

Abrasion, Transport und Sedimentation in der Beltsee

Von Siegfried Bressau

Inhalt

Einleitung	65
Teil I	
Sedimentumlagerungen im Seegebiet um Fehmarn	65
I. Das Untersuchungsgebiet	
A. Umgrenzung und Morphologie	65
B. Die geologische Entwicklung des Untersuchungsgebietes	66
C. Das Ausgangsmaterial	66
II. Die Untersuchungsmethoden	
A. Die Probenentnahme	66
B. Die Korngrößenanalysen	68
C. Die entnommenen Werte	69
III. Die regionale Verteilung der Sedimente	
A. Der Westen	72
B. Der Nordosten	75
C. Der Südosten	77
IV. Geologische Deutung	
A. Die Sedimentationszonen	77
1. Die küstennahe Sandanhäufungszone	77
2. Die Abtragungszone mit den Restsedimenten	77
3. Die küstenferne Sandanhäufungszone	79
4. Die sedimentationsarme oder -freie Zone	80
5. Die Schlickgebiete	80
B. Der Stammbaum der Sedimente	
1. Die Einstufung der Histogramme	83
2. Die Transportrichtungen	84
C. Der Ursprung der Sedimente	86
Teil II	
Veränderungen der Korngestalt während der Wanderung	
I. Einführung	87
II. Die Begriffe Form und Rundung	88
A. Form- und rundungsbestimmende Faktoren	88
B. Geologische Bedeutung von Form und Rundung	89
C. Die Formsortierung	90
III. Die Untersuchungsergebnisse	
A. Wahl der Bestimmungsmethode von Form und Rundung	90
1. Definition der Form	90
2. Definition der Rundung	90
3. Durchführung der Analyse	90
B. Die Wahl der Fraktionen	91
C. Die Korngröße der untersuchten Proben	92
D. Der Form- und Rundungsgrad	93
E. Form und Rundung des Geschiebemergels	93
F. Form und Rundung beim Strandsand	96
1. Form, Rundung und Entfernung	96
2. Form, Rundung und Korngröße	96
3. Form und Rundung	97
G. Form und Rundung beim Seesand	97
1. Form, Rundung und Entfernung	97

2. Form, Rundung und Korngröße	98
3. Form und Rundung	98
H. Geologische Deutung	99
IV. Zusammenfassung von Teil I und II	100
V. Schriftenverzeichnis	101

Einleitung

Im ersten Teil der vorliegenden Arbeit wird versucht, durch eine genaue geologische Kartierung des Seegrundes die Beziehungen zwischen submariner Abrasion, Sandwanderung und Ablagerung zu klären. Seegrundkartierungen sind schon häufiger von verschiedenen Autoren durchgeführt worden (PRATJE, 1931 u. 1948 a; RUCK, 1952 u. a.). Da es sich hierbei um Übersichtsaufnahmen handelte, die mit einem verhältnismäßig großen Probenabstand vorgenommen wurden, kam man über eine reine Beschreibung der angetroffenen Sedimente und ihrer Umgebung nicht hinaus. Lediglich PRATJE hat später (1939 u. 1948 a) die Sedimentationsbedingungen in der südlichen Ostsee aufzeigen können. Bekanntlich herrscht auf submarinen Bänken und in küstennahen Regionen, besonders vor Steilufern, Abrasion. PRATJE hat in seinen zahlreichen Arbeiten fortlaufend darauf hingewiesen. Doch ist das Ausmaß dieser Abtragung bisher wohl meistens unterschätzt worden, so daß eine Untersuchung dieser Vorgänge notwendig erschien.

Im zweiten Teil werden Proben, die im Seegebiet und am Strand entnommen wurden, auf ihre Form und Rundung untersucht. Form und Rundung waren ebenfalls schon Gegenstand früherer Untersuchungen (ANDERSON, 1926; PETTIJOHN u. LUNDAHL, 1943; PETTIJOHN, 1949 u. a.). Diese litten aber darunter, daß zum Teil verschiedene Werte und Definitionen benutzt und Proben mit verschiedenem Material, aus verschiedenem Ursprungsgebiet und mit verschiedener Geschichte verglichen wurden. Das erklärt die sich teilweise widersprechenden Ergebnisse der einzelnen Arbeiten.

In der vorliegenden Arbeit konnten Proben gleichen Ursprungs (Geschiebemergel) und gleicher Geschichte untersucht werden. See- und Strandproben werden einander gegenübergestellt.

Die Untersuchungen sollen zur Klärung der Verhältnisse während eines Sedimentationszyklus, bestehend aus Abrasion, Transport und Sedimentation, beitragen.

Teil I

Sedimentumlagerungen im Seegebiet um Fehmarn

I. Das Untersuchungsgebiet

A. Umgrenzung und Morphologie

Das Untersuchungsgebiet wird im Norden und Osten Fehmarns von der Mud-Zone begrenzt, die hier mit der 20-m-Tiefenlinie erreicht wird. Im Westen liegt die Mud-Zone in großer Entfernung von der Küste. Daher entstanden bei der Probenentnahme erhebliche Schwierigkeiten; denn auf eine terrestrische Standortbestimmung konnte nicht verzichtet werden, da bei astronomischer Messung der Fehler größer als der gewählte Probenabstand ist. Aus diesem Grunde bildet die Mud-Zone hier nicht die Grenze des Untersuchungsgebietes, sie wurde nur an zwei Stellen berührt. Im Süden konnte bei Dahme der Anschluß an die Seegrundkartierung der Lübecker Bucht gewonnen werden (RUCK, 1952).

Das Untersuchungsgebiet liegt in seinem westlichen Teil in der Hohwachter Bucht, während sein östlicher Teil zur Mecklenburger Bucht gehört.

Westlich Fehmarn senkt sich der Untergrund nur sehr langsam ab, so daß die 14-m-Tiefenlinie erst in einer Entfernung von etwa 12 km von der Küste erreicht wird. Es folgt ein etwas steilerer Abfall bis auf 18 m. Eine Tiefe von 20 m tritt hier nur in einigen wenigen Löchern auf. Im Nordwesten stößt die 20-m-Tiefenlinie in einer Bucht, der Hohwachter Rinne, vom Fehmarnbelt etwas nach Süden vor. Von ihr läßt sich eine 16 bis 18 m tiefe Rinne nach Süden verfolgen, die in der Hohwachter Bucht nach Osten umbiegt und dann in 8 m Tiefe östlich der Ansteuerungstonne Fehmarnsund-West ausstreicht. In ihrer Verlängerung liegt der Fehmarnsund in der gleichen Tiefe. Lediglich in zwei Löchern wird diese hier größer als 10 m.

In der Hohwachter Bucht steigt der Südrand der tiefen Rinne in einer Entfernung von 1,5 km steil zur Küste Wagriens auf.

Im Gebiet zwischen Fehmarn und dem Festland fällt der Seegrund langsam von Norden und Süden zu der Rinne ab. Nordöstlich des Graswarders wird in einem Loch die 10-m-Tiefenlinie unterschritten. Dieses Loch wird im Norden vom Großenbrodener Steinriff begrenzt, das sich nach Westen in einigen Untiefen fortsetzt.

Im Fehmarnbelt fällt der Grund langsam bis auf 8 m ab, um dann schnell auf die 20-m-Linie abzusinken. Östlich des Puttgardener Riffs ist der Abfall bis 20 m ziemlich gleichmäßig.

Im östlichen Teil des Untersuchungsgebietes verlaufen die Tiefenlinien ziemlich unruhig. Die 20-m-Linie hält sich in etwa 4 km Entfernung von der Küste. Lediglich in der nördlichen Hälfte ist der Abfall bis 12 m etwas langsamer.

Vor der Ostküste Wagriens macht sich die Sagas-Bank, die bis auf 8 m Tiefe ansteigt, als morphologisches Element bemerkbar. Die 12-m-Linie gibt ihre Umrisse noch deutlich wieder. Die Sagas-Bank ist im Norden von einer 14 m, im Süden von einer 18 m tiefen Rinne vom Festland abgetrennt.

B. Die geologische Entwicklung des Untersuchungsgebietes

Das Ostseebecken wurde durch die Gletscher der letzten Vereisung ausgeschürft. Nachdem sich das Eis aus der westlichen Ostsee zurückgezogen hatte, lag das Gebiet bis auf einzelne kleine Seen trocken. Im östlichen Becken bildete sich der Eisstausee, der nach Westen durch die Darßer Schwelle abgetrennt war. Das rücktaunende Eis gab dann eine Verbindung zum Weltmeer über die mittelschwedischen Seen frei, wodurch der Stausee versalzte und sich das sogenannte Yoldia-Meer bildete. Darauf wurde die Verbindung zum Weltmeer durch eine Landhebung abgeschlossen. Das Meer süßte zum Ancylus-See aus, und der Wasserspiegel hob sich, so daß die Darßer Schwelle überwunden wurde. Dieser See umfaßte schon einen Teil der westlichen Ostsee und entwässerte durch den Großen Belt. Endgültig kam die westliche Ostsee durch die Litorina-Transgression unter Wasserbedeckung.

Nach SCHMITZ (1953) wurde die 21-m-Tiefenlinie am Priwall bei Travemünde etwa um 5500 v. Chr. überschritten, während die 9-m-Linie am Graswarder bei Heiligenhafen etwa um 4000 v. Chr. und die 3-m-Linie etwa um 2500 v. Chr. unter Wasser kam. Heute liegt die Schlickgrenze in der westlichen Ostsee im allgemeinen in 17 bis 20 m Wassertiefe, gelegentlich in geschützten Buchten schon bei 3 bis 4 m. Das heißt aber, daß eine endgültige Sedimentation erst beginnen konnte, nachdem die tiefsten Stellen etwa 17 m unter Wasser gekommen waren, so daß eine Sedimentation in diesem Gebiet erst nach Überflutung der 9-m-Tiefenlinie, also etwa um 4000 v. Chr. einsetzen konnte. Vor diesem Zeitpunkt herrschten Abrasion und Umlagerung des eiszeitlichen Untergrundes. Für das in Suspension aufgenommene Material gab es zwei Wege: entweder blieb es in Suspension oder aber es wurde nach Osten in die tieferen Becken abgeführt.

Diese Entwicklung konnte durch einige Stoßröhrenproben bestätigt werden. In sieben Fällen enthielten sie Geschiebemergel — Sand — Schlick und in zwei Fällen Geschiebemergel — Torf — Sand — Schlick. Daraus folgt, daß die Sedimentation in allen Fällen nach einer Aufbereitungszeit einsetzte.

C. Das Ausgangsmaterial

Bevor eine Bestandsaufnahme der Sedimente am Seegrund gegeben wird, müssen kurz die anstehenden Gesteine, d. h. das in Aufarbeitung befindliche Material, genannt werden:

1. der Geschiebemergel als Trümmerschutt der letzten Vereisung,
2. Kiese, Sande und Beckentone als Schmelzwasserablagerungen des abtauenden Eises,
3. Ton und kieseliger Feinsand des Eozäns in einzelnen aufgepreßten Schollen.

Diese Gesteine werden sowohl in Kliffs als auch auf submarinen Abrasionsflächen angegriffen und ausgewaschen.

II. Die Untersuchungsmethoden

A. Die Probenentnahme

In dem Untersuchungsgebiet wurden während der Sommermonate der Jahre 1951 und 1952 von einem Forschungskutter aus 1377 Proben entnommen. Die Entnahmepunkte lagen

auf Profilen, ihr Abstand betrug im allgemeinen 500 m; lediglich auf dem Puttgarden-Riff wurde er auf 250 m und in dem Gebiet östlich Großenbrode bis Dahme auf 1 sm verändert (Abb. 1: Karte des Stationsnetzes).

Zur Probenentnahme diente ein van-Veen-Bodengreifer, der sich bei den hier angetroffenen Sedimenten gut bewährt hat. Gleichzeitig mit der Grundberührung des Greifers wurde der Standort mittels zweier Sextanten durch Doppelwinkelmessung bestimmt und die Tiefe mit einem Handlot gemessen.

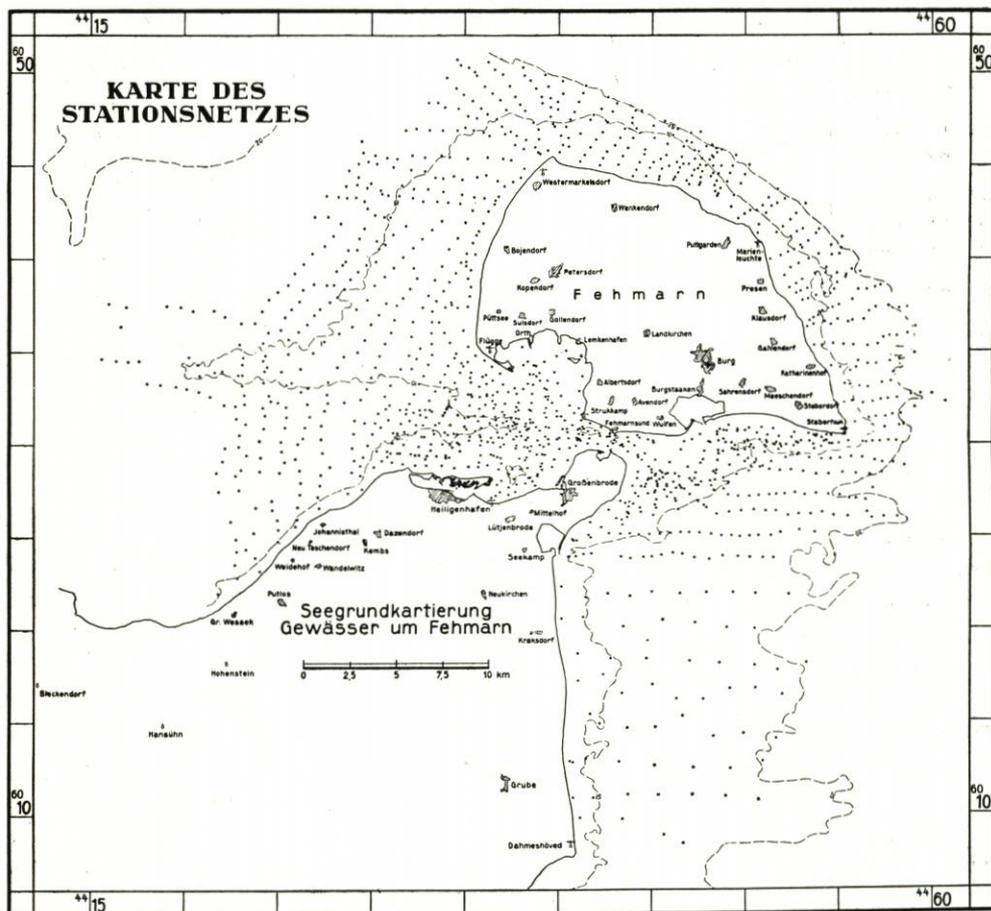


Abb. 1. Karte des Stationsnetzes im Raume Fehmarn

Außerdem konnten dank des freundlichen Entgegenkommens von Herrn Professor Dr. PRATJE noch eine Stoßröhre und ein Unterwegsot benützt werden. Auf eine Beschreibung der Geräte kann hier verzichtet werden (s. PRATJE, 1934 a, 1950 a, 1952 a u. b). Die Anwendung der Stoßröhre erfolgte, um Lagerungsverhältnisse und Mächtigkeiten in einigen Gebieten zu klären. Bei der Arbeit wurde die Röhre so weit hinuntergelassen, daß der Ventilkopf gerade unter der Wasserlinie war, um dann als Freifallot verwendet zu werden. Diese Methode zeitigte bei Wassertiefen von 6 bis 14 m gute Erfolge.

Von der Gewässerkundlichen Untersuchungsstelle beim Wasser- und Schiffsamt Ostsee

wurde für Vermessungszwecke ein Behm-Echograph verwendet. Mit ihm konnten einige Profile gefahren und die Echogramme geologisch ausgewertet werden.

B. Die Korngrößenanalysen

Zu der mechanischen Korngrößenanalyse wurden die Proben getrocknet, geviertelt und 50 g in einer Siebmaschine gesiebt. Die Sedimente wurden dabei in folgende Fraktionen zerlegt:

> 10 mm	}	Kieskomponente
10 — 6 mm		
6 — 2 mm		
2 — 1 mm	}	Grobsandkomponente
1 — 0,5 mm		
0,5 — 0,4 mm	}	Mittelsandkomponente
0,4 — 0,3 mm		
0,3 — 0,2 mm		
0,2 — 0,1 mm		Feinsandkomponente
0,1 — 0,06 mm	}	Mehlsand- = Schlickkomponente
< 0,06 mm		

Erwies sich der Anteil der Fraktion < 0,06 mm > 20 %, so wurde er mit der Pipettmethode geschlämmt und in die Fraktionen

0,06 — 0,02 mm	}	Mehlsand- = Schlickkomponente
0,02 — 0,01 mm		

< 0,01 mm Schluffkomponente zerlegt.

Aus den so gewonnenen Werten wurden auf logarithmisch unterteiltem Papier die Summenkurven und daraus die Histogramme nach der Basis 2 gezeichnet.

Beim Zeichnen der Seegrundkarte entstand die Frage nach der Charakterisierung der Sedimente. Hierzu wird von vielen Bearbeitern der Mittelwert der Korngrößenverteilung (Medianwert, s. S. 69) aus der Summenkurve entnommen und je nach Lage in den oben

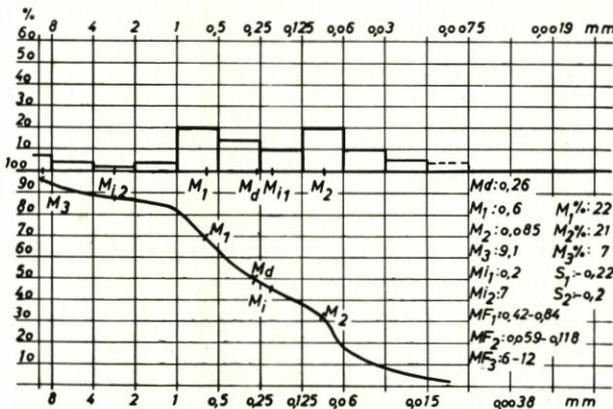


Abb. 2. Probe Nr. 1012. Grobsand mit Schlick (Erläuterungen der Abkürzungen s. S. 69)

angeführten Korngrößenbereichen in die Karte eingetragen. Bei der vorliegenden Untersuchung zeigte sich jedoch, daß dies nur bedingt zulässig ist. Man kann wohl eine symmetrische Korngrößenverteilung durch ihren Medianwert kennzeichnen, da er dort in der Nähe des Maximums liegt. Bei einer asymmetrischen Verteilung ergeben sich aber schon erhebliche Vernachlässigungen gewisser Komponenten (Abb. 2).

In dem Beispiel liegt der Medianwert bei 0,26 mm, d. h. im Mittelsandbereich, er fällt mit kei-

nem besonderen Wert der Verteilung zusammen. Der Grobsand- und der Schlickanteil werden durch ihn vollkommen vernachlässigt. Diese Probe ist aber als Grobsand mit Schlick zu bezeichnen.

Man kann also wohl Sedimente mit engem Korngrößenbereich nach Lage ihres Medianwerts vergleichen. Der Vergleichswert geht aber verloren, sobald sich die Verteilung einer Probenserie mit allen Übergängen auf das ganze Korngrößenintervall erstreckt. Diese Einschränkung gilt nicht nur für den Medianwert, sondern auch für jeden Versuch, stark unterschiedliche Korngrößenverteilungen durch einen Wert zu beschreiben.

Daher wurde bei der vorliegenden Untersuchung der Charakter der Sedimente auf Grund der Prozentanteile in den einzelnen Fraktionen nach folgender Tabelle gekennzeichnet:

Tabelle 1
Kennzeichnung der Sedimente

Korngröße in mm		< 0,02	0,02— 0,06	0,06— 0,1	0,1— 0,2	0,2— 0,5	0,5— 2	2— 10	> 10
Schlick	%	< 20	10—20	> 30	< 15	+	—	—	—
Feinsand schlickig	%	—	> 5	5—20	> 60	< 10	—	—	—
Feinsand	%	—	+	< 10	> 60	< 20	—	—	—
Feinsand grob	%	—	—	< 10	> 50	< 35	< 5	—	—
Mittelsand fein	%	—	—	+	< 40	> 50	< 5	+	—
Mittelsand	%	—	—	—	< 20	> 50	< 25	+	—
Mittelsand grob	%	—	—	—	< 10	> 45	< 35	< 20	—
Grobsand fein	%	—	—	—	+	< 35	> 40	< 15	< 5
Grobsand	%	—	—	—	—	< 30	> 30	< 25	< 10
Grobsand grob	%	—	—	—	—	< 25	> 30	< 30	10—20
Kies	%	—	—	—	—	< 15	< 25	> 30	> 25

+ bedeutet, daß in der betreffenden Fraktion noch ein kleiner Anteil vorhanden sein kann, der zur Charakterisierung des Sediments unwesentlich ist.

C. Die entnommenen Werte

Zur besseren Charakterisierung der Sedimente wurden aus den gezeichneten Kurven folgende Werte entnommen beziehungsweise errechnet:

Median, Md: Schnittpunkt der Kurve mit der 50 %-Abszisse.

Maximum, Ma: Durch Bildung der Differenzkurve (GRY, 1938).

Minimum, Mi: Durch Bildung der Differenzkurve (GRY, 1938).

Maximumsfraktion, MF: Durch Abtragen je einer halben Fraktionsbreite nach rechts und links vom Maximum auf der Summenkurve (GRY, 1938).

Maximumsprozente, M %: Prozentanteil der Verteilung, der in der Maximumfraktion liegt (GRY, 1938).

Sortierungsgrad: $S = \frac{H + V - R}{100}$ (SINDOWSKI, 1938)

H = Hauptfraktion, V = Haupt- + vorhergehende + nachfolgende Fraktion,

R = 100 - H.

Für die Durchschnittskurven wurden außerdem noch folgende Werte ermittelt:

Sortierungsgrad: $S_o = \sqrt{Q_3/Q_1}$ (TRASK)

Q_1 und Q_3 sind das 1. und 3. Quartil (25- und 75 %-Wert)

$Q_3 > Q_1$ (PETTIJOHN, 1949).

Schiefe: $S_k = \frac{Q_3 \cdot Q_1}{Md^2}$ (PETTIJOHN, 1949).

$$\text{Steilheit: } K = \frac{Q_3 - Q_1}{2(P_{90} - P_{10})}$$

P_{90} und P_{10} sind die 90- und 10 %-Werte (PETTIJOHN, 1949).

$$\text{dg-Wert: } dg = \frac{p_1 m_1 + p_2 m_2 + \dots}{100}$$

$p_1, p_2 \dots$ Prozente jeder einzelnen Fraktion; $m_1, m_2 \dots$ mittlere Korngröße jeder einzelnen Fraktion (SIMON, 1952).

Bei der Ermittlung der Werte muß darauf geachtet werden, daß diejenigen, die auf einem Vergleich von Fraktionen beruhen, nur aus dem logarithmischen Maßstab entnommen werden, da nur in ihm alle Fraktionen gleichwertig sind. Eine Ermittlung des Sortierungsgrades darf daher nicht mit den direkt aus der Siebanalyse gewonnenen Prozentwerten vorgenommen werden. Der so gewonnene Wert entspricht nicht der wirklichen Sortierung; da die Fraktionen verschieden breit sind. Die Prozentwerte müssen daher aus den Histogrammen entnommen werden.

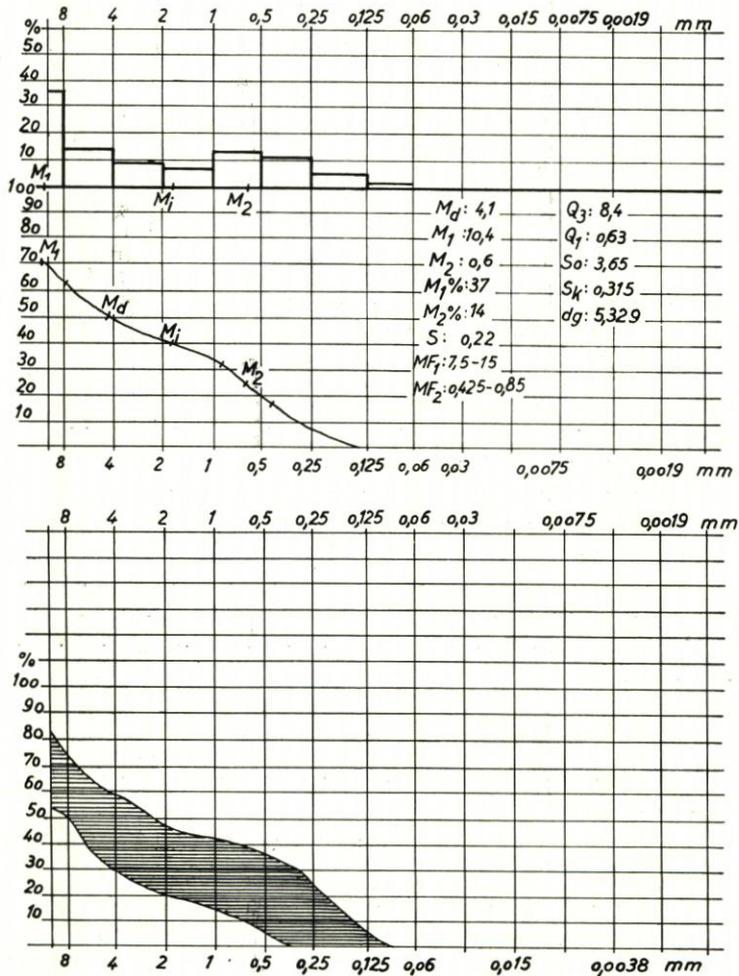


Abb. 3. Kies, Durchschnittskurve — Kies, Variationsbreite

Die Sortierung eines Sediments drückt sich dadurch aus, daß ein Maximum mehr oder weniger stark ausgeprägt ist. Man muß aber bei der Errechnung des Sortierungsgrades wegen der Variationsbreite auch noch die beiden Nebenfraktionen berücksichtigen. Deshalb wurde auch in dieser Arbeit dem Sortierungsgrad von SINDOWSKY der Vorzug gegeben. Derjenige von TRASK dagegen berücksichtigt nur den Kurvenanteil zwischen den beiden Quartilen, so daß unter Umständen nicht einmal die ganze Hauptfraktion einbezogen wird bzw. unwichtige Teile der Kurve den Wert beeinflussen können.

III. Die regionale Verteilung der Sedimente

Die Abbildungen 3 bis 9 zeigen Durchschnittskurven der angetroffenen Sedimente, die aus einer größeren Anzahl von Proben ermittelt wurden. Die Kurven in den Darstellungen der Variationsbreiten sind keine Summenkurven, sondern setzen sich aus den Teilen mehrerer Summenkurven zusammen.

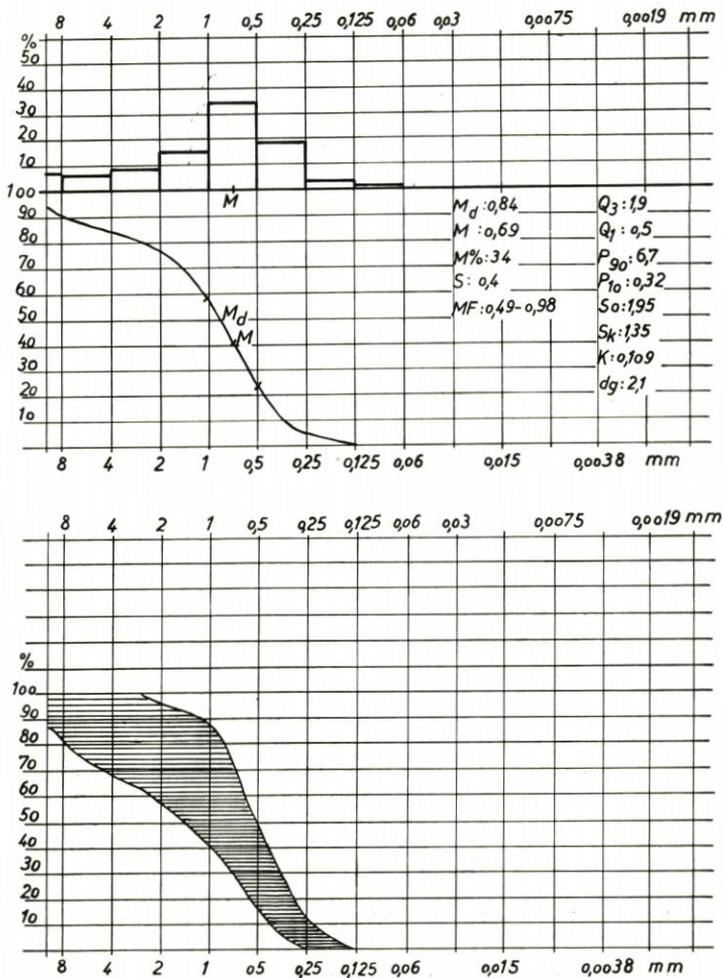


Abb. 4. Grobsand, Durchschnittskurve — Grobsand, Variationsbreite

In den Abbildungen nicht dargestellt ist der Geschiebemergel, der als graublauer fetter Mergel gefunden wurde, aber in einzelnen Fällen durch Verwitterung braun gefärbt war.

Ferner wurde an einigen Stellen Bruchwaldtorf angetroffen. Er lag an der Oberfläche und war nur gelegentlich von einem 1 bis 2 cm mächtigen Sandschleier bedeckt.

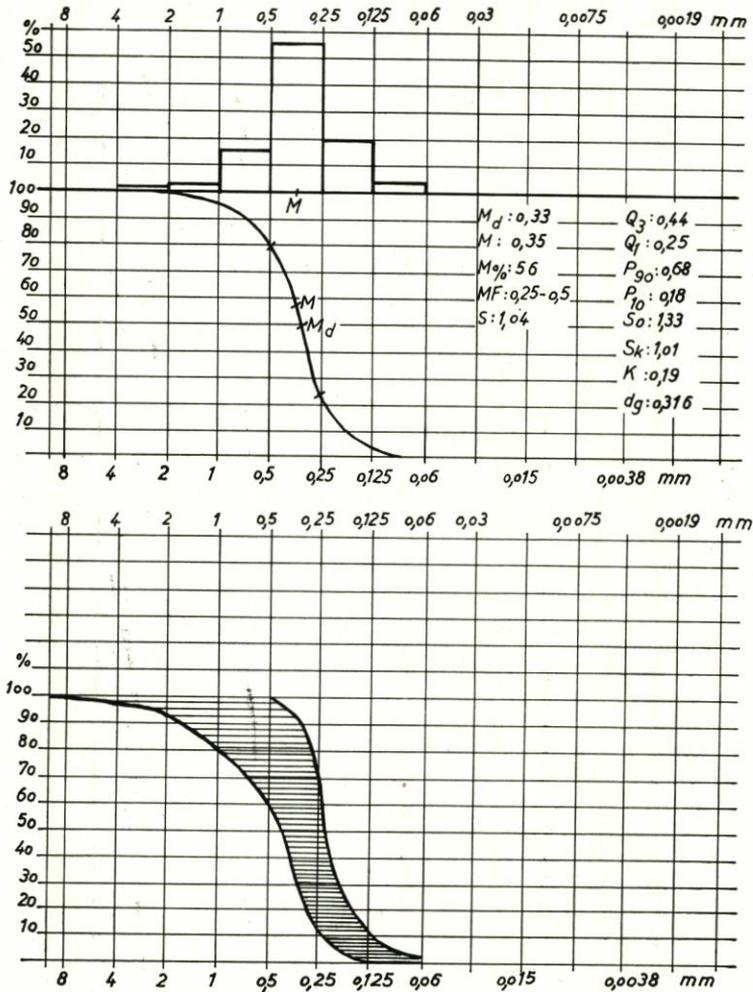


Abb. 5. Mittelsand, Durchschnittskurve — Mittelsand, Variationsbreite

Das Untersuchungsgebiet kann wegen der Verschiedenartigkeit des geologischen und morphologischen Aufbaus in drei Teile, einen westlichen, einen nordöstlichen und einen südöstlichen gegliedert werden (Abb. 10, S. 76: Seegrundkarte).

A. Der Westen

Vor der Westküste Fehmarns breitet sich ein großes Gebiet aus, das aus groben Sedimenten, wie Steinen, Kies, Grobsand und etwas Mittelsand, mit den entsprechenden Übergängen aufgebaut ist. Die hier untersuchten Proben zeichnen sich durch eine schlechte Sortierung aus, haben häufig zwei Maxima und zeigen so den Charakter von Sedimenten, bei

denen der feine Anteil ausgewaschen und nur der grobe Rest liegen geblieben ist. Sie werden kurz als Restsedimente bezeichnet. Ihr Auftreten bedeutet, daß wir es hier mit einer Abrasionsfläche zu tun haben, wofür auch der häufige Fund von Geschiebemergel spricht. Da der nur etwa 20 cm tief eindringende Greifer häufig neben Sand auch Geschiebemergel erfaßte,

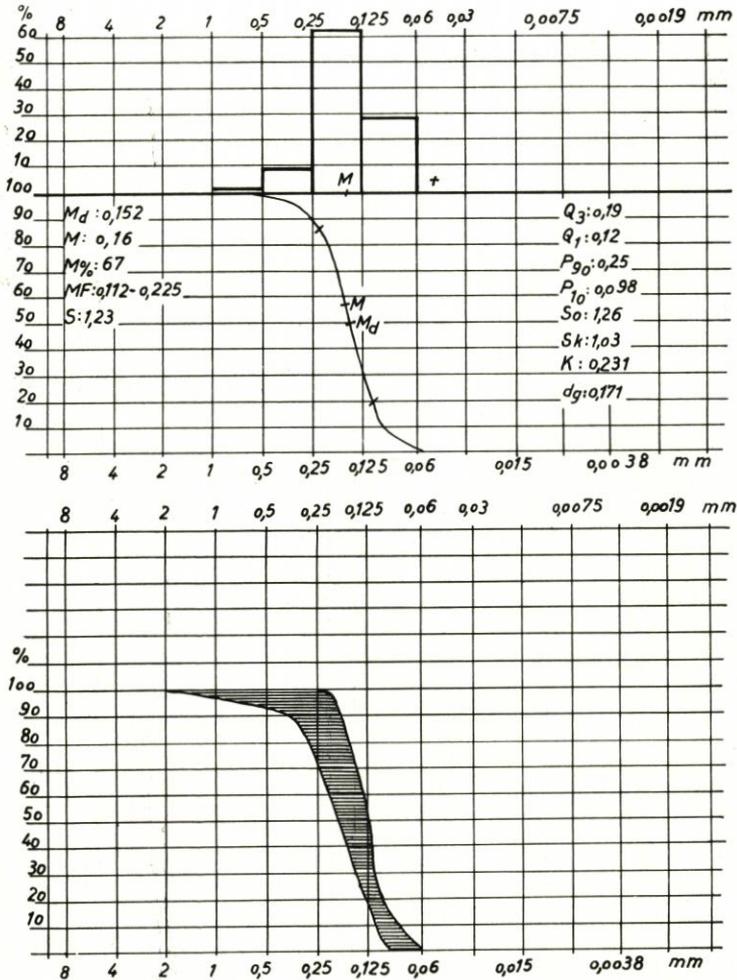


Abb. 6. Feinsand, Durchschnittskurve — Feinsand, Variationsbreite

kann dieser nur von einem dünnen Sandschleier bedeckt sein. Die Westgrenze der Abrasionsfläche konnte aus den in Kapitel I, A erwähnten Gründen nicht ermittelt werden. Nur an einer Stelle wurde sie durch zwei nach Westen vorgetriebene Profile mit der Mud-Zone erreicht.

Nach Süden schließt sich an diese Zone ein Streifen aus Fein- bis Mittelsanden an. Hier findet keine Abrasion mehr statt, sondern wird das von der Abrasionsfläche angelieferte Material weitertransportiert oder abgelagert. In diesen Streifen sind vier kleinere Gebiete mit größerem Material eingelagert, die auch Geschiebemergel enthalten. Sie erheben sich etwa 2 m über ihre Umgebung, so daß hier also Wellen und Strömung noch angreifen und

abradieren können. Weiter südlich folgt dann die Überschneidungszone von Sand zum Schllick und im Anschluß daran ein weit nach Osten vorspringendes Schllickgebiet.

Auf den steilen Anstieg, der dieses Schllickgebiet nach Süden begrenzt, folgt unmittelbar ein Streifen von Grobsand, Kies und Steinen, der vor der Küste Wagriens verläuft und die

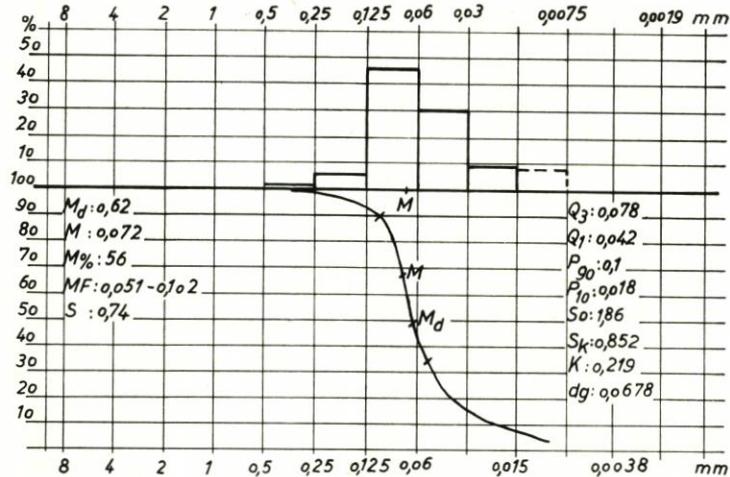


Abb. 7. Mehlsandiger Schllick, Durchschnittskurve

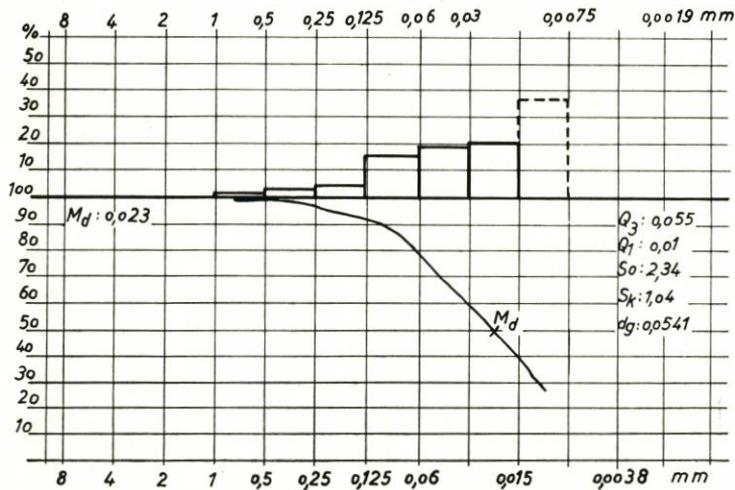


Abb. 8. Schluffiger Schllick, Durchschnittskurve

im Abbruch befindlichen Kliffs von Putlos, Johannesthal und Heiligenhafen begleitet. Auch die hier entnommenen Proben zeigen allgemein den Charakter von Restsedimenten.

In dem Gebiet zwischen Fehmarn und dem Festland sind die Verhältnisse etwas verworrener. Vor der Festlandküste schließt sich unmittelbar an die groben Sedimente vor dem Heiligenhafener Kliff ein breiter Streifen mit Mittel- bis Feinsanden an. In ihm werden die Körnungen von Westen nach Osten immer feiner und gehen östlich des Graswarders in Schllick über.

In diesem Schllickgebiet wurden sechs Proben mit der Stoßröhre entnommen. Die Mächtigkeit

keit des Schlicks ist beträchtlich: in einer Probe aus der Mitte konnte bei einer Eindringtiefe von 2,10 m und einer Probenlänge von 1 m das Liegende nicht erreicht werden. Am Graswarder ergab eine Probe an der Sand-Schlickgrenze eine Wechsellagerung von Sand und Schlick. Hier wird also abwechselnd Sand und Schlick sedimentiert. Bemerkenswert ist aus diesem Gebiet eine Probe mit dem Kontakt Torf-Sand-Schlick. Weitere Torfproben konnten aus dem Fehmarnbelt und östlich Fehmarn gewonnen werden.

Die gleiche Abfolge wie vor den Wardern findet sich an der Südküste Fehmarns vor dem Krumsteert. Der Abschluß wird hier von dem Schlickgebiet in der Orther Bucht gebildet.

Ein drittes Schlickgebiet liegt an der Ansteuerungstonne Fehmarnsund-West. Es breitet sich am Ende der bereits oben erwähnten tiefen Rinne aus, die hier in 8 m Wassertiefe ausstreicht.

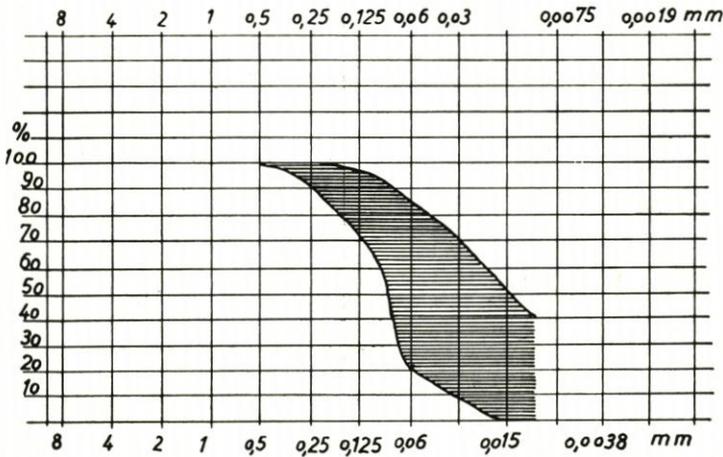


Abb. 9. Variationsbreite des Schlicks

Westlich der Großenbroder Halbinsel befinden sich auf dem in der Seekarte als Großenbroder Steinriff bezeichneten Gebiet wieder grobe Sedimente, die als Restsedimente aufzufassen sind. Auch Geschiebemergel tritt hier häufig auf und konnte in Rippen anstehend beobachtet werden.

Eine weitere kleine Abrasionsfläche liegt in der Orther Bucht zwischen Struckkamp-Huk und der Ziegelei Gold. Auch hier steht ein kleines Kliff im Abbruch.

Im Fehmarnsund liegt hauptsächlich stark reduzierter schlickiger Feinsand, auf dem größtenteils ein *Mytilus*pflaster gewachsen ist, das ihn vor Auswaschung schützt. In einigen tieferen Löchern wird auch reiner Schlick sedimentiert.

Im Sund wurden in einem Längsprofil in Fahrwassermite fünf Stoßröhrenproben entnommen. Die Schlickmächtigkeit schwankt zwischen Spuren und 35 cm. Der Schlick liegt häufig auf einer dünnen Sandlage, unter der Geschiebemergel folgt.

Im äußeren Teil der natürlichen Rinne und in dem daran anschließenden Teil des Grünen Grundes wurden keine Proben entnommen, da hier bei der Ausbaggerung der Fahrinne Baggergut versenkt worden ist.

B. Der Nordosten

Die Grenze zwischen dem Nordosten und dem Westen fällt auf der Seegrundkarte (Abb 10) mit dem Beginn der Mittel- bis Feinsande nordwestlich von Wenkendorf zusammen.

Diese bilden im Fehmarnbelt bis zur 20-m-Tiefenlinie eine Randzone, in die nordöstlich von Wenkendorf eine kleinere Fläche mit groben Sedimenten, Steinen und Geschiebemergel eingelagert ist. Sie bildet eine kleine Abrasionsfläche, auf der auch Torf gefunden wurde.

Vor der gesamten Ostküste Fehmarns erstreckt sich ein breiter Streifen mit Grobsand bis Kies, der an einigen Stellen unmittelbar neben Schlick lagert, an anderen langsam in diesen

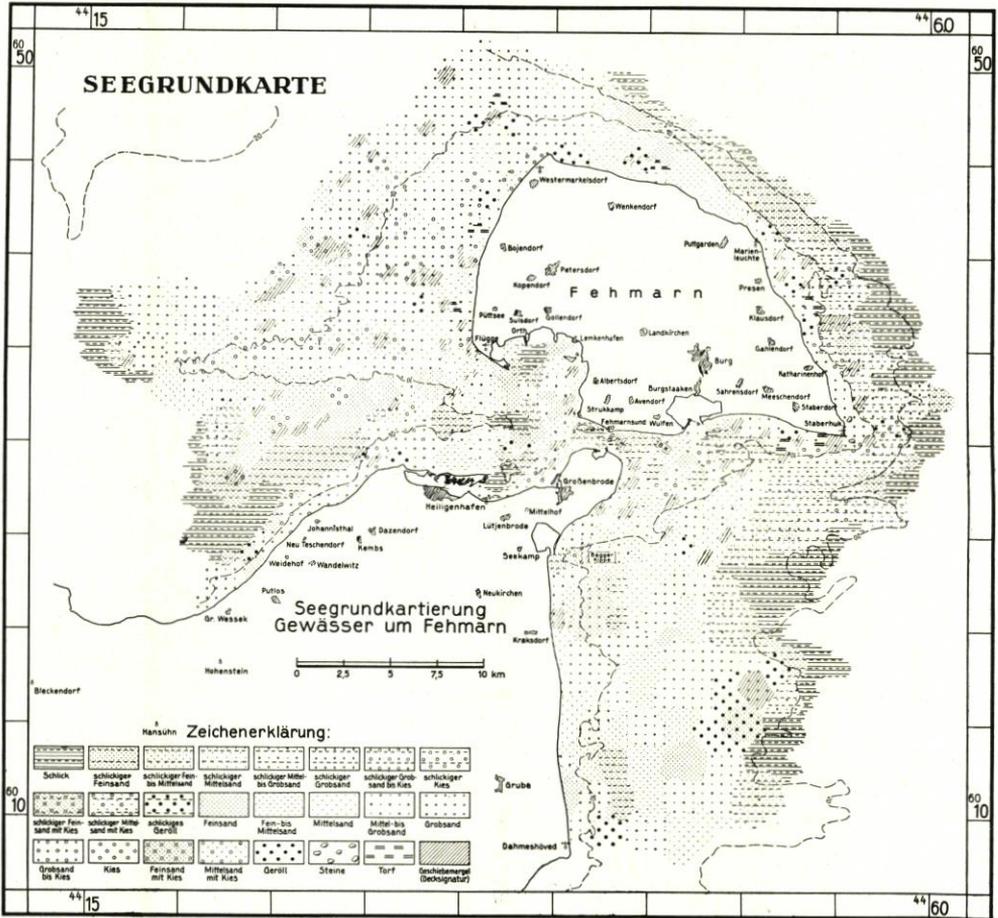


Abb. 10. Seegrundkarte um Fehmarn

übergreift. Dies sind Restsedimente auf einer die Küste begleitenden Abrasionsfläche. Der Schlick tritt hier etwa zwischen 16 und 20 m Tiefe auf. Östlich von Klausdorf breitet sich ein ausgedehntes Torflager aus.

An der Sand-Schlick-Grenze wurden hier vier Stoßröhrenproben entnommen. Zwei von ihnen enthielten einen Transgressionskontakt von eoänem Tarras-Mittelsand-Schlick.

Die Sedimentverteilung in dem Gebiet südlich von Fehmarn ist sehr verworren. Der Schlick greift in einer weit nach Westen vorspringenden Nase bis vor die Hafeneinfahrt von Burgstaaken. Grobe Sedimente treten in einem Streifen westlich von Staberhuk auf, wo wieder ein Torfgebiet eingelagert ist. Weiter südlich bis zur Höhe des Fährhafens von Großenbrode-

Kai treten vereinzelt mehr oder weniger große Flecken von groben Sedimenten in Mittelsanden auf.

C. Der Südosten

Dieser Abschnitt des Untersuchungsgebietes bildet ein Gegenstück zum westlichen Teil. Die Sagas-Bank ist eine Abrasionsfläche mit zum Teil groben Restsedimenten. Sie ist aber vom Festland durch eine tiefer liegende Rinne abgetrennt, in der Schlick sedimentiert wird, so daß es zur Bildung von Übergangssedimenten kommt. Die Schlickzone beginnt auch hier in etwa 18 bis 20 m Tiefe.

Da dieses Gebiet nur kartiert wurde, um den Anschluß an die Lübecker Bucht zu gewinnen, konnte hier der Probenabstand größer gewählt werden. Daher muß auf nähere Angaben über diesen Teil verzichtet werden.

IV. Geologische Deutung

A. Die Sedimentationszonen

PRATJE (1939 und 1948 a) hat auf Grund seiner allgemeinen Untersuchungen in der gesamten Ostsee fünf Sedimentationszonen unterschieden:

1. die küstennahe Sandanhäufungszone,
2. die Abtragungszone mit den Restsedimenten,
3. die küstenferne Sandanhäufungszone,
4. die sedimentationsarme oder -freie Zone,
5. die Schlickgebiete.

Wie sind nun diese Zonen in dem Untersuchungsgebiet ausgebildet? (Abb. 11, Karte der Abtragungs- und Sedimentationsgebiete).

1. Die küstennahe Sandanhäufungszone ist im Untersuchungsgebiet als Riffzone ausgebildet und gehört als solche nicht mehr zum Aufgabenbereich der Seegrundkartierung, sondern wurde von BRAND (1955) sedimentpetrographisch bearbeitet und ist daher in der Abbildung 11 nicht gesondert aufgeführt. Sie reicht bis in etwa 3 bis 4 m Wassertiefe. Diese Zone enthält außerordentlich gut sortierte Mittel- bis Feinsande, die hauptsächlich aus dem Küstenabbruch stammen und von einem mehr oder weniger küstenparallelen Brandungsstrom an der Küste entlangtransportiert werden.

2. Die Abtragungszone mit den Restsedimenten enthält groben Sand, Kies, Steine, gelegentlich etwas Mittelsand und Geschiebemergel. Diese sind die autochthonen Restsedimente. Durch die in der Abtragungszone herrschende Wellenbewegung und Strömung wird das Material hier ständig ausgewaschen. Dadurch werden die groben Anteile so lange angereichert, bis sie die darunter liegenden feinen vor weiterer Abrasion schützen.

Die Abtragungszone mit den Restsedimenten begleitet die Küste fast durch das gesamte Untersuchungsgebiet. Sie reicht etwa bis in 10 bis 14 m Wassertiefe. Lediglich zwischen dem Festland und Fehmarn und im Fehmarnbelt ist sie nicht deutlich ausgebildet oder geht korngrößenmäßig in andere Zonen über, d. h. gleiche oder ähnliche Sande können mehrere Zonen überdecken.

Auch außerhalb dieser Zone kommen Gebiete mit Restsedimenten vor, so z. B. drei kleinere Flächen in der Hohwachter Bucht und die Sagas-Bank. Diese sind Aufragungen über ihre Umgebung, auf denen also Abtragung stattfinden kann.

Durch einen Vergleich mit dem Geschiebemergel läßt sich der Grad der Auswaschung

der Restsedimente bestimmen. Nachstehende Tabelle stellt aus dem Untersuchungsgebiet die durchschnittliche Kornverteilung des Geschiebemergels mit der der einzelnen Restsedimente zusammen.

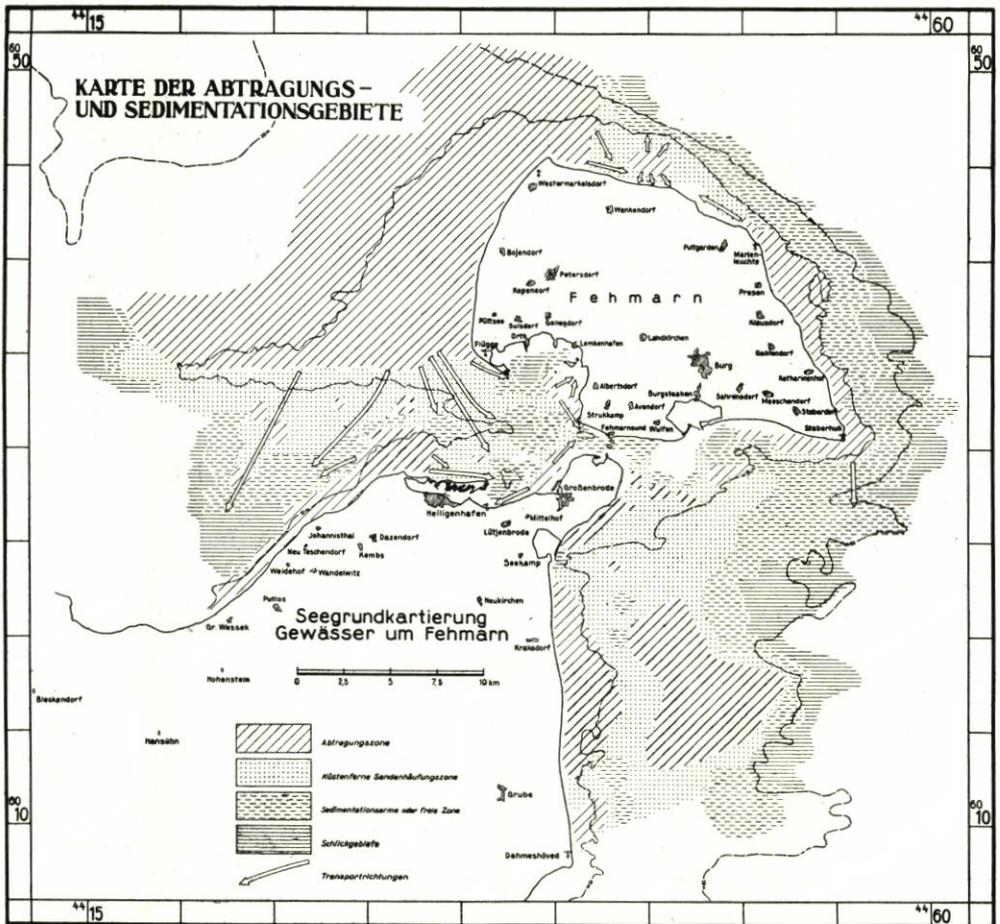


Abb. 11. Karte der Abtragungs- und Sedimentationsgebiete

Tabelle 2
Durchschnittliche Körnungen von Geschiebemergel und Restsedimenten

	Geschiebemergel	Kies	Grobsand	Mittelsand
< 0,02	38 0/0	0 0/0	0 0/0	0 0/0
0,02—0,1	25 0/0	1 0/0	1 0/0	1 0/0
0,1—0,2	14 0/0	6 0/0	3 0/0	13 0/0
0,2—0,5	13 0/0	13 0/0	21 0/0	67 0/0
> 0,5	10 0/0	79 0/0	75 0/0	19 0/0

Diese Tabelle zeigt schon, daß nur die feinsten Fraktionen ausgewaschen worden sind. Schaltet man nun den wegen seiner Variabilität störenden Einfluß der Grobsand- und Kiesfraktion aus, indem man ihn von der Verteilung abzieht und dann wieder auf 100 0/0 um-

rechnet, so kann man deutlicher erkennen, wie weit der Auswaschungsprozeß schon fortgeschritten ist (JARKE, 1948).

Tabelle 3
Die durchschnittlichen Körnungen von Geschiebemergel und Restsedimenten nach Ausschaltung der Grobsand- und Kiesfraktion

	< 0,02	0,02—0,1	0,1—0,2	0,2—0,5
1. Geschiebemergel	42,1	27,8	15,6	13,0
2. Kies	0	2,3	31,0	66,7
G—K	+ 42,1	+ 25,5	— 15,4	— 52,2
ausgewaschen %	100	91,7	—	—
3. Grobsand	0	4	12	84
G—Gs	+ 42,1	+ 23,8	+ 3,6	— 69,5
ausgewaschen %	100	85,6	23,1	—
4. Mittelsand	0	1,2	16,1	82,7
G—M	+ 42,1	+ 26,6	— 0,5	— 68,2
ausgewaschen %	100	95,7	—	—

G—K = Geschiebemergel minus Kies; G—Gs = Geschiebemergel minus Grobsand;
G—M = Geschiebemergel minus Mittelsand.

Aus Tabelle 3 geht eindeutig hervor, daß der Kies am Boden der Ostsee schon fast vollständig ausgewaschen ist. Beim Grobsand dagegen ist die Auswaschung noch nicht beendet, während der Mittelsand kaum angegriffen worden ist. Er tritt auch auf den Abrasionsflächen nur sehr untergeordnet in Erscheinung. Es werden also alle Fraktionen < 0,2 mm mehr oder weniger vollständig ausgewaschen. Gelegentlich kann aber auch bei extremen Wetterlagen ein Teil der Mittelsandfraktion ausgewaschen werden, wie es die Variationsbreite des Kieses zeigt.

Wird über einen Kies während einer bestimmten Wetterlage feineres Material hinwegtransportiert, so wird es bei Beendigung dieser Wetterlage zwischen dem Kies sedimentiert. Daraus entstehen dann einheitliche Sedimentlagen mit zwei Maxima in ihrer Korngrößenverteilung. Dies sind also grobe Restsedimente, die von feinerem Material von verschiedener Zusammensetzung und Menge überlagert worden sind. Man kann nun durch das Minimum einer solchen Verteilung einen Schnitt legen und dann beide Teile, den gröberen wie auch den feineren, auf 100 % umrechnen und als ein Sediment für sich betrachten. Führt man diese Berechnung bei der Durchschnittskurve des Kieses durch, so bekommt man auf diese Weise ein Bild über die Zusammensetzung des Endprodukts der Auswaschung. Wie die so erhaltenen Summenkurven zeigen (Abb. 12), verbleibt ein grober Kies mit einem Mittel- bis Grobsand. Diese Berechnung bestätigt also durchaus die Annahme von JARKE (1948).

3. Die küstenferne Sandanhäufungszone enthält gutsortierte Fein- bis Mittelsande. Sie umsäumt die Abtragungszone, von der sie auch das Material aufnimmt, in einem mehr oder weniger breiten Gürtel. In der küstenfernen Sandanhäufungszone wandert der Sand zur Tiefe ab und wird dabei nach Korngrößen sortiert abgesetzt. In dieser Zone herrscht also ständige Ab- und Umlagerung. Hierdurch wird das Sediment sortiert, wobei der Sortierungsgrad von der Abrasionsfläche aus in der Transportrichtung besser wird, um dann in den Sedimentationsgebieten wieder kleiner zu werden.

Die küstenferne Sandanhäufungszone ist im gesamten Untersuchungsgebiet deutlich ausgebildet und konnte lediglich westlich der großen Abrasionsfläche nicht erfaßt werden. Diese Zone erscheint im gesamten Ostgebiet nicht auf der Karte. Das liegt wohl daran, daß sie hier

nur sehr schmal ist und daher bei dem gewählten Probenabstand nicht gefunden werden konnte, oder hier gar nicht vorhanden ist. Die küstenferne Sandanhäufungszone reicht bis in etwa 15 bis 16 m Tiefe.

PRATJE (1939 und 1948 a) konnte eine Abhängigkeit der Verbreitung der küstenfernen Sandanhäufungszone von der Strömungsrichtung feststellen. Da die vorherrschenden westlichen Winde Strömungen in der gleichen Richtung erzeugen, ist diese Zone auf den Ostflanken der aufragenden Bänke erheblich breiter. Damit ist auch erklärt, daß sie westlich Fehmarn auch dort fehlt, wo die Mud-Zone erfaßt wurde; denn der Sand wird hier auf die Küste zu und in den noch später zu besprechenden Richtungen transportiert, während nach Westen nur wenig Material wandert.

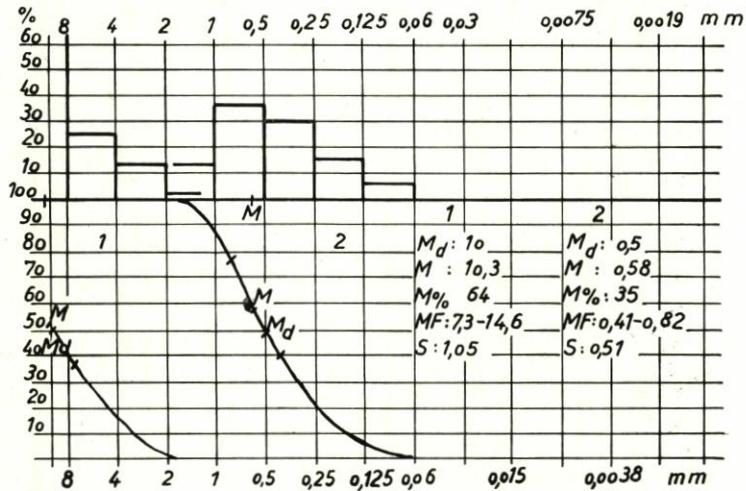


Abb. 12. Korngrößenverteilung des Kieses (s. Abb. 3), im Minimum geteilt

4. Die sedimentationsarme oder -freie Zone schließt normalerweise an die küstenferne Sandanhäufungszone an, kann aber auch unmittelbar neben der Abtragungszone liegen. Die Sedimente dieser Zone zeigen eine Korngrößenverteilung, in der grobes und feines Material, d. h. Kies, Sand und Schluff zusammen vorkommen. Das kann dadurch erklärt werden, daß in dieser Zone langsam die Sedimentation auf die Restsedimente der Abtragungszone übergreift. Die Wasserbewegung ist hier gerade noch so groß, daß sie eine Sedimentation ganz oder teilweise verhindert, eine Abrasion aber nicht mehr zuläßt (PRATJE, 1948 a). So entstehen diese unausgeglichene und uneinheitliche Sedimente. Die Mächtigkeiten in diesem Gebiet können nicht sehr groß sein, da im Greifer schon häufig der diluviale Untergrund (Geschiebemergel) gefördert wurde.

Diese Zone ist ein Beispiel dafür, daß die Sedimentgrenzen keine scharfen Linien, sondern Zonen von verschiedener Breite bilden, in denen die eine oder andere Komponente überwiegt. Sie stellt also den Übergang von der Sand- zu der Schlicksedimentation dar.

5. Die Schlickgebiete nehmen die tiefsten Stellen der einzelnen Abschnitte ein, in denen das Wasser so ruhig ist, daß auch sehr feines Material der Abrasionsflächen und des Küstenabbruchs zur Ablagerung kommt. Dieses sind die Mehlsand-, Schluff- und Tonfraktionen, welche die Schlicke aufbauen. Der Schlick stellt nach der Definition von JARKE (1948) in frischem Zustand einen zähflüssigen, nach Schwefelwasserstoff riechenden Schlamm dar, der etwa 8 bis 25 % organische Substanz enthält. An der getrockneten Probe erkennt man den

in Wirklichkeit schluffigen Charakter dieses Sediments. Im Schlick wurde häufig das schon von PRATJE (1939) genannte Normalprofil gefunden: oben eine dünne (bis 2 cm mächtige) braune, oxydierte und sehr weiche Lage. Sie geht nach unten mit sehr scharfer Grenze in eine durch Reduktion blau-schwarze, etwas festere und nach Schwefelwasserstoff riechende Schicht über. Darunter folgt mit mehr oder weniger scharfer Grenze eine ziemlich fest gepackte, schmutzigrüne Schicht, die nach unten fester und im Grün heller wird. An der Grenze zum Liegendn ist der Schlick hellgrün. Die Sedimentationsgebiete beginnen im Untersuchungsgebiet etwa zwischen 17 und 20 m Tiefe. Lediglich in den durch das Land und durch Buchten geschützten Stellen steigt die Grenze bis auf etwa 3 m an.

Über die Mächtigkeit des Schlicks kann hier nur wenig ausgesagt werden, da die Stoßröhrenproben lediglich am Rande der Schlickgebiete das Liegende erreichten. Nach PRATJE (1939) kann man allgemein in der südlichen Ostsee eine Schlickmächtigkeit von etwa 2 bis 3 m annehmen.

Die Ausbildung der fünf verschiedenen Sedimentationszonen ist stark vom Relief des Seegrundes abhängig. So kann die Abtragungszone mit den Restsedimenten vor der Westküste Fehmarns besonders breit sein, weil der Boden nur ganz langsam nach Westen abfällt. An den anderen Küsten, z. B. der Nordküste Wagriens oder der Ostküste Fehmarns, fällt der Boden erheblich steiler ab. Hier ist die Abtragungszone auch erheblich schmaler. Daher kann angenommen werden, daß das Ende der großen Abrasionsfläche westlich Fehmarns von der Untersuchung wohl fast erreicht worden ist, da bald ein steiler Abfall zu größeren Tiefen, bis auf 18 m folgt.

Auch die küstennahe und die küstenferne Sandanhäufungszone sind in ihrer Verbreitung sehr von der Morphologie abhängig. Beide Zonen sind um so breiter, je geringer die Neigung des Meeresbodens ist.

Man darf also diese Zonen nicht generell mit bestimmten Wassertiefen zusammenlegen, da nicht sie, sondern die Neigung des Meeresbodens ihre Verbreitung bedingt. Dies geht auch aus einem Vergleich mit der Arbeit von WIRTZ (1949) hervor. Er hat an der pommerschen Küste festgestellt, daß die küstennahe Sandanhäufungszone bis zu 10 m Tiefe reicht, während die Abtragungszone bis in 40 m Tiefe hinuntergreift. Die Zahlenangaben von JARKE (1948) dagegen nähern sich schon mehr den hier gefundenen Ergebnissen. Daraus ergibt sich also, daß die Verbindung dieser fünf Sedimentationszonen mit Wassertiefen nur örtlichen Wert hat. Sie gibt eher einen Aufschluß über die Neigung des Seegrundes, kann dann aber auch zu Vergleichen herangezogen werden.

Die regionale Verteilung zeigt also, daß die von PRATJE in seinen Untersuchungen für die gesamte Ostsee ermittelten Zonen auch in unserem räumlich begrenzten und küstennahen Arbeitsgebiet deutlich zu unterscheiden sind. Wie diese Untersuchung zeigt, erfassen sie auch die Sedimentationsbedingungen in kleineren Gebieten, wenn sie mit einem genügend engen Probennetz belegt werden. Dadurch erhalten sie aber eine größere Bedeutung. Es erscheint daher durchaus berechtigt, diese Zonen auch ganz allgemein anzuerkennen.

Die Namen dieser Zonen sind rein genetische, doch kann die Benennung einiger von ihnen, wie die der „küstennahen Sandanhäufungszone“, zu Fehldeutungen Anlaß geben. In ihr findet nämlich keine dauerhafte Sandanhäufung statt, sondern der Sand wird lediglich parallel zur Küste bewegt. Daher ist es wohl zweckmäßiger, diese Zone als küstennahe Sandwanderzone zu bezeichnen.

Auf der Abtragungszone herrscht in erster Linie Abrasion, d. h. alle losen und frisch gelösten Teilchen werden abtransportiert. Wird an einer Stelle abradiert, so wird das dort aufgenommene Material über die Abtragungszone hinwegtransportiert.

In der küstenfernen Sandanhäufungszone findet eine für die heutigen meteo-

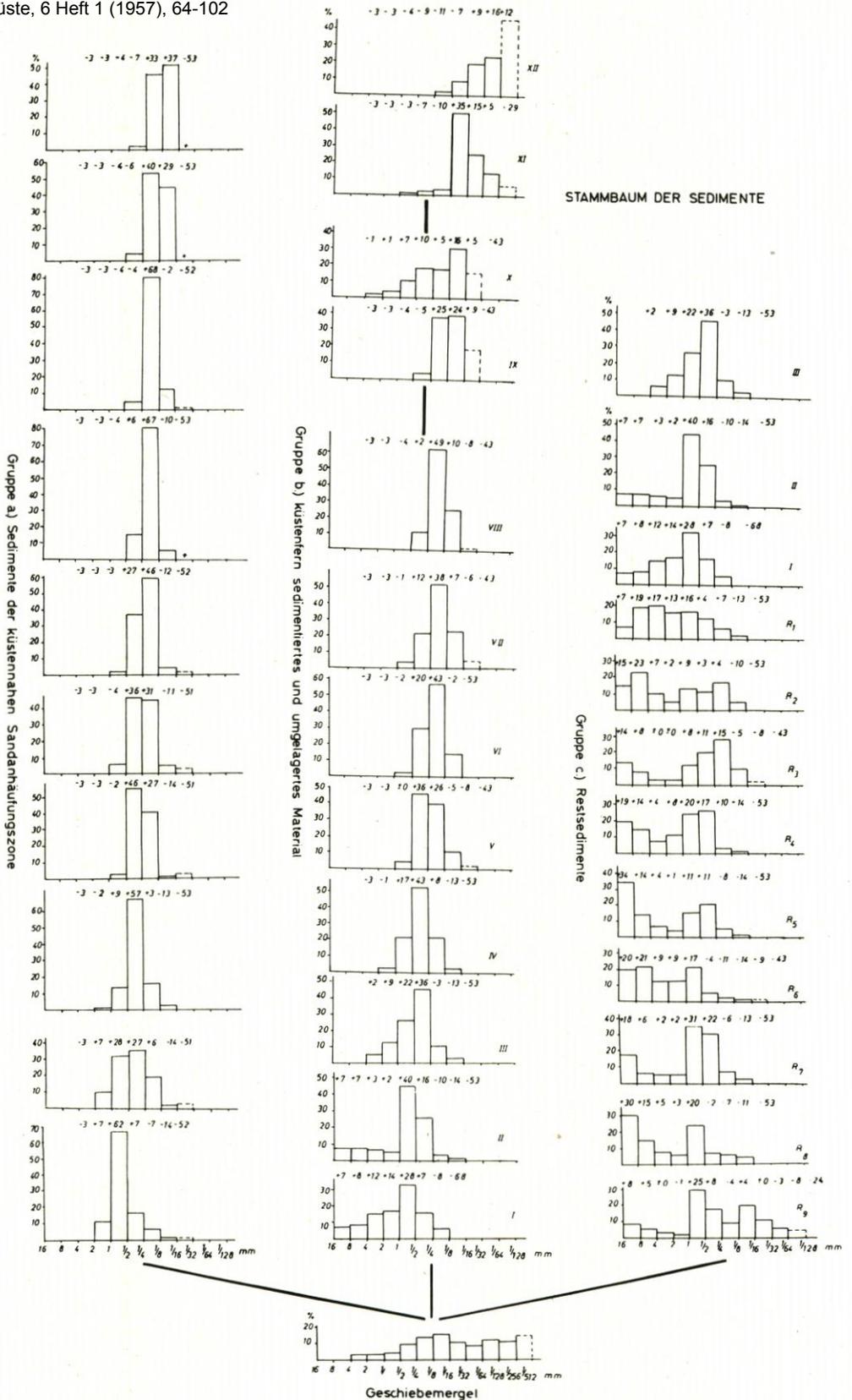


Abb. 13. Stammbaum der Sedimente

rologischen und hydrologischen Bedingungen endgültige Sandanhäufung statt. Sie nimmt den gesamten Sand auf, der von der Abtragungszone hierher geliefert wird. Dieser wird dann in ihr oberflächlich umgelagert und nach Korngrößen getrennt.

Die sedimentationsarme oder -freie Zone ist ein reines Übergangsgebiet vom Sand zum Schllick. In ihr wird wegen der sehr geringen Wasserbewegung außer den feinsten Fraktionen, die in Suspension bewegt werden, nichts transportiert. Daher darf sie nicht als Durchwanderzone aufgefaßt werden.

B. Der Stammbaum der Sedimente

1. Die Einstufung der Histogramme — Die gewählten Fraktionen bieten für die Korngrößen viele Verteilungsmöglichkeiten. Bei der Betrachtung der Histogramme zeigte sich jedoch die Wiederkehr bestimmter Typen, so daß sich von den 1377 Proben alle, bis auf 26 Stück, in 23 verschiedene Gruppen zusammenfassen ließen. Dabei wurde nach folgenden Gesichtspunkten verfahren: Die Histogramme, die ihr Maximum in der gleichen Korngrößenfraktion hatten, wurden zu einer Gruppe zusammengefaßt. Diese Gruppen wurden dann je nach ihrer Schiefe zum Groben oder zum Feinen hin noch weiter unterteilt. Die symmetrischen Verteilungen wurden gesondert zusammengefaßt und in die Reihe eingepaßt. So konnte ein „Stammbaum“ (Abb. 13) aufgestellt werden, aus dem die Entstehung der einzelnen Sedimente leicht zu übersehen und abzuleiten ist. Dieser so gewonnene Stammbaum spaltet sich in drei Äste auf: a) das sehr gut sortierte Material der küstennahen Sandwanderung, b) das küstenfern umgelagerte und sedimentierte Material und c) die Restsedimente.

Die kennzeichnenden Unterschiede dieser drei Gruppen erhält man durch einen Vergleich mit dem Ausgangsgestein, nämlich den Sedimenten der Eis- oder Späteiszeit. Der Aufbau der jüngeren Sedimente im Untersuchungsgebiet muß im Rahmen der Zusammensetzung dieses Ausgangsgesteins liegen und sich daraus ableiten lassen. Es hat sich nun gezeigt, daß sich alle 23 Gruppen auf die Kornverteilung im Geschiebemergel zurückführen ließen. Diese wurde daher an die Wurzel des Stammbaums gestellt. Durch diesen Vergleich werden Anreicherung bzw. Auswaschung in den einzelnen Fraktionen sichtbar. Die Zahlen in der Abbildung sind die Differenzen der Anteile der jeweiligen Proben zu den entsprechenden Fraktionen im Geschiebemergel.

Es ergeben sich folgende Charakteristika: Die Proben der Gruppe a) zeichnen sich durch eine sehr gute Sortierung aus, die durch ein starkes Maximum und eine nur zwei bis vier Fraktionen umfassende Verteilung ausgeprägt ist. Die Fraktionen $< 0,125$ mm sind bis auf zwei Proben ziemlich stark ausgewaschen, während die anderen sehr stark angereichert sind. Die Proben mit den feinsten Kornfraktionen leiten schon zu den Übergangssedimenten (Nr. IX) über. Die Proben dieser Gruppe entstammen der küstennahen Sandwanderzone (Riffzone) und sind von Herrn Dr. G. BRAND zur Auswertung überlassen worden.

Die Gruppe b) stellt eine vollständige Abfolge vom Grobsand bis zum schluffigen Schllick dar. Dabei vermitteln die Proben I bis III zur Gruppe c) und sind deshalb dort noch einmal aufgeführt und werden dort auch besprochen. Bei den Proben IV bis VIII unterliegen die Fraktionen $< 1/16$ mm der Auswaschung. Eine Anreicherung beschränkt sich stets auf drei Fraktionen in dem Bereich von $1/16$ bis 1 mm. Die Sortierung nimmt dabei von der gröberen zur feineren Probe zu, in dem Stammbaum also von unten nach oben. Diese Proben entstammen der küstenfernen Sandanhäufungszone.

Die Proben IX und X vermitteln zwischen den eben besprochenen, sich in ständiger Umlagerung befindlichen Proben und den sedimentierten Schllick. Die Sortierung nimmt ab, und die Verteilungskurve wird dadurch breiter. Eine Anreicherung tritt in den Fraktionen

$> 1/32$ mm auf. Sie entstammen der sedimentationsarmen oder -freien Zone, wo diese an die küstenferne Sandanhäufungszone grenzt.

Die Proben XI und XII sind Schlicke, wie sie in den ruhigen Gebieten sedimentiert werden. Sie zeichnen sich durch eine starke Anreicherung in den Fraktionen $< 1/8$ mm aus, während die größeren Fraktionen nur in ganz geringem Maße vertreten sind. Die Sortierung dieser Proben ist mäßig.

In der Gruppe c) werden die Histogramme der groben Restsedimente zusammengefaßt. Sie weisen im allgemeinen eine Anreicherung in den Fraktionen $> 0,25$ mm auf. Die feineren sind dagegen mehr oder weniger stark ausgewaschen. Nur vier Proben zeigen ein Maximum, eine weist drei, alle anderen aber zwei Maxima auf. Davon liegt das eine in der Kiesfraktion, während das andere in der Grob-, Mittel- oder Feinsandfraktion ausgebildet sein kann. Damit ist eine Verschlechterung der Sortierung verbunden. Die hier eingehaltene Reihenfolge stellt keine genetische Abfolge wie in der anderen Gruppe dar, da sich eine solche dem Charakter dieser Sedimente entsprechend nicht aufstellen läßt. Es soll lediglich ein Überblick über die im Untersuchungsgebiet angetroffenen Restsedimente gegeben werden.

Wie bereits oben erwähnt, konnten 26 Proben nicht eingestuft werden. Ihre Histogramme zeigen allgemein den Charakter der Restsedimente, nur daß sie in keine der ausgeschiedenen Gruppen hineinpassen. Ein Teil von ihnen weist einen großen Schlickanteil auf. Sie gehören der sedimentationsarmen oder -freien Zone an. Aus der regionalen Verbreitung dieser Proben geht hervor, daß sie sich über diese und die Abtragungszone verteilen, so daß nirgends eine Anreicherung auftritt.

2. Die Transportrichtungen — Jeder Materialtransport ist abhängig

1. von einem aufbereitungsfähigen und transportablen Material,
2. von der Entwicklungsmöglichkeit aufbereitender und verfrachtender Kräfte (JARKE, 1948).

Das zur Verfügung stehende Material wurde schon eingehend besprochen. Als aufbereitende und verfrachtende Kräfte kommen Wellen, Turbulenz und Strömungen in Frage. Die senkrecht wirkenden Kräfte lockern die Bodenteilchen in ihrem Zusammenhang und heben sie an, so daß sie dann abtransportiert werden können. Die Körner werden nun je nach der Bewegungsgröße des Wassers und ihrer Korngröße entweder als Rollfracht am Boden oder aber in einer zwischen dieser und dem Schweb vermittelnden Art, dem intermittierenden Schweb, bewegt. Eine Wasserbewegung von gewisser Stärke kann nur Material von einer bestimmten Korngröße abwärts transportieren. Der Sand kommt nur dann zur Ruhe, wenn die Stromstärke und die durch Wellen und Turbulenz hervorgerufene Wasserbewegung einen bestimmten Wert unterschreiten. Daher fallen bei nachlassender Wasserbewegung bestimmte Korngrößen aus. Das Material erfährt so eine Sortierung, und man kann daher aus der Änderung der Korngrößen die Transportrichtungen ermitteln. Doch lassen sich die feinen Unterschiede der Körnungen kaum in einer Karte darstellen, so daß die Angabe einer Richtung auf diese Art nicht immer einfach ist. Daher wurde in dieser Arbeit ein anderer Weg beschritten.

Oben wurde bereits von der Einstufung aller Proben in drei Hauptgruppen gesprochen. Für eine Erörterung der Transportrichtungen kommt nur die Gruppe b), das umgelagerte Material, in Frage, da nur dieses einem Transport unterliegt. Die Restsedimente sind ihrer Definition nach in Ruhe, können also nur den Beginn eines Transports anzeigen. Das sedimentierte Material befindet sich schon wieder in Ruhe und gibt so lediglich das Ende des Transportweges an.

In der Gruppe b) ließ sich eine dem Transport entsprechende Abfolge vom Groben zum Feinen aufstellen, die auch in der Abbildung des Stammbaums der Sedimente beibehalten worden ist. Jedes Glied wurde mit einer Kennziffer versehen, und die Zahlen auf der Karte

wurden wieder durch Isolinien verbunden (Abb. 14, Verteilung der Sedimentgruppen). Auf diese Weise ließ sich ein zahlenmäßig nicht wiederzugebender Begriff, wie es die Korngrößenverteilung ist, auch in einer Karte darstellen. Es zeigte sich, daß die theoretisch gewonnene Abfolge des Stammbaumes in der Karte wiederkehrte. Das heißt aber, daß diese Abfolge die natürlichen Verhältnisse wiedergibt, daß sie also die Veränderungen aufzeigt, die ein Sediment beim Transport erfährt und damit auch die Transportrichtungen angibt. Sie ist auf der

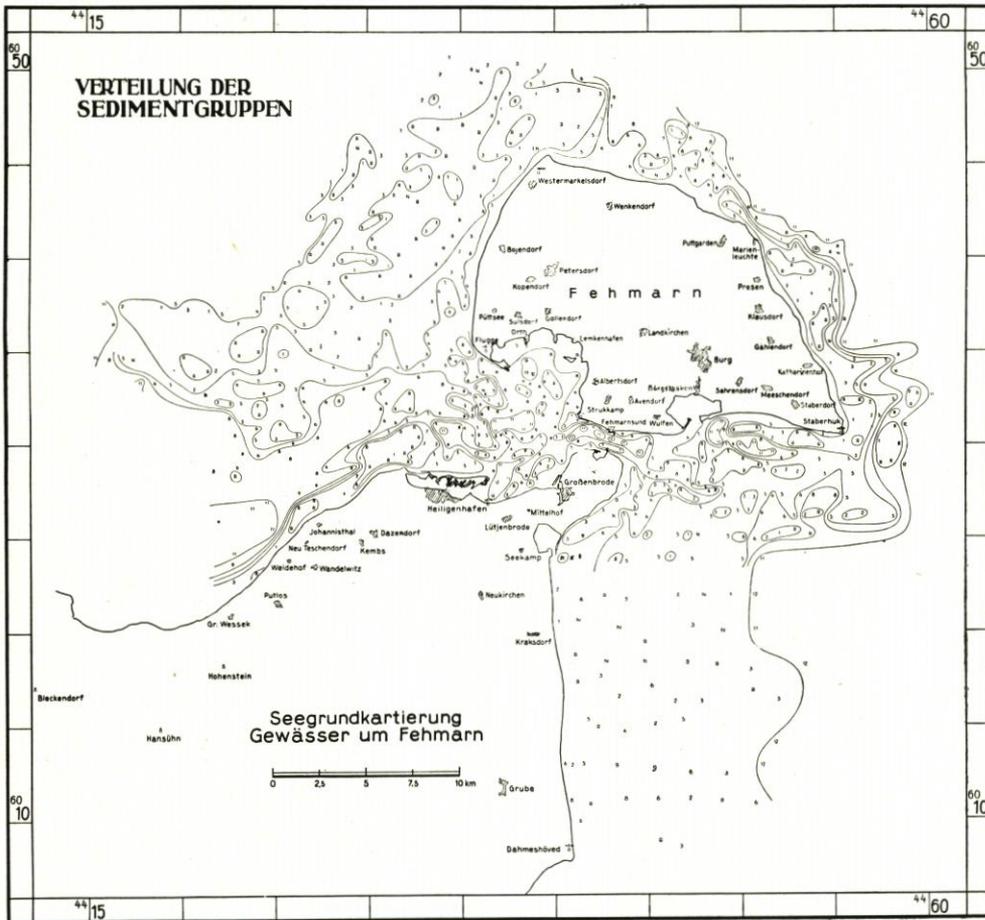


Abb. 14. Die Verteilung der Sedimentgruppen

Karte nicht immer ganz lückenlos, da bei der Probenentnahme das eine oder andere Glied übergangen sein kann. Ein Transport findet in der Richtung statt, in der die Linien einen weiten Abstand haben; denn in dieser Richtung ist eine vollständige Abfolge ausgebildet. Das Bild kann durch weitere kleine Liefergebiete, die in der Transportrichtung liegen, unübersichtlich werden. Aber diese Liefergebiete halten den Transport nicht auf, sondern stören ihn nur dadurch, daß sie in ein schon vorsortiertes Material neues hineinschütten. Daraus ergibt sich dann ein etwas gröberes und schlechter sortiertes Material, das aber dem transportierenden Medium in derselben Weise unterliegt wie vor der Störung.

Die auf diese Weise ermittelten Transportrichtungen sind auf der Karte der Abtragungs-

und Sedimentationsgebiete (Abb. 11) durch Pfeile wiedergegeben. Das gesamte Südostgebiet muß dabei von einer Betrachtung dieser Art ausgeschlossen bleiben, da es zu sehr differenziert ist und der Probenabstand für eine Analyse dieser Art nicht ausreicht.

Eine Haupttransportrichtung geht von der Abrasionsfläche westlich Fehmarns nach Südosten in das Gebiet zwischen dem Festland und Fehmarn und teilt sich in vier Zweige auf. Ein Teil geht am Krumsteert vorbei in die Orther Bucht, ein anderer versorgt das Schlickloch an der Ansteuerungstonne Fehmarnsund-West, ein dritter geht nach Südsüdost und bildet das schlickige Gebiet am Rande der Zone mit den Restsedimenten, während ein Teil auf das Schlickgebiet östlich des Graswarders trifft.

Diese Abrasionsfläche beliefert außerdem noch das Schlickgebiet in der Hohwachter Bucht in einem breiten Schüttungsfächer. Der Haupttransport in dieses Sedimentationsgebiet kommt in einem geschwungenen Bogen aus Nordosten, während aus Norden weniger Material angeliefert wird.

Ob und in welchem Maße von diesem Liefergebiet auch nach Westen transportiert wird, kann wegen der dort fehlenden Proben nicht gesagt werden. Ein geringer Transport ist aber anzunehmen (s. S. 80).

Die Kliffs von Putlos, Johannesthal und Heiligenhafen schütten nur in die küstennahe Sandanhäufungszone nach Osten am Stein- und Graswarder vorbei bis in das Schlickloch. In welchem Maße Material von ihnen nach Westen transportiert wird, kann hier nicht gesagt werden. Lediglich am Nordrand der Abrasionszone, die dem Heiligenhafener Kliff vorge-lagert ist, wird etwas nach Westen verfrachtet.

Im Fehmarnbelt kommt ein Materialtransport von der großen Abrasionsfläche her. Er versorgt das Puttgardener Riff und reicht etwa bis an dessen Ende. Ein nicht unerheblicher Teil kommt aber von Osten um die Ecke bei Marienleuchte und liefert etwa bis an das Ostende des Puttgardener Riffs.

Die kleine Abrasionsfläche vor dem Niobe-Denkmal spielt heute nur eine untergeordnete Rolle. Wie das Auftreten der vielen Steine dort anzeigt, ist die Abrasion heute schon weitgehend zum Stillstand gekommen. Der dort gefundene Torf hatte keine oder nur eine 1 cm mächtige Sandbedeckung. Das zeigt, daß es hier noch nicht zu einer Sedimentation gekommen ist.

Die Ostküste Fehmarns liefert ihr Material hauptsächlich in der oben beschriebenen Weise in den Fehmarnbelt oder aber nach Süden an Staberhuk vorbei. Auf See hinaus dürften von hier nur an einigen Stellen geringe Mengen gehen. In der Abfolge nach See zu spiegelt sich die überaus feine Zusammensetzung des Tarras wider, der hier bei Katharinenhof ansteht. Die Aufarbeitung dieses Materials hinterläßt auf dem Seegrund keine Spuren, da es nur als Schweb verfrachtet wird und erst weit auf See zur Ablagerung kommt. Außerdem fehlen ihm auch die Sandkomponenten, welche die Transportrichtungen anzeigen.

In den Fehmarnsund kommt Material sowohl vom Großenbroder Steinriff als auch von der Abrasionsfläche in der Orther Bucht. Ob auch von Osten in den Sund geliefert wird, kann hier nicht gesagt werden, da das Ostgebiet, wie bereits erwähnt, von dieser Betrachtung ausgeschlossen bleiben mußte.

C. Der Ursprung der Sedimente

Bisher konnte gezeigt werden, daß sich die in den Gewässern um Fehmarn angetroffenen Sedimente vom Geschiebemergel ableiten lassen. Es entsteht weiterhin die Frage, inwieweit das Material vom Küstenabbruch kommt oder ob es vom Meeresboden selbst stammt.

Das beim Küstenabbruch angelieferte Material kommt in den aufbereitenden und trans-

portierenden Bereich des Wassers, und zwar im Abschnitt der küstennahen Sandwanderzone. Brandung und Strömung führen das Feinste, also die Mehlsand-, Schluff- und Tonfraktionen, als Schweb hinweg, während das Grobe, also die Grobsand- sowie die Kiesfraktion und Steine, am Strand oder im näheren Strandbereich liegenbleiben. Die Fein- und Mittelsandfraktionen bleiben in der küstennahen Sandwanderzone und werden von den hier herrschenden küstenparallelen Brandungsströmungen verfrachtet, bauen die Sandriffe und an Buchten die Haken und Nehrungen auf (WIRTZ, 1949; SEIFERT, 1955 u. a.). Das grobe Material kann bei Sturmfluten zum Aufbau von Strandwällen Verwendung finden.

Die küstennahe Sandwanderzone wird durch die in ständiger Abrasion befindliche Abtragungszone begrenzt, in der sich feines Material nicht halten kann. Zwischen diesen beiden Zonen besteht eine ziemlich scharfe Grenze. Aus diesem Grunde ist wohl nicht anzunehmen, daß viel Material aus der küstennahen Sandwanderzone hinauskommt. Nur das als Schweb Verfrachtete geht ihr verloren und kommt erst in den Schlickgebieten zur Ablagerung. Lediglich bei Sturmfluten kann durch die stark gesteigerte Transportkraft des Wassers Sand in die Abtragungszone gelangen, wo es dann die groben Restsedimente mit einem dünnen Schleier bedeckt und später weitertransportiert wird. SEIFERT (1955) konnte für das Stein-Graswarterbecken berechnen, daß ein Teil der Grob- und Mittelsandfraktion fehlt. Das gilt aber nur lokal, denn weiter nördlich war die Bilanz ausgeglichen.

In der aktiven Abtragungszone wird das in dem Bereich der Angriffstiefe der Wellen am Seegrund „Anstehende“ von diesen aufgearbeitet und von den hier herrschenden Strömungen der Korngröße nach ausgewaschen. Dadurch wird das Gebiet langsam vertieft und so dem Angriff der Wellen und Strömungen zunehmend entzogen. Die Abtragung käme jetzt also zur Ruhe, wenn diese Zone nicht durch den fortschreitenden Küstenabbruch weiter zum Land hin vorrücken würde und so wieder frisches Material angegriffen werden könnte.

Die aus dieser Zone ausgewaschenen Fraktionen verhalten sich so, wie oben beim Küstenabbruch beschrieben wurde. Der Fein- und Mittelsand wird in die küstenferne Sandanhäufungszone verfrachtet und verbleibt hier, während die ganz feinen Fraktionen als Schweb abtransportiert werden und erst unter den ruhigen Verhältnissen der Schlickgebiete zum Absatz kommen.

Zusammenfassend kann also über den Ursprung der Sedimente gesagt werden, daß das durch den Küstenabbruch mobilisierte Material zum größten Teil in der Strandzone und der küstennahen Sandwanderzone verbleibt. Nur die feinsten Fraktionen werden abtransportiert, und bei Sturmfluten können auch die mittleren Fraktionen verlorengehen. Das Material der Abtragungszone und der küstenfernen Sandanhäufungszone stammt ausschließlich vom Meeresboden selbst.

Teil II

Veränderungen der Korngestalt während der Wanderung

I. Einführung

Form und Rundung sind schon oft Gegenstand von Untersuchungen gewesen. RUSSEL und TAYLOR (zitiert in PETTIJOHN, 1949 und KRUMBEIN u. PETTIJOHN, 1938) untersuchten Flußsande des Mississippi, PETTIJOHN und LUNDAHL (1943) Strandsande des Eriesees, und mehrere andere Autoren machten Versuche in Kugelmühlen (ANDERSON, 1926; JOHANNSEN u. MERRIT, 1926; ALLING, 1944 u. a.). Doch diese Ergebnisse widersprachen sich zum großen Teil, so daß wohl Theorien aufgestellt wurden, deren Auswertung aber aus Mangel an Beobachtungsmaterial noch nicht abgeschlossen werden konnte.

Um zur Klärung dieser Widersprüche beizutragen, wurden hier die Form und Rundung an zwei Probenserien — einer küstenfernen aus Wassertiefen von 5 bis 7 m und einer Strandserie — bestimmt, um die Unterschiede zwischen beiden aufzuzeigen und entsprechende Abhängigkeiten zu klären.

Die Fragestellung lautete:

1. Besteht eine Abhängigkeit der Form und der Rundung von dem Transportweg?
2. Besteht eine Abhängigkeit der Form und der Rundung von der Korngröße?
3. Wenn ja, lassen sich aus diesen Abhängigkeiten Schlüsse auf die Transportrichtung, die Transportart und die Transportstärke ziehen?

II. Die Begriffe Form und Rundung

Bevor die Ergebnisse der Untersuchungen beschrieben werden, sind noch einige wesentliche Fragen zu klären. Besondere Sorgfalt verdienen die Definitionen von Form und Rundung als Eigenschaften von Sandkörnern (nach WADELI, zit. in KRUMBEIN u. PETTIJOHN, 1938).

Die *F o r m* (sphericity oder shape im angloamerikanischen Sprachgebrauch) befaßt sich mit der äußeren Gestalt der Körner. Als Bezugskörper, d. h. als Körper mit der besten Form, gilt die Kugel.

Die *R u n d u n g* (roundness im angloamerikanischen Schrifttum) dagegen hängt von der Schärfe der Ecken und Kanten eines Körpers ab. Auch hier hat eine Kugel den höchsten Wert. Aber ein Zylinder, an dessen Enden Halbkugeln sind, hat genau den gleichen Rundungswert, jedoch je nach seiner Länge und Breite eine viel schlechtere Form. Dieser Unterschied zwischen den beiden Größen muß klar erkannt werden.

Die Wahl der Kugel als Bezugskörper kann willkürlich erscheinen. Doch hat sie einige Eigenschaften, die sie dafür geeignet machen. So hat die Kugel für ein gegebenes Volumen die kleinste Oberfläche aller Körper. Das bedeutet aber, daß sie bei konstantem Volumen und konstanter Dichte in einer Flüssigkeit die größte Sinkgeschwindigkeit aller Körper besitzt. Das bedingt wiederum die Trennung der kugeligen Teilchen von den weniger kugeligen gleicher Dichte und Größe. Dabei werden bei einem Suspensionstransport die kugeligen Teilchen zuerst abgesetzt, während die anderen noch weiter wandern. Das Gegenteil tritt aber bei einem Transport am Boden ein. Hier rollt und springt das kugelige Teilchen weiter, während die anderen liegenbleiben.

Wie weit diese theoretischen Voraussetzungen in dem Untersuchungsgebiet erfüllt sind, soll weiter unten bei Betrachtung der Untersuchungsergebnisse gezeigt werden.

A. Form- und rundungsbestimmende Faktoren

Es ist das Bestreben der natürlichen Kräfte, an Sandkörnern die Ecken und Kanten stärker anzugreifen als die Flächen. Diese verschwinden dadurch immer mehr, und die Körner werden fortschreitend verkleinert.

Jede Abnutzung, welche die Größe reduziert, wird ebenso Form, Rundung und Oberflächenstruktur des Kornes beeinflussen. Aus dieser Folgerung ist aber nicht unbedingt zu schließen, daß z. B. bei der Größenreduktion eines Kornes durch Zerbrechen sowohl die Form als auch die Rundung geändert wird.

Welcher Art sind nun die Einflüsse, welche die Stärke der Abnutzung bestimmen?

Nach PETTIJOHN (1949) gilt folgende Gliederung über die während des Abnutzungsprozesses auf die sedimentären Teilchen wirkenden Einflüsse:

1. Ursprüngliche Größe, Form und Rundung
2. Materialeigenschaften
 - a. Mechanische Faktoren
 - aa. Härte oder Dauerhaftigkeit
 - bb. Primäre Strukturen
 - b. Chemische Faktoren
3. Transportierende Faktoren
 - a. Reichweite des Transports
 - b. Art des Transports
 - aa. Stärke der Bewegung
 - bb. Art der Bewegung und des Transports
 - cc. Art des transportierenden Mediums

Im folgenden sollen nur die wichtigsten Faktoren kurz besprochen werden.

Ursprüngliche Größe, Form und Rundung hängen von der Art des Ausgangsmaterials ab. Im Untersuchungsgebiet ist das hauptsächlich der Geschiebemergel. Er besteht sowohl aus kristallinen Trümmern als auch aus Sedimenten, die schon mindestens einen Sedimentationszyklus, bestehend aus Abrasion, Transport und Sedimentation, durchgemacht haben. Die ursprünglichen Form- und Rundungswerte der Körner sind aber durch den Transport im Eis in unbekanntem Umfang durch Zerbrechen zerstört worden, so daß der Geschiebemergel bezüglich seiner Form und Rundung als einheitliches Gestein betrachtet werden muß. Daraus folgt, daß der Rundungswert sehr schlecht sein muß.

Einen erheblichen Einfluß auf den Abnutzungsvorgang übt die Korngrößenverteilung des untersuchten Sediments aus¹⁾.

WENTWORTH (zit. in PETTIJOHN, 1949) zeigte experimentell, daß das Maß der Abnutzung

1. direkt von der Korngröße abhängt. Das heißt, je größer das Material ist, desto stärker ist auch die Abnutzung.
2. von der Größe des beigemengten Materials, d. h. von der Kornverteilung, abhängt. Je größer es ist, desto stärker ist die Abnutzung. Diese Beziehung ist aber nicht linear.

Als primäre Strukturen werden Klüftung und Spaltbarkeit zusammengefaßt. Beide bedingen das Zerbrechen der Körner, das nach PETTIJOHN (1949) unter experimentellen Bedingungen etwa zehnmal so schnell wirkt wie reine Abnutzung durch Rollen oder ähnliche Vorgänge. Auch hier besteht eine Abhängigkeit von dem beigemengten Material (ANDERSON, 1926). Grobes Material dient dabei als Schleifmittel und zerbricht die feineren Körner. Auch der Quarz weist nach SCHUMANN (1941) eine gewisse Spaltbarkeit auf.

Die Reichweite des Transports ist nicht gleich der Entfernung vom Ort der Abrasion bis zum Ort der Sedimentation, da die Teilchen durch die zeitlich schnell wechselnde Wasserbewegung ständig hin und her bewegt werden. Der tatsächliche Transportweg ist also größer als der gemessene.

B. Geologische Bedeutung von Form und Rundung

Im vorhergehenden Abschnitt wurden die Einflüsse besprochen, welche die Form- und Rundungsänderungen bewirken. Es taucht nun die Frage nach der geologischen Bedeutung von Form und Rundung auf.

THIEL (zit. in PETTIJOHN u. LUNDAHL, 1943) beobachtete bei einem Experiment über hundert Tage — das entspricht etwa einem Transport von 8 000 Meilen [rd. 13 000 km] — nur eine ganz geringe Rundungsänderung der Quarze. ANDERSON (1926) kam experimentell zu ähnlichen Ergebnissen und schloß aus diesem äußerst langsamen Vorgang, daß gutgerundete Körner bzw. solche mit guter Form schon sehr alt sein müssen, d. h., daß sie wohl schon mehrere Sedimentationszyklen, bestehend aus Abrasion, Transport und Sedimentation, durchgemacht haben müssen.

Aus diesen Ergebnissen schloß PETTIJOHN (1949), daß die Rundung ein guter Indikator für das Alter oder die Reife (maturity) eines Sediments ist. Dabei muß aber der Einfluß der Korngröße berücksichtigt werden. Ein gut gerundeter Kies ist wohl älter bzw. reifer als ein schlecht gerundeter, er ist aber nicht so alt wie ein gutgerundeter Sand, da der Kies viel schneller und bei kürzerem Transport gerundet wird.

Weitere Altersunterschiede können aus der Beziehung zwischen Korngröße und Rundung ersehen werden. Ein nur wenig transportiertes Sediment ist auch nur wenig abgenutzt, d. h. daß alle Korngrößen etwa dieselbe Rundung haben. Wenn aber eine enge Beziehung zwischen den Korngrößen einer Probe und der Rundung besteht, weist das auf eine längere Abrasionsgeschichte hin.

Die Form dagegen erfaßt nach PETTIJOHN (1949) mehr die Bedingungen, die im Augenblick der Anhäufung (Sedimentation) herrschten. Nur in geringem Maße wird die Form von der Abnutzung beeinflusst. Die runden Teilchen haben meist auch die kugelförmigste Form. Ferner scheint die Endform eines Korns weitgehend von seiner Ausgangsform bestimmt zu sein. Die Form zeigt also weniger die Abrasionsgeschichte als die Sortierungsgeschichte des Sediments an. So werden z. B. die blättchenförmigen Glimmer eher mit den feinsten Sedimenten abgelagert als mit den gröberen Sanden, mit denen sie ursprünglich verbunden waren.

¹⁾ In diesem Zusammenhang soll erwähnt werden, daß die Anwendung des Ausdrucks Abrasion auf die Größenreduzierung zu Mißverständnissen führen kann. Man sollte das Wort Abrasion für die Abtragung von Gesteinen beibehalten, während der hier zu beschreibende Vorgang Kornverkleinerung genannt werden sollte. PETTIJOHN (1949) schließt letztere in die Abrasion ein.

C. Die Formsortierung

Bei Behandlung der Kugel als Bezug für die Form wurde schon erwähnt, daß es der Körper mit der größten Sinkgeschwindigkeit bei gegebenem Volumen und Dichte ist. Das bedeutet, daß bei einem Transport in Suspension die Teilchen mit guter Form eher abgesetzt werden als die schlecht-geformten. Bei einem Geschübetransport tritt das Gegenteil ein, da runde Körner leichter rollen als andere.

Da nach PETTIJOHN (1949) eine enge Beziehung zwischen Form und Rundung besteht, wird eine Formsortierung auch immer eine Rundungssortierung mit sich bringen. Daher sind wohl die gewöhnlich der Abnutzung zugeschriebenen fortlaufenden Änderungen der Rundung hauptsächlich das Ergebnis einer Formsortierung.

III. Die Untersuchungsergebnisse

A. Wahl der Bestimmungsmethode von Form und Rundung

Um die Form und die Rundung zu bestimmen, wurden mehrere Methoden ausgearbeitet. So haben PRATJE (1931) und MEYER-ABICH (1949) das Verhältnis der runden zu kantengerundeten zu kantigen Körnern bestimmt. Doch diese Methode ist zu subjektiv und daher ungenau. Andere Autoren (zit. nach KRUMBEIN u. PETTIJOHN, 1938) benutzten das Verhältnis der drei Radien eines Kornes. Doch besteht keine Einigung darüber, ob die Radien rechtwinklig zueinander liegen müssen oder nicht. Da diese Methoden alle mit einer gewissen Ungenauigkeit arbeiten, wurde für diese Untersuchung die zwar genauere, aber auch sehr zeitraubende Methode von WADELL (zit. nach KRUMBEIN u. PETTIJOHN, 1938) gewählt.

1. Definition der Form — WADELL benutzte die Kugel als Bezugskörper für die Formbestimmung, eine Wahl, deren Zweckmäßigkeit weiter oben schon begründet wurde. Er sprach von dem Formwert als einem Maß, mit dem man die Form anderer Körper mit der der Kugel vergleichen kann. Dieser Wert soll die Bedingungen im Augenblick der letzten Sedimentation anzeigen, insbesondere, ob der Niederschlag aus einer Suspension oder nach einem Geschübetransport erfolgte. Ein Wert, der dieses Verhalten zum Ausdruck bringen soll, muß also aus dem Verhältnis der dem Teilchen volumengleichen Kugeloberfläche und der tatsächlichen Oberfläche des Teilchens errechnet werden. Es ergibt sich demnach die Formel:

$$\Psi = \frac{s}{S}$$

s = Oberfläche der volumengleichen Kugel, S = tatsächliche Oberfläche des Kornes, Ψ = wahre Form. Es ist aber sehr schwer, die wahre Oberfläche eines Sandkorns zu messen. Daher gab WADELL eine Näherungsformel an, die von dieser nur gering abweicht. Sie lautet:

$$\Phi = \frac{dc}{Dc}$$

Dabei bedeutet dc = Durchmesser des zum gemessenen Korn flächengleichen Kreises, Dc = Durchmesser des kleinsten umschreibenden Kreises (= größter Durchmesser des Kornes), Φ = Form. Die Werte sind bei dieser Definition > 0 aber < 1 . Eine Kugel hat den Formwert 1. Fehler treten bei dieser vereinfachten Methode nur bei plattigen Körnern auf.

2. Definition der Rundung — Wie oben schon angeführt wurde, hängt die Rundung von der Schärfe der Ecken und Kanten ab. Mit zunehmender Rundung nehmen dabei die Kurvenradien der Ecken zu. Ein Zylinder mit Halbkugeln an den Enden, deren Kurvenradien gleich dem des größten eingeschriebenen Kreises sind, hat die gleiche Rundung wie eine Kugel. Daher definierte WADELL für die Rundung das Verhältnis aus dem durchschnittlichen Kurvenradius und dem Radius des größten eingeschriebenen Kreises:

$$P = \frac{\sum r}{N R}$$

Dabei bedeuten r = Kurvenradius der Ecke, R = Radius des größten eingeschriebenen Kreises, N = Anzahl der Ecken, P = Rundung.

Um vergleichbare Form- und Rundungswerte zu erhalten, müssen die zu untersuchenden Teilchen etwa auf den gleichen Durchmesser vergrößert werden. Das bedeutet, daß für die verschiedenen Korngrößen verschiedene Objektive und Okulare benutzt werden müssen. Als Einheitsgröße wurden hier etwa 5 cm gewählt. Das entspricht einer Fläche von etwa 2000 mm².

3. Durchführung der Analyse — Eine Anzahl Körner einer Siebfraktion wird auf

einen Objektträger gebracht. Eine Reinigung der Proben durch Kochen mit Salzsäure erwies sich bei den Proben von der Ostsee als überflüssig. Als Einbettungsmittel wurde nach einem Vorschlag von P_YE und P_YE (1943) ein Gemisch aus $\frac{2}{3}$ Wasser und $\frac{1}{3}$ Glycerin verwandt. Dieses Einbettungsmittel hat sich gut bewährt, da es die Kornumrisse gerade in der richtigen Stärke sichtbar macht. Dann wurden mit Hilfe eines ABB_FSchen Zeichenspiegels mindestens 50 bis 100 Quarzkörner nach ihren Umrisen gezeichnet. Wie andere Untersuchungen zeigten (PETTIJOHN, 1949 und KRUMBEIN u. PETTIJOHN, 1938), reicht diese Zahl aus, um eine hinreichend genaue Verteilung über die jeweils untersuchte Probe zu geben.

Aus den so gezeichneten Kornumrisen wurden sodann mit einem Polarplanimeter die Flächen bestimmt und aus ihnen mittels eines Diagramms die Durchmesser der flächengleichen Kreise ermittelt. Der Durchmesser des kleinsten umschreibenden Kreises kann direkt mit einem Maßstab gemessen werden. Die Kurvenradien der einzelnen Ecken wurden mit einer Celluloidscheibe gemessen, auf der konzentrische Kreise im Abstand von 2 mm eingeritzt waren. Diese Scheibe wurde so auf die Zeichnung gelegt, daß sich der Kornumriß mit einem Kreis deckte, dessen Durchmesser dann abgezählt werden konnte. Mit derselben Kreisscheibe wurde auch der Radius des größten eingeschriebenen Kreises ermittelt.

Es muß hier erwähnt werden, daß die aus dem projizierten Bild ermittelten Formwerte um etwa 0,1 höher liegen, als dem tatsächlichen Formwert entspricht (PETTIJOHN, 1949).

B. Die Wahl der Fraktionen

Zur Darstellung einer Häufigkeitsverteilung werden allgemein Histogramme verwandt. Form und Rundung folgen den statistischen Gesetzen der Häufigkeit. Bei dieser Darstellungsart ist aber die Wahl der Fraktionen von Bedeutung.

Eine Fraktionseinteilung für die Rundung wurde von RUSSEL und TAYLOR (zit. nach PETTIJOHN, 1949) und von PETTIJOHN (1949) gegeben. Erstere wählten einen arithmetischen Maßstab, in dem die einzelnen Klassen verschieden groß waren. PETTIJOHN änderte diesen Maßstab um, und zwar in einen geometrischen mit fünf gleichgroßen Fraktionen. Diese Einteilung ist jedoch zu grob, um genügend feine Unterschiede aufzuzeigen. Daher wurde in dieser Arbeit die Fraktionseinteilung gewählt, die von POWERS (1953) vorgeschlagen wurde.

Tabelle 4
Rundungsklassen (nach POWERS)

Bezeichnung	Klassenintervalle	geometrisches Mittel
sehr eckig	0,12—0,17	0,14
eckig	0,17—0,25	0,21
mäßig eckig	0,25—0,35	0,30
mäßig gerundet	0,35—0,49	0,41
gerundet	0,49—0,70	0,59
gut gerundet	0,70—1,00	0,84

Das Verhältnis der oberen zur unteren Klassengrenze beträgt hier 0,7. Die Werte sind zum nächsten Hundertstel abgerundet.

Beschreibung der Rundungsgrade (nach PETTIJOHN, 1949 ergänzt):

Sehr eckig, 0,12—0,17: Zeigt keine Abnutzung. Ecken und Kanten völlig scharf. „Sekundäre Ecken“, das sind die vielen kleinen Erhabenheiten im Kornprofil, sehr häufig.

Eckig, 0,17—0,25: Zeigt nur wenig Abnutzung. Ecken und Kanten noch scharf. Sekundäre Ecken häufig.

Mäßig eckig, 0,25—0,35: Zeigt eindeutige Abnutzungseffekte. Die Teilchen haben noch ihre ursprüngliche Form, die Flächen sind unberührt; die Ecken und Kanten sind in einem gewissen Ausmaß gerundet. Sekundäre Ecken zahlreich, etwa 10 bis 20.

Mäßig gerundet, 0,35—0,49: Zeigt schon beträchtliche Abnutzung. Die Ecken und Kanten sind zu sanften Kurven gerundet, und die ursprünglichen Flächen sind erheblich reduziert, aber die ursprüngliche Kornform ist noch deutlich. Sekundäre Ecken stark gerundet, etwa 5 bis 10.

Gerundet, 0,49—0,70: Ursprüngliche Flächen fast vollständig zerstört. Alle Ecken und Kanten bilden weiche Kurven. Sekundäre Ecken kaum noch vorhanden, etwa 0 bis 5. Ursprüngliche Form noch erkennbar.

Gut gerundet, 0,70—1,00: Keine ursprünglichen Flächen, Ecken oder Kanten mehr. Die ganze

Oberfläche besteht aus breiten Kurven. Flache Stellen fehlen. Keine sekundären Ecken mehr. Die ursprüngliche Form kann noch geahnt werden.

Für die Form bestand bisher noch keine Klasseneinteilung. Daher wurde die folgende aus den hier gewonnenen Ergebnissen geschaffen:

Tabelle 5
Formklassen

Bezeichnung	Klassenintervall	geometrisches Mittel
nadelförmig	0,35—0,42	0,39
lang gestreckt	0,42—0,50	0,46
länglich	0,50—0,60	0,55
lang elliptisch	0,60—0,70	0,65
elliptisch	0,70—0,85	0,77
kreisförmig	0,85—1,00	0,92

Das Verhältnis der oberen Grenze zur unteren Grenze beträgt 0,83. Beide Tabellen beginnen nicht mit Null. Es zeigt sich nämlich (PETTIJOHN, 1949 und POWERS, 1953), daß Form und Rundung den Wert Null nie erreichen. An frisch gebrochenem Quarz wurde in der Projektion ein Formwert von 0,7 bis 0,72 gemessen. Am Kalkstein betrug er 0,65, während der Rundungswert bei 0,13 lag (PETTIJOHN, 1949). In dieser Untersuchung lag der niedrigste Rundungswert bei 0,138 und der niedrigste Formwert bei 0,55.

C. Die Korngröße der untersuchten Proben

Wie bereits weiter oben ausgeführt wurde, hängen Form und Rundung sowohl von der Korngröße als auch von der Kornverteilung, d. h. von der Anwesenheit grober Körner ab. Daher sollen der Erörterung der gefundenen Ergebnisse die Korngrößenanalysen der untersuchten Proben vorangestellt werden (Tabelle 6). Die Kornverteilungen werden hier nicht in der Form der Histogramme, sondern als Siebanalysen gegeben, da die Form- und Rundungsuntersuchungen in diesen Fraktionen durchgeführt wurden.

Tabelle 6
Siebanalysen der untersuchten Proben

Nr.	mm > 1	1—0,5	0,5—0,4	0,4—0,3	0,3—0,2	0,2—0,1	0,1—0,06	< 0,06	Md
Geschiebemergel									
382a	7,3	7,0	3,4	5,9	9,5	13,4	9,7	43,8	0,08
359	18,5	6,1	3,2	4,4	7,8	6,8	12,4	40,8	0,099
Strandsand									
1	0,6	22,6	3,8	50,4	3,7	18,9	0,1	—	0,35
3	0,5	12,9	2,7	40,5	34,5	8,6	0,3	—	0,32
5	0,2	4,8	1,8	48,8	40,0	4,2	0,2	—	0,31
7	0,1	3,0	1,2	36,4	49,6	9,4	0,3	—	0,28
9	—	6,5	3,2	66,7	1,1	22,5	+	—	0,34
11	0,2	13,8	1,3	44,0	36,5	4,1	0,1	—	0,34
15	0,1	1,8	0,2	17,6	0,4	79,7	0,2	—	0,15
17	—	3,2	0,4	17,3	1,5	77,4	0,2	—	0,16
Seesand									
400	52,4	18,3	7,3	12,9	6,1	2,5	0,2	—	1,27
648	25,0	6,2	3,6	15,0	26,4	21,2	2,4	0,3	0,3
649	1,5	22,5	18,1	34,2	17,0	6,0	—	—	0,37
650	—	8,3	12,5	25,0	17,5	34,8	1,0	—	0,27
651	0,1	3,3	11,0	31,5	17,7	35,5	0,8	—	0,24
652	0,1	2,4	3,4	32,5	38,8	22,7	0,3	+	0,27
653	+	0,3	0,3	2,1	41,5	54,4	1,1	—	0,19
654	0,5	4,7	5,8	41,1	18,9	28,4	0,5	—	0,3
656	—	0,8	1,1	19,1	38,0	36,4	3,6	0,2	0,22
22	0,2	0,2	0,1	0,6	2,6	28,1	39,4	28,6	0,085

D. Der Form- und Rundungsgrad

Zur Darstellung der Form- und Rundungswerte wurde häufig der Durchschnittswert der Verteilung gewählt. Doch ist dieses sehr ungünstig, da er mit der Verteilung selbst nichts zu tun hat; denn eine Verteilung mit einem Maximum im Groben und einem im Feinen hat denselben Durchschnittswert wie eine solche mit einem Maximum in der Mitte. Der Durchschnittswert kann also eine Verteilung nicht mit hinreichender Genauigkeit wiedergeben. Daher wird hier ein Wert als Form- bzw. Rundungsgrad vorgeschlagen, der die Verteilung recht genau charakterisiert und vor allem auch in der Statistik allgemein angewandt wird.

$$R = \frac{h \cdot f}{100}$$

Es bedeuten: R = Rundungsgrad, h = Häufigkeit oder Prozentanteil jeder Fraktion, f = geometrisches Mittel jeder Fraktion, das logarithmisch ermittelt werden muß. Als Formgrad wird der gleiche Wert definiert.

E. Form und Rundung des Geschiebemergels

Um das Ausgangsgestein mit den Sanden vergleichen zu können, wurden zwei Geschiebemergelproben aus dem Untersuchungsgebiet auf ihre Form und Rundung untersucht. Beide wurden mit dem Bodengreifer aus dem Seegebiet zwischen Heiligenhafen und Fehmarn entnommen. Sie lagen jeweils unter einem dünnen Grobsandschleier mit Steinen, und zwar Probe Nr. 382 a in 9 m und Probe 359 in 6 m Wassertiefe.

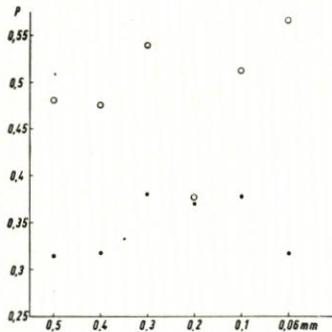


Abb. 15. Beziehung zwischen Rundung und Korngröße beim Geschiebemergel

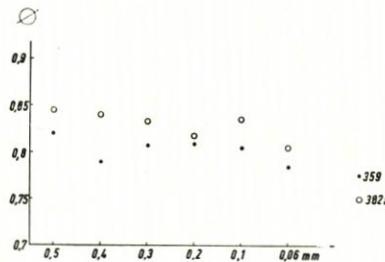


Abb. 16. Beziehung zwischen Form und Korngröße beim Geschiebemergel. Die Ordinatenwerte der Abb. 16 beziehen sich auf die Form

Wie bereits oben erwähnt wurde, zeigt die Rundung das Alter bzw. die Reife eines Sediments, d. h. seine Abrasionsgeschichte an. Besonders ist aber die Beziehung zwischen Rundung und Korndurchmesser ein guter Indikator hierfür.

In Abbildung 15 sind auf der Abszisse die Korndurchmesser und auf der Ordinate der Rundungsgrad P aufgetragen. Sie zeigt deutlich, daß hier keine Beziehung besteht. Die einzelnen Korngrößen haben alle einen etwa gleich schlechten Rundungsgrad. Lediglich bei Probe 382 a fällt die Fraktion 0,3 bis 0,2 mm durch ihren sehr niedrigen Wert aus der Reihe.

Nach dem oben Gesagten bedeutet das, daß der Geschiebemergel noch frisch ist und noch keine Abrasionsgeschichte durchgemacht hat. Die Abnutzung durch den Eistransport kann man nicht dazu rechnen, da erst durch ihn die Körner zerbrochen und der Geschiebemergel als Ausgangsgestein für diese Untersuchung geschaffen wurde.

Bei der Form dagegen verhält es sich anders. Hier besteht eine, wenn auch schwache Beziehung zwischen Korngröße und Form in der Art, daß kleinere Korngrößen einen niedrigeren Formwert haben als größere (Abb. 16). Diese Beziehung ist insofern verständlich, als die Form eines Teilchens weitgehend von seiner Ausgangsform abhängt.

Besteht eine Abhängigkeit sowohl der Rundung als auch der Form von der Korngröße, so müssen sie auch untereinander abhängig sein. Da aber eine Beziehung zwischen Rundung und Korngröße hier fehlt, kann auch eine solche zwischen Rundung und Form nicht erwartet werden. Abbildung 17 bestätigt diesen Schluß.

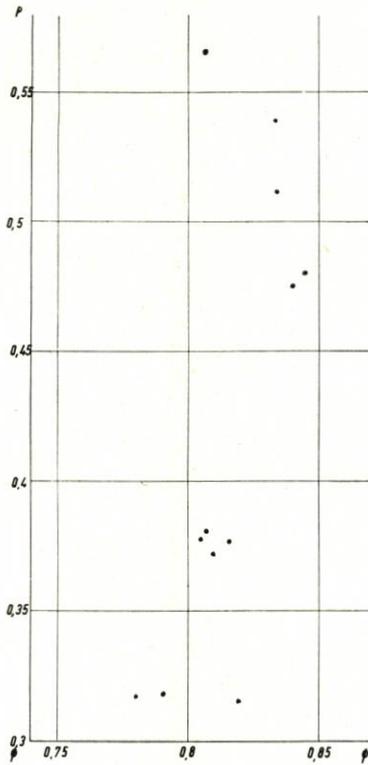


Abb. 17. Beziehung zwischen Form und Rundung beim Geschiebemergel

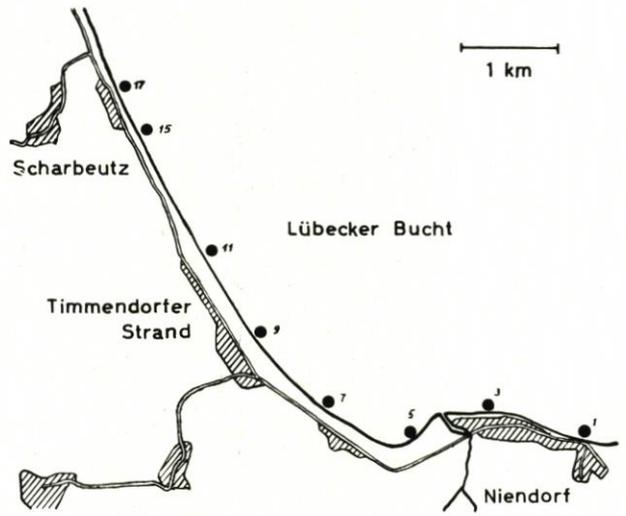


Abb. 18. Entnahmepunkte der Strandproben

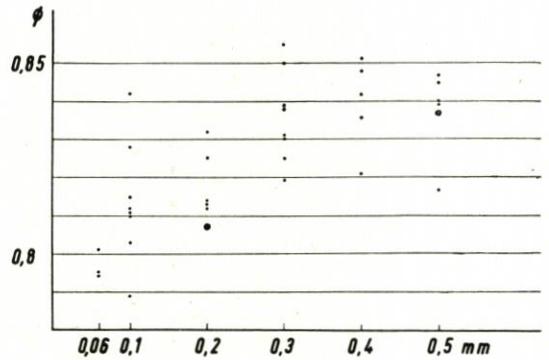


Abb. 21. Beziehung zwischen Form und Korngröße beim Strandsand

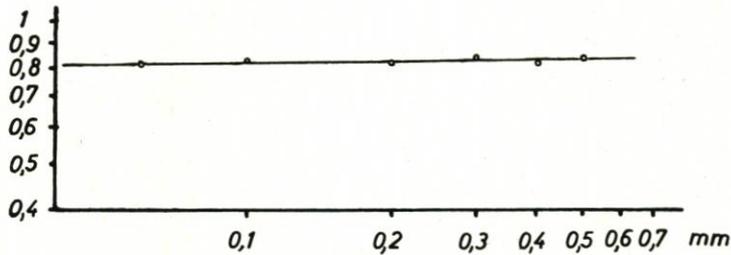


Abb. 22. Beziehung zwischen log Form und log Korngröße beim Strandsand

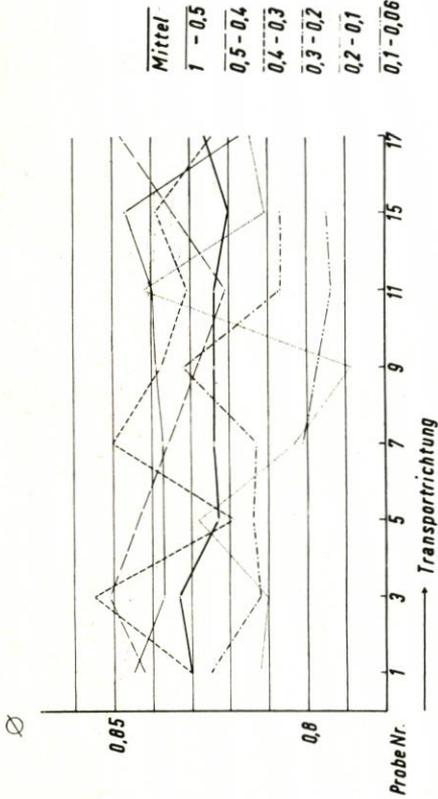


Abb. 19. Beziehung zwischen Form und Entfernung beim Strandsand

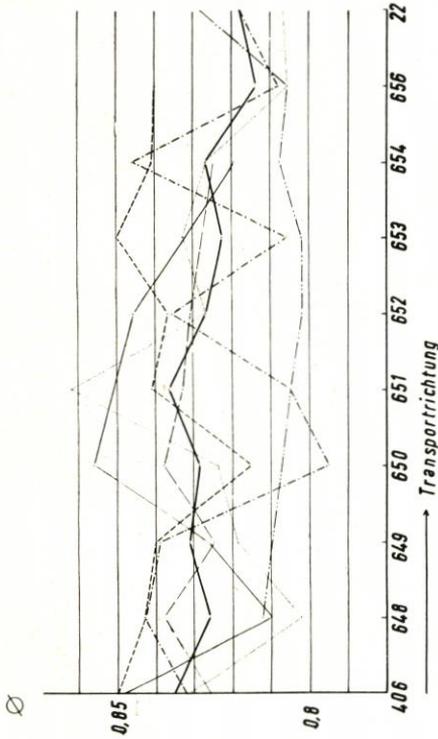


Abb. 27. Beziehung zwischen Form und Entfernung beim Seesand

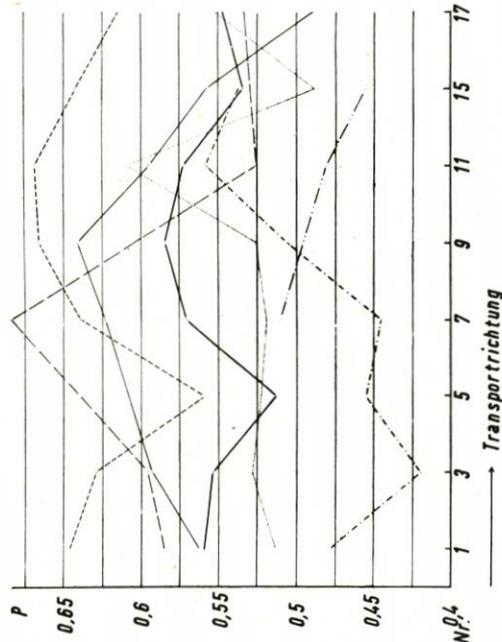


Abb. 20. Beziehung zwischen Rundung und Entfernung beim Strandsand

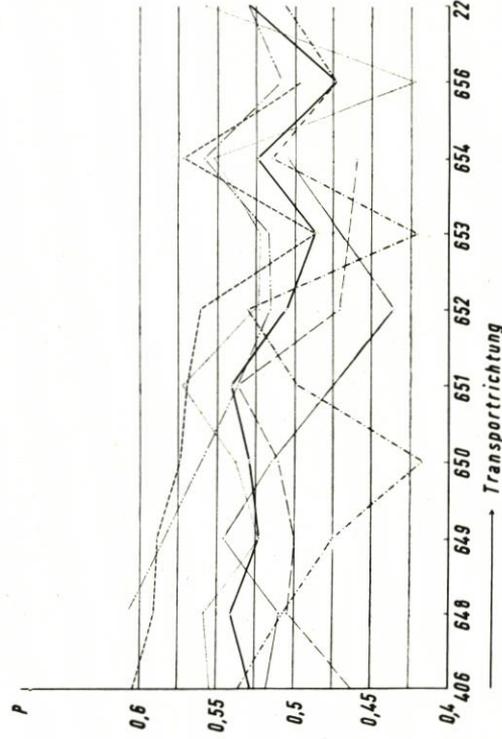


Abb. 28. Beziehung zwischen Rundung und Entfernung beim Seesand

Obleich die beiden untersuchten Proben in ihren Werten voneinander abweichen, kann man sie doch in der Art zusammen behandeln, wie es hier geschehen ist, da die Verteilung der Werte beider Proben sehr ähnlich ist.

F. Form und Rundung beim Strandsand

Die Untersuchung erstreckte sich auf acht Strandproben. Sie stammen vom Strand der Lübecker Bucht und liegen zwischen Niendorf und Scharbeutz (Abb. 18). Die Proben wurden von Herrn Dipl.-Geol. OTTO entnommen und für diese Untersuchung freundlicherweise zur Verfügung gestellt, wofür ihm auch an dieser Stelle gedankt sei. OTTO (1952) hat diese Proben sedimentpetrographisch untersucht und eine Transportrichtung von Probe Nr. 1 nach Probe Nr. 17 festgestellt.

1. Form, Rundung und Entfernung — Die Formwerte schwanken in Abhängigkeit von der Entfernung nur in einem schmalen Bereich, während die Werte der einzelnen Korngrößenfraktionen ± stark variieren (Abb. 19). Daher ist es gewagt, hier eine Beziehung herauslesen zu wollen. Es kann nur gesagt werden, daß die Form in der Transportrichtung etwa gleich bleibt.

Bei der Abhängigkeit der R u n d u n g von der Entfernung (Abb. 20) schwanken die Werte der einzelnen Korngrößenfraktionen sehr stark. Doch lassen sie im allgemeinen einen leichten Abfall in der Transportrichtung erkennen. Lediglich die Fraktionen 0,3—0,2 mm und 0,2 bis 0,1 mm steigen in der Transportrichtung an. Die Kurve der Gesamtfraktion — sie wurde über alle Werte gemittelt und nicht gemessen — läßt keine Beziehung erkennen. Sie verläuft etwa sinusförmig, obwohl ihre Endwerte niedriger liegen als die Anfangswerte.

2. Form, Rundung und Korngröße — Abbildung 21 läßt eine Beziehung zwischen Form und Korngröße ahnen, obgleich die Werte recht gut beieinanderliegen. Trägt man aber statt der absoluten Werte die Logarithmen von Form und Korngröße auf, so lassen sie sich durch eine Gerade verbinden (Abb. 22).

Das bedeutet aber, daß eine mathematische Beziehung in der Art $y = mx^n$ besteht. Aus den zur Verfügung stehenden Daten läßt sich die Gleichung der Kurve $y = 0,86 \times 0,028$ berechnen. Daraus geht hervor, daß für den hier untersuchten Korngrößenbereich von 0,06 mm bis 1 mm und den Formbereich von 0 bis 1 die Beziehung Form—

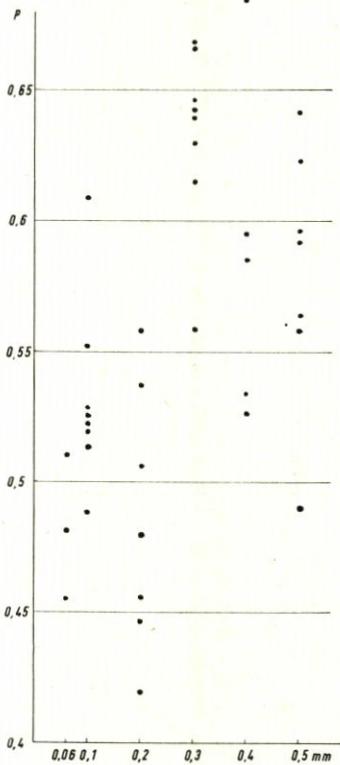
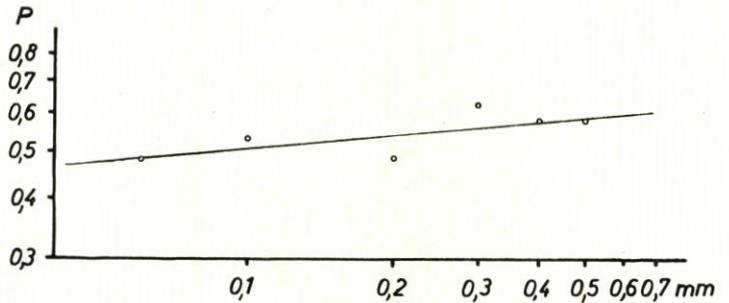


Abb. 23. Beziehung zwischen Rundung und Korngröße beim Strandsand



sein, obwohl sie gute Vergleichsmöglichkeiten geben. Diese Einschränkung gilt in der gleichen Weise für die später zu behandelnden Gleichungen.

Der Rundungsgrad ist in Abbildung 23 in Abhängigkeit von der Korngröße dargestellt worden. Die Werte schwanken verhältnismäßig stark. Auffällig ist deren starker Abfall in der Fraktion 0,3—0,2 mm. In der nächst feineren Fraktion steigen sie wieder an. Trägt man auch hier wieder die Logarithmen auf, so wird die Beziehung Rundung—Korngröße deutlich (Abb. 24). Sie ließ sich berechnen und lautet: $y = 0,63 \times 0,096$. Das bedeutet aber wiederum, daß die großen Fraktionen besser gerundet sind als die feineren.

Der erwähnte Abfall der Fraktion 0,3—0,2 mm kann so gedeutet werden, daß in dieser Fraktion eine Änderung der Transportart eingetreten ist. Welcher Art diese gewesen ist, muß noch offengelassen werden. Hier können weitere Untersuchungen ansetzen.

3. Form und Rundung — Da eine Abhängigkeit sowohl der Form als auch der Rundung von der Korngröße besteht, müssen diese auch voneinander abhängig sein. In Abbildung 25 ist auf der Abszisse die Form und auf der Ordinate die Rundung aufgetragen. Die Werte streuen nur sehr wenig, so daß also eine gute Beziehung, und zwar eine lineare zwischen ihnen zu erkennen ist. Die Gleichung der Geraden konnte berechnet werden und ergibt den Ausdruck: $y = 6,21 x - 4,58$. Das bedeutet, daß mit zunehmendem Formwert auch der Rundungswert ansteigt. Allerdings ändert sich der letztere erheblich stärker. Bei einer Zunahme des Formwerts um 3,7 % ändert sich der Rundungswert um 59,3 % in einer Entfernung von 7 km. PETT-JOHN (1949) stellte am Strandsand des Erieeses bei einem Anstieg des Formwerts um 7,9 % eine Zunahme des Rundungswerts um 35,8 % fest. Der Transportweg betrug hier 13 km. Der Unterschied zwischen den beiden Strandsanden ist also erheblich. Hier läuft die Gerade viel steiler. Das bedeutet aber, daß die Formsortierung am Strandsand der Lübecker Bucht bei kleinerem Transportweg erheblich weiter fortgeschritten ist, daß also der oben herausgestellte Unterschied ein Maß für die Stärke des Vorganges ist.

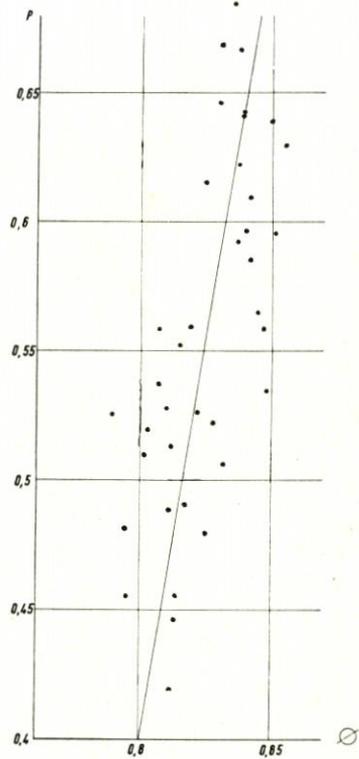


Abb. 25. Beziehung zwischen Form und Rundung beim Strandsand

G. Form und Rundung beim Seesand

Um etwaige Unterschiede festzustellen, wurde eine Serie von zehn unter Wasser entnommenen Proben untersucht. Diese liegen auf einem Profil parallel der Küste vor Heiligenhafen (Abb. 26).

Die Wassertiefe beträgt im Durchschnitt etwa 7 m. Die Transportrichtung wurde durch andere Methoden bestimmt (s. S. 84 ff.). Sie verläuft von Westen nach Osten, also von Probe Nr. 400 nach Probe Nr. 22. Die Proben Nr. 400 und 648 liegen noch auf der Abrasionsfläche vor dem Heiligenhafener Kliff, während die Probe Nr. 22 aus dem Schlickgebiet östlich des Graswarders stammt.

1. Form, Rundung und Entfernung — Die Kurvenschar der Formgrade hat zwar eine erhebliche Breite, jedoch schwankt die einzelne Kurve nicht stark (Abb. 27 auf S. 95). Die Kurven zeigen einen allgemeinen Abfall in der Transportrichtung, also eine Abnahme des Formwerts an. Obgleich diese nur gering ist — die Kurve der Gesamtprobe sinkt von 0,835 auf 0,818 oder um 2,04 % in einer Entfernung von 7 km —, ist sie doch deutlich erkennbar. Die Proben Nr. 400 und 648 von der Abrasionsfläche fallen hier nicht aus dem Rahmen des ganzen Kurvenverlaufs heraus.

Der Rundungsgrad läßt ebenfalls eine deutliche Abhängigkeit von der Entfernung erkennen. Das zeigt sich durch eine Verschlechterung des Rundungswerts in der Transportrichtung (Abb. 28 auf S. 95). Obgleich hier die einzelnen Kurven stark schwanken, nimmt jedoch jede Korngrößenfraktion bis auf die von 0,3 bis 0,2 mm bis zur Probe Nr. 654 ab. Letztere bringt einen starken Anstieg in allen Fraktionen, und die Proben dahinter weisen erhebliche Schwankungen auf, so daß eine Tendenz nicht mehr zu erkennen ist. Eine Erklärung dieser Erscheinung gibt die Karte der Abtragungs- und Sedimentationsgebiete (Abb. 11). In ihr sind die

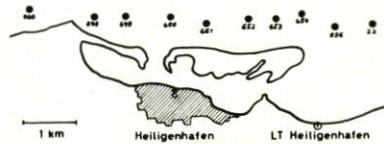


Abb. 26. Entnahmepunkte der Seeproben

Transportrichtungen eingetragen, die nach dem Stammbaum der Sedimente (s. S. 84 ff.) ermittelt wurden. Der Pfeil, der von der Abrasionsfläche westlich Fehmarn nach Südosten auf den Graswarder weist, zeigt auf die Probe Nr. 654. So ist also die starke Schwankung des Rundungsgrads in den letzten Proben dieser Serie durch eine Zufuhr fremden Materials mit anderer Rundung zu erklären. Da die Rundungswerte im Anschluß an diese Probe durch fremde Zufuhr gestört sind, kann man den Abfall der Kurve auch nur bis hierher ermitteln. Die Gesamtprobe sinkt von 0,528 auf 0,478 oder um 7,8 % in einer Entfernung von 5 km. PETTIJOHN und LUNDAHL (1943) stellten am Strand des Eriesees eine Abnahme von 8 % in 13 km fest. Die Größenordnung der Abnahme ist also etwa die gleiche, allerdings in der doppelten Entfernung. Das dürfte für eine erheblich stärkere Wasserbewegung im Untersuchungsgebiet sprechen.

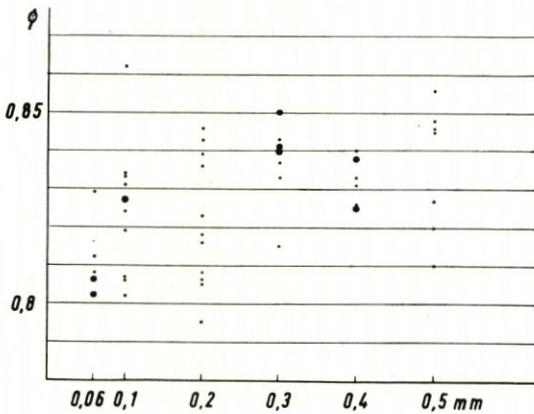


Abb. 29. Beziehung zwischen Form und Korngröße beim Seesand

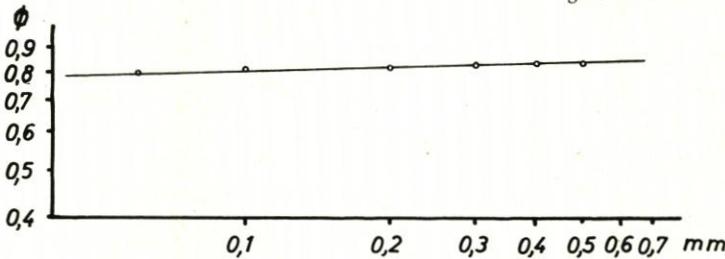


Abb. 30. Beziehung zwischen log Form und log Korngröße beim Seesand

Abbildung 31 stellt die Abhängigkeit des Rundungsgrades von der Korngröße dar. Wenn auch die Werte sehr stark schwanken, so ist trotzdem der scharfe Abfall der Kornfraktion 0,3—0,2 mm zu erkennen. Eine Erklärung wurde schon oben (s. S. 97) gegeben.

Abbildung 32 läßt eine Beziehung zwischen log Rundung und log Korngröße erkennen. Die Gleichung lautet: $y = 0,49 x^{-0,027}$. Das bedeutet, daß die Abhängigkeit einer Hyperbel folgt, daß also hier die Rundung mit abnehmender Korngröße besser wird. Die Änderung ist bei groben Korngrößen geringer als bei feinen.

Über die Gefahr und die Bedeutung dieser Gleichungen wurde schon weiter oben gesprochen.

3. Form und Rundung — Auch hier muß eine Abhängigkeit von Form und Rundung untereinander bestehen. Abbildung 33 gibt diese Beziehung wieder. Sie scheint ebenfalls linear zu sein. Leider streuen die Werte zu sehr, als daß man die Gleichung ausrechnen könnte. Aus der Lage der Punkte kann geschlossen werden, daß die Gerade noch steiler als die der Strandproben ansteigt, daß also die Formsortierung noch weiter fortgeschritten ist. Eine endgültige Klärung kann jedoch nur durch weitere Untersuchungen dieser Art gegeben werden.

Die beiden Proben von der Abrasionsfläche Nr. 400 und Nr. 648 ordnen sich in den allgemeinen Kurvenverlauf gut ein.

Die Erscheinung der Rundungsabnahme in der Transportrichtung deutet auf einen Transport in Suspension hin (s. S. 90), da bei dieser Transportart die gut gerundeten Körner wegen ihrer größeren Sinkgeschwindigkeit eher liegen bleiben als schlechter gerundete. Selbstverständlich herrscht wegen der stärkeren Wasserbewegung hier auch eine stärkere Abnutzung der Körner. Da diese aber sehr langsam vor sich geht, wird trotzdem die Sortierung die Abnutzung überwiegen.

2. Form, Rundung und Korngröße — Die Beziehung zwischen Form und Korngröße ist in Abbildung 29 dargestellt. In ihr ist eine Zunahme des Formwerts mit einer gleichzeitigen Zunahme der Korngröße zu erkennen. Die Abhängigkeit wird durch die Logarithmen der Form und der Korngröße deut-

licher (Abb. 30). Sie verläuft hier wie beim Strandsand der Lübecker Bucht auf einer Parabel. Die Gleichung lautet: $y = 0,85 x^{0,013}$. Hier ist die Neigung der Geraden geringer, also die Öffnung der Parabel etwas kleiner. Das bedeutet, daß bei kleineren Korngrößen die Änderung erheblich stärker, während sie bei den größeren fast linear, also kaum vorhanden ist.

H. Geologische Deutung

In dem vorangehenden Abschnitt wurden die Untersuchungsergebnisse der Geschiebemergel-, Strandsand- und Seesandproben beschrieben. Im folgenden sollen nun die Unterschiede noch einmal gegenübergestellt werden.

Es konnte gezeigt werden, daß die Rundung des Geschiebemergels erheblich schlechter ist als die des Strand- und des Seesandes. Dieses Ergebnis war zu erwarten. Beim Transport durch das Eis ist also die Rundung durch das Zerbrechen der Quarzkörner verschlechtert worden. Die Form dagegen blieb \pm gleich und wurde nur wenig verändert. Die Rundungsverteilung des Geschiebemergels hat aber denselben Charakter wie die der anderen Proben, nur daß sie zur schlechteren Rundung hin verschoben ist. Die bessere Rundung der Sande gegenüber dem Geschiebemergel kann durch Sortierung oder Abnutzung erklärt werden. Bei einer Deutung durch Sortierung bleibt die Frage nach dem Verbleib der schlecht gerundeten Körner.

PETTIJOHN und LUNDAHL (1943) kamen auf Grund der experimentellen Ergebnisse ANDERSONS (1926) unter anderem zu folgendem Schluß: „Schlußfolgerungen, die darauf beruhen, daß Größen-, Form- und Rundungsänderungen von der Abrasion herühren, sind stark verdächtig.“ Die Experimente, auf denen diese Behauptung basiert, liefen aber maximal hundert Tage, während der Abrasions- und Abnutzungsvorgang im Untersuchungsgebiet mehr als 6000 Jahre andauert. Es ist wohl anzunehmen, daß in dieser langen Zeit auch Quarzkörner durch die Wasserbewegung abgenutzt werden. PETTIJOHN und LUNDAHL (1943) haben leider keine Rundungswerte der jeweiligen Ausgangsgesteine veröffentlicht, so daß also ein Vergleich hier nicht angestellt werden kann.

Aus der Beziehung von Form und Rundung zur Entfernung kann aus den untersuchten Strandproben keine Abhängigkeit abgelesen werden. Allerdings zeigen die Strandproben von PETTIJOHN und LUNDAHL (1943) deutlich eine Abhängigkeit der Rundung von der Entfernung. Es muß hier dahingestellt bleiben, ob es sich bei ihnen um ein Zufallsergebnis handelt oder ob an der Lübecker Bucht andere Einflüsse, etwa Zufuhr von See her, die Beziehung stören.

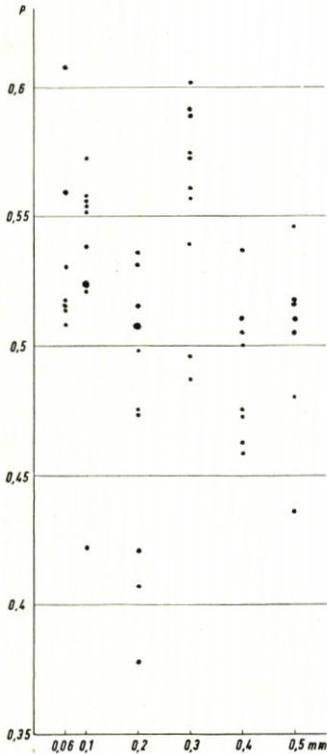


Abb. 31. Beziehung zwischen Rundung und Korngröße beim Seesand

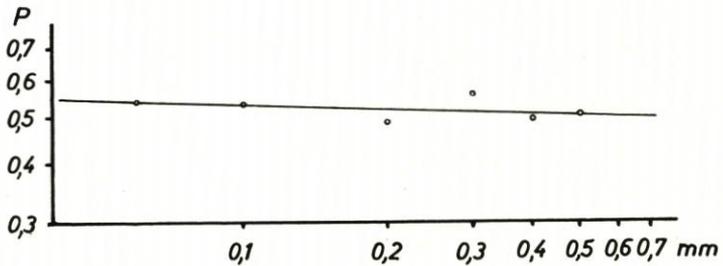


Abb. 32. Beziehung zwischen log Rundung und log Korngröße beim Seesand

Im Gegensatz zu den Strandsandproben zeigen die Seesandproben eine deutliche Abnahme des Form- und Rundungswerts in der Transportrichtung. Diese Erscheinung läßt sich durch Sortierung beim Transport in Suspension erklären. Die runden Teilchen werden dabei wegen ihrer größeren Sinkgeschwindigkeit eher abgesetzt als die eckigen.

Die Abhängigkeit der Form von der Korngröße ergibt in beiden Fällen eine Parabel. Der einzige Unterschied liegt darin, daß diese bei den Seesandproben in den kleinsten Korngrößen erheblich steiler und bei den größeren viel langsamer ansteigt als bei den Strandsandproben.

Die Abhängigkeit der Rundung von der Korngröße ergibt beim Strandsand ebenfalls eine Parabel, beim Seesand dagegen eine Hyperbel. Ersteres stimmt gut mit PETTIJOHN und LUNDAHL (1943) überein. Lediglich der Exponent ist hier etwas kleiner, d. h. die Rundung nimmt hier in den kleineren Korngrößen erheblich schneller zu als am Eriesee, während sie sich bei den größeren nur noch wenig ändert.

Die Abhängigkeit der Rundung von der Korngröße in einer Hyperbel bedeutet, daß sie mit ab-

nehmender Korngröße zunimmt. Daraus ist zu schließen, daß der Seesand in den untersuchten Korngrößen im Gegensatz zum Strandsand in Suspension transportiert wird.

Die Abhängigkeit von Form und Rundung untereinander verläuft in allen Fällen linear und fehlt nur beim Geschiebemergel. Bei den Seesandproben dürfte diese Beziehung ebenfalls bestehen, doch ließ sich wegen der Schwankungsbreite keine Gleichung aufstellen. Der Anstieg der Geraden gibt die Änderung der Rundung mit der Form. Am Strandsand des Eriesees steigt sie flacher an als am Strandsand der Lübecker Bucht und hier wahrscheinlich flacher als beim Seesand. Diese Unterschiede lassen Schlüsse auf die Heftigkeit des Sortierungsvorgangs, also auf die Stärke der Bewegung zu.

Es wird dadurch klar, daß Unterschiede zwischen Strand- und Seesand bestehen. Man kann sie wohl vergleichen, darf aber die in einer bestimmten Umgebung gewonnenen Ergebnisse nicht ohne weiteres verallgemeinern oder sie auf andere Umgebungen übertragen.

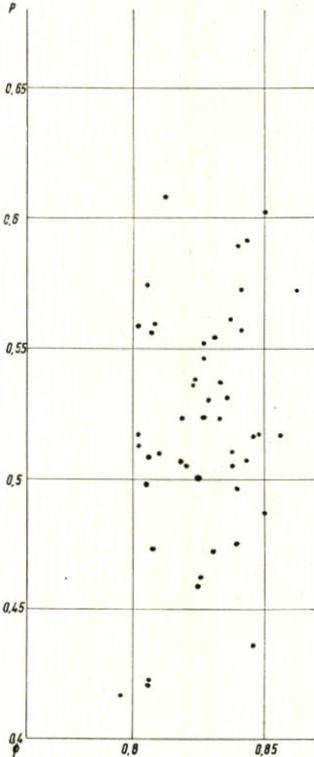


Abb. 33. Beziehung zwischen Form und Rundung beim Seesand

IV. Zusammenfassung von Teil I und II

In den Gewässern um Fehmarn konnte eine eingehende Seegrundkartierung vorgenommen werden. Dabei wurden die fünf Sedimentationszonen im Sinne PRATJES auch in diesem räumlich engbegrenzten und küstennahen Gebiet bestätigt und ihre durch die Sedimente bedingten Unterschiede deutlich herausgestellt.

Die Auswaschung der Restsedimente konnte ermittelt und dabei gezeigt werden, daß der Kies schon vollständig ausgewaschen ist, während der Grobsand noch stark angegriffen und der Mittelsand nur in ganz geringem Maße ausgewaschen wird. Hieraus ergibt sich für das Endprodukt der Auswaschung ein grober Kies mit einem Mittel- bis Grobsand.

An Hand eines „Stammbaums der Sedimente“ ließ sich die Entstehung der Sedimente in den einzelnen Zonen durch die Aufarbeitung des Ausgangsgesteins, in diesem Falle des Geschiebemergels, aufzeigen.

Auf Grund der lückenlosen Abfolge im Stammbaum der Sedimente konnten die Transportrichtungen ermittelt und in einer Karte dargestellt werden.

An drei verschiedenen Probenserien, zwei Geschiebemergelproben als Ausgangsgestein, acht Strandsandproben und zehn Seesandproben wurden Form- und Rundungsbestimmungen vorgenommen und mit anderen schon vorliegenden Untersuchungen verglichen.

So ließ sich zeigen, daß die Sandfraktionen des Geschiebemergels während der Abrasionszeit von etwa 6000 Jahren in der westlichen Ostsee erheblich gerundet wurden, während sich die Form kaum geändert hat.

Die Unterschiede zwischen Strand- und Seesand konnten aufgezeigt werden. Während Form und Rundung des Strandsandes im Gegensatz zu PETTIJOHN und LUNDAHL (1943) keine Abhängigkeit von der Entfernung zeigen, nimmt die Rundung des Seesandes mit der Entfernung vom Ausgangsort ab. Diese Erscheinung ließ sich mit einem Transport der untersuchten Proben in Suspension erklären.

Der Geschiebemergel zeigt keine Abhängigkeit der Form und der Rundung von der Korngröße. Diese Erscheinung war auf Grund des Eistransports zu erwarten. Daher besteht auch keine Abhängigkeit von Form und Rundung untereinander.

Beim Strand- und Seesand folgt diese Abhängigkeit einer Parabel. Lediglich die Rundung des Seesandes entspricht in ihrer Beziehung zur Korngröße einer Hyperbel.

Die Abhängigkeit von Form und Rundung untereinander war in beiden Fällen linear.

Die Gleichung dieser Kurven konnte berechnet werden. Obgleich sie nur für einen ganz bestimmten Definitionsbereich gelten, lassen ihre Vergleiche Schlüsse auf die Transportart und die Transportstärke zu.

Daraus ergab sich, daß der Strandsand als Geschübe und der Seesand in Suspension bewegt wird. Der Sortierungsvorgang ist auf Grund unterschiedlicher Transportkraft am Eriesee weniger weit als an der Lübecker Bucht und hier weniger weit als beim Seesand fortgeschritten.

V. Schriftenverzeichnis

1. ALLING, H. L.: Grain analyses of minerals of sand size in ball mills. *Jour. Sed. Pet.* Vol. **14**, No. 3, 1944.
2. ALLING, H. L.: Initial shape and roundness of sedimentary rock mineral particles of sand size. *Jour. Sed. Pet.* Vol. **20**, No. 3, 1943.
3. ANDERSON, G. E.: Experiments of the rate of wear of sand grains. *Jour. Geol.* Vol. **34**, 1926.
4. BRAND, G.: Sedimentpetrographische Untersuchungen zum Erkennen der Sandwanderungsvorgänge am Strand, im Flachwasser und dem daran anschließenden Seegebiet. *Meyniana*, Veröff. Geol. Inst. Univ. Kiel. **4**, Kiel 1955.
5. v. BÜLOW, K.: Allgemeine Küstendynamik und Küstenschutz an der südlichen Ostsee zwischen Trave und Swine. Beiheft *Geologie*, **10/1954**, Berlin 1954.
6. CORRENS, C. W.: Grundsätzliches zur Darstellung der Korngrößenverteilung. *Cbl. f. Min. etc.* Abt. A, **1**, 1934.
7. DECHEND, W.: Sedimentpetrologische Untersuchungen zur Frage der Sandumlagerungen im Watt Nordfrieslands. *Dtsch. Hydr. Z.* **3**, 1950.
8. DOEGLAS, D. J. de: Interpretatie van Korrelgrootte Analyses. *Verh. Geol. Mijnb. Gen. Deel XV*, 1950.
9. FENCHEL, W.: Sedimentpetrographische Untersuchungen unter besonderer Berücksichtigung der Streupräparatanalyse. *N. Jahrb. f. Min. Monatshefte* H. 7 u. 8, 1953.
10. GRIFFITHS, J. C.: Estimation of error in grain size analyses. *Jour. Sed. Pet.* Vol. **23**, No. 2, 1953.
11. GRIPENBERG, St.: A study of the sediments of the North Baltic and the adjoining seas. *Fennia* **60**, 1934.
12. GROBA, E.: Neue Ergebnisse morphologischer und geologischer Untersuchungen in der mittleren und südlichen Ostsee. *Freiberger Forschungshefte* H. c5, 1953.
13. GROUT, F. F.: The use of calculations in petrology. A study for students. *Jour. Geol.* Vol. **34**, 1926.
14. GRY, H.: Eine Methode zur Charakterisierung der Kornverteilung klastischer Sedimente. *Geol. Rundsch.* **29**, 1938.
15. HOUGH, J. L.: Sediments of Cape Cod Bay, Massachusetts. *Jour. Sed. Pet.* Vol. **12**, No. 1, 1942.
16. INMAN, D. L.: Sorting of sediments in the light of fluid mechanics. *Jour. Sed. Pet.* Vol. **19**, No. 2, 1949.
17. JARKE, J.: Die Unterschiede in der Sedimentation vor der Ost- und Westküste Schleswig-Holsteins. *Diss. Kiel*. 1948.
18. JARKE, J.: Die Sedimentation in den schleswig-holsteinischen Förden. *Schr. Nat. Wiss. Ver. S.H.* **25**, 1951.
19. JOHANNSEN, A. u. MERRIT, C. H.: Comparative losses in crushing and sifting rock minerals. *Jour. Geol.* **34**, 1926.
20. KÖSTER, R.: Die Morphologie der Strandwall-Landschaften und die erdgeschichtliche Entwicklung der Küsten Ostwagriens und Fehmarns. *Meyniana*, Veröff. Geol. Inst. Univ. Kiel. **4**, Kiel 1955.
21. KRUMBEIN, W. C. u. PETTIJOHN, F. J.: *Manual of sedimentary Petrographie*. New York 1938.
22. KING, C. A. M.: Depth of disturbance of sand on sea beaches by waves. *Jour. Sed.* Vol. **21**, No. 3, 1950.
23. KUENEN, Ph. H.: *Marine Geology*. New York 1950.
24. MARSCHNER, A. W.: A method for the size analysis of sand on a number frequency basis. *Jour. Sed. Pet.* **23**, No. 1, 1953.
25. MENARD, H. W.: Sediment movement in relation to current velocity. *Jour. Sed. Pet.* Vol. **20**, No. 3, 1950.
26. MEYER-ABICH, H.: Die Sedimente von Borkum Riffgrund. Eine regional statistische Untersuchung. *Diss. Hamburg* 1949.
27. OTTO, W.: Sedimentpetrographische Untersuchungen an der Küste der inneren Lübecker Bucht. *Die Küste* **1**, 1952.
28. PETTIJOHN, F. J.: *Sedimentary Rocks*. New York 1949.
29. PETTIJOHN, F. J. u. LUNDAHL, A. C.: Shape and roundness of Lake Erie beach sands. *Jour. Sed. Pet.* Vol. **13**, No. 2, 1943.
30. PINCUS, H. J.: Investigations of Lake Erie sediments, Vicinity of Sandusky, Ohio. *Geol. Surv. Rep. Inv.* No. 9, 1950.
31. PINCUS, H. J.: Investigations of Lake Erie shore erosion. *Columbus* 1953

32. POWERS, M. G.: A new roundness scale for sedimentary particles. *Jour. Sed. Pet.* Vol. **23**, No. 2, 1953.
33. PRATJE, O.: Die Sedimente der Deutschen Bucht. *Aus Geol. Paläont. Inst. Univ. Königsberg Pr. u. Biol. Anst.: Helgoland* 1931.
34. PRATJE, O.: Die marinen Sedimente als Abbildung ihrer Umwelt und ihre Auswertung durch die regional statistische Methode. *Fortschr. Geol. usw.* **11**, 35, 1932a.
35. PRATJE, O.: Der Verbleib des Abbruchmaterials der Samlandküste. Ein Beispiel für die Abbildung von Strömungen in küstennahen Sedimenten. *Schr. Phys. Ökon. Ges. Königsberg Pr.* 1932b.
36. PRATJE, O.: Sind die Bodenprofile aus den Röhrenloten ohne Unterbrechungen? *Ann. Hydr. usw.*, 1934 a.
37. PRATJE, O.: Die Ausdeutbarkeit der Sedimente. *Geol. Rundsch.* **29**, 1938.
38. PRATJE, O.: Die Sedimentation in der südlichen Ostsee. *Ann. Hydr. usw.*, 1939.
39. PRATJE, O.: Die Bodenbedeckung der südlichen und mittleren Ostsee und ihre Bedeutung für die Ausdeutung fossiler Sedimente. *Dtsch. Hydr. Z.* **1**, 1948 a.
40. PRATJE, O.: Die Schwankungen der Sedimentzusammensetzung auf engstem Raum und ihre Untersuchungsmethoden. *Dtsch. Hydr. Z.* **1**, 1948 b.
41. PRATJE, O.: Eine neue Lotröhre und ihre erste Erprobung. *Dtsch. Hydr. Z.* **3**, 1950 a.
42. PRATJE, O.: Erfahrungen bei der Gewinnung von Grundproben vom fahrenden Schiff. *Dtsch. Hydr. Z.* **1**, 1952 a.
43. PRATJE, O.: Die Erfahrungen bei der Gewinnung von rezenten marinen Sedimenten in den letzten 25 Jahren. *Mitt. Geogr. Ges. Hamburg.* **50**, 1952 b.
44. PRATJE, O. u. SCHÜLER, F.: Bodenkartierung des Seegebietes Hoofden (südliche Nordsee) mit Hilfe von Grundproben und Echogrammen. *Dtsch. Hydr. Z.* **5**, 1952.
45. PYE, W. D.: Rapid methods for making sedimentational analyses of arenaceous sediments. *Jour. Sed. Pet.* Vol. **13**, No. 3, 1943.
46. PYE, W. D. u. PYE, M. H.: Sphericity determination of pebbles and sand grains. *Jour. Sed. Pet.* Vol. **13**, No. 1, 1943.
47. RITTENHOUSE, G.: A visual method of estimating two-dimensional sphericity. *Jour. Sed. Pet.* Vol. **13**, No. 2, 1943.
48. RITTENHOUSE, G. u. CONNAUGHTON, M. P.: Errors of sampling sands for mechanical analyses. *Jour. Sed. Pet.* Vol. **14**, No. 1, 1944.
49. RUCK, K. W.: Seegrundkartierung der Lübecker Bucht. *Die Küste* **2**, 1952.
50. SCHMITZ, H.: Die Waldgeschichte Ostholsteins und der zeitliche Verlauf der postglazialen Transgression an der holsteinischen Ostseeküste. *Ber. Deutsch. Botan. Ges. Bd.* **67**, 1953.
51. SCHNEIDERHÖHN, P.: Untersuchungen zur Siebanalyse von Sanden und zur Darstellung ihrer Ergebnisse. *N. Jb. Min. Abhdl.* **85**, 1953.
52. SCHUMANN, H.: Zur Korngestalt der Quarze in Sanden. *Chemie d. Erde* **14**, 1941.
53. SEIFERT, G.: Die Steilufer als Materiallieferanten der Sandwanderung. *Meyniana, Veröff. Geol. Inst. Univ. Kiel.* **4**, 1955.
54. SEIFERT, G.: Die postglaziale Geschichte der Warder und der Eichholzniederung bei Heiligenhafen. *Meyniana, Veröff. Geol. Inst. Univ. Kiel.* **4**, Kiel 1955 b.
55. SIMON, W. G.: Untersuchungsergebnisse an Grundproben aus der Außenelbe und ihre Ausdeutung hinsichtlich der Sandwanderung. *Mitt. Geol. Landesamt Hamburg* 1952.
56. SINDOWSKI, K.: Sedimentpetrographische Methoden zur Untersuchung sandiger Sedimente. *Geol. Rdsch.* **29**, 1938.
57. SZADZECZY-KARDOSS, E. v.: Die Bestimmung des Abrollungsgrades. *Cbl. f. Min. etc. Abt. b*, 1933.
58. TANNER, W. F. u. MALLANS, P.: Sorting of Canadian river, Oklahoma, sands. *Jour. Sed. Pet.* Vol. **20**, No. 4, 1950.
59. TAPPER, E.: Meeresgeschichte der Kieler und Lübecker Bucht im Postglazial. *Geol. Meere u. Binnengew.* **4**, 1944.
60. WIRTZ, D.: Die Beziehungen zwischen submariner Abtragung und Sandwanderung an der Küste Pommerns. *Mitt. Geol. Staatsinst. H.* **18**, 1949.