

Abteilung II — Seeschifffahrt

Mitteilung 3

Methoden zur Bestimmung der Sand- und Schlickbewegung entlang den Küsten, in den Flußmündungen und den Tideflüssen. — Anwendung moderner Mittel wie radioaktive Isotope, Luminophore usw.

Von Dr.-Ing. Karl Lüders, Regierungsdirektor, Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Hannover; Dr.-Ing. Walter Hensen, Professor, Ordinarius für Grundbau und Wasserbau an der Technischen Hochschule Hannover; Dr.-Ing. Hans-Achim Klein, Oberregierungsbaurat, Wasser- und Schiffahrtsdirektion Hamburg; Dipl.-Ing. Johann Kramer, Regierungsbaurat, Leiter der Forschungsstelle Norderney; Dr.-Ing. Claus Magens, Wasser- und Schifffahrtsamt Kiel, Hafenbau, abteilung Schlei, Ellenberg über Kappeln/Schlei; Dr.-Ing. Marcus Petersen, Oberregierungsbaurat, Landesamt für Wasserwirtschaft, Kiel; Dipl.-Ing. Heinz Schulz, Oberregierungsbaurat, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz; Dr. rer. nat. Gerhard Ströhl, Dipl.-Chem., Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.

Zusammenfassung

A. Schwebstoff- und Schlickbewegung

Die Bestimmung des Schwebstoffgehaltes durch Untersuchung von Einzelproben ist zeitraubend und umständlich. Erheblich einfacher ist die photoelektrische Schwebstoffmessung, bei der die Trübung des Wassers zur Charakterisierung des Schwebstoffgehaltes benutzt wird. Dieses Verfahren ist heute so weit entwickelt, daß es unter bestimmten Voraussetzungen für praktische Zwecke ausreichend genaue Ergebnisse liefert, und zwar für die Untersuchung von Einzelproben wie auch für Messungen in situ.

Die für seebauliche Arbeiten ebenso bedeutungsvolle wie schwierige unmittelbare Beobachtung des Schlickfalles wurde mit „Schlickfallen“ ausgeführt. Diese sind durchsichtige Kunststofftrichter, die in Abständen von 1 m, untereinander angeordnet, als Meßkette ins Wasser gehängt werden. Der in den Trichtern aufgefangene Schlick kann als Einzelprobe weiter untersucht werden.

Die Schlickbewegung in einem Tidefluß, in der Oste, ist mit Erfolg mittels radioaktiver Leitstoffe beobachtet worden. Neben wichtigen Erkenntnissen über den Einfluß der Dichteströmungen und der Unterschiede der Wasserturbulenz zwischen Flut- und Ebbe-strömung auf die Schlickbewegung in dem Tidefluß haben die Untersuchungen auch weitere Erfahrungen über die praktische Anwendung dieses Verfahrens ergeben.

B. Sandwanderung

Für die unmittelbare Messung der Sandwanderung auf der Gewässersohle, die unter ständiger Wasserbedeckung liegt, steht z. Z. nur die Sandfalle zur Verfügung. Prüfungen dieses Gerätes im Laboratorium haben gezeigt, daß quantitative Bestimmungen des Sandtransportes mit diesem Gerät nicht zu erreichen sind; es können nur qualitative Aussagen gewonnen werden.

Eine andere Möglichkeit, den Sandtransport im tieferen Wasser unmittelbar zu verfolgen, bietet die Anwendung radioaktiver Leitstoffe, bei der die radioaktive Komponente von außen auf das Sandkorn aufgebracht wird, ohne dessen Form zu ändern (Anlage-methode). Hierfür wurde bisher das Nuklid Cr^{51} verwendet. Der Wanderweg des gekennzeichneten Materials läßt sich mit Hilfe der emittierten Strahlung durch Verwendung von Sonden feststellen. Im allgemeinen wird man derartige Messungen von

Bord eines Meßschiffes ausführen. Ein unbedingt sicherer Strahlungsschutz für Mensch und Tier ist zu fordern. Die Meßergebnisse werden entweder in Zeit-Weg-Plänen oder durch Isolinien dargestellt. Diese Meßmethode befindet sich noch in ihren Anfängen. Es ist anzustreben, neben einer Verbesserung der Empfindlichkeit der verwendeten Detektoren möglichst zu einer quantitativen Aussage über den Sandtransport zu gelangen.

Zur Beobachtung des Sandtransportes auf der Gewässersohle, die zeitweise über Wasser liegt (Watt), können das Verfahren der Sandfärbung oder die Verwendung luminophorer Leitstoffe in Betracht kommen. Diese Verfahren geben Hinweise auf die Ausbreitung und Umlagerung des oberflächigen Sedimentes innerhalb eines räumlich engbegrenzten Gebietes in einer kurzen Zeit (1 bis 3 Tage).

Die Methoden der mittelbaren Beobachtung des Sandtransportes sind zahlreich (morphologische, hydrographische, petrographische, biologische Methoden).

Bei der morphologischen Methode werden die aus verschiedenen Zeiten stammenden Vermessungs- oder auch Luftbildpläne eines bestimmten Gebietes miteinander verglichen und nach verschiedenen Gesichtspunkten durch Anfertigung z. B. von Differenzplänen, Tiefenänderungsplänen, Zeit-Weg-Plänen ausgewertet.

Die hydrographischen Untersuchungen können benutzt werden, um die Kräfte zu deuten, welche die Änderung der Morphologie der Gewässersohle verursachen.

Bei den petrographischen Untersuchungen werden Korngrößen, Schwermineralien, Kornrundung, Ätzwerte, Sedimentfarbe u. a. bestimmt und diese Werte in Lagepläne eingetragen, um hieraus z. B. die Bewegungsrichtung des Sandes abzuleiten.

Ebenso werden biologische Faktoren verwendet, um beispielsweise aus dem Wanderweg der Muschelschalen Schlüsse auf den Transportweg des Sandes zu ziehen.

Um die Veränderung der oberen Sedimentschichten eines größeren Wattgebietes zu verfolgen, wird die zu untersuchende Fläche biologisch kartiert. Hierbei werden u. a. der Besiedlungs- und Erhaltungszustand und die Besiedlungsdichte der kennzeichnenden Lebensgemeinschaften untersucht und in Karten dargestellt, deren Auswertung eine Aussage über die Entwicklungstendenz des untersuchten Gebietes ermöglicht.

C. Modelluntersuchungen

Trotzdem es nicht möglich ist, in einem Modell mit beweglicher Modellsohle morphologische Vorgänge quantitativ zu untersuchen, werden dennoch Versuche mit beweglicher Sohle gemacht, weil die Naturvorgänge in vielen Fällen weitgehend unklar sind und auch qualitative Ergebnisse bei vorsichtiger Ausdeutung wichtige Anregungen für die Baupraxis liefern zu können. Die größte Schwierigkeit bei der Bestimmung des Geschiebetransportes bereitet die gleichzeitige Messung der Geschiebe- und Schwebstoffbewegung. Im Modellversuch lassen sich jedoch die grundsätzlichen Vorgänge bei der Geschiebebewegung durch strömendes Wasser untersuchen. Entsprechende Versuche sind im Franzius-Institut für Grund und Wasserbau der TH Hannover in den Jahren 1958/59 durchgeführt worden. Die Versuche sind zur Zeit noch nicht abgeschlossen.

Inhalt

	Seite
A. Methoden zur Bestimmung des Schwebstoffgehaltes und des Schlickfalles	239
1. Schwebstoffmessung	239
1.1 Photoelektrische Schwebstoffmessungen	239

	Seite
1.11 Messung an Hand von Einzelproben	240
1.12 Messung in situ	240
1.2 Schwebstoffseparator	242
2. Schlickfallmessung	243
3. Beobachtung der Schlickbewegung mittels radioaktiver Leitstoffe	243
B. Methoden zur Bestimmung der Sandbewegung	249
1. Unmittelbare Methoden	249
1.1 Messungen	249
1.2 Färbungen	249
1.3 Luminophore Leitstoffe	250
1.4 Radioaktive Leitstoffe (siehe Abschnitt B 3)	250
2. Mittelbare Methoden	250
2.1 Morphologische Untersuchungen	250
2.2 Hydrographische Untersuchungen	251
2.3 Petrographische Untersuchungen	252
2.4 Biologische Untersuchungen	253
2.41 Schilluntersuchung	253
2.42 Biologische Wattuntersuchung	255
3. Beobachtung der Schlickbewegung mittels radioaktiver Leitstoffe	257
3.1 Verfahren	257
3.2 Auswahl des Nuklids	257
3.3 Herstellung radioaktiver Partikel	259
3.4 Messung der Radioaktivität im Gewässer	259
3.5 Strahlenschutz	260
3.6 Berücksichtigung der bewegenden Kräfte	260
3.7 Darstellung der Meßergebnisse	263
3.8 Bisherige Ergebnisse	264
3.9 Schlußbetrachtung	265
C. Modelluntersuchungen	265
1. Allgemeines	265
2. Versuche über Geschiebe- und Schwebstoffbewegung in einem Modellgerinne	267
2.1 Allgemeines	267
2.2 Geschiebebewegung an der Sohle in „Transportkörpern“ (Riffeln oder Bänke)	268
2.3 Bewegung des Geschiebes in Suspension	268
2.4 Beurteilung der Berechnungsmöglichkeiten und -grundlagen des Sandtransportes im Tidegebiet aufgrund der Versuche	269
3. Versuche über den Geschiebetrieb an einem idealisierten Modellstrand	270

A. Methoden zur Bestimmung des Schwebstoffgehaltes und des Schlickfalles

Bei der Planung von Schiffahrtsanlagen in den Ästuaren ist die Kenntnis der Schwebstoffführung und des Schlickfalles von besonderer Bedeutung.

1. Schwebstoffmessung

Die Bestimmung des Schwebstoffgehaltes im Wasser durch Filtrieren einer Wasserprobe, Trocknen und Wiegen ist zeitraubend und umständlich. Da der Schwebstoff im allgemeinen nicht gleichmäßig über den Querschnitt und in der Fließrichtung verteilt ist, müssen sehr viele Proben entnommen werden, um ein zutreffendes Bild zu erhalten. Das von der Sohle aufgewirbelte Material verteilt sich nach einer E-Funktion über den Querschnitt, wenn die senkrechte Geschwindigkeitskomponente sich mit der Zeit nicht ändert. Letzteres ist jedoch keineswegs der Fall, so daß der Schwebstoff mit den „Turbulenzballen“ in deutlichen Wolken transportiert wird und die theoretische Verteilung im allgemeinen nur aus Mittelwerten vieler Proben über eine längere Zeit beobachtet werden kann. Um die Zahl der Proben zu reduzieren, wurden integrierende Wasserschöpfer konstruiert, die einen Mittelwert über einen bestimmten Zeitabschnitt ergeben.

1.1 Photoelektrische Schwebstoffmessungen

Sehr einfach dagegen ist die Messung der Trübung des Wassers. Sie kann in situ und registrierend oder an Hand von Einzelproben sehr schnell mit Hilfe der Photozelle oder des Photoelements durchgeführt werden. Besonders in der Ozeanographie wurde diese Methode angewendet. Als man sie auch in den Ästuarien einführte und die Trübung zur Charakterisierung des Schwebstoffgehaltes benutzte, wurden sehr bald und mit Recht kritische Stimmen laut. Bekanntlich gibt ein und derselbe Schwebstoffgehalt im Wasser eine ganz verschieden starke Trübung, je nachdem, ob das Material sehr fein verteilt oder grobkörnig ist. Daneben spielt natürlich auch die Färbung des Wassers eine Rolle. Klein hat Wege zur Überwindung dieser Schwierigkeiten aufgezeigt und die Beziehung zwischen Korngröße und Trübung untersucht¹⁾.

Wenn sich die Korngröße der Schwebstoffe nicht wesentlich verändert, kann der Schwebstoffgehalt des Wassers mit einer für praktische Zwecke ausreichenden Genauigkeit aus der Trübung ermittelt werden. Dies ist besonders dann der Fall, wenn im Wasser neben dem Schlick Sand nur in geringem Ausmaß suspendiert wird. In der Unteren Hunte, im Ästuar der Oste und in der Unterelbe im Gebiet zwischen Glückstadt und Brunsbüttelkoog konnte eine solche, genügend enge Beziehung zwischen Trübung und Sinkstoffgehalt nachgewiesen werden. Die Abweichungen gegenüber der mittleren Beziehung zwischen Trübung (Extinktion) und Schwebstoffgehalt betrug z. B. bei rd. 200 Vergleichsmessungen in der Elbe bei Schelenkuhlen und Glückstadt, abgesehen von einigen Ausnahmen, nicht mehr als ± 30 mg/l bzw. ± 15 mg/l im Mittel. Das auf Grund dieser Messungen entworfene Diagramm von Bild 1 gestattet die Ablesung des Schwebstoffgehaltes bei einer bestimmten, gemessenen Extinktion (bzw. Lichtauslöschung in %) für eine beliebige Meßstrecke (d. h. Schichtdicke des vom Lichtstrahl durchdrungenen Wassers).

Die Gültigkeit des Lambert-Beerschen Gesetzes, d. h. eine proportionale Änderung der Extinktion mit dem Schwebstoffgehalt, wurde von Klein¹⁾ nur bis zu einem

¹⁾ Klein, H.-A.: Schwebstoffmessungen mit dem lichtelektrischen Trübungsmesser. Mitteilung Nr. 38 der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, Dez. 1952.

Extinktionskoeffizienten $k = 0,25 \text{ cm}^{-1}$ bestätigt gefunden. Bei sehr hoher Schwebstoffkonzentration ist mit einer Abweichung von der geradlinigen Beziehung zwischen Extinktion und Schwebstoffgehalt zu rechnen.

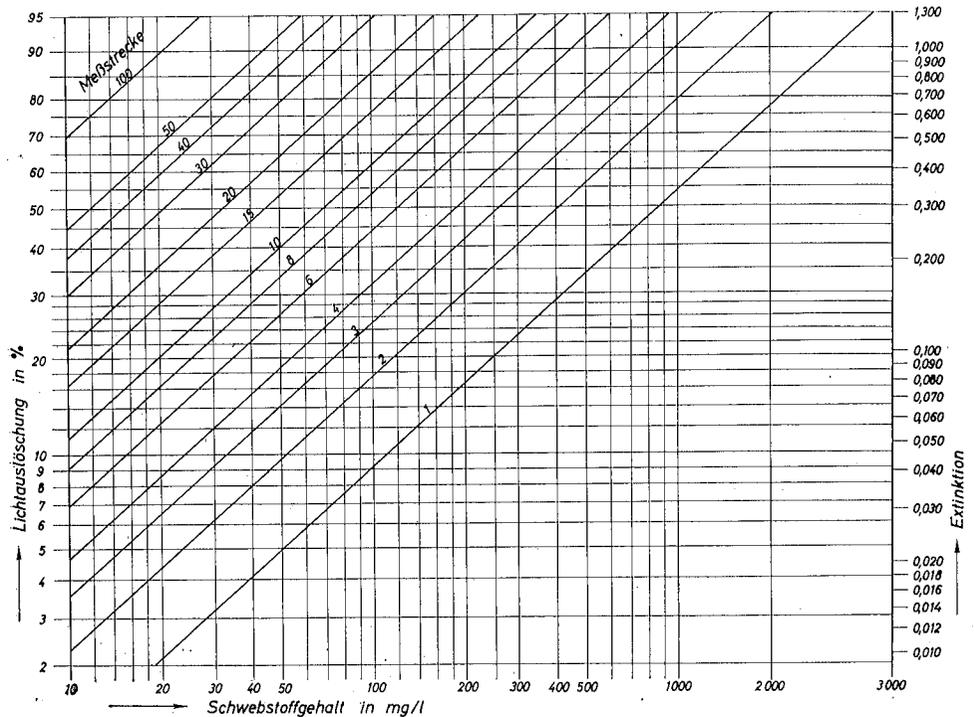


Bild 1

Beziehung zwischen Extinktion (beziehungsweise Lichtauslöschung in ‰) und dem Schwebstoffgehalt in der Unterelbe bei verschiedenen Meßstrecken

1.11 Messung an Hand von Einzelproben

Zur Messung von Einzelproben wurde ein lichtelektrisches Kolorimeter nach B. L a n g e benutzt, das für die Verwendung an Bord entsprechend umgebaut wurde¹⁾. Um Fehler durch die Färbung des Wassers auszuschalten, wurde als Vergleichslösung abgefiltertes Flußwasser verwendet. Zur genauen Messung dienten rechteckige Küvetten; für schnelle Reihenuntersuchungen (z. B. Strömungsmessungen) wurden runde Durchlaufküvetten benutzt. Die Messung einer Wasserprobe dauerte etwa 1 Minute. Das Gerät wurde an der Unteren Hunte, der Oste und der Unterelbe eingesetzt.

Es soll in diesem Zusammenhang nicht unerwähnt bleiben, daß ein, wenn auch geringer Einfluß der Größe der Küvetten auf die Beziehung zwischen Extinktion und Schwebstoffgehalt festgestellt wurde.

1.12 Messung in situ

Zur Messung der Schwebstoffverteilung in der Lotrechten während einer Tide wurde in der Oste ein von J o s e p h²⁾ entwickeltes Durchsichtigkeitsmeßgerät verwendet. Mit

²⁾ J o s e p h, J.: Meereskundliche Meßgeräte. Naturforschung und Medizin in Deutschland 1939—1946, Bd. 18 Geophysik, Teil II.

dem Gerät kann in situ die Extinktion laufend gemessen werden. Die Meßstrecke ist verstellbar und betrug 20 cm. Nach den Ergebnissen der Messungen, die mit Unterstützung des Deutschen Hydrographischen Instituts durchgeführt wurden, konnte das Schema des Bildes 2 entwickelt werden.

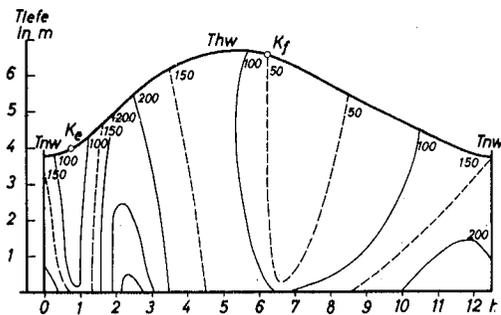


Bild 2

Schema der Schwebstoffverteilung in der Oste km 77,5 in mg/l (nach photoelektrischen Trübungsmessungen)

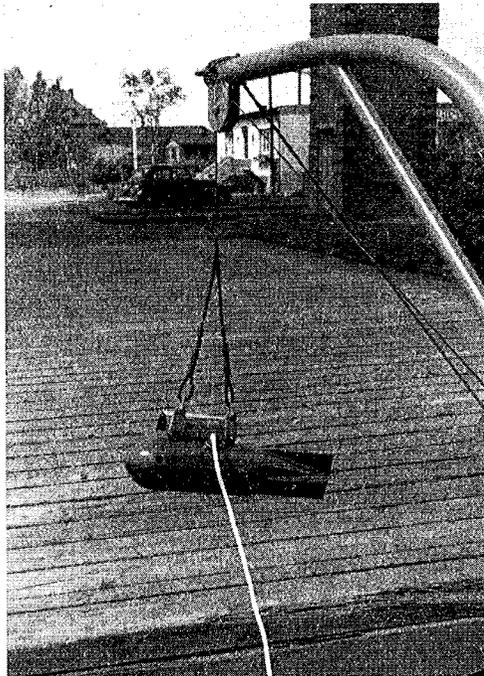


Bild 3

40 kg schwerer Meßkopf des lichtelektrischen Trübelements

Zur Untersuchung der Frage, wie dem Eintrieb und der Ablagerung von Schlick in den Schleusenvorhöfen des Kiel-Kanals (Nord-Ostsee-Kanal) besser als durch fortlaufende Baggerung begegnet werden kann, wurden in den Jahren 1955 und 1956 in der Elbe

und in den Schleusenvorhöfen die Extinktion und damit der Schwebstoffgehalt mit einem besonderen Gerät gemessen. Es bestand aus einem torpedoförmigen Schwimmkörper mit Leitflossen, der an einem Drahtseil in verschiedene Tiefen, ähnlich einem Ott-Schwimmflügel, abgelassen werden konnte (Bild 3). In dem Schwimmkörper war eine konstante Lichtquelle und eine Photozelle untergebracht. Die Helligkeit des Lichtes vor und hinter einer 2 cm langen Meßstrecke wurde auf elektrischem Wege miteinander verglichen und der Unterschied auf einer Ampèreskala sichtbar gemacht.

Zur zuverlässigen quantitativen Auswertung der gemessenen Extinktion waren erhebliche Voruntersuchungen notwendig. Eine große Anzahl im Untersuchungsbereich entnommener Wasserproben wurden sowohl gefiltert als auch ihre Extinktion untersucht, so daß eine für örtliche Verhältnisse zutreffende Beziehung zwischen Extinktion und Schwebstoffgehalt gewonnen wurde. Die weiteren Messungen erfolgten nunmehr nur noch lichtelektrisch, indem die Meßstrecke mit Lichtquelle und Photozelle vom Schiff aus ins Wasser gelassen und an Bord die Extinktion abgelesen wurde. Der Meßkopf mußte der zeitweilig auftretenden starken Strömung wegen sehr schwach sein, damit die Messung auch in größeren Tiefen möglich war.

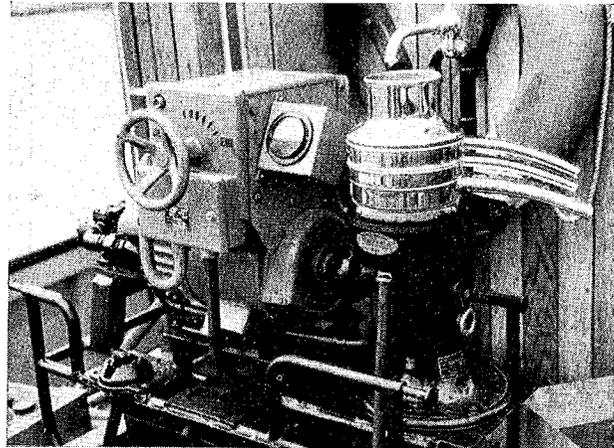


Bild 4

Schwebstoffseparator, angetrieben durch 12-V-Gleichstrommotor

Die Anzeige der Extinktion war außerordentlich empfindlich, so daß die abgelesenen Werte nicht selten sehr stark streuten. Dies lag vor allem daran, daß der Schwebstoff wolkenartig auftrat. Es wurde deshalb daneben ein integrierendes Verfahren zur Feststellung des mittleren Schwebstoffgehaltes angewandt:

1.2 Schwebstoffseparator

Aus der jeweiligen Meßtiefe wurden mittels Saugeschlauch 20 l Wasser durch einen Separator mit 1400 Umdr./Min. gepumpt (Bilder 4 u. 5). Der aus dem durchlaufenden Wasser im Separator ausgefüllte Schlick wurde entnommen, getrocknet und gewogen. Dieses Verfahren besitzt gegenüber dem Filtern von Wasserproben erhebliche Vorteile: Einmal fällt die Entnahme, die Entkeimung und die zeitraubende Filterung der Wasserprobe fort, zum anderen entfällt die Unsicherheit in der Feststellung der äußerst geringen Filtergewichte, die sich infolge der Feuchtigkeitsaufnahme der Filter aus der

Luft während des Abwägens verändern, zum dritten sind die Wägefeler bei größeren Proben aus 20 l Wasser erheblich geringer als bei Proben von wenigen mg Gewicht, und schließlich erhält man einen über Menge und Zeit integrierten Mittelwert des Schwebstoffgehaltes des zu untersuchenden Wassers.

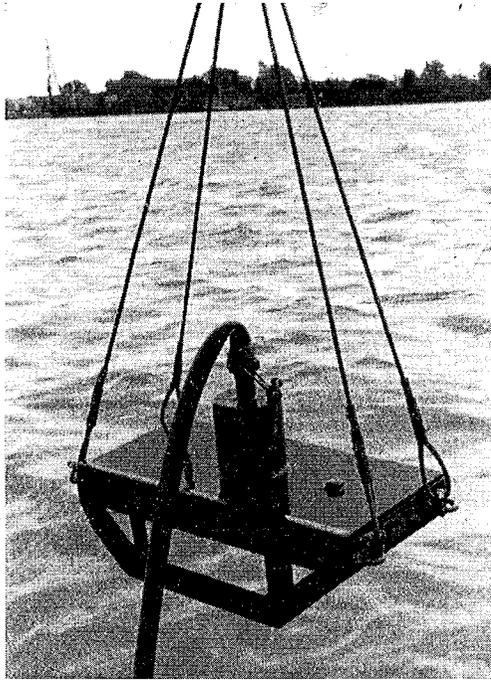


Bild 5

Saugkorb für die Wasserentnahme auf beschwertem Grundschlitten

2. Schlickfallmessung

Der Ausfall von Feststoffen aus dem Wasser im Vorhafen von Brunsbüttelkoog wurde gemessen, indem zwischen kleinen Ketten im Abstand von einem Meter durchsichtige Kunststofftrichter senkrecht aufgehängt wurden. Am unteren Ende der Ketten befand sich ein Gewicht, damit die Kette lotrecht hing. Diese Trichterketten, „Schlickfallen“ genannt, konnten an Leitwerken, Reibepfählen, Dalben und auch am Schiff aufgehängt werden (Bild 6). Die Durchsichtigkeit der Trichter erlaubte ein schnelles Ablesen der Höhe des in ihrem unteren, schmalen Zylinderteil gesammelten ausgefallenen Schwebstoffes. Das Trockengewicht des ausgefallenen Schlicks wurde an Einzelproben ermittelt.

3. Beobachtung der Schlickbewegung mittels radioaktiver Leitstoffe.

Die günstigen Erfahrungen, die man in den Jahren 1954 und 1955 bei der Verwendung von radioaktivem Scandiumglas zur Beobachtung des Schlicktransportes in der Themse gemacht hatte, veranlaßte die Wasser- und Schiffahrtsdirektion Hamburg, einen ähnlichen Versuch in der Oste zu unternehmen³⁾.

³⁾ Klein, H.-A.: Beobachtung des Schlicktransportes in einem Tidefluß mit Hilfe radioaktiver Leitstoffe. Die Wasserwirtschaft, 50. Jg., H. 4, April 1960.

Die Oste erreicht, von links aus der Geest kommend und zwischen den Ländern Hadeln und Kehdingen als Tidefluß das Moor- und Marschgebiet querend, die Unterelbe kurz vor deren Mündung in die Nordsee. Die Tidegrenze der Oste liegt bei Bremervörde, rd. 75 km oberhalb ihrer Mündung (Bild 7).

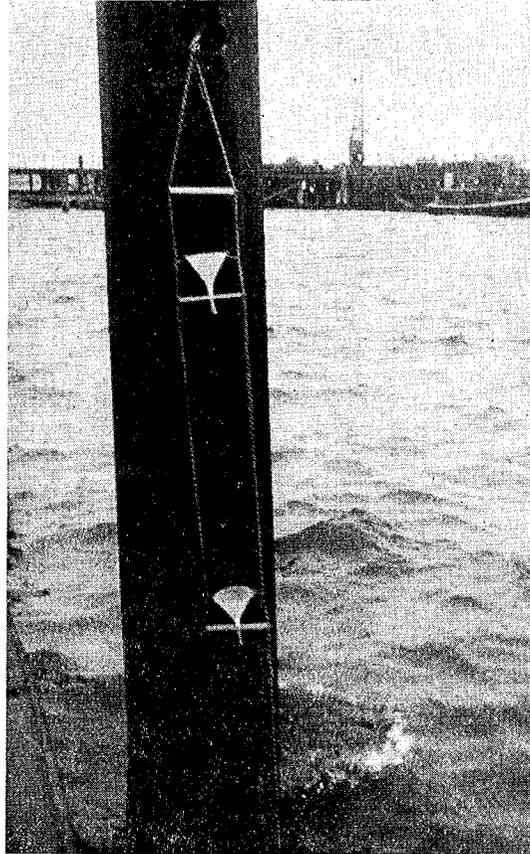


Bild 6

Schlickfalle am Pfehl ausgehängt — 5 Trichter befinden sich im Wasser

Bei einer petrographischen Kartierung des Flußbettes der Oste, die man im Zusammenhang mit Vorarbeiten für eine Abschleusung des Flusses an seiner Mündung durchführte, fand man von km 18 bis km 70 ausgedehnte Schlickablagerungen, deren Herkunft sich nicht ohne weiteres erklären ließ. Von oberhalb — dem Geest- und Moorgebiet — konnte das Material kaum stammen. Aus der Elbe, wie es der Geologe vermutete, sollte es eigentlich nicht so weit hochwandern, da das Elbwasser nur bis etwa km 63 in die Oste eindringt und die Resultierende der Tidebewegung wegen des Oberwasserzuflusses (i. M. $10 \text{ m}^3/\text{s}$) nach der Mündung zu gerichtet ist. Man entschloß sich daher, die Schlickbewegung mit radioaktiven Leitstoffen nachzuprüfen.

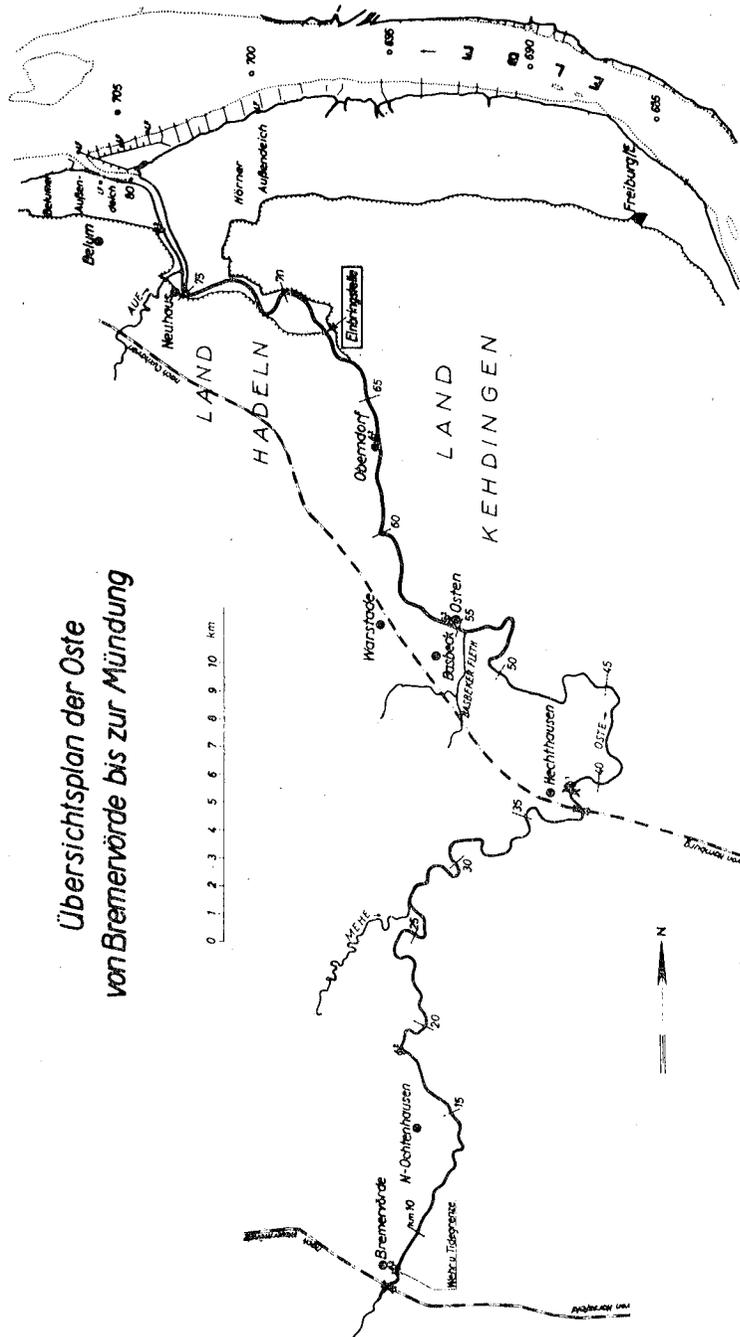


Bild 7
Übersichtsplan der Ooste von der Tidegrenze bis zur Mündung

Verwendet wurden nach dem Themsevorbild 100 g Scandiumglas, das 5% Sc_2O_3 enthielt. Es wurde auf die Korngröße des Osteschlicks (0,01 bis 0,02 mm) gemahlen und in Harwell (England) in einem Kernreaktor auf 4 Curie aktiviert. Das entstandene Scandium 46 ist im Wasser nahezu unlöslich, hat eine geeignete Halbwertszeit von 84 Tagen und sendet genügend energiereiche Gammastrahlung aus, deren beide Banden bei 0,89 und 1,12 MeV liegen.

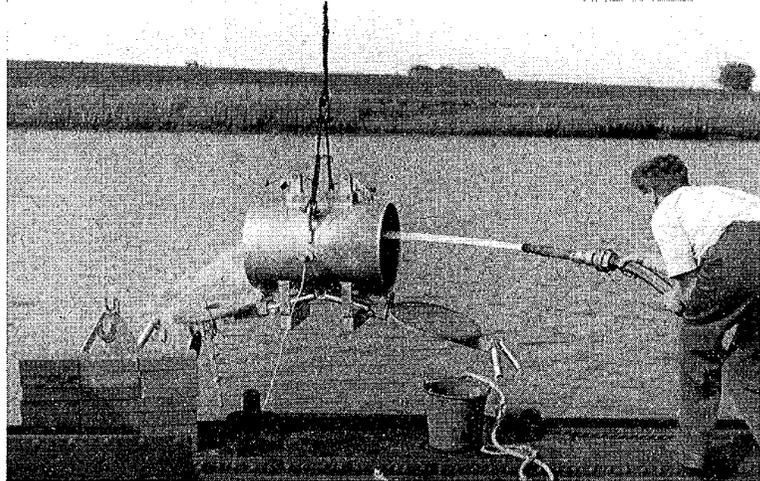


Bild 8

Misch- und Einbringegerät nach dem Versuch beim Entseuchen

Das radioaktive Material wurde an Bord eines Kranschliffes in einem besonderen Gefäß (Bild 8) mit 50 l Schlick gemischt und am 13. 5. 1959 in der Oste bei km 68,05 auf der Flußsohle ausgebracht. Als Zeitpunkt wurden 2 Stunden nach Tidehochwasser bei einsetzendem stärkeren Ebbstrom gewählt, der den radioaktiven Schlick sehr bald restlos aus dem mit dem Kranschliff abgelassenen Einbringefäß spülte. Durch das Einbringen bei Ebbe wurde verhütet, daß konzentriertes Material auf den Vorländern abgelagert und Weidevieh gefährdet werden konnte. Die Oste ist an der Einbringstelle etwa 120 m breit bei einer mittleren Wassertiefe von 3,5 m. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit beträgt etwa 0,6 m/s.

Die Bewegung des eingebrachten Schlicks wurde durch einen Meßschlitten verfolgt (ein zweiter lag als Reserve bereit). Er bestand aus einem 95×100 cm großen Bodenblech mit einem Messingkasten, in dem 2 GM-Zählrohre von 50 cm Länge und ein Vorverstärker mit Kathodenfolger untergebracht waren (Bild 9). Die Verbindung zum Meßplatz (Zähler mit Ratemeter und Schreiber) an Bord des Meßschiffes, von dem aus der Schlitten auf die Flußsohle abgesenkt werden konnte, stellte ein 50 m langes Kabel her. Eine Zählrate von 1 Imp./min entsprach etwa $1,2 \times 10^{-13} \text{C/g}$ Trockengewicht des Schlicks. Vor Beginn des Versuches wurde der Nullwert des Flußbettes unter Beachtung des Einflusses der Wassertiefe bestimmt.

Der eingebrachte Schlick wanderte zunächst in einem 2—3 m breiten Streifen auf der Flußsohle mit dem Ebbstrom flußabwärts. Am Schluß der Ebbe hatte die Spitze, die sehr

deutlich verfolgt werden konnte, einen Weg von rd. 1000 m zurückgelegt. Am Ufer wurden keine erhöhten Aktivitäten gemessen. Durch die anschließende Flut wurde das Material stärker verteilt und bis etwa 650 m oberhalb der Einbringstelle getragen. Die weitere Ausbreitung ist aus Bild 10 zu ersehen. Der radioaktive Schlick wanderte je Tide etwa 0,82 km flußab- und 0,95 km flußaufwärts.

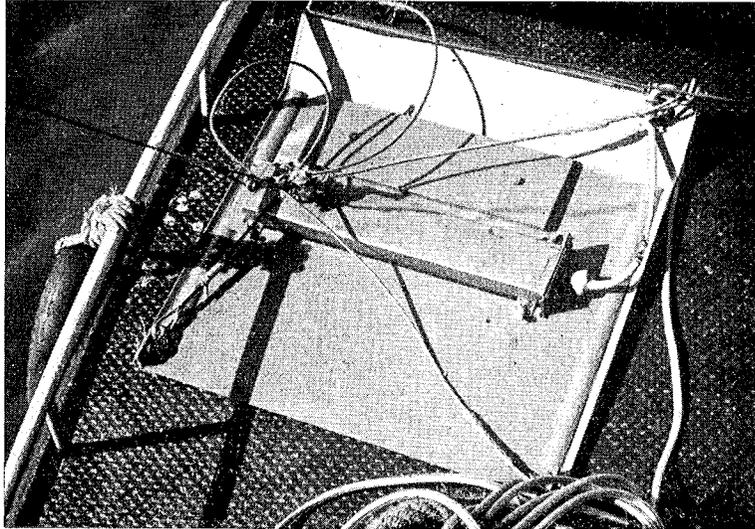


Bild 9

Meßschlitten mit zwei 50 cm langen GM-Zählrohren, Vorverstärker mit Kathodenfolger und 50 m Kabel

Bis zum 15. Mai ließ sich die Grenze der Ausbreitung bis auf ± 100 m genau angeben. Später fand sich das aktive Material an einzelnen Stellen, meist am ausbuchtenden Ufer, wieder, wo sich Schlick abzulagern pflegt. Der eingebrachte Schlick konnte bis km 18 nachgewiesen werden (1,5facher Nullwert) und ist damit bis in die Nähe der Flutstromgrenze gelangt. Dieses Ergebnis bestätigte die auf Diatomeenanalyse begründete Vermutung der Geologen und Biologen, daß in einem Tidefluß der Schlick auch oberhalb der Brackwasserzone bis nahe an die Flutstromgrenze hinaufwandern kann. Es entspricht den aus den erwähnten Themseversuchen gemachten Erfahrungen. Als Ursachen für das Aufwärtswandern des Schlicks kommen neben den Dichteunterschieden in der Brackwasserzone die größere Turbulenz und damit der erhöhte Schwebstoffgehalt des Flutstromes sowie die überwiegend stromaufwärts gerichtete Strömung in der Wasserwechselzone des Ufers in Frage.

Die verwendeten Geräte und die Versuchsmethode haben sich sehr gut bewährt. Im Wasser oder am Ufer traten nirgendwo Aktivitäten auf, die eine Gefährdung für Mensch oder Tier bedeutet hätten, so daß man auch eine wesentlich höhere Aktivität hätte anwenden können. Schwierigkeiten entstanden nur beim Öffnen des Schraubdeckels der Aluminiumdose, in der das Scandiumglas-Pulver aktiviert und befördert worden war. Offenbar war der Verschuß durch die Strahlung korrodiert. Das Glaspulver war z. T.

in kleineren Klümpchen zusammengebacken, die aber im Wasser sofort wieder vollständig zerfielen. Nach den gemachten Erfahrung empfiehlt sich folgendes:

Das aktivierte Material sollte vor dem Einbringen in ein Isotopenlabor gebracht, dort die Aluminiumdose geöffnet und die Kornzusammensetzung kontrolliert werden. Falls dies nicht möglich ist, wird man zumindest an der Einbringstelle ein Fernbedienungsgerät zum Aufschneiden der Dose bereithalten. Zweckmäßig wäre auch eine Umfüllung in eine leicht zu öffnende Büchse, einen Plastikbeutel oder ein Glasampulle. Letztere könnte im Mischgefäß zerschlagen und damit die Gefahr des Stäubens durch den Wind, der fast immer an der Einbringstelle herrschen wird, gebannt werden. Das gefährliche Stäuben kann man auch durch Zugabe von Wasser in die Aluminiumdose verhindern. Bei der Umfüllung und Mischung mit dem Schlick ist es immer möglich, daß radioaktives Material das Schiffsdeck verseucht. Eine Abdeckung des Füllortes mit einer Plastikfolie ist daher sehr zweckmäßig. Die verseuchten Gegenstände (Gummihandschuhe, Alu-Büchse und dergl.) sollten, falls ihre Aktivität größer ist als einige μ C, nicht in den Fluß geworfen, sondern in bereitgehaltene Behälter gegeben werden.

B. Methoden zur Bestimmung der Sandbewegung

1. Unmittelbare Methode

1.1 Messungen

Sandfängergeräte zur quantitativen Bestimmung des Sandtransportes auf der Sohle von Wattströmen und auf dem Vorstrand wurden in der Versuchsrinne geprüft mit dem Ergebnis, daß diese Geräte nur einen geringen und stark schwankenden Teil des auf der Sohle wandernden Sandes erfassen. Auch Vergleichsmessungen in der Natur mit zwei Sandfallen, die in einem Rahmen nebeneinander oder an beiden Seiten eines Meßschiffes ausgesetzt wurden, zeigten sehr unterschiedliche Sandmengen.

1.2 Färbungen

Auf dem Watt vor der Wurster Küste wurde die Sedimentverfrachtung durch Färbung des Sedimentes mit „Methylen-Blau B-extra“ untersucht. Das sandige Sediment wurde an der Untersuchungsstelle entnommen, getrocknet und mehrmals mit zwischenzeitlicher Trocknung eingefärbt. Beim Ausbringen wurde das gefärbte Material in dünner Schicht als „Farbfleck“ auf der Wattoberfläche ausgestrichen, nachdem es vorher mit Seewasser angefeuchtet worden war, um das Verwehen des Farbmateriale bis zur nächsten Überflutung zu verhindern.

Aus den Untersuchungen ging hervor, daß in zwei Drittel aller Fälle nach zweimaliger Überflutung (2 Tiden) der Farbfleck im Zentrum noch vorhanden, aber nach 2 bis 3 Tagen endgültig verschwunden war. Bei einem Drittel aller Fälle war die Umlagerung infolge stärkerer Wasserbewegung (Wellen bei Windstärke 5—6 Beaufort) so groß, daß der Farbfleck nach einmaliger Überflutung praktisch verschwunden war. Allerdings konnte auch dann die Verlagerung noch bestimmt werden, da die Ausbringungsstelle zusätzlich markiert war und bei der Auszählung auf einer Zählplatte unter dem Binokular die Farbsandkörner noch nachzuweisen waren.

Das Ergebnis wurde in einem polaren Koordinatensystem mit Linien gleicher Farbsandhäufigkeit (Zahl der Körner/cm²) aufgetragen.

Dieses Verfahren gibt Hinweise auf Ausbreitung und Umlagerung des oberflächigen Sedimentes innerhalb eines räumlich sehr begrenzten Gebietes und einer sehr kurzen Zeit (1—3 Tage).

1.3 Luminophore Leitstoffe

Um am Nordstrand von Norderney die Bewegungsrichtung einer Plate zu bestimmen, wurde mit „Sudanrot-A“ (benzollöslich) gefärbter Sand benutzt. Diese Farbe fluoresziert bei der Bestrahlung mit Quarzlicht.

Der gefärbte Sand wurde als Farbstreifen in der Größe von 15×1 m auf der Oberfläche der Plate ausgebracht. Nach zwei Tagen war der Farbstreifen mit dem Auge nicht mehr erkennbar. Infolge der Fluoreszenz des Sudanrot-A konnten die gefärbten Körner auch noch nach sieben Tagen in den Sandproben, die auf einer Glasplatte ausgebreitet waren und von unten mit Quarzlicht bestrahlt wurden, nachgewiesen werden. Die Häufigkeit der Farbkörner (Zahl der Körner/Gramm Probematerial) wurde ausgezählt, woraus auf die Transportrichtung geschlossen werden konnte.

Dieses Verfahren ist geeigneter als das vorher beschriebene, jedoch ist seine räumlich und zeitliche Anwendung ebenfalls begrenzt.

1.4 Radioaktive Leitstoffe

s. Abschnitt B 3

2. Mittelbare Methoden

2.1 Morphologische Untersuchungen

Die Formen der Küsten mit ihren Stränden, Watten, Flußmündungen, Wattströmen und Vorstränden sind dauernden Veränderungen unterworfen. Aussagen über Entwicklungstendenzen ermöglichen Vergleiche von Karten, die zu verschiedenen Zeiten auf Grund von Vermessungen gefertigt worden sind. Historische Karten sind mehr oder weniger zufällig überliefert worden. Die ältesten für unsere Betrachtungen verwertbaren Karten reichen etwa bis 1500 zurück.

Um den Ablauf der Formänderungen erkennen zu können, sind systematische Vermessungen erforderlich. Diese werden am Strand und auf den Watten sowohl nivellitisch als auch photogrammetrisch durchgeführt. Beide Meßverfahren sind auf Gebiete beschränkt, die dauernd oder zeitweilig vom Wasser freigegeben werden. Durchsichtiges Wasser (Ostsee) ermöglicht die Erfassung des Vorstrandes bis etwa 5 m Wassertiefe. Größere Wassertiefen müssen gelotet werden.

Die Messungen werden um so wertvoller, wenn möglichst große, zusammenhängende Küstengebiete möglichst gleichzeitig gemessen werden können (Vorteil der Luftbilder).

Für eine zutreffende Deutung der morphologischen Entwicklung eines Küstenabschnitts sind mehrere vergleichbare (möglichst gleichwertige) Küstenkarten notwendig.

Die Meßgenauigkeit der Nivellements an den Stränden und auf den Watten entspricht der der normalen Landvermessung. Die Höhenänderungen werden aus dem Vergleich zweier zeitlich nacheinander gemessenen Zustände ermittelt und lagegetreu in den Höhenlinienplan der Erstvermessung übertragen, dann werden die Linien gleicher Höhenänderungen gezeichnet. In dem so entstandenen „Differenzenplan“ sind Auftrag- und Abtragflächen mit Höhenmaß versehen, die sich in Nordfriesland aus den Wathöhenänderungen eines etwa 20jährigen Zeitraumes ergaben. Der Differenzenplan hat einen qualitativen Aussagewert.

Eine quantitative Untersuchung (Massenbilanz) von Hundt unter Verwendung von Höhendifferenzen im Gebiet der Eidermündung steht vor dem Abschluß. Eine solche Untersuchung setzt die Erfassung eines in sich geschlossenen Gebietes (physiographische

Einheit) voraus. Die Grenzen solcher Gebiete richtig zu bestimmen, stößt besonders nach der freien See hin auf Schwierigkeiten.

In den Flußmündungen, Wattinnen und tieferen Vorstrandgebieten werden die Bodenformen durch Lotungen gewonnen. Die Topographie zu zwei verschiedenen Zeiten übereinander gezeichnet, läßt den „Tiefenänderungsplan“ entstehen. Auch hierbei wird von dem ältesten oder älteren Plan ausgegangen. Dieses Verfahren wurde z. B. im unteren Tidegebiet der Elbe für einen Zeitraum von 20 Jahren angewandt, um die Sandumlagerung in den Stromrinnen und auf den Platen zu bestimmen. Das zu untersuchende Gebiet wird in kleine Einzelflächen aufgeteilt, deren Veränderungen für sich berechnet und dann summiert werden. Die Schwankungen der Zu- und Abnahme konnten mit den Windverhältnissen in der Außen-Elbe (Differenz der West- und Ostwindkomponente am Feuerschiff „Elbe I“) in Beziehung gesetzt und eine befriedigende Übereinstimmung gefunden werden. In gleicher Weise wurde vorgegangen, um innerhalb des Riffgürtels vor Norderney, der durch den West-Ost-Transport des Sandes zwischen den Ostfriesischen Inseln Juist und Norderney entsteht, die Verlagerungsgeschwindigkeit der Sandbänke zu bestimmen.

Die transportierte Sandmenge, die z. B. dem Strand der Insel jährlich zugeführt wird, läßt sich daraus nur aproximativ schätzen, weil der Transport über die Grenzen des untersuchten Gebietes (Zu- und Abfuhr) unberücksichtigt bleibt.

Im Gegensatz zu den Tiefenänderungsplänen, in denen nur zwei topographische Zustände gegenübergestellt werden, ist es möglich, in „Zeitwegplänen“ den zeitlichen Ablauf einer Entwicklung — allerdings nur in einem Punkt oder Profil — darzustellen. Zeitwegpläne haben sich dort wertvoll erwiesen, wo aus einer längeren Beobachtungsreihe die Entwicklungstendenz abgeleitet werden soll, z. B. für einen Rinnenquerschnitt, ein Strandprofil o. ä. Zweckmäßig ist meistens, die sich stark ändernden Werte auszugleichen, um periodische Vorgänge in der Sandzufuhr, dem Sandverlust u. ä. erkennen zu können.

Entzerrte Luftbildpläne wurden vom gesamten deutschen Küstengebiet der Nord- und Ostsee in den Maßstäben 1 : 10 000 bis 1 : 25 000, z. T. auch bereits durch Wiederholung der Luftbildmessungen, hergestellt. Der Luftbildplan gibt im Gegensatz zur Land- oder Seekarte eine vorzügliche Übersicht über die Morphologie besonders der amphibischen Küstenabschnitte, weil alle Formen bis in die feinsten Verästelungen aufgenommen werden. Der Luftbildplan gibt deshalb sehr wertvolle Hinweise auf die hier herrschende Dynamik.

2.2 Hydrographische Untersuchungen

Wenn irgendwelche Eingriffe in den natürlichen Sandhaushalt an der Küste vorgenommen werden sollen, so ist eine umfassende Kenntnis über die Änderung der Morphologie und der diese Änderung bewirkenden Kräfte eine notwendige Voraussetzung für den Erfolg einer Maßnahme. Die Kräfte sind ursprünglich kosmischer (Gezeiten) und meteorologischer (Stürme) Art; sie verursachen horizontale und vertikale Bewegungen des Wassers.

Über die horizontalen Wasserbewegungen im Küstenbereich geben Strömungsmessungen wertvolle Aufschlüsse. Die Entwicklung der Meßverfahren hat von der punktförmigen Einzelmessung an einem Tage über die Gruppenmessung zur synoptischen Messung an 10 und mehr Stationen gleichzeitig über 2—3 Wochen geführt. Auf dieser Weise wurden Meßwerte erzielt, die ohne Umrechnung unmittelbar miteinander vergleichbar sind; denn die Messungen fanden unter den gleichen meteorologischen, hydrologischen und hydrographischen Bedingungen statt.

Synoptisch werden auch an möglichst vielen Stellen der Küste laufend die Wasserstände registriert. Für Sonderuntersuchungen wurden in das stationäre Netz noch weitere Behelfspegel eingeschaltet, so daß dieses Beobachtungsmaterial Einblicke in die Gefällunterschiede während des Ablaufes einer Sturmflut oder einzelner Tiden unter verschiedenen Wetterbedingungen ermöglichte.

Die morphologischen und hydrographischen Untersuchungen werden aus Gründen der Zweckmäßigkeit auf einen einheitlichen Horizont, nämlich auf Normal-Null (NN) der Landesaufnahme, bezogen. Dadurch können örtliche und auch zeitliche Unterschiede unmittelbar, d. h. ohne Umrechnung zahlreicher Werte, erkannt werden. Dies erleichtert eine zutreffende Deutung der Vorgänge.

2.3 Petrographische Untersuchungen

Um die Umlagerung der Sande im Seengebiet vor Norderney und auf der Insel zu untersuchen, wurde eine große Anzahl von Proben bearbeitet. Das untersuchte Meeresgebiet unterliegt wechselnden Strömungseinwirkungen, während auf dem Westteil der Insel durch menschliche Eingriffe die natürlichen Verhältnisse stark verändert worden sind. An petrographischen Untersuchungen wurden ausgeführt:

a) Korngrößenanalysen zur Unterscheidung von

Feinstfraktion	< 0,06 mm
Feinfraktion	0,06—0,10 mm
Mittelfraktion	0,10—0,20 mm
grober Mittelfraktion	0,20—0,25 mm
Grobfraktion	> 0,25 mm

b) Schwermineralabtrennung aus Sandproben mit dem Scheidetrichter, wobei als Trennflüssigkeit Bromoform mit dem spezifischen Gewicht 2,816 g/cm³ verwendet wurde. Die Schwerminerale wurden nach Reinigung und Trocknung zu mikroskopischen Präparaten verarbeitet und unter dem Polarisationsmikroskop unterschieden und ausgezählt nach:

1. Erze
2. Granate
3. Trübe Minerale
4. Restminerale

c) Bestimmung der Rundung an Erz- und Granatkörnern, wobei kantige, mehr oder weniger gerundete sowie vollkommen gerundete Erzkörner unterschieden wurden. Die Granate wurden als kantige oder vollkommen gerundete Körner ausgezählt.

d) Bestimmung der Ätzwerte der Granate durch mikroskopische Betrachtung und Trennung in

1. nicht oder kaum angeätzte Granate,
2. mehr oder weniger angeätzte Granate und
3. stark angeätzte Granate.

e) Bestimmung der Sedimentfarbe der Fraktion 0,10—0,20 mm und Unterscheidung nach

1. helle bis mittlere Graufärbung
2. rötliche bis bräunliche Färbung,
3. grau mit rötlich-braunem Anteil und
4. grau mit grünlichem Anteil

Sämtliche Analysenwerte mit Ausnahme der Korngrößen wurden in Lageplänen durch Signaturen dargestellt, deren Auswertung auf die Verteilung und Bewegungsrichtung des Sandmaterials schließen ließ. Als Ergebnis konnten die Haupttransportrichtungen des Sandes im Seegebiet vor der Insel (Bild 11) und die Phasen der Dünenentwicklung (Bild 12) bestimmt werden.

Das Verfahren, bisher nur an gezeitenfreien Küsten angewandt, erscheint brauchbar, in Verbindung mit kartographischen Untersuchungen qualitativ eine Vorstellung des Sandtransportes zu geben.

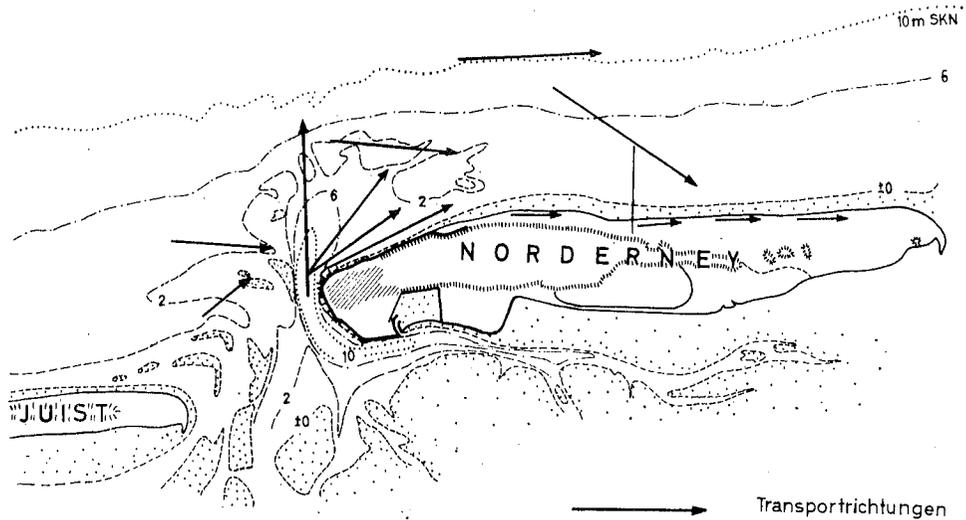


Bild 11
Haupttransportrichtungen des Sandes vor Norderney

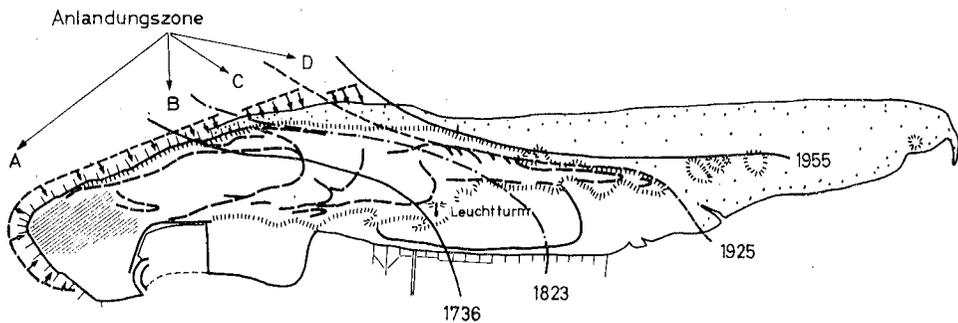


Bild 12
Phasen der Dünenentwicklung auf Norderney

2.4 Biologische Untersuchungen

2.41 Schilluntersuchung

Die Wanderwege der Muschelschalen (Schill), einerseits die der vorherrschend im Wattenmeer lebenden Tiere in seewärtiger Richtung und andererseits die der in der

offenen See lebenden Formen in das Wattenmeer hinein, wurden verfolgt und daraus Schlüsse auf den Transport von Sandmaterial auf der Meeressohle gezogen. Derartige Untersuchungen wurden im Seegebiet von Norderney und in der Außen-Ems unternommen. Mit dem 0,1 m² Bodengreifer nach VAN VEEN wurden an einer Vielzahl von Stellen des Untersuchungsgebietes Bodenproben entnommen. An schillarmen Stellen mußte eine Dredsche benutzt werden, die, über Grund geschleppt, eine größere Materialausbeute ergab.

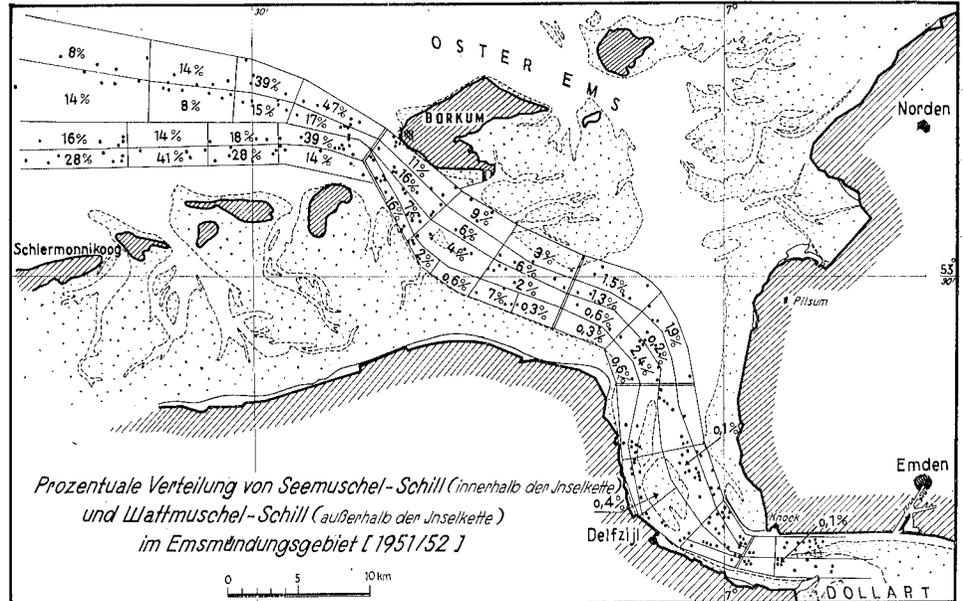


Bild 13

Prozentuale Verteilung von Seemuschel- und Wattmuschelschill im Ems-Mündungsgebiet (1951/52)

Ausgezählt wurden neben den leben Muscheln nur die im Gesamtschill vorhandenen, einwandfrei bestimmbaren Muschel-Einzelklappen, soweit diese mit guter Eindeutigkeit als rezent angesehen werden konnten. Das Untersuchungsgebiet wurde entsprechend der morphologischen Gestaltung in Bezirke unterteilt, auf die jeweils eine genügend große und somit prozentuale Angabe rechtfertigende Menge an Muschelschill entfiel. So wurden für die Emsmündung 335 Grundproben ausgewertet und insgesamt 58 157 Muscheleinzelklappen bestimmt (Bild 13). Aus der Veränderung der Anteile von See- oder Wattmuscheln von Bezirk zu Bezirk kann die Verfrachtungsrichtung festgelegt werden (Bild 14).

Die aus der Schillverfrachtung abgeleiteten Transportrichtungen des Sandes an der Meeressohle stimmen gut mit denen überein, die aus anderen Untersuchungen ermittelt wurden. Das Ergebnis wird subjektiv durch die Auswahl der Muschelarten und die Aufteilung des Untersuchungsgebietes beeinflusst. Anzustreben ist daher die Einbeziehung möglichst vieler Muschelarten und die Aufteilung des Gebietes in möglichst viele Einzelflächen.

2.42 Biologische Wattuntersuchung

Die flächenmäßige Kartierung der tierischen und pflanzlichen Lebensgemeinschaften, die das bei Tideniedrigwasser trockenfallende Watt besiedeln, gibt Hinweise auf Veränderungen der oberen Sedimentschicht. Untersucht werden der Besiedlungs- und Erhaltungszustand und die Besiedlungsdichte der Lebensgemeinschaften. Schlüsse auf Abtra-

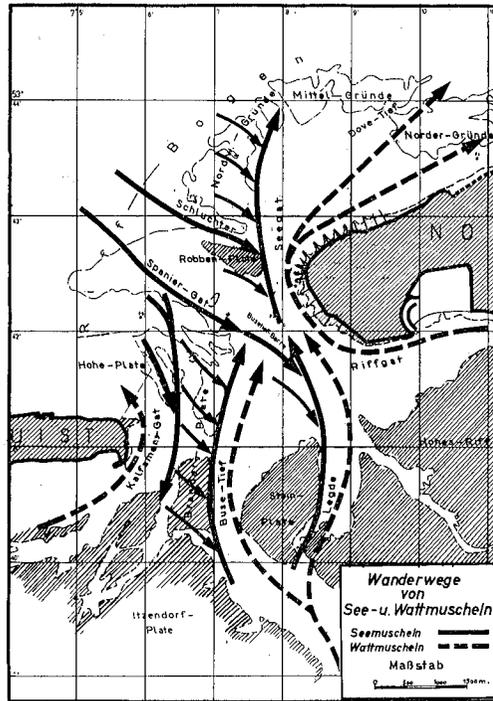


Bild 14

Wanderwege von See- und Wattmuscheln im Norderneyer Seegat

gungen oder Aufhöhungen geben die Tierarten und deren Wohntiefe im Boden, Staffe-lungs- und Verfestigungsgrad der Wohnröhren bestimmter Würmer sowie Wand-inkrustierungen, Freispülung bestimmter Muscheln, Totengesellschaften usw. Kennzeich-nende Lebensgemeinschaften auf dem Watt an der Nordseeküste sind:

a) *Scoloplos*-Variation:

Scoloplos-Siedlung: Tiefe Lage im Watt, meist direkt an der Niedrigwasserkante. Sediment sandig, dauernden Umlagerungen unterworfen. Trockenfallzeit nicht über 30 %. Boden gut durchlüftet. Ober-flächenrippelung.

Arenicola-Siedlung: Sandiger Boden ohne Schlickbeimengungen, meist bis in die Nähe der MTnw-Linie reichend. Trockenfallzeit nicht über 50 %. Gute Durchlüftung. Oberflächenrippelung.

b) *Arenicola-Variation:*

- Arenicola*-Siedlung: Sandiger Boden mit Feinsand- bzw. Schllickbeimengungen, der keinen großen Umlagerungen mehr unterworfen ist. 1,0—2,0 m über MTnw. Keine Oberflächenrippelung. Boden noch instabil. Oxydationszone 3—5 cm tief. Trockenfallzeit bis 60 %.
- Cardium*-Siedlung: Siedlungen in allen Wattgebieten, da die Trockenfallzeit im Verein mit der Nahrungskonkurrenz nur eine Rolle für die Dichte der Siedlung spielt. Oberfläche durch Siedlungsspuren kenntlich. Oxydationszone 3—5 cm tief. Boden darf keinen zu großen Umlagerungen ausgesetzt sein.
- Pygospio*-Siedlung: Lagerungsbeständiges Sediment. Meist in höheren Lagen. Nicht sedimentabhängig, aber Sandkomponente bevorzugt. Von Trockenfallzeit unabhängig.
- Lanice*-Siedlung: Im gesamten Watt, dicht bewohnte Siedlungen aber nur im unteren Teil Bevorzugung größerer Sedimentes durch Larven.

c) *Mya-Variation:*

- Mya*-Siedlung: Bestandbildende Siedlungen in stark schllickhaltigem, lagestabilem Sediment, daher meist in höheren Lagen. Unabhängig von Trockenfallzeit.
- Corophium*-Siedlung: Unabhängig von Wasserbedeckungszeit. Schllicksandiges Sediment, meist höhere Lage. Reiche Besiedlung durch viele Arten.

d) *Corophium-Variation:*

- Corophium*-Siedlung: An lagestabilen, schllickreichen Stellen. Unabhängig von Wasserbedeckungszeit. Als häufige Begleitform nur *Nereis* und *Mya*.
- Nereis*-Siedlung: Schllickiges Sediment sehr unterschiedlicher Zusammensetzung. Unabhängig von Wasserbedeckungszeit. Schlechte Bodendurchlüftung. Besiedlung extremer Lokalitäten.
- Heteromastus*-Siedlung: Weicher, lagebeständiger Schllick in allen Lagen. Von Wasserbedeckungszeit unabhängig. Resistenz gegen Verunreinigungen. Oberfläche durch Kothaufen gekennzeichnet.
- Scrobicularia*-Siedlung: Siedlungen eng lokal begrenzt, in schllickigem Sediment. Von Wasserbedeckungszeit unabhängig. Bis zur Hochwasserlinie.

e) *Epibiosen:*

- Mytilus*-Bank: Auf lagestabilem Schllick nahe MTnw-Linie. Großer Einfluß auf Sediment.
- Zostera*-Wiese: Meist auf lagebeständigen hohen Wattflächen. Bodenbeeinflussend.
- Verlandungsregion: Lange Trockenfallzeit. Großer Einfluß auf das Sediment.

Ausgedehnte Wattflächen wurden untersucht und die Verteilung der Lebensgemeinschaften kartographisch dargestellt. Die Auswertung ergab eine Aussage über die Entwicklungstendenz des untersuchten Gebietes (Auf- oder Abtrag, Verlagerung von Watt-rinnen usw.).

Zum Verfahren ist zu bemerken, daß es gegenwärtig auf andere Weise nicht möglich ist, durch eine nur einmalige Untersuchung zu Aussagen über die morphologische Entwicklungstendenz eines Wattes zu kommen. Das Verfahren gewinnt an Bedeutung, besonders nachdem es im gewissen Umfange gelungen ist, den subjektiven Einfluß auf den Befund auszuschalten.

3. Beobachtung der Sandbewegung mittels radioaktiver Leitstoffe

3.1 Verfahren

Bei der Untersuchung der Sandwanderung mittels radioaktiver Leitstoffe haben sich hauptsächlich 2 Methoden für die Beimischung des radioaktiven Nuklids zum Geschiebe herausgebildet:

- a) die Inkorporationsmethode, bei der sandkornähnliche Partikel, die das radioaktive Element enthalten, verwendet werden und
- b) die Anlagerungsmethode, bei der das radioaktive Element meist durch chemische Bindung an Sandkörner angelagert wird, die dem Untersuchungsgebiet entnommen sind.

Der Anlagerungsmethode wurde aus folgenden Gründen der Vorzug gegeben:

- (1) Für die Verwendung des Geschiebes, dessen Wanderung bestimmt werden soll, werden sämtliche Unterschiede hinsichtlich Kornform, spezifischem Gewicht usw. vermieden.
- (2) Durch eingehende Versuche ist von uns nachgewiesen worden, daß das radioaktive Material mit ausreichender Haftfähigkeit an den Sand angelagert werden kann.
- (3) Es lassen sich ohne Schwierigkeiten beliebig große Mengen Untersuchungsmaterial herstellen.
- (4) Die Herstellungskosten für den Untersuchungsstoff werden bei dieser Methode am niedrigsten, da lediglich das zu aktivierende Material in den Reaktor gebracht werden und eine verhältnismäßig nur kleine Menge radioaktiven Stoffes auf dem meist langen Wege vom Reaktor zum Versuchsort befördert werden muß.
- (5) Störstrahlungen durch die Aktivierungen von Verunreinigungen werden vermieden.

3.2 Auswahl des Nuklids

Von den heute bekannten über 1000 instabilen Nukliden eignen sich nur wenige für den beabsichtigten Zweck. Die Strahler haben folgenden Forderungen zu entsprechen:

1. Die Halbwertszeit darf nicht zu kurz sein, weil sonst hohe Anfangsaktivitäten verwendet werden müssen, was einen erheblichen Aufwand an Schutzmaßnahmen erforderlich macht, und weil andererseits das schnelle Abklingen der Strahlung eine erfolgreiche Beobachtung in Frage stellt. Andererseits darf die Halbwertszeit nicht zu groß sein, da sonst eine lang anhaltende Infizierung des Beobachtungsobjektes eintritt und die Wiederholung eines Experimentes verhindert. Die geeigneten Halbwertszeiten liegen etwa zwischen 20 und 80 Tagen.

2. Gamma-Strahlung muß die vorherrschende sein; ihre Energie soll möglichst niedrig liegen. Als obere Grenze wird 0,6 MeV als zweckmäßig angesehen.
3. Das verwendete Element muß biologisch neutral sein, es darf nicht incorporiert, d. h. als Bestandteil in ein Körperorgan eingebaut werden. Sollte es von einem Lebewesen mit der Nahrung aufgenommen werden, so besteht die Sicherheit, daß es auf schnellstem Wege über den Magen-Darmkanal wieder ausgeschieden wird. Besondere Vorkehrungen sind ggf. gegen das Einatmen radioaktiven Staubes zu treffen.

γ -Energie und Halbwertszeit verschiedener radioaktiver Isotope

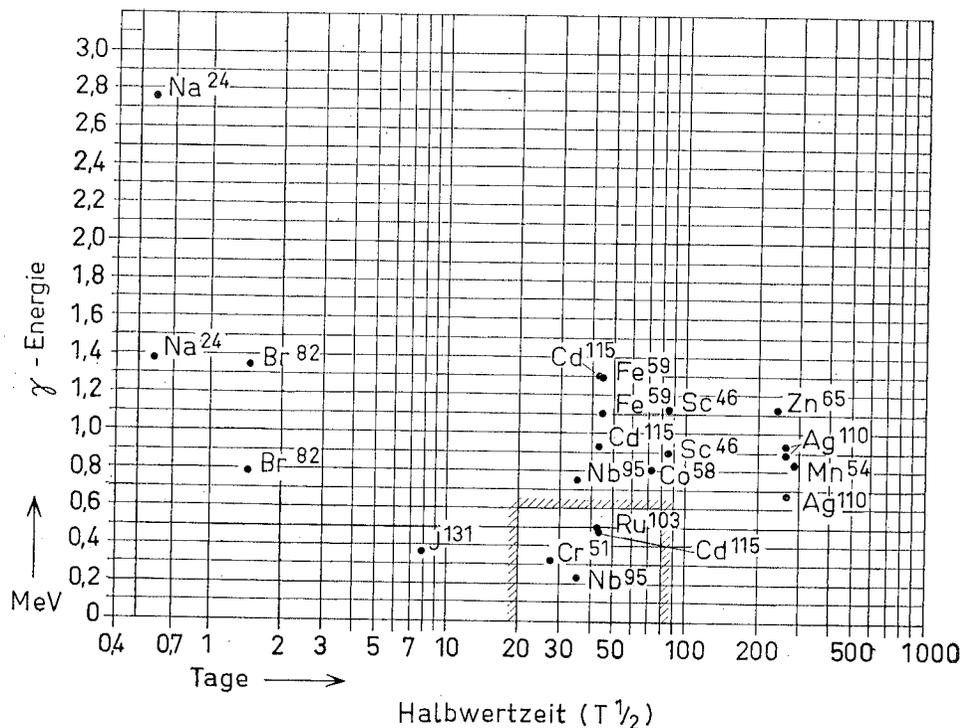


Bild 15

γ -Energie und Halbwertszeit verschiedener radioaktiver Isotope

In Bild 15 sind bisher bei Strömungs- und Sandwanderungsuntersuchungen verwendete sowie weitere erforderlichenfalls in Betracht zu ziehende Nuklide nach der Größe ihrer Halbwertszeit und der Energie ihrer γ -Strahlung dargestellt. Aus diesem Bilde gehen auch die günstigen Eigenschaften des von uns bisher verwendeten Cr⁵¹ hervor. Es hat eine Halbwertszeit von 27,8 Tagen und eine γ -Energie von 0,32 MeV. Es ist in metallischer Form leicht und preiswert zu bekommen. Die Darstellung läßt erkennen, daß außer Cr⁵¹ auch Ru¹⁰³ in dem gezogenen Toleranzbereich liegt. Ebenso liegt Nb⁹⁵, dessen Energiespektrum eine Strahlung mit 0,75 MeV enthält, mit einer Halbwertszeit von 42 Tagen nicht ungünstig. Co⁵⁸ könnte auch in Betracht gezogen werden. Cd¹¹⁵ mit einer Halbwertszeit von 43 Tagen ist erheblich energiereicher und damit ein harter Strahler. Weiterer Untersuchungen bedarf noch die biologische Wirksamkeit dieser Stoffe, sowie der Einfluß ihrer chemischen Eigenschaften.

3.3 Herstellung radioaktiver Partikel

Wie bereits ausgeführt, wird die Aktivierung des Materials nach der Anlagerungsmethode durchgeführt. Die radioaktive Komponente wird also von außen auf das Korn aufgebracht, ohne dessen Form zu verändern. Zwei Hauptforderungen sind an eine derartige Methode zu stellen:

- (1) Es soll möglichst viel Aktivität am Korn adsorbiert bzw. an das Korn gebunden werden.
- (2) Die gebildete Schicht soll möglichst abriebfest sein.

Da die Bildung eines bestimmten Nuklids an Sand oder Schlack ein chemischer Vorgang ist, läßt sich kein allg. gültiges Arbeitsverfahren angeben. Die zu wählende Methode muß sich vielmehr nach den chemischen Eigenschaften des Nuklids und des zu aktivierenden Materials richten.

In den meisten Fällen ist es erforderlich, die einzelnen Körner des Materials zunächst mit einer besonderen Schicht zu umgeben, die die Bindung des radioaktiven Nuklids erhöht. Schichten aus Agar-Agar oder Natrium-meta-Silikat sind für Sandkörner verwendet worden. Dabei hat das meta-Silikat den Vorteil, besonders oberflächenaktiv und abriebfest zu sein. Einzelne Aktivierungsvorschriften sind in der Literatur bereits in hinreichendem Umfange angegeben. (Siehe z. B. Schulz-Ströhl, Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen).

3.4 Messung der Radioaktivität im Gewässer

Die Wanderung des gekennzeichneten Materials läßt sich mit Hilfe der emittierten Strahlung durch Verwendung geeigneter Sonden verfolgen. Dabei gelangen zwei Sondentypen zur Anwendung:

- (1) Großflächenzählrohre für härtere γ -Strahlung
- (2) Szintillationssonden für weichere γ -Strahlung

Anzahl und Größe der Sonden richtet sich nach der Art des Versuches. So wird man z. B. in einer rel. engen Flußmündung mit einer Tauchsonde auskommen. Werden dagegen Messungen im offenen Meer durchgeführt, so sind mehrere Sonden, die ev. in einem Meßschlitten fest eingebaut sind, erforderlich. Das auch vor allem deshalb, weil die stärkere Strömung im freien Gewässer eine entsprechende schwere Halterung der Sonden erfordert, um diese stets in konstanter Höhe über Grund zu halten.

Die Registrierung der aufgenommenen Impulse, die ein Maß für die jeweils vorhandene Aktivität sind, wird mit geeigneten Zählgeräten durchgeführt. Für orientierende Messungen reichen Verstärker mit automatischer Mittelwertanzeige aus. Diese Instrumente können gleichzeitig mit einem Schreiber versehen werden, der die Impulsrate kontinuierlich aufzeichnet. Im allg. werden die Messungen von Bord eines Meßschiffes aus durchgeführt. Gleichzeitige Registrierung der Wassertiefe und des Kurses sollte daher möglich sein.

Neben der Mittelwertanzeige ist die Einzelimpulszählung zweckmäßig. Das vor allem immer dann, wenn bestimmte Punkte besonders gründlich untersucht werden müssen. Ein entsprechendes Zählgerät mit elektronischer Anzeige läßt sich der Mittelwert-Schreiber-Anordnung ohne weiteres anfügen. Es kann aber auch der Fall eintreten, daß Küstenstreifen oder Sand- und Wattflächen bei Ebbe durch Begehung vermessen werden müssen. In diesen Fällen sind tragbare Geräte erforderlich, die möglichst klein und handlich und gegen Witterungseinflüsse widerstandsfähig sein müssen.

Eine weitere Vervollkommnung der meßtechnischen Ausrüstung stellt die Anwendung eines Einkanaldiskriminators dar, der in die vorhandene Meßanordnung eingebaut werden kann. Da es sich bei der verwendeten Aktivität nur um monoenergetische γ -Strahlung handelt, läßt sich mit einem solchen Gerät durch entsprechende Einstellung der Kanallage eine Art von Filter schaffen, das nur diese spezielle Strahlung hindurchläßt. Es ist also auf diese Weise möglich, von vornherein nur die Strahlung zu messen, die von der verwendeten Leitsubstanz stammt.

Vor Beginn der Versuche muß der Nulleffekt im Beobachtungsgebiet genau vermessen werden. Er ist bei der späteren Auswertung der Versuche in Abzug zu bringen.

3.5 Strahlenschutz

Für die Durchführung derartiger Versuche ist ein absolut sicherer Strahlenschutz für Mensch und Tier die Hauptvoraussetzung. Entsprechende Überlegungen sind bereits bei der Versuchsplanung anzustellen. Die Auswahl des radioaktiven Leitstoffes muß so getroffen werden, daß ein Minimum an Gefährdungsmöglichkeiten besteht.

Es sind daher nach Möglichkeit Nuklide mit niedriger biologischer Halbwertszeit und geringer Energie zu verwenden. Besonders nachhaltige Maßnahmen sind während der Präparation des Sandes oder Schlicks zu beachten: Das Arbeitspersonal muß durch ausreichend dicke Schutzschichten aus Blei oder Beton vor der direkten Strahlung geschützt sein. Alle Hantierungen müssen mit Greifwerkzeugen durchgeführt werden. Das offene Präparat darf auf keinen Fall verspritzt oder direkt mit der Oberhaut in Berührung gebracht werden. Natürlich darf auch keine Inkorporation erfolgen. Für das Personal sind daher auch Schutzanzüge aus Kunststoff oder dergleichen erforderlich. Während aller Manipulationen muß die Dosisleistung ständig mit einem Meßinstrument kontrolliert werden.

Entstehen flüssige oder feste Abfallstoffe, so müssen diese in geeigneten Behältern an einem geschützten Platz abgestellt werden, bis die Aktivität über mindestens 10 Halbwertszeiten abgeklungen ist. Erst danach dürfen diese Reste entfernt werden. Sämtliche Anzüge, Zangen, Behälter usw., die bei der Arbeit verwendet werden und noch merkliche Aktivität aufweisen, müssen ebenfalls sicher abgestellt werden. Der Transport des aktivierten Materials bis zum Ausbringort muß in strahlensicheren Behältern erfolgen. Auch hierbei ist Sorge zu tragen, daß kein Material verlorengeht. Die erforderlichen Sicherheitsabstände müssen bei allen Manipulationen wie z. B. Umfüllen, Entleeren usw. eingehalten und mit einem Meßinstrument überprüft werden. Die radioaktive Komponente muß am ausgebrachten Material völlig unlöslich sein, damit eine Inkorporation durch Seetiere mit Sicherheit ausgeschlossen ist.

Versuchsort und -zeit müssen so ausgewählt werden, daß die Anlagerung von aktivem Material an Badestrände unterbleibt. Wird trotz aller Vorsichtsmaßnahmen bei der Vorbereitung oder beim Versuch selbst aktives Material in gefährdender Weise verbreitet, so ist das betreffende Gebiet für einen entsprechenden Zeitraum zu sperren.

3.6 Berücksichtigung der bewegenden Kräfte

Um feststellen zu können, inwieweit die sich zeigenden Wanderungstendenzen charakteristisch für den Normalzustand sind, oder ob diese das Ergebnis einer besonderen hydrographischen Lage darstellen, müssen die die Sinkstoffe bewegenden Kräfte, im wesentlichen Seegang und Strömungen, während der Versuchszeit laufend beobachtet werden. Während für die Strömungen Dauermeßgeräte in Form von Schaufelrädern zur Verfügung stehen, sind Wellenmeßgeräte für Dauerbeobachtungen noch stark in der Entwicklung. Zwischen Strömungen und Tidehub bzw. Steig- oder Fallgeschwindigkeit

bestehen in Tidegewässern meist gute Zusammenhänge, so daß diese an Pegeln leicht zu beobachtenden Werte als Maßstab genommen werden können. Beim Seegang, für den Dauermessungen fast ganz fehlen, muß man sich mit visuellen und mit Windangaben behelfen. Im übrigen werden häufiger wiederholte Versuche mit Leitstoffen einen besseren Einblick in die Zusammenhänge verschaffen.

Einen ersten Überblick über die Strömungsverhältnisse gibt ein Vergleich des während des Beobachtungszeitraumes aufgetretenen mittleren Tidestiegs und Tidefalls mit dem mittleren Tidehub. So wurden z.B. folgende Werte bei einer unserer Untersuchungen festgestellt:

Im Beobachtungszeitraum	Abweichung vom langj. Mittel (3,64 m) in %	
	Tidestieg	Tidefall
1	2	3
Mittelwert	+ 1,9	+ 1,9
Höchster Wert	+ 13,5	+ 15,4
Niedrigster Wert	- 10,4	- 16,5

Für die mit Schaufelrädern in diesem Zeitraum gemessenen Geschwindigkeiten ergaben sich die in Bild 16 dargestellten Beziehungen zwischen den mittleren und den maximalen Flutstromgeschwindigkeiten und dem Tidestieg, sowie zu den entsprechenden Ebbstromgeschwindigkeiten und dem Tidefall. Die Darstellungen lassen deutlich die Unterschiede an den 3 Beobachtungsstationen I, II und III erkennen.

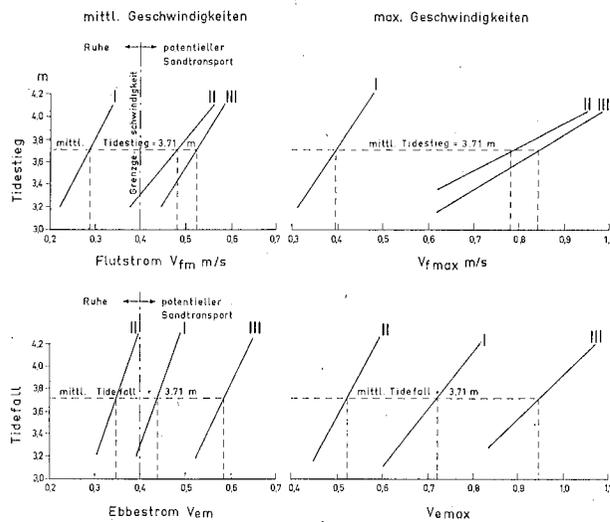


Bild 16

Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Tidehub

Die Bilder 17 und 18 zeigen die Ergebnisse einer Untersuchung der Häufigkeitsverteilung für die verschiedenen Geschwindigkeitsklassen und der daraus entwickelten Dauerlinien. Wird die kritische Geschwindigkeit, die für den Gewässergrund an der

untersuchten Stelle etwa 0,4 m/s betragen dürfte, in die Darstellungen eingetragen, so erkennt man die Ausdehnung des Bereichs des potentiellen Sandtransports und seiner Abgrenzung gegen den Ruhebereich.

Diese Untersuchungen müssen noch weiter vertieft werden, besonders in den Fällen, in denen die Kenterung der Strömungen nicht mit Thw oder Tnw zusammenfällt. Hierbei wird die Tidestieg- bzw. Tidefallgeschwindigkeit mit einer geeigneten Dimension (m/h oder cm/min) verwendet.

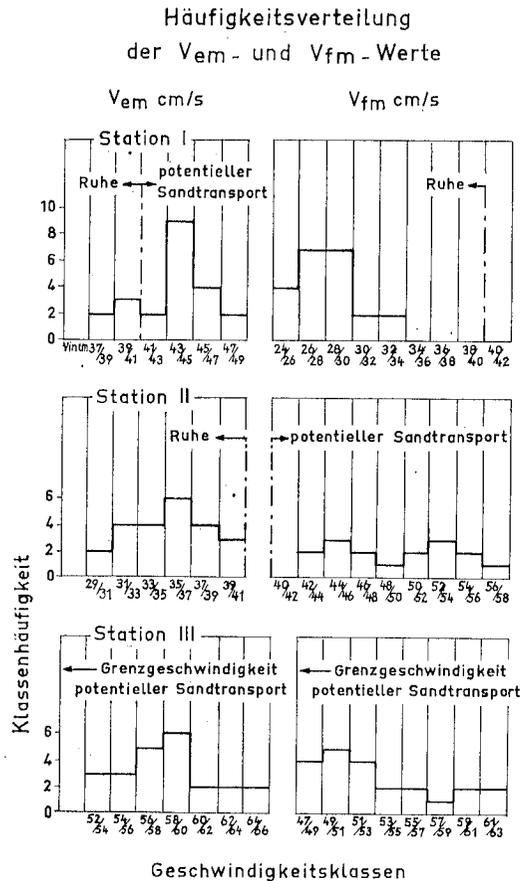


Bild 17

Häufigkeitsverteilung einzelner Geschwindigkeitsklassen

Für die Charakterisierung der Wellenbewegung sind Verfahren noch in der Entwicklung, deren Meßwerte von den verwendeten Geräten abhängen. Wird der vertikale Weg eines Punktes der Wasseroberfläche gemessen, so wird die Bewegung in Meter in einem bestimmten Zeitraum (z. B. 10 min) angegeben. Man kann auch eine feste Weggröße annehmen (z. B. 100 Meter) und die Zeiten messen, in denen dieser Weg zurückgelegt wird. Bei Wellenmeßgeräten, die nach dem Beschleunigungsprinzip arbeiten, werden Beschleunigungssummen in einem gleichbleibenden Zeitabschnitt gemessen. Sollte ein Wellenpegel mit radioaktiven Strahlungen zum Einsatz gelangen, so wird die Intensitäts-

summe der Strahlungen je Zeiteinheit als Maßstab dienen. Grundsätzlich wird also nicht die Einzelwelle, sondern ein Summenwert als Charakteristikum verwendet werden, da es notwendig ist, die Wellenbewegung für einen längeren Zeitraum zu bestimmen; nur so kann ihr Einfluß auf die Verlagerung der Sandmengen erkannt werden.

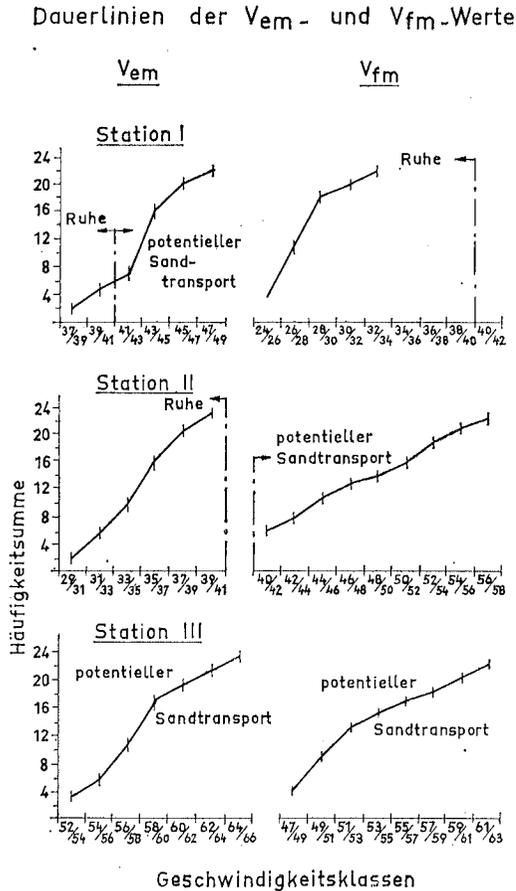
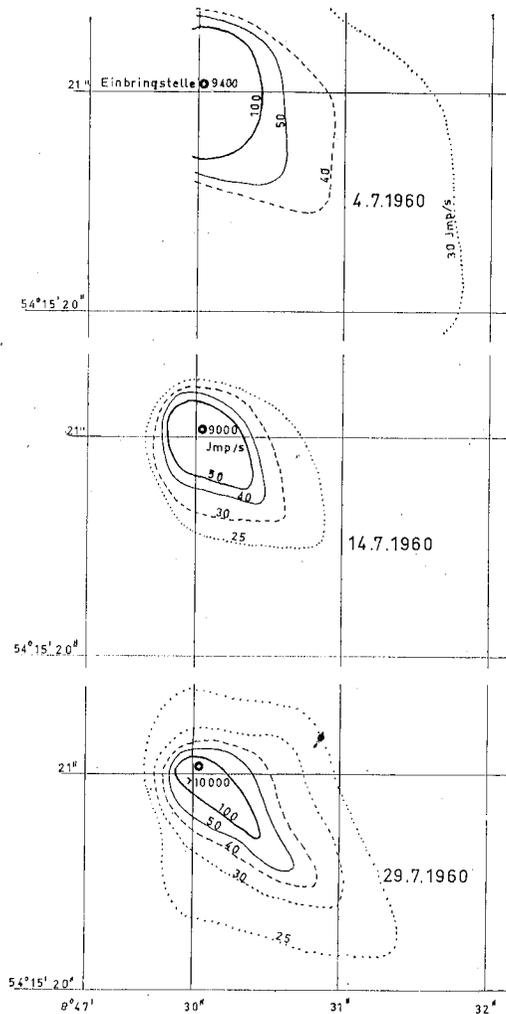


Bild 18
Dauerlinien der Geschwindigkeitsklassen

3.7 Darstellung der Meßergebnisse

Bei der Untersuchung von Gewässern, bei denen die Breitenausdehnung gegenüber der Längenausdehnung vernachlässigt werden kann, wird die Darstellung im wesentlichen auf einen Zeit-Wegplan hinauslaufen. Ist die Breitenausdehnung zu berücksichtigen, so werden die Ergebnisse in Isolinien dargestellt. Aus dem Verlauf und dem Wert der Linien gleicher Aktivität, die in besonders für jeden Zeitpunkt gefertigte Lagepläne eingetragen werden, lassen sich eingehende Aufschlüsse über die vermutliche Wanderung der Feststoffe gewinnen. Sobald die Versuchsdauer einen wesentlichen Teil der Halbwertszeit überschreitet, muß die Abnahme der Strahlungsintensität berücksichtigt werden, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten.

Die Bilder 19 bis 21 zeigen die Ausbreitung radioaktiven Sandes auf einer Wattfläche der Eidermündung in der Zeit vom 4. 7. bis 29. 7. Das Material war am 27. 6. eingebracht worden. Die Linien lassen deutlich die Hauptwanderungsrichtung nach Südosten erkennen.



Bilder 19 bis 21

Ausbreitung des radioaktiven Sandes auf einer Wattfläche

3.8 Bisherige Ergebnisse

Mit Hilfe der ausgeführten Untersuchungen konnte bisher folgendes allgemein erkannt werden:

Baggerstellen, besonders wennn sie in stromlosen Nebengewässern oder im Stromschatten liegen, ziehen Sinkstoffe mit großer Kraft an.

In weiträumigen Gewässern hat man es sinkstofftechnisch gesehen mit einem System von Erosions-, Sedimentations- und Durchzugsgebieten zu tun. Es scheinen keine ausgeprägten Transportbeziehungen in Form von festen Sinkstoffströmen zu bestehen, die ein bestimmtes Erosionsgebiet mit einem bestimmten Sedimentationsgebiet verbinden. Vielmehr wird der im Wasserstrom bewegte Sinkstoff in dem Umfange an den Sedimentationsstellen ausgeschieden, wie er der „Anziehungskraft“ der betreffenden Stelle unterliegt.

3.9 Schlußbetrachtung

Das geschilderte Verfahren befindet sich noch in seinen Anfängen. Wichtig ist eine Verbesserung der Empfindlichkeit der verwendeten Detektoren. Sodann muß versucht werden, möglichst zu einer quantitativen Aussage zu gelangen, wozu ein Vordringen in die 3. Dimension notwendig ist.

C. Modelluntersuchungen

1. Allgemeines

Bei Regelungen von Tideflüssen, Flußmündungen und bei Sicherungen abbruchgefährdeter Küstenstrecken interessieren nicht nur die möglichen oder zu erwartenden Veränderungen der allgemeinen hydraulischen Größen, sondern zugleich der damit verbundene Einfluß auf die Geschiebe- und Schwebstoffverteilung und die Morphologie der Flußsohle oder des Strandquerschnittes. Sowohl mit Modellversuchen im geeigneten Maßstab als auch bis zu einem gewissen Grade mit Rechenverfahren sind heute qualitative und quantitative Voraussagen über die Veränderungen hydraulischer Größen durch bestimmte Ausbau- und Regelungsmaßnahmen im Tidegebiet möglich. Die erforderlichen Eingangswerte zum Bau und Betrieb von hydraulischen Tidemodellen (Peilungen der Flußsohle, Tidekurven von mehreren Schreibpegeln, Angaben des Oberwasserzuflusses und Strommessungen im Untersuchungsgebiet) können mit verhältnismäßig geringem Aufwand beschafft und die Meßwerte durch die Ähnlichkeitsmechanik mit hinreichender Genauigkeit auf die Natur umgerechnet werden. Sobald allerdings die für derartige Modelle übliche feste Modellsohle durch eine bewegliche ersetzt und morphologische Vorgänge an der Gerinnesohle nachgebildet oder untersucht werden sollen, besteht zwischen Modell und Natur keine mathematische Ähnlichkeit und somit keine quantitative Übertragungsmöglichkeit. Außerdem ist bei den feinen Sanden der deutschen Tideflüsse und Küstenstrecken ein starker Materialtransport in Suspension vorhanden, der sich wegen des unterschiedlichen turbulenten Austausches in Natur und Modell nicht nachbilden läßt. Trotz dieser Schwierigkeiten werden aber dennoch Versuche mit beweglicher Modellsohle gemacht, weil die Naturvorgänge in vielen Fällen weitgehend unklar sind und auch qualitative Ergebnisse — bei entsprechend vorsichtiger Ausdeutung und Übertragung auf die Natur — für die Beurteilung und Ausführung von Regelungsmaßnahmen wertvolle Hinweise und Anregungen geben können. Selbstverständlich sollte man jedoch mit dem Begriff der „qualitativen Naturähnlichkeit“ vorsichtig sein, wenn Vergleichsmöglichkeiten mit der Naturlösung wegen mangelnder Kenntnis der Naturvorgänge im allgemeinen oder in einem besonderen Falle nicht gegeben sind.

Für den sinnvollen Betrieb von Geschiebemodellen ist deshalb die Beschaffung der Eingangsgrößen — vor allem Aussagen über die Sandwanderung — wesentlich aufwendiger und auch schwieriger als bei rein hydraulischen Modellen. Bis heute ist die genaue Messung der Geschiebebewegung an der Sohle eines Naturgerinnes nicht möglich; die in Suspension beförderten Mengen kann man zwar durch die üblichen Schweb-

stoff-Fanggeräte erfassen, jedoch sind derartige Messungen sehr aufwendig, wenn z. B. in einem bestimmten Querschnitt eines Stromes zu einem bestimmten Zeitpunkt der Sinkstoffgehalt in einem hinreichend dichten Punktnetz erfaßt werden oder gar eine Messung über eine ganze Tide hinweg ausgeführt werden soll.

Auf die größte Schwierigkeit bei der Bestimmung des Geschiebetransportes in der Natur und auch im Modell soll hier nur kurz eingegangen werden: auf die gleichzeitige Messung der Geschiebe- und Schwebstoffbewegung. Es ist allgemein bekannt, daß beide Bewegungsarten, also der Transport von Feststoffen an der Gerinnesohle und der in Suspension — vor allem bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten — nicht klar gegeneinander abgegrenzt werden können. Wie schon gesagt, kann bis heute die Geschiebebewegung an der Sohle in der Natur nicht genau gemessen werden. Im Modell ist dies wegen der viel kleineren Massen über einfache Geschiebefänge jedoch möglich. Das gleiche gilt für die Sandwanderung an Küstenstrecken, die wegen der erwähnten meßtechnischen Schwierigkeiten in ihren Grundvorgängen bis heute verhältnismäßig unerforscht ist.

Die mathematische Behandlung der Schwebstoff- und Geschiebebewegung bezieht sich in fast allen bisherigen Ansätzen auf stark vereinfachende Annahmen (stationäre und gleichförmige Strömung, Gleichgewicht im Feststofftransport) mit eindimensionaler Berechnungsgrundlage. Da keine dieser Annahmen im Tidegebiet und in Flußmündungen zutrifft, sind diese Berechnungsverfahren nur zur Klärung von Grundsatzfragen geeignet.

Im Küstengebiet schließlich sind die physikalischen Zusammenhänge zwischen der Sandwanderung und den hydraulischen Vorgängen (Triff- und Tideströmungen, Wellenangriff und Brandungsströmung) noch verwickelter, weil zur vollständigen Erfassung aller Randbedingungen unbedingt von einem dreidimensionalen Bezugssystem ausgegangen werden muß. Der an den meisten Küstenabschnitten gleichzeitig vorhandene Quer- und Längstransport des Geschiebes sowie die Vorgänge bei der Entstehung einer strandparallel gerichteten Brandungsströmung und die durch Ungleichförmigkeiten der Strände bedingten Rippströmungen und Pulsationen erschweren sowohl jede umfassende mathematische Behandlung als auch allein deren qualitative Beurteilung und Deutung. Die Möglichkeiten von Modellversuchen mit beweglicher Sohle für Küstengebiete oder idealisierte Modell-Strände (Grundsatzversuche) sind deshalb naturgemäß — zumindest im gegenwärtigen Zeitpunkte — beschränkt. In der eigentlichen Sandwanderungszone des Längstransportes, also zwischen der äußeren Brecherlinie und dem Ufer, konnten bisher keine brauchbaren Ähnlichkeitsgesetze entwickelt werden. Wegen mannigfaltiger Schwierigkeiten (Suspensionsgrad des Geschiebes, Energievernichtung beim Brechen der Natur- und Modellwellen, turbulenter Austausch in der Zone der Brandungsströmung), die hier nicht näher dargestellt werden sollen, besteht auch wenig Hoffnung, derartige Übertragungsgesetze, mit denen man praktisch arbeiten kann, jemals zu finden. Wenn dennoch auch Küstenmodelle mit beweglicher Sohle und Untersuchung der Geschiebebewegung hier und da betrieben werden, so liegt das daran, daß

- a) selbst über die grundsätzliche Wirkung verschiedenster Regelungsmaßnahmen an Abbruchküsten (z. B. über den Bau von Strandbuhnen) bis heute noch keine Klarheit besteht und man auf allen nur möglichen Wegen nach Beurteilungsmaßstäben sucht und daß
- b) bei Bauvorhaben an bestimmten Küstengebieten über den unsichersten aller zu berücksichtigenden Faktoren, die Sandwanderung, auch qualitative Aussagen eines Modells im geeigneten Maßstab wertvoll sein können.

Naturmessungen im unmittelbaren Küstenbereich und vor allem in der Brandungszone sind äußerst aufwendig, schwierig und z. T. bis heute nicht durchführbar.

Für die Feststellung der Sandverfrachtung stehen in vielen Fällen nur Tiefenkarten- oder Querschnittsvergleiche zur Verfügung. Wegen der Schwierigkeiten bei der Abgrenzung des Sandwanderbereiches im Küstenvorfeld und dem meist gleichzeitig wirkenden Quer- und Längstransport können aus derartigen Peilvergleichen nur schwer Aussagen über die tatsächlichen Sandumlagerungen und die dabei auftretenden Wanderwege und Wanderzonen abgeleitet werden.

Im Modell lassen sich entsprechende Messungen, auf die noch weiter unten eingegangen wird, selbstverständlich durchführen; ob und wie weit dabei Ähnlichkeit zwischen Modell und Natur besteht, muß gegenwärtig in vielen Fällen zweifelhaft bleiben. Die Möglichkeit zur Messung der Sandwanderung mit Isotopen oder Luminophoren schafft allerdings neue Beurteilungsmaßstäbe.

Auf eine weitere Schwierigkeit, die ganz allgemein bei Modellen für großräumige Tidemündungen zwangsläufig entsteht, muß in diesem Rahmen ebenfalls hingewiesen werden: Die Berücksichtigung der alle Strömungsvorgänge beeinflussenden Corioliskräfte. Im wasserbaulichen Versuchswesen gibt es zwar Verfahren, die auch in dieser Beziehung bis zu einem gewissen Grade Naturähnlichkeit erzielen, z. B. der Bau eines derartigen Modells auf eine drehbare Scheibe; man kann jedoch sagen, daß diese Wege noch in mancher Beziehung schwierig sind.

Im Versuchslaboratorium besteht die Möglichkeit, die grundsätzlichen Vorgänge bei der Geschiebebewegung durch strömendes Wasser, den Transportmechanismus, den Einfluß von Änderungen der Strömungsrichtung oder -geschwindigkeit, vom Salzgehalt und der Temperatur des Wassers im Maßstabe 1:1, allerdings nur mit beschränkter Wassertiefe, zu untersuchen. Derartige Erkenntnisse sind sowohl für die Aufstellung von Untersuchungsprogrammen bei Messungen in der Natur als auch bei der Beurteilung des erforderlichen und hinreichenden Aufwandes wertvoll, besonders wenn es gelingt, Meßwerte mit Rechenverfahren zu verbinden oder durch die Aufdeckung funktionaler Zusammenhänge die Zahl der erforderlichen Messungen zu vermindern.

Zu diesem Zweck wurden im Franzius-Institut für Grund- und Wasserbau der Technischen Hochschule Hannover in den Jahren 1958/59 Grundsatzversuche über allgemeine Probleme der Geschiebe- und Schwebstoffbewegung bei stationärer und instationärer Strömung durchgeführt. Die Versuche wurden von Dr.-Ing. Dillo ausgewertet, ihre Ergebnisse sind in Heft 17 der „Mitteilungen“ des Franzius-Instituts, S. 135 bis 253, veröffentlicht. Im folgenden Abschnitt wird ein kurzer Überblick dieser Arbeit gegeben.

2. Versuche über Geschiebe- und Schwebstoffbewegung in einem Modellgerinne

2.1 Allgemeines

Aufgabe und Ziel der Untersuchung war es, die theoretischen und praktischen Möglichkeiten einer Voraussage der Gleichgewichtsbedingungen des Feststofftransportes im Tidegebiet zu untersuchen und ein möglichst umfassendes Bild der dabei auftretenden Bewegungsvorgänge zu entwerfen. Die Versuche wurden in einem 0,60 m breiten, 1,0 m tiefen und 35 m langen geschlossenen waagrecht umlaufenden Gerinne mit Strömungsgeschwindigkeiten bis zu 1,30 m/s durchgeführt. Als Geschiebe wurden gleichförmige Mittel- und Feinsande der deutschen Nordseeküste verwendet.

Der Vergleich der Versuchsergebnisse mit drei neueren Geschiebegleichungen („Bed load function“ von EINSTEIN, Gleichung von MEYER-PETER und die sogenannte „Regime theory“, ein empirisches Verfahren mit Grundgleichungen von LACEY) läßt für die Vorgänge bei der Schwebstoff- und Geschiebebewegung in Tideflüssen folgende Schlußfolgerungen zu:

2.2 Geschiebepbewegung an der Sohle in „Transportkörpern“ (Riffeln oder Bänke)

- a) Jeder Strömungsgeschwindigkeit läßt sich im hinreichend langen stationären Zustand unabhängig von der Ausgangssohle ein bestimmtes Sohlenbild (Form und Größe der Transportkörper) zuordnen.
- b) Wird die Strömungsgeschwindigkeit von einem Wert u_1 auf einen Wert u_2 erhöht, so wird das zu u_2 gehörende Sohlenbild sehr viel schneller aufgebaut, als es bei einer Verminderung der Geschwindigkeit von u_2 auf u_1 wieder auf die zu u_1 gehörende Form zurückgebildet wird.
- c) In einem bestimmten Bereich der Strömungsgeschwindigkeit, der von der Größe und Zusammensetzung des Geschiebes abhängt, bilden sich Riffeln; in einem anderen, klar dagegen abgegrenzten Bereiche Bänke, deren Größenordnung die der Riffel um ein Mehrfaches übersteigt. Der Übergang von einer Transportkörpergröße in eine andere geht sprunghaft vor sich.
- d) Mit zunehmender Geschwindigkeit werden die Höhen der Transportkörper geringer, bis diese schließlich völlig abgeschliffen werden.
- e) Zwischen der mittleren Strömungsgeschwindigkeit u_m und der Wandergeschwindigkeit v_m der Transportkörper besteht eine Beziehung, die durch die Exponentialfunktion

$$v_m = c \cdot u_m^B$$

wiedergegeben werden kann, c und B sind dabei Konstanten, die von der Kornverteilung des Geschiebes abhängen.

- f) Bei der Nachbildung instationärer Tidenströmungen zeigte sich, daß eine mit Transportkörpern bedeckte Gerinnesohle im Laufe einer Tide vollständig umgebildet wird, wenn die Strömungsgeschwindigkeiten sowohl bei Flut- als auch bei Ebbestrom groß genug sind.

In der Natur, z. B. in den deutschen Tideflüssen, ist eine solche Umbildung während einer Tide bei großen Transportkörperformen (Bänken) nicht so eindeutig festzustellen. Unklar ist noch, ob die Bänke in der Natur überwiegend durch kurzzeitig wirkende Geschwindigkeitspitzen des Ebbe- oder Flutstromes in ihrer charakteristischen Form ausgeprägt werden oder nicht. Wenn eine hinreichend genaue Ortsbestimmung gelingt, sollten derartige Untersuchungen am zweckmäßigsten in der Natur durchgeführt werden.

2.3 Bewegung des Geschiebes in Suspension

Die Schwebstoffkonzentration wurde bei den Versuchen durch Entnahme von Proben in einem dichten Punktnetz über den Querschnitt ermittelt. Elektrische Meßverfahren, wie sie heute z. B. bei der Messung der Geschiebefracht in Rohrleitungen möglich sind (Konzentrationsmeßsonden), wurden wegen der Größe des Querschnittes nicht angewendet.

Bei allen untersuchten Modellsanden wuchs der Geschiebetransport ungefähr mit der 4. bis 5. Potenz der mittleren Strömungsgeschwindigkeit. Die Nachrechnung eines Modellfalles nach dem Verfahren von EINSTEIN ergibt unter sonst gleichen Bedingungen, daß der Transport annähernd mit der 4. Potenz der Geschwindigkeit wächst.

Bei Versuchen mit instationären (Tide-) Strömungen zeigte sich, daß eine schrittweise Berechnung der transportierten Geschiebemengen aus den augenblicklichen mittleren Strömungsgeschwindigkeiten wegen des Beschleunigungseinflusses nur eine grobe

Abschätzung der bewegten Gesamtmenge liefern kann. In der Natur kann natürlich auch eine über den gesamten durchflossenen Querschnitt gemittelte Geschwindigkeit die tatsächlichen Verhältnisse eines flachen und breiten Tidestromes nicht richtig wiedergeben. Der oft unternommene Versuch, den Feststofftransport aus einer örtlich gemessenen Strömungsgeschwindigkeit an der Sohle herzuleiten, ist wegen der turbulenten Längsschwankungen, die in Sohlennähe besonders bei topographischen Unregelmäßigkeiten (Bänke) sehr groß sind, unzweckmäßig und nicht hinreichend.

In Sonderversuchen wurde der grundsätzliche Zusammenhang zwischen Geschiebetransport, Wassertemperatur und Salzgehalt des Wassers untersucht. Es zeigte sich, daß mit zunehmender Temperatur und damit abnehmender Zähigkeit des Wassers wegen der größeren Fallgeschwindigkeit der suspensierten Sandkörner die Schwebstoffkonzentration abnimmt. Frühere Versuche von HO PANG YUNG hatten ergeben, daß der Geschiebetransport bei größeren Sanden und damit geringerer Suspensionsdichte mit steigender Temperatur zunimmt. Allerdings wurde bei diesen Versuchen mit größerem Sand und nur mit Strömungsgeschwindigkeiten bis etwa 60 cm/s gearbeitet.

Die Versuche mit verschiedenen Salzkonzentrationen zeigten, daß mit steigendem Salzgehalt bei sonst gleichen Bedingungen die Schwebstoffkonzentration ansteigt.

2.4 Beurteilung der Berechnungsmöglichkeiten und -grundlagen des Sandtransportes im Tidegebiet aufgrund der Versuche

Wenn man berücksichtigt, daß im Tidegebiet einer Flußmündung an jeder Stelle Strömungsrichtung und -geschwindigkeit, Wasserstand, Salzgehalt, Temperatur, Sohlentiefe und auch möglicherweise die Form der Sohle (Transportkörper) ständigen periodischen und aperiodischen Veränderungen unterworfen sind, wird verständlich, daß es bisher nicht möglich war, die Größe des Sandtransportes im Tidegebiet vorauszuberechnen. Läßt man zunächst die besonders schwierigen Verhältnisse des Brakwassergebietes unberücksichtigt, so sollten durch weitere Laboratoriums- und Naturmessungen folgende Fragen näher untersucht werden:

- a) Wie beeinflußt die Sohlenmorphologie (Transportkörper) den Fließwiderstand?
- b) Wie verändern sich diese Widerstände während der Tide?
- c) Welchen Einfluß hat die Beschleunigung des strömenden Wassers während der Tide auf dem Geschiebetransport?

Für praktische Messungen in der Natur wird in der Arbeit von DILLO ein Verfahren angegeben, das die Bestimmung der Geschwindigkeits- und Schwebstoffverteilung in einem senkrechten Schnitt theoretisch schon mit zwei Meßpunkten gestattet. Es wäre somit verhältnismäßig leicht, die Änderungen der Geschwindigkeiten und der Schwebstoffverteilung während einer Tide zu verfolgen und aus diesen Messungen ein Zahlenmaterial zu gewinnen, das Schlüsse auf den gesamten Fließvorgang und die Sandwanderung zuläßt. Voraussetzung dazu ist, daß die Geschwindigkeitsverteilung in dem natürlichen Gerinne mit dem logarithmischen Verteilungsgesetz von v. KARMANN (Konstanten nach KEULEGAN), das auch EINSTEIN⁴⁾ verwendet, hinreichend übereinstimmt und daß sich die Schwebstoffverteilung hinreichend genau durch die von ROUSE⁵⁾ angegebene Gleichung beschreiben läßt. Bei Verwendung eines geeigneten Funktionspapiertes ist die Überprüfung dieser Voraussetzungen auch in der Natur durch einfachen Vergleich der Meß- und Rechenwerte leicht möglich.

⁴⁾ EINSTEIN, H. A.: The bed-load function for sediment transportation in open channel flows. U. S. Dept. of Agri. Techn. Bull. 1026 (1950).

⁵⁾ ROUSE, H.: Modern conceptions of the mechanics of fluid turbulence. Trans. ASCE, Vol. 102 (1937).

3. *Versuche über den Geschiebetrieb an einem idealisierten Modellstrand*

Wie bereits angedeutet, müssen gegen Modellversuche mit beweglicher Sohle für bestimmte Küstenabschnitte der Natur nach dem heutigen Stande unserer Kenntnisse und Möglichkeiten gewisse Bedenken erhoben werden. Für größere Gebiete sind solche Untersuchungen meist nur dann möglich, wenn das Modell verzerrt und der Maßstab so klein gewählt wird ($< 1 : 500$), daß sich die tatsächlichen Wellengrößen nicht mehr nachbilden lassen. Im allgemeinen wird dann auch die geometrische Ähnlichkeit, z. B. die Lage der Brecherzone, nicht mehr voll gesichert sein.

Im Franzius-Institut werden seit einigen Jahren an einem etwa 20 m langen Modellstrand grundsätzliche Versuche über die Wirkung von Seebuhnen durchgeführt. Es wurde dabei teils mit beweglicher und teils mit fester Modellsohle gearbeitet. Feste Modellmaßstäbe werden dabei nicht angegeben, weil sich unter Berücksichtigung aller wirksamen Faktoren für den gleichen Modellzustand durch einfache Vergleiche geometrischer Abmessungen des Strandes und der angreifenden Wellen die verschiedensten Maßstäbe in weiten Grenzen konstruieren lassen.

Es gelang bei den Versuchen, die Wellengrößen, die Korngröße des Geschiebes und die geometrischen Abmessungen des Versuchsstandes so aufeinander abzustimmen, daß bei schrägem Wellenangriff der gesamte Geschiebetransport in Form einer strandparallelen Längswanderung zwischen der Modell-Brecherlinie und dem Ufer verlief. Gemessen wurde der Sandtransport mit Sandfangkästen am Ende des Modellstrandes.

Für die grundsätzliche Beurteilung von Strandbuhnen an abbrechenden Küstenstrecken muß hinreichend bekannt sein, in welchem Bereich die Sand-Längswanderung am stärksten ist. Die Annahme konstanter Verfrachtungsintensität zwischen Brecherlinie und Strandwall ist sicher falsch. Im Modell bewegten sich etwa 70 % der Geschiebefracht im Längstransport im unmittelbaren Bereiche des Riffes längs der Brecherlinie (das Modell ist so ausgelegt, daß nur ein Riff entsteht). Selbstverständlich gilt diese Angabe vorerst nur für die besonderen Randbedingungen (z. B. Korngröße des Geschiebes) des Modells, sie kann nicht unmittelbar auf Naturverhältnisse übertragen werden, solange keine Naturmessungen vorliegen. Es ist deshalb nicht nur für die Praxis, sondern auch für das Versuchswesen äußerst wichtig, solche Meßergebnisse in die Hand zu bekommen.

Die oben beschriebenen Versuche sind noch nicht abgeschlossen, so daß umfassendere Aussagen noch nicht gegeben werden können.