

Abteilung II — Seeschifffahrt

Thema 4

Verhalten der Küsten. Bodenbewegung durch Seegang und Strömungen. Modellversuche und Beobachtungen in der Natur.

von

Dipl.-Ing. Helmut Fahse, Wissenschaftlicher Angestellter, Bundesanstalt für Wasserbau — Außenstelle Küste — Hamburg; Dr.-Ing. Harald Göhren, Forschungsgruppe Neuwark, Cuxhaven; Dr.-Ing. Hans Laucht, Erster Baudirektor, Strom- und Hafengebäude, Hamburg; Dipl.-Ing. Dr.-Ing. E. h. J. M. Lorenzen, Präsident a. D., Vorsitzender des Küstenausschusses Nord- und Ostsee, Kiel; Dipl.-Geologe K.-W. Ruck, Bundesanstalt für Wasserbau — Außenstelle Küste — Hamburg; Dr. rer. nat. Gyula Samu, Bundesanstalt für Wasserbau — Außenstelle Küste — Hamburg; Ernst Schnoor, Wissenschaftlicher Angestellter, Bundesanstalt für Wasserbau — Außenstelle Küste — Hamburg; Dipl.-Ing. Heinz Schulz, Regierungsbaudirektor a. D., Bundesanstalt für Wasserbau — Außenstelle Küste — Hamburg; Dr.-Ing. Hans Vollmers, Wissenschaftlicher Angestellter, Bundesanstalt für Wasserbau — Außenstelle Küste — Hamburg.

Zusammenfassung

Sandbewegung im deutschen Küstenbereich als küstengestaltender Faktor

Die gegenwärtige Küstenform im Bereich der südlichen und östlichen Nordsee mit den vorgelagerten Watten ist das Ergebnis säkularer, im wesentlichen durch Gezeiten und Wind ausgelöster, bis in die Gegenwart fortwirkender Naturvorgänge. Der Meeresboden der Nordsee und des landnahen, bis zu 30 km breiten, dem Festland vorgelagerten Wattsockels besteht in den oberen Schichten überwiegend aus holozänen Sedimenten, die in örtlich verschiedener Mächtigkeit auf pleistozänen Sanden liegen. Die Sedimente an der Oberfläche des Meeresbodens werden in der freien Nordsee durch Seegang und Strömung aufgenommen und transportiert. Umfang und Hauptbewegungsrichtung des Sandbewegungstransportes sind noch weitgehend unbekannt. Es wird angenommen, daß die in der freien See bewegten Sedimente zum Teil bis in das Wattenmeer und an die Küsten gelangen. Mit einiger Sicherheit kann man annehmen, daß außerdem im Bereich des Anstiegs des Meeresbodens aus der See zum hohen Watt, wo der Seegang in Brandung übergeht, zumindest an der südlichen Küste der Nordsee ein küstenparalleler Transport von Sand stattfindet. Über die Art und den Umfang dieses Transportes ist außer durch morphologische Rückschlüsse ebenfalls wenig bekannt.

Die Wirkung der den Sedimenttransport auslösenden Naturvorgänge im küstennahen Bereich ist bei einer Sedimentzufuhr für den Schutz gefährdeter Küsten im allgemeinen ein Gewinn (positive Sandbilanz), für die Erhaltung und Verbesserung von Seewasserstraßen aber meist von mehr oder weniger großem Nachteil. Umgekehrt kann ein nach See zu oder durch küstenparallele Vorgänge bewirkter Sedimentabtrag dem Schutz der Küsten gefährlich werden; er kann dagegen für die Maßnahmen zur Verbesserung der Wasserstraßen nützlich sein (negative Sandbilanz).

Da die Sedimentbewegung alle technischen Maßnahmen zum Schutz der Küste und zur Erhaltung des Wattsockels ebenso wie diejenigen zur Erhaltung und Verbesserung der

Seewasserstraßen stark beeinflusst, ist es von entscheidender Bedeutung, die Ursachen des Sedimenttransportes, die Richtung und Menge des bewegten Materials zu kennen. Infolge der mangelhaften Kenntnis der physikalischen Vorgänge bei der Aufnahme und dem Transport des Sedimentes und der Schwierigkeit, die Vorgänge exakt durch Messung des überwiegend in Bodennähe bewegten Materials zu erfassen, hat man sich bisher meist mit indirekten Schlußfolgerungen aus den Ergebnissen, von Strömungsmessungen und morphologischen Vergleichen geholfen, deren Ergebnisse aber nicht befriedigen konnten.

Ein vor kurzem angelaufenes „Schwerpunktprogramm“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft, das die Untersuchung der „Sandbewegung im deutschen Küstenbereich“ zum Gegenstand hat, soll im Wege der Grundlagenforschung die physikalischen Vorgänge bei der Sandbewegung aufhellen und Methoden zur einwandfreien Messung und der Mengenbestimmung des Sandtransportes entwickeln. Dieses Programm befaßt sich zunächst mit den Vorgängen, die in der freien See wirksam sind und von hier aus die Vorgänge in Küstennähe mehr oder weniger stark beeinflussen. Es wird daher geraume Zeit vergehen, bis hier erste Ergebnisse vorliegen. Die akuten Sorgen um den Schutz der Küste und die Verbesserung der Seewasserstraßen machen jedoch alljährlich Entscheidungen über technische Planungen und Maßnahmen notwendig, die sich auf eine möglichst gute Kenntnis der im näheren Küstenbereich wirksamen Naturvorgänge stützen müssen. Mit der Klärung dieser Vorgänge sind seit Jahren eine Reihe von Untersuchungs- oder Forschungsstellen der für Küstenschutz und Seewasserstraßen verantwortlichen Fachverwaltungen befaßt. Sie untersuchen vor allem die Sedimentbewegung auf dem Watt und in dessen Tiderinnen mit Hilfe von Strommessungen, teilweise unter Verwendung von Leitstoffen, morphologischen Vergleichen sowie durch Modell und Rechnung. Aus diesen verschiedenen praktischen Zwecken dienenden Untersuchungen sind im folgenden fünf Beispiele ausgewählt, in denen die Methoden und Ergebnisse z. T. noch der Bestätigung durch Naturmessungen bedürfen und daher noch nicht als allgemein gültig angesehen werden können, sie geben aber gute Hinweise für die Untersuchung ähnlich gelagerter Probleme.

1. Das erste Beispiel behandelt eine Teiluntersuchung über den Sedimenttransport auf dem Watt, und zwar im Bereich der Elbmündung mit Hilfe von Seegangsbeobachtungen, Strömungs- und Leitstoffmessungen:

Während die Gezeitenströmungen im hohen Watt im allgemeinen nur schwach ausgeprägt sind, treten unter Windeinwirkung verhältnismäßig starke Triftströmungen auf. Triftströmungen und Seegang haben größeren Einfluß auf die Materialbewegung in den flachen Wattgewässern als die Gezeitenströmungen.

Aus Messungen mit Leitstoffen und synoptischen Strombeobachtungen lassen sich Zusammenhänge zwischen den Transportkräften und der Sandbewegung an der Sohle erkennen. Auf sandigen Wattböden wird infolge der Orbitalbewegung auch bei Strömungen, die im Bereich oder unterhalb der kritischen Geschwindigkeiten liegen, Material bewegt. Der Materialtransport findet im wesentlichen an der Wattoberfläche statt und erfaßt nur eine wenige Zentimeter starke Bodenschicht (Laucht/Göhren).

2. Ein weiterer Beitrag befaßt sich allgemein mit der Methode der Leitstoffuntersuchungen und der Auswertung und Deutung ihrer Ergebnisse, hauptsächlich in den Tiderinnen und Seewasserstraßen im Wattbereich:

Die bisher entwickelten Verfahren und Rechnungen für die quantitative Bestimmung der Sandbewegung an der Sohle von Küsten- und Tidegewässern mit Hilfe von Tracern befriedigen nicht. Sie gehen von Voraussetzungen aus, die in der Natur nicht oder nur selten erfüllt sind. An Hand von Beispielen wird gezeigt, wie in besonderen

- Fällen die Untersuchungsergebnisse im Bereich der Küsten- und Tidegebiete der Bundesrepublik Deutschland in quantitativer Hinsicht ausgewertet werden können (Schulz / Ruck).
3. Unter Zuhilfenahme von morphologischen Vergleichen und Leitstoffversuchen wird im 3. Beispiel der Vorgang der Sandbewegung in der Jade untersucht:
Man kann verallgemeinernd sagen, daß die Quelle des wandernden Sandes in der Nordsee zu suchen ist. Es treten gleichzeitig verschiedene Nährgebiete auf. Die Transportrichtungen können nicht immer eindeutig bestimmt werden. Der vor den west- und ostfriesischen Inseln vorbeifließende Sandstrom trifft die innere Deutsche Bucht und führt so zur ausgeprägten Verlandung. Eine der HAUPTerscheinungen des Sandtransportes sind die submarinen Sanddünen und analogen Formen, die ein System veränderlicher temporärer Umlagerungsoberflächen darstellen. An Hand von Beispielen aus zwei Untersuchungsbereichen wird gezeigt, wie durch die Erforschung dieser Formen Aussagen über die natürliche Entwicklung der küstenferneren Gebiete und Ästuarien gewonnen werden können (Samu).
4. Im Wege von Modellversuchen und durch Rechnung wird der Gang und das Ergebnis einer Untersuchung über Feststoffbewegung bei Strömungen wiedergegeben:
Vermittels harmonisch oszillierender Bewegung einer künstlichen Sandsohle hat H. A. Einstein in Laborversuchen die „mobilisierte“ Sandmenge in quantitativen Zusammenhang gebracht mit der Amplitudenfunktion der „Scherströmung“ in der Grenzschicht an der Meeressohle und dem Durchmesser und spezifischen Gewicht des Sandkorns.
Anknüpfend an Einsteins Versuchsergebnisse werden hier die im „Tiefwasser“ sowohl durch einheitliche Dünungswellen als auch durch die spektrale Windsee mobilisierten Sandmengen mathematisch formuliert (Fahse / Schnoor).
5. Das 5. Beispiel versucht eine mathematische Ableitung der Sedimentbewegung infolge Seegang und Strömung:
Der Bewegungsbeginn und das Transportverhalten von Sedimenten in einer Strömung ist für die Beurteilung von Sohlumbildungen in offenen Gerinnen von Bedeutung. Bei der Vielzahl von möglichen Variablen lassen sich jedoch durch dimensionslose Parameter für richtungskonstante Strömungen allgemein gültige Aussagen machen, die dann in entsprechender Form für die praktische Anwendung geeignet sind (Vollmers).

Inhalt

	Seite
1. Über den Sandtransport im Wattenmeer	245
1.1 Die Wattsedimente	245
1.2 Die Transportkräfte	246
1.21 Tideströmungen	246
1.22 Triftströmungen und Seegang	247
1.3 Beobachtungen der Sandbewegung mit Luminophoren im Neuwerker Watt	248
1.31 Strömungen und Materialausbreitung	249
1.32 Die Schichtstärke des bewegten Sandes	254
2. Auswertung und Deutung von Sandbewegungen in Tidegewässern mit markierten Leitstoffen unter besonderer Berücksichtigung des derzeitigen Standes der quantitativen Aussagen	255

	Seite
2.1 Verfahren und Untersuchungen zur Messung der Sandbewegung in den Küstengebieten und Flußmündungen der Bundesrepublik Deutschland	255
2.2 Quantitative Ausdeutung der Meßergebnisse	256
3. Untersuchung über die Entwicklung des Bodenreliefs in Ästuarien mit sandigem Untergrund mit Hilfe von morphologischen Methoden	263
3.1 Zur Frage der Herkunft und der Bewegung des Sandes in der südlichen Nordsee	263
3.2 Sandbewegung in Ästuarien: Ergebnisse ausgewählter Untersuchungen ...	264
3.21 Echogramme von Tonnenlegern	264
3.22 Veränderung des Bodenreliefs im Wangerooger Fahrwasser	267
4. Bodenbewegung durch Seegang und Strömungen	270
4.1 Allgemeines	270
4.2 Im Tiefwasser mobilisierte Sandmengen	272
4.21 Durch einheitliche Dünungswellen im Tiefwasser mobilisierte Sandmenge ..	272
4.22 Mathematische Formulierung der durch glatten spektralen Seegang mobilisierten Sandmenge	273
4.3 Zur Verwendung von Airy's Wellentheorie	275
4.4 Über die Grenzen der Anwendbarkeit des Verfahrens	275
5. Feststoffbewegung bei Strömungen	275
5.1 Allgemeines	275
5.2 Dimensionslose Parameter	276
5.3 Der Beginn des Feststofftransportes	277
5.31 Bonnefille, Pernecker, Vollmers	277
5.32 Dou Go-zen	280
5.4 Der Feststofftransport	282

1. Über den Sandtransport im Wattenmeer

1.1 Die Wattsedimente

Das Sohlenmaterial des Wattenmeeres besteht überwiegend aus Feinsand der Fraktion 0,06 bis 0,2 mm. Es kann also durch Strömungsgeschwindigkeiten, die 30 bis 50 cm/s erreichen, aufgenommen und transportiert werden, wenn man die bekannten Beziehungen von HJULSTROM zugrunde legt.

Je nach dem Schluffgehalt des Wattbodens unterscheidet man Sandwatt, Schlicksandwatt und Schlickwatt, wobei diese Grenzen fließend und nicht verbindlich definiert sind. Sandiges Watt wird vornehmlich im äußeren Wattengürtel angetroffen, Schlickwatt in Küstennähe, in geschützten Buchten oder im Brackwasserbereich der Tideflüsse.

Der Schluffgehalt ist maßgebend für die Erodierbarkeit der Wattböden. Schlickwattböden setzen der Erosion, d. h. der Aufnahme von Sohlenmaterial durch die Strömung größeren Widerstand entgegen als sandige Böden. Dabei spielt auch das Alter der Sedimente und die biologische Besiedlung eine Rolle.

Die von HJULSTROM angegebenen Erosions- und Transportgrenzgeschwindigkeiten lassen sich nicht vorbehaltlos auf die Verhältnisse im Wattenmeer anwenden. Die Grenzgeschwindigkeiten können bei konsolidierten, biologisch „gebundenen“ Schlickwattböden höher, bei stark turbulenten Strömungen, insbesondere bei auftretenden Orbitalströmungen, niedriger liegen.

1.2 Die Transportkräfte

Periodische Gezeitenströmungen, Seegang und Triftströmungen transportieren das Sohlenmaterial und formen die Wattlandschaft. Aus umfangreichen Strömungsmessungen in den Mündungswatten der Elbe konnten einige Aufschlüsse über die Strömungsvorgänge im Wattenmeer und ihren Einfluß auf den Materialtransport gewonnen werden.

1.21 Tideströmungen

Außerhalb der Priele und Wattströme, das heißt auf den hohen, ausgedehnten Wattplatten, treten im allgemeinen nur sehr geringe Strömungen bei normalem, meteorologisch nicht gestörten Gezeitenablauf auf. Bild 1 zeigt die im Neuwerker Watt an 113 Meßstationen beobachteten Maximalgeschwindigkeiten bei mittlerer Tide. Wegen des großen Datenumfangs und der Verteilung der Stationen in einem rund 200 km² großen Wattgebiet können die Verteilungskurven als repräsentativ gelten. Sie zeigen, daß die maßgebenden kritischen Grenzgeschwindigkeiten in vielen Fällen bei normaler Gezeitenbewegung nicht erreicht oder nur geringfügig (und kurzfristig) überschritten werden.

Bedingt durch die Asymmetrie der Tidebewegung in Küstennähe (der Flutast der Tidekurve wird steiler, der Ebbeast flacher) sind die maximalen Flutstromgeschwindigkeiten im statistischen Mittel größer als die V_{\max} bei Ebbe. Die Verteilungskurven in Bild 1 geben einen Hinweis auf das geologische Phänomen der Wattbildung. Wenn bei normaler Gezeitenbewegung überhaupt Material bewegt wird, so überwiegt in Flutstromrichtung, von den Stromrinnen auf die hohen Wattplatten, also wattaufbauend.

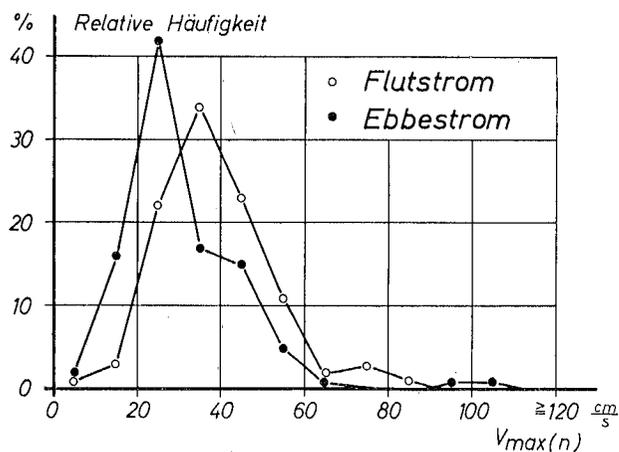


Bild 1
Maximale Stromgeschwindigkeiten an 113 Stationen im Elbmündungswatt
bei mittlerer Tide
(Meßhöhe 0,4 m über der Sohle)

1.22 Triftströmungen und Seegang

Die Bedeutung des Seegangs bei den Materialbewegungen im Watt ist noch wenig erforscht. Grundsätzlich läßt sich folgendes aussagen: Die Orbitalströmungen der Meereswellen werden sich im flachen Wattenmeer bereits bei mäßigem Seegang bis an die Sohle auswirken. Der turbulente Austausch und damit das Transportvermögen der Strömung werden infolge der Orbitalbewegung erhöht, die kritischen Transportgeschwindigkeiten erniedrigt. Im flachen, ebenen Watt entsteht durch die Orbitalströmung jedoch kein nennenswerter Wassertransport. Für den Materialversatz besitzen die Seegangswellen daher keine selbständige Transportfunktion, sondern nur eine transporterhöhende Funktion wenn andere Strömungen auftreten.

Neben dem Seegang entstehen im Wattenmeer unter Windeinwirkung ausgeprägte Triftströmungen, die im allgemeinen in Richtung der Windschubkraft verlaufen und die normalen Gezeitenströmungen in ihrer Intensität erheblich übertreffen. Wegen der erhöhten Turbulenz ist das Transportvermögen der Triftströmung größer als das vergleichbarer Tideströmungen schwachwindiger Wetterlagen. Aus den Strombeobachtungen im Neuwerker Wattgebiet konnten einige Gesetzmäßigkeiten der Triftstromentwicklung im flachen Wattenmeer abgeleitet werden.

Aufschlußreich ist ein Vergleich der normalen Tideströmungen und der unter Wind einfluß entstehenden Triftströmungen. Bild 2 zeigt in einer Häufigkeitsverteilung bei Sturmweatherlagen gemessene Spitzengeschwindigkeiten und die zugehörigen V_{max} bei mittlerer Tide. Den Verteilungskurven liegen 100 Beobachtungen zugrunde.

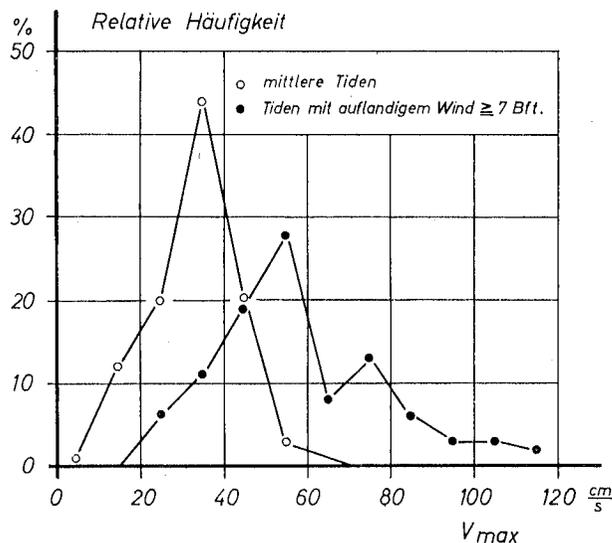


Bild 2
Maximale Stromgeschwindigkeiten im Watt bei Sturmweatherlagen und bei mittlerer Tide nach Meßergebnissen aus der Elbemündung (Meßhöhe 0,4 m über der Sohle)

Bild 3 enthält — aus rund 280 Meßtiden gemittelt — eine Kurve, die die Zunahme der Restströmung mit der Windstärke angibt. Die Restströmung, definiert als das vektorielle Geschwindigkeitsintegral über die Tidedauer, wächst danach im Mittel aller Beobachtungen von 1,6 km/Tide bei normalem Gezeitenverlauf auf 11 km/Tide bei Sturmweatherlagen mit Windstärken über 7 Bft.

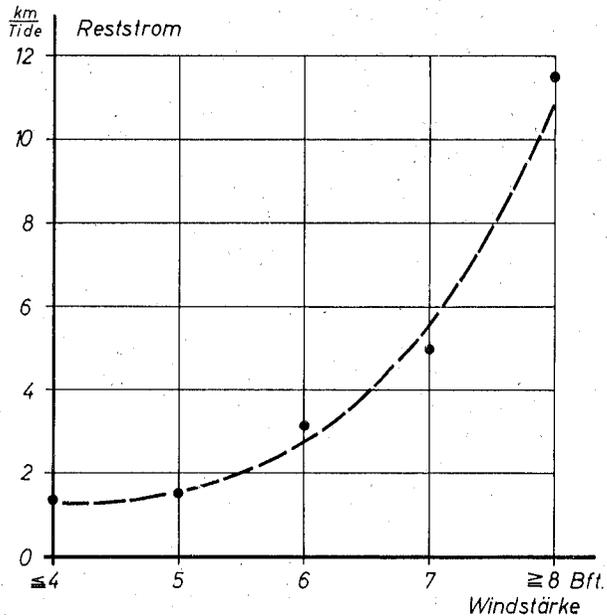


Bild 3
Mittlere Restströmung im Watt in Abhängigkeit von der Windstärke,
nach Meßergebnissen aus der Elbemündung
(Meßhöhe 0,4 m über der Sohle)

Aus einer eingehenden Bearbeitung der umfangreichen Meßwerte, die hier in der gebotenen Kürze nicht behandelt werden kann, ergab sich, daß den unter dem Einfluß aufländiger Winde entstehenden Triftströmungen auch unter Beachtung der Häufigkeit ihres Auftretens ein größerer Einfluß auf den Materialtransport beizumessen ist, als den Gezeitenströmungen. Nicht im monotonen Gezeitenablauf, sondern bei Starkwind- und Sturmweatherlagen finden die entscheidenden Materialumlagerungen im Wattenmeer statt.

1.3 Beobachtungen der Sandbewegung mit Luminophoren im Neuwerker Watt

Es stellt sich die Frage, ob bei den sehr geringen Strömungsintensitäten der normalen Gezeitenbewegung überhaupt Material an der Wattsohle transportiert wird. Um sie zu klären, wurden im Neuwerker Watt mehrere Versuche mit künstlichen Leitstoffen (Luminophoren) durchgeführt. Über das Verfahren und erste Ergebnisse ist bereits berichtet worden. Die Messungen sollten insbesondere auch klären, ob aus Strombeobachtungen auf die resultierenden Transportrichtungen geschlossen werden kann. Parallellaufend mit den Luminophorenmessungen wurden daher stets Strömungsmessungen durchgeführt. Im Lageplan Bild 4 sind die Meßstellen im Neuwerker Watt angegeben.

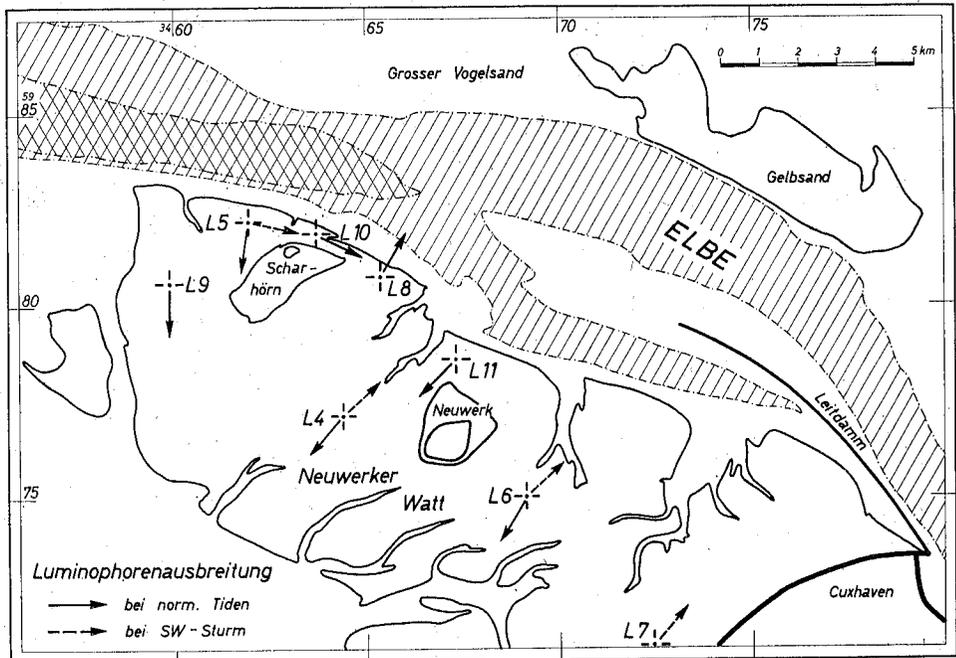


Bild 4
Übersichtsplan der Elbemündung mit Positionen
der Luminophorenmessungen und Meßergebnissen

1.31 Strömungen und Materialausbreitung

Aus dem umfangreichen Beobachtungsmaterial können hier nur einige wenige Beispiele diskutiert werden, die in Bild 5 zusammengestellt sind. Die Darstellung enthält aus 4 verschiedenen Meßserien (vgl. Bild 4) die an der Wattoberfläche gefundenen Konzentrationen (Anzahl der Luminophoren in rd. 200 g trockenem Sand) 2 bis 3 Tage nach Ausgabe des Materials und die bis zu diesem Zeitpunkt gemessenen Strömungen. In den flächenhaften Darstellungen, die die Materialausbreitung an der Sohle erkennen lassen, sind die Richtungen der maximalen Flut- und Ebbeströmungen mit angegeben. Die Übereinstimmung zwischen den Hauptströmungsrichtungen und den Ausbreitungsrichtungen ist in allen Fällen gut.

In Position L 11 läuft der Flutstrom nach Südwesten und erreicht Spitzengeschwindigkeiten zwischen 35 und 50 cm/s. Die nordöstlich gerichtete Ebbeströmung ist schwächer ausgeprägt, $V_{e \max}$ liegt unter 30 cm/s. Die Luminophoren haben sich in beiden Richtungen ausgebreitet, vorwiegend jedoch in Flutstromrichtung. Neben diesen Hauptbewegungsrichtungen ist eine Ausbreitungstendenz nach Westen zu erkennen, die sich ebenfalls aus dem Strömungsverlauf ableiten läßt. Flut- und Ebbeströmung verlaufen nicht genau entgegengesetzt (180°), so daß im stetigen Gezeitenablauf eine resultierende, westlich gerichtete Strömungskomponente verbleibt. Die Windgeschwindigkeiten lagen bis zum 19. September unter 5 Bft. Am 20. September herrschte Südwestwind 5 Bft.

In Position L 10 herrscht alternierende Strömung. Die Spitzengeschwindigkeiten bleiben unter 35 cm/s; sie liegen bei Ebbestrom geringfügig höher als bei Flutstrom. Die Flutstromkurve ist dagegen fülliger. Das Indikatormaterial hat sich in beiden Haupt-

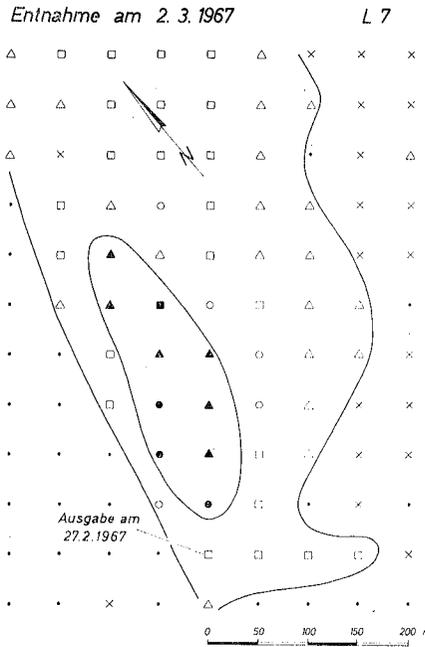


Bild 5
Luminophorenausbreitung und
Strömungsverlauf an 4 Meßstellen
im Neuwerker Watt

Zeichenerklärung

- | | | |
|--------------|-----------------------------|-------------|
| • 0 | △ 6 - 20 | ○ 50 - 100 |
| × 1 - 5 | □ 20 - 50 | ▲ 100 - 200 |
| ■ 200 - 500 | ▲ 1000 - 5000 | |
| ● 500 - 1000 | ● > 5000 Luminophoren/Probe | |

Bild 5 a

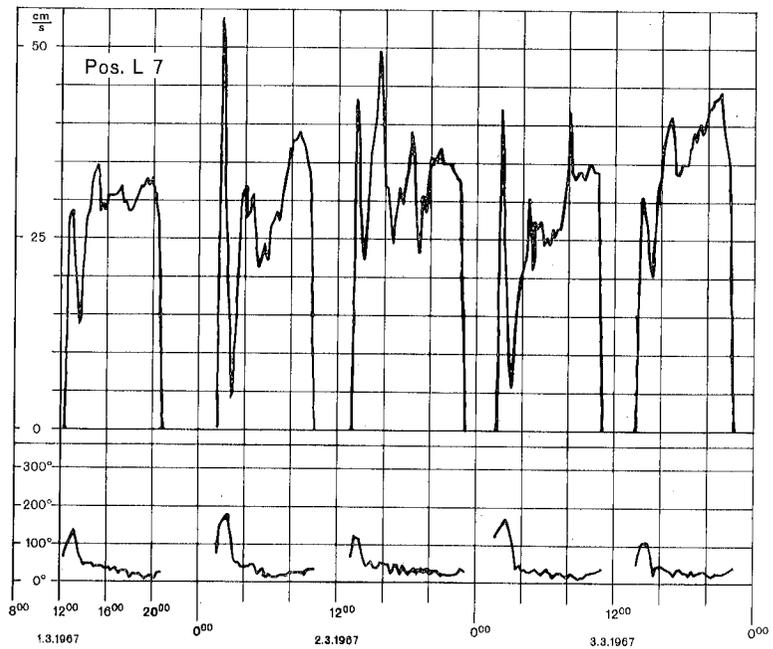


Bild 5 b

Entnahme am 20. 5. 1967 L 8

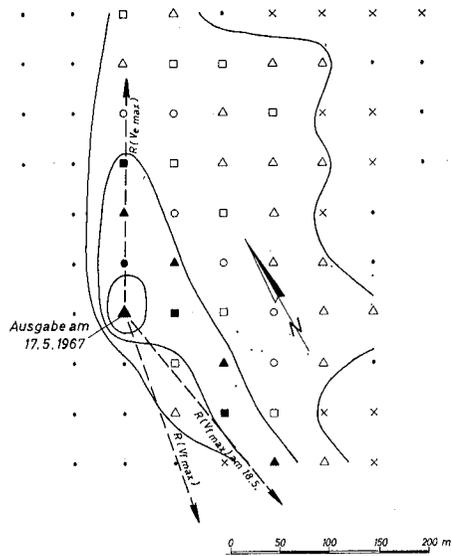


Bild 5 c

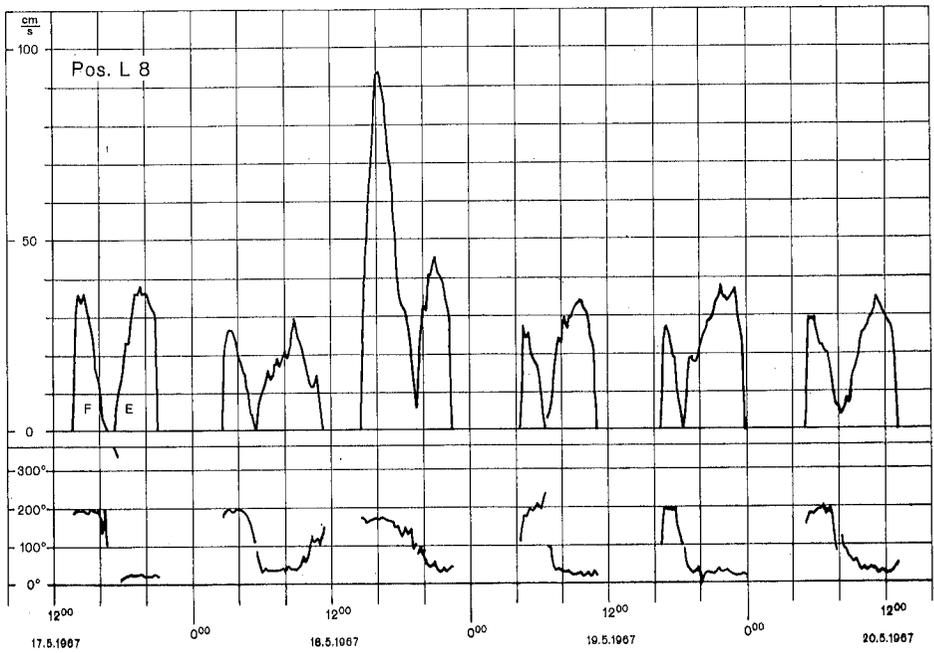
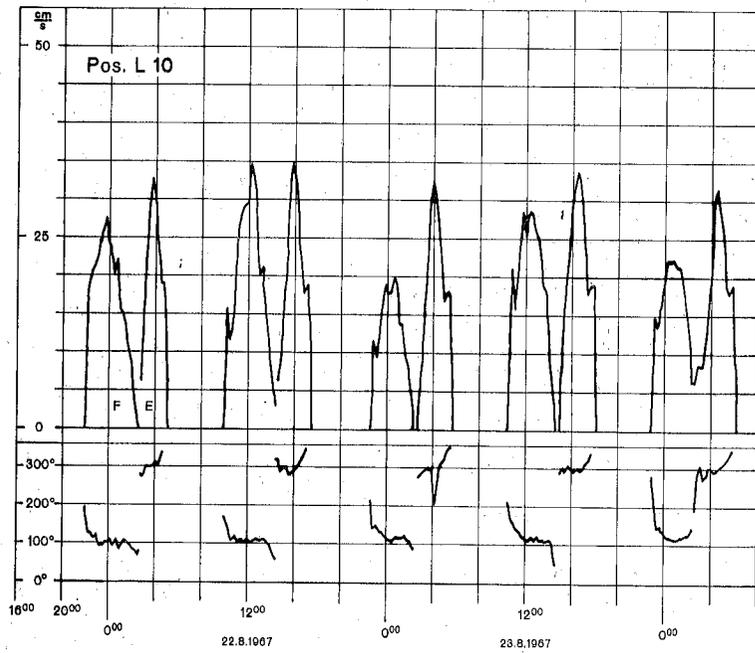
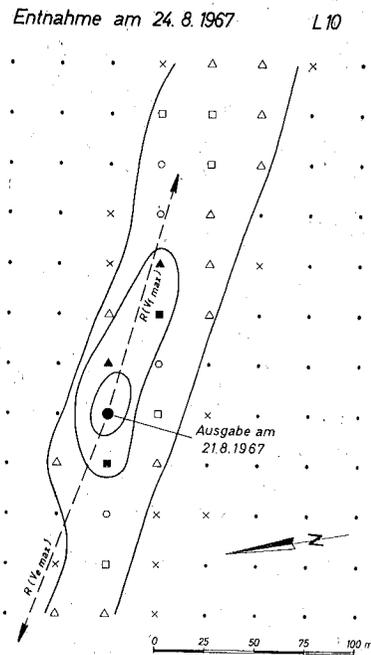


Bild 5 d



Entnahme am 21. 9. 1967

L 11

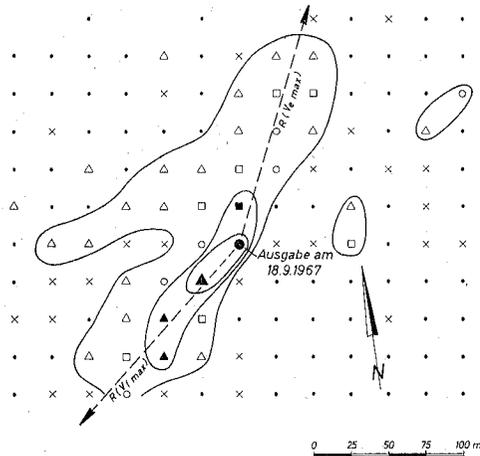


Bild 5 g

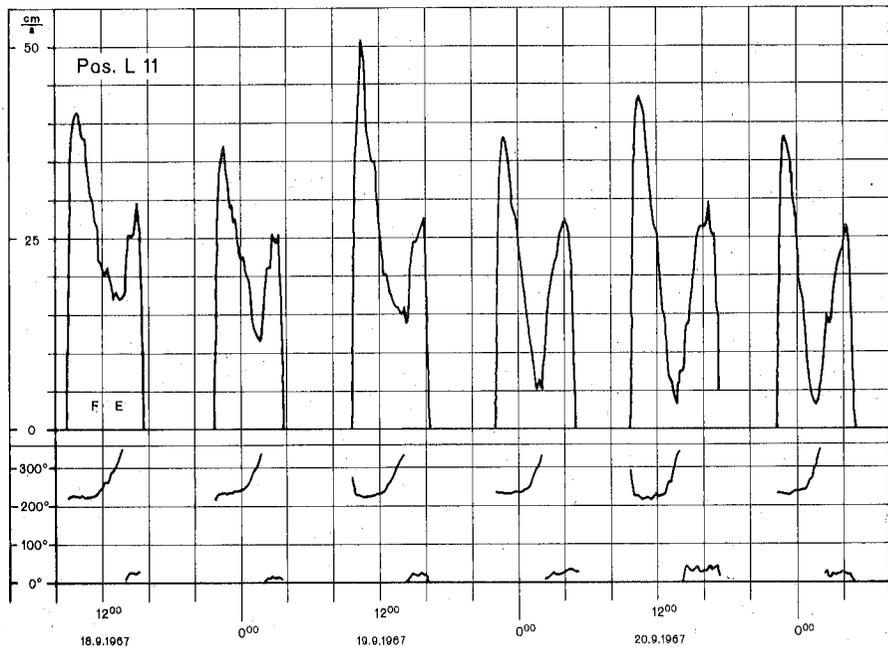


Bild 5 h

strömungsrichtungen ausgebreitet; die vorherrschende Transportrichtung entspricht der Flutstromrichtung. In der Nacht vom 22. August zum 23. August trat Westwind mit 5 Bft auf, sonst lagen die Windgeschwindigkeiten unter 5 Bft.

Die Meßergebnisse in Pos. L 8 zeigen Materialausbreitungen nach Nordnordosten (entsprechend der Ebbestromrichtung) und Süden (Flutstromrichtung). Im Mittel überwiegt die nordöstlich gerichtete Ebbestromung mit Spitzengeschwindigkeiten um 35 cm/s. Die Materialausbreitung nach Süden hängt offensichtlich mit der starken Flutströmung am 18. Mai zusammen. Neben den beiden Hauptausbreitungsrichtungen ist ein Materialversatz nach Osten zu erkennen, der sich ähnlich wie in Pos. L 11 aus den im stumpfen Winkel zueinander verlaufenden Flut- und Ebbestromrichtungen ergibt. Am 18. Mai herrschte Nordwestwind mit 7 Bft., am 19. und 20. Mai Südwestwind um 6 Bft.

In Pos. L 7 wurden die Leitstoffe unmittelbar vor einer Sturmflut (28. Februar 1967) mit Westsüdwestwind Stärke 7 bis 8 Bft. ausgebracht. Das Meßgerät konnte erst am 1. März 1967 aufgestellt werden. Die registrierten Strömungen stehen aber noch immer unter Windeinfluß, und zwar herrschte am 1. März und 2. März Südwestwind Stärke 6 bis 8 Bft. Die Geschwindigkeitsganglinien lassen eindeutig in Windrichtung verlaufende Triftströmungen erkennen. Am 28. Februar dürften bei gleicher Stromrichtung noch höhere Stromgeschwindigkeiten aufgetreten sein. Die Luminophorenausbreitung stimmt wieder mit dem Strömungsverlauf völlig überein; das Material hat sich fast ausschließlich nach Nordosten bewegt.

Die Beispiele wie auch die hier nicht behandelten Meßergebnisse machen deutlich, daß aus sorgfältigen Strombeobachtungen durchaus Rückschlüsse auf die Richtung des vorherrschenden Sandtransportes gezogen werden können. Bemerkenswert ist das Ergebnis, daß auch bei Strömungsgeschwindigkeiten, die in der Nähe der kritischen Grenzggeschwindigkeiten oder sogar darunter liegen, Material an der Sohle transportiert wird. Das dürfte im wesentlichen Folge der über der Sohle auftretenden fluktuierenden Orbitalbewegung sein (die mit den verwendeten Meßgeräten nicht erfaßt wird). Sie erhöht die Turbulenz des Wassers und wirbelt Bodenteilchen auf, die dann auch von sehr schwachen Strömungen weitertransportiert werden können.

In Bild 4 sind die bei den bisherigen Untersuchungen gefundenen resultierenden Transportrichtungen dargestellt. Auf dem hohen Wattrücken besteht ein südlich gerichteter, vermutlich aber schwacher Transport bei normaler Gezeitenbewegung. Bei Südweststürmen wird Material mit der Triftströmung nach Nordosten, zur Elbe hin verfrachtet. Genauere Untersuchungen an Hand vorliegender Strombeobachtungen und Windstatistiken haben ergeben, daß im langjährigen Mittel der Materialversatz nach Nordosten überwiegt.

1.32 Die Schichtstärke des bewegten Sandes

Die flächenhaften Darstellungen der Luminophorenkonzentration in Bild 5 zeigen die Materialausbreitung unmittelbar an der Oberfläche an. Neben den Oberflächenproben wurden bei fast allen Versuchsserien einige Stechproben in den Zentren der erkennbaren Ausbreitung entnommen, aus denen ein Anhalt über die Eindringtiefe der Luminophoren in den Boden und damit über die Schichtdicke des bewegten Sandes gewonnen werden kann. Bild 6 zeigt in einer statistischen Darstellung, der 50 Stechproben der Meßreihen L 7 bis L 11 zugrunde liegen, die Konzentrationsabnahme mit der Tiefe unter der Wattoberfläche. Hohe Luminophorenkonzentrationen wurden im wesentlichen nur in den oberen 4 Zentimetern der untersuchten Stechproben gefunden. Unterhalb 4 cm nehmen die Konzentrationen stark ab; in 10 cm Tiefe wurden nur noch vereinzelt Leitstoffe gefunden.

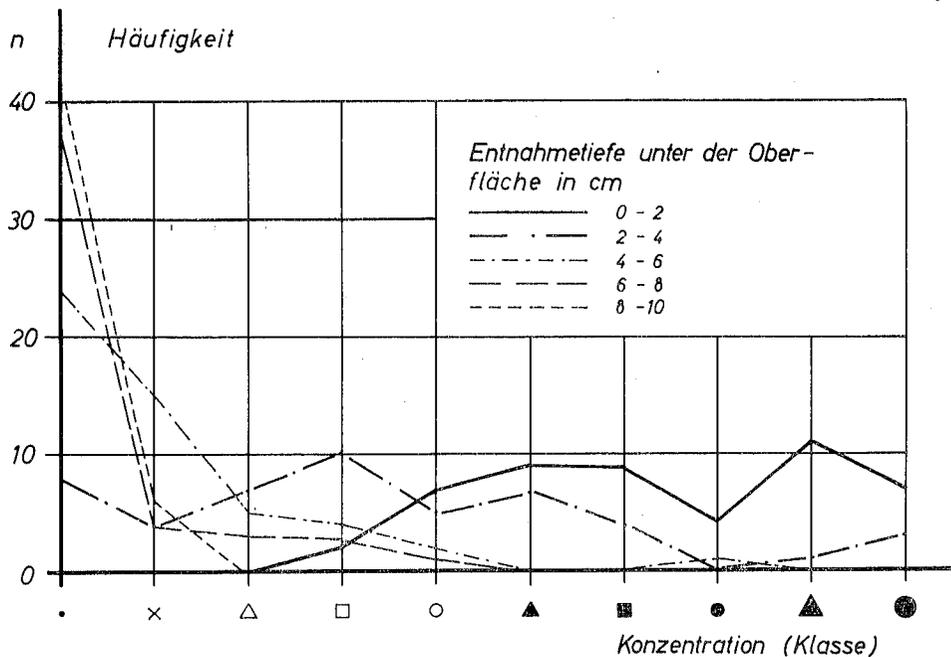


Bild 6

Abnahme der Luminophorenkonzentration mit der Tiefe unter der Wasseroberfläche (Konzentrationsklassen vgl. Bild 5)

Die Sandbewegung an der Wattsohle umfaßt also nur eine wenige Zentimeter starke Oberflächenschicht. Dieses Ergebnis deckt sich mit Beobachtungen über die Höhenabmessungen der Strömungs- und Orbitalriffel auf hohen Wattflächen.

2. Auswertung und Deutung von Sandbewegungen in Tidegewässern mit markierten Leitstoffen unter besonderer Berücksichtigung des derzeitigen Standes der quantitativen Aussagen

2.1 Verfahren und Untersuchungen zur Messung der Sandbewegung in den Küstengebieten und Flußmündungen der BRD

In der Bundesrepublik Deutschland werden im wesentlichen 2 Leitstoffverfahren in größerem Umfang angewendet. Hierzu wird der dem Gewässer an der Untersuchungsstelle entnommene Sand nach Vorbehandlung mit Wasserglas mit einem radioaktiven Isotop — im allgemeinen Cr 51 — oder mit lumineszierendem Farbstoff gekennzeichnet. Andere Leitstoffverfahren sind bei uns nur in ganz geringem Umfange angewendet worden.

Der gekennzeichnete Sand wird in Plastiksäcken, die sich im Wasser auflösen, in das Gewässer eingebracht. Dieses Verfahren stellt naturähnliche Bedingungen auf der Gewässersohle her und ist gleichzeitig am wirtschaftlichsten und einfachsten. Bei den Luminophoren wird die Ausbreitung des Sandes an der Sohle mit Hilfe von Bodenproben, die in bestimmten räumlichen Abständen entnommen werden, untersucht, indem der

Gehalt der Probe an lumineszierenden Körnern festgestellt wird. Die Ausbreitung des radioaktiven Sandes wird mit Hilfe von Szintillationszählern gemessen, welche mit Registriergeräten verbunden sind.

2.2 Ausdeutung der Meßergebnisse

Die zahlreichen Untersuchungen, die in den letzten 10 Jahren auf diesem Gebiet durchgeführt wurden, hatten das Ergebnis, daß es zur Zeit noch nicht möglich ist, exakte Angaben über die Menge des Sandes zu erhalten, der in den untersuchten Küsten- und Tidegewässern bewegt wird. Alle hierfür entwickelten Verfahren gehen von theoretischen Voraussetzungen aus, die in der Praxis zum Teil oder nicht erfüllt sind. Infolgedessen ergeben sich Fehler, welche die Ergebnisse verfälschen und recht unsicher machen.

Die bisher bekanntgewordenen Verfahren sind die folgenden:

- a) Messung der Bewegung des Schwerpunktes eines Sedimentkörpers mit radioaktiver Strahlung:

Das Verfahren geht von der Vorstellung aus, daß sich das in die Sohle eingebrachte gekennzeichnete Material unter Strömungseinfluß mit dem Sohlensediment mischt und der so entstandene Mischungskörper als Geschiebe mit der Strömung ebenso transportiert wird, wie das ihn umgebende Sohlenmaterial. Aus gemessenen Isoaktivitätskurven wird in bestimmten Zeitabständen die Größe des Mischungskörpers, die Lage seines Schwerpunktes und damit die Wandergeschwindigkeit bestimmt.

In der Praxis hat sich gezeigt, daß meist nur eine recht langsame Vermischung des eingebrachten gekennzeichneten Materials mit dem Geschiebe stattfindet. Die Messungen haben ergeben, daß das eingebrachte Material bis zu mehreren Wochen an der Einbringestelle liegen bleibt und sich meist nur sehr langsam mit dem Sohlenmaterial des Gewässers vermischt. Seegang beschleunigt, besonders wenn die Wassertiefe nicht groß ist, die Ausbreitung des Tracerstoffes.

Von erheblichem Einfluß ist das Einbringverfahren. Bei der von der BAW angewandten Methode bildet sich auf der Sohle des Gewässers ein kleiner Hümpel. Dieser bietet zwar der Strömung gute Angriffsmöglichkeiten, hält sich aber trotzdem unerwartet lange am Eingabeort, wie Strahlungsmessungen ergeben haben. Die hierbei auftretenden Strömungen in der Grenzschicht des Hümpels, die für diesen Vorgang verantwortlich gemacht werden müssen, werden noch näher untersucht werden.

Wird der Untersuchungsstoff — zum Beispiel auf Watten — so eingebracht, daß seine Oberfläche mit der umgebenden Gewässersohle gleich hoch liegt, so sind hierbei zum Teil andere Abtragungs- und Ausbreitungsvorgänge wirksam.

Man hat das Untersuchungsmaterial auch in suspendierter Form durch Schläuche oder Rohrleitungen in die Strömung dicht über der Gewässersohle eingeletet. Hierbei sind wieder völlig andere Erscheinungen für seine Ausbreitung maßgebend.

Erschwerend kommt ferner hinzu, daß bei den Messungen im Tidegebiet der Küste und der Ästuarien ein Transport nach zwei Richtungen stattfindet. Auch war ein dauernder Wechsel zwischen Geschiebetransport und Transport in Suspension zu beobachten, wobei die Sohlenform und die Strömungsverhältnisse eine maßgebende Rolle spielen.

Es ist daher nach unserer Ansicht wenig erfolgversprechend, die Wanderung des Schwerpunktes eines Strahlungskörpers in der Gewässersohle zu verfolgen, da die Ausbildung eines solchen Körpers durch Mischung mit dem eingebrachten Material von örtlichen Gegebenheiten und Zufällen abhängt und die Bestimmung der Ausmaße

dieses Körpers und seines Schwerpunktes kaum zuverlässig in den dreidimensionalen, tiefen und nur mit Schiffen zugänglichen Küstengewässern möglich ist. Ein wesentlicher Faktor ist auch die Schwierigkeit der genauen Ortsbestimmung.

- b) Ein anderes Verfahren verwendet eine begrenzte Zahl von gekennzeichneten Körnern. Die Zahl wird so bemessen, daß durch ihre Position im Augenblick der Messungen ein Zustandsbild der Bewegung gewonnen wird, daß andererseits aber zahlreiche Körner sich innerhalb einer bestimmten Zeit soweit voneinander entfernen, daß sie einzeln nachgewiesen werden können.

Diese Voraussetzungen, wie zum Beispiel der Nachweis eines einzelnen Kornes, sind nur schwer im Seegebiet zu erfüllen. Die unter a) und b) genannten Verfahren dürften ihre erfolgreiche Anwendung im wesentlichen im Oberlauf der Gewässer finden können.

- c) Ein anderes in England versuchsweise bei Kies angewendetes Verfahren besteht darin, radioaktives Material in bestimmten Zeitintervallen in gleicher Menge und mit gleicher Aktivität in das Gewässer einzubringen. Im Tidegebiet ergibt sich dann eine nach beiden Seiten vom Einbringeort abnehmende Konzentration des Indikatormaterials. Setzt man eine homogene Mischung des Tracermaterials mit dem Geschiebe der Gewässersohle voraus, so ergibt sich die theoretische Konzentrationsverteilung. Diese wird mit der nach einer bestimmten Zahl von Intervallen gemessenen Verteilung verglichen und daraus die bewegte Geschiebemenge berechnet. Das Verfahren wurde in Holland ebenso für Sand angewendet. Auch hier verursachen die tatsächlich auftretenden von der Theorie abweichenden Vorgänge wie: nicht homogene Vermischung des Indikatormaterials mit dem Sohlengeschiebe (Liegenbleiben am Ort der Einbringung), Materialverlust durch Abtransport in Suspension und seitliche Abwanderung, Einfluß vom Seegang, von Besonderheiten der Morphologie und der Strömungen so große Unterschiede, daß auch auf diesem Wege in der Praxis keine zufriedenstellenden Resultate gewonnen werden konnten.

Die BAW hat sich daher weniger darum bemüht, quantitative Angaben für die Sandwanderung zu erarbeiten und ist der Ansicht, daß die in den in Rede stehenden Seegebieten und Ästuarien vorhandenen komplexen und zeitlich stark veränderlichen Vorgänge eine solche quantitative Analyse nicht zulassen. Zweifellos wären in diesen Gebieten derartige Mengenangaben nur Augenblickswerte, die zeitlich und auch räumlich starken Schwankungen unterliegen. Mehr Bedeutung würden diese Werte bekommen, wenn sie mit anderen synchron gewonnenen Ergebnissen zu einem Übersichtsbild zusammengefaßt werden könnten. Das würde aber einen Aufwand bedeuten, der angesichts der vorher geschilderten Schwierigkeiten, zutreffende Ergebnisse zu erhalten, nicht vertretbar ist.

Die aus den Tracer-Messungen mit erträglichem Aufwand zu gewinnenden Erkenntnisse sind in erster Linie qualitativer Art. Aber auch diese Aussagen sind für den planenden Ingenieur im Wasserbau von großer Bedeutung.

Man darf dabei nicht mit zu einfachen Vorstellungen an die Beurteilung der Sandbewegung herangehen. Im unteren Tide- und Küstengebiet ist es in der Regel nicht so, daß feste Transportbeziehungen von dauerhafter Art bestehen, das heißt, daß Sand von A nach B wandert, also in A erodiert, von einer Strömung nach B transportiert und an dieser Stelle sedimentiert wird. Nach den bisherigen Erkenntnissen pendelt die Höhenlage eines Sohlenpunktes primär nur wenig um eine Gleichgewichtslage, die durch die Morphologie des Gewässerbettes und die in Wechselwirkung mit ihr geprägten Strömungen bestimmt ist. Im Rahmen dieser primären Umlagerungsvorgänge können somit im allgemeinen nur dünne Schichten und Flächen abgetragen

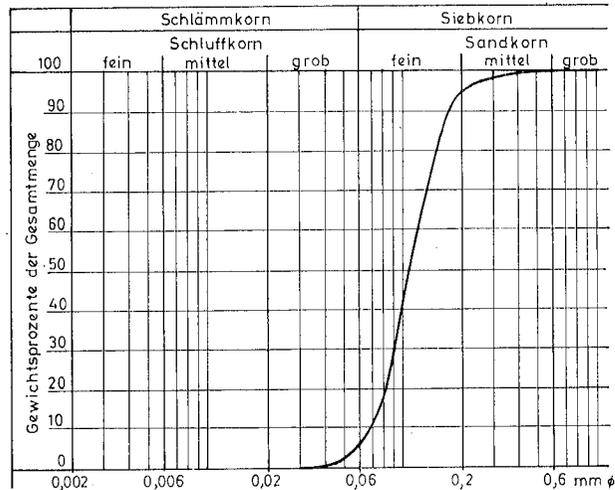
oder gebildet werden. Es kann auch sein, daß Flut- und Ebbestrom morphologisch entgegengesetzt wirken; das, was bei der einen Strömung abgelagert wird, wird von der anderen wieder mit fortgenommen. Größere Massen können i. a. nur im Rahmen von m. o. w. großräumigen Änderungen morphologischer Formen, wie Verlagerung von Strom- und Fahrrinnen, Wanderung von Platen, Strombänken und ähnliches umgelagert werden. Derartige sekundäre Massenumsetzungen dauern aber fast immer Jahre, Jahrzehnte oder gar Jahrhunderte. Infolgedessen können die morphologisch bildsamen Vorgänge der Sandbewegung, wie sie durch Messungen innerhalb einer bestimmten kurzen Zeitspanne aufgeheilt werden können, zu Fehlschlüssen führen; ihre maßgebende Wirkung kann durch kleine Besonderheiten der hydrologischen oder meteorologischen Verhältnisse während der Messung verdeckt oder gar ins Gegenteil verkehrt sein.

Das Bild der Sandwanderung wird nicht durch ein Netz von Transportbeziehungen zwischen bestimmten Sohlenpunkten dargestellt, sondern durch mit Suspensionen beladene Strömungen, deren potentielle Transportkraft und vor allem auch Mobilisationsvermögen für Sand stark schwankt, was im wesentlichen durch morphologische Einflüsse bedingt ist. Stellen mit überwiegender Erosionsneigung wechseln mit solchen, die eine ausgesprochene Sedimentationstendenz haben, ab. Im Tidegebiet der Ästuarien kommen die Wirkungen der bei Strömungsumkehr durch Null gehenden Strömungsgeschwindigkeiten hinzu. Dementsprechend sind die Einflüsse auf die Suspensionen, die mit der Strömung transportiert werden. Maßgebend für diese Erscheinungen sind im wesentlichen Turbulenzeffekte und Änderungen der Strömungsgeschwindigkeiten. Die häufig vom Ingenieur aufgeworfene Frage, wo kommt der Sand her, der sich an dieser Stelle ablagert, ist also falsch gestellt. Richtig muß man nach dem Grunde fragen, aus welchen sich an dieser oder jener Stelle Sand ablagert.

Um diese meist komplizierten Vorgänge zu erkennen, genügen Tracer-Messungen allein nicht. Sie bilden eine wertvolle Ergänzung der übrigen Untersuchungsverfahren, wie Sinkstoffmessungen, Sohlenhöhenvergleiche, petrographische Methoden usw.

Im folgenden soll an 3 Beispielen aus der Vielzahl der durchgeführten Untersuchungen gezeigt werden, wie mit Hilfe von Tracer-Messungen eine Deutung der Verteilung des eingebrachten Materials mit vorsichtigen quantitativen Schätzungen möglich ist:

Im ersten Fall handelt es sich um eine Messung in der Jade, bei der 200 kg feiner Sand in der aus Bild 7 erkennbaren Kornzusammensetzung eingebracht wurde, nachdem er mit 25 Ci Chrom 51 gekennzeichnet worden war. Der Zusammenhang zwischen den gemessenen Impulswerten und der Menge des markierten Sandes pro Flächeneinheit wurde durch Eichung in einem Modellversuch bestimmt. Es ergab sich, daß bei dem verwendeten Szintillationszähler 10 I/s einer Aktivitätsverteilung von $0,06 \mu\text{Ci Cr 51}/\text{dm}^2$ oder $6 \mu\text{Ci}/\text{m}^2$ entsprechen. Hierbei wird vorausgesetzt, daß der Sand gleichmäßig an der Oberfläche verteilt ist. Bei den als Indikator bei diesem Versuch verwendeten 25 Ci Cr 51 sind diese $\frac{1}{4\,000\,000}$ der Gesamtmenge oder entsprechend $0,05 \text{ g}/\text{m}^2$ der ausgebrachten Menge von 200 kg. Wegen der wechselnden Nullaktivität des Gewässergrundes liegt die Nachweisgrenze bei 20 I/s entsprechend $5 \cdot 10^{-7}$ der eingebrachten Sandmenge. Bei länger dauernden Messungen ist die Halbwertszeit des Cr 51 zu berücksichtigen. Die Halbwertsdicke beträgt bei Sand 3,5 cm. Die auf Bild 8 dargestellten Versuchsergebnisse zeigen, wie sich das Material vom Eingabepunkt E im Untersuchungsgebiet, und zwar in der Jaderinne, verteilt hat.



Ungleichkörnigkeitsgrad $d_{60} : d_{10}$
des Untersuchungsmaterials

$$U = 0,12 : 0,07$$

$$U = \underline{1,7}$$

Bild 7

Kornzusammensetzung des beim Versuch in der Jade verwendeten Sandes

Das zweite Beispiel gibt die Ergebnisse einer Messung unter Verwendung von Lumino-phoren wieder:

Beim Bau eines Hafens am rechten Ufer des Elbästuars bei Brunsbüttelkoog, Bild 9, wurde nicht tragfähiger Boden in einer Mächtigkeit von rd. 10 m mit Naßbaggern unter Wasser ausgehoben und die so entstandene Grube mit mehreren Millionen Kubikmetern Inhalt mit Sand verfüllt. Dieser Sand wurde mittels Klappschuten eingebracht und fiel etwa 10 bis 20 m frei durch das Wasser der Elbe. Es bestand die Befürchtung, daß ein Teil dieses Sandes durch die Ebbströmung in die Vorhäfen der Schleusen von Brunsbüttelkoog gelangte, welche rd. 2 km unterhalb der Baustelle aus der Elbe abzweigen. Zur Untersuchung dieser Frage wurden 2 000 kg vorbehandelter Sand mit dem lumineszierenden Farbstoff Lumogen grün gekennzeichnet und an der Klapstelle in wasserlöslichen Plastiksäcken eingebracht. Zugleich wurden 200 kg mit radioaktivem Cr 51 gekennzeichneten Sandes verklappt. Dieses radioaktive Material hatte die Aufgabe, schnell die erste Wanderrichtung des eingebrachten Materials anzugeben. Dadurch konnte der Umfang der Probenentnahme mit Bodengreifern für die Lumino-phorenuntersuchung gesteuert und verringert werden. Ohne diese erste Aussage hätte ein engmaschiges Raster von Probenentnahmestellen über einen möglichen Sandtransportbereich gelegt werden müssen. Das radioaktive Material hatte somit die Aufgabe eines „Pfadfinders“. Es zeigte sich schon ziemlich bald, daß der Sand mit der Elbströmung elbabwärts in Richtung auf die Vorhäfen des Nord-Ostsee-Kanals wanderte. Aus der Isotopenmessung während der folgenden Zeit geht weiter hervor, daß wahrscheinlich die Hauptmasse des eingebrachten Sandes in einem geschlossenen Feld langsam die Elbe abwärts wandert. In den Vorhäfen kam es zu keinen nachweisbaren Ansammlungen radioaktiv gekennzeichneten Sandes.

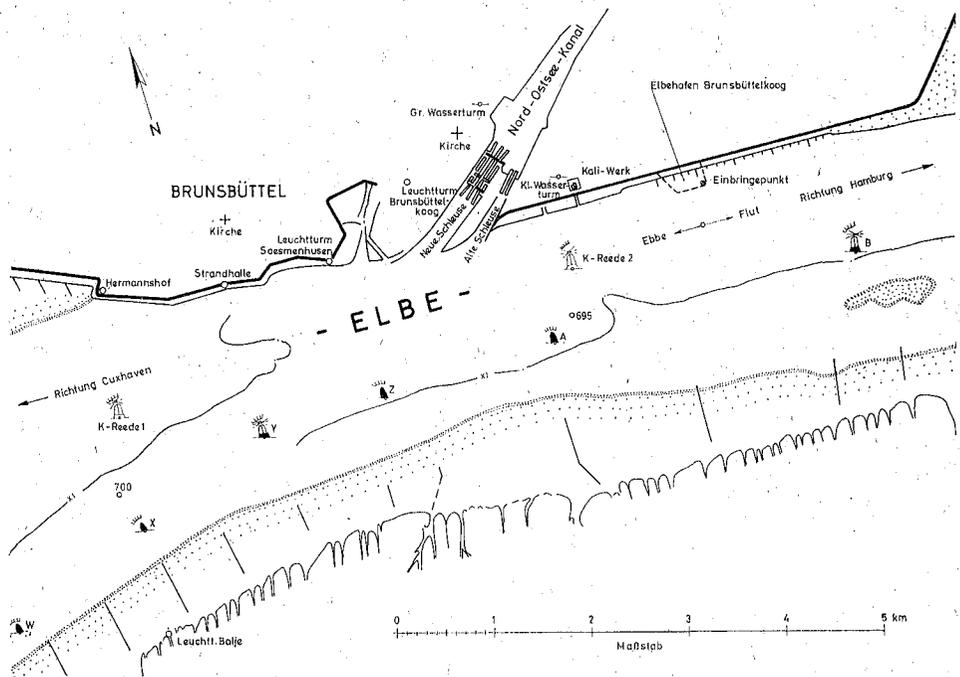


Bild 9
Lageplan der Elbe im Bereich des Elbehafens Brunsbüttelkoog
und der Einfahrten zum Nord-Ostsee-Kanal (Kiel-Kanal)

Die mit einem van Veen'schen Greifer von 1 m² Fläche entnommenen Bodenproben aus den Vorhäfen zeigten folgenden Gehalt an grün lumineszierenden Körnern:

	1. Entnahme	2. Entnahme	3. Entnahme	Gesamt-entnahme
Zahl der grünen Luminophoren auf eine entnommene Probe	7,1	2,5	0,7	3,4

Die Luminophoren-Untersuchungen gestatten folgende Feststellungen und Abschätzungen:

- Die Größe der bei der 1. Entnahme festgestellten Luminophorenzahlen ist trotz der für die Luminophorenmessung relativ hohen Fundzahlen pro Probe so gering, daß hiernach ein größerer Sandtransport mit anschließender Sedimentation in den beiden Vorhäfen nicht stattgefunden haben kann. Nimmt man auf Grund der Meßergebnisse eine Zahl von max. 10 Luminophorenkörnern je Probe oder je dm² des Vorhafens an, so ergibt sich bei einer Fläche der Vorhäfen von rd. 220 000 m² und der Annahme gleichmäßiger Verteilung eine Gesamtzahl von 22.10⁷ Körnern; mit dem spez. Gewicht von 2,65 g/cm³ und einem Korninhalt von 1.10⁻⁶cm³ beträgt das Gesamtgewicht der eingewanderten Kornmenge

$$22.10^7 \cdot 2,65 \cdot 10^{-6} \text{ g} = 585 \text{ g}$$

das sind rd. $\frac{1}{3400}$ der eingebrachten Menge, wobei der Rechnung ziemlich ungünstige Annahmen zugrunde liegen.

2. Ferner müßte, wenn man die durch die Isotopenmessung festgestellte Transportzeit und den Transportweg zugrunde legt, in einem gewissen Zeitpunkt nach diesen 28 Tagen eine außerordentliche Anhäufung von Luminophoren in den Vorhäfen auftreten. Dies ist nicht der Fall.

Aus dem vorher Gesagten ist, soweit aus Messungen mit Isotopen und Luminophoren zur Zeit überhaupt möglich ist, zu folgern, daß ein Sandtransport von der Sandverklappungsstelle im Bereich des Elbehafens zu den beiden Schleusenvorhäfen nur in außerordentlich geringem Maße stattgefunden hat.

Zur Beurteilung des Sinkstoffeintriebes in die Vorhäfen ist auch der Sandwanderungsmechanismus in Abhängigkeit von den Strömungsverhältnissen zu betrachten. Demnach wäre bei Ebbstrom die Bewegung von Sand in die Vorhäfen hinein kaum möglich, wenn nicht in dieser Richtung wirkende Dichteströmungen auftreten würden. Da in der Zeit nach Thw die Dichte des Elbwassers größer als die des Vorhafenwassers ist, ist von der Kenterung auf Ebbstrom (etwa 50 Minuten nach Thw) bis etwa 4 Stunden nach Thw — das heißt für die Dauer von rd. 3 Stunden — an der Sohle ein in den Hafen hinein gerichteter Transport vorhanden. Aber nur in dieser Zeit kann damit gerechnet werden, daß Sand eintreibt. Während der übrigen Tidephase kann kaum Sinkstoff, der von oberhalb kommt, in die Vorhäfen gelangen.

Ferner muß darauf hingewiesen werden, daß die in großer Menge in die Schleusenvorhäfen eindringenden Sinkstoffe wesentlich feiner sind als der beim Bau des Flußhafens verklappte Sand. Hieraus geht hervor, daß die bewegenden Strömungen im allgemeinen nicht kräftig genug sein dürften, diesen Sand in größeren Mengen in die Vorhäfen zu befördern. Aus diesen Ausführungen ist zu folgern, daß in örtlich begrenzten Gebieten das verwendete Tracerverfahren zusammen mit anderen Beobachtungen und Überlegungen gewisse quantitative Aussagen gestattet.

Eine weitere Möglichkeit zu einer ähnlichen Deutung hat sich bei Untersuchungen in der Stör (Nebenfluß der Elbe) ergeben. Hier wurde in einem Tidefluß eine kombinierte Luminophoren-Isotopen-Untersuchung angesetzt. Der Oberlauf und die Einläufe von Nebengewässern wurden mit Luminophoren-Material markiert, wobei jeder mögliche Einlauf und damit mögliche Materialtransport mit einer unterschiedlichen Farbe markiert wurden. In der Mündung der Stör in die Elbe wurde sowohl Isotopen-Material wie auch Luminophoren-Material eingegeben. Die Markierung mit radioaktiven Isotopen hatte hier die Rolle des „Pfadfinders“ zu übernehmen.

Die Ergebnisse zeigten, daß im Hauptversandungsbereich in der Stör zwischen Itzehoe und Kellinghusen überwiegend Material aus dem Oberlauf der Stör und aus dem Lauf der Brahmau (Nebenfluß der Stör) abgelagert wurde. Durch entsprechende statistische Auswertung konnte festgestellt werden, daß der Oberlauf der Stör 75 % und der Lauf der Brahmau 25 % des im Hauptversandungsgebiet abgelagerten Materials liefert. Aus diesem Hauptversandungsgebiet liegen sehr genaue Baggerergebnisse vor. Aus den Prozentzahlen und den Baggermengen konnte so ein relativ gutes Bild über den quantitativen Sandtransport in der Stör gewonnen werden.

Voraussetzungen für eine derartige Auswertung sind ausreichende Aufzeichnungen über die Baggermassen und der Einsatz von mehreren Farben zur Kennzeichnung der möglichen Liefergebiete.

Die oben genannten Beispiele zeigen, daß die quantitative Ausdeutung noch in den Anfängen steckt und ihre Ergebnisse zur Zeit mehr als Schätzungen anzusehen sind. Die Untersuchungen haben aber auch gezeigt, daß Möglichkeiten zur Verbesserung der Methodik bestehen, die später eine bessere quantitative Aussage möglich machen werden.

3. Untersuchung über die Entwicklung des Bodenreliefs in Ästuarien mit sandigem Untergrund mit Hilfe von morphologischen Methoden

3.1 Zur Frage der Herkunft und der Bewegung des Sandes in der südlichen Nordsee

Der Mechanismus der im engeren Bereich der Ästuarien vor sich gehenden Umlagerungen ist besser verständlich, wenn man über die Sandbewegung küstenferner Gebiete schlechthin von der südlichen Nordsee, Kenntnis erlangen kann. Die Frage nach der Herkunft der Sandmassen ist mit diesem Problem eng verknüpft.

Auf das vorhandene Material der Untersuchungsergebnisse der geographischen, geologischen und hydrologischen Forschung gestützt, hat der Verfasser versucht, eine skizzenhafte Darstellung über die Herkunft und die Bewegung des Sandes zu geben.

Natürlich ist das vorgetragene Schema nicht vollständig, wie das vorhandene Material ebenfalls unvollständig ist.

Die vergleichende Betrachtung der morphologischen, sedimentologischen und hydrodynamischen Verhältnisse läßt die Folgerungen zu, bestimmte Räume — für eine längere Zeit gesehen — als Ursprungsgebiete des bewegten Sandes anzusehen. Die vermutlichen Ausgangsräume des Sandes sind zu suchen:

1. In der westlichen Hälfte der südlichen Nordsee entlang der ostenglischen Küste bis zum Ausgang des Kanals.
2. In den Hoofden, dem Gebiet der ständig sich neu bildenden Sanddünen.
3. In dem Material der Moränen, die sich vor den ostfriesischen Inseln (Borkum-Riffgrund, Langeoog) und in einer breiten Zone vor der dänischen und schleswig-holsteinischen Küste hinziehen (Horns Riff, Steingrund, Sylter-Außenzone).
4. In der Doggerbank.
5. Im engeren Bereich der Ästuarien, wo in den tieferen Tidestromrinnen und Gatts prämarine Gesteine angeschnitten werden und deren Material dem allgemeinen Transport zugeführt wird. Ferner aus dem Abbruch der Wattkanten und aus Neubildung von Schlick.
6. Aus dem Abbruch der ostenglischen und französischen Küsten.
7. Einen unbedeutenden Teil des bewegten Materials macht die zusätzliche Sedimentanlieferung durch die Flüsse selbst aus.

Zur Klärung der Bewegungsrichtungen wurden unter den verschiedenen Faktoren die Strömungsgeschwindigkeiten und die Korngrößen, die den stärksten Einfluß auf den Materialtransport haben sowie die submarinen Sanddünen, die eine der Hauptform der Sandbewegung darstellen, herangezogen. Die Richtung des stärksten Tidestromes bzw. des Reststromes, insbesondere am Boden, die Korngrößenverteilung und die Ausbildung der submarinen Sanddünen vermitteln ein ungefähres Bild der Sandbewegung.

Die Verhältnisse im Westen der Nordsee zeichnen sich aus, durch den außerordentlich starken Profilwechsel der Sanddünen, durch die häufige Richtungsänderung des resultierenden Stroms und durch den Wechsel der Bodenbeschaffenheit. Von Ost-England fließt ein schwacher Strom nach Norden bis Flamborough Head, wo er auf einen aus Norden kommenden trifft. Ausgeprägt scheint die Bewegung in Richtung Themsemündung zu sein, vermutlich wird der größte Teil des Sandes der Bänke der Themse-Mündung zugeführt. Der Rest bewegt sich auf die Straße von Dover zu, aber da seine Richtung von nordwärts gerichteten Strömungen umgekehrt wird, gelangt der Sand zu den submarinen Sandfeldern vor der holländischen Küste. Örtlich treten Sandbewegungen auf, die entgegengesetzt verlaufen (Bild 10).

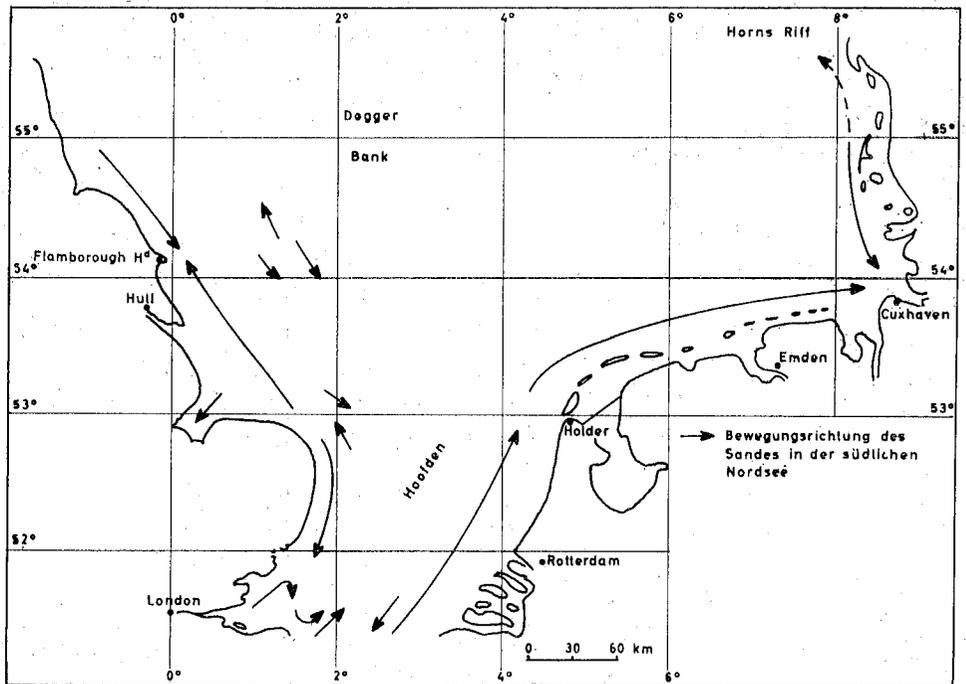


Bild 10

Der Sandstrom verläuft weiter parallel zu den ostfriesischen Inseln und bewirkt in der inneren Deutschen Bucht eine Verlandung. Nördlich der Elbe scheint ein nord-süd gerichteter Sedimenttransport zu bestehen. Das Elbe-Eider-Gebiet kann als Endraum eines komplizierten Materialumlagerungsvorganges aufgefaßt werden.

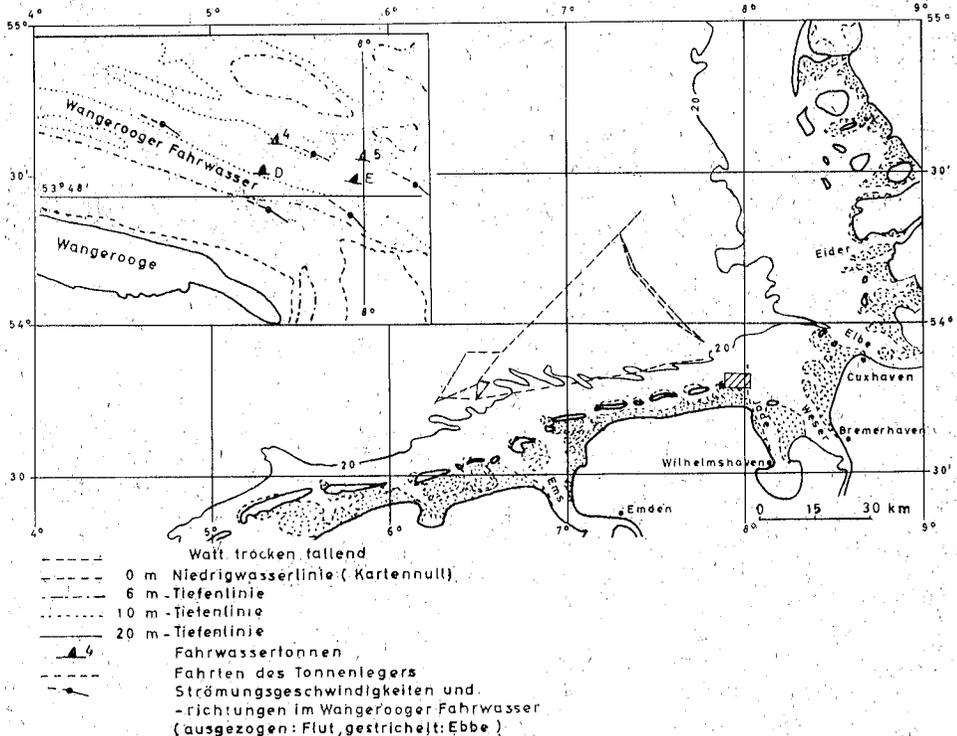
3.2 Sandbewegung in Ästuarien, Ergebnisse ausgewählter Untersuchungen

3.2.1 Echogramme von Tonnenlegern

Der Sandtransport kann in küstenferneren Gebieten mangels großräumiger Einsätze von modernen Methoden (Leitstoffe), die sich als zu kostspielig erweisen, durch die Verfolgung morphologischer Formen, insbesondere durch die Ausbildung von Rippeln und submarinen Sanddünen erkannt werden. Diese strömungsorientierten Formen erscheinen in den Echogrammen in sehr charakteristischer Weise und bieten eine Möglichkeit aus ihrem Erscheinungsbild Schlüsse auf die Bewegungstendenz des Sandes zu ziehen.

Man hat die Echogramme von Tonnenlegern, die sie bei ihren Ablösungs- und Inspektionsfahrten aufnahmen, auf ihre Verwendung hinsichtlich der Sandbewegung geprüft. Über die Abbildungen von Meeresbodenprofilen durch Echolotanlagen und die Verbesserung der Auswertbarkeit der Echogramme wurde in zahlreichen Veröffentlichungen geschrieben. Nach dem heutigen Stand der Meßtechnik können bei ruhiger Wetterlage (Seegang 1) Erhebungen von 30—50 cm als sicher erkannt werden. Hier sei nur auf den Einfluß des Seeganges hingewiesen. Bei mittleren Windgeschwindigkeiten (Stärke 5—6 Beaufort) wird das Bodenprofil derart unkenntlich wiedergegeben, daß nicht einmal größere Bodenformen mit Sicherheit erkannt werden können.

Die Echogramme von Tonnenlegern zeigen, daß bei normalen Inspektions- und Ablösungsfahrten zum Erkennen der Großrippeln und submarinen Sanddünen oder analoger Formen brauchbare Aufzeichnungen gemacht werden können. Die ausgewerteten Aufnahmen stammen aus dem Jade-Ems-Weg, aus jenem Bereich, in dem innerhalb des west-östlichen Sandstromes noch Sandversatz zu vermuten ist. In diesem Gebiet erstrecken sich mehrere langgezogene Zungen von der 20-m-Linie umrissen nach WNW, einige auffallend schmale Gebilde vor den Inseln Langeoog und Wangerooge setzen sich auch unterhalb der 20-m-Linie fort (Bild 11). Die Entstehung dieser Formen hängt, schon wegen ihrer Dimensionen, die in keiner Relation zu den herrschenden Strömungsverhältnissen stehen, offensichtlich nicht mit der Sandbewegung im größeren Raum zusammen, vielmehr handelt es sich um einstige marin überarbeitete Moränenrücken mit sehr flachen Böschungen. Auf den Echogrammen fehlt das typische Bild der submarinen Sanddünen, wie sie vor der holländischen Küste oder in den Mündungsbuchten der großen Flüsse beobachtet werden. Dagegen werden andere Formen abgebildet. Der sich weit erstreckende sanftgewellte Meeresboden wird von Rippeln (Bild 12, 13) von der Größenordnung bedeckt, die für Großrippeln gehalten werden können (H. E. Reineck versteht darunter Formen, die einen Talabstand von 10—30 m und eine Höhe von 0,2—0,6 m haben). Vereinzelt lassen sich walfischrückenartige bucklige Sanddünen (Bild 12) (Talabstand 300—600 m, Höhe 1 m) mit leeseitigen Steilkanten feststellen. Sie haben auffallend viel Ähnlichkeit mit den Bänken, die bei den Modellversuchen entstehen. In der Natur wurden sie auch beobachtet. In den Senken zwischen den Boden-



Übersichtskarte der deutschen Bucht

Bild 11

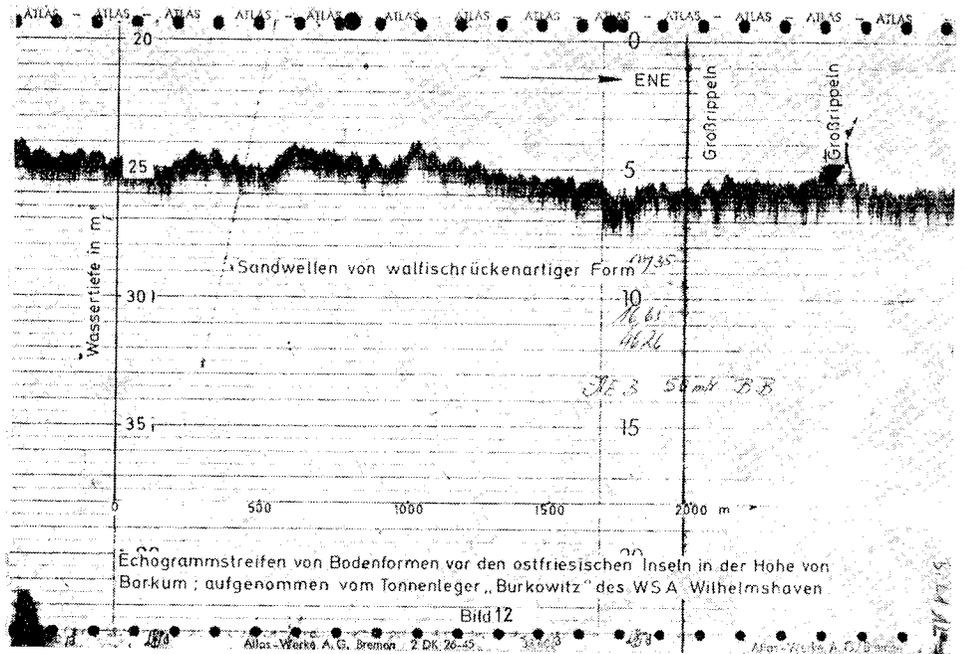


Bild 12

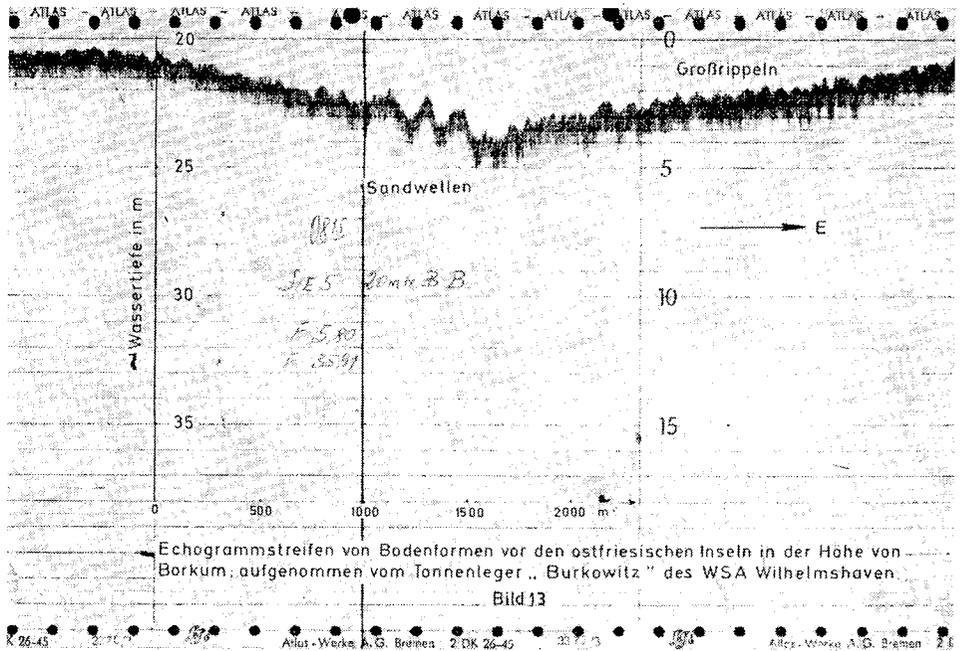


Bild 13

wellen auftretende Formen (Bild 13) erinnern in der Echographenabbildung eher an die submarinen Sanddünen (Talabstand 100—300 m, Höhe 1—1,5 m). Wohl gehören der Größe nach die beiden Vollformen zu den submarinen Sanddünen; doch die äußerst geringen Böschungen und niedrigen Höhen stellen eine Formvariante dar, für die eher die Bezeichnung submarine Sandwelle zutrifft.

Die submarinen Sandwellen bewegen sich nach Osten, Süden und Westen, wobei die östliche Komponente überwiegt.

Die häufige Grundform der Sandbewegung scheint die Großrippel zu sein, deren Entstehung den kleineren Strömungsgeschwindigkeiten und größeren Wassertiefe zuzuschreiben ist, die hier nicht zur Bildung von submarinen Sanddünen ausreichen. Der Aussagewert der dargestellten Echogramme ist noch nicht sehr groß; er läßt sich aber durch sehr genaue Ortung, Durchführung der Lotungen bei ruhiger Wetterlage und zuverlässiger „Beschickung“ auf den wahren Wasserstand verbessern.

Die Klärung des Wandels des Formenschatzes dieses Meeresbereiches erfordert daher noch weitere Untersuchungen.

3.22 Veränderung des Bodenreliefs in dem Wangerooger Fahrwasser

Zur Überwachung der Fahrwassertiefen werden von dem Wasser- und Schiffsamt Wilhelmshaven in einem Jahr wiederholt mehrere Peilungen im Fahrwasser durchgeführt. Die Abstände der Peilungen betragen 30—50 m parallel zum Fahrwasserrand und etwa 200 m quer dazu. Die Tiefenangaben sind auf mittleres Springtideniedrigwasser (MSP_{Tnw}) des Pegels Mellum-Plate bezogen für das Untersuchungsgebiet. Die Genauigkeit von Echolotungen kann allgemein mit ± 20 cm angegeben werden.

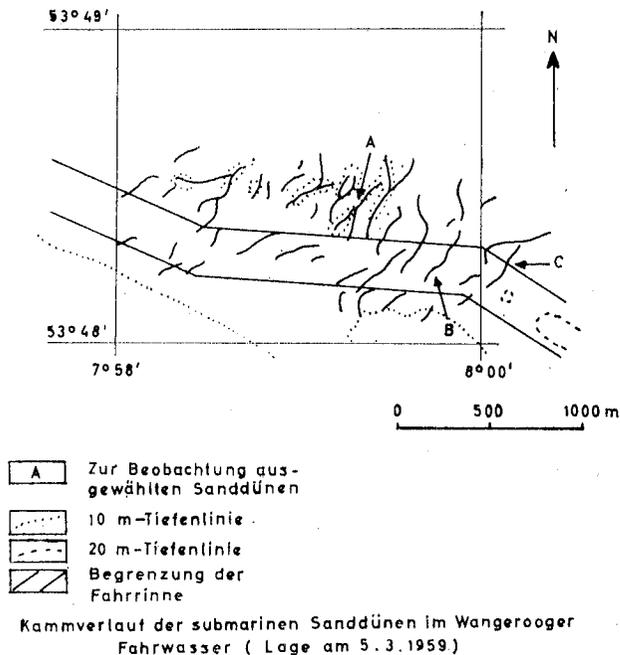


Bild 14

Auf diese Weise können nicht nur relativ kurzperiodische Formänderungen erfaßt werden, sondern sind auch bessere Möglichkeiten zu genauer Erklärung der Bewegungsvorgänge gegeben.

In dem Untersuchungsgebiet, das die Schiffahrtsrinne und nähere Umgebung umfaßt, beherrschen die submarinen Sanddünen in 10 bis 20 m Wassertiefe das morphologische Bild. Den flach nach Süden ansteigenden Südrand bedecken kleinere Formen, die Großrippeln. Die stark asymmetrischen submarinen Sanddünen besitzen keine durchgehende Anordnung (Bild 14). Sie sind unregelmäßig zerlappend ausgebildet, gelegentlich von tiefen Quervertiefungen getrennt. Allgemein liegen sie quer zu den Hauptströmen. Bei einer Durchschnittshöhe von 3—6 m und einen Talabstand von 100—200 m weisen die Steilhänge nach westlichen Richtungen. Weitere Daten sind aus der Tabelle 1 zu entnehmen:

Tabelle 1

L (Talabstand) m	H (Höhe) m	Index L : H
180	5,2	34,6
160	4,2	38,1
100	2,8	35,8
100	2,2	44,5
70	5,2	13,5
120	4,5	26,6
80	3,8	21,0
160	5,9	27,2
100	3,4	29,4
150	6,5	23,0
120	5,3	22,8
120	2,5	48,1
80	5,2	15,4
70	2,7	26,0
100	3,7	27,0
80	2,9	27,6
100	2,7	37,0

Im nördlichen Bereich des Untersuchungsgebietes weist der Ebbstrom die größten Geschwindigkeiten auf, wogegen im südlichen Teil die Flutstromgeschwindigkeiten überwiegen.

Nach neueren Untersuchungen wissen wir, daß im Wangerooger Fahrwasser das submarine Dünenfeld sich infolge des überwiegenden Ebbstroms (Bild 11) nach Westen (WNW) bewegt. Im Südrand der Rinne werden flutwärts gerichtete Tendenzen sichtbar, deren Erkenntnis allerdings nur auf Strömungsmessungen beruht.

Auf Grund der vorliegenden Unterlagen vorgenommene analytische Betrachtung der einzelnen Gruppen der submarinen Sanddünen hat zu folgenden Ergebnissen über ihre Formänderung geführt.

Die Bewegungen der einzelnen submarinen Sanddünen erfolgte zeitlich nicht auf den gleichen Wegstrecken. Die Verlagerungsgeschwindigkeit ist am Nordrand bzw. in der nördlichen Umgebung der Rinne um die Tonne 5 die größte (Bild 15); sie nimmt nach Westen ständig unter Umwandlung der parabelförmigen Düne in eine Düne mit geradem Kamm ab. Ob diese Form mit den in diesem Bereich (Tonne 5) auftretenden hohen

Strömungsgeschwindigkeiten ursächlich zusammenhängt, kann gegenwärtig noch nicht geklärt werden. Jedenfalls handelt es sich hier um einen kontinuierlichen Formenwandel der Sohle.

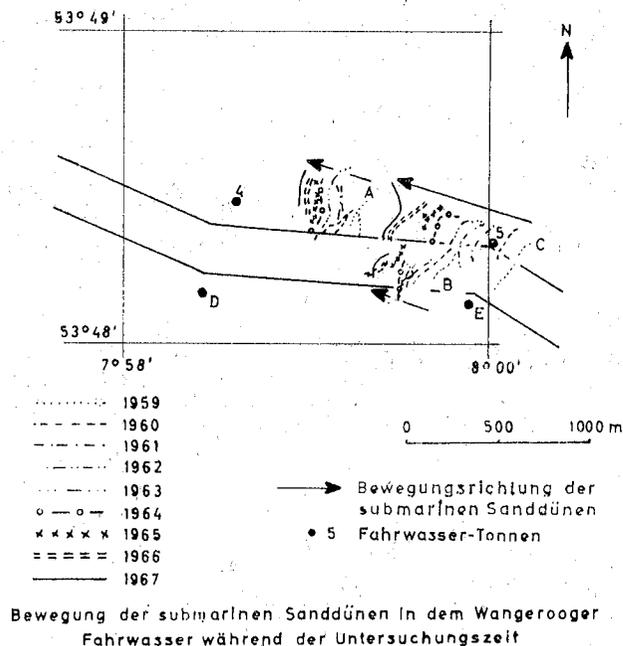


Bild 15

Schließlich kommt die Westwärtsbewegung über die Tonne 4 hinaus zum Stehen. Der zurückgelegte Weg beträgt für die Sanddüne C 770 m innerhalb der Untersuchungszeit und 370 m für Sanddüne A.

Der ins Fahrwasser weit hineinragende Teil der submarinen Sanddüne bleibt bei der Wanderung zurück bis er schließlich von dem Hauptkamm endgültig abgetrennt wird. Dieser Rest bildet dann mit der nachfolgend am Nordrand voreilenden Sanddüne eine neue bis zum südlichen Rand durchgehende Form. In der Mitte der Fahrrinne machen die Wanderwege (Sanddüne B) während der Untersuchungszeit nicht mehr als 350—400 m aus (Bild 15). Offensichtlich nimmt die maximale Flutstromgeschwindigkeit zum Südrand hin bereits so stark zu, daß sie die Großformen bei ihrer Westwärtsbewegung entscheidend beeinflusst.

Das kennzeichnende morphologische Bild ist die starke Vergabelung der submarinen Sanddünen.

Am Südrand der Rinne zeichnen sich die Grenzen zwischen den beiden Hauptbewegungen nicht mehr so klar ab, sie sind ständigen Änderungen unterworfen. Wo in einem Jahr eine in einer Ebbströmung gerichtete Tendenz erkennbar war, vermag später die flutwärts gerichtete zu dominieren. Dieser Umstand läßt sich ebenfalls an dem häufig wechselnden Formenwandel (Dünen mit symmetrischen und asymmetrischen Hängen, Parabelform, sehr kurzen ellipsen- bis kreisförmigen Gebilden) beobachten. Auf dem ansteigenden Südrand der Fahrrinne werden die submarinen Sanddünen zunehmend flacher und im niedrigeren Wasser (über — 10 m) werden sie von den Großrippeln abgelöst. Die Verschiebung jadowärts tritt häufiger in Erscheinung.

Aus der Zahl der neueren Untersuchungen und aus den bisherigen Darlegungen ergibt sich mit zunehmender Deutlichkeit, daß in diesem Bereich des Wangeroooger Fahrwassers die Sandmassen die Fahrrinne nicht überqueren.

Die submarinen Sanddünen sind ihrer Natur nach verhältnismäßig stabil. Die umfangreichen Baggerarbeiten können sie weder bei ihrer Wanderung noch bei ihrer Entstehung hindern, höchstens modifizieren.

Die verhältnismäßig geringe Verlagerungsgeschwindigkeit der submarinen Sanddünen, ihre zum Teil ständige Richtungsänderung spricht für die Hypothesen, die mit einer starken Hin- und Herbewegung der Sandmassen rechnen. Damit müßte nach theoretischen Überlegungen der größte Teil der aufgebrachten Energie für Sandumlagerungen verbraucht werden.

4. Bodenbewegung durch Seegang und Strömungen

4.1 Allgemeines

Erläuterung der verwendeten Zeichen:

Zeichen	Bedeutung	Dimension
α	Horizontale Amplitude der Wellenbewegung an der Oberfläche der Grenzschicht [vgl. Gleich. (5)]	m
β	Parameter ($= \sqrt{\omega/2\nu}$)	m^{-1}
d	Wassertiefe unter dem Ruhewasserspiegel	m
D	Korndurchmesser des Sandes	10^{-3} m
e	natürliche Zahl ($= 2,718 \dots$)	—
ε	Rauhigkeitslänge ($= \approx D$)	10^{-3} m
E [y]	Erwartungswert von y (statistischer Mittelwert)	wie y
η	Entfernung der Wasseroberfläche von der Ruhelage	m
g	Erdbeschleunigung	ms^{-2}
g*	Gramm — Gewicht (Gewichtseinheit)	g*
γ_f	spezifisches Gewicht des Wassers ($= \rho_f \cdot g$)	$Mp \cdot m^{-3}$
γ_s	spezifisches Gewicht des Sandkorns ($= \rho_s \cdot g$)	$Mp \cdot m^{-3}$
H	Wellenhöhe	m
L	Wellenlänge	m
m	Integrationsvariable	—
ν	kinematische Zähigkeit des Wassers	$m^2 \cdot s^{-1}$
ω	Kreisfrequenz ($= \frac{2\pi}{T}$)	s^{-1}
π	natürliche Zahl ($= 3,1415 \dots$)	—
ρ_f	Dichte des Wassers	$Mp \cdot m^{-4} \cdot s^2$
ρ_s	Dichte des Sandkorns	$Mp \cdot m^{-4} \cdot s^2$
S_0	pro m^2 Meeressohle mobilisierte Sandmenge	g^*m^{-2}
$S\eta\eta(\omega)$	spektrale Dichte des Seegangs	$m^2 \cdot s$
$Su_a u_a(\omega)$	spektrale Dichte von u_a	$m^2 \cdot s^{-1}$
Sinh (x)	hyperbolischer Sinus von x ($= 0,5 (e^x - e^{-x})$)	—
T	Wellenperiode	s
t	Zeitvariable	s

Zeichen	Bedeutung	Dimension
[TF]	Transfer-Funktion	—
u^*	Scherströmungsgeschwindigkeit in der Grenzschicht	$m \cdot s^{-1}$
u^*_a	Amplitude von u^*	$m \cdot s^{-1}$
u_a	= Wert von u^*_a für $z = 0,35 D$	$m \cdot s^{-1}$
v_q	mittlere Geschwindigkeit der mobilisierten Sandkörner	$m \cdot s^{-1}$
v	Transportgeschwindigkeit	$m \cdot s^{-1}$
x	horizontale Koordinate	m
z	Vertikale Koordinate ($z = 0$ an der Sohle)	m
Φ, Ψ	Rechenhilfsgrößen (Variable)	—

Die in der Literatur veröffentlichten Untersuchungen über den Einfluß der Wellentätigkeit auf den Sandtransport sind nicht sehr zahlreich. Bei weitem beschränken sich die meisten Untersuchungen dieser Art außerdem auf eine Betrachtung des Sandtransports in den strandnahen Zonen, d. h. also im Flachwasser- und Übergangsbereich.

Wie G. E. Vincent gezeigt hat, erzeugen die fortschreitenden Wellen auch im Tiefwasser ($d > L/2$) in ihrer Fortschrittsrichtung eine Transportströmung, die in Sohlennähe deutlich turbulent ist. Auf diese Weise verursachen die fortschreitenden Wellen im Tiefwasser durch direkte Mitnahme von Sand vermittels dieser Transportströmung unter Umständen einen gewissen Sandtransport, der hier als unmittelbar bezeichnet werden soll. Wesentlich intensiver dürfte jedoch zum Beispiel im ausgesprochenen Tiefwasser der Nordsee der von den Wellen nicht unmittelbar hervorgerufene Sandtransport sein. Dieser kommt dadurch zustande, daß Wellen von ausreichender Höhe und Länge im Tiefwasser in der „Grenzschicht“ an der Sohle sogenannte „Scherströmungen“ erzeugen. Diese Scherströmungen lösen Sandmengen aus der Sohle und halten sie in Schwebelage.

Die auf diese Weise von den Wellen „mobilisierten“ Sandmengen sind bei genügend großen Wellenabmessungen sehr beträchtlich. Von der mit den fortschreitenden Wellen direkt verbundenen relativ schwachen¹⁾ und nur intermittierend wirkenden Transportströmung (siehe oben) können sie daher im „Tiefwasser“ meistens nur in sehr geringem Umfang transportiert werden. Zu ihrer Weiterbewegung ist eine zusätzliche, hinreichend starke Transportströmung erforderlich. Als zusätzliche Transportströmungen kommen in der Nordsee in erster Linie Gezeitenströmungen und Driftströme in Betracht. Ihnen gegenüber dürften hier die Dichteströmungen und thermischen Strömungen nur eine relativ geringe Rolle spielen.

Da die Fortschrittsrichtung der Wellen im allgemeinen nicht mit der Richtung des Gezeitenstromes übereinstimmt, findet neben dem maßgeblichen Transport in Richtung des Gezeitenstroms noch ein sehr viel schwächerer Sekundärtransport in der von der Windrichtung abhängigen Fortschrittsrichtung der Wellen statt. (In der südlichen Nordsee werden beide Transportrichtungen häufig angenähert zusammenfallen).

Wo die Transportströmung so stark ist, daß von ihr die gesamten durch den Seegang mobilisierten Sandmengen abtransportiert werden können, geben diese ein relatives Maß

¹⁾ G. Vincent gibt den maximalen Wert von v an der Oberfläche der Grenzschicht mit

$$v_{\max} = \frac{1,376 T}{L} \cdot \left(\frac{\pi \cdot H}{T} \right)^2 \cdot \frac{1}{\text{Sinh}^2 \left(\frac{2 \pi d}{L} \right)} \text{ an.}$$

Für $H = 2 \text{ m}$, $L = 40 \text{ m}$, $d = 20 \text{ m}$ ($T = \sim 5,2 \text{ sek}$) findet man $v_{\max} = 0,021 \text{ ms}^{-1}$.

für die Stärke des Sandtransports. Da die Gezeitenströme in der Nordsee sehr ausgeprägt sind, dürfte in deren Bereich die pro Zeiteinheit vom Seegang mobilisierte Sandmenge zumindest für längere Zeitabschnitte der Tide ein brauchbares relatives Maß für die dort herrschende Intensität des Sandtransports liefern.

Um einen Anhalt für die Stärke des Sandtransports im Bereich der Gezeitenströme der Nordsee zu bekommen, ist ein Verfahren entwickelt worden, das erlaubt, sowohl die von einheitlichen Dünungswellen als auch die von der spektralen Windsee im Tiefwasser „mobilisierten“ Sandmengen quantitativ zu ermitteln.

4.2 Im Tiefwasser mobilisierte Sandmengen

4.2.1 Durch einheitliche Dünungswellen im Tiefwasser mobilisierte Sandmenge

Durch Verbindung der von H. A. Einstein experimentell mittels der harmonisch oszillierenden Sandsohle erzeugten Scherströmungsverteilung mit der klassischen Wellentheorie und durch Anwendung des Relativitätsprinzips auf die Flüssigkeitsmechanik kann die durch einheitliche Wellen von der Höhe H und Länge L in der Grenzschicht an der Sohle erzeugte Scherströmungsverteilung durch die Gleichung:

$$(1) \quad u^* = \frac{\pi \cdot H}{T \cdot \text{Sinh} \left(\frac{2 \pi d}{L} \right)} \cdot \sqrt{1 + 0,25 e^{-2 \frac{133 z}{\alpha \beta \varepsilon}} - e^{-\frac{133 z}{\alpha \beta \varepsilon}} \cdot \cos (0,5 (\beta z)^{2/3})} \cdot \sin \left\{ \omega t + \arctg \left[\frac{e^{-\frac{133 z}{\alpha \beta \varepsilon}} \cdot \sin (0,5 (\beta z)^{2/3})}{2 - e^{-\frac{133 z}{\alpha \beta \varepsilon}} \cdot \cos (0,5 (\beta z)^{2/3})} \right] \right\}$$

dargestellt werden.

Einsteins „bed load equation“ kann in der Form geschrieben werden:

$$(2) \quad \frac{30 \Phi}{1 + 30 \Phi} = \frac{2}{\pi \cdot \sqrt{2 \pi}} \cdot \int_0^{\pi/2} \left\{ \int_{(4 \Psi - 1,5)}^{\infty} e^{-\frac{m^2}{2}} dm \right\} d(\omega t)$$

mit

$$(3) \quad \Psi = \frac{\gamma_s - \gamma_f}{\gamma_f} \cdot \frac{D \cdot g}{u_a^2}$$

Den in Gleichung (3) auftretenden Wert u_a erhält man aus u^* , indem man in Gleichung (1) ansetzt:

$$(4) \quad z = 0,35 D;$$

$$(5) \quad \alpha = \frac{H}{2 \text{Sinh} \left(\frac{2 \pi d}{L} \right)};$$

$$(6) \quad \beta = \sqrt{\omega/2\nu} \quad \text{mit } \nu = \sim 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1};$$

$$(7) \quad T = \sqrt{\frac{2 \pi L}{g}}; \quad \omega = \frac{2 \pi}{T}$$

Nach Berechnung von Φ aus Gleichung (2) erhält man für die durch die einheitlichen Wellen pro Flächeneinheit der Meeressohle mobilisierte Sandmenge

$$(8) \quad S_0 = \frac{\gamma_s \cdot \Phi \cdot D^{3/2}}{v_q \cdot \sqrt{\frac{\gamma_f}{g(\gamma_s - \gamma_f)}}}, \text{ worin } v_q \text{ die mittlere Geschwindigkeit der vom}$$

Seegang mobilisierten Sandkörner bedeutet. Diese ergibt sich aus der Beschreibung der Grenzschicht. Wird sie z. B. auf das Niveau $z = 0,35 \cdot D$ bezogen, so wird

$$(9) \quad v_q = u_a \cdot \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{2 u_a}{\pi}$$

Zahlenbeispiel:

Für einheitliche Dünungswellen mit $H = 2$ m und $L = 40$ m bei $d = 20$ m und für $D = 0,25 \cdot 10^{-3}$ m und $\gamma_s = 2,65 \text{ g}^*/\text{cm}^3$ erhält man nach den Gleichungen (1) bis (9): $S_0 = 5,0 \text{ g}^* \text{ m}^{-2}$.

4.22 Mathematische Formulierung der durch glatten spektralen Seegang mobilisierten Sandmengen

Hierzu wird an Gleichung (1) angeknüpft. Zu ihrer Herleitung wurde Airy's Wellentheorie benutzt. Dementsprechend ist zu setzen:

$$(10) \quad \eta = \frac{H}{2} \cdot \sin(\omega t)$$

Ein Vergleich von Gleichung (1) mit Gleichung (10) zeigt, daß eine lineare Beziehung besteht zwischen den Amplituden von u^* und η . Das gleiche gilt demnach auch für u_a und $\frac{H}{2}$.

Daher ist hier der Satz von Crandall und Mark anwendbar¹⁾. Nach diesem Satz erhält man bei gegebenem Seegangsspektrum $S_{\eta\eta}(\omega)$ für die zugehörige Verteilung der spektralen Dichte der Amplitude von u^* in der Grenzschicht:

(11) $S_{u_a^* u_a^*} = [\text{TF}]^2 \cdot S_{\eta\eta}(\omega)$, worin die „Transferfunktion [TF]“ bestimmt ist durch:

$$(12) \quad [\text{TF}] = \frac{\omega}{\text{Sinh}\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \cdot \sqrt{[\quad]}$$

Der Ausdruck unter dem Wurzelzeichen ist in Gleichung (12) der gleiche wie in Gleichung (1). Im Tiefwasser kann man ansetzen: $L = \frac{g T^2}{2\pi} = \frac{g 2\pi}{\omega^2}$ Daraus folgt:

$$(13) \quad \frac{2\pi d}{L} = \frac{d \omega^2}{g}$$

Die Amplitude u_a , die in Einsteins „bed load equation“ eingeht, erhält man aus der Amplitude u_a^* , indem man für z den Wert $0,35 \cdot D$ einsetzt. Damit ergibt sich aus den Gleichungen (1), (11), (12) und (13):

$$(14) \quad S_{u_a u_a}(\omega) = \left[\frac{\omega}{\text{Sinh}\left(\frac{d \omega^2}{g}\right)} \right]^2 \cdot \left\{ 1 + 0,25 e^{-0,7 \frac{133 D}{\alpha \beta \varepsilon}} - e^{-0,35 \frac{133 D}{\alpha \beta \varepsilon}} \cdot \cos(0,5 (0,35 \beta D)^{2/3}) \right\} \cdot S_{\eta\eta}(\omega)$$

¹⁾ Wegen der Veränderlichen α vergleiche die im Anschluß an Gleichung (18) gemachten Ausführungen.

In Gleichung (14) ist wieder die spektrale Dichte nach dem Seegangsspektrum durch $S_{\eta\eta}(\omega)$ bezeichnet. In den Gleichungen (2) und (3) zur Berechnung der durch gleichförmige Wellen mobilisierten Sandmenge tritt nicht u_a sondern u_a^2 auf. Bei spektralem Seegang hat an die Stelle von u_a^2 sinngemäß der spektrale „Erwartungswert“ $E[u_a^2] = \overline{u_a^2}$ zu treten. Dieser statistische Mittelwert entspricht der Verteilung der spektralen Dichte von u_a .

Bedeutet $S_{\eta\eta}(\omega)$ die spektrale Dichte des Seegangs, so besteht nach Crandall und Mark zwischen $E[\eta^2]$ und $S_{\eta\eta}(\omega)$ die einfache Beziehung

$$(15) \quad E[\eta^2] = \overline{\eta^2} = \int_0^{\infty} S_{\eta\eta}(\omega) d\omega$$

Gilt ferner für die spektrale Dichte $S_{yy}(\omega)$ einer vom Seegang abhängigen Veränderlichen y die Beziehung:

$$(16) \quad S_{yy}(\omega) = [TF]^2 \cdot S_{\eta\eta}(\omega),$$

so kann nach Nath und Harlemann der Erwartungswert von y^2 berechnet werden vermittels der Gleichung

$$(17) \quad E[y^2] = \overline{y^2} = \int_0^{\infty} S_{yy}(\omega) d\omega = \int_0^{\infty} [TF]^2 \cdot S_{\eta\eta}(\omega) d\omega$$

Nach den Gleichungen (14), (16) und (17) erhält man für den der spektralen Windsee entsprechenden Mittelwert von u_a^2 :

$$(18) \quad \overline{u_a^2} = E[u_a^2] = \int_0^{\infty} \left\{ 1 + 0,25 e^{-0,7 \frac{133 D}{\alpha \beta \varepsilon}} - e^{-0,35 \frac{133 D}{\alpha \beta \varepsilon}} \cdot \cos(0,5 (0,35 \beta D)^{2/3}) \right\} \cdot \left[\frac{\omega}{\text{Sinh} \left(\frac{d\omega^2}{g} \right)} \right] \cdot S_{\eta\eta}(\omega) d\omega$$

Um die Anwendbarkeit des Satzes von Crandall und Mark zu erreichen, ist entsprechend den Gleichungen (5) und (13) angesetzt worden:

$$(19) \quad a = \frac{\overline{H}}{2 \text{Sinh} \left(\frac{d\omega^2}{g} \right)}$$

\overline{H} ist zu bestimmen aus:

$$(20) \quad \overline{H}^2 = 4 \int_0^{\infty} S_{\eta\eta}(\omega) d\omega,$$

denn die Energie der Windsee pro Einheit der Meeresoberfläche kann ausgedrückt werden durch:

$$E = \frac{1}{8} \rho_f g \overline{H}^2$$

und durch

$$E = \frac{1}{2} \rho_f g \int_0^{\infty} S_{\eta\eta}(\omega) d\omega.$$

Statt Gleichung (3) hat man zu setzen:

$$(3a) \quad \Psi = \frac{\gamma_s - \gamma_f}{\gamma_f} \cdot \frac{D \cdot g}{E[u_a^2]}$$

Die weitere Rechnung verläuft wie vorher, nur tritt in Gleichung (9) an die Stelle von u_a der Wert $\sqrt{E[u_a^2]}$

4.3 Zur Verwendung von Airy's Wellentheorie

Airy's Wellentheorie gilt nur für Wellen von kleiner Amplitude. Bei den vorbereitenden Überlegungen in Abschnitt 3.1 ist Airy's Wellentheorie angewendet worden, obwohl dort nicht Wellen von kleiner Amplitude betrachtet wurden. Die dadurch entstehende Ungenauigkeit ist erfahrungsgemäß nicht beträchtlich.

Bei der in Abschnitt 3.2 vorgenommenen Verallgemeinerung für spektrale Windsee sind „Elementarwellen“ von der sehr kleinen Amplitude

$$a\omega = \sqrt{S\eta\eta(\omega)} \cdot \sqrt{d\omega} \text{ bzw. } a\omega = \sqrt{Su_a u_a(\omega)} \cdot \sqrt{d\omega}$$

betrachtet worden. Für diese gilt Airy's Wellentheorie exakt.

4.4 Über die Grenzen der Anwendbarkeit des Verfahrens

Die Anwendbarkeit des Verfahrens ist auf den Tiefwasserbereich beschränkt. Das heißt alle hergeleiteten Gleichungen haben nur Gültigkeit so lange $d > L/2$ bleibt.

Der Ausdruck für die Größe der vom Seegang mobilisierten Sandmenge enthält den Korndurchmesser D . Deshalb ist das Verfahren nur dort anwendbar, wo der Sand gut sortiert ist.

Den genauen Wert der in die Rechnung eingehenden Größe v_q wird man nur auf Grund von Feldversuchen angeben können.

Es wird darauf hingewiesen, daß das Berechnungsverfahren noch nicht anhand von Feldmessungen überprüft worden ist. Dieser Umstand dürfte seine praktische Anwendbarkeit und seine Aussagefähigkeit über die Naturverhältnisse nicht unwesentlich einschränken.

5. Feststoffbewegungen bei Strömungen

5.1 Allgemeines

Erläuterung der verwendeten Zeichen:

ρ	spezifische Masse der Flüssigkeit	[g cm ⁻³]
ρ_s	spezifische Masse des Sohlenmaterials	[g cm ⁻³]
ρ'	$= \frac{\rho_s - \rho}{\rho}$	[1]
ν	kinematische Viskosität	[cm ² · s ⁻¹]
g	Schwerebeschleunigung	[cm · s ⁻²]
h	Wassertiefe	[cm]
z	vertikale Achse	[cm]
D	charakteristischer Korndurchmesser	[cm]
I	Energieliniengefälle	[1]
τ	Schubspannung an der Sohle	[gcm ⁻¹ s ⁻²]
τ_0	Schubspannung an der Sohle bei Beginn des Feststofftransportes	[gcm ⁻¹ s ⁻²]
v	Fließgeschwindigkeit	[cm s ⁻¹]
$u_+^*)$	Schubspannungsgeschwindigkeit	[cm s ⁻¹]

) Das hier verwendete Zeichen $+$ steht an Stelle eines tiefstehenden Sternchens ().

w	Fallgeschwindigkeit eines Korns in ruhigem Wasser	[cm s ⁻¹]
c	Konzentration (Masse der Substanz : Masse der Lösung)	[1]
c _a , c _z	Konzentration in der Höhe z = — a, z = — z	[1]
ε _K	Adhäsionsparameter	[dyn · cm ⁻¹]
κ	Karman — Konstante	[1]
q' _s	spezifischer Feststofftransport (Gewicht unter Wasser pro Breiten- und Zeiteinheit)	[g · s ⁻³]
Re ₊ , Re _w	Reynoldssche Zahlen	[1]
Fr ₊ , Fr _w	Froudesche Zahlen	[1]
G ₊	Transportzahl	[1]
D ₊	Sedimentdurchmesser	[1]

Der Feststofftransport in offenen Gerinnen gehört zu den sehr komplexen Problemen der Hydraulik. Dabei muß grundsätzlich unterschieden werden ob es sich um eine richtungskonstante Strömung handelt (Gerinne im Binnenland) oder ob sich die Strömungsrichtung in einem bestimmten Rhythmus umkehrt (Gerinne unter Gezeitenwirkung).

Die Tidenströme sind im allgemeinen Mischsysteme, wobei die im Mündungsbereich vorhandene Schwingung stromaufwärts zugunsten einer bevorzugten Richtung abgebaut wird und schließlich an der Tidegrenze in den richtungskonstanten Abfluß übergeht.

Da man beim richtungskonstanten Abfluß in einem Beobachtungsabschnitt auch Gleichförmigkeit voraussetzen kann, erschließt sich diese Strömungsform auch leichter allgemeingültigen Betrachtungen, die gewisse Aussagen über die Charakteristika des Feststofftransportes erlauben.

Die Vorgänge beim stetigen Wechsel der Strömungsrichtung, der in den Tidenströmen auftritt, sind ungleich komplizierter und bis heute nicht genau bekannt. Abgesehen von der Schwierigkeit der Deutung von Dichte- oder Corioliseffekten, werden Beschleunigung und Verzögerung der Strömung den Feststofftransport beeinflussen.

Die nachfolgenden Ausführungen beschränken sich deshalb nur auf richtungskonstante Strömungen, die der Ausgang für spätere grundlegende Untersuchungen für die Bedingungen bei wechselnder Strömungsrichtung sein sollen.

5.2 Dimensionslose Parameter

Der spezifische Feststofftransport läßt sich folgendermaßen ausdrücken

$$q'_s = f(\varrho, \varrho', \nu, g, D, u_+)$$

Die in dieser Gleichung enthaltenen Kennzahlen beschreiben die Eigenarten der Sohle und diejenigen des auf die Sohle und das Korn einwirkenden Mediums. Dabei wird die Schubspannungsgeschwindigkeit u_+ benutzt. Der Zusammenhang zwischen der Schubspannung und der Schubspannungsgeschwindigkeit u_+ ergibt sich aus

$$\tau = \varrho \cdot g \cdot h \cdot I$$

und

$$u_+ = \sqrt{g \cdot h \cdot I}$$

zu

$$\tau = \varrho \cdot u_+^2$$

oder bekannter

$$u_+ = \sqrt{\tau/\varrho}$$

Aus den Kennzahlen lassen sich mit Hilfe der Dimensionsanalyse verschiedene dimensionslose Parameter bestimmen:

$$\frac{u_+ \cdot D}{\nu} = \text{Re}_+ \quad \frac{u_+^2}{\rho' \cdot g \cdot D} = \text{Fr}_+ \quad \frac{q'_s}{\rho' \cdot u_+^3} = G_+$$

Re_+ wird als Reynoldssche Zahl des Korns bezeichnet

Fr_+ ist eine von Shields als „Schleppspannungsbeiwert“ bezeichnete Froudesche Zahl

G_+ wird als Transportzahl bezeichnet

Für die Beurteilung der Verteilung der schwebend transportierten Körner hat sich der Ausdruck

$$Z = \frac{w}{\kappa \cdot u_+}$$

als vorteilhaft erwiesen.

Sämtliche Gruppierungen enthalten die Schubspannungsgeschwindigkeit u_+ , die von den hydraulischen Verhältnissen des Gerinnes abhängt. Für bestimmte Probleme ist es günstig, einen Parameter zu verwenden, der lediglich von den Materialeigenschaften der Sohle und der Flüssigkeit abhängt.

$$\text{Aus} \quad \frac{\text{Re}_+^2}{\text{Fr}_+} = \frac{\rho' \cdot g \cdot D^3}{\nu^2}$$

ergibt sich

$$D_+ = \left(\frac{\rho' \cdot g}{\nu^2} \right)^{1/3} D$$

Diese Zahl wird von Bonnefille als „Sedimentdurchmesser“ bezeichnet und hängt für konstante Material- und Flüssigkeitseigenschaften linear vom Korndurchmesser ab.

5.3 Der Beginn des Feststofftransportes

5.3.1 Bonnefille, Pernecker, Vollmers

Für die meisten morphologischen Probleme ist es von Bedeutung, den Zeitpunkt zu kennen, an dem das Sohlmaterial durch die Strömung in Bewegung gesetzt wird. Allerdings ist die Definition dieses Zeitpunktes von der Subjektivität des Beobachters abhängig, der einen bestimmten Bewegungszustand als Transportbeginn bezeichnet. Diese Unsicherheit läßt sich bei der reinen Beobachtung nicht vermeiden.

Shields hat zuerst die Allgemeingültigkeit des Feststofftransportbeginns gezeigt. Allerdings ließ sich in der von ihm gewählten Darstellungsart kein geschlossener Ausdruck für die Parameter ableiten. Bonnefille ist es durch die Darstellung bekannter Ergebnisse für den Beginn des Feststofftransportes in Abhängigkeit von D_+ und Re_+ gelungen, die unhandliche Shieldssche Kurve in eine leicht anwendbare Form umzuwandeln. Unter Verzicht auf eine Wiedergabe der Meßpunkte sind die beiden gefundenen Abhängigkeiten in Bild 16 eingetragen. Es gelten

$$D_+ = 2,5 \text{Re}_+^{4/5} \quad \text{Re}_+ < 12$$

$$D_+ = 3,8 \text{Re}_+^{5/8} \quad \text{Re}_+ > 12$$

Aus der Beziehung

$$D_+ = \frac{1}{\text{Fr}_+^{1/3}} \text{Re}_+^{2/3}$$

läßt sich jeweils für $\text{Re}_+ > 300$ der Beginn des Feststofftransportes nach Shields ($\text{Fr}_+ = 0,06$)

$$D_+ = 2,56 \text{Re}_+^{2/3}$$

und nach Meyer-Peter ($\text{Fr}_+ = 0,047$)

$$D_+ = 2,77 \text{Re}_+^{2/3}$$

in der neuen Schreibweise ableiten.

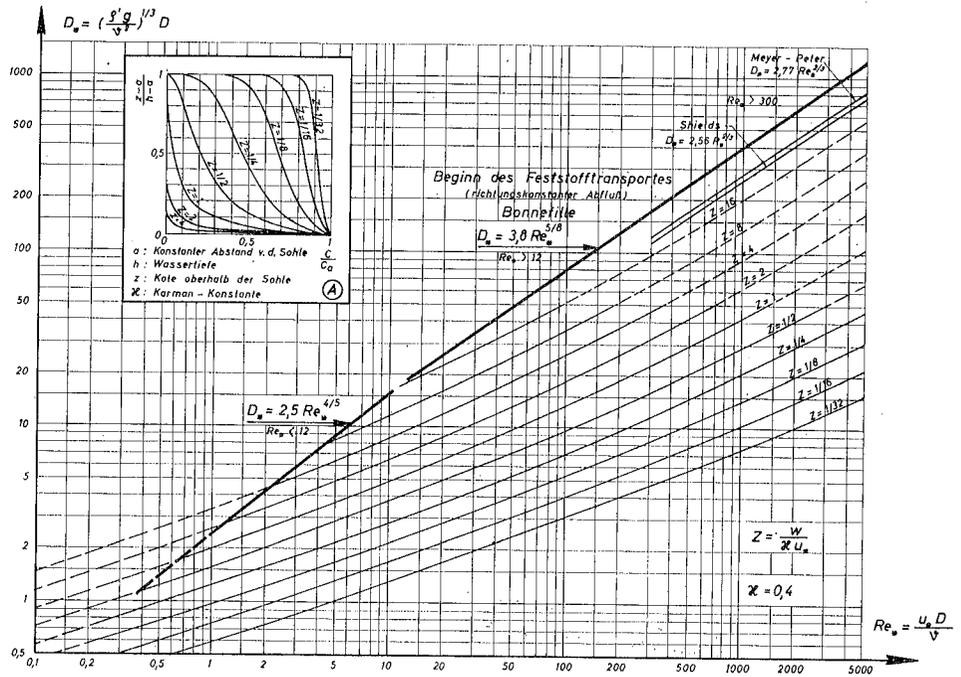


Bild 16
Schwebstoffkonzentrationsverteilung in einer gleichförmigen Strömung

Während der Gültigkeitsbereich der von Bonnefille angegebenen Abhängigkeit für $Re_+ > 12$ bis $Re_+ \sim 50\,000$ durch Pernecker und Vollmers bestätigt wurde, stellten die selben Autoren fest, daß für $D_+ = 2,5 Re_+^{4/5}$ die globale Angabe $Re_+ < 12$ eingeschränkt werden muß.

Auf Bild 17 sind die wesentlichen Ergebnisse fremder und eigener Untersuchungen (Vollmers, Pernecker) für feinkörnige Materialien in der Darstellung $D_+ - Re_+$ eingetragen. Bis $D_+ = 2,5$ ($Re_+ = 1$) wird der Beginn des Feststofftransportes durch die Gerade $D_+ = 2,5 Re_+^{4/5}$ beschrieben. Dann beginnt ein Übergangsbereich. Die hydraulischen Bedingungen bleiben zunächst trotz abnehmender Materialkonstanten gleich, um dann etwa der Abhängigkeit $D_+ = Re_+^2$ zu folgen.

Nach den neuen Untersuchungen läßt sich für $D_+ = 2,5 Re_+^{4/5}$ der untere Gültigkeitsbereich auf $Re_+ \sim 1$ festlegen.

Das Verhalten des Materials mit $D_+ < 1$ weicht von den bisher beobachteten Materialien ab. Für einen Sand mit $D_+ = 0,98$ ($D_{50} = 0,004$ cm) ließ sich der Bewegungsbeginn durch die Beobachtung nicht mehr eindeutig bestimmen, da die oberste Schicht des Materials unter Wasser eine zusammenhängende Haut bildete, die zunächst nicht aufriß. Nur stellenweise wanderten auf dieser Haut kleine Korngruppen (Grobanteil des Kornspektrums). Bakelit mit $D_+ = 0,535$ ($D_{50} = 0,004$ cm) verhielt sich ähnlich. Erst bei größeren Fließgeschwindigkeiten erfolgte ein Aufreißen der Oberschicht und sofortiger Übergang in Schweb. Das stellte auch Dou Go-zen bei seinen Untersuchungen fest.

Diese Erscheinung findet eine zumindest vorläufige Deutung durch die in Bild 16 eingetragenen Parameter Z .

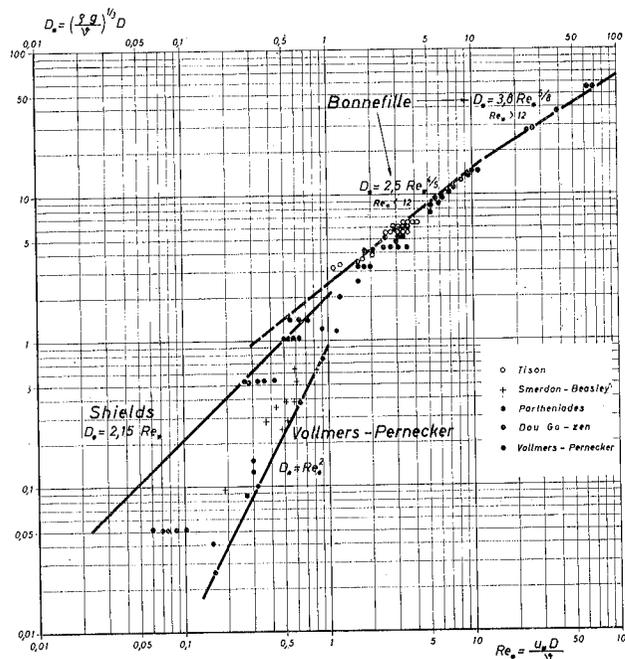


Bild 17
Beginn des Feststofftransportes in dimensionsloser Darstellung $D_+ - Re_+$

Für zweidimensionalen Abfluß läßt sich die Suspensionsverteilung in Abhängigkeit von der Wassertiefe folgendermaßen ausdrücken

$$\frac{cz}{ca} = \left(\frac{h-z}{z} - \frac{a}{h-a} \right) Z'$$

mit

$$Z = \frac{w}{\kappa \cdot u_+}$$

In Bild 16 (A) ist die mit diesen Ausdrücken berechnete Schwebstoffverteilung in einem breiten Gerinne eingetragen.

Die aus Beobachtungsergebnissen erhaltenen Abhängigkeiten der Fallgeschwindigkeiten von Körnern in ruhendem Wasser lassen sich mit Hilfe Reynoldsscher und Froudescher Zahlen ausdrücken. Man erhält dann mit

$$Re_w = \frac{w \cdot D}{\nu} \quad \text{und} \quad Fr_w = \frac{w^2}{g' \cdot D}$$

analog

$$D_+ = \sqrt[3]{\frac{Re_w^2}{Fr_w}}$$

Für $Re_w < 1$ wird mit $Fr_w = \frac{Re_w}{18}$

$$D_+ = 2,62 Re_w^{1/3}$$

Für $1 < Re_w < 500$ ergibt sich mit $Fr_w = 0,072 Re_w^{3/6}$

$$D_+ = 2,408 Re_w^{0,467}$$

oder angenähert

$$D_+ \sim 2,2 Re_w^{1/2}$$

Man kann jetzt den Parameter Z als Funktion von Re_+ und D_+ ausdrücken

$$\text{für } Re_w < 1 \quad D_+ = 2,62 (Z \cdot \kappa \cdot Re_+)^{1/3} \text{ oder } Z = \frac{D_+^3}{18 \kappa Re_+}$$

$$\text{für } 1 < Re_w < 500 \quad D_+ = 2,2 (Z \cdot \kappa \cdot Re_+)^{1/2} \text{ oder } Z = \frac{D_+^2}{4,85 \kappa Re_+}$$

In Bild 16 sind die Parameter $Z = \text{const.}$ in Abhängigkeit von D_+ und Re_+ eingetragen. Die Kurven zeigen die Tendenz, besonders die Gerade $D_+ = 2,5 Re_+^{4/5}$ zu schneiden. Man kann daraus schließen, daß nach den Strömungsbedingungen eine entsprechende Schwebstoffverteilung möglich wäre. Durch die mit der Abnahme des charakteristischen Korndurchmessers parallel laufende Verringerung des Porenvolumens treten wahrscheinlich schon Kohäsionskräfte auf, die den Transportbeginn erst bei größeren Re_+ -Zahlen eintreten lassen. Es erfolgt dann ein rasches Anwachsen der Suspensionskonzentration.

In der Praxis will man den Beginn des Feststofftransportes mit Hilfe leicht meßbarer Größen bestimmen. Das sind besonders die mittlere Fließgeschwindigkeit v , die Wassertiefe h und der charakteristische Korndurchmesser D . Bonnefille schreibt die Strickler Formel

$$v = 21 \left(\frac{h}{D} \right)^{1/6} \sqrt{h I}$$

oder

$$u_+ = 0,15 \left(\frac{D}{h} \right)^{1/6} v$$

Jetzt wird in den Gleichungen

$$\left(\frac{\rho' g}{\nu^2} \right)^{1/3} = 2,5 \left(\frac{u_+ D}{\nu} \right)^{4/5} \quad Re_+ < 12$$

und

$$\left(\frac{\rho' g}{\nu^2} \right)^{1/3} = 3,8 \left(\frac{u_+ D}{\nu} \right)^{5/8} \quad Re_+ > 12$$

jeweils der Ausdruck für u_+ substituiert. Man erhält dann Ausdrücke für v , die z. B. für Sand mit $\rho' = 1,65$ und mit $\nu = 0,01 \text{ cm}^2/\text{s}$ lauten

$$v = 22 h^{1/6} D^{1/12} \quad 0,01 \text{ cm} < D \leq 0,1 \text{ cm}$$

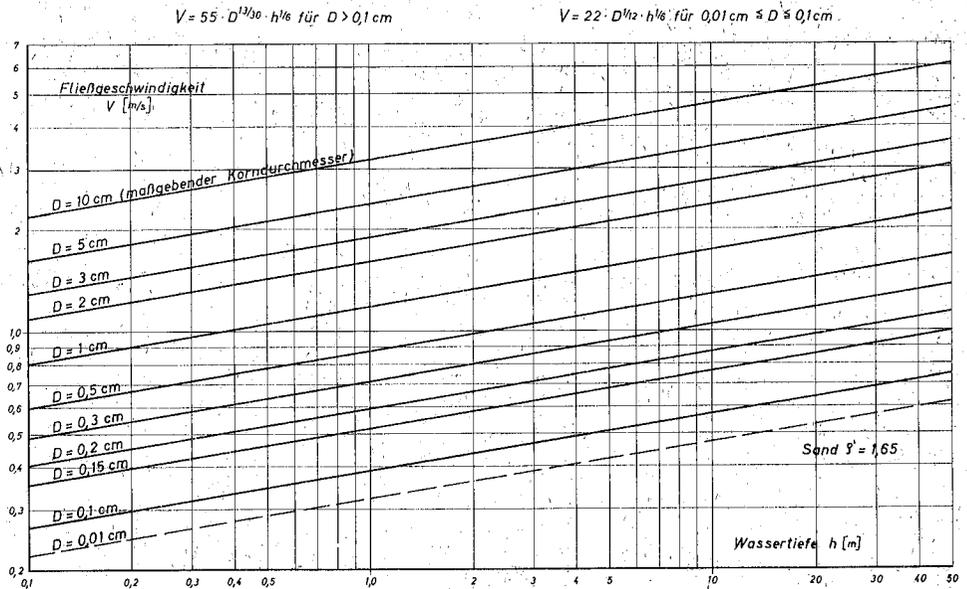
$$\text{und} \quad v = 55 h^{1/6} D^{13/60} \quad D > 0,1 \text{ cm}$$

Die nach diesen Gleichungen berechneten Abhängigkeiten zwischen v , h und D sind in Bild 18 eingetragen und gestatten eine rasche Abschätzung, bei welchen hydraulischen Bedingungen sich ein bestimmtes Korn in Bewegung setzt. Es wird noch darauf hingewiesen, daß Bonnefille in seiner Arbeit übersehen hat, daß sein Nomogramm für $D_+ = 4,0 Re_+^{5/8}$ (anstelle von $D_+ = 3,8 Re_+^{5/8}$) ausgerechnet wurde. Ebenso ist das Nomogramm gerade noch bis $D = 0,01 \text{ cm}$ anwendbar (gestrichelte Linie in Bild 18).

5.32 Dou Go-zen

Völlig anders hat Dou Go-zen einen Ausdruck für die mittlere Geschwindigkeit entwickelt, bei der sich ein Korn in Bewegung setzt. Im Gegensatz zu den anderen Autoren weist er den wesentlichen Einfluß der unmittelbar am Korn haftenden Wasserschicht nach und bestimmt aus Untersuchungen mit Quarzfäden einen Adhäsionsparameter $\varepsilon_K = 2,56 \text{ [dyn/cm]}$ und einen Parameter für die Berührungstärke der Wasserschicht zwischen zwei Körnern $\delta = 2,13 \cdot 10^{-5} \text{ [cm]}$. Mit Hilfe dieser Größen und unter Berücksichtigung der Geschwindigkeitsschwankungen wird schließlich eine Formel für v_{mittel} abgeleitet.

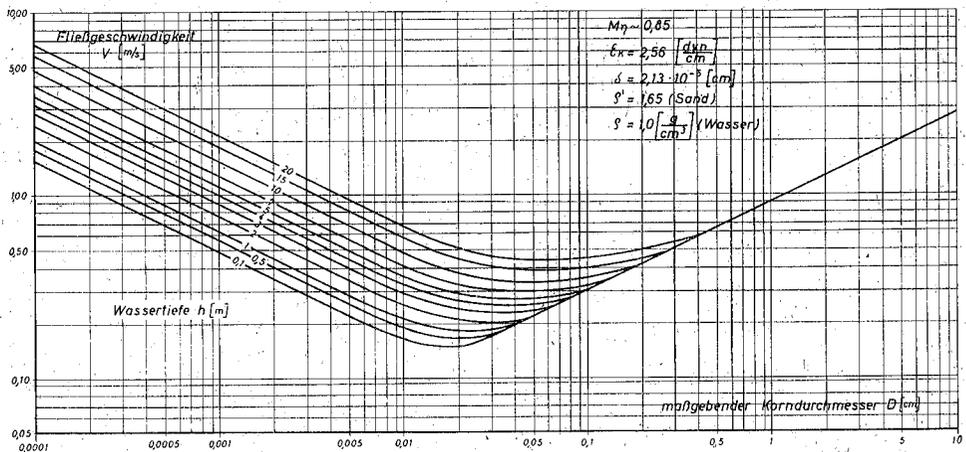
$$v_{\text{mittel}} = \frac{2,24}{M \eta} \sqrt{\rho' g D + 0,19 \frac{\varepsilon_K + g h \delta \rho}{D \rho}}$$



Der Parameter $M\eta$ kann für die praktische Anwendung genau genug 0,85 gesetzt werden. Exakt stimmt dieser Wert bei Wassertiefen $h > 70 \cdot D$.

Bild 19 zeigt die nach dieser Gleichung gerechneten Abhängigkeiten v , D und h für Sand mit $\rho' = 1,65$. Aus der Struktur der Formel geht hervor, daß der Einfluß der Wasser-

$$V_m = \frac{2,24}{M\eta} \sqrt{s' \cdot g \cdot D + 0,19 \cdot \frac{\epsilon \kappa + q \cdot h \cdot \delta s'}{D \cdot s'}}$$



tiefe mit zunehmender Korngröße abnimmt. Im übrigen stimmt die Form dieser Kurvenschar mit der früher von Hjulström gefundenen empirischen Abhängigkeit überein.

Die Grenzgeschwindigkeit hat im Bereich zwischen 0,02 cm bis 0,04 cm ein Minimum, um jeweils mit abnehmendem oder zunehmendem D zu wachsen.

5.4 Der Feststofftransport

Die wichtigsten bekannten Transportgleichungen lassen sich im allgemeinen mit Hilfe dimensionsloser Gruppierungen darstellen.

Für die Gleichungen von Meyer-Peter, Einstein und Kalinske ergeben sich dann folgende Formen:

Meyer-Peter

Aus $q'_s = 8 \sqrt{1/\rho} (\rho g h l - 0,047 \rho' \cdot \rho g \cdot D_m)^{3/2}$

wird $G_+ = 8 \left(1 - \frac{0,047}{Fr_+} \right)^{3/2}$

Einstein

Die Gleichung von Einstein ist eine Beziehung zwischen den Parametern

$$\Phi_+ = \frac{q'_s}{\rho' \rho g} \left(\frac{1}{\rho'} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{g D^3} \right)^{1/2} \quad \text{und} \quad \psi_+ = \frac{D}{h l}$$

Man erhält daraus

$$\Phi_+ = G_+ Fr_+^{3/2} \quad \text{und} \quad \psi_+ = \frac{1}{Fr_+}$$

Kalinske

Die Gleichung von Kalinske lautet

$$\frac{q'_s}{\rho' \rho g u_+ D} = 2,5 f \left(\frac{\tau_0}{\tau} \right)$$

darin ist

$$\frac{\tau_0}{\tau} = 0,12 \frac{\rho' \rho g D}{\rho g l h} = \frac{0,12}{Fr_+}$$

Der erste Ausdruck der Gleichung wird dann

$$\frac{q'_s}{\rho' \rho g u_+ D} = G_+ Fr_+$$

Sämtliche Gleichungen lassen sich in Abhängigkeit von der Transportzahl G_+ und von Fr_+ darstellen.

In Bild 20 (rechts oben) sind die Gleichungen eingetragen. Auf die Einzeldarstellung der Meßpunkte wurde hier verzichtet. Das schraffierte Feld gibt lediglich den Streubereich der Messungen verschiedener Autoren an.

Die eingerechneten Kurven haben bis $G_+ \sim 2$ einen etwa gemeinsamen Verlauf.

Ab $G_+ > 2$ nähern sich die Kurven rasch Grenz- (Meyer-Peter $G_+ = 8$) bzw. Maximalwerten (Einstein $G_+ \sim 9,5$; $Fr_+ \sim 0,4$ und Kalinske $G_+ \sim 3,3$; $Fr_+ \sim 0,3$). Für Einstein und Kalinske ergibt sich sogar eine Abnahme der Transportzahl G_+ mit zunehmendem Fr_+ .

In dem Bereich $10 < G_+ < 50$ erfolgt der Feststofftransport bereits als Suspension, die bei $G_+ \sim 50$ 5% erreicht. Außer der modifizierten $\Phi_+ - \psi_+$ Abhängigkeit (Einstein-Brown) beschreibt keines der anderen Gesetze diesen Bereich.

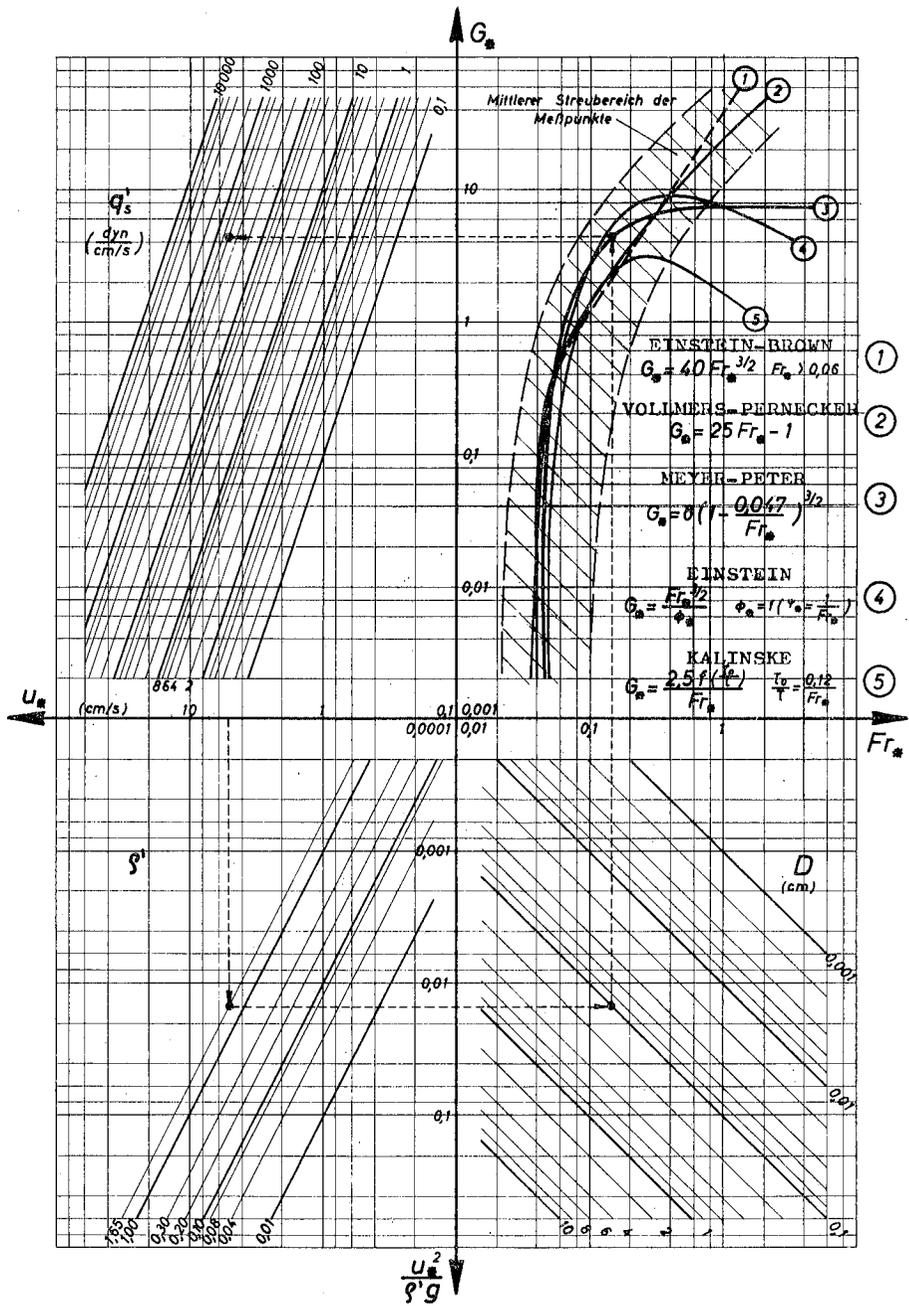


Bild 20
Feststofftransportgleichungen in dimensionsloser Darstellung $G_s - Fr_*$
und Anwendungsmöglichkeit durch ein Nomogramm

Die lineare Abhängigkeit $G_+ = Fr_+ - 1$ (Bild 20) wird als eine vereinfachte Beschreibung des Transportphänomens in dieser Darstellung vorgeschlagen.

Mit Hilfe des Nomogramms (Bild 20) lassen sich aus den Strömungsbedingungen (u_+) und den Materialkennwerten der Sohle (ρ' , D) die Beziehungen zwischen den verschiedenen vorgeschlagenen Transportfunktionen $G_+ = f(Fr_+)$ und der transportierten Feststoffmenge (q'_s) herstellen. Zum Beispiel erhält man für $u_+ = 5$ cm/s, Sand mit $\rho' = 1,65$ und $D = 0,1$ cm nach der Funktion von Meyer-Peter ein $q'_s = 600$ dyn/cm. s.

Dieses Nomogramm erlaubt, bei verschiedenen gemessenen Strömungsbedingungen eines Gerinnes mit bekannten Materialeigenschaften der Sohle und gemessenen Feststoffmengen, die dem Gerinne eigene Transportfunktion zu bestimmen.