

Die Küste

ARCHIV
FÜR FORSCHUNG UND TECHNIK
AN DER NORD- UND OSTSEE



3950-A-2012-00000126

Die Küste

ARCHIV
FÜR FORSCHUNG UND TECHNIK
AN DER NORD- UND OSTSEE

HERAUSGEBER
DER KÜSTENAUSSCHUSS NORD- UND OSTSEE

JÄHRGANG 4/1955

DRUCK UND KOMMISSIONSVERLAG:
WESTHOLSTEINISCHE VERLAGSANSTALT BOYENS & CO. HEIDE I. HOLST.

Anschriften der Verfasser dieses Heftes:

Arbeitsgruppe „Küstenschutz“ im Küstenausschuß Nord- und Ostsee (Leiter: LORENZEN, Johann M., Wasserstraßendirektor, Wasser- und Schifffahrtsdirektion Kiel, Kiel-Wik, Hindenburgufer 247); BETH, Heinrich, Dipl.-Ing., Forschungsstelle Norderney; KÖRNER, Burghard, Dipl.-Ing. o. Professor em., Bad Pyrmont, Oesbergstr. 36; KRAMER, Johann, Dipl.-Ing., Forschungsstelle Norderney; KRAUSE, Heinrich Rudolf, Dr., Hydrobiologische Station, Falkau/Schwarzwald; NIEBUHR, Wulf, Oberregierungsbaurat Dr.-Ing., Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, Hertzstr. 16; SCHMIDT, Harry, Dr., Kiel, Feldstr. 97.

Die Verfasser sind für den Inhalt ihrer Aufsätze allein verantwortlich.

Nachdruck aus dem Inhalt nur mit Genehmigung des Herausgebers: Küstenausschuß Nord- und Ostsee, Ministerialrat i. R. GAYE, Kiel-Wik, Hindenburgufer 247, gestattet.

Schriftleiter: Dr. habil. E. WOHLBERG, Husum, Nissenhaus.

Inhaltsverzeichnis

KÖRNER, Burghard, o. Professor em. Die Sinkstoffe der Küstengewässer	5
Arbeitsgruppe „Küstenschutz“ im Küstenausschuß Nord- und Ostsee Allgemeine Empfehlungen für den deutschen Küstenschutz	52
SCHMIDT, Harry, Dr. Eine unbekannte Karte von Helgoland aus dem Jahre 1714 und die zu ihr ge- hörende Erläuterung	62
NIEBUHR, Wulf, Oberregierungsbaurat Dr.-Ing. Beobachtungen über den Sandtransport in der unteren Ems	67
KRAMER, Johann, Dipl.-Ing., und BETH, Heinrich, Dipl.-Ing. Ein integrierendes Sinkstoff-Fanggerät	93
KRAUSE, Heinrich Rudolf, Dr. Die Verteilung der organischen Substanz in den Sedimenten des Brackwasser- gebietes der Ems	102

Die Sinkstoffe der Küstengewässer

Ein Überblick über den Stand der Forschung

Von Burghard Körner

I. Die Aufgabe	5
II. Begriffe	6
III. Unterlagen	7
IV. Entwicklung und Stand der Sinkstoffforschung in den Binnengewässern	8
1. Übersicht über die Beobachtungsergebnisse und Grundlagen	8
2. Die Theorie der Sinkstoffführung der Flüsse und Ströme	11
V. Die Berechnung der Sinkstofffracht von Tideflüssen	13
VI. Die Sinkstoffe in den Küstengewässern	14
1. Flußmündungen in Meere ohne oder mit geringen Gezeiten	15
2. Flußmündungen in Meere mit Gezeiten	15
3. Der Sinkstoffhaushalt der Wattgebiete	21
4. Die Wirkung menschlicher Eingriffe auf den Sinkstoffhaushalt der Tideflüsse und Watten	24
VII. Die Herkunft der Sinkstoffe	26
1. Die Sinkstoffe der Wattgebiete	26
2. Die Sinkstoffe der Strommündungen	26
3. Andere Sinkstoffquellen	32
VIII. Schlickfall und Schlickbindung	32
IX. Die Strandriffe als Bildungen schwebenden Sandes	35
X. Zusammenfassung und Folgerungen	41
XI. Anhang: Die Theorie der Sinkstoffführung in Flüssen und Strömen	43
XII. Schriftenverzeichnis	46

I. Die Aufgabe

Seit der Überflutung des heutigen Nordseebeckens und der westlichen Ostsee zur Zeit des die letzte Eiszeit beendenden Klimawechsels arbeitet das Meer ununterbrochen an der Gestaltung der deutschen Küsten. Die Kräfte des Meeres, Wellen und Strömungen, suchen die Küstenlinien auszugleichen, Landvorsprünge zu beseitigen, Buchten und tote Winkel abzuriegeln oder auszufüllen. Sie werden durch kosmische und atmosphärische Vorgänge verursacht und gelenkt, welche die Strömungen verstärken oder schwächen und in Stürmen die Wirkung der Wellen zu vernichtender Kraft anwachsen lassen.

Die Abwehrkräfte des Landes beruhen auf dem Aufbau, der Festigkeit und dem Zusammenhalt der die Ufer bildenden Bodenarten. Auch sie unterliegen einem klimatisch bedingten, meist an die Jahreszeiten gebundenen Wechsel. Sonnenschein und Regen lockern von der Oberfläche aus das Gefüge, eindringendes Wasser sprengt es gefrierend und wäscht lösliche Stoffe aus. Lebensvorgänge der Tier- und Pflanzenwelt wirken im Küstensaum in der Hauptsache erhaltend und aufbauend mit.

Nur die systematische Forschung kann die unendlich vielfachen Zusammenhänge und Wechselbeziehungen aufklären. In Zusammenarbeit aller an der Küstenforschung beteiligten

wissenschaftlichen Disziplinen ist in den letzten Jahrzehnten viel geleistet worden. Mehr bleibt noch zu tun. Der im Auftrag des „Küstenausschusses Nord- und Ostsee“ im folgenden gegebene Überblick über die Sinkstoffe in den Küstengewässern hat den Zweck, die auf diesem wichtigen Teilgebiet bisher erarbeiteten Kenntnisse im Zusammenhang darzustellen, noch bestehende Wissenslücken aufzuzeigen und Anregungen für ihre Schließung zu geben.

Bei der Festlegung der Grenzen dieses Teilgebiets aus dem großen Komplex der Küstenforschung stellt sich zunächst die Frage: Was sind im Küstengebiet Sinkstoffe? Schon bei der Fließbewegung des Wassers allein gibt es keine etwa nach der Größe des Einzelkorns festzulegende Grenze zwischen Sinkstoff und Geschiebe. Zunehmende Fließgeschwindigkeiten lassen selbst groben Sand und Feinkies vorübergehend zu Sinkstoffen werden, die auf weite Strecken ohne zwischenzeitliche Bodenberührung fortgetragen werden. Im küstennahen Gebiet des Meeres und besonders in der Brandungszone der Wellen treten zur Turbulenz des strömenden Wassers als der die Sinkstoffbewegung einleitenden und erhaltenden Kraft noch die Impulskräfte der Wellenbewegung hinzu. Diese erreichen in Brechern solche Größe, daß selbst faustgroße Steine aus dem sie tragenden Element heraus und weit durch die Luft geschleudert werden.

Natürlich wird man solche Einzelerscheinungen nicht zum Maßstab einer Grenzziehung machen dürfen. Mangels sicherer Beobachtungsunterlagen bleibt jeder derartige Versuch willkürlich. Da aber ein Seegang mittlerer Stärke den Seesand dauernd soweit anzuheben vermag, daß er von der küstenparallelen Strömung ununterbrochen fortgetragen werden kann, scheint es berechtigt, diesen in den Rahmen der gestellten Aufgabe insoweit einzubeziehen, als die Bildung bestimmter Formen der Brandungszone nur durch den unmittelbaren Ausfall des Sandes aus dem Schweben erklärt werden kann.

Auf der anderen Seite sind die von den Flüssen dem Meere in echter oder kolloider Lösung zugeführten Stoffe insoweit zu berücksichtigen, als sie bei der Mischung mit Salzwasser in den Fluß- und Strommündungen ausflocken und Sinkstoffcharakter annehmen.

Die Herkunft eines großen Teils der Sinkstoffe der Küstengewässer aus dem Binnenland läßt es schließlich zweckmäßig erscheinen, der Darstellung einen kurzen Überblick über den Stand unserer Kenntnis der Sinkstoffbewegung in den Festlandgewässern vorzuschicken. Diese ist praktisch und theoretisch schon weit besser erforscht als die der Küstengewässer und kann Hinweise und Unterlagen für die weitere Arbeit liefern.

Nicht einbezogen werden dagegen die Einflüsse der für die Vergangenheit nachgewiesenen und noch gegenwärtig wirkenden Niveaushiftungen zwischen Land und Meer, die bei einer relativen Hebung des mittleren Meeresspiegels die zerstörenden Kräfte ebenso fördern, wie sie diese bei einer relativen Senkung mindern. Diese Niveaushiftungen und ihre Ursachen festzustellen ist eine vordringliche Aufgabe aller an der Meeres- und Küstenforschung beteiligten Wissenschaftszweige. Denn die Sturmflut vom 1. 2. 1953 an der niederländischen Südwestküste hat gezeigt, daß auch ein sehr langsames Ansteigen der Wasserstände in den Weltmeeren die Ingenieurbauten an der Küste und besonders die Höhe und Abmessungen der Deiche beeinflußt.

II. Begriffe

Die Zuordnung des wellenbewegten, schwebend beförderten Sandes zu den Sinkstoffen in dieser Arbeit ist mit durch die schwierige und für das Küstengebiet noch nicht zu völliger Klarheit gelangte Begriffsbestimmung veranlaßt.

Die englischsprachige Literatur verwendet für die Gesamtheit der vom Wasser beförderten Stoffe den Begriff „sediment“. Dieser trifft — wie im Deutschen — den irgendwie und -wo erreichten Endzustand und ist nicht geeignet, ohne besondere Zusätze die vorher durchlaufenen Bewegungszustände zu kennzeichnen. Die DIN 4049 vom 1. 3. 1954 bezeichnet die Gesamt-

heit der mechanischen Beimengungen des oberirdischen Wassers deshalb mit Recht als „Feststoffe“ und unterteilt diese in Schwimm-, Schweb-, Sinkstoffe und Geschiebe.

Die Begriffsbestimmungen der DIN für die Schwimmstoffe und das Geschiebe sind klar und eindeutig. Dagegen nicht der Begriff 4.35 „Schwebstoffe“. Offenbar ist versucht worden, die Schweb- und Sinkstoffe nach der Bewegungsform zu unterscheiden. Darauf deutet die Begriffsbestimmung 4.36 „Sinkstoffe“ = „Feststoffe, die vor dem Absinken geschwebt haben“. Wenn diese Unterscheidung beabsichtigt war, so hätten die Schwebstoffe aber nicht als „Feststoffe, meist mineralischer Natur, die im Wasser schweben, weil sie mit ihm im Gleichgewicht stehen“ charakterisiert werden dürfen, denn ihre meist mineralische Natur, das heißt in der Mehrzahl der Fälle: schwerer als Wasser, verlangt ein dynamisches Gleichgewicht zur Aufrechterhaltung des Schwebzustandes, wenn der Begriff Schwebstoff auch für Teilchengrößen oberhalb derer der kolloiden Lösungen gelten soll. Es ist zu hoffen, daß der noch nicht erschienene Teil II der DIN 4049, der die Fachausdrücke und Begriffsbestimmungen der Gewässerkunde qualitativ festlegen soll, durch Angabe der Korngrößengrenzen hierüber Klarheit bringen wird.

Die von der Arbeitsgruppe „Wasserbauliche Hydrometrie“ dem Küstenausschuß Nord- und Ostsee 1951 für seine Zwecke vorgeschlagenen Fachausdrücke sind bestimmter, ohne aber schon als endgültig formuliert gelten zu können. In dieser noch nicht veröffentlichten Definition der Sink- und Schwebstoffe wird unter „Sinkstoff“ ein Material verstanden, „das sich längere Zeit schwebend im Wasser hält, das sich aber bei abnehmender Strömungsgeschwindigkeit oder Wasserruhe wieder absetzt“. Dagegen sind „Schwebstoffe“: „feste Stoffe, die wegen ihrer geringen Korngröße (weniger als 1μ) infolge der Brownschen Molekularbewegung dauernd schwebefähig sind und daher am Absetzen verhindert werden. In diesem Sinne sind die Schwebstoffe das Übergangsglied zu den gelösten Sinkstoffen.“ Damit umfassen die Schwebstoffe den Korngrößensbereich der kolloiden Lösungen, der in der Kolloidchemie dem Teilchengrößensbereich von 0,2 bis $0,001 \mu$ entspricht, und die feineren Fraktionen der „Aufschwemmungen“. Diese haben zwar noch eine vom spezifischen Gewicht, der Kornform und dem Dispersionsmittel abhängige, aber in der Wasserbaupraxis zu vernachlässigende Fallgeschwindigkeit, zum Beispiel für Quarz von Kugelform und 1μ Durchmesser in destilliertem Wasser von 15°C : $v = \text{rund } 0,000785 \text{ mm/s}$.

Die gewählte Begriffsbestimmung der Sinkstoffe schließt alle Bewegungszustände: Schweben, Absinken und Ruhe (Ablagerung) ein und gibt keinen Korngrößensbereich an, weil ein großer Teil dieser Stoffe geringes spezifisches Gewicht und die Struktur unregelmäßiger, stark wasserhaltiger Flocken besitzt. Für Sand ist die untere Korngrößengrenze in der Definition der Schwebstoffe auf 1μ festgelegt. Die obere entspricht nach allgemeiner Auffassung an der Küste der Feinsandfraktion (0,1—0,2 mm), die in Schlickablagerungen häufig enthalten ist.

Alle größeren mineralischen Körperchen bis zu einem Durchmesser von 2 mm sind nach dem genannten Vorschlag „Sand“, das ist „auf dem Meeresboden wanderndes Material, welches durch die Strömung schiebend, rollend oder hüpfend weiter bewegt wird“.

III. Unterlagen

Im Verhältnis zu der sehr umfangreichen Geschiebeliteratur finden sich im deutschen Schrifttum weit weniger Veröffentlichungen über die Sinkstoffe. Fragen aus dem Grenzgebiet der Sandwanderung im Brandungssaum der Nord- und Ostsee und der mit der Landgewinnung zusammenhängenden Sinkstoffe sind dabei noch am häufigsten behandelt. Die Gründe dafür sind in der überragenden technischen Bedeutung der Geschiebebewegung für den weitgetriebenen Ausbau der heimischen Ströme und größeren Flüsse zu suchen, der gegenüber die Probleme der Sink-

stoffführung zurücktreten. In Ländern anderer klimatischer Verhältnisse und Bodennutzungsformen überwiegt die Bedeutung der Sinkstoffführung die des Geschiebes dagegen bei weitem. Dementsprechend lag das Schwergewicht der Forschung hier bereits seit langer Zeit und zum Teil sogar seit der Erschließung dieser Länder bei den Sinkstoffproblemen.

Den Vereinigten Staaten und den tropischen und subtropischen Ländern des englischen Weltreiches gebührt das Verdienst, am meisten zur Erforschung dieser Probleme beigetragen zu haben. Die als „Sedimentation Bulletin Nr. 2“ im Februar 1950 erschienene „Annotated Bibliography on Sedimentation“ (2) gibt auf rund 350 Druckseiten eine Übersicht über etwa 90 v. H. der wichtigsten in englischer Sprache vor 1950 erschienenen Arbeiten. Diese umfassende und unter dem Gesichtspunkt des Ingenieurs geschaffene Zusammenstellung hat dadurch besonderen Wert, daß zu fast allen Titel- und Verfasserangaben kurze Inhaltsübersichten gegeben werden. Die Zahl der seit 1950 erschienenen Veröffentlichungen, die zunehmend auch Fragen der Küstengewässer behandeln, würde demnächst eine Fortsetzung der Bibliographie rechtfertigen und die Arbeiten damit leichter zugänglich machen.

In jüngerer Zeit hat die Sinkstoffforschung auch in Frankreich an Interesse gewonnen. Davon zeugen Berichte der „Société Hydrotechnique de France“, deren Inhalt GEORGE LABAYE in „La Houille Blanche“ (58) zusammengefaßt hat, und andere mehr.

Im übrigen Ausland mit Ausnahme der Niederlande scheinen die Probleme der Sinkstoffe erst in jüngster Zeit die ihrer Bedeutung zukommende Würdigung in der Forschung zu finden. Das ist um so erstaunlicher, als zum Beispiel der Schlickfall für die amerikanische Ostküste, die englischen Nordsee- und Kanalhäfen und die französischen Strommündungen von gleich großer Bedeutung ist, wie für die deutsche Nordseeküste. Die Bemühungen des Verfassers, durch Briefwechsel mit ausländischen Fachleuten Literaturnachweise zu erhalten, sind deshalb so gut wie erfolglos geblieben.

Die Unterlagen, auf die sich diese Arbeit stützt, sind dem Verfasser, soweit sie Strommündungen und Küstengewässer betreffen, in der Hauptsache vom Küstenausschuß Nord- und Ostsee, der Bundesanstalt für Gewässerkunde und anderen Dienststellen zugänglich gemacht worden. Ihnen und Herrn Dr. habil. WOHLBERG, Forschungsstelle Westküste in Husum, der Fehlendes aus seiner persönlichen Bücherei freundlich zur Verfügung stellte, sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Für die Sinkstoffführung in den Binnengewässern lieferten die unter dem Obertitel: „A Study of Methods used in Measurement and Analysis of Sediment Loads in Streams“ zusammengefaßten Berichte des U.S. Interdepartmental Committee wertvolle Unterlagen (114). Diese Berichte und die erwähnte Bibliographie fassen die bis 1948 gesammelten umfangreichen nordamerikanischen praktischen und wissenschaftlichen Erfahrungen zusammen und vermitteln einen umfassenden Überblick über den Stand der Forschung auf dem Gebiet der Sinkstoffforschung. Auf die den Heften beigefügten umfangreichen Literaturübersichten muß verwiesen werden. Die für diesen Bericht benutzten Arbeiten sind in der Zusammenstellung am Schluß aufgeführt. Zahlen in Klammern verweisen auf dieses Verzeichnis.

IV. Entwicklung und Stand der Sinkstoffforschung in den Binnengewässern

1. Übersicht über die Beobachtungsergebnisse und Grundlagen

Die Bedeutung des Sinkstoffproblems wurde zuerst in den Ländern erkannt, die aus klimatischen Gründen auf Bewässerungsanlagen zur Erhaltung und Steigerung der Ertragsfähigkeit des Bodens angewiesen sind. Die Versuche, Querschnittsform und -größe sowie Gefälle der

Bewässerungskanäle so zu wählen, daß sie formbeständig bleiben und möglichst geringer Unterhaltungsarbeit bedürfen, bezeichnen die erste und älteste Stufe der wissenschaftlichen Erforschung des Sinkstoffproblems.

Ohne auf die zahlreichen Versuche zur Beantwortung dieser so einfach scheinenden Frage einzugehen, muß gesagt werden, daß brauchbare Lösungen empirisch zwar für Einzelfälle gefunden sind — zum Beispiel von LACEY (58a, 58b) —, daß es aber noch nicht gelungen ist, eine für alle Fälle anwendbare Gleichung zu finden. Bei der Vielfalt der Erscheinungen und ihrer örtlichen und zeitlichen Variationsbreite erscheint es auch unwahrscheinlich, daß eine allgemeingültige Lösung gefunden werden kann, die mehr bieten würde als Näherungswerte.

Das Problem wäre einfach, wenn es sich bei der Sinkstofffracht nur um die im Flußbett selbst aufgearbeiteten Feststoffe handeln würde. Der Grundtendenz der Erhöhung dieses Anteils an der Gesamtfracht mit steigender Wasserführung und Fließgeschwindigkeit überlagert sich aber die klimatisch bedingte Zufuhr von Feinstoffen, meist tonigen Charakters, aus der flächenhaften Abspülung mehr oder weniger großer Teile des Einzugsgebiets bei jedem Regenschlag.

So kann zum Beispiel die starke Überregnung eines kleinen Teils des Einzugsgebiets besonders in Zeiten, in denen die Kulturböden nicht durch eine Vegetation geschützt sind, weit unterhalb im Fluß zu einer Erhöhung der Gesamtsinkstofffracht führen, ohne daß sich die Abflußmenge an dieser Stelle ändert. Die gleiche Ursache verändert auch die erwähnte Grundtendenz derart, daß die Sinkstofffracht des steigenden Astes einer Hochwasserwelle weit größer wird als die bei gleichen Wasserständen des fallenden Astes. Damit entfällt die Möglichkeit, gleicher Wasserführung eine bestimmte Sinkstoffführung zuzuordnen.

Hinzu kommt die in der Regel ungleichmäßige Verteilung der Sinkstoffe über den Flußquerschnitt, sowohl der Breite als auch der Tiefe nach. Zwar nimmt die Sinkstoffkonzentration von der Wasseroberfläche nach unten einigermaßen gesetzmäßig zu, aber über die Breite des Querschnitts findet sich selbst in regelmäßigen, langen geraden Flußstrecken nur selten eine annähernd gleichbleibende Verteilung. Vielfach sind in solchen Strecken zwei Zonen besonderer Sinkstoffanreicherung rechts und links der Achse festgestellt, die durch die allgemeine Wasserbewegung ebenso zu erklären sind, wie die einseitige Zunahme der Konzentration in oder unterhalb von Flußkrümmungen. Schließlich ist bekannt, daß sich das Wasser von Nebenflüssen oft noch viele Kilometer weit an seiner Färbung als einseitige, außerordentlich stabile Dichteströmung feststellen läßt.

Aus Messungen an nur einem oder wenigen Punkten des Querschnitts, und mögen sie noch so häufig wiederholt werden, läßt sich daher nur unter besonders günstigen örtlichen Verhältnissen und bei ihrer Ergänzung und Kontrolle durch den ganzen Querschnitt erfassende Vollmessungen ein einigermaßen zutreffendes Bild der Sinkstoffführung gewinnen. Die sehr zahlreichen Literaturangaben über Sinkstofffrachten müssen daher auf die Art ihrer Gewinnung geprüft werden. Bedauerlicherweise geben die meisten von ihnen nur Zufallswerte wieder, aus denen Schlüsse auf die gesamte Sinkstofffracht eines Abflußjahres nicht gezogen werden können.

In der Erkenntnis dieser Tatsache ist mehrfach versucht worden, die Sinkstofffracht durch Aufmessung der Ablagerungen in natürlichen Seen oder Staubecken (18, 78, 82) zu erfassen, und durch die Bestimmung der Korngrößen entnommener Proben den als Geschiebe oder als Sinkstoff zu wertenden Anteil näherungsweise zu errechnen. Dabei werden die feinsten, weit in den See vertriebenen Teilchen von vornherein nicht erfaßt. Außerdem bleibt sowohl die Bestimmung der Ablagerungszeit, als auch die Zuordnung der Proben zu bestimmten Zeiträumen und Abflußmengen und die Feststellung der Dichte der Ablagerungen unsicher.

Die umfassendsten Angaben, die in der Hauptsache aus derartigen Untersuchungen gefunden sind, hat STEVENS (108) gemacht. OEXLE (79) und VAN RINSUM (94) geben Werte von

bayrischen Flüssen. Einige in Frankreich gewonnene Zahlen nennt LABAYE (58). Alle Angaben dürfen aber selbst dann nur als rohe Näherungswerte angesprochen werden, wenn sie wie nordamerikanische aus laufenden täglichen Messungen stammen, weil die Zone der größten Sinkstoffkonzentration in Sohlennähe durch Messungen nicht erfassbar ist und nur auf Grund einer Extrapolation der Kurven der Sinkstoffverteilung in der Lotrechten geschätzt werden kann.

Es würde hier zu weit führen, aus der Fülle der Unterlagen auch nur einen Auszug zu geben. Doch mag es von Interesse sein, an Hand einiger Zahlen auf weitere Faktoren hinzuweisen, welche die Sinkstoffführung der Flüsse mitbestimmen.

Der Einfluß von Nebenflüssen kommt zum Beispiel in den aus zwölfjährigen Messungen an drei Stellen der Donau ermittelten Werten zum Ausdruck, die ERTL (18) als spezifische Schwebstoffmengen (in ‰ der Jahresabflußmenge) angibt:

Neu Ulm	7 611 km ²	0,056 ‰
Ingolstadt	20 017 km ²	0,079 ‰
Vilshofen	47 674 km ²	0,040 ‰

Die Zahlen lassen Schlüsse auf die Sinkstofffracht der Nebenflüsse zu, die meist weit größer ist und im Inn bei Neu-Oetting 0,203 ‰ erreicht. Dem entspricht eine mittlere Jahresmenge von 3,2 Mill. t oder etwa 2,5 bis 3 Mill. m³, in der die in der sinkstoffreichsten Zone bis 50 cm über der Sohle geförderten Mengen noch nicht enthalten sind, weil das verwendete Auffanggerät nicht tiefer abgesenkt werden konnte.

Die klimatischen und geologisch-mineralogischen Einflüsse auf die Sinkstofffracht mögen schließlich folgende Werte spezifischer Sinkstoffmengen (in ‰ der Jahresabflußmenge) zeigen:

Mississippi bei St. Louis	0,7 ‰	} langjährige Mittelwerte
Missouri „ „	3,5 ‰	
Mississippi unterhalb des Zusammenflusses	1,0 ‰	
Colorado, Oberlauf	13,4 ‰	} größte Jahresmittelwerte
„ Mittellauf	12,4 ‰	
„ Unterlauf	9,4 ‰	
Nil bei Assuan	0,83 ‰	14jähriges Mittel
Indus bei Sukkur	3,03 ‰	} langjährige Mittelwerte
Yangtse	0,36 ‰	
Hoang Ho	39,5 ‰	Mittel 1919

Kurzfristig auftretende Sinkstoffgehalte ostasiatischer Flüsse erreichen oft 30 v. H. und in Einzelfällen bis zu 50 v. H. des Wassergewichts (20). Die außergewöhnliche Feinheit der Sinkstoffe wird durch folgende Korngrößenangabe gekennzeichnet:

0,125 — 0,0625 mm	= 2 ‰
0,0625 — 0,0039 mm	= 48 ‰
0,0039 — 0,0001 mm	= rund 50 ‰ (Klei).

Ohne auf die Bedeutung solch hoher Werte für den Ingenieur und die Volkswirtschaft näher einzugehen, sei noch mitgeteilt, daß der mittlere jährliche Flächenabtrag der in der Hauptsache durch das Stromsystem des Mississippi entwässerten Vereinigten Staaten zwar nur auf 0,033 mm geschätzt wird. Dem entspricht aber ein Abtrag an fester Masse von rund 780 Mill. t im Jahr, die sich im Mittel der Jahre 1936—1950 auf rund 500 Mill. t Feststoffe — zum weitaus größten Teil Sinkstoffe — und auf 280 Mill. t in Lösung gegangene Stoffe verteilen (34). Diese

werden zum kleineren Teil in Stauräumen und den Überschwemmungsgebieten abgelagert, zum größeren Teil aber dem Meere zugeführt.

2. Die Theorie der Sinkstoffführung der Flüsse und Ströme

Die auffällige Tatsache, daß kleine Teilchen von größerem Gewicht als Wasser zeitweilig oder dauernd mechanisch in einem Schwebезustand gehalten werden, setzt irgendwelche Kraftwirkungen voraus, die für die Erhaltung des Schwebезustands gleich der Wirkung der Schwerkraft, für die Einleitung des Schwebens aber größer als diese sein müssen. Die Ursachen dieser Kraftwirkungen sahen ältere Forscher entweder in den Unterschieden der Fließgeschwindigkeiten eines Flußquerschnitts oder in „vertikalen Komponenten“, welche sie der Strömung zuordnen.

Die erste Forschergruppe ging von der Beobachtung aus, daß die Fließgeschwindigkeit mit zunehmender Entfernung von der Sohle des Querschnitts nach oben erst schnell, dann langsamer wächst, während die Sinkstoffkonzentration nach oben abnimmt. Es lag nahe, diese Abnahme mit dem kleiner werdenden Geschwindigkeitsgradienten in Verbindung zu bringen. Dabei wurde aber übersehen, daß es sich offenbar um Gleichzeitigkeiterscheinungen und nicht um Ursache und Wirkung handelt. Auf dieser Grundlage unter anderen von FLAMANT aufgestellte Beziehungen konnten deshalb brauchbare Ergebnisse nicht liefern.

Die zweite Gruppe geht von der bekannten Erscheinung aus, daß feste Körperchen um so leichter und zahlreicher in den Schwebезustand versetzt und in ihm gehalten werden, je größer die Geschwindigkeit der Strömung ist. Aus dieser Tatsache, die in der Beobachtung scheinbar aufquellender Wasserkörper im fließenden Wasser eine Stütze findet, schließen sie, daß die Fließbewegung von der Geschwindigkeit v eine aufwärts gerichtete Komponente $v_f = v/m$ besitze, wobei m ein von v abhängiger Beiwert ist, der aber auch zur Wassertiefe in Beziehung gesetzt wird. v_f muß gleich oder größer als die Fallgeschwindigkeit der Körperchen im Wasser sein, um den Schwebезustand zu erhalten oder einzuleiten.

Zu dem gleichen Schluß führt auch die Annahme, daß die bekannten Pulsationen des fließenden Wassers nicht nur in der Strömungsrichtung auftreten, sondern auch in allen Richtungen senkrecht oder schräg zu dieser. Für die Pulsationen selbst findet sich dabei aber, außer bei Bettunregelmäßigkeiten und in oder unterhalb von Krümmungen, keine befriedigende Erklärung. Der Hauptvertreter dieser Gruppe VELIKANOV (120) glaubt auf Grund von Versuchen eine Beziehung zwischen der Sinkstoffverteilung im Querschnitt einerseits und der Fallgeschwindigkeit, dem Abstand von der Sohle und der Zeit andererseits gefunden zu haben.

Diese und ähnliche, empirisch gewonnenen Ableitungen ermöglichen zwar Teilberechnungen, zum Beispiel die der Geschwindigkeiten, welche das Ausfallen von Teilchen bestimmter Größe eben noch verhindern, ihre Autoren waren aber noch nicht in der Lage, die Turbulenz des Wassers rechnerisch in ihre Betrachtungen einzubeziehen. Die gewonnenen Ergebnisse sind gleichwohl, wie zum Beispiel die Arbeiten von KREY (53), als wertvolle Vorarbeiten anzusehen.

Denn der Grundgedanke KREYS, die Geschwindigkeitsverteilung der turbulenten Strömung, die Pulsationen und die Sinkstoffkonzentration miteinander zu verbinden, war richtig. Zur Zeit seiner Arbeiten waren die Voraussetzungen für vollkommenere Rechnungsansätze aber noch nicht gegeben. Diese boten erst die Fortschritte der von PRANDTL eingeleiteten Turbulenzforschung.

Die ersten Ansätze zu deren Verwendung finden sich in den Vereinigten Staaten bei O'BRIEN (77). Sie wurden durch zahlreiche Beobachtungen und Messungen in Strömen und Kanälen sowie durch Versuche mit künstlich erzeugter Turbulenz (42, 95) berichtigt und ergänzt. LANE und KALINSKE (59) und EINSTEIN (17a) gelang es dann, die gewonnenen Beziehungen in eine mathematische Form zu kleiden, die erlaubt, die Sinkstoffverteilung in einer

Stromlotrechten unter gewissen Vereinfachungen und Voraussetzungen zu berechnen, wenn die Sinkstoffkonzentration an einem Punkte dieser Lotrechten gemessen ist.

Die Vereinfachungen sind: die Fortlassung der untersten Zone über der Stromsohle, in der sich die bisher auf keine Weise rechnerisch oder meßtechnisch erfaßbare Sprungbewegung vollzieht; Betrachtung des Abflusses als zweidimensional, so daß eine Stromvertikale einen Wasserkörper von der Breite 1 repräsentiert.

Die Voraussetzungen: Feststellung der Sinkstoffkonzentration an einem Punkt der Vertikalen durch Messung; beharrender Abfluß, das heißt Gleichheit der Geschwindigkeitsverteilung in aufeinanderfolgenden Querschnitten; einheitliche Korngröße der Sinkstoffe; Gleichgewicht zwischen der Wirkung der Schwerkraft, welche die Partikelchen auszufällen und die Konzentration der oberen zugunsten der unteren Schichten zu vermindern sucht, und der Wirkung der Turbulenz, welche die Konzentration ausgleicht.

Die noch keinesfalls vollkommene Theorie beruht auf der durch zahlreiche Messungen bestätigten Annahme, daß die Sinkstoffe gleicher Korngröße oder Fallgeschwindigkeit in der Lotrechten gesetzmäßig — entsprechend der Turbulenz — verteilt sind und daß für die Kurve der Geschwindigkeitsverteilung in der gleichen Lotrechten bestimmte theoretische oder auf Messungen beruhende Annahmen gemacht werden können. Die Sinkstofffracht jedes durch eine Lotrechte repräsentierten Querschnittsabschnitts wird dann durch punktweise Multiplikation der aus den lotrechten Flächen beider Größen rechnerisch oder graphisch festgestellten Mittelwerte gewonnen.

Dabei ist allerdings zu beachten, daß die Kurve der Sinkstoffkonzentration jeweils nur für eine Korngröße gilt. Die Rechnungen müssen also für jede repräsentative Korngröße der gesamten Sinkstofffracht besonders durchgeführt werden. Durch die Benutzung nomographischer Auftragungen kann diese Arbeit wesentlich vereinfacht werden. Gleichwohl bleibt sie um so größer, je weiter der Korngrößenbereich der vom Flusse geförderten Sinkstoffe ist und in je zahlreichere Stufen er zerlegt wird.

Die Arbeits- und Kostenersparnis liegt in der Hauptsache in der erheblich geringeren Feldarbeit, weil für eine vollständige Erfassung der Sinkstofffracht nur je eine Messung in jeder der ausgewählten Meßlotrechten auszuführen ist. Besonders bei großen Flußquerschnitten ergibt sich durch die Zeitersparnis eine Genauigkeit der Ergebnisse, die der einer Vollmessung durchaus gleichwertig ist. Denn die häufigen schnellen Änderungen der Sinkstoffkonzentration selbst bei gleichbleibender Abflußmenge machen das Ergebnis einer Vollmessung um so unsicherer, je längere Zeit sie beansprucht.

Obleich gegen die hier nur skizzierte Theorie erhebliche Einwände zu erheben und erhoben worden sind, scheint sie doch interessant genug, um sie im Anhang ausführlicher wiederzugeben, zumal eine Veröffentlichung in Deutschland noch nicht bekanntgeworden ist. Die erhobenen Einwände werden dabei mitbehandelt. Die Theorie hat sich in den Vereinigten Staaten besonders für die laufende Überwachung der Schwebstoffführung vollkommen durchgesetzt. Dort wird an gut gewählten Meßstellen meist nur an einem Punkt des Gesamtquerschnitts gemessen, nachdem die allgemeine Konzentrationsverteilung, auch über die Breite, durch wenige über das Jahr verteilte Vollmessungen festgestellt worden ist.

Die gegen die Theorie mit Recht zu erhebenden Einwände werfen jedoch die Frage auf, ob es der sehr zeitraubenden rechnerischen Weiterbehandlung der aus Einzelmessungen gewonnenen Ergebnisse überhaupt bedarf, um zu einer ausreichend zuverlässigen Bestimmung der gesamten Sinkstofffracht eines Flusses zu kommen. Da die Bayrische Landesstelle für Gewässerkunde, französische und italienische Dienststellen für die laufende Überwachung der Sinkstoffführung Einzelmessungen an durch Vollmessungen als für den Gesamtquerschnitt reprä-

sentativ bestimmten Punkten verwenden, würde ein Vergleich der so empirisch gewonnenen mit den sich aus der Theorie ergebenden Sinkstofffrachten leicht möglich und wertvoll sein.

V. Die Berechnung der Sinkstofffracht von Tideflüssen

Zur Berechnung fehlen in der Regel die Voraussetzungen der festen Bettbegrenzung und des gleichförmigen Abflusses. Infolge der Gewichtsunterschiede des Süß- und Salzwassers treten außerdem Strömungsüberschneidungen auf. Das schwerere Seewasser strömt beim Kentern von Ebbe auf Flut als Unterströmung schon ein, während das leichtere Süß- oder weniger salzhaltige Brackwasser an der Oberfläche ausströmt. Die im seeseitigen Teil der Strom- und Flußmündungen scharfe Grenze (Sprungschicht) dieser Strömungen verliert sich aber weiter stromauf durch Diffusion und Mischung.

Schließlich dienen in durch Bänke und Wattflächen geteilten Mündungstrichtern einzelne Stromrinnen bevorzugt dem einlaufenden Flutstrom, andere dem auslaufenden Ebbstrom. Damit entstehen im Längsschnitt und im Grundriß der Mündungen in Verbindung mit dem Wechsel des Tidehubs und der Zuflüsse aus dem Binnenlande sich ständig ändernde und schwer zu übersehende Abflußverhältnisse.

Gleichwohl müßte es möglich sein, durch intensive Messungsarbeit wenigstens für mittlere und Schönwetterlagen Mittelwerte der Strömungs- und Geschwindigkeitsverteilung für einzelne Abschnitte einer gemittelten Tide zu gewinnen und darauf einen Rechnungsansatz nach der entsprechend erweiterten Theorie aufzubauen. Auch wäre es reizvoll, den Einfluß der durch Wellen erzeugten zusätzlichen Turbulenz auf die Sinkstoffverteilung in der Lotrechten grundsätzlich festzustellen¹⁾.

VICK (122) hat einen anderen Weg angegeben, auf dem die Sinkstofffracht von Tideflüssen unter bestimmten Voraussetzungen aus wenigen oder sogar nur einer Punktmessung in jeder Meßlotrechten rechnerisch angenähert bestimmt werden kann.

Die Voraussetzungen sind: beiderseitige Bettbegrenzung bei allen Wasserständen, keine Änderungen der Querschnitte mit der Zeit durch Ablagerung oder Abtragung und einmalige Erfassung der Sinkstofffracht bei Flut- und Ebbstrom durch Vollmessungen bei möglichst zahlreichen Querschnittsfüllungen und mitzumessenden Fließgeschwindigkeiten. Ziel dieser Voruntersuchung ist die Feststellung des Punktes in jeder Meßlotrechten, der die mittlere Sinkstoffkonzentration in dieser Lotrechten repräsentiert. VICK nimmt an, daß dieser Punkt im allgemeinen in 0,3 bis 0,4 t der Wassertiefe t über der Sohle liegt, aber seine Lage infolge der durch verschiedenen Salzgehalt veranlaßten Strömungsschichtung bei Ebbe und bei Flut und auch in den einzelnen Meßlotrechten wechselt.

Zwischen dem Sinkstoffgehalt s (kg/m^3) und der Fließgeschwindigkeit v (m/s) soll die Beziehung bestehen:

$$s = k \cdot v^z,$$

¹⁾ Während der Drucklegung teilt Herr Dr. IR. VAN VEEN, Hoofdingenieur-Directeur, Rijkswaterstaat — Algemene Dienst, freundlicherweise mit, daß es Herren seiner Verwaltung gelungen ist, mit Hilfe der Theorie auch im Tidegebiet quantitative Sinkstoffberechnungen durchzuführen, wenn die Salzgehaltsunterschiede nicht zu groß sind. Die Berechnungen stimmen mit den Ergebnissen von Messungen und Peilungen überein. Der Wind hat wenig Einfluß, wenn die Wassertiefen nicht zu klein sind. Leider sind die entwickelten Berechnungsmethoden noch nicht veröffentlicht.

Dr. VAN VEEN verweist außerdem auf die im Juni 1955 erschienene Arbeit von H. A. EINSTEIN: „Mechanics of bottom sediment movement, due to Wave-action.“ Technical Memorandum no. 75 of the Beach Erosion Board. Diese konnte nicht mehr beschafft und berücksichtigt werden. Herrn Dr. IR. VAN VEEN sei für seine freundliche Mitteilung an dieser Stelle bestens gedankt.

deren Unbekannte k und z empirisch zu bestimmen sind. Für den durch die Meßlotrechte repräsentierten Querschnittsteil wird dann

$$s_m = k \cdot v_m^z.$$

Für den Gesamtquerschnitt ist die mittlere Profilvergeschwindigkeit

$$V_m = \frac{\int_0^B v_m \cdot dx}{B}$$

und die durch den Querschnitt geförderte Sinkstoffmenge wird:

$$S_m = \frac{\int_0^B s_m \cdot dx}{B} = \frac{\int_0^B k v_m^z \cdot dx}{B}.$$

Die Gleichung ist jedoch nur lösbar, wenn die Fließgeschwindigkeiten gesetzmäßig über die Querschnittsbreite verteilt sind. Der Verfasser gibt z. B. für von der Strommitte nach beiden Seiten parabelförmig auf Null abfallende v_m -Werte nach einigen Umrechnungen folgende Gleichung an:

$$S_m = \frac{k}{B} \left(\frac{6 V_m}{B^2} \right)^z \cdot \int_0^B (x \cdot B - x^2)^z \cdot dx.$$

Das Integral ist am einfachsten graphisch auszuwerten, da z in der Regel einen Dezimalbruch darstellt.

Der Verfasser sagt abschließend, daß das Verfahren wegen der notwendigen Verallgemeinerungen nur überschlägliche Resultate erwarten läßt. Ob dieses Ergebnis aber auch für die Strecke eines Tideflusses gilt, in dem Überschiebungen des Flut- und Ebbstroms eintreten, bleibt offen.

In der gleichen Arbeit wird ein Näherungsverfahren behandelt, mit dem die in einer bestimmten Flußstrecke während einer Tide oder eines Tideabschnitts abgelagerten oder ausgeräumten Sinkstoffmengen ermittelt werden können. Und schließlich wird dieses Verfahren mit dem Ziel abgewandelt, den Wechsel zwischen den in dem obersten Abschnitt eines Tideflusses ein- oder ausgetriebenen Schwerstoffmengen aus den im gleichen Zeitabschnitt am untern Ende dieser Strecke beobachteten Tiden ungefähr zu schätzen. Die Gleichungen und die ihre Verwendung einschränkenden, vom Verfasser erläuterten Voraussetzungen anzugeben, würde hier zu weit führen.

In den Wattgebieten und an der freien Küste besteht auch unter Zuhilfenahme empirischer Messungen vorläufig keine Möglichkeit zur Berechnung der Sinkstoffführung. Bei den Wattströmen und Prielen fehlen bei höheren Wasserständen die seitlichen Begrenzungen. Die Überströmung der Watten und der Wiederablauf des Wassers von ihnen bringt sprungartige Änderungen der Sinkstoffführung. Hier und im Brandungsraum der Küsten verstärkt der Wellenschlag die Aufnahme und den Transport der Sinkstoffe um so mehr, je höher die Wellen und je geringer die Wassertiefen werden.

Für die äußeren Teile der Mündungsgebiete von Tideflüssen hat LUCHT (62, 64) jedoch ein empirisches Verfahren angegeben, mit dem zwar nicht der gerichtete Schwerstofftransport, aber die gesamte Materialumlagerung in einem abgegrenzten Gebiet durch den Vergleich aufeinander folgender Peilpläne überschläglich ermittelt werden kann. Hierüber wird weiter unten im Abschnitt VI 2 berichtet.

Da bekannt ist, daß die Länge der durch Wellen erzeugten symmetrischen Riffel von der Wellenhöhe, der Wassertiefe und der Korngröße des Sandes abhängt, wird es sich empfehlen, in Fortsetzung der bisher vorliegenden Versuche die Grenzwerte der Orbitalgeschwindigkeiten festzustellen, die ein Material bestimmter Korngröße in Suspension bringen. Das erfordert zunächst die versuchstechnisch schwierige Erfassung dieser Geschwindigkeiten bei Flachwasserwellen im Laboratorium.

VI. Die Sinkstoffe in den Küstengewässern

Die vielfältigen Formen der Sinkstoffbewegung und -ablagerung in den Küstengewässern verlangen eine Gliederung des Stoffes nach dem Ort der Erscheinungen.

1. Flußmündungen in Meere ohne oder mit geringen Gezeiten

Sie verdanken ihre Entstehung den vom Fluß zugeführten und mit Verringerung der Fließgeschwindigkeit in den größer werdenden Querschnitten zur Ablagerung kommenden Feststoffen. In den größeren Flüssen und Strömen überwiegt dabei der Anteil der Sinkstoffe den des am Grunde bewegten und als Geschiebe anzusprechenden Sandes erheblich. Für den Mississippi ist zum Beispiel ein Verhältnis von 85 : 15 festgestellt.

Die Sinkstoffe fallen um so weiter seewärts aus, je feiner sie sind. Über diese Ablagerungen schiebt sich im Laufe der Zeit und besonders bei Hochwasserführung des Flusses gröberes Material hinweg. Ihm überlagert sich in ruhigen Zeiten wieder feineres. Der entstehende Schüttkegel ist also schichtweise aufgebaut, wenn nicht größere Spiegelschwankungen die Ablagerungen in den Einflußbereich der Wellen bringen. Diese arbeiten die Ablagerungen auf, verschieben sie landwärts und lassen sie häufig über das mittlere Meeresniveau in kürzeren Zeiträumen aufwachsen, als bei den vergleichbaren Bildungen an den Flußmündungen in Binnenseen.

Der Fluß bahnt sich durch die Aufschüttung einen oder mehrere Wege. Die ursprünglich vorhandenen Küstenformen, vorherrschende Küstenströme, langfristige relative Änderungen des mittleren Meeresniveaus zum Festland und das Abflußregime des Flusses wirken an der Bildung der Mündungen — einfache, Delta- oder Haffmündungen — mit, soweit der Mensch nicht im Interesse der Schifffahrt und Vorflut durch technische Maßnahmen in die natürliche Entwicklung eingreift.

Nur die feinsten Sinkstoffe kommen — besonders bei unruhigem Wetter und Hochwasserführung der Ströme — infolge der durch die Wellen erzeugten Turbulenz in Küstennähe nicht zur Ablagerung, sondern werden weit in das Meer hinausgeführt. So ist das „graue Wasser“ der Weichsel wiederholt noch auf der Höhe von Brüsterort und nördlich davon festgestellt worden, ohne daß die das Wasser färbenden Sinkstoffe in diesem Gebiet schon endgültig zur Ablagerung kommen. Das ist, wie PRATJE (87, 90, 90a) nachgewiesen hat, nur in den im Stromschatten liegenden größten Tiefen des Bodenreliefs und in geschützten Buchten möglich. Hier sammelt sich auch das feinste Material der in Uferabbrüchen aufgearbeiteten diluvialen Mergel und Tone und bildet ausgedehnte Schlickgebiete. RUCK (97) berichtet im einzelnen über die Bodenbedeckung der Lübecker Bucht.

2. Flußmündungen in Meere mit Gezeiten

Flußmündungen in Meere mit Gezeiten unterliegen zusätzlich den gestaltenden Kräften der regelmäßigen Spiegelschwankungen und dem seewärts größer werdenden Einfluß des Salzwassers. Mit dem Tidehub wechselt das Fließgefälle die Richtung. In Abhängigkeit vom Meeresniveau bei HW, den jeweiligen Abflußmengen und dem Spiegelgefälle des Flusses tritt Salzwasser in die Mündung mehr oder weniger weit ein, um bei außen fallenden Wasserständen unter dem Druck des zurückgestauten Süßwassers wieder zurückzupendeln. Durch Mischung und Diffusion treten dabei hin- und herschwingende Brackwassergebiete²⁾ mit landwärts abnehmendem Salzgehalt ebenso auf, wie Überschiebungen der Strömungen in den Grenzgebieten der Brackwasserzone gegen Fluß und Meer als Folge der verschiedenen spezifischen Gewichte und der Gestaltung des Mündungsgebietes im Grundriß und in den Querschnitten.

Die vielfältigen Erscheinungen haben grundsätzliche Bedeutung für die vom Fluß mitgeführten Feststoffe jeder Art. Es galt lange Zeit als selbstverständlich, daß diese restlos bis in die See verfrachtet würden und schließlich irgendwo zur Ablagerung kämen. Besonders niederländische Forscher: BAAK (3), VAN VEEN (116, 117, 118), CROMMELIN und MAASKANT (8, 9) glauben aber durch petrographische Untersuchungen festgestellt zu haben, daß aus Rhein, Ems,

²⁾ Hier ohne Rücksicht auf den Salzgehalt im allgemeinen Sinne gebraucht.

Weser und Elbe kein Flußsand bis ins Meer gelangt. Über ihre und die Forschungsergebnisse anderer Autoren berichtet zusammenfassend GRIFF (26) unter Angabe zahlreicher Literatur. VAN VEEN schließt aus seinen Untersuchungen: „Im allgemeinen ist die obere Grenze des Brackwassergebietes als Grenze des Seesandgebietes anzusehen. Wohin auch nur ein Tropfen Salzwasser kommen kann, dorthin kann auch ein Körnchen Seesand und sicher Seeschlick kommen.“

Dieser Schluß ist zweifellos richtig, besagt aber keineswegs, daß Flußsand nicht weiter seewärts und bis ins Meer gelangt. CROMMELIN und MAASKANT gehen in ihren Folgerungen noch erheblich weiter: „Der von den Flüssen Ems, Weser und Elbe transportierte Sand ist oberhalb der Mündungsgebiete deutlich verschieden von dem in den Mündungsgebieten und Außenrinnen. Hier und im Watt tritt die typische A-Assoziation auf. Mit anderen Worten: es wird kein Flußsand in die See hinausgeschafft, sondern umgekehrt Sand aus der See durch den Flutstrom eine Strecke in die Mündung aufwärts gespült, wie es VAN VEEN schon früher für den Rhein nachgewiesen hat.“ Andererseits weisen die gleichen Forscher aber nach, daß sich im Mündungsgebiet der Ems und im Watt bis zu 5 % metamorphe Mineralien des Mittellaufs finden.

Der VAN VEENSchen Auffassung sind EDELMAN (16, 17) und SCHAANK (99) auf Grund petrologischer Untersuchungen in den Rheinmündungsarmen entgegengetreten. Sie sind der Meinung, daß der aus Deutschland den Rhein herunterkommende Sand in Holland mit Sanden anderer Herkunft gemischt ist. Sie erklären das damit, daß die Flußbetten zum Teil in Niederterrassen aus der Pleistozänzeit eingeschnitten, zum Teil aber auch durch tiefgehende Baggerungen erhebliche Umlagerungen eingetreten sind. Die Aufteilung des Baggergutes in Kies und Sand und das Zurückwerfen großer Sandmengen habe erhebliche Umschichtungen bewirkt, so daß die heutige Zusammensetzung des Sohlenmaterials nicht mehr den natürlichen Verhältnissen entspräche.

Wir danken HENSEN (29) den wissenschaftlichen Nachweis, daß es in der Mündungsstrecke einen „Gleichgewichtspunkt“ der Strömungen gibt, oberhalb dessen die Sandwanderung stromab, unterhalb aber stromauf gerichtet ist. Die Lage dieses kritischen Punktes verschiebt sich mit steigendem Oberwasser stromabwärts, mit fallendem stromaufwärts. Seitlich des Stroms gelegene Watten, die bei Flutstrom länger überströmt werden als bei Ebbstrom, verlagern ihn stromab. Die Brackwassererscheinungen verschieben den Gleichgewichtspunkt für die Geschwindigkeiten an der Sohle stromauf und für die Oberflächengeschwindigkeiten stromab.

HENSEN weist weiter darauf hin, daß die Sandwanderung durch ein Exponentialgesetz an die Strömungsgeschwindigkeiten gebunden ist, das im Tidegebiet wegen der nicht stationären Strömungen aber nicht angewendet werden kann. Die Gleichsetzung des kritischen Punktes der Strömungen mit dem der Sandwanderung bietet deshalb nur eine Näherungslösung. Der natürliche Wechsel der die Lage des Punktes beeinflussenden Faktoren: Oberwasser, Eisgang, jahreszeitlich schwankende Größe des Tidehubs, wechselnde Dichte des Wassers usw. schieben ihn außerdem periodisch und aperiodisch hin und her. Damit wird der kritische Punkt zu einer kritischen Zone, in der regelmäßig von Land und von See her eine Sandanhäufung entsteht. Als Beispiel wird angeführt, daß aus dem Elbeabschnitt zwischen Brunsbüttelkoog und dem Klotzenloch in den drei Jahren von 1928 bis 1930 zwar rund 45 Mill. m³ Sand nach See zu abgetrieben, in den folgenden sechs Jahren aber 75 Mill. m³ wieder eingetrieben sind. Sie können nicht vom Oberlauf stammen, da der Eintrieb von dort im Mittel nur 500 000 m³ im Jahr beträgt.

Für das Mündungsgebiet der Elbe zeichnete LUCHT (62, 63) aus den jährlichen Peilplänen von 1937 bis 1950 Tiefenänderungspläne und stellte durch Planimetrieren der Flächenelemente die Veränderungen des Sandinhalts eines Gebietes von etwa 100 km² Größe zwischen der Kugelbake und dem Feuerschiff „Elbe 2“ fest. Dabei ergab sich, daß Jahren oder Jahresgruppen mit einer überwiegenden Sandförderung elbeauswärts Jahre oder Jahresgruppen mit überwiegender Sandeintrieb folgen. Insgesamt überwiegt in der Jahresreihe die Sandförderung von See her

mit 2,8 Mill. m³. Die Angabe HENSENS für die Jahre 1928 bis 1936 ist damit qualitativ bestätigt. Die geringere Größe der Sandverfrachtung von der See her mag, wie der Wechsel von Jahren mit überwiegendem Ein- oder Austrieb, durch eine Änderung der wirkenden Kräfte verursacht sein, die in der Hauptsache meteorologische Ursachen haben dürfte. LUCHT betont, daß Aussagen hierüber noch nicht gemacht werden könnten, da die bisher untersuchten zehn Jahre eine zu kurze Zeit seien, „um diese in langen Perioden ablaufenden Vorgänge zu erfassen“. Er vermutet: „Auf längere Sicht scheint sich ein Gleichgewichtszustand herzustellen zwischen den beiden Sandströmen.“

Die vom Flut- und Ebbstrom bewegten Schwerstoffmengen hat LUCHT durch umfangreiche, größtenteils an drei Punkten — an der Oberfläche, in der Mitte der Tiefe und 5 cm über der Sohle — einer Lotrechten während einer ganzen Tide entnommen und sorgfältig analysierten Schöpfproben ermittelt und zu Bändern derart zusammengefaßt, daß die jeweils in einer Meßlotrechten überwiegende Bewegungsrichtung dem see- oder landwärts gerichteten Band zugeordnet wurde. Die in der Sekunde bewegten Sinkstoffmengen sind dabei durch verschiedene Schraffur gekennzeichnet. Sie bestehen überwiegend aus Sand, dessen gemittelte Korngrößen zwischen 0,21 und 0,26 mm liegen (Abb. 1).

Es ist erklärlich, daß diese Darstellungsart Abweichungen von der einfacheren HENSENS aufweist. Diese können auf die andere Art der Probenentnahmen — früher: Messungen mit der LÜDERSSCHEN Sandfalle (67, 69), jetzt Schöpfproben mit dem horizontalen Wasserschöpfer nach WOHLENBERG (133) —, aber auch auf Strömungsverlagerungen in der Zwischenzeit zurückzuführen sein.

Die Ergebnisse LUCHTS werden durch die mineralogischen Untersuchungen von SIMON in den Jahren 1949/50 (106) im Gebiet von Cuxhaven bis zum Feuerschiff „Elbe 1“ und durch ergänzende Bestandsaufnahmen³⁾ in einem elbeaufwärts und nach Norden erweiterten Gebiet bestätigt, die an gleicher Stelle demnächst veröffentlicht werden sollen.

³⁾ Herrn Dr. SIMON sei für die lebenswürdige persönliche Schilderung seiner neuen Forschungsergebnisse herzlich gedankt.



Abb. 1. Sandstrombänder in der Außenelbe [nach LUCHT (62)]
(Für die Überlassung des Druckstockes aus LUCHT [62] sei der Frankhchen Verlagshandlung, Stuttgart bestens gedankt.)

Die auf ganz anderem Wege — im Strom mit dem Bodengreifer nach VAN VEEN und auf den trockenfallenden Watten durch Abschälen der Oberfläche bis zu 1 cm Tiefe, zu festgelegten Tidezeiten — bei Flut und Ebbstrom gewonnenen Proben wurden nach Korngrößen zerlegt und aus der Kornfraktion 0,2 bis 0,1 mm die Schwerminerale ausgesondert. In sehr mühsamer Arbeit wurden sodann die Mineralarten dieser Fraktion unter dem Polarisationsmikroskop bestimmt und die Körner der einzelnen Arten ausgezählt.

Die Hauptkomponenten der schweren Fraktion der Sande in der Außenelbe sind die Mineralien Granat, Epidot und Hornblende, die der A-Gruppe nach EDELMAN und BAAK entsprechen. Augit tritt als Mineral der Flußsande im Seesand ganz zurück. Der Gedanke, das Verhältnis der Zahl der Augitkörner zu der der Epidotkörner in den Proben zur Feststellung der Herkunft der Sande zu benutzen, verspricht guten Erfolg, da beide Mineralien das gleiche spezifische Gewicht von 3,3 haben. Sie sind zwar schwerer als die Masse des Sandes, in der Kornfraktion 0,2 bis 0,1 mm dürften dadurch bei der Größe der wirkenden Kräfte aber keine merkbaren Unterschiede ihrer Beweglichkeit dem Quarzsand gegenüber bestehen.

Voraussetzung für die Anwendung des Verfahrens ist allerdings die Ermittlung des Gehalts der glazialen und postglazialen Sande des Elbelaufs früherer Epochen an den gleichen Schwerminerale. Die von SIMON ausgeführten Untersuchungen zeigen, daß die als Seesand angesprochenen Sande der Außenelbe und die Schmelzwassersande des Elbeurstromtals den gleichen Bereich der Verhältniszahlen Augit/Epidot · 100 aufweisen. Diese beiden Sandarten können also nicht unterschieden werden. Mit Einschränkung gilt das gleiche für die andere Gruppe der postglazialen Elbesande und der rezenten Flußsande.

Die von SIMON entworfene, noch nicht veröffentlichte Auftragung der Mengen der Hauptminerale im Längsschnitt der Außenelbe läßt klar erkennen, wie weit die augitarmeren Sande der ersten Gruppe stromaufwärts vordringen und wie weit der Flußsand seewärts verfrachtet wird. Die Mischzone der Sande verschiedenen Ursprungs tritt dabei deutlich hervor. Zur Unterscheidung der Sandherkunft gibt SIMON an: *„Wo der Augitwert < 10 ist, entspricht die Schwermineralzusammensetzung der reinen A-Gruppe, wo der Augitwert 10 übersteigt, liegt Beimischung von rezenten oder postglazialen Elbesanden vor.“*

Die Eintragung der aus den Proben ermittelten Verhältniszahlen in eine Karte (Abb. 2) in Verbindung mit den gemittelten Korngrößen d_g ergibt durch Umrandung der Gebiete gleicher Größen ein Zustandsbild der Verteilung der Sandarten, das mit den Ergebnissen von LUCHT weitgehend übereinstimmt. Auf die vorliegende und die vorbereitete Veröffentlichung darf hier verwiesen werden. Zur Frage des Vordringens von rezenten Flußsanden in das Außengebiet der Elbe sei der Arbeit aber entnommen, daß der augit-verunreinigte Sand bis zum Westende des Lüchter Grundes vordringt. Hier in 8°30' O trifft er auf einen mit der Flut einlaufenden Strom gleicher Art. Dieser wird aus in 8°20' O angeschnittenen postglazialen Sanden gespeist. Von diesen ausgehend wird der augit-verunreinigte Sand mit dem Ebbstrom auch nach Westen verfrachtet.

Die Karte LUCHTS und die jüngsten Feststellungen SIMONS lassen erkennen, daß der Ebbstrom Flußsande auch durch das Klotzenloch in nördlicher Richtung fördert, wo sie noch auf Teilgebieten der großen Sände nachweisbar sind. Weiter konnte gezeigt werden, daß aus großen Tiefen, besonders aus einem mehr als 30 m tiefen Kolk vor Groden, fluvioglaziale kiesige Sande des Liegenden der jungen Elbesande ausgespült und sowohl stromauf als auch stromab verteilt werden (107). Überhaupt sind die Sandumlagerungen in dem gesamten Gebiet der Außenelbe sehr groß und weit größer als die des durch den Flut- oder Ebbstrom gerichteten Transports (64). Wenn daher auch keine Möglichkeit besteht, den endgültigen Verbleib der Flußsande in der Mischung mit Seesand mit Hilfe der Schwerminerale sicher festzustellen, so spricht doch sehr viel dafür, daß er im Zuge der Umlagerungen bei den heutigen Gezeitenverhältnissen auch aus der Elbe noch bis ins Meer gelangt.

Im Gegensatz zur Elbe besitzen Weser und Jade und wahrscheinlich auch die Ems „die Natur einer Ebbstromrinne“ (29). Nach KRÜGER (54, 55) dringt der von Westen kommende Sand in die Jade selbst nicht ein. Das gleiche wird für die Weser aus der Wanderung der Sandbänke durch die Außenweser und daraus geschlossen, daß die 20 m-Tiefenlinie an beiden Mündungen fast gradlinig vorbeiläuft, während sie in die Elbe tief einbuchtet. Die Mischungszone des Fluß- und Seesands ist deshalb in diesen Mündungsgebieten noch weiter seewärts zu erwarten

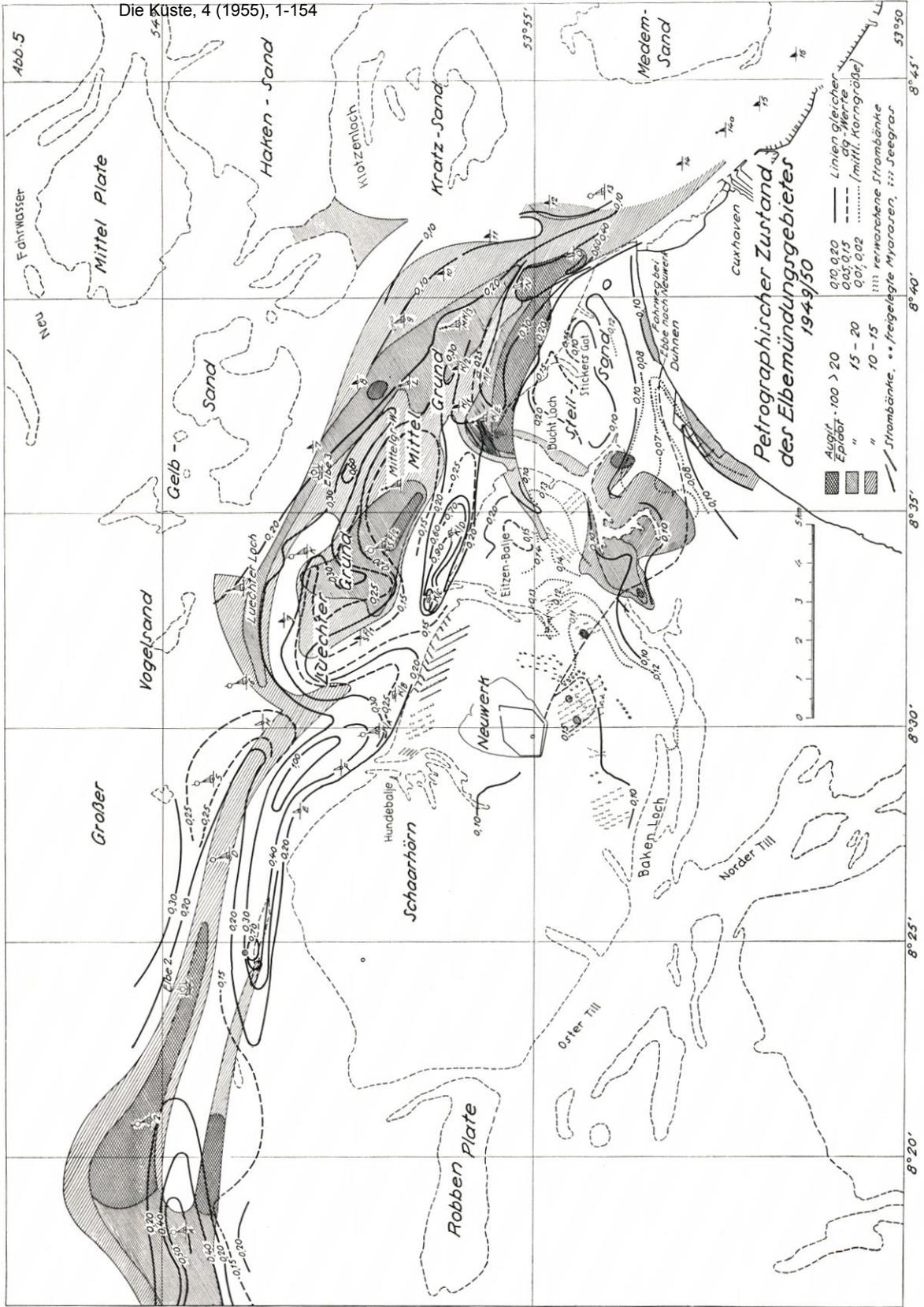


Abb. 2. [aus SIMON (106)]

als in der Elbe. Um so leichter wird der Flußsand im Zuge der auch hier stattfindenden großen Umlagerungen bis in die See gelangen.

Für die feineren, schlickbildenden Sinkstoffe der Tideflußmündungen gilt das gleiche. Die Feststellung ihrer Wanderwege und ihres Verbleibs ist meßtechnisch aber sehr viel schwieriger.

Nach den Messungen LÜNEBURGS (71, 72) gelten für den Sinkstoffgehalt der landwärts gerichteten Unterströmungen auch die Feststellungen HENSENS. In der kritischen Zone reichern sie sich mit Sinkstoffen an. Die salzärmere Oberströmung wird gestaut und über die Watten abgedrängt. Abbildung 3 gibt zwei der Messungen LÜNEBURGS rund 5 km südöstlich des Roter Sand-Leuchtturms bei starker Oberwasserführung der Weser wieder, die ein repräsentatives Bild der vertikalen Verteilung von Salz und Trübung oder Sinkstoffen in der Außenweser z. Z.

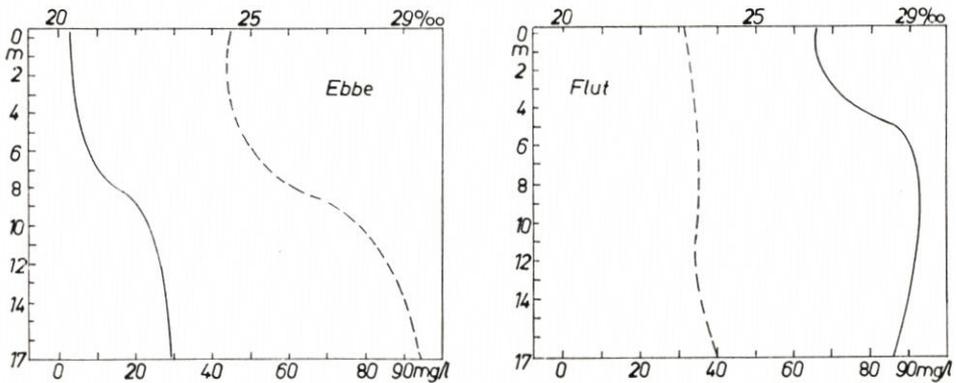


Abb. 3. Verteilung von Salzgehalt (—) und Trübung (....) bei fortgeschrittener Ebbe und Flut in der Unterweser

(Den Druckstock stellte der Verlag Franz Leuwer, Bremen aus Lüneburg freundlich zur Verfügung.)

der fortgeschrittenen Flut und Ebbe bieten. Der Sinkstoffgehalt ist an der Meßstelle im Verhältnis zu den in der oberen Brackwasserzone gemessenen Werten insgesamt sehr klein, aber in dem oberen, seewärts strömenden Wasserkörper noch wesentlich geringer als in Sohlennähe. Gleichwohl wäre der Schluß verfrüht, daß die Sinkstoffe der Unterströmung ausschließlich von See her herangeführt werden, weil es sich dabei auch um Material handeln kann, das weiter seewärts aus der Oberströmung abgesunken ist. LÜNEBURG vermutet ein gelegentliches Vordringen dieser Oberströmung bis zum Roten Sand. PRATJE hat die Trübung aus der Elbe noch südlich Helgoland festgestellt (88, 89).

Nach HENSEN (29) versetzt eine vor der Elbemündung vorhandene Restströmung das aus der Elbe abströmende Oberflächenwasser längs der schleswig-holsteinischen Küste in nördlicher Richtung. Der Einfluß des Elbewassers auf den Salzgehalt reicht noch bis Horns-Riff.

GLANGEAUD (25) berichtet, daß der „Schlammpropfen“ in der Gironde bei HHW des Flusses vollkommen aus der Mündung herausgedrückt und dann von der Küstenströmung fächerförmig verteilt wird. Nach BRAUDEAU (4) scheint für die Loire-Mündung das gleiche zu gelten. Über den Sinkstoffgehalt der ausströmenden Wassermengen finden sich jedoch keine Angaben.

Einem dem Internationalen Schiffahrtskongreß in Rom 1953 von DANIEL (9a) erstatteten Bericht ist zu entnehmen, daß diese mit „Aureole“ bezeichnete Erscheinung auch an anderen französischen Flußmündungen beobachtet wird. Die Stärke der als Oberströmung über einer einlaufenden, durch den Salzgehalt schwereren Grundströmung wird mit 0,5 m angegeben.

Dieses Maß dürfte aber orts- und zeitgebunden sein, denn auf den Einfluß des Windes, des Tidehubs und des Oberwasserzuflusses wird hingewiesen.

PRATJE stellt in der mittleren Nordsee ausgedehnte Schlickgebiete fest (86, 88, 89) (Abb. 4) und vertritt seine Auffassung, daß es sich dabei um junge und jüngste Ablagerungen handelt, mit treffenden Argumenten gegenüber anderen Autoren (66, 103). Dabei werden die Voraussetzungen für die Bildung solcher Ablagerungen leicht beweglicher Sedimente in der Flachsee mit Gezeiten ausführlich geschildert. Über die vermutliche Herkunft der abgelagerten Sinkstoffe finden sich in den Arbeiten aber keine Angaben. Die Besiedlung der küstennäheren Teile südlich und südöstlich Helgolands mit Foraminiferen anderer Art als im küstenferneren Bereich der Deutschen Bucht wird auf das salzärmere Wasser zurückgeführt, obgleich sich auch die Sedimente deutlich unterscheiden.

Schließlich begründet LUCHT (64) in seiner jüngsten Arbeit die Auffassung, daß zwischen den von der Elbe der See zugeführten Schwerstoffen und den aus der See stammenden ein „Transportgleichgewicht“ besteht. Eine etwa geringere Sandförderung aus der Elbe wird durch den Sinkstofftransport zur See ausgeglichen.

Über die gefördertten Mengen sind außer den weiter oben mitgeteilten Angaben für den Mississippi (34) keine Zahlen bekannt. Um diese zu gewinnen, müßten Sinkstoffmessungen weit seewärts ausgedehnt werden und die Ober- und Unterströmung getrennt erfassen. Aber auch ohne Vorliegen derartiger zeitraubender und kostspieliger Untersuchungen kann nicht bezweifelt werden, daß auch Sinkstoffe aus den Tideströmen bis ins Meer gelangen.

Nach den vorstehend geschilderten Gründen spricht alles dafür, daß der oben mitgeteilte bedingungslose Schluß von CROMMELIN und MAASKANT nicht haltbar ist. Auch bei den heutigen Gezeitenverhältnissen der Nordsee ist mit einem Austausch von Schwerstoffen zwischen den Tideflüssen und dem Meer in den Mündungsgebieten zu rechnen. Die Äußerung VAN VEENS wird nur in diesem Sinne zu verstehen sein. Daß andere hydrographische und morphologische Voraussetzungen diesen Austausch sehr stark zugunsten der einseitigen Sandförderung zum Meere verschieben können und in früheren Epochen der Erdgeschichte verschoben haben, bedarf keines Beweises.

3. Der Sinkstoffhaushalt der Wattgebiete

Für den Sinkstoffhaushalt der Wattgebiete ist der Massenaustausch mit der offenen See im Hinblick auf die Zukunftsaussichten der Landgewinnung von ausschlaggebender Bedeutung. Für die nordfriesischen Watten ist nach bekanntgewordenen Arbeiten bisher zweimal der Versuch

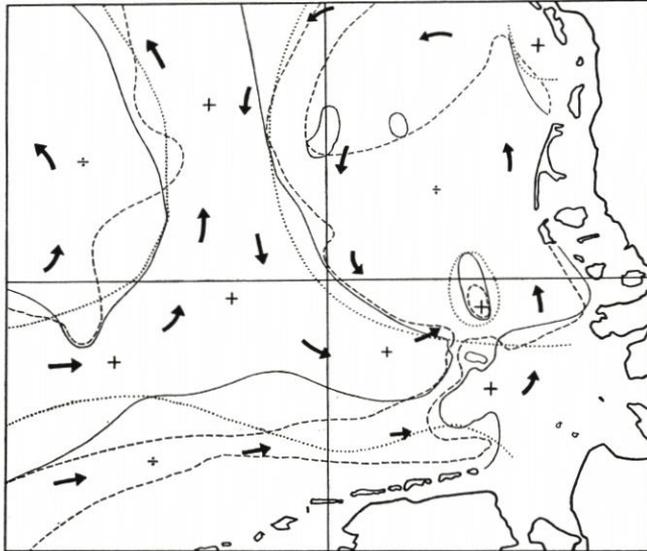


Abb. 4. Restströmungen (→) und Schlickgebiete (+) in der Nordsee
[nach PRATJE (89)]
(Für die Überlassung des Druckstockes sei dem Verlag der Geologischen Rundschau bestens gedankt.)

gemacht worden, festzustellen, ob der in den großen Wattgebieten vor der schleswig-holsteinischen und der dänischen Westküste von den Gezeiten bewegte und an wind- und strömungsgeschützten Stellen meist in unmittelbarer Küstennähe zur Ablagerung kommende Schlick durch Zufuhr aus der offenen See laufend oder periodisch ergänzt wird oder ob er ausschließlich dem Wattenmeer selbst entstammt und sich im Lauf der Zeit erschöpfen kann.

GRY (27) gibt ein sehr anschauliches Bild der Schwerstoffverteilung und -bewegung in dem vom Graadyb gespeisten nördlichsten Teil des nordfriesischen Wattenmeeres, das mit Esbjerg in der Mitte seawärts durch die Halbinsel Skallingen im Nordwesten und dem Nordteil der Insel Fanoe im Süden begrenzt wird.

GRY maß leider nur je über eine Tide, am 25. 6., 24. und 25. 8. 1938, an neunzehn über das Gebiet und im Graadyb verteilten Stationen die Fließgeschwindigkeiten in der Nähe der Oberfläche und bis 1,0 m über Grund und gleichzeitig den Sinkstoffgehalt in verschiedenen Höhen bis 0,5 m über Grund. Am 25. 6. herrschte Südwestwind und der Einstrom überwog, während am 24./25. 8. Nordwind wehte und der Ausstrom stärker war. Die Größtgeschwindigkeit im Tief erreichte in jeder Richtung am 26. 8. rund 1,17 m/s. Die Tidehöhe im Tief betrug am 25. und 27. 6.: 1,08 m, am 24. 8.: 1,72 m und am 25. 8.: 1,80 m, bei einem Mittelwert für das Graadyb von 1,28 m. Die geschöpften Proben wurden nach Sand $> 0,02$ mm und nach „Schlamm“ $< 0,02$ mm getrennt. Die praktischen Ergebnisse der Messungen waren folgende:

Die Sinkstofffracht ist dort am größten, wo innerhalb der Bucht der Schlamm aus dem anstehenden Boden durch die Strömung aufgenommen wird. Sie ist bei Hochwasser am kleinsten und bei Niedrigwasser am größten, sie nimmt nach See zu ab und ist nach Überschreitung eines Schwellenwertes der Fließgeschwindigkeit, $v = 0,20$ m/s, über die Tiefe gleichmäßig verteilt. Für die Abnahme des Sinkstoffgehalts y mit der Entfernung x vom Aufnahmeort findet GRY die allgemeine Gleichung

$$y = a \cdot e^{-lx}$$

Als Beispiel wird für die Strecke vom Nordende der Bucht bis zum Graadyb

an der Oberfläche	$a = 173$ und $l = 0,183,$
am Grunde	$a = 343$ und $l = 0,208.$

Die Ungleichheit der Werte steht im offenbaren Widerspruch zu der vorangegangenen Feststellung der Gleichmäßigkeit der Sinkstoffverteilung über die erfaßte Tiefe, wenn man nicht annimmt, daß auf Teilstrecken der Schwellenwert der Geschwindigkeit nicht erreicht wurde.

Die Folgerungen aus den Messungen sind nach GRY: Da der ausgehende Strom nach Stärke und Laufzeit überwiegt, wird dauernd Material aus dem Tief ins Meer geführt und vor dem Tief auf der Barre abgelagert. Wenn die Watten nicht abgetragen werden, müssen sich also die Priele vertiefen! Unter Betonung, daß die Messreihen für eine abschließende Beurteilung nicht ausreichen, wird die gesamte in einer Tide bewegte Sinkstoffmenge auf rund 4000 t eingehend und rund 5500 t ausgehend, je zur Hälfte Sand und „Schlamm“, geschätzt. Mithin ergibt sich ein täglicher Überschuß der zur See verfrachteten Bodenmengen von rund 3000 t, der mit den Baggermassen zur Offenhaltung der Fahrwinne durch die Graadyb-Barre „ganz gut übereinstimmt“.

Diese Übereinstimmung ist offenbar aber nur dann gegeben, wenn die Summe der auf der Barre nicht zur Ablagerung kommenden Sinkstoffe durch Sand ersetzt wird, der durch die küstenparallele Strömung herangeführt wird.

Die Möglichkeit des Wasseraustausches über das Watt hinter Fanoe wird erwähnt, GRY ist ihm aber nicht besonders nachgegangen. Vielleicht hätten auch die Süßwasserzuflüsse berücksichtigt werden müssen.

Die sorgfältigen Messungen GRYS verdienen, über längere Zeiträume mit wechselnden Witterungsbedingungen in dem gleichen Gebiet wiederholt zu werden. Die Voraussetzungen für die Gewinnung eindeutiger Messungsergebnisse sind hier sehr viel günstiger als in den größeren, durch Wattwasserscheiden weniger klar getrennten und gegen die See offeneren Teilgebieten des schleswig-holsteinischen Wattenmeeres. Zusätzliche Feststellungen etwaiger Abtragungen

oder Aufhöhungen der Watten und der Veränderung der Prielquerschnitte könnten die Sinkstoffmessungen leicht ergänzen und kontrollieren.

Die außerordentlichen Schwierigkeiten einer zuverlässigen Erfassung der Sinkstoffführung großer Wattströme schildert PETERSEN in einem Bericht der Forschungsabteilung des Marschenbauamts Husum (83) über die Ziele, die Durchführung und die Ergebnisse umfangreicher Messungen in der Norderhever vom 14. bis 25. 8. 1937.

Nachdem in den vorangegangenen Jahren mit Strommessungen verbundene Sinkstoffmessungen an Einzelpunkten ergeben hatten, daß der Sinkstoffgehalt sowohl von Ort zu Ort, als auch an der gleichen Meßstelle von Messung zu Messung sehr stark schwankt und keine gesetzmäßigen Beziehungen zwischen Stromgeschwindigkeit und mitgeführtem Sinkstoff bestehen, wurden unter Einsatz aller verfügbaren Fahrzeuge Quer- und Längsprofilmessungen bei im allgemeinen mäßigen Winden aus wechselnden Richtungen an mehreren Tagen je über eine ganze Tide durchgeführt. Ausgesprochene Schlechtwetterverhältnisse, die in dem ausgedehnten Gebiet jede Messung unmöglich machen, wurden nicht erfaßt.

Die gleichzeitigen Geschwindigkeitsmessungen in Verbindung mit den in den Vorjahren gewonnenen Unterlagen über die während einer Tide bewegten Wassermengen erlaubten eine Berechnung der in einer Halbtide den maßgebenden Querschnitt Pellworm-Südfall der Norderhever landwärts und seewärts durchlaufenden Sinkstoffmengen in τ (Trockengewicht). Die Messungen im Längsschnitt an fünf Stellen zwischen dem „Strand“ (Oberlauf der Norderhever) und der Süderoog Bake (Mündung der Norderhever), jeweils zu gleichen Zeiten in der Strommitte, ergaben ein Bild der Sinkstoffverteilung zu den einzelnen Tidezeiten (Ganglinien des Sinkstoffgehalts) und lieferten in Verbindung mit früher ausgeführten Einzelmessungen und den bereits bekannten Durchflußmengen auch die je Halbtide beförderten Sinkstoffmengen an ausgezeichneten Punkten des großen Wattstroms.

Von den vielseitigen Ergebnissen können hier nur die wichtigsten mitgeteilt werden:

a) In dem durch die Gruppenmessung erfaßten Zeitabschnitt beträgt der mittlere Sinkstoffgehalt im Querschnitt Pellworm-Südfall bei Flut- und Ebbstrom gleichmäßig 51mg/l. Frühere Einzelmessungen deuten aber darauf hin, daß der Wert durch die Witterung und die Jahreszeit bedingt ist.

Über den die Norderhever begleitenden Watten erreicht der Sinkstoffgehalt zu Beginn der Überströmung 30 bis 100 mg/l, um zur Zeit des HW auf 12 bis 19 mg/l abzufallen und mit fallendem Wasser zunächst wieder leicht anzusteigen. Es wird erwartet, daß die Werte bei stürmischen Wetterlagen infolge des Wellenschlags weit höher sind. Untersuchungen auf den Watten zwischen dem Strom und den Anlandungsgebieten stehen noch aus.

b) Der Sinkstofftransport ist über den Querschnitt ungleichmäßig verteilt. Er überwiegt bei Flut- und Ebbstrom auf der Pellwormer Seite.

c) Die Sinkstofffracht während einer Halbtide schwankt in der Meßzeit bei Flutstrom zwischen 17 872 und 25 371 t und bei Ebbstrom zwischen 15 242 und 18 754 t (Trockengewicht).

d) Die Kleinstwerte der Sinkstoffgehalte treten an allen Meßstellen des Längsschnitts im Mittel etwa eine halbe Stunde nach Thw und Tnw auf. (Ausnahme Meßstelle „Strand“, wo der HW-Kleinstwert wegen des Überströmens erheblicher Wassermengen in das Gebiet der Süderau erst anderthalb Stunden nach Thw auftritt.) Die Sinkstoffgehalte sind bei Thw wesentlich kleiner als bei Tnw. Die Höchstwerte fallen gleichmäßig in die Zeit von einer bis anderthalb Stunden vor und anderthalb bis zwei Stunden nach Tnw.

e) Die Höchstwerte des Sinkstoffgehalts nehmen vom „Strand“ zur See erheblich ab.

f) Wegen der Zunahme der Querschnittsgrößen und der bewegten Wassermengen in Richtung auf die See zeigen die je Halbtide gemessenen Sinkstoffmengen das umgekehrte Bild.

Die aus diesen Mengen berechneten Sinkstofffrachtüberschüsse sind an allen Tagen der Meßreihe im „Strand“ seewärts, an der Meßstelle Holmerfähre dagegen überwiegend landwärts gerichtet. Der gleichfalls landwärts gerichtete Überschuß bei Pellworm erreicht nicht ganz den Wert, der sich aus den Querprofilmessungen errechnet. Dagegen geht die Sinkstofffracht bei Süderoog stark überwiegend zur See. Die aus örtlichen und meßtechnischen Gründen nicht als

gleichwertig anzusehenden Messungen bei der schon auf der Grenze der offenen See gelegenen Süderoog Bake ergaben in der Halbtide geringere Sinkstofffrachten als die Messungen bei Süderoog. Die Richtungsüberschüsse schwanken zwischen 1805 t landwärts und 2241 t seewärts.

Zusammenfassend wird aus den Untersuchungen geschlossen, daß der Überschuß der bewegten Sinkstoffmengen zur Nordsee gerichtet ist, obwohl im Querschnitt Pellworm—Südfall bei einer mittleren Tide infolge des Wasserübertritts in das Gebiet der Süderau 40 bis 50 Mill. m³ Wasser mehr landwärts strömen als mit dem Ebbstrom seewärts.

Obgleich in den anderen großen Wattströmen, besonders in der Süderau, Sinkstoffmessungen bisher nicht ausgeführt werden konnten, hat dieser Schluß Anlaß gegeben, den Schlickvorrat im Wattenmeer als begrenzt anzusehen und die zukünftigen Landgewinnungsarbeiten darauf abzustellen. Das ist berechtigt, weil in der Süderau die ausströmenden Wassermengen weit größer sind als die mit dem Flutstrom landwärts gehenden und weil mit Sicherheit anzunehmen ist, daß dementsprechend hier noch mehr Sinkstoffe zur See vertrieben werden als aus der Norderhever. Außerdem bringt der starke Wellenschlag bei ungünstigerem Wetter auf den hochliegenden Wattflächen weit größere Bodenmengen in Suspension, ohne diesen gleich günstige Bedingungen für die Wiederablagerung zu geben, wie ruhigeres Wetter. Die vor der Küste angestauten Wassermengen führen sie bei verschärftem Ausstrom dann in die See in größerer Menge hinaus als die ausgeführten Messungen erkennen lassen.

Auch DECHEND (10) stellte durch Schwermineraluntersuchungen und Kalkgehaltsbestimmungen fest, daß in den äußeren Teilen der Wattströme und Priele vor der schleswig-holsteinischen Westküste der Transport von Fein- und Mehlsand zur See überwiegt. In den landnäheren Gebieten werden die feinsten Sande dagegen in Richtung auf die Küste befördert. Der Hauptteil des bewegten Materials stammt aus der Sohlenerosion der Wattwasserläufe. Strecken ohne wesentliche Materialverschiebungen zeichnen sich ab.

4. Die Wirkung menschlicher Eingriffe auf den Sinkstoffhaushalt der Tideflüsse und Watten

Der in den vorstehenden Abschnitten nachgewiesene Austausch von Schwerstoffen zwischen den Tideströmen und dem Meer kann durch Eingriffe des Menschen in die natürlichen Vorgänge stark geändert werden. HENSEN (29) bringt dafür mehrere Beispiele.

Der schwerste Eingriff ist die Abdämmung eines Tideflusses oder Wattgebietes. Das Verhältnis der Ein- zu den Ausstromgeschwindigkeiten nach Größe und Dauer wird dadurch erheblich geändert, die mit der Tide hin und her schwingende Wassermenge verkleinert sich. Eine Verminderung des Binnenabflusses ist dieser Verkleinerung gegenüber dann von geringerer Bedeutung, wenn das Verhältnis dieses Abflusses zu der von den Gezeiten bewegten Wassermenge klein ist. Aber auch sie wirkt mit, um die allgemein gegen die Küste gerichtete Sanddrift, von der weiter unten noch zu sprechen ist, weiter stromauf vordringen zu lassen. Die Vergrößerung des Tidehubs besonders durch das Absinken des T_{nw}, welches stets größer ist als die Hebung des Th_w, verringert die Räumungskraft des Ebbstroms und verstärkt auf den geringer werdenden Wassertiefen den Einfluß der Wellenbewegung. Durch diese wird auch Sand aufgewirbelt und von Strömungen fortgetragen, deren Geschwindigkeiten allein nicht zu seiner Bewegung ausreichen würden. Ablagerungen unterhalb der Abdämmung sind die unabwendbare Folge.

Ein eindrucksvolles Beispiel hierfür bietet die Versandung der unteren Eider nach deren Abdämmung bei Nordfeld, rund 30 km oberhalb der Mündung, im Jahre 1936, über die WEINNOLDT und BAHR (123), gestützt auf Sinkstoffuntersuchungen von DITTMER und VINCK (14), berichten. Bei den Vorarbeiten war die Versandungsgefahr geprüft worden. Da aber die Ableitung der oberen Eider in den Nord-Ostsee-Kanal bei Rendsburg seinerzeit außer einem Vordringen des Schlickfalls bis zur Stadt keine nachteiligen Folgen gehabt hat und die Modell-

versuche keine wesentlichen Änderungen der Flut- und Ebbstromgeschwindigkeiten erkennen ließen, wurden größere Versandungen unterhalb der Abdämmung nicht erwartet. Im Lauf von nur fünf Jahren drangen jedoch so große Mengen sehr feinen Sandes bis zum Sperrwerk vor, daß der Zweck der Anlage, die Sicherung der Entwässerung der großen Eiderriederung, ernstlich gefährdet war.

Zur Freihaltung des Siels und der Schiffsschleuse unmittelbar unterhalb des Bauwerks ausgeführte Baggerungen erwiesen sich als zwecklos. Die eingetriebenen Sinkstoffmengen wuchsen bis 1946 auf rund 20 Mill. m³ an. Als Gegenmaßnahme zunächst probeweise durchgeführte Spülungen mit bei Flut durch das Siel eingelassenen und angestauten Wassermengen hatten keinen Erfolg. Erst das systematische Einlassen jedes zweiten Hochwassers und die Wiederabgabe der angestauten Wassermengen nach einem bestimmten Plan führten zur Freispülung einer für die Vorflut ausreichenden Rinne. Deren erneute Versandung wird dadurch verhindert, daß der einlaufende Flutstrom durch das abgegebene Wasser zurückgedrängt und seine Geschwindigkeit unter die für den Sandtransport erforderliche Grenze herabgedrückt wird.

Die Versuche zur Auffindung der günstigsten Stauhöhe, die auch von den Binnenwasserzuflüssen abhängig ist, sind noch nicht abgeschlossen. Sie haben das Ziel, den Binnenwasserabfluß intermittierend soweit zu vergrößern, wie die örtlichen Verhältnisse das zulassen. Das ursprüngliche Verhältnis des Binnenabflusses zu der hin und her schwingenden Wassermenge kann natürlich nicht erreicht werden, aber das Verfahren wird im Falle des Gelingens die einzige Möglichkeit bieten, ohne ins Gewicht fallende laufende Kosten die Erfolge der Eiderabdämmung dauernd zu erhalten.

Das Ausmaß der Sandablagerungen ist mit durch den außergewöhnlich feinen und sehr gleichkörnigen Sand in und vor der Eidermündung veranlaßt. Durch die gegen das Sperrwerk abnehmenden Fließgeschwindigkeiten ist außerdem eine gewisse Sortierung eingetreten, so daß die zur Einleitung der Bewegung des Sandes notwendigen Grenzgeschwindigkeiten von 42 cm/s bei Tönning bis auf den sehr kleinen Wert von 24 cm/s bei Nordfeld abgefallen sind. Die Mitwirkung der durch die Wellen erzeugten Turbulenz bei der Verschiebung der großen Sandmengen beweist die Feststellung eines außergewöhnlich großen Sandgehalts von 31 gr/l der in 15 cm über dem Boden entnommenen Wasserproben.

Der schwerste bisher ausgeführte Eingriff in den Haushalt eines großen Wattgebiets war die Abdämmung der Zuiderzee. Sie hat bis jetzt zu einer Aufhöhung der vor dem Abschlußdamm liegenden Platen zu Lasten einer Austiefung der Wattströme und Priele geführt. Die Umbildungen sind aber bei weitem noch nicht abgeschlossen. THIJSSÉ (109) schätzt die bis zur Erreichung eines Gleichgewichts noch umzulagernden Massen auf eine Milliarde m³. Woher diese Mengen kommen werden, ist eine noch offene Frage. Das Watt selbst wird sie auch bei fortschreitender Abtragung der Platen und Vertiefung der Wattwasserläufe nicht liefern können, weil deren Querschnitte von den mit den Gezeiten hin und her schwingenden Wassermengen abhängig sind. Diese werden sich mit der Zeit aber verkleinern.

Aus starken Uferabbrüchen im Norden der Insel Texel wird geschlossen, daß auch die Materialführung des vor den Westfriesischen Inseln laufenden Küstenstroms nicht ausreicht, um den Sandbedarf des Watts zu decken.

Gleiche Erscheinungen kleineren Umfangs sind bei der Eindeichung von Wattflächen die Regel. Die gemachten Erfahrungen haben zu dem Entschluß geführt, einen Teil der nach dem Bau des Hindenburgdamms besonders im südlichen Winkel zwischen ihm und dem Festland entstandenen, aber teilweise noch nicht über MThw aufgewachsenen Anlandungen einzudeichen. Der begrenzte Schlickvorrat des Wattenmeeres soll damit geschont und die entstandene Kleidecke im Interesse der zukünftigen landwirtschaftlichen Nutzung nicht zu stark werden. Das ist

unter anderen allgemein von IWERSEN (37, 38, 39) und speziell von WOHLBERG (128, 130, 136) schon vor Jahren empfohlen worden.

VII. Die Herkunft der Sinkstoffe

1. Die Sinkstoffe der Wattgebiete

Die Frage nach der Herkunft der Sinkstoffe der Wattgebiete ist durch die oben geschilderten Untersuchungen weitgehend geklärt. Sie bestehen zum überwiegenden Teil aus dem aufgearbeiteten Material alter Niederungsgebiete, auf deren Entstehung und Zerstörung hier nicht näher eingegangen werden kann. Unter anderen sei auf die Arbeiten von DITTMER (11, 12, 13) verwiesen. Durch Sackung des zum Teil auf Moorschichten aufgelagerten schweren alten Marschbodens und durch eine relative Hebung des Meeresspiegels gelangte dieses Land unter den zerstörenden Einfluß der Gezeiten⁴⁾. Priele und Wattströme schnitten sich ein. Der Wellenschlag bewirkte eine flächenhafte Abtragung überall dort, wo Bodenaufbau und Schichtung ihm Angriffsmöglichkeiten boten.

Unter der Wirkung der Strömungskräfte verlagern sich die Wasserläufe ständig (68). Die Krümmungen verschärfen sich, bis die entstandene Laufverlängerung zu Durchbrüchen in den Sehnen der Bogen führt und das für die hin und her schwingenden Wassermengen zu klein gewordene Gefälle wieder vergrößert wird. Das bei diesen Bettverlagerungen aus seinem Verband gelöste feine Bodenmaterial gerät in Suspension, das gröbere wird an den Gerinnesohlen weiter befördert und zum Teil bei Richtungsänderungen von der Strömung ausgeworfen. Es lagert sich in Randaufwürfen auf der alten Marsch ab und schützt diese dann örtlich vor dem weiteren Wellenangriff.

Eine in den ersten Jahren der Westküsten-Forschung durch terrestrische Messungen und Luftbildaufnahmen ausgeführte genaue Kartierung der nordfriesischen Wattgebiete sollte die Grundlagen für die Feststellung des zeitlichen Ablaufs dieser Veränderungen bieten. Bei der 1951 abgeschlossenen Kartierung der Dithmarscher Watten wurden erst Teilgebiete der älteren Aufnahmen erneut erfaßt. Gleichlaufende Untersuchungen in den Niederlanden haben die bisherigen Auffassungen aber bestätigt und darüber hinaus nachgewiesen, daß die Abstände der Priele Gesetzmäßigkeiten folgen und daß zwischen Flut- und Ebbewasserläufen unterschieden werden muß (119).

Über das Ausmaß der aus altem Bodenmaterial aufgearbeiteten Sinkstoffmengen besteht noch keine Klarheit. Ebenso wenig läßt sich über ihre zweifelsfreie Ergänzung durch im Watt selbst aus dem Plankton, den Resten der Wattflora und -fauna entstehenden Sinkstoffmengen schon Sicheres sagen. Der Gehalt der als Schlick abgelagerten Sinkstoffe an Humus und Kalk entsteht aber in der Hauptsache aus tierischem und pflanzlichem Leben.

2. Die Sinkstoffe der Strommündungen

Die Sinkstoffe der Strommündungen werden zum Teil aus dem Binnenland unmittelbar zugeführt, zum Teil bilden sie sich unter dem Einfluß des Seewassers aus kolloiden Aufschwemmungen feinsten Schwebstoffe. Nach Beobachtungen jüngerer Zeit trägt auch der von der

⁴⁾ In einer während der Drucklegung bekanntgewordenen Arbeit — Eiszeitalter u. Gegenwart (1954) 4/5, S. 210—215 — vertritt DITTMER mit Recht die Auffassung, daß „Der Mensch als geologischer Faktor an der Nordseeküste“ durch die Verfehlung großer Moorgebiete, die Salzgewinnung aus Torfasche und die Verhinderung der weiteren Landerhöhung durch den Deichbau die natürliche Entwicklung ungünstig beeinflusst habe.

Strömung an den Ufern und auf den den Strom und das Mündungsgebiet begleitenden Watten aufgenommene Schlick zur Anreicherung der Sinkstoffführung bei (50, 64).

Die Flockenbildung aus den Aufschwemmungen und kolloiden Lösungen, die als Schlickbildung bezeichnet wird, ist in der ganzen Welt bekannt und um die Jahrhundertwende erstmalig von VERNON-HARCOURT (121) ausführlich beschrieben worden. Trotz der sehr großen Bedeutung dieses Vorgangs für den Hafenbau und die Schifffahrt ist seine Erforschung aber noch nicht abgeschlossen. In der grundsätzlichen Erkenntnis des Naturgeschehens sind durch die Entwicklung der Kolloidchemie zwar erhebliche Fortschritte erzielt worden, viele Einzelheiten bleiben aber noch zu klären. Die dabei zu überwindenden Schwierigkeiten sind groß und nur der Einsatz erheblicher Mittel verspricht Erfolg.

Die Kolloidchemie liefert im Grundsätzlichen folgende Erkenntnisse:

Die Korngrößengrenze der Sinkstoffe gegen die kolloiden Lösungen ist fließend je nach Art dieser Lösungen. Sie kann für Wasser praktisch bei $0,2 \mu$ angenommen werden. Unter dieser Größe erlangen die Teilchen eine Eigenbewegung nach Art der Molekularbewegung der echten Lösungen. Diese verhindern im stehenden Wasser das Absinken der Teilchen unter der Wirkung der Schwerkraft (23).

Die verschiedenen Gruppen der Kolloide werden durch Elektrolyte unterschiedlich beeinflusst. Die Suspensionskolloide, größtenteils anorganischer Art, koagulieren bei Hinzutritt eines Elektrolyten leicht, bilden Flocken und fallen aus. Die Emulsionskolloide organischer Art sind der Beeinflussung durch Elektrolyte sehr viel weniger zugänglich. Sie lösen sich nach Trocknung ohne weiteres in Lösungsmitteln wieder auf, während die Suspensionskolloide nicht wieder aufzulösen sind.

Wenn sich bei der Flockenbildung reversible Emulsionskolloide an irreversible Suspensionskolloide anlagern, kann es zu einer Schutzwirkung kommen, die diese dem Einfluß der Elektrolyten entzieht und eine weitere Koagulation verhindert (Schutzkolloide).

Für die Fällung von Kolloiden ist dasjenige Ion des Elektrolyten maßgebend, das dem Kolloid gegenüber die entgegengesetzte Ladung aufweist. Metallsalze sind ein geeignetes Mittel zur Ausflockung von Kolloiden mit negativer Ladung.

„Das Seewasser hat infolge seiner Beimengung an $MgCl_2$ eine starke koagulierende Wirkung, die durch das mengenmäßig mehr vorhandene $NaCl$ nicht erreicht wird. Die Gesamtwirkung des Gemisches von $NaCl$ und $MgCl_2$ ist geringer, als man nach der Koagulationsfähigkeit der einzelnen Salze vermuten könnte. Ihre Wirkungen addieren sich nicht“ (63).

Im einzelnen ist vorliegenden Veröffentlichungen folgendes zu entnehmen:

Nach den Untersuchungen von LÜNEBURG (70, 71, 72, 73a) und KÖPPEN (49) steht fest, daß an der Schlickbildung nicht nur die aus dem Binnenlande in die Flußmündungen gelangenden, bis zu kolloiden Größen aufgearbeiteten Sinkstoffe beteiligt sind, sondern auch große Mengen im Brackwasser absterbenden Planktons des Süß- und Salzwassers. Die organischen Substanzen des Planktons werden über Ammoniak größtenteils zu Nitrit (Salpetrige Säure) abgebaut. Reste gelangen mit den Skeletten der Kieselalgen aber auch in den Schlick. Eine weitere Quelle der Anreicherung des Schlicks mit Stoffen organischer Herkunft ist die Einleitung ungeklärter Abwässer der an den Flußmündungen liegenden Städte. Die Abbauzonen dieser organischen Massen kennzeichnen sich gleichfalls durch einen hohen Nitritgehalt des Wassers.

LÜNEBURG (71) faßt die Untersuchungen des Instituts für Meeresforschung in Bremerhaven an der Unterweser mit einem Ausblick auf die gleichartigen Verhältnisse in der Elbe wie folgt zusammen:

„Das aus dem Binnenlande heranströmende Süßwasser ist, wie die besonders in Elbe und Weser auffällig in Erscheinung tretende Gelbfärbung des Wassers (meist humosen Ursprungs) sinnfällig zeigt, sehr mit kolloidgelösten Stoffen belastet, die außerdem aus organogenen Abwasserderivaten und aus kolloiden Ton-, Kiesel- sowie Eisenteilchen bestehen können. Diese Kolloide werden im oberen Brackwasser plötzlich der Einwirkung eines starken Elektrolyten ausgesetzt, wobei sie in bekannter Weise infolge der Erreichung oder Überschreitung des isoelektrischen Punktes zur Koagulation gelangen, wie dieses auch an filtriertem Moorwasser mit Salzzusatz am Photometer in vitro nachgewiesen werden konnte. An die so gebildeten „Koagulationskerne“ werden bald übrige, im Wasser verteilte „quasi-kolloide“ Teilchen adsorbiert, und die Masse der gebildeten Sinkstoffe wird so immer mehr vergrößert, bis die erwähnten Trübungswolken sich herausgebildet haben, was meist, nach bisherigen Erfahrungen

in Elbe- und Wesermündung, bei 2, 3, 5 oder noch einigen Promille Salz mehr der Fall zu sein pflegt. Beim weiteren Abströmen nach See sinken sie, bei von uns festgestellten Teilchengrößen von etwa einheitlich 20 μ , in das untere Drittel des Wasserkörpers ab und können dann nicht mehr bis zur Oberfläche aufsteigen, da sie von der erwähnten Sprungschicht daran gebindert werden⁵⁾.

Die Trockensubstanz der so entstandenen Trübungsmasse besteht im Durchschnitt zu 10—20% aus organischer Substanz und nur immer zu 2—3% aus CaO (Kalk). Ferner wurde bei Beobachtungen über Stauwasser, das heißt bei Stromstille, ein kurzfristiges aber fast restloses Absinken der gesamten Trübungswolke an den Grund beobachtet. Die Sinkstoffmengen kommen jedoch infolge der starken Gezeitenströmungen nie zur dauernden Ablagerung im eigentlichen Stromstrich, wie Bodengreiferproben eindeutig bewiesen. Der Boden des Hauptfahrwassers der Wesermündung besteht aus Sand der verschiedensten Korngrößen und ist mit Schill u. a. vermischt.“

KÖPPEN (48) berichtet über die Vorgänge der Schlickbildung in der Emsmündung und vorbereitende Untersuchungen mit Aufschwemmungen von Kaolin und alter Marscherde im Laboratorium. Die Ausflockung des Kaolins beginnt im destillierten Wasser schon bei 0,9% NaCl-Gehalt und weniger. Die Sedimentationsgeschwindigkeit nimmt mit zunehmendem Salzgehalt zu, und zwar bei Kaolin schneller als bei Marscherde. KÖPPEN schließt daraus in Übereinstimmung mit den Feststellungen LÜNEBURGS, daß die Hauptmasse des Schlicks schon bei viel geringeren Salzkonzentrationen gebildet wird, als die eigentliche Brackwasserzone mit 10% und mehr Salzgehalt besitzt.

Die Tatsache, daß in Teilen der Brackwasserzone der Ems die Wassertrübe erhalten bleibt, eine Ausflockung aber nicht eintritt, führt KÖPPEN darauf zurück, daß Humusbestandteile auf den Primärteilchen Schutzkolloide bilden, welche die Zusammenballung verhindern. Die dadurch erzielte Stabilisierung der Suspension geht aber durch das Hinzukommen von Alkalischen (Ammoniak) wieder verloren, und es tritt weiterhin doch Ausflockung ein. Die Neutralisierung der Schutzwirkung durch Steigerung der Hydroxylionen im Salzgemisch erfordert einen pH-Wert von mindestens 8, also ein alkalisch wirkendes Wasser. Die gleiche Wirkung schreibt KÖPPEN auch dem Gehalt des Seewassers an Magnesiumhydroxyd zu, das sich mit der Humussäure zu unlöslichen humussäuren Magnesiumsalzen verbindet. Die Bildung von Ammoniak führt er in Übereinstimmung mit LÜNEBURG auf den bakteriellen Abbau organischer Substanzen zurück.

LÜTTMER (74) bezeichnet die Erklärung KÖPPENS für die vorübergehende Wirkung von Humusstoffen als chemisch unhaltbar und begründet seine Auffassung eingehend. Er führt die stellenweise Erhaltung der Trübe auf die ungleichmäßige Verteilung des stark eisenhaltigen Wassers in der Ems zurück. Nach ihm entsteht die Ausflockung überall dort, wo die positiv geladenen Eisenmoleküle durch die Strömung an die negativ geladenen Tonteilchen herangeführt werden und sich an diese anlagern.

⁵⁾ Herrn Dr. Wohlenberg bin ich zu Dank dafür verpflichtet, daß er mir anlässlich der Korrektur die Arbeit von POSTMA u. KALLE: „Die Entstehung von Trübungszonen im Unterlauf der Flüsse, speziell im Hinblick auf die Verhältnisse in der Unterelbe“, Deutsche Hydr. Zeitschr. 8 (1955) 4, S. 137—144 zur Verfügung gestellt hat. Die Verfasser vertreten in Übereinstimmung mit Feststellungen LÜNEBURGS (71, 73a) die Auffassung, daß der Ausflockungsvorgang je nach der Menge der kolloidalen Beimengungen nur einen mehr oder weniger geringen Anteil zur Erhöhung der Sinkstoffkonzentration beitragen könne. Sie schließen das aus der Feststellung, daß die Extinktionswerte der von ihnen an 16 Stationen zwischen Hamburg und Cuxhaven in der Elbe entnommen und je zur Hälfte mit Seewasser und destilliertem Wasser versetzten Wasserproben auch nach dem Absetzen und erneutem Durchschütteln nahezu unverändert geblieben sind. Für die Entstehung des Trübungsmaximums an der obersten Grenze der Brackwasserzone geben die Verfasser dann die einfache Erklärung: Die Sinkstoffe sinken aus der ausgehenden Oberströmung erst allmählich in die einlaufende Unterströmung ab, reichern sie an und gelangen mit ihr an der Grenze der Brackwasserzone wieder an die Oberfläche. Sie werden in einem Kreislauf herumgeführt. „Der eigenartige Vorgang der Fluß- und Meerwasser-Vermischung wirkt demnach wie eine Sinkstoff-Falle.“

Es wird Aufgabe der weitem Forschung sein, die verschiedenen Auffassungen zu klären und den Meinungsstreit zu entscheiden.

Die Ausführungen LÜNEBURGS und KÖPPENS folgen in der Hauptsache der oben wiedergegebenen „klassischen“ Theorie der Schlickbildung. RIVIÈRE (92) wendet sich gegen einige Angriffe auf diese, glaubt aber doch dem Umstand Rechnung tragen zu müssen, daß die Sinkstoffteilchen nach vorliegenden Beobachtungen häufig schon im Zustand der Flockung oder Vorflockung in das Mündungsgebiet der Flüsse gelangen und es des Hinzutritts eines Elektrolyten des Seewassers zu ihrer Bildung nicht mehr bedarf. Das ist zweifellos richtig, ob es aber auch in anderen Fällen ohne die Elektrolytwirkung zur Flockenbildung kommen würde, ist noch nicht bewiesen. SANTEMA (98) ist der Meinung, daß die häufig gegebene Anwesenheit von Ca-Ionen im Flußwasser schon zu einer Vorflockung führt.

Nur Untersuchungen des Flußwassers oberhalb der Brackwasserzone werden Aufschluß über dessen Mineral- und Salzgehalte und den Zustand der ankommenden Trübung: dispers, Vorflockung oder Flockung, geben können. Es wird sich dann erkennen lassen, ob es sich bei den von RIVIÈRE behandelten Fällen um grundsätzliche Unterschiede der Eigenschaften der ankommenden Sinkstoffe und um andere Gesetze der Flockenbildung handelt, oder ob die alte Theorie sinngemäß auch für die Ausflockung oberhalb der Brackwasserzone gilt.

Die Einrichtung einer Wasseruntersuchungskammer in einem Strompfeiler der neuen Elbebrücke bei Lauenburg durch die Wasser- und Schifffahrtsdirektion Hamburg (100) ist in diesem Sinne sehr zu begrüßen.

Als weitere Aufgabe war KÖPPEN die Ausarbeitung eines Verfahrens zur einfachen Bestimmung der mineralogenen und organogenen Kieselsäurebestandteile des Schlicks, das heißt der Schlickherkunft, gestellt (49). Versuche der Fraktionierung auf chemischem Wege waren erfolglos, weil es nicht gelang, die großen und rauhen Diatomeenskelette (Kieselgur) von den anhaftenden Tonteilchen zu trennen. Ein von ihm ausgearbeitetes kombiniertes Verfahren — mit Einschaltung mikroskopischer Kontrollen — erwies sich für die Praxis als zu umständlich und teuer.

Es ergab einen Diatomeengehalt im Trockenschlick von 18,5% an der Außenseite der Schleuse Nesserland und von 20,5% an der Außenseite der Seeschleuse.

Im frischen Schlick des Emdener Außenhafens wurden stellenweise bis zu 70% Kieselguranteile festgestellt. Die Forschungsstelle Norderney, in deren Auftrag KÖPPEN arbeitete, zieht aus diesen und anderen Messungen den Schluß, daß etwa ein Drittel des Schlicks und der Schlickkomponenten größerer Sedimente im Emsgebiet selbst entsteht. Diese Auffassung findet in den Untersuchungen HUSTEDTS (36) eine Stütze, der im Emsgebiet eine sehr reiche Diatomeenflora feststellte. Von den vorgefundenen 451 Formen sind zwar nur 199 solche des Seewassers, ihre Zahl überwiegt aber bei weitem die der Süßwasserformen und derjenigen, welche im Wasser wechselnden Salzgehalts leben können. Die Zahl der Süßwasserformen nimmt gegen See zu stark ab, während die Meeresdiatomeen bei Papenburg noch mit 25,6% an der Individuenzahl beteiligt sind.

LÜNEBURG stellte unter Benutzung des Nitrits als Indikator für den Abbau organischer Substanz in Elbe und Weser je zwei Maxima des Nitritgehalts fest, deren eines unterhalb der Abwassereinleitungen von Hamburg und Bremerhaven liegt, während sich die äußeren in Gebieten zwischen 25 und 15‰ Salzgehalt finden. Er schließt:

„Es scheint also doch zweifellos in diesem bei Neuwerk in der Elbe und bei Robbenplate-Wremen in der Weser gelegenen Nitritmaximum ein gewisses System vorzuliegen, das auf den ersten Blick nur dadurch zu erklären ist, daß im Brackwasserbereich von 15—25‰ ein größeres Absterben einerseits der stenohalinen Meeresplanktonorganismen und andererseits auch der limnischen Planktonlebewesen stattfindet.“

LUCHT (63) gibt, gestützt auf JÜRGENSONS-STRAUMANIS (41), folgende andere Erklärung

für die von KÖPPEN beobachtete teilweise Erhaltung der Wassertrübe und die Ausbildung des zweiten Trübungsmaximums:

„Die Beobachtung der beiden Trübungsmaxima in der Unterelbe erklärt sich aus der sogenannten Doppelflockung. Danach wächst die koagulierende Wirkung eines Elektrolyten zunächst an, wenn man von der niedrigsten Konzentration ausgeht, bis zu einem Grenzwert, der ein Maximum der Ausfällung hervorruft (Abb. 5). Dies ist in der Unterelbe der Fall bei einem Salzgehalt 1,5 ‰ bis 2,0 ‰. Bei einem weiteren Ansteigen des Salzgehaltes tritt zunächst keine weitere Steigerung der Ausflockung ein, sondern ein Rückgang. Erst bei einem Salzgehalt von 8 ‰ erfolgt eine Zunahme der Koagulation und führt zu der Entstehung des zweiten Maximums im Bereiche stärkeren Salzgehaltes. Die Lage der beiden Höhepunkte verschiebt sich mit der Höhe der Tide und der Menge des abfließenden Oberwassers innerhalb der oberen Hälfte der Brackwasserzone. Es liegen z. Z. bei weitem nicht soviel Trübungsmessungen

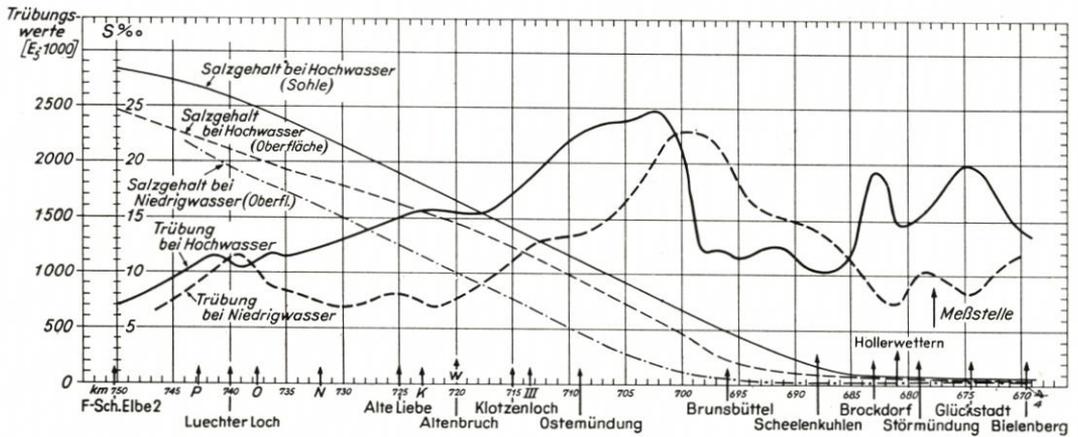


Abb. 5. Trübung und Salzgehalt in der Unterelbe [nach LUCHT (63)]

aus der Brackwasserzone der Elbe vor, wie Salzgehaltsmessungen, so daß die Lage der Trübungsmaxima, besonders ihre Verschiebung infolge verschiedener Einflüsse, nicht mit gleicher Sicherheit angegeben werden kann, wie die Lage des Maximums der Salzgehaltsschwankungen.“

„Mit zunehmender Konzentration tritt eine Umladung der kleinen Teilchen ein, dergestalt, daß ihre gerade neutralisierte Ladung durch Adsorption von Na- und Mg-Ionen positiv wird und damit wieder eine teilweise Auflösung der koagulierten Partikel eintritt. Bei weiterer Zunahme des Salzgehaltes wirken die Cl⁻-Ionen neutralisierend auf die Kolloidteilchen ein, was zur Ausbildung des zweiten Trübungsmaximums führt.“

LUCHT fügt unter Bezugnahme auf KORTÜM (52) hinzu: „Diese Deutung ist aber nicht ausreichend und bildet allein keine Grundlage für die Ableitung quantitativer Gesetzmäßigkeiten des Schlickfalles, so daß in manchen Fällen Abweichungen zwischen Theorie und Beobachtungen auftreten. Zur Zeit ist es der Kolloidchemie noch nicht möglich, alle Vorgänge exakt zu klären, die sich bei der Koagulation abspielen.“

Eine nordamerikanische Veröffentlichung (75a) welche die Feststofffracht der Flüsse und die damit zusammenhängenden Probleme zusammenfassend behandelt, gibt nachstehende kurze, der üblichen Theorie folgende Darstellung des Schlickfalles und der Schlickbildung:

„In den Aestuarien und Häfen des südatlantischen und der östlichen Golfküste verursacht die chemische Einwirkung des Salzwassers auf die von den Flüssen herabgeführten Ton- und kolloiden Gelteilchen die Ablagerung von Ausflockungen so ungeheuren Ausmaßes, daß regelmäßig jedes Jahr Millionen von cubic-yards durch Baggerung entfernt werden müssen, um die Schiffahrtstiefen zu erhalten. Die so entfernten Massen umfassen aber nicht die gesamten Ablagerungen, ein großer Teil wird durch die Ebbeströmungen in die See hinausgeschwemmt.“

Die Ausflockung ist ein elektrochemischer Vorgang eines Basenaustausches, analog dem des Ersatzes der Zeolithe in Wasser gelagerter Pflanzen. Es entsteht ein Aluminiumhydroxysilikat mit einer Natrium-Base, deren Teilchen sich auf einmal zusammenballen und zu Boden sinken. In einfacher Sprache: Was

zuerst ein Calcium-Klei war, wird ein Natrium-Klei. Die rote Farbe geht über in ein grünliches Grau und u. U. in ein bläuliches Grau. Die so gebildeten Ablagerungen haben zunächst schlammigen Charakter („mud“ im örtlichen Sprachgebrauch), die einem Bleilot noch erlauben, bis zum Boden durchzudringen, die aber Schiffskörpern und -schrauben einen erheblichen Widerstand entgegensetzen. Wenn die Ablagerungen sich anhäufen und ungestört liegenbleiben, verdichten sie sich, und es entsteht ein fester dunkelblauer Klei, welcher Ingenieuren und Geologen als mariner Klei bekannt ist.“

Die Arbeit gibt leider keine Literaturhinweise, so daß der offenbar irrigen Behauptung, ein Calcium-Klei verwandele sich in ein Natrium-Klei, nicht nachgegangen werden kann. Der meist nicht große Kalkgehalt der Sinkstoffe findet sich im Schlick — nach zahlreichen Untersuchungen 1 bis 15 % und im Mittel 5 bis 8 % CaCO_3 — und in den frischen, durch Vegetation und Niederschläge noch nicht entkalkten Kleiböden wieder.

Auch nach KELLEY und LIEBIG (45) ist die amerikanische Spezialforschung im Grundsätzlichen nicht zu anderen Ergebnissen gekommen wie die deutsche. KELLEY (44) betont aber, daß die Bildung und die Eigenschaften des Kleis von Ort zu Ort stark wechseln.

Auf diese Unterschiede geht die bereits angezogene Arbeit von SANTEMA (98) näher ein, die im Rahmen der seit 1951 laufenden Untersuchung der Verschlickung der Rotterdamer Häfen die Schlickbildung im Rheinwasser und die Zusammensetzung der vom Fluß als Sinkstoff herangeführten Klei-Mineralien schildert. Das Mineral des Rheins und der Maaß ist fast ausschließlich Illit, ein dem Montmorillonit ähnliches Umformungs- und Verwitterungsprodukt der Urgesteine, das stark mit Kalk angereichert ist. Infolge der Kalkaufnahme befindet sich die Suspension schon fast im Zustand der Koagulation, die zum Beispiel im „süßen“ Wasser des Lek plötzlich eintritt, wenn eine Wasserprobe kurze Zeit gestanden hat. Der Verfasser glaubt, daß die Ausflockung im Fluß durch hydrodynamische Kräfte der Strömung so lange aufgehalten wird, bis sie durch Hinzukommen der ersten Seewasser-Ionen ausgelöst wird. Nach Überschreitung eines Schwellenwertes des Gehalts an Seewasser-Elektrolyt tritt dann erneut Koagulation auf.

Er verweist auf Versuche von RIVIÈRE (93), nach denen kaolinhaltige Suspensionen im Gegensatz zum Verhalten der illit- und montmorillonithaltigen schon durch Spuren von Humus gegen die Ausflockung geschützt werden. Die Feststellungen KÖPPENS in der Ems werden damit bestätigt.

Auf Grund von Flockungsversuchen mit Sinkstoffproben, denen die Humusstoffe entzogen wurden, vermutet SANTEMA, daß die Zunahme der organischen Stoffe im Flußwasser in jüngerer Zeit zu einer dichteren Lagerung des Schlicks als früher führt. Besonders wichtig ist aber seine Feststellung, daß die große örtliche Verschiedenheit der an der Schlickbildung beteiligten Stoffe und ihre unterschiedliche Reaktion im Seewasser eine Feststellung der Art der im Sinkstoff enthaltenen Mineralien, ihrer Korngrößen, des pH-Wertes und der Kationenbesetzung notwendig mache, wenn ein zutreffender Einblick in die auftretenden Vorgänge gewonnen und Untersuchungen miteinander verglichen werden sollen.

Die von den Flüssen den Meeren ohne oder mit geringen Gezeiten zugeführten feinen und feinsten Sinkstoffe unterliegen dem Einfluß des Seesalzes in gleicher Weise wie in den Mündungsgebieten der Tideflüsse. Der Vorgang spielt sich hier aber um so weiter vor der Küste ab, je größer die abfließende Wassermenge ist und je weniger sie durch Wind und Küstenstrom abgelenkt wird. Nur wenn kleine Abflusssmengen auf hohe Außenwasserstände treffen und vorübergehend Seewasser in die Mündung eindringt, tritt die Ausflockung in den äußeren Mündungsgebieten ein.

Die Haffe der deutschen Ostseeküste nehmen eine Zwischenstellung ein. Jeder Wasserstandswechsel der See bewirkt einen Wasseraustausch durch die Verbindungstiefs mit dem Haff, der auf der Innenseite in der Nähe der Mündungen Wasserkörper verschiedenen Charakters entstehen läßt. Für das Pillauer Seetief genügt bei ruhigem Wetter der sehr kleine Tidehub der

Ostsee für diesen Austausch. Die geringe Salzkonzentration reicht zur Koagulation der feinsten noch schwebenden Teilchen aus, und in den der See am nächsten gelegenen Haffteilen bildet sich Seeschlick, der sich vom Haffschlick der inneren Haffgebiete deutlich unterscheidet. Praktische Bedeutung hat der Schlickfall hier jedoch nicht.

3. Andere Sinkstoffquellen

An den dem Seegang ausgesetzten Steilküsten werden große Mengen bindiger Bodenarten aufgearbeitet und als Sinkstoff fortgeführt. DÜCKER (15) schildert den Vorgang und seine Voraussetzungen sowie die neben der Wellenenergie vom Lande her mitwirkenden Kräfte am Beispiel des Brodtener Ufers. Andernorts gelangen in früheren erdgeschichtlichen Zeiten mit feinkörnigen Süß- oder Salzwasserabsätzen ausgefüllte Täler, Mulden und Niederungen bei einer relativen Hebung des Meeresniveaus oder bei Sturmfluten in den Bereich der Wellen, werden zerschlagen und aufgearbeitet. Moordecken schwimmen auf, zerbrechen in Schollen, werden abgetrieben und zerfallen im Seegang. Ihre organischen Bestandteile werden durch Wasseraufnahme schwerer und damit auch zu absetzbaren Sinkstoffen.

Ob bei diesen vielfältigen Erscheinungen das Salzwasser wie in den Flußmündungen als Elektrolyt wirkt und zur Zusammenballung auch der feinsten kolloiden Teilchen führt oder ob chemische Umsetzungen anderer Art stattfinden, ist noch unbekannt, aber kaum von großer Bedeutung.

Im Brandungssaum kommen ebenfalls große Mengen von Meeresorganismen zum Absterben und bilden die der Menge nach stark wechselnden Anteile des Schlicks an organischer Substanz. Das durch den Wellenschlag zu feinsten Trübe aufgearbeitete Material wird durch die Strömungen fortgeführt und gelangt wie das der Flüsse schließlich in den größten strömungsfreien Tiefen der Meere und in geschützten Buchten zur Ablagerung. Ausgedehnte Schlickgebiete finden sich wie in der Nordsee so auch in der Ostsee. PRATJE (89, 90, 90a) hat ihrer Bildung besondere Aufmerksamkeit geschenkt, sieht in der wechselnden Neigung ihrer Oberfläche ein Abbild der vorherrschenden Strömungen und zieht aus den rezenten Sedimentationsvorgängen Schlüsse auf fossile Ablagerungen. Auf die angeführten grundlegenden Arbeiten näher einzugehen würde hier zu weit führen.

VIII. Schlickfall und Schlickbindung

Die Verfestigung der zu Schlickflocken koagulierten, aber auch als Einzelteilchen abgesunkenen Sinkstoffe zu mehr oder weniger dichten Ablagerungen ist ein zum Teil noch ungeklärter Vorgang. Er vollzieht sich in den Schlickfallgebieten der Tideflüsse größtenteils unter der Wasseroberfläche, ist der Beobachtung unzugänglich und meßtechnisch schwer zu erfassen. Vielleicht kann der von LÜNEBURG (73) entwickelte Schlickpegel neben der Messung der allmählichen Konsolidierung der Schlickmassen auch dazu dienen, an den mit seinen ringförmigen Ausbohrungen entnommenen Proben etwaige chemische und physikalische Umwandlungen festzustellen.

Größere Klarheit besteht dagegen über die Schlickbindung in den der Beobachtung leichter zugänglichen, bei Ebbe trockenfallenden Watten. Ohne auf die in weiten Grenzen schwankenden, nicht auf gleichen Wassergehalt bezogenen und deshalb nicht vergleichbaren Angaben über die Größe des Schlickfalls in den vielen unter ihm leidenden Häfen und Seewasserstraßen einzugehen, wird im folgenden über das berichtet, was sich in der Literatur zu den Problemen findet:

In der Elbe fand LÜNEBURG (70) in mehreren Meßreihen die Größtwerte des Sinkstoffgehalts — bis zu 1000 mg/l — unterhalb Glückstadt und in der Weser bei Blexen. Hier wächst er

von Oberflächenwerten zwischen 200 und 300 mg/l gleichfalls auf etwa 1000 mg/l in Bodennähe an.

Diese Gebiete sind auch die Zentren des größten Schlickfalls, der mit gegen die See stark abnehmenden Werten das Gesamtgebiet der vom Tidehub und den Oberwasserzuflüssen abhängigen Pendelbewegung der Trübungszone umfaßt. Die Grenzen dieser Bewegung liegen in der Elbe (72) landwärts etwa bei Brunsbüttelkoog, seewärts noch außerhalb des Feuerschiffs Elbe 1, in der Weser etwa bei Nordenham und beim Roten Sand und in der Ems landwärts etwa bei Oldersum. Über die seeseitige Begrenzung fehlen Angaben.

An keiner Stelle dieser Gebiete sind aber die Sinkstoffe gleichmäßig über den Querschnitt verteilt. LÜNEBURG glaubt in der Weser nicht nur eine Abhängigkeit des Schlickgehalts von der Stromgeschwindigkeit, sondern in Übereinstimmung mit LUCHT (63) auch vom Salzgehalt feststellen zu können. Dementsprechend ist die Verteilung nicht nur in der Waagerechten von der Bewegung der verschiedenartigen Wasserkörper abhängig, sondern wechselt neben der allgemeinen Zunahme der Konzentration gegen die Sohle auch in der Senkrechten und hier besonders an den Sprungschichten.

In Gebieten, in denen eine Sprungschicht nicht zur Ausbildung kommt, der Salzgehalt klein wird und über die Tiefe gleichmäßig verteilt ist, quellen schlickreiche Wassermengen der Tiefe auch bis zur Oberfläche auf. LÜNEBURG beobachtete dieses Aufquellen an verschiedenen Stellen der Weser, besonders aber am oberen Ende der Brackwasserzone bei einem Salzgehalt von etwa 3 bis 5 ‰ und meint, daß das Auftreten dieser auch in der Elbe festgestellten Trübungswolken an der Oberfläche ein zuverlässiger Indikator für diesen Salzgehalt ist.

In der Emsmündung weisen die Trübungswolken sehr ungleichmäßige Sinkstoffgehalte auf, und ein Mittelwert der Konzentration ist nur schwer festzustellen (48).

Mit abnehmenden Strömungsgeschwindigkeiten und kleiner werdender Turbulenz vor und nach der Stromkenterung sinken die Sinkstoffe mit den schwersten beginnend ab. Durch die wiederauflebende Wasserbewegung nach der Kenterung werden sie von der zunehmenden Strömung aber wieder aufgenommen, so daß außer zur Zeit der Stromkenterung auf der Stromsohle kein Schlick sondern nur Sand zu finden ist. Nur an strömungsgeschützten Stellen und besonders in vom Strom abzweigenden Hafenbecken, Vorhäfen, toten Winkeln und auf den nur zeitweise und mit geringer Geschwindigkeit überströmten Vorländern und Watten bleibt der Schlick liegen. Die zunächst stark wässerigen Ablagerungen verstärken sich und werden unter dem Druck der hinzukommenden Mengen dichter, aber niemals fest, soweit sie bei NW nicht trockenfallen.

Über die Art der außerdem bei der Konsolidierung der Ablagerungen mitwirkenden Kräfte, ob in der Hauptsache chemisch oder physikalisch, bestehen noch Meinungsverschiedenheiten, wie der Arbeit von RIVIÈRE (92) zu entnehmen ist. Zum Beweis seiner eigenen Auffassung, daß die durch die Flockung der abgesetzten Teilchen vergrößerten Adsorptionskräfte die alleinige Ursache der verhältnismäßig festen und schnell wachsenden Bindung frisch abgesunkener Schlickteilchen untereinander und an bereits abgelagerte sind, verweist er auf einen Versuch folgender Art:

„Eine tonige, gut entflochte und dispergierte Suspension, deren Elemente fast unbegrenzte Zeit suspendiert bleiben, wird geteilt. Der eine Teil wird nach Zusatz eines Flockungsmittels kräftig geschüttelt. Beide Teile werden sodann zentrifugiert und zum Absetzen sich selbst überlassen. Bei der Probe mit Elektrolytzusatz bleibt die über dem Bodensatz stehende Flüssigkeit klar, und der Bodensatz kann durch mechanisches Aufrühren nur sehr schwer wieder in Suspension gebracht werden. Bei der nicht behandelten Probe verliert der Bodensatz bald seine scharfe Begrenzung infolge Diffusion der nicht geflochtenen Teilchen in die darüber stehende Flüssigkeit. Man erkennt also, daß, wenn die Schlicke der Flußmündungen und Küsten nicht geflockt wären, ihre kolloiden Partikel, wie im Experiment beschrieben, das Bestreben hätten, spontan in das darüber befindliche Wasser zu dispergieren. Durch die langsamsten Strömungen oder die geringste Bewegung würden sie weit davongeführt werden.“

Der Schlickfall ist bei gleicher Schwebstoffkonzentration um so stärker, je größer die Wassertiefe ist. In Hafenbecken ist er aber nicht nur von deren Tiefe, sondern auch von der Weite der Einfahrt abhängig, weil die Dichteunterschiede zwischen salzreicherem und salzärmerem Wasser und die dadurch zustande kommenden Strömungen einen um so schnelleren und intensiveren Wasserumsatz zwischen Strom und Becken bewirken, je größer der Dichteunterschied und die Verbindungsöffnung sind. Der Wasserumsatz umfaßt also nicht nur die durch Beckenfläche und Spiegelunterschied bei HW und NW gegebene Wassermenge, sondern bei breiten und ungünstig gelegenen Einfahrten das Mehrfache des Gesamthalts (30, 63).

Die Größe des Schlickfalls ist für alle betroffenen Häfen bekannt. Die in m oder cm angegebenen Zahlen vermitteln zwar ein Bild von der möglichen Behinderung der Schifffahrt, sie sind aber nicht unmittelbar vergleichbar, da in der Regel der Feststoffgehalt nicht erfaßt wird. Besser vergleichbare Zahlen liefern die gebaggerten Schlickmengen, weil die Baggerungen erst angesetzt zu werden pflegen, wenn die abgelagerten Mengen hinderlich werden und dann schon konsolidierteren Schlick umfassen.

Gleichwohl beträgt der Wassergehalt des Naßschlicks bis zu 90%. Für den sogenannten spittreifen (stichfesten) Schlick wird mit 60% gerechnet, während der abgelagerte krümelige Schlick immer noch 35 bis 40% Wasser enthält.

In den ost- und nordfriesischen Watten findet sich die zum Ausfallen des Schlicks aus der mit der Flut herangeführten Trübungswolke notwendige Voraussetzung abklingender, durch Strömung und Wellenschlag erzeugter Turbulenz in Küstennähe und im Wind- und Strömungsschutz der Inseln und Halligen. Gegen die Hochwasserzeit nehmen die Strömungsgeschwindigkeiten ab, um erst längere Zeit nach HW wieder größer zu werden. Die geringen Wassertiefen in Landnähe lassen unter normalen Witterungsverhältnissen auch die Bildung eines Wellenschlags mit größerer Turbulenz nicht zu. Luftereinwirkung und Sonneneinstrahlung während der Zeit, in der die Watten trockenfallen, sorgen für eine zusätzliche Verklebung und Haftung der abgelagerten dünnen Schlickschicht.

Die Messungen GRYS und der Forschungsabteilung in Husum zeigen, daß der Sinkstoffgehalt der im Wattengebiet mit den Gezeiten hin und her pendelnden Schlickwolke über deren Ausdehnung ungleichmäßig verteilt ist. Das Maximum liegt nach GRYS mit etwa 500 mg/l bei HW über den Schlickaufnahmegebieten und bei NW mit etwa 400 mg/l in Küstennähe.

Die Messungen WOHLBERGS (136) südlich des Hindenburgdamms bei Windstille und ruhiger See ergeben ein ausgezeichnetes Bild von der Sinkstoffverteilung über die Tiefe und Länge des Wattstroms bei Flut- und Ebbstrom. Am Grunde des Hauptvorflutgrabens des Anwachsens stieg der Sinkstoffgehalt bei einsetzendem Flutstrom von rund 100 auf 868 mg/l. Dem Anstieg folgte bis zum Thw ein Wiederabfall auf 53 mg/l. Unter schwierigen Bedingungen bei Westsüdweststurm unmittelbar am Damm um die Hochwasserzeit und 10 cm unter der Oberfläche entnommene Proben ergaben auf der Luvseite bis über 3000 mg/l anwachsende Werte, während die Konzentration in Lee des Damms nur $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{3}$ dieser Sinkstoffmenge erreicht. Auf die eindrucksvolle Schilderung des schnellen Anwachsens, besonders auf der Südseite des Damms, und die dabei mitwirkenden Faktoren muß verwiesen werden. Sie zeigen unter anderem mit ausgezeichneten Lichtbildern die Mitwirkung der Diatomeen an der Schlickbindung bei der primären und sekundären Sedimentation, den Einfluß der Sturmfluten und des Winters auf die Wattoberfläche und die Leistungen der verschiedenen Pflanzengesellschaften — Queller und Andel — für den weiteren Aufwuchs. Die umfassende Darstellung WOHLBERGS erübrigt es, auf ältere Arbeiten einzugehen, welche die Schlickablagerung und -bindung und die dabei wirksamen Lebensvorgänge im einzelnen schildern. Als Wegbereiter der fortschreitenden Erkenntnis dieser Vorgänge seien aber in ungefähr zeitlicher Ordnung folgende Autoren genannt: TRUS-

HEIM (111), SCHWARZ (103), WOHLBERG (125, 129, 131, 132), KOLUMBE (51), BROCKMANN (5, 6, 7), LINKE (60) und HUSTEDT (36).

Humus- und Kalkgehalt sind für die spätere landwirtschaftliche Nutzung der Ablagerungen von großer Bedeutung. HERRMANN (31) bringt Zahlen aus eigenen und älteren Untersuchungen. Der Humus entsteht, soweit er nicht aus aufgearbeiteten älteren Bodenschichten stammt, aus den organischen Resten der Wattflora und -fauna. Zum Teil bildet er sich nach IWERSEN (40) auch erst nach der Trockenlegung der Anlandungen (Eindeichung) durch die Tätigkeit aerober Bodenbakterien. Der Kalkgehalt wurde bisher auf die Schalen und Kalkpanzer der Wattiere zurückgeführt. MASCHHAUPT (75) vermutet daneben eine Entstehung durch physikalisch-chemische Prozesse, die an den Watträndern zu einer Praecipitation aus dem Seewasser führen.

KÖNIG (47) und PLATH (85) erarbeiteten die Zusammenhänge zwischen den zahlreichen Wattbewohnern und der Art der Sedimente. OSTENDORFF (80) lieferte im Rahmen der Arbeiten der Westküstenforschung eine Bodenbestandsaufnahme der nordfriesischen Watten nach Verfahren der landwirtschaftlichen Bodenkunde. Ziele und Grenzen der zukünftigen Landgewinnungsarbeiten an der schleswig-holsteinischen Westküste wurden damit in Zusammenarbeit von Fachleuten aller Zweige der Naturwissenschaft und erfahrenen Ingenieuren festgelegt.

Die Maßnahmen, mit denen der Mensch seit langer Zeit die Schlickablagerung zu fördern sucht, um den natürlichen Anwachs zu beschleunigen und ihn schneller deichreif werden zu lassen, sind oft beschrieben und bekannt.

Die ihnen zugrunde liegende Idee hat aber erstmalig WOHLBERG (136) aufgezeigt. Nach ihm beruht „das ökologische Prinzip der Landgewinnung“ auf der Vegetation und auf dem Wassergehalt des Sediments. Dieses muß durch die Spatenarbeit — Auswerfen der Gröppen und Bildung der Beete — aus dem Zustand der Wasserübersättigung in den der Untersättigung überführt werden.

Zahlenangaben über die Schlickbildung beim Durchgang durch den Darmkanal der Mollusken finden sich schließlich bei KAMPS (43). In flachen Kästen im Watt von Groningen ausgesetzte 80 Exemplare von Lamellibranchen nahmen nach seinen Messungen in vierzehn Tagen 4,5 kg (Trockengewicht) Schlick auf und gaben ihn durch Schleim verfestigt wieder ab.

Nach der gewonnenen Erkenntnis, daß der Schlickvorrat des Wattenmeeres hauptsächlich durch die Aufarbeitung alten untergegangenen Kulturlandes und aus tieferliegenden tonigen, in den Wattströmen und Prielen angeschnittenen Schichten ergänzt wird, während gleichzeitig der Abstrom der Sinkstoffe zum Meere größer ist als der Zustrom, müssen die Landgewinnungsarbeiten in erster Linie darauf gerichtet sein, den Schlickfall durch bauliche Maßnahmen so zu lenken, daß mit kleinsten Schlickmengen eine möglichst große Fläche wertvollen Kulturbodens geschaffen werden kann.

IWERSEN ist daher wiederholt dafür eingetreten, die Aufschlickung auf ein Maß zu beschränken, das auf die Dauer die besten landwirtschaftlichen Erträge sichert (37, 38, 40). Es war erklärlich, daß diese Forderung besonders bei tiefliegenden, der üblichen Auslegung des Begriffs der „Deichreife“ noch nicht entsprechenden Aufschlickungsgebieten Widerständen begegnete. IWERSENS jüngste Arbeit (40) legt diesen Begriff endgültig fest und liefert an Hand der Schilderung umfangreicher Anbauversuche auf eingedeichten Wattböden die Grundlagen für die Lösung dieses Problems.

IX. Die Strandriffe als Bildungen schwebenden Sandes

Die vielfältigen Sandbildungen an flachen Küsten, die auf die den vorherrschenden Winden oder den Gezeitenströmungen folgende Sandwanderung zurückzuführen sind, sind bekannt und

häufig geschildert. Für die ostfriesische Inselreihe behandelten WALTHER (122a), HIBBEN (33), GAYE und WALTHER (22) und KRÜGER (55, 56), für die Ostsee besonders OTTO (81) und PRATJE (90, 90a) in grundlegenden Arbeiten die Erscheinungsformen und deren ständige Veränderungen. Man ist geneigt, sie als Bildungen des auf dem Vorstrand von der Strömung rollend und gleitend bewegten Sandes anzusehen und den Wellen nur insoweit eine Mitwirkung zuzugestehen, als die Orbitalbewegung der ungebrochenen und die fortschreitende Geschwindigkeit der gebrochenen Welle den Sand in gleicher Weise auf der Sohle in Bewegung setzt und bei der Formgebung der Gebilde mitwirkt.

Für die Mehrzahl der Sandbildungen ist diese Erklärung zutreffend. Bei den bekannten Strandriffen reicht sie jedoch nicht aus. EVANS (19) leitete 1940 aus Beobachtungen und Messungen am Michigansee eine „Suspensionstheorie“ ab, fand aber Widerspruch. Neuere Beobachtungsergebnisse und Modellversuche lassen jedoch darauf schließen, daß diese oft in größerer Zahl auftretenden Bildungen in der Hauptsache durch den Ausfall des Sandes aus dem Schwebezustand entstehen.

Zur Begründung dieser Auffassung seien folgende Forschungsergebnisse und eine Theorie angegeben, welche die Behandlung der Strandriffe im Zusammenhang mit den Sinkstoffen rechtfertigt.

Die Strandriffe sind an flache Vorstrandneigungen gebunden. Je geringer diese sind und je stärker die Höhenlage des mittleren Seespiegels und die Wellenhöhe wechseln, desto größer kann die Zahl der hintereinander liegenden Riffe werden. OTTO (81) stellte an der pommerschen Ostseeküste bis zu fünf Riffe fest. Im Tidegebiet übersteigt ihre Zahl selten zwei. Sie erstrecken sich meist parallel zur Strandlinie und erreichen, dann durch einzelne Öffnungen unterbrochen, Längen von vielen Kilometern. Aber auch dachziegelartig übereinandergreifende Formen werden beobachtet, deren Längsachse einen Winkel zur Strandlinie bildet. Sie kennzeichnen sich dadurch als Wellenbildungen und ihre Längsachse als abhängig von der Wellenanlafrichtung. Küstenparallele Strömungen, die ältere Forscher für ihre Bildung allein verantwortlich machen, wirken in der Hauptsache bei ihrer Formung mit.

SHEPARD (105) bringt aus einem sehr umfangreichen von der Scripps Institution of Oceanography gesammelten Beobachtungsmaterial zahlreiche Beispiele der Bildung und Umformung der Strandriffe bei verschiedenen Wellenhöhen und bei deren Wechsel. Die Linie, in der sie sich bilden, ist abhängig von der Lage des Punktes, an dem die gebrochene Welle „eintaucht“. Das Riff bildet sich unmittelbar vor diesem Punkt unter der zusammenstürzenden Welle. Die Ursache der Bildung an dieser Stelle sieht SHEPARD in der Interferenz und hält der von EVANS (19) geäußerten Ansicht, daß die Riffe aus suspendiertem Material gebildet würden, entgegen, daß das nur teilweise richtig sein könne, weil der Sand längs des Scripps-Piers manchenorts von See gekommen sei. Eine Begründung, die die EVANSche Meinung durchaus nicht ausschließt.

Den Hauptteil seiner Arbeit widmet SHEPARD der Ableitung gemittelter Beziehungen der Tiefenlage der Riffkronen zu der der Rifftäler und zwischen diesen beiden Größen und der Wellenhöhe, welche zu ihrer Bildung führte. Die letztgenannten Beziehungen dienen dem Vergleich der Natur mit Modellversuchen und lassen erhebliche Unterschiede erkennen, die weiter unten erklärt werden. Die erste Gruppe der Vergleiche ergibt keine klare Abhängigkeit der beiden Hauptabmessungen der Strandriffe von den als verantwortlich für ihre Bildung angenommenen Wellenhöhen. Ein Zeichen dafür, daß ihr natürlicher Wechsel und die Nebeneinflüsse im Modell nicht erfaßt worden sind.

Die von SHEPARD zur Erklärung der Riffbildung angezogene „Interferenztheorie“ nach BRAUN und HARTNACK (28) nimmt an, daß die Strandriffe sich dort bilden, wo eine auflaufende Welle auf das zurückflutende Wasser der vorangegangenen trifft und die Transportkraft bei-

der Bewegungsrichtungen durch den Zusammenprall soweit herabgesetzt wird, daß der mitgeführte Sand liegenbleibt.

WIRTZ (124) fand bei Geschwindigkeits- und Sandfallmessungen in der Kösliner Bucht unabhängig von EVANS jedoch dessen Auffassung bestätigt. Er nimmt an, daß sich durch Zusammenprall und Brandung Zonen erhöhter Turbulenz bilden, die Sand in hohem Maße in Suspension bringen und erhalten. Die durch die Wellen herangeführten Wassermengen werden größtenteils nach der Seite in der Richtung des herrschenden Windes abgedrängt und nehmen als küstenparallel verlaufender Brandungsstrom über dem Boden den Sand schwebend mit.

WIRTZ folgert:

„Aus turbulenten Strömungen, die als Transportbänder des Sandes dienen, fallen bei nachlassender Stromgeschwindigkeit und Turbulenz die suspendierten Sandkörner nach ihrer Korngröße aus; es entsteht dann erst das Riff.“

Er belegt seine Meinung unter anderem mit den in Abbildung 6 wiedergegebenen Messungen an zwei aufeinanderfolgenden Tagen mit abnehmender Windgeschwindigkeit und durch Bohrungen (Abb. 7) auf Riffkämmen, die eine nach innen und unten vom Feinsand bis Kies zunehmende Korngrößenverteilung ergaben.

Die Beobachtungen von WIRTZ werden durch die Untersuchungen LINKES (61) am Nordstrand von Norderney großenteils bestätigt. Auch LINKE stellt fest, daß die Strandriffe in der Gezeitenzone bei Sturm verschwunden sind und sich erst in der nachfolgenden Schönwetterzeit langsam wieder bilden. In ruhigen Zeiten ändern sie ihre Lage nicht, während schon eine kurzfristige mittelstarke Brandung sie um mehrere Meter strandwärts verschieben kann.

KEULEGAN (46) untersuchte die Riffbildung in zwei Gerinnen von 46 cm und 4,27 m Breite, 61 cm und 1,22 m Tiefe und 9,15 bzw. 26 m Länge bei Vorstrandneigungen von 1 : 15; 1 : 30; 1 : 50 und 1 : 70 unter Verwendung von Sand einer mittleren Korngröße von 0,42 mm und

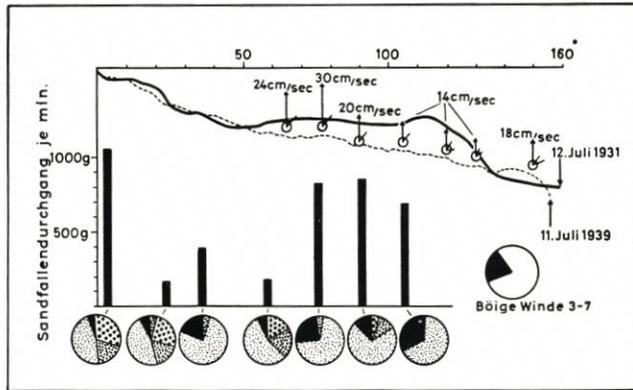


Abb. 6. Sandfallen- und Strommessungen in einem in der Umsetzung begriffenen Riff [aus: WIRTZ (124)]
Abzisse oben = Entfernung vom Strand. Wassertiefe bei 160 m = rund 4,20 m

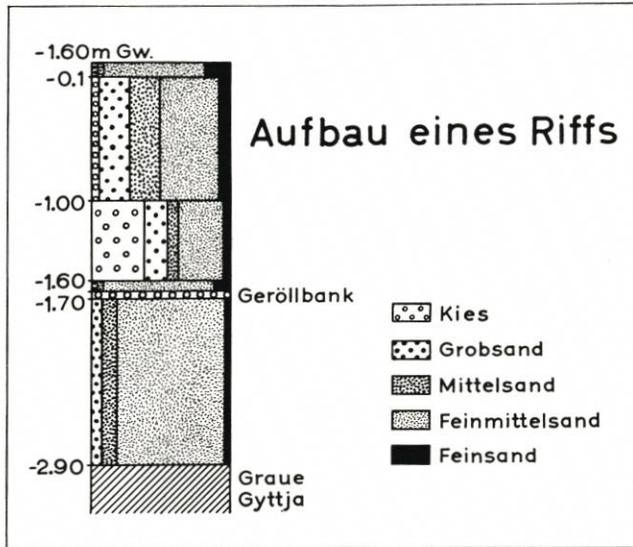


Abb. 7. Ergebnis der Kornanalyse der Bohrung in einem Strandriff [nach WIRTZ (124)]
Die Riffsohle liegt bei -1,70 m

Flachwasserwellen verschiedener Höhe und Periode. Seine Hauptergebnisse waren folgende:

- a) Über dem Punkt der Sohle, an dem der Wellenkamm überzukippen beginnt, ist die landwärts gerichtete Sandbewegung am größten. Sie nimmt gegen das sich bildende Riff ab.
- b) Dort, wo die gebrochene Welle untertaucht, wird die Sohle angegriffen. Das losgeschlagene Material wandert zum Teil rückwärts gegen das Riff, zum Teil in Richtung auf den Strand.
- c) Das Riff bildet sich also zunächst als flache Sandwelle vor dem Punkt, an dem die gebrochene Welle „untertaucht“.
- d) Die weitere Entwicklung des Strandriffs zeigt Abbildung 8.

Zu beachten ist die fünffache Überhöhung des Tiefenmaßstabs der Auftragung. Aber auch unverzerrt aufgetragen sind die Riffhänge der Endformen zu steil und die Kronen zu schmal.

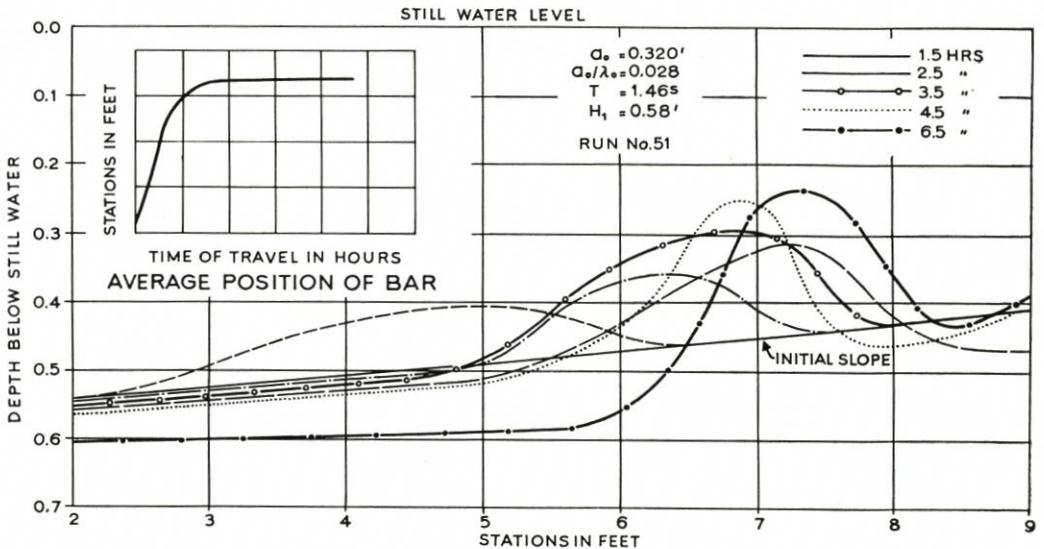


Abb. 8. Entwicklung eines Strandriffs im Modellversuch in 6,5 Stunden [nach KEULEGAN (46)]

Wellenhöhe a_0 im Modell	=	0,320'	=	0,0976 m
Wellenhöhe λ_0 im Modell	=	1,14'	=	0,348 m
Wassertiefe links v. Bildrand H	=	0,58'	=	0,177 m

Das ist offenbar auf die im Modell fehlende abschleifende und die Formen ausgleichende küstenparallele Strömung und darauf zurückzuführen, daß die maschinell erzeugte Wellenform und -periode bis zum Abbruch des Versuchs gehalten wurde, wenn sich ihre Form im Riffbereich mit fortschreitender Riffbildung auch änderte.

e) Die Lage des Riffs auf dem Vorstrand ist eine Funktion der Wellenhöhe und des Verhältnisses der Wellenhöhe zur Wellenlänge. Bei gleicher Wassertiefe und Wellenhöhe, aber kleiner werdender Wellenlänge wandert das Riff strandwärts. Das gleiche tritt ein, wenn Wellenhöhe und -länge konstant bleiben, aber die Wassertiefe größer wird. Umgekehrt verschiebt sich das Riff auch dann seawärts, wenn Wellenhöhe und -länge wachsen, ohne daß sich das Verhältnis der beiden Größen zueinander ändert. Bei steileren Vorstrandneigungen als 1 : 30 vertieft sich die Ausgangssohle see- und landwärts des Riffs.

f) Weitere Beziehungen, die KEULEGAN für das Verhältnis der Riffhöhe zur Sohlenbreite, der Rinntiefe zur Wassertiefe usw. glaubt ableiten zu können, haben aus dem unter d) angegebenen Grund offenbar nur für die Modellversuche Geltung. Das zeigt auch der mitgeteilte Vergleich natürlicher Strandriffquerschnitte mit den durch die Versuche gewonnenen (Abb. 9).

Die zur Aufstellung der — in dimensionslose Form gebrachten — Gleichungen verwendeten Größen sind in der Natur zum Teil nur schwer oder überhaupt nicht festzustellen. Auf die Wiedergabe dieser Gleichungen wird daher verzichtet. Der Wert der Arbeit liegt in der Hauptsache in der Sorgfalt der Messungen in zwei Maßstäben.

Sie bringt unter anderem eine Darstellung der alle 15 cm durch ein sehr einfaches Verfahren gemessenen, oben unter a) erwähnten Sandbewegung. Die gegebene Erklärung für die Abnahme der bewegten Sandmengen in Richtung auf das sich bildende Strandriff ist aber unklar

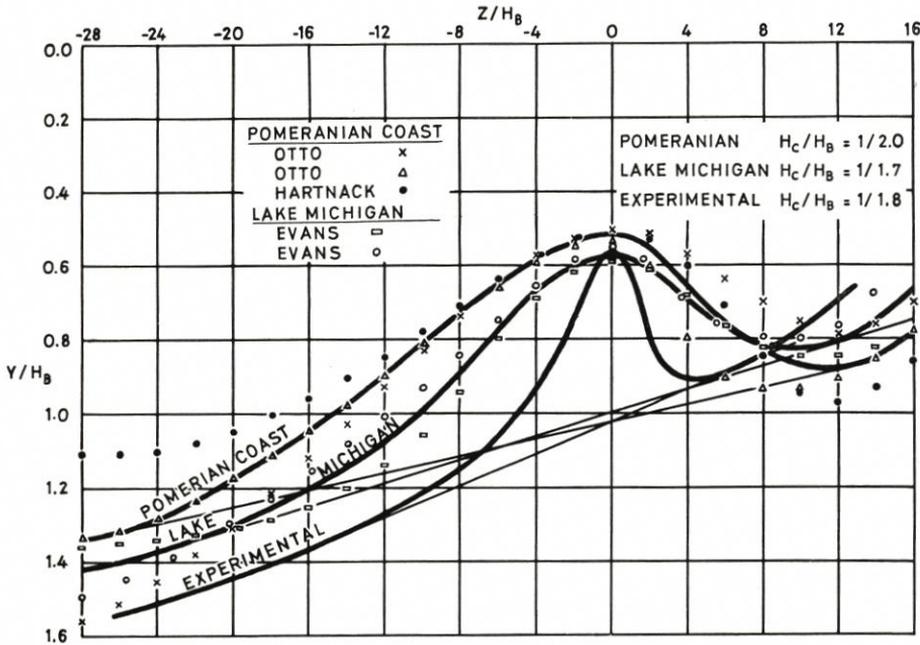


Abb. 9. Vergleich natürlicher Strandriffe mit dem des Modellversuchs
 H_C = Wassertiefe über Riffkrone vom Ruhespiegel aus
 H_B = Wassertiefe über Riffsohle vom Ruhespiegel aus
 Y = Wassertiefe über dem Schnittpunkt der strandseitigen Riffböschung mit der Ausgangssohle. Neigung der Ausgangssohle 1 : 50
 [aus: KEULEGAN (46)]

und offenbar nicht stichhaltig. Viel näher liegt die Erklärung der Abnahme der auf der Sohle bewegten Sandmengen durch die unter der brechenden Welle schnell zunehmende Wirbelbildung und Turbulenz, die fortschreitend mehr Sand von der Sohle in Suspension bringt. Hier bestehen offenbar maßstabbedingte Unterschiede zwischen Modell und Natur, wenn die steilen Flanken der Modellriffe es auch möglich erscheinen lassen, daß der verwendete grobe Sand teilweise in Suspension gegangen ist.

Trifft diese Annahme zu, so ist die Suspensionstheorie von WIRTZ und EVANS zum Teil durch die Versuche KEULEGANS bestätigt. Es bleibt aber, und das betont auch WIRTZ, noch zu klären, wie aus dem suspendierten Material das Riff selbst entsteht.

WIRTZ fand bei starker Brandung nur den untersten Sockel des Riffs und nimmt an, daß sich dieses in der Hauptsache erst durch den Ausfall des schwebenden Sandes beim Nachlassen der Wellenbewegung und verminderter Turbulenz bildet. Diese „Turbulenztheorie“ setzt jedoch

eine so starke Anreicherung des Wassers mit Sand im kritischen Bereich voraus, daß daraus nicht nur die Sanddrift laufend, wenn auch mit abnehmender Intensität gespeist wird, sondern auch die Hauptmasse des Riffs aufgebaut werden kann. Ob die Sandanreicherung so groß werden kann, daß nach dem WIRTZschen Beispiel das Riff von einem zum anderen Tag entsteht, ist zweifelhaft und muß noch geprüft werden. Großer Sandvorrat am Vorstrand, feinkörniges Material und besonderer Witterungsablauf wären jedenfalls die Voraussetzungen dafür. Die von WIRTZ untersuchten Riffe bestanden zum größten Teil aus Mittelsand von 0,2 bis 0,5 mm Durchmesser mit einem Feinsandanteil (0,1—0,2 mm) von nur etwa 20%. Seine bei schon abgeklungener Wellenbewegung 10 bis 15 cm über Grund ausgeführten Sandfallenmessungen ergaben bei Strömungsgeschwindigkeiten zwischen 14 und 30 cm/s einen Durchgang von 650 bis 350 g/min, der wegen der Ungenauigkeiten und Fehlerquellen der Messung aber nicht zu Schlüssen auf die in Bewegung befindliche Gesamtmenge benutzt wird.

LINKE (61) schildert die Schwierigkeit der Sinkstoffmessung im Brandungsraum. Es gelang ihm aber durch den Einsatz von Schwimmern, welche mit Tauchgeräten und Flossen ausgerüstet waren, die Brandungszone zu durchschwimmen und die schwebend beförderte Sandmenge in einem 400 m langen Profil, senkrecht zum Strand von Norderney, der ungefähren Größenordnung nach zu vermitteln. Selbst bei einem Nordweststurm von 8 bis 10 Beaufort konnte an 22 Punkten dieses Profils, je elf an der Oberfläche und am Grunde, der mittlere Sandgehalt des Wassers zu 0,3 bis 0,6 cm³/l bestimmt werden. In der aus diesen Werten zu rund 50 000 m³ in 24 Stunden errechneten Gesamtmenge des bei Sturm auf einer Breite von 400 m des Vorstrands schwebend beförderten Sandes sind die auf und dicht über der Sohle laufenden Sandmengen nicht enthalten.

Bei geringeren Wind- und Strömungsgeschwindigkeiten wird der Gehalt des Wassers an schwebendem Sand viel kleiner. Damit gewinnt seine Feststellung, daß sich das Riff erst während einer auf einen Sturm folgenden längeren Schönwetterzeit bildet, an Wahrscheinlichkeit.

Zieht man die Ergebnisse der ausgeführten Modellversuche zur Erklärung der Riffbildung mit heran, so ergibt sich eine wahrscheinliche und einfache Erklärung wie folgt:

Der untere aus größerem Material bestehende Teil des Riffs entsteht dort, wo die strandwärts gerichtete Strömung unter der anlaufenden Welle auf die Rückströmung der vorangegangenen trifft und die Schleppkraft momentan stark abnimmt (Interferenztheorie). Seewärts des dadurch zunächst gebildeten Walls wird Sand durch die Wirbelbildung unter der brechenden Welle angehoben und durch den sich bildenden Schußstrahl gegen den Strand fortgetragen. Dieser Strahl zerschellt hinter dem Riffsockel durch Aufprall und unter der Wirkung des rücklaufenden Wassers der vorangegangenen Welle. Er löst sich in neue Wirbel und Walzen auf, deren Drehung — unterstützt durch die am Boden einsetzende Rückströmung — gegen das Riff und riffaufwärts gerichtet ist. Die zunehmende Rückströmung zerstört die Wirbel und läßt den Sand über Krone und landseitigem Hang des Riffsockels ausfallen, soweit er nicht durch die aus der Anhäufung der Wassermengen im Brandungsbereich entstehende küstenparallele Strömung in der Schwebe gehalten und mit ihr fortgetragen wird. Das Strandriff wächst, verbreitert sich nach der Landseite und verschiebt sich bei unverminderter Wellenwirkung langsam gegen den Strand. Abklingender Seegang und die Strömung sorgen für eine Verflachung und Verbreiterung seiner Form.

Ob die hier entwickelte Entstehung der Strandriffe im einzelnen richtig ist, ließe sich durch Modellversuche bei Verwendung eines feinen Sandes aus sehr leichten Stoffen und unter Nachbildung der küstenparallelen Strömung sicher feststellen. Grundsätzlich gibt aber die Verbindung der Interferenz- und der Turbulenztheorie nach WIRTZ und EVANS eine treffende Erklärungsmöglichkeit. Für die Mitwirkung der küstenparallelen Strömung bietet die Flußkunde dabei noch folgenden Vergleich an:

Die ersten Messungen von WIRTZ erfaßten die Riffbildung „in statu nascendi“. Der küstenparallele Strom ist bereits ausgebildet und zeigt landwärts der Brandungslinie die größten Geschwindigkeiten der waagerechten Strömungskomponente. Nach ihrer Entstehung hat diese Strömung aber Schraubenform und entspricht damit den bekannten Strömungen auf den Übergangsstrecken zwischen zwei Krümmungen in Flüssen, die zur Bildung langgestreckter Sandbänke führen. Auch WIRTZ schreibt:

„Wirbelbildung an den Flanken scheint eine nicht geringe erosive und akkumulative Wirkung auf die Riffe zu haben, welche letztere ja bereits tote Formen sind, wenn die Rinnen noch zum Abfluß dienen. So muß man annehmen, daß die Riffe unmittelbar nach ihrer Entstehung symmetrisch gebaut sind, wengleich dieser Zustand auch nur von sehr kurzer Dauer ist.“

Die bei langen Strandriffen regelmäßig zu beobachtenden Durchrisse sind eine zwangsläufige Folge der durch die Wellen dauernd vergrößerten Wassermenge des landwärts des Riffs laufenden Stroms. Sie schafft sich Entlastungsöffnungen, reißt durch sie einen Teil des Sandes mit, der sich über den Vorstrand ausbreitet und erneut in das Spiel der anlaufenden Wellen gerät. Die Beobachtungen LINKES bestätigen diesen Vorgang.

SHEPARD glaubt, daß aus diesem Sand weitere Strandriffe seawärts vor dem zuerst entstandenen aufgeworfen werden, und schreibt: *„Das Anwachsen dieser Riffe ist begrenzt durch die Wassertiefe, über welcher die Wellen brechen und die weitere Sandzufuhr unterbinden.“* WIRTZ läßt die Frage der Lage weiterer Riffe offen und äußert sich zu ihrer Bildung nur wie folgt:

„Die einmal entstandene vordere Turbulenzzone scheint auf dem Wege der Verstärkung zur Bildung weiterer Turbulenzstreifen führen zu können, je nachdem, ob der verfügbare Brandungsstrom genügend breit ist. Die Einzelheiten dieses letzteren Vorgangs sind dem Verfasser noch völlig unklar.“

Unverändertes Meeressniveau und gleichbleibende Wellenlänge und -höhe vorausgesetzt, hat SHEPARDs Meinung nur für einen sandarmen Vorstrand Geltung. Die aus der See anlaufenden Wellen brechen zuerst über der ihrer Höhe entsprechenden Tiefe von rund 1,5—2 h. Findet sich hier genügend Sand, so wird das äußerste Riff zuerst gebildet. Aus der Brandung entstehen aber neue Systeme niedrigerer Wellen, die landwärts erneut brechen und weitere „Turbulenzstreifen“ erzeugen, die bei ausreichendem Sandvorrat die strandnäheren Riffe bilden. In der Regel wird aber die Entstehung von mehr als zwei Strandriffen auf Änderung des Wasserstandes und der Wellenhöhe zurückzuführen sein. Stets ist die Bildung mehrerer Riffe ein sicheres Zeichen für die ausreichende Speisung des Strandes mit Sand.

X. Zusammenfassung und Folgerungen

Der Überblick über den Stand der Sinkstoffforschung in den Binnengewässern versucht die Schwierigkeiten aufzuzeigen, die trotz großer Bemühungen noch zu keiner allgemein befriedigenden Lösung der Sinkstoffprobleme geführt haben. Nur laufende Messungen der Sinkstofffracht werden dort weiter führen können, wo ein Bedürfnis für genaue Ermittlungen besteht. Großer personeller und apparativer Einsatz ist dazu erforderlich.

Die in den Vereinigten Staaten entwickelte Theorie der Sinkstoffverteilung in der Lotrechten eines Flußquerschnitts kann diesen Aufwand bei günstigen örtlichen Abflußbedingungen verkleinern, aber der erzielbaren Genauigkeit der Ergebnisse sind dabei Grenzen gesetzt.

Die unter dem Einfluß der Gezeiten, des Windes, des Zuflusses aus dem Binnenlande und der Dichteströmungen dauernd wechselnden Abflußbedingungen in den Tidelflußmündungen lassen eine zuverlässige Bestimmung der Sinkstoffführung besonders in den äußeren Teilen der Mündungsgebiete nicht zu, in denen die wasserführenden Querschnitte bei höheren Wasserständen nicht mehr sicher abzugrenzen sind. Man wird sich hier mit Teilmessungen begnügen müssen, die bei genügender Zahl und räumlicher sowie zeitlicher Ausdehnung Schätzungen der Sinkstoff-

fracht nach Richtung und Größe ermöglichen. Die dazu erforderlichen Meßgeräte stehen zur Verfügung oder sind in der Entwicklung.

Vorgeschlagene halbempirische Berechnungsverfahren lassen dagegen nur mehr oder weniger rohe Schätzungen der in abgegrenzten Gebieten während bestimmter Zeiten stattfindenden Materialbewegungen und -umlagerungen zu. Der gerichtete Transport kann mit ihrer Hilfe mengenmäßig nicht erfaßt werden. Aber auch solche angenäherten Feststellungen können wertvolle Hinweise auf bestehende Entwicklungstendenzen der Fahrrinnen und Sände bieten. Ihnen sollte daher in leicht veränderlichen Mündungsgebieten besondere Sorgfalt gewidmet werden.

Die Strom- und Flußmündungen in Meeren mit Gezeiten haben verschiedenen Charakter, je nachdem in ihnen der Ebb- oder der Flutstrom überwiegt. Aus beiden gelangen Schwerstoffe bis ins Meer, wenn bei den letzteren in der Hauptsache auch nur im Austausch mit Seesand. Die Sinkstoffe der Mündungsgebiete ergänzen sich ununterbrochen durch unmittelbare Zufuhr aus dem Binnenlande und durch Neubildung in der oberen Brackwasserzone. Eine Abhängigkeit der Neubildung von bestimmten Salzgehaltsverhältnissen durch Flockenbildung aus der kolloiden Trübung und echten Lösungen besteht offenbar. Zum endgültigen Nachweis und zur Gewinnung zahlenmäßiger Beziehungen müssen Sinkstoffmessungen in größerem Umfang durchgeführt werden als bisher. Zwar wird sich der Schlickfall nicht verhindern lassen, aber die bessere Kenntnis der Schlickbildung bietet unter Umständen Möglichkeiten, ihn durch strombautechnische Maßnahmen so zu lenken, daß er der Schifffahrt weniger hinderlich wird als bisher. Von der Vervollkommnung des wasserbaulichen Modellversuchswesens kann auch bei der Lösung schwieriger Probleme eine wesentliche Hilfe erwartet werden.

Im Gegensatz zu den Fluß- und Strommündungen bildet sich in den Wattgebieten neuer Schlick nur in zahlenmäßig noch nicht nachgewiesenem, wahrscheinlich geringem Umfange. Die Masse der hier durch die Tideströmungen bewegten Sinkstoffe entstammt dem Watt selbst, und ihr Vorrat ist begrenzt. Deshalb verlangt die Forderung unbedingt Beachtung, mit ihnen hausälterisch umzugehen und den Schlickfall wenn nötig durch Früheindeichung auf das für die spätere landwirtschaftliche Nutzung des gewonnenen Neulands notwendige Maß zu beschränken.

Das Problem der Konsolidierung der Schlickmassen in den Strommündungen hat zur Zeit weniger technische als wissenschaftliche Bedeutung. Trotzdem sollte die Lösung dieses Problems in der Zusammenarbeit mit der Kolloidchemie angestrebt werden mit dem Ziel, Verfahren zu entwickeln, die zu einer schnelleren Verdichtung und zur Verringerung des Wassergehalts führen. Schon ein erzielter geringer Erfolg würde zu einer Ersparnis an Baggerkosten führen, die den Einsatz der erforderlichen Mittel rechtfertigen.

Die Schlickbildung der im Gezeitenwechsel trockenfallenden der Luft- und Sonneneinwirkung ausgesetzten Watablagerungen und die dabei mitwirkenden Lebensvorgänge sind in der Hauptsache erforscht. Das „ökologische Prinzip der Landgewinnung“ weist den Weg für die Nutzbarmachung des Anwachs. Es bleibt jedoch zu klären, ob die klassischen auf Handarbeit beruhenden Methoden der Landgewinnung nicht durch den Einsatz geeigneter Maschinen verbilligt werden können.

Abschließend wird mit der Bildung der Strandriffe ein Grenzgebiet zwischen den Sinkstoffen und dem Sand gestreift. Der Schilderung mag entnommen werden, daß auch zwangsläufig unvollkommene, weil mit unzureichenden Meßgeräten und unter schwierigsten Bedingungen ausgeführte Messungen die Klärung der Vorgänge im Brandungssaum der Meere wesentlich fördern können.

XI. Anhang: Die Theorie der Sinkstoffführung in Flüssen und Strömen

Die amerikanische Theorie der Sinkstoffbewegung ist ausführlich in dem Bericht Nr. 3: „Analytical Study of Methods of Sampling suspended Sediment“ der umfassenden Schriftenreihe (114) wiedergegeben. Ihr sei zunächst die Formulierung einiger Begriffe der Turbulenzforschung entnommen:

Turbulenz einer Strömung ist ein Zustand, bei dem sich Wasserteilchen an jedem Punkt des betrachteten Querschnitts oder Wasserkörpers nicht nur in der allgemeinen Strömungsrichtung fortbewegen, sondern ihre Richtung und Geschwindigkeit mit der Zeit unregelmäßig wechseln. Bei ausgebildeter Turbulenz sind die Richtungs- und Geschwindigkeitsschwankungen nicht periodisch, sondern unregelmäßig und zufällig. Ihre Frequenz gehorcht jedoch dem allgemeinen Streuungsgesetz der Statistik.

Turbulenz Austausch ist der Austausch impulsbehafteter Wasserteilchen oder Körper zwischen verschiedenen Orten oder Schichten des Querschnitts infolge der Richtungs- und Geschwindigkeitsschwankungen. Er wird nach PRANDTL durch den „Austauschkoeffizienten“ ϵ charakterisiert, der sich aus der zwischen zwei Schichten der Strömung an jedem Punkt herrschenden Scherspannung τ , der Dichte ρ und der Neigung dv/dy der Kurve der Geschwindigkeitsverteilung in der Lotrechten wie folgt berechnen läßt:

$$\tau = \rho \epsilon \, dv/dy \tag{1}$$

Der PRANDTLsche Ausdruck „Mischungslänge“ l bedeutet schließlich die mittlere Weglänge, welche die sich mit der Geschwindigkeit u in beliebiger Richtung bewegenden Wasserteilchen zurücklegen, bis sie auf andere Teilchen oder Wirbel stoßen, an die sie ihre mitgeführte Energie abgeben, um an deren Weiterbewegung teilzunehmen. Dabei besteht die allgemeine Beziehung

$$u \cdot l = \epsilon^3 \tag{2}$$

Die augenblickliche Sinkstoffkonzentration N an einem Punkt der Stromvertikalen in der Höhe y über der Sohle ist gleich der mittleren Konzentration \bar{N} zu- oder abzüglich der Konzentrationsänderung ΔN , welche gleichzeitig durch die Turbulenz veranlaßt wird:

$$N = \bar{N} \pm \Delta N \tag{3}$$

Beharrungszustand der Strömung vorausgesetzt, wird die Sinkstoffkonzentration in der Lotrechten bestimmt durch die lotrechten Komponenten $u \uparrow$ und $u \downarrow$ der örtlichen Geschwindigkeit einerseits und durch die Fallgeschwindigkeit c der Sinkstoffteilchen infolge der Schwerkraft andererseits. Mithin ist

$$\bar{N}u \uparrow = \bar{N}u \downarrow + \bar{N}c \tag{4}$$

Im Beharrungszustand sind die Bewegungsgrößen aufwärts und abwärts gleich groß, und es kann gesetzt werden

$$\bar{N}u = \bar{N}c \tag{5}$$

Aus der Zusammenfassung von (3) und (5) ergibt sich

$$(\bar{N} \pm \Delta N) \cdot u = \bar{N}u \pm \Delta N u = \bar{N}c \text{ und}$$

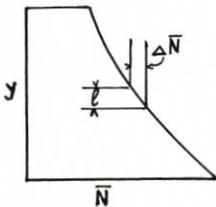
$$\text{da } u = 0, \quad \pm \bar{N}u = \bar{N}c$$

Weil ΔN und u immer gleichgerichtet sind (+ oder -) kann geschrieben werden

$$\bar{N}u = \bar{N}c \tag{6}$$

Nimmt man nun eine Sinkstoffverteilung nach nebenstehender Skizze an, so ist ihr zu entnehmen

$$\Delta \bar{N} = l \frac{d \bar{N}}{d y} \tag{7}$$



$$\text{Aus (5) und (7) ergibt sich } \bar{N} l \frac{d \bar{N}}{d y} = \bar{N}c = \epsilon \frac{d \bar{N}}{d y} \tag{8}$$

Die Integration liefert

$$\ln \bar{N}/N_a = - c \int_a^y d y / \epsilon \tag{9}$$

als allgemeine Gleichung der Sinkstoffverteilung in der Lotrechten in Beziehung zu einer bekannten Sinkstoffkonzentration im Punkt a der gleichen Lotrechten.

Die Gleichung ist lösbar, wenn nach dem PRANDTLschen Vorbild ϵ durch die Scherspannung in der Höhe y nach (1) ersetzt wird, und wenn man für die Form der Linie der lotrechten Geschwindigkeitsverteilung dv/dy bestimmte Annahmen macht.

Bei einer Tiefe T und einem Gefälle J des Wasserlaufs wird die Scherspannung in der Höhe y über der Sohle

3) Überstrichene Symbole bezeichnen Mittelwerte.

$$\tau = (T - y) \gamma J \text{ und } \varepsilon = \frac{(T - y) \gamma J}{\rho \cdot d \cdot v/d y} \quad (10)$$

Für die durch dv/dy charakterisierte Form der lotrechten Geschwindigkeitsverteilung sind verschiedene Ansätze möglich. Die amerikanische Gemeinschaftsarbeit hält auf Grund zahlreicher Messungen die Übertragung der von v. KARMAN für die Geschwindigkeitsverteilung in rauen Rohren entwickelte Gleichung auf Flüsse und Ströme für möglich und verwendet sie wegen ihres physikalisch richtigen Aufbaus. v. KARMAN fand:

$$x = 1 + \frac{\sqrt{\tau_0/\rho}}{0,4 v_m} (1 + \ln z), \quad (11)$$

in welcher 0,4 eine experimentell bestimmte universelle Konstante und

$$\tau_0 = \gamma T J \text{ und } z = y/T \text{ ist.}$$

Für (11) kann dann geschrieben werden

$$\bar{v}/v_m = 1 + \frac{\sqrt{\gamma \cdot T J}}{0,4 v_m} \cdot (1 + \ln y/T). \quad (12)$$

Setzt man für v_m die CHEZY-EITELWEYNSche oder die von den Amerikanern bevorzugte Geschwindigkeitsformel von MANNING ein, so vereinfacht sich (11) zu

$$x = 1 + 14,2/C (1 + \ln z) \quad (13)$$

$$x = 1 + 9,50 n/T^{1/6} (1 + \ln z).$$

Differenziert man weiter (12), so findet man

$$d \bar{v}/d y = \frac{\sqrt{\tau_0/\rho}}{0,4 y}$$

und durch Einsetzen dieses Wertes in (10)

$$\varepsilon = 0,4 T \cdot \sqrt{\tau_0/\rho} \cdot (1 - z) \cdot z. \quad (14)$$

Hiermit wird aus (9)

$$\ln N/N_a = -\frac{c}{0,4 \sqrt{\tau_0/\rho} \cdot a} \int_a^z dz/z \cdot (1 - z). \quad (15)$$

Trägt man den Ausdruck $\int_a^z dz/z (1 - z)$ graphisch über der Tiefe auf, so ergibt sich eine Kurve, die für alle praktischen Fälle als gerade Linie angesehen werden kann. Die Integration wird dadurch einfach und ergibt

$$\bar{N} = \bar{N}_a \cdot e^{-16 t (z - a)} \quad (16)$$

mit $t = c \cdot \sqrt{\tau_0/\rho}$.

Setzt man für τ_0 wiederum $\gamma \cdot T J$ ein und multipliziert die Glieder von (16) mit den entsprechenden der MANNINGSchen oder CHEZY-EITELWEYNSchen Gleichung so erhält man

$$t = \frac{0,0086 c}{(n/T^{1/6}) \cdot v_m} \text{ oder } \frac{0,0057 c \cdot C}{v_m}, \quad (17)$$

wobei die Fallgeschwindigkeit c in cm/s, die mittlere Geschwindigkeit in der Vertikalen v_m aber in fl/s und die Tiefe T in ft eingesetzt sind ($1 \text{ ft} = 0,3048 \text{ m}$). Der Beiwert C der CHEZY-EITELWEYNSchen Gleichung wird dabei aus dem Rauigkeitsbeiwert der MANNING-Formel errechnet mit $C = 1 : n/T^{1/6}$. T ist dabei wieder in ft einzusetzen.

(Manningformel: $v_m = 1/n \cdot T^{2/3} \cdot J^{1/2}$).

Die Auftragung der Gleichung (16) auf halblogarithmischem Papier ergibt wiederum eine gerade Linie, die mit der Neigung 16 t ohne weiteres gezeichnet werden kann, wenn die Sinkstoffkonzentration an einem Punkt der Lotrechten bekannt ist.

Für die Berechnung von t gibt die Veröffentlichung (114, 3) ein Nomogramm, auf das verwiesen sei. Außerdem enthält die Arbeit Auftragungen in dimensionsloser Form der Sinkstoffverteilung in der Lotrechten für Werte von t von 0,001 bis 1,0, der Geschwindigkeitsverteilung nach v. KARMAN in Abhängigkeit von der Rauigkeit und eine Darstellung der geringen Abweichungen der berechneten Geschwindigkeitsverteilung von der nach amerikanischer Auffassung natürlichen. Diese Kurve zeigt die Größtgeschwindigkeit in etwa 15 % der Tiefe und biegt in Spiegelhöhe etwas zurück, während bei der theoretischen nach v. KARMAN die Geschwindigkeiten bis zum Spiegel ansteigen. Die Unterschiede der von den beiden Geschwindigkeitsprofilen eingeschlossenen Flächen betragen dabei weniger als 1 %.

Die Sinkstofffracht jedes durch eine Lotrechte repräsentierten Querschnittsabschnitts wird dann durch punktweise Multiplikation der nach (16) ermittelten Sinkstoffkonzentration mit der dazugehörigen Fließgeschwindigkeit oder durch Multiplikation der aus den lotrechten Flächen beider Größen rechnerisch oder graphisch festgestellten Mittelwerte N_m und v_m gewonnen. Die rechnerische Ermittlung unter Zu-

grundelegung der vorstehend geschilderten Verfahren, (16) und (13), führt zur Gleichung des Gesamtgehalts eines Querschnittsabschnitts an Sinkstoff der Fallgeschwindigkeit c

$$S(c) = \Phi v_m T \bar{N}_a e^{-16tz}, \quad (18)$$

worin \bar{N}_a wieder die gemessene Konzentration in der Höhe a über der Sohle ist. Φ ist eine Funktion von t und der relativen Rauigkeit $n/T^{1/6}$ oder C . Sie gibt das Verhältnis der mittleren Sinkstoffkonzentration in der Vertikalen zu der an der Sohle an.

Die Berechnung von Φ aus

$$\Phi = \left[(1 + 9,50 n/T^{1/6}) \cdot \int_0^1 e^{-16tz} \cdot dz \right] + \left[9,50 n/T^{1/6} \int_0^1 e^{-16tz} \ln ez \cdot dz \right] = \\ = \left[(1 + 14,2/C) \cdot \int_0^1 e^{-16tz} \cdot dz \right] + \left[14,2/C \cdot \int_0^1 e^{-16tz} \ln ez \cdot dz \right] \quad (19)$$

ist sehr umständlich. (114, 3) bringt deshalb eine graphische Darstellung der Funktion Φ in Abhängigkeit von t für relative Rauigkeiten $n/T^{1/6}$ von 0,01; 0,02 und 0,03. Diese zeigt, daß der Rauigkeitseinfluß nur bei größeren t -Werten von einiger Bedeutung ist.

Die Grundgleichungen für die Scherspannung τ (1) und für das vorausgesetzte Gleichgewicht der Sinkstoffverteilung $\bar{N} \cdot c$ (8) haben auch andere Forscher für Berechnungen gewählt. Sie rechnen dann aber mit einer anderen Form der Geschwindigkeitsverteilung in der Lotrechten. Zu erwähnen ist besonders ROUSE (96). Er wählt die allgemeine Exponentialform

$$\frac{dv}{dy} = \frac{\sqrt{\tau_0/\rho}}{K \cdot y},$$

schaltet dann die sohlennahe Schicht von der Dicke a durch $\eta = y - a$ aus und kommt zu der Gleichung

$$\bar{N} = \bar{N}_a \left(\frac{1 - \frac{\eta}{\eta_0}}{1 + \frac{\eta}{\eta_0}} \right)^P$$

mit $p = \frac{c}{K \sqrt{\tau_0/\rho}}$ und $\eta_0 =$ Wert von η in Spiegelhöhe.

Um den Wert der Theorie für die Praxis abschätzen zu können, ist es notwendig, besonders die auf Seite 12 des Berichts geschilderten Voraussetzungen und Vereinfachungen einer kritischen Betrachtung zu unterziehen. Vom Ingenieurstandpunkt aus ergibt sich dabei folgendes:

a) Die Voraussetzung eines zweidimensionalen gleichförmigen Abflusses — auch hinsichtlich der örtlichen Sinkstoffkonzentration — ist berechtigt, weil die Einzel-(Punkt-)messung nur Sekunden erfordert.

b) Auch eine gesetzmäßig verteilte Turbulenz muß vorausgesetzt werden, um eine Rechnung überhaupt ansetzen zu können. Die Annahme verlangt gleichförmige Querschnitte in geraden Flußstrecken und in genügend großem Abstand von oberhalb liegenden Flußkrümmungen und anderen Bettunregelmäßigkeiten. Das sind Forderungen, die für jeden Meßquerschnitt ohne Rücksicht auf Meßverfahren und -geräte gestellt werden müssen, wenn zuverlässige Ergebnisse erwartet werden sollen.

c) Die Ausschaltung einer sohlennahen Zone ergibt sich zwangsläufig aus der Unmöglichkeit, die Öffnung eines Schwebstofffanggeräts bis unmittelbar an die Sohle heranzubringen, ohne von dem in Riffeln wandernden Sohlenmaterial etwas mitzufangen. Die Begründung mit der Ausschaltung der Sprungbewegung ist nicht stichhaltig. Diese fördert im Vergleich zu der sehr hohen Konzentration der Sinkstoffe in der gleichen sohlennahen Zone so wenig feste Stoffe, daß ihr Einfluß auf die mittlere Konzentration einer Vertikalen weit geringer ist, als die der nicht erfaßten Sinkstoffschicht. Je nach dem mit dem Fanggerät erreichbaren tiefsten Entnahmepunkt ist der dadurch veranlaßte Fehler verschieden groß, aber immer unvermeidlich.

Zur Zeit in der Entwicklung begriffene Schöpfgeräte suchen bis in unmittelbare Sohlennähe zu gelangen. Es ist jedoch fraglich, ob die Messungsergebnisse dadurch verbessert werden können. Der unvermeidliche Stau jedes Geräts führt zwangsläufig zu einer Änderung des als zweidimensional vorausgesetzten Strömungsbildes und die sich mit zunehmender Annäherung des Geräts an die Sohle vergrößernde Umströmung wirbelt leichtbewegliches Sohlenmaterial auf. Die dadurch entstehenden Meßfehler sind von den Korngrößen dieses Materials abhängig und auch durch großmaßstäbliche Modellversuche kaum zu erfassen.

Von der Theorie her gilt weiter folgendes:

d) Für die Ermittlung des Austauschkoeffizienten der Turbulenz ε aus der Scherspannung τ wird mit der Dichte reinen Wassers $\rho = \gamma/g$ gerechnet. Der Einfluß der Wassertemperatur auf γ ist gering und durch Temperaturmessungen leicht auszuschalten. Nicht erfaßt und erfaßbar ist aber der Einfluß des unbekanntem Gewichts der im Wasser enthaltenen Sinkstoffe. Es ist anzunehmen, daß hier Analogien zu dem Einfluß der Wassertemperatur auf den Geschiebetrieb bestehen. SEIFERT (104) berichtet, daß die in der Preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau durchgeführten Versuchsreihen eine

erhebliche Abhängigkeit der geförderten Geschiebemengen von der Wassertemperatur ergeben haben. Der Geschiebetrieb wird um fast 100% größer, wenn sich die Temperatur im natürlichen Schwankungsbereich von + 2° auf + 25° C erhöht, wobei sich die kinematische Zähigkeit um 46% verkleinert. Auf der anderen Seite ist im Bereich der molekularen Größen (BROWNSche Bewegung) seit langem das gleiche bekannt. Der durch die Vernachlässigung des Sinkstoffgewichts gemachte Fehler ist größenordnungsmäßig daher vorläufig nicht abzuschätzen.

e) Das gleiche gilt von der gleichzeitigen Voraussetzung, daß die im Wasser enthaltenen schwereren Sinkstoffteilchen die Bewegungen der Wasserteilchen vollkommen mitmachen. Das würde der Fall sein, wenn sich der Austausch der Wasserteilchen in der Turbulenz auf geraden Bahnen vollziehen würde. Das ist sicher nicht der Fall. Bei gekrümmten Bahnen treten aber Schleuderkräfte auf, deren Wirkung besonders bei größeren und schwereren Sinkstoffteilchen zu deren Austritt aus den Wasserteilchen führen kann, in denen sie schweben.

In den Vereinigten Staaten wird diesem Umstand bei der Ausbildung und Lage der Eintrittsöffnungen moderner Sinkstoffangegeräte große Aufmerksamkeit gewidmet. Er dürfte bei dem Rechnungsansatz nicht unbeachtet bleiben.

f) Schließlich ist die Annahme sicher unzutreffend, daß die Fallgeschwindigkeit im fließenden Wasser gleich der im ruhenden Wasser sei. Ein experimenteller Beweis dafür ist wegen der außerordentlichen versuchstechnischen Schwierigkeiten zwar noch nicht erbracht, jedoch lassen sich nach Ansicht von LABAYE (58) Analogieschlüsse aus der Theorie der Emulsionen ziehen, welche HURST (35) bei Messungen der Konzentration einer einheitlichen Mischung in Abhängigkeit von der Tiefe bestätigt fand.

Es besteht also die Notwendigkeit, die in der amerikanischen Theorie offenbar unvollständigen Definitionen von ε und c zu ergänzen. Für den Austauschkoeffizienten werden dabei die Erfahrungen mit kolloiden Lösungen und Emulsionen herangezogen werden können. In der organischen Chemie rechnet man zum Beispiel mit einem Wachsen der Zähigkeit kolloider Lösungen mit deren Konzentration nach einem Exponentialgesetz.

Die Bestimmung der Fallgeschwindigkeit c kleiner Teilchen im fließenden Wasser erfordert schwierige und sehr umfangreiche Versuche, bei denen Gewicht, Form und Oberflächenbeschaffenheit der Körper ebenso variiert werden müssen, wie die Zahl der gleichzeitig auf engem Raum fallenden Teilchen. VANONI (115) ist bereits zu dem grundsätzlichen Ergebnis gekommen, daß für c im fließenden Wasser andere Werte gelten als im stehenden. Über den Einfluß der Körperform auf die Fallgeschwindigkeit im fließenden Wasser würde auf den umfangreichen Versuchen aufgebaut werden können, die unter anderen HEYWOOD (32) ausgeführt hat. Der Report Nr. 4 des Interdepartmental Committee bringt eine Zusammenfassung der vorliegenden Ergebnisse. LABAYE berichtet (58) über Arbeiten von SURDY, der eine Verkleinerung der Fallgeschwindigkeit kleiner Quarzkörner in kaolinhaltigem Wasser auf rund $\frac{1}{10}$ der normalen feststellte.

Schließlich wird es im Hinblick auf Literaturangaben über angebliche Sinkstoffgehalte von 50% und mehr notwendig sein, die Frage der größtmöglichen Sinkstoffkonzentration im ruhenden und fließenden Wasser aufzugreifen.

XII. Schriftenverzeichnis

1. ALLEN, F. H.: Das Themse-Versuchsmodell. Eine Studie des Verschlickungsproblems. Übers. aus „Dock and Harbour“, S. 373, 1952.
2. ANNOTATED BIBLIOGRAPHY ON SEDIMENTATION. Sedimentation Bulletin No. 2. U.S. Government Printing Office, Washington 1950.
3. BAAK, I. A.: Regional petrology of the southern north-sea. Diss. Leiden 1936.
4. BRAUDEAU, G.: Quelques techniques pour l'étude et la mesure du débit solide. Mémoires et Travaux de la Société Hydrotechnique de France. Vol. 1, S. 33—42, 1951.
5. BROCKMANN, C.: Diatomeen und Schlick im Jade-Gebiet. Abh. Senckenbg. Ges. 430, 1935.
6. BROCKMANN, C.: Küstennahe und küstenferne Sedimente in der Nordsee. Naturw. Ver. Bremen 30, 1/2, 1937.
7. BROCKMANN, C.: Die Watt-Diatomeen der schleswig-holsteinischen Westküste. Abh. Senckenbg. Ges. 478, 1950.
8. CROMMELIN, R. D.: De herkomst van het zand van de waddenzee. Tijdschr. Kon. Ned. Aardr. Gen. 57, 3. S. 347—361, 1940.
9. CROMMELIN, R. D. u. MAASKANT, A.: Untersuchungen im Stromgebiet der Weser und Elbe. Mededeelingen van de Landbouwhoogeschool, 44. Verhandeling 2, S. 1—18, Wageningen 1940.

- 9a. DANIEL: Bericht zum 28. Internationalen Schiffahrtskongreß in Rom 1953. Übersetzung aus *De-Ingenieur* 66, 34/35, 1954.
10. DECHEND, W.: Sedimentpetrologische Untersuchungen zur Frage der Sandumlagerungen im Watt Nordfrieslands. *Dtsch. Hydrogr. Zeitschr.* 3, 5/6, S. 294—303, 1950.
11. DITTMER, E.: Schichtenaufbau und Entwicklungsgeschichte des Dithmarscher Alluviums. *Westküste* 1, 2, S. 105—150, 1938.
12. DITTMER, E.: Zur Verbreitung altinterglazialer Meeresablagerungen in Nordfriesland. *Westküste* 2, 1, S. 123—127, 1939.
13. DITTMER, E.: Die nacheiszeitliche Entwicklung der schleswig-holsteinischen Westküste. *Meyniana* 10, 1952.
14. DITTMER, E. und VINCK, F.: Der Sinkstoffhaushalt der Eider. Unveröff. Bericht, Kiel 1950.
15. DÜCKER, A.: Über die physikalischen Eigenschaften der das Brodtener Ufer aufbauenden Bodenarten und ihre Bedeutung für den Steiluferrückgang und die Errichtung eines Uferschutzwerks. *Die Küste* 1, 2, S. 21—33, 1952.
16. EDELMAN, E. H.: Die Petrologie der Sande der niederländischen Flüsse Rijn, Lek, Waal, Merwede, Geldersche Yssel. *Ass. Intern. d'Hydrologie scientifique*, 6. Assemblée générale à Edinbourg, Bull. No. 22, 1936.
17. EDELMAN, E. H.: Petrology of recent sands of the Rhine and the Meuse in the Netherlands. *Journ. Sedimentary Petrology* 8, 2, S. 59—66, 1938.
- 17a. EINSTEIN, H. A.: The bed-load function for transportation in open channel flows. *U.S. Dept. Agri. Tech. Bull. No. 1026*, 1950.
18. ERTL, O.: Die Gestaltungsvorgänge am Saalachsee bei Reichenhall und an anderen Stauräumen in alpinen Gewässern. *Deutsche Wasserwirtschaft* 34, 1939.
19. EVANS, O. F.: The low and ball of the eastern shore of Lake Michigan. *Jour. Geology* 58, S. 476, 1940.
20. FUTU LI: Die Regelung des Hwangho. *Diss. Hannover* 1933.
21. GAYE, J.: Entwicklung und Erhaltung der ostfriesischen Inseln. *Zentralbl. d. Bauverw.* 54, 22, S. 293—300, 1934.
22. GAYE, J. u. WALTHER, F.: Die Wanderung der Sandriffe vor den ostfriesischen Inseln. *Bautechnik* 13, 41, S. 555—567, 1935.
23. GESSNER, H.: Die Schlämmanalyse. *Akad. Verlagsges. Leipzig* 1931.
24. GILBERT, G. K.: The transportation of debris by running water. *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper* 86, 1914.
25. GLANGEAUD: Feststofftransport und -ablagerung in den Tidemündungen. Beispiel der Gironde, mitgeteilt von Glangeaud. *Auszugsweise Übersetzung aus Révue Générale de l'Hydraulique* 30, 1939.
26. GRIPP, K.: Entstehung und künftige Entwicklung der Deutschen Bucht. *Arch. Dtsch. Seewarte* 63, 2, 1944.
27. GRY, H.: Das Wattenmeer bei Skallingen. Physiographisch-biologische Untersuchung eines dänischen Tidegebietes. *Fol. Geogr. Danica*, Tom. 2, No 1. Verlag H. Hagerups, Kopenhagen 1942.
28. HARTNACK, W.: Über Sandriffe. *Jahrb. Pomm. Geogr. Ges.* 40—42, Greifswald 1924.
29. HENSEN, W.: Die Entwicklung der Fahrwasserhältnisse in der Außen-Elbe. *Jahrb. Hafenbautechn. Ges.* 18, S. 91—165, 1939/40.
30. HENSEN, W.: Modellversuche für den Amerika-Hafen in Cuxhaven. *Mitt. Hann. Versuchsanst. H.* 4, 1953.
31. HERRMANN, F.: Über den physikalischen und chemischen Aufbau von Marschböden und Watten verschiedenen Alters. *Westküste*, S. 72—119, Kriegsheft 1943.
32. HEYWOOD, H.: Measurement of the fineness of powdered materials. *Inst. Mech. Engin. (London) Proc.* vol. 140, S. 257—347, 1938.
33. HIBBEN, I. A.: Die Schutzbauten auf der Insel Borkum. *Diss. Breslau* 1935 u. *Die Bautechnik*, 4. verstärktes Vierteljahresh., 1935.
34. HOLLE, Ch. G.: Sedimentation at the mouth of the Mississippi river. *Proc. 2. Conf. on Coastal Engineering*, Bd. 2. Council on Wave Research. Berkeley 1952.
35. HURST, H. E.: The suspension of sand in water. *Roy. Soc. London Proc.* vol. 124, S. 196—201, 1929.
36. HUSTEDT, F.: Die Diatomeenflora des Küstengebietes der Nordsee vom Dollart bis zur Elbemündung. *Abh. Nat. Ver. Bremen* 31, 3, 1939.

37. IWFRSEN, J.: Stellungnahme zum Deichbau und Versuchskoog im Wattgebiet von Klanxbüll. Unveröff. Bericht, Husum 1936.
38. IWFRSEN, J. und WOHLBERG, E.: Versuchskoog am Hindenburgdamm. Unveröff. Bericht, Husum 1937.
39. IWFRSEN, J.: Zur bodenkundlichen Kartierung des nordfriesischen Wattengebietes. Westküste, S. 47 bis 71, Kriegsheft 1943.
40. IWFRSEN, J.: Das Problem der Kultivierung eingedeichter Watten. Die Küste 2, 1, S. 24—142, 1953.
41. JÜRGENSONS-STRAUMANIS: Kurzes Lehrbuch der Kolloidchemie, Berlin 1949.
42. KALINSKE, A. A.: Experimental studies in liquid turbulence. Univ. Studies in Engineering. Bull. 20, S. 50—65, Iowa 1940.
43. KAMPS, L. F.: Enige gegevens over de sedimentatie in het Waddengebied ten Noorden van de Provincie Groningen. Waddensymposium, 's-Gravenhage 1950.
44. KELLEY, W. P.: Base-exchange in relation to sediment. In Trask: Recent marine-sediment; a Symposium. London, T. Murby u. Co. 1939.
45. KELLEY, W. P. und LIEBIG, G. F.: Base-exchange in relation to composition of clay with special reference of seawater. Bull. Am. Assoc. Petr. Geol. 18, 1934.
46. KEULEGAN, G.: An experimental study of submarine sand-bars. Beach Erosion Board, Chief of Engineers, Technical Report No. 3, 1948.
47. KÖNIG, D.: Vergleichende Bestandsaufnahme an bodenbewohnenden Watt-Tieren im Gebiet des Sicherungsdammes vor dem Friedrichskoog (Süderdithmarschen) in den Jahren 1935—1939. Westküste, S. 120—172, Kriegsheft 1943.
48. KÖPPEN, R.: Zur Klärung der Vorgänge bei der Sinkstoffausflockung im Brackwasser. Unveröff. Bericht Wasser- u. Schiffsamt Emden 1950.
49. KÖPPEN, R.: Bestimmung der mineralogenen und organogenen Kieselsäurebestandteile des Schlicks. Unveröff. Bericht Wasser- u. Schiffsamt Emden 1950.
50. KÖPPEN, R.: Der Schlick im Küstengebiet der Nordsee. Die Umschau in Wissenschaft und Technik 51, 13; S. 389/390, 1951.
51. KOLUMBE, E.: Die Bedeutung der Pflanzen für die Landgewinnung an der schleswig-holsteinischen Westküste. Die Heimat 42, 1932.
52. KORTÜM, G.: Lehrbuch der Elektrochemie, S. 348 ff., Berlin 1950.
53. KREY, H. D.: Die Bewegung der Schwemmstoffe in unseren Flüssen. Zentralbl. d. Bauverw. 1919 und 1921.
54. KRÜGER, W.: Sinkstoffuntersuchungen im Jadebusen. Unveröff. Bericht, Wilhelmshaven 1911.
55. KRÜGER, W.: Die Jade, das Fahrwasser Wilhelmshavens, ihre Entstehung und ihr Zustand. Jahrb. Hafentechn. Ges. 4, Hamburg 1921.
56. KRÜGER, W.: Riffwanderung vor Wangerooge. Abh. Naturw. Ver. Bremen 30, 1/2, 1937.
57. KUMM, A.: Über Sedimentbildung an der Küste des norddeutschen Wattenmeeres. Ver. Naturw. 20, S. 38—55, Braunschweig 1927.
58. LABAYE, G.: Note sur le débit solide des cours d'eau. La Houille Blanche, Numéro spécial „A“, S. 600—627, 1948.
- 58a. LACEY, G.: Uniform flow in alluvial rivers and canals. Inst. Civ. Engineering, Minutes of Proc. vol. 237, S. 241—454, 1933.
- 58b. LACEY, G.: A general theory of flows in alluvium. Inst. Civ. Engineering, Jour. vol. 27. Nr. 1. S. 16—47, 1946.
59. LANE, E. W. u. KALINSKE, A. A.: Engineering calculation of suspended sediment. Amer. Geophys. Union, Trans. 22, 3, S. 603—606, 1941.
60. LINKE, O.: Die Einwirkung des Quellers (*Salicornia herbacea* L.) auf den Verlandungsvorgang des Wattes im Jadebusen. Abb. Naturw. Ver. Bremen 30, 1/2, 1937.
61. LINKE, O.: Bericht über die Riff- und Sandwanderungs-Untersuchungen am Nordstrand von Norderney. Unveröff. Forschungsber. Forschungsstelle Norderney, 1952.
62. LUCHT, F.: Hydrographische Messungen in der Außenelbe. Wasserwirtschaft, Sonderheft S. 22—26, 1951.
63. LUCHT, F.: Hydrographische Untersuchungen in der Brackwasserzone an der Elbe. Dtsch. Hydrogr. Zeitschr. 6, S. 18—32, 1953.
64. LUCHT, F.: Geschiebe und Sinkstofftransport in der Elbe. Mitt. Geol. Staatsinst. Hamburg 23, S. 68—75, 1954.
65. LÜDERS, K.: Entstehung der Gezeitschichtung auf den Watten im Jadebusen. Senckenbergiana 12, 4/5, S. 229—254, 1930.

66. LÜDERS, K.: Sediment und Strömung. *Senckenbergiana* 12, 6, S. 387—390, 1932.
67. LÜDERS, K.: Unmittelbare Sandwanderungsmessung auf dem Meeresboden. Veröff. Inst. Meereskunde N.F.A. 24, 1933.
68. LÜDERS, K.: Über das Wandern der Priele. *Abh. Nat. Ver. Bremen* 29, 1/2, 1934.
69. LÜDERS, K.: Die Messung der Sandwanderung in der Flachsee mit Gezeiten. *Senckenbergiana* 18, 3/4, S. 121—130, 1936.
70. LÜNEBURG, H.: Hydrochemische Untersuchungen in der Elbmündung mittels Elektrokolorimeter. *Arch. Dtsch. Seewarte* 59, 5, 1939.
71. LÜNEBURG, H.: Beiträge zur Hydrographie der Wesermündung. Veröff. Inst. Meeresforsch. Bremerhaven 1, S. 91—114, 1952.
72. LÜNEBURG, H.: Über Messung und Bedeutung der Sinkstoffe in Elb- und Wesermündung. *Vom Wasser* 18, Weinheim 1950/51.
73. LÜNEBURG, H.: Ein Gerät zur Messung des Schlickfalls in Küstengewässern und Häfen. Veröff. Inst. Meeresforsch. Bremerhaven 1, 2, S. 129—138, 1952.
- 73a. LÜNEBURG, H.: Die Probleme der Sinkstoffverteilung in der Wesermündung. Veröff. Inst. Meeresforsch. Bremerhaven 2, S. 15—51, 1953.
- 73b. LÜNEBURG, H.: Beiträge zur Hydrographie der Wesermündung III. Vergleichende Wattuntersuchungen im Bereich der Wesermündung. Veröff. Inst. Meeresforschung Bremerhaven 3, S. 66 bis 125, 1954.
74. LÜTTMER, J. H.: Zur Schlickbildung im Mündungsgebiet der Ems. *Kolloid-Zeitschr.* 118, S. 1—78, 1950.
75. MASCHHAUPT, J. G.: Het koolzure-kalkgehalte der Dollardgronden. *Waddensymposium. 's-Gravenhage* 1951.
- 75a. MATTHES, G. H.: Solids in stream flow. *Amer. Geophys. Union Trans.* 30, 3, S. 421—426, 1949.
76. NELSON, M. E. u. BENEDICT, P. C.: Measurement and analysis of sediment load on streams. *Amer. Soc. Civil Engin. Proc.* 76, Separate 31, 1950.
77. O'BRIEN, M. P.: Review of the theory of turbulent flow and its relation to sediment-transportation. *Amer. Geophys. Union Trans.* 14, S. 487—491, 1933.
78. OEXLE, L.: Änderung der Auflandung im Stausee des Saalackkraftwerkes bei Reichenhall in den Jahren 1928—1933. *Wasserkraft und Wasserwirtschaft*, H. 18/19, 1935.
79. OEXLE, L.: Die Schwebestoff- und Schlammführung der geschiebeführenden Flüsse Bayerns. *Wasserkraft und Wasserwirtschaft*, H. 11, 1936.
80. OSTENDORFF, E.: Die Grund- und Bodenverhältnisse der Watten zwischen Sylt und Eiderstedt. *Westküste, Kriegsheft* 1943.
81. OTTO, Th.: Der Darss und Zingst. *Jahresber. Geogr. Ges. Greifswald* 13, 1911/12.
82. o. V.: Vom Rheindelta in der Fussacher Bucht. *Schweiz. Bauzeitung* 110, S. 164, 1937.
83. PETERSEN, M.: Sinkstoffgruppenmessung in der Norder Hever 1937. Unveröff. Arbeitsber. Marschenbauamt — Forschungsabt. — Husum 6. 11. 1941.
84. PETERSEN, M.: Abbruch und Schutz der Steilufer an der Ostseeküste (Samland bis Schleswig-Holstein). *Die Küste* 1, 2, S. 100—152, 1952.
85. PLATH, M.: Die biologische Bestandsaufnahme als Verfahren zur Kennzeichnung der Wattsedimente und die Kartierung der nordfriesischen Watten. *Westküste, Kriegsheft*, 1943.
86. PRATJE, O.: Die Sedimente der Deutschen Bucht. *Wissenschaftl. Meeresunters. Abt. Helgoland*, N.F. 18, 6, 1931.
87. PRATJE, O.: Der Verbleib des Abbruchmaterials der Samlandküste. *Schrift. Phys.-ökon. Ges. Königsberg* 67, 3/4, 1932.
88. PRATJE, O.: Die Lebensbezirke der Foraminiferen am Boden der Deutschen Bucht. *Aus der Heimat*. 46, 2, S. 41—46, 1933.
89. PRATJE, O.: Die Schlickgebiete der Deutschen Bucht und die Beziehungen zwischen Strömung und Sediment. *Geol. Rundschau* 25, 3, S. 145—160, 1934.
90. PRATJE, O.: Die Sedimentation in der südlichen Ostsee. *Ann. Hydr.*, S. 92—97, 1939.
- 90a. PRATJE, O.: Die Bodenbedeckung der südlichen und mittleren Ostsee. *Dtsch. Hydrogr. Zeitschr.* 1, 2/3, S. 45—61, 1948.
91. PRATJE, O.: Der Meeresboden als Lebensgrundlage. *Fischereiwelt, Reiheft* 1, 1949.
92. RIVIÈRE, A.: Beobachtungen über die Sedimentation an der Küste der Vendée. Die Sedimentation an der Küste und in den Flußmündungen, sowie ihre allgemeinen Gesetze. *Auszugsw. Übers. aus: Revue Générale de l'Hydraulique*, Nov.—Dez. 1948.

93. RIVIÈRE, A. u. VERNHET, S.: Sedimentation of clayish minerals in a marine medium in the presence of humic matter. 1951.
94. RINSUM, A. van: Die Schwebstoffe der bayerischen Flüsse. Festschr. z. 50jähr. Bestehen der Bayerischen Landesstelle f. Gewässerkunde, 1898—1948. R. Oldenburg, München 1950.
95. ROUSE, H.: Experiments on the mechanics of sediment suspension. Proc. 5. Intern. Kongr. f. angew. Mechanik. 1939.
96. ROUSE, H.: An analysis of sediment transportation in the light of fluid-turbulence. U.S. Department of Agriculture Soil Conservation Service, Sedimentation Division 1939.
97. RUCK, K. W.: Seegrundkartierung der Lübecker Bucht. Die Küste 1, 2, S. 55—57, 1952.
98. SANTEMA, P.: Koagulation von Flußschlamm beim Zusammentreffen mit Seewasser. Übers. aus „De Ingenieur“ 65, 16, S. B 70—B 72, 1953.
99. SCHAANK, E. M. H.: Transport de sable par le courant dans la partie supérieure des embranchements Néerlandais du Rhin. Intern. Vereinig. wissenschaftl. Hydrologie. Bull. 22. 60. Hauptvers. Edinbourg 1936.
100. SCHULZ, H.: Die Wasseruntersuchungskammer in der Lauenburger Elbbrücke. Mitt. Wasser- u. Schifffahrtsdirektion Hamburg 1951.
101. SCHULZ, H.: Messungen von Temperatur, Dichte und Salzgehalt des Meerwassers. Die Wasserwirtschaft 41, 11, S. 400—404, 1951.
102. SCHULZ, H.: Probleme der gewässerkundlichen Meßtechnik. Mitt. Hannov. Versuchsanst. 2, 1952.
103. SCHWARZ, A.: Der tierische Einfluß auf die Meeressedimente. Senckenbergiana 14, Frankfurt/M. 1932.
104. SEIFERT, R.: Über die Geschiebeführung von Wasserläufen mit beweglicher Sohle. Dtsch. Ber. Intern. Vereinig. wissenschaftl. Hydrologie, Washington 1939.
105. SHEPARD, F. P.: Longshore-bars and longshore-troughs. Techn. Memorandum 15, Beach Erosion Board. Chief of Engineers, 1950.
106. SIMON, W. G.: Untersuchungsergebnisse an Grundproben aus dem Gebiet der Außen-Elbe und ihre Ausdeutung hinsichtlich der Sandwanderung. 1949/50. Mitt. Wasser- u. Schifffahrtsdirektion Hamburg u. Geol. Landesamt Hamburg 1, 1952.
107. SIMON, W. G.: Über das Vorkommen einer Schale von *Tapes senescens* Cocconi aus dem Eem im rezenten Schill der Elbmündung. Probleme der Küstenforschung im südl. Nordseegebiet 5, 1953.
108. STEVENS, I. C.: The silt-problem. Amer. Soc. Civil Engineers, Transact. 101, S. 207—288, 1934.
- 108a. THAMDRUP, H. M.: Beiträge zur Ökologie der Wattenfauna. Medd. Danmarks Fiskeri og Havunders, 10, 2, 1935.
109. THIJSSE, J. Th.: Veranderingen in waterbewegingen en bodemrelief in de waddenzee. Wadden-symposium, 's-Gravenhage 1951.
110. TIEDEMANN, B.: Über Wandern des Sandes im Küstensaum des Samlandes. Mitt. Preuß. Versuchsanst. Wasserbau und Schiffbau Berlin, 5, 1930.
111. TRUSHEIM, F.: Zur Bildungsgeschwindigkeit geschichteter Sedimente im Wattenmeer, besonders solcher mit schräger Parallelschichtung. Senckenbergiana 11, S. 47, Frankfurt/M. 1929.
112. TWENHOFEL, W. H.: Treatise on sedimentation Bailliere, Tindall and Cox, London 1932.
113. TWENHOFEL, W. H.: Principles of sedimentation, McGraw Hill. New York 1939.
114. U.S. INTERDEPARTMENTAL COMMITTEE: A study of methods used in measurement and analysis of sediment loads in streams. St. Paul Engineer District Sub-Office, Hydraulic-Laboratory, University of Iowa, Iowa-City. — Reports:
 - No. 1. Field practice and equipment used in sampling suspended sediment. 1940.
 - No. 2. Equipment used for sampling bed-load and bed-material. 1940.
 - No. 3. Analytical study of methods of sampling suspended sediment. 1941.
 - No. 4. Methods of analyzing sediment samples. 1941.
 - No. 5. Laboratory investigation of suspended sediment samplers. 1941.
 - No. 6. The design of improved types of suspended sediment samplers (nicht erhältlich).
 - No. 7. A study of new methods for size-analysis of suspended sediment samples. 1943.
 - No. 8. Measurement of the sediment discharge of streams. 1948.
 - No. 9. Density of sediments deposited in reservoirs. 1943
115. VANONI, V. A.: Some experiments on the transportation of suspended load. Amer. Geophys. Union, Trans. 22, 3, S. 608—620, 1941.
116. VEEN, J. van: Zandtransport langs onze kusten. Nederl. Nat. u. Gen. Congr. 1935.
117. VEEN, J. van: Onderzoekingen in de Hoofden. 's-Gravenhage 1936.
118. VEEN, J. van: Die unterseeische Sandwüste in der Nordsee. Geol. Meere u. Binnengew. 1938.

119. VEEN, J. van: Eb- en vloed-schaar-systemen in de Nederlandse getijwateren. Waddensymposium. 's-Gravenhage 1951.
120. VELIKANOV, M. A.: Die Anwendung der Wahrscheinlichkeitstheorie auf die Ablagerung von Sand in turbulenten Strömungen. Veröff. hydrotechn. Versuchsanst. Leningrad, 18, 1936.
121. VERNON-HARCOURT, L. F.: Experimental investigations on the action of seawater in accelerating the deposit of riversilt and the formation of delta's. Proc. Inst. Civ. Engrs. V, CXLII, paper 3196, 1900.
122. VICK, F.: Über die Erfassung des Sinkstofftransportes in Tideflüssen. Die Wasserwirtschaft 43, 1, S. 10—13, 1952.
- 122a. WALTHER, F.: Die Gezeiten und Meeresströmungen im Norderneyer Seegat. Diss. Berlin 1934.
123. WEINNOLDT, E. und BAHR, M.: Die Versandung der Eider. Ursachen und Gegenmaßnahmen. Wasserwirtschaft 42, 8, S. 255—266, 1952.
124. WIRTZ, D.: Die Beziehungen zwischen submariner Abtragung und Sandwanderung an der Küste Pommerns. Mitt. Geol. Staatsinst. Hamburg H. 18, S. 45—72, 1949.
125. WOHLBERG, E.: Die grüne Insel in der Eidermündung, eine entwicklungsphysiologische Untersuchung. Arch. Deutsche Seewarte 50, 2, 1931.
126. WOHLBERG, E.: Über die tatsächliche Leistung von *Salicornia herbacea* L. im Haushalt der Watten. Wiss. Meeresunters. Abt. Helgoland 19, 3, 1933.
127. WOHLBERG, E.: Biologische Landgewinnungsarbeiten im Wattenmeer. Der Biologe 1934.
128. WOHLBERG, E.: Zusammenstellung einiger Punkte zur Begründung der Frühbedeichung des Verlandungsgebietes am Hindenburgdamm. Unveröff. Bericht, Husum Dezember 1936.
129. WOHLBERG, E.: Die Wattenmeer-Lebensgemeinschaften im Königshafen von Sylt. Helgol. wiss. Meeresunters. 1, 1, 1937.
130. WOHLBERG, E.: Bericht über die Anlandungen nördlich und südlich des Hindenburgdammes nach den Herbst- und Winterfluten 1936/37. Unveröff. Bericht, Husum Juli 1937.
131. WOHLBERG, E.: Biologische Kulturmaßnahmen mit dem Queller (*Salicornia herbacea* L.) zur Landgewinnung im Wattenmeer. Westküste 1, 2, S. 52—104, 1938.
132. WOHLBERG, E.: Die Nutzenanwendung biologischer Erkenntnisse im Wattenmeer zugunsten der praktischen Landgewinnung an der deutschen Nordseeküste. Rapp. et Procès-Verbaux, CIV, 1939.
133. WOHLBERG, E.: Der horizontale Wassers schöpfer. Dtsch. Hydrogr. Zeitschr. 3, 5/6, 1950.
134. WOHLBERG, E.: Produktionsbiologische Untersuchungen auf eingedeichten Watten. Die Küste 2, 1, 1953.
135. WOHLBERG, E.: Der Anwachs am Hindenburgdamm. Unveröff. Bericht, Husum Dezember 1952.
136. WOHLBERG, E.: Sinkstoff, Sediment und Anwachs am Hindenburgdamm. Die Küste 2, 2, S. 33 bis 94, 1954.

Allgemeine Empfehlungen für den deutschen Küstenschutz Bericht der Arbeitsgruppe „Küstenschutz“¹⁾

Inhalt

- A. Allgemeines
 - 1. Veranlassung zum Bericht
 - 2. Räumliche Begrenzung
- B. Die Schutzwerke an der Festlandküste
 - 1. Seedeiche
 - Die heutige Deichlinie — Deichhöhe — Deichquerschnitt — Bauwerke im Seedeich — Deichverteidigung
 - 2. Deckwerke
 - 3. Bühnen
- C. Das Watt
 - 1. Die Bedeutung des Watts für den Küstenschutz
 - Küstenabschnitte Ems—Jade, Jade—Eider und Eider—Lister Tief
 - 2. Dämme im Watt
- D. Die Inselfschutzwerke
 - 1. Dünenpflege
 - 2. Ostfriesische Inseln
 - Strandbühnen — Dünendeckwerke — Unterwasserbühnen
 - 3. Inseln zwischen Jade und Eider
 - 4. Nordfriesische Inseln und Halligen
 - Strandbühnen — Dünendeckwerke
- E. Instandhaltung der Küstenschutzwerke

A. Allgemeines

1. Veranlassung zum Bericht

Über die Baumaßnahmen zum Schutz der deutschen Nordseeküste sind in den letzten Jahren mehrere Erfahrungsberichte (Bilanzberichte) aufgestellt worden (vgl. Die Küste III, 1/2, 1955). Die nachstehenden Ausführungen sind eine kurz gefaßte Auswertung der in den verschiedenen Küstenabschnitten gewonnenen Erfahrungen.

Die Notwendigkeit einer solchen Zusammenfassung wurde durch die Auswirkungen der Sturmfluten der letzten Jahre erhärtet und gewinnt durch die bevorstehenden umfassenden Baumaßnahmen zum Schutz der Küste und zur Schaffung der Voraussetzungen für die wirtschaftliche Gesundung der Marschen besondere Bedeutung.

2. Räumliche Begrenzung

Der vorliegende Bericht behandelt den Küsten- und Inselfschutz in der Deutschen Bucht zwischen Ems und Lister Tief. Er umfaßt das Gebiet von den Festlanddeichen bis an die offene

¹⁾ Der Bericht der Arbeitsgruppe zieht wichtige Folgerungen aus der historischen Entwicklung des Küstenschutzes (vgl. auch Die Küste, III, 1/2, 1955) und den wissenschaftlichen und technischen Erkenntnissen einer 30jährigen Forschungsarbeit an der Küste. Die Küstenschutzarbeit der Gegenwart erhält aus den Empfehlungen der Arbeitsgruppe wertvolle Anregungen; aber auch die Selbstverwaltungen an der Küste und die Finanzverwaltungen von Bund und Ländern können daraus für ihre Entscheidungen im Sinne einer wirtschaftlichen Haushaltsführung Lehren ziehen.

DIE DEUTSCHE NORDSEEKÜSTE



ZEICHENERKLÄRUNG:

-  GEEST
-  MARSCH und Düneninseln
-  WATT, bei mittlerem Springniedrigwasser trockenfallend
-  BIS ZUR 6-m-TIEFENLINIE unter mittlerem Springniedrigwasser
-  DÄMME zu den Inseln



See und erstreckt sich auch auf die Küstenstrecken in den Mündungstrichtern der großen Tideröme, soweit sie denselben Angriffswirkungen unterliegen wie die eigentliche Seeküste (vgl. Abbildung).

In diesem Küstenraum sind drei, in ihrem Charakter verschiedene Küstenabschnitte zu unterscheiden, in denen auch der Küstenschutz zum Teil unterschiedliche Merkmale zeigt:

Die Küste von der Ems bis zur Jade mit der vorgelagerten Inselkette,
die insellose Küste von der Jade bis zur Eider,
die Küste von der Eider bis zum Lister Tief mit den vorgelagerten Inseln und Halligen.

B. Die Schutzwerke an der Festlandküste

1. Seedeiche

Die heutige Deichlinie

Das deutsche Küstenfestland besteht aus niedrig gelegenen fruchtbaren Marschen, die nur im Schutze starker Seedeiche bewohnt und bewirtschaftet werden können. Die Deiche sind das Rückgrat aller Schutzmaßnahmen für die Festlandküste. Daher müssen alle anderen Küstenschutzmaßnahmen auf die zweckmäßige Anordnung und Gestaltung und auf die größtmögliche Sicherheit und bauliche Erhaltung der Seedeiche ausgerichtet werden.

Auf die Frage, ob die heutige Deichlinie für die Verteidigung der Festlandküste gegen die See auf lange Sicht zweckmäßig und richtig ist, kann eine für die ganze Küste gültige Antwort nicht gegeben werden. Für die drei eingangs als unterschiedlich bezeichneten Küstenabschnitte kann jedoch grundsätzlich folgendes gesagt werden: Es gibt Küstenstrecken, in denen die Vorverlegung der heutigen Deichlinie zum Schutz der Festlandküste oder zur Neugewinnung oder Wiedergewinnung verlorengegangenen Landes anzustreben ist. Andererseits gibt es Küstengebiete, in denen mit Rücksicht auf die Erhaltung des bestehenden Zustandes Neueindeichungen unterbleiben müssen (vgl. hierzu die Ausführungen unter C). Für die Höhe, Form und Bauweise der Seedeiche sind in erster Linie maßgebend: die Angriffskräfte von der See her, die Bedeutung des zu schützenden Hinterlandes, die Untergrundverhältnisse, die Gestalt und Höhe des Geländes vor und hinter dem Deich und das verfügbare Baumaterial.

Deichhöhe

Die Höhe der Deichkrone richtet sich nach dem maßgebenden Sturmflutwasserstand und nach dem dazugehörigen größten Wellenaufwurf in dem jeweiligen Deichabschnitt.

Für die Ermittlung des maßgebenden Sturmflutwasserstandes hat die „Arbeitsgruppe Sturmflut vom 1. Februar 1953“ folgende Empfehlung gegeben:

- „1. Es wird empfohlen, einen „maßgebenden Sturmflutwasserstand“ für jede Pegelstelle mit hinreichend langen Beobachtungsreihen nach dem Beispiel von SCHELLING (Die Küste I, 1, 1952) zu ermitteln (Addition des bisher beobachteten größten Unterschiedes zwischen dem eingetretenen und dem vorausgerechneten Wasserstand zum heute höchstmöglichen astronomischen Hochwasser). Hierzu ist gegebenenfalls noch ein Betrag für weiteren säkularen Anstieg der Wasserstände hinzuzufügen. Zu berücksichtigen sind auch die Änderungen, die auf natürlichem oder künstlichem Wege in den Wasserständen hervorgerufen werden.
2. Eine genaue Angabe, mit welcher Wahrscheinlichkeit diese so ermittelten oder ähnlich hohe Wasserstände erreicht oder überschritten werden, läßt sich nicht machen. Einen Anhalt für eine solche Wahrscheinlichkeit gibt das von WEMELSFELDER („De Ingenieur“ 1939, S. B. 31—35) angewendete Verfahren.
3. Es wäre zu begrüßen, wenn das Studium der Sturmfluten in ihren physikalischen Zusammenhängen nachhaltig gefördert würde. Bei der Dringlichkeit, die Nordseeküste zu sichern, und bei der dadurch gegebenen Notwendigkeit zu einer kurzfristigen Beantwortung der an sie gerichteten Anfragen, hält

es die Arbeitsgruppe jedoch nicht für vertretbar, die Ergebnisse dieser umfangreichen und langwierigen Forschungen abzuwarten.“

Der danach ermittelte maßgebende Sturmflutwasserstand muß von den Seedeichen gekehrt werden. Die Forderung nach einer Deichhöhe, die für jeden denkbaren Sturmflutwasserstand einschließlich Wellenauflauf mit Sicherheit ausreicht, kann dagegen nicht länger aufrechterhalten werden, weil sie zu Deichabmessungen führen würde, die wirtschaftlich nicht zu ermöglichen sind. Man muß deshalb ernsthaft überlegen, die Seedeiche im allgemeinen so auszubilden, daß sie bei höchsten Sturmfluten ein Überschwappen der Wellen ohne Gefahr ihrer Zerstörung vertragen. Das Wasser darf allerdings nicht über die Deichkrone „strömen“.

Bestimmend für die Wellenauflaufhöhe²⁾ sind die örtlichen Verhältnisse und die Bauweise des Deiches, insbesondere: die Lage des Deiches zur Windrichtung, die Geländebeziehungen vor dem Deich (Höhe und Breite von Watt und Vorland), die Böschungsgestalt (flach, steil, eben, konkav, konvex), die Oberflächenrauigkeit (Grasnarbe, Bitumen- oder andere Deckwerke).

Wegen dieser verschiedenartigen Einflüsse können allgemein gültige Angaben für die größte Wellenauflaufhöhe nicht gemacht werden. Es wird dringend empfohlen, die Größe des Wellenaufbaus in der Natur an besonders hierfür ausgesuchten Stellen zu beobachten. Dabei sind u. a. zweckmäßig folgende Beobachtungen anzustellen:

1. Messen der auf dem Vorland oder dem Watt auftretenden Wellenhöhen (Pfahlpegel, Tassenpegel).
2. Beobachtung der Wellenperiode.
3. Messen der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung.
4. Einmessen der Treibsel-Grenzen nach höheren Fluten.

Deichquerschnitt

Die Querschnittsform des Deiches beeinflußt sowohl die Höhe des Wellenaufbaus als auch die Wirkung des Wellenangriffs und damit die Deichsicherheit und die laufenden Kosten für die ordnungsmäßige bauliche Unterhaltung.

Die konkave, flach geneigte, mit gepflegter Grasnarbe bedeckte Außenböschung hat sich, auch bei Deichen mit sandigem Kern, im allgemeinen als genügend widerstandsfähig gegen Wellenangriffe erwiesen. Dies ist nicht nur bei Deichneubauten, sondern auch bei der Beurteilung der Standsicherheit der vorhandenen Deiche und vor allem bei ihrer Erhöhung und Verstärkung zu berücksichtigen. Auch bei Deichverstärkungen dürfen keine unzulänglichen Außenböschungen beibehalten werden.

Steile Innenböschungen (1:1½ bis 1:2) und das Fehlen oder die zu tiefe Lage und zu geringe Breite von Innenbermen haben sich nach den Erfahrungen bei den Sturmfluten der jüngsten Zeit im Hinblick auf das Überschwappen auflaufender Wellen und auf die Gefahr der Durchfeuchtung, besonders bei Deichen aus sandigem Boden, als sehr bedenklich erwiesen. Man wird die Innenböschungen und die Innenbermen bei Neubauten von Deichen und bei Deichverstärkungen gegen das Überschwappen der Wellen stärker schützen müssen.

²⁾ Hinweise auf die Wellenaufbauhöhen finden sich in folgenden Berichten:

HENSEN, W.: Modellversuche über den Wellenaufbau an Seedeichen im Wattgebiet. — Mitt. Hann. Versuchsanstalt, Heft 5, Hannover 1954.

HENSEN, W.: Modellversuche zur Bestimmung des Einflusses der Form eines Seedeiches auf die Höhe des Wellenaufbaus. — Mitt. Hann. Versuchsanstalt, Heft 7, Hannover 1955.

HUNDT, C.: Maßgebende Sturmfluthöhen für das Deichbestick der schleswig-holsteinischen Westküste. — Die Küste III, 1/2, 1955.

PETERSEN, M.: Über die Grundlagen zur Bemessung der schleswig-holsteinischen Landesschutzdeiche. — Die Küste III, 1/2, 1955.

Bauwerke im Seedeich

Alle Öffnungen und Einbauten im Seedeich wie Durchlässe, Siele, Schleusen, Stöpen (Deichgats) u. a. sind Gefahrenstellen und erfordern zusätzliche Kosten für ihre bauliche Instandhaltung und damit für die Erhaltung der Deichsicherheit. Deshalb sollte man sie in ihrer Zahl möglichst einschränken und baulich so sorgfältig ausbilden, daß ihr Vorhandensein keine zusätzliche Gefährdung des Deiches bedeutet.

Deichverteidigung

Für die Deichverteidigung im Gefahrenfalle ist die Zugänglichkeit jeder Deichstrecke auf jederzeit befahrbaren, d. h. befestigten Zuwegungen von entscheidender Bedeutung. Es wird empfohlen, diesem Punkt bei den bevorstehenden umfassenden Baumaßnahmen zum Schutz der Küste die größte Bedeutung beizumessen.

Die Zuwegungen müssen in nicht zu großen Abständen mit befestigten Deichüberfahrten (Triften, Aks) verbunden sein, damit die Zugänglichkeit zu Schadenstellen auf jeden Fall gesichert bleibt.

Der Organisation der Deichverteidigung durch Bereithalten von Baustoffen und Geräten und ihrer regelmäßigen Prüfung und Überwachung sowie dem schlagkräftigen Einsatz von Arbeitskräften im Gefahrenfalle muß besondere Beachtung geschenkt werden.

Schlafdeiche sollen, wo irgend angängig, als zweite Verteidigungslinie erhalten bleiben bzw. wieder instandgesetzt werden. Sie müssen soweit instand gehalten werden, daß sie bei einem Bruch des Seedeiches den Schutz des rückwärtigen Gebietes behelfsmäßig übernehmen können.

2. Deckwerke

Während die Deichlinie festliegt, ist die Uferlinie des Vorlandes veränderlich. Ihr Vorschieben oder Zurückweichen ist abhängig von den sich ständig ändernden Einwirkungen der Tide und von der morphologischen Änderung des Watts. Wo das Vorland natürlich oder künstlich durch Landgewinnungsmaßnahmen anwächst, die immer der einfachste und billigste Küstenschutz bleiben, ist zusätzlicher Uferschutz in der Regel entbehrlich. Wo dagegen das Vorland abbricht und das Zurückweichen auch durch Landgewinnungsmaßnahmen nicht aufgehalten werden kann, muß das im Abbruch liegende Ufer möglichst bald durch Uferdeckwerke festgelegt werden, damit ein ausreichend breites Vorland, der beste natürliche Schutz vor dem Deich, erhalten bleibt.

Weicht die Abbruchkante des Vorlandufers jedoch bis an den Deich zurück, so daß dieser schaar liegt, wird der Schutz des Deichfußes durch massive Böschungsdeckwerke zur zwingenden Notwendigkeit. Da für einen Schaardeich die Gefahr stets größer ist und die Kosten für die notwendigen schweren Schutzwerke wesentlich höher sind als für einen Deich mit Vorland, ist dem rechtzeitigen und ausreichenden Schutz des Vorlandufers größte Beachtung zu schenken.

Uferdeckwerke stellen stets einen mehr oder weniger harten Eingriff in den Ablauf der natürlichen Veränderungen dar. Sie sollen deshalb so gestaltet werden, daß sie einen möglichst weichen Übergang zwischen Watt- und Vorlandoberfläche bilden, damit Ausspülungen durch über- und rückschlagende Wellen sowohl auf dem Vorland als auch im Watt möglichst vermieden werden.

Zu steil ausgeführte Böschungen und zu niedrig angeordnete Kronen der Deckwerke verursachen in der Regel starke Schäden im grünen Vorland und gefährliche Austiefungen im Watt.

Wird dadurch der Fuß des Deckwerks freigelegt, kann es nur noch durch Vorschüttungen und zusätzlich durch Buhnen gerettet werden.

Nicht nur bei Neubauten, sondern auch bei Umbauten oder größeren Instandsetzungen von Deckwerken müssen zu steile Böschungsneigungen daher grundsätzlich vermieden werden. Höhenlage und Form der Deckwerksoberkante sind in vorsichtiger Anpassung an die Höhenlage des Vorlandes oder der Außenberme des Deiches und an die Steigung seiner Außenböschung auszubilden, wobei auch die ansteigenden Meereswasserstände berücksichtigt werden müssen. Eine rauhe, d. h. „wellenschluckende“ Deckwerksoberfläche ist allen anderen Bauweisen vorzuziehen (siehe auch S. 59 bzw. 60).

3. B u h n e n

Die Buhnen vor den Seedeichen oder dem Vorland haben ihren Zweck, Küstenströmungen und die durch sie oder durch Brandung verursachte uferparallele Verfrachtung der aufgewirbelten Sinkstoffe zu verringern oder gar Sinkstoffe zu fangen, oft nicht befriedigend erfüllt. Die Ursache für das Versagen ist in erster Linie auf nicht ausreichende Einsicht in die Wirkungsweise von Buhnen oder Buhnensystemen und in ihre Wechselbeziehung zu den Wasserständen, der Brandungswirkung und der veränderlichen Wathöhe, Bodenbeschaffenheit und sinkstoffführende Strömung zu suchen (Abstand und Höhenlage der Buhnen).

Diese Wechselbeziehungen sollte man beim Neubau von Buhnen oder Buhnensystemen mit Hilfe möglichst weiträumiger Untersuchungen — auch durch Modellversuche — zu erfassen versuchen. Die Bauweise der Buhnen spielt hierbei nur insofern eine Rolle, als ihre Formen unter Vermeidung lotrechter Wände möglichst weich und brandungsmildernd sein sollen. Da die Wirkungsweise eines Buhnensystems einer exakten Untersuchung wenig zugänglich ist, sollte — abgesehen von gelegentlich nützlichen Modellversuchen — dem Erfahrungsaustausch über alle Buhnenbauten an der Küste, auch mit den Nachbarländern Deutschlands, größte Beachtung geschenkt werden.

C. Das Watt

1. Die Bedeutung des Watts für den Küstenschutz

Die Gestalt der heutigen Festlandküste hängt auf das engste mit der Form des Wattenmeeres zusammen. Dieses ist durch die Wirkung der Naturkräfte (Tideströmung und Brandung) starken Veränderungen unterworfen, die ihrerseits auch die Naturkräfte selbst wieder beeinflussen und damit für die Festlandküste entscheidenden Einfluß gewinnen können. Die Folgen der Veränderungen in diesem Naturkräftespiel können für die Festlandküste und ihren Schutz günstig, aber auch sehr nachteilig sein. Das Watt ist also ein wichtiger Bestandteil des Küstenschutzes. Es ist daher dringend notwendig, nicht erst auf Grund notwendiger technischer Planungen, sondern ganz allgemein die Wechselwirkung zwischen Naturkräften und Wattformen gründlich zu untersuchen. Die genaue Kenntnis dieser Vorgänge erspart im Gefahrenfalle mit Sicherheit Zeit und Geld.

Die Einwirkung bautechnischer Maßnahmen auf das Watt und die sich hieraus ergebenden Folgerungen für die Festlandküste und die Inseln sind in den eingangs betrachteten drei Küstenabschnitten sehr unterschiedlich. Grundsätzlich kann folgendes gesagt werden:

Küstenabschnitt Ems—Jade

Die ostfriesische Inselkette von Borkum bis Wangerooge—Oldeooog als seeseitige Begrenzung ist kein Festlandrest, sondern alluviale Neubildung des Meeres. Die Inseln sind veränderliche Sandgebilde, die in ihrer Lage und Gestalt unmittelbar von Größe, Höhe, Bodenbeschaffenheit und Morphologie des Watts abhängen. Änderungen des Wattzustandes wirken sich unmittelbar oder mittelbar auf Veränderungen und letzten Endes auf den Bestand der Inseln aus. Im allgemeinen ist eine westöstliche Wanderrichtung der einzelnen Inseln festzustellen.

Wenn die Inselkette als weit vorgelagerter Schutzwall für die Festlandsküste und ihren Deich erhalten bleiben soll, muß wegen der engen Wechselbeziehung nach dem heutigen Stand der Erkenntnis der Wattkörper in seiner vorhandenen Gestalt möglichst unverändert erhalten bleiben. Landgewinnungsarbeiten mit dem Ziel der Eindeichung werden daher nur in solchem Umfange für zulässig erachtet, daß die Verkleinerung der Wattflächen zu keinen nachteiligen Auswirkungen auf den Bestand und die Erhaltung der Inselkette führen kann³⁾. Ausgenommen hiervon bleibt die Leybucht, die selbständiges Landgewinnungs- und Eindeichungsgebiet ist. Landgewinnungsarbeiten zur Gewinnung eines Vorlandstreifens für den Schutz der Festlandsdeiche sind dagegen zulässig und notwendig.

Für Art und Umfang aller Arbeiten im Watt ist oberstes Ziel die Erhaltung des Watts und der Inselkette als Ganzes. Inwieweit die einzelnen Inseln eines Schutzes bedürfen, um Abbruchstrecken zu sichern, hängt von örtlichen Verhältnissen ab.

Küstenabschnitt Jade—Eider

Die Watten sind hier seeseitig offen. An den weit vorgeschobenen Wattzungen haben sich einzelne jungalluviale Sandinseln, Mellum, Scharhörn und Trischen, gebildet, die für den Schutz der Festlandküste keine nennenswerte Bedeutung haben. Das gilt auch für die ältere Marschinsel Neuwerk, die nur als niedrige Wattkuppe anzusehen ist.

Die ausgedehnten Watten selbst dagegen haben für den Küstenschutz auch in diesem Gebiet große Bedeutung. Sie sind ausgesprochen labil und durch die Verbindung mit den natürlichen Einflüssen der großen Strommündungen von Weser und Elbe und durch die künstlichen Maßnahmen zur Fahrwasserverbesserung starken Veränderungen unterworfen.

Für den Schutz der Festlandküste ist daher die Schaffung möglichst stabiler Verhältnisse in den ufernahen Wattgebieten wichtig. Sie kann durch Landgewinnungsarbeiten erreicht oder gefördert werden, die hier ohne Beeinträchtigung anderer Gebiete ausgeführt werden können, soweit nicht Interessen der Stromführung und Schifffahrt dem entgegenstehen.

Küstenabschnitt Eider—Lister Tief

Das Watt liegt in seinem südlichen Teil seeseitig offen und ist hier ähnlich labil wie im Küstenabschnitt Jade—Eider. In seinem nördlichen Teil wird es seeseitig begrenzt von den Inseln Amrum und Sylt, Dünen- und Marschgebilden mit diluvialen, z. T. tertiärem Kern. Gleichartig ist die zurückliegende Insel Föhr. Die Dünen- und Marschteile dieser Inseln sind ebenso wie die im südlichen Teil des Wattgebietes liegenden Marschinseln Pellworm und Nordstrand mit den sie umgebenden Halligen alluviale Bildungen, die auf untergegangener alter Festlandmarsch durch Meeresablagerung neu erstanden und erst in geschichtlicher Zeit durch Meeresinbrüche zu den heutigen Insel- und Halligformen zerrissen worden sind.

³⁾ In den Niederlanden ist geplant, nach Durchführung des Deltaplans (vgl. Die Küste, Jahrgang 2, Heft 2) einen Teil der Westfriesischen Inseln durch Dämme mit dem Festland und untereinander zu verbinden, um auf diese Weise Land zu gewinnen und große Süßwasserbecken zu schaffen. Im Bereich der Ostfriesischen Inseln liegt zur Zeit und auch in nächster Zukunft keine Notwendigkeit für derartige Maßnahmen vor.

Allen diesen Inseln ist gemeinsam, daß es sich im Gegensatz zu den Ostfriesischen Inseln um festliegende Reste ehemals größerer Gebilde handelt, die nicht wandern. Dies schließt örtliche Formveränderungen, wie z. B. die Sandhakenbildungen von Amrum und Sylt oder geschützt liegende wattseitige Marschanlandungen nicht aus. Insgesamt gesehen leiden hier jedoch die Inseln und Halligen von Natur aus unter Abbruch.

Seit dem Untergang des alten Nordfrieslands schreitet die Ausräumung des großen Wattengebietes durch die See unablässig fort. Dadurch haben sich in den letzten Jahrhunderten die Einzugsgebiete der Wattströme vergrößert. Die Ströme sind hierdurch vertieft und verbreitert worden. Während ursprünglich die einzelnen Wattströme ihre Einzugsgebiete unabhängig voneinander schufen, stehen sie heute durch küstennahe Stromrinnen miteinander in Verbindung und gefährden zunehmend sowohl die Festlandküste als auch die Inseln und Halligen. Die Entwicklung ist noch nicht abgeschlossen.

Dieser Vorgang bildet auf lange Sicht eine ernste Gefahr für die Erhaltung der heutigen Deichlinie, falls nicht durch technische Maßnahmen, wie Dammbauten und Eindeichungen, der fortschreitenden Ausräumung Einhalt geboten wird. Über die bestehende Gefahr darf auch der augenblickliche Landanwachs vor dem Festlandsufer nicht hinwegtäuschen, denn seine Substanz stammt aus dem Wattabtrag und macht ohnehin nur einen kleinen Teil von ihm aus⁴⁾. Deshalb sind in diesem Küstenabschnitt Dammbauten für die Schaffung größerer Verlandungsbuchten, Landgewinnungsarbeiten und Maßnahmen zum Schutz der Inseln und Halligen unerlässlich.

2. D ä m m e i m W a t t

Zu den bedeutendsten technischen Mitteln, mit deren Hilfe die Entwicklung der Wattgestalt und der Naturkräfte beeinflußt werden kann, gehören die D ä m m e im Watt.

Zur großräumigen Beeinflussung von Wattströmen vor der Festlandküste, z. B. zwecks Richtungsänderung oder Seitenführung oder zwecks Trennung oder Abriegelung gefahrdrohender Prielsysteme, werden bühnenartige Werke als Dämme weit über das Bühnensystem hinaus ins Watt vorgetrieben. Entsprechend ihrer Längenausdehnung bis in uferferne Wattengebiete, deren Verhältnisse weniger einflußbar sind als die der ufernahen Zone, ergeben sich bei ihnen auch wesentlich weiterreichende Wechselwirkungen zwischen den hydrologischen und morphologischen Verhältnissen der benachbarten Wattgebiete als bei einfachen Uferschutzbühnen. In besonderem Maße trifft dies auf Dämme zu, die vom Festland aus zu vorgelagerten Inseln oder Halligen geführt werden und eine vollständige Teilung und großräumige Aufgliederung von Watträumen bewirken.

Als Beispiele solcher Dämme und der mit ihrem Bau und mit ihrer Wirkung verbundenen Probleme seien genannt: Die Bühne H am Westrand von Wangerooge, der Damm Friedrichskoog-Spitze sowie die Dämme nach den Nordfriesischen Inseln und Halligen.

Die Notwendigkeit zum Bau solcher Dämme wird oft erst erkannt, wenn der Festlandküste ernste Gefahr droht. Es muß zur Vermeidung solcher überraschend auftretenden Gefahr erneut und nachdrücklich gefordert werden, die Kenntnis des gesamten Wattgebietes und der diesen Raum gestaltenden Kräfte durch systematische und weiträumige Untersuchungen zu vertiefen. Diese Untersuchungen erfordern erhebliche Zeit und umfangreiche Geldmittel. Sie lohnen sich aber im Vergleich zu den weit höheren Kosten, die bei plötzlich auftretenden Schäden zwangsläufig aufgewendet werden müssen, ohne daß dann noch genügend Zeit für Untersuchungen zur Ermittlung der richtigsten Maßnahmen zur Verfügung steht.

⁴⁾ LORENZEN, J. M.: Hundert Jahre Küstenschutz an der Nordsee. Die Küste III, 1/2, 1955.

Über die zweckmäßige Lage, Länge, Höhe und Bauart solcher Dämme vom Festland aus gibt es eine Reihe von Beobachtungen und Erfahrungen an vorhandenen Bauwerken. Sorgfältige und langdauernde Beobachtungen über die Wirkung von ausgeführten Dammbauten sind ein wichtiges Hilfsmittel für die richtige Planung neuer Dämme. Sie erfordern ebenfalls viel Mühe und Geld, die sich aber auf weite Sicht stets bezahlt machen⁵⁾. Vom Standpunkt des Küstenschutzes aus sollte man sturmflutfreie Dämme nach Inseln und Halligen nur dann planen, wenn man ihre Wirkung im Vergleich zur Abriegelung nur normaler oder erhöhter Tidebewegung eindeutig abzuschätzen vermag.

D. Die Inselschutzwerke

1. Dünenpflege

Wo als Folge eines genügend breiten Strandes Sandflug besteht, können, soweit nötig, zur Verstärkung der Randdünen Sandfangzäune und Helmpflanzungen mit Erfolg angewendet werden. Da Helm jedoch nur bei ständiger Sandzufuhr gedeiht, sind in Dünenbereichen, in denen keine Sandzufuhr besteht, zur Festlegung keine Helmgräser zu pflanzen, sondern Dünenkleinräser anzusäen.

2. Ostfriesische Inseln

Strandbuhnen

Bauliche Maßnahmen zum Schutz der Inseln selbst sind immer abhängig vom Sandhaushalt. Falls Sandzufuhr überwiegt, sind keine Maßnahmen erforderlich. Solange die Sandzufuhr in dem zu schützenden Gebiet im mehrjährigen Mittel mindestens dem Sandverlust entspricht, genügen zur Sicherung der Inseln Strandbuhnen und notfalls zur Ergänzung Dünendeckwerke.

Von den Buhnen hat sich das Kastenprofil (etwa Norderneyer Bauart) mit weichem Übergang zum Strand am besten bewährt. Bei stark wechselnden Strandhöhen ist dabei die Berme seitlich durch Spundwände zu schützen, bei geringen Strandhöhenänderungen genügt dagegen eine seitliche Steinschüttung auf Buschunterlage. Abweichend hiervon genügt es, in Gebieten, die durch den Buhnenbau mit Sicherheit eine schnelle Strandaufhöhung erwarten lassen, Einwandbuhnen zu bauen. Auch kann diese Buhnenart an geeigneten Stellen als Landanschluß für Kastenbuhnen dienen.

Soweit mit Sandschliff gerechnet werden muß, sind zweckmäßig keine Stahlbuhnen zu verwenden.

In einem Buhnensystem ist anzustreben, die Buhnen bis zu einer festzulegenden Streichlinie vorzuziehen, ihre Köpfe auf gleiche Höhe zu legen (etwa 0,5–1,0 m über MTnw) und auch das Längsgefälle im seeseitigen Teil der Buhnen etwa gleich groß zu wählen. Die Wurzeln sollten etwa auf MThw liegen.

Grundsätzlich ist es zweckmäßig, die Buhnenfeldbreiten nicht größer als die Buhnenlänge zu wählen. Die Buhnenköpfe sollen möglichst in die Brandungszone und damit in den Bereich der küstenparallelen Strandvertriftung reichen.

Dünendeckwerke

Alle seit Beginn des Dünendeckwerkbaues gemachten Erfahrungen zeigen, daß steile Formen sich nicht bewährt haben. In Strandgebieten mit starkem Brandungsangriff ist ein etwa 1:4

⁵⁾ GAYE, J.: Die deutsche Küstenforschung und der Seewasserbau. Die Küste III, 1/2, 1955.

geneigtes Deckwerk zu empfehlen (Norderney, Sylt). Die Oberkante des Deckwerks soll mindestens auf + 5,00 MThw liegen, der Fuß ist möglichst tief in den Strand einzubinden und durch ausreichend lange Fußspundwände zu sichern.

In Gebieten mit geringerer Brandung braucht die Böschungsneigung nicht ganz so flach gewählt zu werden, jedoch sollte man auch hier keine Steilprofile bauen.

Unterwasserbuhnen

Ist der Sandhaushalt nicht ausgeglichen, dann können Maßnahmen getroffen werden, die geeignet sind, dem zu schützenden Gebiet den notwendigen Sand zuzuführen. Das läuft in der Regel darauf hinaus, den Anlandepunkt des Riffbogens nach Westen zu verschieben.

Allgemein gültige Richtlinien können hierfür nicht gegeben werden. Eingehende Untersuchungen sind jeweils erforderlich. Daß die Sandzuwanderung mit Erfolg beeinflußt werden kann, beweisen die Beispiele Borkum und Wangerooge, wo es in einem Fall durch Verbauung des „Strandgatjes“ mit Unterwasserbuhnen und im anderen Fall im Wege der Durchbauung der „Doven Harle“ durch Verlängerung der „Buhne H“ gelungen ist, die Sandanlandungen weiter nach Westen hin zu verlagern⁶⁾.

3. Inseln zwischen Jade und Eider

Die drei Strandinseln Mellum, Schaarhörn und Trischen sind nicht bewohnt. Sie werden wegen ihrer geringen eigenen Bedeutung nicht durch Bauwerke geschützt und haben für den Schutz der Festlandsküste keine wesentliche Bedeutung.

Die Insel Neuwerk ist bewohnt und wird in der Hauptsache wegen ihres Eigenwertes und wegen ihrer Bedeutung für das Elbefahrwasser durch Deiche, Deckwerke und Buhnen geschützt, die grundsätzlich den Bauformen und Bedingungen der Schutzwerke an der Festlandküste entsprechen.

4. Nordfriesische Inseln und Halligen

Die Schutzmaßnahmen auf den Marschinseln Pellworm und Nordstrand und auf den Halligen entsprechen in ihren Bauformen den Schutzmaßnahmen für die Festlandküste.

Strandbuhnen

Unter der Wirkung der Brandung — besonders bei höheren Wasserständen — werden auf der Insel Sylt vom Kliff oder Dünenfuß Sandmassen gelöst und küstenparallel verfrachtet. Die Hauptrichtung des küstenparallelen Sandstromes scheint vor dem nördlichen Teil der Insel nach Norden zu gehen. In diesen ufernahen Brandungsstrom gerät auch ein Teil des Sandes aus dem Riffgürtel, der sich mit Unterbrechungen in mehreren 100 m Abstand vor dem Weststrand hinzieht und der sich, ebenfalls unter der Wirkung der Brandung, abschnittsweise, aber zeitlich und örtlich unregelmäßig, an den Westrand der Insel Sylt anlegt.

Zum Schutz der Insel, deren Küstenlinie durch die beschriebene Brandungsströmung im Laufe der Zeit immer mehr zurückgedrängt wird, sind verschiedenartige Buhnen gebaut worden. Wie die Erfahrung gezeigt hat, können die Buhnen die geschilderte Wirkung der Brandungsströmung nicht unterbinden, aber doch verlangsamen. Ihre bremsende Wirkung auf den küsten-

⁶⁾ LÜDERS, K.: Die Wirkung der Buhne H in Wangerooge-West auf das Seegat „Harle“. Die Küste I, 1, 1952.

parallelen Sandstrom wächst zweifellos mit ihrer Länge. Wie lang die Buhnen im einzelnen zu bauen sind, läßt sich nur aus eingehender Kenntnis der örtlichen Verhältnisse, insbesondere aus der Lage des Riffgürtels, entscheiden. Die ersten Steinkastenbuhnen wurden aus Kostenersparnisgründen durch einwandige Stahlbetonbuhnen ersetzt, die dem Sandschliff besser als die Stahlbuhnen widerstehen. Soweit sich eine Verlängerung der bestehenden Einwandbuhnen als notwendig herausstellt, muß diese Verlängerung in stärkerer Bauweise, etwa als Kasten- (vgl. S. 59) oder Schüttsteinbuhne, ausgeführt werden.

Die Wurzeln der Buhnen liegen zweckmäßig auf MThw, die Köpfe in einer Streichlinie auf etwa 0,5—1,0 m über MTnw.

Dünen deck werke

Hier gilt grundsätzlich dasselbe wie bei den Ostfriesischen Inseln.

Die auf den Inseln Amrum und Föhr vorhandenen Strandmauern, im wesentlichen Steilprofile, genügen zwar heute noch den Ansprüchen, doch beweisen die Angriffserscheinungen an der Strandmauer vor Westerland auf Sylt und auf Amrum, daß sich Steilprofile auf die Dauer nicht bewähren. Aus diesem Grunde ist man auf Sylt bereits zu flach geneigten Deckwerken übergegangen.

Soweit die Marschgebiete dieser Inseln durch Deiche usw. geschützt werden müssen, gilt auch hier das für die Festlandsküste Gesagte.

E. Instandhaltung der Küstenschutzwerke

Die Angriffe von See her wirken dauernd und wechseln ständig Stärke und Richtung. Dementsprechend erfordern auch die Küstenschutzwerke ständige Instandhaltung. Jede auch nur kurzfristige Unterbrechung der sorgfältigen Pflege und ordnungsgemäßen Unterhaltung der Deiche und anderen Küstenschutzwerke bedeutet Erhöhung der Gefahr und Verlust an Sicherheit. Außerdem steigt der Kostenaufwand durch später notwendige Nachholarbeiten in nicht absehbarer Weise.

Kiel, den 1. August 1955.

gez. BOTHMANN	gez. KATTENBUSCH	gez. J. M. LORENZEN
gez. Dr. LÜDERS	gez. Dr. SCHAUBERGER	
gez. SNUIS	gez. THILO	

Eine unbekannte Karte von Helgoland aus dem Jahre 1714 und die zu ihr gehörende Erläuterung

Von Harry Schmidt

In der Handschrift *Gamle Kongl. Manuscriptsamling* der Königlichen Bibliothek zu Kopenhagen No. 1029 Fol. ist ein Prospekt von Helgoland, wie es sich 1714 darbot, samt dazugehöriger Erläuterung enthalten. Die sehr sorgfältig ausgeführte farbige Zeichnung, deren Maße 30,3 cm : 39 cm sind, wird Zacharias WOLF (1667—1726), einem Gottorfer Offizier und Spezialisten in militärischen Karten, verdankt¹⁾. Vermutlich ist sie einst in der nicht vollendeten, von Zacharias WOLF besorgten Handschrift F. 22, Folio, in *Ingenieurcorpsets Bibliothek*, Kopenhagen, enthalten gewesen. Jedenfalls ist die auf der Rückseite der Karte niedergeschriebene Erklärung von der gleichen Hand wie die des Manuskripts F. 22. Die Karte ist bisher unbekannt²⁾. Wie alles, was das Felseneiland in der Nordsee betrifft, dürfte sie allgemeinem Interesse begegnen. Sie ist nach der Eroberung der Insel durch die Dänen im Jahre 1714³⁾ entstanden und in der nebenstehenden Abbildung wiedergegeben.

Unsere Karte ist wohl das wertvollste Original aus jener Zeit. Nach ihr hat RANDAHL 1743 die bei LANG⁴⁾ abgebildete Karte Helgolands mit einigen Abweichungen, sowohl Hinzufügungen als beträchtlichen Fortlassungen, kopiert. Insbesondere ist die der Wirklichkeit nicht entsprechende Wiedergabe der Felswand von ihm übernommen. Andererseits hat RANDAHL, um die vielen leeren Räume auszufüllen, die bei WOLF sinnvoll mit Tiefenangaben und Bemerkungen verschiedener Art versehen sind, unter anderem Schiffe und Boote sowie das Wappen mit der Königskrone und den Putten rechts unten, ferner die über der Insel schwebende Leine mit den Meerestieren und dem Schiff hinzugefügt. An Wert übertrifft unser Blatt bei weitem die ebenfalls aus dem Jahre 1714 stammende Karte Helgolands, die BROHM⁵⁾ veröffentlicht hat. Letztere kann freilich gleichsam als Illustration zur zweiten Hälfte der Erklärung unserer Karte dienen. Reizvoll ist die Ansicht des Kirchturms von 1706/07, des Vorgängers des „anspruchsvollen“, neugotischen von 1885, der im letzten Kriege vernichtet worden ist⁶⁾.

Bei der Rute wird es sich um die Eiderstedter Rute handeln, die nach Franz BÖTTGER-Emil WASCHINSKI⁷⁾ 16 Fuß = 4,7751 m betrug. Nach denselben⁸⁾ ist „in den Herzogtümern die

¹⁾ Vgl. den Aufsatz des Verfassers „Kunst- und kulturgeschichtliche Zeichnungen des Generalmajors Zacharias WOLF, die für die Herzogtümer Schleswig und Holstein von Bedeutung sind, samt seinen Erläuterungen“, Nordelbingen, Beiträge zur Heimatforschung in Schleswig-Holstein, Hamburg und Lübeck, 23. Band, 1955, S. 97 ff. — Auf S. 99 WOLFS Bildnis.

²⁾ Von Arend Wilhelm LANG „Helgoland auf alten Karten“, in „Helgoland ruft“, 1952, S. 47 ff., ist sie nicht angeführt. Auch Gustav JACOBY, der in seinem Aufsatz „Helgoland bei Johannes Mejer und Adam von Bremen“ in „Die Küste“, 1954, Heft 2, S. 95 ff. die kartenmäßig und textlich überlieferten Größenangaben betr. die Insel sowie die Maßstabsfragen durch die Jahrhunderte hindurch kritisch beleuchtet hat, ist die Karte unbekannt geblieben.

³⁾ Vgl. F. C. RODE, Kriegsgeschichte der Festung Glückstadt und der Niederelbe. Erster Band, 1940, S. 274 ff.

⁴⁾ a. a. O., S. 59.

⁵⁾ Helgoland in Geschichte und Sage. Seine nachweisbaren Landverluste und seine Erhaltung... 1907, Blatt 26.

⁶⁾ Richard HAUPT, Die Bau- und Kunstdenkmäler in der Provinz Schleswig-Holstein usw., Fünfter Band = Geschichte und Art der Baukunst im Herzogtum Schleswig, 1924, S. 773, sowie SIEBS und WOHLNBERG, Helgoland und die Helgoländer, 1953, S. 190.

⁷⁾ Alte schleswig-holsteinische Maße und Gewichte = Bücher der Heimat, Band 4, 1952.

⁸⁾ a. a. O., S. 23.

dänische Meile 24 000 dänische Fuß oder 1643 Hamburger Ruten das gesetzliche . . . Maß“. Der Eiderstedter Fuß ist rund 30 cm (297,67 mm)⁹⁾. Der Faden in Dänemark von 6 dänischen Fuß oder 3 Ellen ist 1,881 m lang¹⁰⁾.

Ich lasse nunmehr den auf der Rückseite der Karte befindlichen Text, der ebenso wie die Karte selbst dokumentarischen Wert hat, mit geringen Kürzungen folgen^{11a)}:

„*Helgelandt, Wie solches im Jahr 1714. sich befunden. Diese Insul liegt Sec. lat. sub gr. 54.16 m.rat. longit. 41 gr. 22 min. Die Circumfer. helt 940 Ruten. Von Sylter Neütief lieget dieße Insul 8 Meilen. Von der Hever 7 Meilen, Von der Eyder 6½ Meilen, Nach der Elbe 6 Meilen. Von der Weser 6 Meilen, Nach Wangeroe 6 Meilen Northöeft 7 Meilen Buysen¹¹⁾ 8 Meilen Helgelande Deep 3 Meilen, Dogger Sandt 30 Meilen.*

Die ordinare Fluht alhier ist 8 biß 10 fus, die höchste 12 fus. Dieses Land wird in 4 quartie geteiblet als Suderquartier Negst Suderquartier Norderquartier Negst Norderquartier. Die Inwohner wohnen teilß oben teilß unten auf dem Lande, und heisen es auf dem hohen Lande und unten aufs Land. auf den hohen Land sind 179 Heüser, ohne des Commandanten und Pastorn Heüßer, hier unten wohnen 70 Witwen, deren Mennern der meste teibl bey der Fischerey Vertrunken. Aufß unterland sind 38 Heüser worunter der Herrn Krug, 94 Pack Häuser oder fischer Buden, worunter die Herren Bude. Hier unter wohnen 3 witwen. Die Heüser stehen durcheinander, haben nicht mehr als eine Gaße, sondern nur fusteige, Volbuir Leüte oder heele Lotsluide sind in allen 188. Halbe Lots Leute sind in allen 37. Summa 217 Häuser oder feurstedten, ohne Packhäuser und Buden. Die Größe des Landes: Der Superficialinhalt davon ist 33 480 Ruten im quadrat. Korn Acker und gras Land auff dem hohen Lande, der mehrerteihl Landes ist besetet, und wird von den Weybern gegraben und geärrtet, Von dem gras Land so zwische die Kornplätze liegen wird kein Häu gemacht, weiln kaum genung 80 Kübe darauf zu weyden, die Ländereyen sind in etliche 100 Kleine Parten geteiblet, und haben viele einwohner nur 2 à 3 Ruten und wird daselbst nichts als Gärsten gesäet. Buirlandt an dem ufer oben gantzherumb, und an den Seiten der fussteige werden die Kübe angedutert geweydet, und ist unter den Inwohnern gemein. Höhe der Klippen, bey der Rodeburg ist das hohe Land am niedrigsten, ist nach seiner perpendicular nur 12, mit der Docirung aber 13 faden hoch, bey der Feürback ist es am höchsten mit der Docirung 36 faden. Die Tiefe der Erden. an dem (so!) meisten örtern ist die Erde keine 4 fuß Tief, und da es am tiefesten nicht über 6. Die Saps Kuhlen daraus werden die Küh getränkert samlet sich von der feuchtigkeit ist Rotlich und dick und dienet nicht zum Kochen. Die Sanddühnen nehmen an der oster und Süderseiten zu, an der Norder und Nordwesterseiten vielmehr ab. wen die Glocke bey dem wacht Hause geleutet, wird das tohr geschlossen. Die Kirche ist ao. 1686 bey Konigl. Regierung gebauet, das Korn aufn Lande wird auf Handmühlen, woran 2 personen sich abwechseln gemahlen. Die Fischerey und Schneppenfang, im Martio fängt die fischerey an, wehret Jacobi und fangn Schelfische und Cappelau, im April werden hummers gefangen bis Johannj. im August und Septemb. ist die Macrel Zeit, im Sept. und Octob. gehet der Fischfang wieder an. im Mart. April und Septemb. ist die Schneppen Zeit.“

Auf der zweiten Hälfte der Rückseite steht folgende Erklärung:

„*Plan von dem Helligen Lande, wie Solches auff Ordre J.K.M. zu Dennemarcke, durch Eine Esquadre armirten Fahr Zeugen unter Commendo des Commendeur Paulsen den 6. Augusti Anno 1714 ist berennet, auch Selbigen dato die Landung auf denen Sand Dühnen getahn und folgens den 9 dito durch Glr (Generalmajor) Wilster in Possession genommen worden.*

A Helligland welches bey dem Münch B 29 und bey C 13 faden hoch, D Die Treppe, hat biß ans untere Tohr 40 stupfen und von da biß auf dem Lande zu dem obersten Tohr, So durch die defension und Commandanten Haus gehet 86 stufen. E Die Kirche und der Flecken. F Das Commandanten Haus so rund umb heer palisadiret, wo durch die Passage gehet von dem obern nach dem untern Lande. G Das pulver gewölb auff nordhörn oder die Rode burg. H Die Winkel batt. I Rode Borgs batt. K Passage batt. L Hafjen batt. M Colditz batt. N Eine Bake und die pulver Kammer in den Moder Berg. O Die feür Bäck oder der feür berg. P Die Sandtbank bey der Ebbe So bey der Fluht unter waßer steht, der Grund ist

⁹⁾ Ebenda, S. 17.

¹⁰⁾ Ebenda, S. 14.

^{11a)} Bei der Korrektur sehe ich, daß A. L. J. MICHELSEN in einer in den Jahrbüchern für die Landeskunde usw., Bd. X, 1869, S. 279 ff., veröffentlichten Miscelle „Helgoland im Jahre 1714“ den Text ohne den Plan, der ihm „leider nicht zu Gesicht gekommen“, bereits veröffentlicht hat. Der Text ist jedoch ohne die Karte zum großen Teil unverständlich, ebenso wie die Karte zum Verständnis des Textes bedarf.

¹¹⁾ Büsum.

gelber sand und steine. Q ist die Neüe batt. unten bey die Heüser und fischer Buden. R Der Suderhafjen. S Der Norderhafjen. T Die Dühnen welche 30. 40. biß 50 fus hoch Sind. V Sind Zwey Baaken, So mit der Kleinen Klippe So unter wasser lieget und Selten zum Vorschein Kompt in gerader Lienie, welche den Schiffern zur warnung wen Selbe in den Süder Hafjen, W an diesem Orte ist die Landung geschehen, und die Königl. Flagge aufgesetzt worden. X Campement der Artillerie nach der Landung Y Das Campe(ment) der Trouppen So in 600 Mann bestanden. Z Ein Kesel von 4 Mortier¹²⁾ wodurch einige Heüser auf dem Lande Ruijniret worden. a Ein anderer Keßel zu glüenden Kugeln, Welcher nicht gebraucht worden. b Campement der Konigl. Danischen Trouppen nach der übergabe, weil Selbe in den Suderhaven wieder zu Schiffe gegangen, nebst der Hochfürstl. Garnison So auff der Elbe ausgesetzt worden, welche bestanden in Ein Leutenant, 2 unterofficierer und 50 Mann, nebst dem H. Major Boldewahn als Commandant. Die Gemeine weil viele Invaliedes andere alt oder wegen Verbrechen dahin Condemniret, wurden bey dero Ankunst Dimmittiret Sich künfftig wieder anzugeben als den Ihrer wieder in gnaden solte gedacht werden.“

Die erste Hälfte der Erklärung liegt fast vierzig Jahre vor der Beschreibung der Insel Helgoland, die J. LASS 1751 und 1753 veröffentlicht und die Johann Friedrich CAMERER (Vermischte historisch-politische Nachrichten usw., 1758, S. 16 ff., S. 196 ff.) zum drittenmal gedruckt hat. Die Erklärung weicht von der Beschreibung von LASS in Einzelheiten ab, so in bezug auf die Zahl der Kühe (80 : 40). — Mit der zweiten Hälfte der Erklärung ist die BOLZENDAHLsche Chronik¹³⁾ zu vergleichen.

Man mag bedauern, daß Zacharias WOLF sich wohl nicht sonderlich für die Vorgeschichte der Insel interessiert hat. Jedenfalls äußert er sich nicht näher über die von ihm eingetragenen vorgeschichtlichen Grabhügel, von denen er nur einen mit Namen nennt. Als Grabhügel erkennt man rechts von der Kirche am äußersten Ende der Insel einen größeren, höheren sowie zwei kleinere. Auch bei dem Buchstaben K ist ein vorgeschichtliches Hügelgrab wiedergegeben, ebenso bei N ein größerer, höherer Grabhügel, der Moderberg. Er wurde als Pulverkammer, deren Zugang zu erkennen ist, benutzt. Links vom Moderberg liegen schließlich noch zwei kleinere vorgeschichtliche Hügelgräber. Auf einem weiteren Grabhügel (dem Bredtberg) ist das erste Helgoländer Leuchtfeuer, ein viereckiger Backsteinbau (auf unserer Karte unter dem Buchstaben O) errichtet worden. So bietet Zacharias WOLFS Karte s i e b e n (oder acht) Grabhügel, also mehr als die fünf 1643 von CNOBLOCH (vgl. Anm. 17) S. 11, angeführten (CNOBLOCH berichtet, daß „von alters . . . 7 an der Zahl gewesen . . .“), auch mehr als die von JOHANNES MEJER auf der von DANCKWERTH in der Newen Landesbeschreibung von 1652 veröffentlichten Karte von 1649 im Bilde festgehaltenen^{13b)}.

Auf dem Leuchtturm weht eine Flagge mit den waagrecht gestreiften Farben Helgolands: rot, weiß, grün. Dieser Flagge entspricht bei WOLF (13 des Deckblatts) der Danebrog.

Auch Friedrich NOODT¹⁴⁾ bringt einen ausführlichen Bericht über die Eroberung Helgolands mit Angaben über die zeitgenössische Literatur. In diesem Bericht, der in Einzelheiten von dem Berichte WOLFS abweicht¹⁵⁾, heißt es unter anderem:

„Als im Jahre 1684. dieses Landgen eingenommen ward¹⁶⁾, stellte man zu Hamburg einen Abriß

¹²⁾ Mörser.

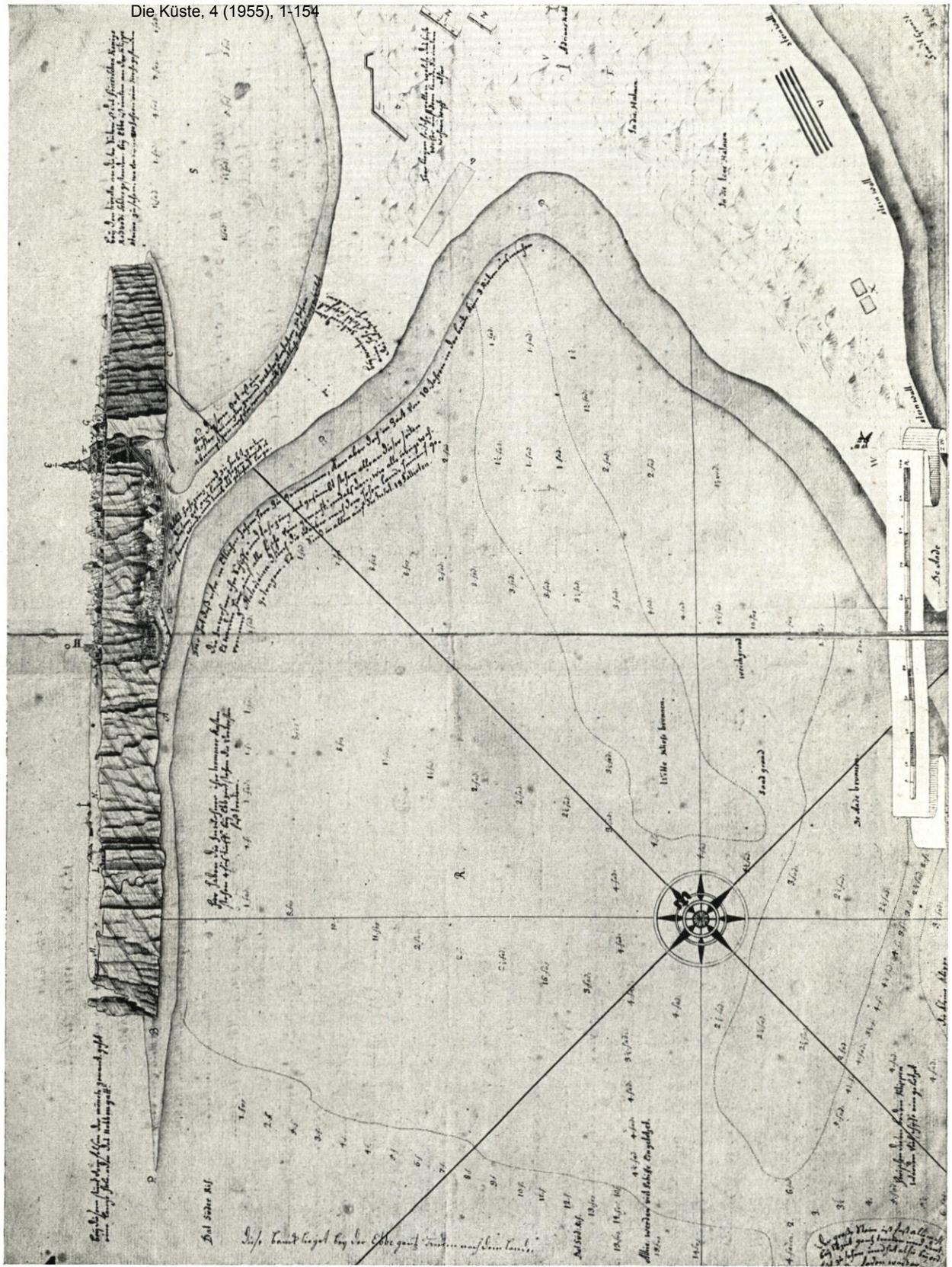
¹³⁾ Herrn Oberregierungsbaurat Dr.-Ing. BAHN, Tönning, verdanke ich eine Abschrift der BOLZENDAHLschen Chronik.

^{13b)} Über die vorgeschichtlichen Grabhügel der Insel und die auf Helgoland gemachten vorgeschichtlichen Funde vgl. insbesondere O. OLSHAUSEN, Zur Vorgeschichte Helgolands (Verhandlungen der Berliner Gesellschaft für Anthropologie, Ethnologie und Urgeschichte, 1893, S. 500 ff., vornehmlich S. 505 ff.), und Peter ZYLMANN, Helgoland in der Vor- und Frühgeschichte (in: „Helgoland ruft“, S. 34 ff.), sowie SIEBS und WOHLBERG, a. a. O., S. 107 ff.

¹⁴⁾ Beyträge zur Erläuterung der Civil-Kirchen- und Gelehrten-Historie der Herzogthümer Schleswig und Hollstein, Sechstes und letztes Stück des ersten Bandes, 1748, S. 627 f.

¹⁵⁾ Insbesondere S. 627, Anm. 40, betr. die Eroberung Helgolands.

¹⁶⁾ Auf Grund des Okkupationspatents Christians V. vom 30. 5. 1684, durch das der Gottorfer Anteil von Schleswig mit dem Königlichen vereinigt wurde.



nebst der historischen und geographischen Beschreibung auf einen Bogen in groß Folio ans Licht. Es ist nichts mehr darin enthalten, als was DANCKWERTH, KNOBLAUCH¹⁷⁾ oder Pet. SAXE, schon davon berichtet hatten, nur wird von der Eroberung folgende Erzählung gemacht . . .“ Am Schluß wird mitgeteilt: „Wir wollen bei der nächsten Gelegenheit das merkwürdige Schreiben eines Königlichen Officiers von dem Zustande der Insul Helgoland nach der Eroberung an. 1714. ans Licht stellen.“

Diese Absicht ist jedoch leider nicht ausgeführt worden. Denn weder im I. noch II., 1752—1756 ebenfalls in Hamburg erschienenen Bande des Werks ist dies Schreiben abgedruckt. Auch der von NOODT erwähnte „Abriß“ von 1684 ist bisher unbekannt. Die Karte, die im Staatsarchiv zu Hamburg (Plankammer) ruht¹⁸⁾, lehnt sich freilich eng an die bei LANG, a.a.O., S. 54, veröffentlichte Karte Johannes MEJERS von 1639 an, aber sie weist doch auch Unterschiede auf, da sie etwa fünfzig Jahre später entstanden ist. Noch enger ist die Beziehung des Abrisses von 1684 zu der auf Peter SAX fußenden Karte Johannes MEJERS aus dem Jahre 1649¹⁹⁾.

Abschließend weise ich darauf hin, daß es noch mehr unbekanntere Karten Helgolands gegeben hat, von denen wahrscheinlich mindestens zwei verschollen sind. Denn in der Kieler Universitätsbibliothek, Cod. Ms. S.H. 24, L. 8^o, ruht ein Bändchen, in dem der Inhalt aller Bände des *Museum Cimbricum Iconicum Historico-Dogmaticum*²⁰⁾ verzeichnet ist. In ihm heißt es unter der Rubrik „Pars topographica“:

„65. Grundriß von Heiligland a. 1707 nebst den Fortifications Werke cum Hertha, Fosta et Wede, Idolis, ex delin. des Ingenieur Capitain Randahl.“

„66. Clasens Grundriß von dem Vordertheil der Insel Heiligland nebst einem Profil von der Vorsetzung²¹⁾, so zur Conformation der so genannten rothe Burg dienet²²⁾.“

„67. Abriß von Helgoland, Autore Rode.“

„68. Abriß von Helgeland, eleganti manu de Wolff, Commandanten in Tönningen²³⁾.“

¹⁷⁾ Gemeint ist Benjamin Cnobloch, Helgolandia usw., 1643.

¹⁸⁾ Dagegen scheint sich die historische und geographische Beschreibung Helgolands aus dem Jahre 1684 nicht erhalten zu haben. Jedenfalls ruht sie nicht, wie die gleichzeitige Karte, in der Plankammer. (Freundliche Mitteilung von Herrn Staatsarchivdirektor Dr. von LEHE, Hamburg.)

¹⁹⁾ Abgebildet von JACOBY in seinem in Anm. 2 angeführten Aufsatz nach S. 112. Ein Ausschnitt bei SIEBS und WOHLBERG, a. a. O., S. 197—198.

²⁰⁾ Sie waren, mindestens 21 an Zahl, einst im Besitze des Gottorfer Kanzlers v. Westphalen († 1759), Zwei von ihnen, die für unsere Vor-, Früh- und Kulturgeschichte von Bedeutung sind, ruhen in der Kieler Universitätsbibliothek. — Vgl. den in Anm. 1 angeführten Aufsatz des Verfassers, S. 114, Anm. 97.

²¹⁾ Uferschutzbau.

²²⁾ Von diesem Grundriß, datiert Tönning 1711, liegt ein Foto im Wasser- und Schiffsamt Tönning, und zwar in der von Herrn Dr. LANG zusammengestellten Kartensammlung. — Ketel Clasen war Ingenieur-Kapitän. Vgl. BROHM, a. a. O., S. 59 f., und Blatt 25 (Grundriß der Ostseite).

²³⁾ Bei diesem Abriß wird es sich wohl um den oben behandelten und abgebildeten Prospekt handeln.

Den Herren Oberregierungsaurat i. R. Dr.-Ing. BAHR, Tönning, Ministerialrat i. R. GAYE, Kiel, Dr. Arend LANG, Juist, und Dr. WOHLBERG, Husum, sage ich für wertvolle Hinweise herzlichen Dank. Nicht minder herzlich ist mein Dank gegenüber der Königlichen Bibliothek zu Kopenhagen, die mir in stets bewiesenem freundlichen Entgegenkommen die Benutzung der eingangs genannten beiden Handschriften in der Landesbibliothek zu Kiel gestattete und so erst den obigen Beitrag und den in Anm. 1 genannten Aufsatz ermöglicht hat.

Beobachtungen über den Sandtransport in der unteren Ems

Von Wulf Niebuhr

Inhalt

A. Ergebnisse der Sinkstoffmessungen	69
1. Mittlerer Sinkstoffgehalt in den Meßprofilen I—VI	69
2. Beziehung zwischen mittlerem Sinkstoffgehalt und Stromgeschwindigkeit	70
3. Kornzusammensetzungen der Sinkstoffe, getrennt nach Ebbe und Flut	73
4. Sinkstoffverteilung in der Lotrechten, Kornzusammensetzung	77
B. Geschiebemessungen mit der „Lüderschen“ Sandfalle	80
1. Einige charakteristische Ergebnisse	80
2. Abhängigkeit des Sandtransports auf der Sohle von der Stromgeschwindigkeit, Grenzgeschwindigkeit	82
3. Mittlerer Korndurchmesser und Kornzusammensetzung des Bodensediments im Vergleich zum Sediment der Sandfallen	85
C. Der Sinkstofftransport	87
1. Beziehung zwischen mittlerem Sinkstofftransport und Stromgeschwindigkeit	87
2. Der Sinkstofftransport in den Meßstellen Y und Z, getrennt nach Korngrößen	88
D. Zusammenfassung der Ergebnisse	91
E. Schriftenverzeichnis	92

Feststellungen über den Sandtransport im Tidegebiet werden dadurch erschwert, daß der Strom infolge der Gezeitenbewegung in regelmäßigem Wechsel einmal stromauf und dann wieder stromab verläuft. Eine Sandablagerung an irgendeiner Stelle des Stroms ist somit stets das resultierende Ergebnis beider Bewegungen. Eine weitere Erschwerung besteht in der mit Annäherung an die Brackwasserzone wachsenden Zunahme von feinsten Sinkstoffen. Werden unter dem Sammelbegriff „Sinkstoffe“ sämtliche im Wasser befindlichen festen Bestandteile verstanden, so umfassen diese die feinsten Bestandteile (Schluff) sowohl als auch die gröberen bis zum Feinsand. Während die Feinsande ($\geq 0,05$ mm) verhältnismäßig schnell zu Boden sinken und jedesmal in den Kenterzeiten bei Hochwasser und Niedrigwasser zum überwiegenden Teil sedimentieren, halten sich die feinsten Sinkstoffe ($\leq 0,02$ mm) längere Zeit schwebend im Wasser. Ihre Sinkgeschwindigkeit ist so klein, daß sie während der Stromkenterung nur, soweit sie sich in Bodennähe befinden, zur Ablagerung kommen können, es sei denn, daß besondere physikalisch-chemische Erscheinungen (Koagulation) das Absinken bewirken. Die dazwischen liegenden Korngrößen ($> 0,02$ mm, $< 0,05$ mm) werden mehr oder weniger zur Ablagerung kommen. Die Grenzen sind hierbei fließend und von den örtlichen Verhältnissen, insbesondere der Dauer der Stillwasserzeiten abhängig.

Abbildung 2 gibt die Fallgeschwindigkeit von kugelförmigen Teilchen ($\gamma = 2,65$) im Wasser bei 15° C in cm/s abhängig vom Durchmesser wieder. Bei einer angenommenen Kenterzeit von im Mittel 30' würde ein Sandkorn mit einem Durchmesser von 0,1 mm: 12,6 m absinken, mit einem Durchmesser von 0,05 mm: 3,5 m und mit einem Durchmesser von 0,02 mm nur noch 0,54 m, das heißt in einem etwa 10 m tiefen Tidestrom wird während der Kenterung nur der Feinsand ($\geq 0,1$ mm) zu 100 % ausfallen, der Mehlsand (0,05—0,1 mm) zu mehr als 80 %, der Schluff ($\leq 0,02$ mm) dagegen etwa nur zu 2,0 %. Um einen Einblick in die Sinkstoffbewegung

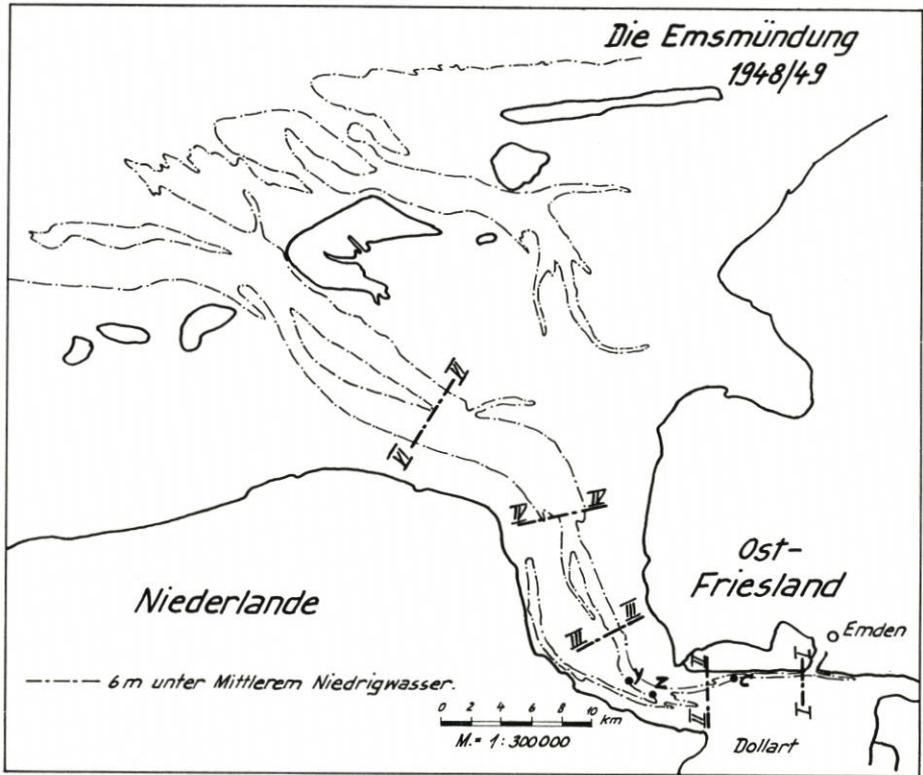


Abb. 1. Das Untersuchungsgebiet

zu gewinnen, genügt es somit nicht, den Sinkstoffgehalt nur der Menge nach zu bestimmen, sondern parallel hiermit müssen auch Kornanalysen der Sinkstoffproben durchgeführt werden.

Die Entnahme der Sinkstoffe erfolgte zum Teil mit einem vertikalen, überwiegend jedoch

mit einem horizontalen Wasserschöpfer [nach WOHLBERG (5)], der einen Inhalt von 1000 ccm besitzt und eine Probenentnahme bis etwa 0,10 m über Sohle bei ruhigem Wetter gestattet. Bei unruhiger See konnte nur bis 0,20 bzw. 0,50 m über Grund gemessen werden. Die Vorgänge unmittelbar über der Sohle konnten mit diesem Gerät daher nicht erfaßt werden. Als Ergänzung wurde deshalb für die Sandbewegung auf der Flußsohle außerdem die „Lüdersche“ Sandfalle eingesetzt (2). Über die Konstruktion und

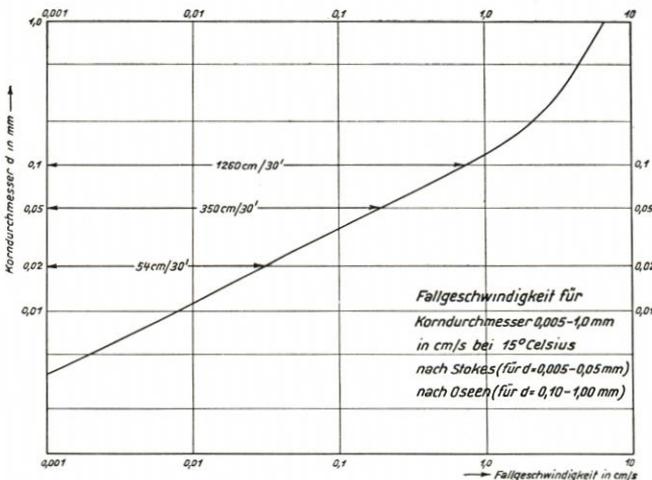


Abb. 2. Diagramm der Fallgeschwindigkeit

die Handhabung der Sandfalle wurde in verschiedenen Veröffentlichungen eingehend geschrieben. Sie darf hier als bekannt vorausgesetzt werden.

A. Ergebnisse der Sinkstoffmessungen

1. Mittlerer Sinkstoffgehalt in den Meßprofilen I—VI (Zahlentafel 1)

Sinkstoffproben wurden in den Meßprofilen I bis VI sowie an Zwischenpunkten in den Jahren 1948 und 1949 in großer Zahl entnommen. Die Entnahmen fanden in drei bis acht Tiefenstufen und in Zeitabständen von je 20' statt. Sie wurden grundsätzlich über eine ganze Tide ausgedehnt. In einigen Meßprofilen wurde an ein und derselben Stelle bis zu sieben Tage hintereinander (siebentägige Ungleichheit) gemessen, um Durchschnittswerte zu erhalten. Gleichzeitig wurden jeweils die Stromgeschwindigkeiten in drei bis fünf Tiefenstufen gemessen.

Von dem vorliegenden, umfangreichen Material seien hier nur die wesentlichen Ergebnisse mitgeteilt. Der mittlere Sinkstoffgehalt während der Flut bzw. Ebbe in den einzelnen Meßstellen ist in Zahlentafel 1 wiedergegeben.

Zahlentafel 1
Mittlerer Sinkstoffgehalt¹ in den Meßprofilen I bis VI in mg/l

Messung		oben	Mitte	unten	ve) vf)	in cm/s	Anzahl der Meßtage
I/101 (r)	E	85	143	445	61		4
	F	55	110	420	71		4
II/101 (r)	E	112	235	538	78		6
	F	102	218	440	58		6
II/102 (l)	E	90	147	313	60		7
	F	122	201	420	63		7
III/101 (r)	E	97	. 148	(167)	77		6
	F	57	. 170	202	64		6
III/102 (l)	E	60	. 103	187	62		7
	F	49	. 103	176	58		7
IV/103	E	31	. 123	223	62		2
	F	33	. 71	154	47		2
IV/105	E	30	. 85	128	63		6
	F	19	. 93	118	71		6
IV/102	E	19	. 131	187	49		1
	F	8	. 65	144	35		1
VI/2 : 6	E	(115)?	114	163	66		2
	F	44	65	154	69		2
VI/3 : 7	E	40	110	228	72		2
	F	35	77	120	64		2

¹ Mittel aus 1 bis 7 Tiden.

Bemerkungen:

E = Ebbmessung
F = Flutmessung
. = 1 m über Grund

r = rechte Stromseite
l = linke Stromseite
ve = mittlere Stromgeschwindigkeit bei Ebbe
vf = mittlere Stromgeschwindigkeit bei Flut

Mittlere Geschwindigkeitsdiagramme
in den Meßstellen II/101, 102 u. III/101, 102

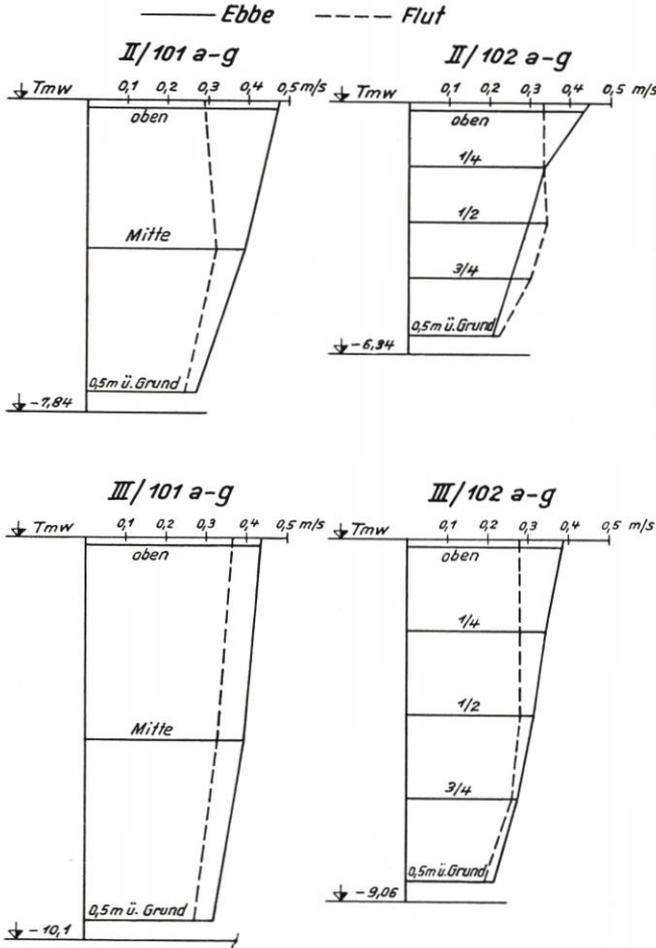


Abb. 3

Die Aufstellung zeigt eine bedeutende Zunahme des Sinkstoffgehalts von oben nach unten, eine Erscheinung, die auch im Sylter Wattenmeer festgestellt wurde [WOHLENBERG (6)]. Aber auch mit der Annäherung an die Brackwasserzone (Profil I und II) steigt der Sinkstoffgehalt an. Unten (etwa 0,20 m über Grund) nimmt der Sinkstoffgehalt von im Mittel 166 mg/l in VI bis auf 430 mg/l in II zu, oben von im Mittel 40 mg/l in VI bis auf 107 mg/l in II. Das Verhältnis vom mittleren Sinkstoffgehalt bei Ebbe zum mittleren Sinkstoffgehalt bei Flut ist unterschiedlich. Im allgemeinen zeigt sich in der Aufstellung dort der höhere Sinkstoffgehalt, wo auch die höhere mittlere Stromgeschwindigkeit gemessen wurde. Das heißt je nachdem ob Flutstrom oder Ebbstrom überwiegt, ergibt sich auch für den Flutstrom bzw. Ebbstrom der höhere Sinkstoffgehalt. Eine gewisse Abhängigkeit zwischen Sinkstoffgehalt und Stromgeschwindigkeit scheint hiernach zu bestehen. Eine eindeutige Beziehung läßt sich jedoch, jedenfalls aus der vorliegenden Aufstellung, nicht ableiten.

2. Beziehung zwischen mittlerem Sinkstoffgehalt und Stromgeschwindigkeit (Zahlentafel 2)

Zahlentafel 2 enthält die Ergebnisse von Sinkstoffmessungen im Jahre 1948 an verschiedenen Tagen in Meßprofil II getrennt nach Ebbe und Flut, sowie nach rechter und linker Stromseite. Der Sinkstoffgehalt an Grunde an den verschiedenen Meßtagen steht mit der Stromgeschwindigkeit in einem gewissen Zusammenhang. Einer höheren Stromgeschwindigkeit entspricht im allgemeinen auch ein höherer Sinkstoffgehalt. Es ergibt sich weiter, daß auf der rechten Stromseite der Ebbstrom überwiegt ($v_e > v_f$), während auf der linken Seite der Flutstrom vorherrscht ($v_f > v_e$). Auffällig ist hierbei, daß unten bei etwa gleicher mittlerer Geschwindigkeit der Sinkstoffgehalt bei Flut im allgemeinen höher ist als derjenige bei Ebbe. Hieraus ist zu entnehmen, daß der Flutstrom bei gleicher mittlerer Geschwindigkeit eine höhere Sohlengeschwin-

digkeit und damit auch größere Schleppkraft entwickelt als der Ebbstrom. Die Formen der Geschwindigkeitsdiagramme in der Lotrechten (vgl. Abbildung 3) bestätigen dies.

Für die Tiefenstufen Mitte und Oben läßt sich dagegen eine entsprechende Beziehung zwischen Stromgeschwindigkeit und Sinkstoffgehalt nicht feststellen. Der Sinkstoffgehalt ist mit Ausnahme von II/6 sowohl auf der rechten als auch auf der linken Stromseite bei Flut zum Teil beträchtlich höher als bei Ebbe, unabhängig von der jeweils vorherrschenden Stromgeschwindigkeit.

Die Ergebnisse der Sinkstoffmessungen in Profil I wurden auf Abbildung 4 in Abhängigkeit von der mittleren Stromgeschwindigkeit graphisch aufgetragen. Die Darstellung zeigt wieder unten ($\approx 0,20$ über Grund) eine gewisse Abhängigkeit zwischen Sinkstoffgehalt und Geschwindigkeit, während diese für die Tiefenstufen Mitte und Oben allenfalls für die Flutmessungen noch erkennbar ist. Offenbar wird hier der Einfluß der Stromgeschwindigkeit auf den Sinkstoffgehalt von anderen örtlich bedingten Einflüssen überlagert.

Die Abbildungen 5 bis 7 enthalten weitere Darstellungen des mittleren Sinkstoffgehalts in den Meßprofilen II bis IV aus dem Jahre 1949 in Beziehung zur mittleren Stromgeschwindigkeit. Abbildung 5 gibt die Sinkstoffmessungen in II/101 (= rechte Stromseite) und in II/102 (= linke Stromseite) wieder. Während in II/101 unten und in der Mitte der Sinkstoffgehalt bei Ebbe im Mittel größer ist als bei Flut bei gleichzeitig größerer Geschwindigkeit bei Ebbe, ist oben der Sinkstoffgehalt ausgeglichen. Auf der linken Stromseite (II/102) ist dagegen bei annähernd gleicher mittlerer Geschwindigkeit der Sinkstoffgehalt bei Ebbe im Mittel kleiner als bei Flut.

In den Meßprofilen III und IV (Abbildung 6) ist ein Unterschied im Sinkstoffgehalt Ebbe zu Flut in gleichem Maße nicht mehr erkennbar.

Abbildung 7 zeigt den Sinkstoffgehalt in der Meßstelle C a) abhängig von der mittleren

Beziehung zwischen mittl. Sinkstoffgehalt und mittl. Stromgeschwindigkeit [v]

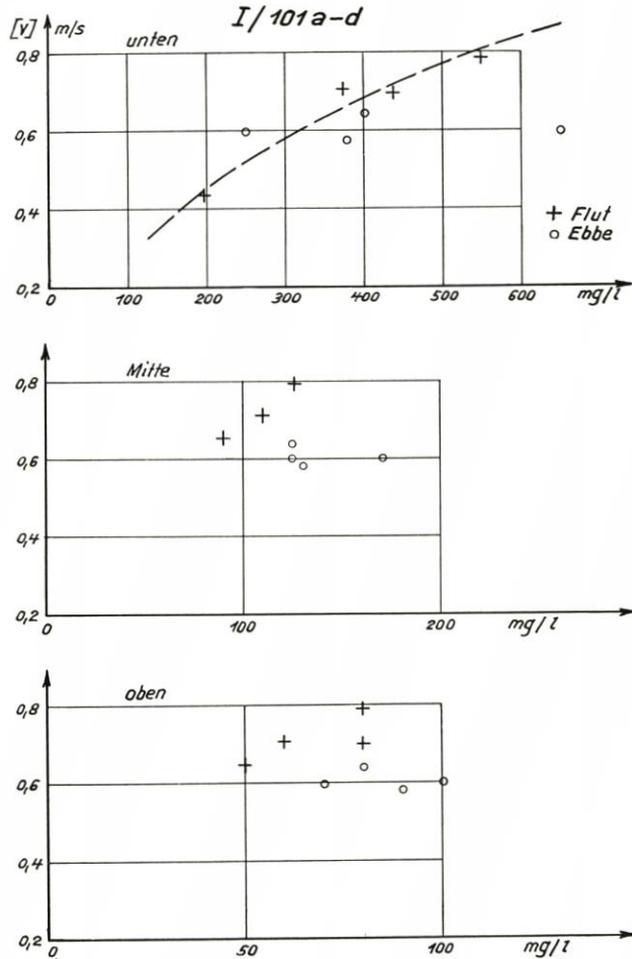


Abb. 4

Zahlentafel 2
Mittlerer Sinkstoffgehalt¹ an verschiedenen Meßtagen in II in mg/l

Messung		oben	Mitte	unten	ve vf	in cm/s	
II/ 2	E	83	172	555		85	
	F	117	178	504		73	
II/ 6	E	75	220	347		68	
	F	65	175	314		49	rechte Stromseite
II/10	E	80	199	606		79	
	F	183	262	488		62	
II/17	E	96	242	707		82	
	F	235	319	629		64	
II/ 3	E	59	91	134		60	
	F	163	282	606		71	
II/14	E	67	127	272		73	linke Stromseite
	F	96	199	477		93	
II/18	E	67	126	294		67	
	F	101	224	609		75	

¹ Mittelwert einer Tide.

Bemerkungen: E = Ebbmessung F = Flutmessung

Zahlentafel 3
Kornzusammensetzung der Sinkstoffe
Tide-Mittel aus 3 bis 7 Tiefenstufen getrennt nach Flut und Ebbe in %

Messung		Korndurchmesser m/m				ve vf/cm/s	Bemerkung
		< 0,02	0,02—0,05	0,05—0,1	> 0,1		
I/101 d ¹	F	51,9	21,8	21,0	5,3	65	rechte Stromseite
	E	48,7	30,6	11,1	9,6	60	
II/101 ¹	F	48,9	23,7	20,7	6,7	58	rechte Stromseite
	E	45,5	21,9	23,8	8,8	75	Mittel aus 101 a, c, e
II/102 ¹	F	46,6	21,4	12,9	19,1	62	linke Stromseite
	E	61,6	17,2	4,3	16,9	61	Mittel aus b, d, f,
III/101 ¹	F	41,9	24,0	11,1	23,0	62	rechte Stromseite
	E	47,4	23,1	12,0	17,5	80	Mittel aus 101 b, d
III/102 ²	F	31,6	15,2	11,3	41,9	67	linke Stromseite
	E	36,3	18,3	10,5	34,9	65	Mittel aus e und f
IV/103 d ²	F	21,3	9,7	6,3	62,7	48	rechte Stromseite
	E	17,3	15,7	7,7	59,3	58	
IV/105 c ²	F	16,6	11,7	9,8	61,9	65	linke Stromseite
	E	14,2	24,0	11,9	43,9	63	
VI/101 b ²	F	21,0	12,6	4,8	61,6	51	rechte Stromseite
	E	19,8	9,6	3,5	67,1	49	
VI/102 b ³	F	9,4	6,3	4,2	80,1	62	linke Stromseite
	E	13,7	13,4	4,1	68,8	50	

¹ 3 Stufen: 0,20; Mitte; oben.

² 4 Stufen: 0,20; 0,50; 1,0 m; oben.

³ 7 Stufen: 0,10; 0,20; 0,30; 0,50; 1,0 m; Mitte; oben.

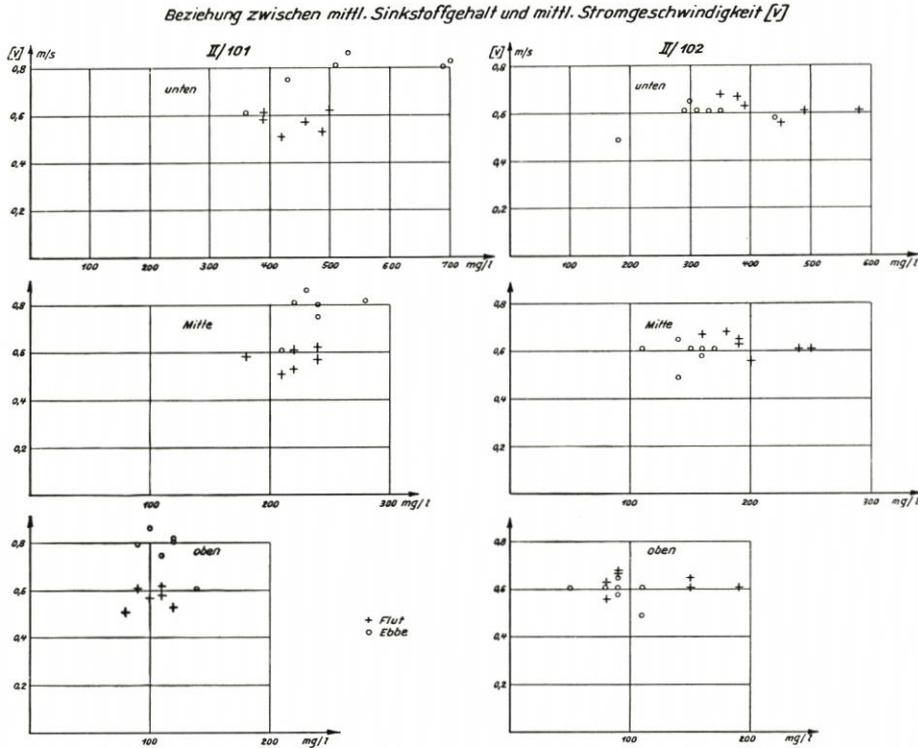


Abb. 5

Grundgeschwindigkeit [vg], b) abhängig von der mittleren Profilgeschwindigkeit [v]. Die Darstellung zeigt in Grundnähe (0,20—0,50 m über Grund) eine eindeutige Beziehung zwischen Sinkstoffgehalt und Geschwindigkeit.

3. Kornzusammensetzungen der Sinkstoffe, getrennt nach Ebbe und Flut (Zahlentafel 3)

Eingangs wurde bereits auf den maßgeblichen Einfluß des Korndurchmessers auf das Verhalten des Sinkstoffs im Verlauf der Tide hingewiesen. Für verschiedene Meßstellen wurde deshalb die Kornzusammensetzung der entnommenen Sinkstoffe getrennt nach Ebbe und Flut ermittelt. Die Zahlentafel 3 gibt das Ergebnis der Kornanalysen getrennt nach vier Fraktionen in Prozent der Gesamtmenge (Mittelwerte) wieder. Die Aufstellung zeigt überwiegend einen prozentual höheren Gehalt an Fein- und Mehlsand ($\geq 0,05$ mm) bei Flut als bei Ebbe, obwohl die mittlere Geschwindigkeit bei Ebbe zum Teil höher liegt als bei Flut (vgl. Messung III/101 und IV/103 d). Nur die Messung II/101 (rechte Stromseite) mit einer stark überwiegender Ebbe-geschwindigkeit $v_e = 75$ cm/s gegenüber $v_f = 58$ cm/s ergibt einen höheren Sandgehalt bei Ebbe, desgleichen die Messung VI/101b. Bei der letzten Messung sind die Geschwindigkeiten v_e und v_f nur wenig voneinander verschieden, aber auch der Unterschied im Sandgehalt ist relativ gering. Die bereits gemachte Feststellung, daß der Flutstrom eine relativ stärkere Räumkraft zu besitzen scheint als die Ebbe, wird auch hier wieder bestätigt. Ferner erkennt man, daß seawärts der Sandgehalt prozentual bedeutend zunimmt. Vergleichbar sind hierbei die Messungen mit den gleichen Tiefenstufen, so die Messungen I/101 bis III/101 und die Messungen III/102 bis

Beziehung zwischen mittl. Sinkstoffgehalt
und mittl. Stromgeschwindigkeit [v]

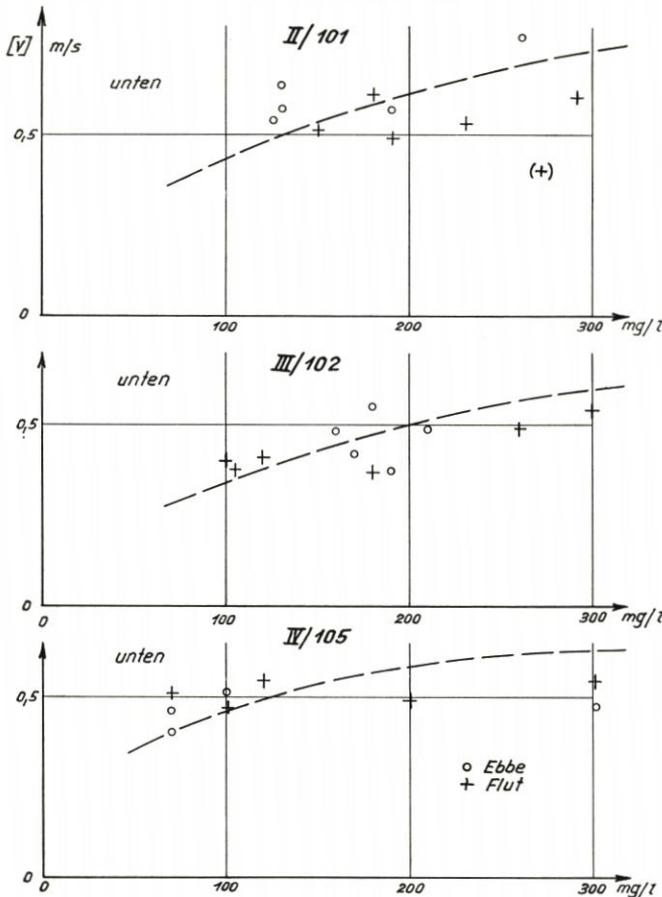


Abb. 6

VI/101b. Der Feinsandgehalt ($> 0,1$ mm) steigt bei den ersteren bei Flut von 5,3 auf 23 % und bei Ebbe von 9,6 auf 17,5 %, bei den letzteren bei Flut von 41,9 auf 61,6 % (in IV/103d) und bei Ebbe von 34,9 auf 67,1 %. Der besonders hohe Sandgehalt (in VI/102b) ist auf die größere Anzahl der Stufen in Nähe der Flußsohle zurückzuführen, die auch einen entsprechend höheren Gehalt an Sand ergeben muß.

Die jeweils in den einzelnen Meßstellen anfallenden Anteile an Fein- und Mehlsand ($\geq 0,05$ mm) sind, getrennt nach Flut und Ebbe und getrennt nach den Stromseiten, unten aufgeführt.

Auf der rechten Stromseite überwiegt der prozentuale Anteil an Fein- und Mehlsand bei Ebbe nur in II/101 (starkes Überwiegen der Ebbegeschwindigkeit v_e) und VI, im übrigen überwiegt der Sandanteil bei Flut. Auf der linken Stromseite dagegen überwiegt eindeutig der Fein- und Mehlsandanteil bei Flut denjenigen bei Ebbe in allen Profilen. Wenn aus den prozen-

Anteile an Feinsand ($> 0,05$ mm) in %

a) rechte Stromseite

Meßstelle	I/101 d	II/101	III/101	IV/103 d	VI/101 b
Flut (+)	26,3	27,4	34,1	69,0	66,4
Ebbe (—)	20,7	32,6	29,5	67,0	70,6
Unterschied	+ 5,6	— 5,2	+ 4,6	+ 2,0	— 4,2

b) linke Stromseite

Meßstelle	II/102	III/102	IV/105 c	VI/102 f
Flut (+)	32,0	53,2	71,2	84,3
Ebbe (—)	21,2	45,4	55,8	72,9
Unterschied	+ 10,8	+ 7,8	+ 15,9	+ 11,4

tualen Anteilen auch noch nicht unmittelbar auf die absoluten transportierten Sandmengen geschlossen werden kann, so ergibt die Gegenüberstellung doch schon eine wahrscheinliche Überlegenheit des Flutstroms bezüglich des Sandtransports. Es kann hieraus gefolgert werden, daß in den Profilen II bis VI vermutlich mehr Feinsand stromauf als stromab befördert wird.

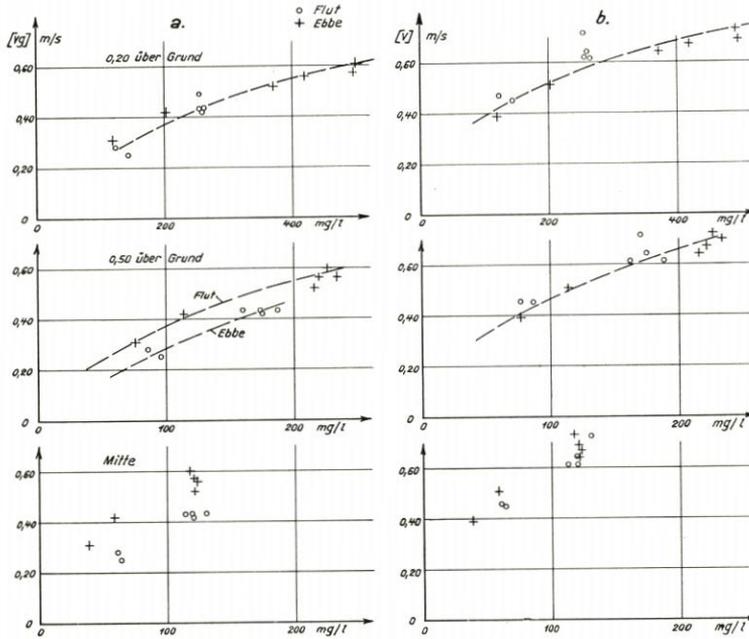


Abb. 7

- Beziehung zwischen mittl. Sinkstoffgehalt und
 a.) mittl. Grundgeschwindigkeit [vg] (= 0,5 m über Grund) und
 b.) mittl. Stromgeschwindigkeit [v], Meßstellen C/101 a—g

Enthielt Zahlentafel 3 den prozentualen Anteil der einzelnen Fraktionen, so ist in Zahlentafel 4 der mittlere Sinkstoffgehalt in mg/l getrennt nach Ebbe und Flut und nach vier Korngrößen für die Profile II und III zusammengestellt. In die letzte Spalte wurde außerdem die mittlere Grundgeschwindigkeit v_g (gemessen 0,5 m über Grund) eingetragen. Die Messungen II/101a und II/101e zeigen in allen Körnungen, die Messung II/101c in der Körnung $> 0,1$ mm größere Sinkstoffmengen bei Ebbe als bei Flut. Für die Sandkomponente ($\geq 0,05$ mm) ist dies zweifellos auf die höhere Grundgeschwindigkeit bei Ebbe (vgl. v_g) zurückzuführen. Bezüglich der Sinkstoffe ($\leq 0,05$ mm) ergibt sich der höhere Gehalt bei Ebbe aus der Lage der Meßstelle am unteren Ende der Brackwasserzone. Das mit Sinkstoffen angereicherte Wasser der Brackwasserzone durchströmt bei Ebbe das Profil. Bemerkenswert ist das Ansteigen der Fein- und Mehlsandmengen mit zunehmender Geschwindigkeit. So nimmt der Feinsandanteil z. B. in II/101 von 8 auf 38 mg/l (Ebbe) bzw. von 8 auf 19 mg/l (Flut) zu, der Mehlsandanteil entsprechend von 30 auf 104 mg/l (Ebbe) bzw. von 25 auf 55 mg/l (Flut), wobei die Messung II/101c mit 75 mg/l allerdings aus dem Rahmen fällt. Die mittleren Geschwindigkeiten steigen dabei bei Ebbe von 0,39 auf 0,60 m/s und bei Flut von 0,33 auf 0,51 m/s. Der mittlere Sandgehalt nimmt hiernach etwa mit der zweiten bis dritten Potenz der Grundgeschwindigkeit zu.

**Beziehung zwischen mittlerem Fein- und Mehlsandgehalt ($> 0,05 \text{ mm}$)
und mittl. Geschwindigkeit (gemessen 0,5 m über Grund)**
(vgl. Zahlentafel 4)

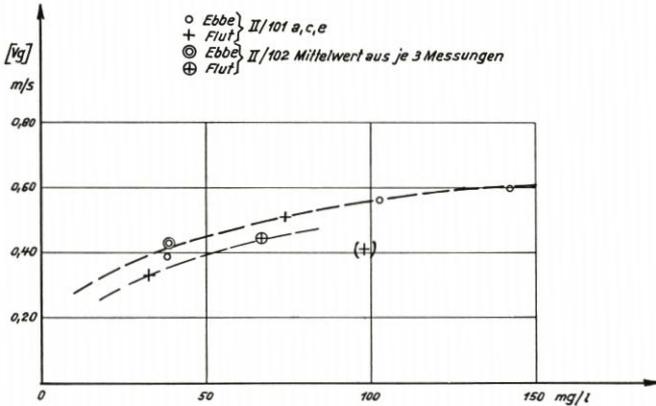


Abb. 8

Der Gehalt an Sinkstoffen ($< 0,02 \text{ mm}$) zeigt dagegen keine solche Abhängigkeit. Die Messung II/101a mit der kleinsten Geschwindigkeit zeigt etwa den gleichen Sinkstoffgehalt wie die Messung II/101e.

Die Messungen II/102b, d und f zeigen für die Körnungen ($> 0,05 \text{ mm}$) bei Flut größere Sinkstoffmengen als bei Ebbe, bei annähernd gleichen Geschwindigkeiten. Nur die feinsten Schwebstoffe ($< 0,02 \text{ mm}$) überwiegen auch hier bei Ebbe. Das Ansteigen der Feinsandmengen mit zunehmender Geschwindigkeit ist in II/102 nicht so eindeutig wie in II/101. Die

Geschwindigkeitsunterschiede sind allerdings auch weniger ausgeprägt.

Die Messungen in III zeigen verhältnismäßig geringere Sinkstoffmengen als in II. Die Verringerung der Sinkstoffe ($< 0,05 \text{ mm}$) wird auf die größere Entfernung von der Brackwasserzone, sowie auf den Einfluß des Dollarts zurückzuführen sein. Die im Vergleich zur Geschwindigkeit ebenfalls geringeren Fein- und Mehlsandmengen lassen sich mit der seewärts zunehmenden Korngröße erklären.

Zahlentafel 4
Mittlerer Sinkstoffgehalt¹ getrennt nach Korngrößen
und nach Ebbe und Flut in mg/l

Messung		$< 0,02$	$0,02 - 0,05$	$0,05 - 0,1$	$> 0,1$	[vg] ² cm/s
II/101 a	E	138	55	30	8	39
	F	112	43	25	8	(33)
II/101 c	E	97	49	72	31	56
	F	111	54	75	23	41
II/101 e	E	132	77	104	38	60
	F	124	76	55	19	51
II/102 b	E	167	38	4	7	39
	F	133	38	18	16	38
II/102 d	E	102	33	6	56	(44)
	F	85	36	24	63	45
II/102 f	E	92	29	14	31	46
	F	76	37	43	38	48
III/101 b	E	66	28	10	11	64
	F	63	32	11	30	53
III/101 d	E	40	24	16	27	68
	F	48	32	18	30	41

¹ Tidemittel aus 3 Stufen: 0,20 m; Mitte; oben.

² Mittlere Tidengeschwindigkeit, gemessen 0,5 m über Grund.

In Abbildung 8 wurden die mittleren Fein- und Mehlsandgehalte ($\geq 0,05$ mm) für die Meßstellen in II (6 Messungen) getrennt nach Ebbe und Flut in Abhängigkeit von der mittleren Geschwindigkeit [vg] (0,5 m über Grund) graphisch aufgetragen. Die Zunahme des Sandgehalts mit der Geschwindigkeit ist ersichtlich.

4. Sinkstoffverteilung in der Lotrechten, Kornzusammensetzung

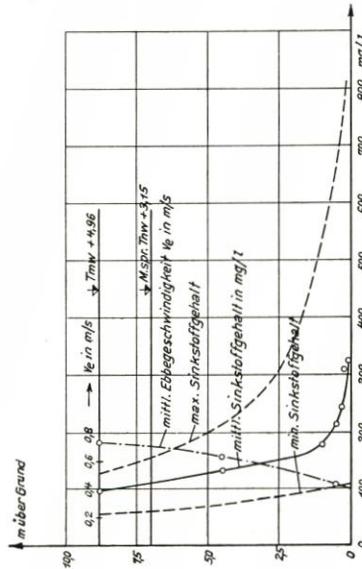
Zur Feststellung der Verteilung der Sinkstoffe in der Lotrechten wurden an einigen Meßstellen Sinkstoffproben in bis zu acht Tiefenstufen entnommen. Die Messungen wurden wieder in Zeitabständen von je 20' ausgeführt und jeweils über eine Flut- bzw. Ebbe-Tide ausgedehnt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 9 dargestellt. Und zwar wurde der mittlere Sinkstoffgehalt während einer Flut- bzw. Ebbe-Tide in den Meßstellen C, Y und Z am Meßtage in mg/l wiedergegeben. Gestrichelt wurden außerdem die Linien der minimalen und maximalen Gehalte, wie sie sich während der Messung ergaben, eingetragen.

Die Sinkstoffgehaltskurven aller drei Meßstellen zeigen eine stetige Zunahme des Sinkstoffgehalts mit der Wassertiefe. Der mittlere Gehalt 10 cm über Grund schwankt dabei zwischen 468 mg/l an der Meßstelle Y (Flutmessung) und 269 mg/l an der Meßstelle Z (Ebbemessung)! An der Oberfläche ergeben sich Werte von 66 mg/l an der Meßstelle Y gegenüber 61 mg/l an der Meßstelle Z und 95 mg/l an der Meßstelle C. Da letztere Meßstelle bereits im Emders Fahrwasser

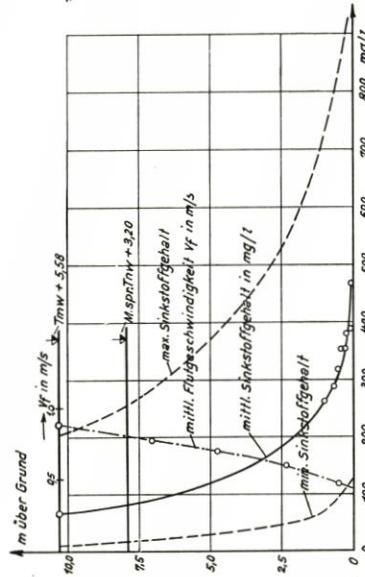
Sinkstoffverteilung in der Lotrechten

(mittl. Sinkstoffgehalt während einer Flut- bzw. Ebbe-tide in mg/l)

c/101g vom 24.9.1949 (Ebbemessung)



y" Messung vom 10.8.1949 (Flutmessung)



z/101 vom 27.7.1949 (Ebbemessung)

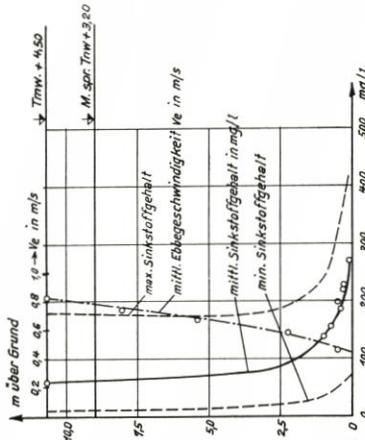
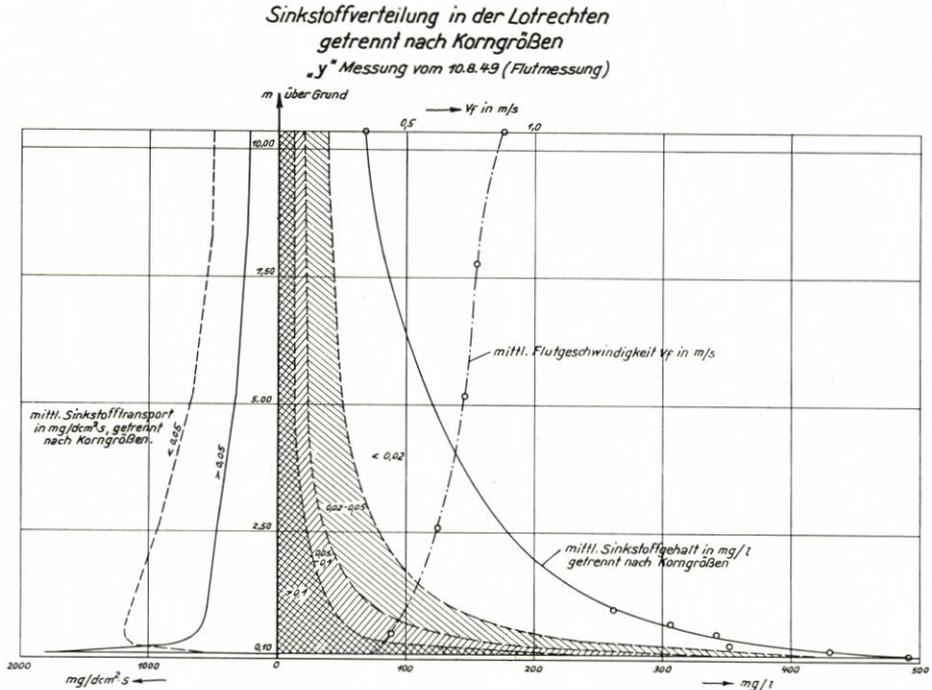


Abb. 9

liegt, und damit außerhalb des Bereichs des Dollarts, macht sich hier der größere Gehalt an Sinkstoffen innerhalb der Brackwasserzone der Ems deutlich bemerkbar. Auch die verhältnismäßig hohen Werte der minimalen Gehalte in C deuten auf einen hohen Gehalt der feinsten Sinkstoffe hin. Im Verlauf der Tide wurden in Y (Flutmessung) 10 cm über Grund bis zu 929 mg/l und an der Oberfläche bis zu 214 mg/l, in Z (Ebbmessung) 10 cm über Grund bis 416 mg/l und an der Oberfläche bis zu 180 mg/l gemessen.



Der höhere Sinkstoffgehalt der Y-Messung ist abgesehen von lokalen und zeitlich bedingten Umständen auch auf die höhere Tide während der Messung — sie lag 0,54 m über MThw — zurückzuführen. Die C-Messung wurde etwa bei MThw und die Z-Messung bei einer um 0,14 m über MThw liegenden Tide ausgeführt.

Um einen Einblick in die Zusammensetzung der in den einzelnen Tiefenstufen transportierten Sinkstoffe zu erhalten, wurden die Sinkstoffproben der „Y“- und „Z“-Messungen nach Tiefenstufen getrennt auf ihre Kornzusammensetzung hin untersucht. Das Ergebnis der Kornanalysen der Y-Messung ist auf Abbildung 10 graphisch aufgetragen.

Der mittlere Gehalt an Feinsand ($> 0,1$ mm) nimmt von 225 mg/l : 10 cm über Grund auf rund 50 mg/l : 1,0 m über Grund stark ab, beträgt aber selbst an der Oberfläche immerhin noch 13 mg/l. Der mittlere Gehalt an Mehlsand (0,05—0,1 mm) nimmt von 115 mg/l : 10 cm über Grund auf 30 mg/l : 1,0 m über Grund und auf 8 mg/l an der Oberfläche ab. Der Sinkstoffgehalt ($< 0,05$ mm) nimmt von 151 mg/l : 10 cm über Grund auf rund 140 mg/l : 0,3 m über Grund zu, um dann bis auf 47 mg/l an der Oberfläche wieder abzunehmen. Der Prozentgehalt der einzelnen Fraktionen beträgt:

Korndurchmesser mm	0,1—0,25	0,05—0,1	0,02—0,05	< 0,02
Oberfläche in %	19,3	11,8	27,3	41,6
0,10 m über Grund in %	45,8	23,4	13,1	17,7

Während der Feinsandgehalt hiernach von 19,3 % an der Oberfläche auf 45,8 % : 0,10 m über Grund zunimmt, nimmt der Sinkstoffgehalt (< 0,02 mm) von 41 % oben auf 17,70 % :

Sinkstoffverteilung in der Lotrechten, getrennt nach Korngrößen
 Messung Z/101 vom 27. 7. 1949 (Ebbmessung)

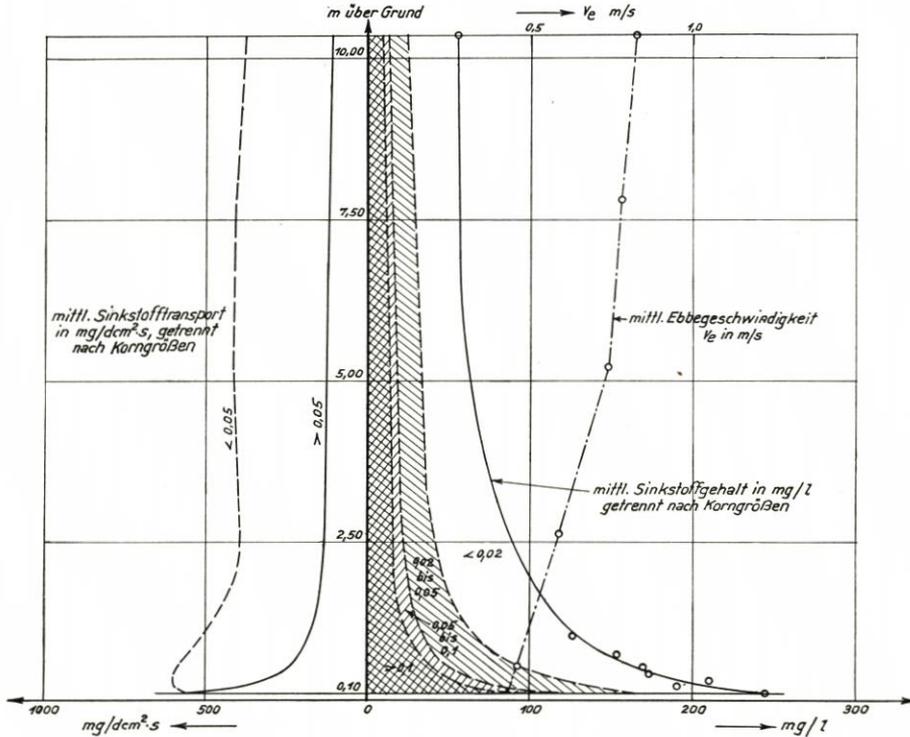


Abb. 11

0,10 m über Grund ab. Die zunehmende Vergrößerung der Sinkstoffe nach unten kommt hier klar zum Ausdruck¹⁾.

Abbildung 11 zeigt in gleicher Weise die Sinkstoffverteilung in der Lotrechten, getrennt nach vier Korngrößen, für die Meßstelle Z 101 (Ebbmessung). Der mittlere Gehalt an Feinsand nimmt von 98 mg/l : 0,10 m über Grund auf 24 mg/l : 1,0 m über Grund bzw. 8 mg/l an der Oberfläche ab. Er ist demnach bedeutend geringer als oben in Y (Flutmessung). Der mittlere Gehalt an Mehlsand ist mit 19 mg/l : 10 cm über Grund, 9 mg/l : 1,0 m über Grund und 4 mg/l

¹⁾ VAN VEEN hat aus einer Anzahl von Messungen im „Het Vlie“, bei denen gleichzeitig in 10, 30, 50 und 70 cm über dem Boden Sinkstoffproben entnommen wurden, das Verhältnis der Sandgehalte in diesen Höhen im Mittel zu 100 : 54 : 34 : 28 gefunden. Aus der Darstellung Abbildung 10 ergeben sich für den Fein- und Mehlsand (> 0,05 mm) entsprechende Verhältniszahlen von 100 : 51 : 37 : 29, also ähnliche Zahlen, wie sie VAN VEEN festgestellt hat.

an der Oberfläche verhältnismäßig gering. Der Sinkstoffgehalt ($< 0,05$ mm) nimmt von 128 mg/l : 10 cm über Grund auf 43 mg/l an der Oberfläche ab. Der Prozentgehalt der einzelnen Fraktionen beträgt:

Korndurchmesser mm	0,1—0,25	0,05—0,1	0,02—0,05	$< 0,02$
Oberfläche in %	15,1	7,0	21,7	56,2
0,10 m über Grund in %	40,0	7,7	16,7	35,6

Auch hier zeigt sich eindeutig die Vergrößerung der Sinkstoffe nach dem Grunde zu. Bemerkenswert erscheint der hohe Anteil an feinsten Sinkstoffen ($< 0,02$ mm) 0,10 m über Grund.

Einen Vergleich der Sandgehalte ($> 0,1$ mm) an der Oberfläche von drei weiteren Meßstellen mit denen der Meßstellen Y und Z gibt die nachfolgende Zusammenstellung:

Mittlerer Sandgehalt an der Oberfläche ($> 0,1$ mm)

Meßstelle	mg/l	Windrichtung und Stärke	Unterschied gegen MThw	Meßdauer
III/101 c	3,0	SW 3/S 3	— 0,19 m	volle Tide
III/101 e	8,5	SW 5/S 2	— 0,05 m	" "
U/101	5,9	—	— 0,08 m	" "
Y	12,7	SW 3	+ 0,54 m	Flutmessung
Z/101	8,0	—	+ 0,14 m	Ebbmessung

Der höhere Sandgehalt bei der Y-Messung wird einerseits auf die um 0,54 m erhöhte Tide zurückzuführen sein — die übrigen Messungen wurden bei Tiden ausgeführt, die bis zu 0,19 m unter MThw lagen —, andererseits wird aber auch der Umstand eine Rolle spielen, daß es sich bei Y um eine reine Flutmessung handelt. Die Zunahme des Sandgehalts an der Oberfläche mit erhöhter Tide ist beachtlich und läßt auf eine zunehmende Turbulenz schließen. Es darf als unzweifelhaft angesehen werden, daß bei Sturmfluten bedeutende Sandmengen bis an die Oberfläche gelangen.

B. Geschiebemessungen mit der „LÜDERSchen“ Sandfalle

Die unmittelbar über der Sohle sich abspielenden Vorgänge konnten, wie bereits bemerkt, durch die Sinkstoffentnahme mit den zur Verwendung gekommenen Wasserschöpfern nicht erfaßt werden. Um jedoch einen Einblick in die unmittelbar über der Sohle stattfindende Sandbewegung zu gewinnen, wurden parallel zu den Sinkstoffentnahmen auch Geschiebemessungen mit der Sandfalle durchgeführt. Sie sollten damit das durch die Sinkstoffmessungen bereits gewonnene Bild über den Sandtransport ergänzen. Geschiebemessungen wurden in den Profilen I bis VI durchgeführt. Außerdem fand eine Reihe von Sondermessungen statt. Die Sandfalle wurde hierbei jeweils 5 Minuten lang in etwa 30 Minuten Zeitabstand eingesetzt. Grundsätzlich wurden die Messungen über eine ganze Tide ausgedehnt.

1. Einige charakteristische Ergebnisse

Die Abbildungen 12 a—c zeigen einige charakteristische Meßergebnisse aus den Profilen II, III und IV. Aufgetragen wurden oben die gleichzeitig gemessenen Stromgeschwindigkeiten (gemessen 0,5 m über Grund), unten die Fangergebnisse in $\text{cm}^3/5$ Minuten. Die angegebenen Mengen

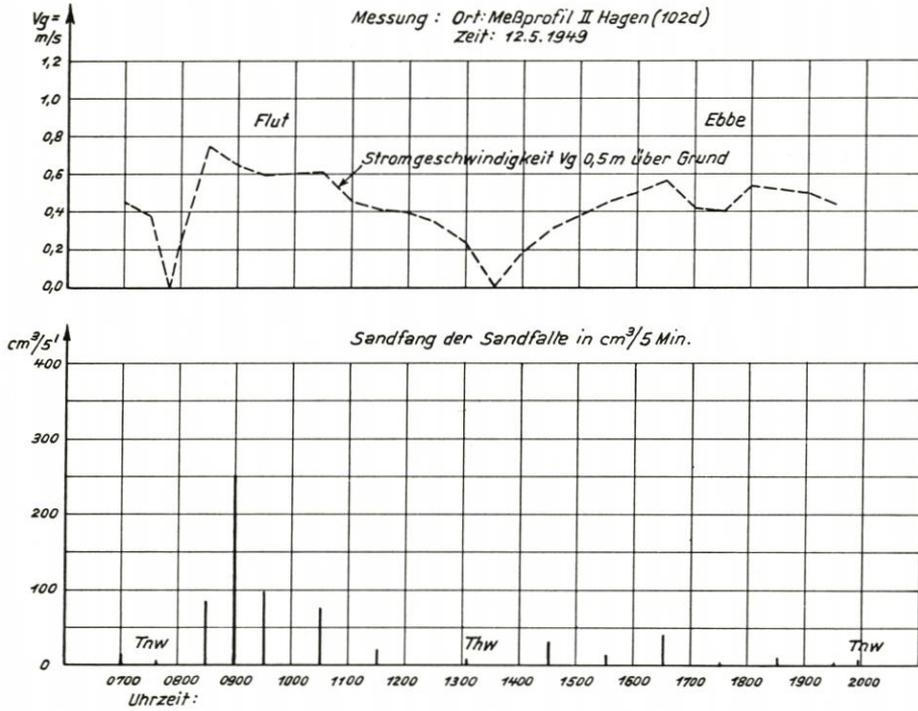


Abb. 12a. Geschiebmessungen mit der Sandfalle im Meßprofil II

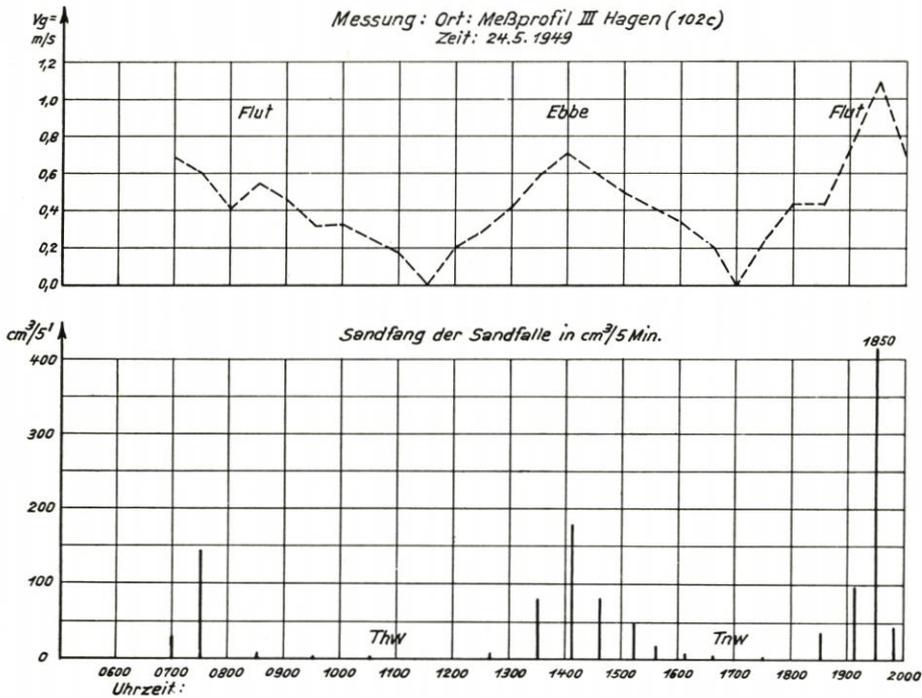


Abb. 12b. Geschiebmessungen mit der Sandfalle im Meßprofil III

(Fangergebnisse) beziehen sich ausschließlich auf Sand, der sich in den für die Mengenbestimmung benutzten Meßgläsern deutlich von dem gleichzeitig mitgefangenen Schlick abgrenzte. Eine Auswertung der Schlickmengen, die im allgemeinen nur gering ($\leq 10 \text{ cm}^3$) waren, ist unterblieben. Sie wäre auch wertlos, da das Wasser innerhalb der Falle ja nicht zur Ruhe kommt. Die mitgeführten feineren Sinkstoffe treten daher größtenteils aus den Austrittsöffnungen der Sandfalle wieder aus. Anders steht es dagegen mit dem Sand. Es kann angenommen werden, daß der Sand mit einem Korndurchmesser $\geq 0,1 \text{ mm}$ im wesentlichen in der Sandfalle tatsächlich zurückgehalten wurde. Vergleichende Kornanalysen zwischen dem jeweils anstehenden Bodensediment und dem Sandfallenmaterial bestätigen dies.

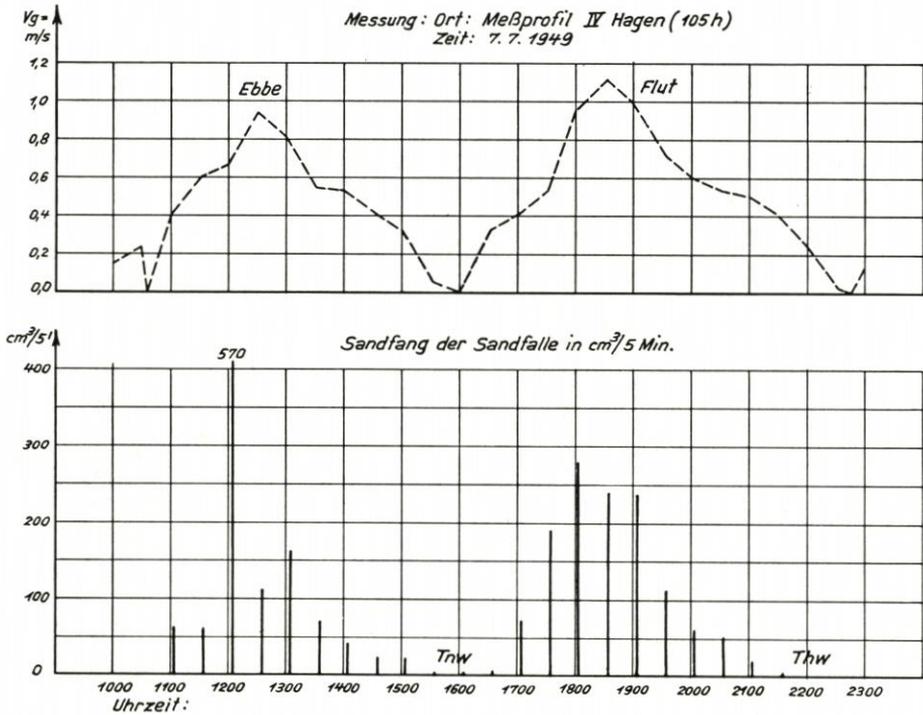


Abb. 12c. Geschiebemessungen mit der Sandfalle im Meßprofil IV

2. Abhängigkeit des Sandtransports auf der Sohle von der Stromgeschwindigkeit, Grenzgeschwindigkeit

Die Abbildungen 13 bis 15 geben die Fangergebnisse in den Meßprofilen II und VI sowie in den Meßstellen Q, N²) und Z, abhängig von der Stromgeschwindigkeit (0,5 m über Grund) wieder. Die Messungen wurden an vier bis sieben aufeinanderfolgenden Tagen, jeweils an ein und derselben Stelle und über eine volle Tide durchgeführt. Die Flut- und Ebbmessungen wurden hierbei durch besondere Signaturen gekennzeichnet. Ein wesentlicher Unterschied zwischen Flut- und Ebbmessung ist aber nicht erkennbar. Eine weitere Unterscheidung zwischen den Meßergebnissen bei steigendem und fallendem Wasser ist unterblieben. Die große Streuung der Meßergebnisse ließ dies als zwecklos erscheinen. Wenn die Auftragungen auch erhebliche Streuungen zeigen — das trifft insbesondere für die Außengebiete der Ems (Profil VI) zu —, so ist die Zunahme der Sandbewegung mit der Stromgeschwindigkeit doch unverkennbar. Die

²) Die Meßstellen Q und N liegen zwischen den Profilen II und III in der Nähe der Meßstelle Z.

starke Streuung ist auf die Unvollkommenheit des Geräts und die Welligkeit der Sohle (Riffelbildung) zurückzuführen, zum Teil wohl aber auch darauf, daß die Stromgeschwindigkeit nicht an der Entnahmestelle selbst gemessen werden konnte, sondern — bedingt durch die Anordnung der Meßgeräte — in einem Abstand von 5 bis 10 m von der Entnahmestelle entfernt. Außerdem wurde die Stromgeschwindigkeit nicht unmittelbar an der Sohle, sondern etwa 0,5 m über Sohle gemessen. Es kommt hinzu, daß die Sandbewegung wahrscheinlich nicht kontinuierlich sich steigend, sondern, wie aus Modellversuchen bekannt, mehr oder weniger stoßweise vor sich geht. Hierbei entstehen Unregelmäßigkeiten, die nur durch eine genügend große Anzahl von Messungen ausgeglichen werden können. Unter der Voraussetzung, daß die einzelnen Meßergebnisse gleichwertig sind, läßt sich im Wege der Ausgleichsrechnung eine Beziehung zwischen dem Sandfang G_s und der Geschwindigkeit v ableiten. G_s wächst offenbar mit einer Potenz der

Abhängigkeit des Sandfanges (Lüders'sche Sandfalle) von der Stromgeschwindigkeit

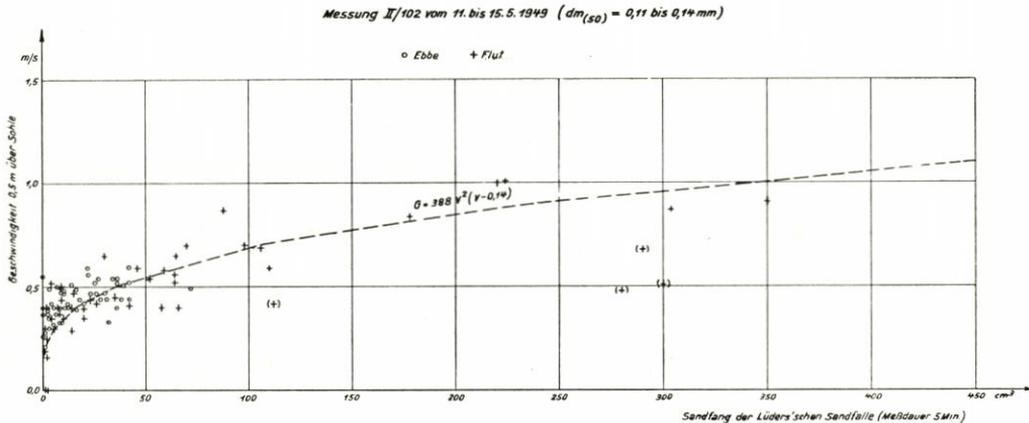


Abb. 13

Stromgeschwindigkeit, die größer als 2 ist. Wird weiter berücksichtigt, daß G_s für $v = v_0$ (Grenzgeschwindigkeit) = 0 werden muß, so kann in erster Annäherung geschrieben werden: $G_s = C \cdot v^\alpha (1 - v_0/v)$, worin C und α zwei Konstante und v_0 die Grenzgeschwindigkeit bedeuten. Für die Meßstelle II/102 (Abb. 13) wurden die Meßergebnisse unter Ausschaltung der offensichtlich herausfallenden Werte (eingeklammert) entsprechend ausgewertet. Mit $\alpha = 3$ (angenommen) errechneten sich die übrigen Konstanten — nach der Methode der kleinsten Quadrate — zu: $C = 388$ und $v_0 = 0,14$ m/s, wobei sich G_s in $\text{cm}^3/5$ Minuten ergibt. Die entsprechende Ausgleichskurve wurde in Abbildung 13 eingetragen.

Dieselbe Kurve wurde gleichfalls in die Abbildungen 14 und 15 eingetragen. In der Meßstelle VI (Abb. 14) liegen die Meßergebnisse zum größeren Teil darüber, d. h. die Geschiebemengen sind im Mittel kleiner als der eingezeichneten Schwerlinie entsprechen würde. Mit stromab zunehmendem Korndurchmesser nimmt der Geschiebetrieb entsprechend ab. Im Gebiet der Messungen Q/101, N/102 und Z 102 (Abb. 15) liegen offenbar besondere Verhältnisse vor. Die Geschiebemengen sind bedeutend größer als in II. Die Messungen wurden auf einem besonders starken Umlagerungen unterworfenen Gebiet der Mittelplate (Fein- und Mehlsand) durchgeführt.

Die Grenzgeschwindigkeit v_0 ist in erster Linie von den Eigenschaften des Geschiebes, wie Korndurchmesser, Kornform, spezifischem Gewicht, Schlickgehalt, ferner von der jeweils herrschenden Turbulenz, außerdem aber auch von der Temperatur und Dichte des Wassers abhängig. Bei Mischsedimenten, mit denen man es meistens in mehr oder minder großem Umfang

zu tun hat, ist v_0 veränderlich. Die Grenzgeschwindigkeit wird in diesem Fall auf den maßgebenden Korndurchmesser (d) bezogen, der von verschiedenen Verfassern verschieden definiert wird. MEYER-PETER setzt z. B. als Wert für (d) den Durchmesser der Siebmaschen an, die 35 0/0 des Sandes durchlassen. Andere nehmen hierfür den mittleren Durchmesser dm (50 0/0).

Abhängigkeit des Sandfanges (Lüders'sche Sandfalle) von der Stromgeschwindigkeit

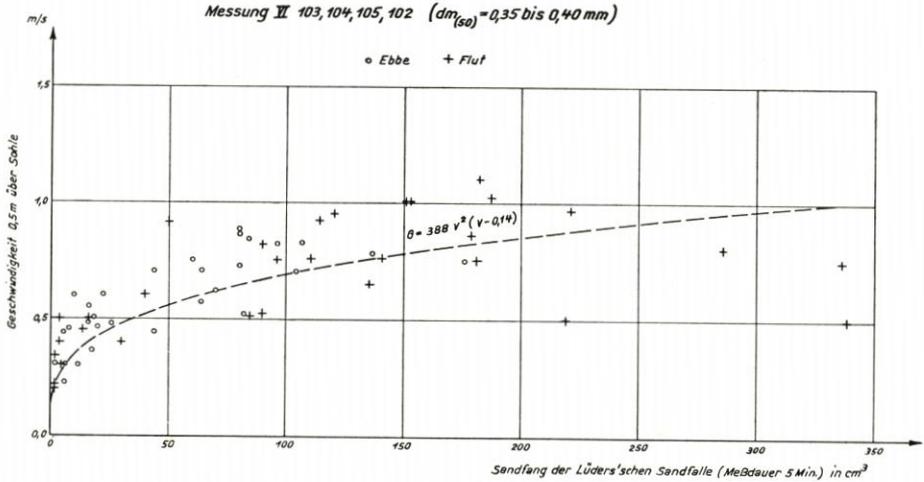


Abb. 14

Abhängigkeit des Sandfanges (Lüders'sche Sandfalle) von der Stromgeschwindigkeit

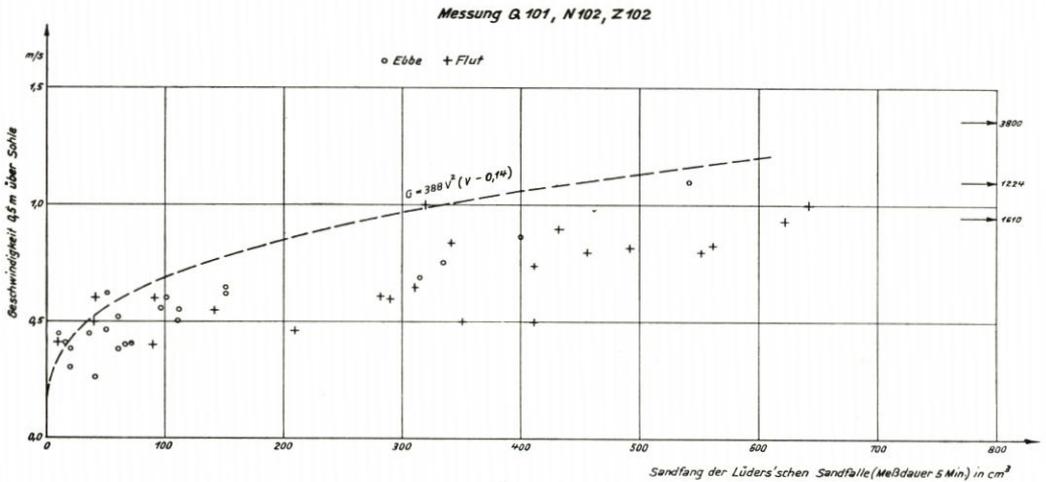


Abb. 15

VAN VEEN gibt in grober Annäherung für reinen Sand von 0,50 mm Korndurchmesser Grenzgeschwindigkeiten von 30 bis 50 cm/s an, wobei die Geschwindigkeit 15 cm über Boden gemessen wurde. Bei dem feineren Sediment der Ems ist die Grenzgeschwindigkeit kleiner. Sie beträgt bei einem mittleren Korndurchmesser des bewegten Geschiebes dm (50 0/0) = 0,11 bis 0,14 mm etwa 0,14 m/s (0,50 m über Grund) und steigt bei einem mittleren dm (50 0/0) = 0,35 bis 0,40 mm auf etwa 0,20 m/s (0,50 m über Grund).

3. Mittlerer Korndurchmesser und Kornzusammensetzung des Bodensediments im Vergleich zum Sediment der Sandfallen

Drei mit dem Bodengreifer in II/102 entnommene Proben ergaben mittlere Korndurchmesser [dm (50 %)] von 0,18, 0,19 und 0,14 mm, eine in III/102 entnommene Bodenprobe einen mittleren Korndurchmesser von 0,23 mm. Die Proben enthielten dabei bis zu 12 % Mehlsand ($\leq 0,1$ mm). Grober Sand ($\geq 0,5$ mm) trat nur in einer Probe in geringer Menge (4 %) auf. Sandfallenproben wurden in den Meßprofilen II, III und VI sowohl bei Flut als auch bei Ebbe entnommen. In den Zahlentafeln 5 und 6 sind die Siebergebnisse der Bodenproben sowie der Sandfallenproben der Messung II/102 d und III/102 d mit ihren mittleren Korndurchmessern und den gleichzeitig gemessenen Stromgeschwindigkeiten (0,5 m über Sohle) zusammengestellt.

Zahlentafel 5
Kornanalyse der Bodenproben und der Sandfallenmessungen
II/102 d (12. 5. 1949) (in %)

Nr.	Korndurchmesser mm					dm mm	vg ¹ cm/s	Sandfang cm ³ /5 Min.
	< 0,1	0,1—0,15	0,15—0,20	0,20—0,25	> 0,25			
Flutmessung								
S 4	12	48	28	7	5	0,145	74	86
S 5	11	49	22	6	12	0,14	64	(250)
S 8	18	32	25	9	16	0,15	61	76
S 11	37	45	8	3	7	0,11	40	10
Ebbmessung								
S 19	20	35	21	7	17	0,14	52	36
G a) ²	10	19	34	19	18	0,185		
G b) ²	4	16	35	22	23	0,195		
G c) ²	12	54	20	6	8	0,140		

¹ vg = Grundgeschwindigkeit, gemessen 0,5 m über Grund.

² Grundproben, entnommen in II/102 am 12. 5. 1949.

Die Flutproben S 4 und S 8 (Zahlentafel 5) zeigen bei abnehmender Geschwindigkeit (von 74 auf 61 cm/s) einen mittleren Korndurchmesser zwischen 0,14 und 0,15 mm. Erst bei weiterer Abnahme der Geschwindigkeit auf 40 cm/s (S 11) verringert sich der mittlere Korndurchmesser auf 0,11 mm. Die Ebbmessung S 19 ergibt bei einer Geschwindigkeit von 52 cm/s dm = 0,14 mm. Die Flutproben S 1 bis S 3 (Zahlentafel 6) haben bei zunehmender Geschwindigkeit einen mittleren Korndurchmesser dm = 0,19 bis 0,20 mm, während die Proben S 17 bis S 23 (Ebbmessung) bei einem mittleren Korndurchmesser dm = 0,13 bis 0,16 mm trotz zum Teil größerer Geschwindigkeiten wesentlich feiner waren.

Zahlentafel 7 enthält eine Probenreihe aus dem Meßprofil VI. Die Kornzusammensetzung der Proben ist bedeutend gröber als in den weiter oberhalb gelegenen Meßprofilen II und III. Der mittlere Korndurchmesser der Proben schwankt hier zwischen 0,30 und 0,40 mm. Bei bereits wieder abnehmender Geschwindigkeit ist noch zunehmende Vergrößerung des Geschiebes bis etwa zwei Stunden nach Ke (= Kenterung bei Ebbe) festzustellen. Diese Erscheinung ist vermutlich auf die Gezeitschichtung des Sediments zurückzuführen. Jede Tide wird eine Sortierung des Sediments hervorrufen derart, daß bei abnehmender Geschwindigkeit zuerst das gröbere und später das feinere Sediment zur Ablagerung kommt. Mit wieder ansteigender Geschwindigkeit wird dann zunächst das zuletzt abgelagerte feinere und erst später das gröbere

Sediment aufgearbeitet. Dabei kann es bei verhältnismäßig kurzem ansteigenden Ast der Geschwindigkeitskurve, wie er sich bei Flut häufig zeigt, vorkommen, daß die größeren Sedimente erst zur Aufarbeitung kommen, wenn das Maximum der Geschwindigkeit bereits überschritten ist. Voraussetzung ist nur, daß die Geschwindigkeit noch groß genug ist, um das gröbere Material in Bewegung zu setzen. Erst bei noch weiterem Abfall der Geschwindigkeit muß dann wieder infolge Ausfällung der größeren Bestandteile eine Verfeinerung des in Bewegung befindlichen Sediments eintreten.

Die Kornzusammensetzung des Sandfalleninhalts unterscheidet sich, wie ein Vergleich mit den Kornanalysen entsprechender Bodenproben gezeigt hat, nur wenig von diesen. Sie ist allgemein etwas feiner als das Grundsediment.

Zahlentafel 6
Kornanalyse der Bodenproben und der Sandfallenmessungen
III/102 d (25. 5. 1949) (in %)o

Nr.	Korndurchmesser mm					dm mm	vg ¹ cm/s	Sandfang cm ³ /5 Min.
	< 0,1	0,1—0,15	0,15—0,20	0,20—0,25	> 0,25			
Flutmessung								
S 1	5	13	56	9	17	0,19	49	74
S 2	2	13	34	30	21	0,20	54	152
S 3	2	14	37	26	21	0,20	75	172
S 4	9	22	44	6	19	0,17	49	82
S 5/7	8	18	36	12	26	0,18	32	73
Ebbmessung								
S 17	4	22	59	8	7	0,16	80	770
S 18/20	8	68	17	3	4	0,13	56	482 ²
S 22/23	4	44	34	9	9	0,16	59	167 ³
G III/102 e ⁴	2	7	18	54	19	0,23	—	—

¹ vg = Grundgeschwindigkeit, gemessen 0,5 m über Grund.

² Drei Proben zusammengeschüttet.

³ Zwei Proben zusammengeschüttet.

⁴ Grundprobe, entnommen in III/102 am 26. 5. 1949.

Zahlentafel 7
Kornanalyse der Bodenproben und der Sandfallenmessungen
(Flutmessung) VI/102 (13. 10. 1949) (in %)o

Zeit der Messung ¹	Korndurchmesser mm					dm mm	vg ² cm/s	Sandfang cm ³ /5 Min.
	0,05—0,1	0,1—0,2	0,2—0,25	0,25—0,5	> 0,5			
10 ⁰⁰	2,6	16,1	15,9	63,0	2,4	0,36	0,82	90
10 ³⁰	0,3	12,7	6,9	77,0	3,1	0,37	0,96	220
11 ⁰⁰	0,3	7,4	7,1	79,0	6,2	0,40	0,75	180
11 ³⁰	1,1	23,4	12,3	61,4	1,8	0,30	0,64	136
12 ⁰⁰	1,4	12,2	13,1	69,6	3,7	0,33	0,60	40
Grundprobe (38 d — 4 a)	1,5	16,5	3	53	26	0,42	—	—

¹ Ke = 90⁴.

² vg = Grundgeschwindigkeit, gemessen 0,5 m über Grund.

In der Stromrinne ist eine Zunahme der mittleren Korndurchmesser von $dm = 0,14$ bis $0,20$ mm in II, auf $0,30$ bis $0,40$ mm in VI festzustellen. Das Sediment wird nach See zu gröber.

C. Der Sinkstofftransport

1. Beziehung zwischen mittlerem Sinkstofftransport und Stromgeschwindigkeit

Der Sinkstofftransport ergibt sich aus dem Sinkstoffgehalt multipliziert mit der Stromgeschwindigkeit. Der Sinkstoffgehalt läßt sich nach den Ausführungen auf Seite 75 nur insoweit zur Stromgeschwindigkeit in Beziehung setzen, als es sich um sandiges Sediment ($\sim \geq 0,05$ mm) handelt. Für den sandigen Anteil wurde eine Zunahme des Sinkstoffgehalts mit der zweiten bis dritten Potenz der Stromgeschwindigkeit bereits festgestellt. Berücksichtigt man, daß die Aufarbeitung des Sediments erst bei der Grenzgeschwindigkeit v_0 — abhängig unter anderem von dem mittleren Korndurchmesser dm — beginnt, so läßt sich für den Sinkstoffgehalt S in erster Annäherung anschreiben:

$$S = C \cdot v^\alpha \left(1 - \frac{v_0}{v}\right) \text{ in g/dcm}^3 \quad (1)$$

S mit der jeweiligen Stromgeschwindigkeit multipliziert, ergibt dann den Sinkstofftransport S_T

$$S_T = C \cdot v^{\alpha+1} \left(1 - \frac{v_0}{v}\right) \text{ in g/dcm}^2 \cdot \text{sec} \quad (2)$$

Hieraus erhält man den mittleren Sinkstofftransport während einer Tide durch Summierung und Mittelung:

$$S_{Tm} = C \cdot \frac{\sum_1^n v^{\alpha+1} \left(1 - \frac{v_0}{v}\right)}{n} \text{ in g/dcm}^2 \cdot \text{sec} \quad (3)$$

worin n die Anzahl der Messungen während einer Tide ist, v die jeweils gemessene Stromgeschwindigkeit, v_0 die Grenzgeschwindigkeit und C und α von örtlichen Bedingungen abhängende Konstante darstellen.

Für die jeweils eine volle Tide umfassenden Messungen II/2, 6, 10, 17, C/101 a bis g und II/101 a bis g wurden für $\alpha = 2$ (angenommen) die Ausdrücke $\sum vg^3 \cdot (1 - v_0/vg)$, worin vg die Grundgeschwindigkeit $0,5$ m über Grund (in Tide/12 gemessen) und v_0 die Grenzgeschwindigkeit ($= 0,15$ m/s) bedeuten, gebildet und zum jeweils gemessenen mittleren Sinkstofftransport ($0,20$ m über Grund) in Beziehung gebracht. Die Darstellung auf Abbildung 16 zeigt eine annähernd gradlinige Abhängigkeit des mittleren Sinkstofftransports von dem obigen Ausdruck. Die eingetragenen Schwerlinien gehen aber nicht durch den Koordinatennullpunkt, wie es eigentlich sein sollte. Es bleibt für $v_0/vg = 1$ noch ein gewisser Rest an Sinkstofftransport, der auf den Anteil feiner Sinkstoffe ($\leq 0,05$ m/s) schließen läßt. Diese sind bei der angenommenen Grenzgeschwindigkeit noch in Schwebe bzw. von der jeweiligen Stromgeschwindigkeit überhaupt unabhängig.

In Abbildung 17 wurde für die Messung II/101 a, c, e, g die Abhängigkeit des Sandanteils ($> 0,05$ mm) allein von der Geschwindigkeit, und zwar a) für $\alpha + 1 = 3$ und b) für $\alpha + 1 = 4$ aufgetragen. Die Ebbwerte zeigen eine nahezu eindeutige Abhängigkeit nach der angegebenen Beziehung. Die Flutwerte, die nur wenig auseinanderliegen, folgen im Mittel gleichfalls diesem Gesetz. Für $\alpha + 1 = 4$ ergibt sich eine gerade Linie. Der Sandtransport wächst daher eher mit der vierten als der dritten Potenz von vg . Auch geht die Schwerlinie jetzt durch den 0-Punkt, d. h. für $v_g = v_0$ wird der Sandtransport $= 0$. Ein von der Geschwindigkeit unabhängiger Rest, wie er oben auf Abbildung 16 noch festzustellen war, ist nicht mehr vorhanden.

Beziehung zwischen mittl. Sinkstofftransport in $g/dcm^2 \cdot s$
 0,20 m über Grund u. $\approx Vg^3(1 - \frac{V_0}{Vg})$; $V_0 = 0,15 m/s$

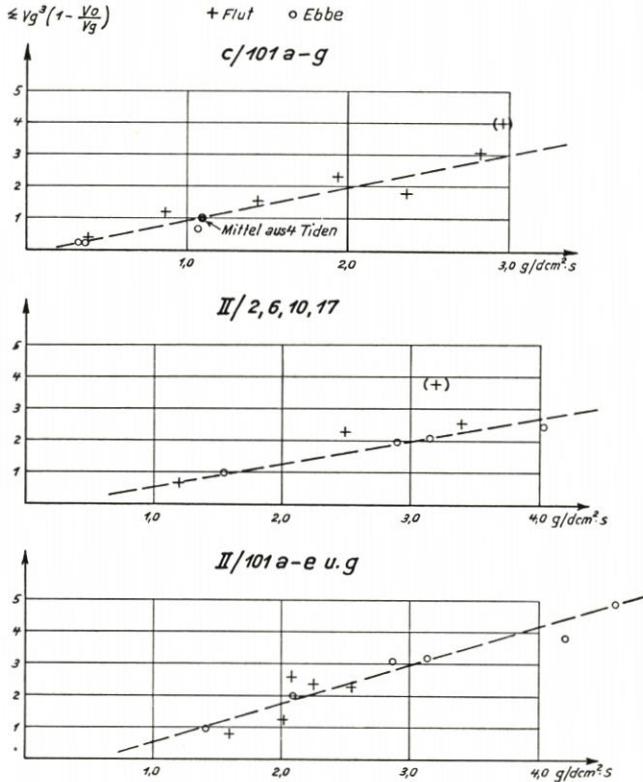


Abb. 16

$dcm^2 \cdot s$ auf rund $600 mg/dcm^2 \cdot s$ ab. Unterhalb der 10-cm-Grenze ist mit weiterer Zunahme des sandigen Anteils zu rechnen, während der schluffige Anteil mit Annäherung an die Sohle eher abnimmt als zunimmt. Das Maximum des schluffigen Anteils liegt etwa 50 cm über der Sohle.

Die Planimetrierung der eingeschlossenen Flächen ergibt den mittleren Transport je Längeneinheit und Sekunde bzw. mit Df (= Flutdauer) multipliziert, den Transport je Längeneinheit und Flutdauer. Für 1 m Flußbreite und Sekunde bzw. Df erhält man folgende Mengen:

Sinkstofftransport an der Meßstelle „Y“ (Flut)
 in $g/m \cdot s$ bzw. in $kg/m \cdot Df$ ($Df = 22\ 860 s$)

Feinsand > 0,1	Mehlsand, grob 0,05 bis 0,1	Mehlsand, fein u. Schluff $\leq 0,05$	Σ
238	154	746	1 138 g/ms
5 440	3 510	17 050	26 000 kg/m Df
20,9	13,5	65,6	100 ‰

Insgesamt wurden somit oberhalb 0,10 m über Grund $26 t/m \cdot Df$ transportiert. Hiervon entfallen auf Mehl- und Feinsand (> 0,05 mm) $8,95 t/m \cdot Df$ oder = 34,4 ‰ und auf Mehlsand

2. Der Sinkstofftransport in den Meßstellen Y und Z, getrennt nach Korngrößen

Abbildung 10 (Y-Messung) enthielt auf der rechten Seite den gemessenen mittleren Sinkstoffgehalt in mg/l in Abhängigkeit von der Tiefe, getrennt nach vier Korngrößen. Für die einzelnen Korngrößen ergaben sich Sinkstoffgehaltskurven, die sich nach oben stark verjüngen. Gleichzeitig wurden auf der rechten Seite die mittleren Geschwindigkeiten aufgetragen.

Auf der linken Seite der Abbildung wurde der durch Mittelung über die Tide erhaltene mittlere Sinkstofftransport in $mg/dcm^2 \cdot s$, getrennt für den sandigen Anteil (> 0,05 mm) und den schluffigen Anteil (< 0,05 mm), aufgetragen. Während der sandige Anteil von rund $600 mg/dcm^2 \cdot s$: 1,0 m über Sohle bis auf rund $1600 mg/dcm^2 \cdot s$: 10 cm über Sohle stark zunimmt, nimmt der schluffige Anteil in den gleichen Tiefen von rund $1100 mg/dcm^2 \cdot s$

und Schluff (< 0,05 mm) 17,05 t/m · Df oder = 65,6 %. Der Feinsandanteil allein (> 0,1 mm) betrug dabei mit 5,44 t/m · Df rund 21 % der Gesamtmenge.

Nicht erfaßt wurden bisher die unmittelbar an der Sohle (0 bis 0,10 m über Grund) transportierten Sinkstoffe. Sie lassen sich nur schätzungsweise angeben, da Messungen hierüber nicht vorliegen. Hierbei interessiert nur der mit Annäherung an die Sohle zunehmende sandige Anteil; der nach der Sohle zu abnehmende schluffige Anteil kann, da unerheblich, außer Betracht bleiben.

Um einen Anhalt über die Größenordnung zu erhalten, wurden in Abbildung 18 die mittleren Mehl- und Feinsandgehalte (> 0,05 mm) S_m und die mittleren Geschwindigkeiten v_m in Abhängigkeit von der Höhe h über Grund auf doppelt logarithmischem Papier aufgetragen. Die Zunahme des Sinkstoffgehalts bzw. die Abnahme der

Stromgeschwindigkeit mit Annäherung an die Sohle lassen sich entsprechend dem Verlauf der Ausgleichsgeraden mit genügender Genauigkeit durch folgende Exponentialfunktionen darstellen:

$$S_m = 340 \cdot h^{-0,61} \tag{4}$$

$$v_m = 3,65 \cdot h^{1/2} \tag{5}$$

Der entsprechende Sinkstofftransport (> 0,05 mm) je $dc m^2 \cdot s$ ergibt sich durch Multiplikation der Gleichungen (4) und (5) und der gesamte Sinkstofftransport je $dc m \cdot s$ von 0 bis 1 $dc m$ über Grund durch Integration zwischen den Grenzen 0 und 1. Man erhält:

$$S_{To-1 dc m} = 1270 \int_0^1 h^{-0,467} dh = 2320 \text{ mg}/dc m \cdot s = 23,2 \text{ g}/m \cdot s$$

Der Mehl- und Feinsandtransport (> 0,05 mm) von 0 bis 0,10 m über Grund beträgt hiernach nur etwa 6 % der oberhalb 0,10 m über Grund transportierten Menge. Der Sandtransport geht somit im wesentlichen in dem durch die Messungen erfaßten Querschnitt vor sich. Der Transport unterhalb der 10 cm-Grenze beträgt nur einen Bruchteil des Gesamttransports.

In gleicher Weise wie für die Y-Messung wurden auch für die Messung Z/102 vom 27. 7. 1949 (Ebbmessung) die Sinkstoffgehalt- und Sinkstofftransportkurven, getrennt nach Korngrößen, ermittelt und auf Abbildung 11 graphisch dargestellt.

²⁾ PRANDTL (3) gibt für wandnahe Punkte als Näherung für die Abnahme der Geschwindigkeit eine Potenzformel an, nach der v gleichfalls proportional der 7. Wurzel von h ist. In Rohren ist diese nach PRANDTL bis etwa $Re = 100\,000$ gut bestätigt.

Beziehung zwischen mittl. Sandtransport (0,05-0,25 mm) in $g/dcm^2 \cdot s$ u. $v_g^{\alpha+1} \cdot (1 - \frac{v_0}{v_g})$; $v_0 = 0,15 \text{ m/s}$

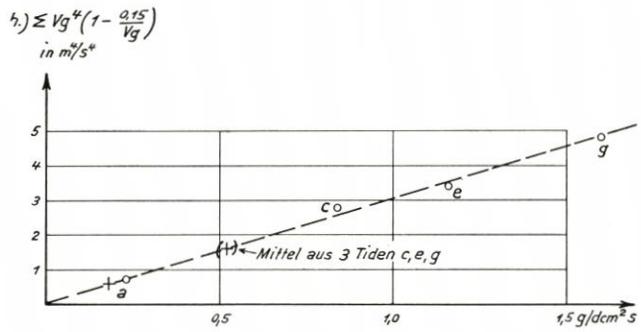
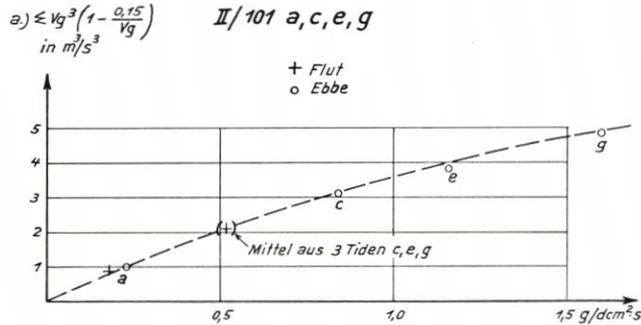


Abb. 17

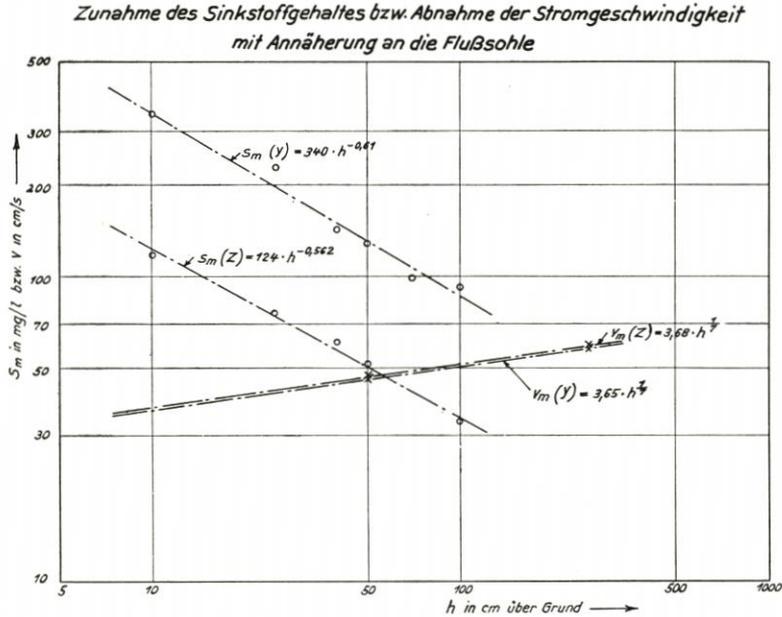


Abb. 18

Wie an der Meßstelle „Y“, nimmt auch hier der sandige Anteil mit Annäherung an die Sohle stark zu, während der schluffige Anteil sein Maximum etwa bei 0,30 m über Grund erreicht. Die Sinkstofftransportmengen je 1 m Flußbreite und Sekunde bzw. Ebbedauer (De) ergeben sich wie folgt:

Sinkstofftransport an der Meßstelle „Z“ (Ebbe)
in g/m · s bzw. kg/m · De (De = 23 460 s)

Feinsand > 0,1	Mehlsand, grob 0,05 bis 0,1	Mehlsand, fein u. Schluff ≤ 0,05	Σ
105	39	433	577 g/ms
2 460	920	10 150	13 530 kg/mDe
18,2	6,8	75,0	100 %

Von dem Gesamttransport in Höhe von 13,5 t/m · De entfallen auf Mehl- und Feinsand (> 0,05 mm) 3,38 t/m · De = 25 % und auf Mehlsand und Schluff (< 0,05 mm) 10,15 t/m · De = 75 %. Der Feinsandanteil allein (> 0,1 mm) betrug dabei mit 2,46 t/m · De 18,2 % der Gesamtmenge.

Bei Ermittlung des Sandtransports (> 0,05 mm) 0 bis 0,10 m über Grund wurde in gleicher Weise verfahren wie für die Meßstelle „Y“. Die entsprechenden Exponentialfunktionen lauten in diesem Fall:

$$S_m = 124 \cdot h^{-0,562} \tag{6}$$

$$v_m = 3,68 \cdot h^{1/2} \tag{7}$$

Der Sinkstofftransport (> 0,05 mm) je dcm · s von 0 bis 1 dcm über Grund ergibt sich analog wie oben zu:

$$S_{T0-1 \text{ dcm}} = 456 \int_0^1 h^{-0,419} \cdot dh = 784 \text{ mg/dcm} \cdot \text{s} \\ = 7,8 \text{ g/m} \cdot \text{s}$$

Der Mehl- und Feinsandtransport von 0 bis 0,10 m über Grund hat an der Meßstelle „Z“ somit nur 5,4 % der oberhalb transportierten Menge betragen.

Die Messungen „Y“ und „Z“ wurden am einbuchtenden Ufer des ostfriesischen Gattjebogens in der Nähe der Knock (vgl. Lageplan Abb. 1) ausgeführt. Sicherlich liegen hier besondere Verhältnisse vor, die eine Verallgemeinerung der Ergebnisse nicht ohne weiteres gestatten. Sie sind auch nicht miteinander vergleichbar, da sie an verschiedenen Stellen und zu verschiedener Zeit (Zeitdifferenz = 14 Tage) ausgeführt wurden. Die Tidehübe waren allerdings mit 3,42 m („Y“) und 3,46 m („Z“) annähernd gleich. Auch die mittleren Profilgeschwindigkeiten waren wenig verschieden. Sie betragen 70,0 cm/s in „Y“ und 68,9 cm/s in „Z“. Dagegen war der Verlauf der Geschwindigkeitskurven unterschiedlich. Während in „Y“ die Grundgeschwindigkeit innerhalb von eineinhalb Stunden bis auf ~ 70 cm/s anstieg, erreichte diese in „Z“ in der gleichen Zeit nur eine Größe von ~ 55 cm/s. Hierauf mag, abgesehen von örtlich bedingten Umständen, wie Verschiedenheit der Bodenzusammensetzung und -lagerung, wenigstens zum Teil der höhere Sinkstofftransport in „Y“ zurückzuführen sein. Immerhin darf der relativ größere Sandtransport bei Flut in „Y“ (34,4 %) gegenüber demjenigen bei Ebbe in „Z“ (25 %) als charakteristisch festgestellt werden. Es ergab sich ferner, daß die unmittelbar über Sohle transportierten Sinkstoffmengen (0 bis 0,10 m über Grund) nur einen Bruchteil der durch den übrigen Querschnitt transportierten Menge betragen (etwa 6 %).

D. Zusammenfassung der Ergebnisse

1. Die Sinkstoffmessungen ergaben, daß eine gesetzmäßige Beziehung zwischen dem mittleren Sinkstoffgehalt und der mittleren Stromgeschwindigkeit bei sonst gleichen örtlichen Bedingungen nur für die unteren Schichten bis etwa 0,5 m über Grund nachzuweisen ist. Für den Sinkstoffgehalt in den Tiefenstufen Mitte und Oben konnte eine gleiche Abhängigkeit im allgemeinen nicht festgestellt werden. Der Grund hierfür wurde darin gefunden, daß in den unteren Schichten die Fein- und Mehlsandanteile überwiegen, während weiter oben die schluffigen Anteile ($< 0,05$ mm) ausschlaggebend sind. Die letzteren kommen aber während der Kenterzeiten wegen ihrer geringen Fallgeschwindigkeiten nur zu einem geringen Prozentsatz zur Sedimentation. Im allgemeinen kann daher zwischen den schluffigen Sinkstoffen ($< 0,05$ mm) und der jeweiligen Stromgeschwindigkeit eine unmittelbare Beziehung nicht erwartet werden. Betrachtet man den Fein- und Mehlsandgehalt jedoch für sich, so ist für diesen eine Beziehung zur Stromgeschwindigkeit festzustellen.

2. Der Sinkstoffgehalt nimmt in der Längsrichtung mit Annäherung an die Brackwasserzone stark zu. Gleichzeitig vergrößert sich der Anteil an schluffigen Bestandteilen gegenüber dem sandigen Anteil. In der Lotrechten verhält sich der Gehalt an Fein- und Mehlsand ($> 0,05$ mm) in 10, 30, 50 und 70 cm über Grund etwa wie 100 : 51 : 37 : 29 („Y“-Messung), Werte, wie sie ähnlich auch VAN VEEN angibt (100 : 54 : 34 : 28). Der Gehalt an Mehlsand und Schluff ($< 0,05$ mm) erreicht demgegenüber bei 30 bis 50 cm über Grund sein Maximum.

3. Die Ergebnisse der durchgeführten Sandfallenmessungen unterliegen beträchtlichen Streuungen, die auf Unvollkommenheiten des Gerätes sowie der Meßmethode, z. T. aber auch auf die wahrscheinlich sprunghafte Bewegung des Sandes zurückzuführen sind. Nur aus einer größeren Anzahl von Messungen, wie sie in der Ems an verschiedenen Meßstellen durchgeführt wurden, kann eine Beziehung zwischen Geschiebebewegung und Stromgeschwindigkeit abgeleitet werden. Da der Wirkungsgrad der Sandfalle unbekannt ist, sind die erhaltenen Werte jedoch in erster Linie als Vergleichswerte zu betrachten.

Die Geschiebebewegung ist örtlich verschieden; sie hängt außer vom Korndurchmesser und der Kornform der Sedimente vom jeweiligen Schlickgehalt sowie von der Beschaffenheit der Fluß-Sohle ab. Die Grenzgeschwindigkeit v_0 wurde für einen mittleren Korndurchmesser von 0,1 bis 0,15 mm zu etwa 15 cm/s (0,5 m über Grund) und für einen mittleren Korndurchmesser von 0,3 bis 0,4 mm zu etwa 20 cm/s (0,5 m über Grund) gefunden.

4. Als Näherung für den Sinkstofftransport kann die Beziehung genannt werden:

$$S_T = C \cdot v^\alpha + 1 \left(1 - \frac{v_0}{v} \right)$$

Für den sandigen Anteil ergab sich hierbei $\alpha \approx 3$.

Für die Meßstellen „Y“ und „Z“ wurde der Sinkstofftransport, getrennt nach vier Korngrößen ermittelt. Es ergab sich für die „Y“-Messung (Flut) bei einem Gesamttransport von 26,0 t/m ein Transport

von Fein- und Mehlsand ($> 0,05$ mm) von $8,95$ t/m = 34% der Gesamtmenge und von schluffigen Sinkstoffen ($< 0,05$ mm) von $14,05$ t/m = 66% der Gesamtmenge.

Für die „Z“-Messung (Ebbe) betrug der Gesamttransport $13,53$ t/m bei einem Fein- und Mehlsandanteil ($> 0,05$ mm) von $3,38$ t/m = 25% der Gesamtmenge und einem schluffigen Sinkstoffanteil ($< 0,05$ mm) von $10,15$ t/m = 75% der Gesamtmenge.

Durch Extrapolation wurde der von 0 bis $0,10$ m über Grund transportierte Fein- und Mehlsand in „Y“ (Flutmessung) zu etwa 6% und in „Z“ (Ebbmessung) zu etwa $5,4\%$ der oberhalb transportierten Menge ermittelt.

Wenn auch aus den Einzelmessungen „Y“ und „Z“ noch keine quantitativen Angaben über den Gesamt-Sinkstoffhaushalt der Ems gemacht werden können, so ergibt sich doch aus diesen Messungen ein vermutliches Überwiegen des Sandtransports ($> 0,05$ mm) zugunsten der Flut ($34\% : 25\%$).

Es ist daher anzunehmen, daß jedenfalls im Meßbereich im allgemeinen mehr Fein- und Mehlsand stromauf als stromab transportiert wird, während das Umgekehrte bei den feinen Sinkstoffen der Fall zu sein scheint. Bei erhöhten Tiden ist sicherlich mit einer bedeutend vermehrten Sandbewegung und damit auch mit einem erhöhten Sandtransport stromauf zu rechnen, während über das Verhalten der feinen Sinkstoffe bei erhöhten Tiden nichts Bestimmtes gesagt werden kann.

E. Schriftenverzeichnis

1. Küstenausschuß Nord- und Ostsee: Bilanzbericht der Arbeitsgruppe „Wasserbauliche Hydrometrie“. Stand 1951 (unveröffentlicht).
2. LÜDERS, K.: Unmittelbare Sandwanderungsmessung auf dem Meeresboden. Veröff. Inst. Meeresk. N.F.A. H. 24. Berlin 1933.
3. PRANDTL, L.: Strömungslehre. Breslau 1949.
4. SCHAANK, E. M. H.: The transportation of Sand in rivers. Vortrag. Washington 1939.
5. WOHLBERG, E.: Der horizontale Wasserschöpfer. Dt. Hydrogr. Ztschr. III, 516, 1950.
6. WOHLBERG, E.: Sinkstoff, Sediment und Anwachs am Hindenburgdamm. Die Küste II, 2, 1954.

Ein integrierendes Sinkstoff-Fanggerät

Von Johann Kramer und Heinrich Beth

Inhalt

1. Integrierende Sinkstoffmessung	93
2. Beschreibung der Konstruktion und Wirkungsweise des integrierenden Sinkstoff-Fanggeräts	94
3. Eichung und Erprobung des Geräts	97
4. Schlußbemerkung	101
5. Schriftenverzeichnis	101

1. Integrierende Sinkstoffmessung

Zur Beurteilung der morphologischen Veränderungen im Fluß- und Seegebiet — eine notwendige Voraussetzung für wasserbauliche Maßnahmen — muß der Transport der Feststoffe im Wasser bekannt sein. Es ist dabei zwischen dem auf der Sohle sich bewegendem Material (Geschiebe) und den in Suspension verteilten Feststoffen (Schweb- und Sinkstoffen) zu unterscheiden. Um die Geschiebebewegung auf der Sohle zeitlich integrierend, das heißt über eine bestimmte Zeitdauer hin messen zu können, sind bereits verschiedene Geräte entwickelt worden, die allerdings — das gilt besonders für das Mündungsgebiet der Flüsse und das Küstengebiet mit dem sehr feinen Bodenmaterial — noch nicht befriedigend arbeiten. Geräte dagegen, die zur zeitlich integrierenden Messung von Sink- und Schwebstoffen geeignet sind, stehen bisher in Deutschland noch nicht zur Verfügung.

Im Brackwassergebiet der Ems ober- und unterhalb Emdens, wo in den vergangenen Jahren umfangreiche Sinkstoffmessungen¹⁾ mit dem Endziel der quantitativen Bestimmung des Brackwasserhaushalts ausgeführt wurden, mußte die Forderung erhoben werden, ein ungestörtes Bild der natürlichen, im Wasser vorhandenen Sinkstoffverteilung zu gewinnen. Für die Sinkstoffmessungen stand anfangs der horizontale Wassers schöpfer nach WOHLBERG-SCHWEDER (2) zur Verfügung, der allerdings nur eine punktförmige, d. h. momentane Entnahme gestattet. Im Wasser ist jedoch — vor allem infolge der Turbulenz — der Sinkstoff nicht gleichmäßig verteilt, sondern tritt in „Sinkstoffwolken“ auf. Die aus den Messungen gewonnenen Augenblickswerte der Sinkstoffverteilung mußten daher als nicht ausreichend für quantitative Schlüsse angesehen werden.

In der Verfolgung des Ziels, die Absolutwerte der natürlichen Sinkstoffkonzentration zu bestimmen, wurde beim Wasser- und Schiffsamt Emden ein Fanggerät entworfen und erprobt, das nachstehend behandelt werden soll. Im Verlauf dieser Arbeiten erhielten die Verfasser Kenntnis von Schwebstoff-Fanggeräten, die in den Vereinigten Staaten (1) für die Messung des Feststofftransports in Flußläufen entwickelt wurden und für Integrationsmessungen über die Zeit an einzelnen Punkten wie auch über die Tiefe bestimmt sind. Die sehr eingehende Prüfung aller grundlegenden Eigenschaften dieses Geräts in den amerikanischen Laboratorien erlaubte

¹⁾ Im weiteren Text: „Sinkstoff“ als Bezeichnung für Sink- und Schwebstoffe, deren scharfe Trennung im Brackwassergebiet (der Ems) infolge stark wechselnder Strömungsgeschwindigkeiten und der besonderen chemisch-physikalischen Bedingungen nicht möglich ist (vgl. auch den Aufsatz von NIEBUHR in diesem Heft).

einen Verzicht auf eine Wiederholung dieser Untersuchungen, so daß lediglich die Eichung erforderlich war.

2. Beschreibung der Konstruktion und Wirkungsweise des integrierenden Sinkstoff-Fangeräts

Die Konstruktion des in Abbildung 1 im Schnitt dargestellten Geräts ist ein torpedoförmiger Körper, der, um Korrosionserscheinungen im aggressiven Wasser (Salzwasser) zu verhindern, zweckmäßig aus Messing hergestellt wird. Im Vorderteil liegt der Sammelraum, der durch das

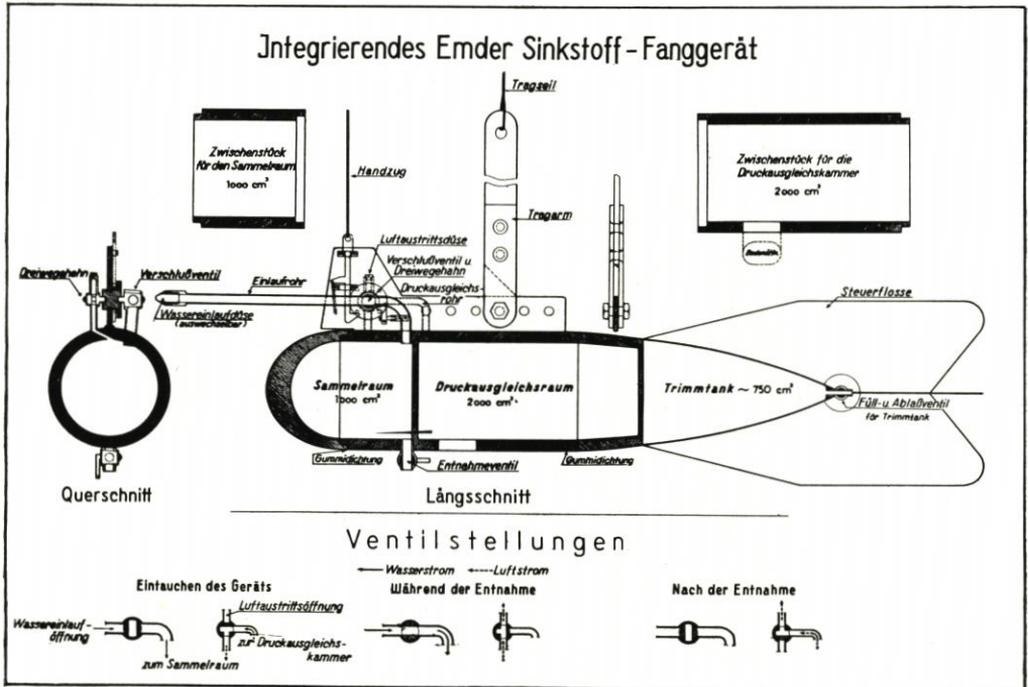


Abb. 1. Systemskizze des integrierenden Sinkstoff-Fangerätes

Einlaufrohr mit auswechselbarer Einlaufdüse und eingesetztem Verschlußventil gefüllt wird. Der Rohrstutzen zum Austritt der Luft aus dem Sammelraum mit der gleichfalls auswechselbaren Luftaustrittsdüse hat über den Dreiwegehahn und das Druckausgleichsrohr Verbindung zur Druckausgleichskammer. An der Unterseite des Sammelraums liegt das Entnahmeventil zur Entleerung der Wasserprobe. Das Mittelstück enthält im hinteren Teil die Druckausgleichskammer, die beim Absenken über das Druckausgleichsrohr den Luftdruck im Sammelraum dem hydrostatischen Druck angleicht, wobei das Wasser durch die Bodenöffnung eintritt.

Im Schwanzstück mit den Steuerflossen ist ein Trimm-tank vorgesehen, der durch ein Ventil gefüllt und entleert werden kann. Aufgehängt wird das Gerät an einem Trage-seil, das am Trag-arm befestigt ist, der zur Herstellung der Schwerpunktlage verstellbar ist und bei richtiger Einstellung das Überkippen des Geräts nach vorn verhindert.

Der Sammelraum hat 1000 cm³ Inhalt, der sich durch Einsatz eines Zwischenstücks verdoppeln läßt. Entsprechend wird die Größe der Druckausgleichskammer durch ein weiteres Zwi-

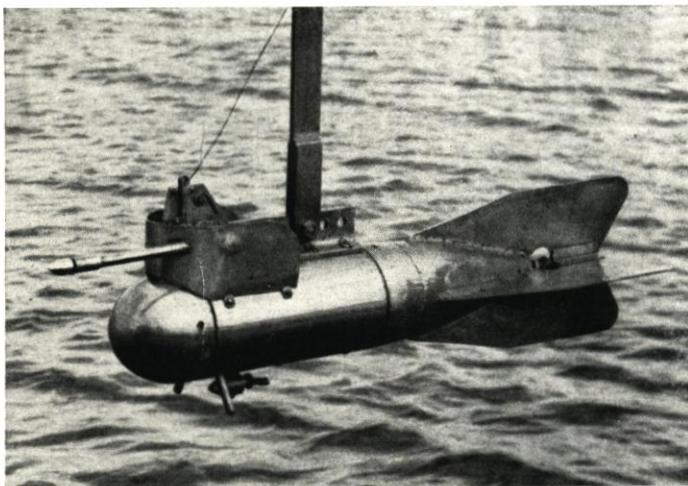


Abb. 2
Gerät beim Einsatz
am Tragarm hängend

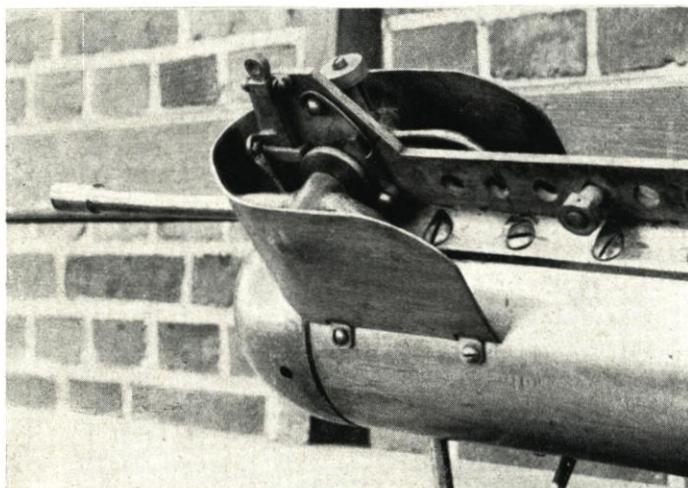


Abb. 3
Wassereinlaufrohr,
Luftaustrittsöffnung, Ventil
und Zugvorrichtung

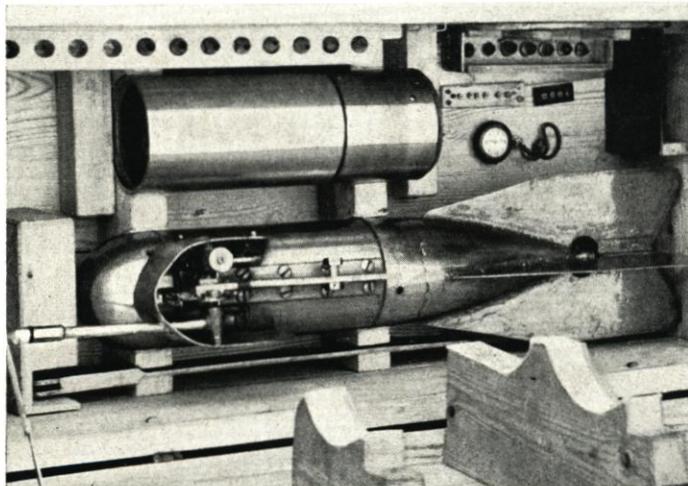


Abb. 4
Gerät in Transportkiste
mit Zubehör

Aufnahmen: Bildarchiv
Forschungsstelle Norderney

schenstück auf den doppelten Inhalt gebracht. Die einzelnen Stücke werden zusammengeschaubt, wobei Gummidichtungen unerwünschten Wasserzutritt verhindern. Auch bei Einsatz des Zwischenstücks liegt die Einlauföffnung außerhalb des Störbereichs durch Stau oder Wirbelbildung.

Abbildung 2 gibt eine Ansicht des Geräts. An der Spitze des Einlaufrohrs tritt die auswechselbare Einlaufdüse hervor. Zu erkennen ist ebenfalls die Zugvorrichtung zur Betätigung des Verschlusses für den Wassereinlauf und des Dreiwegehahns. Abbildung 3 zeigt die Anordnung des Wassereinlaufrohrs, der Luftaustrittsöffnung, der Ventile und der Zugvorrichtung. In Abbildung 4 liegt das Gerät in der Transportkiste, die gleichzeitig die (hier zusammengeschaubten) Zwischenstücke für Sammelraum und Druckausgleichskammer sowie die auswechselbaren Wassereinlauf- und Luftaustrittsdüsen enthält.

Zur Erläuterung der Wirkungsweise des Geräts sind in Abbildung 1 (am unteren Rand) die verschiedenen Ventilstellungen des Verschlusses im Einlaufrohr und des Dreiwegehahns wiedergegeben.

Darstellung links: Beim Eintauchen des Geräts ist das Einlaufrohr verschlossen, während der Dreiwegehahn die Verbindung zwischen Sammelraum und Druckausgleichskammer freigibt und die Luftaustrittsöffnung schließt. Das Wasser strömt beim Absenken durch die Bodenöffnung in die Druckausgleichskammer und erzeugt einen Luftdruck im Sammelraum, der gleich dem hydrostatischen Außendruck ist.

Darstellung in der Mitte: Ist die gewünschte Tiefenstufe erreicht, so gibt das Verschlussventil durch Handzug das Wassereinlaufrohr frei, wodurch der Füllvorgang eingeleitet wird. Gleichzeitig öffnet der Dreiwegehahn den Luftaustritt und sperrt die Verbindung zwischen Sammelraum und Druckausgleichskammer. Das Wasser kann nunmehr in den Sammelraum entsprechend der Strömungsgeschwindigkeit des Wassers einlaufen. Ohne vorher eingetretenen Druckausgleich zwischen der Luft im Sammelraum und dem hydrostatischen Druck über die Druckausgleichskammer, die verhindert, daß beim Zusammenpressen der Luft Wasser in den Sammelraum gelangt, würde das Wasser nach Öffnung der Ventile „einschießen“ und einen Teil des Sammelraums — zunehmend mit der Tiefe — bis zur Herstellung des Druckgleichgewichts füllen. An einer früheren Gerätekonstruktion ohne Druckausgleichskammer war dieses „Einschießen“ festzustellen.

Darstellung rechts: Am Ende der Entnahmezeit werden durch einen weiteren Handzug die Wassereinlauf- und Luftaustrittsöffnungen geschlossen, so daß beim Hochziehen des Geräts kein Wassereintritt mehr möglich ist. Der Sammelraum wird durch das Entnahmeventil entleert. Ein Absetzen der Sinkstoffe im Sammelraum braucht bei der Feinheit des Materials und der bei der Entleerung auftretenden Turbulenz nicht befürchtet zu werden. Notfalls genügt ein kurzes Schütteln des Geräts, um abgesetzte Teilchen wieder in Suspension zu bringen.

Die Torpedoform des Geräts vermindert den Strömungswiderstand und damit die Abtrift. Im gleichen Sinne wirkt das Eigengewicht von rund 35 kg, das vor allem aus der starken Wandung des Kopf- und Mittelstücks herrührt. Jedoch ist bei diesem Gewicht und den äußeren Abmessungen eine Bedienung durch zwei Mann erforderlich, davon einer an der Handwinde und ein anderer zum Abfüllen der Wasserproben und zum Auswechseln der Düsen.

Auf Grund der robusten Bauart mit einfachen mechanischen Übertragungen ist das Gerät beim Einsatz wenig störanfällig und unkompliziert in der Arbeitsweise. Während der Entnahmen ist lediglich der Handzug zur Regelung der Ventilstellungen zu betätigen, und in Abständen ist die Wassereinlaufdüse entsprechend der gleichzeitig zu messenden Strömungsgeschwindigkeiten auszuwechseln, wobei das in Abbildung 7 wiedergegebene Nomogramm zu benutzen ist.

3. Eichung und Erprobung des Geräts

Um das Ergebnis einer punktförmig integrierenden Entnahme als Mittelwert der in der untersuchten Tiefenstufe vorhandenen Sinkstoffverteilung ansprechen zu können, müssen verschiedene Voraussetzungen gegeben sein. Die Tiefenintegration (gleichmäßiges Absenken des Geräts in einer Senkrechten bei gleichzeitiger Entnahme) soll hier unberücksichtigt bleiben, da infolge der Schichtung des Wasserkörpers im Brackwassergebiet, verursacht durch die Dichteunterschiede von Flut- und Ebbstrom, die Sinkstoffverteilung uneinheitlich ist.

Verschiedene Eichversuche mußten unternommen werden, um nachzuweisen, daß die an das Gerät zu stellenden Forderungen erfüllt sind. Diese umfassen:

- a) Der Sammelraum soll sich in einer Zeit füllen, die ausreicht, um den Sinkstoffgehalt der Probe als Mittelwert des in der Natur vorhandenen ansprechen zu können.
- b) Die Einlauföffnung muß in der Anstromrichtung liegen oder darf nur wenig von ihr abweichen.
- c) Im Wasser und besonders an der Einlaufstelle darf durch das Entnahmegerät keine Störung (Stau oder Wirbelbildung) hervorgerufen werden, damit eine ungestörte Wasserprobe gewonnen wird.
- d) Die Einlaufgeschwindigkeit in den Sammelraum des Geräts muß gleich der Strömungsgeschwindigkeit des umgebenden Wassers sein, um einen Sog infolge größerer und einen Stau infolge kleinerer Einlaufgeschwindigkeit zu verhindern.

Zu a): Durch eine ausreichende Entnahmezeit wird aus dem am Gerät vorbeiströmenden Wasser ein Stromfaden von solcher Länge entnommen, daß die verschiedene Dichte der Sinkstoffverteilung infolge „Wolkenbildung“ ausgeglichen wird. Nach Abbildung 5 beträgt die Füllzeit bei $v = 0,13$ m/s für 1000 cm^3 Inhalt rund $5\frac{1}{2}$ Minuten. Entsprechend beträgt die Länge des Stromfadens etwa 35 m und bei $v = 2,0$ m/s und einer Füllzeit von 70 s etwa 140 m. Stromfäden dieser Länge ergeben einen sicheren Mittelwert der Sinkstoffverteilung, wie es durch Beobachtungen in der Natur bestätigt wird.

Zu b): Daß die Einlauföffnung in der Anstromrichtung liegt, wird durch die Torpedoförmigkeit und die großen Stabilisierungsflächen des Tauchkörpers erreicht. Bei der Eichung des Geräts in der Versuchsrinne und der Erprobung in der Natur war die stabile Lage augenscheinlich.

Zu c): Durch die angenäherte Stromlinienform des Vorderstücks des Tauchkörpers ist die Wirbelbildung sehr gering. Außerdem ist die Einlauföffnung — auch bei Einsatz des Zwischenstücks — so weit vorgestreckt, daß sie außerhalb des Bereichs dennoch auftretender Wirbel liegt und durch ihren scharfen Rand eine Störung des einfließenden Stromfadens verhindert. In der Versuchsrinne wurde bei Färbung des Wassers mit Kaliumpermanganat keine Störung des Einstromungsvorgangs durch das Gerät festgestellt.

Zu d): Die wesentlichste Bedingung für die Brauchbarkeit des Sinkstoff-Fängers ist, daß die Einlaufgeschwindigkeit in den Sammelraum gleich der Strömungsgeschwindigkeit des umgebenden Wasserkörpers ist. Bei Versuchen zur integrierenden Sinkstoffentnahme in den Vereinigten Staaten (1) ergab sich, daß durch eine gegenüber der Einlaufgeschwindigkeit größere Stromgeschwindigkeit ein Stau bzw. im entgegengesetzten Fall ein Sog erzeugt wird. Auf Grund der größeren Massenträgheit der gegenüber dem Wasser schwereren Feststoffe ergibt sich bei Stau eine Vergrößerung und bei Sog eine Verminderung der Sinkstoffkonzentration in der Probe gegenüber der Natur.

Zur Erzielung der Übereinstimmung zwischen Einlauf- und Strömungsgeschwindigkeit wurden in einer Versuchsrinne der Hannoverschen Versuchsanstalt für Grundbau und Wasserbau, Franzius-Institut der Technischen Hochschule Hannover, verschiedene Eichversuche ausgeführt. Auch in der Ems wurden an geeigneten Stellen Versuche unternommen, um insbesondere

festzustellen, wie der Füllvorgang des Geräts von der Tiefenlage abhängig ist. Es sollen nicht die verschiedenen Eichversuche, die zu Konstruktionsverbesserungen führten, behandelt werden; jedoch ist ein Ergebnis für die Arbeitsweise des Geräts von Bedeutung. Anfangs wurde angenommen, daß die Anpassung der Einlaufgeschwindigkeit an die stark wechselnde Strömungsgeschwindigkeit nur durch Veränderung der Wassereinlauf- wie auch der Luftaustrittsdüse zu

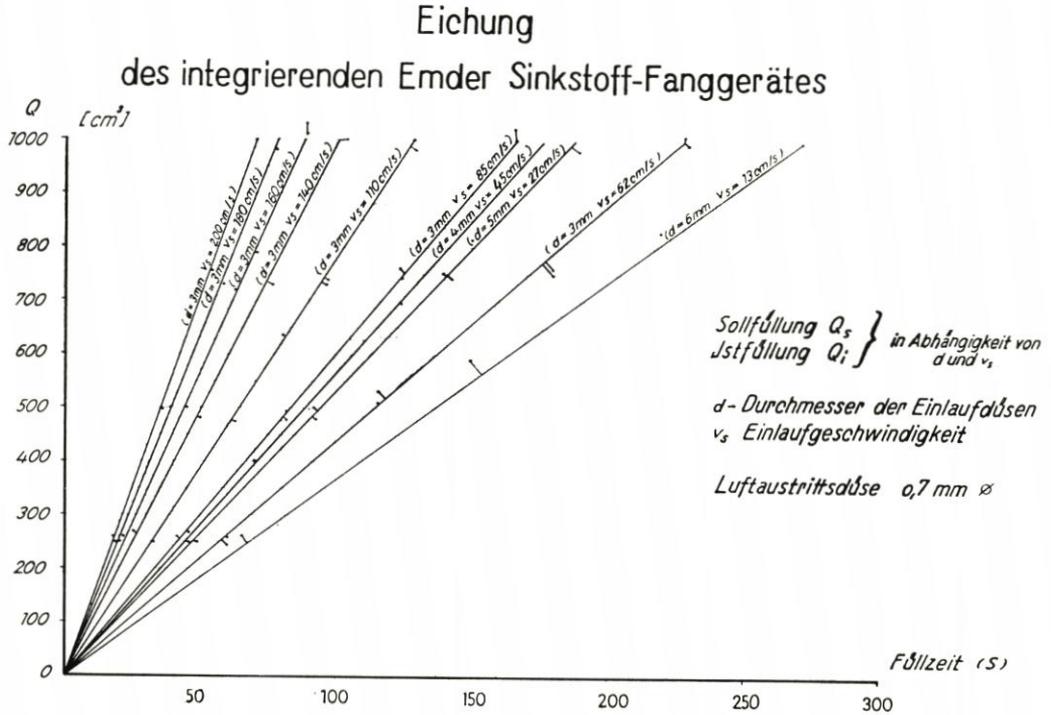


Abb. 5. Eichung des Gerätes, Vergleich von Soll- und Istfüllung

erreichen sei. Während der Versuche im Franzius-Institut zeigte sich aber, daß auf die Veränderung der Luftaustrittsöffnung verzichtet und mit einem konstanten Düsendurchmesser von 0,7 mm (Öffnung 0,38 mm²) gearbeitet werden konnte. Der Verzicht auf die Regelbarkeit der Luftaustrittsdüse bedeutet eine wesentliche Vereinfachung der Eichung wie auch der praktischen Anwendung des Geräts.

Die endgültigen Eichergebnisse, die mit der eingangs beschriebenen Geräteausführung erreicht wurden, enthält Abbildung 5. In einem Koordinatensystem mit der Füllzeit als Abszisse und der Füllmenge als Ordinate sind für verschiedene Wassereinlaufdüsen und Strömungsgeschwindigkeiten die Soll-Füllung (Q_s) und die Ist-Füllung (Q_i) gegenübergestellt. Es sind die Q_i -Werte als Punkte und die Q_s -Werte als gerade Linien aufgetragen, von denen erstere bei den Versuchen mengenmäßig bestimmt und letztere errechnet wurden.

$$Q_i = v_i \cdot F \cdot t \text{ und } Q_s = v_s \cdot F \cdot t$$

v_i = Einlaufgeschwindigkeit
 v_s = Strömungsgeschwindigkeit
 F = Querschnittsfläche des Wassereinlaufrohrs
 t = Füllzeit

Da $F \cdot t = \text{konstant}$, ist die Forderung
 $v_i = v_s$ erfüllt, wenn $Q_i = Q_s$.

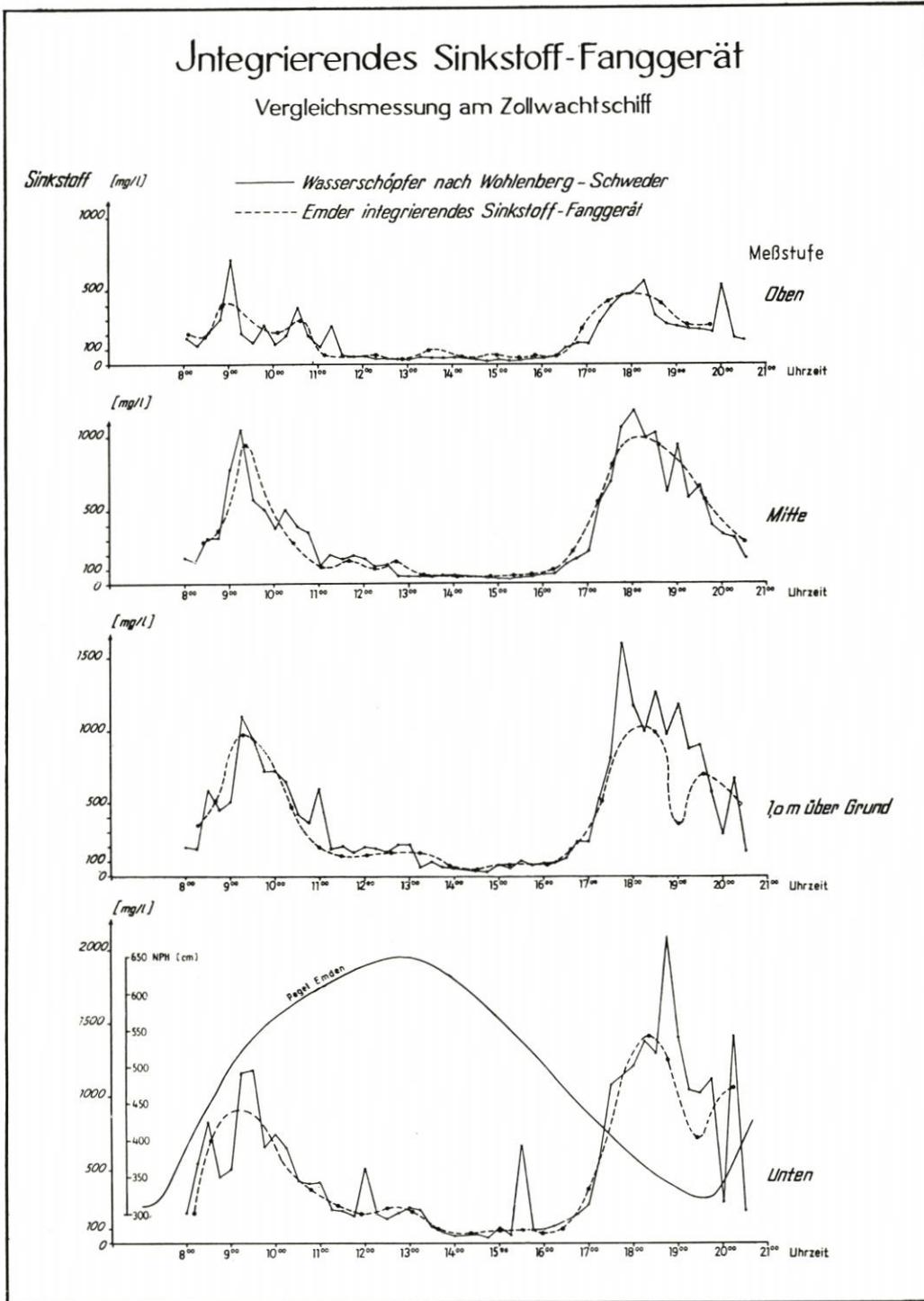


Abb. 6. Vergleichsmessung zwischen Wasserschöpfer nach WOHLNBERG-SCHWEDER und integrierendem Sinkstoff-Fanggerät

Die Werte von Q_s in Abhängigkeit von der Füllzeit liegen infolge der Linearität auf Geraden, die für verschiedene Durchmesser (d) der Wassereinlaufdüsen und Werte von v_s , die untersucht wurden, gezeichnet sind. Nach der Darstellung ist die Streuung der Q_i -Werte gegenüber den Q_s -Geraden gering und bezogen auf die Geschwindigkeiten innerhalb der Grenzen, in denen die Geschwindigkeitswerte in der Natur infolge des ungleichförmigen Fließvorgangs schwanken. In grundsätzlichen Untersuchungen in den Vereinigten Staaten (1) ist festgestellt worden, daß die Abweichung in der Sinkstoffkonzentration zwischen Entnahmeprobe und Natur, verursacht durch geringe Unterschiede von Einlauf- und Strömungsgeschwindigkeit, mit dem Korndurchmesser abnehmen. Bei Korndurchmessern unterhalb 0,05 mm, die den Hauptanteil der Sinkstoffe ausmachen, ist der Unterschied praktisch bedeutungslos.

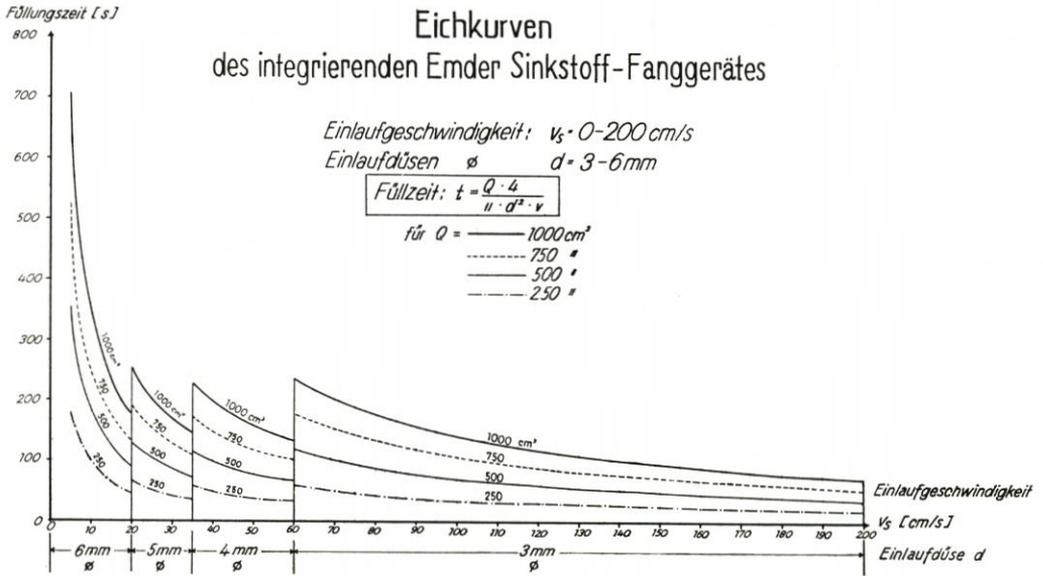


Abb. 7. Durchmesser der Wassereinlaufdüse in Abhängigkeit von der Stromgeschwindigkeit

Als Ergebnis der Eichung sind für die im Tidegebiet gewöhnlich auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten bis zu 200 cm/s Wassereinlaufdüsen von $d = 3 - 6$ mm ausreichend. Zu diesen Größen der Einlaufdüsen wurde bei Laboruntersuchungen in den Vereinigten Staaten (1) ermittelt, daß der Durchmesser der Düsen nur sehr geringen Einfluß auf die Sinkstoffkonzentration der Probe hat, solange die Einlauf- etwa gleich der Strömungsgeschwindigkeit ist.

In Abbildung 6 ist das Ergebnis einer Vergleichsmessung des integrierenden Sinkstoff-Fangeräts mit dem Wasserschöpfer nach WOHLBERG-SCHWEDER aufgetragen. Die Darstellung zeigt, daß die integrierende Entnahme Mittelwerte ergibt, die die mit dem Wasserschöpfer nach WOHLBERG-SCHWEDER gewonnenen, in der Größe schwankenden Augenblickswerte, ausgleichen. Die Füllzeit und der Durchmesser der Einlaufdüse wurden nach Abbildung 7 bestimmt. Beobachtet wurde bei einer Wassertiefe von rund 6 m bei MTnw in verschiedenen Meßstufen, die gleicherweise nachweisen, daß das Gerät in jeder Tiefe einwandfrei arbeitet und eine größere Zahl von Augenblickswerten der Sinkstoffkonzentration durch eine geringe Anzahl von Integrationsmessungen mit dem neuen Gerät ersetzbar ist.

4. Schlußbemerkung

Für die Anwendung des Sinkstoff-Fanggeräts wurde das Diagramm in Abbildung 7 aufgestellt. In der Abszisse sind die Strömungsgeschwindigkeiten und die für den jeweiligen Geschwindigkeitsbereich zu verwendenden Durchmesser der Wassereinlaufdüse angegeben. In der Ordinate ist die Füllzeit aufgetragen, wobei die Zeiten für $1/1$, $3/4$, $1/2$ und $1/4$ Füllung aus der Kurvenschar für die verschiedenen Geschwindigkeiten und Düsendurchmesser zu entnehmen sind. Unter Verwendung dieses Diagramms ist es möglich, bei gleichzeitiger Messung der Strömungsgeschwindigkeit das Gerät einzusetzen.

Nach den Ergebnissen der Eichung und Erprobung dürfen die unter Verwendung des integrierenden Sinkstoff-Fanggeräts gewonnenen Werte als Mittelwerte der in der Meßtiefe vorhandenen Sinkstoffkonzentration angesehen werden. Sie lassen als Absolutwerte eine quantitative Bestimmung des Sinkstoffgehalts in der Brackwasserzone zu. Das war eingangs als Endziel der Geräteentwicklung angezeigt worden. Die selbsttätige zeitliche Integration vermindert außerdem die Anzahl der zu entnehmenden Proben, wodurch die Arbeit der Auswertung im Laboratorium wesentlich verringert wird.

5. Schriftenverzeichnis

1. NELSON, M. und BENEDICT, C.: Measurement und Analysis of Sediment Load on Streams (Messung und Analyse der Schwebstoffmengen in Strömen). Vol. 76, Separate Nr. 31, American Society of Civil Engineers, 1950.
2. WOHLBERG, E.: Der horizontale Wasserschöpfer. Dt. Hydrogr. Ztschr. Bd. 3, H. 5/6, 1950.

Die Verteilung der organischen Substanz in den Sedimenten des Brackwassergebietes der Ems

Von Heinrich Rudolf Krause

Inhalt

I. Einleitung		102
II. Untersuchungsgebiet		103
III. Methodik		105
IV. Untersuchungsergebnisse		106
1. Organischer Kohlenstoff- und Stickstoffgehalt		106
2. Sauerstoffverbrauch		109
V. Besprechung der Ergebnisse		111
VI. Zusammenfassung		113
VII. Schriftenverzeichnis		113

I. Einleitung

Die Verteilung der organischen Substanz in marinen Sedimenten ist mehrfach Gegenstand umfassender Untersuchungen gewesen. Hier mögen nur die Arbeiten von WAKSMAN (18), CORRENS (3) und ANDERSON (1) aus dem Raum des Atlantik, von BOYSEN JENSEN (2) und GRIPENBERG (5) aus Gebieten der Nord- und Ostsee, von TRASK (16, 17) und REVELLE (15) aus pazifischen Distrikten, von WISEMAN und BENNETT (21) aus dem Arabischen Meer und schließlich von MOHAMED (11) aus dem Roten Meer erwähnt werden. Aus diesen Arbeiten ist ersichtlich, daß die unterschiedliche Verteilung der organischen Substanz durch eine Vielzahl von Faktoren bedingt wird. Da letztlich die abgestorbenen Lebewesen des Wassers und des Meeresbodens als Quellen für die in den marinen Ablagerungen nachweisbare organische Substanz zu betrachten sind, hängt deren regionale Verteilung ursprünglich direkt oder indirekt mit der marinen Produktion eines Gebietes zusammen. Ferner ist sie von der Intensität der zersetzenden Einflüsse, denen die toten Organismen vor und nach der Sedimentation ausgesetzt sind, in erheblichem Maße abhängig. Hierbei spielen neben Bakterien auch Sauerstoffgehalt und Temperatur von Wasser und Boden eine entscheidende Rolle. Neben Produktion und Zersetzung steht die Verteilung der organischen Substanz noch zu weiteren Gegebenheiten wie Strömungen, Bodengestaltung, Kornzusammensetzung, Tiefe und Alter der Sedimente, Entfernung von der Küste und anderem in Beziehung.

Aus den Untersuchungen von GRIPENBERG (5) im Ostseeraum geht hervor, daß diese Faktoren grundsätzlich auch in einem Gebiet mit niedrigem Salzgehalt gelten. Unter den Brackwasserregionen nehmen jedoch die gezeitenbeeinflussten Strommündungen nach BROCKMANN (2a) eine bemerkenswerte Sonderstellung ein, da für diese nicht allein der verringerte Salzgehalt, sondern die durch Gezeiten- und Dichteströmungen bewirkte Vermischung von zwei Wasserkörpern mit sehr verschiedenen chemischen und physikalischen Eigenschaften, Meerwasser einerseits und Flußwasser andererseits, als Hauptkriterium zu gelten haben [BROCKMANN (2a), LÜNEBURG (9), HENSEN (6), LUCHT (8)]. Da ferner die Brackwasserzonen der Tideflüsse periodischen, aperiodischen und jahreszeitlichen Verlagerungen unterliegen und sich außerdem durch einen hohen

Trübungsgrad und eine beträchtliche Sedimentation auszeichnen, kann hier mit weiteren Besonderheiten bei der Verteilung der organischen Substanz in den Sedimenten gerechnet werden. — Bisher liegen von keiner Stelle der deutschen Nordseeküste eingehende Untersuchungen über den Fragenkomplex vor, obwohl nicht zu verkennen ist, daß die dabei zu erzielenden Ergebnisse auch praktische Bedeutung erlangen können¹⁾.

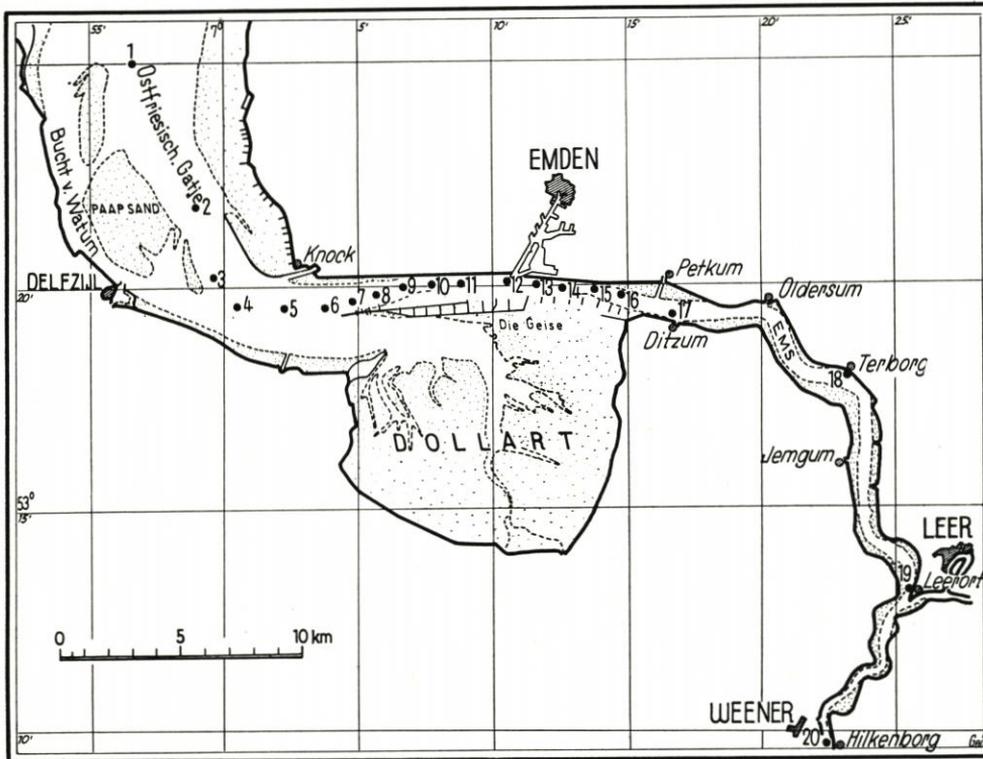


Abb. 1. Lage der Stationen im untersuchten Abschnitt des Mündungsgebiets der Ems

II. Untersuchungsgebiet

Das untersuchte Gebiet (Abb. 1) umfaßt die 56,7 km lange Strecke der Ems vom Ostfriesischen Gatte, etwa in Höhe der Ortschaft Manslagt, bis zur alten Fährstelle bei Hilkenborg, unweit von Weener. Der im ostfriesischen Wattenraum und nördlich des Dollarts gelegene Abschnitt der Außenems enthält die Stationen 1 bis 16, der sich vom Ostrand des Dollarts flußaufwärts erstreckende Abschnitt der Unterems die Stationen 17 bis 20.

Bei einer Peilung des Gebietes im April 1953 wurden die folgenden, auf mittleres Springtideniedrigwasser bezogenen Tiefen ermittelt. Die Ausgleichung der Tiefen im Fahrwasser bis zum Emdener Außenhafen (Stat. 12) ist auf Baggerung zurückzuführen.

¹⁾ Die vorliegende Arbeit entstand im Zusammenhang mit langjährigen und vielseitigen Bemühungen des Wasser- und Schiffsamtes Emden zur Klärung der Sedimentationsbedingungen im Mündungsgebiet der Ems. Diesem Amt schulde ich großen Dank für die mir entgegengebrachte Unterstützung, für die Beschaffung der erforderlichen Sedimentproben und für die freundliche Überlassung aller benötigten Unterlagen. Gleichfalls danke ich dem Leiter der Forschungsstelle Norderney, Herrn Diplomingenieur KRAMER, und mehreren Mitarbeitern dieser Dienststelle für die mir zuteil gewordene Hilfe.

Die Tiefen der Ems im April 1953

Station Nr.	Lage (Bezeichnung der Tonne)	Tiefe (m)	Station Nr.	Lage (Bezeichnung der Tonne)	Tiefe (m)
1	G/1a	8,1	11	E/17	7,2
2	G/3	13,0	12	E/R	7,0
3	G/5	7,0	13	1—A	5,7
4	G/6	7,2	14	2—B	7,5
5	E/12	7,2	15	2a—C	5,4
6	E/13	7,0	16	3—D	3,6
7	E/13a	7,4	17	4—E	5,0
8	E/14	7,1	18	K	8,9
9	E/15	7,1	19	alte Fährstelle Leerort	3,7
10	E/16	7,1	20	alte Fährstelle Hilkenborg	3,0

Im gesamten Gebiet macht sich der Gezeiteinfluß sehr deutlich bemerkbar. Der mittlere Tidehub beträgt am Paapsand (Stat. 2) 2,7 m, an der Knock (Stat. 5) 2,8 m, an der neuen Emdener Seeschleuse (Stat. 12) 3,0 m, bei Terborg (Stat. 18) 2,8 m und bei Weener (oberhalb Stat. 20) 2,2 m.

Obwohl im Tidebereich eines Flusses kein stationäres Salzgehaltsgefälle vorliegt, ist eine Unterteilung dieses Gebiets nach dem Schema von REDEKE (13), modifiziert durch REMANE (14), in eine polyhaline (16,5 — 30 ‰ S), eine mesohaline (3 — 16,5 ‰ S) und eine oligohaline Zone (0,5 — 3 ‰ S) zweckdienlich, auch auf die Gefahr hin, daß eine derartige Zonierung bis zu einem gewissen Grade anfechtbar ist. — Nach den Feststellungen von KÜHL und MANN (7) kann der Emsabschnitt von Borkum bis zur Knock (Stat. 5) als polyhaline Brackwasserzone gelten. Weiter flußaufwärts, etwa bis in die Gegend unterhalb von Oldersum (Stat. 17), erstreckt sich die mesohaline Region, in welcher sich der „Schwerpunkt der Brackwasserzone“ [LUCHT (8)] mit den größten tidebedingten Salzgehaltsschwankungen befindet. Die sich anschließende oligohaline Zone grenzt im Raum von Kritzum-Terborg (unweit Stat. 18) an den eigentlichen Süßwasserbereich des Emsflusses. Im oberen Abschnitt der oligohalinen Zone ist ein ziemlich rapider Abfall des Salzgehalts auf kurzer Strecke, der sogenannte Salzgehaltssprung, nachweisbar. — Bei Berücksichtigung der Tatsachen, daß die gesamte Brackwasserregion ständigen Lageveränderungen unterliegt und daß ferner das Wasser in Bodennähe im allgemeinen einen höheren Salzgehalt als das Oberwasser besitzt, wird mit einer solchen Festlegung der Zonengrenzen naturgemäß nur deren grobe Mittellage bezeichnet. Immerhin kommt deutlich zum Ausdruck, daß in der Ems die meso- und oligohaline Zone nur einen verhältnismäßig engen Raum beanspruchen — eine charakteristische Eigenart dieses Flusses, welche von KÜHL und MANN (7) auf die besondere Morphologie seiner Mündung zurückgeführt wird und auch weitere chemisch-physikalische Verhältnisse beeinflussen soll.

Eine im Rahmen dieser Untersuchung besonders interessierende Folgeerscheinung ist die Ausbildung von nur einem Trübungs- und Sinkstoffmaximum innerhalb der oligohalinen und der oberen mesohalinen Region. Unter dem Einfluß der Tiden und der jeweiligen Oberwasserführung verlagert sich die Zone des größten Sinkstoffgehalts ungefähr im Bereich Terborg—Emdener Außenhafen [HENSEN (6)].

Da die Ausbildung von Trübungsmaxima im Brackwassergebiet der Tideflüsse durch die koagulierende Wirkung des elektrolytreichen Meerwassers beim Zusammentreffen mit dem

kolloidreichen Flußwasser, wenigstens zum Teil, erklärt werden kann, sei hier abschließend auf die bedeutende Zunahme des Elektrolytgehalts zwischen Unterems und Außenems hingewiesen. Nach den Angaben von WILDEVANG (20), die allerdings nur auf einer einmaligen Untersuchung des Oberflächenwassers im Juli 1918 basieren und somit nicht verallgemeinert werden dürfen, nimmt auf der Strecke von Bingum (unweit Stat. 19) bis Emden (Stat. 12) der Natriumgehalt um das 47fache, der Kaliumgehalt um das 36fache, der Magnesiumgehalt um das 28fache, der Calciumgehalt um das 6fache, der Chloridgehalt um das 44fache und der Sulfatgehalt um das 26fache zu. Diese Angaben beziehen sich auf die Zeit des ablaufenden Wassers. Zur Flutzeit dagegen sind die Werte erwartungsgemäß niedriger und betragen auf der erwähnten Strecke nur den dritten bis vierten Teil. BROCKMANN (2a) gliedert die Sedimente in der Ems mit Hilfe der in den Schlickablagerungen gefundenen *Diatomeen*. *Coscinodiscus normani* und *Cyclotella striata* bilden die Leitformen in den Schlickablagerungen des oberen Brackwassers in der Höhe von Leer, während *Coscinodiscus normani* die schlickigen Sedimente des unteren Brackwassers im Dollart und im seewärtigen Mündungsgebiet der Ems kennzeichnen.

III. Methodik

Die erforderlichen Sedimentproben von den genannten zwanzig Stationen wurden in den Monaten November 1952, Februar 1953, Mai 1953 und Juli 1953, jeweils bei auflaufendem und bei ablaufendem Wasser, von Bord eines Motorboots aus mit Hilfe eines kleinen, nur $\frac{1}{40}$ qm fassenden Bodengreifers nach VAN VEEN entnommen. Da es unmöglich war, die gesamte Untersuchungsstrecke während der gleichen Tidephase abzufahren, mußte die Probenentnahme auf mehrere Tage ausgedehnt werden.

Im Laboratorium wurden volumengleiche Teile des an jeder Station bei Flut und bei Ebbe entnommenen Sediments vermischt, auf Membranfilter mit destilliertem Wasser entsalzen und anschließend zwei bis drei Tage bei 105° getrocknet. Das gepulverte Material kam dann, nach kurzer vorhergehender Nach-trocknung, für die Bestimmungen des organischen Kohlenstoffs und des Gesamt-Stickstoffs zur Verwendung.

Der organische Kohlenstoff wurde nach der von MOHAMED (11) angewendeten Modifikation der Methoden von MORGAN (12) und DIXON (4) ermittelt. Die aus etwa 5 g Trockensediment mittels Phosphorsäure und Chromsäureanhydrid in Freiheit gesetzten Mengen Kohlendioxyd, das teils aus den Carbonaten stammte, teils sich bei der Verbrennung der organischen Substanz bildete, wurden nacheinander in Absorptionsröhren an Natronasbest gebunden und ausgewogen. Aus den gefundenen Werten für organischen Kohlenstoff wurde der Gehalt an organischer Substanz durch Multiplikation mit dem Faktor 1,724 berechnet. Dieser in der agrikulturnchemischen Bodenanalyse gebräuchliche Faktor setzt einen Gehalt von 58 % C im Humus voraus und wurde von GRIPENBERG (5) auch für die Brackwassersedimente der Ostsee verwendet.

Die Stickstoffbestimmungen erfolgten nach einer Halbmikromodifikation der üblichen KJELDAHL-Methode. Ungefähr 5 g genau eingewogenes Trockensediment wurden vier Stunden lang mit rauchender Schwefelsäure, unter Benutzung eines Tröpfchens Quecksilber als Katalysator, behandelt. Zur Destillation des gebildeten Ammoniaks fand die Apparatur von PARNAS-WAGNER Anwendung. Der nicht durch Ammoniak gebundene Anteil der vorgelegten 25 ccm n/100-Schwefelsäure wurde mit n/100-Natronlauge gegen „Mischindikator 5“ (Firma E. MERCK, Darmstadt) zurücktitriert.

Durch zahlreiche Analysen mit der gleichen Probe konnte die Zuverlässigkeit der Kohlenstoff- und Stickstoffbestimmungen bewiesen werden. Die Resultate stimmten bei den erstgenannten auf $\pm 0,05\%$, bei den letztgenannten auf $\pm 0,006\%$ überein. Bisweilen vorkommende größere Abweichungen ließen sich in fast allen Fällen auf eine ungenügende Nach-trocknung der äußerst leicht wasseranziehenden Trockensedimente zurückführen.

Von jeder Probe der gemischten frischen Sedimente wurde außerdem der Sauerstoffverbrauch im Verlauf von zehn Tagen nach der Methode von ANDERSON (1) festgestellt. In den nachfolgenden Analy-sentabellen ist der Sauerstoffverbrauch sowohl in mg O₂ je 100 g Trockensediment als auch in ccm O₂ je Gramm organischen Kohlenstoffs angegeben.

IV. Untersuchungsergebnisse

Aus den Tabellen 1 bis 4 sind die Prozentanteile des organischen Kohlenstoffs und des Gesamt-Stickstoffs, das hieraus berechnete C/N-Verhältnis und der in zweifacher Form ausgedrückte Sauerstoffverbrauch von allen Proben der vier, zu verschiedenen Jahreszeiten entnommenen Sedimentserien zu ersehen. Die höchsten und niedrigsten Werte sind jeweils besonders kenntlich gemacht.

1. Organischer Kohlenstoff- und Stickstoffgehalt (Abb. 2)

Im untersuchten Raum schwankt, je nach Ort und Jahreszeit, die Menge des organischen Kohlenstoffs von 0,111 ‰ bis 2,143 ‰ und des Gesamt-Stickstoffs von 0,010 ‰ bis 0,191 ‰. Bei beiden Komponenten der organischen Substanz liegen die begrenzenden Werte etwa im Verhältnis von 1 : 20 auseinander. Die durch Anwendung des Faktors 1,742 aus dem organischen Kohlenstoffgehalt berechnete Menge an organischer Substanz bewegt sich somit zwischen 0,191 ‰ und 3,695 ‰.

Tabelle 1

Organische Substanz (org. Kohlenstoff, Stickstoff, C/N-Verhältnis) und Sauerstoffverbrauch in den Sedimenten des Brackwassergebiets der Ems; 11.—13. November 1952

Station	Organischer Kohlenstoff ‰	Stickstoff ‰	C/N	Organische Substanz ‰	Sauerstoffverbrauch in 10 Tagen	
					mg O ₂ /100 g	ccm O ₂ /g C
1	0,160	0,014	11,4	0,276	3,32	14,53
2	0,112	0,010	11,2	0,193	—	—
3	0,129	0,016	8,1	0,222	4,53	24,60
4	0,221	0,021	10,5	0,381	8,74	27,68
5	0,469	0,053	8,8	0,809	7,54	11,25
6	0,568	0,051	11,1	0,979	8,37	10,32
7	0,305	0,023	13,3	0,526	5,28	12,12
8	0,461	0,063	7,3	0,795	10,28	15,26
9	0,561	0,045	12,5	0,967	8,81	10,99
10	0,611	0,061	10,0	1,053	10,94	12,54
11	0,544	0,051	10,7	0,938	11,27	14,17
12	0,328	0,027	12,2	0,566	6,96	14,86
13	0,508	0,059	8,6	0,876	10,67	14,70
14	0,575	0,057	10,1	0,991	10,72	13,05
15	0,576	0,055	10,5	0,993	11,42	13,88
16	0,611	0,068	9,0	1,053	13,92	15,94
17	0,656	0,065	10,1	1,131	8,07	8,61
18	0,675	0,068	9,9	1,164	7,77	8,06
19	0,154	0,010	15,4	0,266	2,25	10,25
20	0,118	0,010	11,8	0,203	2,25	13,37

Betrachtet man die Verteilung der organischen Substanz im Raum, so stimmen alle Sedimentserien dahingehend überein, daß im mittleren Untersuchungsabschnitt, der die meso- und oligohaline Brackwasserzone umfaßt, durchweg größere organische Substanzmengen als im oberen polyhalinen und im oberen, bereits Süßwasser führenden Bereich der Ems vorliegen. Die jahreszeitlichen Unterschiede betreffend kann festgestellt werden, daß im Herbst und Frühjahr durchschnittlich kleine, im Winter und Sommer dagegen allgemein größere Mengen organischer Substanz anzutreffen sind.

In der November-Serie wurde im Mittel aus allen Proben 0,417 % C und 0,041 % N nachgewiesen. Mehr oder weniger deutlich ausgeprägte Kohlenstoffmaxima lagen in dieser Serie mit ihren Spitzen bei den Stationen 6, 10 und 18. Obwohl die räumliche Verteilung des Stickstoffs demgegenüber nur unwesentliche Gangabweichungen zeigte, ergab das C/N-Verhältnis

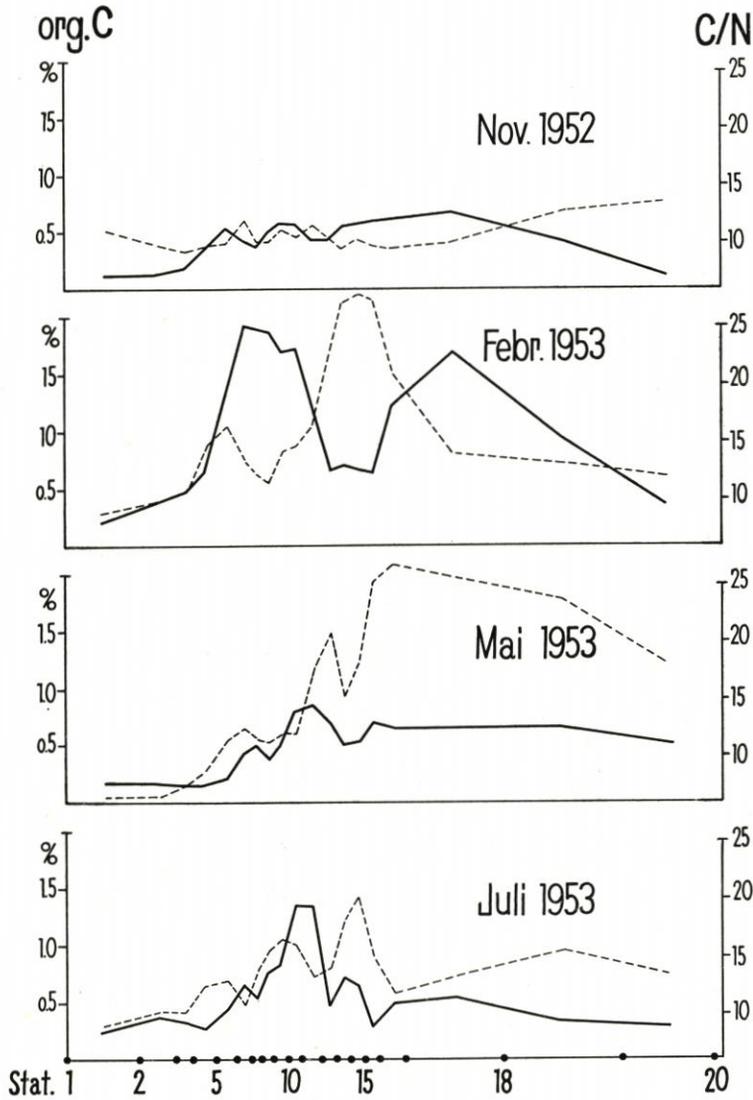


Abb. 2. Organischer Kohlenstoffgehalt und C/N-Verhältnis im Brackwassergebiet der Ems (überlappende Mittelwerte). — Dicke, durchgehende Linie: organischer Kohlenstoff; dünne, unterbrochene Linie: C/N-Verhältnis

eine Schwankungsbreite von 7,3 bis 15,4, jedoch einen Mittelwert von 10,6. — Die im Februar entnommene Winterserie enthielt im Durchschnitt aller Proben 1,026 % C und 0,072 % N. Als besonders kennzeichnend in dieser Serie verdienen zwei stark hervortretende Maxima im Kohlenstoff- und Stickstoffgehalt erwähnt zu werden, von denen das eine im Bereich der Außen-Ems

Tabelle 2

Organische Substanz (org. Kohlenstoff, Stickstoff, C/N-Verhältnis) und Sauerstoffverbrauch in den Sedimenten des Brackwassergebiets der Ems; 24.—27. Februar 1953

Station	Organischer Kohlenstoff ‰	Stickstoff ‰	C/N	Organische Substanz ‰	Sauerstoffverbrauch in 10 Tagen	
					mg O ₂ /100 g	ccm O ₂ /g C
1	0,111	0,013	8,5	0,191	4,10	25,86
2	0,358	0,039	9,2	0,617	4,57	8,94
3	0,400	0,037	10,8	0,690	7,27	12,72
4	0,567	0,054	10,5	0,934	9,43	11,64
5	0,728	0,037	19,7	1,255	8,65	8,32
6	2,076	0,154	13,5	3,579	19,92	6,72
7	1,783	0,130	13,7	3,074	19,53	7,67
8	2,015	0,191	10,6	3,474	22,97	7,98
9	1,739	0,144	12,1	2,998	19,06	7,67
10	1,669	0,101	16,5	2,877	15,82	6,64
11	1,776	0,139	12,8	3,062	17,14	6,76
12	0,520	0,026	20,0	0,897	2,63	3,54
13	0,752	0,029	25,9	1,296	3,23	3,01
14	0,654	0,023	28,4	0,113	3,09	3,31
15	0,627	0,023	27,3	1,081	3,43	3,83
16	0,630	0,023	27,4	1,086	4,65	5,17
17	1,891	0,132	14,3	3,260	29,60	10,96
18	1,511	0,111	13,6	2,605	1,72	0,80
19	0,395	0,031	12,7	0,681	3,91	6,93
20	0,319	0,029	11,0	0,550	4,65	10,21

Tabelle 3

Organische Substanz (org. Kohlenstoff, Stickstoff, C/N-Verhältnis) und Sauerstoffverbrauch in den Sedimenten des Brackwassergebiets der Ems; 18.—21. Mai 1953

Station	Organischer Kohlenstoff ‰	Stickstoff ‰	C/N	Organische Substanz ‰	Sauerstoffverbrauch in 10 Tagen	
					mg O ₂ /100 g	ccm O ₂ /g C
1	0,164	0,025	6,6	0,283	17,24	73,60
2	0,193	0,029	6,6	0,333	17,62	63,91
3	0,141	0,023	6,2	0,243	17,19	85,34
4	0,130	0,015	8,1	0,224	18,50	99,62
5	0,156	0,017	9,2	0,269	18,75	84,14
6	0,256	0,019	13,5	0,441	18,04	49,33
7	0,583	0,050	11,7	1,005	20,79	24,97
8	0,426	0,038	11,2	0,583	17,36	28,53
9	0,318	0,028	11,4	0,548	18,07	39,78
10	0,690	0,055	12,5	1,190	25,91	26,29
11	0,915	0,078	11,7	1,577	30,71	23,49
12	0,785	0,034	23,1	1,353	16,92	15,09
13	0,633	0,034	18,6	1,091	14,80	16,37
14	0,347	0,031	11,2	0,598	16,78	33,85
15	0,702	0,028	25,1	1,210	14,87	14,83
16	0,709	0,022	25,3	1,222	17,08	16,86
17	0,566	0,020	28,3	0,976	15,89	19,65
18	0,712	0,031	23,0	1,228	17,36	17,07
19	0,590	0,024	24,6	1,017	15,00	17,80
20	0,407	0,036	11,3	0,702	11,43	19,66

zwischen den Stationen 6 bis 11 und das andere in der Unter-Ems bei den Stationen 17 und 18 ausgebildet war. Auffallend ist ferner, daß der Ems-Abschnitt zwischen diesen Maximalbereichen durch ein ungewöhnlich hohes C/N-Verhältnis, mit einem Extremwert von 28,4 in Station 14, ausgezeichnet war. Aus allen Proben dieser Serie wurde ein mittleres C/N-Verhältnis von 16,2 berechnet. — Die Verteilung der organischen Substanz in den Ablagerungen der Mai-Serie zeigte eine gewisse Ähnlichkeit mit jener in der November-Serie, auch kamen ziemlich übereinstimmende Durchschnittsmengen — 0,471 % C und 0,032 % N — zur Feststellung. Kleinere Bereiche mit relativ hohem Kohlenstoffgehalt lagen diesmal mit ihren Gipfelpunkten bei den

Tabelle 4

Organische Substanz (org. Kohlenstoff, Stickstoff, C/N-Verhältnis) und Sauerstoffverbrauch in den Sedimenten des Brackwassergebiets der Ems; 27.—29. Juli 1953

Station	Organischer Kohlenstoff %	Stickstoff %	C/N	Organische Substanz %	Sauerstoffverbrauch in 10 Tagen	
					mg O ₂ /100 g	ccm O ₂ /g C
1	0,126	0,018	7,0	0,217	4,00	8,21
2	0,371	0,034	10,9	0,640	11,13	21,00
3	0,396	0,041	9,7	0,683	22,69	41,04
4	0,245	0,023	10,7	0,422	5,76	16,46
5	0,299	0,021	14,2	0,516	5,54	12,97
6	0,594	0,051	11,7	1,024	19,40	22,86
7	0,695	0,072	9,7	1,198	22,01	22,17
8	0,382	0,022	17,4	0,659	9,00	16,12
9	1,184	0,086	13,8	2,041	21,16	12,51
10	0,531	0,028	19,0	0,915	12,22	16,11
11	2,143	0,164	13,1	3,695	47,29	15,45
12	0,585	0,044	13,3	1,009	15,65	18,73
13	0,399	0,027	14,8	0,688	6,38	11,19
14	1,047	0,048	21,8	1,805	18,13	12,12
15	0,280	0,015	18,7	0,483	4,93	12,33
16	0,321	0,028	11,5	0,553	12,18	26,56
17	0,671	0,056	12,0	1,157	20,64	21,53
18	0,416	0,029	14,3	0,717	10,97	18,46
19	0,230	0,014	16,4	0,397	5,42	16,50
20	0,339	0,033	10,3	0,584	8,09	16,71

Stationen 7, 11, 16 und 18. Eine gute Parallelität zur räumlichen Stickstoffverteilung fand sich nur im unteren Abschnitt bis etwa zur Station 11, während sich weiter flußaufwärts stärkere Gangunterschiede zwischen C und N bemerkbar machten. Im letztgenannten Bereich wurden wieder extreme C/N-Werte, bis zu 28,3 in Station 17, bestimmt. Auch das mittlere C/N-Verhältnis dieser Serie von 15,0 muß als reichlich hoch angesehen werden. — Eine beträchtlich abweichende Verteilung der organischen Substanz kam schließlich in der Juli-Serie zum Ausdruck, wo auf engem Raum, zwischen den Stationen 6 und 14, mehrfach bedeutende Quantitätsunterschiede, im Kohlenstoffgehalt von 0,382 % bis 2,143 % und im Stickstoffgehalt von 0,022 % bis 0,164 %, nachgewiesen wurden. Außerdem trat bei Station 17 ein weiteres, allerdings kleineres Maximum in Erscheinung. Diese Sommerserie erbrachte 0,562 % C, 0,043 % N und ein C/N-Verhältnis von 13,5 als Mittelwerte aus allen Proben.

2. Sauerstoffverbrauch (Abb. 3)

Der experimentell ermittelte Sauerstoffverbrauch der Sedimente in zehn Tagen unterliegt ebenfalls recht erheblichen jahreszeitlichen und lokalen Schwankungen, deren Ausmaß durch

die Extremwerte von 1,72 mg und 47,29 mg O_2 , bezogen auf 100 g Trockensediment, zu kennzeichnen ist. In den einzelnen Serien wurden folgende Mittelwerte bestimmt: November 8,06 mg, Februar 10,27 mg, Mai 18,02 mg und Juli 14,13 mg. Demnach verbrauchen die Sedimente in der kalten Jahreszeit weniger Sauerstoff als im Frühjahr und Sommer. Beim Vergleich der beiden Serien mit relativ hohem O_2 -Verbrauch waren im Mai die kleinsten, im Juli dagegen die größten räumlichen Amplituden zu bemerken. Die jeweils höchsten jahreszeitlichen Einzelwerte wurden im November und Februar an der Grenze von Außen- und Unter-Ems (Stat. 16 und 17), im Mai und Juli westlich vom Emdener Außenhafen (Stat. 10 und 11) gefunden.

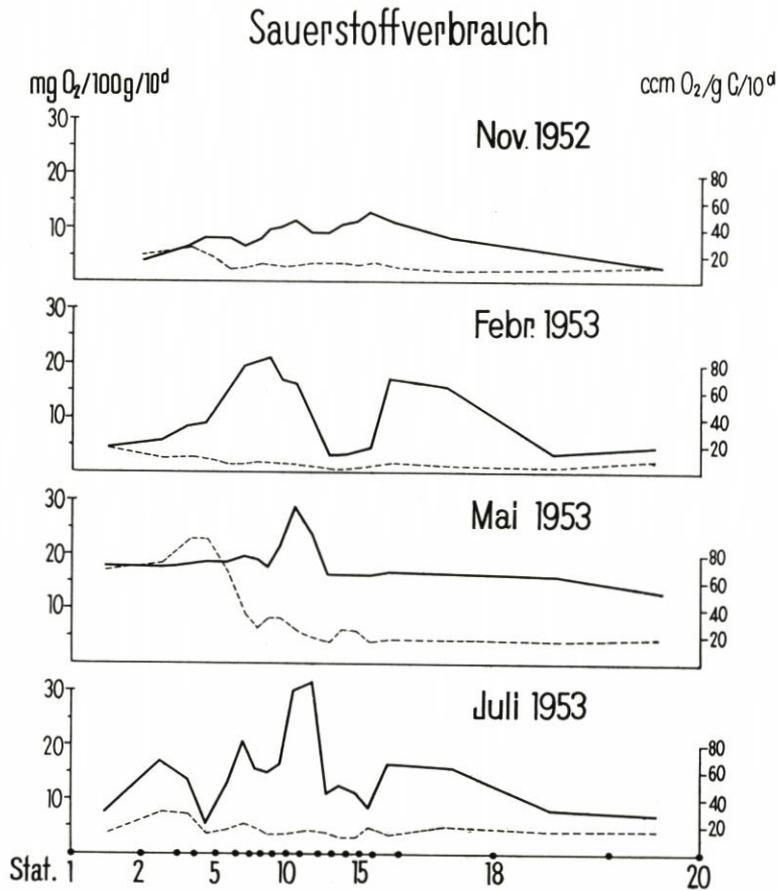


Abb. 3. Sauerstoffverbrauch der Sedimente aus dem Brackwassergebiet der Ems (überlappende Mittelwerte). — Dicke, durchgehende Linie: O_2 -Verbrauch in mg O_2 /100g/10^d; dünne, unterbrochene Linie: O_2 -Verbrauch in ccm O_2 /g C/10^d

Wird dagegen der O_2 -Verbrauch auf organischen Kohlenstoff bezogen, so fluktuieren die Werte von 0,80 ccm bis 99,62 ccm je Gramm C. Die durchschnittlich niedrigsten Werte wurden dabei in der Februar-Serie, die entsprechend höchsten in der Mai-Serie festgestellt. Alle Sedimentserien sind durch einen typischen Anstieg des O_2 -Verbrauchs im polyhalinen Bereich der untersuchten Strecke charakterisiert. Dieser war im Mai am ausgeprägtesten und lieferte hier, in Station 4, den oben genannten Maximalwert. Ein weiteres Maximum fand sich in der Fe-

bruar- und Juli-Serie im Gebiet der Stationen 16 und 17, während die Mai-Serie noch bemerkenswerte Spitzen bei den Stationen 9 und 14 aufwies

V. Besprechung der Ergebnisse

Nach den vorliegenden Ergebnissen muß der Anteil, den die organische Substanz an der Zusammensetzung der oberflächlichen Sedimente zu einem beliebigen Zeitpunkt einnimmt, als gering bezeichnet werden, obwohl gerade im Brackwassergebiet eines Tideflusses eine sehr intensive Sedimentation herrscht. Nahezu alle einleitend genannten Verfasser berichten über einen durchschnittlich höheren organischen Kohlenstoff- und Stickstoffgehalt in den rein marinen Ablagerungen, nur CORRENS (3) und MOHAMED (11) geben für den maximalen C-Gehalt stets Werte unter 1 % an. Zwar handelt es sich bei den meisten Arbeiten um Meeresgebiete mit vollem Salzgehalt, doch fand auch GRIPENBERG (5) in den Sedimenten der salzärmeren Ostsee eine Schwankungsbreite im organischen C-Gehalt von 0,23 % bis 4,64 % und im N-Gehalt von 0,021 % bis 0,590 %, somit also Minimal- und Maximalwerte, die mehr als doppelt so hoch wie die entsprechenden eigenen Ergebnisse sind.

In der Regel erstreckt sich das C/N-Verhältnis in marinen Ablagerungen über eine Spanne von etwa 7,5 bis 16,0. GRIPENBERG (5), WISEMAN und BENNETT (21) und MOHAMED (11) haben allerdings auch abweichende Extremwerte, bis zu 2,0 einerseits und bis zu 34,2 andererseits, namhaft gemacht. Die im Emsgebiet ermittelte Schwankungsbreite von 6,2 bis 28,4 und das mittlere C/N-Verhältnis von 13,6 sind daher nicht als völlig ungewöhnlich zu betrachten.

Bei der charakteristischen Kürze der Brackwasserregion in der Ems und unter Berücksichtigung der hier herrschenden Strömungsgeschwindigkeiten ist es sehr unwahrscheinlich, daß ein nennenswerter Anteil der organischen Substanz von den selbstverständlich auch hier vorkommenden spezifischen Brackwasserorganismen des Wassers und des Bodens entstammt. Der weitestgehendste Teil der organischen Substanz kann als allochthon gelten und besitzt zweifellos seinen Ursprung teils in fluviatilen, teils in marinen Organismen, die mit den Strömungen in Bereiche mit einem nicht mehr verträglichen Salzgehalt gelangen und dort absterben. Demnach werden im untersuchten Gebiet zwei letal wirkende „Vernichtungsschranken“ zu suchen sein: eine obere, wo der Salzgehalt bereits eine Höhe besitzt, die für die eigentlichen Flußorganismen lebensbegrenzend ist, und eine untere, wo durch die Verminderung des Salzgehaltes der größte Teil der mit dem Meerwasser herbeigeführten Lebewesen nicht mehr existieren kann [vgl. BROCKMANN (2a)].

Alle Analysenserien lassen übereinstimmend einen auffallenden Anstieg im organischen Gehalt bei den Stationen 17 bis 18 erkennen. Bei Kritzum, unweit von Station 18, liegt nach den Befunden von KÜHL und MANN (7) der sogenannte Salzgehaltsprung. Die hier auf engem Raum auftretende Zunahme der Salinität von etwa 0,5 ‰ auf 2 bis 3 ‰ ist für die mit dem Flußwasser herbeigeschafften Organismen nicht mehr verträglich. Eine räumlich schwer festzulegende Zone oberhalb und innerhalb des Salzgehaltsprungs stellt folglich die „obere Vernichtungsschranke“ dar. — Im unteren Untersuchungsabschnitt macht sich ebenfalls in allen Serien ein Anstieg in den Mengen der organischen Substanz im Bereich der Stationen 5 bis 7 bemerkbar. Gemäß den Angaben von HENSEN (6) handelt es sich hier um einen Raum, in dem der Salzgehalt im Kenterpunkt des Flutstroms von 13 ‰ bis 26 ‰ und im Kenterpunkt des Ebbstroms von 6 ‰ bis 14 ‰ schwanken kann. KÜHL und MANN (7) verlegen in dieses Gebiet die „mittlere“ Grenze zwischen der polyhalinen und der mesohalinen Brackwasserzone, die bekanntlich nach der REDEKE-REMANESCHEN Einteilung einen mittleren Salzgehalt von 16,5 ‰ zur Voraussetzung hat. Offenbar befindet sich unterhalb und innerhalb dieser Grenze die „untere Vernichtungsschranke“,

der alle an einen höheren Salzgehalt angepaßten marinen Lebewesen — und nach REMANE (14) sind die Lebewesen der polyhalinen Brackwasserzone als echte marine Organismen zu betrachten — in kurzer Zeit zum Opfer fallen.

Die Anzahl der an den Vernichtungsschranken zu Grunde gehenden Lebewesen, damit aber auch die Menge der von ihnen gelieferten organischen Substanz in den Sedimenten, hängt von zwei Größen ab, von denen die eine in der Höhe der marinen beziehungsweise fluviatilen Produktion und die andere in der Intensität der Wasserführung zu suchen ist. Demnach kann es vorkommen, daß zu Zeiten, in welchen die Produktion im allgemeinen gering ist, auch dann eine beträchtliche Vernichtungsrate erzielt werden kann, wenn durch eine hohe Strömungsgeschwindigkeit große Wassermengen bewegt werden. Das scheint besonders im Winter der Fall zu sein, da der gerade im Februar festgestellte hohe organische Gehalt der Ablagerungen keineswegs mit der zu dieser Jahreszeit niedrigen Produktion im Einklang steht. Aus den von HENSEN (6) und KÜHL und MANN (7) vermerkten Abflußmengen am Emswehr bei Herbrum (Ems km 214) kann jedoch ersehen werden, daß im Winter und Frühjahr ziemlich regelmäßig mit einer verhältnismäßig hohen Oberwasserführung zu rechnen ist. Damit würde jedenfalls das Wintermaximum der organischen Substanz in der Unter-Ems erklärbar sein. Analoge Vorgänge können auch die Bildung des anderen Maximalbereichs in der Außen-Ems bedingt haben. Unter entsprechenden hydrographischen und meteorologischen Gegebenheiten zur Flutzeit auflaufende große Wassermengen würden dafür Voraussetzung sein. — Es ist nicht angängig, die erzielten Befunde mit wenigen Daten der Wasserstände, Strömungsgeschwindigkeiten und Durchflußmengen erhärten zu wollen, da die bereits abgelagerte organische Substanz Gegenstand dieser Arbeit ist und die Sedimentierung fortlaufend über längere Zeiträume erfolgt, für die eine Analyse der bereits schon während eines Tages stark wechselnden Bedingungen von vornherein aussichtslos erscheinen muß.

Der mehrgipfelige organische Maximalbereich im Sommer kann ohne Schwierigkeiten mit der hohen marinen und fluviatilen Produktion zu dieser Jahreszeit erklärt werden.

Ganz allgemein steht die Längenausdehnung der brackwasserwärts von den Vernichtungsschranken gelegenen Maximalbereiche an organischer Substanz und wahrscheinlich auch deren lokale Anhäufung mit dem transportierenden Effekt der verschiedenen nach Richtung und Geschwindigkeit wechselnden Strömungen im Zusammenhang, doch stößt auch hier jeder Versuch einer Erforschung der speziellen Ursachen zunächst noch auf unüberwindliche Hemmnisse. —

Wie einführend zum Ausdruck gebracht wurde, bestimmt auch der Zersetzungsgrad maßgeblich die Verteilung der organischen Substanz. Da in den oberflächlichen Ablagerungen flacher Gewässer grundsätzlich Sauerstoff bei den Zersetzungsprozessen benötigt wird, kann der O_2 -Verbrauch der Sedimente, allerdings mit einigen Vorbehalten, als Maßstab für den oxydativen Abbau der organischen Stoffe gewertet werden. — Beim Vergleich der Kurven in Abbildung 2 und 3 ist leicht zu ersehen, daß zwischen der räumlichen Verteilung der organischen Substanz, ausgedrückt durch den C-Gehalt, und dem Sauerstoffverbrauch, bezogen auf das Sedimentgewicht, eine ziemlich gute Parallelität besteht. Ablagerungen mit einem hohen organischen Gehalt besitzen folglich im allgemeinen auch eine verhältnismäßig hohe oxydative Zersetzungsrate. Es ist jedoch nicht möglich, aus dem experimentell festgestellten O_2 -Verbrauch unmittelbar auf den Anteil organischer Stoffe an der Sedimentzusammensetzung zu schließen. So wurde in der Mai-Serie durchschnittlich wenig organischer Kohlenstoff und Stickstoff gefunden, während der O_2 -Verbrauch, bei guter Gangparallelität zum C-Gehalt, beachtlich hohe Werte erbrachte. Diese Tatsache ist weiter nicht verwunderlich, da bekanntermaßen der oxydative Abbau organischer Stoffe temperaturabhängig ist.

Seit den Untersuchungen von WAKSMAN und HOTCHKISS (19) und ANDERSON (1) kann als gesichert gelten, daß die organische Substanz in den Sedimenten in sehr unterschiedlichem Maße

der bakteriellen Zersetzung in Gegenwart von Sauerstoff anheimfällt. Dem letztgenannten Verfasser folgend, wurde als Maßstab für die Verfügbarkeit der organischen Stoffe, oxydativen Prozessen gegenüber, der O_2 -Verbrauch der Sedimente auf die Gewichtseinheit des darin enthaltenen organischen Kohlenstoffs berechnet. — Die gefundenen Werte sind im Durchschnitt bedeutend kleiner als jene, die ANDERSON (der in seinen Tabellen allerdings nur die Ergebnisse des O_2 -Verbrauchs in 15 Tagen aufführt) von rein marinen, teilweise sogar aus großen Tiefen entnommenen Sedimenten berichtet. Wie aus den Kurven in Abbildung 3 zu erkennen ist, liegt der O_2 -Verbrauch je Gramm Kohlenstoff im größten Teil des untersuchten Emsgebietes durchgängig auf etwa gleicher Höhe. Alle Serien zeigen jedoch im Bereich der Stationen 3 bis 6 einen \pm höheren O_2 -Verbrauch, der besonders im Mai beträchtliche Werte ergab. Es verdient erwähnt zu werden, daß KÜHL und MANN (7) gerade an dieser Stelle eigenartig abweichende chemische Verhältnisse im Wasser, unter anderem auch zeitweilig ein enormes O_2 -Defizit, bemerkt haben und zu dem Schluß gelangen, „daß hier in der Tiefe irgendwelche sauerstoffzehrenden Vorgänge stattgefunden haben“. Aus den eigenen Befunden ist nur der Hinweis möglich, daß die organischen Stoffe, die nahe der Grenze der polyhalinen Brackwasserregion abgelagert sind, offenbar leichter der oxydativen und bakteriellen Zersetzung unterliegen als jene aus dem Innern der meso- und oligohalinen Zone.

VI. Zusammenfassung

1. In den verschiedenen Jahreszeiten (November 1952; Februar, Mai und Juli 1953) von zwanzig Stationen des Brackwassergebiets der Ems entnommenen Sedimenten wurde der Gehalt an organischer Substanz durch Bestimmung des organischen Kohlenstoffs und des Gesamt-Stickstoffs ermittelt.

2. Der Anteil der organischen Substanz an der Zusammensetzung der Sedimente ist nicht so beträchtlich, wie auf Grund der herrschenden intensiven Sedimentation angenommen wird. Je nach Ort und Zeit schwankt der organische Kohlenstoffgehalt von 0,111 % bis 2,143 %, entsprechend organischen Substanzmengen von 0,191 % bis 3,695 %. Der Stickstoffgehalt bewegt sich in den Grenzen von 0,010 % bis 0,191 %. Das C/N-Verhältnis variiert von 6,2 bis 28,4 und beträgt im Mittel 13,6.

3. In der meso- und oligohalinen Zone gelangt zu jeder Jahreszeit mehr organische Substanz zur Ablagerung als in der polyhalinen Zone oder im süßwasserführenden Flußabschnitt. — Im Winter und Sommer finden sich durchschnittlich größere Mengen organische Substanz als im Herbst und Frühjahr.

4. Die räumliche Verteilung der organischen Substanz beweist das Vorhandensein von lebensbegrenzenden Vernichtungsschranken in der Brackwasserregion. Eine obere Vernichtungsschranke, der die Flußorganismen zum Opfer fallen, liegt oberhalb und innerhalb des Salzgehaltssprungs in der oligohalinen Zone. Eine untere Vernichtungsschranke, welche die Existenzgrenze für die marinen Organismen darstellt, befindet sich unterhalb und innerhalb der Grenze zwischen polyhaliner und mesohaliner Zone.

5. Es wird gefolgert, daß die Mengen organischer Substanz und ihr Verteilungszustand im Innern der Brackwasserregion zu einer bestimmten Zeit einerseits mit der marinen bzw. fluviatilen Produktion und andererseits mit hydrischen Faktoren, im besonderen der Oberwasserführung und den Strömungsverhältnissen, in Beziehung stehen.

6. Der Sauerstoffverbrauch der Sedimente in zehn Tagen variiert von 1,72 bis 47,29 mg O_2 /100 g Trockensediment und zeigt eine deutliche Gangparallelität zur räumlichen Verteilung der organischen Substanz. Im Frühjahr und Sommer ist ein höherer O_2 -Verbrauch als im Herbst und Winter nachweisbar.

7. Die Verfügbarkeit der organischen Substanz für oxydative Zersetzungsprozesse, geschlossen aus dem Sauerstoffverbrauch je Gewichtseinheit des vorhandenen organischen Kohlenstoffs, ist im Grenzgebiet der polyhalinen und mesohalinen Zone stets größer als innerhalb der meso- und oligohalinen Zone.

VII. Schriftenverzeichnis

1. ANDERSON, D. Q.: Distribution of organic matter in marine sediments and its availability to further decomposition. J. Mar. Research 2, 225—235, 1939.
2. BOYSEN JENSEN, P.: Studies concerning the organic matter of the sea bottom. Rep. Dan. Biol. Stat. 22, 1—39, 1914.

- 2a. BROCKMANN, Christoph: Das Brackwasser der Flußmündungen als Heimat und Vernichter des Lebens. *Natur und Museum*, 8, 1929.
3. CORRENS, C. W.: Die Verfahren der Gewinnung und Untersuchung der Sedimente. In: *Wiss. Ergebn. d. deutsch. Atlant. Exped. a. d. Forsch. u. Vermess.-Schiff „Meteor“*. 3. Band, 3. Teil, 1937.
4. DIXON, B. E.: The determination of carbon in rocks and minerals. *Analyst* **59**, 739—743, 1934.
5. GRIPENBERG, S.: A study of the sediments of the North Baltic and adjoining seas. *Fennia* **60**, No. 3, 1—231, 1934.
6. HENSEN, W.: Das Eindringen von Salzwasser in die Gezeitenflüsse und ihre Nebenflüsse, in Seekanäle und in Häfen. *Mitt. Hann. Versuchsanst.*, Heft 3, 20—50, 1953.
7. KÜHL, H. u. MANN, H.: Über die Hydrochemie der unteren Ems. *Veröffentl. Inst. Meeresforsch. Bremerhaven* **3**, 126—158, 1954.
8. LUCHT, F.: Hydrographische Untersuchungen in der Brackwasserzone der Elbe. *Deutsch. Hydrograph. Z.* **6**, 18—32, 1953.
9. LÜNEBURG, H.: Hydrochemische Untersuchungen in der Elbmündung mittels Elektrokolorimeter. *Arch. Deutsch. Seewarte* **59**, Nr. 5, 1—27, 1939.
10. LÜTTMER, J.: Zur Schlickbildung im Mündungsgebiet der Ems. *Kolloid-Z.* **131**, 38, 1953.
11. MOHAMED, A. F.: The distribution of organic matter in sediments from the northern Red Sea. *Amer. J. Science* **247**, Nr. 2, 116—127, 1949.
12. MORGAN, G. T.: The estimation of carbon by oxidation with chromic acid. *J. Chem. Soc.* **85**, 1004—1005, 1904.
13. REDEKE, H. C.: Über den jetzigen Stand unserer Kenntnisse der Flora und Fauna des Brackwassers. *Verh. Intern. Ver. Limnol.* **6**, 1933.
14. REMANE, A.: Einführung in die zoologische Ökologie der Nord- und Ostsee. In: GRIMPE u. WAGLER: *Die Tierwelt der Nord- und Ostsee*, Band I a, 1940.
15. REVELLE, R.: Marine bottom samples collected in the Pacific Ocean by the Carnegie on its seventh cruise. *Dissert. Univ. Calif.* 1936.
16. TRASK, P. D.: Sedimentation in the Channel Islands Region, California. *Econ. Geol.* **26**, 24—43, 1931.
17. TRASK, P. D.: Organic matter of recent marine sediments. In: *Recent marine sediments*. *Amer. Assoc. Petrol. Geol.*, Tulsa, 428—453, 1939.
18. WAKSMAN, S. A.: On the distribution of organic matter in the sea bottom and the chemical nature and origin of marine humus. *Soil Science* **36**, 125—147, 1933.
19. WAKSMAN, S. A. u. HOTCHKISS, M.: On the oxidation of organic matter in marine sediments by bacteria. *J. Mar. Research* **1**, 101—118, 1938.
20. WILDVANG, D.: *Das Reiderland*. Aurich 1920.
21. WISEMAN, J. D. H. u. BENNETT, H.: The distribution of organic carbon and nitrogen in sediments from the Arabian Sea. *John Murray Exped. 1933/34, Scient. Results* **3**, 193—221, 1940.

