

DEUTSCHE AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN ZU BERLIN  
INSTITUT FÜR MEERESKUNDE

# BEITRÄGE ZUR MEERESKUNDE

HERAUSGEGEBEN  
VON  
ERICH BRUNS  
UNTER MITWIRKUNG  
VON  
O. KOLP, G. SAGER, K. VOIGT

Institut für Ostseeforschung  
Warnemünde (IOW)  
Bibliothek  
WA 1

HEFT 17-18

Meeresgrund- und Küstenforschung  
im Bereich der Ostsee

II

Sedimente, Farbsandversuche, Meßverfahren



---

AKADEMIE-VERLAG · BERLIN

1966

E-5/1 (17/18)

DAW  
Institut für Meereskunde  
Warnemünde  
— Bibliothek —

Inst. f. Ostseeforschung-Bibliothek  
Wa1\$ 000 165 514





DEUTSCHE AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN ZU BERLIN  
INSTITUT FÜR MEERESKUNDE

# BEITRÄGE ZUR MEERESKUNDE

HERAUSGEGEBEN

VON

ERICH BRUNS

UNTER MITWIRKUNG

VON

O. KOLP, G. SAGER, K. VOIGT

HEFT 17—18

Meeresgrund- und Küstenforschung  
im Bereich der Ostsee

II

Sedimente, Farbsandversuche, Meßverfahren



---

AKADEMIE-VERLAG · BERLIN

1966

Institut für Meereskunde  
Warnemünde  
- Bibliothek -

Erschienen im Akademie-Verlag GmbH, 108 Berlin, Leipziger Straße 3-4  
Copyright 1966 by Akademie-Verlag GmbH  
Lizenznummer: 202 · 100/548/66  
Kartengenehmigung: Nr. 456, 422, 794/66  
Gesamtherstellung: VEB Druckerei „Thomas Müntzer“, 582 Bad Langensalza  
Bestellnummer: 2105/17-18, ES 18 E 4  
69,30

1966 980

## Inhalt

I. Widmung . . . . .	5
II. Vorwort . . . . .	7
1. KOLP, O.: Die Sedimente der westlichen und südlichen Ostsee und ihre Darstellung . . . . .	9
2. KOLP, O.: Untersuchung der Wirksamkeit von Seebuhnen mit Hilfe von Farbsandversuchen . . . . .	61
3. STRIGGOW, K.: Automatische Zählung lumineszenter Sandkörner. Bekannte Verfahren und ihre Weiterentwicklung im Institut für Meereskunde der DAW . . . . .	91
4. BRAUCKHOFF, K.: Gleichzeitige Markierung von Meeressanden mit lumineszenten und magnetischen Stoffen zur Erleichterung der Probenaufbereitung bei Farbsandversuchen . . . . .	96
5. STRIGGOW, K.: Ein Wellenmesser mit Stufensonde und interner Datenreduzierung . . . . .	100
6. STRIGGOW, K.: Strömungsmessung in der Brandungszone. Aufgabenstellung und Voruntersuchungen zur Lösung eines meßtechnischen Problems der Küstenforschung . . . . .	111



*Wilhelm Alm*

Dem Andenken des Kapitäns *Wilhelm Alm*

## WILHELM ALM

1. 11. 1896 — 7. 8. 1961

WILHELM ALM hatte als Kapitän des Forschungskutters „Magnetologe“ an den während der Jahre 1954 bis 1959 durchgeführten Forschungsarbeiten des Instituts für Meereskunde in Warnemünde hervorragenden Anteil. Seine seemännische Erfahrung und Umsicht kamen vor allem meeresgeologischen Aufnahmen in der westlichen und südlichen Ostsee zugute.

Kapitän ALM war Vorbild für eine große Zahl jüngerer Menschen, die er zu tüchtigen Seeleuten erzog. Bei aller schweren Arbeit behielten der Humor und die Gutmütigkeit des welt erfahrenen Seemanns, der auf gut Wetter und sein Glück vertraute, stets die Oberhand.

Jahre erfolgreicher Zusammenarbeit lassen die wissenschaftlichen Mitarbeiter des Instituts für Meereskunde dieses Fischländer Kapitäns, dessen seemännische Laufbahn noch auf Segelschiffen begonnen hatte, in Dankbarkeit gedenken.

WILHELM ALM wurde am 1. November 1896 in Dierhagen geboren. Seine erste Reise als Decksjunge auf dem Dampfer „Friedrich Carow“ führte ihn gleich 9 Monate von Hause fort. Weitere 16 Monate war er als Leichtmatrose auf dem Vollschiff „Olona“ und 18 Monate als Matrose auf der Viermastbark „Dalbeck“ gemustert. Der Ausbruch des ersten Weltkrieges ließ ihn die Fahrt unterbrechen. In die Heimat zurückgekehrt, besuchte WILHELM ALM die Seefahrtsschule in Wustrow und bestand 1923 das Examen als Steuermann auf große Fahrt. Nach 2jähriger Fahrtzeit als II. Offizier und nochmaligem Schulbesuch erhielt er das Patent als Schiffer auf große Fahrt. Auf weiteren Reisen fuhr er als II. und I. Offizier auf Hamburger Schiffen. Dann erfolgte die Anstellung als Kapitän bei der Rostocker Reederei August Cords.

Nach dem zweiten Weltkriege fuhr Kapitän ALM auf Schiffen des Wasserstraßenamtes Stralsund und des Seehydrographischen Dienstes. Die letzten 6 Jahre war er Kapitän des Forschungskutters „Magnetologe“. Als solcher bleibt er uns unvergessen.

Ein schweres Leiden ließ ihn 1960 von der Seefahrt Abschied nehmen.

OTTO KOLP

## Vorwort

Bei dem vorliegenden Heft 17/18 der Beiträge zur Meereskunde handelt es sich um den 2. Band mit Beiträgen zur Meeresgrund- und Küstenforschung im Bereich der Ostsee. Diese Bände werden ihre Fortsetzung finden. Es wird demnächst von einzelnen bemerkenswerten Stechrohrproben und neuen paläogeographischen Ergebnissen aus der westlichen und südlichen Ostsee, Untersuchungen der Beziehung zwischen Sediment und benthonischer Lebewelt, von der Erprobung eines neuen, 9 m langen Vibrationsstechrohrs sowie von jüngsten Ergebnissen der Küstenforschung und von umfangreichen Farbsandversuchen zu berichten sein.

Die Autoren dieses Heftes sind:

- Geol.-Ing. K. BRAUCKHOFF, Wasserwirtschaftsdirektion Stralsund, Abt. Küstenschutz Warnemünde;  
Dr. habil. O. KOLP, Institut für Meereskunde Warnemünde der Dtsch. Akad. d. Wiss. zu Berlin, Abt. Meeresgeologie und Küstenforschung;  
Dipl.-Physiker K. STRIGGOW, Institut für Meereskunde Warnemünde, wiss. Mitarbeiter der Abt. Meeresgeologie und Küstenforschung.

In den Abhandlungen werden Probleme der Seegrundkartierung in Schelfmeeren und der Küstenforschung aufgegriffen, die von allgemeiner Bedeutung sind und seit langem einer Lösung harren.

Die Darstellung und systematische Zusammenfassung der Sedimente der westlichen und südlichen Ostsee in faziellen Gruppen wurde bereits 1962 abgeschlossen. Die Darstellung der Korngemische mit Hilfe mehrfarbiger Schraffuren auf Tafel I bewährte sich bei der Herstellung neuer Meeresgrundkarten.

Die Untersuchung der Wirksamkeit von Seebuhnen mit Hilfe verschiedenfarbiger, lumineszenter Sande gilt einer seit 100 Jahren ungelösten Frage des Küstenschutzes. Es wird damit ein neues Beispiel für die erfolgreiche Verwendung lumineszenter Farbstoffe bei der Untersuchung der Sedimentumlagerung in der ufernahen Zone vor Augen geführt. Erstmals können auf Grund der nach mehrmonatigen vorbereitenden Aufnahmen des submarinen Reliefs, der Sedimentverteilung und des Strömungsfeldes durchgeführten Farbsandversuche gut begründete Aussagen über die Funktion und Wirksamkeit dicht geschlagener, einreihiger Pfahlbuhnen gemacht werden. Dieser erste Bericht über eine noch weiter zu führende mehrjährige Reihe von Farbsandversuchen soll dazu beitragen, daß die dringend erforderlichen Untersuchungen von Seebuhnen in den kommenden Jahren intensiviert werden und daß die Zahl derartiger Farbsandversuche auch in anderen Ländern rasch anwachsen möge.

Zwei kürzere Abhandlungen von K. BRAUCKHOFF und K. STRIGGOW enthalten Hinweise zur Vereinfachung der Analyse von Farbsandproben. Der Vorschlag von K. BRAUCKHOFF, Meeresande gleichzeitig mit lumineszenten und magnetischen Stoffen zu markieren, um vor der Auszählung der verschiedenen Farbsandkörner eine Anreicherung mit Hilfe eines Magnetscheiders vorzunehmen, führt bei visueller Untersuchung der Proben zu einer Erleichterung und Zeit-

ersparnis. Die Ausführungen zur automatischen Zählung lumineszenter Sandkörner von K. STRIGGOW sollen zur Beseitigung der Mängel bisher bekannter Verfahren beitragen.

In zwei weiteren Referaten berichtet K. STRIGGOW über einen Wellenmesser mit Stufensonde und interner Datenreduzierung, der im Rahmen der schon erwähnten Untersuchung von Seebuhnen erprobt wurde und zur Zeit auf Grund der bisher gewonnenen praktischen Erfahrungen überarbeitet wird, sowie über theoretische Voruntersuchungen von Strömungsmeßverfahren, welche für die Brandungszone geeignet sind.

Anläßlich des Berichtes über die in den Jahren 1963—1965 durchgeführten Farbsandversuche muß die verdienstvolle Mitwirkung des Seevermessungsingenieurs G. REBENTROST dankbar anerkannt werden. Besonderer Dank gebührt ferner dem Kartographen H.-E. MULSOW für die sorgfältige Herstellung der zum Teil mehrfarbigen Tafeln und Karten dieses Heftes.

Warnemünde 1966

OTTO KOLP

# Die Sedimente der westlichen und südlichen Ostsee und ihre Darstellung<sup>1)</sup>

Von OTTO KOLP

## Gliederung

Einführung . . . . .	11
A. Probleme der Darstellung von Sedimenten . . . . .	12
1. Gedanken zum Entwurf neuer Meeresgrundkarten . . . . .	12
2. Unterscheidung von Fraktions- und Sedimentbezeichnungen . . . . .	15
3. Darstellung von Korngemischen . . . . .	16
4. Verwendung von Farben, Symbolen und Abkürzungen . . . . .	21
B. Sedimente der westlichen und südlichen Ostsee . . . . .	22
1. Rezente organogene und klastische Sedimente . . . . .	22
a) Schlick, Schlamm und der Begriff „Mudd“ . . . . .	22
b) Übergänge zwischen Schlick und Sand . . . . .	26
c) Klastische Sedimente und der Begriff „Restsediment“ . . . . .	30
d) Besondere Korngemische beim unvermittelten Übergang vom gröberen Sediment zu Schlick am Rande von Abrasionsplatten . . . . .	33
2. Sedimente des Untergrundes . . . . .	33
a) Geschiebemergel . . . . .	33
b) Schluff . . . . .	34
c) Ton . . . . .	35
d) Litoriner Schlick oder Cardium-Klei . . . . .	37
e) Torf . . . . .	38
f) Steinlagen unter einer Sanddecke . . . . .	39
3. Durch den Untergrund bedingte Korngemische . . . . .	39
C. Sedimentzonen und fazielle Gruppierungen . . . . .	40
1. Der Zusammenhang zwischen der zonalen Anordnung der Sedimente und der Wellenwirkung am Meeresgrund . . . . .	40
2. Übersicht über Sedimentzonen und rezente Fazies . . . . .	42
3. Die Verschiebung der Grenze zwischen Kurz- und Langschweb beim Wechsel vom limnischen zum brackisch-marinen Milieu . . . . .	44
D. Zusammenfassung . . . . .	45
E. Anhang . . . . .	47
Analysen von Sedimenten aus Stechrohrkernen	
a) Analysen von 2 Schlickkernen:	
Tab. 6 Schlickkern FS 1 vom Westrande der Mecklenburger Bucht . . . . .	48
Tab. 7 Schlickkern MB 9 aus dem zentralen Teil der Mecklenburger Bucht . . . . .	49
b) Analysen von 2 Schluffkernen:	
Tab. 8 Schluffkern MB 2 vom Ostrand der Mecklenburger Bucht . . . . .	
Tab. 9 Schluffkern MB 12 aus der Nordostecke der Mecklenburger Bucht. Beispiel für Sedimente, mit denen ein Schmelzwassertal aufgefüllt wurde . . . . .	50 52

<sup>1)</sup> In Auszügen als Plenarvortrag gehalten unter dem Titel „Rezente Fazies der Ostsee“ auf der X. Jahrestagung der Geologischen Gesellschaft der DDR in Leipzig 1963.



c) Analysen eines Stechrohrkernes mit vollständiger Schichtfolge aus dem zentralen Teil der Mecklenburger Bucht: . . . . .	
Tab. 10 Stechrohrkern MB 6a . . . . .	54
d) Analysen eines Stechrohrkernes mit rosa Ton aus dem Arkona Becken: . . . . .	
Tab. 11 Stechrohrkern AB 26a . . . . .	56
e) Tab. 12 Sedimente aus den tiefen Mulden der mittleren Ostsee . . . . .	57
F. <i>Literatur</i> . . . . .	58

## Einführung

Biologische, sedimentologische, paläogeographische sowie ozeanographische Forschungen machen es erforderlich, daß insbesondere für Flachmeergebiete neue Meeresgrundkarten entworfen werden, die vielfältigen wissenschaftlichen Zwecken gleichzeitig dienen möchten.

Das betrifft eine verfeinerte Darstellung der Sedimentzonen als Grundlage einer Neuaufnahme der benthonischen Lebensgemeinschaften und ihrer Zuordnung zu den Sedimentzonen des Meeresgrundes.

In Meeresgrundkarten der westlichen und südlichen Ostsee möchten ferner Einzelheiten der erst in geologisch jüngster Zeit im Meere untergegangenen Glaziallandschaft unmittelbar Ausdruck finden. Dieses Ziel läßt sich vor allem durch eine sorgfältige Aufnahme der Block- und Steinvorkommen im Bereich untermeerischer Fortsetzungen von Moränenzügen und durch die Darstellung des stellenweise an der Oberfläche des Meeresgrundes oder unter einer nur geringmächtigen Sedimentdecke anstehenden Geschiebemergels erreichen.

Die Wiedergabe auch der Sedimente des Untergrundes in neuen Meeresgrundkarten erweist sich für pläogeographische und stratigraphische Untersuchungen als besonders nützlich.

In Rücksicht auf die verschiedenen Zielsetzungen wurden die Sedimente der westlichen und südlichen Ostsee zu einem geschlossenen System zusammengefaßt, welches eine unzweideutige Ansprache aller vorkommenden marinen Sedimente mit Hilfe einer möglichst geringen Anzahl von Analysen zuläßt. Die auf genauen Prozentangaben der Kornfraktionen beruhenden Definitionen stützen sich auf die Untersuchung von etwa 6000 Oberflächenproben aus der westlichen und südlichen Ostsee. Eindeutige Unterscheidungen konnten ferner an Hand der Feuchte, des Calciumcarbonat-Anteils und der organischen Substanz getroffen werden. Außerdem wurden die morphologischen Merkmale der frischen Sedimentproben berücksichtigt.

Die beigegefügte mehrfarbige Tafel der Sedimente der westlichen und südlichen Ostsee kann für die gesamte Ostsee gelten, wenn dieselbe noch um den Schlamm mit Ton als Hauptfraktion  $< 0,002$  mm, Feuchte  $> 70\%$ , Calciumcarbonat  $< 1\%$  und organischer Substanz  $< 10\%$  erweitert wird. Die Abstufungen für Schlamm möchten analog denjenigen für Schlick erfolgen. Schlamm wurde nur in den tiefsten Mulden der Ostsee, z. B. im Landsort-Tief in 450 bis 460 m Tiefe, angetroffen.

Die mehrfarbige Tafel der Sedimente läßt eine neue Art der Darstellung des Korngemisches erkennen, die es erlaubt, die allmähliche Verschiebung der Hauptfraktion zu verfolgen und die fließenden Übergänge zwischen den Korngemischen zu veranschaulichen. Diskontinuitäten in der Abfolge der Sedimente treten bei dieser Darstellungsweise deutlich hervor und weisen auf genetische oder morphologische Besonderheiten hin.

Eine geschickte Wahl der Farben für die verschiedenen Sedimente dient der plastischen Wiedergabe des submarinen Reliefs in neuen Meeresgrundkarten. Es kommen dadurch ferner die Sedimentzonen deutlich zum Ausdruck. Auch der Einfluß des Untergrundes bei der Bildung rezenter Sedimente in Gestalt toniger oder schluffiger Beimengungen geht in die farbige Darstellung ein, während der Untergrund selbst durch verschiedene einfarbige Schraf-

furen und Signaturen angedeutet werden kann, ohne daß die Übersichtlichkeit des Gesamtbildes leidet.

Das neue System und die neue Darstellungsweise haben sich bereits bewährt. Es handelt sich um ein System, daß nicht zuletzt ozeanographischen Zwecken dient und das den Einfluß hydrographischer Faktoren auf die Verteilung der Sedimente erkennen lassen soll. Aus diesem Grunde konnte das auf dem Festlande für geologische und sedimentologische Aufnahmen verwendete System nicht einfach für die Kartierung des Meeresgrundes übernommen werden.

Die Ausführungen über die neuartige Darstellung des Korngemisches wurden der im zweiten Teil folgenden Beschreibung und Definition der Sedimente vorangestellt, um dem Leser das in der farbigen Tafel 1 veranschaulichte System von vornherein verständlich zu machen und damit die Lesbarkeit dieser Arbeit zu erleichtern.

Anläßlich der im dritten Teil getroffenen faziellen Unterscheidungen nach der Transportart, Sortiertheit und Textur der Sedimente sowie den benthonischen Biocoenosen ist zu bemerken, daß es sich bei der Ostsee um ein gezeitenloses, flaches Nebenmeer handelt, dessen mittlere Tiefe weniger als 50 m beträgt. Tideströmungen besitzen hier keine Bedeutung. Wellenwirkung und windbedingte Strömungen üben entscheidenden Einfluß auf die Sedimentverteilung aus.

Sedimentpetrographisch ist es von Belang, daß das Untersuchungsgebiet innerhalb der Moränen der nordeuropäischen Vereisung gelegen ist und daß Geschiebemergel im Untergrund überwiegt.

#### A. Probleme der Darstellung von Sedimenten

##### 1. Gedanken zum Entwurf neuer Meeresgrundkarten

Die Anwendung neuer Methoden bei der Untersuchung des Meeresgrundes führt zu einer zunehmend verfeinerten Darstellung desselben. Der Einsatz von Tauchern, Probenentnahmen mit Vibrationsstechrohren, Sondierungen mit Spülrohren sowie Erkundungen mit Echoloten lassen ein hochwertiges Proben- und Beobachtungsmaterial einbringen, dessen vielseitige Auswertung neuartigen Meeresgrundkarten einen abwechslungsreichen Inhalt verleiht.

Die feinere Darstellung des Korngemisches führt zur Veranschaulichung der von PRATJE (1948) gekennzeichneten Sedimentzonen. Darüber hinaus lassen die zu beobachtenden fließenden Übergänge zwischen gröberen und feineren Korngemischen den Einschub weiterer Zonen mit Hilfe zusätzlicher Symbole notwendig erscheinen, so daß die allmähliche Verschiebung der Hauptfraktion nach dem Bereich der stärksten Nachbarfraktion nachgewiesen werden kann.

Durch den Einschub von je 2 Zwischenstufen zwischen benachbarte Fraktionen läßt sich ein eindrucksvolles Bild gewinnen, das den nachdrücklichen Hinweis auf die Vorgänge der Abrasion, des Transports und der Entmischung der Kornarten durch die weitflächige Wellenwirkung am Meeresgrund enthält.

Die ununterbrochene Abfolge der Korngemische ist beim Übergang vom Sand- zum Schlickgebiet am deutlichsten zu erkennen. Z. B. ist zwischen dem Sandgebiet nördlich von Warnemünde und dem Schlickgebiet der Mecklenburger Bucht die lückenlose Reihe vom Mittelsand zum Mittelschlick: m, m/f, f/m, f, f sk, GSk f, GSk, G/MSk, M/GSk/MSk zu verfolgen. Diskontinuitäten lassen auf Tiefensprünge schließen und umgekehrt.

Im flacheren Seegebiet sind im Bereich von Schwellen, Bänken und Gründen gesetzmäßige Beziehungen zwischen der Sedimentverteilung und dem untermeerischen Relief zu erkennen. Im Bereich enger begrenzter Formen liegt das gröbere Korn höher und das feinere Korn tiefer. Der ursächliche Zusammenhang ist in der mit der Wassertiefe abnehmenden Kraft der Wellen am Meeresgrund zu suchen.

Ein umgekehrtes Verhältnis lenkt die Aufmerksamkeit auf das Sediment. Z. B. gilt es positive Formen mit feinkörniger Bedeckung, die sich im Vergleich zum Sediment der Umgebung in zu hoher Lage befindet, besonders zu beachten. Es kann sich um verebnete Dünen aus prätoriner aber auch späterer Zeit handeln, sofern dieselben im Niveau bekannter Uferterrassen gelegen sind. Der Widerspruch zur Grundregel, daß das gröbere Korn zuoberst gefunden wird, weist darauf hin, daß wahrscheinlich die ganze Erhebung aus feinkörnigem Material aufgebaut ist.

In ausgedehnten Sandgebieten bietet sich die Möglichkeit, das submarine Relief mit Hilfe von Isolinien aus der Kornverteilung abzuleiten. Es braucht nur der Quotient

$$Q = \frac{\text{Summe der Gewichtsanteile der groben und mittleren Fraktionen}}{\text{Summe der Gewichtsanteile der feinkörnigen Fraktionen}}$$

gebildet zu werden. Die an Hand der Verhältniswerte gezogenen Isolinien laufen den Isobathen weitgehend parallel. Als Beispiel kann die vom Verfasser für das Seegebiet Darßer Ort — Hiddensee entworfene Meeresgrundkarte mit den auf Grund der Kornverteilung gezogenen Isolinien angeführt werden (KOLP 1956).

Nach dem Vorangegangenen scheint es verständlich, daß sich die Großgliederung der in der westlichen und südlichen Ostsee untergegangenen Glaziallandschaft mitbestimmend auf die Anordnung der Sedimente auswirkte und daß das Bild der Sedimentverteilung glaziäre Einzelformen bis auf den heutigen Tag widerspiegelt.

Eine Rekonstruktion der Formen der einstigen Glaziallandschaft am Meeresgrund erfordert eine besonders sorgfältige Bearbeitung der Kies-, Stein- und Blockvorkommen. Im Bereich von Endmoränen weist das gröbste Sediment auf die Kerbspuren zwischen den Loben hin (Abb. 1). Nach der Lobenstirn erfolgt eine stete Abnahme des Kornes. Das feinste Sediment ist im Zentrum der hinter der Lobenstirn gelegenen Mulde zu suchen. Im rückwärtigen Teil der Mulde sowie in den Kerben tritt Geschiebemergel an die Oberfläche. Während die Kerb-

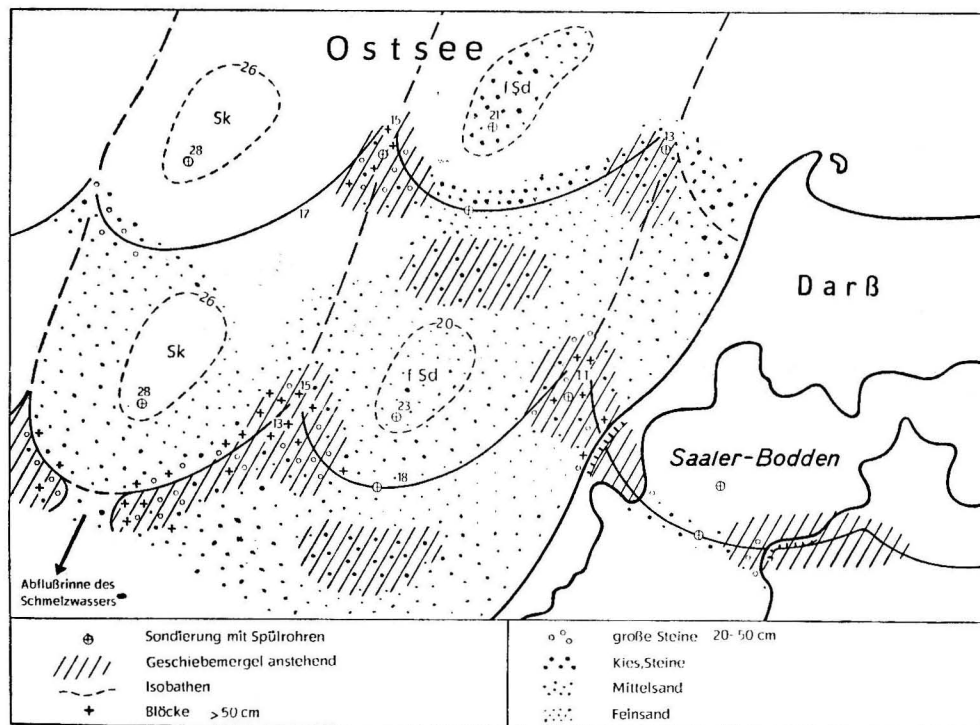


Abb. 1. Schematische Darstellung der submarinen Steinvorkommen und Sedimente im Bereich der Velgaster Staffel

spuren höher aufragen, fallen die Lobenränder jeweils nach der Lobenstirn hin ab, wie die Tiefenzahlen erkennen lassen.

Die wellen- und strömungsbedingten rezenten Formen beschränken sich auf nur geringe Flächen des Meeresgrundes. Bei den positiven Formen handelt es sich um flache Sandkerne inmitten von Strömungswalzen hinter Landvorsprüngen, die durch die einschwenkenden Wellen und umlaufende Strömung eingeschliffen werden und in deren Bereich das Echogramm Großrippeln erkennen läßt (Abb. 2). Ferner kommen Sandbarren vor Mündungen und flache Schwellen vor den Ausgängen untermeerischer Rinnen in Frage.

Die negativen Formen erscheinen als Auskolkungen vor untermeerischen Spornen oder als ganz flache Mulden, die den Verlauf von Strömungsbändern über dem Meeresgrund erkennen lassen und in stark überhöhten Echogrammen abgebildet werden (Abb. 3).

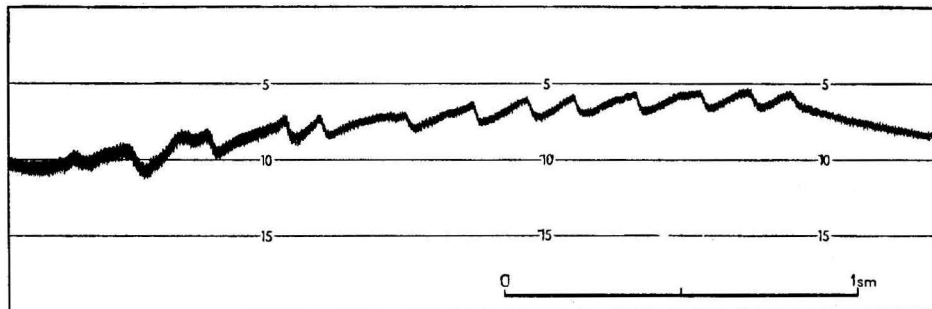


Abb. 2. Großrippeln auf einer Sandbank. Das Aufwandern erfolgt in Richtung der fortschreitenden Wellen, im Bilde von links nach rechts. Tiefenangaben in m, Längen in cm

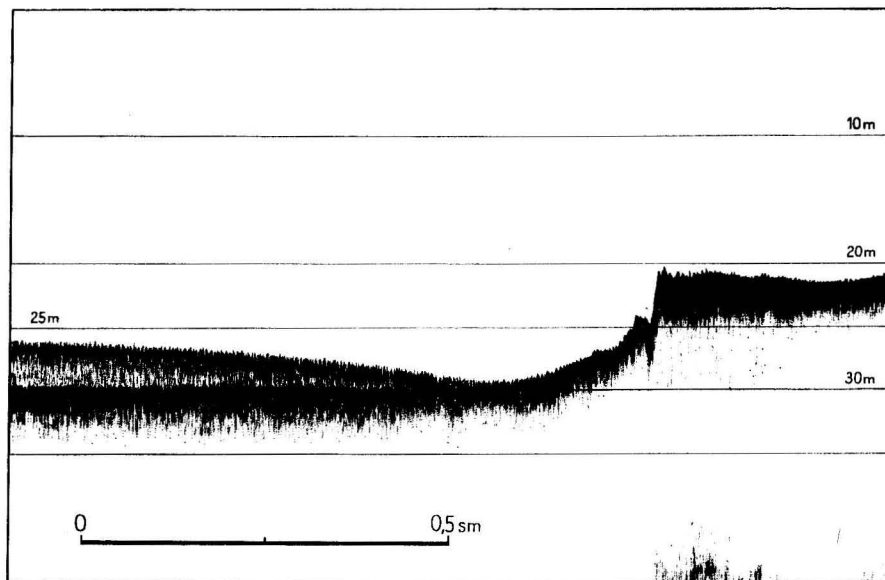


Abb. 3. Flache Strömungsmulde im Schlief vor der Kante einer Abrasionsplatte am Südrande der Mecklenburger Bucht

Im Bilde links sind ein jüngerer Schliefhorizont und darunter ein weicher, präitoriner Horizont zu erkennen. Die Doppelzeichnung im Bilde rechts weist auf Geschiebemergel. Tiefenangaben in m, Längen in cm

Die Freilegung älterer Sedimente am Meeresgrund, die zum Teil unter einer meterstarken Deckschicht liegen, ist mit Hilfe von Strahlrohren möglich. Schluffe und Tone des Unter-

grundes lassen eine andere Kornverteilung als die rezenten marinen Sedimente erkennen und deshalb auf andersartige Sedimentationsbedingungen in früheren Gewässern geringerer Halinität schließen.

## 2. Unterscheidung von Fraktions- und Sedimentbezeichnungen

Die Herstellung der Legende einer Meeresgrundkarte hat eine deutliche Unterscheidung von Korngrößenklassen und Sedimenten zur Voraussetzung (Tab. 1).

TABELLE 1  
Meeresbodenarten und Sedimente  
der westlichen und südlichen Ostsee

Atterberggrad $\eta$	Korngrößen mm	Korngrößenklassen	Marine Sedimente	Abk. zgn.	Einzelkorn	Zonen und Gebiete am Meeresgrund
-3	6300 - 2000	Blockfraktion	Blockfeld	Blf.	großer Block	Abrasions-  Zone
	2000 - 1000				mittlerer Block	
	1000 - 630				kleiner Block	
-2	630 - 200	Brockfraktion	Steinpflaster	St. pfl.	großer Stein	
	200 - 63				mittlerer Stein	
-1	63 - 20	Grob-	Grob-	GK	kleiner Stein	
	20 - 6,3	Mittel- Kies	Mittel- Kies	MK	1-6 cm	
0	6,3 - 2,0	Fein-	Fein-	FK		Feinkies- Grobsand- Gürtel
+1	2,0 - 1,0	sehr grober-	sehr grober-	ggb		Durchfrach- lungszone
	1,0 - 0,63	grober-	grober-	gb		
	0,63 - 0,2	mittlerer- Sand	mittlerer- Sand	m		Küstenferne Sandanhäu- fungszone
	0,2 - 0,1	feiner-	feiner-	f		(Kurzsweb)
+2	0,1 - 0,063	sehr feiner	sehr feiner-	ff		
	0,063 - 0,02	Grob-	Grob-	GSk		Schlick- gebiete
	0,02 - 0,0063	Mittel- Schluff	Mittel- Schlick	MSk		(Langsweb)
+3	0,0063 - 0,002	Fein-	Fein-	FSk		
	0,002 - 0,00063	Grob-	Grob-	GSm		Schlamm- gebiete
	0,00063 - 0,0002	Mittel- Ton	Mittel- Schlamm	MSm		(Langsweb)
+4	0,0002 - 0,000063	Fein-	Fein-	FSm		

Der Fraktionsbezeichnung, welche die Größe des Einzelkorns betrifft, steht die Sedimentbezeichnung gegenüber, die eine mehr oder weniger homogene Masse von Individuen umfaßt und die zugleich weitere Hinweise auf die Genese, Bindigkeit und Härte des Sediments enthält.



Ton und Schluff können als Fraktionsbezeichnungen für den marinen Bereich ohne Gefahr einer Doppelsinnigkeit verwendet werden, da Ton und Schluff niemals als marine Sedimente im Untersuchungsbereich in Frage kommen.

Bei Tonen und Schluffen als Sedimenten des Untergrundes handelt es sich um limnische und limnisch-brackische Absätze, die unter den rezenten marinen Sedimenten des neritischen Bereichs kein Äquivalent besitzen.

Die Hauptanteile von Schlick und Schlamm liegen zwar in der Schluff- und Tonfraktion. Es handelt sich jedoch bei Schlick und Schlamm um Sedimente mit organogenem Anteil, denen als limnische Bildungen nur Gyttja-Schluff und Gyttja-Ton gegenübergestellt werden können (s. Tab. 4, S. 25).

Bei Sand und Kies ist seit alters her eine Zweideutigkeit gegeben. Es kann im Gegensatz zu den Sedimenten von der Sandfraktion und Kiesfraktion gesprochen werden.

Die Bezeichnungen Blockfeld und Steinpflaster sollen auf dichte Stein- und Blockpackungen hinweisen. Für die entsprechenden Korngrößenklassen wurden die von NIGGLI eingeführten Bezeichnungen Brockfraktion und Blockfraktion übernommen.

Bei der Abgrenzung der Korngrößenbereiche wurde die ATTERBERG-Skala zugrunde gelegt, die die Darstellung von Korngemischen in einer leicht lesbaren Summenkurve gestattet.

Ton, Schluff, Sand und Kies umfassen je 1,5 ATTERBERG-Grade, während die Intervalle der Brock- und Blockfraktion jeweils nur einem Grad entsprechen.

Innerhalb der Hauptfraktionen werden bei Sand 5 Unterfraktionen und bei Kies 3 Unterfraktionen unterschieden, während auf eine Unterteilung der Brock- und Blockfraktion verzichtet wird.

In den Bereichen von Schluff und Ton wird ebenfalls eine Dreiteilung vorgenommen. Die Unterfraktionen Grob-, Mittel- und Feinschluff ermöglichen die Unterscheidung von Grob-, Mittel- und Feinschlack, und ebenso erfolgt die Kennzeichnung von Schlamm verschiedener Körnigkeit mit Hilfe der Unterfraktionen Grob-, Mittel- und Feinton.

Bei der Unterscheidung einzelner Steine kommt es zu einer Überschneidung. Während es sich bei Individuen aus der Masse von Mittelkies nach dem Sprachgebrauch um „kleine Steine“ handelt, werden Individuen von Grobkies sowie eines Steinpflasters als mittlere und große Steine angesprochen. Der Bereich einzelner Steine umfaßt außer Mittel- und Grobkies noch die Brockfraktion und somit insgesamt 2 ATTERBERG-Grade.

### 3. Darstellung von Korngemischen

Die Hauptschwierigkeit beim Entwurf einer neuen Meeresgrundkarte besteht in der flächenhaften Darstellung der Korngemische. Es gilt für jeden Punkt auf der Karte eine annähernde Vorstellung von dem Korngemisch zu erwecken, ohne daß der Gesamtüberblick über die Verteilung der Sedimente und ihre zonale Anordnung beeinträchtigt wird.

Bevor die eigene Lösung mitgeteilt wird, möchte an Hand verschiedener Beispiele ein kurzer Rückblick auf frühere Darstellungsweisen von Korngemischen geworfen werden. Als Beispiele werden die Karte des Golfs von Pozzuoli nach G. MÜLLER (1958), die Karte des Greifswalder Boddens von GROBA und LUDWIG (1956), die Seegrundkarte der Schleimündung und der Flensburger Außenförde von HINTZ (1955 und 1956) sowie die Meeresgrundkarte des Seegebietes um Fehmarn von BRESSAU (1957) angeführt.

MÜLLER benutzte zur Darstellung des Korngemisches noch das althergebrachte Säulendiagramm. Er verlieh damit der Kornzusammensetzung an einzelnen Stationen Ausdruck (Abb. 4). Die prozentualen Anteile der einzelnen Fraktionen können als Ordinaten gemessen und mit Hilfe einer Strichteilung abgelesen werden.

Bei GROBA und LUDWIG wurde das Korngemisch durch Sektoren kleiner Kreisflächen dargestellt (Abb. 5). Die prozentualen Anteile der Fraktionen lassen sich an Hand der verschieden

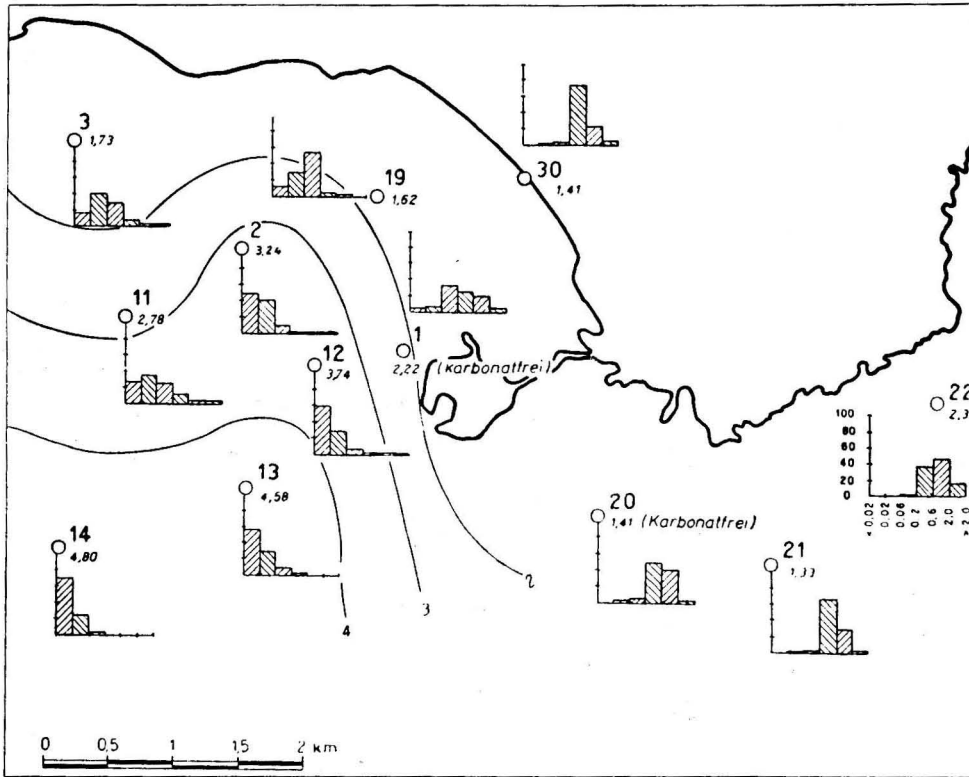


Abb. 4. Ausschnitt der Darstellung von Kornmischen mariner Sedimente im Golf von Neapel nach G. MÜLLER 1958

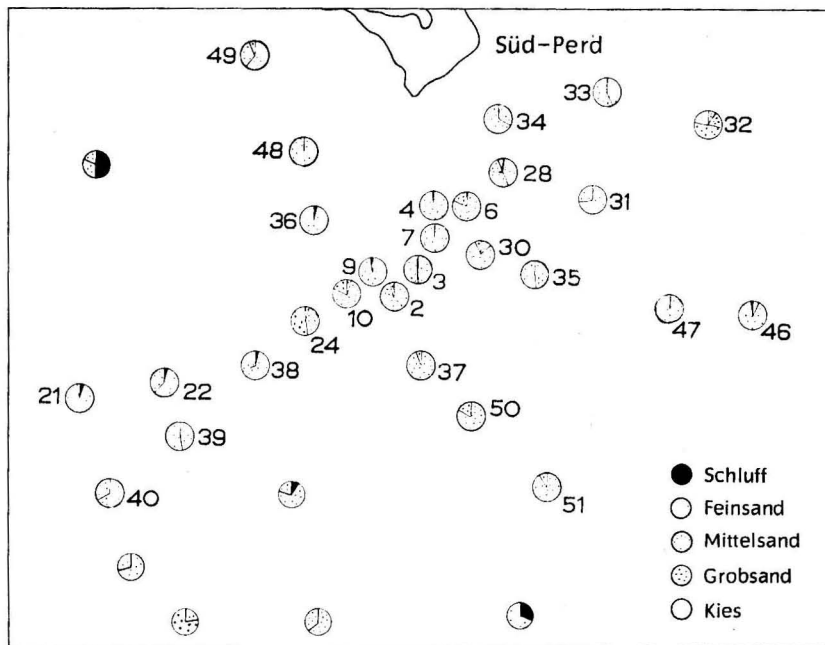


Abb. 5. Ausschnitt der Darstellung von Kornmischen mariner Sedimente südöstlich der Insel Rügen nach GROBA und LUDWIG 1956



großen Kreissektoren nur abschätzen. Die zwar genaue Darstellung nützt wenig ohne Angabe der Verhältniszahlen. Bei beiden Darstellungsarten verschwimmt das Gesamtbild im Falle einer Verdichtung des Stationsnetzes. Der Übergang von der punktförmigen zur flächenhaften Darstellung des Korngemisches ist auf diese Weise nicht möglich.

Der erste Vorschlag von HINTZ sieht verschiedene Signaturen für die einzelnen Fraktionen vor, die in einem Quadrat zusammengefaßt, das Korngemisch an einer Station erkennen lassen (Abb. 6). Die Anteile der Fraktionen werden in grober Annäherung in Vierteln des Gesamtquadrates angegeben. Auch diese Darstellung führt bei einem engmaschigeren Stationsnetz zur Unübersichtlichkeit.

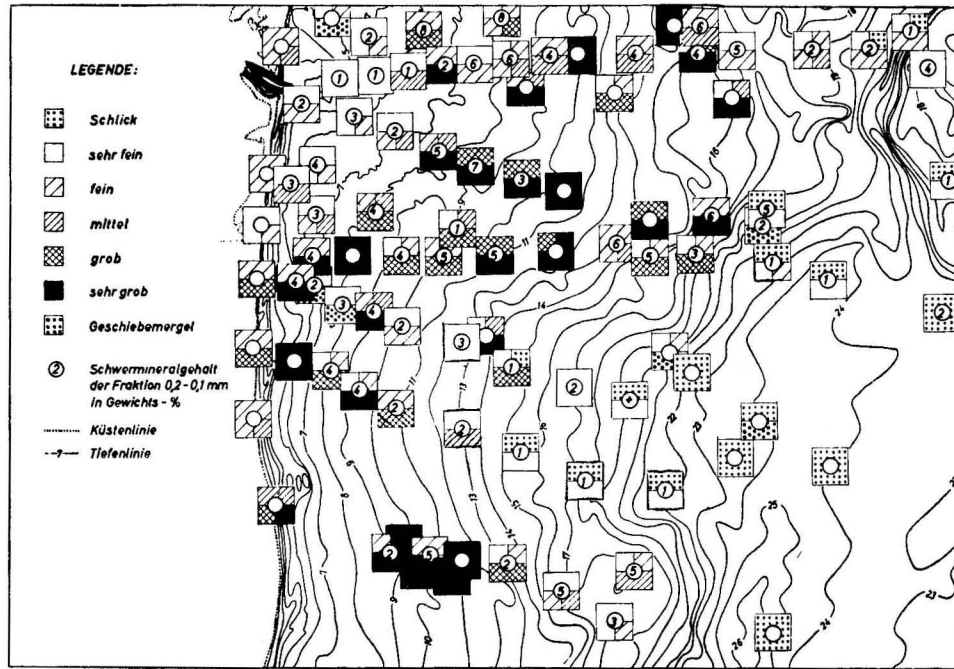


Abb. 6. Ausschnitt der Darstellung von Korngemischen mariner Sedimente vor der Schleimündung nach HINTZ 1955

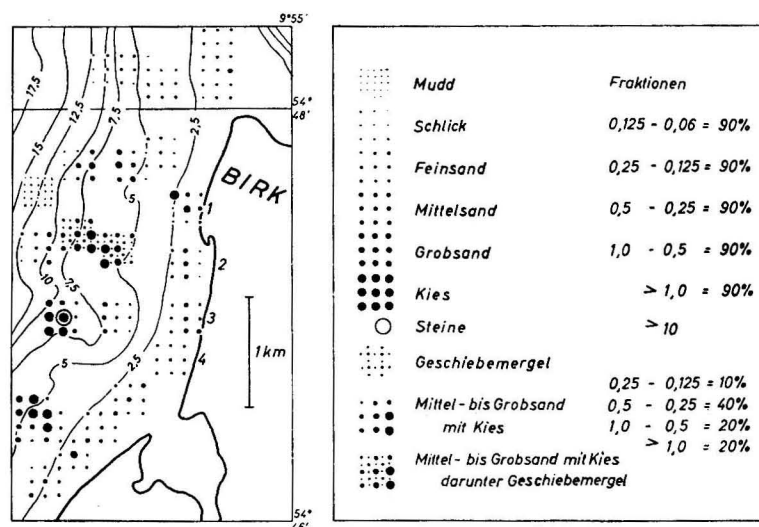


Abb. 7. Darstellung der Korngemische mariner Sedimente nach HINTZ 1956

Der zweite Entwurf von HINTZ enthält eine Punktsignatur für die einzelnen Korngrößenklassen (Abb. 7). Jeder Fraktion wird eine kleine schwarze Kreisfläche (Punkt) mit bestimmtem Durchmesser zugeordnet. Die Darstellung des Korngemisches erfolgt mit Hilfe von 9 Punkten, die in einem Quadrat angeordnet sind. Jeder Punkt entspricht einem Gewichtsanteil von 10% der Gesamtprobe. Um 100% zu erreichen, sind der schwächste und der stärkste Punkt jeweils mit 15% zu bewerten. Steine werden durch Kreislinien dargestellt und der

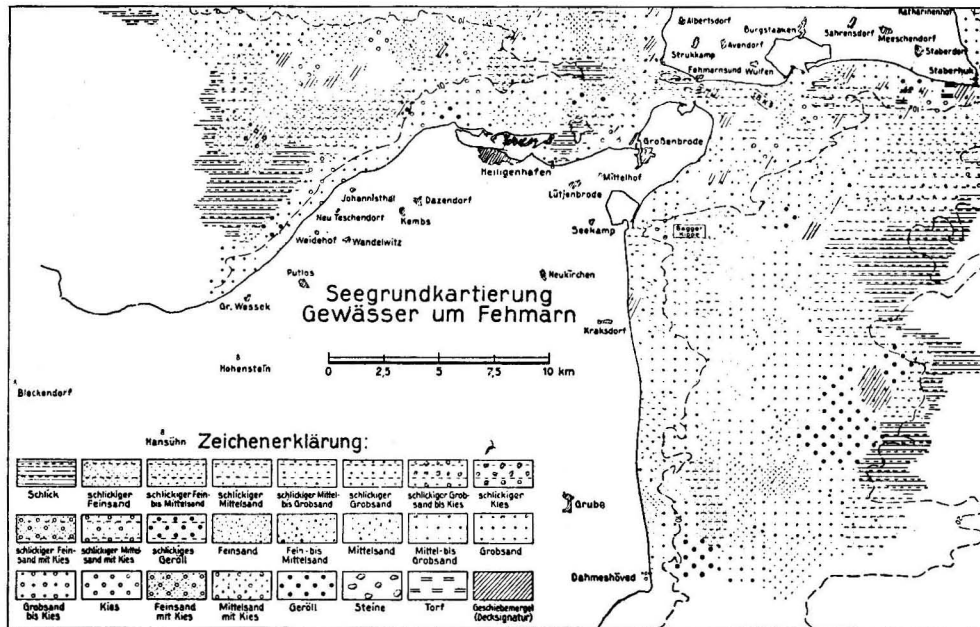


Abb. 8. Ausschnitt aus der Seegrundkarte um Fehmarn nach BRESSAU 1957

Punktsignatur überlagert. Der Vorteil dieser Symbolik ist in der verfeinerten Darstellung des Korngemisches bei leichterer Lesbarkeit zu erblicken. Jedoch erfordert auch die als Beispiel gelieferte Karte der Flensburger Außenförde eine mühselige Übersetzung der Symbole an jeder einzelnen Station. Es wird bereits ein gewisser Gesamteindruck erzielt. Jedoch gehen in diesem Fall bei einer Verringerung der Stationsabstände und bei schwach sortierten Sedimenten an benachbarten Stationen die Einzelheiten verloren. Ein weiteres Beispiel der Anwendung des Verfahrens gab LÜNEBURG (1960). Es handelt sich aber nicht um eine Meeresgrundkarte im engeren Sinn, sondern wieder nur um die Darstellung von Korngemischen an einzelnen Punkten, für die bei einer wiederholten Aufnahme den unterschiedlichen Korngemischen durch verschiedene Farben Ausdruck verliehen wurde.

BRESSAU legte die fünf Stufen: Schlick, Feinsand, Mittelsand, Grobsand und Kies zugrunde. Er schuf für die am gesamten Probenmaterial aus dem Seegebiet um Fehmarn als charakteristisch erkannten Korngemische besondere Symbole, so daß die Legende der Meeresgrundkarte 24 Signaturen umfaßte (Abb. 8). Auf diese Weise konnte ein klares Gesamtbild bei einer relativ leichten Lesbarkeit der Einzelheiten erzielt werden. Im Schlick wurden keine Unterscheidungen getroffen. Für klastische Sedimente finden sich insgesamt 10 Signaturen. Dementsprechend sind für die Übergänge zwischen Schlick und den klastischen Sedimenten 10 weitere Signaturen vorgesehen. Die letzten 3 Signaturen dienen zur Kennzeichnung von Steinen, Torf und Geschiebemergel.

Es ist zu bemerken, daß die von BRESSAU dargestellten Korngemische als charakteristisch für die Abrasionsflächen um Fehmarn und für den unvermittelten Übergang zwischen groben Sedimenten und Schlick an den Rändern von Abrasionsgebieten angesehen werden müssen.

In der einfarbigen Karte konnte nur 1 zusätzliche Stufe zwischen 2 Fraktionen berücksichtigt werden, während ursprünglich von BRESSAU in der tabellarischen Übersicht der Korngemische jeweils 2 Zwischenstufen eingeschaltet waren. Es liegt der Seegrundkarte um Fehmarn noch kein vollständiges System zugrunde, in dem sämtliche Korngemische der Beltsee ihren bestimmten Platz einnehmen.

Der erste Entwurf einer Meeresgrundkarte, in der die Wiedergabe von Korngemischen durch farbige Schraffuren erfolgte, wurde vom Verfasser 1957 für das Seegebiet Darßer Ort bis Hiddensee vorgelegt.

Zwischen den durch reine Farben dargestellten Fraktionen wurden mit Hilfe verschieden breiter, farbiger Schraffen jeweils 2 Stufen eingeschaltet, z. B. zwischen das reine Gelb des Feinsandes und das reine Hellbraun des Mittelsandes das Gelb-Braun von Fein- bis Mittelsand und das Braun-Gelb für Mittel- bis Feinsand. Das Verhältnis der Hauptfraktion zur stärksten Nachbarfraktion von etwa 2:1 findet dadurch Ausdruck, daß der die Hauptfraktion kennzeichnende Farbstreifen die doppelte Breite des andersfarbenen Streifens der Nachbarfraktion aufweist (s. farbige Tafel I).

Der Darstellung durch farbige Schraffuren entsprechen Abkürzungen zur Kennzeichnung des Korngemisches. Die zwischen den reinen Fraktionen ff, f, m, gb und ggb auftretenden Gemische ff/f, f/ff, f/m, m/f, m/gb, gb/m usw. lassen vor dem Schrägstrich die Hauptfraktion und hinter demselben die stärkste Nachbarfraktion erkennen. In den „reinen“ Sanden beträgt der Anteil der Hauptfraktion 65 Gewichtsprozent und darüber. Die Abkürzung f/m für Fein- bis Mittelsand bedeutet, daß 50—64% der Hauptfraktion f und 30—40% der stärksten Nachbarfraktion m angehören. Die Abkürzung m/f läßt die Umkehr des Verhältnisses beider Fraktionen, also das Überwiegen mittleren Sandes über den feinkörnigen Sand feststellen.

Für den Fall, daß in einer Sandprobe die Gewichtsanteile zweier benachbarter Fraktionen fast einander gleichen und zusammen 80% der gesamten Probe ausmachen, wird zwischen die Abkürzungen für beide Fraktionen ein Bindestrich gesetzt. Z. B. bedeutet f-m fein- bis mittelkörniger Sand zu annähernd gleichen Teilen mit einem geringen Übergewicht der zuerst genannten Fraktion, also des feinkörnigen Sandes. In der farbigen Schraffendarstellung findet auch in diesem Fall das Übergewicht des Feinsandes durch einen gelben Streifen doppelter Breite neben dem einfachen hellbraunen Streifen für Mittelsand Ausdruck. Bei einer gut sortierten Sandprobe mit einem Gewichtsanteil der Hauptfraktion von mindestens 65% kann in der Regel nur noch eine weitere Fraktion mit etwa 20% Bedeutung erlangen. In diesem Fall kann eine Kennzeichnung der Beimengung dadurch erreicht werden, daß ihr Kurzzeichen in Klammern hinter die Abkürzung für die Hauptfraktion gesetzt wird z. B. f(ff) = Feinsand mit Feinstsand. Es ist darauf hinzuweisen, daß Meeressande in der Regel einen hohen Sortierungsgrad aufweisen und deshalb mit ihrer Summenkurve auf ein schmales Intervall beschränkt bleiben (s. Abb. 14, S. 30). Deshalb liefert die vorgeschlagene Darstellung gerade für den Bereich der Sande eine treffende Charakteristik der Kornzusammensetzung.

Die für Gemische von Sanden angegebenen prozentualen Anteile der Haupt- und Nebenfraktion besitzen für die Schraffendarstellung verschiedener Schlickarten keine Gültigkeit. Für die Signaturen des Schlicks und die Übergänge zwischen Sand und Schlick werden im folgenden Kapitel genaue Verhältniszahlen angegeben. Auch bei der Darstellung von Restsedimenten wird die Deutung der Schraffuren ein wenig geändert.

In dem Fall, daß am Rande von Abrasionsflächen grobkörniges Sediment einen beachtlichen Schlickanteil aufweist, bewährt sich eine dreifarbige Schraffur. Diese wird in folgender Weise gelesen. Zuerst faßt man die einfach breiten, hellblauen Schraffen für die Schlickbeimengung ins Auge. Die zwischen den blauen Schraffen vorhandenen farbigen Streifen werden

von links nach rechts oder von oben nach unten gelesen. An erster Stelle findet sich die Farbe für die Hauptfraktion, dann folgt die Farbe der stärksten Nachbarfraktion z. B.

hellblau
dunkelbraun
hellbraun
hellblau

gb/m sk    Grob- bis Mittelsand schlickig

Auch bei den durch den Untergrund bedingten Korngemischen wie z. B. tonigem Fein- bis Mittelsand bewährt sich die dreifarbig Schraffur.

#### 4. Verwendung von Farben, Symbolen und Abkürzungen

In der Darstellung der Sedimente der westlichen und südlichen Ostsee entsprechen den 13 Unterfraktionen (ohne Ton) 13 Abstufungen bei den Sedimenten vom Feinschlick bis zum Blockfeld. Schlamm wurde im Untersuchungsbereich nicht angetroffen und blieb deshalb unberücksichtigt.

Infolge der auch bei den Sedimenten mit organogenem Anteil vorgenommenen Gliederung an Hand der stärksten Kornfraktion wird durch die farbigen Schraffuren der Übergang sowohl zwischen den Sedimenten als auch zwischen den Korngrößenklassen dargestellt. Auf dieser Doppelsinnigkeit der Farben beruht die höhere Aussagekraft.

Mit Farben kann insofern gespart werden, als diejenigen Sedimentarten und Kornfraktionen, deren Abgrenzung auf der Karte keine gesetzmäßige Abfolge erkennen läßt, durch einund dieselbe Farbe dargestellt werden. Die Unterscheidung der Unterarten und Unterfraktionen wird in diesem Falle durch Abkürzungen und zusätzliche Symbole gewährleistet.

Zum Beispiel finden sich Grobkies-, Stein- und Blockvorkommen in den Zentren von Abrasionsflächen wahllos nebeneinander. Sie werden gemeinsam durch ein Rotbraun dargestellt. Stein- und Blockfelder lassen sich durch rot überdruckte Punkt- und Kreuzsignaturen unterscheiden, während Grobkiesflächen einfach rotbraun erscheinen.

Eine Untergliederung der schmalen Kies- und Grandzone (MK-ggb) am Rande der Abrasionsflächen ist auf einer Übersichtskarte nicht möglich. Sehr grober Sand (ggb), der landläufig auch als Grand oder Gräbing bezeichnet wird, sowie Fein- und Mittelkies werden zusammengefaßt und durch ein Orange wiedergegeben. Eine Unterscheidung auf der Karte ist mit Hilfe der Abkürzungen ggb, FK und MK möglich, die in Schwarzdruck in den orangefarbenen Flächen erscheinen.

Im Gegensatz zu den auf Abrasionsflächen kaum sortierten, groben Restsedimenten lassen Sande eine mit der Feinheit des Korns zunehmende Sortiertheit erkennen. Es lassen sich breite Zonen für die einzelnen Sandarten abgrenzen. Deshalb wird jede Sandart durch einen besonderen Farbton unterschieden. Grob- und Mittelsand werden durch Mittelbraun und Hellbraun gekennzeichnet, während feiner und sehr feiner Sand auf der Karte gelb und hellgelb erscheinen.

Wie beim Sand werden auch beim Schlick sämtliche Unterarten durch 3 Farbabstufungen in Blau wiedergegeben.

Es finden zur Kennzeichnung der wichtigsten Fraktionen und Sedimentarten 9 Farbtöne Verwendung: Rotbraun, Orange, Mittel- und Hellbraun, Gelb und Hellgelb sowie Hell-, Mittel- und Dunkelblau.

Zusätzliche Farben werden für Ton- und Schluffbeimengungen im Sand benötigt. Ton und Schluff zählen zu den Sedimenten des Untergrundes. In den durch den Untergrund bedingten Korngemischen tonigen und schluffigen Sandes werden Tonbeimengungen violett und Grobschluffanteile hellgrau kenntlich gemacht.



Im übrigen lassen sich die Sedimentgesteine des Untergrundes: Geschiebemergel, Ton, Schlick, Kreide, Steinschichten und Torf durch einfache Schraffuren und Signaturen andeuten.

Einzelne Blöcke und Steine verschiedener Größen werden durch schwarze Kreuz- und Punktsignaturen dargestellt. Kleine schwarze Ringe weisen auf Steine im Untergrund

## B. Sedimente der westlichen und südlichen Ostsee (Tafel I)

### 1. Rezente organogene und klastische Sedimente

#### a) Schlick, Schlamm und der Begriff „Mudd“

Der Schlick in den Mulden der westlichen und südlichen Ostsee läßt eine graubräunliche Oxydationsschicht von 0,5 bis 5 cm Stärke über einer schwarzgrauen, 6 bis 12 cm starken Reduktionsschicht erkennen. Unterhalb dieser Schicht erscheint der Schlick grau oder dunkelolivfarben. Beim Trocknen nimmt er eine hellgraue Färbung an:

Der  $H_2S$ -Geruch von Schlick ist als deutlich bis kräftig zu bezeichnen. Von einer stärkeren Gasbildung oder unerträglichem  $H_2S$ -Geruch, wie er im Faulschlamm vorkommt, kann nicht die Rede sein. Bei sandigem Schlick läßt sich nur ein schwacher Geruch feststellen.

Schlick fühlt sich weich und fettig an. Er zerfließt ganz allmählich. Bei Arbeiten am Meeresgrund sinkt ein Taucher etwa 10 bis 30 cm tief in Schlick ein, während er in fast flüssigem, schmierig anzufühlenden, tintenblauschwarzen Faulschlamm gleich bis über den Kopf versinkt. Faulschlamm findet sich nur selten unter der Küste in kleinen Löchern von der Größe eines 3 bis 4 m tiefen Bombentrichters in der Nachbarschaft von Tangfluren und Muschelbänken. Er ist auch von Taucherarbeiten in stillen Hafenbecken her bekannt.

Stechrohrkerne ließen unter einer 40 bis 60 cm starken, von Würmern belebten und mit einzelnen Muschelschalen durchsetzten, oberen weichen Schlickschicht mehrere Meter eines einheitlich grauen, fetten, festeren Schlicks von nur schwachem  $H_2S$ -Geruch verzeichnen.

Der mineralische Anteil im Schlick beträgt über 90%. Etwa 2 bis 9% entfallen auf organogene Substanz. Grobschlick weist noch einen Anteil feinen und sehr feinen Sandes bis über 50% auf. Im zentralen Teil der Mecklenburger Bucht findet sich Grob- bis Mittelschlick mit Feinstsandanteilen von weniger als 10%. Schluff wird als die charakteristische Fraktion im Schlick angesehen.

In Tab. 2 lassen die Mittelwerte für je 10 Schlickproben aus den tiefsten Teilen der Mecklenburger Bucht, des Arkona Beckens, der Bornholm Mulde und der Danziger Bucht die Verschiebung der Hauptfraktion vom Grobschluff zum Feinschluff erkennen. Die genauen Sedimentbezeichnungen sind Grobschlick in der Mecklenburger Bucht, Mittelschlick im Arkona Becken sowie Mittel- bis Feinschlick in der Bornholm Mulde und Danziger Bucht. Vom Mittelschlick ab fehlt Sand fast gänzlich und der Schluffanteil von 65 bis 80% überwiegt den Anteil des Tons (s. Definitionen auf S. 23).

TABELLE 2

Mittlere Kornverteilung in je 10 Schlickproben aus den tiefsten Teilen der Mulden der westlichen und südlichen Ostsee

Fraktion mm	ff Sd >0,063	GSf >0,02	MSf >0,006	FSf >0,002	GT >0,0006	MT-FT <0,0006	Wasser- tiefen m
Mecklenburger Bucht	8,5%	<b>36,9%</b>	<b>28,0%</b>	11,6%	6,8%	8,2%	24—26
Arkona Becken	0,7%	<b>25,8%</b>	<b>37,6%</b>	16,3%	9,3%	10,3%	45—48
Bornholm Mulde	0,4%	18,1%	<b>31,1%</b>	<b>20,6%</b>	15,8%	14,0%	80—92
Danziger Bucht	0,4%	13,1%	<b>31,0%</b>	<b>22,9%</b>	18,6%	14,0%	103—107

Die Feuchte des Schlicks steigt mit zunehmender Feinheit des Kornes von der Mecklenburger Bucht nach der Danziger Bucht von 65,4% auf 76,9% des Gesamtgewichts der frischen Bodenprobe (s. Tab. 3 und Abb. 9).

Die Feuchte sinkt im 4 bis 5 m mächtigen Schlick zuunterst bis auf etwa 50% (s. Anhang, Tab. 6 u. 7).

Die  $\text{CaCO}_3$ -Werte nehmen in den östlichen, tieferen Mulden ab. Die Mittelwerte liegen zwischen 0,94 und 0,34% (s. Tab. 3).

Die auf Grund des in organischen Verbindungen enthaltenen Kohlenstoffs mit Hilfe des von SCHULZE (1849) angegebenen Faktors 1,72 errechneten Anteile organischer Substanz liegen zwischen 7,3 und 9,5%. Noch geringere Werte mit einer Häufung um 4% waren von GRIPENBERG (1939) für die Sedimente der mittleren und nördlichen Ostsee mitgeteilt worden.

Der Vorschlag für die Darstellung von Schlick umfaßt nach dem bereits in Teil A dargelegten Schema folgende Abstufungen:

FSk	Feinschlick, Hauptfraktion: Feinschluff $\geq 35\%$
F/MSk	Fein- bis Mittelschlick, Hauptfraktion: Feinschluff 25–34% stärkste Nebenfr.: Mittelschluff > 20%
M/FSk	Mittel- bis Feinschlick, Hauptfraktion: Mittelschluff 25–34% stärkste Nebenfr.: Feinschluff > 20%
MSk	Mittelschlick, 95% und darüber < 0,063 mm, Hauptfraktion: Mittelschluff $\geq 35\%$
M/GSk	Mittel- bis Grobschlick, 90–94% < 0,063 mm, Hauptfraktion: Mittelschluff 25–34% stärkste Nebenfr.: Grobschluff > 20%
G/MSk	Grob- bis Mittelschlick, 80–89% < 0,063 mm, Hauptfraktion: Grobschluff 25–34% stärkste Nebenfr.: Mittelschluff > 20%
GSk	Grobschlick, 45–79% < 0,063 mm, Hauptfraktion: Grobschluff $\geq 35\%$
GSk ff	Grobschlick feinstsandig, 25–44% < 0,063 mm Grobschluffanteil: 20–34%, ff $\geq 10\%$ , f < 10%

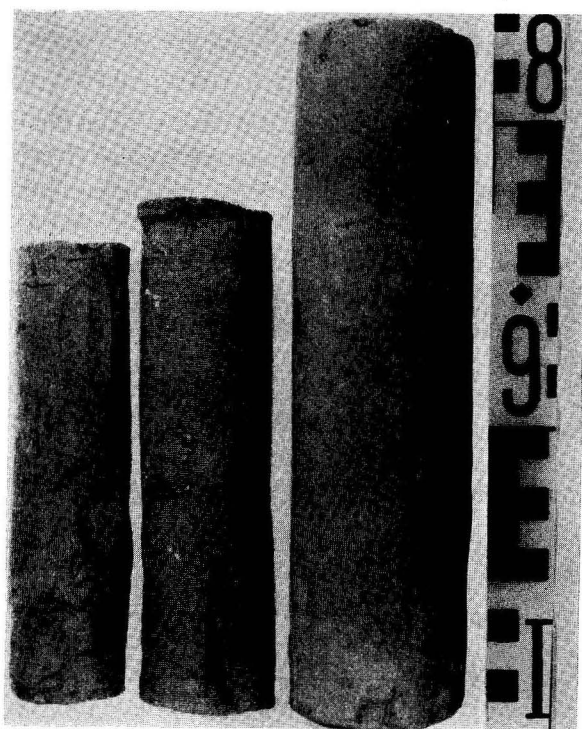


Abb. 9. Verkürzung von Schlickproben in Stechrohren infolge des Volumenverlustes durch Austrocknen

Der im Bilde rechts sichtbare Geschiebemergelkern läßt das ursprüngliche Volumen und die vorherige Länge von 23 cm erkennen. Links: Schlick; in der Mitte: Sandiger Schlick

Es liegt nahe, bei der Betrachtung der Kornverteilungskurven von Schlickproben die mittlere Summenkurve für Geschiebemergel zum Vergleich heranzuziehen, da der im Schlick überwiegende mineralische Anteil aus dem mechanisch aufbereiteten Geschiebemergel stammt, der sich als Gestein des Untergrundes am weitesten verbreitet findet (Abb. 10). Es scheint nur natürlich, daß sich die Kornverteilungskurven von Grobschlick an die Kurve des Geschiebemergels anschmiegen oder ihr fast parallel laufen.

TABELLE 3

Mittelwerte für je 10 Schlickproben aus den tiefsten Teilen der Mulden der westlichen und südlichen Ostsee<sup>1)</sup>

	Mecklenburger Bucht	Arkona Becken	Bornholm Mulde	Danziger Bucht	Labor-methode
Hauptfraktion	GSf 37%	MSf 38%	MSf 31%	MSf 31%	n. KÖHN
stärkste Nachbarfrakt.	MSf 28%	GSf 26%	FSf 21%	FSf 23%	n. KÖHN
Feuchte	65,4%	72,4%	76,3%	76,9%	n. MÜLLER
CaCO <sub>3</sub>	0,70%	0,94%	0,52%	0,34%	n. SCHEIBLER
C-org.	4,22%	5,53%	5,30%	4,50%	n. HOLTHAUS-SEUTHE
organ. Substanz	7,3%	9,5%	9,1%	7,7%	n. SCHULZE

<sup>1)</sup> Die in dieser Tabelle enthaltenen Werte von C-org. wurden freundlicherweise von Herrn Dr. G. REUTER im Bodenzlabor des Instituts für Agrikulturchemie und Bodenkunde der Universität Rostock bestimmt.

Da nur alle feineren Kornarten dem Schlickgebiet zugeführt werden, müssen sämtliche Schlickkurven unterhalb der Kurve des Geschiebemergels liegen, und es kann im Grobschlick in den Fraktionen unter 0,063 mm annähernd das gleiche Kornverhältnis wie im Geschiebemergel erreicht werden. Da die Kurve für Geschiebemergel als äußerste Grenze für Schlick angesehen wird, muß auch für Schlick die Forderung erfüllt sein, daß 45 Gewichtsprozent auf die Kornarten <0,063 mm entfallen, wie es beim Geschiebemergel der Fall ist.

Die vom Verfasser 1957 für Schlick festgesetzte Grenze bei 40% <0,063 mm möchte nach dem eigenen neuen Vorschlag nach 45% verschoben werden.

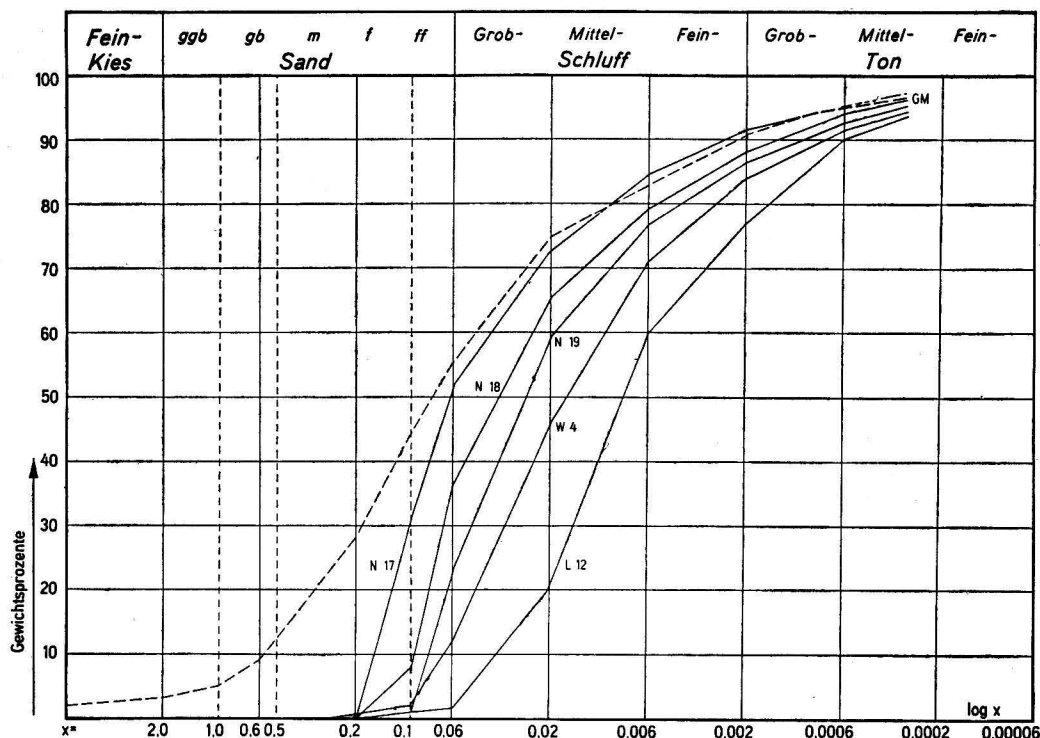


Abb. 10. Kornverteilungskurven verschiedener Schlickproben aus der Mecklenburger Bucht

Stat.	SK-Art	>0,2	>0,1	>0,06	>0,02	>0,006	>0,002	>0,0006	<0,0006 mm	Gebiet	Tiefe
N17	GSk	0,4	31,3	20,8	20,7	12,3	6,2	4,2	4,1%	Nordöstlich Staberhuk	24,0 m
N18	GSk	0,2	8,3	28,0	29,4	13,4	8,6	6,8	5,3%	Ostwärts Staberhuk	22,5 m
N19	GSk	0,2	1,3	22,5	35,7	16,9	10,1	6,1	7,2%	Ostwärts Staberhuk	22,0 m
W4	G/MSk	0,7	1,8	9,9	33,7	24,9	12,7	8,1	8,2%	Offen Tief (Hannibal)	18,8 m
L12	MSk	0,8	0,4	0,5	18,9	39,5	16,8	13,2	9,9%	Lübecker Bucht südl. Walkyriengrund	21,7 m

Die Abstufungen des Schlicks an Hand des Gesamtanteils der Kornarten  $<0,063$  mm ersparte bei mehr als 1000 Schlickproben aus der Mecklenburger Bucht und dem Westteil des Arkona Beckens langwierige Schlämmanalysen. Die Schlickproben wurden lediglich naß gesiebt, wobei mit einem weichen Pinsel vorsichtig gerührt wurde. Es wurden die Sandfraktionen und der Rest unter  $0,063$  mm bestimmt.

Mit Hilfe von Vergleichsanalysen konnte dieses ältere Verfahren der Untergliederung des Schlicks mit Hilfe des Restes unter  $0,063$  mm mit dem neuen Vorschlag der Darstellung von Schlick an Hand der einzelnen Schlufffraktionen leicht in Einklang gebracht werden.

Das ältere Verfahren reicht bis zur Unterscheidung von Mittelschlick. Abstufungen zwischen Mittel- und Feinschlick können nur auf Grund der durch Schlämmanalysen ermittelten Anteile der Unterfraktionen des Schluffs vorgenommen werden.

Für Grobschlick kann entweder ein Gesamtanteil der Fraktionen unter  $0,063$  mm von 45% und darüber oder ein Grobschluffanteil von mindestens 35% als entscheidend angesehen werden.

Schlick als marines Sediment mit organogenem Anteil ähnelt den  $\text{CaCO}_3$ -armen limnischen Ton-, Algen- und Detritusgyttjen. Eine Verwandtschaft ist auch hinsichtlich der Häufigkeit von Diatomeen vorhanden. Wegen des Verhältnisses zwischen Mineralgehalt und organogenem Anteil kann der Schlick der westlichen und südlichen Ostsee als marines Äquivalent zu limnischem Gyttja-Schluff gelten. Diese Einstufung erfolgt in Einklang mit den Bezeichnungen von L. v. POST und GRANLUND (1926) sowie NAUMANN (1930).

Schlamm kann als marines Äquivalent zu Gyttja-Ton angesehen werden. Er wird in der westlichen und südlichen Ostsee nicht angetroffen, ist aber in den tieferen Mulden der mittleren und nördlichen Ostsee zu finden (s. BRINKMANN 1956, S. 96). Er sollte nach NIGGLI bis zu 90% Wasser enthalten (NIGGLI, Bd. 2, S. 290).

TABELLE 4

Unterscheidung von Gyttjen nach dem Mineralgehalt<sup>1)</sup>

Bezeichnungen nach L. v. POST und GRANLUND 1926 sowie NAUMANN 1930	Mineral- gehalt	Bezeichnungen nach G. LUNDQVIST 1940
Gyttja	0—10%	Fein- oder Grobdetritusgyttja
	10—40%	Fein- oder Grobdetritusgyttja tonig, schluffig
	40—80%	Fein- oder Grobdetritusgyttja tonreich, schluffreich
Ton-Gyttja, Schluff-Gyttja	80—90%	
Gyttja-Ton, Gyttja-Schluff	90—98%	Ton, Schluff

<sup>1)</sup> Einen umfassenden Überblick über Abwandlungen und Erweiterungen des Inhalts der Bezeichnungen organogener Sedimente bietet die Arbeit von GROSSE-BRAUCKMANN, der diese Tabelle entnommen wurde.



Im Norrköping-Tief (200 m) und im Landsort-Tief (460 m) wurde folgendes Normalprofil angetroffen: 2–3 cm schwarzer Schlamm über einer 8–10 cm starken, grauen Schlickschicht mit kräftigem  $H_2S$ -Geruch und hellgrauem Ton im Liegenden. Es handelt sich dabei wahrscheinlich um umgelagerten Ton, der von den seitlichen Hängen in die Mulden geflossen ist.

Nach der Kornverteilung handelt es sich im Norrköping- und im Landsort-Tief wie auch in dem nördlich der Insel Gotland gelegenen Farö-Tief (223 m) und in der Ostgotland-Mulde (250 m) um schlickigen Schlamm. Der Wechsel der Kornverteilung, der Feuchte, des Calciumcarbonat-Anteils und der Werte von  $C_{org}$  wird an einigen Beispielen in Tab. 12 des Anhangs vor Augen geführt. Die Feuchte erreichte in den Schlammproben aus den beiden erstgenannten Mulden Höchstwerte von 82%.

Die von APSTEIN (1916) eingeführte und von PRATJE übernommene Bezeichnung „Mudd“ findet sich nicht in der neuen Darstellung, da die systematische Gliederung an Hand der Fraktionen bis in die Korngrößenbereiche von Schluff und Ton folgerichtig durchgeführt wurde.

Die Bezeichnung „Mudd“ sollte nach APSTEIN dann verwendet werden, wenn organische Bestandteile in der Bodenprobe überwiegen. Auch von PRATJE (1933) war Mudd als „reich an organischer Substanz, insbesondere Pflanzenresten“ gekennzeichnet worden. Angesichts des organischen Anteils von weniger als 10% in den Schlickproben, die in den von PRATJE auf der Meeresgrundkarte der südlichen und mittleren Ostsee angegebenen Muddgebieten entnommen waren, kann von einem Reichtum an organischer Substanz nicht gesprochen werden. Pflanzenreste sind in dem von PRATJE (1948) als besonders weicher Schlick gekennzeichneten Mudd nicht gefunden worden und in den küstenfernen tiefen Mulden der Ostsee auch kaum zu erwarten.

Die von WOHLBERG (1937) für das Wattengebiet vor der schleswig-holsteinischen Westküste vorgenommene Inhaltserweiterung der Bezeichnung „Mudd“ für sapropelische Bildungen kann für die Ostsee nicht gelten.

Der Begriff „Mudd“ wird in dem neuen Schema der Sedimente der westlichen und südlichen Ostsee nicht mehr verwendet, weil der darin enthaltene Hinweis auf einen Reichtum an organischer Substanz nicht gerechtfertigt erscheint. Zum anderen kommt es zwischen den Grenzen der in den von PRATJE bearbeiteten Meeresgrundkarten ausgezeichneten Muddgebiete und den auf Grund der Hauptfraktion und stärksten Nachbarfraktion gezogenen Grenzen der verschiedenen Schlickzonen zu vielfachen Überschneidungen.

#### b) Übergänge zwischen Schlick und Sand

Beim Übergang vom Schlick zum Sand muß man sich dessen bewußt sein, daß es sich um den Grenzbereich zwischen Kurzsweb (Sand) und Langsweb (Schluff, Ton) handelt. Während sich bei den aus Langsweb gebildeten Sedimenten eine Streuung über 5 bis 6 Fraktionen hinweg feststellen läßt, entfallen bei hochsortierten Meeressanden über 90% auf ein- und dieselbe Fraktion. Dem durchschnittlichen Anteil der Hauptfraktion für Grob-, Mittel- und Feinschlick von 35% steht bei reinen Sanden ein durchschnittlicher Mittelwert von 65% gegenüber. Deshalb ist beim Übergang vom Schlick zum Sand in Rücksicht auf die unterschiedliche Sortiertheit von Lang- und Kurzsweb der Anteil des Schluffs doppelt zu bewerten.

Die Grenze für reinen Schlick wurde bei 45%  $< 0,063$  mm gezogen. Die Grenze zwischen sandigem Schlick und schlickigem Sand möchte nach den obigen Überlegungen bei 25%  $< 0,063$  mm liegen.

Beide Abgrenzungen entsprechen dem durch die frischen Proben erweckten Eindruck. Es erschien durchaus richtig, wenn die frische Probe als Schlick bezeichnet worden war und nachher im Labor ein Anteil von nur 45%  $< 0,063$  mm festgestellt wurde. Bei einem Schluffanteil von etwa 25% wurden die Proben noch als bindiger Schlick angesprochen, wenn sie auch durch

den Feinstsandanteil trockener wirkten und sich bereits bei einem Anteil feinen Sandes von weniger als 10% sandig anfühlten.

Mitunter lassen sich im sandigen Schlick an frisch auseinandergebrochenen Greiferproben feinsandige Lagen, bisweilen auch Flaserschichtungen oder einzelne 6 bis 8 cm lange, flache Sandlinsen erkennen, die auf eine gelegentliche Übersandung und Rippelbildung hinweisen. Feinschichtung und Sandeinlagerungen werden durch einzelne schwere Stürme hervorgerufen, die eine Verschiebung der Grenze der Wellenwirkung am Meeresgrund nach der Tiefe hin bewirken. In der Mecklenburger Bucht handelt es sich um millimeterstarke Lagen. Im Schlick des Arkona Beckens sind sie in Zentimeter-Stärke zu erkennen. Die Feinschichtungen des sandigen Schlicks wie auch des schlickigen Sandes ähneln den von REINECK (1958, 1960) für den Wattenschlick an der Nordseeküste beschriebenen Gefügen.

- GSk ff    Grobschlick feinstsandig, 25–44% < 0,063 mm,  
Grob schluffanteil: 20–34%,  
sehr feiner Sand ff ≥ 10%, feiner Sand f < 10%
- GSk f    Grobschlick feinsandig, 25–44% < 0,063 mm,  
Grob schluffanteil: 20–34%,  
feiner Sand f ≥ 10%, m < 10%
- GSk m    Grobschlick mittelsandig, 25–44% < 0,063 mm,  
Grob schluffanteil: 20–34%,  
mittlerer Sand m ≥ 10%, gb < 10%
- ff sk    sehr feiner Sand schlickig, 5–24% < 0,063 mm,  
Hauptfraktion: ff Sand 60% und darüber
- f sk    feiner Sand schlickig, 5–24% < 0,063 mm,  
Hauptfraktion: f Sand 60% und darüber.

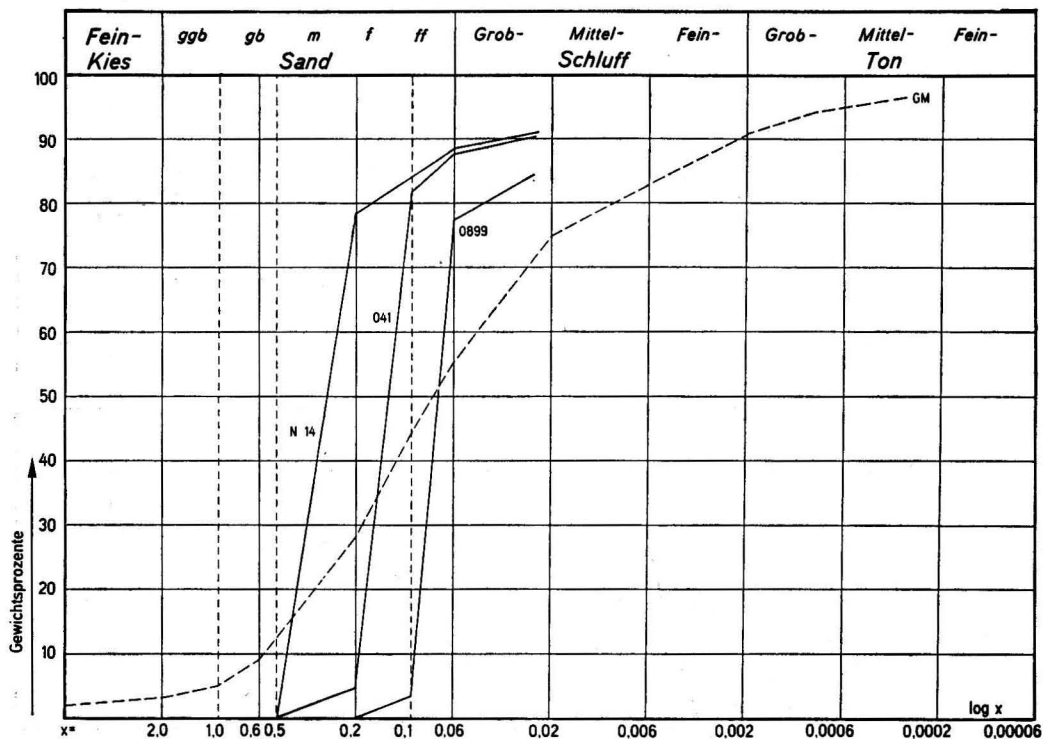


Abb. 11. Summenkurven schlickiger Sande

Stat.	Sedim.	>2,0	>1,0	>0,5	>0,2	>0,1	>0,06	<0,06 mm	Gebiet	Tiefe
N14	m sk	—	—	—	77,8	5,3	3,6	12,3%	Mecklenburger Bucht	19,0 m
041	f sk	—	—	—	5,0	76,6	5,4	13,0%	Fehmarn Belt	19,0 m
0899	ff sk	—	—	—	0,1	2,9	74,1	22,9%	Arkona Becken	36,3 m

Im Übergangsbereich zwischen Schlick und Sand wurden folgende Gemische angetroffen: Feinstsandiger Grobschlick (GSk ff) tritt verhältnismäßig selten auf.

Feinsandiger Grobschlick (GSk f) mit einem Feinsandanteil von 10% und darüber, ist häufig anzutreffen.

Mittelsandiger Grobschlick (GSk m) findet sich dort, wo Geschiebemergelflächen allmählich im Schlick untertauchen. Eine Beimengung von 10% mittlerem Sand weist vor den Rändern von Arasionsflächen auf eine geringe Mächtigkeit der Schlickdecke von weniger als 1 m hin.

Sehr feiner schlickiger Sand (ff sk) findet sich nur zwischen größeren Feinstsandflächen und Schlickgebieten. Er besitzt eine graue Farbe und erweist sich noch als bindig.

Feiner schlickiger Sand (f sk) ist am Rande der Mecklenburger Bucht und auf der Darßer Schwelle weit verbreitet.

Außerdem ist Schlick als Beimengung zu jedem beliebigen Sand- und Kiesgemisch dort möglich, wo ein Schlickgebiet unmittelbar an Geschiebemergelflächen mit Restsedimenten grenzt. Von den besonderen Korngemischen am Rande von Abrasionsflächen wird später die Rede sein.

Die Summenkurven schlickiger Sande lassen die Eindeutigkeit dieser Bezeichnung erkennen (Abb. 11). Es handelt sich um die Kurven gut sortierter Sande, die im Vergleich zu den Kurven reiner Sande (Abb. 14) lediglich um den Schlickanteil verkürzt erscheinen. Diese Kurven weichen erheblich vom Geschiebemergel ab und sprechen für überschlickte Sand-schichten.

Demgegenüber erweisen sich sandige Schlicke als zweideutig. Es lassen sich bei fein- und mittelsandigem Grobschlick jeweils 2 Typen unterscheiden (Abb. 12, 13).

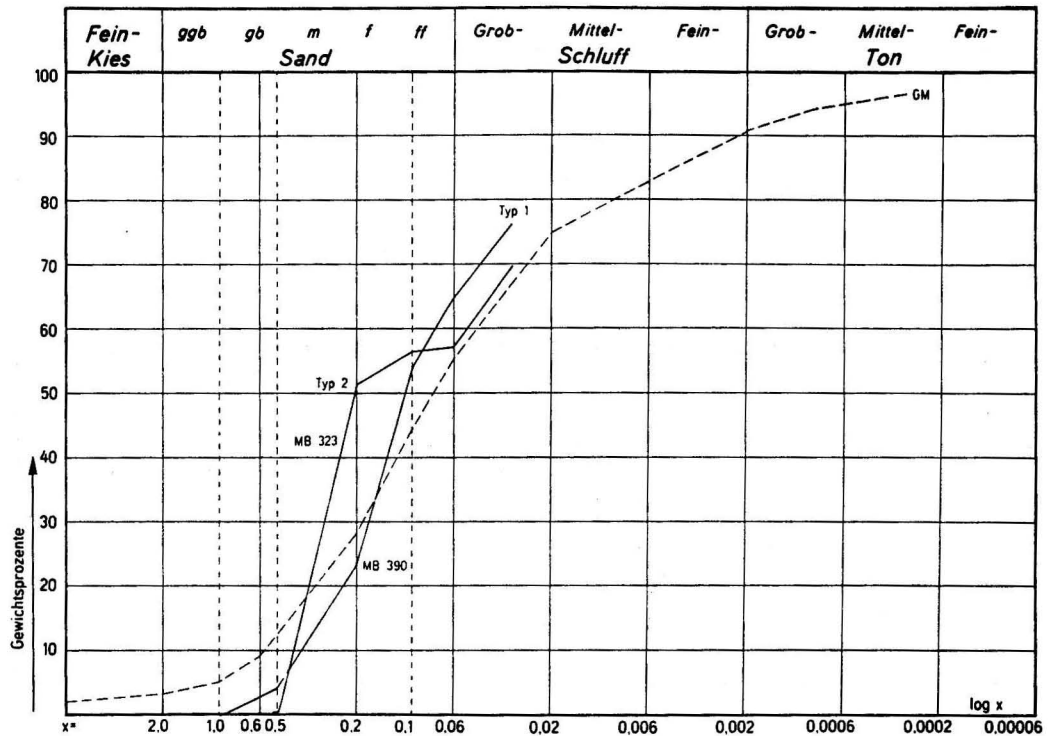


Abb. 12. Summenkurven verschiedener Typen von mittelsandigem Schlick

Stat.	Sediment	>2,0	>1,0	>0,5	>0,2	>0,1	>0,06	<0,06 mm	Gebiet	Tiefe
MB 390	Sk m Typ 1	—	—	4,0	19,4	30,8	11,3	34,8%	Mecklenburger Bucht, südlich Nystedt	22,0 m
MB 323	Sk m Typ 2	—	—	0,5	51,5	4,6	0,5	42,9%	Mecklenburger Bucht, südlich Röd-Sand	26,0 m

Die Kurven des ersten Typs folgen der Krümmung der Kurve des Geschiebemergels sowohl im Bereich des Sandes wie auch in den Bereichen von Schluff und Ton. Die Kornverteilungskurve weist damit auf die Aufarbeitung von Geschiebemergel, die am Rande von Abrasionsflächen erfolgt. Von dort werden zeitweilig feine und mittlere Sandkörner auf Schlick getragen.

Beim zweiten Typ sandigen Schlicks scheint die Kurve deutlich aus zwei Ästen links und rechts der Grenze bei 0,063 mm zusammengesetzt zu sein. Der linke Ast gleicht der oberen Hälfte einer Summenkurve für hochsortierten Sand, während der rechte Ast durch die Annäherung an die Kurve des Geschiebemergels Grobschluff veranschaulicht. In den prozentualen Anteilen der Sandfraktion findet der Typ 2 dadurch Ausdruck, daß der Anteil nur einer Fraktion von etwa 50% die Anteile der übrigen Fraktionen weit überragt, während sich beim

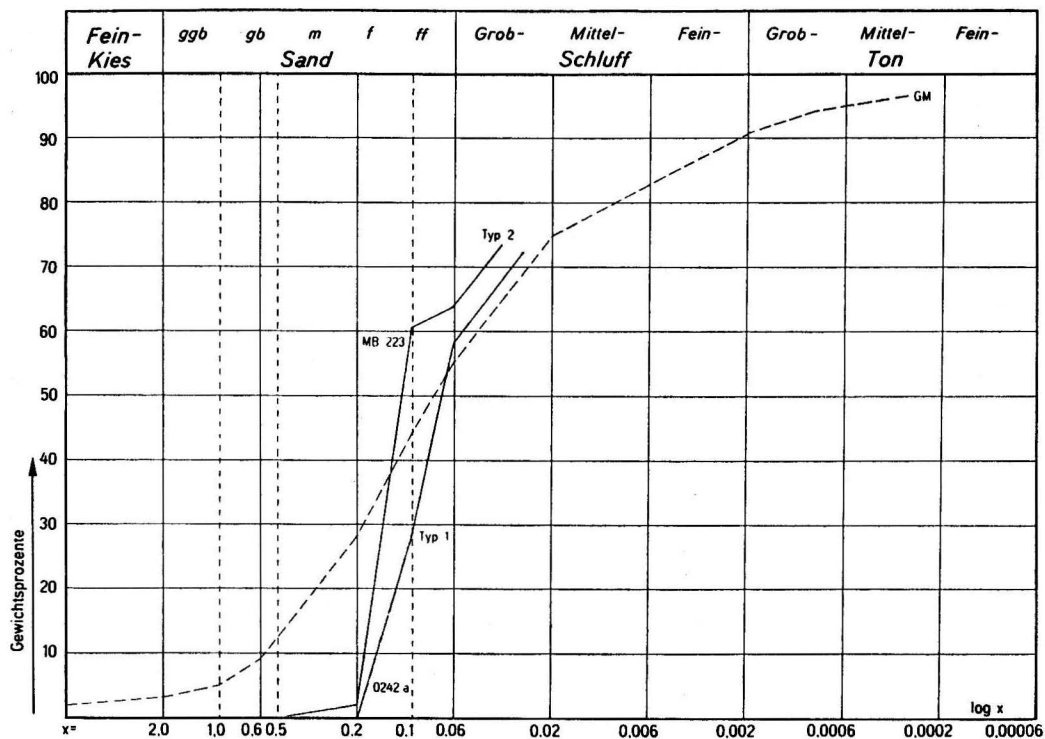


Abb. 13. Summenkurven verschiedener Typen von feinsandigem Schlick

Stat.	Sediment	>2,0	>1,0	>0,5	>0,2	>0,1	>0,06	<0,06 mm	Gebiet	Tiefe
0242a	Sk f Typ 1	—	—	—	0,3	27,9	29,9	41,9%	Schlickmulde ostwärts Falster	18,7 m
MB 223	Sk f Typ 2	—	—	—	2,2	58,1	3,6	36,1%	Mecklenburger Bucht, Eingang des Fehmarn Belts	26,0 m

Typ 1 die Anteile der verschiedenen Korngrößenklassen denjenigen des Geschiebemergels nähern.

Typ 2 scheint in der Mecklenburger Bucht auf die mit der Transgression verbundene Überschlückung einstiger Sandflächen in der Uferzone eines präitorinen Sees hinzuweisen (KOLP 1961). Dieser Auffassung liegt folgende Anschauung zugrunde. Bei normaler Anordnung der Sedimentzonen folgen nacheinander die Schlickzone, sedimentarme Zone, Feinstsandzone und Feinsandzone. Bei einzelnen schweren Stürmen gelangt selten Feinsand über die beiden anderen Zonen hinweg ins Schlickgebiet. Wird eine Sandfläche überschlickt, so grenzen Schlick und Feinsand der noch nicht überdeckten Restfläche unmittelbar aneinander, und es wird häufig Feinsand auf den Schlick getragen.

### e) Klastische Sedimente und der Begriff „Restsediment“

Die Meeressande lassen mit wachsender Entfernung von den küstennahen Abrasionsgebieten eine zunehmende Sortiertheit erkennen.

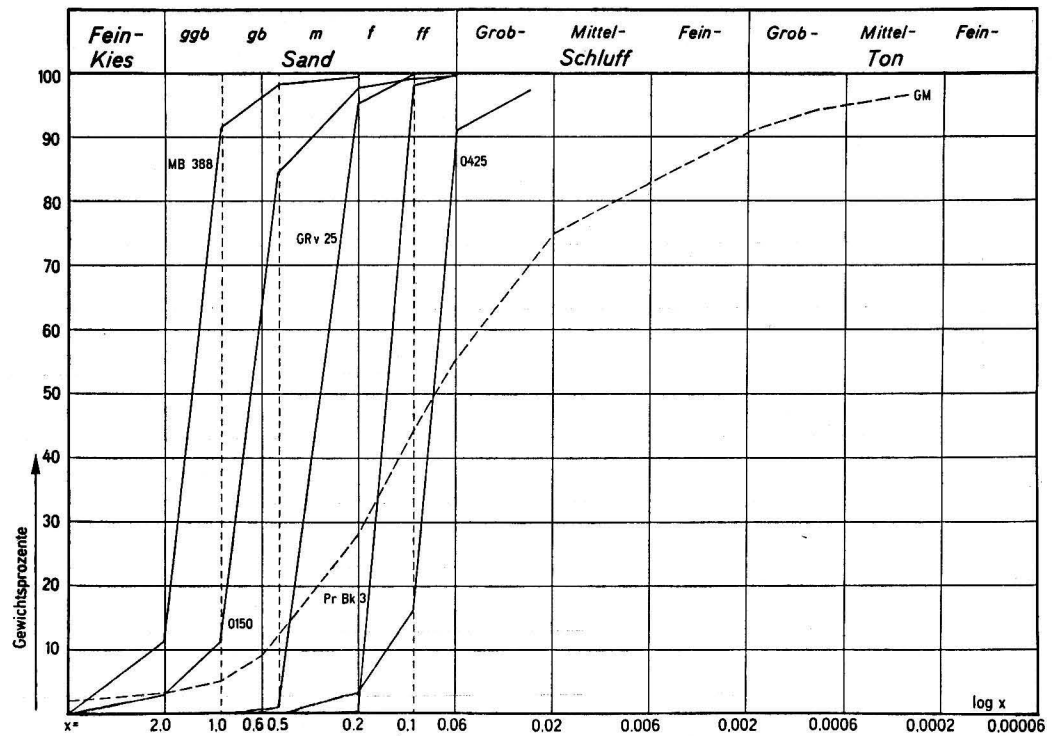


Abb. 14. Summenkurven maximal sortierter Sande der westlichen Ostsee

Stat.	Sand	>2,0	>1,0	>0,5	>0,2	>0,1	>0,06	<0,06 mm	Gebiet	Tiefe
MB 388	ggb	11,7	80,0	6,4	1,5	0,4	—	— %	Rand der Abrasionszone südlich Nysted	10,9 m
0150	gb	3,5	7,9	73,1	12,7	1,7	0,5	0,6	Rand der Abrasionszone südwestlich Gedser	11,0 m
GR 25	m	—	—	1,4	94,4	3,7	0,4	0,1 %	Gedser Rev	13,3 m
PB 3	f	—	—	0,1	0,3	97,5	2,0	0,1 %	Prerow Bank	6,0 m
0425	ff	—	—	—	3,9	12,7	74,7	8,7 %	Falster-Rügen Platte, 11 sm südwestlich Möens Klint	18,5 m



Der dauernde Nachschub von den Abrasionsflächen her bringt es mit sich, daß gröbere Sande dadurch schwächer sortiert erscheinen, daß sie stets einen Anteil feineren Sandes enthalten, der sich auf dem Wege nach dem küstenfernen Sandablagerungsgebiet befindet. Die Zone größeren Sandes ist somit die Durchfrachtungszone für alle feineren Kornarten.

Bei mittlerem Sand (m) überschreitet der Anteil der Hauptfraktion häufig 70%, des öfteren 80% und an mehreren Stationen sogar 90%. Feiner Sand (f) findet sich häufig über 80% und des öfteren über 95% rein. Bei sehr feinem Sand (ff) werden trotz der geringen Intervallbreite von nur 0,037 mm 70% des öfteren überschritten (Abb. 14).

Bei groben und sehr groben Sanden (gb, ggb) erreichen die Maximalwerte der Hauptfraktion zwar 74% und 80%, jedoch ist die Anzahl der Proben mit Anteilen über 60% nur beschränkt. Ein Gebiet mit häufigerem Vorkommen von Grobsand stellt die Rönne Bank dar. Die geringere Sortiertheit der groben Sande wird teils durch die größeren Intervallbreiten wettgemacht. Es gilt jedoch zu beachten, daß grober und sehr grober Sand im Geschiebemergel mit nur 3,1% bzw. 2,4% beteiligt sind. Grobe Sande finden sich aus diesem Grunde seltener als mittlere und feine Sande. Sie bleiben in der Regel auf eine schmale Zone am Rande der Abrasionsflächen beschränkt.

*Im Hinblick auf sämtliche im Untersuchungsbereich entnommenen Sandproben wird bei einem Anteil der Hauptfraktion von 65% und darüber ein Sand in dieser Fraktion als „rein“ bezeichnet.*

Zwischen den reinen Fraktionen sind alle Übergänge zu verzeichnen. In der Regel übertrifft bei Gemischen von groben und mittleren Sanden die Summe der Hauptfraktion und der stärksten Nachbarfraktion 80% sowie bei Korngemischen von mittleren und feinen Sanden 90% des Gesamtgewichts.

Spuren grob- und mittelkörnigen Sandes finden sich selbst in hochsortierten Feinsanden dadurch, daß bei seltenen schweren Stürmen das bereits zur Ruhe gekommene Sediment wieder aufgewirbelt und mit einzelnen Körnern der größeren Fraktionen durchsetzt wird. Feinschichtungen innerhalb der Sande werden durch einzelne schwere Stürme hervorgerufen (GRIPP 1958).

Mittelkies, Feinkies und sehr grober Sand folgen gut sortiert nacheinander in schmalen Bändern am Rande von Abrasionsflächen. Diese 3 Fraktionen wurden bei der Farbgebung zusammengefaßt und durch ein Orange gekennzeichnet. Sie lassen sich wenn nötig mit Hilfe der Abkürzungen MK, FK und ggb. unterscheiden.

Grobkiesflächen (GK), Steinpflaster (Stpfl) und Blockfelder (Blf) finden sich in den Zentren der Abtragungsgebiete. Sie werden fast ausschließlich im Bereich pleistozäner Eisrandlagen angetroffen und sind infolge der marinen Abrasion an Ort und Stelle umgelagert worden.

Kies und Steine bilden auf den der mecklenburgischen Küste vorgelagerten Abrasionsflächen eine 10 bis 30 cm starke Decke über dem Geschiebemergel. Auf dem Gedser Rev liegt Kies in einer 50 bis 60 cm starken Schicht und wird schon seit langer Zeit für Bauzwecke erworben. Es läßt sich nicht entscheiden, welche Anteile an Kies und Steinen auf eine ursprünglich über dem Mergel vorhandene Ablationsmoräne und andererseits auf das durch Abrasion des Geschiebemergels ausgewaschene, grobe Material entfallen.

Die infolge des Abtransports der feinkörnigen Sande und Schluffe auf Abrasionsflächen angereicherten gröberen Kornarten bilden das „Restsediment“. Die Unsortiertheit des Restsediments, in denen 3 bis 4 grobe Fraktionen mit annähernd gleichen Anteilen auftreten können, bringt es mit sich, daß es sich nicht durch die Symbole einfacher Gemische benachbarter Fraktionen wie FK/ggb, ggb/gb, oder gb/m bezeichnen läßt. Deshalb sollte der gesamte Bereich der hauptsächlich beteiligten Fraktionen dadurch gekennzeichnet werden, daß die

Abkürzungen für die beiden äußeren Fraktionen durch einen Bindestrich verbunden werden z. B. MK-gb oder FK-m (Tafel 1).

Die Kurven für Restsedimente liegen naturgemäß oberhalb der Kurve des Geschiebemergels (Abb. 15). Sie erweisen sich in den größeren Fraktionen als steiler und im Bereich von Feinsanden und Schluffen als flacher.

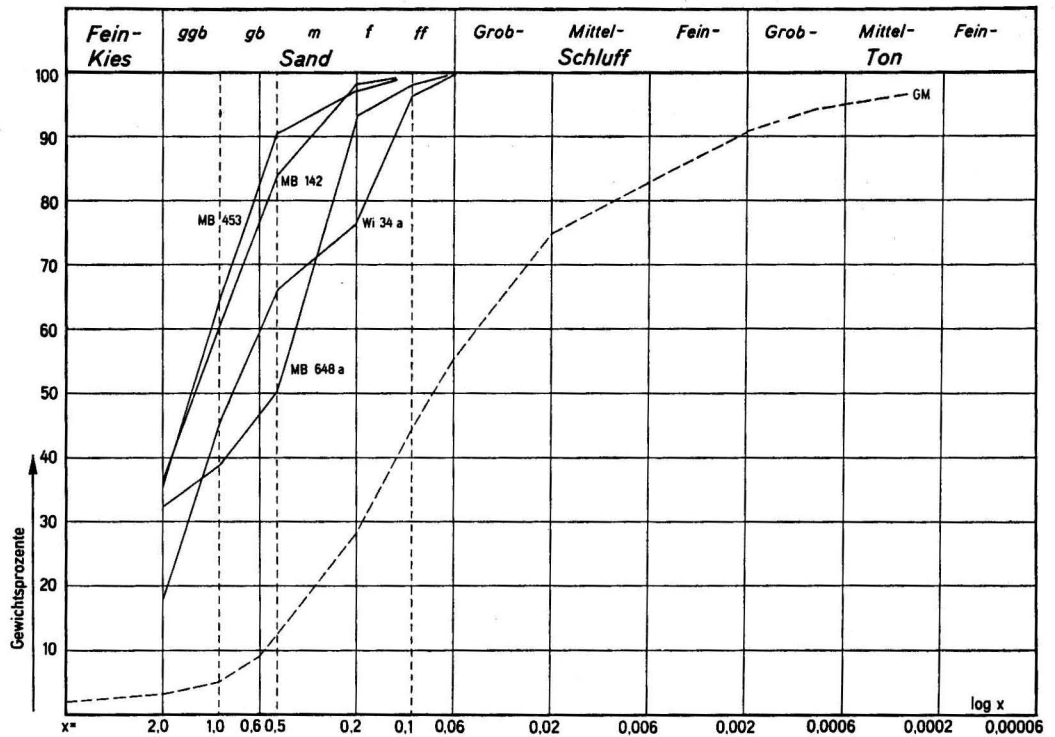


Abb. 15. Summenkurven von Restsedimenten auf Abrasionsflächen

Stat.	Sediment	>2,0	>1,0	>0,5	>0,2	>0,1	>0,06	<0,06 mm	Gebiet	Tiefe
MB 453	FK-gb	35,6	28,8	25,9	6,6	2,9	—	— %	Mecklenburger Bucht vor Kühlungsborn	11,3 m
MB 142	FK-m	36,3	24,6	22,9	14,7	0,7	0,8	— %	Mecklenburger Bucht nördlich Hannibal	11,0 m
MB 648a	m//FK	32,6	6,6	11,3	43,5	4,0	2,0	— %	Darßer Schwelle vor Dierhagen	7,4 m
Wi 34a	f//FK-m	18,6	27,6	20,4	10,1	19,8	3,4	0,1 %	Mecklenburger Bucht vor dem Offen Tief	10,8 m

Bei ruhiger See wurde wiederholt beobachtet, daß sich über das grobe Restsediment ein Schleier von Feinsand oder Mittelsand gelegt hatte, den der nächste Sturm wieder aufwirbeln und weiterverfrachten würde. In der Kurzbezeichnung ist eine schwache Sanddecke über dem Restsediment dadurch angedeutet worden, daß die Symbole für Sand und Restsediment durch einen doppelten Schrägstrich getrennt sind z. B. f//FK-m (Lies: Feiner Sand über Fein-

kies bis Mittelsand). In diesem Fall erscheint die Kurve des Restsediments zweifach gebrochen. Auf den Konvex-Knick folgt noch ein Konkav-Knick, wie ihn in Abb. 15 die Kurven für die Stationen MB 648a und Wi 34a erkennen lassen.

**d) Besondere Korngemische beim unvermittelten Übergang von größerem Sediment zu Schlick am Rande von Abrasionsplatten**

In dem Falle, daß an den Rändern von Abrasionsplatten im Fehmarn Belt, in der Mecklenburger Bucht und an den Rändern der Kadet Rinne Kiesflächen, Stein- und Blockfelder unmittelbar an das Schlickgebiet grenzen, ergeben sich vielfältige Kombinationen, die sich zum Teil nur mit Hilfe einer dreifarbigigen Schraffur darstellen lassen (s. Tafel I, Gruppe V). Dies ist notwendig, wenn Sand oder Kies, der als schlickig gilt, sich aus zwei benachbarten Fraktionen zusammensetzt, wie z. B. mittlerer bis feiner Sand schlickig (m/f sk). Eine einfache Lesbarkeit ist insofern gewährleistet, daß zuerst die hellblaue Schraffur einfacher Breite als Beimengung ins Auge fällt. Erst dann wird das Korngemisch des Hauptsediments dadurch richtig erkannt, daß die zwischen den blauen Schraffen gelegene Doppelschraffur für Sand oder Kies von links nach rechts bzw. von oben nach unten gelesen wird.

Von größeren Beimengungen im Schlick wird jeweils nur die größte Fraktion dargestellt unter der Bedingung, daß ihr Anteil an der Gesamtprobe 10% und darüber beträgt.

Im Schlick vorhandene größere Steine werden durch die bereits erwähnten Symbole bezeichnet.

Im Schlick untergehende Steinschichten lassen sich durch kleine schwarze Kreise andeuten, die in der Gruppe der Signaturen für den Untergrund zu finden sind.

## 2. Sedimente des Untergrundes (Tafel II)

Für die Beurteilung der Sedimente der Oberfläche ist es unerlässlich, die Kornzusammensetzung des Untergrundes zu kennen. Der Einfluß des Untergrundes in Form von Beimengungen muß bekannt sein, um örtliche Besonderheiten in Hinblick auf das Gesamtbild und die gesetzmäßige Abfolge der Sedimentzonen richtig zu beurteilen. Aus diesem Grunde wird im folgenden ein kurzer Überblick über die wichtigsten Gesteine des Untergrundes geboten.

### a) Geschiebemergel (GM)

Geschiebemergel findet sich im Untergrund am weitesten verbreitet. Seine durchschnittliche Kornzusammensetzung ist insofern von besonderem Interesse, als Geschiebemergel das hauptsächlichste Ausgangsgestein für die mineralischen Anteile der rezenten Sedimente der westlichen und südlichen Ostsee darstellt. Nach der Auslese der Geschiebe über 6,3 mm ergeben sich folgende mittleren Prozentwerte:

FK	ggb	gb	m	f	ff	GSf	MSf	FSf	T
>2,0	>1,0	>0,6	>0,2	>0,1	>0,06	>0,02	>0,006	>0,002	<0,002 mm
3,6	2,4	3,1	18,3	16,7	11,8	19,4	8,9	7,0	8,8%

Diese Werte liegen der mittleren Summenkurve für Geschiebemergel zugrunde, die bei der Diskussion der Kurven der marinen Sedimente zum Vergleich herangezogen wurde. Die Mittelwerte wurden auf Grund der Analysen von 18 Geschiebemergelproben aus verschiedenen Seegebieten errechnet.

Die CaCO<sub>3</sub>-Anteile schwanken zwischen 10% und 25%. Der Durchschnitt liegt bei 15,6%.



Auf Tafel I in der Gruppe der Sedimentgesteine des Untergrundes wird Geschiebemergel, der stellenweise an der Oberfläche oder unter einer wenige Dezimeter starken Sand- oder Kiesdecke ansteht, durch eine senkrechte schwarze Schraffur dargestellt.

In der Nähe der oberen Schlickgrenze bildet aufgeweichter Geschiebemergel eine 10 bis 20 cm starke Schicht, die einem sandigen Schlick mit einzelnen Steinen ähnelt. Ein ausgedehntes Gebiet derartigen Pseudoschlicks liegt nordwestlich von Fehmarn vor dem Eingang des Großen Belts.

#### b) Schluff (Sf)

Schluff tritt in der westlichen und südlichen Ostsee als marines Sediment nicht in Erscheinung. Dagegen findet sich Schluff im Untergrund als limnisches Sediment hoch sortiert mit einem  $\text{CaCO}_3$ -Gehalt von 10 bis 12% am Rande der Mecklenburger Bucht.

Schluff im Untergrund gibt sich bisweilen an der Oberfläche durch die Beimengung von Schluff zu feinkörnigen Sanden zu erkennen. Im Vergleich zum schlickigen Sand fehlt dem schluffigen Sand jegliche Bindigkeit. Er erscheint hell und niemals schlickig grau. Bei umgelagerten Schluffen und schluffigen Sanden sinkt der Kalkgehalt unter 3%.

Die am Rande der Mecklenburger Bucht unter Laaland und vor dem Südausgang der Kadet-Rinne entnommenen Stechrohrkerne bestehen vorwiegend aus Schluffen, in denen der Anteil der Hauptfraktion in der Regel über 65 Gew.-% ausmacht (Abb. 16). Es ist zu bemerken, daß in limnischen Ablagerungen des Untergrundes zwischen den 3 Schlufffraktionen Übergänge der gleichen Art wie bei Sanden angetroffen werden (s. C. 3).

Schluffe unterscheiden sich von Schlick deutlich durch eine geringe Intervallbreite, da bei gut sortierten Schluffen die Summe der Hauptfraktion und ihrer stärksten Nachbarfraktion 80% und darüber beträgt (s. Anhang, Tabelle 8 und 9).

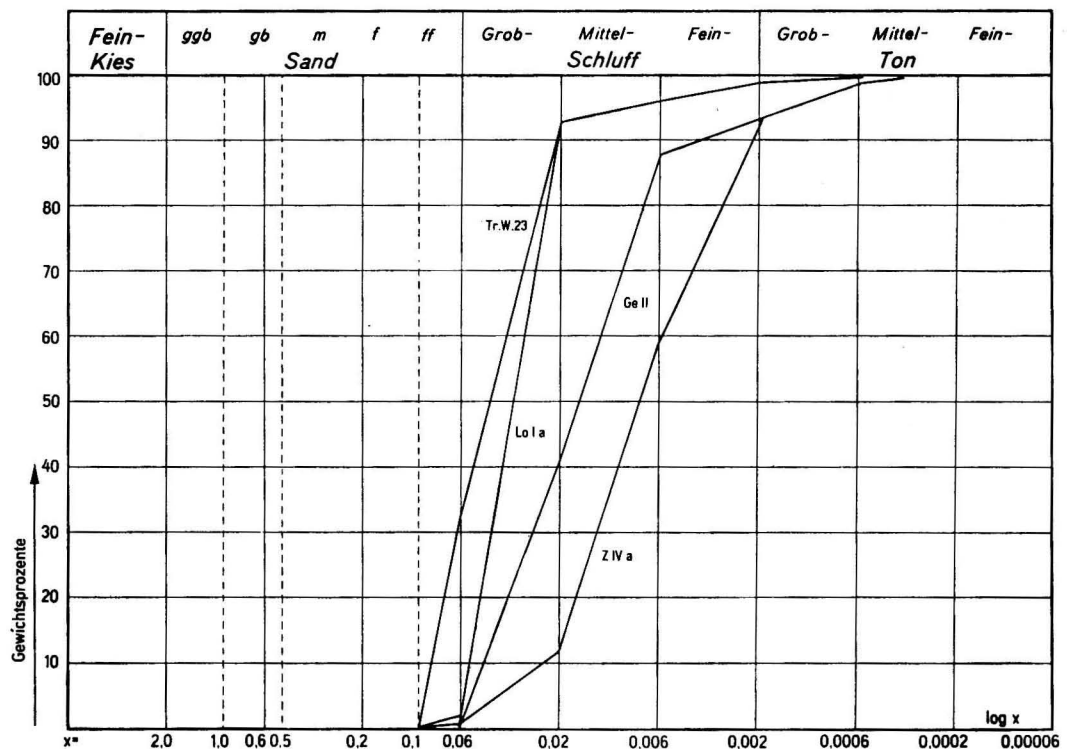


Abb. 16. Summenkurven von Schluffen aus Stechrohrkernen und der einzigen Oberflächenprobe

Station	Schicht	Sediment	0,1-0,06	>0,02	>0,006	>0,002	<0,002 mm	Seegebiet	Tiefe
Lo Ia	0,10-0,17 m	GSf	2,8	91,2	2,7	0,4	2,9%	Nordrand der Mecklenburger Bucht	22,5 m
Z IVa	2,70-2,85 m	M/FSf t	0,9	11,0	47,2	33,5	7,4%	Zentraler Teil der Mecklenburger Bucht	25,1 m
Ge II	3,70-3,75 m	M-GSf t	0,8	40,9	45,3	6,0	7,0%	Vor dem Südausgang der Kadet Rinne	22,2 m
TrW 23	Oberflächenprobe	GSf ff	32,4	60,6	2,7	1,9	2,4%	Tromper Wick	19,0 m

Die Abmessungen in Spalte 2 bezeichnen die Schicht innerhalb des Stechrohrkerns in m, wobei 0 m der Oberfläche des Meeresgrundes entspricht.

c) Ton (T)

Ein Blick auf die Summenkurven verschiedener Tonproben des Untergrundes läßt erkennen, daß sich dieselben von der mittleren Kurve des Geschiebemergels ebenso weit entfernen wie das entgegengesetzte Extrem der groben Restsedimente (Abb. 17).

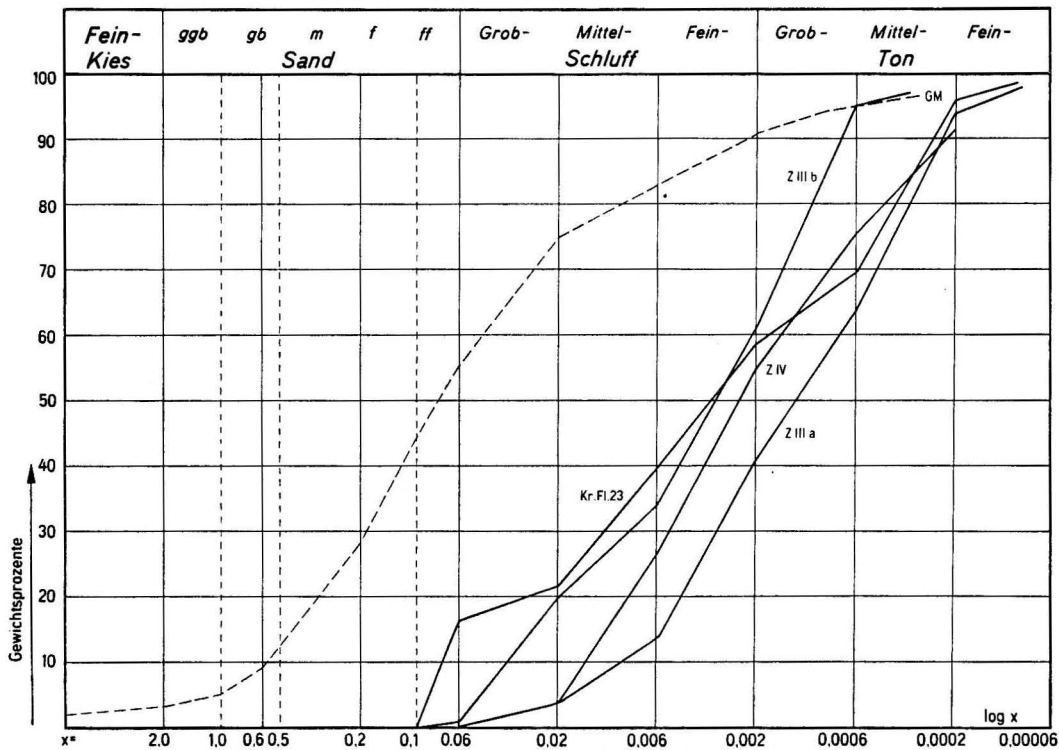


Abb. 17. Summenkurven von Tonproben aus Stechrohrkernen

Station	Schicht	Sediment	0,1-0,06	>0,02	>0,006	>0,002	>0,0006	<0,0006 mm	Seegebiet	Wasser-Tiefe
Z IIIa	3,18-3,23 m	grauer Ton M/GT fsf	—	4,3	9,2	27,4	23,0	36,1%	Zentraler Teil der Mecklenburger Bucht	24,8 m
Z IIIb	2,93-2,99 m	grauer Ton GT gsf	0,9	18,9	14,4	27,9	33,4	4,5%	Zentraler Teil der Mecklenburger Bucht	24,8 m
Z IVa	3,00-3,12 m	Bänderton T msf	0,2	3,5	22,9	28,0	18,9	26,5%	Zentraler Teil der Mecklenburger Bucht	25,1 m
AB 28a	2,40-2,45 m	rosa Ton M/FT	0,4	2,4	3,0	7,6	25,4	61,2%	Westrand des Arkona Beckens	45,0 m

Die Abmessungen in Spalte 2 bezeichnen die Schicht innerhalb des Stechrohrkerns in m, wobei 0,0 m der Oberfläche des Meeresgrundes entspricht.

Als Absatz der feinsten Trübe, die von aufgearbeitetem Geschiebemergel stammt, kommt Ton nicht in Frage. In der als Flachmeer zu bezeichnenden Ostsee sedimentiert Feinschweb, der sich zu mehr oder weniger gleichen Teilen aller Fraktionen vom Feinstsand bis Mittelton und einem geringen organischen Anteil zusammensetzt, nur als Schlick bzw. Schlamm. Ton als limnisches Sediment sowie Schlick und Schlamm als marine Sedimente unterscheiden sich eindeutig durch den Kalkgehalt, H<sub>2</sub>S-Geruch, Plastizität und Diatomeen. Schlick und Schlamm zerfließen, während dies bei Ton nicht der Fall ist.

Bei den blaugrauen bzw. rosafarbenen gebänderten Tonen aus der Mecklenburger Bucht und von der Darßer Schwelle handelt es sich um schluffreiche Grob- bis Mitteltonen, deren CaCO<sub>3</sub>-Gehalt um 15% schwankt.

Die Feinkörnigkeit der von BRANNOV (1925) beschriebenen Tone aus dem Kleinen Belt mit Anteilen der Tonfraktion über 80% wurde nur bei den rosa Tonen aus dem Arkona-Becken, aus der 40 m-Mulde nördlich Kriegers Flak und aus Bornholmshgat erreicht. Dieser spätglaziale Ton weist im Mittel über 70% unter 0,002 mm auf. Es handelt sich um einen Mittel- bis Feinton, dessen CaCO<sub>3</sub>-Gehalt um 11% schwankt. Der Anteil an organischer Substanz liegt unter 2%. Die mittlere Kornverteilung dieses für den Untergrund der mehr als 40 m tiefen Mulden der Ostsee charakteristischen Sediments ist folgende:

ff	GSf	MSf	FSf	GT	M + FT
0,1–0,06	>0,02	>0,006	>0,002	>0,0006	<0,0006 mm
1,2%	5,3%	5,8%	13,5%	23,9%	50,3%

Der im Spätglazial abgesetzte Ton kann als Diatomeen- und fossilarm bezeichnet werden. In Stechrohrkernen fanden sich bisweilen im fetten Ton zentimeterstarke, hellgelbliche Schlufflinsen und vereinzelt kleine Steine.

Die Untersuchung von etwa 50 Tonproben ließ erkennen, daß die Unterscheidung von Grob-, Mittel- und Feinton an Hand der Kornverteilung sehr wohl möglich ist (s. Anhang, Tab. 10 und 11). Ähnlich wie in dem für die marinen Sedimente vorgeschlagenen Schema ergibt sich folgende Gliederung:

FT	Feinton, Hauptfraktion: Feinton $\geq$ 35%
F/MT	Fein- bis Mittelton, Hauptfraktion: Feinton 25–34%, stärkste Nebenfraktion: Mittelton > 20%
M/FT	Mittel- bis Feinton, Hauptfraktion: Mittelton 25–34%, stärkste Nebenfraktion: Feinton > 20%
MT	Mittelton, Hauptfraktion: Mittelton $\geq$ 35%
M/GT	Mittel- bis Grobton, Hauptfraktion: Mittelton 25–34%, stärkste Nebenfraktion: Grobton > 20%
G/MT	Grob- bis Mittelton, Hauptfraktion: Grobton 25–34%, stärkste Nebenfraktion: Mittelton > 20%
GT	Grobton, Hauptfraktion: Grobton: $\geq$ 35%
GT msf	Grobton mittelschluffig, 25–44% < 0,002 mm Grobtonanteil: 20–34%, größte Fraktion: Mittelschluff $\geq$ 10%

Der Übergang zwischen Ton und Schluff vollzieht sich ähnlich wie der Übergang zwischen Sand und Grobschlick.

Übergänge zwischen Schlick und Schlamm einerseits sowie Schluff und Ton andererseits entfallen, da sich beide Sedimente nach ihrer Bildung im marinen bzw. limnischen Milieu unvereinbar gegenüberstehen. Der Wechsel der Hauptfraktion in marinen Sedimenten führt vom Schlick zum Schlamm. Das möge gelten, wenn auch Mittelschlick äußerlich einen tonigen Charakter aufweist (s. C. 3).

Angesichts ähnlicher Kornverteilungskurven von schlammigem Schlick und tonigen Schluffen sind bei der Ansprache des Sediments die Ergebnisse der  $\text{CaCO}_3$ - und C-Bestimmung heranzuziehen.  $\text{CaCO}_3$ -Werte über 3% sprechen für tonigen Schluff, während geringere Werte Schlick ausweisen. Bei tonigen Schluffen sinkt der Anteil der organogenen Substanz in der Regel unter 3%, während Schlick, wie bereits erwähnt, Werte um 7% aufweist.

#### d) Litoriner Schlick oder Cardium-Klei

Bei dem durch eine blaue Schraffur zu kennzeichnenden Cardium-Klei handelt es sich um einen oliv-grauen, an Cardien reichen Schlick im Bereich alter Mündungen und Seegatts (Abb. 18). Der in geringer Wassertiefe im brackisch-marinen Milieu zum Absatz gelangte litorine Klei reicht heute vor der Küste bis in etwa 10 m Wassertiefe. Er wurde vor Warnemünde, vor den früheren Durchlässen am Vordarß, die heute noch durch die Altwässer der Hundsbeck und Werre angedeutet werden, vor der Straminke ostwärts Zingst wie auch vor der Gellenmündung gefunden. Er wurde ferner zwischen den Inseln Hiddensee und Rügen gelegenen Bucht des Libben bis in 9 m Tiefe angetroffen.



Abb. 18. Litoriner Cardium-Klei im Bereich der alten Warnowmündung in 10 m Wassertiefe am Meeresgrund anstehend

Dieses nicht zu verkennende, in den Profilen an unserer Küste charakteristische Sediment war von GEINITZ anlässlich des Aushubs des Neuen Stroms bei Warnemünde (1902) und im Hafen Wismar (1903) als „Litorina-Ton“ bezeichnet worden. Er enthält in überwiegender Zahl *Cardium edule*, ferner *Mytilus*, *Scrobicularia* und *Hydrobien*. Der einen starken  $\text{H}_2\text{S}$ -Geruch aufweisende, feste Schlick ist von blättriger Struktur. Er besitzt im frischen Zustand eine oliv-graue Farbe und erscheint getrocknet hellgrau.

GEIB (1944) fand denselben Klei vor dem an der pommerschen Küste gelegenen Leba-See und kennzeichnete ihn als Sediment, das im Schutze der ersten Hakenbildungen zum Absatz gelangt sei. Auch GEIB hatte den charakteristischen Klei bis in etwa 10 m Tiefe verfolgen können. Das einheitliche Vorkommen an der mecklenburgischen und pommerschen Küste spricht dafür, daß dieses Sediment erst zur Ablagerung gelangen konnte, als durch die Verlangsamung des eustatischen Meeresspiegelanstiegs im jüngeren Atlantikum (VII) und Subboreal (VIII) das Wachstum von Haken und Nehrungen erfolgen konnte. Die Steilheit der Transgressionskurve im frühen Atlantikum läßt annehmen, daß die Bildung von Haken und Nehrungen erst möglich war, als der Meeresspiegel 12 m unter NN erreichte. Im Schutze der mit dem weiteren allmählichen Anstieg des Meeres rückwärts verlagerten Haken und Nehrungen gelangte der für die alten Mündungen kennzeichnende Schlick immer höher bis etwa 3 m unter NN zur Ablagerung.

Die mittlere Kornverteilung von 12 verschiedenen Proben des vor Warnemünde anzutreffenden litorinen Kleis entspricht derjenigen eines Grob- bis Mittelschlicks (G-MSk).

>0,1	>0,06	>0,02	>0,006	>0,002	>0,0006	<0,0006 mm
6,1%	7,4%	33,3%	31,6%	9,7%	6,2%	5,7%

Der  $\text{CaCO}_3$ -Gehalt von 10 Proben betrug im Mittel 2,3%, der Anteil von C-org. 7,25%. Der Mittelwert der organischen Substanz kann demzufolge bei etwa 12,3% angenommen werden.

Einige Mollusken im litorinen Klei wurden freundlicherweise durch Herrn Diplomgeologen LAZAR vom Geologischen Zentralinstitut Berlin bestimmt. *Cardium edule* LINNÉ fand sich zahlreich, *Hydrobia ventrosa* (MONTAGU) und *Hydrobia ulvae* (PENNANT) seltener. Die Artenarmut der Molluskenfauna ist auffallend. *Hydrobia ulvae* weist auf einen Salzgehalt von etwa 10‰ und damit auf ein brackisch-marines Milieu. Typische Süßwassermollusken wie *Bithynia tentaculata*, *Valvata piscinalis* und *Theodoxus fluviatilis* fehlen. Damit scheidet der brackisch-limnische Bereich aus. In diesem Zusammenhang sei auf die ausführlichen Angaben über die mineralische Zusammensetzung sowie den Inhalt an Mikro- und Makrofossilien des *Cardium*-Kleis an der niederländischen Küste nordöstlich von Amsterdam von ZWILLENBERG und HENDRICKS (1954) verwiesen.

#### e) Torf

Torfvorkommen werden selten an der Oberfläche des Meeresgrundes angetroffen. Sie finden sich in der westlichen und südlichen Ostsee meist unter einer Sanddecke von einigen Dezimetern Stärke und in Mulden bisweilen unter mehreren Metern Schlick. Bei Torfen bekannten Alters werden zur Signatur die Bezeichnungen der waldgeschichtlichen Abschnitte hinzugesetzt.

Zahlreiche Torfvorkommen um Fehmarn sind in der Meeresgrundkarte von BRESSAU (1957) enthalten.

Die im zentralen Teil der Mecklenburger Bucht unter mehreren Metern marinen Schlicks und limnischer Gytta angetroffenen, autochtonen borealen Gytta-Torfe (Va) lassen eine geschlossene Torfdecke über den prä-litorinen Sedimenten annehmen (Tafel II). Auf der vor dem Südausgang der Kadet-Rinne gelegenen, flachen Barre sind Torfe verschiedenen Alters zu verzeichnen. Alleröd-Torfe finden sich dort in etwa 20 m Tiefe unter einigen Dezimetern kalkhaltigen, sehr feinkörnigen Sandes. Andere Proben wurden auf Grund des Pollenbestandes ins Boreal und an den Beginn des Atlantikums gestellt. Bei Tonne 2 der Ansteuerung Warnemünde liegt ein etwa 2 m mächtiger, aus der jüngeren Dryas stammender Carextorf zwischen 19 und 21 m. Ein 40 bis 60 cm starkes präboreales Waldtorflager fand sich in der ins Arkona



Becken führenden Rinne nordöstlich des Plantagenet Grundes unter 1 m Schlick und sehr feinem Sand bei -29 m NN (KOLP 1965, Karte 2).

Die am Westrand des Arkona Beckens in Tiefen zwischen 38 und 48 m angetroffenen Schwemmtorfe erwiesen sich vorerst in Einzelspektren als präboreal oder älter.

Eine vom Verfasser erst 1963 südlich Bornholm aus 60 m Tiefe im ungestörten Schichtverband gewonnene autochtone Moostorfprobe wurde auf Grund der pollenanalytischen Befunde von KROG und MAJEWSKI als präboreal bezeichnet.

#### f) Steinlagen unter einer Sanddecke

Stein- und Geröllagen, die unter einer Sanddecke bei Sondierungen mit Spülrohren getroffen und wiederholt durchstoßen wurden, ließen verschiedene Schlußfolgerungen zu.

Bei Geröllagen unter Sand unmittelbar auf Geschiebemergel kann es sich um inzwischen inaktiv gewordene Abrasionsflächen handeln. Z. B. findet sich ein Steinpflaster unter einer 1 bis 2 m starken Sanddecke nördlich der Halbinsel Wittow (Rügen) in Tiefen zwischen 25 und 35 m im Bereich einer älteren Abrasionsfläche.

Mehrere Steinlagen in untermeerischen Sandrücken weisen offenbar auf untergegangene Strandwälle, z. B. in den flachen Sandkuppen des Plantagenet Grundes sowie im Bereich der durch die in der Gellen-Bucht häufig einspringende 6-m-Tiefenlinie gekennzeichneten Sandrücken. Bei 5 m tief geführten Sondierungen wurden auf dem Plantagenet Grund und in der Gellen-Bucht mehrere Steinlagen in Abständen von einigen Dezimetern durchstoßen, bis die Sondierungen in litorinem Schlick und darunter auf Steinen oder Geschiebemergel endeten.

Bei Steinpackungen vor submarinen, alten Ufern, die mit der Spülsonde nicht durchstoßen werden können, handelt es sich meist um stärkere Kies- und Geröllagen alter Strandterrassen. Solche Geröllagen wurden am Rande der Mecklenburger Bucht und am Sporn des Gedser Revs bei -23 m NN unter mehreren Metern Schlick und Sand angetroffen.

### 3. Durch den Untergrund bedingte Korngemische

Ton und Schluff als Sedimente des Untergrundes können sich in Sanden des Hangenden durch Beimengungen zu erkennen geben.

Sehr feiner toniger Sand (ff t) läßt sich nur an Hand der Kornverteilung durch einen Tonanteil von 5 bis 24%  $< 0,002$  mm ausweisen. Er besitzt eine graue Farbe und wirkt trockener als schlickiger Sand und nicht fettig oder schmierig. Jeglicher  $H_2S$ -Geruch fehlt.

Feinkörniger, toniger Sand findet sich am Grunde von Mulden, die nicht mit Schlick aufgefüllt werden. Es handelt sich um reichlich mit Sand vermengten, aufgeweichten Ton z. B. in der über 40 m tiefen Mulde nördlich von Kriegers Flak.

Sehr feiner, schluffiger Sand (ff sf) weist auf Schluff im Untergrund. Ein ausgedehnteres Vorkommen ist etwa 10 sm südlich der Insel Möen am Rande des von der 20-m-Tiefenlinie begrenzten Schlickgebietes gelegen.

Sehr feine schluffige Sande besitzen eine gelbliche Färbung. Sie enthalten einen Anteil von 5 bis 24% Schluff. Schluffige Feinstsande zerfließen im frischen Zustand und bilden eine an der Oberfläche glänzende Schicht.

ff t	sehr feiner Sand tonig, 65% und darüber sehr feiner Sand, 5-24% $< 0,002$ mm
ff sf	sehr feiner Sand schluffig, 65% und darüber sehr feiner Sand, 5-24% Grobschluff; 0-5% $< 0,02$ mm

Als Beispiele seien 3 Proben aus der Bornholm Mulde angeführt.

Probe	Sand			Schluff			Ton
	>0,2	>0,1	>0,06	>0,02	>0,006	>0,002	<0,002 mm
37 o	0,9	12,1	74,6	12,9	2,0	1,1	6,4% ff t
48 f	0,4	7,6	74,4	12,8	1,9	1,2	1,7% ff sf
55 m	0,6	7,9	75,7	11,6	1,8	1,4	1,0% ff sf

### C. Sedimentzonen und fazielle Gruppierungen

#### 1. Der Zusammenhang zwischen der zonalen Anordnung der Sedimente und der Wellenwirkung am Meeresgrund

Die Unterscheidung sedimentologischer Fazies am Grunde der westlichen und südlichen Ostsee ergibt sich zwanglos an Hand der Sedimentzonen.

Die Verwendung des Begriffs „Fazies“ erscheint insofern gerechtfertigt, als eine enge Wechselbeziehung zwischen dem Sediment und der Wellenwirkung die zonale Anordnung bedingt. Der Begriff „Fazies“ setzt voraus, daß es sich um die Kennzeichnung einer Wechselbeziehung zwischen dem Gegenstand fazieller Unterscheidungen und einer Ursache von weltweiter Verbreitung handelt, die zu einer zonalen Anordnung führt.

So lassen sich petrographische Fazies auf Thermik und Gebirgsdruck zurückführen, und die Unterscheidung mariner Biofazies stützt sich auf überall vorhandene Ursachen wie Halinität, Tiefenstufen und Substrat. Die Wechselbeziehungen finden in der Abfolge von Gesteinszonen und Zonen mit typischen Lebensgemeinschaften des Benthos Ausdruck.

Im Flachmeerbereich bestehen engste Beziehungen zwischen der benthonischen Lebewelt und dem Sediment als Nahrung und Lebensmedium. WOHLBERG, PLATH und KÖNIG unternahmen es in den dreißiger Jahren, im nordfriesischen Wattengebiet „sedimenttypische Tiere“ zu suchen und in Gruppen zusammenzufassen. Die flächenmäßige Verbreitung derartiger Tiergruppen spiegelt die Verteilung der Sedimente im Wattengebiet wider. Die biologischen Aufnahmen erfolgten in Verbindung mit physikalisch-chemischen Untersuchungen der Sedimente durch HERMANN (1943). Die Arbeiten wurden nach dem Kriege fortgeführt (MÜLLER 1957, SCHÄFER 1962).

Angesichts der erfolgreichen Aufnahmen vor der Nordseeküste, die in eindrucksvollen Übersichtskarten die Zusammengehörigkeit typischer Tiergruppen und Sedimentzonen vor Augen führen, ist es zu wünschen, daß auch für die westliche und südliche Ostsee durch eine engere Anlehnung an die von PRATJE gekennzeichneten Sedimentzonen und weitere, an Hand des in dieser Arbeit gebotenen Schemas einzuschaltende Übergangszonen eine Verfeinerung der faziellen Unterscheidungen erzielt wird.

Bei den Sedimentzonen gezeitenloser Flachmeere handelt es sich um die ufernahe Sandwanderzone, die Abrasionszone, die küstenferne Sandzone, die sedimentarme Zone und die Schlickgebiete. Geschiebemergelauftragungen mit grobem Restsediment als Bedeckung inmitten von Sand- und Schlickgebieten sind den Abrasionsflächen zuzurechnen und in die Abrasionszone einzubeziehen.

Diese Zonen sollten in jeder Meeresgrundkarte durch eine geeignete Darstellung des Kornmischtes einheitlich Ausdruck finden. Das in dieser Arbeit vorgeschlagene Schema der Darstellung der Sedimente der westlichen und südlichen Ostsee dient in erster Linie diesem Zweck.

Darüber hinaus bietet jedes der farbigen Symbole der Gruppen I bis III auf Tafel I die Möglichkeit, zusätzliche Zonen auszuzeichnen. Zum Beispiel folgen konzentrisch zum zen-

tralen Mittelschlick-Gebiet der Mecklenburger Bucht die Übergangszonen von M/GSk, G/MSk, GSk, GSk f, f sk, f, f/m und m nacheinander.

Es ist die Aufgabe des jeweiligen Bearbeiters für mehr oder weniger abgeschlossene Seegebiete wie die Kieler Bucht, Mecklenburger Bucht, Darßer Schwelle, Falster-Rügen Sandplatte, das Arkona Becken und die Oder Bucht der Anordnung der Sedimentzonen im einzelnen Ausdruck zu verleihen.

In den Mulden der westlichen und südlichen Ostsee bildet die konzentrische Anordnung der Schlickzonen die Regel. Dagegen wird das Bild der Sedimentverteilung an den Rändern der Mulden und auf den Schwellen durch verschiedene Einflüsse abgewandelt. Das submarine Relief, die Sedimente des Untergrundes, die Küstenkonfiguration und Exposition eines Seegebietes zu den vorherrschenden Winden sowie die größtmöglichen Wellen spielen eine Rolle. Dabei ist die Wellenwirkung von vorrangiger Bedeutung.

In einem früheren Aufsatz des Verfassers über Abrasion, Sedimentumlagerung und -entmischung durch Wellenwirkung am Meeresgrund (KOLP 1958) wurde auf die Bedeutung der Rippelbildung hingewiesen und der Mechanismus der Wasser- und Sedimentbewegung dargestellt. Die inzwischen erfolgten Veröffentlichungen von REINECK (1960, 1961) vervollständigten unsere Kenntnis durch Abbildungen der in den Rippeln vorhandenen Kreuzschichtung.

Die Orbitalbewegung unter einer deformierten, fortschreitenden Welle war vom Verfasser auf Grund von Beobachtungen im Wellentank als ungleichförmig beschleunigte Bewegung gekennzeichnet worden, die im Moment der Geschwindigkeitsspitzen zur Aufwirbelung feinkörnigen Langschwebs und zur Ausbildung sandgeschwängelter Wirbel in den Rippeltälern führt (Abb. 19).

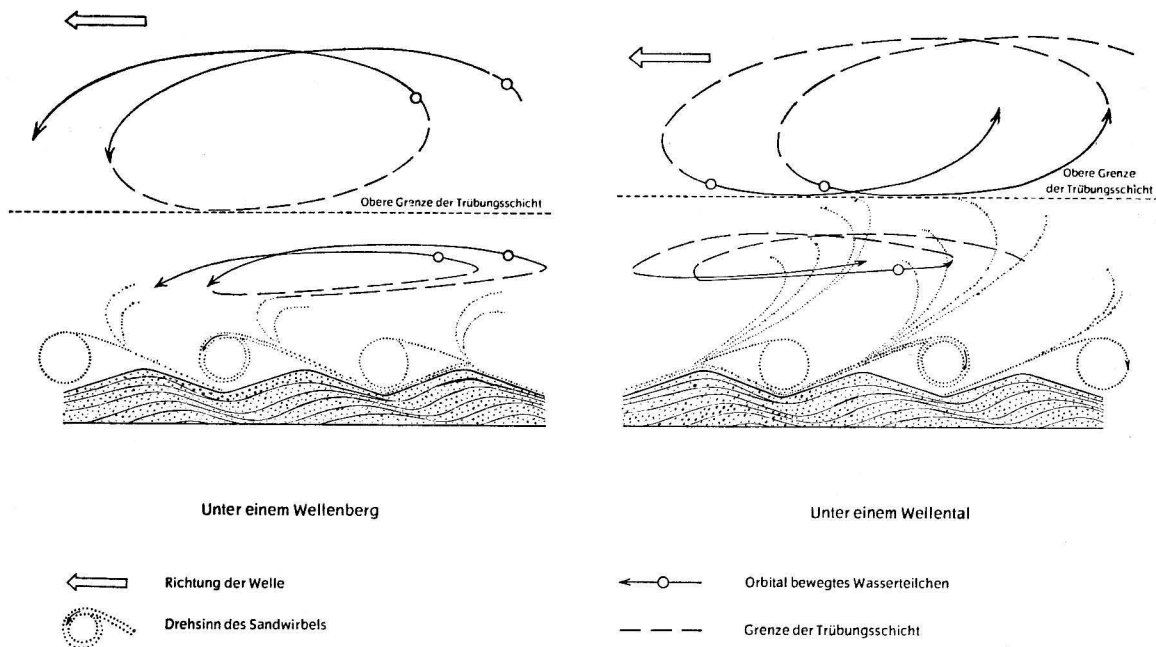


Abb. 19. Orbitalbahnen der Wasserteilchen unter einer fortschreitenden Welle sowie Kreuzschichtung der Sande in fast symmetrischen quasistationären Wellenrippeln. Sedimentbewegung und Bahnen orbital bewegter Wasserteilchen unter dem Wellenberg (links) und dem Wellental (rechts) einer durch Grundberührung deformierten fortschreitenden Welle



Es erscheint für die Sedimentumlagerung von besonderer Bedeutung, daß die Vor- und Rückwärtsbewegung mit unterschiedlicher Geschwindigkeit erfolgt, so daß 4 Fälle unterschieden werden können:

1. Die rollende Vorwärtsbewegung desjenigen Korns, für das die größere Schleppkraft in einer Richtung ausreicht,
2. die Vor- und geringere Rückwärtsbewegung eines kleineren Korns, das im Endeffekt langsamer in Richtung der fortschreitenden Welle transportiert wird,
3. Die Aufwirbelung der noch feineren Kornarten, von denen der feinkörnige Sand in den Strömungswalzen zwischen den Rippelkämmen erfaßt wird und bei der Richtungsumkehr als feiner Sandregen am jeweiligen Luvhang niederfällt, während Schluff- und Tonteilchen in der Trübungsschicht als Langschweb von der Strömung fortgeführt werden,
4. das Zurückbleiben des groben Korns, das nicht einmal rollend bewegt werden kann, als Restsediment.

Mit der allmählich erfolgenden Verlagerung der quasistationären Wellenrippeln vollzieht sich die Umlagerung des immer wieder verschütteten, erneut freigelegten und von der Orbitalbewegung erfaßten Sandkorns.

Der Vorgang der Abrasion auf den der Küste vorgelagerten Abrasionsflächen wurde derart gedeutet, daß Milliarden rotierender, aus Wasserteilchen und Sandkörnern gebildeter Walzen den Meeresgrund abschleifen.

Die mit zunehmender Wassertiefe abgeschwächte Wellenwirkung findet in der Abnahme der Höhe der Wellenrippeln bis unter 1 cm und der allmählichen Auflösung der geschlossenen Rippelfelder in der Übergangszone zwischen Sand- und Schlickgebieten Ausdruck.

Die durch den Rippelmechanismus bedingte, säuberliche Trennung der Kornarten in größeren Sandgebieten bildet die Ursache für eine zusammenhängende Folge der Gürtel von m, m/f, f/m, f, f/ff, ff Sand. Es handelt sich bei der Entmischung um einen weitflächigen Vorgang, der an die ausgedehnten Felder wellenbedingter Sandrippeln gebunden erscheint. Weit ist der Weg des Einzelkorns, den es unter unzähligen Umstellungen des Rippelfeldes mit dem Wechsel der Windrichtungen von einer Rippel zur anderen zurücklegen muß, ehe es nach wiederholter Einbettung und erneuter Aufwirbelung in einer fast homogenen Masse für lange Zeit zur Ablagerung gelangt. Das Bild der Sedimentverteilung entspricht offenbar einer Gleichgewichtslage zwischen den Veränderlichen: Wassertiefe und Wellenwirkung.

Das Bild der Sedimentverteilung in kleineren, abgeschlossenen Seegebieten wie der Kieler Bucht und der Mecklenburger Bucht stellt offenbar das Ergebnis der in Jahrtausenden erfolgten, wellenbedingten Abrasion, Umlagerung und Entmischung der Kornarten dar und ist, wenn wir von der ufernahen Sandwanderzone absehen, von annähernder Konstanz für säkulare Abschnitte.

## 2. Übersicht über Sedimentzonen und rezente Fazies

Fazielle Unterscheidungen mariner Sedimente können primär nach der Korngröße, nach der Charakteristik auf Grund der Transportart als Geröll, Kurzschweb, Langschweb und Restsediment, nach der Sortiertheit und nach der Textur sowie sekundär nach den benthonischen Lebensgemeinschaften getroffen werden. Die als primär bezeichneten Merkmale sind sämtlich auf den durch Wellenwirkung am Meeresgrund hervorgerufenen Rippelmechanismus zurückzuführen. Die soeben angeführten Unterscheidungsmerkmale lassen in den einzelnen Spalten der Tab. 5 die direkte Zuordnung zur jeweiligen Sedimentzone erkennen.

In der ufernahen Sandwanderzone findet sich gut sortierter Mittel- bis Feinsand, der als Kurzschweb durch die Wellenwirkung aufgewirbelt wird und dann in Sandrippeln kreuzgeschichtet zur Ablagerung gelangt. Die ufernahe Sandwanderzone wird durch die Totengemeinschaft zusammengeschwemmter Mollusken gekennzeichnet.

Zonen und Fazies rezenter Flachmeerabsätze im brackisch-marinen Milieu der südlichen Ostsee

Zonen mariner Sedimente nach Praje	ufernahe Sandwandlerzone	Abrasionszone		küstenferne Sandzone	sedimentarme Zone	Schlickgebiet	
		Abrasionszentren GM-Auflagungen	Durchfrachtungszone Kies- Grobsandgürtel			randliche Übergangszone	zentrales Schlickgebiet
marine Sedimente	Mittel- bis Feinsand	grobklastische Sedimente auf Geschiebemergel	Mittelkies bis Grobsand unter einem zermittlerstarken Mittel- bis Feinsandschleier	Mittel- und Feinsand nacheinander folgend	schlickiger, schluffiger und toniger Feinsand in dünner Schicht über den Sedimenten des Untergrundes-Geschiebemergel, Ton, Schluff, Torf	leinsandiger Schllick mit Schluffinseln	Grob-, Mittel- und Feinschllick
von der Art des Transports abgeleitete Sedimentbezeichnung	Kurzschweb	grobes Restsediment	Geröll	Kurzschweb	Kurzschweb und Langschweb wechselnd		Langschweb
Sortierungsgrad	gut sortiert	kaum sortiert	mäßig sortiert	sehr gut sortiert	schwach sortiert		schwach sortiert
Wellenwirkung		Wellenwirkung am Meeresgrund			Wellenwirkung nur gelegentlich großer Stürme		keine Wellenwirkung
Wellenrippeln	Sandrippeln bis 10 cm Höhe	Kiesrippeln bis 30 cm Höhe		Sandrippeln deren Höhe bis 1 cm abnimmt	ebener Grund mit fleckenweise auftretenden, bis 1 cm hohen Rippein		ebener Grund
Schichtung		Kreuz- und Flaserschichtung			horizontale Schichtung mit Flaserschichtung wechselnd		horizontale Schichtung
benthonische Lebensgemeinschaften	Totengemeinschaft zusammengesetzter Mollusken	Mytilus, Littorina littorea, Astarte, Actinien		Cardium edule, Macoma baltica	Mya arenaria, Scrobicularia, Pectinaria koreni		Cyprina islandica, Abra alba
							Schllickgebiet ohne benthonische Makrofauna, Red Ox Grenzfläche über dem Meeresgrund

Die vor der Küste zwischen 1 bis 6 m wechselnd breite Abrasionszone umfaßt in den Abrasionszentren Gebiete mit grobklastischem Restsediment, die von schmalen Kies- und Grobsandgürteln umgeben werden. Kies- bis Grobsandgürtel können als Durchfrachtungszone für mittlere und feine Sande angesehen werden. Die Höhe der Wellenrippeln im Kies erreicht 30 cm. Die Hauptvertreter der benthonischen Lebensgemeinschaft sind *Mytilus*, *Astarte*, *Littorina* sowie *Actinien*.

Die küstenferne Sandzone enthält über 80% rein sortierte Mittel- und Feinsande, die als Kurzsweb herangeführt, einem durch den Rippelmechanismus bedingten, unaufhörlichen Entmischungsvorgang unterliegen. Nach der Tiefe wird der Sand immer feinkörniger und die Höhe der Rippeln nimmt ab bis 1 cm. *Cardium edule* und *Macoma baltica* bevorzugen die küstenfernen Sandgebiete. Die sedimentarme Zone erhält nur selten gelegentlich großer Stürme eine Feinstsandzufuhr. Rippeln geringster Höhe finden sich auf kleinen Flecken des fast ebenen Grundes. Durch den Untergrund bedingte Korngemische kennzeichnen die sedimentarme Zone. Es handelt sich um feinkörnige Sande mit Beimengungen von Schluff und Ton, die in nur dünner Lage reine Schluffe und Tone überdecken. Die Frage nach der Ursache der Sedimentarmut ist nicht sicher zu beantworten. Wahrscheinlich spielen Strömungen eine Rolle, die um Schlickgebiete am Rande herumführen.

Nach der Grenzzone des Schlickgebietes hin erfolgt ein unmerklicher Übergang.

*Mya*, *Scrobicularia* und *Pectinaria Koreni* kennzeichnen die benthonische Lebensgemeinschaft im Bereich schlickigen Sandes. Es kommt zur Ausbildung von Linsen- und Flaserschichtung.

Im Schlickgebiet gelangt nur Langsweb ( $< 0,06$  mm) schwach sortiert zum Absatz. Das Sediment erscheint strukturlos oder fein geschichtet. *Cyprina islandica*, *Abra alba* und *Buccinum undatum* leben im Schlick.

Im Sonderfall einer windgeschützten Lage eines Schlickgebietes und einer stärkeren Zufuhr organogener Reste von benachbarten Tangfluren und Muschelbänken her liegt die Redox-Grenze in der grundnahen Wasserschicht. Es fehlt dann fast jegliche benthonische Makrofauna.

Die aus der Kenntnis des Rippelmechanismus abgeleiteten Sammelbezeichnungen sowie die in der Natur erkannten Sedimentgruppen führen zu faziellen Gruppierungen wie sie u. a. in der Darstellung der Sedimente (Tafel I) Ausdruck gefunden haben.

Die Gruppen von Schlickern als Langsweb und Sanden als Kurzsweb wie auch die Gruppe der Restsedimente weisen auf die vorrangige Ursache der Wellenwirkung am Meeresgrund. Ebenso wie die hohe Sortiertheit mariner Sande erscheint die schwache Sortiertheit jenseits der Grenze bei 0,06 mm für marinen Schlick charakteristisch.

### 3. Verschiebung der Grenze zwischen Kurz- und Langsweb beim Wechsel vom limnischen zum brackisch-marinen Milieu

Ein letzter Hinweis mag der Verschiebung der Grenze zwischen Lang- und Kurzsweb beim Wechsel vom limnischen Milieu spätglazialer Schmelzwasserseen zum brackisch-marinen Milieu der Ostsee gelten.

Der Vergleich der Summenkurven der marinen Sande (Abb. 14) und limnischer Schluffe (Abb. 16) führt zu der Annahme, daß die Schluffe im Süßwasser einst ähnlichen Bedingungen hinsichtlich der Wellenwirkung unterlagen wie die Sande nach der marinen Transgression.

Auch die im Anhang mitgeteilten Analysenergebnisse von 2 typischen Schluffkernen vom Rande der Mecklenburger Bucht sprechen dafür (Tab. 8 und 9 im Anhang).

Die weit verbreiteten schluffreichen Tone des Untergrundes der Mecklenburger Bucht und der Darßer Schwelle ähneln in ihrer geringeren Sortiertheit den heutigen marinen Schlickern.

Es wird mit einer Verschiebung der Grenze zwischen Kurzsweb und Langsweb im Zuge der Entwicklung vom Schmelzwassersee zum Baltischen Meer von 0,002 mm nach 0,06 mm gerechnet. Infolge der gegenwärtigen Grenze bei 0,06 mm ist eine Anhäufung reiner Schluffe nicht mehr möglich.

Aus diesem Grunde wurden bei der Bezeichnung von Schluffproben des Untergrundes und rezenten schluffhaltigen Oberflächenproben verschiedene Verhältniswerte zugrunde gelegt.

Bei limnischen Absätzen des Untergrundes aus Stechrohrkernen gelten für die Übergänge zwischen Schluff und Feinstsand sowie zwischen den einzelnen Schlufffraktionen dieselben Verhältniswerte und Symbole wie bei rezenten klastischen Sedimenten.

Die Abkürzungen ff/GSf = Feinstsand bis Grobschluff, GSf/ff = Grobschluff bis Feinstsand und M/FSf = Mittel- bis Feinschluff setzen ein Verhältnis von etwa 60%:30% voraus. Die Symbole ff-GSf und GSf-ff lassen etwa gleiche Anteile mit einem geringen Übergewicht der zuerst genannten Fraktion annehmen.

GSf (ff) = Grobschluff mit Feinstsand und ff (GSf) = Feinstsand mit Grobschluff weisen auf einen Anteil der Hauptfraktion von 65% und darüber und einen beachtlichen Anteil der Nachbarfraktion von etwa 20%, demgegenüber alle anderen Fraktionen zurücktreten.

Bei ff (GSf) beträgt der  $\text{CaCO}_3$ -Gehalt 5% und darüber im Gegensatz zum rezenten Oberflächensediment ff sf = Feinstsand schluffig, bei dem die  $\text{CaCO}_3$ -Werte 3% in der Regel nicht übersteigen.

Für Beimengungen von Schluff und Ton zu rezenten marinen Sanden gilt bereits ein Gewichtsanteil von 5% Schluff bzw. Ton als kennzeichnend. Als obere Grenze für eine Beimengung werden 24% Schluff insgesamt bzw. 24% Ton insgesamt angesehen, während bei den Symbolen ff/GSf, ff (GSf), G/MSf und M-FSf stets nur der Anteil der einzelnen Schlufffraktion in Betracht gezogen wird.

#### D. Zusammenfassung

Die neue Darstellung der Sedimente der westlichen und südlichen Ostsee möchte zu einer Einheitlichkeit der Sedimentbezeichnung im Bereich der Ostsee beitragen.

Ganz allgemein waren die Ergebnisse neuerer Meeresgrundaufnahmen z. B. aus der Nordsee, dem Nordmeer, der Irischen See und der Barent See schwer vergleichbar, da durch Zahlenangaben gestützte Definitionen der Sedimente meist fehlten. Wenn angesichts der Vielfältigkeit der Sedimente in anderen Meeren nicht so bald eine Einheitlichkeit aller Begriffsbestimmungen erzielt werden kann, so sollte doch jeder Verfasser die von ihm für das einzelne Sediment vorgenommene Abgrenzung der Bereiche des Korngemisches, der Feuchte, des Calciumcarbonatgehalts und des Anteils der organischen Substanz bekanntgeben. Damit würde ein entscheidender Beitrag zum leichteren Verständnis der Veröffentlichungen über Meeressedimente und zur besseren Verwendbarkeit des anfallenden, reichen Materials geleistet.

Zur übersichtlichen Darstellung der mit Hilfe neuer Definitionen der Sedimente erzielten wissenschaftlichen Ergebnisse wurde ein neues Schema der Darstellung von Korngemischen erdacht, das es unter anderem gestattet, die allmähliche Verschiebung der Hauptfraktion und der stärksten Nachbarfraktion zu verfolgen und die in der Natur vorhandenen, fließenden Übergänge zu veranschaulichen.

Das neue Schema wurde im ersten Abschnitt ausführlich besprochen und den bisher mit weniger Erfolg verwendeten Darstellungsweisen gegenübergestellt. Es sollte dem Leser zu-



nächst das Verständnis für die neue Symbolik vermittelt werden, damit die aus der farbigen Gesamtdarstellung der Sedimente der westlichen Ostsee gewonnene erste Übersicht während der folgenden, ausführlichen Beschreibung und Kennzeichnung der einzelnen Sedimente erhalten bliebe. Dies erschien um so notwendiger, als die zahlreichen neuen Unterscheidungen, welche für die Klärung der Begriffe unerlässlich sind, eine leichte Lesbarkeit der Abhandlung beeinträchtigen.

Es wurde angestrebt, jede der alljährlich eingebrachten, zahlreichen Sedimentproben aus der Ostsee mit Hilfe möglichst weniger Analysen eindeutig anzusprechen. Dabei galt es vor allem, genaue, auf Zahlenangaben gestützte Abgrenzungen der Korngemische vorzunehmen.

Bei hochsortierten Sanden genügt in der Regel die Angabe des Verhältnisses der Gewichtsanteile der Hauptfraktion und der stärksten Nachbarfraktion. Beim Übergang vom Kurzschweb ( $> 0,06$  mm) zum Langschweb ( $< 0,06$  mm) ist zu beachten, daß für beide Bereiche sehr unterschiedliche Verhältnisse in Frage kommen, so daß sich Schwierigkeiten bei der Darstellung des Überganges ergeben. Auch für grobklastische Restsedimente und Sande mit Beimengungen, die durch den Untergrund bedingt sind, gelten besondere Verhältnisse, denen zahlenmäßig Ausdruck verliehen wird.

Organogene und mineralische Sedimente werden durch genaue Abgrenzungen des Verhältnisses der organischen zur anorganischen Substanz gekennzeichnet.

Rezente marine Sedimente und limnisch-brackische Sedimente des Untergrundes lassen sich bereits am Kornverhältnis von Schluffen und Tonen sowie am Calciumcarbonat-Gehalt unterscheiden.

Der Begriff „Mudd“ ist zu verwerfen, da er sich nicht eindeutig mit Hilfe von Zahlenangaben definieren läßt.

Die an Hand der genauen Prozentangaben vorgenommene Klassifikation der Sedimente erfolgte zugleich in Rücksicht auf die morphologischen Erkennungsmerkmale der ca. 6000 vom Verfasser selbst auf See eingebrachten Proben. Nach der eindeutigen Definition auf Grund der Analyseergebnisse wurden die Sedimente nach genetischen Gesichtspunkten in Gruppen zusammengefaßt. Die Zweckmäßigkeit der Gruppierungen wurde an Scharen von Summenkurven überprüft. Die vorgenommene Gliederung bewährte sich besonders bei der Darstellung der Sedimentzonen und Kennzeichnung der Fazies.

Im dritten Abschnitt wurde ein Überblick nach faziellen Gesichtspunkten: Transportart, Sortierungsgrad, Textur und benthonischer Lebensgemeinschaft gegeben. Während die drei zuerst genannten Merkmale auf der Wellenwirkung am Meeresgrund beruhen, die zur zonalen Anordnung der Sedimente führt, kommen für die benthonische Lebensgemeinschaft Salinität und Tiefenstufe als weitere Fazies bedingende Ursachen hinzu.

Schon früher war vom Verfasser auf die Bedeutung der Wellenrippeln für die untermeerische Abrasion, Sedimentumlagerung und Entmischung der Kornarten hingewiesen worden. Die Zusammenhänge wurden wegen der Bedeutung für die zonale Anordnung und Ausbildung der rezenten Fazies der Ostsee nochmals behandelt und in einer Tabelle übersichtlich dargestellt.

Die von PRATJE allein auf Grund der Sedimente unterschiedenen Zonen des Meeresgrundes ließen sich mit Hilfe der genannten faziellen Merkmale deutlicher kennzeichnen. Dadurch erhielt sogleich der Begriff der Sedimentzone einen erweiterten Sinn.

Der letzte Abschnitt galt dem Einfluß der Halinität auf die sedimentpetrographischen Fazies. Die Verschiebung der Grenze zwischen Kurz- und Langschweb infolge des Wechsels vom limnischen zum brackisch-marinen Milieu fand in unterschiedlichen Kornverhältnissen schluffig-toniger Sedimente Ausdruck.

Bei einem Rückblick auf die Darstellung der Sedimente der westlichen und südlichen Ostsee lassen Eindeutigkeit der Bezeichnung und Lückenlosigkeit hinsichtlich der in See angetroffenen Sedimente sowie die Verflechtung der Sedimentgruppen mit den faziellen Bereichen mit Recht von einem in sich geschlossenen System der Sedimente sprechen.

Die Zweckmäßigkeit des neuen Systems wurde bereits erprobt. Entscheidend ist die Übersichtlichkeit der mit Hilfe des neuen Schemas entworfenen Karten trotz des im Vergleich zu früheren Karten erheblich erweiterten Inhalts. Das Relief, die Sedimentzonen sowie Einzelheiten der Glaziallandschaft am Meeresgrund sind auf den ersten Blick zu erkennen. Die Abhängigkeit zwischen Sedimentverteilung und Relief tritt deutlich hervor.

#### E. Anhang

##### *Analysen von Sedimenten in Stechrohrkernen*

a) Analysen von 2 Schlickkernen:

Tab. 6. Schlickkern FS 1 vom Westrande der Mecklenburger Bucht

Tab. 7. Schlickkern MB 9 aus dem zentralen Teil der Mecklenburger Bucht

b) Analysen von 2 Schluffkernen:

Tab. 8. Schluffkern MB 2 vom Ostrand der Mecklenburger Bucht

Tab. 9. Schluffkern MB 12 aus der Nordostecke der Mecklenburger Bucht — Beispiel für Sedimente, mit denen Schmelzwassertäler aufgefüllt wurden.

c) Analysen eines Stechrohrkernes mit vollständiger Schichtfolge aus dem zentralen Teil der Mecklenburger Bucht:

Tab. 10. Stechrohrkern MB 6a

d) Analysen eines Stechrohrkernes mit rosa Ton aus dem Arkona Becken:

Tab. 11. Stechrohrkern AB 26a

e) Sedimente aus den tiefen Mulden der mittleren Ostsee



TABELLE 6

## Schlickkern aus der Mecklenburger Bucht

Station FS 1 = FS 7 sm südostwärts Fehmarn Sund  $\varphi = 54^{\circ}19,7'N$ ;  $\lambda = 11^{\circ}19,7'E$   
 Wassertiefe: 20,3 m 0,3%  $\leq$  CaCO<sub>3</sub>  $\leq$  3,3% 54%  $\leq$  Feuchte  $\leq$  65%

Teufe im Stechrohr- kern m	Anteile der Fraktionen in Gewichts-%								<0,06 mm insges.	Feuchte %	CaCO <sub>3</sub> %	Sedimentbezeichnung Kurzbezeichnung
	0,1-0,06	0,06-0,02	0,02-0,006	0,006-0,002	0,002-0,0006	<0,0006 mm						
0-0,30	5,1	32,3	30,7	14,8	7,1	10,0	94,9	65,2	0,7 1,0	Grob- bis Mittelschlick G-MSk		
0,30-0,50	3,8	39,4	30,4	12,8	6,7	6,9	96,2	-	0,3 0,4	Grobschlick GSK		
0,50-0,70	6,9	36,6	30,3	11,9	7,2	7,1	93,1	-	0,2 0,5	Grobschlick GSK		
0,70-1,00	0,7	23,9	36,9	20,2	9,7	8,6	99,3	-	0,9 0,9	Mittelschlick MSk		
1,00-1,20	0,5	20,0	37,0	19,1	11,7	11,7	99,5	60,2	1,2 1,2	Mittelschlick MSk		
1,20-1,40	0,5	15,6	44,8	20,5	13,3	5,3	99,5	-	1,7 1,9	Mittelschlick MSk		
1,40-1,60	0,3	14,5	37,9	23,3	11,2	12,8	99,7	-	1,1 1,0	Mittelschlick MSk		
1,60-1,90	0,4	18,6	44,8	18,5	9,4	8,3	99,6	-	1,6 1,5	Mittelschlick MSk		
1,90-2,10	0,3	15,8	47,9	21,9	7,4	6,7	99,7	58,9	1,7 1,8	Mittelschlick MSk		
2,10-2,30	0,2	9,9	41,0	25,2	13,5	10,2	99,8	-	1,8 1,9	Mittelschlick MSk		
2,30-2,50	0,2	11,4	46,9	24,9	9,4	7,2	99,8	-	2,4 2,3	Mittelschlick MSk		
2,50-2,70	0,3	11,5	41,0	24,2	12,5	10,5	99,7	-	3,3 3,3	Mittelschlick MSk		
2,70-2,90	0,5	14,9	40,5	20,9	12,7	10,5	99,5	54,1	2,3 2,5	Mittelschlick MSk		
2,90-3,17	3,3	9,2	36,8	23,4	17,4	9,9	96,7	-	2,9 2,9	Mittelschlick MSk		

TABELLE 7

## Schlickkern aus der Mecklenburger Bucht

Station MB 9 = Z VII Zentraler Teil der Mecklenburger Bucht  $\varphi = 54^{\circ}16,2'N$ ;  $\lambda = 11^{\circ}33,6' E$   
 Wassertiefe: 23,8 m  $0,4\% \leq CaCO_3 \leq 3,2\%$   $52,6\% \leq \text{Feuchte} \leq 65,0\%$

Teufe im Stechrohr- kern m	Anteile der Fraktionen in Gewichts-%						$<0,06$ mm insges.	Feuchte %	CaCO <sub>3</sub> %	Sedimentbezeichnung Kurzbezeichnung
	0,1-0,06	0,06-0,02	0,02-0,006	0,006-0,002	0,002-0,0006	$<0,0006$ mm				
0,20-0,40	0,8	55,8	17,5	9,1	8,8	8,0	99,2	65,0	0,5 0,4	Grobschlick GSk
0,40-0,70	1,1	37,6	31,9	13,5	9,2	6,7	98,9	—	0,9 0,9	Grobschlick GSk
0,70-1,00	0,8	33,2	31,3	16,2	9,7	8,8	99,2	—	0,6 0,8	Grob- bis Mittelschlick G-MSk
1,00-1,30	0,5	26,0	39,8	13,9	12,1	7,7	99,5	53,7	0,8 0,9	Mittelschlick MSk
1,30-1,60	0,3	29,6	29,7	19,6	10,5	10,3	99,7	—	0,9 1,1	Mittel- bis Grobschlick M-GSk
1,60-1,90	0,4	21,9	36,2	18,1	12,0	11,4	99,6	—	1,1 0,9	Mittelschlick MSk
1,90-2,20	0,2	19,5	32,9	22,7	13,3	11,4	99,8	55,4	1,5 1,5	Mittel- bis Feinschlick M/FSk
2,20-2,50	0,3	25,5	31,6	20,7	10,0	11,9	99,7	—	1,6 1,0	Mittel- bis Grobschlick M/GSk
2,50-2,80	0,1	17,9	36,3	20,2	16,3	9,4	99,9	—	2,0 2,1	Mittelschlick MSk
2,80-3,10	0,2	15,7	38,3	21,7	13,9	10,2	99,8	53,1	2,8 2,8	Mittelschlick MSk
3,10-3,40	0,1	15,2	30,0	23,7	16,7	14,3	99,9	—	2,8 2,8	Mittel- bis Feinschlick M/FSk
3,40-3,60	0,3	13,0	38,2	21,2	13,1	14,2	99,7	—	3,0 3,2	Mittelschlick MSk
3,60-3,82	0,2	14,8	39,7	19,4	14,9	11,0	99,8	52,6	1,1 1,1	Mittelschlick MSk

TABELLE 8  
Schluffkern vom Ostrande der Meeklenburger Bucht

Station MB 2 = Z II 7,5 sm nördlich Kühlungsborn  $\varphi = 54^{\circ}16,9'N$ ;  $\lambda = 11^{\circ}45,0'E$   
Wassertiefe: 26,0 m  $CaCO_3$ -Gehalt bei reinen Schluffen:  $7,0\% \leq CaCO_3 \leq 15,9\%$   
Die oberen 52 cm marinen Schlicks des Stechrohrkernes wurden verworfen

Tiefe im Stechrohr- kern m	Anteile der Fraktionen in Gewichts-%								CaCO <sub>3</sub> %	Sedimentbezeichnung Kurzbezeichnung
	0,2-0,1	0,1-0,06	0,06-0,02	0,02-0,006	0,006-0,002	0,002-0,0006	<0,0006 mm			
0,52-0,55	—	65,4	26,4	4,4	1,3	1,3	1,2	1,8 1,7	Feinstsand mit Grobschluff ff (GSf)	
0,55-0,60	—	61,5	28,4	5,6	1,9	1,2	1,4	4,6 4,5	Feinstsand bis Grobschluff ff/GSf	
0,65-0,70	—	16,3	67,2	11,1	1,1	1,7	2,6	10,1 10,3	Grobschluff GSf	
0,67-0,80	—	71,6	21,8	4,6	0,4	0,3	1,3	5,8 5,8	Feinstsand mit Grobschluff ff (GSf)	
0,85-0,90	—	21,7	71,4	4,6	0,2	0,7	1,4	7,6 7,0	Grobschluff mit Feinstsand GSf (ff)	
0,95-1,00	—	18,8	74,9	2,9	1,7	0,3	1,4	9,2 9,0	Grobschluff GSf	
1,05-1,10	—	8,8	79,9	7,2	0,3	1,7	2,1	8,8 7,8	Grobschluff GSf	
1,15-1,20	—	12,1	79,9	5,1	0,6	0,6	1,7	7,8 7,8	Grobschluff GSf	
1,25-1,30	—	19,3	69,2	6,2	2,3	0,9	2,1	7,0 7,3	Grobschluff GSf	
1,35-1,40	—	10,5	73,7	10,9	1,5	0,7	2,7	10,0 9,8	Grobschluff GSf	
1,45-1,50	—	7,4	80,3	8,3	1,0	1,0	2,0	9,8 9,6	Grobschluff GSf	
1,55-1,60	—	10,0	66,4	15,4	0,7	4,1	3,4	8,0 7,8	Grobschluff GSf	
1,65-1,70	—	9,8	62,9	22,7	1,0	0,9	2,7	6,2 6,0	Grob- bis Mittelschluff G/MSf	
1,75-1,80	—	10,2	63,3	20,7	2,7	1,2	1,9	10,7 10,3	Grob- bis Mittelschluff G/MSf	

TABELLE 8 (Fortsetzung) Stechrohrkern MB 2 = Z II

Teufe im Stechrohr- kern m	Anteile der Fraktionen in Gewichts-%							CaCO <sub>3</sub> %	Sedimentbezeichnung Kurzbezeichnung
	0,2-0,1	0,1-0,06	0,06-0,02	0,02-0,006	0,006-0,002	0,002-0,0006	< 0,0006 mm		
1,85-1,90	—	21,3	62,4	11,2	1,0	1,0	3,1	6,4 6,6	Grobschluff bis Feinstsand GSf/ff
1,95-2,00	24,5	32,3	38,2	3,0	0,2	0,7	1,1	6,4 6,1	Grobschluff bis Feinstsand GSf-f
2,05-2,10	7,4	45,1	44,6	1,5	0,2	0,3	0,9	6,6 6,8	Feinstsand bis Grobschluff ff-GSf
2,15-2,20	12,8	60,9	24,5	0,6	0,1	0,1	1,0	5,3 4,9	Feinstsand mit Grobschluff ff (GSf)
2,25-2,30	5,3	42,1	49,9	0,9	0,6	0,1	1,1	4,1 4,4	Grobschluff bis Feinstsand GSf-ff
2,35-2,40	6,2	39,6	51,6	0,8	0,5	0,2	1,1	6,8 6,5	Grobschluff bis Feinstsand GSf/ff
2,45-2,50	9,2	25,6	61,7	1,7	0,5	0,4	0,9	7,8 7,5	Grobschluff bis Feinstsand GSf/ff
2,55-2,60	—	31,0	66,5	1,1	0,2	0,1	1,1	8,3 8,2	Grobschluff mit Feinstsand GSf (ff)
2,65-2,70	—	17,1	65,0	13,3	2,4	0,6	1,6	12,4 12,0	Grobschluff GSf
2,75-2,80	—	2,9	73,0	16,9	2,3	2,2	2,7	14,8 14,3	Grobschluff GSf
2,85-2,90	—	13,9	56,4	24,9	2,8	0,6	1,4	12,1 12,2	Grob- bis Mittelschluff G/MSf
2,95-3,00	—	11,2	66,0	16,9	3,6	0,2	2,1	14,3 14,8	Grobschluff GSf
3,05-3,10	—	5,7	76,2	12,5	1,7	1,3	2,6	14,3 14,4	Grobschluff GSf
3,10-3,15	—	8,4	53,5	30,5	3,6	1,9	2,1	14,1 13,9	Grob- bis Mittelschluff G/MSf
3,15-3,20	—	5,6	46,8	33,5	8,0	2,5	3,6	14,8 14,5	Grob- bis Mittelschluff G/MSf
3,20-3,25	—	8,8	45,8	39,2	2,9	1,3	2,0	15,5 15,9	Grob- bis Mittelschluff G/MSf

TABELLE 9  
**Schluffkern aus der Nordostecke der Mecklenburger Bucht**  
 Limnische Sedimente, mit denen ein Schmelzwassersediment aufgefüllt wurde  
 Station MB 12 = Ge II 7,0 sm südlich Gedser  $\varphi = 54^{\circ}27,5'N$ ;  $\lambda = 11^{\circ}56,6'E$   
 Wassertiefe: 21,0 m

Teufe im Stechrohr- kern m	Anteile der Fraktionen in Gewichts-%										CaCO <sub>3</sub> % /	Sedimentbezeichnung Kurzbezeichnung
	0,4-0,2	0,2-0,1	0,1-0,06	0,06-0,02	0,02-0,006	0,006-0,002	0,002-0,0006	<0,0006mm				
0,00-0,05	—	11,2	18,3	53,5	11,6	1,5	2,0	1,9	3,4 3,3		Grobschluff bis Feinstsand GSf/ff	
0,10-0,15	3,8	2,4	15,4	56,8	15,6	2,6	2,0	1,4	7,7 7,3		Grobschluff mit Feinstsand GSf (ff)	
0,20-0,25	—	—	19,2	63,4	9,3	2,4	1,6	4,1	7,7 7,7		Grobschluff mit Feinstsand tonig GSf (ff) t	
0,30-0,35	—	—	20,2	53,1	15,7	4,9	3,3	3,3	7,7 7,5		Grobschluff bis Feinstsand tonig GSf/ff t	
0,40-0,45	—	—	14,5	62,6	14,5	3,0	2,6	2,8	11,4 11,2		Grobschluff mit Feinstsand tonig GSf (ff) t	
0,50-0,55	—	—	9,5	64,6	17,0	4,6	2,1	2,2	11,5 11,1		Grobschluff GSf	
0,60-0,65	—	—	30,4	48,1	12,4	3,4	2,5	3,2	8,5 7,8		Grobschluff bis Feinstsand tonig GSf/ff t	
0,70-0,75	—	—	26,9	49,4	9,2	8,7	3,1	2,7	8,6 8,5		Grobschluff bis Feinstsand tonig GSf/ff t	
0,80-0,85	—	—	23,9	52,3	15,3	4,2	1,8	2,5	7,8 8,6		Grobschluff bis Feinstsand GSf/ff	
0,90-0,95	—	—	16,3	60,0	15,6	3,7	2,1	2,3	6,3 6,8		Grobschluff mit Feinstsand GSf (ff)	
1,00-1,05	—	—	38,4	48,7	7,9	1,7	0,8	2,5	5,8 6,0		Grobschluff bis Feinstsand GSf/ff	
1,10-1,15	—	—	32,2	47,2	11,0	5,2	1,6	2,8	6,5 6,4		Grobschluff bis Feinstsand GSf/ff	
1,20-1,25	—	—	25,0	58,2	10,0	3,1	1,4	2,3	9,9 10,2		Grobschluff bis Feinstsand GSf/ff	
1,30-1,35	—	—	13,3	55,3	16,5	6,7	4,2	4,0	7,2 7,6		Grob- bis Mittelschluff tonig G/MSf t	
1,40-1,45	—	—	11,9	64,0	16,3	3,8	1,4	2,6	6,4 6,3		Grobschluff GSf	
1,50-1,55	—	—	25,4	51,3	14,0	4,6	1,8	2,9	7,2 6,5		Grobschluff bis Feinstsand GSf/ff	
1,60-1,65	—	—	7,5	59,8	20,1	5,8	3,1	3,7	7,2 6,8		Grob- bis Mittelschluff tonig G/MSf t	
1,70-1,75	—	2,6	35,6	46,0	8,8	2,4	2,0	2,7	4,2 3,8		Grobschluff bis Feinstsand GSf/ff	

TABELLE 9 (Fortsetzung) Stechrohrkern MB 12 = Ge II

Teufe im Stechrohrkern m	Anteile der Fraktionen in Gewichts-%										CaCO <sub>3</sub> %	Sedimentbezeichnung Kurzbezeichnung
	0,4-0,2	0,2-0,1	0,1-0,06	0,06-0,02	0,02-0,006	0,006-0,002	0,002-0,0006	0,0006mm	<0,0006mm			
1,80-1,85	—	1,1	22,4	52,9	14,7	3,9	2,2	2,8	6,7	6,6	Grobschluff bis Feinstsand GSf/ff t	
1,90-1,95	—	3,5	31,9	43,9	10,7	4,5	2,7	2,8	6,9	6,6	Grobschluff bis Feinstsand tonig GSf/ff t	
2,00-2,05	—	2,5	19,1	47,3	16,9	6,2	4,6	3,4	6,0	6,6	Grobschluff bis Feinstsand tonig GSf/ff t	
2,10-2,15	—	8,3	68,4	9,4	7,8	2,8	0,9	2,4	3,4	3,4	Feinstsand ff	
2,20-2,25	—	4,9	25,5	42,8	19,1	1,8	2,3	3,6	8,3	8,5	Grobschluff bis Feinstsand tonig GSf/ff t	
2,30-2,35	—	14,2	49,4	25,0	6,2	2,7	1,1	1,9	3,2	3,4	Feinstsand bis Grobschluff ff/GSf	
2,40-2,45	—	5,0	46,6	39,8	2,6	2,2	1,8	2,0	3,5	3,8	Feinstsand bis Grobschluff ff/GSf	
2,50-2,55	—	3,8	38,0	30,1	16,0	5,5	2,6	4,0	8,0	7,9	Feinstsand bis Grobschluff tonig ff/GSf t	
2,60-2,65	—	8,2	49,1	32,4	4,7	2,5	0,7	2,1	3,6	3,8	Feinstsand bis Grobschluff ff/GSf	
2,70-2,75	—	—	40,1	41,8	9,8	4,1	2,6	1,6	6,0	5,6	Grobschluff bis Feinstsand GSf/ff	
2,80-2,85	—	—	48,3	39,9	7,2	2,5	1,2	0,9	4,3	4,2	Feinstsand bis Grobschluff ff/GSf	
2,90-2,95	—	—	35,0	50,9	7,2	3,1	2,6	1,2	5,0	5,6	Grobschluff bis Feinstsand GSf/ff	
3,00-3,05	0,6	3,0	52,2	37,7	3,9	0,7	1,3	0,8	2,9	2,6	Feinstsand bis Grobschluff ff/GSf	
3,10-3,15	—	—	36,5	49,2	8,5	2,0	1,9	1,9	3,7	3,3	Grobschluff bis Feinstsand GSf/ff	
3,15-3,18	—	—	66,7	27,3	2,9	1,5	1,3	0,2	2,1	2,2	Feinstsand mit Grobschluff ff (GSf)	
3,18-3,25	56,6	21,0	7,5	9,5	2,0	1,7	0,7	0,9	1,6	1,3	Mittel- bis Feinstsand m/f	
3,30-3,35	—	—	2,7	23,9	52,3	12,0	6,2	2,9	20,3	20,7	Mittel- bis Grobschluff tonig M/GSf t	
3,40-3,45	—	—	2,7	58,8	30,2	4,3	2,2	1,8	17,4	16,5	Grob- bis Mittelschluff G/MSf	
3,50-3,55	—	—	2,4	53,0	31,4	6,7	3,0	3,5	19,4	19,0	Grob- bis Mittelschluff tonig G/MSf t	
3,60-3,65	—	—	0,4	31,7	48,9	12,7	2,0	4,3	21,1	21,2	Mittel- bis Grobschluff tonig M/GSf t	
3,70-3,75	—	—	0,8	40,9	45,3	6,0	4,6	2,4	—	—	Mittel- bis Grobschluff tonig M-GSf t	



TABELLE 10

## Stechrohrkern mit vollständiger Schichtfolge aus der Mecklenburger Bucht (Tafel II)

Station MB 6 = Z IV Zentraler Teil der Mecklenburger Bucht  $\varphi = 54^{\circ}21,1' N$ ;  $\lambda = 11^{\circ}45,0' E$   
 Wassertiefe: 25,1 m Länge des frischen Kernes: 3,78 m; Länge des lufttrockenen Kernes: 3,24 m

Tiefe im Stechrohrkern m	Anteile der Fraktionen in Gewichts-%										CaCO <sub>3</sub> %	Sedimentbezeichnungen	
	0,2-0,1	0,1-0,06	0,06-0,02	0,02-0,006	0,006-0,002	0,002-0,0006	<0,0006	Borbefund	Laborbefund				
0-0,10	4,2	10,6	24,0	25,2	18,1	10,6	7,4	8,3 8,3	Schlick	Mittel- bis Grobschlick M-GSk			
0,10-0,20	1,5	17,7	44,1	19,8	7,5	4,6	4,8	0 0		Grobschlick GSk			
0,20-0,30	1,5	12,7	38,7	27,3	9,5	5,7	4,6	1,1 0,8		Grobschlick GSk			
0,30-0,40	1,1	11,3	31,7	26,5	12,8	8,0	8,6	0,3 0,2		Grob- bis Mittelschlick G/MSk			
0,40-0,50	2,2	10,6	36,2	26,0	12,3	6,2	6,5	0,9 1,4		Grobschlick GSk			
0,50-0,58	7,5	35,4	25,3	15,3	6,3	5,1	5,1	2,4 2,2		Grobschlick feinstsandig GSk ff			
0,58-0,62	9,6	51,6	28,0	5,8	1,0	1,9	2,1	1,1 0,9		Feinsand ff sf			
0,62-0,66	-	-	-	-	-	-	-	-		Torf			
0,66-0,77	-	1,1	38,2	39,8	11,5	5,6	3,8	32,4 31,0		Kalkgyttja			
0,77-0,82	-	0,3	21,7	42,6	17,6	12,8	5,0	41,2 40,3					
0,82-0,87	-	2,6	27,5	38,4	16,2	12,2	3,1	32,7 30,6					
0,87-0,94	-	0,3	25,2	40,2	13,4	15,2	5,8	-					
0,94-0,99	-	8,9	36,2	32,7	12,8	6,8	2,6	37,2 35,2					
0,99-1,03	-	4,1	47,1	32,6	10,0	4,2	2,0	22,5 22,6					
1,03-1,10	-	3,9	47,8	30,1	7,0	8,4	2,8	26,3 27,4					
1,10-1,24	-	3,3	46,9	35,8	8,2	3,6	2,2	22,1 23,4					
1,24-1,33	-	2,5	45,0	32,6	11,7	5,5	2,7	22,4 23,6					

TABELLE 10 (Fortsetzung) Stechrohrkern MB 6 = Z IV

Tiefe im Stechrohrkern m	Anteile der Fraktionen in Gewichts-%							CaCO <sub>3</sub> %	Sedimentbezeichnung	
	0,2-0,1	0,1-0,06	0,06-0,02	0,02-0,006	0,006-0,002	0,002-0,0006	<0,0006		Bordbefund	Laborbefund
1,33-1,44	—	0,6	56,5	31,1	6,5	3,2	2,1	20,2 21,7	Grob- bis Mittelschluff tonig G/MSf t	
1,44-1,50	8,9	8,1	50,5	22,7	5,5	2,3	2,0	17,5 16,9	Grob- bis Mittelschluff feinstsandig G/MSf ff	
1,50-1,61	11,1	8,9	48,3	26,5	1,2	1,0	3,0	16,6 15,2	Grob- bis Mittelschluff G/MSf	
1,61-1,74	—	1,5	52,9	31,0	6,6	3,2	4,8	19,6 19,0	Grob- bis Mittelschluff tonig G/MSf t	
1,74-1,85	—	4,0	71,2	14,9	3,2	4,2	2,5	15,4 15,6	Grobschluff tonig GSf t	
1,85-1,95	—	3,0	79,2	12,5	2,3	1,0	2,0	10,0 8,2	Grobschluff GSf	
1,95-2,07	—	2,1	77,4	13,9	2,0	3,3	1,3	6,9 8,8	Grobschluff GSf	
2,07-2,13	—	10,9	78,4	7,1	0,9	2,6	0,1	12,8 11,1	Grobschluff GSf	
2,13-2,23	—	4,7	81,4	9,1	1,5	1,3	2,0	11,0 11,0	Grobschluff GSf	
2,23-2,33	—	11,0	74,3	10,0	1,6	1,1	2,0	11,2 11,2	Grobschluff GSf	
2,33-2,41	—	0,9	87,9	7,5	1,5	2,0	0,2	6,1 6,3	Grobschluff GSf	
2,41-2,46	—	1,2	63,9	21,8	5,0	4,2	3,9	14,6 14,2	Grob- bis Mittelschluff tonig G/MSf t	
2,46-2,60	6,5	5,4	74,7	8,3	0,9	2,8	1,4	8,2 10,0	Grobschluff feinstsandig GSf ff	
2,60-2,70	—	24,7	52,0	17,4	2,7	2,0	1,2	8,5 8,6	Grobschluff bis Feinstsand GSf/ff	
2,70-2,85	—	0,9	11,0	47,2	33,5	4,8	2,6	22,1 21,8	Mittel- bis Feinschluff tonig M/FSf t	
2,85-3,00	—	—	10,9	35,8	32,1	6,2	15,0	21,0 21,0	Mittel- bis Feinschluff tonig M/FSf t	
3,00-3,12	—	0,2	3,5	22,9	28,0	18,9	26,5	22,0 20,6	Ton mittelschluffig T msf	
3,12-3,24	—	0,9	16,4	44,1	24,7	7,9	6,0	22,4 21,5	Mittel- bis Feinschluff tonig M/FSf t	

Der an der gleichen Station entnommene zweite Stechrohrkern MB 6 b ließ über dem rosa Ton Feinsand verzeichnen, während es sich im Kern MB 6 lediglich um feinst- bis feinsandigen Grobschluff handelte

TABELLE 11  
**Steckrohrkern aus dem Arkona Becken mit spätglaziale rosa Ton**

Station AB 26, 1 sm nördlich Tonne 5  $\varphi = 54^{\circ}56,6' N$ ;  $\lambda = 13^{\circ}08,8' E$  Wassertiefe: 45,0 m  
 Länge des frischen Steckrohrkernes: 3,80 m, Länge des luftgetrockenen Steckrohrkernes: 3,28 m  
 Die oberen 60 cm Schlick der Probe wurden verworfen

Tiefe im Steckrohr- kern m	Anteile der Fraktionen in Gewichts-%										CaCO <sub>3</sub> %	Sedimentbezeichnung	
	0,2-0,1	0,1-0,06	0,06-0,02	0,02-0,006	0,006-0,002	0,002-0,0006	<0,0006	Bordbefund	Laborbefund				
0,73-0,80	4,1	6,3	46,6	21,3	11,0	4,7	6,3	0	Schlick	Grobschlick GSk			
0,95-1,00	9,7	25,9	40,8	13,2	3,3	3,9	3,2	0		Grobschlick feinsandig GSk f			
1,15-1,20	—	3,9	23,2	21,3	17,2	22,7	11,7	0,2	Gyttja-Ton dkl.-grau mit humosen Lagen	Gyttja-Ton grobschluffig T gsf			
1,35-1,38	—	13,5	15,7	19,9	17,8	22,4	11,7	0,2		Gyttja-Ton feinstsandig T ff			
1,47-1,50	—	5,1	7,7	5,9	11,5	19,4	50,4	4,4	Ton blaugrün	Mittelton MT			
1,59-1,65	—	0,9	6,6	6,4	11,2	64,8	10,1	4,4		Grobton GT			
1,80-1,85	—	5,9	16,7	8,8	11,5	19,9	37,2	7,6	Ton rosa	Mittel- bis Grobton M/GT gsf			
2,00-2,05	—	2,5	13,6	19,2	7,5	17,7	39,4	7,8		Mittel- bis Grobton M/GT gsf			
2,20-2,25	—	1,4	2,0	2,5	11,3	22,9	59,9	6,8	Ton rosa	Mittelton MT			
2,30-2,35	—	2,8	15,2	9,3	9,5	15,8	47,4	6,8		Mittelton grobschluffig MT gsf			
2,40-2,45	—	0,4	2,4	3,0	7,6	25,4	61,2	9,4	Ton rosa	Mittel- bis Feinton M/FT			
2,60-2,65	—	1,2	6,5	4,5	38,5	48,8	0,5	9,5		Grobton GT			
2,80-2,85	—	1,0	7,0	5,8	16,6	25,5	44,1	10,4	Ton rosa	Mittel- bis Grobton M/GT			
2,90-2,95	—	0,7	4,3	5,4	16,0	27,9	45,7	10,5		Mittel- bis Grobton M/GT			
3,00-3,05	—	0,6	7,0	3,8	11,5	26,3	50,8	10,8	Ton rosa	Mittelton MT			
3,20-3,28	—	0,9	1,9	32,6	28,4	17,4	18,8	8,7		Ton mittelschluffig T msf			
								8,7					
								18,2					
								19,1					

TABELLE 12

## Sedimente aus den tiefen Mulden der mittleren Ostsee

Normalprofil: 2—3 cm Schlamm schwarz / 8—10 cm Schlack grau / Ton hellgrau  
 Noorköping-Tief: Station 10  $\varphi = 57^{\circ}58,7' N$ ;  $\lambda = 17^{\circ}57,2' E$  Wassertiefe: 198 m

Proben-Nr.	Anteile der Fraktionen in Gewichts %						Feuchte* %	CaCO <sub>3</sub> * %	C <sub>org.</sub> %*	Sedimentbezeichnung Kurzbezeichnung
	0,1—0,06	— 0,02	— 0,006	— 0,002	— 0,0006	< 0,0006				
54	1,1	12,5	25,2	19,8	26,7	14,7%	81,8	1,6	3,1	Grobschlamm schlickig GSchl sk
55	0,2	6,8	19,5	48,3	17,2	8,0%	75,7	1,3	2,5	Feinschlack FSk
56	—	4,6	16,3	23,1	27,2	28,8%	69,7	0,7	2,2	Ton mittelschluffig T msf
Landsort-Tief:										
Station 11 $\varphi = 58^{\circ}36,0' N$ ; $\lambda = 18^{\circ}14,8' E$ Wassertiefe: 465 m										
81	0,1	12,3	29,0	21,9	25,6	11,1%	80,0	4,2	3,5	Grobschlamm schlickig GSchl sk
82	0,1	8,6	17,8	21,6	24,1	27,8%	77,8	1,1	3,5	Schlamm Schl
83	—	5,2	13,2	21,6	28,2	31,7%	71,5	0,6	2,5	Ton T
Station 13 $\varphi = 58^{\circ}38,0' N$ ; $\lambda = 18^{\circ}16,3' E$ Wassertiefe: 460 m										
87	0,1	13,7	23,7	20,8	27,7	14,0%	80,1	3,1	3,5	Grobschlamm schlickig GSchl sk
89	—	6,7	18,1	20,2	44,0	11,0%	71,4	0,6	2,1	Grobton GT

\*) Feuchte — Mittelwert auf Grund von 3 Messungen bei 130 °C

CaCO<sub>3</sub> — Mittelwert von 2 BestimmungenC<sub>org.</sub> — Mittelwert von 2 Bestimmungen

## F. Literatur

- [1] APSTEIN, C., Bodenuntersuchungen in Ost- und Nordsee. Sitzungsber. d. Ges. naturforsch. Freunde zu Berlin, Nr. 10 (1916) S. 355—376.
- [2] ATTERBERG, A., Studien auf dem Gebiet der Bodenkunde. Die landwirtschaftlichen Versuchsstationen, **69** (1908) S. 93—143.
- [3] ATTERBERG, A., Die mechanische Bodenanalyse und die Klassifikation der Mineralböden Schwedens. Internat. Mitt. f. Bodenkunde, **2** (1912), S. 312—342.
- [4] BERTHOIS, L., Recherches sur les sédiments de la mer du Nord et de la mer d'Irlande. Revue des travaux de l'institut des pêches maritimes. Paris, **21** (1957) Nr. 4, S. 448—554.
- [5] BRANNOV, Sv., Forundersøgelse for Lillebaeltsbroen 1923—24. Ingeniøren, Kopenhagen **34** (1925) Nr. 4, S. 37—47.
- [6] BRESSAU, S., Abrasion, Transport und Sedimentation in der Beltsee. Die Küste, **6** (1957) S. 64—102.
- [7] BRINKMANN, R., Abriß der Geologie. Bd. 1, Stuttgart 1956.
- [8] EVANS, O. F., The classification of wave-formed ripple marks. Tulsa Journ. of sedimentary Petrology, **11** (1941) S. 37—41.
- [9] GEIB, K. W., Meeresgeologische Untersuchungen im Bereich der ostpommerschen Küste vor Stolpmünde bis zur ehemaligen deutsch-polnischen Grenze. Geologie der Meere und Binnengewässer, **7** (1943) S. 1—39.
- [10] GEINITZ, E., Die geologischen Verhältnisse (Litorina-Ablagerungen) des neuen Warnemünder Hafenaufbaues. Mitt. d. Meckl. Geol. Landesanstalt Nr. 14, Rostock 1902.
- [11] GEINITZ, E., Litorinatone im Wismarschen Hafen. Archiv d. Freunde d. Naturgeschichte in Mecklenburg, **57** (1903) S. 182—183.
- [12] GRIPENBERG, St., A Study of the sediments of the North Baltic and adjoining seas. Fennia, **60** (1934) Nr. 3.
- [13] GRIPENBERG, St., Sediments of the Baltic Sea. Recent marine sediments, A symposium ed. by P. D. Trask, 2. Aufl., Tulsa 1955, S. 298—321.
- [14] GRIPP, K., Rezente und fossile Flachmeer-Absätze petrologisch beobachtet und gedeutet. Geol. Rundschau, **47** (1958) H. 1, S. 83—99.
- [15] GRIPP, K., Über den Abtrag durch Rippelfelder. (N. Jb. Geol. Paläont. Mh., Jg. 1961, H. 9, S. 474 bis 477.
- [16] GROBA, E., Geologische Unterwasserkartierung im Litoral der deutschen Ostseeküste. Acta hydrophysica, **V** (1959) H. 4, S. 163—200.
- [17] GROBA, E. und LUDWIG, G., Sedimentologische Untersuchungen zum Erkennen von Entmischungen der Sedimente an der Außenküste von SE-Rügen und im Greifswalder Bodden. Geologie, **3**, (1956) Nr. 7, S. 617—641.
- [18] GROSSE-BRAUCKMANN, G., Zur Terminologie organogener Sedimente. (Geol. Jb., **79** (1961) S. 117 bis 141.
- [19] HANSEN, S., Varvighed i danske og skaanske senglaciale Aflejringar. Danmarks Geol. Unders., Re. II, Nr. 63 (1940).
- [20] HANSEN, S. und ØDUM, H., Lerblokke som Bundsediment i danske Farvande. Danmarks Geol. Unders., Re. IV, Bd. 4 (1960) 24 S.
- [21] HERMANN, F., Über den physikalischen und chemischen Aufbau von Marschböden und Watten verschiedenen Alters. Westküste, Heide 1943, S. 72—119.
- [22] HINTZ, R. A., Die Entwicklung der Schleimündung. Meyniana, **4** (1955) S. 66—77.
- [23] HINTZ, R. A., Eine neue Methode zur regionalen Darstellung von Korngrößenanalysen. Meyniana, **5** (1956) S. 92.
- [24] INMAN, D. L., Measures for describing the size distribution of sediments. Journ. of sedimentary Petrology, **22** (1952) S. 125—145.
- [25] INMAN, D. L., Wave-generated ripples in nearshore sands. (Beach Erosion Board, Techn. Memor. Nr. 100, New York 1957).
- [26] ILLIES, H., Die Schrägschichtung in fluviatilen und litoralen Sedimenten, ihre Ursache, Messung und Auswertung. Mitt. Geol. Staatsinst. Hamburg, **19** (1949) S. 89—109.
- [27] JARKE, J., Die Sedimentation in den schleswig-holsteinischen Förden. Schr. Naturw. Ver. f. Schleswig-Holstein, **25** (1951) S. 204—210.
- [28] JARKE, J., Eine neue Bodenkarte der südlichen Nordsee. (Dtsch. Hydr. Z., **9** (1956) H. 1, S. 1—9.
- [29] KALLE, K., Der Stoffhaushalt des Meeres. Probleme der kosmischen Physik, **23** (1945) 263 S.
- [30] KÖNIG, D., Vergleichende Bestandsaufnahmen an bodenbewohnenden Watt-Tieren im Gebiet des Sicherungsdammes vor dem Friedrichskoog (Süderdithmarschen) in den Jahren 1935—1939. Westküste, Heide 1943, S. 120—172.



- [31] KOLP, O., Ein Beitrag zur Methodik der Kartierung küstennaher Sandgebiete an Hand des Beispiels des Seegebietes zwischen Darßer Ort und Hiddensee. *Ann. f. Hydrographie*, H. 7 (1956) S. 22–29.
- [32] KOLP, O., Sedimentsortierung und -umlagerung am Meeresboden durch Wellenwirkung. *Peterm. Geogr. Mitt.*, **102** (1958) H. 3, S. 173–178.
- [33] KOLP, O., Beitrag zur Entwicklungsgeschichte der Mecklenburger Bucht. *Peterm. Geogr. Mitt.*, **105** (1961) H. 4, S. 249–254.
- [34] KOLP, O., Paläogeographische Ergebnisse der Kartierung des Meeresgrundes der westlichen Ostsee zwischen Fehmarn und Arkona (*Beitr. z. Meereskunde*, H. 12–14 (1965) S. 19–59).
- [35] LUDWIG, G., Zur Benennung von Korngemischen. *Geologie*, **4** (1955) Nr. 6, S. 565–572.
- [36] LÜDERS, K., Sediments of the North-Sea. Recent marine sediments. A symposium ed. by P. D. Trask, 2. Aufl., Tulsa 1955, S. 322–347.
- [37] LÜNEBURG, G., Zur Sedimentverteilung in der Außenweser zwischen Hoheweg und Rotersand. *Veröff. Inst. f. Meeresforsch.* Bremerhaven, **7** (1960) H. 1, S. 1–13.
- [38] LUNDQVIST, G., Sjösediment fran Gotland. *Sver. Geol. Unders. Arsb.*, **34** (1940) S. 1–143.
- [39] MANOHAR, M., Mechanics of bottom sediment movement due to wave action. Beach Erosion Board, Techn. Memorandum Nr. 75, New York 1955.
- [40] MÜLLER, C. D., Biocoenotisch-oekologische Untersuchung verschiedener Wattengebiete an der deutschen Küste. Diss. bei d. Naturw.-Phil. Fakultät der Justus Liebig-Universität zu Gießen, Gießen 1957.
- [41] MÜLLER, C. D., Biologisch-sedimentologische Untersuchung der Wattveränderung 1955–1961 bei Wremen Forschungsstelle Norderney. Sonderdruck aus dem Jahresber. 1961, **13** (1962) S. 123–179.
- [42] MÜLLER, C. D., Das Watt an der Butjadinger Küste von Langwarden bis Tossens. Untersuchung von Fauna und Sediment und Folgerungen für den Küstenschutz. Forschungsstelle Norderney, Sonderdruck aus dem Jahresber. 1962, **14** (1963) S. 115–137.
- [43] MÜLLER, C. D., Fauna und Sediment im Wurster Watt von Solthörn bis Dorumer Tief und ihre Beeinflussung durch die Februarsturmfut 1962. Forschungsstelle Norderney, Sonderdruck aus dem Jahresber. 1962, **14** (1963) S. 143–170.
- [44] MÜLLER, G., Die rezenten Sedimente im Golf von Neapel. 1. Die Sedimente des Golfes von Pozzuoli. *Geol. Rdsch.*, **47** (1959) H. 1, S. 117–150.
- [45] MÜLLER, W., Unterschiede in den chemischen und physikalischen Eigenschaften von fluviatilen, brackischen und marinen Sedimenten. *Developments in Sedimentology*, Vol. 1, Deltaic and shallow marine deposits, Amsterdam 1964, S. 293–300.
- [46] NAUMANN, E., Einführung in die Bodenkunde der Seen. *Die Binnengewässer*, Bd. 9, Stuttgart 1930.
- [47] NIEHOFF, W., Die primär gerichteten Sedimentstrukturen, insbesondere die Schrägschichtung, im Kohlenquarzit am Mittelrhein. *Geol. Rundschau*, **47** (1958) S. 252–321.
- [48] NIGGLI, P., Gesteins- und Minerallagerstätten I u. II, Basel 1948.
- [49] OSTENDORF, E., Die Grund- und Bodenverhältnisse der Watten zwischen Sylt und Eiderstedt. *Westküste*, Heide 1943, S. 1–6.
- [50] PLATH, M., Die biologische Bestandsaufnahme als Verfahren der Kennzeichnung der Wattedimente und die Kartierung der nordfriesischen Watten. *Westküste*, Heide 1943, S. 7–46.
- [51] POST, L. v. und GRANLUND, E., Södra Sveriges torvtillgänger I. *Sver. Geol. Unders. Arsb.*, **19** (1926) S. 1–127.
- [52] POTONÉ, R., Die Nomenklatur der Unterwasserablagerungen unter besonderer Berücksichtigung derjenigen vorwiegend organischer Natur. Erläuterungen zur Normung der Terminologie der subaquatischen Gesteine. *Jb. Preuß. Geol. Landesanstalt*, **58** (1938) S. 426–438.
- [53] PRATJE, O., Der glaziale Untergrund der heutigen Sedimente im Bornholmer Becken. *Z. Geol. Ges.* **85** (1933) S. 730–739.
- [54] PRATJE, O., Die Bodenbedeckung der südlichen und mittleren Ostsee und ihre Bedeutung für die Ausdeutung fossiler Sedimente. *Dtsch. Hydr. Z.*, **1** (1948) H. 2/3, S. 45–61.
- [55] PRATJE, O., Die Deutung der Steingründe in der Nordsee als Endmoränen. *Dtsch. Hydr. Z.*, **4** (1951) H. 3, S. 106–114.
- [56] REINECK, H. E., Über Gefüge von orientierten Grundproben aus der Nordsee. *Senckenbergiana Lethaea*, **39** (1958) Nr. 1/2, S. 25–41.
- [57] REINECK, H. E., Über die Entstehung von Linsen- und Flaserschichten. *Abh. dtsh. Akad. d. Wiss. Berlin, Klasse III*, H. 1 (1960) S. 369–374.
- [58] REINECK, H. E., Sedimentbewegungen an Kleinrippeln im Watt. *Senckenbergiana Lethaea*, **42** (1961) Nr. 1/2, S. 51–67.
- [59] REINECK, H. E., Sedimentgefüge im Bereich der südlichen Nordsee. *Abh. der Senckenbergischen Naturforsch. Ges.*, **505** (1963) S. 1–138.



- [60] REMANE, A., Einführung in die zoologische Ökologie der Nord- und Ostsee. In: Die Tierwelt der Nord- und Ostsee von G. GRIMPE und E. WAGLER, Bd. 1, Teil 1a, S. 1–124, Leipzig 1940.
- [61] REUTER, G., Gelände- und Laborpraktikum der Bodenkunde. Berlin 1962.
- [62] RUCK, K. W., Seegrundkartierung der Lübecker Bucht. Die Küste, H. 2, (1952) S. 55–57.
- [63] RUYTER, J. L., Vorschlag zur bodenartigen Kennzeichnung von Wattsedimenten. (Eiszeitalter und Gegenwart, 11 (1960) S. 190–195.
- [64] SAGER, G., Die Beziehung zwischen den Gezeitenströmen und der Meeresbodenbedeckung in der Nordsee, dem Kanal und der Irischen See. Peterm. Geogr. Mitt. 107 (1963) H. 2, S. 111–115.
- [65] SCHÄFER, W., Aktuo-Paläontologie nach Studien in der Nordsee. Frankfurt a. M. 1962.
- [66] SCHERF, H., Der Goldkögerwurm, *Pectinaria koreni*. Natur und Volk, 87 (1957) S. 103–111.
- [67] SCHULZ, BR., Hydrographische Untersuchungen in der Ostsee 1925–1938 mit dem Reichsforschungsdampfer „Poseidon“. Ergänzungsheft z. Dtsch. Hydr. Z., Reihe B, Nr. 1, Hamburg 1956.
- [68] SCHULZE, F., Anleitung zur Untersuchung der Ackererde auf ihre wichtigsten physikalischen Eigenschaften und Bestandteile. Journ. f. prakt. Chemie, 47 (1849) H. 5/6, S. 241–335.
- [69] SCHWARZ, A., Der tierische Einfluß auf die Meeressedimente Senckenbergiana Lethaea, 14 (1932) S. 118–172.
- [70] SEIBOLD, E., DILL, R. F. und WAGLER, E., Tauchbeobachtungen und petrographische Untersuchungen in der Kieler Außenförde. Meyniana, 11 (1961) S. 82–96.
- [71] VAN STRAATEN, L. M. J. U., Composition and structure of recent marine sediments in the Netherlands. Leidse Geol. Medelingen, 19 (1954) 110 S.
- [72] TAPPER, E., Meeresgeschichte der Kieler- und Lübecker Bucht im Postglazial. Geol. d. Meere u. Binnengewässer, Bd. 4, Berlin 1940, S. 113–244.
- [73] TRASK, P. D., Organic content of recent marine sediments. Recent marine sediments. A symposium ed. by P. D. Trask, 2. Aufl., Tulsa 1955, S. 428–453.
- [74] WATTENBERG, H., Entwurf einer natürlichen Einteilung der Ostsee. Kieler Meeresforschungen, VI (1949) S. 10–17.
- [75] WASMUND, E., Zur Nomenklatur der subaquatischen Sedimente. Geol. d. Meere u. Binnengewässer, Bd. 2, Berlin 1938, S. 44–48.
- [76] WOHLLENBERG, E., Die Wattenlebensgemeinschaften im Königshafen von Sylt. Helgoländer wiss. Meeresunters., Kiel 1937, Bl. 1, H. 1, S. 1–92.
- [77] ZWILLENBERG, O. und HENDRICKS, J., Zum Vorkommen von *Cardium*-Klei in Waterland nordöstlich von Amsterdam. Geol. en Mijnbouw, Nw. Ser., 16 (1954) S. 105–117.

# Untersuchung der Wirksamkeit von Seebuhnen mit Hilfe von Farbsandversuchen<sup>1)</sup>

VON OTTO KOLP

*Zusammenfassung:* Die Anwendung neuer Methoden läßt einen wissenschaftlichen Fortschritt bei der Beantwortung der Frage nach der Funktion und Wirksamkeit von Seebuhnen erwarten. Vom Seegang unabhängige Peilungen mit Hilfe im Meeresgrund eingespülter, markierter Stangen, Aufnahmen des Strömungsfeldes mit Hilfe von Uranin-Eingaben und Farbsandversuche, verbunden mit dem Einsatz zahlreicher, autonomer Taucher, lieferten neues Anschauungsmaterial. Zielsetzungen und Methodik der in den Jahren 1963 bis 1965 vom Institut für Meereskunde Warnemünde an der Ostseeküste durchgeführten Farbsandversuche in Buhnenfeldern werden dargelegt. Es erfolgt eine Gegenüberstellung verschiedener Versuche mit lumineszenten Farbstoffen. Die angeführten Beispiele von Aufnahmen des submarinen Reliefs und Karten der Reliefveränderung, des Strömungsfeldes, der Sediment- und Farbsandverteilung in Buhnenfeldern sollen die Richtigkeit des eingeschlagenen Weges erkennen lassen.

Einführung . . . . .	62
A. Zielsetzung und Methodik . . . . .	63
1. Zielsetzung mehrjähriger Untersuchungen der Wirksamkeit von Seebuhnen verschiedener Bauweise . . . . .	63
2. Wahl und Herrichtung des Versuchsfeldes . . . . .	66
3. Vom Seegang unabhängige Aufnahmen des submarinen Reliefs mit Hilfe eingespülter, markierter Stangen. . . . .	67
4. Aufnahmen des Strömungsfeldes mit Hilfe von Uranin-Eingaben . . . . .	69
5. Farbsandversuche mit lumineszenten Stoffen . . . . .	70
B. Auswertung der einem Farbsandversuch vorangegangenen Messungen . . . . .	70
1. Tiefenkarten und Karten der Reliefveränderung. . . . .	71
2. Aufnahmen der Strömungsfelder im Bereich dicht und offen geschlagener Pfahlbuhnen . . . . .	73
3. Karten der Sedimentverteilung . . . . .	77
C. Farbsandversuche mit lumineszenten Stoffen in Buhnenfeldern . . . . .	77
1. Planung und Durchführung eines Farbsandversuchs zwischen dicht geschlagenen Pfahlbuhnen vor dem Fischland 1964 . . . . .	79
a) Die Situation vor dem Fischland . . . . .	79
b) Vorüberlegungen . . . . .	80
c) Vorbereitungen im Labor . . . . .	80
d) Ablauf des Versuchs — Vorübungen, Planung, Wind und Strömungen am Versuchstag, Farbsandeingabe und Probenentnahme . . . . .	80
e) Untersuchung der Proben . . . . .	81
2. Planung und Durchführung eines Farbsandversuchs zwischen offen geschlagenen Pfahlbuhnen vor Zempin (Usedom) 1965 . . . . .	82
a) Die Situation vor Zempin. . . . .	82
b) Vorüberlegungen . . . . .	83
c) Vorbereitungen im Labor . . . . .	84
d) Ablauf des Versuchs . . . . .	84
e) Untersuchung der Proben . . . . .	85

<sup>1)</sup> Herrn Professor Dr. KARL GRIPP zum 75. Geburtstag.

3. Vergleich verschiedener Farbsandversuche . . . . .	86
4. Karten der Farbsandverteilung in den Bühnenfeldern vor dem Fischland am 25. 10. 1964 . .	87
a) Symbolik . . . . .	87
b) Die Farbsandverteilung in den Bühnenfeldern . . . . .	87
c) Die Wirksamkeit dichter, einreihiger Pfahlbuhnen . . . . .	88
D. Schlußwort . . . . .	89
E. Literatur . . . . .	89

### Einführung

In Anbetracht der Schwierigkeit aller Untersuchungen in der ufernahen Brandungszone erscheint es verständlich, daß nach mehr als 100 Jahren des Bühnenbaues an deutschen Meeresküsten die Frage nach der Funktion und Wirkungsweise von Seebuhnen noch immer offen steht. Auch über die Grenzen Deutschlands hinaus stellt die Wirksamkeit von Seebuhnen noch heute ein umstrittenes Problem dar.

Vor etwa hundert Jahren mußte der Altmeister der deutschen Wasserbaukunst, GOTTHILF HAGEN folgendes feststellen: „Vorzugsweise sind die Erfolge derjenigen baulichen Anlagen noch sehr unsicher, . . . die das Wasser zu gewissen Wirkungen veranlassen sollen. Hierher gehören beispielsweise die Bühnen. Die Erfahrung hat zwar auch bei ihnen zu manchen Regeln geführt, aber zur klaren Einsicht in ihre Wirkungen und dadurch zur Entscheidung über ihre zweckmäßigste Anordnung ist man noch keineswegs gelangt. Selbst die Frage, unter welchen Verhältnissen das Wasser den Boden angreift, ist bisher nicht genügend beantwortet. Ebenso wenig kennt man die Bewegungen, welche diese Werke bei den verschiedenen Wasserständen veranlassen. Ähnlichen Zweifeln begegnet man in allen Einzelheiten, und der Zusammenhang der ganzen complicierten Erscheinung in der Ausbildung eines Strombettes oder eines Ufers ist noch vollständig dunkel. Der größte Übelstand besteht aber darin, daß dieser Mangel gar nicht erkannt wird, vielmehr die Ansicht verbreitet ist, daß jene Theorien schon so vollständig über Alles Aufschluß geben, wie dieses von Theorien nur erwartet werden kann.“<sup>1)</sup>

In jüngster Zeit gelangte M. PETERSEN (1961, S. 45) nach einer Zusammenfassung des deutschen Schrifttums über Seebuhnen an sandigen Küsten fast nur zu derselben Erkenntnis: „Die komplexen Vorgänge an sandigen Küsten mit den bisher verfügbaren Mitteln vollständig zu klären und für alle Fälle richtig zu deuten, war noch nicht möglich. Aus der Tatsache, daß das Schrifttum über die Wirkung von Strandbuhnen mit so zahlreichen Annahmen und Behauptungen belastet ist, geht hervor, daß diese durch Maß und Zahl zu belegen oder zu entkräften sind — eine Notwendigkeit, die heute allgemein anerkannt wird und wegen der sehr hohen Bau- und Unterhaltungskosten nachdrücklich gefordert werden muß.“

Es soll nicht übersehen werden, daß sich frühere Diskussionen auf gewisse Erfahrungen bezüglich des Sandhaushalts nach Errichtung von Bühnenwerken stützten. Verpeilungen, die zur Beurteilung der Veränderungen am Strande und in den Bühnenfeldern in beschränkter Zahl vorgenommen wurden, reichen jedoch für unsere Fragestellung nicht aus. Es sind vielfältige, zusammenhängende Beobachtungen über einen großen Teil des Jahres hinweg oder besser während des ganzen Jahres erforderlich.

Die Unzulänglichkeit von Modellversuchen zum Studium der Wirkung von Seebuhnen wurde bereits von verschiedenen Autoren dargelegt. Das gilt insbesondere für den Fall, daß bei schräg zum Strande anlaufenden Wellen und einer weiß schäumenden Brecherlinie auf dem Riff eine uferparallele Strömung und ein gleichgerichteter Sedimenttransport einsetzen.

<sup>1)</sup> G. HAGEN, Handbuch der Wasserbaukunst, III (1863) S. VII ff.

Der Zusammenhang zwischen brechenden Wellen, uferparalleler Strömung und Sedimentbewegung in Buhnenfeldern wird sich kaum im Modell einer Forschungsanstalt für Hydraulik und Wasserbau maßstabgerecht darstellen lassen. Die sich bei ruhigerer Wetterlage senkrecht zur Uferlinie vollziehenden Veränderungen sollen hier außer acht gelassen werden, da sie ohne besondere Wirksamkeit der Seebuhnen erfolgen und unter Vorbehalt einfacher im Wellentank untersucht werden können.

Die Problematik der ufernahen Prozesse und ihrer Abwandlung durch Buhnenbauten bildet sowohl für die Meeresgeologie als auch für die Ozeanographie der ufernahen Meereszone gegenwärtig und noch für viele Jahre einen schwierigen Gegenstand der Grundlagenforschung. Die Notwendigkeit umfangreicher Messungen und Beobachtungen an Buhnen wurde erkannt. Es fehlt jedoch an voranschreitender Arbeit. Der vorliegende Bericht möchte deshalb als ein Beitrag angesehen werden, der einen Weg in dieses schwierige Untersuchungsfeld weist. Für einen Erfolg sprechen gegenwärtig mehrere neu ins Feld zu führende Methoden und bessere technische Voraussetzungen für Messungen und Probenentnahmen im und unter Wasser. Insbesondere ergibt sich hier eine reizvolle und Erfolg versprechende Anwendungsmöglichkeit der Luminoforenmethode, deren Vorzüge bei der Untersuchung der Funktion von Küstenschutzbauten im Wasser klar hervortreten.

#### A. Zielsetzung und Methodik

In zahlreichen Diskussionen wurde eine enge Zusammenarbeit zwischen Geowissenschaftler und Physiker bei der Erforschung der Vorgänge auf der Schorre gefordert.

Man sollte die Zuständigkeit meereskundlicher Institutionen angesichts der Schwierigkeit der Erforschung der Küstenprozesse schärfer betonen. Es ist notwendig, von einer Ozeanographie der ufernahen Meereszone zu sprechen. Die Schorre ist eine Zone des Meeresgrundes, die die Aufmerksamkeit von Meeresgeologen vorrangig beansprucht. Seegangs- und Strömungsmessungen in der Brandungszone sollten von Ozeanographen mit betrieben werden, die bereits mit Wellen und Strömungen des Meeres vertraut sind. Die in meereskundlichen Instituten meist vorhandene enge Verbindung zwischen Meeresgeologie und Meeresphysik bietet am ehesten eine Gewähr für die notwendige Verschmelzung der empirisch-beschreibenden und der physikalisch-statistischen Methode. Der Physiker weilt nicht nur mehrere Monate zu Wellen- und Strömungsmessungen draußen, sondern er nimmt kritisch Anteil an der Versuchsanordnung und der beschreibenden Auswertung des an der Küste erfahrenen Geologen und Geographen.

Im Folgenden wird nur von dem einen Weg der Sammlung neuen Tatsachenmaterials durch verbesserte Aufnahmen in den Buhnenfeldern die Rede sein. Dem anderen Weg sind in diesem Heft mehrere Aufsätze von Dipl.-Physiker K. STRIGGOW gewidmet.

##### *1. Zielsetzung mehrjähriger Untersuchungen der Wirksamkeit von Seebuhnen verschiedener Bauweise*

Die Untersuchungen der Funktion von Buhnen mit Hilfe von Farbsandversuchen werden sich über eine Reihe von Jahren erstrecken, da bei gleichzeitiger Verwendung mehrerer Farben im Laufe eines Jahres jeweils nur ein Versuch im Untersuchungsfeld durchgeführt werden kann. Durch automatische Selektions- und Zählvorrichtungen für lumineszente Sandkörner ließen sich weitere Möglichkeiten schaffen, die sowohl zu einer Erhöhung der Zahl von Farbsandversuchen als auch zu einer umfassenderen Versuchsanordnung führen könnten. Ein durch Eingabe mehrerer Zentner verschieden gefärbter Sande verunreinigtes Feld käme erst nach Ablauf von 2 Jahren für einen weiteren Versuch in Frage. Das gilt besonders, wenn



der Sand nach dem früher beschriebenen Verfahren (KOLP & ENZENROSS 1961) durch einen Kunstharzüberzug gegen Abrieb des lumineszenten Stoffes in der Brandung geschützt wird. Es besteht stets die Möglichkeit einer zeitweiligen Einbettung von Farbsand durch Verschüttung z. B. am leeseitigen Riffhang, so daß bis zum Abtransport sämtlicher Farbkörner ein längerer Zeitraum angenommen werden muß.

Bei der Untersuchung von Buhnen kommt es zunächst darauf an, die stärksten Gegensätze herauszuarbeiten. Deshalb gelten die ersten Aufnahmen der Gegenüberstellung der Verhältnisse an Küstenstrecken mit und ohne Buhnen.

Die nächsten Versuche dienen dem Vergleich der an unserer Küste am häufigsten anzutreffenden, dicht und offen geschlagenen, einreihigen Pfahlbuhnen.

Weitere Untersuchungen sollen der unterschiedlichen Wirkung kurzer und langer Buhnen und dem Einfluß gänzlich undurchlässiger Buhnen wie Faschinen-, Stein- und Stahlspundbuhnen gewidmet sein.

Spezielle Aufnahmen betreffen Einzelprobleme wie z. B. Rinnenbildung und Kolkungen an Buhnen und die Frage der Lee-Erosion.

Wie bereits erwähnt, sollte die Wirkung von Seebuhnen bei schräg zur Uferlinie anlaufenden Wellen und weiß schäumenden Brechern auf dem Riff und in den Buhnenfeldern untersucht werden. Die Vielfalt der Kombinationen verschiedener Windrichtungen und -stärken läßt sich bei der Untersuchung von Buhnen auf 2 Fälle reduzieren, in denen die Strömung uferparallel entweder in der einen oder anderen Richtung verläuft. Für einen Farbsandversuch wird derjenige der beiden Fälle bevorzugt, der vorher bei gleicher Windstärke höhere Strömungsgeschwindigkeiten feststellen ließ. Um bei einer bestimmten Wetterlage im voraus beurteilen zu können, ob während eines Farbsandversuchs die Strömung zeitweilig zum Stillstand kommt und anschließend kentert, ist es wichtig, bei den vorangehenden, monatelangen Beobachtungen diejenige Richtung auflandigen Windes zu erkunden, bei der ein Stagnieren des Brandungsstromes eintritt. Dies ist insofern entscheidend, als ein mißlungener Farbsandversuch aus den bereits angeführten Gründen nicht wiederholt werden kann.

Es gilt die Funktion der Buhnen mit der Gesamtheit der Küstenprozesse in Zusammenhang zu sehen. Deshalb müssen bei entscheidenden Wetterlagen gleichzeitige Aufnahmen des Reliefs, des Strömungs- und Wellenfeldes sowie der Sediment- und Farbsandverteilung in einem engmaschigen Stationsnetz erfolgen. Die damit gewonnenen Übersichtskarten sollen Relationen zwischen den einzelnen Erscheinungen unmittelbar erblicken lassen. Derartige annähernd synchrone Momentaufnahmen gewähren einen tieferen Einblick in die Vorgänge im Bereich eines Buhnenwerkes und bieten dem Physiker wertvolle Hinweise für den Einsatz neuer Geräte zur Erfassung der Seegangscharakteristik und der Strömungsverhältnisse.

Der Farbsandversuch wird bei bewegter See im Spätherbst durchgeführt, wenn die Wassertemperatur noch einen mehrstündigen Einsatz autonomer Taucher zuläßt. Wiederholte Aufnahmen des Reliefs, der Sedimentverteilung und des Strömungsfeldes während der vorangegangenen Monate dienen der Vorklärung der gesamten Situation. Die in den Sandproben vorherrschenden Korngrößen lassen über die getrennt und verschieden einzufärbenden Fraktionen entscheiden. Die Wahl der Eingabeorte für die verschiedenen Farbsande erfolgt auf Grund der vorherigen Kenntnis des Reliefs und des Strömungsfeldes.

3 Übersichtsverpeilungen vor einem etwa 400 m breiten Strandabschnitt, die beiderseits über das Untersuchungsfeld hinaus reichen und noch das 2. Riff mit erfassen, erfolgen zu Beginn, in der Mitte und am Ende der Beobachtungsperiode (Abb. 1).

Zu den gleichen Zeiten werden Sedimentproben vor und in den Buhnenfeldern, am Strande und auf der Düne an allen Stationen im Quadratnetz mit 10 m Abständen entnommen.

Das allgemeine Beobachtungsprogramm umfaßt:

- a) Messungen der Windstärke und -richtung, Pegelablesungen und Wellenmessungen 3mal täglich,



Abb. 3. Blick auf das Untersuchungsfeld vor dem Fischland



Abb. 9. Seegang in den Bühnenfeldern vor Zempin am 16. Juli 1965. Wind: NE 5 Beauf., Pegelstand: 546. Die 20 cm über Mittelwasser abgeschnittenen Bühnen befinden sich unter Wasser. Der Strand wurde etwa zur Hälfte überflutet. Die Schwappkante ist an dem weißen Gischt dicht vor den Stangen der Standlinie zu erkennen. Die beiden Boote liegen dicht hinter dem Kamm des weit auf den Strand zurückverlegten Strandwalls.





- b) Verpeilungen des Versuchsfeldes wöchentlich und nach besonderen Wetterlagen,
- c) Aufnahmen des Strömungsfeldes bei besonderen Wetterlagen,
- d) Strömungsmessungen auf einem verlängerten Profil zwischen den Buhnen und auf einem Vergleichsprofil vor der benachbarten, nicht durch Buhnen geschützten Küste,
- e) Oberflächen- und Bodenströmungsmessungen,
- f) Spezialverpeilungen der Kolkungen an Buhnen,
- g) Messungen der bei Seegang in Suspension befindlichen Sandmengen.

## 2. Wahl und Herrichtung des Versuchsfeldes

An unserer Küste bieten sich nicht allzuvieler, günstig erscheinende Versuchsstrecken. Bei der Wahl des Versuchsfeldes ist in Rücksicht auf die Strömung und Wellen darauf zu achten, daß dasselbe nicht zu dicht hinter einem Küstenknick liegt. Wegen des Farbsandversuchs ist eine günstige Exposition zu den im Herbst vorherrschenden Windrichtungen wünschenswert. Deshalb sollte das Untersuchungsfeld nicht in einer Bucht liegen. Die Nähe von Steilufern ist zu meiden, da dort meist nur grobes Material in den Buhnenfeldern enthalten ist und die unter einer geringmächtigen Decke lockeren Sediments vorhandene Abrasionsplatte bei Seegang besondere Verhältnisse auf der Schorre und am Strande hervorruft. Schadenstellen an sandigen Flachküsten ist auszuweichen, da meist die Ursachen für den stärkeren Küstenrückgang unbekannt sind. Es ist ferner darauf zu achten, daß die in Aussicht genommenen Buhnenfelder nicht unter dem Einfluß anderer Bauwerke wie Molen, Seebrücken und längerer Buhnen stehen.

Die Vorerkundung läßt feststellen, ob die Buhnen intakt sind. Die Möglichkeit einer Sperrung des Untersuchungsfeldes für den Badeverkehr ist zu prüfen. Das Hauptaugenmerk gilt jedoch der Sandbedeckung in den Buhnenfeldern und den Sandriffen. Taucher schwimmen die Buhnenfelder ab, um vielleicht vorhandene Kiesflächen zu erkunden. Es wird eine Abschätzung des Verhältnisses zwischen den mit Sand und gröberem Material bedeckten Flächen vorgenommen. Einzelne Sandprobenentnahmen auf der Schorre, am Strand und auf der Düne lassen das mittlere Korn grob bestimmen. Zu den Vorarbeiten gehört ferner die topographische Aufnahme.

Mit dem Aufbau transportabler, winterfester Stationen wurde ein lang gehegter Wunsch der Einrichtung von Versuchsstrecken an der Küste Wirklichkeit. Ein Holzhaus mit 4 Räumen gewährt 4 bis 5 Mitarbeitern während der etwa ein halbes Jahr umfassenden Untersuchungsperiode Arbeitsunterkunft (Abb. 2). Für eine höhere Belegung während des Farbsandversuchs sind insgesamt 10 Betten vorhanden. Ein kleiner Geräteschuppen enthält die Taucherausrüstung, ein Aggregat, Spülpumpen, Schlauchboote und das gesamte Zubehör. Vor dem Farbsandversuch werden die mit gefärbten Sanden gefüllten Perfolsäcke, gegen Sonnenlicht geschützt, darin gelagert.

Das Versuchsfeld umfaßt 3 Buhnenfelder und einen 20 bis 40 m breiten Streifen vor der Streichlinie der Buhnenköpfe. Nach der Einmessung einer Standlinie auf dem Strande erfolgt das Einspülen und Einnivellieren von 200 bis 250 zollstarken Eisenrohren von 4 bis 6 m Länge (Abb. 3). Die Rohre werden mit Hilfe eines 1½ m langen Spülrohres etwa 2 m tief in den Meeresgrund eingespült. Die im Quadratnetz im Abstand von je 10 m eingespülten Rohre bieten eine Gewähr dafür, daß in der mehrmonatigen Beobachtungsperiode sämtliche Probenentnahmen, Peilungen und Strömungsmessungen stets an denselben Stationen erfolgen. In der Brandung kann sich der Taucher unter Wasser an den Stangen festhalten, so daß auch unter schwierigen Bedingungen die gleichen Stationen getroffen werden. Bei Strömungsmessungen mit Hilfe von Uranin-Eingaben dienen die Stangen als Festpunkt. Die einnivellierte Marke an jedem Rohr, deren oberer Rand bei + 50 cm NN liegt, dient als sicherer Anhaltspunkt für Peilungen mit dem Peilstab bei Seegang.



Abb. 2. Stationshaus hinter der Düne auf dem Fischland 1964

Bei einer 250 m langen Standlinie stehen 26 Fluchtstangen auf dem Strande. Vor jeder Stange befinden sich auf einem Profil senkrecht zur Standlinie je nach der Länge der Buhnen 6 bis 10 Rohre (Abb. 4). Für Strömungsmessungen bei besonderen Wetterlagen werden mehrere Profile durch weitere Rohre verlängert. Ein am weitesten seewärts bis nach dem 2. Riff vorgetriebenes Profil von 150—200 m Länge weist innerhalb des Untersuchungsfeldes Stangen im Abstand von 2,50 m und weiter seewärts in 5-m-Abständen auf. Falls unweit der mit Buhnen versehenen Uferstrecke ein freier Strand vorhanden ist, empfiehlt es sich, ein Vergleichsprofil in engeren Abständen ebenfalls bis nach dem 2. Riff einzurichten.

Zur Herrichtung des Versuchsfeldes gehört ferner die Ausbringung eines transportablen Schreibpegels, einer fernregistrierenden elektrischen Stufensonde für Seegangsmessungen sowie der meteorologischen Meßeinrichtungen. Es ist auch die Errichtung eines Leichtmetallmastes für fotografische Wellenaufnahmen und weitere Beobachtungen zu empfehlen.

### *3. Vom Seegang unabhängige Aufnahmen des submarinen Reliefs mit Hilfe eingespülter, markierter Stangen*

Wie schon angedeutet, trägt jede der im Untersuchungsfeld eingespülten Stangen 50 cm oberhalb des Meeresspiegels (NN) eine mit Ölfarbe gezeichnete Marke, die mit Hilfe eines Nivelliergeräts angebracht wurde. Auch bei Seegang kann mit einem Peilstab die Tiefe vom oberen Rand der Marke bis zum Meeressgrund auf 1 cm genau und somit jede Veränderung des Meeresbodens festgestellt werden. Bei den Messungen notiert der Taucher die Beträge mit einem Bleistift auf eine mit feinem Sandpapier angerauhte PVC-Tafel, auf der ein dem Bühnenfeld mit seinen Stationen entsprechendes Gitternetz vorgezeichnet ist.

Die Peilungen dienen der Darstellung des Reliefs in Tiefenkarten mit Isobathen-Abständen von 10 cm.

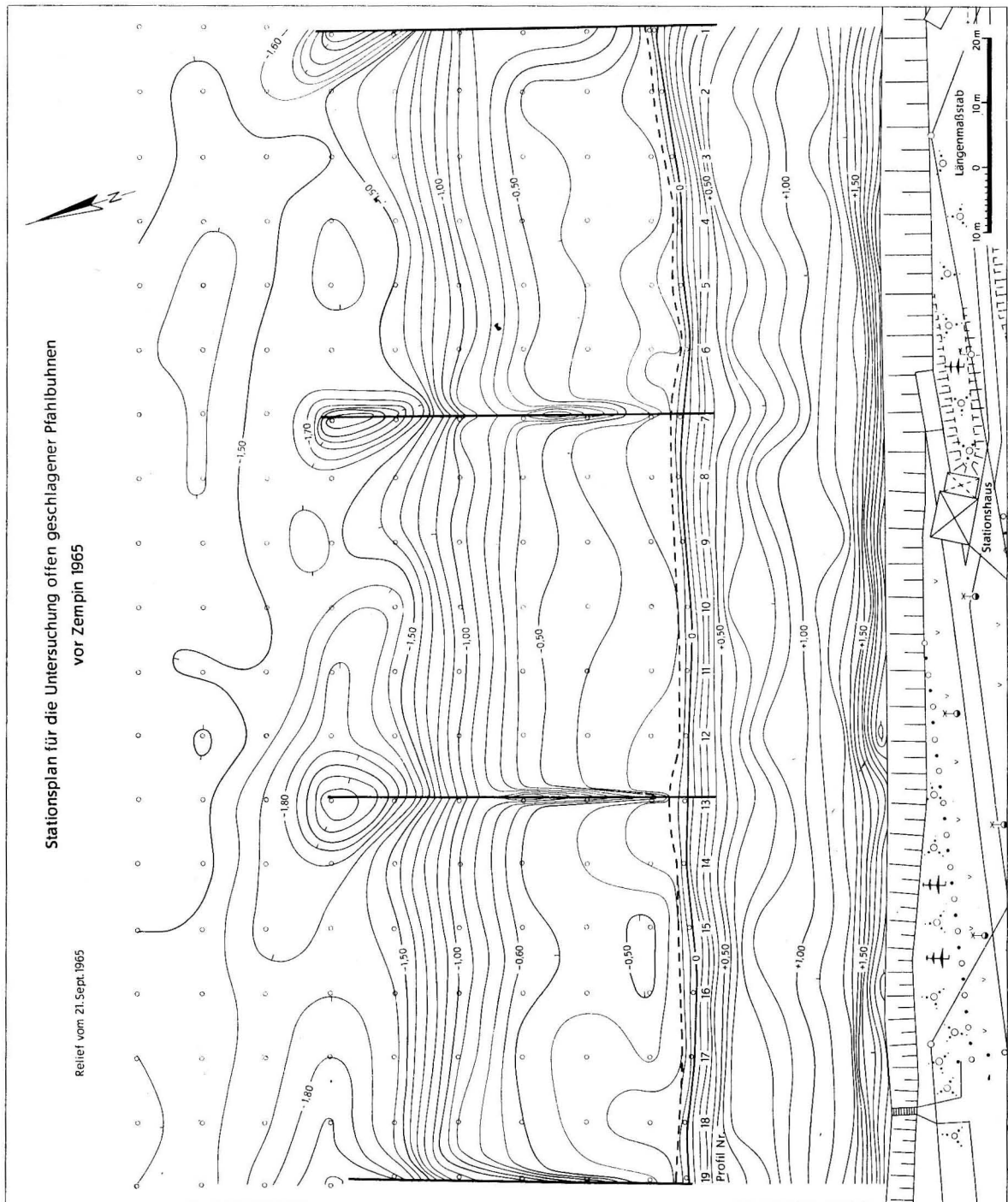


Abb. 4. Stationsplan für die Untersuchung offen geschlagener Pfahlbuhnen vor Zempin 1965

Aufnahmen auf dem verlängerten Profil bis nach dem 2. Riff werden für die Zeichnung von Schnitten benötigt, die auf Grund der mit den Peilungen gleichzeitig vorgenommenen Strömungsmessungen unterschiedliche Strömungen auf den Riffen, in den Rinnen und an der Schwappkante erkennen lassen.

Die Messungen wurden bei auflandigen Winden bis Windstärke 8 Beaufort durchgeführt. Im Falle körperlicher Ermüdung läßt sich der Taucher in seinem Neopren-Anzug, der ihn im Wasser trägt, vom Seegang an Land treiben. Es besteht einzig die Gefahr, daß der Taucher durch die Brandung gegen eine Buhne geworfen wird.



#### 4. Aufnahmen des Strömungsfeldes mit Hilfe von Uranin-Eingaben

Strömungsmessungen lassen sich einfach mit Hilfe von Uranin (Natrium-Fluoreszin) vornehmen. Es werden etwa 6 gehäufte Teelöffel voll in 1 Liter Wasser gelöst. Der Taucher führt diese Lösung bei Strömungsmessungen an der Oberfläche wie auch unter Wasser in einer PVC-Spritzflasche bei sich. Die tieferen Stationen erreicht er schwimmend. Er hält sich dann an der Stange fest, bis von Land her das Zeichen zum Ausspritzen des Uranins gegeben wird. Wenige Kubikzentimeter Farbstoff lassen einen fluoreszierenden grünen Farbleck im Wasser aufleuchten, der sich mit der Strömung langsam vom Eingabeort entfernt. Der Taucher folgt dem Fleck vorsichtig. Der allmählich verblassende Fleck kann durch erneutes Einspritzen von Uranin in seiner Leuchtkraft verstärkt werden. Wenn das Zentrum des sich allmählich auseinanderziehenden Farbleckes eine andere Stange erreicht oder die benachbarte Profillinie überschreitet, wird an Land die Zeit gestoppt. Gleichzeitig vermerkt der Taucher auf seiner PVC-Tafel die Entfernung der Mitte des Farbleckes von der Standlinie. Der Abstand von der nächsten Eisenstange wird in Metern geschätzt und dann die Entfernung der Stange von der Nulllinie, die dem Taucher bekannt ist, hinzugezählt. Strömungsrichtung und -geschwindigkeit werden später als Vektor in die Strömungskarte eingetragen.

Bei Strömungsmessungen mit Hilfe von Farbeingaben ist insofern mit einer Verfälschung zu rechnen, als eine geringe Komponente gegen den Wind und die Hauptströmungsrichtung auftritt, die im Bereich von Brechern durch die Ausbreitung des Farbstoffes vom Brechpunkt nach beiden Seiten und in Ufernähe durch das parabelförmige Auflaufen der Wellen am Hang des Strandwalls hervorgerufen wird (Abb. 5). Der Fehler bleibt deshalb klein, weil die Zeit der Beobachtung des Farbkleckses 2 Minuten meist nicht überschreitet.

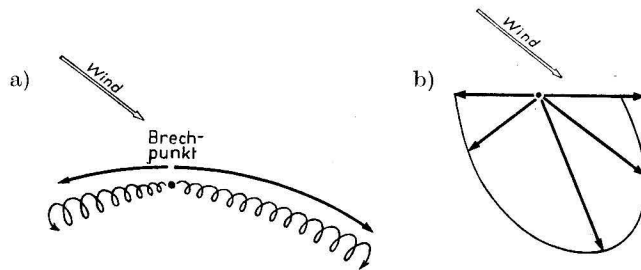


Abb. 5. Gegenläufiger Transport infolge der Ausbreitung des Brechers vom Brechpunkt nach beiden Seiten (a) und infolge des parabelförmigen Auflaufens der Welle auf den Strandwall (b)

Es kommt darauf an, innerhalb eines so kurz wie möglich gehaltenen Zeitraumes an sämtlichen Stationspunkten des Untersuchungsfeldes Messungen durchzuführen. 6 Taucher und 6 Beobachter am Strande benötigten nach einiger Übung 90 Minuten, um die Strömung an 170 Stationen zu messen. Strömungsrichtung und -geschwindigkeiten wechselten von einer Station zur anderen. Es ergab sich bereits nach den ersten Aufnahmen die Erkenntnis des beschränkten Wertes von Einzelmessungen angesichts der Vielfalt der Strömungen in Buhnenfeldern.

Zur Herstellung von Schnitten senkrecht zur Uferlinie, welche gleichzeitig die Strömung an der Oberfläche und dicht über dem Meeresgrund erkennen lassen sollten, wurden wiederholt Strömungsmessungen unter Wasser vorgenommen. Der Taucher testete zuerst die Strömungsrichtung über Grund mit Uranin. Dann legte er eine schwere Meßlatte, die mit einem Ende an der Stationsstange befestigt war, in die Richtung der Strömung. Nach einer zweiten Uranin-Eingabe wurde die Zeit gemessen, in welcher der kleine Farbkleck über dem Meeresgrund eine bestimmte Meterzahl zurückgelegt hatte.

### 5. Farbsandversuche mit lumineszenten Stoffen

Bei Verwendung lumineszenter Stoffe lassen sich einzelne gefärbte Körner aus einer großen Menge Sandes wiederfinden. Das lumineszente Korn leuchtet farbig im UV-Licht, während alle übrigen Sandkörner dunkel bleiben. In einer Probe von 250 g fein- bis mittelkörnigem Sand wird des öfteren nur ein einziges Farbkorn gefunden. Das entspricht einem Verhältnis von etwa 1:10<sup>7</sup>. Trotz der sehr hohen Verdünnung ergeben sich bei Farbsandversuchen brauchbare Aufnahmen der Farbsandkonzentration.

Der besondere Vorteil der Kennzeichnung von Meeressand mit Hilfe lumineszenter Stoffe besteht gegenüber der Verwendung radioaktiven Materials darin, daß mehrere Farben verwendet werden können. 4 Farben ermöglichen z. B. die gleichzeitige Beobachtung der an 4 Stellen in verschiedenen Strömungszonen eingegebenen Farbsande. Das wäre bei Verwendung von radioaktivem Sand nur bei wiederholten Versuchen möglich.

Im Hinblick auf die schwierige Probenentnahme und Untersuchung der Farbsandproben im Labor besteht das Verfahren mit radioaktiven Sanden. Messungen der Strahlungsintensität können an Ort und Stelle ausgewertet werden und ermöglichen noch Umstellungen während des Versuchs. Die Messungen selbst gestalten sich in der Brandung nicht viel einfacher als Probenentnahmen. Es müssen ebenfalls Beobachter mit Schutzanzügen ins Wasser, denn wiederholte Messungen im Quadratnetz mit engen Stationsabständen von nur 10 m lassen sich nicht vom Hubschrauber aus vornehmen.

Es kommt hinzu, daß bei Versuchen zwischen offen geschlagenen Pfahlbuhnen Probenentnahmen bzw. Messungen an 200 Stationen nicht länger als 20 Minuten dauern dürfen, damit die Taucher nach erneuter Vorbereitung und Rückkehr an ihre Anfangsstationen nach Ablauf von insgesamt einer halben Stunde zum zweiten Mal durch die Buhnenfelder schwimmen und anschließend in je einer weiteren halben Stunde das Untersuchungsfeld noch ein drittes, viertes und fünftes Mal durchqueren können.

Die Entnahme von Sandproben bietet den weiteren Vorteil, daß sich bei Eingabe vorher getrennt gefärbter Kornfraktionen verschiedene Transportgeschwindigkeiten und Streuung derselben feststellen lassen. Dazu müssen aus den beim Farbsandversuch entnommenen Proben im Labor je 200 g der entsprechenden Fraktionen ausgesiebt und die darin enthaltenen Farbkörper gezählt werden. Es ist dann auch nötig, von jeder der etwa 1000 g schweren Proben 100 g Sand für eine vollständige Siebanalyse zur Bestimmung des Korngemisches zu entnehmen. Damit wird zugleich ein Überblick über die Sedimentverteilung in den Buhnenfeldern während des Versuchs gewonnen.

Der Nachteil, daß unbekannte Mengen des in See eingegebenen, markierten Sandes durch Verschüttung für unbekannte Dauer vom Sedimenttransport ausgeschlossen bleiben können, gilt für beide Verfahren.

### B. Auswertung der einem Farbsandversuch vorangegangenen Messungen

Die Vorerkundung des Reliefs, der Sedimentverteilung und des Strömungsfeldes für den im Herbst stattfindenden Farbsandversuch erfordert den ständigen Einsatz leichter Taucher. Der täglich mehrstündigen Arbeit im Wasser werden durch die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen Grenzen gesetzt. Deshalb dauert die Beobachtungsperiode von Mai bis Oktober. Es wird nicht übersehen, daß während der Winter- und Frühjahrsmonate stürmische Wetterlagen mit höheren Wellen- und Strömungsgeschwindigkeiten auftreten und größere Veränderungen hervorrufen. Es können dann aber nicht Taucher stundenlang in der Brandung eingesetzt werden. Stürmische Perioden treten bisweilen auch während der Sommermonate auf und sind während des Herbstes in der Regel zu erwarten.



Zwischen den täglichen Beobachtungen und insbesondere während stiller Wetterlagen erfolgt die Bearbeitung der Messungen durch die in der Station anwesenden 4 Beobachter. Es werden verschiedene Schnitte, Karten des Reliefs und seiner Veränderungen, Strömungskarten und Seegangdiagramme gezeichnet, so daß bei der Planung des Farbsandversuchs umfangreiches Beobachtungsmaterial aufbereitet vorliegt.

### 1. Tiefenkarten und Karten der Reliefveränderung

Tägliche Verpeilungen des Untersuchungsfeldes in den beiden ersten Monaten ergaben, daß es während des Sommers genügt, das Relief wöchentlich einmal aufzunehmen. Nur stürmische Wetterlagen lassen deutliche Veränderungen erwarten und erfordern zusätzliche Vermessungen.

In den Reliaufnahmen vor dem Fischland (Abb. 6, 7) tritt die Schwappkante durch die Scharung der 20- bis 50-cm-Isobathen deutlich in Erscheinung. Es handelt sich um die markanteste Grenze im Bühnenfeld, an der die Welle in Ufernähe zum letzten Male bricht. Dies geschieht selbst bei ruhigerem Wetter, und demzufolge läuft ständig eine Strömung an der Schwappkante entlang. Im Vergleich zu der durch eine kräftige, gestrichelte Linie gekenn-

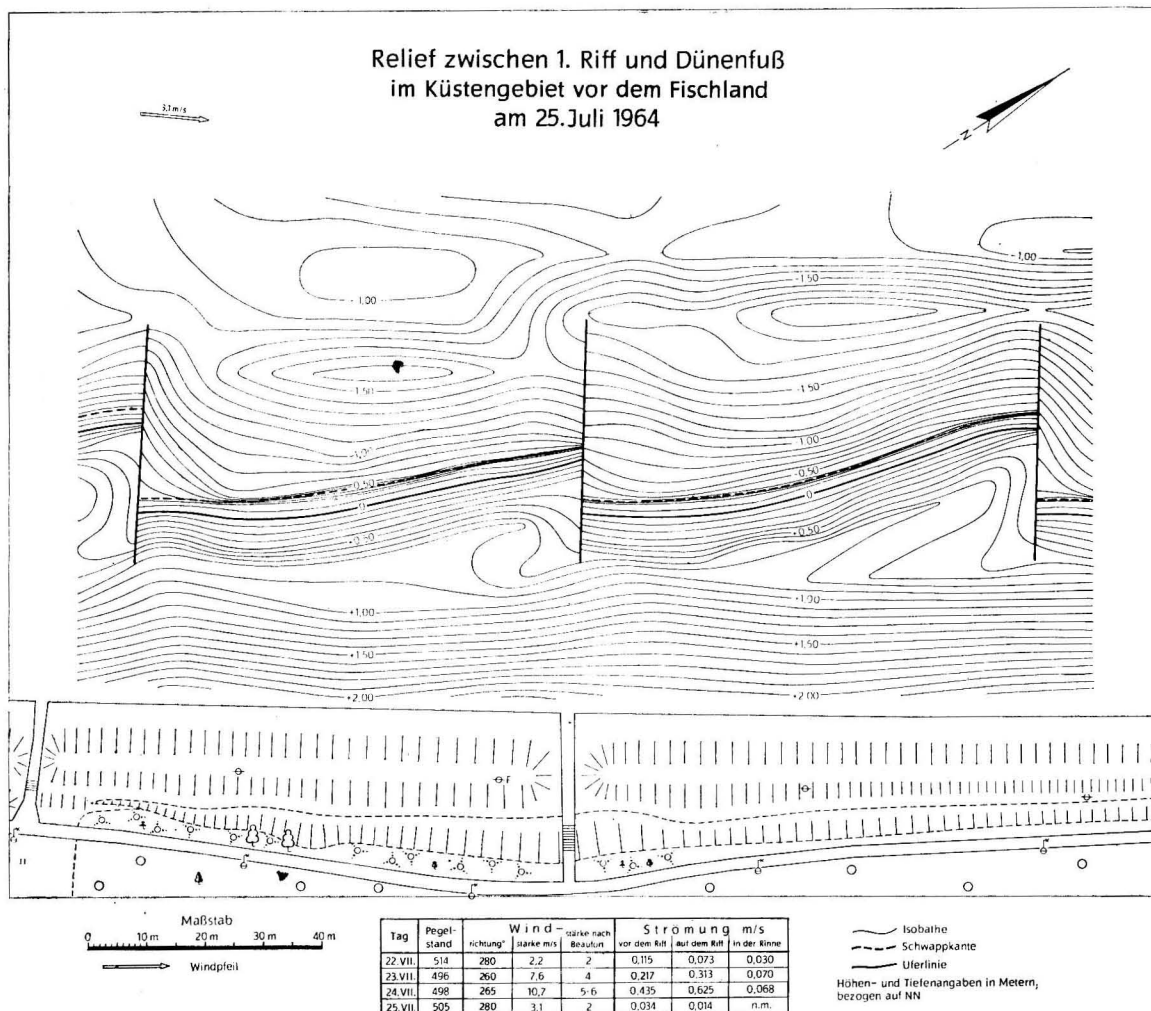


Abb. 6. Relief in den Bühnenfeldern und am Strande vor dem Fischland am 25. Juli 1964

zeichneten Schwappkante besitzt die Nulllinie lediglich orientierenden Charakter, ohne daß sie die Grenze z. B. für das Auflaufen der Welle am Luvhang des Strandwalls darstellt.

Die Aufnahmen vom 25. 7. und 5. 8. 1964 vor dem Fischland lassen eine sich in den Sommermonaten vollziehende, allmähliche Verebnung des Untersuchungsfeldes feststellen. Die im östlichen Bühnenfeld gelegene Mulde wurde um 20 cm aufgefüllt. Der Kamm des 1. Riffs erfuhr eine Abplattung um etwa 20 cm. Die in den Frühjahrsmonaten vor der Streichlinie des Bühnenwerkes fortlaufend zu verfolgende 1. Rinne erscheint infolge der Sedimentumlagerung in einzelne längliche Mulden gegliedert, die teils noch innerhalb der Bühnenfelder liegen. In den Aufnahmen vom Oktober desselben Jahres (Abb. 10, 12) ist der Fortgang dieser Entwicklung zu verfolgen.

Die Wind- und Strömungstabellen unter den Abbildungen lassen erkennen, daß bei schräg auf die Küste treffenden, westlichen Winden der Stärken 4—5 Beaufort auf dem 1. Riff etwa 1-sm-Strom (50 cm/sek) in östlicher Richtung vor den Bühnen entlangsetzt, während die Strömung im Bereich der zum Teil landwärts der Streichlinie gelegenen Mulden bis auf einige Zentimeter in der Sekunde abnimmt.

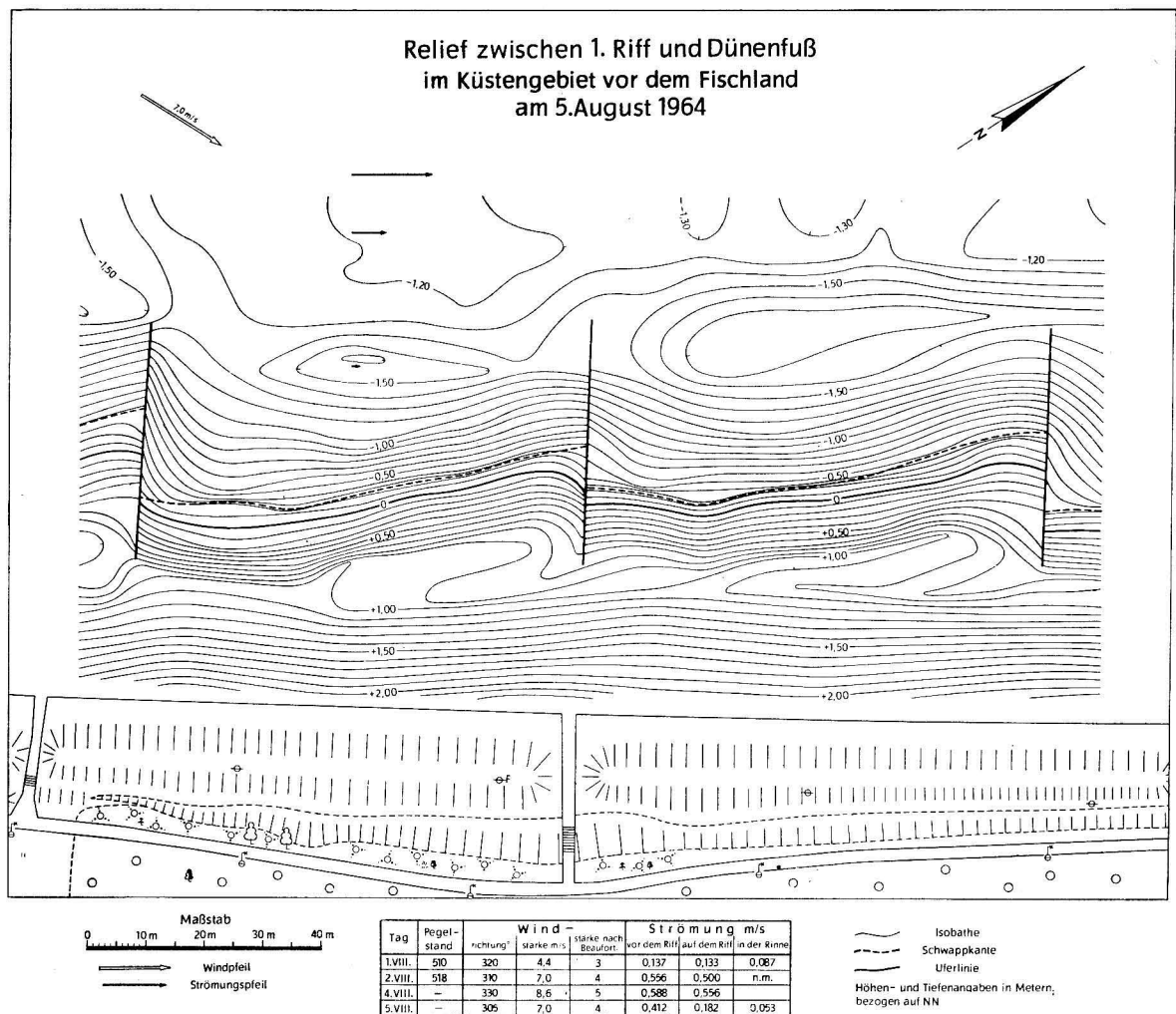


Abb. 7. Relief in den Bühnenfeldern und am Strande vor dem Fischland am 5. August 1964

Karten der Reliefveränderung sollen die Auswirkung der marinen Kräfte nach bestimmten Wetterlagen erkennen lassen. Der Entwurf von Veränderungskarten setzt deshalb eine Gliederung der gesamten, mehrmonatigen Beobachtungszeit nach Wetterlagen voraus.

Solche Karten lassen sich nur bei gleichzeitiger Kenntnis des Wettergeschehens während der Zeit, in der sich die Änderungen des Reliefs vollzogen, verstehen. Sie sind auch nur in Zusammenhang mit den Reliefdarstellungen vor und nach einer bestimmten Wetterlage lesbar, denn es geht vor allem um die stärkere Ausprägung der Formen durch Umlagerung des Sandes in den Bühnenfeldern an stürmischen Tagen. Die Veränderungen in den Bühnenfeldern und unmittelbar an den Bühnen lassen bei Kenntnis des vorher bei einer ruhigen Ausgangslage vorhandenen Reliefs direkte Schlußfolgerungen auf die Vorgänge in den Bühnenfeldern und somit auf die Wirksamkeit oder Unwirksamkeit der Bühnen zu.

Die beiliegende Karte der Reliefveränderung zwischen offen geschlagenen Pfahlbuhnen vor Zempin gilt für die Zeit vom 8. bis 20. Juli 1965 (Tafel III, Abb. 8). Es ist zu bemerken, daß während einer ruhigen Ausgangslage vom 8. bis 15. 7. kaum Veränderungen des Reliefs eingetreten waren. Nach der stillen Periode mit schwachen, meist ablandigen Winden aus SW kam es am 16. 7. zur Ausbildung eines Hochdruckgebietes über Skandinavien und einer NE-Lage, die einen Einstrom kühler Polarluft in unseren Küstenbereich zur Folge hatte. Am 19. 7. dehnte sich das Hochdruckgebiet über den gesamten baltischen Raum und am 20. 7. bis nach Südosteuropa aus. Nach einer 2-tägigen SE-Lage endete die Vorherrschaft des östlichen Hochdruckgebietes.

Am 16. 7. drehte der Wind auf NE bei einer Stärke von 5 Beaufort. Am 17. und 18. 7. wehten im Küstenbereich östlich Arkona NNE-Winde der Stärke 5—6 Beaufort. Am 19. und 20. Juli hielten Winde aus E der Stärke 3—4 an.

Der Pegel lag am 16. und 17. 7. zwischen 540 und 545 cm. Der Strand wurde etwa zur Hälfte überflutet (Abb. 9, S. 64/65).

In der als Beispiel angeführten Karte der Reliefveränderung tritt die Verstärkung der uferparallelen Formen deutlich in Erscheinung. Im Hinblick auf das ursprüngliche Relief ergeben sich:

1. Eine Aufhöhung des 1. Riffs, 30 bis 50 m vor der Standlinie,
2. die deutlichere Ausprägung des 2. Riffs und der 2. Rinne durch Ausgleich der Tiefen im Zuge des Riffkamms als auch der Rinne,
3. die Vertiefung der Kolkungen jeweils vom Bühnenfuß bis ans 1. Riff,
4. eine Vertiefung der Kolke an den Bühnen seewärts des 1. Riffs sowie
5. eine Verflachung des Luvhanges des Strandwalls und Rückverlegung der Kammlinie infolge des höheren Pegelstandes (545 cm) bis zur Mitte des vorherigen Strandplanums.

## 2. Aufnahmen der Strömungsfelder im Bereich dicht und offen geschlagener Pfahlbuhnen

Aufnahmen von Strömungsfeldern erfolgten erstmalig im Bereich dicht geschlagener, einreihiger Pfahlbuhnen vor dem Fischland im Oktober 1964. Abb. 10 zeigt die erste Strömungskarte, die sich über 3 Bühnenfelder erstreckt. Leider fehlten im linken und rechten Bühnenfeld Messungen an der Schwappkante, so daß die unmittelbar am Ufer entlang ziehende Strömung, die durch die dicht geschlagenen Bühnen seewärts gelenkt wird, nicht in der Abbildung erscheint.

An allen vor der Streichlinie gelegenen Stationen ergab sich bei schräg auflandigen Winden eine einheitlich der Streichlinie parallele Strömungsrichtung. Der vor der Leitlinie des Bühnenwerkes entlang setzende Strom erschien an den Bühnenköpfen wie abgeschnitten.

Inmitten der Bühnenfelder herrschte fast völliger Stillstand. Nur an der Schwappkante zog eine durch leichte Brecher hervorgerufene Strömung entlang und wurde vor der Luvseite der Bühnen seewärts geleitet.

Die Ruhe im Mittelfeld sowie der an der Schwappkante entlang und um die Bühnen herum setzende Teilstrom erscheint für strömungsundurchlässige und deshalb strömungsabweisende, dichte Pfahlbühnen kennzeichnend.

Die am 18. und 19. Oktober 1964 auf dem seewärts verlängerten Profil durchgeführten Strömungsmessungen ließen vor allem während des am 18. Oktober unter einem Winkel von etwa  $45^\circ$  auf die Küste treffenden Windes über beiden Riffen höhere Beträge als in den Rinnen verzeichnen. Die Unterschiede der Strömung prägten sich bei höheren Windstärken noch deutlicher aus. Die größten Strömungsgeschwindigkeiten wurden in Höhe der Brecherlinie am seewärtigen Hang des Riffs vor dem Riffkamm gemessen. Infolge größerer Brecherhöhen herrscht auf dem 2. Riff eine stärkere Strömung als auf dem 1. Riff.

Die auf dem 1. Riff und in der 1. Rinne vor Graal-Müritz während der Beobachtungsperiode vom Juni bis Oktober 1964 am 17. 9. gemessenen Höchstwerte betragen

auf dem seewärtigen Hang des Riffs	83,3 cm/sek $\cong$ 1,67 sm/h,
über dem Riffkamm	71,3 cm/sek $\cong$ 1,42 sm/h und
in der 1. Rinne	24,5 cm/sek $\cong$ 0,5 sm/h.

Die Messungen bestätigten die bereits vor Jahren ausgesprochene Regel, daß bei uferparalleler Strömung auf den Riffen höhere Geschwindigkeiten als in den Rinnen auftreten (O. KOLP 1958, S. 177). Schon damals wurde von einer *dynamischen Riegelwirkung* gesprochen. Das in den Rinnen langsamer strömende Wasser wirkt auf das über den Riffen in Suspension befindliche Sediment wie eine Barriere, so daß das von der rascheren Strömung erfaßte Sediment weder see- noch landwärts ausweichen kann. Die im Bühnenfeld herrschende Ruhe schützt bis zu einem gewissen Grade das an der Schwappkante aufgewirbelte Sediment vor dem seewärts gerichteten Abtransport. Das müßte auch bei Farbsandversuchen zum Ausdruck kommen.

Aufnahmen des Reliefs und des Strömungsfeldes vor Zempin vom 20. Sept. 1965 ergaben ein ganz anderes Bild (Abb. 11). Die Isobathen verliefen zwischen den offen geschlagenen, einreihigen Pfahlbühnen fast uferparallel. Eine Vertiefung im mittleren Teil des Bühnenfeldes war nicht vorhanden. Statt dessen zog ein Riff ohne Unterbrechung durch die Bühnenfelder und ließ von vornherein eine ungehindert durch die Bühnen hindurch setzende Strömung erwarten. Nur kurze Rinnen führten vom Bühnenfuß an den Bühnen entlang bis ans 1. Riff. Auch die beiderseits der Bühnenköpfe gleich breiten Kolke sprachen weniger für die Ausbildung von Strömungswalzen als vielmehr für eine durch Querschnittsverengung und höhere Strömungsgeschwindigkeit zwischen den Bühnenpfählen bewirkte Kolkung.

Das 2. Riff lag dicht vor den Bühnen. Die Entfernung des Riffkamms von den Bühnenköpfen betrug nur etwa 20 m und die Wassertiefe über dem Riff 1,20 bis 1,30 m. In der zwischen dem Riff und den Bühnen vorhandenen Rinne war eine durchschnittliche Wassertiefe von 1,60 m zu verzeichnen. An den Bühnenköpfen erreichte die Wassertiefe über 2 m.

Seewärts des 2. Riffs waren keine weiteren Riffe vorhanden. Der Meeresgrund fiel nach See hin gleichmäßig ab. Bei der in 180 m Entfernung von der Uferlinie eingespülten Wellensonde betrug die Wassertiefe bereits 3 m.

Die Aufnahme des Strömungsfeldes vom 20. Sept. 1965 ließ bei annähernd uferparallelem Wind der Stärke 3—4 Beauf. aus WNW über dem vor den Bühnen gelegenen 2. Riff Strömungsgeschwindigkeiten von 10 bis 20 cm/sek verzeichnen. An der Streichlinie ging die Strömung bis auf wenige cm/sek zurück. Die Höchstwerte wurden in den Bühnenfeldern am Hang



## Relief und Strömung in den Bühnenfeldern vor dem Fischland

Relief: 20. Oktober 1964

Strömung:

19. Oktober 1964 (9.00–11.30 Uhr)  
bei Wind 4,8 m/s, 30°  
18. Oktober 1964 (7.20 Uhr)  
bei Wind 5,2 m/s, 15°



- Uferlinie
- - - Schwappkante
- Isobathe (10 cm Äquidistanz)
- Strömungsvektor
- Strömungsrichtung (Betrag der Geschwindigkeit unbekannt)
- ⊙ Strömungsrichtung, Betrag der Geschwindigkeit = 0,2 cm/s
- ⊙ Betrag der Strömungsgeschwindigkeit = 0

10 cm/s 0 20 cm/s 40 cm/s  
Maßstab der Strömungsgeschwindigkeit

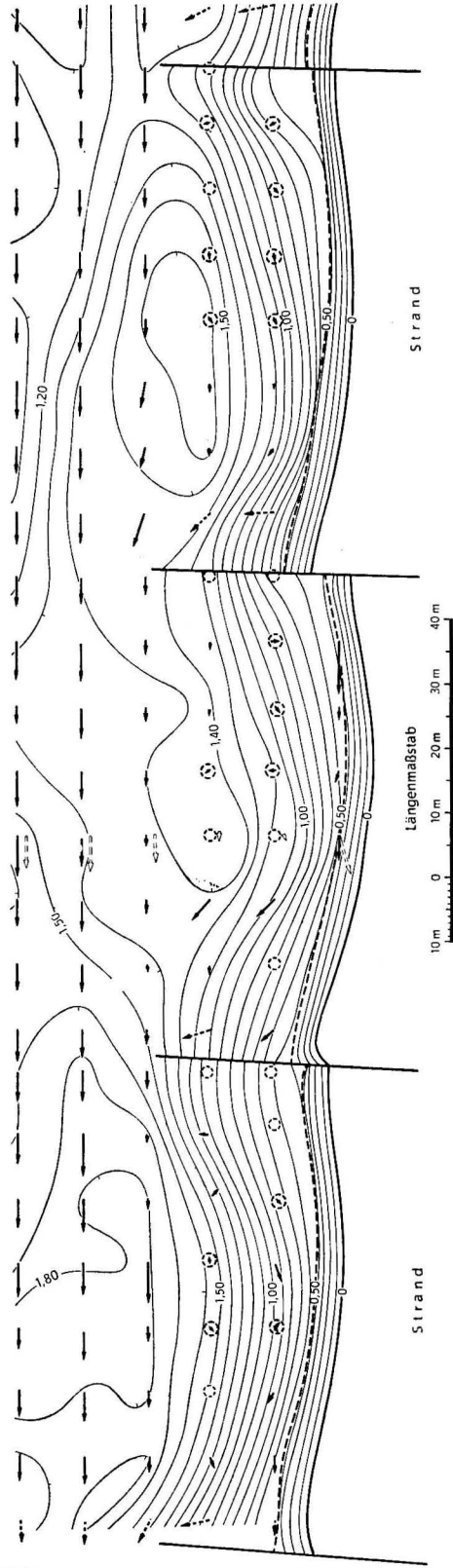


Abb. 10. Strömungsfeld zwischen dicht geschlagenen, einreihigen Pfahlbühnen vor dem Fischland bei schräg auflandigem Wind am 18./19. Okt. 1964

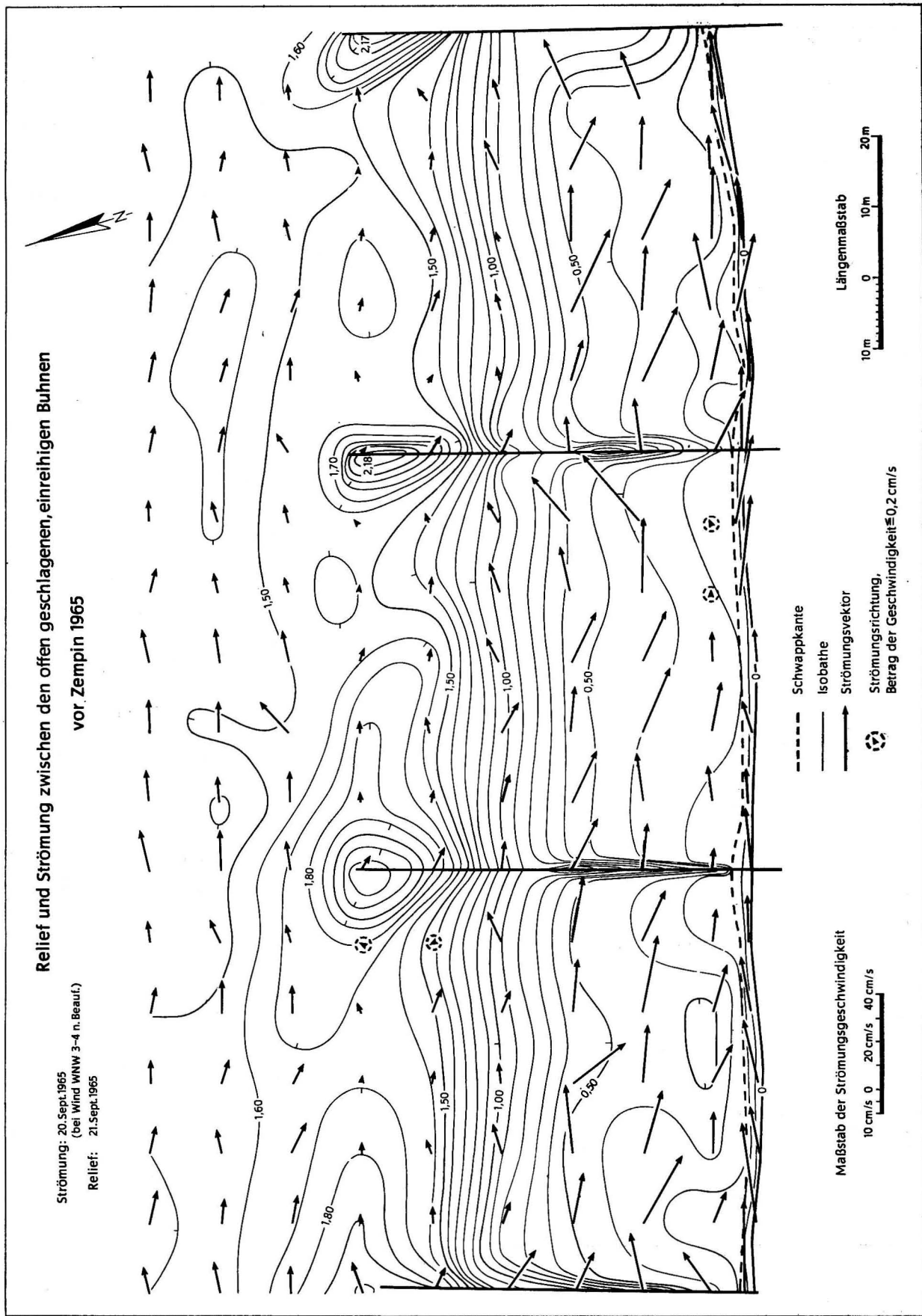


Abb. 11. Strömungsfeld zwischen offen geschlagenen, einreihigen Pfahlbühnen vor Zempin am 20. Sept. 1965



des 1. Riffs gemessen. Sie betragen bis zu 40 cm/sek. Das über dem Riff vorhandene Strömungsband wurde von der an der Schwappkante mit der gleichen Geschwindigkeit entlang setzenden Strömung durch einen schmalen, nur etwa 10 m breiten Streifen mit geringerer Strömung getrennt. Dies kam nur im linken und mittleren Bühnenfeld deutlich zum Ausdruck.

Auf dem vor den Buhnen gelegenen 2. Riff, und in der teils noch in die Bühnenfelder hineinreichenden 2. Rinne verlief die Strömung uferparallel nach ESE. In den Bühnenfeldern, am Luvhang des 1. Riffs variierte die Strömungsrichtung unter dem Einfluß der Brecher. Im Ganzen gesehen herrschte jedoch auch hier die Hauptrichtung parallel zum Ufer vor, so daß die Strömung durch die Buhnen weder abgelenkt noch vermindert erschien. Die kurzen Rinnen bis zum 1. Riff und am Bühnenkopf zeugen keinesfalls für eine seewärts gerichtete Strömung an den Buhnen entlang. Sie entstanden aus Kolkungen um die Pfähle herum. Alle Beobachtungen ließen auf eine nur geringe Wirksamkeit der offenen Pfahlbuhnen schließen.

### 3. Karten der Sedimentverteilung

Karten der Sedimentverteilung lassen den Flächenteil verschiedenenkörniger Sande im Untersuchungsbereich erkennen. Auch spiegeln sich in der Kornverteilung Beziehungen zum Relief und zur Strömung wider.

Als Beispiel wird die Karte der Sedimentverteilung vom 26. 10. 1964 vor dem Fischland mit dem am Vortage aufgenommenen Relief und Strömungsfeld angeführt (Abb. 12).

Vor dem Fischland überwiegt mittelkörniger Sand. Am Hand des Strandwalls findet sich Mittelsand bis Mittelkies. Gröberes Korn (Grobsand bis Mittelkies) sammelt sich infolge des Abtransports feinerer Kornarten an der Schwappkante und an den Luvseiten der Buhnen. Das gröbere Korn an den Buhnen weist auf die Auskolkung von Rinnen sowie auf die Wirkung kleinerer Strömungswalzen an den Bühnenköpfen hin. Feinsand findet sich vor allem im Lee der Buhnen. Fein- bis mittelkörniger Sand überwiegt in den Bühnenfeldern während mittelkörniger Sand vor den Bühnenfeldern im Bereich des 1. Riff und der 1. Rinne vorherrscht.

Die im mittleren Bühnenfeld eingetragenen Strömungspfeile veranschaulichen wiederum die Verhältnisse vor und in einem Bühnenfeld zwischen dicht geschlagenen Pfahlbuhnen. Mittel- bis feinkörniger Sand weist auf geringe Strömungen in der Mitte des Bühnenfeldes hin. Das grobe Korn am Bühnenfuß auf der Luvseite wird mit der Refraktion der Wellen und das Feinkorn auf der Leeseite mit dem Einschwenken der Wellen und der Dehnung der Wellenkämme in Zusammenhang gesehen. Beiderseits der Buhnen erfolgt in Ufernähe eine Abbremsung der an der Schwappkante entlang laufenden Strömung durch die Wellen.

Für einen Farbsandversuch kann erwartet werden, daß sich das an verschiedenen Stellen vor und in den Bühnenfeldern ausgeschüttete mittlere Korn am weitesten verbreitet, da es sich mit Ausnahme der Feinsandflächen überall findet. Bei der Auswertung müßte der Anteil des mittleren Kornes an jeder Probe berücksichtigt werden.

### C. Farbsandversuche mit lumineszenten Stoffen in Bühnenfeldern

Bei Farbsandversuchen sollte stets über Zweck und Ziel, über die Wahl des Versuchsfeldes, Anzahl der Farben und getrennt gefärbten Fraktionen, über Eingabeort und ausgeschüttete Farbsandmengen, Zeitabstände und Anzahl der Probenentnahmen, über die Zahl der Teil-

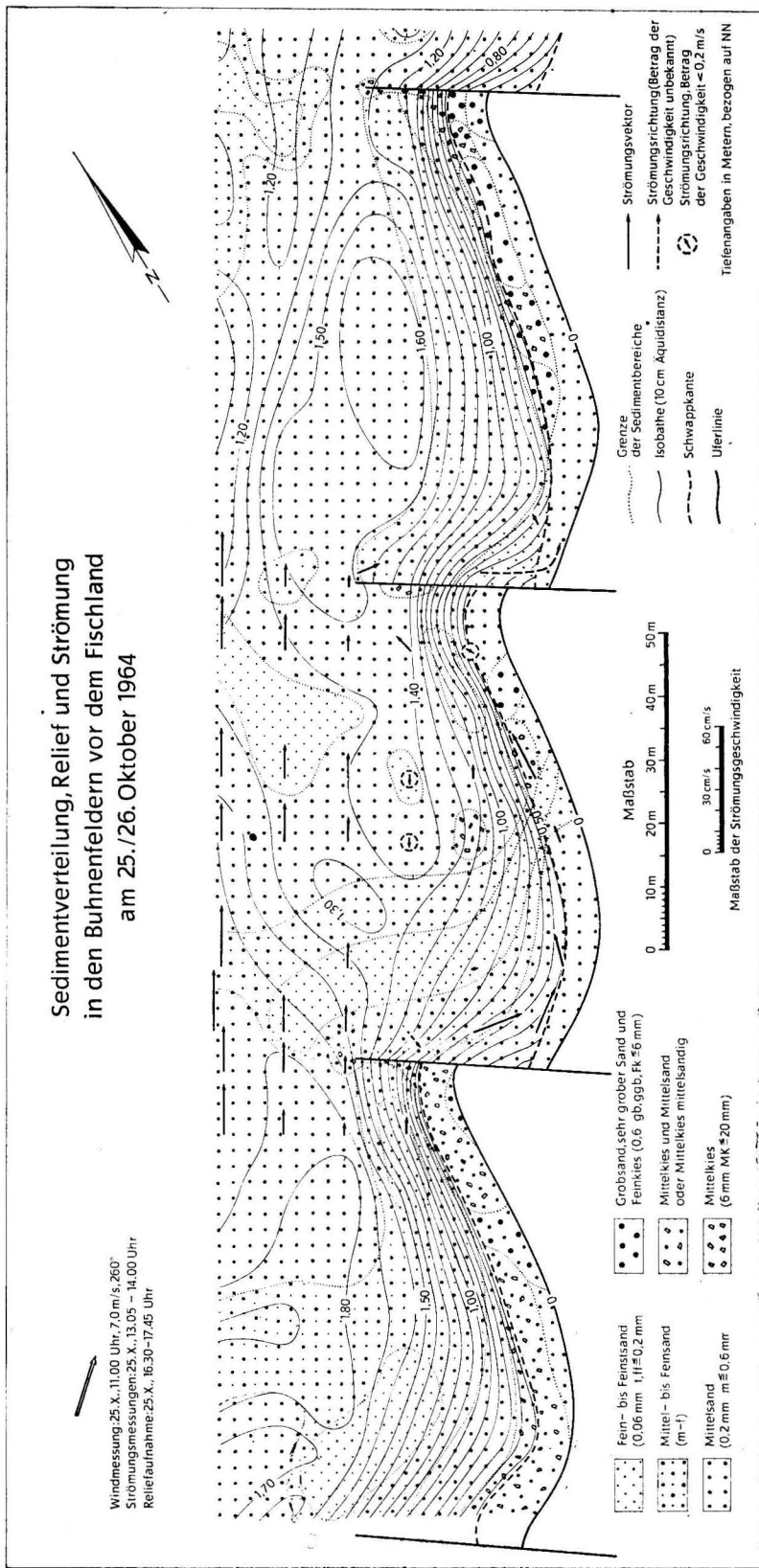


Abb. 12. Karte der Sedimentverteilung mit Relief und Strömung in den Bühnenfeldern vor dem Fischland am 25./26. Okt. 1964

nehmer und den Umfang der Laborarbeiten ausführlich berichtet werden. Ein Farbsandversuch kann recht simpel, aber auch kompliziert angelegt sein. Dementsprechend erhöht sich die Aussagekraft der in Karten der Farbsandverteilung vorgelegten Ergebnisse. Dies gilt für den Bereich der ufernahen Meereszone in besonderem Maße.

Farbsandversuche in Buhnenfeldern sollen die Ablenkung und Verminderung der Strömung und Wellenwirkung durch die Buhnen deutlich erkennen lassen. Auf Grund wechselnder Konzentration gleichfarbiger Sandkörner können Rückschlüsse auf Strömungsbahnen und Transportgeschwindigkeiten sowie auf die Streuung einer Kornart gezogen werden.

### *1. Planung und Durchführung eines Farbsandversuchs zwischen dicht geschlagenen Pfahlbuhnen vor dem Fischland 1964*

Jeder, der einmal Farbsandversuche durchführte, ist sich dessen bewußt, daß bei Versuchen in der Natur viel Glück in bezug auf Wind, Wellen und Strömung dazu gehört, um einen vor-gefaßten Plan zu verwirklichen. Wind und Strömung möchten während des mehrstündigen Versuches eine gleichmäßige Stärke und Richtung beibehalten und der Seegang die für den Einsatz von Tauchern zulässige Grenze nicht überschreiten. Dennoch bildet eine wohl überlegte Wahl der Mittel und des Versuchsfeldes sowie ein gut durchdachter Plan für den Versuch die Voraussetzung für einen Erfolg.

#### **a) Die Situation vor dem Fischland**

Die Pfahlbuhnen vor dem Fischland sind einreihig und dicht geschlagen. Lediglich die Buhnenköpfe sind auf den letzten 3 bis 4 m offen gehalten, d. h., es ist jeder 2. Pfahl fortgelassen worden, so daß die Buhnenköpfe als strömungsdurchlässig angesehen werden können. Die Pfahlreihen ragen etwa 50 cm aus dem Wasser. Die Buhnenlänge beträgt 40 m. Davon befinden sich auf der Luvseite infolge der Grobsand- und Kiesablagerung am Buhnenfuß nur 25 m und auf der Leeseite infolge des Zurückspringens der Uferlinie etwa 35 m im Wasser. Der Abstand zwischen den Buhnen beträgt 75 m.

Der Strand ist etwa 30 m breit. Die Strandhöhe beträgt am Dünenfuß ca. 2 m. Die Uferlinie verläuft von WSW nach ENE.

Vor den Buhnen liegen 2 Riffe (Abb. 1). Die mittleren Entfernungen von der Standlinie betragen

bis zur 1. Rinne 25 m,	bis zum 1. Riff 40 m,
bis zur 2. Rinne 105 m,	bis zum 2. Riff 140 m.

Die 1. Rinne war 10 m breit. Die Wassertiefe in der Rinne betrug etwa 1,60 m.

Das 1. Riff war sehr flach und 60 m breit. Der Riffkamm lag 20 m vor der Streichlinie des Buhnenwerkes. Die Wassertiefe über dem Kamm betrug etwa 1,20 m.

Der Rinnenboden der 2. Rinne war ca. 20 m breit. Die Wassertiefe betrug in der 2. Rinne 2,40 m und über dem Kamm des 2. Riffs 1,30 m.

In den Buhnenfeldern, am Strande und auf der Düne überwog mittelkörniger Sand der Fraktion 0,2—0,4 mm. In den Buhnenfeldern und auf der Düne enthielt das Korngemisch ca. 60% der Fraktion 0,2—0,4 mm und ca. 30% der Fraktion 0,4—0,6 mm. Der Strandsand erwies sich als etwas feiner mit einem durchschnittlichen Anteil von 75% und einem maximalen Anteil von 93% der Fraktion von 0,2—0,4 mm.

### b) Vorüberlegungen

Aus der Vorkenntnis verschiedener Strömungszonen über Riffen und Rinnen, der in Bühnfeldern nur ganz geringen Strömungen umlaufender Richtung und des schmalen Strömungsbandes an der Schwappkante erwachsen bestimmte Vorstellungen über den Sedimenttransport vor und in den Bühnfeldern. Bei der Wahl der Eingabeorte gilt es ferner, die früher schon in anderen Ländern bei Farbsandversuchen festgestellte Sedimentausbreitung gegen den Wind und die Strömung zu berücksichtigen.

Dem unterschiedlichen Sedimenttransport in der Hauptströmungsrichtung auf dem 1. Riff und in der 1. Rinne kann durch Eingabe verschiedenfarbiger Sande in beiden Strömungszonen vor dem westlichen Bühnfeld Rechnung getragen werden. Farbsandeingaben im stillen Feld zwischen den Bühnen und dicht vor der Schwappkante sind im mittleren Bühnfeld vorzusehen, damit die späteren Aufnahmen der Farbsandverteilung den gegenläufigen Sedimenttransport ins westliche Bühnfeld deutlich erkennen lassen.

Auf die Eingabe verschiedener, getrennt gefärbter Fraktionen kann verzichtet werden, da mittelkörniger Sand auf  $\frac{3}{4}$  der Gesamtfläche und Feinsand nur auf kleineren Flächen angetroffen wird. Die Kornzusammensetzung der Sandproben läßt erkennen, daß die Fraktion 0,2—0,4 mm das aufschlußreichste Bild liefern wird.

Auf Grund der vorangegangenen Seegangs- und Strömungsbeobachtungen ist für einen Farbsandversuch vor dem Fischland eine Wetterlage mit westlichen Winden der Stärke 4 Beaufort zu bevorzugen.

### c) Vorbereitungen im Labor

Für den Farbsandversuch sollten zur Eingabe an 4 verschiedenen Orten  $4 \times 45$  kg mittelkörnigen Sandes der Fraktion 0,2—0,4 mm durch 4 Farben gekennzeichnet werden. Die Eingabemenge von jeweils 45 kg Mittelsand hatte sich auf Grund eines Testversuchs zwischen dicht geschlagenen Bühnen vor Ostseebad Ribnitz 1963 als zweckmäßig erwiesen.

Es wurden zunächst im Labor aus dem am Strande vor dem Fischland entnommenen Sand 4 Zentner der Fraktion 0,2—0,4 mm ausgesiebt. Danach wurden je 45 kg dieser Fraktion gelb, blau, orange und grün gefärbt. Für die Färbung von 1000 g Sand wurden 5 g Leuchtstoff und 17 ccm Polystyrollösung benötigt. Die Lösung war zuvor im Verhältnis 6,5 g Polystyrol/1000 ccm Benzol angesetzt worden. Die Verwendung von Polystyrol bot im Vergleich zu Lack- und Wasserglas-Überzügen den Vorteil der geringsten Veränderung der Kornart (KOLP & ENZENROSS 1961). Der Leuchtstoff wurde mit in die Polystyrollösung gegeben. Dann wurde eine bestimmte Menge Sand mit der vorberechneten Menge Polystyrollösung gründlich verrührt und anschließend auf einer sorgfältig gesäuberten Betonfläche an der frischen Luft bei ständiger, zerreibender Durchbewegung getrocknet. Zuletzt wurden je 15 kg gefärbten Sandes in wasserdichte PVC-Säcke gefüllt. 3 Wochen vor dem Versuch wurde der Farbsand in den Folie-Säcken durch Zugabe von einigen Litern Seewasser und durch wiederholtes Umrühren gründlich benetzt und damit für die Eingabe in See vorbereitet.

### d) Ablauf des Versuchs

An dem Versuch waren 2 Wissenschaftler, 6 Taucher, 1 Vermessungsingenieur und 1 Techniker beteiligt.

Die Farbsandeingabe und Probenentnahme war vorher mit genau verteilten Rollen zweimal geübt worden. Dabei wurden für das Ausbringen des Farbsandes 15 Minuten und für die Sandprobenentnahme an 150 Stationen durch 6 Taucher und 1 Mann in Wathosen 40 Minuten benötigt.





Abb. 13. Taucher beim Ausbringen des Farbsandes nach den ufernahen Eingabeorten



Abb. 14. Taucher beim Absetzen der Proben in die Kisten



Der *Plan für den Farbsandversuch* sah folgendes vor:

Stündliche Wind- und Seegangsmessungen,

*2 Stunden vor dem Versuch*: Aufnahme des Reliefs in 3 Bühnenfeldern durch 3 Taucher,

*20 Minuten vor Beginn der Probenentnahme*: Eingabe des Farbsandes an 4 Stellen,

*in der 1. Stunde nach der Eingabe des Farbsandes*: Probenentnahmen an 150 Stationen (40 Minuten Dauer, 10 Minuten Reserve, 10 Minuten für den Rückweg der Taucher nach Profil 1),

*in der 2. Stunde*: Probenentnahmen an denselben 150 Stationen,

*in der 3. Stunde*: Pause (warmer Imbiß, Aus- und Ankleiden der Taucher); Aufnahme des Strömungsfeldes vor und in dem mittleren Bühnenfeld durch 1 Taucher und 1 Beobachter am Strande (30 Minuten),

*in der 4. Stunde*: Probenentnahmen an denselben 150 Stationen,

*in der 5. Stunde*: Probenentnahmen an denselben 150 Stationen,

*in der 6. Stunde*: Reliefaufnahme durch 2 Taucher.

Der Farbsandversuche fand am 25. 10. 1964 statt. Es wehte ein auflandiger Wind von durchschnittlich 7,5 m/sek aus der Richtung 250—260°. Der Seegang ließ den Einsatz von Tauchern gerade noch zu. Die Strömungsgeschwindigkeit betrug auf dem 1. Riff bis zu 20 cm/sek, in der 1. Rinne bis zu 10 cm/sek, im Bühnenfeld fast Null und an der Schwappkante bis 17 cm/sek.

Der Farbsand wurde nach den beiden ufernahen Stationen von Tauchern getragen (Abb. 13). Die für die 1. Rinne und das 1. Riff vorgesehenen Säcke wurden im Schlauchboot hinaus geschafft. Jeweils 3 gut verschnürte Säcke wurden bei einer Stange am Meeresgrund abgesetzt. Auf ein Zeichen von Land her wurden die Säcke gleichzeitig unter Wasser aufgeschlitzt und der Farbsand vom Taucher mit der Hand verebnet. Die leeren Säcke wurden unter Wasser zusammengefaltet und beim Aufheben über Wasser gleich ins Schlauchboot geworfen. Auf diese Weise sollte der durch an der Wasseroberfläche fortgetriebene Farbsandkörner hervorgerufene Fehler gemindert werden.

Die Probenentnahme erfolgte auf 7 uferparallelen Bahnen. Es wurden auf einer Bahn in einem Bühnenfeld 6 bis 7 Proben entnommen. Dann kam der Taucher mit den etwa je 1 kg schweren Proben an Land, empfing neue Perfol-Beutel und brachte die nächsten 6 oder 7 Proben nach den Kisten, die am Ende des 2. Bühnenfeldes bereit standen.

Die Proben wurden mit einem Schürfgerät entnommen, um nur den Sand der oberen, 2 bis 3 cm starken Schicht zu erfassen. Die einzelne Probe wurde vom Taucher an Ort und Stelle durch eine farbige Klammer gekennzeichnet, mit welcher der Perfol-Beutel verschlossen wurde. Dabei galt die Reihenfolge: Schwarz, Weiß, Rot, Gelb, Grün, Blau, Rotweiß. Zur Erleichterung der Arbeit in der Brandung zog der Taucher einen Netzbeutel mit den Proben hinter sich her, der von 2 Fischerkugeln getragen wurde.

Die Probenbeutel wurden so, wie sie der Reihe nach entnommen waren, nebeneinander in die mit denselben Klammern markierten Fächer der Probenkisten gestellt (Abb. 14). Durch die Bezeichnung der Kiste und die Nummer des Faches war die einzelne Probe bereits unverwechselbar gekennzeichnet. Zusätzlich wurden nummerierte Kunststoffmarken in die Probenbeutel getan.

#### e) Untersuchung der Proben

Die Untersuchung von 600 Farbsandproben erforderte eine mehrmonatige, anstrengende Arbeit. Es wurden die verschiedenfarbigen Körner in jeweils 250 g Sediment unter UV-Licht mit dem Auge gezählt. Von Proben mit einer hohen Anzahl farbiger Körner wurden 125 g und bei sehr hoher Konzentration nur 50 g Sand untersucht.

## 2. Planung und Durchführung eines Farbsandversuchs zwischen offen geschlagenen Pfahlbuhnen vor Zempin (Usedom) 1965

Die Durchführung eines Farbsandversuchs vor Zempin gestaltete sich aus verschiedenen Gründen erheblich schwieriger als vor dem Fischland.

Die größere Länge der Buhnen bedingte eine Erhöhung der Anzahl der Stationen. Die Strömungsdurchlässigkeit der offen geschlagenen Buhnen ließ von vornherein mit einem rascheren Abtransport des Farbsandes rechnen und deshalb eine Verkürzung der Zeit für die Probenentnahme notwendig erscheinen.

Die beiden Sandriffe lagen dicht unter Land. Das 1. Riff zog sich mitten durch die Buhnenfelder hindurch. Das 2. Riff lag dicht vor den Buhnen, so daß in der 2. Rinne an den Buhnenköpfen eine Wassertiefe von 2 m vorhanden war und Proben auf der Bahn 60 m vor der Standlinie nur schwimmend genommen werden konnten.

Es herrschten auch andere Seegangsverhältnisse. Bei auflandigen Winden der Stärke 2 bis 3 Beaufort entwickelten sich im Buhnenfeld bereits meterhohe Wellen.

Bei Ostwind wurde am 2. 9. 1965 bei Windstärke 4 eine Strömung von 2 sm/h 20 m vor den Buhnenköpfen gemessen.

Dies alles machte eine Erhöhung der Zahl der Taucher erforderlich.

Im Vergleich zum Fischland, wo mittelkörniger Sand überwog, waren hier 2 Kornarten mit etwa gleichen Anteilen vorherrschend, was den Umfang der Vorbereitungen und Untersuchungen im Labor beträchtlich erhöhte.

### a) Die Situation vor Zempin

Die offen geschlagenen, einreihigen Pfahlbuhnen an der Bootsstelle Zempin sind 60 m lang. Davon befinden sich 50 m im Wasser. Der Abstand der Buhnen beträgt 60 m. Die Pfähle wurden etwa 20 cm über Mittelwasser abgeschnitten. Die Buhnen sind strömungsdurchlässig (Abb. 11).

Es fehlen Anlagerungen gröberer Sediments am Buhnenfuß, wie sie bei dicht geschlagenen Buhnen angetroffen werden. Die Uferlinie erscheint aus diesem Grunde geradlinig und nicht bogenförmig wie zwischen dichten Pfahlbuhnen.

Sie verläuft von WNW nach ESE. An Stelle der Sedimentanlagerung am Buhnenfuß kann es gelegentlich zur Ausbildung von Strandzotten in einigen Metern Abstand von den offenen Buhnen kommen.

Der Strand besitzt eine Breite von etwa 35 m und eine Höhe von etwa 1,80 m am Dünenfuß.

Die beiden Riffe lagen dicht vor dem Ufer. Das 1. Riff erstreckte sich mitten durch die Buhnenfelder, während der Kamm des 2. Riffs 20 m vor der Streichlinie lag. Von dort fiel der Meeresgrund nach See hin allmählich ab. Die 1. Rinne zwischen der Schwappkante und dem 1. Riff war nicht immer deutlich ausgeprägt. Die 2. Rinne verlief in Höhe der Buhnenköpfe. Es war somit eine ganz andere Situation als zwischen dicht geschlagenen Buhnen vorhanden.

Die Entfernung von der Standlinie betrug bis zum 1. Riff 25 m, bis zur 2. Rinne 60 m und bis zum Kamm des 2. Riffs 80 m. Die Wassertiefe über dem 1. Riff war so gering, daß das Riff bei Niedrigwasser trocken fiel. Der Riffkamm lag 30 bis 40 cm unter NN. Zwischen der Schwappkante und dem 1. Riff war zeitweilig eine Wassertiefe von 60 cm vorhanden. Die Wassertiefe in der 2. Rinne betrug etwa 1,80—2,00 m und über dem Kamm des 2. Riffs etwa 1,30—1,40 m.

Als Beispiel für Seegang und Strömung können die Messungen vom 2. 9. 1965 angeführt werden. Der Wind kam um 7<sup>00</sup> Uhr schräg auflandig von Osten mit einer Stärke von 7,1 m/sek  $\cong$  4 Beaufort. Bis 14<sup>00</sup> Uhr hatte der Wind bei gleichbleibender Richtung eine Geschwindigkeit

keit von 14,8 m/sek  $\approx$  7 Beaufort erreicht. Der Pegelstand betrug um 7<sup>00</sup> Uhr 520 cm und um 14<sup>00</sup> Uhr 530 cm. Um 7.30 Uhr wurde 180 m von der Uferlinie entfernt bei etwa 3 m Wassertiefe eine Wellenhöhe von 1,80 m registriert.

Für die Strömungsgeschwindigkeit ergaben sich auf dem verlängerten Profil 10 vor dem mittleren Bühnenfeld und auf dem 500 m westlich vor der offenen Küste gelegenen W-Profil folgende Werte:

TABELLE I  
Strömungsmessungen vor Zempin am 2. Sept. 1965

		Profil 10		West-Profil
		8.55–9.35 Uhr	13.55–14.10 Uhr	10.00–10.40 Uhr
Schwappkante	0 m	0,33 m/sek	<b>0,71</b> m/sek	0,34 m/sek
	10 m	0,42 m/sek	0,36 m/sek	0,65 m/sek
Kamm des 1. Riffes	20 m	<b>0,59</b> m/sek	0,67 m/sek	<b>1,00</b> m/sek
	30 m	0,44 m/sek	<b>0,71</b> m/sek	0,52 m/sek
	40 m	0,27 m/sek	0,38 m/sek	0,27 m/sek
	50 m	0,24 m/sek	0,44 m/sek	<b>0,39</b> m/sek
2. Rinne	60 m	<b>0,91</b> m/sek	0,71 m/sek	0,65 m/sek
	70 m	1,25 m/sek	1,11 m/sek	0,79 m/sek
Kamm des 2. Riffs	80 m	<b>1,25</b> m/sek	<b>1,67</b> m/sek	<b>1,57</b> m/sek
	90 m	1,25 m/sek	1,51 m/sek	0,92 m/sek
	100 m	0,77 m/sek	<b>1,39</b> m/sek	0,92 m/sek
	120 m	0,83 m/sek	1,00 m/sek	0,92 m/sek
	140 m	0,46 m/sek	1,00 m/sek	0,65 m/sek
	160 m	0,38 m/sek	0,67 m/sek	0,55 m/sek

Die Messungen konnten leider nur von einem Taucher nacheinander ausgeführt werden, so daß sich die auf Profil 10 und auf dem West-Profil gewonnenen Werte nicht unmittelbar miteinander vergleichen lassen. Dennoch passen die Werte zueinander und lassen den gleichen Abstand des 1. und 2. Riffkamms von der Uferlinie auf beiden Profilen erkennen. Das besagt, daß Riffe und Rinnen in ihrer Lage durch offene Buhnen nicht beeinflußt werden.

#### b) Vorüberlegungen

Die Strömungsdurchlässigkeit offener Buhnen bedingt ein ganz anderes Bild als bei dicht geschlagenen Buhnen. Die zwischen der Schwappkante und den Riffen vorhandenen Strömungszonen verlaufen auch in den Bühnenfeldern uferparallel. Der stille Raum, der zwischen dichten Buhnen vorhanden war, entfällt. Die Eingabeorte für den Farbsand können dieses Mal nur vor der Schwappkante, auf dem 1. Riff, in der 2. Rinne und auf dem 2. Riff liegen.

In Anbetracht der Strömungs- und Sedimentdurchlässigkeit der offenen Buhnen ist mit einem rascheren Abtransport des Farbsandes zu rechnen. Deshalb sind kürzere Zeitabstände für die Probenentnahmen vorzusehen und die Farbsandmengen zu vergrößern.

Die annähernd gleichen Anteile der Kornfraktionen 0,2–0,4 mm und 0,1–0,2 mm in den Sandproben erfordern die Berücksichtigung beider, sowohl des mittelkörnigen als auch des feinkörnigen Sandes beim Farbsandversuch. Kornmengenmäßig gesehen liegt bei gleichen Gewichtsanteilen an der einzelnen Probe das Übergewicht beim Feinsand, da sich die Kornzahl bei Feinsand im Vergleich zum Mittelsand bei gleichem Volumen auf das 4fache erhöht.

Auf Grund der vorangegangenen Wind- und Seegangsmessungen kommen für einen Farbsandversuch Wetterlagen mit schräg auflandigen Winden aus beiden Hauptrichtungen: NNW bis Nord und Ost bis NE in Frage. Es sind deshalb sowohl im 1. wie im 3. Bühnenfeld je 4 Eingabeorte durch Stangen zu markieren, um auf jeden Fall vorbereitet zu sein.

Die Grenze für den Einsatz von Tauchern wird wegen der sich bei auflandigen Winden rasch entwickelnden groben See und wegen der größeren Wassertiefe an den Bühnenköpfen etwa bei Windstärke 3 erreicht.

#### c) Vorbereitungen im Labor

Es wurden für den Farbsandversuch vor Zempin die Kornfraktionen von 0,2—0,4 mm und von 0,1—0,2 mm getrennt. Die Menge für Mittelsand wurde auf jeweils 60 kg erhöht und die Menge für Feinsand in Anbetracht der höheren Kornzahl auf 30 kg festgesetzt. Es wurden zunächst 5 Zentner der Fraktion 0,2—0,4 mm und 2,5 Zentner der Fraktion 0,1—0,2 mm ausgesiebt und dann 4 × 60 kg Mittelsand und 4 × 30 kg Feinsand gelb, blau, orange und grün gefärbt. Dieses Mal wurden je 30 kg Farbsand in einen PVC-Sack getan.

#### d) Ablauf des Versuchs

Die schwierigen Verhältnisse vor Zempin erforderten die Mitwirkung von 9 Tauchern, 4 Mann in Wathosen, 2 Wissenschaftlern und 1 Vermessungsingenieur beim Farbsandversuch. Die beiden vorherigen Übungen im Wasser nach Zeit ergaben etwa 20 Minuten Dauer für die Probenentnahme in 3 Bühnenfeldern an 171 Stationen.

Dem Farbsandversuch lag folgender Plan zugrunde:

*Vor dem Versuch:* Strömungsmessungen bis 160 m in See auf Profil 10 und dem West-Profil,  
*20 Minuten vor Beginn der Probenentnahme:* Ausbringen des Farbsandes mit dem Schlauchboot und Eingabe auf ein Zeichen von Land,  
 5malige Probenentnahme in 2<sup>1</sup>/<sub>2</sub> Stunden,  
 1stündige Pause,  
 Aufnahme des Strömungsfeldes durch 3 Taucher und 3 Beobachter am Strande,  
*am folgenden Tage:* Aufnahme des Reliefs.

Der Farbsandversuch erfolgte am 1. 10. 1965. Der Wind kam von E bis ESE. Die Windstärke betrug 2 Stunden vorher und in der 1. Stunde 3 Beaufort und ging dann zurück auf 2 Beaufort. Während der Aufnahme des Strömungsfeldes am Nachmittag erreichte die Windstärke 4 Beaufort. Die dabei anlaufende grobe See hätte die Durchführung eines Farbsandversuchs nicht mehr zugelassen. Die Brecher auf dem 1. Riff bildeten bereits während des Versuchs ein weißes Band, das sich durch die Bühnenfelder hinzog. Auf dem 2. Riff vereinigten sich die Brecher erst am Nachmittag zu einer geschlossenen Linie.

Der Pegel hielt sich am Versuchstag bei 515 cm. Die Schwappkante verlief geradlinig, 5 m vor der Standlinie. Der Spülsaum, der am Strandwall auflaufenden Wellen, lag etwa im Zuge der Nulllinie.

Die Strömungsmessungen auf Profil 10 hatten vor und nach dem Versuch folgende Geschwindigkeiten ergeben:

Entfernung vom Ufer	8.45—9.20 Uhr	14.45—15.20 Uhr
160 m	8 cm/sek	12 cm/sek
140 m	9 cm/sek	17 cm/sek
120 m	9 cm/sek	18 cm/sek
100 m	9 cm/sek	21 cm/sek
90 m	8 cm/sek	21 cm/sek
80 m	9 cm/sek	15,5 cm/sek
70 m	10 cm/sek	18 cm/sek
60 m	6 cm/sek	12 cm/sek
50 m	3 cm/sek	2 cm/sek
40 m	3,5 cm/sek	8,5 cm/sek
30 m	10 cm/sek	40 cm/sek
20 m	18,5 cm/sek	33 cm/sek
10 m	6,5 cm/sek	29 cm/sek
Schwappkante	16 cm/sek	25 cm/sek



Die Mittelwerte zwischen beiden Messungen können für die Dauer des Versuchs als gültig angesehen werden, da der Seegang trotz des leichten Rückganges des am Strande gemessenen Windes gleichmäßig anhielt.

Die Eingabe des Farbsandes erfolgte in derselben Weise wie vor dem Fischland. Die Eingabeorte lagen 15 m, 35 m, 55 m und 75 m vor der Standlinie zwischen den Profilen 3 und 4 des östlichen Bühnenfeldes. Die beiden ersten Eingabestellen lagen in der 1. Rinne und auf dem 1. Riff. Der 3. Eingabeort bei 55 m befand sich 5 m innerhalb der Streichlinie des Bühnenfeldes im Bereich der geringsten Strömung. Der 4. Eingabeort lag dicht hinter dem Kamm des 2. Riffs.

Die Probenentnahme erfolgte auf 9 uferparallelen Bahnen (Abb. 15). Die Taucher und Mitarbeiter in Wathosen wurden so eingesetzt, daß mit dem Probennehmen im östlichen und mittleren Bühnenfeld zur gleichen Zeit begonnen werden konnte, um vor allem während des 1. Durchganges bei einem raschen Abtransport des Farbsandes Schritt halten zu können.

Die Zeiten betragen für einen Durchgang etwa 20 Minuten. Bei Verzug eines Tauchers konnte durch gegenseitige Hilfeleistung im Wasser Ausgleich geschaffen werden.

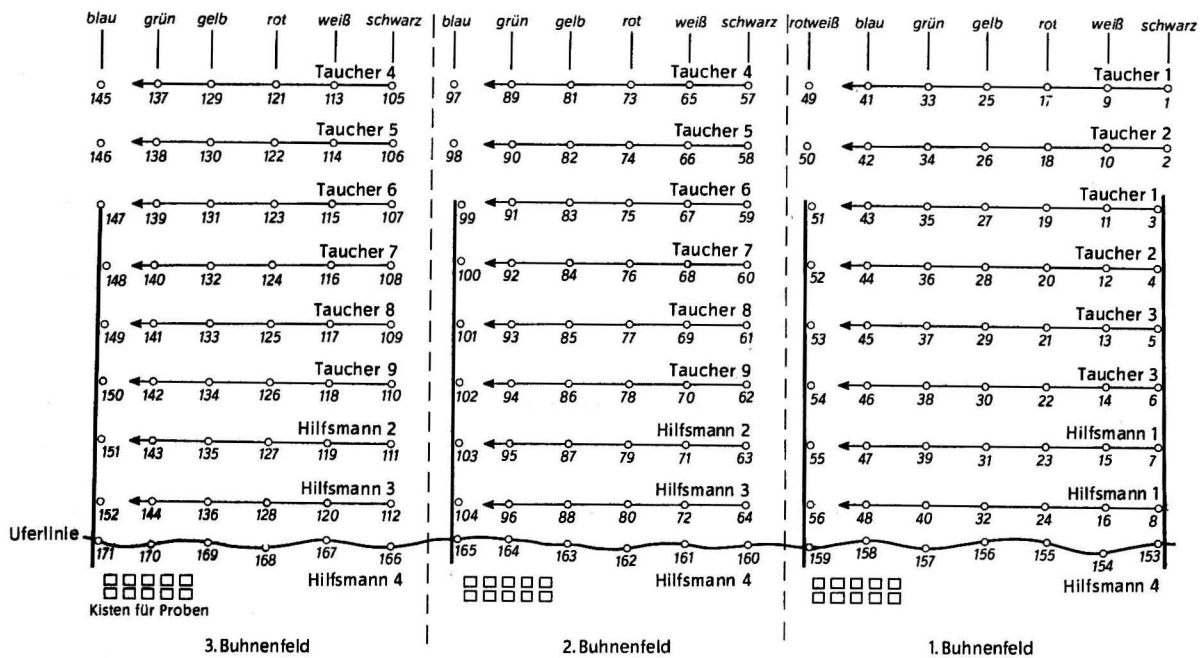


Abb. 15. Plan für den Einsatz von Tauchern und Mitarbeitern beim Farbsandversuch vor Zempin 1965

e) Untersuchung der Proben

Von jeder Farbsandprobe werden 100 g für eine Siebanalyse abgenommen, so daß ein Überblick über die Sedimentverteilung im Untersuchungsfeld während jedes einzelnen Durchganges gewährleistet ist. Zugleich bieten die Kornanalysen die Möglichkeit einer Kontrolle des Verhältnisses zwischen Fein- und Mittelsand in den Proben.

Des weiteren werden aus jeder Probe 250 g der Mittelsandfraktion von 0,2—0,4 mm und 250 g der Feinsandfraktion von 0,1—0,2 mm ausgesiebt und die darin enthaltenen Farbkörner getrennt gezählt. Die Ergebnisse werden zur Herstellung von je 2 Karten der Verteilung des gefärbten Mittelkorns und des gefärbten Feinkorns für die 5 Aufnahmen des Farbsandversuchs verwendet, so daß insgesamt 10 Farbsandverteilungskarten miteinander verglichen werden können.



### 3. Vergleich verschiedener Farbsandversuche

Ein erster Testversuch vor Ostseebad Ribnitz 1963 galt der Erkundung der Eingabemenge von Farbsand und des Zeitabstandes zwischen den einzelnen Aufnahmen während eines Farbsandversuchs. Er diente ferner der Untersuchung der methodischen Erfordernisse. Es wurden  $3 \times 60$  kg mittelkörnigen Sandes in den Farben Orange, Grün und Blau eingegeben und stündlich Proben genommen. Es fehlte bei diesem Versuch die monatelange Vorerkundung des Reliefs, des Strömungsfeldes und der Sedimentverteilung. Somit war die eigentliche Grundlage für die Auswertung noch nicht vorhanden. Es gab noch kein Stangenfeld wie 1 Jahr später vor dem Fischland.

Der Aufbau des Versuchsfeldes vor dem Fischland mit Hilfe zahlreicher, im engmaschigen Quadratnetz eingespülter Eisenrohre mit dem Ziel des Entwurfs vielfältiger Karten von einer bisher bei Aufnahmen in See nicht gekannten Genauigkeit, insbesondere der Aufnahmen des Strömungsfeldes wurden erst 1964 vom Verfasser in Vorschlag gebracht. Damit war die Voraussetzung für erfolgreiche Farbsandversuche in Bühnenfeldern gegeben.

Der Farbsandversuch vor Zempin führte methodisch gesehen zu einer weiteren Steigerung durch die getrennte Untersuchung von 2 Fraktionen und Siebung sämtlicher Farbsandproben. Der Arbeitsaufwand im Labor vervielfachte sich. Es wurde deshalb an einer automatischen Zählvorrichtung für lumineszente Sandkörner gearbeitet, die verschiedenfarbige Körner bei einem Zählvorgang gleichzeitig erfaßt.

Die untenstehende Übersicht gestattet rückblickend noch einmal einen Vergleich der verschiedenen Farbsandversuche.

TABELLE 2

Übersicht über 3 Farbsandversuche in Bühnenfeldern an der Ostseeküste in den Jahren 1963 bis 1965

Ort Jahr Buhnentyp	Ostseebad Ribnitz 1963 dichte Bühnen	Fischland 1964 dichte Bühnen	Zempin 1965 offene Bühnen
Anzahl der Mitwirkenden	8 Taucher 4 Mann an Land	6 Taucher 1 Mann in Wathose 3 Mann an Land	9 Taucher 4 Mann in Wathosen 3 Mann an Land
Anzahl der Stationen	120	175	171
Zeit für die Probenentnahme	1 Stunde	1 Stunde	1/2 Stunde
getrennt eingegebene Fraktionen	0,2—0,4 mm	0,2—0,4 mm	0,2—0,4 mm 0,1—0,2 mm
Anzahl der Farben	3	4	4
Menge des Farbsandes	$3 \times 60$ kg	$4 \times 45$ kg	$4 \times 60$ kg $4 \times 30$ kg
Anzahl der Farbsandproben	480	672	855
Anzahl der Siebanalysen	—	—	855
ausgezählte Farbsandproben	480	672	1710

Dem Farbsandversuch 1965 gingen 2 Übersichtsverpeilungen, 25 Reliefaufnahmen, 7 Aufnahmen des Strömungsfeldes, 3 Aufnahmen der Sedimentverteilung auch auf dem Strande und der Düne, Strömungsmessungen an 21 Tagen auf dem verlängerten Profil 10 und dem West-Profil sowie 41 Wellenregistrierungen voraus.

#### 4. Karten der Farbsandverteilung in den Bühnenfeldern vor dem Fischland am 25. 10. 1964 (Tafel IV, V)

##### a) Symbolik

Die Herstellung von Farbsandverteilungskarten erfolgte durch Eintragung der Farbkornmengen mit Hilfe verschiedenfarbiger Symbole in eine Tiefenkarte mit dem Stationsnetz. Die Abstufung der Kornzahlen wurde so gewählt, daß die rechten Grenzen der Intervalle in Potenzen von  $\sqrt{10}$  fortschreiten. Die Zuordnung von verschiedenen Symbolen ist aus Tab. 3 ersichtlich.

TABELLE 3

Symbole für die Darstellung verschiedener Mengen von Farbsandkörnern

Symbole	Anzahl der farbigen Körner in 250 g Sand
1 kleiner Strich	0-1
1 kleiner Punkt	2-3
1 stärkerer Punkt	4-10
1 kleiner Kreis	11-32
1 kleiner Kreis mit Seitenstrichen	33-100
1 kleine farbige Kreisfläche	101-316
1 kleine farbige Kreisfläche mit Seitenstrichen	317-1000
1 Kreis mit Punkt in der Mitte	1001-3160
1 Kreis mit Punkt in der Mitte und Seitenstrichen	3161-10000
1 Kreis mit Punkt in der Mitte und Kreuz	mehr als 10000

Die Eingabestellen der verschiedenen Farbsande wurden durch größere farbige Kreise mit schräger Schraffur gekennzeichnet.

Mit Hilfe dieser Symbolik ließen sich übersichtliche Farbsandverteilungskarten für das Untersuchungsgebiet vor dem Fischland entwerfen. Es ist nicht gesagt, daß die hier verwendete Skala sich bei allen weiteren Farbsandversuchen bewährt. Wenn Einzelheiten nicht mit genügender Deutlichkeit zu erkennen sind, wird sich vielleicht durch eine andere Abstufung der Kornzahlen ein schärferes Bild erzielen lassen.

##### b) Die Farbsandverteilung in den Bühnenfeldern

Die 3 ersten Aufnahmen der Farbsandverteilung spiegeln den Farbsandtransport und die Streuung deutlich wider (Abb. 16, 18). Die 4. Aufnahme erscheint unklar (Abb. 19). Wind und See ließen gegen Abend nach, so daß das bei den anderen Aufnahmen durch den ständigen Nachschub bedingte Bild in der 4. Karte verwischt erscheint. Das kommt vor allem durch das Fehlen orangefarbenen Sandes im westlichen und mittleren Bühnenfeld sowie auch durch den Rückgang der grünen Sandkörner im westlichen Bühnenfeld zum Ausdruck.

Der vor dem 1. Bühnenfeld auf dem 1 Riff und in der 1. Rinne, 2 bis 3 m vor der Streichlinie eingegebene rote und blaue Sand wurde uferparallel in östlicher Richtung rasch fortgeführt. Es gelangten nur Spuren davon in die Bühnenfelder. Die Hauptmengen von Rot und Blau überschritten schon in der 1. Stunde nach der Eingabe die östliche Grenze des Untersuchungsfeldes.

In der 1. Aufnahme liegen sämtliche roten Punkte und Kreise auf der uferparallelen Bahn 1 20 m vor den Bühnenköpfen. Die Verfrachtung des blauen Sandes erfolgte während der 1. Stunde ausschließlich auf Bahn 3 vor der Streichlinie. Blau war in der 2. Stunde aus unbekannter Ursache schon fast ganz erloschen. Die Konzentration von Rot betrug in der

2. Stunde noch 10 bis 100 Farbkörner. Geringere Kornzahlen waren bei der 2. Aufnahme auf Bahn 2 und somit am Leehang des 1. Riffs angetroffen worden. Nur ganz wenige rote und blaue Körner gelangten in die Bühnenfelder.

Der im stillen Raum des mittleren Bühnenfeldes ausgeschüttete *orange-farbene Sand* blieb in der 1. Stunde liegen. Geringe Mengen bis zu 31 Körnern waren dicht beim Eingabeort an der Schwappkante zu verzeichnen. In der 2. Aufnahme finden sich im östlichen Bühnenfeld Konzentrationen von über 1000 Körnern und an der Luvseite der letzten Bühne von mehr als 10000 Körnern. Gleichzeitig waren Mengen bis zu 100 Körnern an einzelne Stationen des westlichen Bühnenfeldes gelangt. In der 3. Aufnahme wurden bereits an 5 Stationen dieses Feldes bis zu 100 orange-farbene Sandkörner festgestellt. Die Streichlinie wurde seewärts nur von einzelnen dieser Körner überschritten.

Von dem im mittleren Bühnenfeld vor der Schwappkante ausgeschütteten *grünen Farbsand* gelangten jeweils bis zu 100 Körner an der Schwappkante entlang bis an die westliche Grenze des Untersuchungsfeldes. Einzelne grüne Körner wurden gleichzeitig an fast allen Stationen des 1. Bühnenfeldes und sogar noch weiter seewärts gefunden. In der 2. Stunde setzte sich der Transport des grünen Sandes in der Hauptrichtung nach Osten durch. Es wurden nunmehr vor allen Bühnenfeldern einzelne grüne Körner auf den Bahnen 1, 2 und 3 angetroffen. Die höchsten Konzentrationen des grünen Sandes erreichten erst in der 4. Stunde nach der Farbsandeingabe das östliche Bühnenfeld. Wie bereits erwähnt, kann die letzte Aufnahme auch für die Umlagerung des grünen Sandes nicht mehr als repräsentativ angesehen werden.

#### e) Die Wirksamkeit dichter, einreihiger Pfahlbuhnen

Es wäre verfrüht, auf Grund der wenigen Farbsandversuche bereits allgemein gültige Aussagen über die Funktion und Wirksamkeit von Seebuhnen machen zu wollen. Es läßt sich aber doch schon ein enger Zusammenhang zwischen Aufnahmen des Strömungsfeldes und der Farbsandverteilung feststellen.

Auf jeden Fall erweisen sich dicht geschlagene Pfahlbuhnen als strömungsabweisend. Es wurde bereits darauf hingewiesen, daß die Strömung an den Bühnenköpfen wie abgeschnitten erscheint. Infolge der höheren Strömungsgeschwindigkeit auf dem 1. Riff gelangt kein Sand vom Riff in die Bühnenfelder.

Durch das Vorhandensein des stillen Raumes in den Bühnenfeldern gelangt umgekehrt nur wenig Sand aus den Bühnenfeldern hinaus, zumal die an der Schwappkante entlang setzende Strömung im Luv der Bühnen durch die reflektierten Wellen gebremst wird. Das besagen die nur einzeln vor den Bühnenfeldern angetroffenen grünen und orange-farbenen Sandkörner. Beide Farbsande verteilen sich über die ganze Fläche der Bühnenfelder. Der grüne Sand wanderte hauptsächlich an der Schwappkante entlang und durch die Bühnen hindurch. Keine der Farbsandaufnahmen ließ eine Konzentration grüner und orange-farbener Sande an den Bühnenköpfen erkennen, so daß kaum größere Mengen um den Bühnenkopf herumgeführt wurden. Die dichten Pfahlbuhnen erwiesen sich somit als sedimentdurchlässig.

Im Gegensatz zu dem raschen Abtransport des vor den Bühnen ausgeschütteten roten und blauen Sandes erreichte die Hauptmenge des grünen Sandes erst in der 4. Stunde das benachbarte, östliche Bühnenfeld. Der orange-farbene Sand wurde in nur geringer Menge umgelagert und ließ während des Versuchs kaum eine stärkere Konzentration erkennen. Beides spricht für die Bremswirkung auf den durch die Bühnen hindurch erfolgenden Sedimenttransport.

Die durch die Brecher und das parabelförmige Auflaufen der Wellen am Strandwall bewirkte gegenläufige Sedimentverfrachtung erscheint nur durch die geringe Strömung in den Bühnenfeldern möglich (Abb. 5, S. 69).

Ein Sandfang durch die Bühnen war während des bei auflandigem Wind und uferparalleler Strömung durchgeführten Farbsandversuchs nicht festzustellen. Wohl aber kann den Bühnen

in Hinblick auf die Verzögerung des uferparallelen Transports in den Buhnenfeldern und auf die geringe Anzahl seewärts verfrachteter Farbsandkörner eine den Strand schützende Wirkung zuerkannt werden.

#### D. Schlußwort

Es sollte ein gangbarer Weg zur Lösung der Frage: Buhnenbau ja oder nein? gesucht werden.

Die bisherigen Farbsandversuche in Buhnenfeldern lassen einen Erfolg der wissenschaftlichen Bemühungen erwarten. Es ist jedoch mit Nachdruck darauf hinzuweisen, daß Farbsandeingaben ohne vorherige Sicherstellung genauer Aufnahmen des submarinen Reliefs, der Sedimentverteilung und des Strömungsfeldes so gut wie keinen Wert besitzen. Die bisher angewandte Methodik und das gewonnene aussagekräftige Material sollten an einigen Beispielen erläutert und vor Augen geführt werden. Die auf Grund weiterer Farbsandversuche zwischen verschiedenartigen Buhnen erkennbaren Gegensätze werden endgültige Schlußfolgerungen und die Beantwortung spezieller Fragen z. B. nach der Buhnenlänge und dem Abstand der Buhnen erleichtern.

Wir sind methodisch noch lange nicht am Ziel. Systematische Aufnahmen des Wellenfeldes stehen noch aus, und es gilt, die Wechselwirkung zwischen Buhne und Welle zu erkunden. Dem Unterschied zwischen der Oberflächenströmung und der Strömung dicht über dem Grund ist noch Rechnung zu tragen. Die Frage nach Momentaufnahmen bietet Kritikern Gelegenheit zu Einwänden. Das kann nur Ansporn sein, die Zahl synchroner Messungen und Probenentnahmen zu erhöhen.

Der Durchführung von Farbsandversuchen in Buhnenfeldern sind aus technischen Gründen leider noch enge Grenzen gesetzt. Das gilt vor allem für den Fall der größten Beanspruchung und Wirksamkeit der Buhnen bei Stürmen und Sturmhochwässern, bei denen Messungen und Probenentnahmen nur in beschränktem Umfange möglich sind.

Eine Erhöhung der Zahl der jährlichen Versuche hängt von der Schaffung automatischer Selektions- und Zählrichtungen für verschiedenfarbige Sandkörner ab.

Die aufwendige Untersuchung von Farbsandproben mit dem bloßen Auge läßt die Anzahl der Proben beschränken und führt vorläufig noch zu Inkonsequenzen bei der Untersuchung der Proben.

Wir sind uns der Schwierigkeit und Langwierigkeit der Untersuchungen wohl bewußt. Dennoch muß der Versuch unternommen werden, auch in der Frage der Seebuhnen zu einem wissenschaftlichen Erfolg zu gelangen.

#### E. Literatur

- [1] BURHORN, E., Seebuhnen an Küsten mit schwachen Gezeiten und starker Sanddrift. Planen und Bauen, 5 (1951) H. 3, S. 57–62.
- [2] CORDSHAGEN, H., Der Küstenschutz in Mecklenburg. Schwerin (1965) 258 S.
- [3] GRIESSEIER, H. & VOLLBRECHT, K., Über die Unmöglichkeit einer wohldefinierten naturähnlichen Abbildung wellenbedingter Vorgänge im Litoral durch Küstenmodelle. Wasserwirtschaft—Wassertechnik, 6 (1956) H. 8, S. 247–257.
- [4] GRIESSEIER, H. & VOLLBRECHT, K., Zur Problematik der modellmäßigen Darstellung litoraler Prozesse. Mitt. des Franzius-Instituts der Techn. Hochsch. Hannover, H. 11 (1957) S. 234–261.
- [5] GUTSCHE, H., Über den Einfluß der Strandbuhnen auf die Sandwanderung an Flachküsten. Mitt. des Franzius-Instituts der Techn. Hochsch. Hannover, H. 20 (1961) S. 74–211.
- [6] HAGEN, G., Handbuch der Wasserbaukunst. Seeufer- und Hafenbau, 3. Teil, I. u. II. Bd. (1863).
- [7] KOLP, O., Was geschieht zum Schutze unserer Ostseeküste? Wasserwirtschaft—Wassertechnik, 6 (1956) H. 8, S. 229–231.
- [8] KOLP, O., Sedimentsortierung und -umlagerung am Meeresboden durch Wellenwirkung. Petermanns Geogr. Mitt., H. 3 (1958) S. 173–178.

- [9] KOLP, O. & ENZENROSS, CH., Über einige Laborerfahrungen bei der Kennzeichnung von Meeressand mit lumineszenten Farbstoffen. Beitr. z. Meereskunde, H. 1 (1961) S. 27–38.
- [10] KRESSNER, B., Modellversuche über die Wirkung von Strömungen und Brandungswellen auf einen sandigen Meeresstrand und die zweckmäßige Anlage von Strandbuhnen. Bautechnik, H. 25 (1928) S. 374–386.
- [11] PETERSEN, M., Das deutsche Schrifttum über Seebuhnen an sandigen Küsten. Die Küste, 9 (1961) S. 1–57.
- [12] POPPE, FR., Uferschutzbauten an der Ostseeküste vom Darß bis Hiddensee. Bautechnik, 20 (1942) H. 54/56.
- [13] SCHMITZ, H. P., Kritische Betrachtungen zur modellmäßigen Ermittlung von Strömungen und Sedimenttransporten in Küstenabschnitten gezeitenfreier Meere. Wasserwirtschaft—Wassertechnik, 6 (1956) H. 8, S. 234–246.
- [14] STUEMUND, H., Vorschlag zur Herstellung einreihiger Pfahlbuhnen in offener Bauweise (Sanddurchlässige Buhnen). Küstenschutzamt Graal-Müritz (1954) unveröffentlicht.
- [15] WINKEL, R., Die Buhnenwirkung. Bautechnik, H. 27 (1928) S. 395–397.
- [16] ZSCHIESCHE, O., Die Zweckmäßigkeit von Modellversuchen für seebauliche Maßnahmen an Häfen, in Seewasserstraßen und für den Küstenschutz. Wasserwirtschaft—Wassertechnik, 6 (1956) H. 12, S. 383–386.



## Automatische Zählung lumineszenter Sandkörner

Bekannte Verfahren und ihre Weiterentwicklung im Institut für Meereskunde der DAW.

VON KLAUS STRIGGOW

*Zusammenfassung:* Bekannte Verfahren zur automatischen Zählung lumineszenter Sandkörner werden besprochen. Es wird nachgewiesen, daß jene von ihnen, die für die Unterscheidung verschiedener Farben vorgesehen sind, unter den praktisch vorliegenden Bedingungen nicht zuverlässig arbeiten können. Ein neues Verfahren mit verbessertem Farbunterscheidungsvermögen wird angegeben.

Zur Erforschung der Sandbewegung auf dem Meeresboden werden seit etwa 12 Jahren Sandkörner, welche durch einen lumineszenten Überzug markiert sind, als Tracer verwendet. Diese sogenannte Luminophorenmethode, die besonders in der Küstenforschung weite Verbreitung gefunden hat und beispielsweise vom Institut für Meereskunde der Deutschen Akademie der Wissenschaften zur Erkundung der Wirkungsweise von Seebuhnen eingesetzt wird (vgl. KOLP [1]), leidet jedoch bisher hauptsächlich daran, daß die visuelle Untersuchung der oft zahlreichen Sandproben auf markierte Körner sehr zeitaufwendig und für das Untersuchungspersonal außerordentlich ermüdend ist. Es ist daher verständlich, daß bereits von verschiedenen Seiten Versuche zur Automatisierung derartiger Analysen von Sandproben unternommen wurden. Hierüber und über entsprechende Arbeiten im Institut für Meereskunde soll im folgenden berichtet werden.

Das von NACHTIGALL [2] beschriebene Gerät zur Zählung lumineszenter Sandkörner soll an Hand seines Blockschaltbildes (Abb. 1a) erläutert werden. Die auf markierte Körner zu untersuchende Sandprobe wird mittels einer elektromagnetisch betriebenen Schüttelrinne in Einkornschicht in einen trichterförmigen, senkrechten Fallschacht geschüttet, unterhalb dessen Öffnung der Sand durch die UV-Lampe 1 mit dem vorgesetzten UV(durchlässigen)-Filter 2 angestrahlt wird. Falls das zu prüfende Sandkorn 4 luminesziert, gelangt Lumineszenzstrahlung auf die Fotokathode des Sekundär-Elektronen-Vervielfachers (kurz: SEV) 25. Das UV-Sperrfilter 8 verhindert dabei, daß die vom Sandkorn reflektierte und andere UV-Strahlung die Fotokathode erreicht. Der im SEV erzeugte elektrische Impuls wird im Verstärker 29 und Impulsformer 48 auf die für die Zählung erforderliche Höhe und Form gebracht und anschließend im Impulszähler 52 gezählt.

*Verschiedenfarbige* Körner werden von diesem Gerät *nicht unterschieden*. Das ist ein Mangel, da gerade der gleichzeitige Einsatz verschiedenfarbiger Tracer an verschiedenen Eingabestellen aufschlußreiche Erkenntnisse über den flächenhaften Vorgang der Sandwanderung zu geben vermag.

Ein für die Zählung lumineszenter Sandkörner *bestimmter Farben* vorgesehenes Gerät wurde von TELEKI [3] beschrieben. Das Blockschaltbild ist in Abb. 1b dargestellt. Die Körner 4, 5, 6, 7 der zu untersuchenden Sandprobe fallen in einem senkrechten, aus UV-durchlässigem Glas bestehenden Rohr, welches durch die UV-Lampe 1 angestrahlt wird, herab, wobei jedes Korn der Reihe nach vor die optisch-elektronischen Kanäle 9, . . . 52 und 10, . . . 53 usw. gelangt. Das Gerät ist für maximal 10 solcher Kanäle vorgesehen, von denen in Abb. 1b jedoch nur vier dargestellt sind. Jeder Kanal dient zur Erkennung einer bestimmten Farbe und zur Zählung der Körner dieser Farbe. Seine Wirkungsweise ist folgende: Das von dem zu

prüfenden Sandkorn, z. B. 4, emittierte Licht wird mittels der Sammellinse 9 durch das Interferenzfilter 17 auf den SEV 25 geworfen. Der Durchlaßbereich des Filters ist so gewählt, daß er mit dem spektralen Maximum der zu erkennenden Farbe zusammenfällt. Der gegebenenfalls im SEV erzeugte elektrische Impuls wird über den Verstärker 29, den Integral-Diskriminator 33 und den Impulsformer 48 dem Impulszähler 52 zugeführt. Der Diskriminator hat

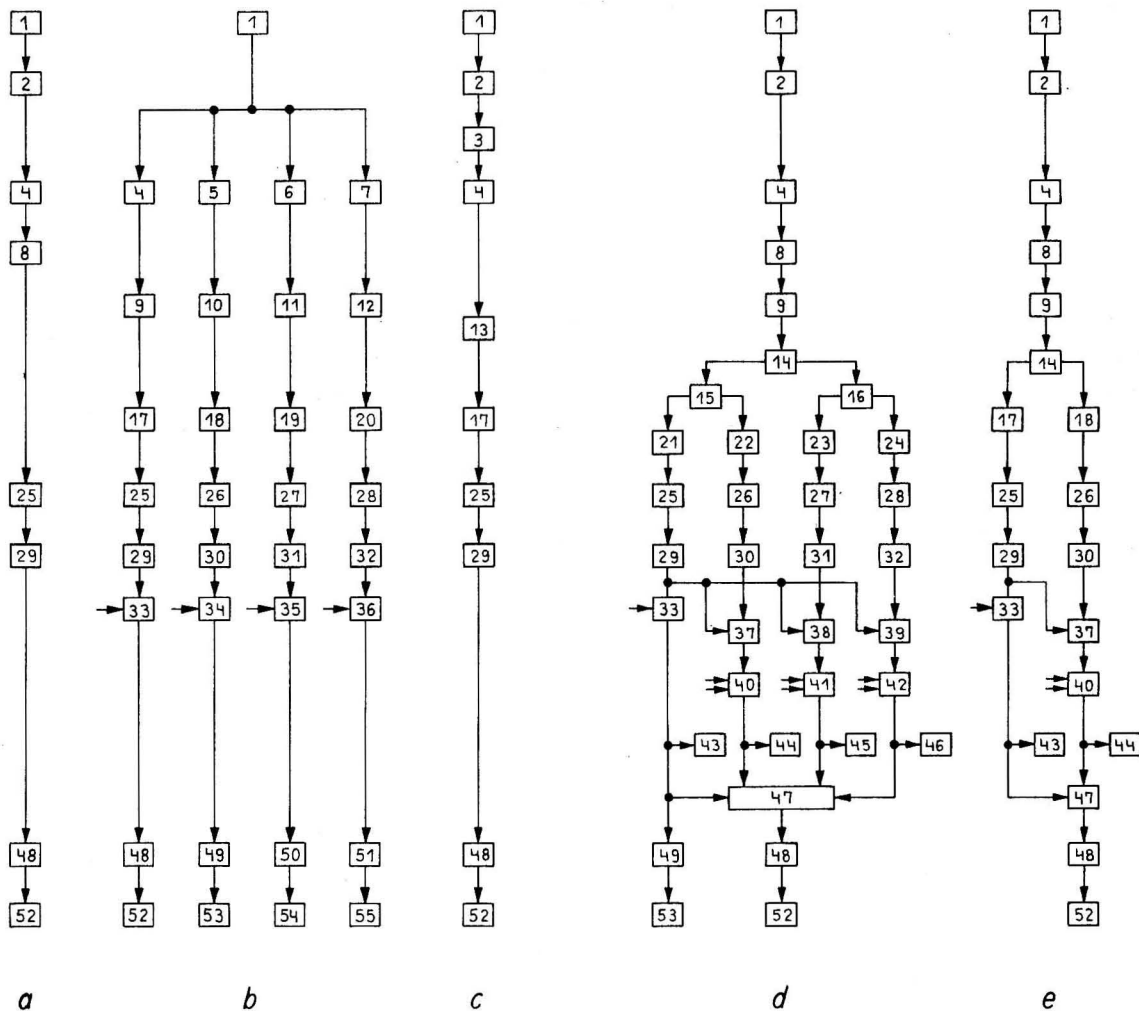


Abb. 1. Anordnungen zur Zählung lumineszenter Sandkörner

a, b und c: Anordnungen nach NACHTIGALL [2], TELEKI [3], und GRIESSEIER und VOIGT [4, 5, 6]  
 d und e: Anordnungen mit verbessertem Farbumscheidungsvermögen nach STRIGGOW [8]

Zeichenerklärung

1 UV-Lampe  
 2 UV-Filter  
 3 Quarzlinse  
 4...7 Sandkorn  
 8 UV-Sperrfilter  
 9...12 Sammellinse  
 13 Mikroskop  
 14...16 Strahlenteiler  
 17...20 Interferenzfilter  
 21...24 Filter  
 25...28 SEV (Sekundär-Elektronen-Vervielfacher)

29...32 Verstärker  
 33...36 Integral-Diskriminator mit einstellbarem Schwellwert  
 37...39 Quotientenmeßwerk  
 40...42 Differential-Diskriminator mit einstellbarem oberen und unteren Schwellwert  
 43...46 Kontrollampe  
 47 Koinzidenzgatter  
 48...51 Impulsformer  
 52...55 Impulszähler

einen einstellbaren Schwellwert; er wird dazu verwendet, die Korngrößenverteilung der Körner mit der durch das Interferenzfilter ausgewählten Farbe zu bestimmen.

Eine ähnlich arbeitende, jedoch einkanalige Anordnung (vgl. Abb. 1 c) zur Zählung lumineszenter Sandkörner bestimmter Farbe wurde auch von GRIESSEIER & VOIGT [4, 5, 6] angegeben.

Mit beiden Anordnungen ist jedoch *keine sichere Unterscheidung verschiedenfarbiger* Sandkörner möglich. Die Ursache hierfür liegt in dem Zusammentreffen folgender Gegebenheiten:

1. Die Lumineszenzstrahlung ist nicht monochromatisch, sondern überdeckt ein mehr oder minder breites Spektralband.

Zur Illustration ist in Abb. 2 die spektrale Energieverteilung der Lumineszenzstrahlung für vier Leuchtstoffe aus der (Zn:Cd)S:Ag(0,01)-Familie, deren Emissionsmaxima bei beziehungsweise 465 nm (blau), 525 nm (grün), 585 nm (gelb) und 615 nm (orange) liegen, dargestellt (nach LEVERENZ [7]). Die Halbwertsbreiten der Kurven liegen zwischen 60 und 94 nm, das sind im Mittel 25% der Breite des sichtbaren Spektralbereiches (400 bis 700 nm). Ähnliche Werte gelten für andere Leuchtstoffe.

2. Die Intensität der Lumineszenzstrahlung der markierten Körner streut in einem breiten Bereich, bedingt durch den unterschiedlichen Durchmesser und die unregelmäßige Gestalt der Körner, die vom Anfärbevorgang und Abrieb abhängige Stärke des lumineszenten Überzuges und das unterschiedliche Emissionsvermögen verschiedener Leuchtstoffe bei gleichen Anregungsbedingungen.

Zur Erläuterung des letzten Effektes sei bemerkt, daß sich bei Anregung der Lumineszenz durch UV-Strahlung der Wellenlänge 365 nm die Strahlungsintensitäten des blauen, grünen, gelben und orange Leuchtstoffes von Abb. 2 im Emissionsmaximum wie 114:110:60:47 verhalten.

Werden beispielsweise zur Markierung die blau-, grün-, gelb- und orangelumineszierenden Leuchtstoffe mit den in Abb. 2 gezeigten Spektralkurven verwendet, so strahlt bei beispielsweise 525 nm ein grünes Korn etwa genau so intensiv wie ein 8mal helleres blaues oder ein 4mal helleres gelbes oder ein 18mal helleres orange Korn. Da nun aber der SEV nicht wissen kann, ob die von dem für 525 nm durchlässigen Interferenzfilter hindurchgelassene Strahlung wirklich von einem grünen oder aber einem helleren blauen, gelben oder orange Korn stammt,

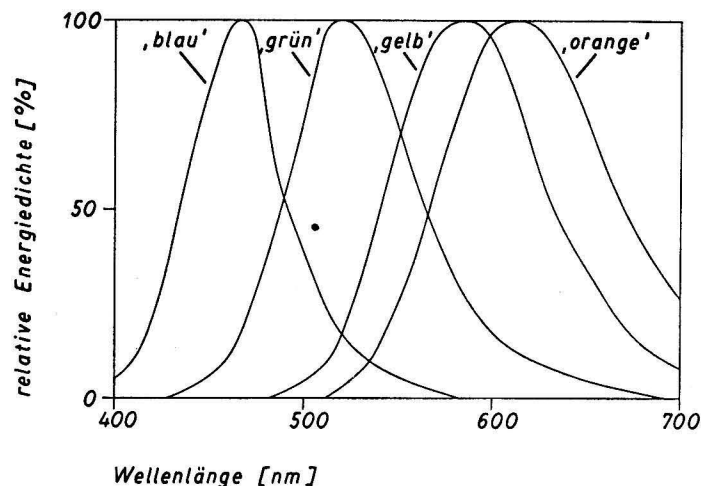


Abb. 2. Normierte spektrale Energieverteilung der Lumineszenzstrahlung von Leuchtstoffen aus der (Zn:Cd)S:Ag(0,01)-Familie nach LEVERENZ [7]

Man beachte, daß die gleiche Höhe der Emissionsmaxima nur eine Folge der Normierung ist. Die absoluten Ordinaten der Maxima verhalten sich — bei Anregung der Lumineszenz durch UV-Strahlung der Wellenlänge 365 nm — wie 114 : 110 : 60 : 47, wobei die kleineren Werte den größeren Wellenlängen entsprechen. Bemerkenswert ist die im Vergleich zum sichtbaren Spektralbereich große Halbwertsbreite der Kurven.

sind Fehlzählungen — selbst bei Verwendung visuell deutlich unterscheidbarer Farben — unvermeidlich!

Ausgangspunkt für die Verbesserung der automatischen Zählung lumineszenter Sandkörner ist die Erkenntnis, daß für die Identifizierung eines bestimmten Leuchtstoffes wegen der oben unter Punkt 2 angeführten Gründe *nicht die absolute, sondern die relative* spektrale Energieverteilung der Lumineszenzstrahlung maßgebend ist. Deshalb werden die bisher bekannten Verfahren zur automatischen Zählung in folgender Weise abgeändert (STRIGGOW [8]):

1. Absolute Strahlungsintensitäten werden für jedes Korn *gleichzeitig in zwei oder mehr* Spektralbereichen gemessen.
2. Aus den gemessenen Absolutwerten werden *relative* Strahlungsintensitäten berechnet.
3. Kriterium für die automatische Erkennung einer bestimmten Tracer-Farbe ist die *gleichzeitige Lage der relativen Strahlungsintensitäten innerhalb ihrer Sollwertbereiche*.

Zur technischen Realisierung werden Strahlenteiler, Quotientenmeßwerke, Differential-Diskriminatoren sowie ein Koinzidenzgatter herangezogen. Die Abb. 1d und e zeigen zwei Varianten des Blockschaltbildes der Zählordnung mit verbessertem Farbunterscheidungsvermögen. Die Anregung der Lumineszenz erfolgt bei beiden Schemen wie üblich dadurch, daß die durch das UV-Filter 2 gefilterte UV-Strahlung der UV-Lampe 1 auf das zu prüfende Sandkorn 4 geworfen wird. Die Lumineszenzstrahlung wird durch das UV-Sperrfilter 8 von reflektierter und anderer UV-Strahlung befreit, durch die Sammellinse 9 gebündelt und als konvergentes, paralleles oder nahezu paralleles Strahlenbündel durch einen Strahlenteiler 14, z. B. einen für den gesamten sichtbaren Spektralbereich teildurchlässigen oder einen für gewisse Spektralbereiche vollständig durchlässigen Spiegel, in zwei Teilstrahlen aufgespalten, die bei Abb. 1d nochmals durch die Strahlenteiler 15, 16 zerlegt werden. Sofern nicht ausdrücklich anderes festgelegt wird, beziehen sich die folgenden Ausführungen dieses Absatzes ausschließlich auf Abb. 1d; die sinngemäße Übertragung auf Abb. 1e liegt auf der Hand. Aus den vier Teilstrahlen werden durch die Filter 21 bis 24 gewisse Spektralbereiche ausgesondert, deren Intensitäten dann durch die SEV 25 bis 28 und die Verstärker 29 bis 32 in proportionale elektrische Signale umgesetzt werden. Die Durchlaßbereiche der Filter — genauer: die spektralen Durchlaßkurven der Filter — sind bis auf die Forderung, daß sie paarweise nicht vollständig gleich sein dürfen, keiner weiteren Bedingung unterworfen; insbesondere brauchen sie nicht so schmal wie die der Interferenzfilter zu sein. Die Ausgänge der Verstärker werden zur Berechnung der relativen Strahlungsintensitäten paarweise an die Quotientenmeßwerke 37 bis 39 geführt. Die eigentliche Farberkennung erfolgt mit den Differential-Diskriminatoren 40 bis 42 und dem Koinzidenzgatter 47. Der untere und der obere Schwellwert jedes Diskriminators sind so eingestellt, daß er dann und nur dann ein Signal gibt, wenn die *relative* Strahlungsintensität innerhalb des Sollwertbereiches liegt. Kriterium für die automatische Farberkennung ist das gleichzeitige Auftreten von drei Diskriminator-Signalen, das durch das Koinzidenzgatter festgestellt wird. Die Koinzidenzsignale werden dann nach entsprechender Formung durch den Impulsformer 48 im Impulszähler 52 gezählt.

In Hinblick auf die Möglichkeit der Fehlanzeige eines Quotientenmeßwerkes bei *kleinen* Eingangswerten ist der Integral-Diskriminator 33 vorgesehen. Dieser gibt erst dann ein Signal ab, wenn die vom SEV 25 empfangene Strahlungsintensität eine gewisse Mindeststärke übertrifft, und sperrt dadurch das Koinzidenzgatter in dem Falle, daß alle Quotientenmeßwerke den Ausgang  $\frac{0}{0}$  = unbestimmt haben.

Die richtige Einstellung der Diskriminatoren wird empirisch vorgenommen, indem ein mit der zu erkennenden Farbe markiertes, besonders leuchtschwaches Probekorn stationär in die Anordnung gebracht wird und die Schwellwerte so eingestellt werden, daß die den Zustand der Diskriminatoren anzeigenden Kontrolllampen 43 bis 46 aufleuchten.

Wenn auch noch die Anzahl der Körner aus einer gewissen Farbengruppe ermittelt werden soll, können an den Integral-Diskriminator noch ein Impulsformer 49 und -zähler 53 angeschlossen werden.

Die in Abb. 1e gezeigte Variante zeichnet sich durch den geringen apparativen Aufwand aus. Ein sehr gutes Farbumterscheidungsvermögen wird dadurch erzielt, daß die Durchlaßbereiche der Interferenzfilter 17 und 18 in die steilsten Teile der linken und rechten Flanke des spektralen Emissionsmaximums der zu erkennenden Farbe gelegt werden. Mit dieser Anordnung können bereits seitliche Verschiebungen der Emissionskurve um Bruchteile ihrer Halbwertsbreite erkannt werden.

Als Quotientenmeßwerk kann beispielsweise eine Braunsche Röhre verwendet werden, wenn die Ablenkspannungen als Eingangsgrößen und der Winkel zwischen der  $x$ -Achse des Leuchtschirmes einerseits und der Verbindungslinie zwischen Lichtpunkt und Nullpunkt andererseits als Maß für den Quotienten angesehen werden. In diesem Fall läßt sich auch der Differential-Diskriminator sehr einfach, nämlich durch eine vor dem Leuchtschirm angeordnete drehbare Sektorenblende mit verstellbarem Öffnungswinkel in Verbindung mit einer Fozelle, realisieren.

#### Literatur

- [1] KOLP, O., Untersuchung der Wirksamkeit von Seebuhnen mit Hilfe von Farbsandversuchen. Beiträge zur Meereskunde, Heft 17/18 (1966) S. 61–90.
- [2] NACHTIGALL, K. H., Ein Gerät zur automatischen Zählung von Luminophoren Meyniana, Kiel, 14 (1964) S. 48–51.
- [3] TELEKI, P. G., Scanning Fluorescent Tracer Sand. Coastal Engineering Laboratory, University of Florida, Gainesville, Florida, August 1963.
- [4] GRIESSEIER, H. und VOIGT, G., Photoelektrische Zählung von lumineszenten Sandkörnern. Monatsberichte der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 6 (1964) H. 12, S. 901–905.
- [5] GRIESSEIER, H. und VOIGT, G., Lumineszenter Sand und sein Nachweis in Bodenproben. Acta Hydrophysica, IX (1965) H. 3, S. 151–167.
- [6] GRIESSEIER, H. und VOIGT, G., Zur Markierung von Sanden mit lumineszenten Farbstoffen. Monatsberichte der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 6 (1964) H. 11, S. 820–826.
- [7] LEVERENZ, H. W., An Introduction to Luminescence of Solids. New York/London 1950.
- [8] STRIGGOW, K., Anordnung zur Zählung farbiger Teilchen. Deutsches Wirtschaftspatent beim Amt für Erfindungs- und Patentwesen der DDR beantragt, Amtl. Aktenzeichen: WP 42 h/115 308.



## Gleichzeitige Markierung von Meeressanden mit lumineszenten und magnetischen Stoffen zur Erleichterung der Probenaufbereitung bei Farbsandversuchen

VON KURT BRAUCKHOFF

*Zusammenfassung:* Die zusätzliche Präparation lumineszenter Sande mit Ferromagnetica ermöglicht eine schnellere Aufbereitung der Proben bei Farbsandversuchen. Ein neu entwickeltes Gerät dient der Anreicherung der zugleich lumineszenten und magnetischen Sandkörner in den Proben.

Es gibt verschiedene Methoden, die beim Studium wellen- und strömungsbedingter Küstenveränderungen angewandt werden. Am bedeutendsten sind die Verwendung radioaktiven Sandes und die Luminoforenmethode. Sie wurden von GRESSEIER [1] beschrieben. Erste Erfahrungen wurden ferner von KOLP [9] und SEIBOLD [11] mitgeteilt.

An der Küste der DDR finden zur Zeit nur lumineszent gefärbte Sande Verwendung. Deshalb bedarf es keiner besonderen Sicherheitsmaßnahmen wie bei der Arbeit mit radioaktiven Sanden.

Bei Anwendung der Luminoforenmethode macht es sich störend bemerkbar, daß die Untersuchung der gewonnenen Proben zuviel Zeit in Anspruch nimmt. Bei einem Versuch mit lumineszenten Sanden fallen etwa 200 bis 600 Proben an. Die darin enthaltenen Farbkörner müssen visuell bestimmt und gezählt werden. Für die Durchsicht einer Probe werden 15 bis 90 Minuten benötigt, je nachdem, ob nur wenige oder zahlreiche Farbkörner darin enthalten sind. Auch die Korngröße spielt dabei eine Rolle. Die zu untersuchende Sandmenge schwankt zwischen 100 und 1000 g. Sie richtet sich nach der Konzentration gefärbten Sandes in den Proben.

In verschiedenen Ländern wurden elektronische Apparaturen für eine automatische Aufarbeitung von Farbsandproben entwickelt. (vgl. BRUUN [2, 3], GRIESSEIER [8], NACHTIGALL [11], TELEKI [13]). Alle diese Zählvorrichtungen haben auch Nachteile. Sie sind sehr teuer, kompliziert und in ihrer Meßgenauigkeit nicht ausreichend. Die Zählergebnisse liegen für Korngrößen von 0,1 bis 0,2 mm nur zwischen 70 und 90% [10]. Das ist um so nachteiliger, als diese Korngrößen an der Ostseeküste häufig vorkommen. Der Luminoforenmethode ist eine andere von H. GRIESSEIER sowie S. und W. HOEG ausgearbeitete Indikatormethode verwandt. Sie beinhaltet die Kennzeichnung von Sanden mit Hilfe magnetischer Stoffe. Es sind dieser Methode jedoch vorläufig noch enge Grenzen gesetzt. Ein großer Mangel besteht in dem zu weiten Fehlerbereich bei automatischer Zählung, der sich kaum einengen lassen wird.

Im Seesand befinden sich durchschnittlich 0,6% und bisweilen sogar mehr als 5% Schwerminerale, die zu einem großen Teil magnetisch sind wie z. B. Magnetit, Ilmenit, Granat, Hornblende, Monazit u. a. Ihr Magnetismus ist großenteils dem der Indikatoren so ähnlich, daß selbst eine gute elektronische Filterung Fehler größeren Ausmaßes nicht verhindert. Man muß bedenken, daß in 100 g der Fraktion 0,1—0,2 mm mehr als 100 000 natürlich-magnetische Körner enthalten sind.

Um diesen Unzulänglichkeiten auszuweichen, wurde in der Abteilung Küstenschutz der Wasserwirtschaftsdirektion Stralsund ein neues Verfahren der Kennzeichnung und Aufbereitung von Sandproben entwickelt. Es bietet die Vorzüge größerer Genauigkeit und einer schnelleren Untersuchung der Proben.

Hierbei werden die für den Versuch präparierten Sande mit magnetischen Stoffen versehen, aber nur um nachher bei der Probenaufbereitung den Magnetismus für die Anreicherung der gefärbten Sandkörner zu nutzen. Man hat dann die Möglichkeit, die magnetischen Körner mit Hilfe eines „Magnetscheiders“ auszulesen. Dann werden die lumineszenten Körner des Konzentrats unter UV-Licht gezählt.

Die Markierung der Sande geschieht wie bei der Verwendung lumineszenter Stoffe. Mit einem geeigneten Lack werden Magnetstoff und lumineszierender Farbstoff an die Sandkörner gebunden.

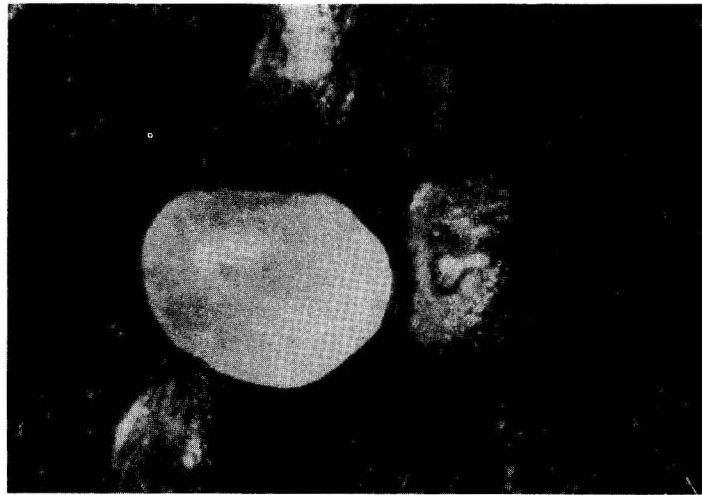


Abb. 1. Mit Ferromagnetika präparierte Sandkörner (1:500)  
 Korn am oberen Bildrand: Präpariertes Sandkorn durchleuchtet. Es ist zu erkennen, daß nicht das gesamte Sandkorn behaftet ist.  
 Korn rechts im Bild zeigt die geringfügige Veränderung der Kornoberfläche durch die angelagerten Magnetstoffe.  
 Das Sandkorn in Bildmitte ist nicht präpariert

Es wird eine Magnetsuspension des VEB Filmfabrik Wolfen empfohlen [5]. Diese Suspension besteht zugleich aus dem Lösungsmittel, Bindemittel und Eisenpulver. Die lumineszenten Farbstoffe werden mit Polystyrol an den Sand gebunden. In einem Mischer werden die für den Versuch vorgesehenen Sande zuerst mit der Suspension versehen. Der Mischer bleibt solange in Bewegung, bis das Lösungsmittel verdunstet ist und sich das Bindemittel mit dem eingelagerten magnetischen Pulver als feste Haut um jedes Sandkorn gelegt hat. Darauf wird der magnetisierte Sand mit dem in Benzol gelösten, lumineszenten Farbstoff und Polystyrol präpariert. Nach Verdunsten des Benzols bei ständiger Durchbewegung bleiben Polystyrol und Farbstoff als zweiter Überzug an den Sandkörnern.

Für 100 kg Sand benötigt man:

- 3000 g Magnetitsuspension,
- 500 g lumineszenten Farbstoff,
- 300 g Polystyrol,
- 12000 ccm Benzol.

Magnetitsuspension und Farblösung lassen sich nicht gleichzeitig auf den Sand aufbringen. Es wird zuerst die Suspension verwendet, da dieselbe stark abdeckt und die Lumineszenz mindert.

Der Gebrauch des so präparierten Sandes erfolgt wie üblich. Bei der Aufbereitung der beim Farbsandversuch entnommenen Proben wird das in Abb. 2 dargestellte Gerät verwendet.

Die gut getrocknete Probe wird gleichmäßig und in dünner Schicht auf ein kleines Förderband gegeben. In der Rolle, über die der Sand läuft, befinden sich Magnete, die den magnetischen Anteil der Probe vom unmagnetischen trennen. Die unmagnetischen Körner fallen zuerst vom Band ab, die magnetischen erst dann, wenn sie das Kraftfeld der Magnete verlassen.

In dem gewonnenen Konzentrat befinden sich außer den magnetisierten Körnern auch alle natürlich-magnetischen Körner.

Eine Verbesserung läßt sich noch dadurch erreichen, daß man die Elektromagnete in der Scheiderolle verschieden stark wählt. Dadurch kann eine weitere Konzentration der magnetisierten Sandkörner erzielt werden.

Das Konzentrat wird wie jede andere Probe durchgesehen. Die durch Anreicherung der Farbsandkörner eingesparte Zeit beträgt etwa  $\frac{9}{10}$  der ohne die magnetische Trennung für die Untersuchung einer Probe benötigten Zeit.

Eine Trennung der natürlich-magnetischen Körner von den künstlich magnetisierten Körnern ist auch mit Hilfe schwerer Lösungen möglich.

Das oben beschriebene Verfahren wurde entwickelt, um bei Farbsandversuchen schneller und mit geringerem Kostenaufwand zu Ergebnissen zu gelangen. Es ist nicht so elegant wie die elektronische Auszählung, bietet dafür aber die genannten Vorteile. Vor allem wird der Fehlerbereich eingeschränkt. Dieses Verfahren kann auch in die automatische Untersuchung von Farbsandproben einbezogen werden.

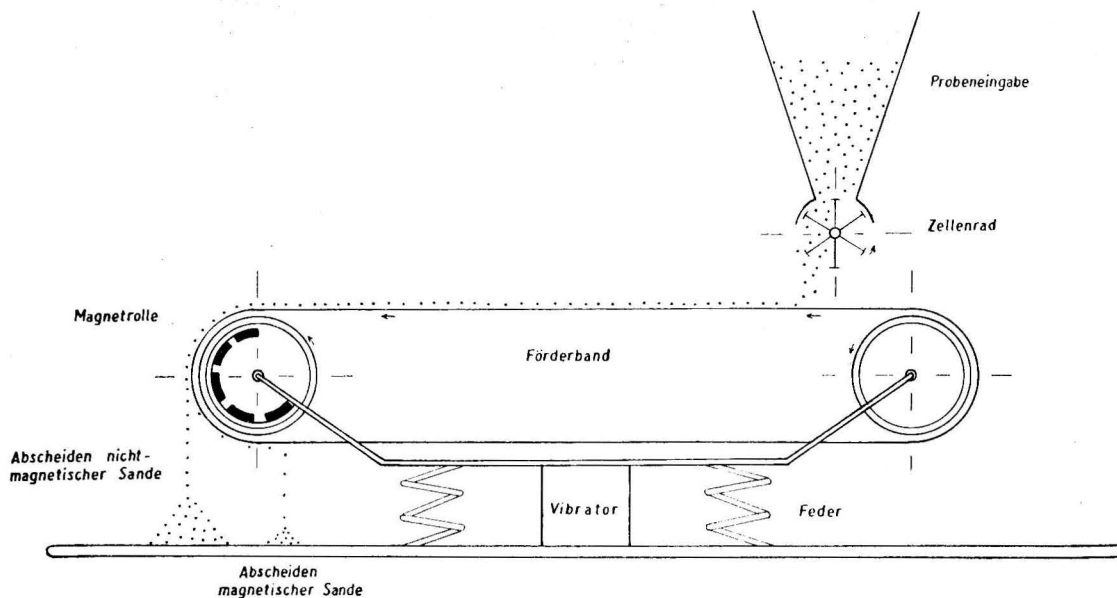


Abb. 2. Anlage zur Konzentration magnetischer Luminiforen

### Literatur

- [1] AJBULATOV, N., BOLDYREV, V. und GRIESELER, H., Das Studium der Sedimentbewegung in Flüssen und Meeren mit Hilfe von lumineszenten Farbstoffen und radioaktiven Isotopen. *Petermanns Geogr. Mitt.*, **105** (1961) S. 177—186, 254—263.
- [2] BRUN, P., Quantitative tests of littoral drift. IXth Conference on Coastal Engineering, Paper 2.5 (1964).
- [3] BRUN, P., Quantitative research on littoral drift in field and laboratory. 11. IAHR Kongreß Leningrad, **5** (1965).

- [4] GREISSEIER, H. und HOEG, S., Über die Kornzusammensetzung von lumineszenten Sanden. Monatsber. d. DAW, 6 (1964) S. 826—829.
- [5] GREISSEIER, H. und HOEG, S. u. W., Durch Ferromagnetika markierte Sedimente und Möglichkeiten ihrer automatischen Zählung. Acta Hydrophysica, 11 (1964) S. 35—53.
- [6] GREISSEIER, H. und MAKOWSKI, J., Quantitative Erfassung hydrodynamisch bedingter Sedimenttransporte mit Hilfe von Radioisotopen. Monatsber. der DAW, 6 (1964) S. 724—730.
- [7] GREISSEIER, H. und VOIGT, G., Zur Markierung von Sanden mit lumineszenten Farbstoffen. Monatsber. der DAW, 6 (1964) S. 820—826.
- [8] GREISSEIER, H. und VOIGT, G., Photoelektrische Zählung von lumineszenten Sandkörnern. Monatsber. der DAW, 6 (1964) S. 901—909.
- [9] KOLP, O. und ENZENROSS, C., Über einige Laborerfahrungen bei der Kennzeichnung von Meeressand mit lumineszenten Farbstoffen. Beiträge zur Meereskunde, H. 1 (1961) S. 27—38.
- [10] NACHTIGALL, K. H., Ein Gerät zur automatischen Zählung von Luminoforen. Meyniana, 14 (1964) S. 48—51.
- [11] SEIBOLD, E. und WALGER, E., Erste Versuche mit Luminoforen zur Untersuchung der Sandverfrachtung in der Kieler Förde. Meyniana, 12 (1962) S. 1—8.
- [12] TELEKI, P. G., Scanning fluorescent tracer sand. Unveröffentl. Bericht Coastal Engineering Laboratory, University of Florida (1963).

# Ein Wellenmesser mit Stufensonde und interner Datenreduzierung

Von KLAUS STRIGGOW

*Zusammenfassung:* Es wird ein Wellenmesser beschrieben, der speziell für den Einsatz an Küsten mit flachem Unterwasserhang bestimmt ist und sich durch die Messung nach dem Abtastverfahren, die Verwendung einer Stufensonde, die digitale Meßwertübertragung sowie die interne Datenreduzierung auszeichnet.

Das Gerät besteht aus einem Meßfühler und einem Empfänger, welche durch ein 7adriges Kabel miteinander verbunden werden. Als Meßfühler dient eine Stufensonde mit 31 elektrolytischen Schaltern im Abstand von 1 dm. Sie wird an einem in den Meeresboden eingespülten Rohr befestigt und über zwei Adern des Kabels mit Strom versorgt. Der Wasserstand wird mit einer zwischen 0,1 und 6 s einstellbaren Periode abgetastet und nach dem Impulscodier-Verfahren auf den fünf anderen Adern des Kabels zum Empfänger auf dem Lande übertragen. Der Empfänger enthält einen Impulsgeber zur Erzeugung der Abtastimpulse, eine Decodier- und Zählschaltung sowie Trockenelemente zur Versorgung des Gerätes mit 12 V Gleichspannung. In der auf den Meßimpuls folgenden Pause wird der Wasserstand entschlüsselt, wobei in Abhängigkeit vom Meßwert eins von 32 Zählwerken einen Zählimpuls erhält. Wenn bei dem Meßimpuls  $n$  Elektroden der Stufensonde untergetaucht waren, spricht das Zählwerk mit der Nummer  $n + 1$  an. Auf diese Weise werden die beispielsweise 1000 oder 10000 durch die Abtastung gewonnenen Momentanwerte auf maximal 32 Zahlenangaben über ihre Klassenhäufigkeit reduziert.

Als Kenngrößen des Seegangs dienen die erste Verteilungsfunktion aus der Theorie der stochastischen Prozesse, der Mittelwert und die Standardabweichung. Sie können durch die interne Datenreduzierung und eine graphische Interpolation leicht bestimmt werden. Die Ungenauigkeit, mit der Mittelwert und Standardabweichung ermittelt werden, ist mit Ausnahme des Falles niedriger Wellen etwa eine Größenordnung kleiner als der Stufenabstand. Fehlmessungen können in vielen Fällen erkannt werden.

Die bisherigen Ergebnisse bestätigen die bereits bekannte Eigenschaft des Seegangs, daß seine erste Verteilungsfunktion näherungsweise normal ist. Sie zeigen jedoch auch, daß die Verteilungsfunktion mehr oder minder schief ist — worin sich die bekannte Asymmetrie von Wellenberg und Wellental widerspiegelt —, und deuten an, daß sie auf der rechten Seite abgeschnitten ist. Es ist also möglich, daß prinzipiell nur endliche Wasserstandsschwankungen vorkommen. Die Schwankungsweite lag bei allen Messungen zwischen dem 4- und dem 10fachen der Standardabweichung.

Auf die Gewinnung von Angaben über den zeitlichen Verlauf der Wasserstandsschwankungen ist vorerst verzichtet worden.

## 1. Einleitung

Nach einer Konzeption des Verfassers entstand in der Gruppe „Küstenforschung“ des Institutes für Meereskunde ein Wellenmesser, der an Küsten mit flachem Unterwasserhang eingesetzt werden und — ohne daß Eichungen und Nacheichungen erforderlich sind — mit hinreichender Genauigkeit sowie einem Minimum an Auswertungsarbeiten solche Parameter des Seegangs liefern soll, die dem Problem physikalisch und mathematisch angepaßt sind.

Entsprechend den speziellen Einsatzbedingungen wird der Meßfühler an einem in den Meeresboden eingespülten Rohr befestigt und ein Kabel zur Meßwertübertragung sowie zur Stromversorgung des Meßfühlers verwendet (Abb. 1). Die gleichbleibende Genauigkeit wird durch eine Stufensonde und eine digitale Meßwertübertragung erreicht. Die Grundlage für die einfache Auswertung bilden das Abtastverfahren, d. h. die zeitliche Quantisierung des Meß-



vorganges, die *interne Datenreduzierung* und eine *graphische Interpolation* im Wahrscheinlichkeitsnetz.

Als Kenngrößen des Seegangs werden im Sinne der Theorie der stochastischen Prozesse (JAGLOM [2]) der Mittelwert  $m$ , die Standardabweichung oder mittlere quadratische Abweichung  $\sigma$  und die erste Verteilungsfunktion

$$F(x) = P\{\xi(t) < x\}$$

verwendet. Der Mittelwert gibt die Lage der Stillwasserlinie an, und die Standardabweichung ist ein Maß für die Wellenhöhe. Beide Begriffe sind in der üblichen Weise definiert; ihre elektrotechnischen Analoga sind das Gleichspannungspotential und der Effektivwert einer Wechselspannung. Die erste Verteilungsfunktion gibt die Wahrscheinlichkeit dafür an, daß der Momentanwert des Wasserstandes zum Zeitpunkt  $t$ ,  $\xi(t)$ , kleiner als  $x$  ist.

Auf die Bestimmung der Spektralfunktion (Energiespektrum), der Korrelationsfunktion und der höheren Verteilungsfunktionen zur Charakterisierung des *zeitlichen* Verlaufes der Wasserspiegelschwankungen wurde in Hinblick auf den geräte-technischen Aufwand und die Entwicklungszeit vorerst verzichtet.

## 2. Meßfühler

Der Meßfühler besteht aus der Stufensonde und einer in ihrem Innern untergebrachten Codierschaltung.

### 2.1 Stufensonde

Wegen ihrer gleichbleibenden Genauigkeit, welche Eichungen und Nacheichungen überflüssig macht, wurde die häufig für Seegangsmessungen verwendete Stufensonde (GERHARDT u. a. [1], RUSSEL [8], VERHAGEN [9]) auch für das hier beschriebene Gerät ausgewählt.

Die Stufensonde besitzt im Abstand von 1 dm 31 elektrolytische Schalter, die durch das Seewasser geschlossen werden. Vorerst werden die Elektroden aus Zinkblech hergestellt und zu zweit auf einen Piacryl-Isolator mit eingeklebten elektrischen Zuführungen montiert (Abb. 2). Das verzinkte Rohr, auf dem die Isolatoren befestigt sind, dient allen Schaltern als Gegenelektrode.

### 2.2 Codierschaltung

Wegen der Vorteile, welche die digitale Darstellung gegenüber der analogen hinsichtlich der Genauigkeit bei der Meßwertfernübertragung, -speicherung und -verarbeitung aufweist, wird der durch die Stufensonde quantisierte Meßwert *digital* fernübertragen. Da zu diesem Zwecke nicht jeder Schalter der Sonde eine eigene Ader des Übertragungskabels erhalten kann, muß der Meßwert in irgendeiner Form verschlüsselt werden. Hierfür sind verschiedene Verfahren bekannt. Die Verschlüsselung nach dem Impulszahlverfahren läßt sich im Prinzip sehr einfach

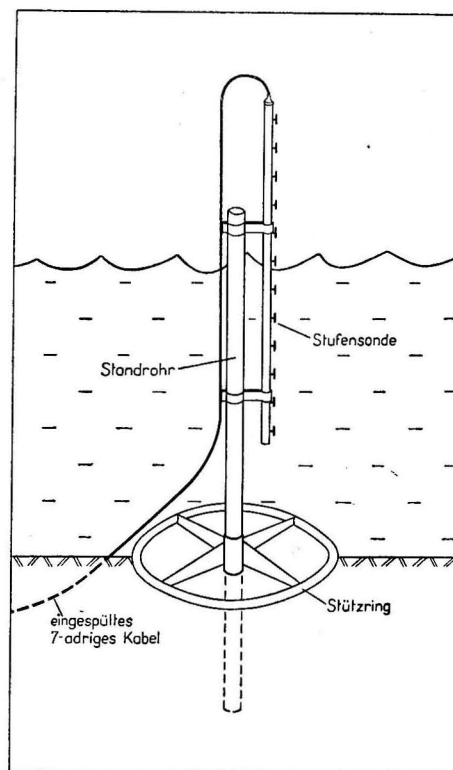


Abb. 1. Aufstellung des Meßfühlers  
Der Stützring braucht nur leicht eingespült zu werden, um große horizontale Kräfte aufnehmen zu können. Die oberste Elektrode der Stufensonde befindet sich etwa 1,8 m über dem Meeresspiegel

dadurch erzielen, daß die Schalter der Stufensonde sukzessiv abgetastet werden (JAHN [3], LUCAS [5]). In der Praxis ist hierbei jedoch bei mechanischen Umschaltern, z. B. Drehwählern, für die sukzessive Abtastung die geringe Arbeitsgeschwindigkeit und bei elektronischen viestelligen Umschaltern die Aufwendigkeit von Nachteil. Die Verschlüsselung nach dem Impulscodeverfahren mit dem Graycode wird von RUSSEL zwecks Meßwertspeicherung auf Lochstreifen durchgeführt. Jeder elektrolytische Schalter der Stufensonde steuert ein Relais mit zwei Umschaltekontakten. Der eine Kontakt dient dazu, alle untergetauchten Schalter mit Ausnahme der beiden obersten von der Spannungsquelle abzuschalten, während der andere wahlweise entweder zum Aufbau eines variablen Spannungsteilers, an dem der Meßwert in analoger Form abgegriffen werden kann, oder zur Ansteuerung einer Diodenmatrix, die den Meßwert nach dem Graycode verschlüsselt, verwendet wird.

Das hier beschriebene Gerät verwendet ebenfalls das Impulscodeverfahren, wobei eine speziell auf den Graycode zugeschnittene, wenig aufwendige Codierschaltung benutzt wird. Die besondere Eigenschaft des Graycodes oder reflektierten Binärcodes (Tab. 1) besteht darin,

TABELLE 1

Codierung des Momentanwertes  $\xi(t)$  des Wasserstandes nach dem Graycode ( $x_n$  ist die Höhe der  $n$ -ten Stufe. Die Stufen sind von unten beginnend numeriert)

Nr.	Wasserstand	Codierung A B C D E	Nr.	Wasserstand	Codierung A B C D E
1	$\xi < x_1$	0 0 0 0 0	17	$x_{16} \leq \xi < x_{17}$	L L 0 0 0
2	$x_1 \leq \xi < x_2$	0 0 0 0 L	18	$x_{17} \leq \xi < x_{18}$	L L 0 0 L
3	$x_2 \leq \xi < x_3$	0 0 0 L L	19	$x_{18} \leq \xi < x_{19}$	L L 0 L L
4	$x_3 \leq \xi < x_4$	0 0 0 L 0	20	$x_{19} \leq \xi < x_{20}$	L L 0 L 0
5	$x_4 \leq \xi < x_5$	0 0 L L 0	21	$x_{20} \leq \xi < x_{21}$	L L L L 0
6	$x_5 \leq \xi < x_6$	0 0 L L L	22	$x_{21} \leq \xi < x_{22}$	L L L L L
7	$x_6 \leq \xi < x_7$	0 0 L 0 L	23	$x_{22} \leq \xi < x_{23}$	L L L 0 L
8	$x_7 \leq \xi < x_8$	0 0 L 0 0	24	$x_{23} \leq \xi < x_{24}$	L L L 0 0
9	$x_8 \leq \xi < x_9$	0 L L 0 0	25	$x_{24} \leq \xi < x_{25}$	L 0 L 0 0
10	$x_9 \leq \xi < x_{10}$	0 L L 0 L	26	$x_{25} \leq \xi < x_{26}$	L 0 L 0 L
11	$x_{10} \leq \xi < x_{11}$	0 L L L L	27	$x_{26} \leq \xi < x_{27}$	L 0 L L L
12	$x_{11} \leq \xi < x_{12}$	0 L L L 0	28	$x_{27} \leq \xi < x_{28}$	L 0 L L 0
13	$x_{12} \leq \xi < x_{13}$	0 L 0 L 0	29	$x_{28} \leq \xi < x_{29}$	L 0 0 L 0
14	$x_{13} \leq \xi < x_{14}$	0 L 0 L L	30	$x_{29} \leq \xi < x_{30}$	L 0 0 L L
15	$x_{14} \leq \xi < x_{15}$	0 L 0 0 L	31	$x_{30} \leq \xi < x_{31}$	L 0 0 0 L
16	$x_{15} \leq \xi < x_{16}$	0 L 0 0 0	32	$x_{31} \leq \xi$	L 0 0 0 0

daß beim Übergang von einem Wert zum Nachbarwert nur eine der binären Variablen  $A$ ,  $B$ , ... geändert wird. Dadurch ist es möglich, eine Codierschaltung für diesen Code so aufzubauen, daß jeder Schalter der Stufensonde nur *einen* der Kanäle  $A$ ,  $B$ , ... steuert. Eine derartige Schaltung zeichnet sich durch wichtige Minimaleigenschaften aus: Der Aufwand an Bauelementen und der durch Trägheit der Bauelemente bedingte Codierungsfehler sind kleiner als bei anderen Schaltungen (STRIGGOW [10]).

Abb. 3 zeigt den Logikplan der nach diesen Überlegungen entworfenen Codierschaltung, welche aus 16 Sperrgattern mit je zwei Eingängen und 3 Oder-Gattern (MILMAN [6]) besteht. Ihre Wirkungsweise soll an einigen Beispielen erläutert werden: Wenn kein Schalter der Sonde untergetaucht ist, erhalten alle Eingänge der Sperrgatter das Signal 0, so daß sie ausgangseitig das Signal 0 liefern. Die Oder-Gatter liefern unter dieser Voraussetzung ebenfalls das Signal 0. Dieser Fall wird also durch die Impulskombination  $A = 0$ ,  $B = 0$ ,  $C = 0$ ,  $D = 0$ ,  $E = 0$ , kurz 00000, dargestellt, übereinstimmend mit der Codetabelle. Wenn nur der unterste

Schalter der Sonde, S 1, eingetaucht ist, liefern nur S 1, Sperrgatter SG 1 und Oder-Gatter OG 1 ein L. Dieser Fall führt also in Übereinstimmung mit der Codetabelle auf die Impulskombination 0000L. Wenn die beiden untersten Schalter, S 1 und S 2, eingetaucht sind, liefern S 1 und S 2, SG 1 und SG 9 sowie OG 1 und OG 2 ein L. Wieder in Übereinstimmung mit der Tabelle ergibt sich 000LL. Taucht schließlich auch noch der dritte Schalter S 3 unter, so wird SG 1 gesperrt. Es ergibt sich also die in der Tabelle angegebene Impulskombination 000L0. Vom Standpunkt der Schaltlogik ist das Sperrgatter SG 16 überflüssig; vom praktischen Standpunkt kann es trotzdem nützlich sein, z. B. in Hinblick auf die Signalformung für den Kanal A.

Die Sperrgatter bestehen aus je einem Transistor, die Oder-Gatter aus Dioden. Abb. 4 zeigt die zum Kanal C gehörende Schaltung. Jeder der Transistoren leitet nur in dem Falle, daß der in seiner Emittterleitung liegende elektrolytische Schalter eingetaucht, d. h. geschlossen ist und der in seiner Basisleitung liegende Schalter nicht eingetaucht, d. h. geöffnet ist. Die Dioden sind überflüssig, wenn gewährleistet ist, daß die Spannung am Ausgang der Schaltung in jedem Falle kleiner ist als die Spannung zur Versorgung der Basis. Dann ist nämlich der p-n-Übergang zwischen Kollektor und Basis gesperrt, wodurch die Transistoren entkoppelt werden.

Für eine genauere Untersuchung der Schaltung brauchen nur die drei praktisch vorkommenden Fälle

- (1) Emittter- und Basis-Schalter nicht eingetaucht,
- (2) nur Emittter-Schalter eingetaucht, und
- (3) Emittter- und Basis-Schalter eingetaucht

betrachtet zu werden. Wenn die elektrolytischen Schalter den Durchgangswiderstand 0 und den Öffnungswiderstand  $\infty$  haben, so ist der Emittter im ersten Fall offen und im dritten Fall mit der Basis kurzgeschlossen. In beiden Fällen ist der Transistor gesperrt, und es fließen nur der kleine Kollektor-Reststrom  $I_{CBO}$  bzw. der wenig größere Kollektor-Kurzschluß-Reststrom  $I_{CBK}$  (RUSCHE u. a. [7]). Diese Restströme stellen das Zeichen 0 im Sinne der Schaltalgebra dar. Nur im zweiten Falle kann bei einem Meßimpuls ein nennenswerter Kollektorstrom,  $I_C = (1 + B) I_{CBO} + B I_B$  ( $B =$  Gleichstromverstärkung in Emittterschaltung,  $I_B =$  Basisstrom), der das Zeichen L darstellt, fließen. Tatsächlich haben

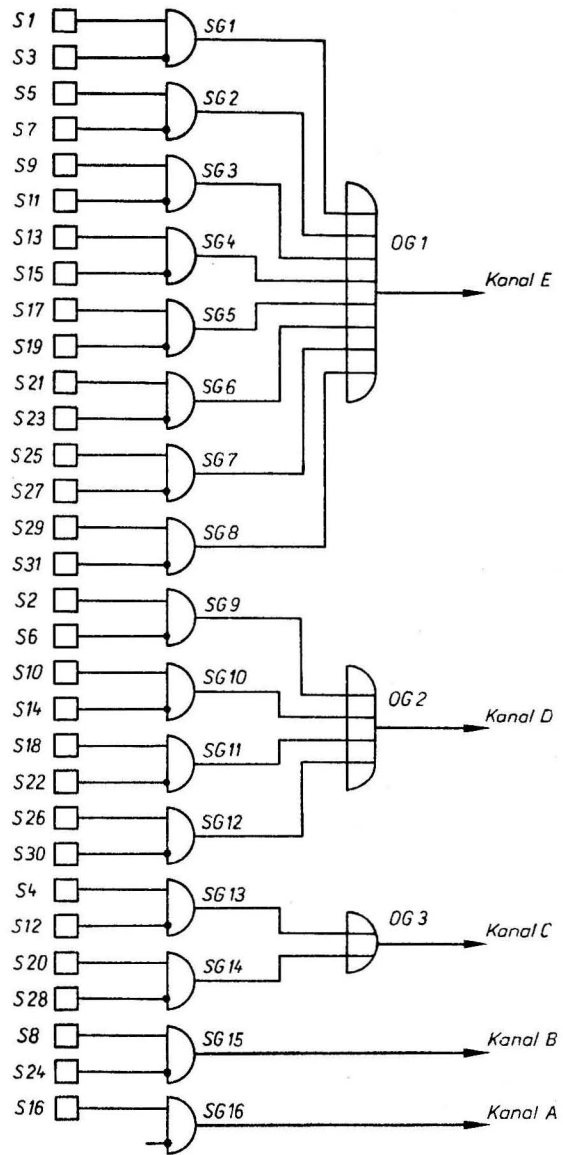


Abb. 3. Logikplan für die Codierung des Wasserstandes nach dem Graycode

S = Schalter der Stufensonde, SG = Sperrgatter, OG = Oder-Gatter. Die Schalter liefern beim Untertauchen das Signal L und sonst 0. Sie sind entsprechend ihrer Reihenfolge an der Sonde nummeriert; S 1 ist der unterste Schalter

die elektrolytischen Schalter infolge parasitärer Ströme über Wasserfilme auf den Isolatoren einen Öffnungswiderstand  $< \infty$  und wegen der endlichen Leitfähigkeit des Wassers einen Durchgangswiderstand  $> 0$ . Dadurch werden die dem Zeichen 0 zugeordneten Ströme vergrößert, während der dem Zeichen  $L$  entsprechende Strom verkleinert wird. Besonders unangenehm ist die Vergrößerung der Restströme, da grundsätzlich alle Transistoren eines Kanals gleichzeitig gesperrt sein können, wobei sich die Störungen hinter dem Oder-Gatter summieren. Diese Erscheinung erfordert bei vielstufigen Sonden besondere Vorkehrungs-

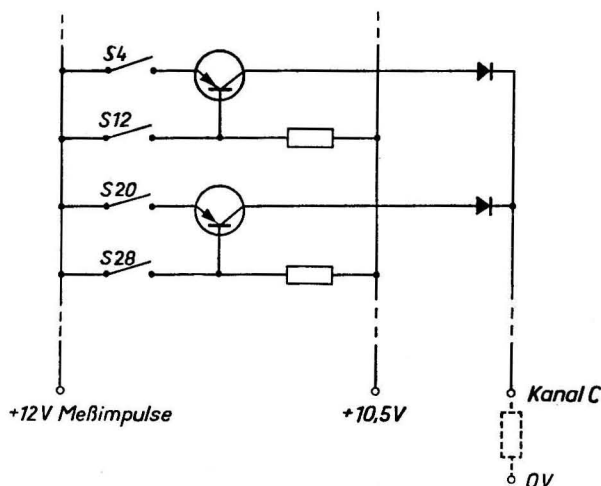


Abb. 4. Schaltbild für den Kanal C der Codierschaltung

maßnahmen, z. B. das Einfügen von Siliziumdioden in Durchlaßrichtung oder von Zenerdioden in Sperrichtung in die Emitterzuleitung.

### 3. Empfänger

Der Empfänger (Abb. 5 und 6) enthält den Impulsgeber, die Decodier- und Zählerschaltung sowie die Trockenelemente zur Stromversorgung. Seine Funktion wird mit Hilfe eines Codierlineals überprüft.

#### 3.1 Impulsgeber

Der Impulsgeber erzeugt zwei gegeneinander versetzte Impulsfolgen (Abb. 7). Die gemeinsame Periode  $T$  wird mittels eines Schmitt-Triggers als Halbwertzeit einer Kondensatorentladung ermittelt und kann im Bereich  $0,1 \dots 6$  s kontinuierlich verändert werden. Die Impulse der einen Folge sind etwa 10 ms lang und dienen zur Messung des Wasserstandes sowie zur Speicherung des Meßwertes (Meßimpulse), während die der anderen etwa 40 ms dauern und zur Betätigung der Zählwerke verwendet werden (Zählimpulse). Nach dem Einschalten des Impulsgebers wird als erstes ein Meßimpuls abgegeben. Alle Impulse haben eine Höhe von 12 V.

Der Impulsgeber ist mit gepolten Relais bestückt, die durch Transistoren gesteuert werden.

#### 3.2 Decodierschaltung mit Zählwerken zur Datenreduzierung

Der nach dem Graycode verschlüsselte Momentanwert des Wasserstandes wird im Empfänger zur Impulsrestaurierung auf fünf SCHMITT-Trigger gegeben, von denen jeder ein gepoltes Relais mit zwei Umschaltekontakten, die nach dem Aufhören des Erregerstromes in ihrer

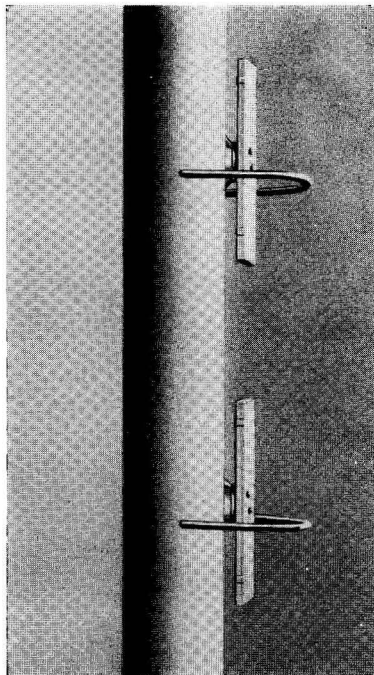


Abb. 2. Elektroden der Stufensonde

Die Zinkblechelektroden sind zu zweit auf einen Piacryl-Isolator mit eingeklebten elektrischen Zuführungen befestigt. Als gemeinsame Gegenelektrode dient das verzinkte Trägerrohr.

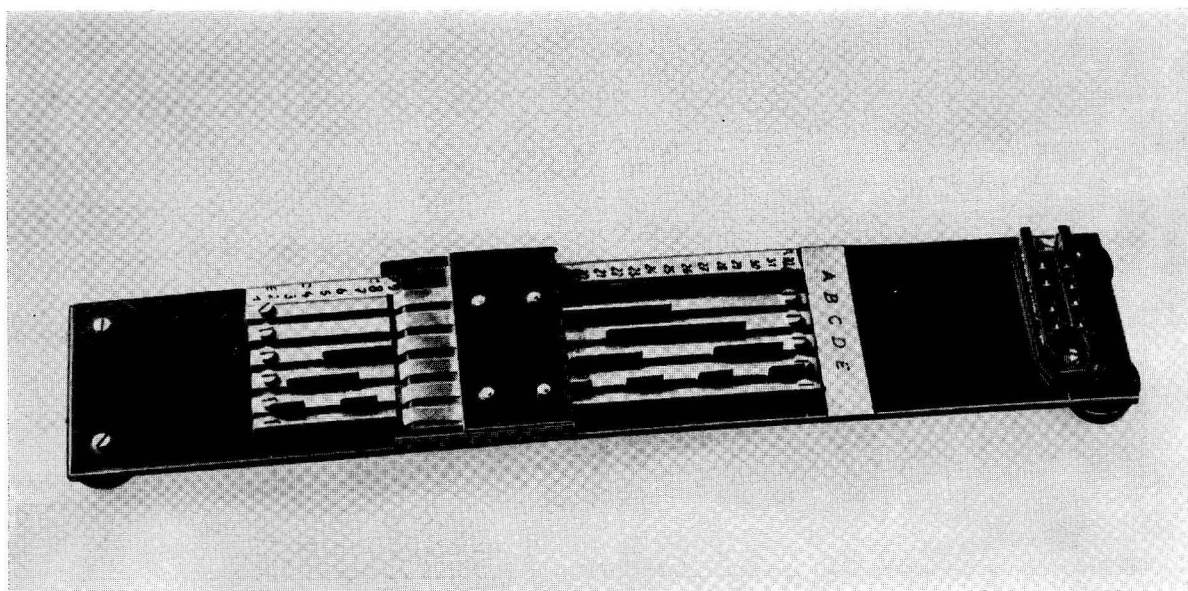


Abb. 9. Codierlineal zur Kontrolle des Empfängers



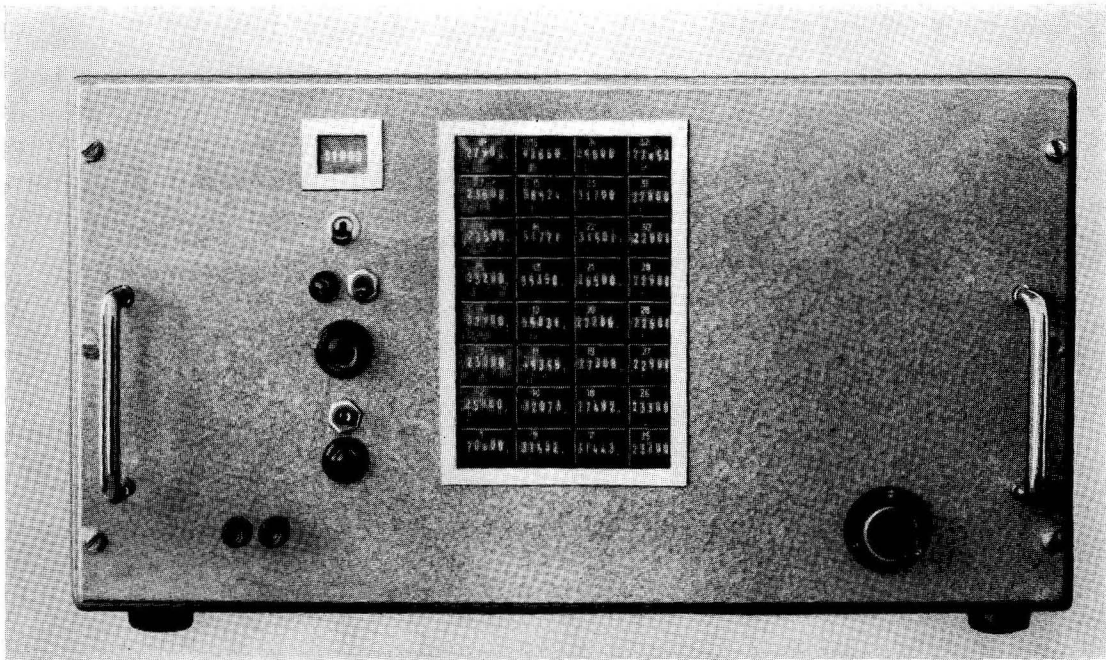


Abb. 5. Empfänger

Links: Bedienungselemente und Zählwerk für die Anzahl der gesammelten Momentanwerte.  
 Mitte: Zählwerke für die absoluten Klassenhäufigkeiten der Momentanwerte. Rechts: Anschluß für das  
 7adrige Kabel

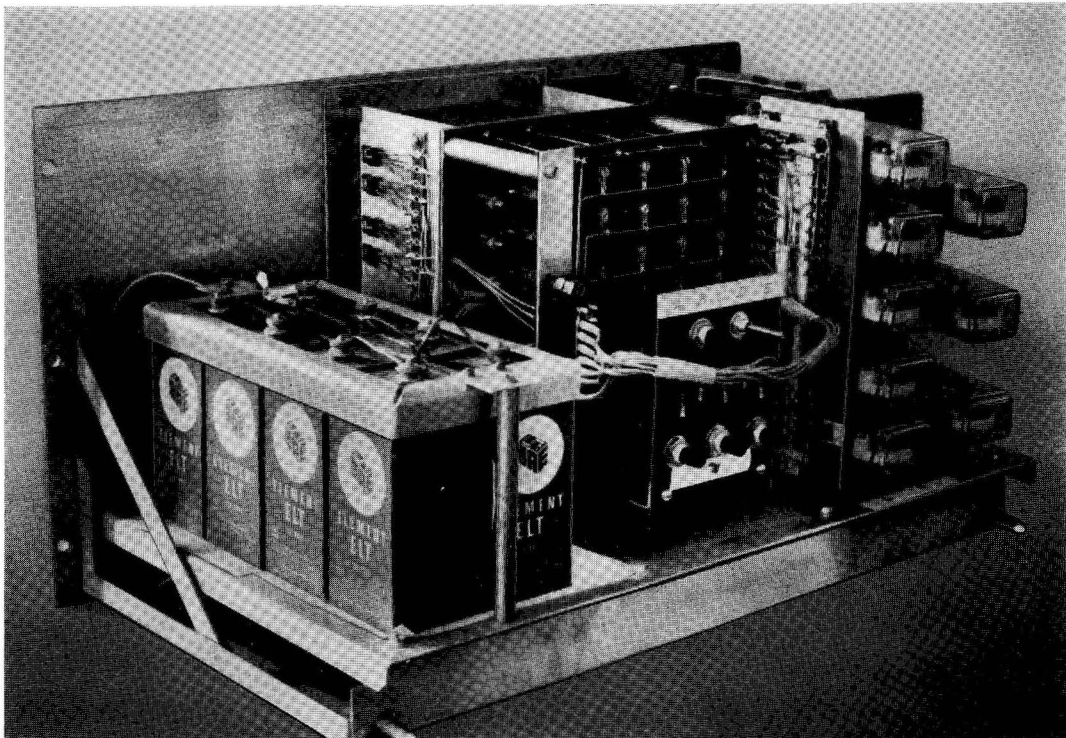


Abb. 6. Empfänger (geöffnet)

Rechts: Impulsgeber. Mitte: Decodierschaltung und Zählwerke für die absoluten Klassenhäufigkeiten. Links: Trockenelemente

Lage verbleiben<sup>1)</sup>, steuert. Der Meßwert (in der verschlüsselten Form) wird also bis zum nächsten Meßimpuls gespeichert.

Die Entschlüsselung des Meßwertes wird wegen der zeitlichen Versetzung der Meß- und Zählimpulse in der auf den Meßimpuls folgenden Pause vorgenommen. Die fünf Relais werden dadurch *lastlos* umgeschaltet — eine Maßnahme, die sich in der Rechenmaschinentechnik zur Erhöhung der Lebensdauer der Kontakte bewährt hat (KÄMMERER [4]).

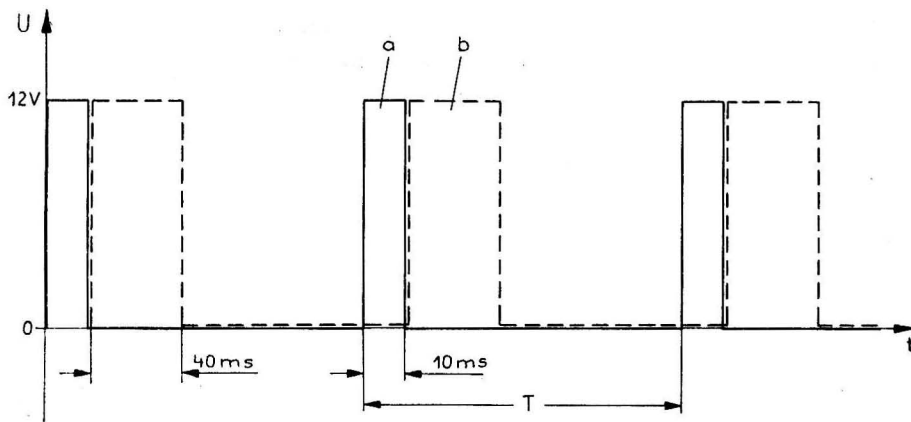
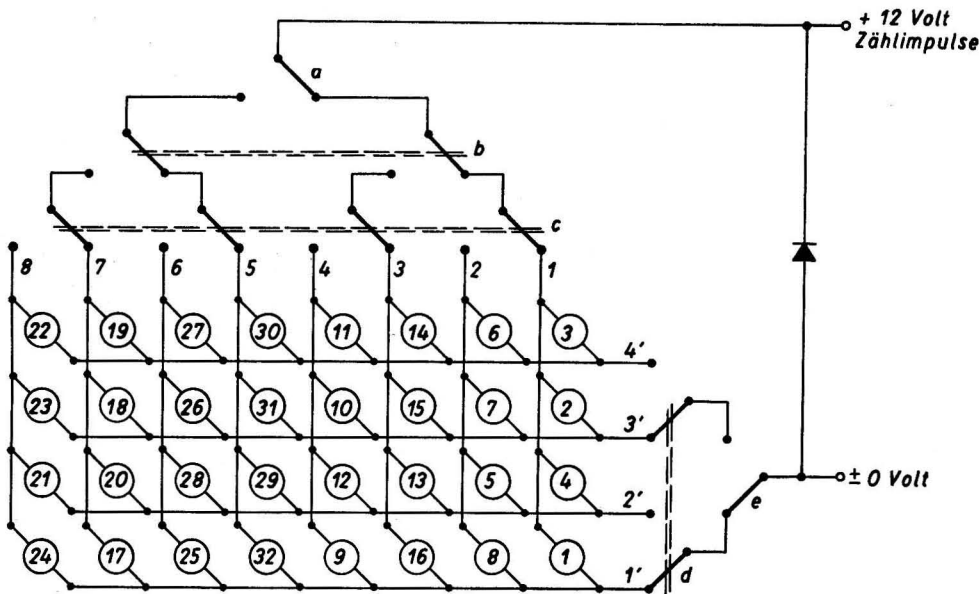


Abb. 7. Meßimpulse (a) und Zählimpulse (b)

Die Impulsperiode  $T$  kann kontinuierlich im Bereich 0,1–6 s variiert werden

Zur Decodierung dienen die bekannten Kontaktpyramiden, von denen zwecks Einsparung von Umschaltekontakten zwei verwendet werden (Abb. 8). Da das Relais  $C$  nicht die erforderlichen vier Umschaltekontakte besitzt, wurde eine Kontaktvervielfachung mit Transistoren



**Zeichenerklärung:**



Abb. 8. Decodierschaltung mit Zählwerken (schematisch)

Die Numerierung der Zählwerke entspricht dem Code von Tabelle I

<sup>1)</sup> Gepoltes Relais A 6 nach TGL 6625.

vorgenommen. Die gezeichnete Stellung der Umschaltkontakte entspricht der Impulskombination 00000. Hierbei werden nur die Leitungen 1 und 1' mit dem Impulsgeber und der Rückleitung verbunden, so daß Zählwerk 1 anspricht. Schaltet beispielsweise Relais E entsprechend der Impulskombination 0000L um, so zählt das zwischen den Leitungen 1 und 3' liegende Zählwerk 2.

Jeder Zählimpuls wird also in Abhängigkeit vom Meßwert genau einem von 32 Zählwerken (in der Mitte von Abb. 5) zugeführt, und zwar entspricht das Zählwerk mit der Nummer  $n$  dann an, wenn bei dem vorangegangenen Meßimpuls  $n-1$  Elektroden der Stufensonde untergetaucht waren. Außerdem wird jeder Zählimpuls noch auf ein weiteres Zählwerk (links oben in Abb. 5) gegeben, das die Anzahl der gesammelten Momentanwerte anzeigt.

Nach dem Abschalten des Gerätes zeigt das Zählwerk mit der Nummer  $n$  an, wieviele der gesammelten Momentanwerte  $\xi(t)$  im Bereich

$$x_{n-1} \leq \xi < x_n$$

lagen. Man kann diese Zahl als absolute Klassenhäufigkeit bezeichnen.

### 3.3 Stromversorgung

Zum Messen und Zählen wird eine Gleichspannung von 12 V benötigt, welche aus 8 Kohle-Zink-Elementen entnommen wird. Das Meßgerät ist dadurch unabhängig vom Netz und absolut ungefährlich für den Menschen. Der Impulsbetrieb mit einem Tastverhältnis von etwa 0,1 wirkt sich günstig auf die Lebensdauer der Trockenelemente aus.

### 3.4 Funktionskontrolle

Zur Kontrolle der Funktion des Empfängers wird an Stelle des Meßfühlers ein Codierlineal (Abb. 9) angeschlossen. Dieses besteht aus einem Schleifkontakt und fünf entsprechend dem Graycode ausgefeilten Messingschienen  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  und  $E$ , welche in Abhängigkeit von der Schleiferstellung an Spannung liegen oder nicht.

## 4. Auswertung

Die Bestimmung der ersten Verteilungsfunktion, des Mittelwertes und der Standardabweichung soll an Hand des Beispiels der Messung Nr. 226, bei welcher 4000 Momentanwerte gesammelt wurden, erläutert werden. Tabelle 2 gibt einen Auszug aus dem Meßprotokoll,

TABELLE 2  
Auszug aus dem Meßprotokoll

Zählwerk Nr.	Messung Nr. 225				Messung Nr. 226			
	Stand	$\Delta$	$\Sigma$	$\Sigma\%$	Stand	$\Delta$	$\Sigma$	$\Sigma\%$
11	37200				37200	0	0	0,00
12	52926				52928	2	2	0,05
13	82800				83092	292	294	7,20
14	43425				44857	1432	1726	43,15
15	33394				35125	1731	3457	86,42
16	37976				38483	507	3964	99,10
17	28252				28285	33	3997	99,92
18	25622				25625	3	4000	100,00
19	26602				26602	0	4000	100,00

dessen Spalten „Stand“ die Zählerstände *nach* der Messung enthalten. Folgende Arbeitsgänge sind erforderlich:

1. Ermittlung der absoluten Klassenhäufigkeiten (Spalte „ $\Delta$ “) durch Differenzbildung der Zählerstände der vorliegenden und der vorausgegangenen Messung.
2. Ermittlung der absoluten Summenhäufigkeiten (Spalte „ $\Sigma$ “) durch Aufsummierung der Spalte  $\Delta$ .
3. Ermittlung der relativen Summenhäufigkeiten (Spalte „ $\Sigma\%$ “) durch Division der Spalte  $\Sigma$  durch die Gesamtzahl der Momentanwerte.  
Die relativen Summenhäufigkeiten sind näherungsweise gleich der ersten Verteilungsfunktion; die Abweichungen sind um so kleiner, je größer die Anzahl der Momentanwerte ist.
4. Eintragung der relativen Summenhäufigkeiten in ein Wahrscheinlichkeitsnetz<sup>1)</sup> und Verbindung der Meßpunkte durch eine Kurve (siehe Abb. 10, links außen).  
Die Abszissenachse des Wahrscheinlichkeitsnetzes ist gleichmäßig und die Ordinatenachse ist nach dem Gaußschen Integral geteilt. Eine Normalverteilung führt deshalb auf eine Gerade.
5. Ablesung der Abszissen der Schnittpunkte der Verteilungskurve mit den Linien 15,87%, 50% und 84,13% sowie Halbierung der Differenz zwischen dem ersten und dem letzten Wert. Bei der Normalverteilung liegen nämlich die Schnittpunkte mit den genannten Linien bei  $m - \sigma$ ,  $m$  und  $m + \sigma$ .

Für das Beispiel findet man die Abszissen

$$13,35 \text{ dm}, \quad 14,1 \text{ dm} \quad \text{und} \quad 14,95 \text{ dm},$$

woraus sich die folgenden Parameter ergeben:

$$m = 14,1 \text{ dm}, \quad \sigma = 0,8 \text{ dm}.$$

Zu diesem Verfahren sind einige Bemerkungen erforderlich:

a) Wesentliche Vereinfachungen lassen sich noch erzielen, wenn

1. Zählwerke mit Nullrückstellung verwendet werden, wodurch die Differenzbildung entfällt,
2. die Zählhaltung so abgeändert wird, daß die Zählwerke nicht die Klassenhäufigkeiten, sondern direkt die Summenhäufigkeiten zählen, und
3. 1000 oder 10000 Momentanwerte für die Messung gesammelt werden, wodurch die Division auf eine Kommaverschiebung beschränkt wird.

Geeignete Zählwerke mit Nullrückstellung waren zur Zeit des Baus des Gerätes nicht greifbar. Bei der Weiterentwicklung sollen jedoch die unter Punkt 1 und 2 genannten Möglichkeiten ausgenutzt werden. Von der dritten Möglichkeit wurde bereits Gebrauch gemacht. Hierbei zeigte sich, daß im allgemeinen schon mit 1000 Momentanwerten eine glatte Verteilungskurve gezeichnet werden kann.

b) Bei Kurven, die im Gegensatz zu dem Beispiel Nr. 226 merklich von der Geraden abweichen, liefert das Verfahren nur Näherungswerte für  $m$  und  $\sigma$ . Es behält aber trotzdem seine Berechtigung, da Präzisionsangaben ohnehin wegen der Breite der verwendeten Elektroden — 5 mm — nicht möglich sind.

c) Sofern die Interpolation der Verteilungsfunktion möglich ist, d. h., wenn mindestens zwei Meßpunkte in das Wahrscheinlichkeitsnetz eingetragen werden können, lassen sich  $m$  und  $\sigma$  mit einer Unsicherheit bestimmen, die etwa eine Größenordnung kleiner ist als der Stufenabstand.

<sup>1)</sup> Wahrscheinlichkeitsnetze können unter der Bestell-Nr. 500 von der Firma Schäfers Feinpapier, Plauen (Vogtl.), bezogen werden.

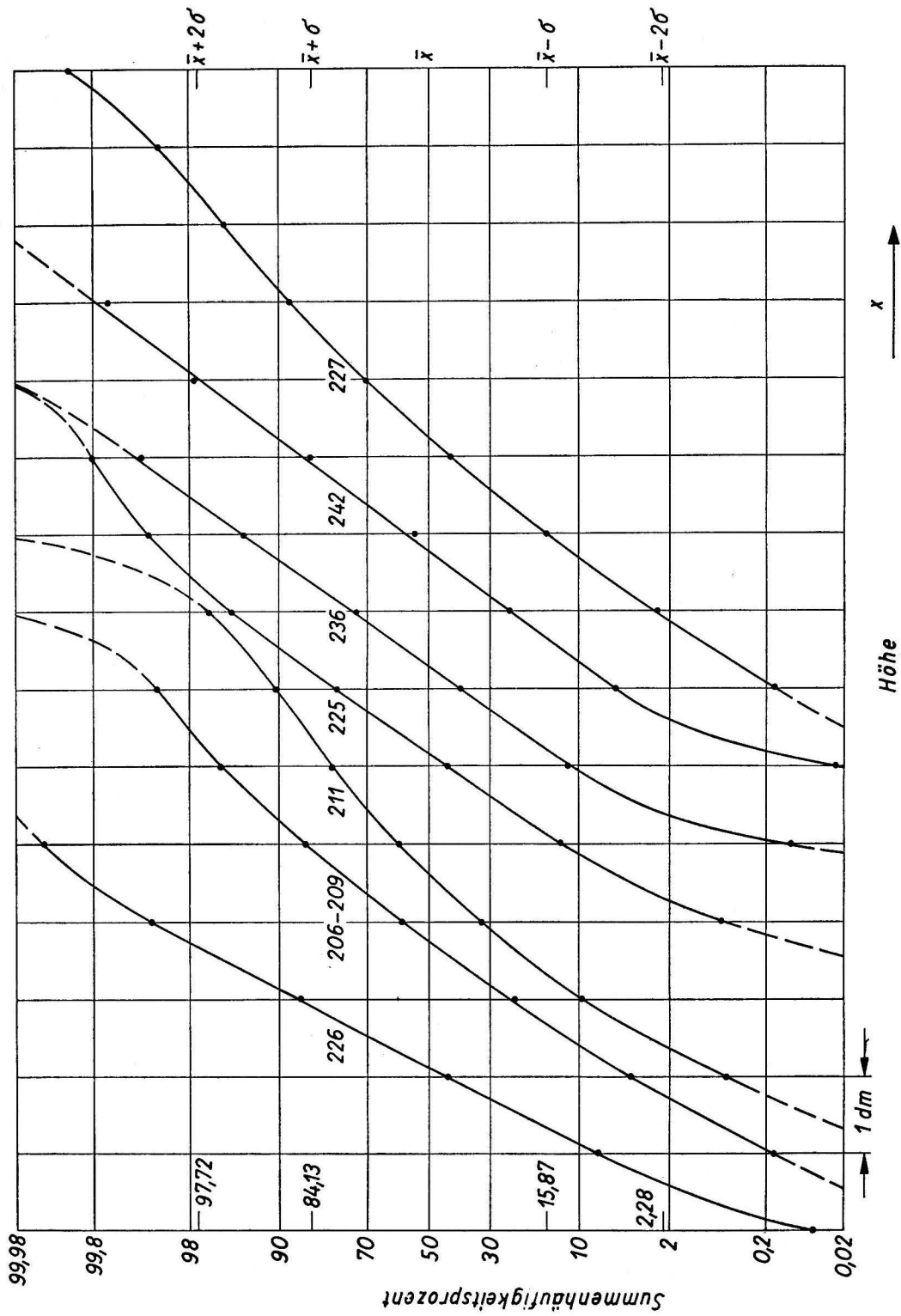


Abb. 10. Typische Beispiele für die 1. Verteilungsfunktion  $F(x) = P\{\xi(t) < x\}$  des Seegangs



- d) Da die erste Verteilungsfunktion näherungsweise normal, also bei der Darstellung im Wahrscheinlichkeitsnetz näherungsweise gerade ist, werden Fehlmessungen in vielen Fällen erkannt.

### 5. Ergebnisse der ersten Messungen

Nach der Erprobung im Oktober 1963 kam das beschriebene Gerät im Jahre 1964 zum Einsatz. Die dabei gewonnenen Meßwerte bestätigen zunächst die bekannte Tatsache, daß die 1. Verteilungsfunktion des Seegangs näherungsweise normal ist. Diese Eigenschaft tritt bei der graphischen Darstellung der empirischen Verteilungsfunktionen im Wahrscheinlichkeitsnetz (Abb. 10) deutlich zu Tage, da hierbei Normalverteilungen durch Geraden dargestellt werden. Beispiele für eine praktisch vollkommene Annäherung an die GAUSS-Verteilung fast innerhalb des gesamten Intervalls  $m \pm 2\sigma$  sind die Kurven 225, 226, 236 und 242.

Die Meßwerte zeigen ferner, daß die mehr oder minder ausgeprägten Abweichungen der empirischen Verteilungsfunktionen von der GAUSSschen darin bestehen, daß die Kurven bei der Darstellung im Wahrscheinlichkeitsnetz erstens in einer breiten Umgebung des Zentralwertes nach rechts gekrümmt sind (Messung Nr. 206–209, 211 und 227) und zweitens am rechten Ende nach oben umgebogen sind (Nr. 206–209, 211 und 225).

Die Krümmung macht die 1. Verteilungsfunktion bezüglich des Zentralwertes asymmetrisch oder „schief“. Bei den gekrümmten Verteilungskurven ist die Wahrscheinlichkeit  $P\{\xi(t) > m + a\}$  dafür, daß der Wasserspiegel  $\xi(t)$  um mehr als  $a$  ( $a > 0$ ) über dem Zentralwert  $m$  liegt, kleiner als die Wahrscheinlichkeit  $P\{\xi(t) < m - a\}$  dafür, daß  $\xi(t)$  um mehr als  $a$  unter  $m$  liegt. Der Mittelwert  $\bar{x}$  fällt nicht mehr mit dem Zentralwert zusammen, sondern ist größer. Aus  $\bar{x} > m$  folgt sofort  $P\{\xi(t) > \bar{x}\} < 0,5$  und  $P\{\xi(t) < \bar{x}\} > 0,5$ . Die beiden letzten Ungleichungen besagen, daß positive Abweichungen des Wasserspiegels vom Mittelwert seltener auftreten als negative, woraus wiederum folgt, daß sie im Mittel betragsmäßig größer sind als die negativen. Eine derartige Asymmetrie des Seegangs ist schon lange bekannt. Die beobachtete

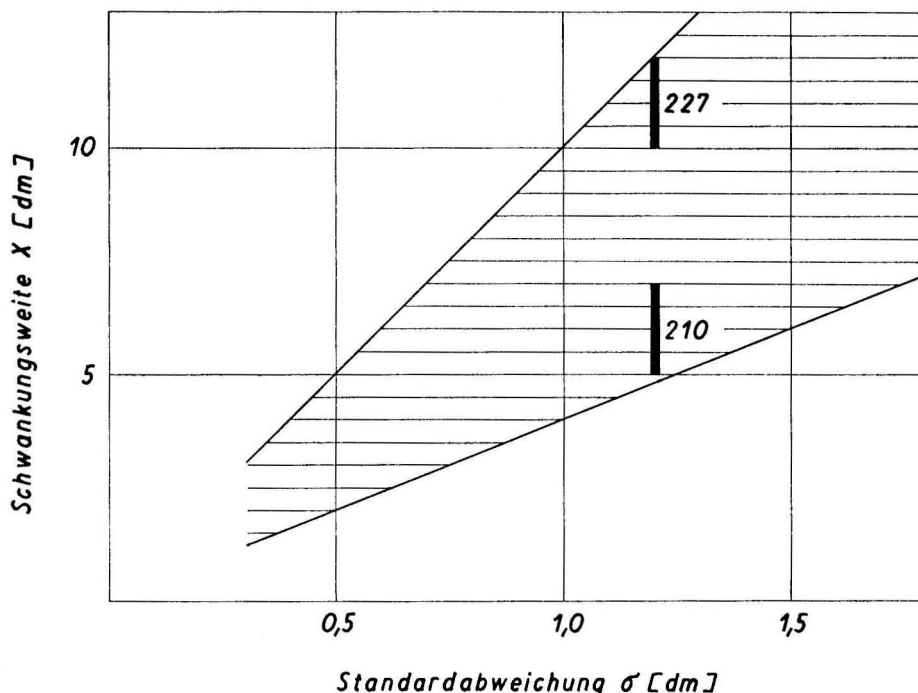


Abb. 11. Zusammenhang zwischen Standardabweichung  $\sigma$  und Schwankungsbreite  $X$  bei den Wellenmessungen 1964

*Krümmung der 1. Verteilungsfunktion darf daher keineswegs überraschen, sondern hätte von vornherein erwartet werden müssen!*

*Das Umbiegen der 1. Verteilungsfunktion kann durch die Annahme gedeutet werden, daß sehr große positive Abweichungen vom Mittelwert grundsätzlich nicht vorkommen. Wenn man ferner annimmt, daß die Verteilungskurven auch auf der linken Seite „abgeschnitten“ sind — was bei den bisherigen Darstellungen noch nicht sehr deutlich wird —, dann muß der Seegang als ein beschränkter stochastischer Prozeß angesehen werden:*

$$X_1 \leq \xi(t) \leq X_2 .$$

Die Abhängigkeit der Schwankungsweite

$$X \equiv X_2 - X_1 ,$$

die auf Grund des Stufenabstandes von 1 dm nur bis auf  $\pm 1$  dm genau ermittelt werden kann, von der Standardabweichung  $\sigma$  ist in Abb. 11 dargestellt. Es zeigt sich, wie z. B. bei den Messungen 210 und 227, daß zu einem  $\sigma$  verschiedene Werte von  $X$  auftreten können, deren Unterschiede durch die Meßungenauigkeit allein nicht erklärt werden können. *Nach den bisherigen Meßwerten besteht daher zwischen Schwankungsweite und Standardabweichung nur ein stochastischer Zusammenhang, der durch die Gleichung*

$$X = k \sigma$$

*mit dem zufälligen Proportionalitätsfaktor  $k$  aus dem Intervall 4—10 beschrieben werden kann.*

#### Literatur

- [1] GERHARDT, J. R., JEHN, K. H. and KATZ, J., A Comparison of Step-, Pressure-, and Continuous-Wire-Gage Wave Recordings in the Golden Gate Channel. Trans. Amer. Geophys. Un. **36** (1955) S. 235—250.
- [2] JAGLOM, A. A., Einführung in die Theorie stationärer Zufallsfunktionen. Akademie-Verlag, Berlin 1959.
- [3] JAHN, S., Vorrichtung zur elektrischen Wasserstandsfernanzeige, insbesondere zur Tiefgangsmessung für Schiffe. DB-Patent Nr. 943 695.
- [4] KÄMMERER, W., Ziffernrechenautomaten. Akademie-Verlag, Berlin 1963.
- [5] LUCAS, C., Anordnung zur Standanzeige, vorzugsweise Fernanzeige. DB-Patent Nr. 957 193.
- [6] MILMAN, J., und TAUB, H., Impuls- und Digitalschaltungen. Verlag Berliner Union, Stuttgart, VEB Verlag Technik, Berlin, 1964.
- [7] RUSCHE, G., WAGNER, K. und WEITSCH, F., Flächentransistoren. Springer-Verlag Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1961.
- [8] RUSSEL, T. L., A Step-Type Recording Wave Gage. Ocean Wave Spectra. Proceedings of a Conference, Easton, Maryland, May 1—4, 1961, S. 251—257. Prentice Hall 1963.
- [9] VERHAGEN, C. M., Improvements in the Electric Step Gauge for Measuring Wave Heights. Proc. of Conf. on Coastal Engineering **6** (1958) S. 225—230.
- [10] STRIGGOW, K., Verfahren zur Messung und Codierung der Standhöhe einer Flüssigkeit und zur Auswertung der Meßergebnisse bei zeitlich veränderlicher Standhöhe. DDR-Wirtschaftspatent Nr. 50 009.

# Strömungsmessung in der Brandungszone

## Aufgabenstellung und Voruntersuchungen zur Lösung eines meßtechnischen Problems der Küstenforschung

VON KLAUS STRIGGOW

*Zusammenfassung:* Die Forderungen an ein Strömungsmeßgerät für den Einsatz in der Brandungszone werden zusammengestellt. Die konventionellen Strömungsmeßmethoden der Meereskunde genügen diesen Forderungen nicht. Sehr vorteilhafte Eigenschaften bieten dagegen die akustischen Verfahren; von diesen werden das Laufstreckenverfahren mit Frequenzmessung und das Dopplereffektverfahren in die engere Auswahl gezogen. Abschließend wird die Konzeption eines verbesserten Dopplereffektverfahrens angegeben.

### 1. Einleitung

Die in der Meereskunde gebräuchlichen Strömungsmesser sind für die Zwecke der Küstenforschung wegen der Forderungen an die physikalische Leistungsfähigkeit und an den mechanischen Aufbau, welche aus den extremen Bedingungen der Brandungszone insbesondere hinsichtlich des Bereiches und der zeitlichen Änderung der Geschwindigkeit sowie der Verschmutzung des Wassers resultieren, unzulänglich. Die Tatsache, daß es nicht möglich erscheint, alle ihre Mängel durch konstruktive Änderungen zu beseitigen, gibt Anlaß zu grundsätzlichen Überlegungen für die Entwicklung eines Strömungsmessers für die Küstenforschung.

Ein solches Gerät sollte — wie jedes andere in der Brandungszone für Routinemessungen einzusetzende Gerät — die Meßwerte zu einer Land(oder auch Schiffs-)station *fernübertragen*. Denn ein direktes Meßverfahren, sei es anzeigend oder registrierend, scheidet aus, weil das Ablesen nur bei besonders günstigen Seegangsverhältnissen möglich ist bzw. weil die Meßwerte nicht sofort zur Auswertung bereit stehen und Funktionsstörungen im Gerät oft erst nach längerer Zeit bemerkt werden. Außerdem bringt die räumliche Trennung von Meßwert-erfassung und -anzeige bzw. -registrierung den Vorteil, daß der materielle Schaden beim Verlust oder bei Zerstörung des Gerätes durch Seegang, Treibgut oder andere Umstände auf das Mindestmaß beschränkt wird.

Von den drei bei der Entwicklung eines Fernmeßverfahrens anfallenden Problemkreisen: *Meßwertgewinnung*, *Meßwertübertragung* und *Meßwertdarstellung*, d. h. -anzeige und -registrierung, wird im folgenden nur der durch die Belange der Küstenforschung am stärksten beeinflusste Komplex der Meßwertgewinnung behandelt.

### 2. Forderungen an den Meßfühler eines Strömungsmessers für die Brandungszone

Der Meßfühler eines Strömungsmessers für die Brandungszone muß einer Reihe Forderungen genügen, die hier kurz zusammengestellt werden sollen.

Zunächst ergeben sich aus der Tatsache, daß die zu messende Geschwindigkeit im wesentlichen eine Überlagerung der durch Oberflächenwellen bedingten Oszillation — die in grober Näherung in einer vertikalen, zum Ufer schiefwinkligen Ebene erfolgt — und der näherungsweise stationären und uferparallelen Küstenströmung ist, folgende Bedingungen:

1. Messung aller *drei* Komponenten des Geschwindigkeitsvektors,
2. geringe Einstellträgheit ( $< 0,1$  s),
3. großer Meßbereich (etwa 1,5 cm/s bis 15 m/s).

Ferner folgt aus der schon eingangs erwähnten Überlegung:

4. Eignung für die Fernübertragung der Meßwerte,
5. robuster Aufbau,
6. niedriger Preis.

Außerdem bestehen noch folgende Forderungen:

7. Unempfindlichkeit gegen Verschmutzung des Wassers durch Schwebstoffe, Seegrass und ähnliches,
8. Beständigkeit gegen Seewasser,
9. Konstanz der Parameter, z. B. Konstanz der Eichkurve,
10. Wartungsarmut,
11. kleine Abmessungen, um die Störung der Strömung klein zu halten,
12. geringes Gewicht, um die Montage durch Taucher einfach zu halten.

### 3. Konventionelle Strömungsmeßverfahren und ihre Mängel für den Einsatz in der Brandungszone

Die konventionellen Strömungsmeßverfahren [2, 6] werden hier nach ihrer grundsätzlichen physikalischen Wirkungsweise in *kinematische*, *dynamische*, *thermische* und *elektrische* Verfahren unterteilt. In diesem Sinne wird beispielsweise das bekannte Hitzdrahtverfahren als thermisches Verfahren bezeichnet, während die Strömungsmessung mittels eines wechselstrombeheizten Drahtes und eines stromabwärts angeordneten Widerstandsthermometers den kinematischen Verfahren untergeordnet wird, da im letzten Falle die Geschwindigkeit aus der Laufzeit des durch den Hitzdraht erwärmten Mediums ermittelt wird.

Bei der Beurteilung der Brauchbarkeit der einzelnen Verfahren werden — soweit möglich — die Erfahrungen der allgemeinen Meereskunde (3, 5, 9] besondere Berücksichtigung finden.

#### 3.1 Kinematische Verfahren

Die kinematischen Verfahren führen die Geschwindigkeitsmessung auf eine Weg- und Zeitmessung zurück. Nach der Terminologie von THORADE [20] könnte man sie auch als *Driftverfahren* bezeichnen, im Gegensatz zu den *Stromverfahren*, welche auf der dynamischen, thermischen oder elektrischen Wirkung der Strömung auf ortsfeste Geräte, wie z. B. Flügelrad mit Stromfahne oder Hitzdraht, beruhen.

Für die Markierung der Bahnkurve kommen in Frage:

- a) natürliche Inhomogenitäten, z. B. Luftbläschen oder Schwebstoffe,
- b) Probekörper, z. B. Flaschen oder Al-Filter,
- c) Farbstoffe, z. B. Uranin oder elektrolytisch ausgeschiedenes Tellur
- d) radioaktive Isotope
- e) Ionen
- f) (künstliche) lokale Temperaturerhöhungen.

Wenn man den Begriff „Tracer“ verallgemeinert und beispielsweise auch die lokale Temperaturerhöhung als Tracer bezeichnet, so darf man die kinematischen Verfahren auch Tracer-Verfahren nennen. Ihre prinzipiellen Mängel sind in der Tab. 1 zusammengestellt.

In der Meereskunde werden Probekörper und Farbstoffe als Tracer verwendet. Für eine automatische Strömungsmessung kommen die Tracer-Verfahren jedoch nicht in Frage; der Hauptgrund ist die Schwierigkeit der apparativen Verfolgung der Tracer.

TABELLE 1

Prinzipielle Mängel der kinematischen Strömungsmessung bei Verwendung verschiedener Tracer

Tracer	(a) natürliche Inhomogenitäten	(b) Probekörper	(c) Farbstoffe	(d) radioaktive Isotope	(e) Ionen	(f) lokale Temperatur- erhöhungen
Mängel	Möglichkeit der Fehlmessung durch Eigenbewegung der Tracer					
	Schwierigkeit der automatischen Verfolgung der Tracer bei unbekannter oder veränderlicher Strömungsrichtung					
	Dispersion des Tracers					
	Materialverbrauch					
	Versagen des Verfahrens beim Fehlen geeigneter Inhomogenitäten					

### 3.2 Dynamische Verfahren

Die dynamischen Verfahren führen die Geschwindigkeitsmessung auf eine Kraft- oder Druckmessung mittels einer ortsfesten Sonde zurück.

Der *Betrag* des Geschwindigkeitsvektors wird mittels

- a) Flügelrad
- b) Schaufelrad (insbesondere Schalenkreuz)
- c) Widerstandskörper oder
- d) Staurohr

gemessen. Die prinzipiellen Mängel dieser Meßfühler sind in der Tab. 2 zusammengestellt.

TABELLE 2

Prinzipielle Mängel der dynamischen Strömungsmessung bei Verwendung verschiedener Meßfühler

Meßfühler	(a) Flügelrad	(b) Schaufelrad	(c) Widerstandskörper	(d) Staurohr
Mängel	Notwendigkeit der Ausrichtung in die Strömungsrichtung, da bei schräger Anströmung eine schwer erfaßbare Verfälschung eintritt			
			Quadratischer Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Meßeffect	
	Lagerreibung und Verschmutzungsempfindlichkeit			
	Theoretisch schwer überschaubares Verhalten bei instationärer Strömung			

Die *Richtung* des Geschwindigkeitsvektors wird üblicherweise durch eine Stromfahne ermittelt. Ungebräuchlich ist das theoretisch mögliche Verfahren, die Strömungsrichtung und evtl. auch den Betrag der Geschwindigkeit mit Hilfe von drei *fest ausgerichteten* Meßfühlern



wie Flügelrädern, Schaufelrädern, Widerstandskörpern und Staurohren zu bestimmen, wenn deren Eichkurven

$$\text{Meßeffect} = f(\text{Geschwindigkeitsbetrag, Anströmwinkel})$$

bekannt sind.

In der Meereskunde werden von den genannten Meßfühlern vorwiegend Flügel- und Schaufelrad in Verbindung mit einer Stromfahne eingesetzt. Rotoren sind überhaupt die am häufigsten verwendeten Geschwindigkeitsfühler. Das Staurohr ist ohne Bedeutung geblieben. Widerstandskörper werden gelegentlich in der Küstenforschung verwendet. Für die Brandungszone scheiden jedoch alle Verfahren aus — die Rotorgeräte wegen der durch die beweglichen Teile bedingten Verschmutzungsempfindlichkeit und die Staudruckgeräte wegen des quadratischen Meßeffectes. Hinzu kommt bei allen Geräten das ungeklärte Verhalten bei schräger Anströmung.

### 3.3 Thermische Verfahren

Die thermischen Verfahren der Geschwindigkeitsmessung nützen die Abhängigkeit des Wärmeüberganges zwischen dem strömenden Medium und einer ortsfesten Sonde von der Geschwindigkeit aus. Als Meßfühler werden elektrisch beheizte Drähte (Hitzdrähte) oder andere temperaturabhängige Widerstände (z. B. Thermistoren) verwendet.

Nachteile dieser Verfahren sind:

1. Die Meßfühler müssen zur Strömung ausgerichtet werden.
2. Der Einfluß von Temperaturschwankungen muß kompensiert werden.
3. Die Bestimmung der Strömungsrichtung ist umständlich.
4. Die Eichkurve ist nicht konstant infolge der Bildung von Schmutzfilmen auf der Oberfläche.

In der allgemeinen Meereskunde haben sich die thermischen Verfahren für Dauermessungen als ungeeignet erwiesen, da die Eichkurve infolge der Bildung von Schmutzfilmen auf der Oberfläche nicht konstant ist. Speziell für die Küstenforschung kommt noch hinzu, daß die Forderungen nach Robustheit und geringer Ansprechträgheit unverträglich sind und die Abhängigkeit des Meßeffectes vom Anströmwinkel ungeklärt ist.

### 3.4 Elektrische Verfahren

Der Zusammenhang zwischen Strömungsgeschwindigkeit und elektrischen Erscheinungen wie

- a) Townsend-Entladung zwischen zwei Elektroden in einem nichtleitenden Gas oder
  - b) Induktion einer Spannung in einer im Magnetfeld strömenden Flüssigkeit
- kann ebenfalls zur Geschwindigkeitsmessung herangezogen werden. In der Meereskunde kann von diesen Verfahren naturgemäß nur das auf dem Induktionsgesetz beruhende angewandt werden, wobei teils mit einem künstlichen Magnetfeld, teils mit dem Erdfeld gearbeitet wird („elektromagnetisches“ und „geomagnetisches“ Verfahren). Problematisch wird dieses Verfahren durch den unbekanntesten Anteil des durch den Meeresboden fließenden induzierten Stromes und durch Polarisationsspannungen an den Elektroden. Bei Ausnutzung des Erdfeldes können auch dessen Schwankungen noch zu Fehlmessungen führen.

## 4. Akustische Strömungsmeßverfahren

Die Unbrauchbarkeit der konventionellen Strömungsmeßmethoden für die Brandungszone macht es erforderlich, nach besseren Verfahren zu suchen. Eine erfolgversprechende Möglichkeit stellt die Strömungsmessung mit Hilfe von Schall, insbesondere von Ultraschall, dar, die

vom theoretischen Standpunkt hervorragende Eigenschaften hat, sich praktisch bereits in zahlreichen Labor- und Industriemeßgeräten bewährt hat und auch schon versuchsweise Eingang in die Meereskunde [4, 17] gefunden hat.

### 4.1 Theorie

Die gegenwärtig bekannten akustischen Strömungsmeßverfahren beruhen auf zwei Prinzipien, nämlich auf der *Verdriftung von Schallwellen* im strömenden Medium und auf dem *DOPPLER-Effekt bei Reflexion von Ultraschall* an frei drittenden Reflektoren. Die Verdriftung des Schalles wird dabei entweder durch die Veränderung der Schalllaufzeit für eine Strecke bekannter Länge oder durch die Ablenkung eines scharf gebündelten Ultraschallstrahles nachgewiesen. Im folgenden werden das *Laufstreckenverfahren*, das *Ablenkungsverfahren* und das *DOPPLER-Effekt-Verfahren* unterschieden. Das Laufstreckenverfahren kennt noch zwei technische Varianten, die sich dadurch unterscheiden, daß die zu messende Geschwindigkeit in eine Zeit oder eine Frequenz umgewandelt wird.

In diesem Abschnitt soll die Abhängigkeit der Laufzeit, der Ablenkung und der DOPPLER-Verschiebung von der Strömungsgeschwindigkeit berechnet und diskutiert werden.

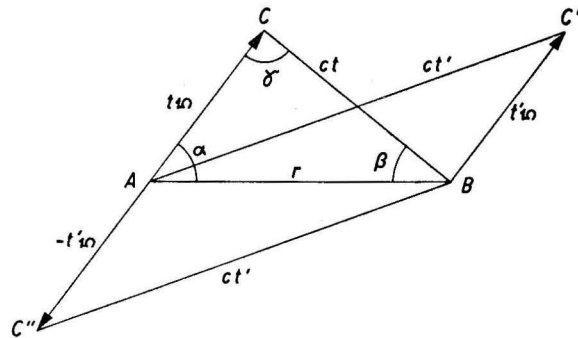


Abb. 1. Zur Berechnung der Schalllaufzeiten  $t$  und  $t'$  für die Strecken  $\vec{AB}$  und  $\vec{BA}$

$c$  Phasen- bzw. Gruppengeschwindigkeit des Schalles,  
 $r$  Länge der Laufstrecke  $AB$ ,  
 $v$  Strömungsgeschwindigkeit ( $|v| = v$ ),  
 $\alpha$  Winkel zwischen  $v$  und  $\vec{AB}$

#### 4.1.1 Das Laufstreckenverfahren

Für die Laufzeit  $t$  des Schalles (Gleichschall bzw. Schallimpulse) auf der Laufstrecke  $\vec{AB}$  (siehe Abb. 1) gilt unter den Voraussetzungen, daß das Strömungsfeld

1. in der Umgebung der Punkte  $A$  und  $B$  als räumlich konstant und
2. während der Laufzeit ( $\approx r/c$ ) als stationär

angesehen werden kann, nach dem auf Dreieck  $ABC$  angewendeten Sinussatz

$$\frac{ct}{\sin \alpha} = \frac{vt}{\sin \beta} = \frac{r}{\sin \gamma} \tag{1}$$

Es ist also

$$t = \frac{r \sin \alpha}{c \sin \gamma} = \frac{r \sin \alpha}{c \sin [\pi - (\alpha + \beta)]} = \frac{r \sin \alpha}{c \sin (\alpha + \beta)} = \frac{r \sin \alpha}{c (\sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \sin \beta)}, \tag{1a}$$

$$\sin \beta = \frac{v}{c} \sin \alpha, \tag{1b}$$

und daher

$$t = \frac{r}{c} \frac{1}{\cos \beta + \frac{v}{c} \cos \alpha} = \frac{r}{c} \frac{\cos \beta - \frac{v}{c} \cos \alpha}{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \text{ mit } \sin \beta = \frac{v}{c} \sin \alpha. \tag{2}$$

Da wegen der Kongruenz der Dreiecke  $ABC'$  und  $BAC''$  die Laufzeit  $t'$  für die Strecke  $\vec{BA}$  bei der Strömungsgeschwindigkeit  $v$  gleich der Laufzeit für die Strecke  $\vec{AB}$  bei der Strömungsgeschwindigkeit  $-v$  ist, ergibt sich  $t'$  aus Gleichung (2) durch die Substitution  $\alpha \rightarrow \alpha' = \pi - \alpha$

$$t' = \frac{r}{c} \frac{1}{\cos \beta - \frac{v}{c} \cos \alpha} = \frac{r}{c} \frac{\cos \beta + \frac{v}{c} \cos \alpha}{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}. \quad (2')$$

Die Schalllaufzeiten  $t$  und  $t'$  für die Laufstrecken  $\vec{AB}$  und  $\vec{BA}$  hängen also

1. von der Laufzeit  $t_0 = r/c$  bei ruhendem Medium,
  2. von dem Winkel  $\alpha$  zwischen Geschwindigkeitsvektor und Laufstrecke und
  3. von der MACH-Zahl  $M = \frac{v}{c}$
- ab.

Um einen Überblick über die zu erwartende Größenordnung des Effektes zu erhalten, soll mit den typischen Werten

$$\left. \begin{aligned} r &= 15 \text{ cm} \\ c &= 1500 \text{ m/s} \\ v &= 15 \text{ m/s} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

eine Abschätzung vorgenommen werden. Zunächst folgt aus

$$M \leq 10^{-2}$$

und

$$\cos \beta \geq 1 - \frac{1}{2} 10^{-4},$$

daß in sehr guter Näherung die lineare Abhängigkeit

$$t = \frac{r}{c} \left( 1 - \frac{v \cos \alpha}{c} \right) = \frac{r}{c} (1 - v_x/c) \quad (4)$$

zwischen der Schalllaufzeit  $t$  und der der Laufstrecke parallelen Geschwindigkeitskomponente  $v_x = v \cos \alpha$  besteht. Als Grundlage für ein Strömungsmeßverfahren ist die Gleichung (4) aber nicht günstig, denn die Laufzeit  $t$  weicht im Höchsthalle nur um 1% von dem Wert  $t_0 = r/c = 10^{-4}$  s bei ruhendem Medium ab und muß daher mit der hohen relativen Genauigkeit von  $10^{-5}$  gemessen werden, wenn  $v_x$  auf 1,5 cm/s genau ermittelt werden soll. Abgesehen von der Aufwendigkeit einer derartigen Präzisionskurzzeitmessung scheidet ein auf Gleichung (4) beruhendes Meßverfahren auch noch deswegen für die meereskundliche Anwendung aus, weil die Schallgeschwindigkeit mit derselben absoluten Genauigkeit bekannt sein muß, mit der die Strömungsgeschwindigkeit bestimmt werden soll.<sup>1)</sup> Diese Voraussetzung ist aber nicht gegeben, weil die Schallgeschwindigkeit des Meerwassers von Temperatur und Druck abhängt und für

$$0 \text{ } ^\circ\text{C} \leq T \leq 30 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$0 \leq S \leq 36 \text{ } \text{‰}$$

im Bereich

$$1475 \text{ m/s} \pm 5\% = (1475 \pm 75) \text{ m/s}$$

schwankt.

<sup>1)</sup> Ein akustischer Windmesser, der die Beziehung (4) ausnützt, wurde von SCHOTLAND [16] beschrieben.

In der Praxis wird deshalb die Laufstrecke in *beiden* Richtungen betrieben und aus den Laufzeiten  $t$  und  $t'$  entweder (bei der „Zeitmessung“) die Differenz

$$\Delta t = t' - t = 2 \frac{r}{c} \frac{\frac{v}{c} \cos \alpha}{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \approx 2 \frac{r}{c} \frac{v_x}{c}, \quad (5)$$

die in sehr guter Näherung

1. der in die Richtung der Laufstrecke fallenden Komponente  $v_x$  direkt und
2. dem Quadrat der Schallgeschwindigkeit indirekt proportional ist, oder (bei der „Frequenzmessung“) aus den Frequenzen  $f = 1/t$  und  $f' = 1/t'$  die Frequenzdifferenz

$$\Delta f = f - f' = 2 \frac{v_x}{c}, \quad (6)$$

die

1. der in die Richtung der Laufstrecke fallenden Komponente  $v_x$  des Geschwindigkeitsvektors direkt proportional und
2. von der Schallgeschwindigkeit *unabhängig*

ist, gebildet. Die Abschätzung mit den Werten der Gleichung (3) ergibt

$$|\Delta t| \leq 2 \cdot 10^{-6} \text{ s} \quad (t_0 = r/c = 10^{-4} \text{ s}) \quad (7)$$

$$|\Delta f| \leq 200 \text{ Hz} \quad (f_0 = c/r = 10^4 \text{ Hz}). \quad (8)$$

#### 4.1.2 Das Ablenkungsverfahren

Für die Ablenkung  $\varphi$  eines gebündelten Ultraschallstrahles gilt unter der Voraussetzung der Homogenität und Stationarität des Strömungsfeldes gemäß Abb. 2

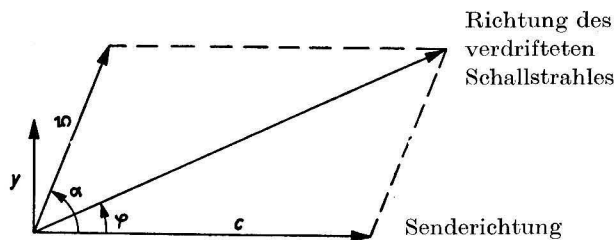


Abb. 2. Zur Berechnung der Ablenkung  $\varphi$  eines Schallstrahles

$$\sin \varphi = \frac{v}{c} \frac{\sin \alpha}{1 + 2 \frac{v}{c} \cos \alpha + \left(\frac{v}{c}\right)^2}. \quad (9)$$

Sie hängt von der MACH-Zahl und der Richtung ab. Mit den Werten der Gleichung (3) gilt in sehr guter Näherung

$$\varphi = \frac{v \sin \alpha}{c} = v_y/c, \quad (10)$$

und es ist

$$|\varphi| \leq 10^{-2} \approx 0,6^\circ. \quad (11)$$

Eine hohe Meßgenauigkeit kann nicht erwartet werden, da sich ein Ultraschallstrahl nicht genügend scharf bündeln läßt; ein runder Schwinger von 6 mm  $\varnothing$  hat bei 10 MHz eine Halbstahlbreite von etwa  $2^\circ$  (4).

## 4.1.3 Das DOPPLER-Effekt-Verfahren

Ein driftender Reflektor empfängt auf Grund des DOPPLER-Effektes die Frequenz

$$f_1 = f_0 \frac{1}{1 + \frac{v_1}{c}}. \quad (12)$$

Hierin bedeuten:

$f_0$  Frequenz des ruhenden Senders,

$c$  Schallgeschwindigkeit,

$v_1$  Radialgeschwindigkeit des Reflektors in bezug auf den Sender. Das Vorzeichen wird als positiv definiert, wenn sich der Abstand Sender—Reflektor vergrößert.

Der ruhende Empfänger empfängt die am driftenden Reflektor reflektierte Welle mit der Frequenz

$$f_2 = f_1 \left( 1 - \frac{v_2}{c} \right). \quad (13)$$

Hierin bedeutet

$v_2$  Radialgeschwindigkeit des Reflektors in bezug auf den Empfänger. Das Vorzeichen wird als positiv definiert, wenn sich der Abstand Empfänger—Reflektor vergrößert.

Unter Berücksichtigung von Gl. (3) gilt also in guter Näherung

$$f_2 = f_0 \left( 1 - \frac{v_1 + v_2}{c} \right). \quad (14)$$

Für die Ableitung des Zusammenhanges zwischen  $v_1 + v_2$  und  $v$  wird zunächst der Sonderfall betrachtet, daß  $v$  in der Ebene von Sender, Reflektor und Empfänger liegt. Gemäß Abb. 3 gilt dann

$$\begin{aligned} v_1 &= v \cos(\alpha + \delta), \\ v_2 &= v \cos(\alpha - \delta), \\ v_x &= v \cos \alpha. \end{aligned}$$

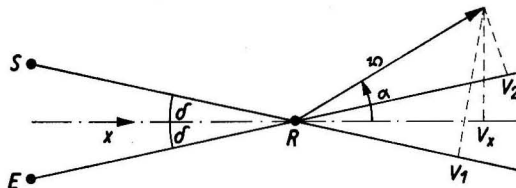


Abb. 3. Zur Geometrie des DOPPLER-Effekt-Verfahrens

$S$  = Sender,  $R$  = Reflektor,  $E$  = Empfänger

$v$  Strömungsgeschwindigkeit, liegt laut Voraussetzung in der Ebene  $SRE$ ,

$v_{1,2}$  Radialgeschwindigkeit des Reflektors bezüglich Sender bzw. Empfänger,

$v_x$  Geschwindigkeitskomponente bezüglich der Winkelhalbierenden des Winkels  $SRE$ ,

$2\delta$  Winkel  $SRE$

Hieraus folgt

$$v_1 + v_2 = 2 \cos \delta v_x. \quad (15)$$

An diesem Ergebnis ändert sich nichts, wenn zu  $v$  noch eine zur Ebene  $SRE$  senkrechte Komponente hinzukommt. Daher gilt ganz allgemein

$$f_2 = f_0 \left( 1 - 2 \cos \delta \frac{v_x}{c} \right). \quad (16)$$

Die DOPPLER-Verschiebung

$$\Delta f = f_2 - f_1 = - 2 f_0 \cos \delta \frac{v_x}{c} \quad (17)$$



ist also in guter Näherung der Geschwindigkeitskomponente  $v_x$  in Richtung der Winkelhalbierenden direkt und der Schallgeschwindigkeit indirekt proportional. Für ihr relatives Maximum gilt mit den Werten der Gleichung (3)

$$|\Delta f|/f_0 = 2 \cdot 10^{-2}. \quad (18)$$

Diese Gleichung stimmt mit der entsprechenden für das Laufstreckenverfahren (vgl. Gl. (8)) überein. Die absolute Frequenzdifferenz läßt sich beim DOPPLER-Effekt-Verfahren jedoch leicht um einige Größenordnungen größer machen als beim Laufstreckenverfahren, da die Sendefrequenz beim DOPPLER-Effekt-Verfahren höher gewählt werden kann als die Impuls-umlauffrequenz beim Laufstreckenverfahren.

## 4.2 Technische Einzelheiten

Ein Teil der in der Literatur beschriebenen akustischen Strömungsmesser wird zur Bestimmung des Durchsatzes in Leitungen eingesetzt. Die für diesen Zweck noch zusätzlich vorhandenen Einrichtungen, z. B. zur Bestimmung der Dichte, werden hier nicht besprochen.

### 4.2.1 Geräte nach dem Laufstreckenverfahren

Die nach dem Laufstreckenverfahren arbeitenden Geräte führen entweder eine Zeitmessung oder eine Frequenzmessung aus.

#### a) Geräte mit Zeitmessung

Das Laufstreckenverfahren mit Zeitmessung liegt den Geräten von HAUGEN [7], HESS [8], KALMUS [10], LESTER [13], MIDDLETON<sup>1)</sup> und SIRA<sup>2)</sup> [1] zugrunde. Die Laufzeiten von der Größenordnung  $100 \mu\text{s}$  bzw. ihre Differenz von maximal  $2 \mu\text{s}$  werden bei allen Geräten nach dem relativ einfachen und genauen Phasendifferenzverfahren bestimmt.

Der Grundgedanke dieses Verfahrens besteht darin, die zu messende Zeit  $t$  in eine proportionale Phasenverschiebung  $\varphi = \omega t$  zweier Wechselspannungen der Kreisfrequenz  $\omega$  zu verwandeln und diese dann mittels eines Phasennessers zu bestimmen. Die üblichen Phasennesser formen die sinusförmigen Spannungen zunächst in Rechteckspannungen um und steuern mit diesen eine Phasennesserröhre (Doppelgitterröhre). Dadurch ergibt sich der in Abb. 4 gezeigte Zusammenhang zwischen Phasendifferenz und mittlerem Anodenstrom. Die

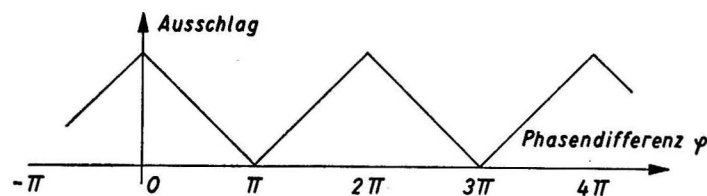


Abb. 4. Eichkurve des Phasennessers

Anzeige ist also vieldeutig. Daher muß von vornherein bekannt sein, in welchem der Intervalle

$$n\pi \leq \varphi \leq (n+1)\pi \quad \text{mit } n = 0 \text{ oder } \pm 1 \text{ oder } \pm 2 \text{ oder } \dots$$

die zu messende Phasendifferenz  $\varphi$  liegt.

HESS, KALMUS, MIDDLETON und HAUGEN arbeiten mit einer einzigen Laufstrecke, die abwechselnd in beiden Richtungen mit Gleichschall betrieben wird. Ist  $\omega$  die Kreisfrequenz des

<sup>1)</sup> Zitiert nach JOHNSON [9].

<sup>2)</sup> SIRA = British Scientific Instrument Research Association.

Ultraschalls, so ergeben sich zwischen Sender und Empfänger entsprechend Gleichung (4) abwechselnd die Phasendifferenzen

$$\omega t = \omega \frac{r}{c} (1 - v_x/c),$$

$$\omega t' = \omega \frac{r}{c} (1 + v_x/c).$$

Damit aus den ihnen zugeordneten Phasemesseranzeigen die Laufzeitdifferenz  $\Delta t = t' - t$  bestimmt werden kann, müssen  $\omega t'$  und  $\omega t$  den Bedingungen

$$n \pi \leq \left\{ \begin{array}{l} \omega t \\ \omega t' \end{array} \right\} \leq (n + 1) \pi$$

mit ein und demselben  $n$  ( $n = 0$  oder  $1$  oder  $2$  oder  $\dots$ ) genügen. Hieraus folgt für die in Hinblick auf die Größe des Meßbereiches zweckmäßige Frequenz  $f_{\text{opt}}$

$$\omega_{\text{opt}} \frac{r}{c} = \left( n + \frac{1}{2} \right) \pi$$

oder

$$f_{\text{opt}} = \frac{(2n + 1) c}{4 r} \text{ mit } n = 0 \text{ oder } 1 \text{ oder } 2 \text{ oder } \dots \quad (20)$$

und für die zugehörige Grenze  $|v_x|_{\text{max}}$  des Meßbereiches

$$|v_x|_{\text{max}} = \frac{c/r}{4 f_{\text{opt}}} c = \frac{1}{2n + 1} c. \quad (21)$$

Die Empfindlichkeit des Verfahrens ist um so größer, desto größer  $f_{\text{opt}}$ , also auch  $n$  gewählt wird. Da jedoch mit wachsendem  $n$  der Meßbereich kleiner wird, kann die Empfindlichkeit nicht beliebig gesteigert werden. Mit den Werten der Gleichung (3) ergibt sich  $n_{\text{max}} = 50$ . Die  $\omega t$  und  $\omega t'$  entsprechenden Phasemesseranzeigen werden bei MIDDLETON photographisch registriert, während sie bei SWENGEL, KALMUS und HAUGEN einem synchron mit der Laufstrecke umgepolten Spannungsmesser zur Differenzbildung zugeführt werden.

LESTER modifizierte das oben beschriebene Verfahren. Eines seiner Geräte arbeitet mit zwei antiparallelen Laufstrecken, die kontinuierlich betrieben werden. Zwei andere Geräte arbeiten mit je einer Laufstrecke, die gleichzeitig in beiden Richtungen mit Schallimpulsen, die kürzer als die Laufzeit sind, betrieben werden. In allen drei Fällen wird dem Phasemesser die der Laufzeitdifferenz  $t' - t$  entsprechende Phasendifferenz  $\omega (t' - t) = 2 \omega r v_x/c^2$  zugeführt. Das Vorzeichen von  $v_x$  geht im Phasemesser verloren. Für das Maximum  $|v_x|_{\text{max}}$  des Meßbereiches gilt

$$2 \omega r |v_x|_{\text{max}}/c^2 = \pi$$

oder

$$|v_x|_{\text{max}} = \frac{c/r}{4 f} c. \quad (22)$$

Diese Beziehung legt die obere Grenze für  $f$  fest. In den Fällen, wo diese so niedrig liegt, daß sich der Ultraschall nicht genügend bündeln läßt, arbeitet LESTER mit einem hochfrequenten Träger, der mit der Frequenz  $f$  moduliert ist.

In dem schon erwähnten Gerät mit zwei Laufstrecken lassen sich zur Kontrolle des Nullpunktes beide Laufstrecken parallel schalten.

Das Gerät von SIRA arbeitet mit einer einzigen Laufstrecke, die gleichzeitig und kontinuierlich in beiden Richtungen mit den Frequenzen  $f_1$  und  $f_2$  betrieben wird. An jedem der beiden Schwinger überlagern sich die ausgesendete und die empfangene Schwingung. Durch

je einen Mischer wird aus den Überlagerungen die Differenzfrequenz  $f_1 - f_2$  erzeugt. Die beiden Differenzfrequenzen sind gegeneinander in Abhängigkeit von den Laufzeiten phasenverschoben. Durch eine besondere Schaltung und einen Phasenmesser wird die Differenz  $\Delta t = t' - t$  der Laufzeiten bestimmt.

Die Beeinflussung des Meßergebnisses durch eine Veränderung der Schallgeschwindigkeit wird innerhalb eines gewissen Bereiches selbsttätig kompensiert, indem durch Ausnutzung des Refraktionsgesetzes die Länge der Laufstrecke verändert wird.

#### b) Geräte mit Frequenzmessung

Das Laufstreckenverfahren mit Frequenzmessung liegt den Geräten von KNAPP [11], KRITZ [12], MESSIAS [15] und SUELLENTROP [18] zugrunde. Der Laufzeit  $t$  wird hier die Impulsfolgefrequenz  $f = 1/t$  durch die in Abb. 5 gezeigte Impulsumlaufschaltung („sing-around“-Kreis), die häufig auch zur direkten Messung der Schallgeschwindigkeit in ruhenden Medien verwendet wird (TSCHIEGG [21]), LOVETT [14]), SUELLENTROP [19]) zugeordnet.

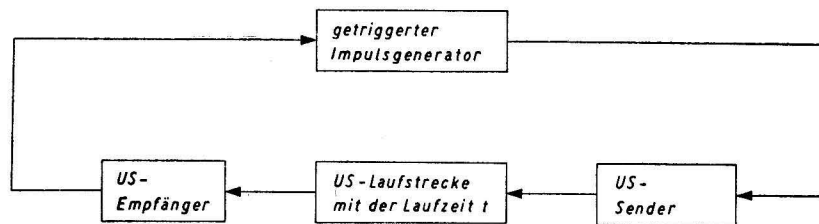


Abb. 5. Impulsumlaufschaltung für Schall- und Strömungsgeschwindigkeitsmeßgeräte  
Der getriggerte Impulsgenerator liefert Impulse, die kürzer als die Ultraschall-Laufzeit  $t$  sind. Wenn die Totzeit des elektronischen Teiles des Kreises gegen  $t$  vernachlässigt werden kann, gilt für die Impulsumlauf-  
frequenz  $f = 1/t$

Alle Geräte enthalten zwei Impulsumlaufkreise mit gleichen, aber antiparallelen Laufstrecken.

Die Frequenzdifferenz  $\Delta f = f - f'$  wird von KRITZ als Schwebungsfrequenz bestimmt; nähere Angaben fehlen. KNAPP gibt die beiden Impulsfolgen auf die Gitter einer Koinzidenzröhre und erhält dadurch an der Anode eine Impulsfolge mit der Frequenz  $|\Delta f| = |f - f'|$ . Diese Impulsfolge wird zur sofortigen Auswertung einem Kurzzeitmesser und zur nachträglichen Auswertung zusammen mit Zeitmarken im Abstand von 0,5 s einem Schreibgerät zugeführt. SUELLENTROP vervielfacht die Frequenzen  $f$  und  $f'$  und mischt sie dann in einem Gegentaktmodulator. Durch einen Hochpaß und einen Tiefpaß werden die vervielfachte Summenfrequenz, welche der Schallgeschwindigkeit proportional ist, und die vervielfachte Differenzfrequenz, die der Komponente  $v_x$  proportional ist, gebildet. MESSIAS vervielfacht die Frequenzen  $f$  und  $f'$  durch einen Multivibrator mit nachgeschalteten Flip-Flop-Untersetzen in einer Regelschaltung um den Faktor 4, 8 oder 16, wandelt sie dann mit Hilfe von Synchronmotoren in proportionale Drehgeschwindigkeiten um und bildet schließlich die Differenz durch ein mechanisches Differentialgetriebe.

Die nicht ganz vermeidbaren Unterschiede der Längen der beiden Laufstrecken berücksichtigt KNAPP durch die Bestimmung der Koinzidenzfrequenz bei parallelen Laufstrecken. Für die Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit wird dann die Differenz der Koinzidenzfrequenzen bei antiparallelen und bei parallelen Laufstrecken verwendet.

#### 4.2.2 Geräte nach dem Ablenkungsverfahren

Die Ablenkung eines gebündelten Ultraschallstrahles liegt nach KNAPP [11] einem industriellen Gerät zur Durchsatzmessung in Rohrleitungen zugrunde. Die Ultraschallfrequenz beträgt 6 MHz. Der US-Strahl fällt nach zwei Reflexionen an den Rohrwänden auf zwei dicht

nebeneinander liegende Empfänger. Die Differenz ihrer Ausgänge hängt von der MACH-Zahl  $v/c$  ab; der genaue Zusammenhang ist nicht linear und kann nur empirisch ermittelt werden. Unterhalb von  $\approx 3$  m/s liefert das Verfahren sehr ungenaue Werte. Eine eventuell auftretende Schallabsorption täuscht zu geringe Geschwindigkeiten vor.

#### 4.2.3 Geräte nach dem DOPPLER-Effekt-Verfahren

Das DOPPLER-Effekt-Verfahren liegt den Geräten von CHALUPNIK [4] und SIRA [1] zugrunde.

CHALUPNIK benutzt einen 10-MHz-Tunneldioden-Oszillator, der mit  $2 V_{ss}$  einen Barium-Titanat-Schwinger mit folgenden Daten treibt:  $\varnothing = 6,5$  mm, Resonanzfrequenz = 10 MHz, theoretische bzw. praktische Halbstrahlbreite = 1,7 bzw.  $2,5^\circ$ . Das Echo wird mit einem gleichartigen Schwinger in 8 mm Abstand vom Sender empfangen und in einem dreistufigen Transistorverstärker mit 20facher Verstärkung pro Stufe verstärkt. Durch die akustische Kopplung zwischen Sender- und Empfängerschwingung wird eine Mischstufe überflüssig. Der Empfänger liefert das Signal

$$\sin \omega_0 t + \sin (\omega_0 + \Delta\omega) t = 2 \cos \frac{\Delta\omega}{2} t \sin \left( \omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2} \right) t,$$

worin das Vorzeichen der DOPPLER-Verschiebung  $\Delta\omega$  praktisch verloren geht. Die Hälfte der absoluten DOPPLER-Verschiebung erscheint als Amplitudenmodulation des 10-MHz-Trägers. Ein Dioden-Detektor liefert die absolute DOPPLER-Verschiebung als Wechselspannung, welche in einer Tonfrequenzstufe mit Emitterfolgerausgang verstärkt wird. In dieser Form — als Wechselspannung mit der Frequenz 13 Hz bis 130 kHz (entsprechend 1 mm/s bis 10 m/s Strömungsgeschwindigkeit) — können die Daten auf Magnetband gespeichert oder zu einer Datensammelstelle fernübertragen werden. Der Stromverbrauch beträgt 50 mA bei 1,5 V. Das Gerät ohne die Batterie befindet sich in einem mit zwei O-Ringen abgedichteten zylindrischen Gefäß ( $\varnothing = 3,2$  cm;  $l = 12$  cm). Zwei elektrische Leitungen für Gleichspannung bzw. Tonfrequenz werden durch Stopfbuchsen mit O-Ringen eingeführt.

Als driftende Reflektoren wirken die natürlichen Inhomogenitäten des strömenden Mediums.

Die Geschwindigkeit wird an einer Stelle gemessen, wo der störende Einfluß der Sonde verschwunden ist. Denn wegen der Richtwirkung der versetzten Schwingung und wegen der Absorption (20 db/m) können nur Echos aus 40—70 cm Abstand empfangen werden.

Der Oszillator muß eine hohe Kurzzeitkonstanz aufweisen, damit nicht durch Frequenzverschiebungen während der Schalllaufzeit von etwa 0,8 ms falsche Geschwindigkeiten vorgetauscht werden.

#### 4.3 Vorauswahl von Verfahren für die Brandungszone

Die Eigenschaften der bekannten akustischen Strömungsmeßverfahren sind in der Tabelle 3 zusammengestellt. Allen Verfahren ist gemeinsam, daß eine wohldefinierte Komponente des Geschwindigkeitsvektors gemessen wird.

Das Laufstreckenverfahren mit Zeitmessung und das Ablenkungsverfahren scheiden für das hier interessierende Anwendungsgebiet deshalb aus, weil das Meßergebnis — zumindest bei der üblichen technischen Realisierung mit Hilfe eines Phasenmessers bzw. einer Differenzschaltung von zwei Empfängern — in einer für die Fernmessung wenig geeigneten Form anfällt. Ein anderer Nachteil beider Verfahren liegt in dem Einfluß der Schallgeschwindigkeit auf das Meßergebnis. Ferner leidet das Ablenkungsverfahren darunter, daß zwischen der gemessenen Geschwindigkeitskomponente und dem Meßeffect ein nichtlinearer Zusammenhang besteht.

TABELLE 3  
Zusammenstellung der Eigenschaften der akustischen Verfahren

Verfahren	Laufstreckenverfahren		DOPPLER-Effekt-Verfahren	Ablenkungs- verfahren
	mit Zeitmessung	mit Frequenz- messung		
Gleichung	$\Delta t = 2 \frac{r}{c} \cdot \frac{v_x}{c} \cdot \left( t_0 = \frac{r}{c} \right)$	$\Delta f = 2 \frac{v_x}{r} \cdot \left( f_0 = \frac{c}{r} \right)$	$\Delta f = -2 f_0 \cos \delta \frac{v_x}{c}$	$\varphi = \frac{v_y}{c}$
Effekt 1.	proportional einer exakt definierten Komponente des Geschwindigkeitsvektors			
2.	indirekt proportional dem Quadrat der Schallgeschwindigkeit	unabhängig von der Schallgeschwindigkeit	indirekt proportional der Schallgeschwindigkeit	
3.	relativ $\leq 2 \cdot 10^{-2}$			absolut $\leq 10^{-2}$ $\approx 0,6^\circ$
4.	sehr gut geeignet für die Fernübertragung und die digitale Darstellung			
Aufwand	groß, da zwei Laufstrecken betrieben werden müssen  oder eine Laufstrecke abwechselnd umgeschaltet werden muß		klein	sehr klein
Meßbereich	begrenzt bei Verwendung von Phasennessern zur Kurzzeitmessung	unbegrenzt		
Vorzeichen	geht bei einigen der beschriebenen Geräte verloren			

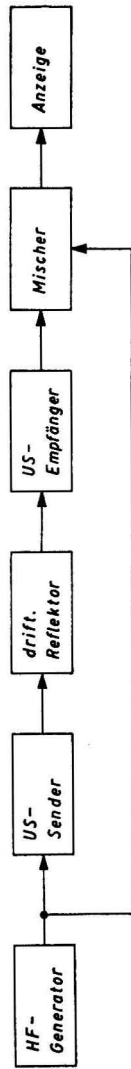
Für die Fernmessung vorteilhaft sind das Laufstreckenverfahren mit Frequenzmessung und das DOPPLER-Effekt-Verfahren, da hierbei eine der Geschwindigkeitskomponenten in eine proportionale *Frequenz* umgesetzt wird. Welchem dieser beiden Verfahren für die Brandungszone der Vorzug gegeben werden soll, kann jedoch noch nicht entschieden werden, da ihre Vor- und Nachteile in detaillierteren Untersuchungen gegeneinander abgewogen werden müssen.

#### 4.4 Eine verbesserte Variante des DOPPLER-Effekt-Verfahrens

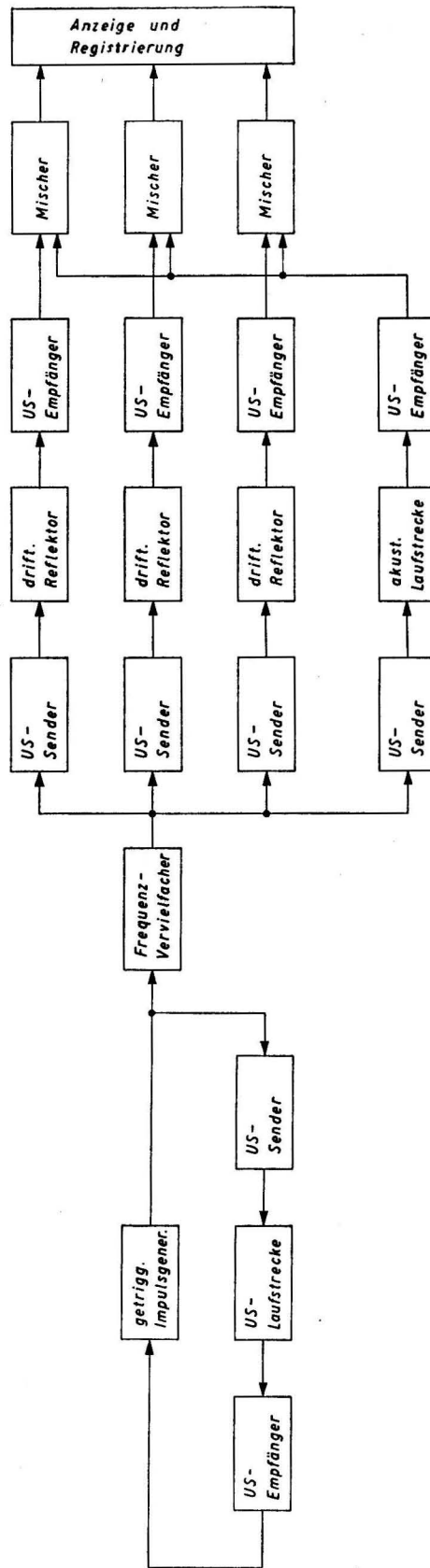
Der Hauptvorteil des DOPPLER-Effekt-Verfahrens gegenüber dem Laufstreckenverfahren mit Frequenzmessung liegt in der um einige Größenordnungen höheren Empfindlichkeit  $\frac{d(\Delta f)}{d(v_x)}$ , für deren numerische Werte man unter Benutzung der Angaben von Abschnitt 4.2.3 bzw. der Zahlen von Gleichung (3)  $133 \frac{\text{Hz}}{\text{cm/s}}$  bzw.  $0,133 \frac{\text{Hz}}{\text{cm/s}}$  findet. Dem Vorteil der hohen Empfindlichkeit steht jedoch der Nachteil des Einflusses der Schallgeschwindigkeit auf die DOPPLER-Verschiebung gegenüber.

Dieser Nachteil wird durch die verbesserte Anordnung nach Abb. 6b beseitigt (STRIGGOW [17]). Zum Vergleich ist in Abb. 6a die gebräuchliche Anordnung dargestellt.





a) gebräuchliche Anordnung



b) schallgeschwindigkeitskompensierte Anordnung zur Messung von drei Komponenten des Strömungsvektors  
 Abb. 6. Blockschaltbilder für Strömungsmesser nach dem DOPPLER-Effekt-Verfahren

Die wesentlichste Neuerung besteht darin, daß der HF-Generator für eine *Festfrequenz*  $f_0$  durch eine Impulsumlaufschaltung der schon in Abschnitt 4.2.1 b erwähnten Art und einen Frequenzvervielfacher ersetzt ist. Der Sinn dieser Maßnahme besteht darin, die Senderfrequenz  $f_0$  *in Abhängigkeit von der Schallgeschwindigkeit so zu steuern, daß Veränderungen der Schallgeschwindigkeit ohne Einfluß auf die DOPPLER-Verschiebung bleiben.*

Die Ultraschallaufstrecke der Impulsumlaufschaltung ist im Innern eines durchlöcherten Gefäßes von beispielsweise zylindrischer Gestalt untergebracht, das sich in dem Medium, dessen Strömungsgeschwindigkeit gemessen werden soll, befindet. Da praktisch die Strömung auf der Laufstrecke unterbunden ist, das Medium hier aber dieselbe Temperatur, denselben Druck und auch dieselbe stoffliche Zusammensetzung wie außerhalb des durchlöcherten Gefäßes hat, beträgt die Schallaufzeit  $r/c$ , worin  $r$  die Länge der Laufstrecke und  $c$  die Schallgeschwindigkeit des strömenden Mediums ist. Die Impulsumlauf Frequenz beträgt daher  $f = \frac{c}{r}$ . Der Frequenzvervielfacher macht hieraus die höhere Frequenz

$$f_0 = n f = n \frac{c}{r}, \quad (23)$$

welche im Hinblick auf die Bündelung des Schalles, seine Reflexion an den kleinen natürlichen Inhomogenitäten und die absolute Größe der DOPPLER-Verschiebung für das Verfahren vorteilhafter als die „sing-around“-Frequenz  $f$  ist.

Mit dem obigen Wert für  $f_0$  gilt gemäß Gl. (17) für die DOPPLER-Verschiebung

$$\Delta f = - \frac{2 n \cos \delta}{r} v_x; \quad (24)$$

sie ist also jetzt, wie gefordert, von der Schallgeschwindigkeit *unabhängig*.

Die Frequenz  $f_0$  wird durch einen oder mehrere Ultraschallsender in das strömende Medium gestrahlt; Abb. 6 b zeigt drei solcher Sender, die beispielsweise senkrecht zueinander ausgerichtet sein können. Die an driftenden Reflektoren reflektierten Ultraschallechos werden wie üblich empfangen und Mischern zugeführt. Im Gegensatz zu den bekannten Anordnungen muß jedoch die Senderschwingung, bevor sie an die Mischer geführt wird, etwa um die Laufzeit des Schalles für den Weg Ultraschallsender—driftender Reflektor—Ultraschallempfänger *verzögert* werden, damit nicht durch Frequenzverschiebungen während der Echolaufzeit falsche DOPPLER-Verschiebungen vorgetäuscht werden. Abb. 6 b zeigt, wie die Verzögerung mittels einer akustischen Verzögerungsstrecke, bestehend aus Ultraschallsender, akustischer Laufstrecke und Ultraschallempfänger, erzielt wird.

#### Literatur

- [1] Anonym, An Ultrasonic Flowmeter for Industry — Research Report on Work of the British Scientific Instrument Research Association. Engineering, 1. Dec. 1961, S. 726—727.
- [2] BECKWITH, T. G. and BUCK, N. LEWIS, Mechanical Measurements. Reading, Massachusetts, U.S.A., London, England, 1961.
- [3] BÖHNECKE, G., Principles of Measuring Currents. Assoc. d'Océanogr. Phys., Publ. Sc. No. 14, Bergen 1955.
- [4] CHALUPNIK, J. D. and GREEN, P. S., A doppler-shift ocean current meter. Marine Sciences Instrumentation, Vol. 1, New York 1962, 194—199.
- [5] DIETRICH, G. und KALLE, K., Allgemeine Meereskunde. Berlin 1957.
- [6] EDER, F. X., Moderne Meßmethoden der Physik, I (2. Aufl.), Berlin 1960.
- [7] HAUGEN, M. G., FARRALL, W. R., HERRICK, J. F. and BALDES, E. J., An Ultrasonic Flowmeter. Proc. Nat. Electronics Conf. 11 (1955) 465—475.
- [8] HESS, W. B., SWENGEL, R. C. and WALDORF, K. S., Measuring Water Velocity by an Ultrasonic Iethod. Electr. Engineering 69 (Nov. 1950) 983.

- [9] JOHNSON, J. W. and WIEGEL, R. L., Investigation of Current Measurement in Estuarine and Coastal Waters. Berkely, California, Sept. 1958.
- [10] KALMUS, H. P., Electronic Flowmeter System. *Rev. Sci. Instrum.* **25** (1954), 201–206.
- [11] KNAPP, CARLOS — BOETTICHER, Geschwindigkeits- und Mengemessung strömender Flüssigkeiten mittels Ultraschall. *Voith Forschung und Konstruktion*, H. 3 (1958); oder Mitteilungen aus dem Institut für hydraulische Maschinen und Anlagen an der Eidgenössischen Hochschule in Zürich, H. 2 (1958).
- [12] KRITZ, J., Ultrasonic Flowmeter. *Instruments & Automation* **28** (1955), 1912–1913.
- [13] LESTER, R. A., High-accuracy, selfcalibrating acoustic flowmeters. *Marine Sciences Instrumentation*, Vol. 1, New York 1962, 200–204.
- [14] LOVETT, J. R., The SVTP-Instrument and some Application to Oceanography. *Marine Sciences Instrumentation*, Vol. 1, New York 1962, 168–172.
- [15] MESSIAS, H. F., Ultrasonics Measures Flow Velocity of Rivers. *Electronics* (1961), Oct. 13, 56–59.
- [16] SCHOTLAND, R. M., The Measurement of Wind Velocity by Sonic Means. *J. of Meteorology* **12** (1955) 386–389.
- [17] STRIGGOW, K., Anordnung zur Messung der Strömungs- und/oder Fahrtgeschwindigkeit, insbesondere von Schiffen. DWP beantragt, amtl. Aktenzeichen: WP 42 0/113 336.
- [18] SUELLENTROP, F. J., BROWN, A. E. and RULE, E., An acoustic ocean-current meter. *Marine Sciences Instrumentation*, Vol. 1, New York 1962, 190–193.
- [19] SUELLENTROP, F. J., BROWN, A. E. and RULE, E., An instrument for the direct measurement of the speed of sound in the ocean. *Marine Sciences Instrumentation*, Vol. 1, New York 1962, 186–189.
- [20] THORADE, H., Methoden zum Studium der Meeresströmungen. In: E. ABDERHALDEN, *Handbuch der biologischen Arbeitsmethoden*, Abt. II, Teil 3. Berlin 1933.
- [21] TSCHIEGG, C. E. and HAYS, E. E., Transistorized Velocimeter for Measuring the Speed of Sound in the Sea. *J. Acoust. Soc. Amer.* **31** (1959) No. 7, 1038.