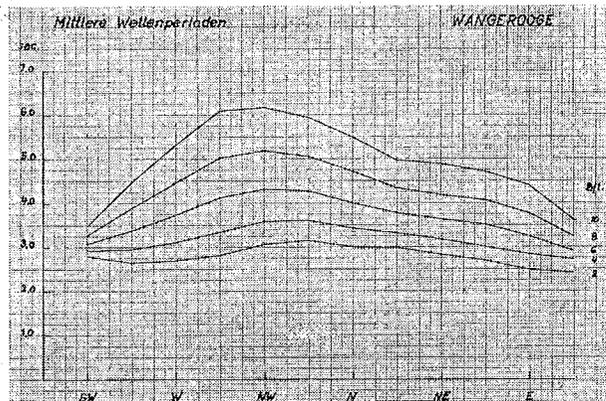


Bild 4 a

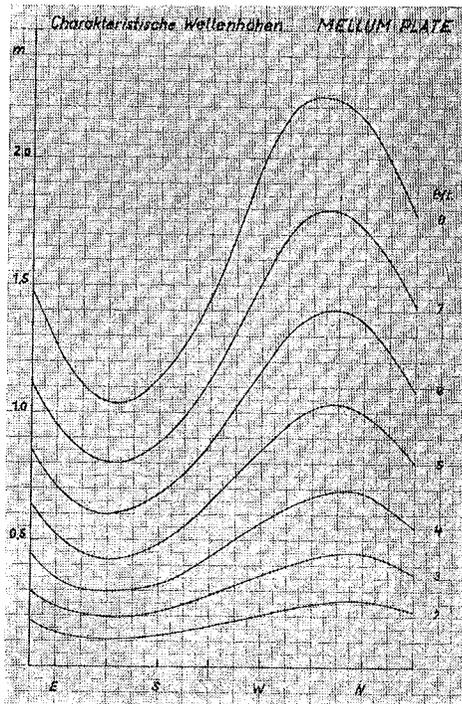


Bild 4 b

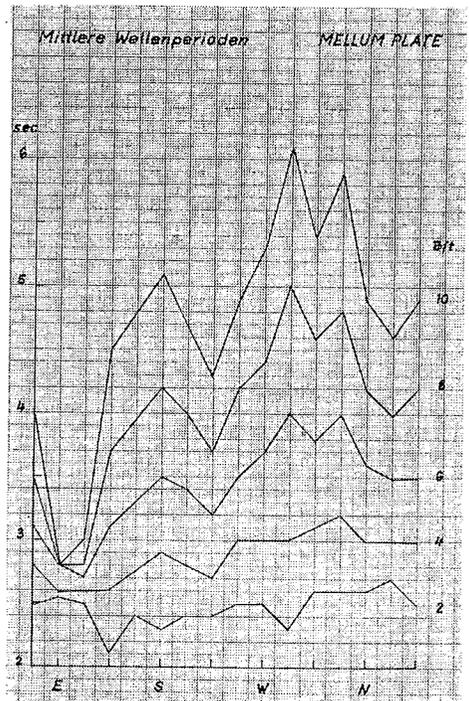


Bild 4 b



Bild 4 c

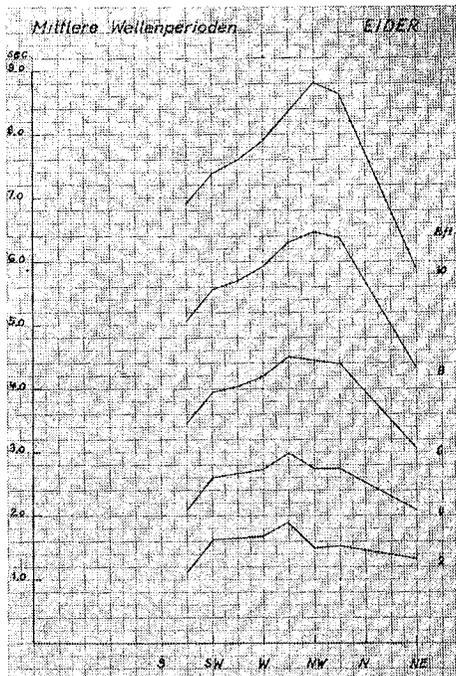


Bild 4 c

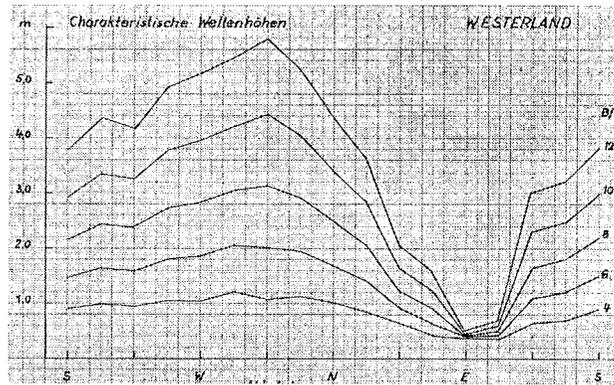


Bild 4 d

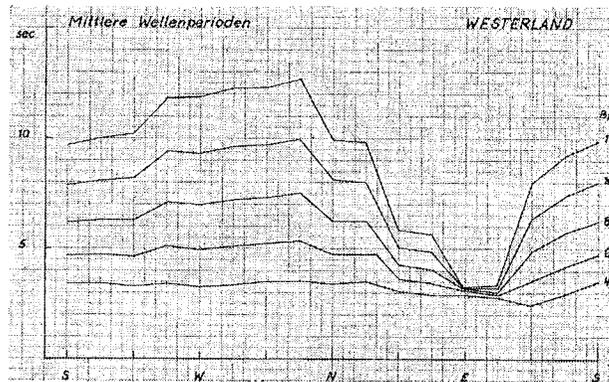


Bild 4 d

In den folgenden Tabellen sind weitere 8 Stationen der Deutschen Bucht mit einbezogen worden, um einen Eindruck von der Verschiedenartigkeit der charakteristischen Seegangswerte zu vermitteln, die bei gleichen meteorologischen Verhältnissen im freien Seegebiet der Deutschen Bucht, in der Übergangszone zu den Wattgebieten und in den Prielen und Flußmündungsgebieten herrschen. Die Tabellen 1 a und 1 b geben die Meßwerte für auflandige und ablandige Winde der Stärke 8 Beaufort an. Die Stationen sind in folgende Gruppen eingeteilt:

Gruppe A: Freies Seegebiet.

Olbohrturm E 1, Wassertiefe 29 m

Olbohrturm A 1, Wassertiefe 17 m

Westerland, Wassertiefe 3 m

Gruppe B: Übergangszone zu den Wattengebieten.

Außeneider, 4 Wassertiefe 7 m

Mellum-Plate, Wassertiefe 13 m

Wangerooge, Wassertiefe 6 m

Gruppe C 1: Wattgebiet, jedoch bei Hochwasser frei liegend.

Tertius, Wassertiefe 3 m

Scharhörnriff, Wassertiefe 6 m

Gruppe C 2: Wattgebiet, auch bei Hochwasser abgeschirmt liegend.

Hundeknöll,	Wassertiefe	6 m
Büsum-Scholloch,	Wassertiefe	8 m
Büsum, Tonne 16,	Wassertiefe	3 m
Wittsand,	Wassertiefe	3 m

Tabelle 1

Charakteristische Wellenhöhen und mittlere Wellenperioden bei auf- und ablandigen Winden der Stärke 8 Beaufort in der Deutschen Bucht.

## a) Auflandige Winde, NW 8:

	Gr. A	Gr. B	Gr. C 1	Gr. C 2	Gr. A	Gr. B	Gr. C 1	Gr. C 2
Olbohrturm E 1	5,0 m				7,6 s			
Olbohrturm A 1	3,4 m				6,4 s			
Westerland	3,1 m				7,3 s			
Außeneider		2,8 m				6,5 s		
Mellum-Plate		1,9 m				4,9 s		
Wangerooge		2,5 m				6,5 s		
Tertius			1,6 m				4,4 s	
Scharhörnriff			1,8 m				5,1 s	
Hundeknöll				0,5 m				3,2 s
Büsum-Scholloch				1,0 m				2,2 s
Büsum, Tonne 16				0,8 m				2,2 s
Wittsand				0,6 m				2,2 s
Mittel der Gruppe:	3—5 m	2—3 m	1—2 m	0,5—1 m	6—7 s	5—6,5 s	4—5 s	2—3 s

## b) Ablandige Winde, ESE 8:

	Gr. A	Gr. B	Gr. C 1	Gr. C 2	Gr. A	Gr. B	Gr. C 1	Gr. C 2
Olbohrturm E 1	3,6 m				6,4 s			
Olbohrturm A 1	—				—			
Westerland	0,4 m*)				3,1 s*)			
Außeneider		1,4 m				6,4 s		
Mellum-Plate		1,0 m				3,0 s**)		
Wangerooge		1,5 m				4,6 s		
Tertius			1,1 m				2,8 s	
Scharhörnriff			0,8 m				3,8 s	
Hundeknöll				—				—
Büsum-Scholloch				0,6 m				2,4 s
Büsum-Tonne 16				0,6 m				2,3 s
Wittsand				0,6 m				2,3 s
Mittel der Gruppe:	2—4 m	1—2 m	~ 1 m	~ 0,5 m	5—6 s	4—5 s	3—4 s	~ 2,5 s

\*) Die Station Westerland liegt bei E-Wind im Schutz der Insel Sylt.

\*\*\*) Die Station Mellum-Plate liegt bei E-Wind im Schutz von trockenfallenden Sänden.

Wichtig ist der Einfluß der Gezeiten:

In der Deutschen Bucht beträgt der Tidenhub 1,5 bis 4 m. Dabei treten Gezeitenströme bis zu 2,5 m/h auf. Beide Faktoren beeinflussen den Seegang merklich. Dabei wirkt sich steigender Wasserstand im Sinne zunehmender Wellenhöhen aus, wie die Abb. 5a und 5b am Beispiel der Seegangscharakteristiken der Station Tertius bei Hoch- und Niedrigwasser zeigen. Die Zunahme der Wellenhöhen bei Hochwasser gegenüber denen

bei Niedrigwasser bis zu 100 % ist an dieser Stelle allerdings besonders ausgeprägt, da sich in ihrer Umgebung ausgedehnte Sände befinden, die bei Niedrigwasser teilweise sogar trockenfallen.

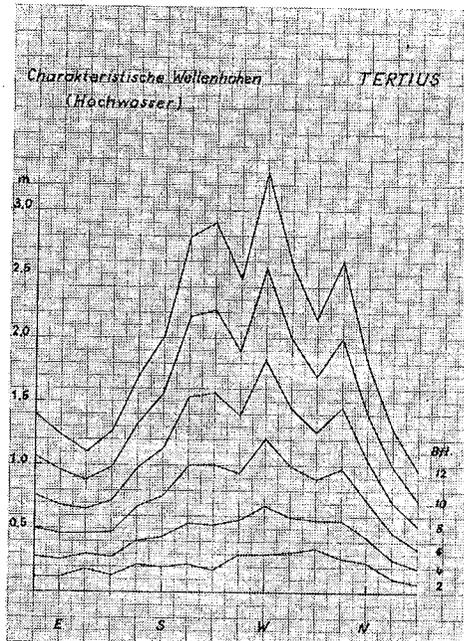


Bild 5 a

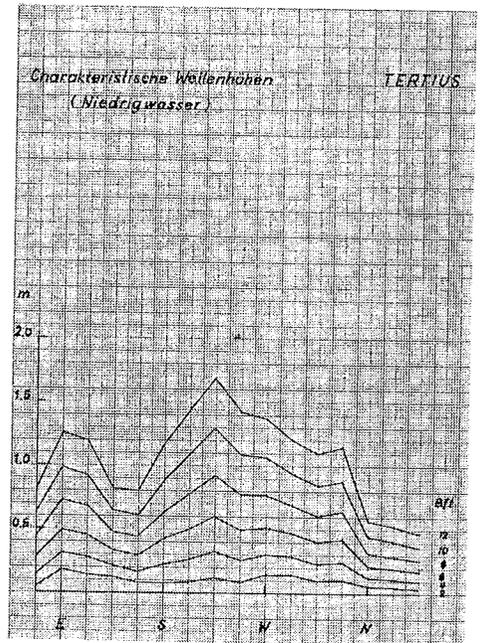


Bild 5 b

Der Gezeitenstrom bewirkt eine Zunahme der Wellenhöhen, wenn er entgegengesetzt zur Windrichtung läuft. Ein Beispiel dafür gibt die Abb. 6, in der die Ausgleichsgeraden für die Seegangsbeobachtungen an der Station Mellum-Plate bei NNW-Wind eingetragen

sind. Der Ebbestrom setzt bei Mellum-Plate in Richtung NNW, der Flutstrom in der entgegengesetzten Richtung. Alle zur Kenterzeit erfolgten Beobachtungen ergeben eine Ausgleichsgerade zwischen denen für Ebbe- und Flutstrom.

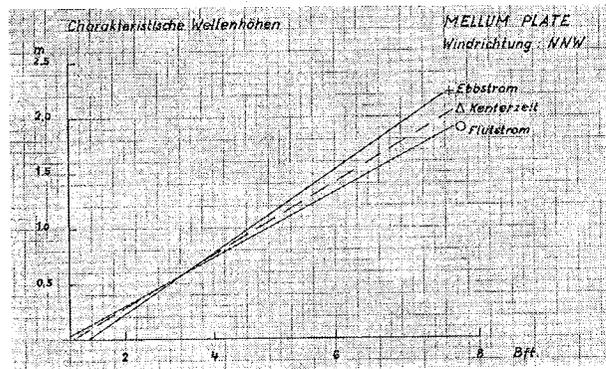


Bild 6

Die eingangs gestellte Frage nach der Häufigkeit der Wellen von bestimmter Höhe oder Periode läßt sich an Hand einer Reihe typischer Stationen auch für orographisch schwierige Seegebiete angenähert beantworten, wenn genügend Beobachtungen für die verschiedenen Gruppen A, B, C 1 und C 2 vorliegen. Die Ergebnisse der Seegangsbeobachtungen sind hierzu mit den entsprechenden Werten der Häufigkeitsverteilung meteorologischer Parameter zu kombinieren.

Die Frage nach der voraussichtlich größten Wellenhöhe oder -periode ist dagegen schwieriger zu lösen. Bei den freieren Stationen der Deutschen Bucht mit größeren Wassertiefen liefert die auf statistischen Betrachtungen beruhende Theorie von Longuet-Higgins [12] einige Anhaltspunkte. Unter der Annahme eines orkanartigen Sturmes von bestimmter Dauer kann man danach bei bekannter mittlerer Periode und Wellenhöhe am Ort Extremwerte berechnen, für die eine bestimmte Wahrscheinlichkeit des Auftretens besteht. Für die der Berechnung zugrundeliegende Windgeschwindigkeit und Dauer des Sturmes wird man dabei von meteorologischen Erfahrungswerten ausgehen müssen. Für flacheres Wasser ist diese Theorie jedoch nicht anwendbar. In diesen Fällen wird man die sog. „Extremwerte“ an Hand der für die Station vorliegenden Seegangscharakteristik nur abschätzen können.

### 3. Wellenhöhe und Wellendruck bei MACH-Reflexion-Messungen am Hafen Eckernförde

Erst vor kurzer Zeit wurde festgestellt, daß sich die bekannte Analogie zwischen der Überschallströmung in der Gasdynamik und dem Freispiegelabfluß auch auf die MACH-Reflexion erstreckt. Die MACH-Reflexion tritt bei spitzen Winkeln zwischen der reflektierenden Wand und der Wellenfortschrittsrichtung auf und bewirkt, daß die Reflexionswelle nur einen kleinen Teil der Wellenenergie einnimmt, während der größte Teil der Wellenenergie in dem sogenannten MACH-Bogen an der Wand verbleibt. Die Wellenkämme stellen sich dabei senkrecht zur Wand ein.

Den Bauwerkslasten aus diesem schrägen Wellenangriff ist bisher wenig Beachtung geschenkt worden. Im Technical Report Nr. 4 der Beach Erosion Board [3] ist lediglich die Empfehlung enthalten, im Fall der brechenden Welle bei schrägem Wellenangriff die Nor-

malkomponente der Stoßbelastung anzusetzen, also die Gesamtbelastung mit dem Faktor  $\sin^2 \alpha$  abzumindern. Dabei ist  $\alpha$  der Einfallswinkel zwischen Wellenfortschrittsrichtung und Bauwerkswand (oder zwischen Richtung der Wellenkämme und Flächennormale auf der Wand). Eine Übertragung dieser einfachen Beziehung auf die Reflexion der Tiefwasserwelle ist nicht möglich, weil das hydrodynamische Druckbild infolge der Wellenbewegung auch ohne Reflexion an der Wand und daher auch unabhängig von der Wellenrichtung vorhanden ist. Es wäre allenfalls möglich, den aus der reflektierten Welle herrührenden Lastanteil mit dem Faktor  $\sin^2 \alpha$  zu überlagern.

Nach Berichten von PERROUD [14], CHEN [5] und SIGURDSSON und WIEGEL [16] sind an der University of California in Berkeley Versuche an senkrechten und geneigten Wänden bei schrägem Wellenanlauf ausgeführt worden, die sich allerdings auf die Wellenbeobachtung beschränkt haben. Hiernach ist zwischen einem Bereich mit normaler Reflexion bei Einfallswinkeln von  $45^\circ$  bis  $90^\circ$  und dem Bereich mit der sogenannten MACH-Reflexion bei Einfallswinkeln unter  $45^\circ$  zu unterscheiden, die mit einer ähnlichen Erscheinung beim Verdichtungsstoß der Gasdynamik verglichen werden kann. Durch den sogenannten MACH-stem-Effekt wird die ankommende Welle rechtwinklig gegen die Wand gebeugt. Diese Erscheinung tritt in der Gasdynamik durch Überlagerung eines Verdichtungsstoßes bei der Bewegung entlang einer unendlichen Halbscheibe mit einer Beugungswelle auf, die von der Kante der Scheibe oder einer einspringenden Ecke ausgeht. Der Reflexionsdruck in Größe des zweifachen Anfangswertes wird infolge der Überlagerung erst in großer Entfernung von der Kante der Scheibe erreicht.

Beobachtungen von SIGURDSSON und WIEGEL zeigen in ähnlicher Weise eine Zunahme der Wellenhöhe, allerdings an einer gekrümmten Wand, also unter einer sich ständig ändernden Wellenanlaufrichtung.

Die von PERROUD festgestellte Zunahme der Wellenhöhen an senkrechter Wand sind für verschiedene Wandneigungen durch CHEN bestätigt worden. Die Länge des zur Wand gebeugten Wellenastes zeigte aber abweichend von den früheren Beobachtungen keine deutliche Veränderung mit dem Wellenfortschritt.

Bei dem Bau des Hafens Eckernförde an der deutschen Ostseeküste (Bild 7 und 8) waren Veränderungen der Wellenhöhen unter schrägem Wellenangriff an den langgestreckten Hafenmolen festgestellt worden. Da die Auswirkung dieser Erscheinung auf die Bauwerksbelastung nicht hinreichend bekannt war, sollte die erreichte Bauwerksicherheit in geeigneter Weise überprüft werden; hierzu bot sich der Weg der Naturmessungen an.

Es war möglich, die Veränderungen des Wellenbildes beim Auftreffen der schräg anlaufenden Tiefwasserwelle und beim Wandern entlang einer langgestreckten Molenswand zu verfolgen. Gleichzeitig wurden die dabei auftretenden Wellendrucke und Bauwerksbeanspruchungen ermittelt.

Die Anordnung der Meßgeräte geht aus Bild 8 hervor. Für den Vergleich zwischen der ankommenden und der am Bauwerk reflektierten Welle war eine Meßtonne ausgelegt, deren Bewegungen mit der Filmkamera festgehalten wurden. Da der Seegang in der etwa 14 km langen Bucht wesentlich durch die Windverhältnisse in diesem Bereich geprägt wird, mußten auch selbstschreibende Windmeßgeräte an Ort und Stelle eingesetzt werden. Zur Messung der Wellenhöhen am Bauwerk waren 9 Meßstellen in gleichmäßigen Abständen an der Mole angeordnet. Die Wellenbewegung wurde durch Abtasten der Wellenoberfläche nach dem Echolot-Prinzip erfaßt und von Echographen fortlaufend registriert.

18 Wellendruckmeß Dosen waren in der Molenaußenwand an zwei in 20 m Abstand liegenden Meßquerschnitten im Über- und Unterwasserbereich jeweils senkrecht unter-

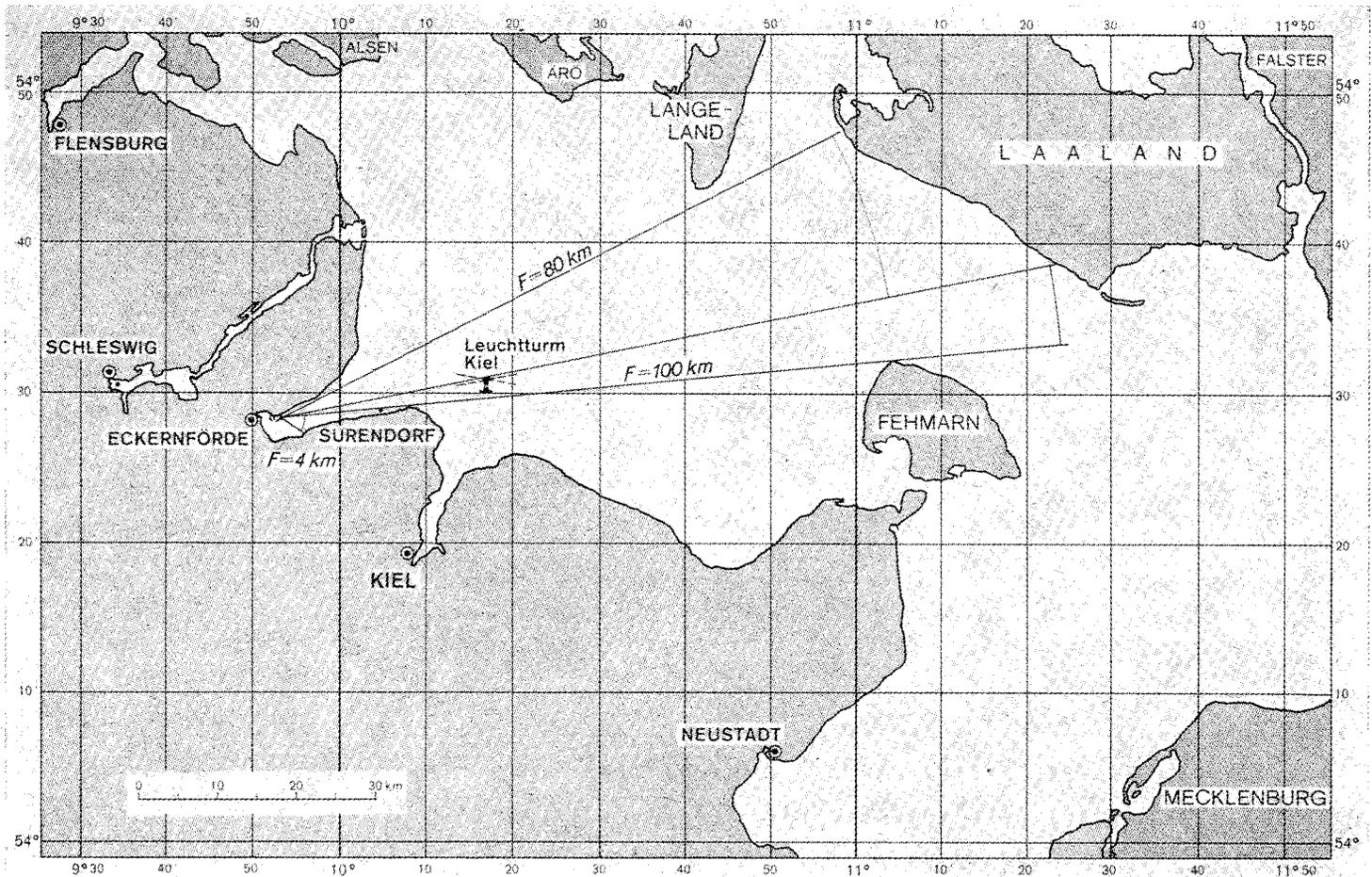


Bild 7

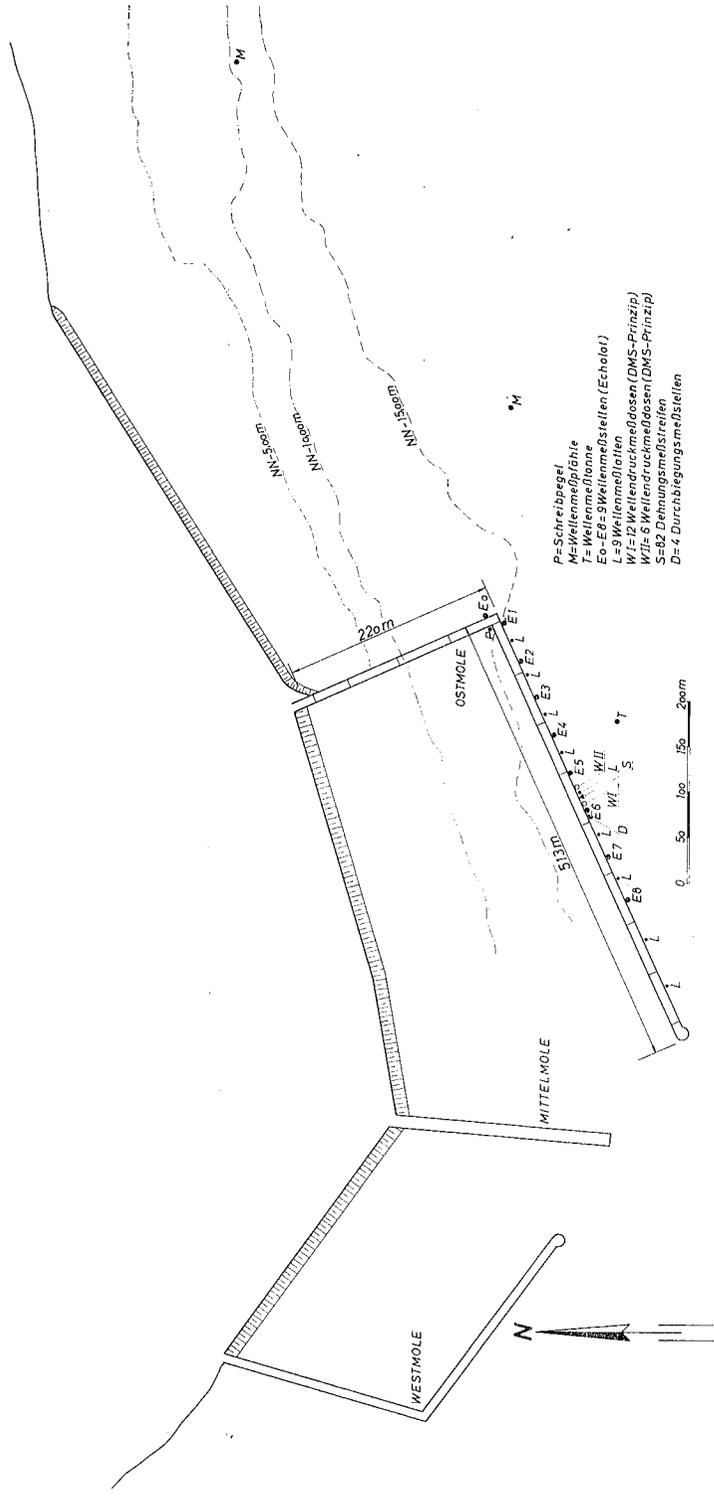


Bild 8

einander angeordnet. Die mit Dehnungsmeßstreifen arbeitenden Druckdosen lieferten ihre Meßwerte nach entsprechender Verstärkung an das mit Lichtpunktgalvanometern ausgerüstete Aufnahmegerät, welches die gleichzeitige Registrierung aller Meßwerte gestattete.

Die Wellenrichtungen wurden neben visueller Beobachtung bei verschiedenen Meßserien durch eine stationäre Radaranlage kontrolliert. Ein Schreibpegel im Ruhewasser des Hafens, 9 Lattenpegel zur visuellen Beobachtung des Wasserstandes und der Wellenbewegungen vervollständigten die Anlage. Die Anordnung der Meßpunkte zeigt Bild 8. Die Registriergeräte waren in einem geschützten Meßraum innerhalb des Molenbaukörpers untergebracht, wo die für die Funktionsfähigkeit der Meßgeräte notwendigen Voraussetzungen geschaffen waren.

Mit diesen Meßeinrichtungen wurden im Verlaufe eines Jahres in über 100 Meßreihen nahezu alle vorkommenden Seegangsverhältnisse erfaßt. Aus der Vielzahl der Messungen wurden einige Ergebnisse ausgewählt, die den Einfluß der schräg anlaufenden Wellen deutlich machen. In Bild 9 ist die gemessene Vergrößerung der Wellenhöhen an der lotrechten Wand in Abhängigkeit von der Wellenanlaufrichtung (Einfallswinkel  $\alpha$  = Winkel zwischen Wellenfortschrittsrichtung und Molenwand) aufgetragen. Der Vergleich mit den von PERROUD [14] im Labor mit Einzelwellen ermittelten Wellenhöhen zeigt eine grundsätzlich gleichartige Tendenz der Wellenaufteilung. In den Laboruntersuchungen wurde die maximale Wellenaufteilung im Bereich der MACH-Reflexion ( $\alpha < 45^\circ$ ) bei einem Einfallswinkel von etwa  $22^\circ$  festgestellt, während das Maximum bei den Eckernförder Messungen bereits zwischen  $10^\circ$  bis  $15^\circ$  liegt.

Bei steilerem Wellenanlaufwinkel erscheint dagegen eine Reflexionswelle, die bei ungünstiger Überlagerung mit den nachfolgenden Wellen durch Kreuzseebildung den Vorgang der Wellenaufteilung an der Wand abschwächen kann. Erst bei Einfallswinkeln über  $45^\circ$  nähert sich der Überlagerungsvorgang zwischen ankommender und reflektierter Welle dem Zustand der stehenden Welle. Wenn man die Linie der Wellenhöhen der reflektierten Welle mit der Kurve  $\sin^2 \alpha$  vergleicht, erscheint es durchaus zulässig, diesen Faktor bei der Reflexion schräg anlaufender Wellen anzusetzen. Dies führt dann in Bild 9 zur Linie  $1 + \sin^2 \alpha$ . Es zeigt sich aber deutlich, daß die Aufteilung an der Wand weit größer ist, als sich aus der Überlagerung der ankommenden und der reduzierten Reflexionswelle ergibt.

In Bild 10 ist die beobachtete Veränderung der Wellenhöhen beim Fortschreiten der Wellen an der langen Molenwand dargestellt. Danach tritt — unabhängig von der Wellenanlaufrichtung — ein Maximum der Wellenhöhen in einer Entfernung von etwa 100 bis 150 m vom Molenanfang auf, d. i. etwa das Vier- bis Sechsfache der Wellenlänge der ankommenden Wellen. Bei 200 bis 250 m fällt die Wellenhöhe leicht ab und steigt dann — allerdings nur bei den kleinen Wellenanlaufwinkeln — bei 300 m zu einem noch höheren Maximum an. Bei den steileren Einfallswinkeln hat vermutlich die Kreuzseebildung die weitere Aufteilung verhindert. Nach den Beobachtungen von PERROUD nimmt der rechtwinklig zur Mole gebeugte Wellenast beim Wandern entlang der Wand linear zu, solange der Einfallswinkel unter  $45^\circ$  bleibt. Bei den Eckernförder Messungen wurde der gebeugte Wellenast nur bei kleinen Wellenanlaufwinkeln deutlich wahrgenommen. Sobald hier eine Reflexionswelle auftrat, ging diese Erscheinung durch Überlagerungen gänzlich verloren.

Aus den Wellendruckmessungen sind einige Wellendruckbilder ausgewählt und in Bild 11 mit der rechnerischen Druckfläche für die Totalreflexion verglichen worden. Dabei ist zu beachten, daß das rechnerische Druckbild (SAINFLOU) auf der sicheren Seite liegt. Danach dürften zwischen den Belastungen der schräg anlaufenden und der total reflektierten Welle keine wesentlichen Unterschiede bestehen.

300

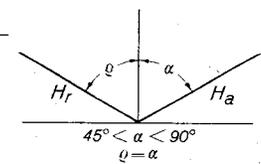
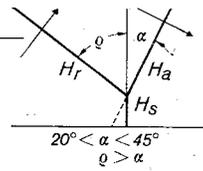
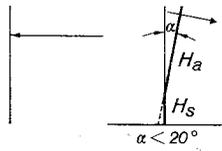
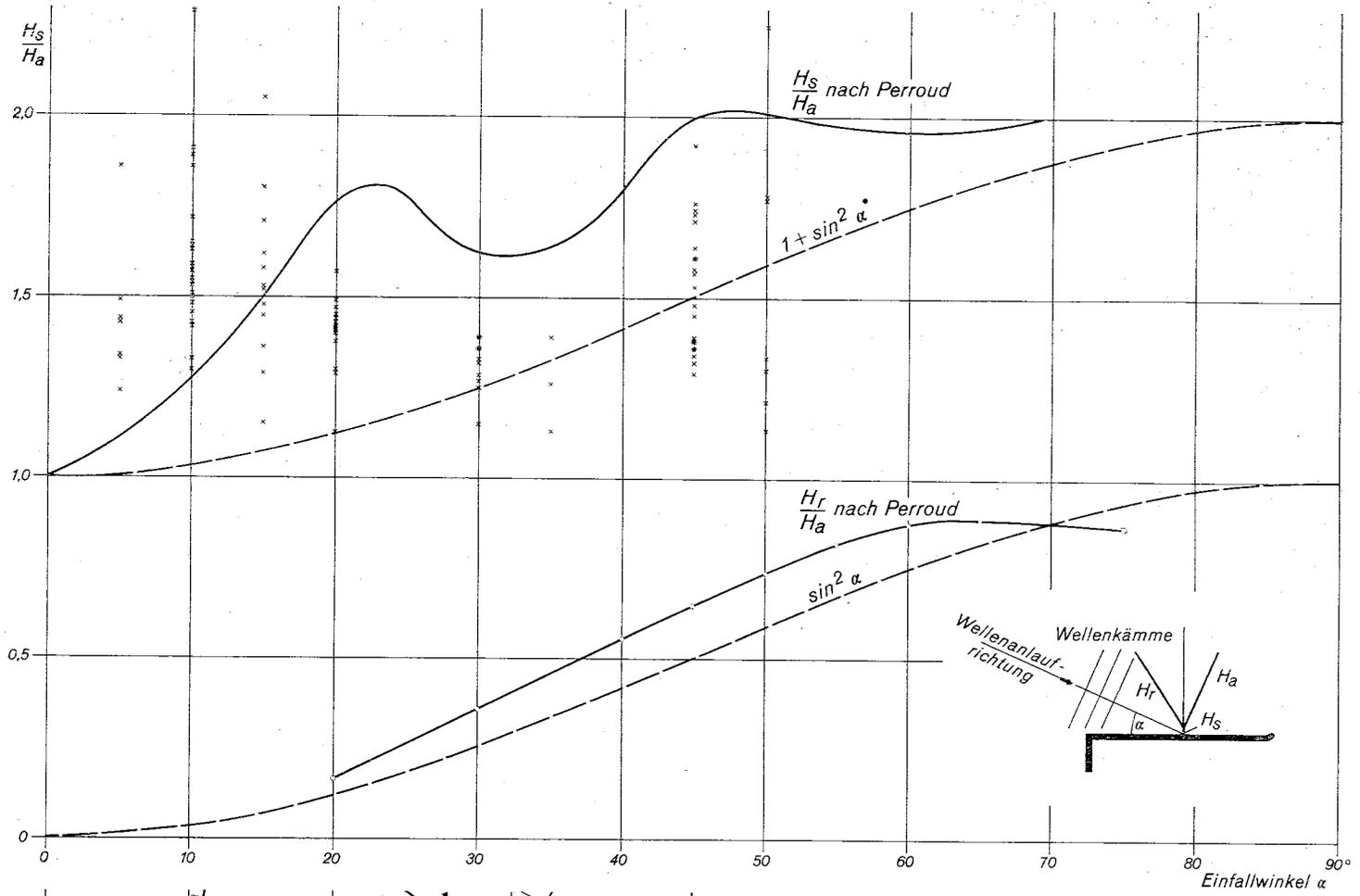
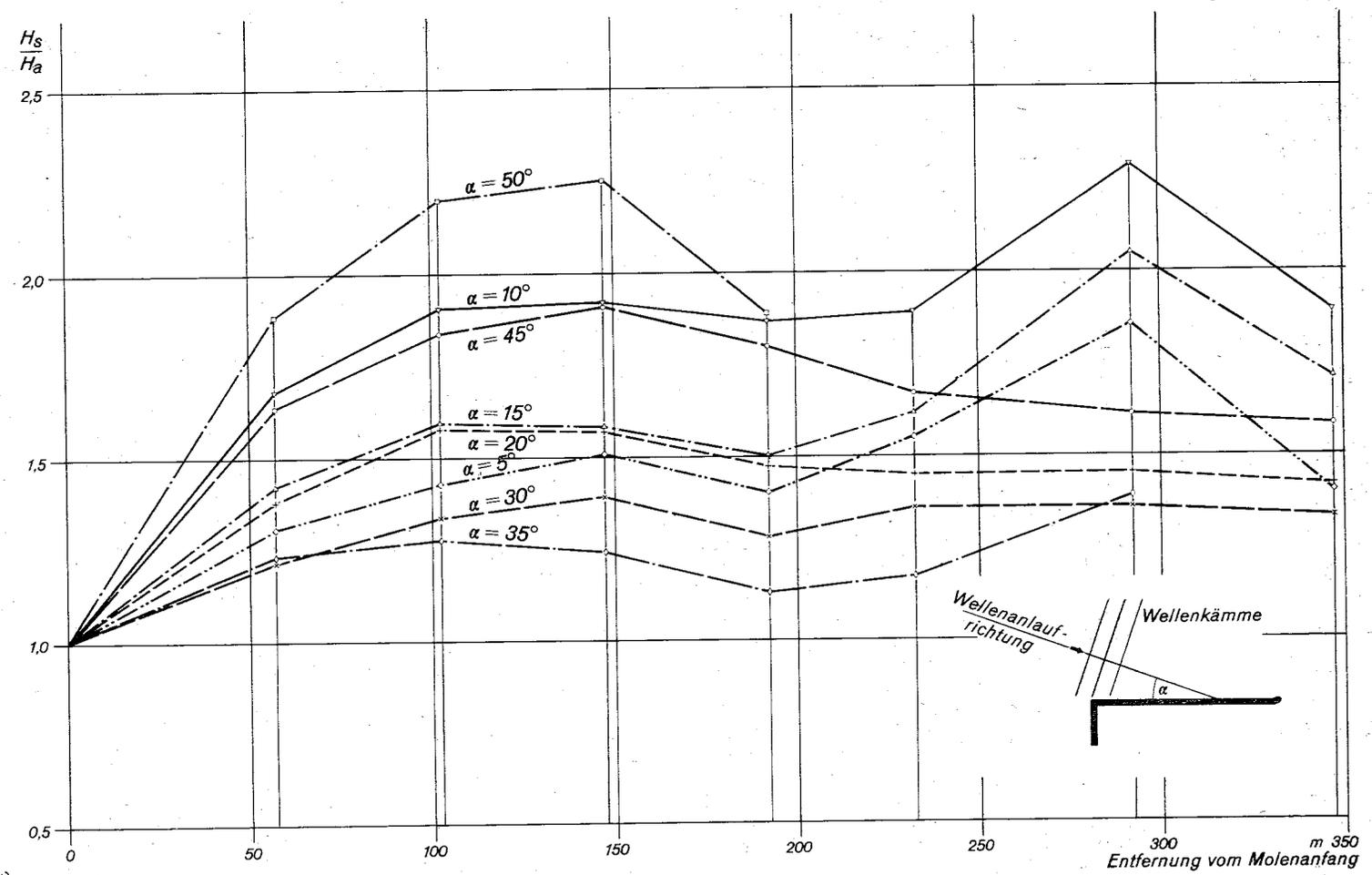


Bild 6



301

Bild 10

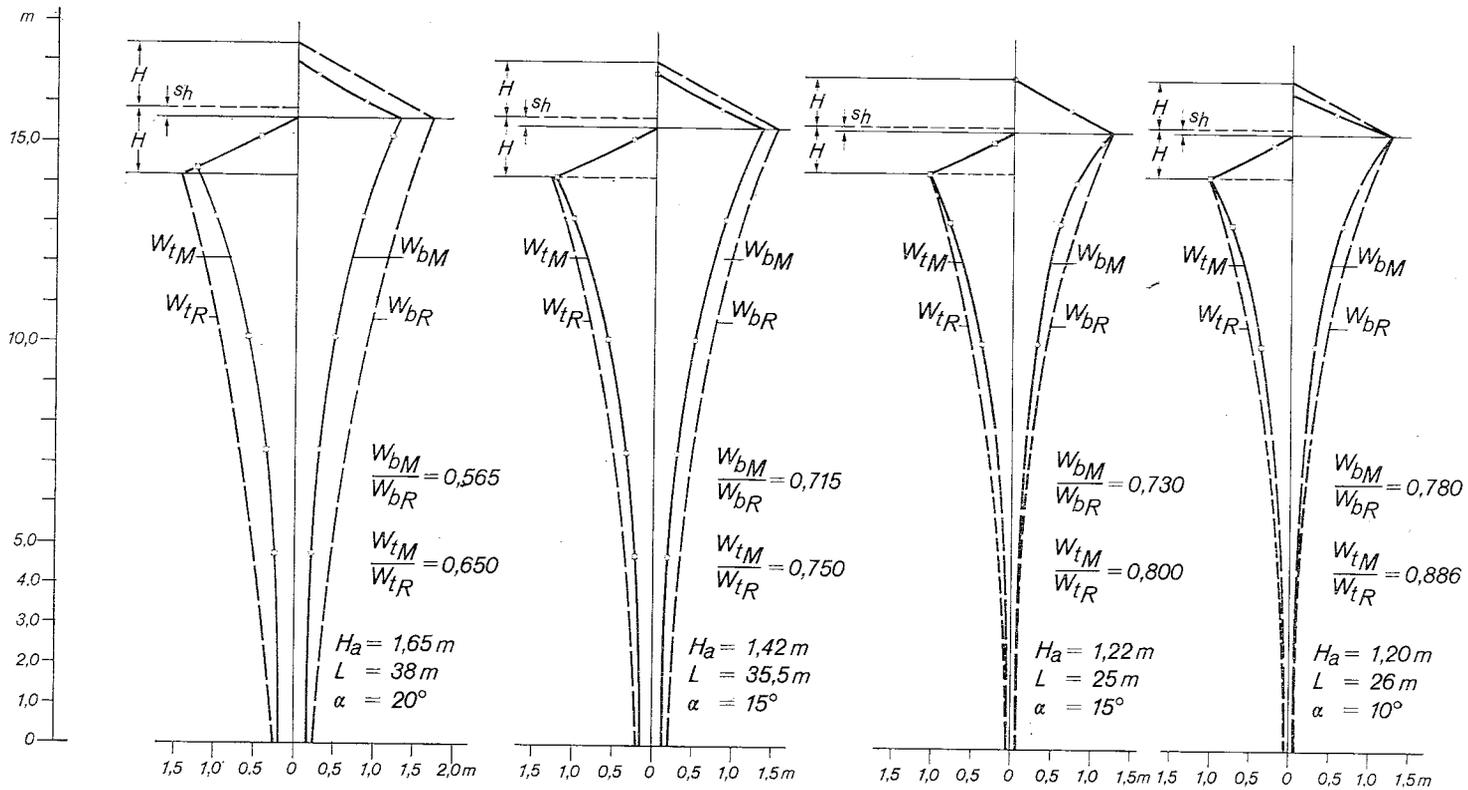


Bild 11

Die Versuchsergebnisse zeigen, wie bedeutend bei schrägem Wellenauflauf die Wellenbelastung durch MACH-Reflexion ansteigen kann. Das umfangreiche Meßmaterial wird weiter ausgewertet und wird in einer besonderen Arbeit veröffentlicht werden.

#### 4. Der Druckschlag durch aufschlagendes Wasser als statistischer Vorgang — Untersuchungen im Naturmaßstab

BAGNOLD [2] führte als erster Modellversuche zur Bestimmung des Druckschlages durch brechende Wellen durch; seine Untersuchungen wurden von DENNY [6] fortgesetzt, wobei DENNY bereits die Versuchsergebnisse statistisch auswertete und zeigte, daß die Zufallsverteilung bei wellenerzeugten Druckschlägen annähernd der GAUSSSchen Normalverteilung genügt. DENNY zeigte außerdem, welche große Bedeutung die Wasseroberfläche auf die Höhe der Druckschläge hat; bei unruhigem und gestörtem Wasserspiegel sind die Druckschläge wesentlich kleiner als bei glattem Wasserspiegel.

Es ist allgemein bekannt, daß im Modell gemessene Druckschlaghöhen, wenn sie nach FROUDE auf die Natur übertragen werden, unnatürlich große Werte ergeben (ALLEN [1], JOHNSON [10] und MINIKIN [13]). Aus der Natur liegen nur wenige Messungen vor, am umfangreichsten sind die von ROUVILLE, BESSON und PETRY [15], die immerhin Werte bis zu  $p_{\max} = 69$  m WS ergaben. Starke Streuungen treten aber im Modell wie in der Natur auf.

Wäre keine Luft zwischen der aufschlagenden Wassermasse und der (als starr angesehenen) Aufschlagfläche vorhanden, so würde sich der Wasserschlag nach KARMAN [11]

$$p_{\max} = \rho \cdot v \cdot c$$

$p_{\max}$  = Maximum der Druckspannung

$\rho$  = Dichte des Wassers

$v$  = Aufschlaggeschwindigkeit

$c$  = Schallgeschwindigkeit des Wassers

ergeben, der bei  $v = 10$  m/s und  $c = 1485$  m/s eine Druckspitze von 1510 m WS ergeben würde. Solche Druckschläge wurden aber bei brechenden Wellen in der Natur bisher noch nicht beobachtet; JASPER und BROOKS [9] haben bei slamming-Untersuchungen an Schiffen (eine Sonderform des Wasserschlages) maximal 207 m WS gemessen.

Durch die Elastizität der — immer vorhandenen — eingeschlossenen Luft wird die Größe des Druckschlages abgemindert; außerdem wird die Dauer des Druckschlages vergrößert. Durch theoretische Überlegungen können dabei folgende Näherungsgleichungen gefunden werden (FUHRBOTER [7]):

$$p_{\max} = \rho \cdot v \cdot c \cdot \sqrt[3]{\frac{c}{v}} \cdot \delta$$

$$\Delta t_k = \frac{R}{3 \sqrt{v \cdot c^2} \cdot \sqrt{\delta}}$$

mit  $\Delta t_k$  = Anstiegszeit von  $p = 0$  bis zur Druckspitze  $p_{\max}$   
 $R$  = hydraulischer Radius  $F/U$  der Aufschlagfläche

und

$$\delta = \left( \frac{E_L}{E} \cdot \frac{R}{D} \right)^{2/3}$$

als dimensionsloser, aus Versuchen zu bestimmender Verhältniszahl, in der  $E_L$  die mittlere Elastizität der Luft während des Druckschlages,  $E$  die Elastizität des Wassers,  $R$  den hydraulischen Radius der Aufschlagfläche und  $D$  die Dicke der idealisierten Luftschicht bedeutet, die den Lufteinschlüssen in Blasen, Hohlräumen usw. entspricht;  $E_L$ ,  $R$  und  $D$  stehen dabei in Wechselbeziehungen miteinander.

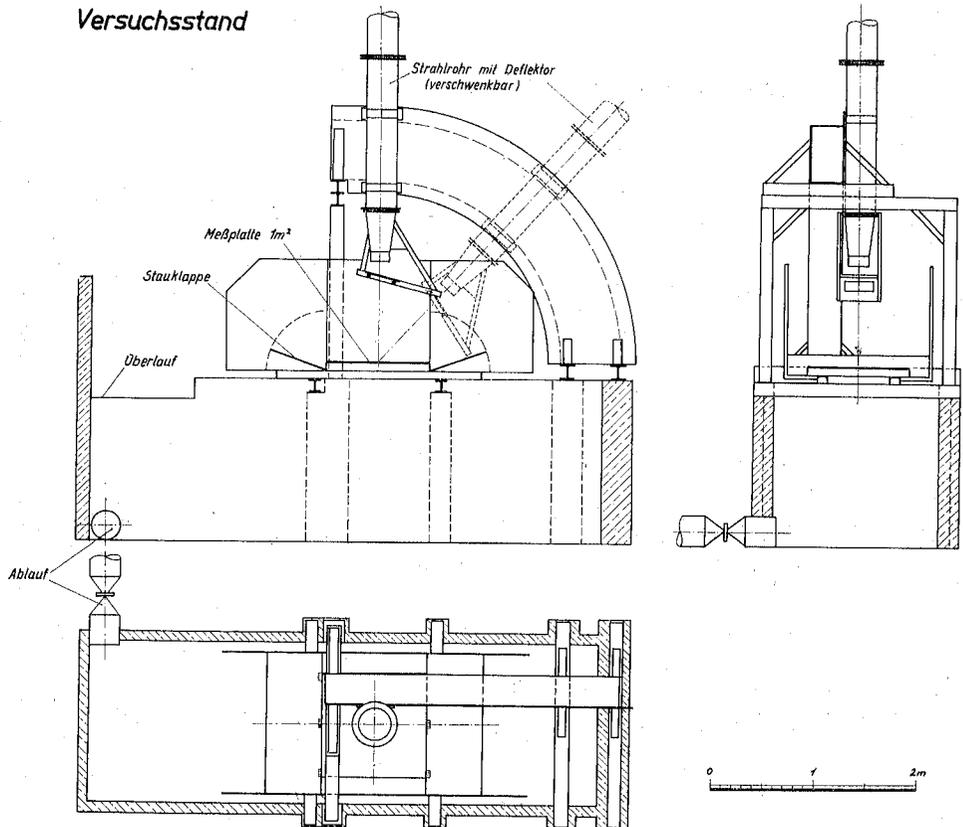
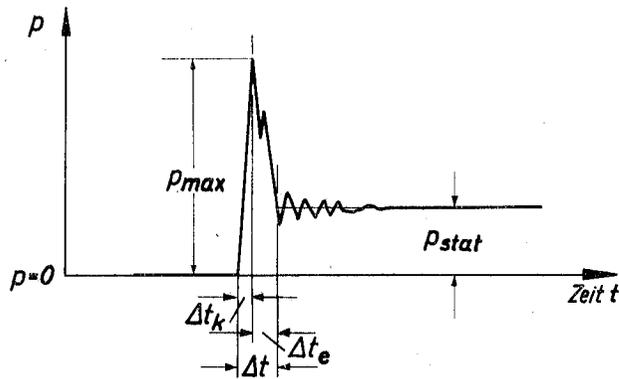


Bild 12

Die Aufschlagsgeschwindigkeiten brechender Wellen liegen in der Natur im Bereich um 10 m/s. Um die Druckschlaghöhen bei diesen Geschwindigkeiten untersuchen zu können, wurde im Franzius-Institut der Technischen Universität Hannover ein Versuchsaufbau, in dem ein Wasserstrahl dieser Geschwindigkeit durch einen Deflektor plötzlich auf eine mit elektronischen Meßzellen bestückte Platte gelenkt werden kann (Bild 12). Eine ähnliche Versuchseinrichtung hatte bereits GAILLARD Anfang des Jahrhunderts verwendet; da aber damals elektronische Meßgeräte fehlten, konnten die mechanischen Meßgeräte die nur kurz dauernden (um 0,01 s) Druckschläge nicht nachweisen. Bild 13 zeigt die Registrierung eines solchen Druckschlages, nach dessen Abklingen nur noch der Druck des stationären Strahles  $p_{\text{stat}} = \gamma \cdot v^2/2g$  verbleibt [7].

Es zeigte sich erwartungsgemäß, daß auch unter sonst völlig gleichen Versuchsbedingungen stark streuende Ergebnisse für  $p_{\text{max}}$  auftreten; dies hängt damit zusammen, daß

## Druckschlag durch den Wasseraufprall



### Beispiel eines Oszillogrammes

Bild 13

sowohl der Lufteinschluß als auch die Aufschlagfläche stets zufälligen Änderungen unterworfen sind. Deshalb muß eine statistische Auswertung vorgenommen werden; es zeigte sich (und kann auch theoretisch begründet werden), daß die Häufigkeitsverteilung gut durch die GAUSSsche Normalverteilung über  $\log p_{\max}$  genähert werden kann; Bild 14 zeigt ein Beispiel der Ergebnisse einer solchen Versuchsreihe mit 100 Versuchen sowie die Auswertung in einem entsprechenden speziellen Funktionspapier [7]. Es gehen außer der Aufschlaggeschwindigkeit  $v$  auch noch der Aufschlagwinkel  $\alpha$  und der Stirnflächenwinkel  $\beta$  ein, die die Geometrie der Aufschlagfläche bedingen (Bild 14).

Bild 14 zeigt, daß der höchste gemessene Druckschlag ( $p_{\max} = 31,2$  m WS) immerhin fast die 10fache Größe des Druckes des stationären Strahles ( $p_{\text{stat}} = 3,5$  m WS) erreicht. Der höchste Druckschlag bei 600 Versuchen betrug  $p_{\max} = 40,7$  m WS.

Aus 600 Versuchen wurden die statistisch streuenden Druckschlagzahlen  $\delta$  ausgewertet; es ergab sich, daß alle 600 Versuchsergebnisse in einer Verteilungsfunktion (ebenfalls normal-logarithmisch verteilt) zusammengefaßt werden können, wie Abb. 15 zeigt. Der Wert  $\delta_{50}$ , der von 50 % der Versuche unter- und von 50 % überschritten wird, ergab sich zu

$$\delta = 0,00245$$

Bei diesen Versuchen traf der aufschlagende Strahl stets auf eine wasserfreie Aufschlagfläche. Es wurde in weiteren Versuchsreihen untersucht, wie stark die Druckschlaghöhen abgemindert werden, wenn der aufschlagende Strahl in ein Wasserpolster der Dicke  $a$  einschlägt. Bild 16 zeigt, als Beispiel, daß bereits eine Wasserschicht von nur 3,5 cm Dicke beträchtliche Abminderungen erzeugt; bei  $a = 5$  cm weichen die gemessenen Druckschlaghöhen nicht mehr wesentlich von dem Druck des stationären Strahles ab.

# Häufigkeitsverteilung der Druckschläge $p_{max}$ (100 Versuche)

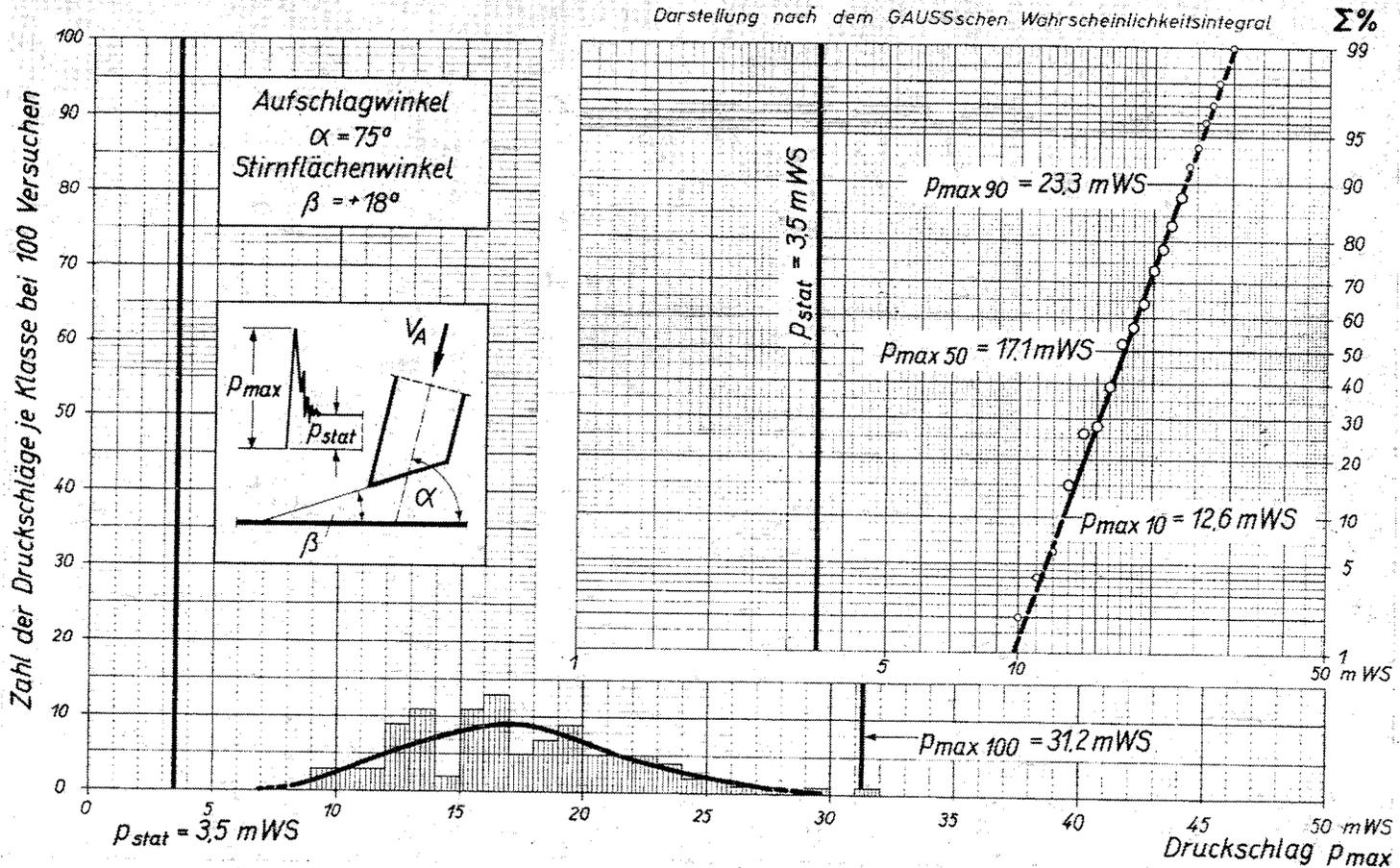


Bild 14

## Mittelwerte der Druckschlagzahlen $\delta$ aus 600 Versuchen

Aufschlagwinkel  $\alpha$  von  $90^\circ$  bis  $30^\circ$

Stirnflächenwinkel  $\beta$  von  $+33,8^\circ$  bis  $-35^\circ$

Aufschlaggeschwindigkeiten  $v$  von 8,3m/s bis rd. 4m/s

$$P_{max} = \rho \cdot v \cdot c \cdot \sqrt[3]{\frac{c}{v}} \cdot \delta$$

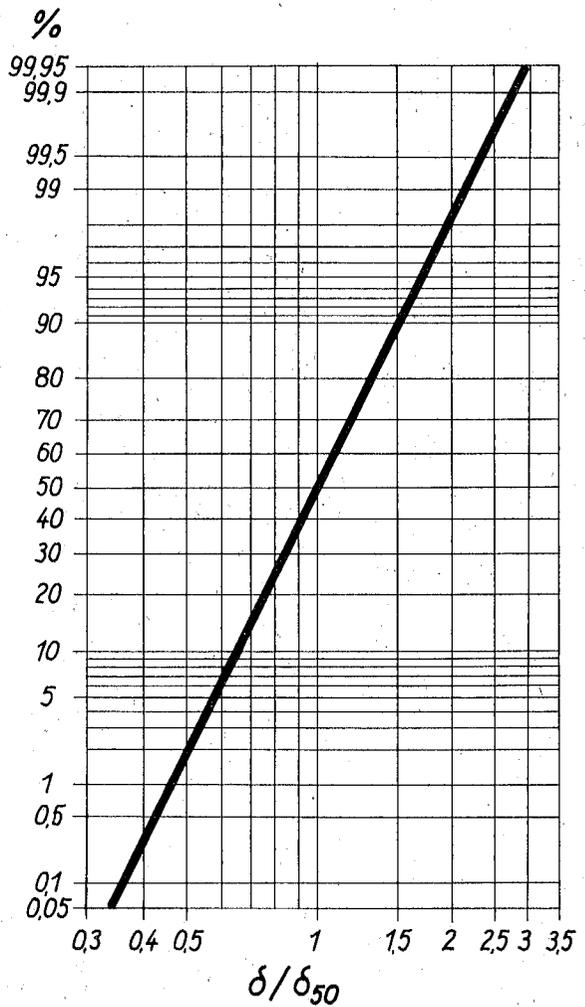
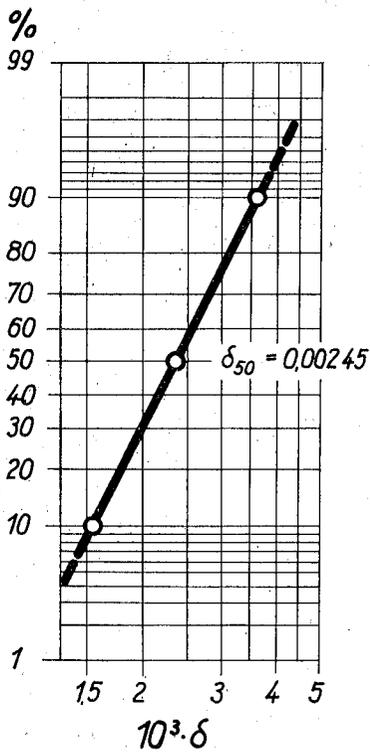


Bild 15

### Einfluß der Dicke des Wasserpolsters $a$ auf die Häufigkeitsverteilung der Druckschläge $\alpha = 90^\circ$ Meßpunkt 4

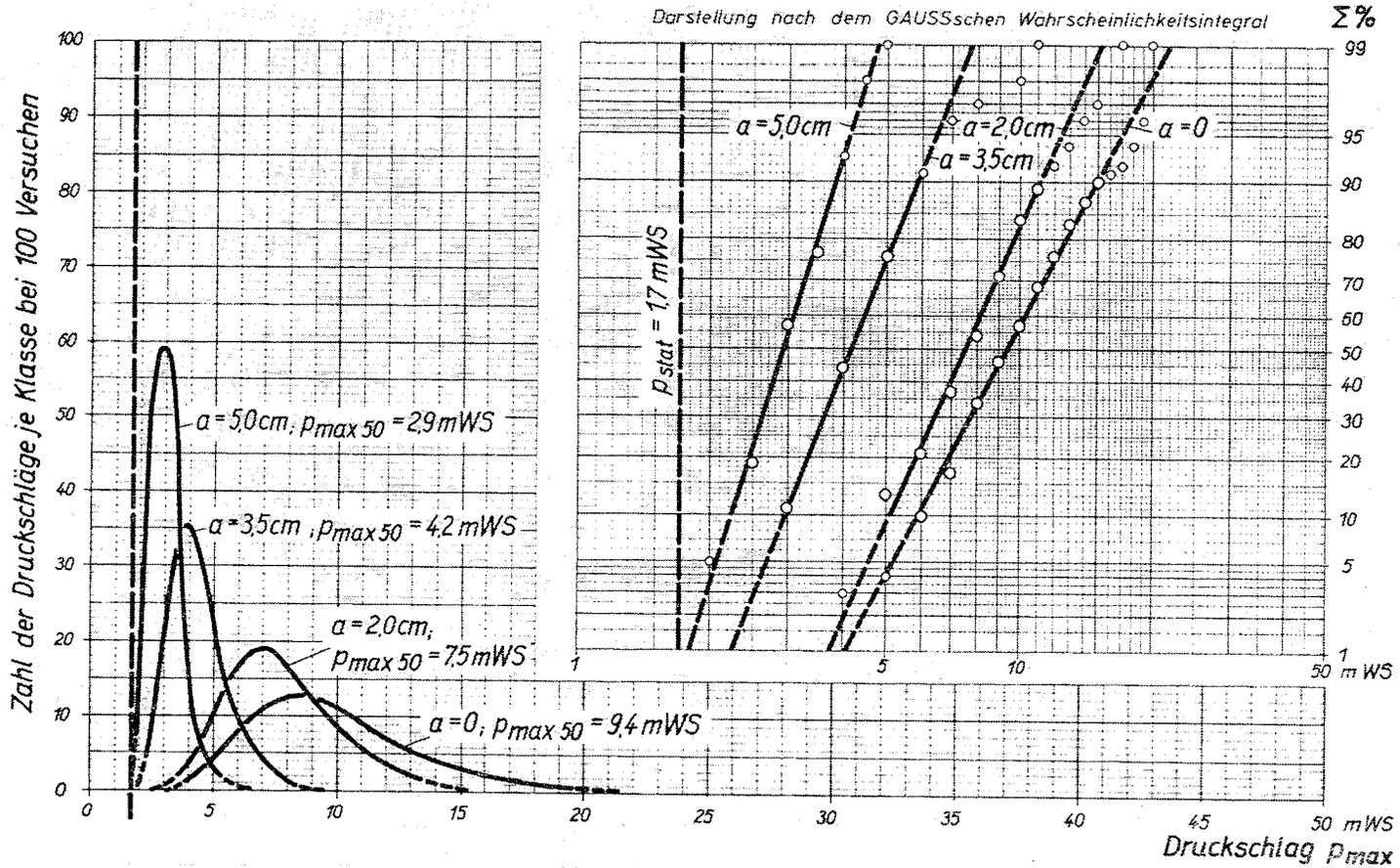


Bild 16

Dies ist damit zu erklären, daß bei dem Aufschlag Wasser-Wasser in der Berührungsfläche eine besonders starke Luftaufnahme stattfindet; dieser Luftanteil ergibt eine wirksame Dämpfung der Druckschlaghöhen [7].

Es geht daraus hervor, daß bei der Belastung von Deichböschungen und Deckwerken die hohen Kräfte durch brechende Wellen vermieden werden, wenn der aufschlagende Brecher auf der Aufschlagstelle noch das Rücklaufwasser der vorhergegangenen Welle vorfindet. Dies ist bei Böschungen, die flacher als 1 : 6 geneigt sind, fast immer der Fall; erst bei Böschungen steiler als 1 : 6 treten Druckschlagbelastungen auf, deren Häufigkeit stark von dem ankommenden Wellenspektrum abhängig ist.

#### Schriftumsverzeichnis

- [1] ALLEN, J.: Scale Models in Hydraulic Engineering, Longmans, Green and Co., London 1947.
- [2] BAGNOLD, R. A.: Interim Report on Wave Pressure Research. Journal of the Institution of Civil Engineers, Vol. 12, 1938/1939.
- [3] BEACH EROSION BOARD: Shore Protection Planning and Design. Technical Report No. 4/1961.
- [4] BRETSCHNEIDER, C. L.: Generation of Wind Waves over a Shallow Bottom. Techn. Mem. Beach Erosion Board. No. 51, 1954.
- [5] CHEN, T. C.: Experimental Study on the Solitary Wave Reflektion along a Straight Sloped Wall at Oblique Angles of Incidence. U.S. Army, Corps of Engineers, Beach Erosion Board. Technical Mem. No. 124.
- [6] DENNY, D. F.: Further Experiments on Waves Pressures. Journal of the Institution of Civil Engineers, Vol. 35, 1951.
- [7] FÜHRBOTER, A.: Der Druckschlag durch Brecher auf Deichböschungen. Heft 28 der Mitteilungen des Franzius-Instituts, Hannover 1966.
- [8] GIENAPP, H.: Vergleich berechneter und gemessener Seegangsgößen von Mellum-Plate. Deutsche Hydrographische Zeitschrift, Heft 2, Jg. 20, 1967.
- [9] JASPER, N. H. und BROOKS, R. L.: Sea Tests of the VSCGC UNIMAK, Part 2, Statistical Presentations of the Motion, Hull Bending Moments, and Slamming. Pressure for Ships of the AVP Type, David Taylor Model Basin Report 977, 1957.
- [10] JOHNSON, J. W.: Deficiencies in Research in Gravity Surface Waves. Council on Wave Research, Engineering Foundation 1961.
- [11] v. KARMAN, Th.: The Impact of Seaplanes during Landing. N.A.C.A. TN 321, 1929.
- [12] LONGUET-HIGGINS, M. S.: On the Statistical Distribution of the Heights of Sea Waves. Journ. Marine Res., 11, No. 3, 1952.
- [13] MINIKIN, R. R.: Wind, Waves and Maritime Structures. Charles Griffin and Company, Limited, London, 1950.
- [14] PERROUD, P. H.: The Solitary Wave Reflection along a straight Vertical Wall at oblique Incident. The techn. Report No. 95, 1957.
- [15] ROUVILLE, M. A., BESSON, P. et PETRY, P.: Etat actual des Etudes Internationales sur les Efforts dus aux Lames. Annales des Ports et Chaussees 1938.
- [16] SIGURDSON and WIEGEL: in: WIEGEL, Oceanographical Engineering Prentice-Hall 1964.
- [17] WEMELSFELDER: in: XIX. Schiffahrtskongreß London, 1957.