

Dr. Gyula S a m u

Ergebnisse der Sandwanderungs-
untersuchungen in der südlichen Nordsee

Results of Researches of Sand Movements
in the Southern North Sea

Zusammenfassung

Der auf dem Meeresboden der Nordsee auf die Küste zuwandernde Sand dringt unter Bildung von verschiedenen morphologischen Formen tief in die Mündungstrichter der großen Flüsse ein und führt dort z.T. zu Verflachungen und Verengungen der Stromrinnen und Schiffahrtswege. Die Erforschung der Sandbewegung ist daher eine grundlegende Aufgabe der Wissenschaft und Technik.

In dem vorliegenden Aufsatz wird zunächst über die Ergebnisse und Erkenntnisse der Sandbewegung in den Küstengewässern berichtet, die in den letzten Jahren durch morphologische Untersuchungen und mit Hilfe von lumineszierenden und radioaktiven Leitstoffen gewonnen wurden.

Ferner werden Überlegungen zur Bestimmung der Herkunft und Bewegung des Sandes in der südlichen Nordsee und zur Verbesserung der Untersuchungstechnik angestellt.

Summary

Building up various morphological forms the sand that is moved along the bottom of the North Sea to the coast enters far into the estuaries of the big rivers and there at places causes the river-beds and shipping-routes to become shallow and narrow. Exploration of the movements of the sand therefore is a fundamental task of natural and technical sciences.

This paper reports for the first about the results and knowledge of the sand movements in the coastal waters that have been obtained in the last years through morphological research and with the help of luminescent and radioactive indicators.

Besides the paper treats of reflections about determining the origin and movement of the sand in the Southern North Sea and about improving the research techniques.

G l i e d e r u n g

1. Problemstellung
2. Methoden zur Bestimmung der Sandwanderung
 - 2.1 Beschreibung der Methodik
 - 2.1.1 Morphologische Methode
 - 2.1.2 Methode der radioaktiven und der lumineszierenden Leitstoffe
3. Bilanz der Untersuchungsergebnisse
 - 3.1 Außen-Jade
 - 3.2 Weser-Mündung
 - 3.3 Elbe-Mündung
 - 3.4 Übrige Gebiete
4. Herkunft und Wanderwege des Sandes
 - 4.1 Allgemeines
 - 4.2 Grundlagen der Herkunft und der Bewegung des Sandes
 - 4.2.1 Topographie des Meeresbodens
 - 4.2.2 Bodenbeschaffenheit
 - 4.2.3 Strömungsverhältnisse und Wellenbewegung
 - 4.2.3.1 Strömung
 - 4.2.3.2 Seegang
 - 4.2.3.3 Hydrologische Grundlagen
 - 4.3 Herkunft des Sandes
 - 4.4 Bewegungsrichtungen des Sandes
 - 4.5 Materialtransport in Küstennähe
5. Einige Gedanken über die zukünftige Entwicklung zur Verbesserung der Untersuchungsmethodik
6. Schlußbemerkungen

1. Problemstellung

Der auf dem Meeresboden der Nordsee auf die Küste zuwandernde Sand gestaltet nicht nur das submarine Relief, sondern bildet auch weitgehend das Material zum Aufbau des Küstengürtels und dringt unter Bildung verschiedener morphologischer Formen tief in die Mündungstrichter der großen Flüsse ein, wobei die Stromrinnen teilweise in für die Schifffahrt bedrohlicher Weise verengt und verflacht werden. Die immer größer werdenden Seeschiffe andererseits erfordern tiefere und hindernisfreie Fahrwasser. Daher ist die Erforschung der Sedimentbewegung in Ästuarien und küstennahen Meeresgebieten sowie der Herkunft der Sedimente nicht nur von wissenschaftlichem Interesse, sondern auch für die Planung und Ausführung von baulichen Maßnahmen von wesentlicher Bedeutung.

2. Methoden zur Bestimmung der Sandwanderung

Die Erforschung der Sandwanderungstendenzen wird mit verschiedenen Methoden vorangetrieben. Bis in die jüngste Vergangenheit waren es im wesentlichen mittelbare Untersuchungsmethoden, und zwar morphologisch-morphometrische, sedimentologische, hydrometeorologische und biologische, die nur über die Wirkung, aber nicht von dem Verlauf der Sedimentbewegung eine Vorstellung zu vermitteln vermochten.

Neben diesen herkömmlichen Verfahren wird den Verfahren der radioaktiven Indikatoren und der lumineszierenden Leitstoffe für die Untersuchung der zahlreichen, die Schifffahrt betreffenden Fragen größte Wichtigkeit beigemessen.

Im Rahmen dieses Aufsatzes können nicht alle genannten Methoden erwähnt werden. Hauptsächlich werden diejenigen von ihnen erörtert, die bei den Untersuchungen der Bundesanstalt für Wasserbau - Außenstelle Küste - angewandt worden sind.

2.1 Beschreibung der Methodik

2.1.1 Morphologische Methode

Bei der morphologischen Methode werden die aus verschiedenen Zeiten stammenden Vermessungspläne eines bestimmten Gebietes miteinander verglichen und nach verschiedenen Gesichtspunkten ausgewertet.

Die Niveauänderungen werden durch die Darstellung in Tiefenänderungsplänen veranschaulicht:

- 1) Flächenhafte Darstellung der Gebiete mit Niveauerhöhung und Niveauniedrigung,
- 2) Entwurf einer Karte mit Linien gleicher Tiefenänderung, um die Größe der Erhöhung und Vertiefung bestimmen zu können,
- 3) Ermittlung der Verlagerung der Tiefenlinien, und zwar in der Weise, daß von den Tiefenlinien der älteren Peilpläne oder Karten senkrecht zu den jüngeren Pfeile gezogen werden. Die Richtungshäufigkeit und die Größe der Pfeile ergeben eine Resultierende, die die wahre Verlagerung der morphologischen Formen anzeigt.

Außerdem wird die Wandlung der Formen und die Änderung der Tiefenverhältnisse durch Vergleich der zahlreichen Querprofile herausgehoben.

Für die Ableitung der Entwicklungstendenzen für einen längeren Beobachtungszeitraum werden die Lage der Rinnenquerschnitte bzw. die Beständigkeit der Lage der Stromrinnen ermittelt.

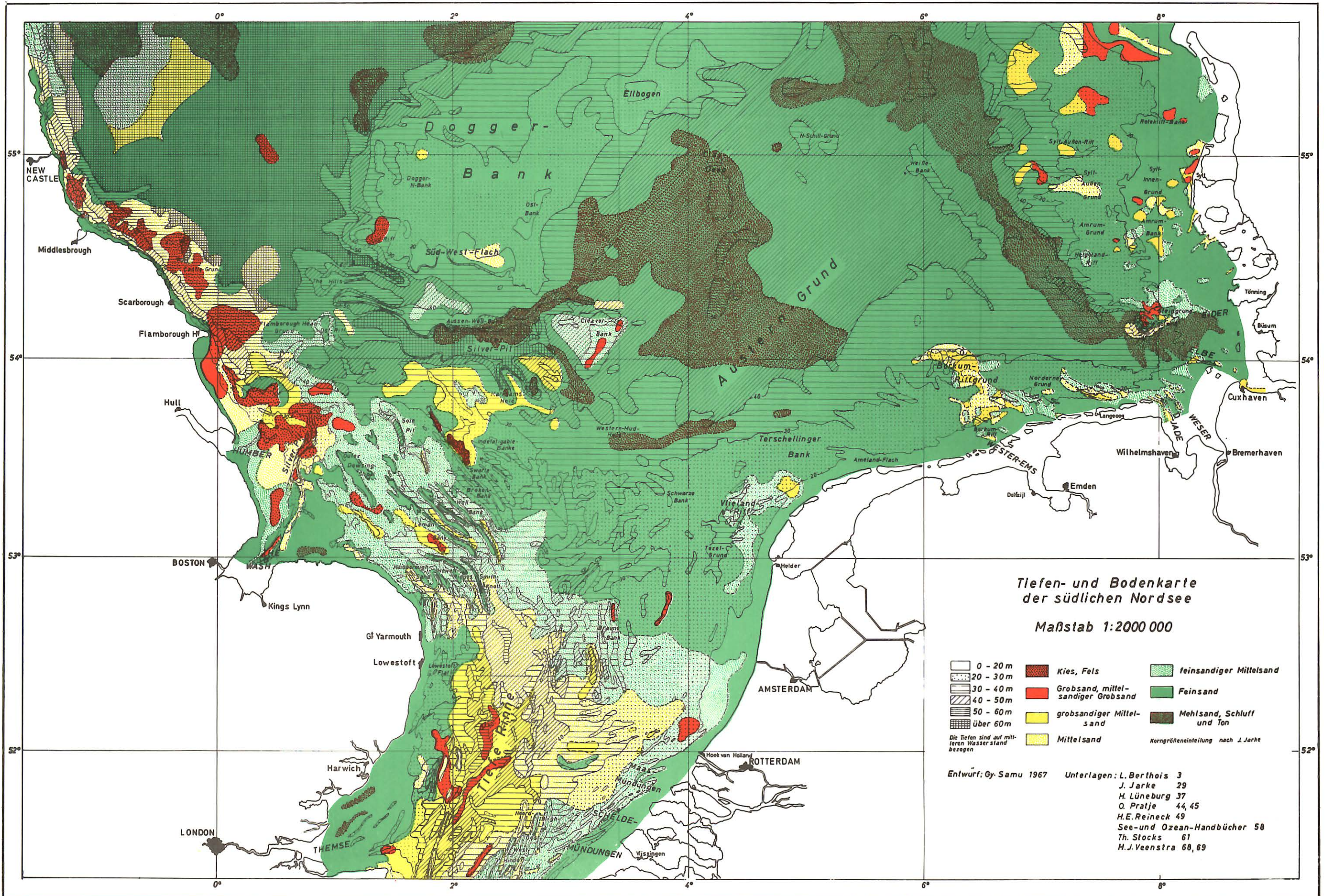
2.1.2 Methode der radioaktiven und der lumineszierenden Leitstoffe

Erst seit etwa einem Jahrzehnt werden Untersuchungen mit lumineszierenden und radioaktiven Leitstoffen durchgeführt. Diese Methode vermittelt keine Zustandbilder, wie z.B. die morphologische, sondern erlaubt eine direkte Beobachtung der Sandbewegung auch innerhalb kurzfristiger Zeiträume.

Die Luminophoren-Methode *) gründet sich darauf, daß mit lumineszierenden Farbstoffen bestrichene Sedimente in der beigegebenen Farbe aufleuchten, wenn sie mit ultraviolettem Licht angestrahlt werden.

Das Prinzip der Methode kann wie folgt erläutert werden: Aus dem Untersuchungsgebiet wird eine bestimmte Menge Material entnommen, durch Anfärbung von Luminophoren gekennzeichnet und nach sorgfältiger Trocknung an der vorher ermittelten Einbringestelle ausgegeben. Unter Einwirkung der Naturkräfte breitet sich das markierte Material mit Geschwindigkeiten und Richtungen aus, die als charakteristisch für die Bewegung der Gesamtmasse angesehen werden können. Nach der Ausgabe erfolgt die Bodenentnahme in bestimmten Zeitabständen an vorher festgelegten Punkten.

*) vergl. hierzu Ruck [54]



Die Proben werden getrocknet und nach der Trocknung auf einem Zählband unter UV-Licht durchgeführt; die in den einzelnen Proben befindlichen markierten Körner werden visuell ausgezählt. Das ist ein sehr zeitraubender Arbeitsgang. Ein anderer wesentlicher Nachteil ist, daß die mit Wasserglas hergestellte Hülle sehr beständig ist. Die erwähnten Nachteile können durch die radioaktive Methode behoben werden, da die Messungen an Ort und Stelle vorgenommen werden können. Erschwerend ist lediglich der Umstand, daß die Arbeit mit radioaktiven Stoffen besondere Schutzmaßnahmen erfordert.

Im einzelnen kann hier auf die Messungen, auf das Markierungsverfahren, auf die Analyse der Proben und auf die Darstellung der Analysenergebnisse nicht näher eingegangen werden, da diese ohnehin anhand der Spezialliteratur genügend bekannt sein dürften.

3. Bilanz der Untersuchungsergebnisse

Die in dem Seegebiet und in den Flußmündungen durchgeführten morphologischen Untersuchungen *) sowie Untersuchungen mit lumineszierenden und radioaktiven Leitstoffen **) verfolgten im wesentlichen den Zweck, Erkenntnisse über die Materialbewegung in den Fahrrinnen, auf den Platen, Sänden und Watten, in der Brandungszone und auf dem Strand zu erhalten (Abb.1). Die Erforschung der Sedimentbewegung zeichnet sich durch die Komplexität der Einzeluntersuchungen insofern aus, als die Beobachtung des Verhaltens des Indikatormaterials jeweils durch die Messung von Wind, Wasserstand und Strömungen, weiterhin durch die Feststellung der Veränderung des Strandprofils ergänzt wird.

3.1 Außenjade

Bei der Untersuchung des Bodenreliefs im Wangerooger Fahrwasser ***) wurde insbesondere die Verlagerung der submarinen Sanddünen (Tidestrombänke, Riesenrippeln) während der schweren Sturmperiode im Februar 1962 untersucht.

Das allgemeine morphologische Bild des Fahrwassers zeichnet sich im Untersuchungsgebiet durch die tiefen Kolke im Osten (Tonne 5), durch den ansteigenden Rand der Rinne im Süden (Tonne B bis E) und ein Feld von submarinen Sanddünen im Mittelbereich aus (Abb.2).

*) vergl. Schrifttum hierzu [11] [12] [16] [72] [73] [74]
**) vergl. Schrifttum hierzu [6] [7] [8] [9] [10] [11] [13] [14] [15]
[17] [57] [58]
***) " " " [72]

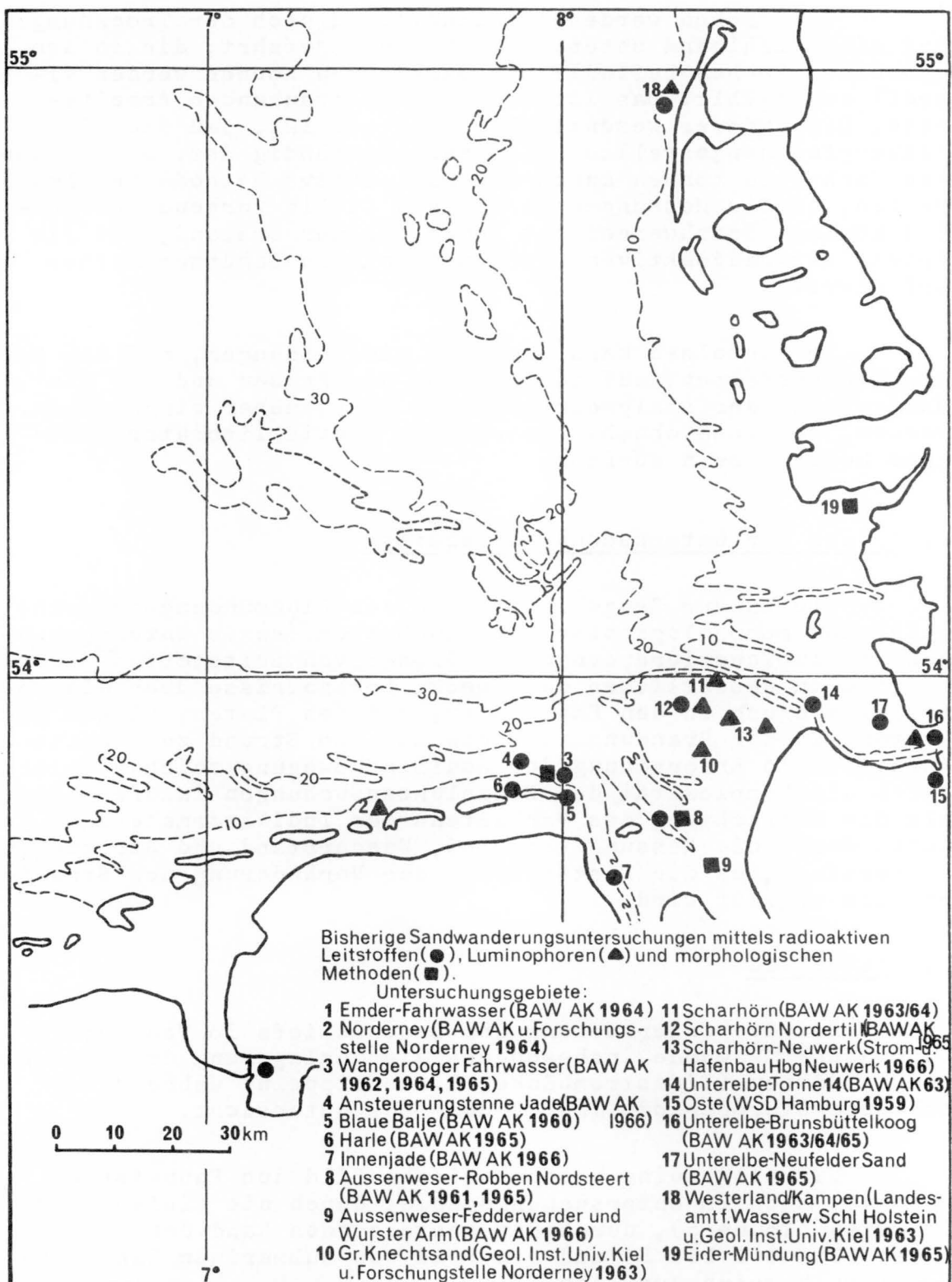


Abb. 1 Sandwanderungsuntersuchungen in der südlichen Nordsee

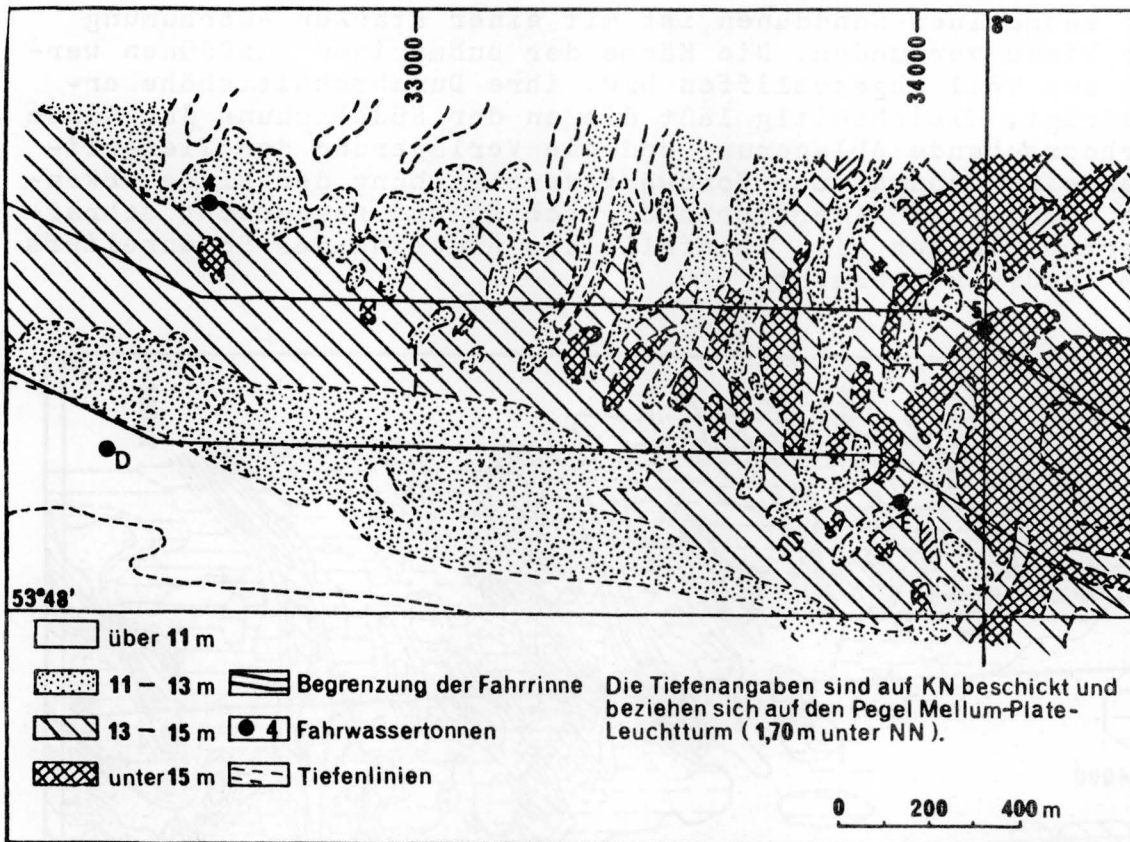


Abb. 2 Tiefenkarte des Wangerooger Fahrwassers am 18.1.1962

Die submarinen Sanddünen haben bei einer Durchschnittshöhe von 4-6 m einen Mittelkammabstand von 100-200 m (Abb.3). Die vergleichende Betrachtung der verschiedenen morphologischen Zustände hat ergeben, daß die Verlagerung der submarinen Sanddünen, bezogen auf gleiche Zeiten in der Sturmperiode, erheblich schneller vor sich ging als in der folgenden ruhigeren Periode (40-50 m bzw. 30-40 m). Die Westwärtsverschiebung

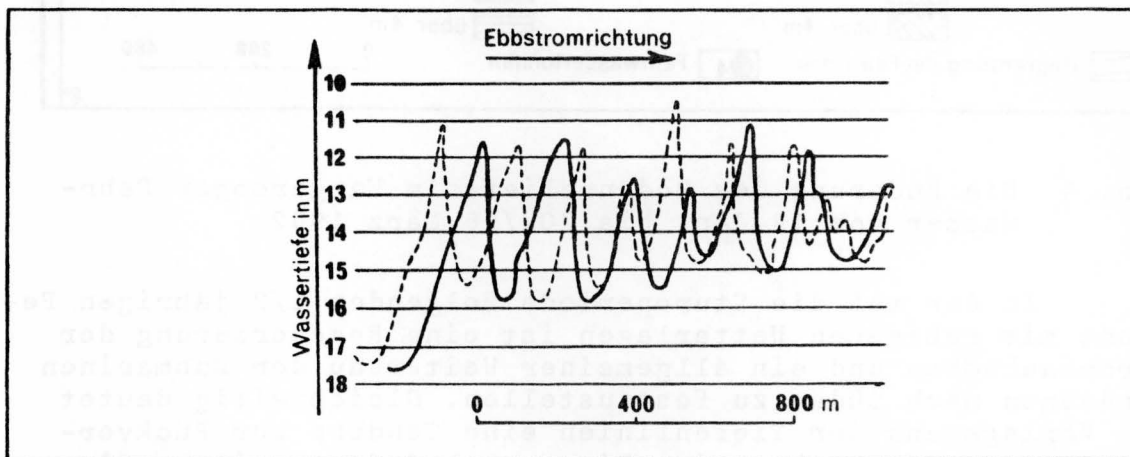


Abb. 3 Die Verlagerung der submarinen Sanddünen von Tonne 5 nach Westen längs der Nordbegrenzung des Wangerooger Fahrwassers in der Zeit vom 18.1.1962 bis 20./26.3.62, dargestellt anhand schematisierter Echolotdiagramme

der submarinen Sanddünen ist mit einer starken Ausräumung der Rinne verbunden. Die Kämme der submarinen Sanddünen werden zum Teil abgeschliffen bzw. ihre Durchschnittshöhe erniedrigt. Gleichzeitig läßt die an der Südböschung der Rinne vorherrschende Ablagerung und die Verlagerung der Tiefenlinien eine Tendenz zur Nordwärtsverschiebung der Rinne erkennen. Durch das Alternieren der schräg und waagrecht schraffierten Flächen wird ebenfalls die Änderung des Bodenreliefs zum Ausdruck gebracht.

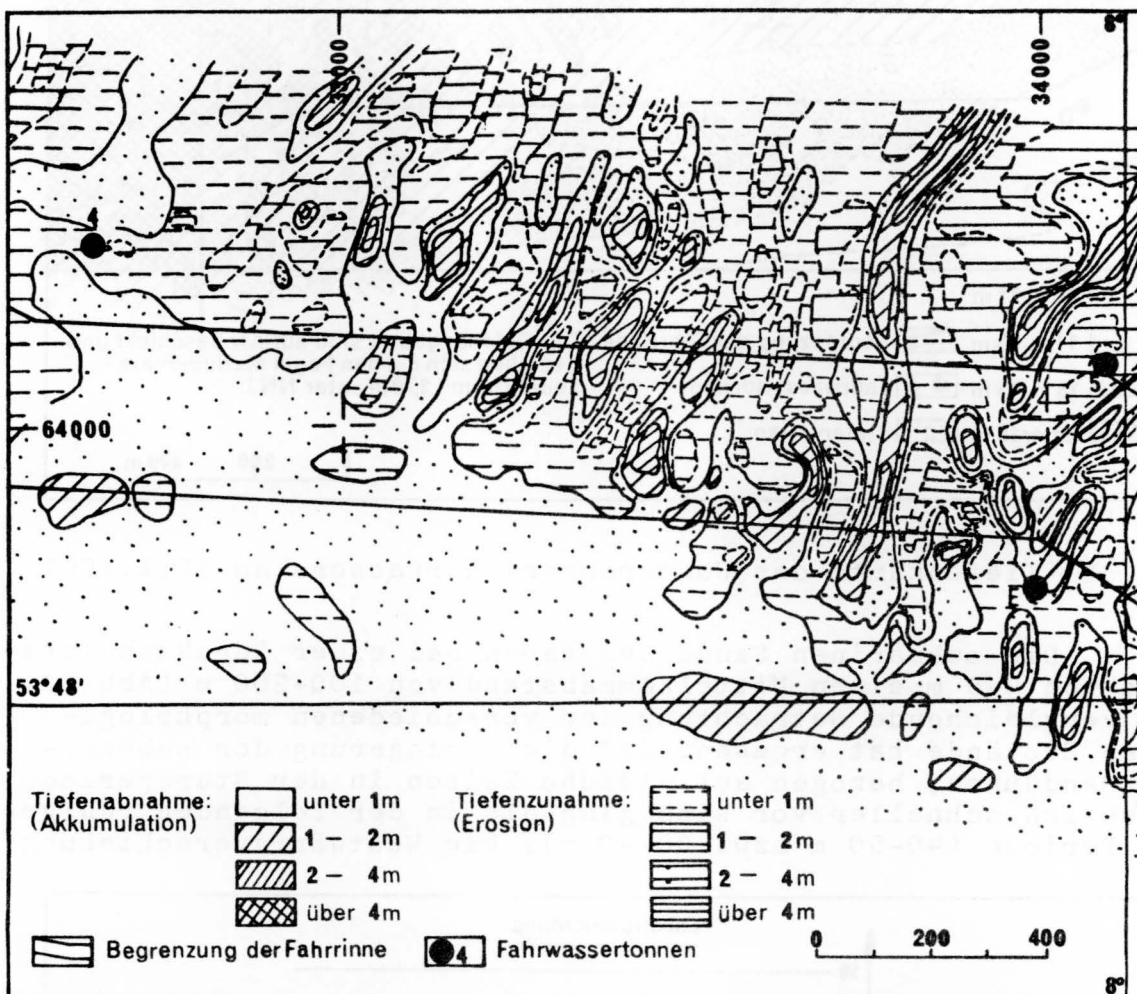


Abb. 4 Die Änderung des Bodenreliefs im Wangerooger Fahrwasser vom 18. Jan. bis 20./26. März 1962

In der auf die Sturmperiode folgenden 1/2 jährigen Periode mit ruhigeren Wetterlagen ist eine Regenerierung der Strombankhöhen und ein allgemeiner Weiterbau der submarinen Sanddünen nach Süden zu festzustellen. Gleichzeitig deutet die Verlagerung der Tiefenlinien eine Tendenz zur Rückversetzung der Südböschung der Rinne nach Süden an (Abb. 5).

Im ganzen dürfte nach dem derzeitigen Wissen über die Bildung der submarinen Sanddünen kein Zweifel bestehen, daß das submarine Sanddünenfeld sich infolge des überwiegenden Ebbstroms nach Westen (WNW) bewegt.

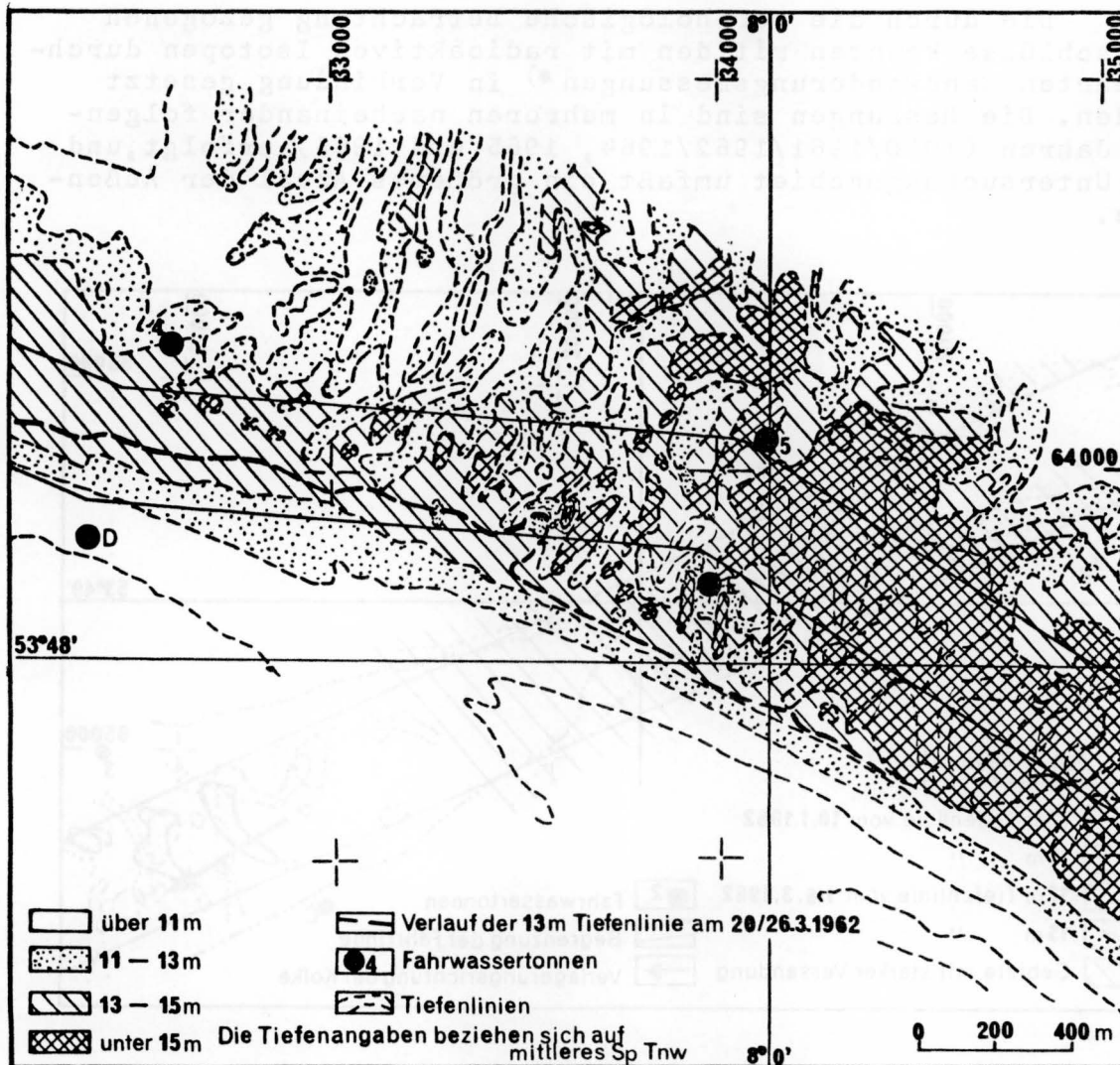


Abb. 5 Tiefenkarte des Wangerooger Fahrwassers am 19.9.1962

Im Westteil des Wangerooger Fahrwassers (Tonne 2) überwiegt an der engsten Stelle der Fahrrinne die Sandablagerung während der Sturmperiode eindeutig. Trotz der erheblichen Menge ausgebaggerten Sandes (121 525 cbm) ergibt sich ein mittlerer Erhöhungsbetrag des Bodens während der betrachteten Zeit in diesem Gebiet um 0,19 m (Abb.6).

Etwa östlich davon treten Flutstrombänke und Flutstromkolke auf, die an der Ostwärtsverlagerung eindeutig als solche bestimmt werden können.

Demzufolge liegt die Deutung nahe, daß die Versandung dieses flachsten und engsten Rinnenbereiches in der Sturmperiode während des überwiegenden Flutstroms erfolgt sein dürfte.

Die durch die morphologische Betrachtung gezogenen Rückschlüsse konnten mit den mit radioaktiven Isotopen durchgeführten Sandwanderungsmessungen *) in Verbindung gesetzt werden. Die Messungen sind in mehreren nacheinander folgenden Jahren (1960/1961/1962/1964, 1965 und 1966) erfolgt, und das Untersuchungsgebiet umfaßt ein größeres Areal der Außenjade.

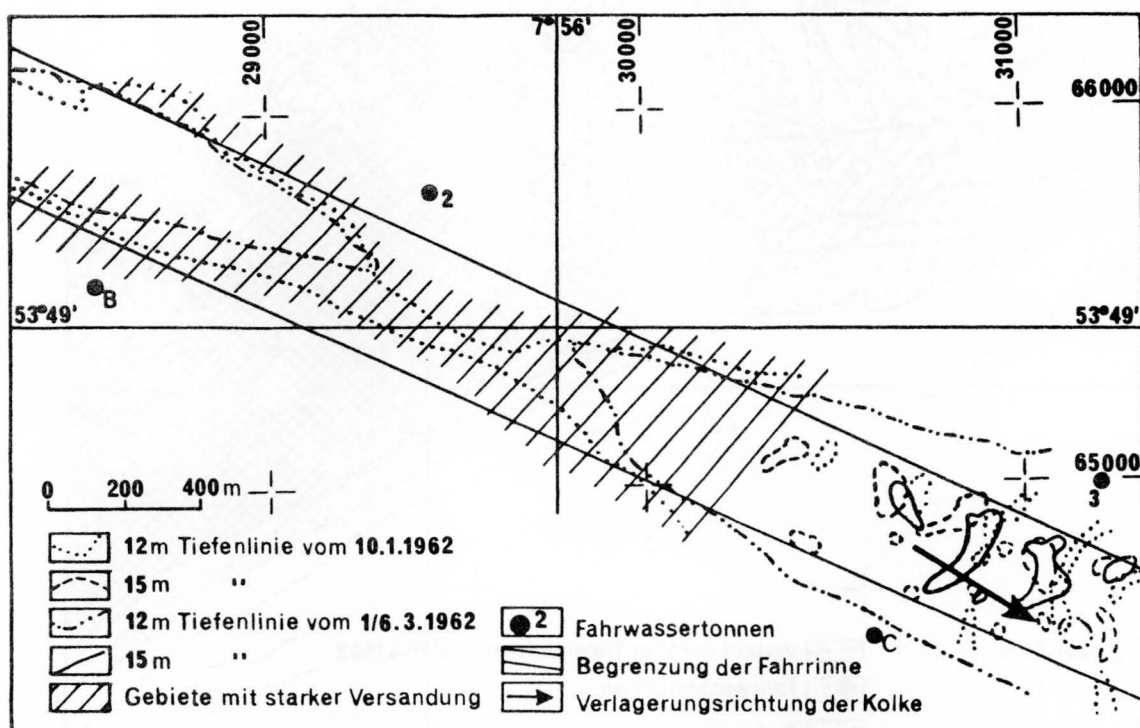


Abb. 6 Verlagerung der 12 m- und 15 m-Tiefenlinien vom 20.1. bis 1./6.3.1962

Die Anordnung der Linien gleicher Aktivität (Abb.7) zeigt, daß in größerer Tiefe (20 m) vor der Jade-Mündung bereits eine starke Sandverdriftung Richtung Außenjade vorhanden ist. Diese Sandmengen nehmen in dem Bereich der Platen und Rinnen unterschiedliche Wege, bevor sie nach Nordosten versetzt werden. Der WNW gerichtete starke Ebbstrom ist in der Rinne bzw. im Nordteil der Rinne, in der Blauen Balje, und auch auf der Wangerooger Plate transportwirksam.

*) vergl. Schrifttum hierzu [10] [13] [17] [57]

Diese Richtung wird vom Fluttransport jedoch im engeren Bereich des Wangerooger Fahrwassers aufgehoben. Dies zeigen besonders die großen Mengen gekennzeichneten Sandes, die in den östlich der Einbringestellen gelegenen Baggerabschnitten festgestellt wurden. Allerdings lassen die Versuche auch die Folgerungen zu, daß gewisse Mengen mit der Ebbe hinaus transportiert werden. Die ausgeprägt schmale Ausbreitungsform des markierten Materials in seewärtiger Richtung kann kein Zufall sein. Diese Sandmengen können dem West-Ost gerichteten Materialtransport zugeführt werden und somit besteht die Möglichkeit, daß der Sand mit der Flut in die nächste Rinne (Mittel-Rinne) gelangt.

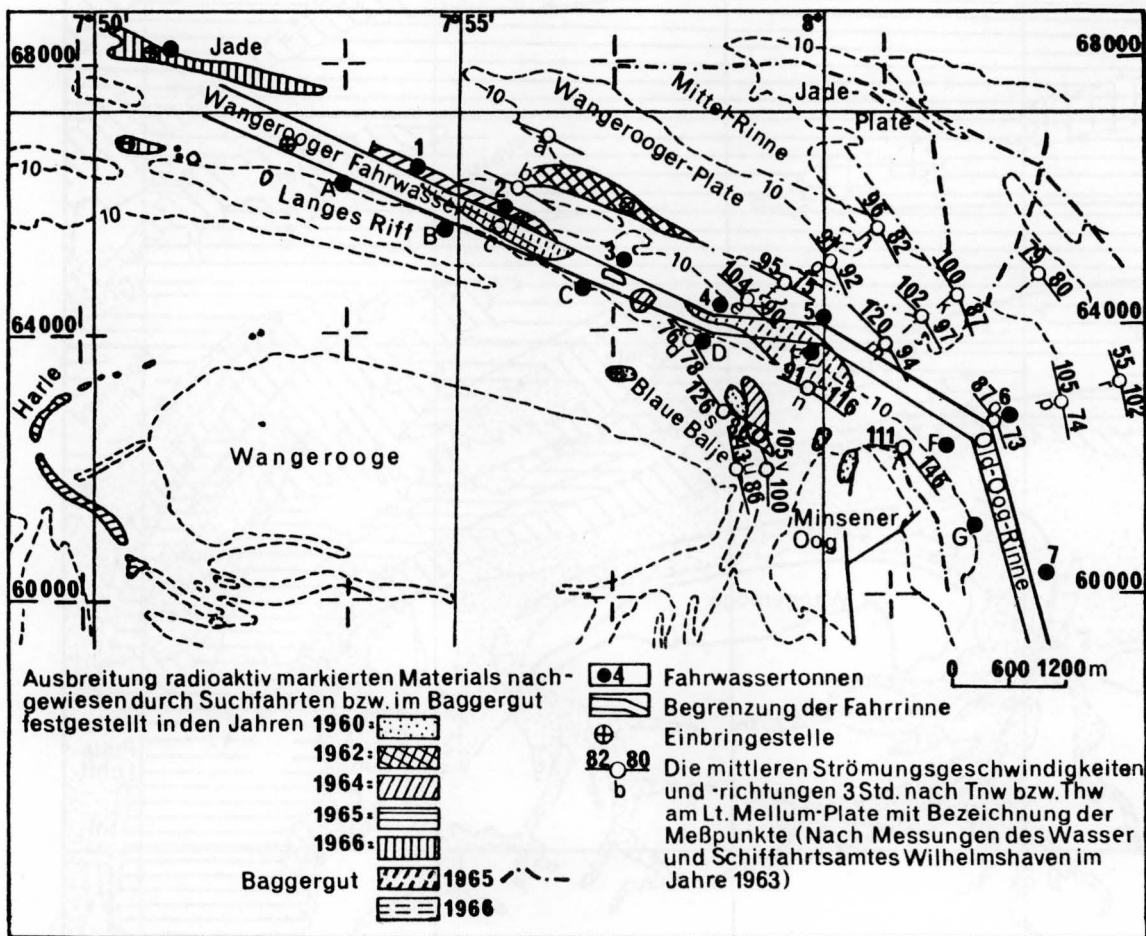


Abb.7 Transport des radioaktiv markierten Materials und die mittlere Richtung der mittleren Ebb- und Flutströmung

Auf der Südseite des Wangerooger Fahrwassers überwiegt der Fluttransport so stark, daß eine Sandbewegung in Ebbrichtung nur in ganz unwesentlichem Umfang festgestellt werden konnte.

Dieses Bild der Materialbewegung dürfte für die anderen Rinnen ebenfalls gültig sein.

Zusammenfassend ergibt sich, daß der westostwärts wandernde Sand beim Überqueren der Außenjade im Bereich der Rinnen und Platen in Abhängigkeit von den morphologischen und hydrologischen Gegebenheiten unterschiedliche Wege einnimmt. Anhand der ausgeführten Untersuchungen unter Verwendung der Ergebnisse anderer Forschungen*) läßt sich von der vermutlichen Bahn eine Vorstellung geben, welcher der Sand folgt.

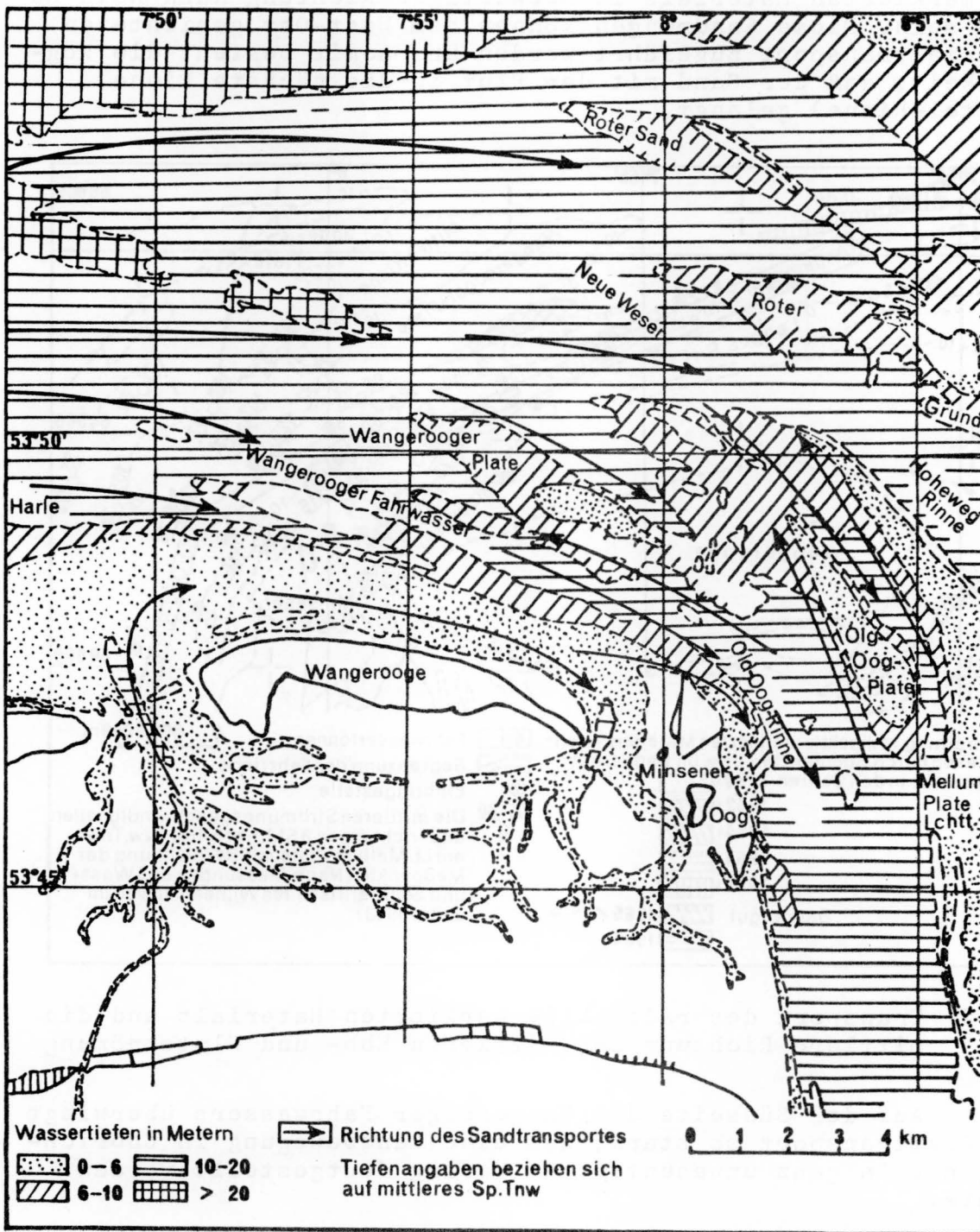


Abb.8 Sandbewegung in der Jade-Mündung

*)vergl. Schrifttum hierzu [26] [50]

1. Ein Teil des Sandes wandert vor der Jade-Mündung weiter nach Osten.
2. Das durch die Flut bewirkte Vordringen des Sandes wird in dem inneren Bereich der Rinnen von dem Ebbstrom fast kompensiert. Der Sand wird Richtung See so weit zurücktransportiert, bis er von der Flutströmung wieder erfaßt wird. Das Material bewegt sich also in der Rinne im Rhythmus der Gezeiten, und zwar bei Flut mehr an der Südseite, bei Ebbe deutlich an der Nordseite der Rinne in Form von submarinen Sanddünen (Tidestrombänke, Riesenrippeln und darauf schneller wandernden Großrippeln).
3. Entlang des Vorstrandes in der Brandungszone wandert der durch den Seegang aus der West-Ostdrift herangeführte Sand vor Wangerooge in Form von Riffeln und Rippen über das Riff-Gebiet der Blauen Balje weiter von Bühne A nach Bühne B. In Untiefen östlich und südöstlich von Minsener Oog zwischenlagernd, wird er von dem Ebbstrom wieder erfaßt oder weiter in Richtung Old-Oog-Plate verfrachtet. Hier dürfte man im eigentlichen Sinne von einem Nordosttransport sprechen.
4. Während die Hauptmenge des Sandes in dem engeren Bereich der Rinnen bleibt, wird ein Teil aus diesem Raum hinausgefördert. Für diese Sande gibt es folgende Transportrichtungen:
 1. Der Sand wird dem westost gerichteten Materialstrom zugeführt.
 2. Der Sand überquert die Platen unmittelbar in östlicher Richtung oder wird um die Enden der Platen herumgeführt.

Ein resultierender Nordost-Transport besteht nicht in der Weise, wie das aus den früheren Vorstellungen bekannt ist. Die Hauptmenge des Sandes wird nicht in die Richtung der Platenverlagerung verfrachtet. Dagegen mögen die folgenden Argumente aufgeführt sein:

1. Die Vektoren des Reststromes in den Rinnen zeigen eine Resultierende nach Südwesten oder Westen (Abb.8).
2. Die Ausbreitungsform des markierten Sandes ist eine mehr oder minder schmale Bahn, die in Richtung des Gezeitenverlaufs weist. Die kaum vorhandene Streuung des ausgebrachten Materials ist eine weitere Bestätigung gegen einen Nordost-Transport über die Platen hinweg.
3. Die Gefügerichtungen verlaufen parallel oder schräg zu beiden Seiten der Platenlängsachsen *).
4. Fehlen von Großrippeln auf den Platen.
5. Der Nordosten der Platen ist fast unbesiedelt.

3.2 Weser-Mündung

Im Seegebiet zwischen Robben-Plate und Tegeler-Plate wurden im Jahre 1961 und 1965 Untersuchungen mit radioaktiven Isotopen vorgenommen**), um über den Verbleib der geklappten Bodenmassen am nördlichen Fahrwasserrand ausreichende Auf-

*) vergl. Schrifttum hierzu [50]

**) vergl. Schrifttum hierzu [6] [11]

schlüsse zu gewinnen. Zur Ergänzung der durchgeführten Untersuchungen wurde die morphologische Entwicklung näher in Betracht gezogen*).

Das Hauptcharakteristikum des Untersuchungsgebietes ist das Vorhandensein mehr oder minder gut ausgeprägter asymmetrischer Rücken. Der von Südwesten flach ansteigende und nach Nordosten mäßig steil abfallende Robben-Nordsteert wird durch die Rinne Dwars-Gatt von der Tegeler-Plate getrennt.

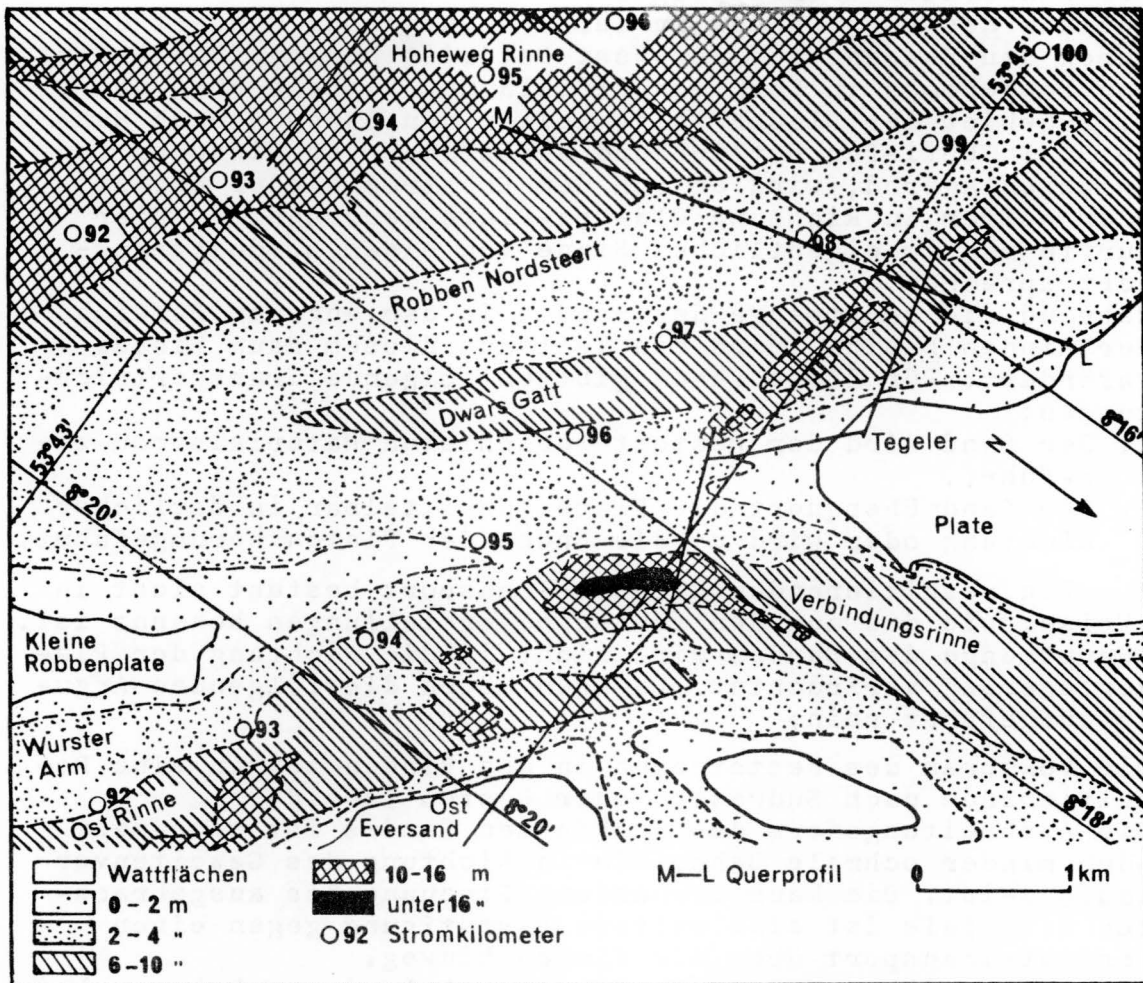


Abb.9 Bodenrelief im Bereich des Dwars-Gatt im Jahre 1958

Die mit radioaktiv gekennzeichnetem Sand ausgeführten Versuche haben gezeigt, daß bei den Messungen von 1961***) das Material auf die Robben-Plate zuwanderte. Ablagerungen wurden auf dem Robben-Nordsteert und unmittelbar am Leitdamm Robben-Nordsteert festgestellt.

*) vergl. Schrifttum hierzu [11]

**) vergl. Schrifttum hierzu [6]

Weitere interessante Ergebnisse brachten die Versuche *) im Jahre 1965. Das Indikatormaterial zeigte in den ersten Tagen der Messung ein etwas breiteres Streuungsgebiet, die Ausbreitungsform weist nach Westen, Osten und Norden. An den nächsten Tagen ist die Ausbreitungsrichtung nach Norden gerichtet. Die Kartenvergleiche für die Zeit von 1958 bis 1964 (Tiefenänderungspläne, Karte der Linien gleicher Tiefenänderung und Veränderung der Tiefenlinien) zeigen, daß in dem Untersuchungsraum nicht nur starke Niveauänderungen festgestellt wurden, sondern die Unterwasser- Voll- und Hohlformen eine deutliche Verlagerung erfuhren.

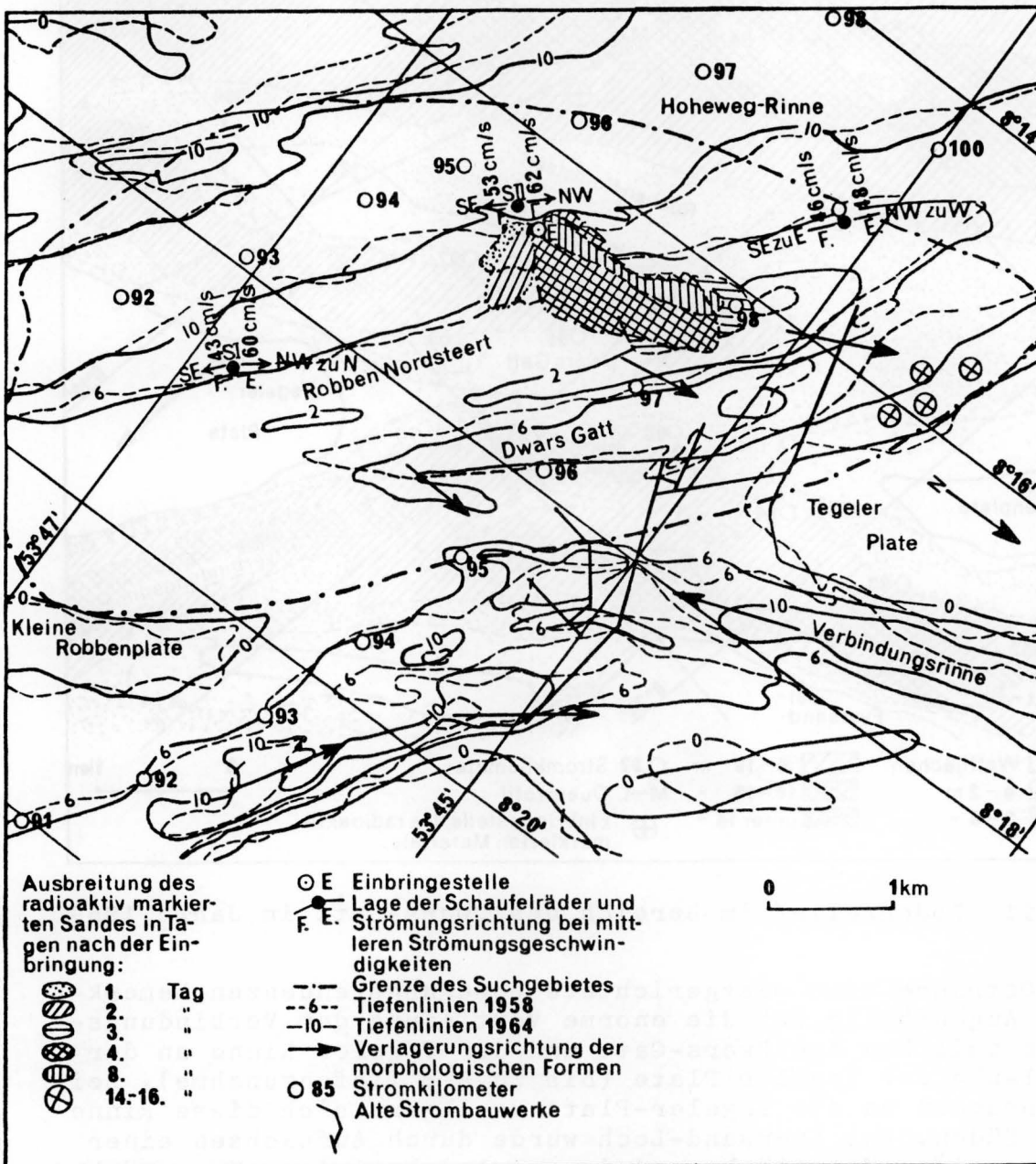


Abb.10 Sandwanderungsmessungen mit radioaktiven Isotopen und Veränderung der Morphologie im Gebiet Robben-Nordsteert

*) vergl. Schrifttum hierzu [11]

Auffallend ist die starke Erhöhung (bis 6 m) des zum Fahrwasser parallelen Robben-Nordsteerts. Dieser langgestreckte Unterwasser-Sandrücken rückt zusammen mit der Rinne Dwars-Gatt nach Norden und Nordwesten zu der Tegeler Plate. Ebenfalls zeichnet sich das Gebiet entlang der $8^{\circ} 18'$ geographischen Länge im Bereich der Verbindungsrinne und die Umgebung der Kleinen Robben-Plate durch Tiefenabnahme aus. Dagegen zeigt der westliche Ausgang des Wurster Armes (Ostrinne) eine Tiefenzunahme. Am Westende der Kl. Robben-Plate und in

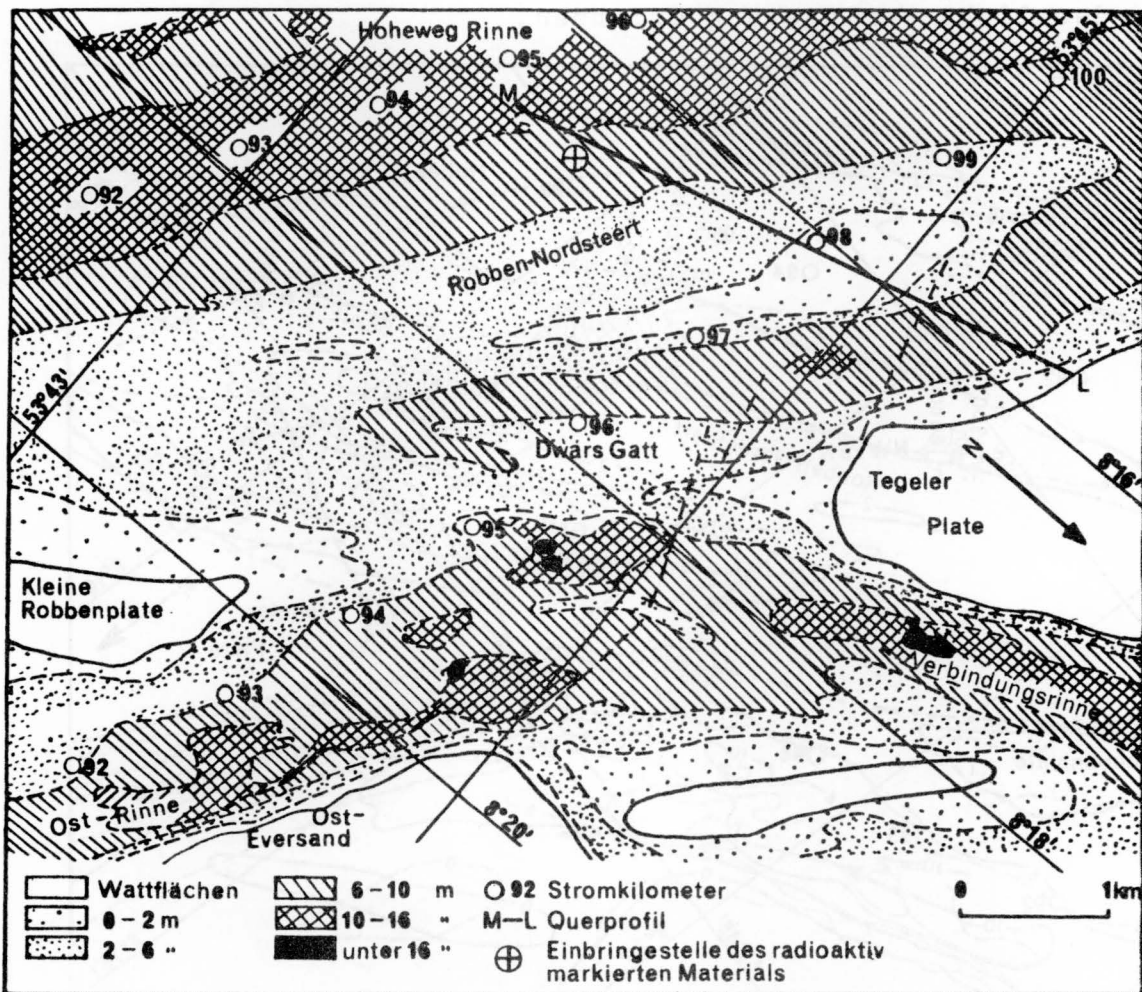


Abb.11 Bodenrelief im Bereich des Dwars-Gatt im Jahre 1964

der Ostrinne sind westgerichtete Bewegungstendenzen bemerkbar. Augenfällig ist die enorme Vertiefung der Verbindungsrinne zwischen dem Dwars-Gatt und der Tegeler Rinne an der Ostflanke der Tegeler Plate (bis zu 8 m Tiefenzunahme). Bei Heranrücken an die Tegeler-Plate verlagert sich diese Rinne nach Süden. Das Eversand-Loch wurde durch Aufwachsen einer hakenartigen Wattfläche und deren gleichzeitiges Heranrücken an den Ost-Eversand stark eingengt.

Während die Tiefenänderungspläne einen zusammenhängenden Überblick über das Gebiet veranschaulichen, vermitteln die Querprofile Veränderung und Zustand eines kleineren Abschnittes. Im großen und ganzen finden wir das bereits durch die Auswertung der Kartenvergleiche gewonnene Bild bestätigt.

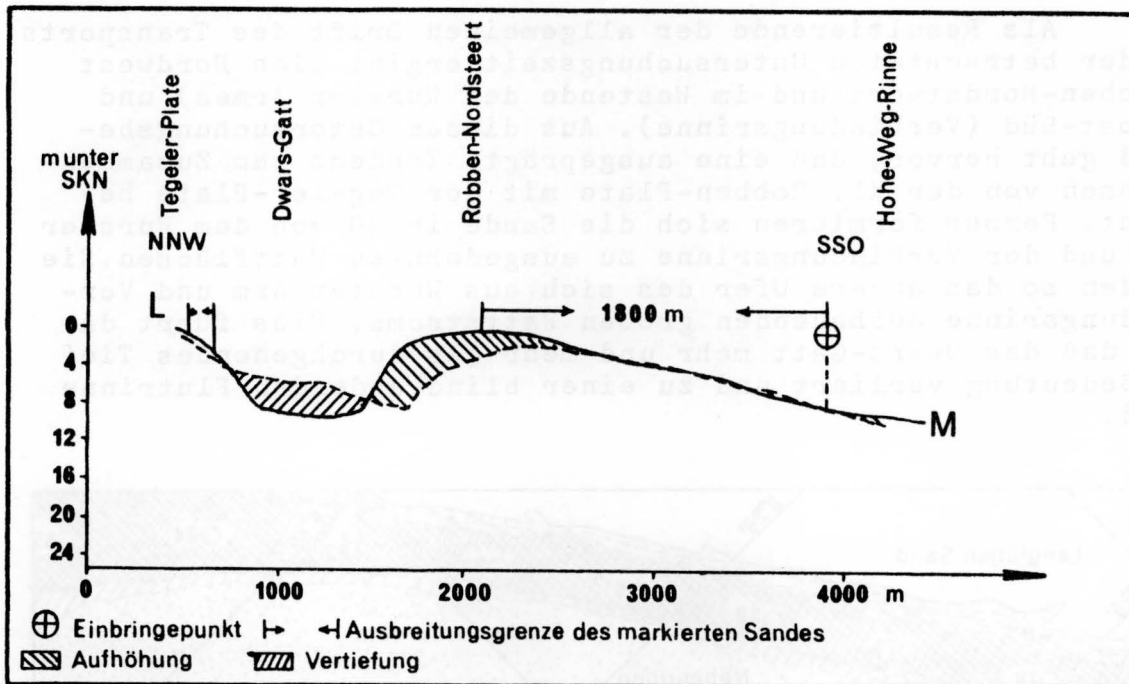


Abb.12 Querprofil über den Robben-Nordsteert

Die Querprofile lassen erkennen:

1. Die verhältnismäßig stark zunehmende Asymmetrie der Rücken
2. Die Versteilung der Rinnenböschungen
3. Die Aufhöhung der breiten Rückenfläche des Robben-Nordsteerts
4. Den relativ hohen Verlagerungsbetrag der Rinnen und Rücken (200-300 m).

Abgesehen von dem Gebiet um die alten Seebauwerke kann also ein gleichlaufender Entwicklungsgang des Bodenreliefs festgestellt werden.

Im augenblicklichen Zustand der Entwicklung führt die Aufsandung des Robben-Nordsteerts bei der stetigen Nordwärtsverlagerung zu einer Verflachung des Dwars-Gatt. In Anbetracht der Tatsache, daß die resultierende Sanddrift der radioaktiv markierten Sande eine nördliche war, bedarf es keines Zweifels mehr, daß während der Untersuchungszeit ein überwiegender Ebbtransport das Anwachsen des Robben-Nordsteerts verursacht hat. Jedenfalls ist für die Erhöhung der Rückenfläche derartiger Formen an sich schon ständig neue Sandzufuhr von der Luv-Seite erforderlich. Offenbar ist die langsame,

aber stetige Ausräumung der Verbindungsrinne auch mit einer Sandzufuhr verbunden. Das Material gelangt bis in den Bereich der Unterwasserbauwerke (Abb.10) und der Kl. Robben-Plate. An der Südseite des Ost-Eversandes (Ostrinne) scheint wieder die Ebbströmung wirksam zu sein.

Als Resultierende der allgemeinen Drift des Transports in der betrachteten Untersuchungszeit ergibt sich Nordwest (Robben-Nordsteert und im Westende des Wurster Armes) und Südost-Süd (Verbindungsrinne). Aus diesem Untersuchungsbefund geht hervor, daß eine ausgeprägte Tendenz zum Zusammenwachsen von der Kl. Robben-Plate mit der Tegeler-Plate besteht. Ferner formieren sich die Sande im NO von dem Wurster Arm und der Verbindungsrinne zu ausgedehnten Wattflächen. Sie bilden so das andere Ufer des sich aus Wurster Arm und Verbindungsrinne aufbauenden großen Wattstroms. Dies führt dazu, daß das Dwars-Gatt mehr und mehr als durchgehendes Tief an Bedeutung verliert und zu einer blind endenden Flutrinne wird.

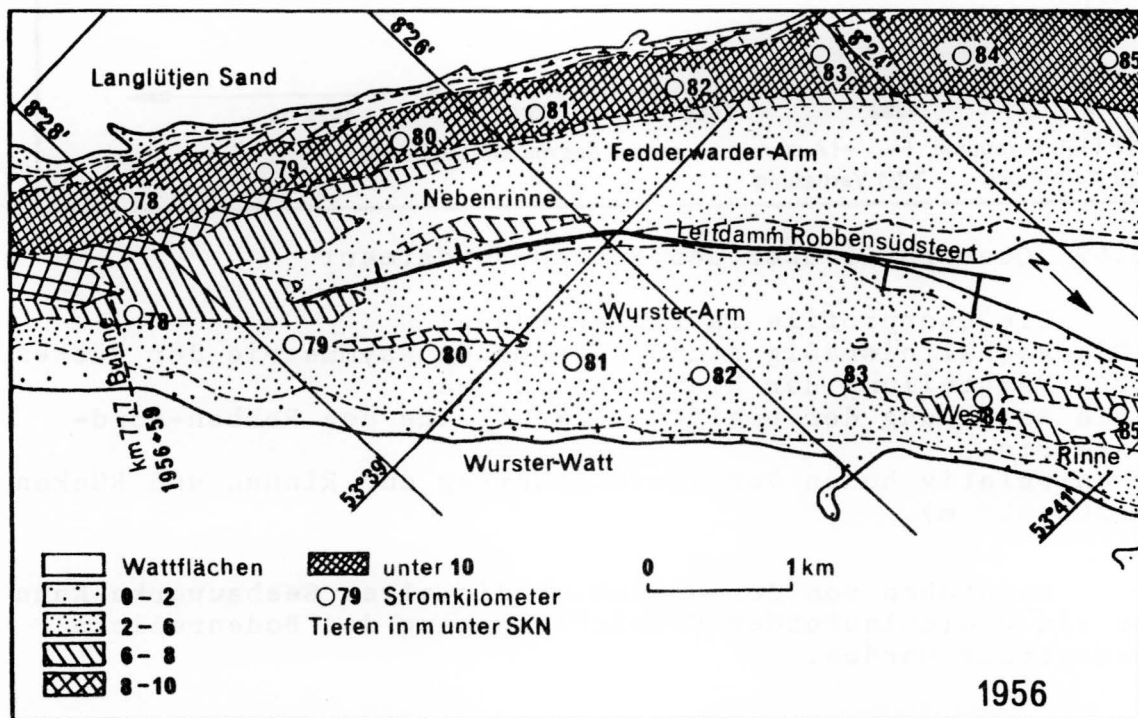


Abb.13 Bodenrelief der Außen-Weser zwischen km 77 und km 85

Es ist notwendig, in diesem Zusammenhang die morphologische Entwicklung am oberen Ende des Wurster Armes zu betrachten. In der Zeit von 1956 - 1959 führte man umfangreiche Baumaßnahmen zwischen km 77 und km 85 durch. Auf dieser Strecke unterteilt die Robben-Plate die Außenweser in zwei ungleich ausgebildete Rinnen, von denen der Wurster Arm dem Fedderwarder Arm hydrologisch untergeordnet ist. Den morphologischen Zustand im Jahre 1956 zeigt Abb.13.

Um die Auswirkungen der Regelungsmaßnahmen feststellen zu können, wurden die Veränderungen der hydrologischen Verhältnisse untersucht *). Im Stromquerschnitt der Weser bei Strom-km 81 sind in den Jahren 1956, 1960 und 1964 Strommessungen durchgeführt worden. Die vergleichende Betrachtung der einzelnen Ergebnisse läßt schon die unterschiedliche Entwicklung in den beiden Armen erkennen (Tab.1 und 2).

TABELLE 1
Tidewassermengen*) im Meßquerschnitt bei km 81 nach Messungen von 1956 1960 und 1964 in 10⁶m³

Bezeichnung der Teilrinne	Fedderwarder Arm						Wurster Arm					
	Flut			Ebbe			Flut			Ebbe		
	1956	1960	1964	1956	1960	1964	1956	1960	1964	1956	1960	1964
Gesamtarm	203.0	206.0	212.0	190.0	215.0	215.0	76.0	76.8	84.5	103.5	75.6	93.0
Hauptrinne	153.0	143.5	152.5	125.0	131.0	133.0	53.0	53.5	62.4	71.0	52.6	75.7
Nebenrinne	50.0	62.5	59.5	65.0	84.0	82.0	23.0	23.3	22.1	32.5	23.0	17.3

*) Alle Vergleichswerte in dieser Zusammenstellung sind umgerechnet auf die aus den 4 Meßtiden von 1964 gemittelte Vergleichstide.

TABELLE 2
Zeitliche Mittelwerte*) der mittleren Querschnittsgeschwindigkeiten in m/sek

Bezeichnung der Teilrinne	Fedderwarder Arm						Wurster Arm					
	Flut			Ebbe			Flut			Ebbe		
	1956	1960	1964	1956	1960	1964	1956	1960	1964	1956	1960	1966
Gesamtarm	61.5	65.0	61.7	72.2	76.0	76.6	45.2	42.0	51.4	61.0	41.0	56.7
Hauptrinne	74.5	75.0	73.0	72.5	79.2	72.6	42.5	42.8	50.7	64.2	42.2	62.9
Nebenrinne	46.5	55.5	48.5	71.7	72.0	81.0	51.5	40.0	53.2	52.9	38.2	39.0

*) gemittelte über die Flut - bzw. über die Ebbstromdauer

Für die Beurteilung der Entwicklungstendenzen der beiden Rinnen war es von großer Bedeutung, Kenntnisse über die Wandlung des Bodenreliefs auch von den an den Meßquerschnitt angrenzenden stromauf und seewärts liegenden Gebieten zu gewinnen. Daher wurden die morphologischen Untersuchungen**) in die hydrologischen einbezogen.

Das südwestlich des Leitdammes Robben-Nordsteert gelegene Gebiet ist am stärksten von Veränderungen betroffen (Abb. 14). Aus den einzelnen Kolken entwickelte sich fortlaufend seit 1956 unter gleichzeitiger Vergrößerung des Querschnitts und Zunahme der Tiefen eine durchgehende Rinne, die von der Gegend km 77 bis km 82 klar erkennbar ist. Unterhalb der

*) vergl. Schrifttum hierzu [16] [73]
**) vergl. Schrifttum hierzu [16]

Erosionsstrecke ist auf der rechten Fahrwasserseite zwischen km 82 und km 85 eine größere Aufsandungsfläche vorhanden. Offensichtlich läßt die Räumkraft der Weser nach, zumal neben der Stromdivergenz zwischen Ebb- und Flutweg auch eine Vergrößerung des Querschnitts eintritt. Die Wirkung des Ebbstroms ist in schwachen Ansätzen in Form von zwei flachen Teilrinnen vorhanden.

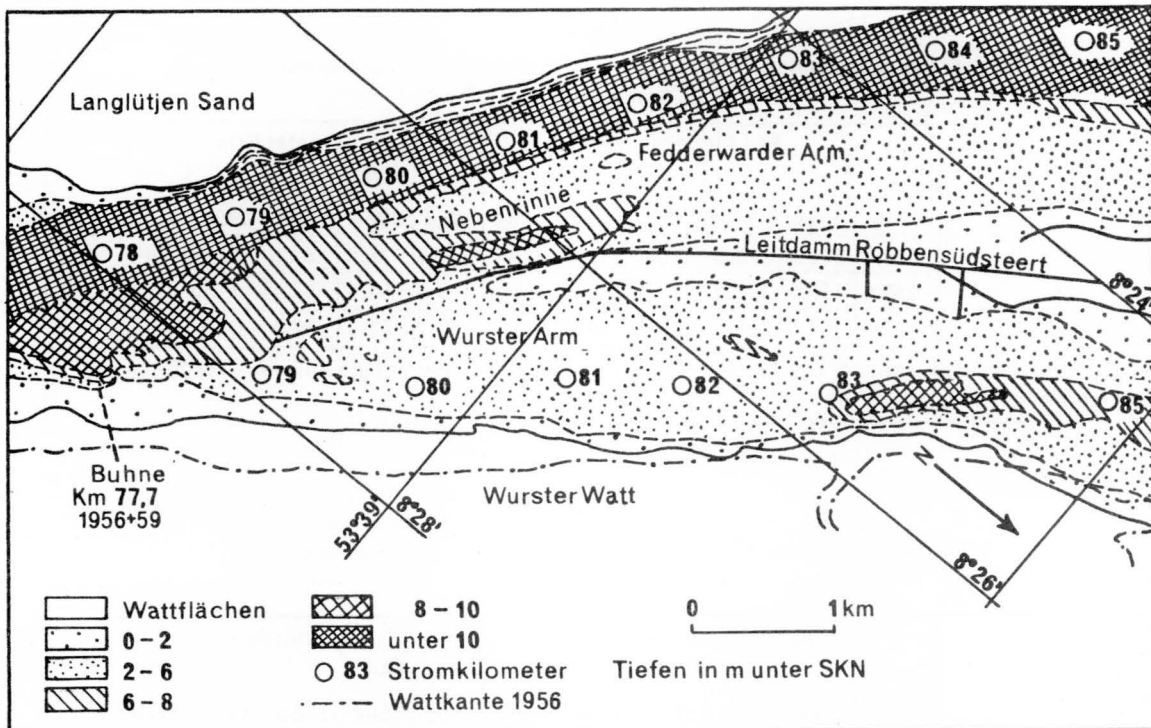


Abb.14 Bodenrelief der Außen-Weser zwischen km 77 und km 85

Die Auswirkungen der Buhne in dem Wurster Arm sind ebenso bedeutend wie in dem Fedderwarder Arm. Ein Teil der bisher hier durchfließenden Ebbstrommengen geht verloren. Damit ändert sich die dynamische Lagestabilität des Gebietes. Die anteilmäßige Transportkraft des Flutstroms vergrößert sich, die Folge ist die Verlagerung der Westrinne flußaufwärts. Unterhalb der Buhne km 77,7 (und auch oberhalb) tritt eine beträchtliche Versandung vor dem Wurster Watt ein.

Es muß darauf hingewiesen werden, daß die Umgestaltung der Gewässersohle in den beiden Armen nicht nur die Folge der geänderten hydrologischen Verhältnisse, sondern auch naturbedingt ist. Die durch die beiden Ursachen bestimmten Entwicklungen greifen ineinander.

Infolge der geänderten hydrodynamischen Verhältnisse ging ein beachtlicher Materialversatz vor sich. Hierbei handelt es sich in erster Linie um engräumige Umlagerungen.

Bei der vergleichenden Betrachtung der beiden Gebiete (Robben-Nordsteert und Wurster Arm) fällt die zeitlich zusammentreffende Entwicklung auf. Zweifellos waren schon vor 1956 Versandungs- (Robben-Nordsteert, mittlerer Abschnitt des Wurster Arms) bzw. Vertiefungserscheinungen (Verbindungsrinne, Ostrinne) erkennbar, allerdings erst seit 1962 zeichnen sich starke Tiefenänderungen und Materialverlagerungen ab, wie die Volumenänderung die Nebenrinne des Fedderwarder Armes es zeigt.

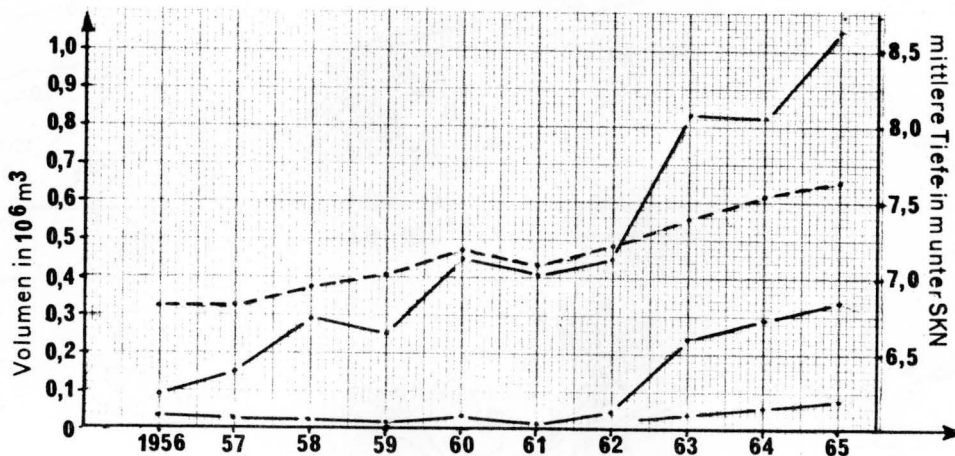


Abb.15 Volumenänderung der Nebenrinne des Fedderwarder Armes unterhalb der 6, 7 und 8 m Tiefenlinie sowie die Änderung der mittleren Tiefen unterhalb 6 m

Die seit 1962 beginnende sprunghafte Entwicklung der bereits bestehenden Vorgänge läßt die Vermutung entstehen, daß die Regelungsmaßnahmen für den behandelten Weser-Abschnitt von Einfluß waren.

3.3 Elbe-Mündung

Die Untersuchungen bei Cuxhaven^{*)} und im Raume Brunsbüttelkoog^{**)} lieferten wertvolle Angaben über den Verbleib des verklappten Baggergutes und gleichzeitig Rückschlüsse über die Bewegung des Sandes (Abb.1).

In Kombination mit den Isotopen-Untersuchungen wurden auch Luminophoren-Untersuchungen in der Brandungszone vor Scharhörn und im Scharhörnloch^{***)} durchgeführt (Abb.16). Die ausgebrachten markierten Körner erleiden eine Zerstreuung, über deren Charakter die räumlich-zeitliche Verteilung der Radioaktivität und der mit lumineszierenden Stoffen gekenn-

*) vergl. Schrifttum hierzu [7]

***) vergl. Schrifttum hierzu [8]

***) vergl. Schrifttum hierzu [15]

zeichneten Sande Aufschluß geben. Diese Arbeitsweise erlaubte die Ausbreitungsrichtung und Ausbreitungsgeschwindigkeit der Sedimente im Untersuchungsraum zu bestimmen. Bei Scharhörn verläuft die Sandbewegung an der Wattkante im allgemeinen von West und biegt in die Elbmündung hinein. Die Verlagerung geht hier relativ schnell vor sich im Gegensatz zum Watt selbst. Hier ist die Bewegung relativ langsam. Es lassen sich Haupt- und Nebentransportrichtungen erkennen.

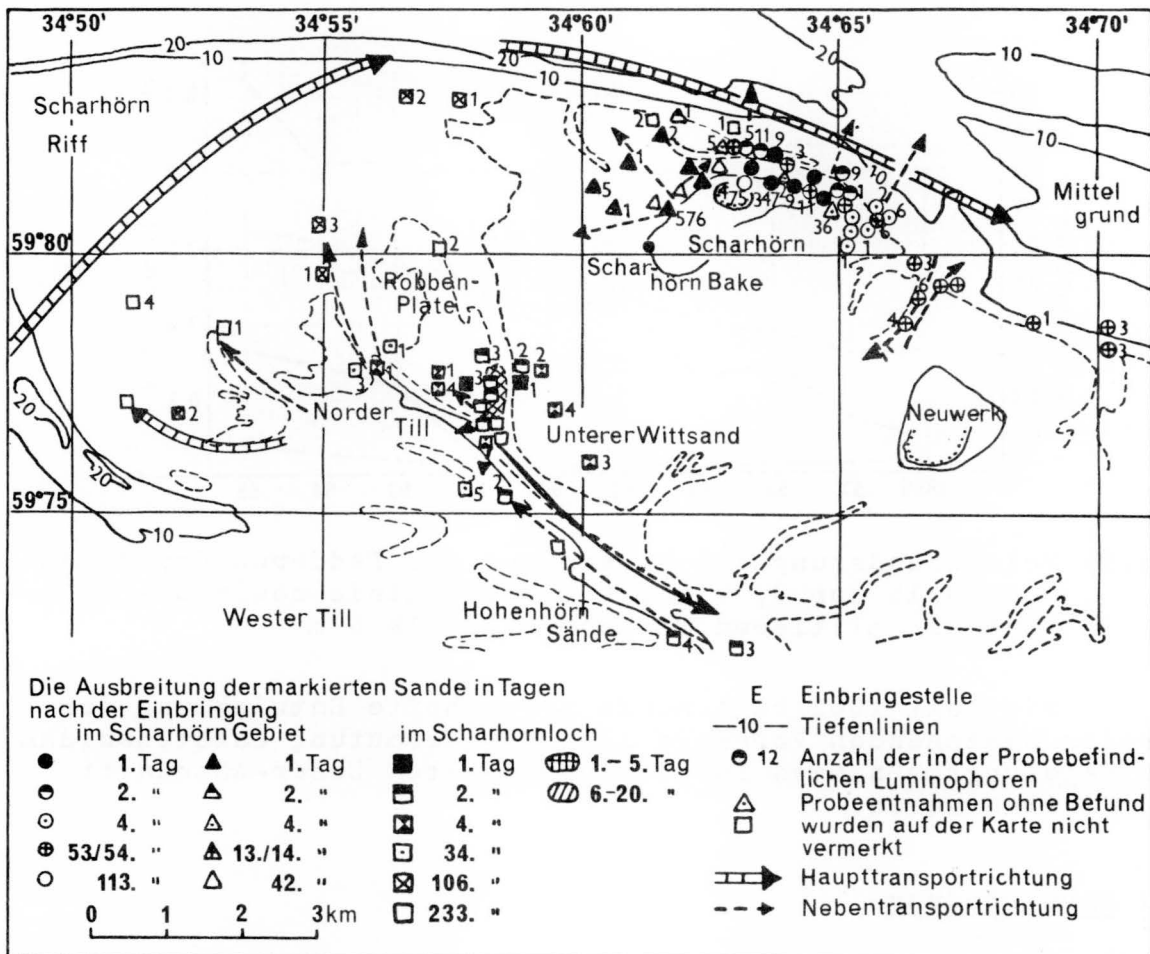


Abb.16 Materialbewegung im Wattgebiet Neuwerk-Scharhörn aufgrund der kombinierten Untersuchungen mit Isotopen und Luminophoren

Bei dem Versuch zeigte sich, daß die gekennzeichneten Körner ein gewisses Streuungsgebiet bildeten, das ziemlich weit entfaltet ist. Das beweist, daß auf dem Vorstrand gleichzeitig ein Längs- und ein Quertransport stattfindet bzw. daß die Windrichtungen einen Einfluß auf die Zwischentransportrichtungen ausüben. Im Scharhörn-Loch und in seiner näheren Umgebung, das zum Till-Stromrinnen-System gehört, zeigt die Bewegung des Sandes einen anderen Verlauf wie in den Ästua-

rien von Weser, Jade und Elbe. Normalerweise wandert der Sand aus der Richtung des Flutstromes gesehen rechtsseitig in die Flußmündung ein und linksseitig aus. Der durch das Scharhörn-Loch mit dem Flutstrom aus der Elbe in Norder- und Ostertill gelangende Sand wird zum Teil in diesen Rinnen hin- und herbewegt, wobei geringe Mengen auf den Platen, besonders auf den Robbenplatten zwischenlagern können. Der Hauptteil wird in Richtung Westertill verfrachtet, an deren Mündung er sich in den west-ost gerichteten Sandstrom der Deutschen Bucht eingliedert.

Die Unterschiede der Bewegungsrichtungen geben Hinweis darauf wie die Kräfte, die den Transport wirksam gestalten und erhalten, durch die morphologische kleinräumige Gliederung des Gebietes örtlich Abwandlungen erfahren können.

3.4 Übrige Gebiete

Im weiteren kann hier eine Schilderung der einzelnen Untersuchungen nur andeutungsweise berührt werden. Grundsätzlich ist zu sagen, daß es in den genannten Gebieten möglich war, mit Hilfe der Isotopen und Luminophoren im Zusammenhang den Verlauf der Sedimentbewegung genau zu erfassen.

Drei Versuche mit Luminophoren (Abb.1) wurden in der Kiesschüttung vor Norderney gemeinsam mit der Forschungsstelle Norderney vorgenommen. Das Ergebnis war, daß eine Kieswanderung bei stürmischem Wetter über die Bühnen weg von der Hauptangriffsstelle des Seeganges gesehen nach zwei Richtungen erfolgt.

Die Versuche *) in der Brandungszone vor Sylt **) und auf dem Knechtsand ***) bzw. in der Robinbalje hatten zunächst mehr oder weniger informatorischen Charakter (Abb.1). Das Ziel war die Eignung der radioaktiven- (Sylt) und Luminophoren-Methode (Knechtsand) zum Erkennen des Materialtransportes in Gewässern mit Gezeitenwirkung. Bei dem wiederholten kombinierten Einsatz mit Luminophoren und radioaktiven Leitstoffen vor der Sylter Küste hat man gute Ergebnisse hinsichtlich der Sedimentbewegung in der Brandungszone erzielt.

Ferner sind noch die Schlickuntersuchungen (durchgeführt von der WSD Hamburg) in der Oste zu erwähnen (Abb.1).

*) Durchgeführt von dem Landesamt für Wasserwirtschaft Schleswig-Holstein und von dem Geol. Institut der Universität Kiel

**) vergl. Schrifttum hierzu 24

***) vergl. Schrifttum hierzu 42

Auf dem Knechtsand und Eversand wurden Messungen über die Wanderung der oberflächennahen Sedimente mit Hilfe der Blausandmethode *) durchgeführt. Eine willkommene Ergänzung der Luminophoren- und radioaktiven Methode ist das von H. Lüneburg**) entwickelte sog. "natural tracers"-Verfahren. Er benutzt die an den Sedimentkörper angelagerten Brauneisensteine als Leitfaktor in der Weise, daß in dieser Eisenverbindung mehr oder minder eingeschlossene Körner quantitativ unter dem Begriff der sog. Braunkorn-Zahl erfaßt werden.

Aufgrund der historisch-kartographischen Betrachtung des Eiderraumes wurde die Veränderung des Sandversatzes in diesem Gebiet ermittelt. Schließlich wurde anhand der Untersuchungen in der Eidermündung***), die das Ziel hatten, die Veränderungen des Rinnenverlaufs und ihre Beständigkeit festzustellen, ein häufiges Verspringen der Rinnen ermittelt. Die Verlagerungen der Hauptrinne finden in Abständen von 20 - 25 Jahren statt.

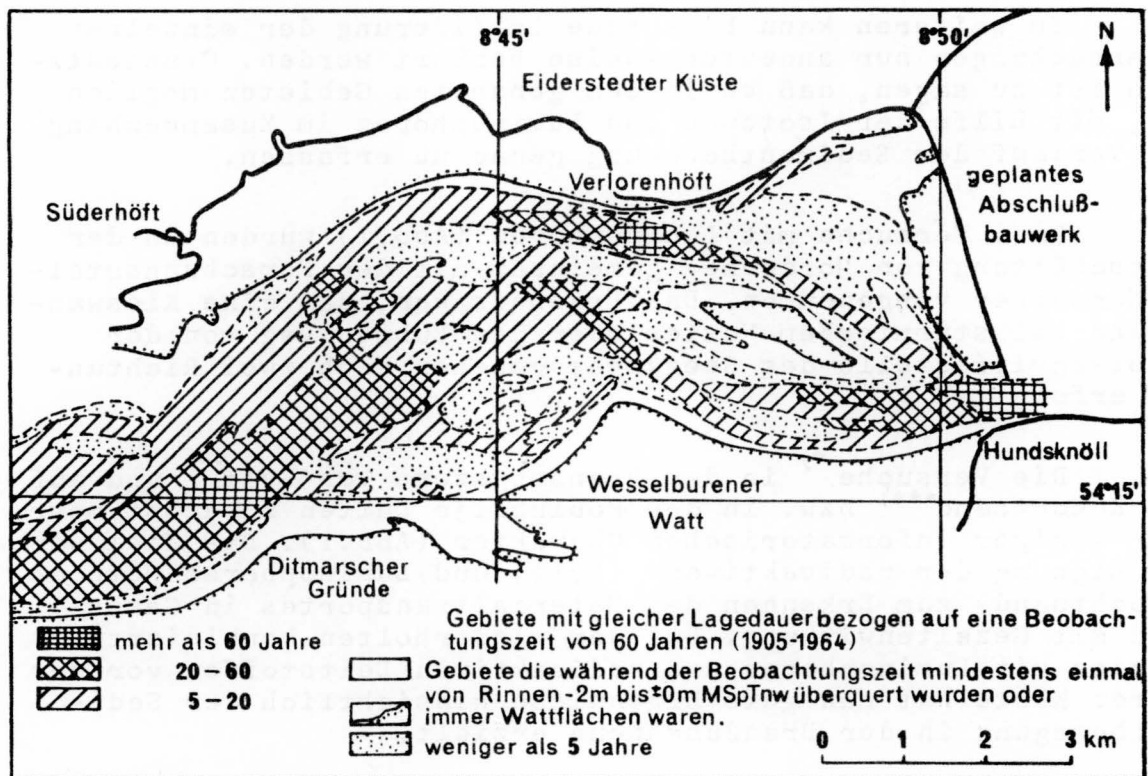


Abb.17 Beständigkeit der Lage der Stromrinnen im Mündungsgebiet der Eider

*) vergl. Schrifttum hierzu [39]
**) vergl. Schrifttum hierzu [40]
***) vergl. Schrifttum hierzu [12]

Dieser besondere Umstand der Unstetigkeiten beweist, daß die mit der Flut in die Eidermündung gelangten Sandmassen von der Ebbe nicht verarbeitet werden können, dies äußert sich auch in den ständigen Umlagerungen.

4. Herkunft und Wanderwege des Sandes

4.1 Allgemeines

Die Frage nach der Herkunft der Sandmassen ist außerordentlich wichtig. Zahlreiche Untersuchungen liegen bereits vor, die sich mehr oder minder mit diesem Problem beschäftigen. Wenn auch im einzelnen noch viele Fragen offen bleiben, so ist es doch möglich, anhand der bisherigen Untersuchungsergebnisse der geographischen, geologischen und hydrologischen Forschungen eine skizzenhafte großräumige Darstellung über die Herkunft und die Bewegung des Sandes zu geben.

4.2 Grundlagen der Herkunft und der Bewegung des Sandes

4.2.1 Topographie des Meeresbodens

Das in Betracht gezogene Gebiet umfaßt die südliche Nordsee von $55^{\circ}40'$ nördlicher Breite bis zum Ausgang des Kanals (Karte 1). Im Osten bilden die Mündungsbuchten der Flüsse ausgebildete Wattgebiete und ein System von natürlichen Stromrinnen. Zwischen Den Helder und der Jade-Mündung stellt die Kette der west- und ostfriesischen Inseln den nordwestlichen und nördlichen Abschluß des dem Festland vorgelagerten Wattengebietes dar. Nördlich der Elbe-Mündung gestalten durch die anders gearteten Verhältnisse die unregelmäßig zerstreut liegenden nordfriesischen Inseln und die Watten dazwischen die Westküste Schleswig-Holsteins und Dänemarks.

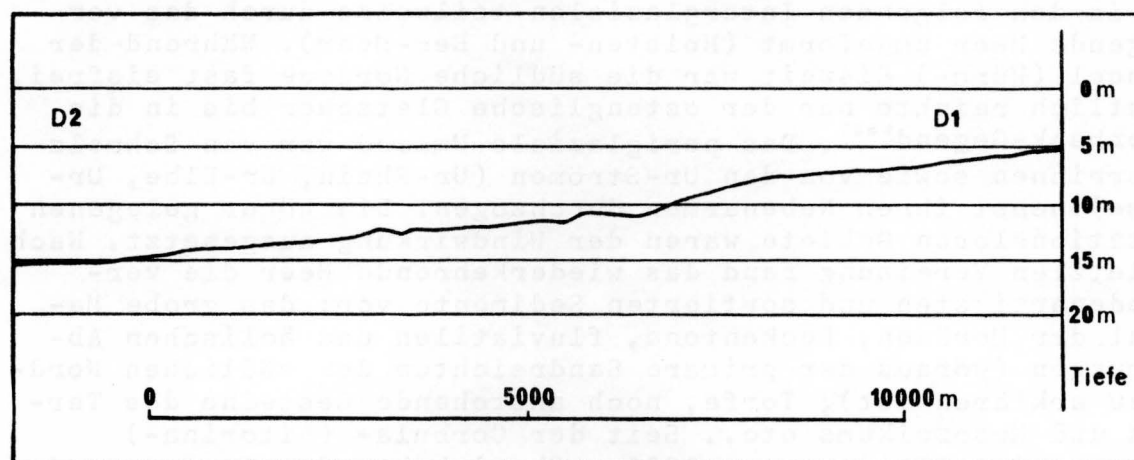


Abb.18 Echolotdiagramm senkrecht zur Sylter Küste in der Höhe von Kampen (schematisiert)

An den Vorstrandbereich schließt bis zur freien See ein ebener Flachseeboden an, der in etwa 10 m Tiefe einen schwachen Gefälleknick aufweist (Abb.18). Von der Jade bis nach Büsum fehlt dieser Bereich.

Die SO-NW gestreckte, stellenweise rd. 13 - 16 m unter dem Meeresspiegel liegende Doggerbank nimmt im zentralen Teil der Nordsee größere Areale ein. Ihre geringsten Tiefen liegen im Süden bzw. Südwesten (Südwest-Flach). Der von Norden und Osten flach ansteigende Boden fällt steil nach Süden (Outer-Silver-Pit) bzw. nach Westen ab. Zwischen Doggerbank, Jütlandbank und Borkumriff-Grund bildet das Bodenrelief*) eine weitläufige, tiefe, aber eintönige Mulde (Austern-Grund). Das lebhaft gegliederte Bodenrelief der Westhälfte der südlichen Nordsee steht im auffallenden Gegensatz zu der Einförmigkeit des Bodens der Becken (Karte 1). Ihr morphologisches Bild wird beherrscht von einem System von West-Ost bzw. Nord-Süd verlaufenden schmalen Rinnen und sich dazwischen erhebenden in Richtung der großen Achse der Gezeitenellipse streichenden, steil aus dem tiefen Wasser aufragenden Bänken (Leman-, Well- und Broken-Bank, Hewett Ridges), ferner von Einschaltungen kleinerer und größerer Mulden in unterschiedlichen Wassertiefen. Das Wattgebiet an der Ostküste Englands ist schmal entwickelt. Im Ostrand der Tiefen gruppieren sich submarine Sanddünen, die nach Osten in die geschlossenen Dünenfelder vor der holländischen Küste**) übergehen.

4.2.2 Bodenbeschaffenheit

In Bezug auf ihre Bodenarten zeigt die südliche Nordsee ebenfalls ein recht wechselvolles Bild (Karte 1). Diese Mannigfaltigkeit findet ihre Erklärung in der Entwicklung des Nordseeraumes. Die Eismassen der wiederholten Vereisungen stoßen aus Skandinavien und aus dem schottischen Hochland weit nach Süden vor. Im Laufe der Glaziale entstandener Formenschatz wird in den folgenden Interglazialen teilweise durch das vordringende Meer umgeformt (Holsten- und Eem-Meer). Während der Weichsel (Würm-) Eiszeit war die südliche Nordsee fast eisfrei, vermutlich reichte nur der ostenglische Gletscher bis in die Doggerbank-Gegend***). Das periglaziale Umland war von Schmelzwasserrinnen sowie von den Ur-Strömen (Ur-Rhein, Ur-Elbe, Ur-Themse) nebst ihren Nebenarmen durchzogen. Die höher gelegenen vegetationslosen Gebiete waren der Windwirkung ausgesetzt. Nach der letzten Vereisung fand das wiederkehrende Meer die verschiedenartigsten und sortierten Sedimente vor: das grobe Material der Moränen, Beckentone, fluviatilen und äolischen Ablagerungen (woraus der primäre Sandreichtum der südlichen Nordsee zu erklären ist), Torfe, noch anstehende Gesteine des Tertiärs und Mesozoikums etc.. Seit der Corbula- (Litorina-) Transgression (Beginn etwa 8000 v.Chr.) haben der Seegang und

*) vergl. Schrifttum hierzu [62]
**) vergl. Schrifttum hierzu [64] [65] [68]
***) vergl. Schrifttum hierzu [67]

die Strömungen gewaltige Umlagerungsarbeit geleistet und im östlichen Küstenraum der Nordsee einen 15 - 25 m mächtigen Sockel aus Sand aufgeschüttet.

Obwohl in Küstennähe die Sedimentdecke große Mächtigkeit erreicht, ist der wandernde Sand relativ dünn. Die vielerorts gefundenen Anhäufungen von Steinen, Kiesen und groben Sanden sprechen dafür, daß keine mächtige junge Sanddecke vorhanden ist, sonst müßten sie in stärkerem Maße zugeeckt sein. Noch heute stehen ältere Gesteine, vor allem Pleistozän, auf beträchtlichen Flächen unmittelbar am Meeresgrunde an. Das Material der Steingründe entspricht dem Aufbau der Endmoränen des benachbarten Festlandes. Das prämarine Relief paust sich überall in die dünne Sanddecke durch. Das jugendliche Alter des Nordsee-Beckens prägt sich in der Korngrößensortierung und dem submarinen Relief aus. Die ehemaligen Hohl- und Vollformen wurden nicht durch die erst zehntausend Jahre währenden marinen Vorgänge eingeebnet. Solche morphologischen Formen sind die vermutlichen Abflußrinnen der Urflüsse (der von Helgoland nach NNW verlaufenden Rinne, Outer Silver Pit, Western Mud Hole *) und die Moränen der eiszeitlichen Gletscher (Borkum-Riffgrund, südlicher Teil der Doggerbank und der von Horns Riff bis Helgoland verlaufende Rücken **).

Die großräumige Verteilung der Sedimente dürfte nach den eingehenden Untersuchungen hinreichend geklärt sein***).

Wird das gesamte Gebiet betrachtet, so ergibt sich - abgesehen von den Wattbildungen - eine Sedimentverteilung von gröber nach feiner mit zunehmender Tiefe. Den Wattsedimenten folgt ein breiter Streifen mittelsandiger Feinsande, der seewärts immer stärker in feinsandigere bis schlickige Bereiche übergeht (Karte 1). Das kennzeichnende Sediment der inneren Nordsee ist ein sandig-schluffiger Schlick mit einer geringen Beimengung von Ton (Helgoländer Rinne, N-Schlickbank, Austern-Grund, Outer Silver Pit, Western Mud Hole). Die ebenen, einförmigen Feinsandgebiete, die den größten Teil der südlichen Nordsee bedecken, werden vielerorts von gröberen oder feineren Sedimenten durchbrochen. In dem inneren Teil der Deutschen Bucht und auch im Westen der südlichen Nordsee sind die mittelsandigen Feinsande in einzelne Flecken und Streifen von verschiedenen Korngrößen aufgelöst und die unterschiedlichsten Bodenarten grenzen regellos aneinander. Der Borkum-Riffgrund, die Gründe und Riffe vor der Schleswig-Holsteinischen Küste, das Gebiet nördlich der Insel Langeoog sowie der südliche und südwestliche Teil der Doggerbank zeigen derartige Verhältnisse besonders deutlich.

*) vergl. Schrifttum hierzu [62]
**) vergl. Schrifttum hierzu [3] [45] [50] [70]
***) vergl. Schrifttum hierzu [29] [41] [45] [47] [50]

Die genannten Gebiete haben sich auch morphologisch erfassbar, wie seit langem es angenommen wurde, als Moränenrücken erwiesen *). Das gröbere Material der Fahrrinnen und der Gatts ist der selektiven Wirkung der höheren Strömungsgeschwindigkeiten zuzuschreiben; ein Teil stammt aus dem angeschnittenen Pleistozän. Auf den Platen im Mündungsbereich werden feinere Ablagerungen abgesetzt.

Im Gegensatz zum östlichen und mittleren Bereiche der Nordsee findet man hinsichtlich der Korngrößenverteilung im Westen und Süden, besonders im Gebiet stark alternierender Gezeitenströme, vorwiegend grobe Bodenarten vor. Die räumliche Sedimentfolge liegt umgekehrt der im Osten, das feinere Material wird mit der Entfernung von der Küste gröber. Die küstennahe Zone wird von der Themse-Mündung entlang der englischen Küste bis weit nach Norden von typischem Feinsande bedeckt. In der küstenferneren Zone treten ausgedehnte Felder groben Materials vor der englischen Ostküste im Gebiet Castle Grund, Flamborough Head bis über Outer Dowsing Shoal hinaus und zurück zur Küste von Norfolk sowie im Bereich der Teifen Rinne und Hoofden bis zum Ausgang des Kanals auf (Karte 1). In diesem Gebiet sind feinsandige Ablagerungen sowie größere Kies- und Steinvorkommen eingebettet. Die Nordgrenze bildet die Linie Helder-New Castle. Grobes Material liegt auch westlich und nördlich Texel, am Rande der Outer Silver Pit sowie im Westteil der Doggerbank. Im Bereich der Bänke vor der Nordostküste Norfolks ergibt sich das bekannte petrographische Bild der deutschen Ästuarien; auf den Rückenflächen der Bänke lagern feinsandige Sedimente, in den sich dazwischen erstreckenden Rinnen trifft man gröberes Material an. Daneben gibt es vereinzelt in der Themse-Mündung und im Wash-Busen kleine mehlsandige Schlickfelder.

4.2.3 Strömungsverhältnisse und Wellenbewegung

4.2.3.1 Strömung

Die Gezeitenströmungen stammen aus der Silberrinne- und von der Kanal-Welle **) (Abb.19). Die aus den Gezeitenwellen resultierenden Tideströmungen verlaufen etwa West-Ost und Nord-Süd; der Reststrom hat die Richtung des Flutstromes.

Die größten Strömungsgeschwindigkeiten im Untersuchungsgebiet treten in den küstennahen Zonen auf. Die Karte (Abb.19) gibt die Maximalgeschwindigkeiten des Gezeitenstromes zur mittleren Springzeit an. Danach grenzt die 2 kn-Linie

*) vergl. Schrifttum hierzu [50] [45]

**) vergl. Schrifttum hierzu [21] [59] [55]

(1,03 m/s) hauptsächlich die Mündungstrichter der Flüsse Elbe, Weser, Ems, Schelde, Humber, Themse sowie den Jadebusen ab. Innerhalb dieser Grenzen werden noch höhere Geschwindigkeiten erreicht (bis über 3 kn (1,54 m/s)).

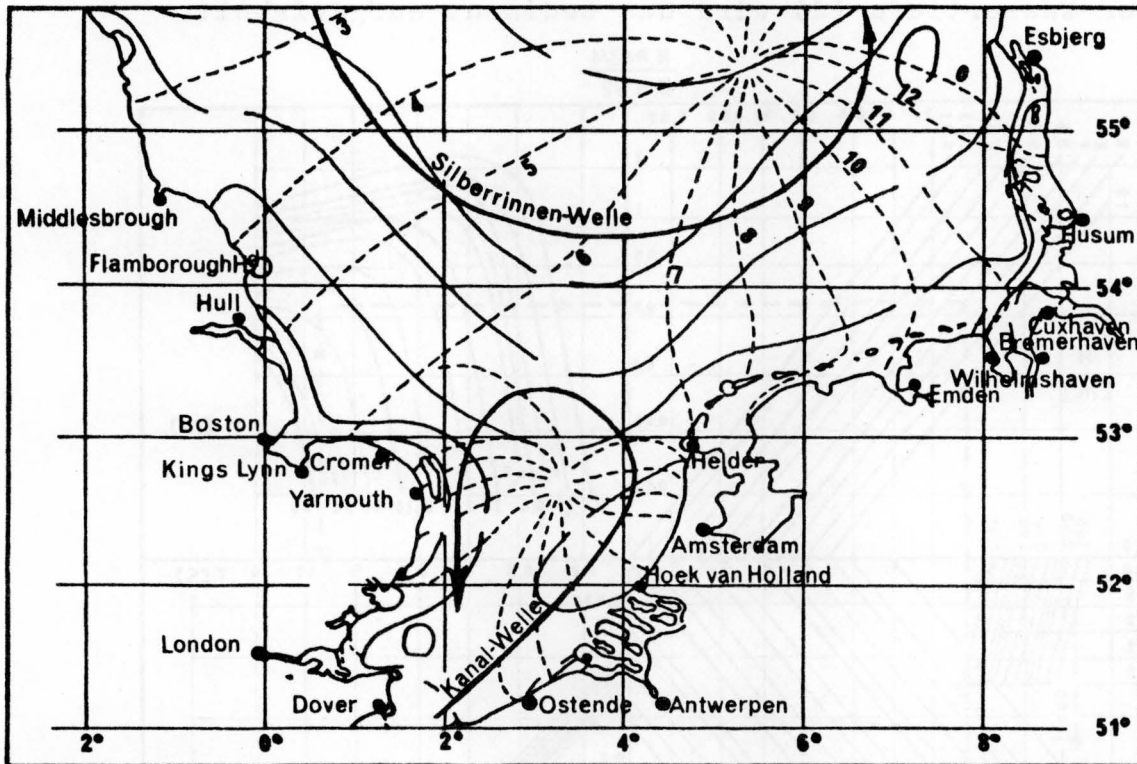


Abb.19 Maximalgeschwindigkeit des Gezeitenstroms zur mittleren Springzeit in kn (- 10 -^{*)} und Linien gleichen mittleren Hochwassers (---) in Stunden nach Durchgang des Mondes durch den Meridian von Greenwich^{**})

Außerhalb der Flußmündungen erstreckt sich von der Themse-Mündung eine 40-50 km breite Zone an der Ostküste der Norfolk-Halbinsel und weiter bis Flamborough Head, in dem die Strömungen zwischen 2-3 kn liegen. Der Bereich der langen sichelförmigen Bänke, der durch die Silver Pit, Outer Silver Pit und 2°40'E begrenzt wird, zeigt gebietsweise immer noch relativ hohe Strömungsgeschwindigkeiten (1,5 - 2,5 kn). Nach Norden und nach innen zu dem zentralen Teil hin nehmen die Strömungen merklich ab und auf der Doggerbank und in ihrer Umgebung sinken sie sogar unter 1 kn.

4.2.3.2 Seegang

In einer begrenzten Wassertiefe, wie in der Nordsee gegeben, geraten die längeren Wellen in die Bedingungen des Flachwassers, d.h. sobald das Verhältnis d/L kleiner als $1/2$

^{*)} vergl. Schrifttum hierzu [55]

^{**}) vergl. Schrifttum hierzu [59]

wird, berührt die Welle den Boden und die Orbitalbewegungen am Grunde verlieren die Vertikalkomponente. Die innerhalb der Welle am Boden vorhandene Orbitalgeschwindigkeit der Wasserteilchen greift das Material des Meeresgrundes an und entsprechend der in der Welle enthaltenen Energie in Abhängigkeit von der Wassertiefe (d) wird das Sediment aufgewirbelt.

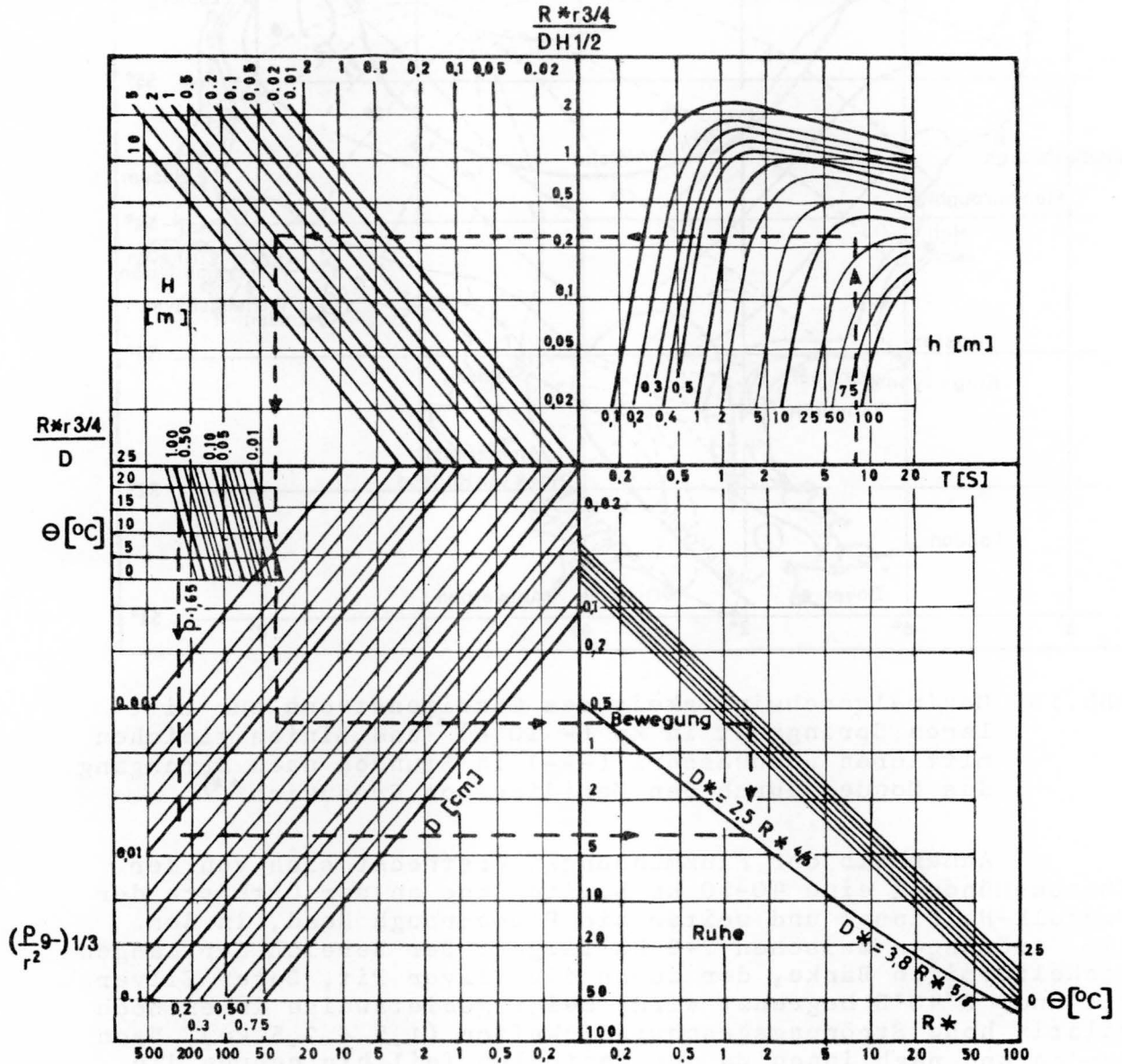


Abb.20 Nomogramm zur Ermittlung des Feststofftransportes bei Wellen (nach Bonnefille [5])

Bonnefille⁽⁵⁾ leitete aus den verschiedenen Ergebnissen der Modelluntersuchungen einen Zusammenhang zwischen Wellengrößen (Periode, Höhe), Materialkennwerten (spezifisches Gewicht des Materials, Korndurchmesser), Wassertemperatur und Transport des Materials ab, der allerdings noch einer Bestätigung durch Naturmessungen bedarf. Mit Hilfe des dargestellten Nomogramms läßt sich aus den bekannten Größen der Bereich, in dem das Material sich in Ruhe oder in Bewegung befindet, feststellen.

Über den vom Seegang verursachten Sandtransport wurden unter Anwendung der von H.A. Einstein aufgestellten "bed-load-equation" auch bei der BAW/AK einige Berechnungen durchgeführt, nach denen die Horizontalgeschwindigkeiten der Orbitalbewegung bei einer Wassertiefe von $d = 20$ m durch Wellen von einer Höhe $H = 3$ m und einer Länge $L = 60$ m bereits ausreichen, um Fein- bis Mittelsande vom Boden emporzuheben.

In der Tat wurden bereits in Küstennähe (Norderney, Mellum-Plate) derartig hohe Wellen bei Stürmen gemessen, so daß angenommen werden kann, daß die Orbitalgeschwindigkeiten, die in diesem Falle über dem Grenzwert liegen, für den Transport von Bedeutung ist.

Wenn \bar{H} und \bar{T} die kennzeichnende Höhe bzw. Periode der am Beobachtungsort registrierten Wellen bedeuten, so kann der zugehörige Wert \bar{L} entsprechend der Gleichung (1) ermittelt werden:

$$\bar{L} = \bar{T}^2 \cdot \frac{g}{2\pi} \cdot \text{Tgh} \left(\frac{2\pi d}{\bar{L}} \right) \quad (1)$$

wobei g Schwerebeschleunigung und d Wassertiefe bedeuten. Einige Meßwerte aus Aufzeichnungen sind in der nachstehenden Tabelle 3 wiedergegeben:

TABELLE 3

Datum der Messung	Ort	Windrichtung und Windstärke in Bft.	Kennzeichnende Wellenhöhe $\bar{H}_{1/3}$ in cm	Höchste gemessene Wellenhöhe in cm	Kennzeichnende Wellenperiode $\bar{T}_{1/3}$ in sec	Längste gemessene Wellenperiode in sec	Aus den gemessenen kennzeichnenden Perioden berechnete Wellenlängen in m	Art der Registrierung	Gesamtzahl der Perioden bzw. Anzahl der Wellenhöhen in der Registrierung
10. 8.62	Norderney	W 6-7	108	206	4.3	9.2	40	Film	334
21. 9.64	"	NW 8	243	369	7.2	13.0	81	Leitföh.	911
16.12.62	Mellum-Pl.	NW 8	155	238	6.7	12.4	70	"	252
12. 4.60	" 1)	"	232	338	7.0	10.4	76	"	455
17. 2.58	" 1)	W 8-9	215	-	6.4	10.1	64	"	822
30. 5.62	Feuerschiff Elbe1 2)	WNW 7	120 150	-	5.0	-	39	Beobach	-
30. 5.62	Feuerschiff P 8 2)	"	200	-	6	-	56	"	-
1949-52	Feuerschiff S 2 3)	SW 8-9	340	-	7.3	-	83	"	133
1949-52	Feuerschiff P 12 3)	NW 6-7	240	-	7.9	-	97	"	226

1) Nach Messungen des Seewetteramtes
 2) Nach Angaben von J. Piest [44]
 3) Nach Angaben von H. U. Roll [53]

*) vergl. Schrifttum hierzu [56]

Bereits diese Angaben veranschaulichen, daß bei einem Sturm mittlerer Stärke (7-8) mit einer erheblichen Energieabgabe des Seeganges an dem 10-30 m tiefen Meeresboden gerechnet werden muß, da schon von einer Wassertiefe von $d/L < 1/2$ ab merklich Wellenenergie an den Meeresboden abgegeben wird. Nach einem Vortrag von Walden fühlen schon bei Windstärken der Größenordnung 3 - 4 Beaufort in 30 m Wassertiefe die längeren Komponente des Spektrums Boden. Diese Rechnungen beweisen, daß große Teile der südlichen Nordsee mit Ausnahme einiger tiefer Stellen von dem grundberührenden Seegang betroffen sind.

Die vom Seegang und auch von der Strömung selbst aufgewirbelten Sedimente werden von der Strömung erfaßt und verfrachtet. In Abhängigkeit von der jeweiligen Tiefenwirkung der Wellen und der Stärke der Gezeitenströme vollzieht sich die Formung des untermeerischen Reliefs von der Küste und in der Nordsee. Die Wellen und Strömungen sind aber in ihrem Wirkungsgrad von der Morphologie und vor allem der Beschaffenheit des Untergrundes abhängig.

4.2.3.3 Hydrologische Grundlagen

Um die Zusammenhänge besser verdeutlichen zu können, soll auf einige Abhängigkeiten zwischen Strömung und Feststofftransport eingegangen werden, die für die Beurteilung der Vorgänge bei der Materialherkunft und -bewegung im Rahmen dieser Untersuchung von Bedeutung sind.

Es finden beide Arten der Sedimentbewegung Berücksichtigung, nämlich die Bewegung, die durch strömendes Wasser und die Bewegung, die durch Seegang verursacht wird. Die beiden Bewegungen sind zwangsläufig gekoppelt, eine Abgrenzung ist nur theoretisch möglich.

Zweifelsohne haben unter den verschiedenen Faktoren die Strömungsgeschwindigkeiten und die Korngröße den stärksten Einfluß auf den Materialtransport. Sie bilden jedoch nicht die einzigen Veränderlichen. Wassertiefe, vertikale Geschwindigkeitsverteilung, Feststoffgehalt, spezifisches Gewicht des Wassers und des Bodenmaterials, Turbulenz, Bodenbewegung, Temperatur, Gestalt und Kohäsion der Teilchen stellen weitere Veränderliche dar.

Nach unseren bisherigen Kenntnissen wird das auf der Sohle ruhende Material umso schneller emporgerissen, je turbulenter die Strömung, je unebener der Meeresgrund ist und je lockerer die Sedimente gelagert sind. Da dieser Zustand in der Natur in der südlichen Nordsee Regel ist, kann für eine großräumige Betrachtung eine weitgehende Unterscheidung der einzel-

nen Veränderlichen, die die Größe der kritischen Grenzwgeschwindigkeiten der Sandbewegung beeinflussen, vernachlässigt werden. Wegen der großen praktischen Bedeutung des Feststofftransportes wurden zahlreiche Transportformeln aufgestellt, von denen keine allgemeine Gültigkeit hat, da gleichzeitig nicht alle Faktoren berücksichtigt werden können. Diese Einschränkung gilt auch für die nachstehende Abbildung 21.

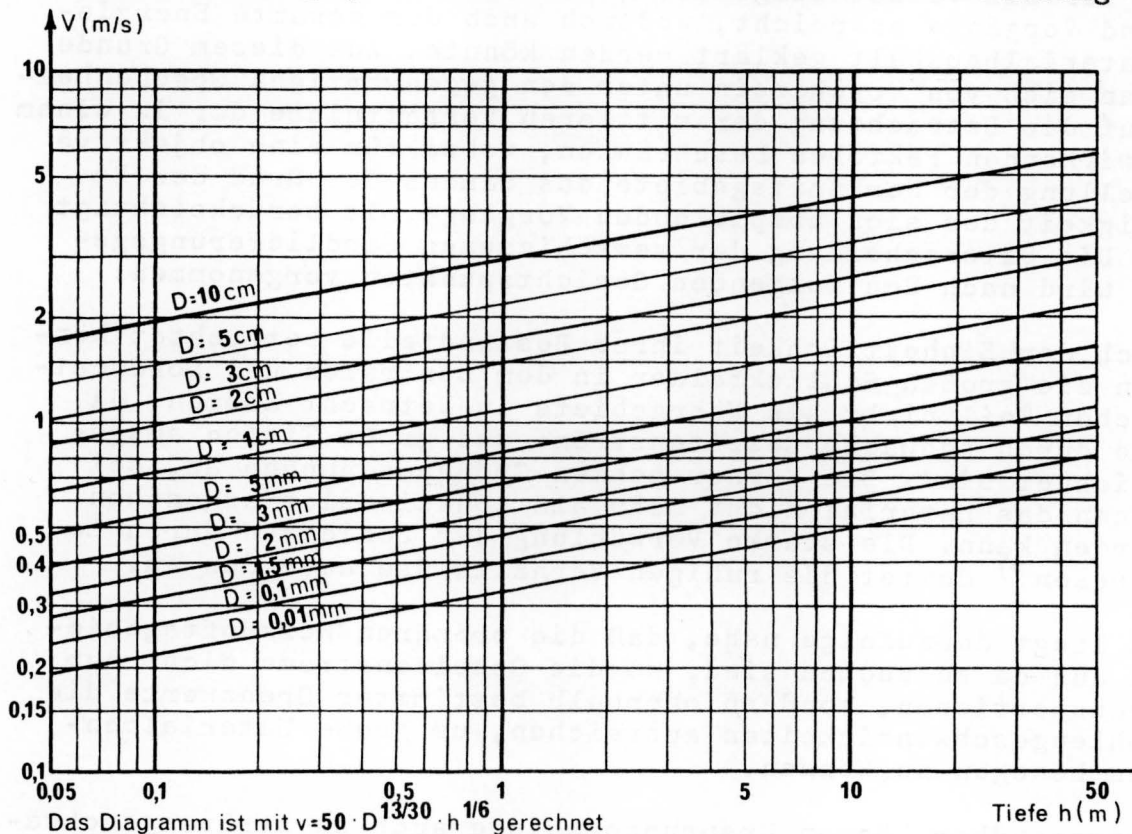


Abb.21 Mittlere Geschwindigkeit (v) für Korndurchmesser (D) bei verschiedenen Wassertiefen

Prinzipiell ist jedoch das Diagramm auch hier bedeutsam. Denn es vermittelt nicht nur den üblichen Zusammenhang zwischen der mittleren Geschwindigkeit (v) des Feststofftransportes und der Korngröße (D), sondern zeigt die Wassertiefe (h) an, in der bei den im Bereich der südlichen Nordsee vorhandenen Strömungsgeschwindigkeiten noch ein bedeutsamer Transport zu erwarten ist.

4.3 Herkunft des Sandes

Theoretisch können alle Bereiche des Nordseeraumes als Materiallieferant des Sandes bei den allgemein geringen Tiefen angesehen werden. Den Ergebnissen der bisherigen Arbeiten folgend läßt sich jedoch sagen, daß in bestimmten Räumen der Ursprung des Sandes zu vermuten ist. Die Grenze solcher Sand-

anlieferungsgebiete, soweit von einer Grenze im herkömmlichen Sinne gesprochen werden darf, sind keine scharfen Linien, sondern Zonen verschiedener Breiten, die entsprechend der Schwankungen der einzelnen Faktoren, die das Phänomen Sandwanderung auslösen, sich ständig verschieben. An sich sind die Voraussetzungen für eine eindeutige Darstellung von Ursprungsgebieten schon dadurch nicht erfüllt, daß das Beobachtungsmaterial nicht für die vollständige Beschreibung und Deutung aller Formen und Vorgänge ausreicht, wodurch auch der gesamte Energie- und Materialhaushalt geklärt werden könnte. Aus diesem Grunde muß man sich von vornherein unter den gegenwärtigen Gegebenheiten auf die Betrachtung der mittleren Verhältnisse der in einem Raum wirkenden Faktoren beschränken, wobei für eine objektive Darstellung der Herkunftsgebiete des Sandes der Grad der Beständigkeit der sich abspielenden Vorgänge mit berücksichtigt wird. Die Unterscheidung der verschiedenen Sandlieferungsgebiete wird nach den folgenden Gesichtspunkten vorgenommen:

1. Nach der Einheitlichkeit ihrer Bestandteile betrachtet können die großen Schlickfelder in dem zentralen und nordwestlichen Teil nicht als Nährgebiete in Betracht kommen, da sie durch schwache Gezeitenströme und große Tiefen ausgezeichnet sind. Die Körner nehmen Größenordnungen an, bei denen das Material nicht mehr als kohäsionslos angesehen werden kann. Die starke Verwühlung der Schichten durch Lebewesen *) deutet die ruhigen Verhältnisse am Boden an.
2. Es liegt demzufolge nahe, daß die primären Herkunftsgebiete nur da zu suchen sind, wo die Gezeitenströme nicht nur transportieren, sondern oberhalb bestimmter Grenzwerte die Sohlengeschwindigkeiten ausreichen, um große Materialmengen bewegen zu können.
3. Demgegenüber können Ursprungsgebiete auch an strömungsschwächere Gebietsteile gebunden sein, wenn diese in flachere Bereiche sich erstrecken. In diesem Fall erreicht die Wirksamkeit des Seeganges eine höhere Intensität und die Menge der in Schwebelage befindlichen Körner wird größer sein; somit werden schwächere Strömungen ab bestimmter Korngröße transportwirksam.
4. Die veränderlichen Transportverhältnisse spiegeln sich in der Korngrößenverteilung des Materials wieder. Es findet bei wechselstarker Wasserbewegung eine Sortierung des Materials entlang des Transportweges statt. Im allgemeinen nimmt die Korngröße vom Ursprungsgebiet ab und gleichzeitig erhält das Sediment eine bessere Sortierung. Örtlich unterschiedlich stellt sich dann ein Gleichgewicht zwischen Sediment und Hydrodynamik ein. An einer Stelle, an der das Gleichgewicht durch irgendeine Ursache Änderung erleidet, wird eine Änderung der Korngrößenfraktion folgen. Störende Einflüsse können durch neue Liefergebiete entstehen (Borkum-Riffgrund, Horns-Riff, Steingrund), die in der Transportrichtung liegen. Daraus ergibt sich ein größeres, evtl. auch feineres und schlechter sortiertes Material, das aber dem transportierenden Medium in derselben Weise unterliegt wie vor der Störung.

*) vergl. Schrifttum hierzu [50]

Bei annähernd gleichmäßig fortgesetztem Transport durch Gezeitendrift erhält das Sediment eine sehr charakteristische Gleichkörnigkeit, es entstehen die sogenannten Streifensande^{*)}, die auf den weiten Fluren der küstenfernen Gebiete gebildet werden.

Dieser Zusammenhang von Korngrößenverteilung und Transportweg erlaubt es, die bevorzugten Bahnen der Sandbewegung zu verfolgen; er deutet gewissermaßen auch den Ursprung des Sedimentes an. Die Gebiete mit schlecht sortiertem Material, in engerem Sinne die Gebiete mit Restsedimenten, werden als Abrasionsflächen aufgefaßt und als Ausgangsräume des Sandes betrachtet. Die Bezeichnung Restsediment im Sinne von O. Pratz hat hier nur bedingte Gültigkeit. In der Ostsee werden die Gebiete, in denen die feinen Bestandteile des autochthonen Materials soweit ausgewaschen werden, bis die größten eine Schutzdecke für die darunter liegenden feineren bilden, als Abtragungszonen mit Restsedimenten bezeichnet. In der südlichen Nordsee trifft man derartige Flächen kaum an. Die Abweichungen sind im wesentlichen darauf zurückzuführen, daß einerseits die Wirksamkeit der marinen Vorgänge seit kurzer Zeit voll entfaltet ist, andererseits die Gezeiten andere Auswirkungen auf die hydrographischen Verhältnisse ausüben.

Für eine nur kurzzeitige Einwirkung der Naturkräfte auf die pleistozänen Formenwelt sprechen die durchweg größeren und schlechtersortierten Sedimente in der Abtragungszone, die eine Variationsbreite der Korngrößenverteilung haben, die von den Feinsanden bis Kies reicht. Natürlich wird durch den marinen Abbau eine Anreicherung der groben Bestandteile erfolgen, denn aus den bekannten Transportformeln ist noch am ehesten die Mobilisierung für die Fraktionen der Feinsandanteile zu erwarten. In der Tat bedeckt gerade der Sand von dieser Fraktion (0,1 - 0,2 mm) weite Teile des Meeresbodens. Die in Bewegung gesetzten Sandmengen überqueren solche Gebiete und können zu kurzfristiger Einsandung führen. Somit befinden sich in diesen Abtragungszonen die Sedimente in stetiger Umlagerung durch die differenzierten bipolar gerichteten Strömungen.

Die Erosion und Akkumulation unterliegt den wechselnden hydrometeorologischen Bedingungen. Daher ist es überhaupt nur durch langfristige Beobachtungen möglich zu entscheiden, ob ein Raum zum überwiegenden Liefergebiet oder zum Ablagerungsgebiet gehört. Kennzeichnende Unterschiede erhält man durch einen Vergleich der gewählten Kriterien, nachdem sie in Beziehung zueinander gesetzt worden sind. Ein Blick auf die vorstehend behandelten Karten läßt erkennen, daß die Verteilung der Korngrößen des am Boden angetroffenen Materials in ganz großen Zügen einen Zusammenhang mit der horizontalen Verteilung der Maximalgeschwindigkeiten des Gezeitenstromes

^{*)} vergl. Schrifttum hierzu [71]

zeigt. Die höchsten Geschwindigkeiten und die maximale Wirksamkeit des Seeganges fallen in flacheren Bereiche in Küstennähe zusammen.

Die ausgedehnten Felder von grobem Material sind mit den Gebieten mit höchsten Strömungsgeschwindigkeiten verknüpft; besonders im ostenglischen Küstenbereich und in der Deutschen Bucht in den Ästuarien erreichen die Geschwindigkeiten mehr als 2,5 - 3 sm/h. Die Korngrößen entsprechen diesem Bilde: Im Westen der Nordsee stehen Kies, Grobsand oder sogar Felsflächen an, in den Rinnen der Ästuarien Mittel- und Grobsande und mit Abnahme der Geschwindigkeiten treten Fein- und Mittelsandflächen auf. Im kleinen wiederholt sich dieses Bild vor Vorgebirgen, wo sich auch die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten örtlich verstärken (Flamborough Head). Ein weiteres Beispiel für strömungsgebundene Bodenbedeckung zeigt der Ausgang des Kanals. Hier nehmen die Geschwindigkeiten nach Südwesten zu bis 3,5 sm/h und anstelle des Sandes tritt Kies; in der Hauptsache wird aber der Felsboden freigespült.

Eine Ausnahme bilden die Doggerbank und eine breite Küstenzone zwischen Hoek van Holland und Helder. Die Strömungsgeschwindigkeiten können von den vom Seegang verursachten Bewegungen übertroffen werden. In der Doggerbank Area und in den südlich Horns Riff bis Helgoland angrenzenden Gebieten läßt sich kein solcher Zusammenhang darstellen. Die in der Eiszeit regellos abgelagerten Sedimente verschiedener Korngrößen geben - bedingt durch die höhere Lage und schwächeren Gezeitenströme - noch die ursprüngliche Kornzusammensetzung des Materials wieder.

Diesen Überlegungen zufolge sind die vermutlichen Ausgangsräume des wandernden Sandes zu suchen (Abb.22):

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 und Langeoog) und in einer breiten Zone vor der Dänischen und Schleswig-Holsteinischen Küste hinziehen (Horns Riff, Steingrund, Sylter-Außenzone).
4. Im engeren Bereich der Ästuarien, wo in den tieferen Tidestromrinnen und Gatts prämarine Gesteine angeschnitten werden und deren Material *) dem allgemeinen Transport zugeführt wird.
5. Eine geringere Menge des Materials hat ihren Ursprung an

*)vergl. Schrifttum hierzu [50] [60] [61]

Ort und Stelle, es stammt aus der Sohlenerosion, ferner aus dem Abbruch der Wattkanten, schließlich aus der Neubildung von Schlick *).

6. Aus dem Abbruch des Materials der englischen und französischen Küsten.
7. Einen unbedeutenden Teil des bewegten Materials macht die zusätzliche Sedimentanlieferung durch die Flüsse selbst aus.

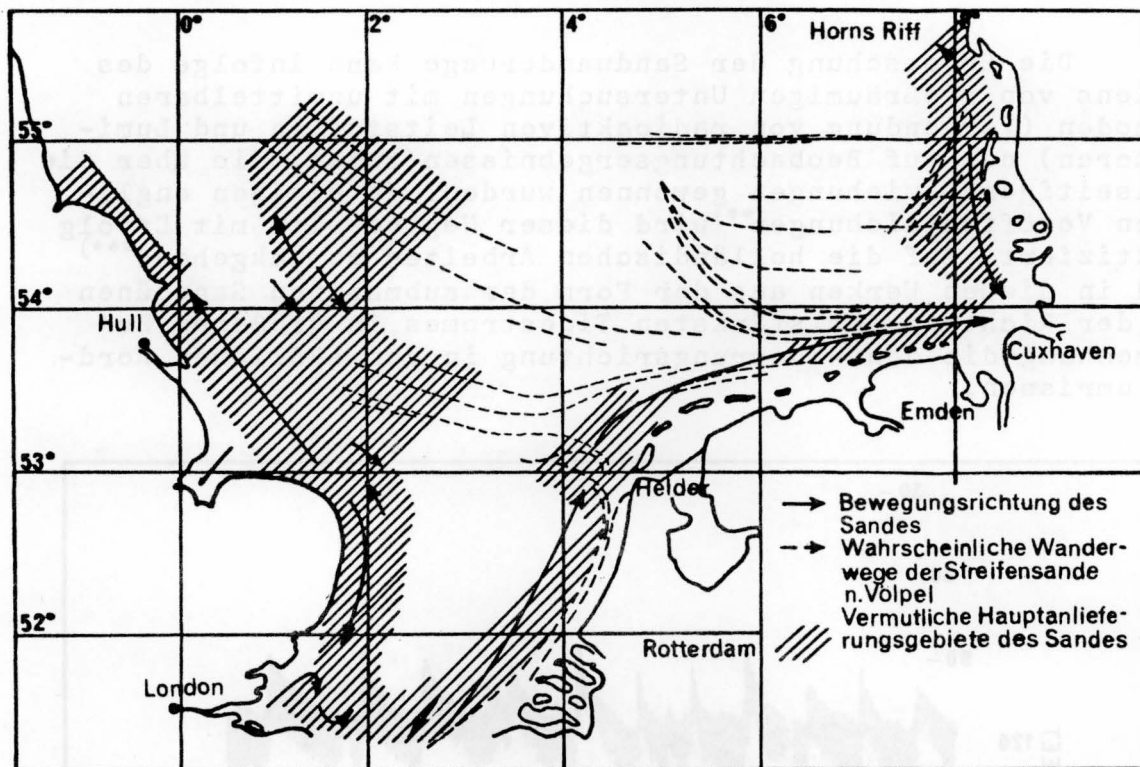


Abb.22 Herkunft und Bewegungsrichtung des Sandes in der südlichen Nordsee

4.4 Bewegungsrichtungen des Sandes

Einfache Verhältnisse, wie sie an vielen Stellen an der deutschen und dänischen Ostseeküste vorgefunden werden, wo hinter einem Landvorsprung ein Haken sich entwickelt und daraus die Bewegungsrichtung des Sediments abzuleiten ist, liegen in der südlichen Nordsee nicht vor. Ein geschlossener Materialhaushaltsraum im Sinne etwa einer "physiographischen Einheit" besteht nicht einmal in einem engeren Raum, denn es

*)vergl. Schrifttum hierzu [28] [29] [39] [50] [61]

gehen ständig Materialmengen aus entfernten Gebieten ein oder werden abgelagerte Sedimente fortgeführt. Den vorliegenden Untersuchungen zufolge ist daher die Korrelation zwischen Abtragung und Sedimentation doch sehr vorsichtig zu treffen. Die eindeutige Klärung der Beziehungen Abtragung und Sedimentation ist allerdings auch noch kein Beweis für eine in einsinniger Richtung verlaufende Sedimentverdriftung, denn "der ermittelte Transportweg kann genau so gut als resultierender Vektor einer Vielzahl von Teilwegen angesehen werden, die auch noch häufig durch Absatz und Wiederaufnahme am Boden zeitlich unterbrochen worden sind" *).

Die Erforschung der Sandwanderwege kann infolge des Fehlens von großräumigen Untersuchungen mit unmittelbaren Methoden (Verwendung von radioaktiven Leitstoffen und Lumino-phoren) nur auf Beobachtungsergebnissen fußen, die über die vielseitigen Beziehungen gewonnen wurden. In einigen englischen Veröffentlichungen**) wird dieser Weg bereits mit Erfolg praktiziert. Auf die holländischen Arbeiten zurückgehend***) wird in diesen Werken aus der Form der submarinen Sanddünen und der Richtung des stärksten Tidestromes in größerem Zusammenhang die Sandwanderungsrichtung in der südlichen Nordsee umrissen.

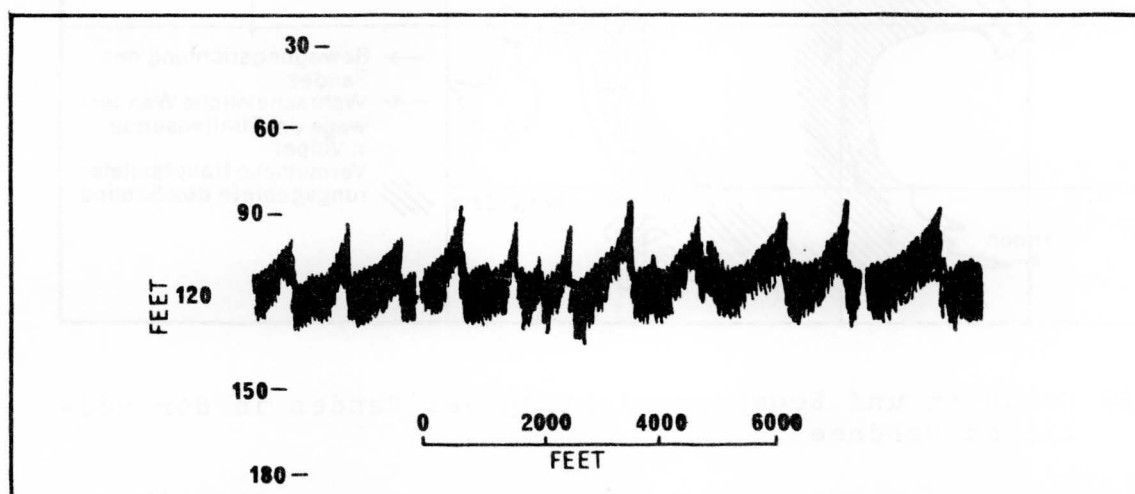


Abb.23 Submarine Sanddünen auf freier See vor der niederländischen Küste. Profil senkrecht zu den Kammlinien in Richtung NNE (Schrifttum 64)

Eine der Hauptformen der Sandbewegung kann in den bekannten submarinen Sanddünen oder -rippeln gesehen werden. Die

*) vergl. Schrifttum hierzu [25/91]
**) vergl. Schrifttum hierzu [23] [64] [65]
***) vergl. Schrifttum hierzu [68]

an der Luvseite flach ansteigenden und an der Leeseite steil ausgebildeten Sanddünen (Abb.23) zeigen das Vorherrschen eines der Gezeitenströme an und lassen sich über weite Teile der Nordsee verfolgen. Das Auftreten ist an relativ höhere Strömungsgeschwindigkeiten, an Mittelsand und mittelsandige Feinsandstreifen und an ausgedehnte Sandbänke gebunden.

Sie wurden in der Außenjade von K. Lüders 37, H.E. Reineck 49 und von F. Völpel-Gy. Samu 72 untersucht. H.E. Reineck fand sie außerdem in der Wesermündung und in verschiedenen Seegatts zwischen den ostfriesischen Inseln. Hülsemann (cit.Reineck) beobachtete die Sanddünen in dem Seegatt Blaue Balje. Sie kommen auch in der Unterelbe und Unterweser vor, wie aus den Unterlagen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltungen ersichtlich ist. Die submarinen Sanddünen beschreibt van Veen 68 in den Hoofden und macht auf die nordwärts gerichteten Driften der Rücken aufmerksam; die gleiche Richtung fand A.H. Stride 65 20 Jahre später. Die Untersuchungen von A.H.Stride erbrachten die Beweise über das Vorhandensein der submarinen Sanddünen in anderen Gebieten der südlichen Nordsee. Hier erstrecken sie sich zerstreut oder in zusammenhängenden Feldern von Flamborough Head über die großen Sandbänke vor der Küste Norfolks bis zur Themse-Mündung und weiter bis zur Straße von Dover. R.V. Dingle 23 berichtet von Sanddünen aus der Gegend der westlichen Doggerbank.

In Anlehnung an die Untersuchungsergebnisse von Stride wird versucht, aus den bekannten Strömungsverhältnissen zumindest einen Anhalt über die mögliche Richtung resultierender Sandbewegungen zu gewinnen. Auf Grund von Beobachtungen nimmt man an, daß die Sandwanderung sich aus der Richtung der stärksten Tideströmung (Abb.24) ableiten läßt, da diese die Ursache für die Hauptwanderrichtungen ist.

Diese Annahme ist zwar plausibel, ergibt sich jedoch nicht zwangsläufig. Die Sandverdriftung braucht nicht, kann aber in Richtung der stärksten Tideströmung liegen. Einen zusätzlichen Unsicherheitsfaktor bedeutet die Windwirkung. Im Endresultat kann zwischen den Richtungen des stärksten Tidestromes und des Reststromes eine deutliche Winkeldiskordanz bestehen. Der Reststrom und die stärkste Tideströmung weisen in unterschiedliche Richtungen hin. Daher ist ein Vergleich der beiden Größen wünschenswert, wenn der Verlauf der resultierenden Sandbewegung mit einiger Sicherheit bestimmt werden sollte.

Die Bahnen des stärksten Tidestroms wurden dem "Atlas der Gezeitenströme..." 21 entnommen, weil die Ergebnisse in besonders handlicher Weise angeboten wurden. Der Reststrom wurde ebenfalls aus den Gezeitenstromtabellen des eben erwähnten Atlas zeichnerisch bestimmt, in dem die Angaben über eine volle Tideperiode auf vektorieller Darstellungsweise, die we-

gen des starken zeitlichen Wechsels der Stromrichtungen geeignet erschien, ermittelt wurden. In der Abb.24 wurde jedoch übersichtshalber auf die Darstellung der einzelnen Strömungskomponente verzichtet und in die Karte nur die resultierende Stromrichtung (Reststrom) eingetragen.

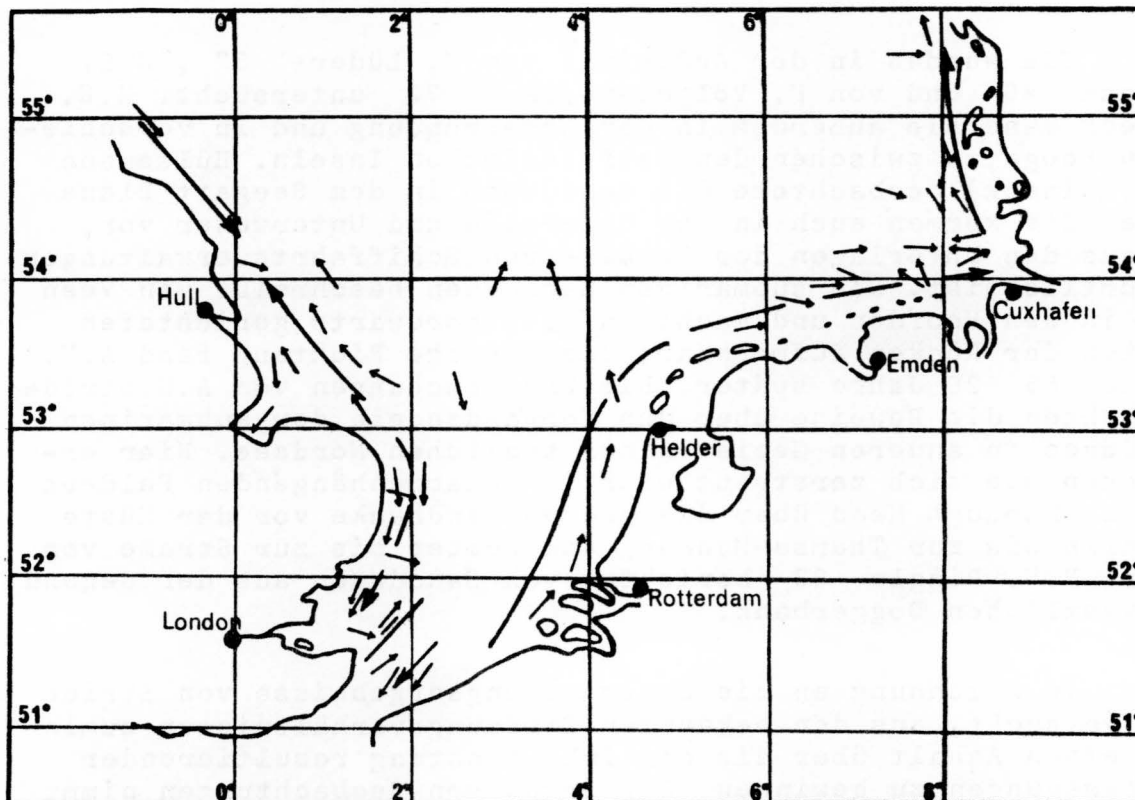


Abb.24 Richtung des Reststromes (→) und der vorherrschenden stärksten Tidestromung (↔) (nach Atlas der Gezeitenströme [21] und A.H. Stride and D.E. Cartwright [64])

Wie das Beispiel in Abb.24 zeigt, sind abgesehen von örtlichen Differenzen die beiden Richtungen bezüglich des zu erwartenden Sandtransports vielfach übereinstimmend.

Die Änderung der Kornfraktion erlaubt wegen des unzureichenden Materials nur in begrenzter Weise die Darstellung der Sandwanderungsrichtung; ihre Betrachtung führt nur im Zusammenhang mit anderen Kriterien zu brauchbaren Ergebnissen.

Eine der vielen Möglichkeiten, das vorhandene Material auszuwerten, nutzt F. Völpel [71], indem er genauere Vergleiche der Korngrößenverteilung durchführt. Die Ergebnisse seiner Untersuchungen ergaben, daß Sande durch Gezeitenströmung und Seegang eine Klassierung zu sehr gleichmäßiger Korngröße erfahren. Die sog. Streifensande lassen sich auf dem Boden der Nordsee mehrere hundert Kilometer weit verfolgen (Abb.22).

Die drei Betrachtungen ergänzen einander soweit, daß man einen qualitativen Überblick des Sandtransports gewinnen kann.

Die Verhältnisse im Westen der Nordsee zeichnen sich aus, durch den außerordentlich starken Profilwechsel der Sanddünen, durch die häufige Richtungsänderung des resultierenden Stromes und durch Wechsel der Bodenbeschaffenheit. Die eingezeichneten Pfeile (Abb. 22) vermitteln nur ein ungefähres Bild von der Kompliziertheit der Sandbewegung. Die Strömungsverhältnisse zeigen, daß von Ost-England ein schwacher Strom nach Norden bis Flamborough Head fließt, wo er auf einen aus Norden kommenden trifft. Ausgeprägt scheint die Bewegung in Richtung Themse-Mündung 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 ihre Richtung von nordwärts gerichteten Strömungen umgekehrt wird, gelangt der Sand zu den submarinen Sandfeldern vor der holländischen Küste. Innerhalb der großen Sandströme treten örtlich Sandbewegungen auf, die denen gegenüber entgegengesetzt verlaufen. Am Nordende der Norfolk-Halbinsel, im Bereich der großen Sandbänke, im Ausgang des Kanals, im Gebiet der Hinder-Gruppe sind nordwärts bzw. südwärts gerichtete Bewegungen festzustellen.

Östlich Flamborough Head an der Westseite der Doggerbank sind parallel nebeneinander unterschiedlich verlaufende Sandbewegungen zu erkennen^{*)}. Diese Erscheinung ist auch für das Gebiet zwischen Outer Silver Pit und die Norfolk Halbinsel charakteristisch. In diesem Raum mit stetigem Materialtransport ist die Lage und Form der zigarrenförmigen parabolisch gestalteten Sandbänke meistens äußerst beständig. Bei eventuell geringfügigen Verlagerungen behalten sie ihre kennzeichnende Form.

Dieser Umstand setzt nicht voraus, daß sie bei dem Materialtransport unbeteiligt sind, denn "Partikel können dem Materialhaushalt bei der Bildung von Sandbänken nur zeitweilig angehören und auch ausgetauscht werden; die Großformen brauchen sich deswegen nicht sichtbar zu verändern"^{**}).

Der Sandstrom vor der holländischen Küste wird bei der Nordwärts- bzw. Ostwärtswanderung durch das Material der eiszeitlichen Moränen (Vlieland-Riff, Borkum-Riffgrund, Langeoog) weiter genährt. Der parallel zu den ostfriesischen Inseln verlaufende "submarine Sandstrom" bewirkt in der inneren Deutschen Bucht eine ausgeprägte Verlandung. Dieser Sandstrom erhielt ständig Sandzufuhr vom Grunde der Nordsee aus den Erosionsgebieten durch die Wirkung einer küsten- und bodennahen Restströmung von See her, besonders nord-westlich von Texel^{***}).

*) vergl. Schrifttum hierzu [23]

***) vergl. Schrifttum hierzu [25/88]

***) vergl. Schrifttum hierzu [20]

Wie die Abb.25 erkennen läßt, verfrachtet der Reststrom den Sand in allen untersuchten Fällen küstenwärts.

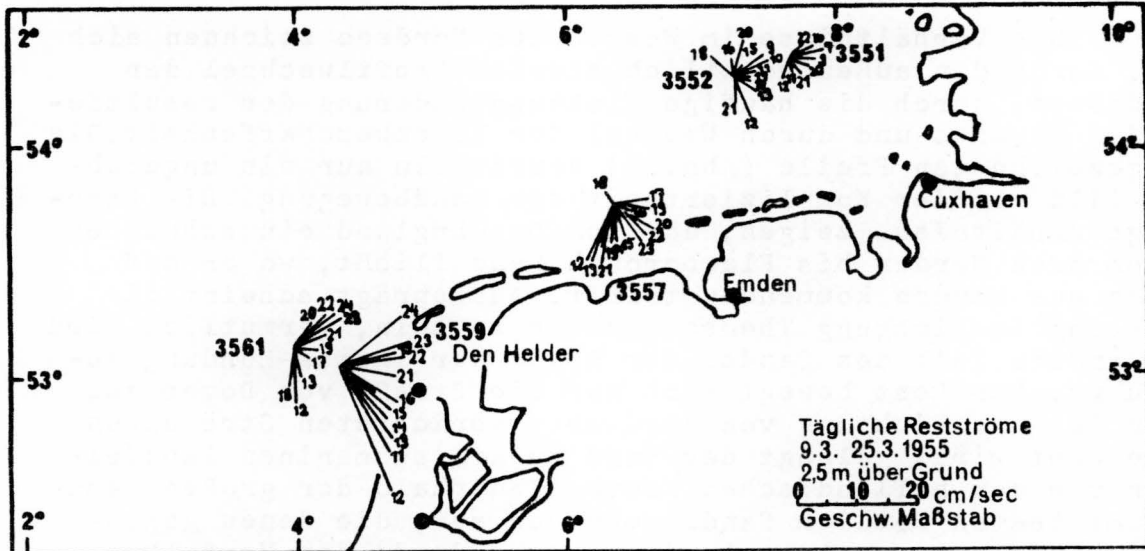


Abb.25 Tägliche Restströme am Boden der Deutschen Bucht
(nach G. Dietrich [19])

Das Elbe-Eider-Gebiet kann als Endraum eines komplizierten Materialumlagerungsvorganges aufgefaßt werden, wie auch die diesbezüglichen Arbeiten bezeugen.

Daß von Holland nach Deutschland auf diese Weise ein Sandtransport stattfindet, ergibt sich aus der räumlichen Verteilung der Korngrößenfraktionen. Der Mittelsandstreifen, der von Borkum-Riffgrund bis zur Jade-Mündung zusammenhängend ausgebildet ist, löst sich im Weser-Nordergründe-Gebiet in einzelne Streifen auf. Die Feinsandanteile nehmen ständig zu und nach Überqueren der Elbe bleiben nur noch diese Fraktionen übrig. Die gleiche Abnahme der Korngrößenfraktionen findet auch von Süden nach Norden bis Texel-Grund statt.

Noch recht undeutlich ist der Bewegungsvorgang nördlich der Elbe. Wenn sich die Sandwanderung in der von K. Gripp 27 angegebenen Weise vollzieht, so dient das Elbe-Gebiet für den Nord-Süd gerichteten Sedimenttransport ebenfalls als Sedimentationsbecken. Die Untersuchung von M.Bahr 2 ergänzt gewissermaßen die Theorie von K. Gripp, in der er anhand der Vergleiche der Größenverhältnisse der Volumenänderungen der Ablagerungen zum Ergebnis kommt, daß die Nord-Süd wandernden Sedimente im Raume der Norder- und Süderpiep abgelagert werden.

Ein mögliches Erosionsgebiet stellt die Sylter Küstenzone dar (Sylter Außen-Riff).

In welchem Maße der Sandtransport außerhalb der Brandungszone nach Norden von dem Westerlander Aufhängepunkt *) sich fortsetzt, kann heute nur vermutet werden. Man weiß auch nichts Zuverlässiges über die Anlieferung von der See her. Die Wanderwege der Streifensande, wie aus der Abb.22 hervorgeht, geben nur eine Möglichkeit, die Richtung des wandernden Sandes zu deuten. Die Doggerbank gehört zu jenem Bereich der Nordsee, wo neben den schwachen Strömungen die Seegang verursachende Bewegung wegen der hohen Lage des Gebietes bedeutend ist. Die Wirkung des Seeganges liegt nicht nur in der starken Aufwirbelung des Sandes, sondern er bildet auch eine verstärkende und vermindernde Komponente des strömungsbedingten Transports.

Während stürmischen Wetters auf der Doggerbank wurden von der Besatzung der sich in diesem Gebiet aufhaltenden Fischereifahrzeuge wiederholt Brecher beobachtet und festgestellt, daß nach Abklingen des Sturmes die Decks der Fahrzeuge von dünnen Sandschleiern bedeckt waren **).

Betrachtet man unter diesen Gesichtspunkten das Gebiet der Doggerbank und berücksichtigt man, daß hier auch die westlichen Windlagen die häufigsten sind, so kann die Annahme nicht verfehlt sein, daß der Seegang eine mehr oder minder östlich gerichtete Sandbewegung bewirkt.

4.5 Materialtransport in Küstennähe

In den vorangehenden Kapiteln wurden bei der Deutung der Herkunft und Wanderung des Sandes nur die großräumigen Zusammenhänge besprochen. In der Küstennähe und auch in den Stromrinnen wird durch zusätzliche Effekte die Bewegung komplizierter. Neben der bereits erwähnten Gezeitenströmung, Seegang, Topographie und Sedimenteigenschaften beeinflussen die Dichteströmungen, Brandungsströmungen, die spezifische Ausbildung der morphologischen Formen, insbesondere des Strandes, die Corioliskraft - um die wichtigsten zu nennen - direkt oder indirekt die bereits bestehenden Materialbewegungen.

Im Gegensatz zum Transport in der Nordsee selbst vollzieht sich in der Brandungszone ein wesentlich schnellerer Transport. Die Brandungslängsströmung, die aus einem landauf in Richtung des Wellenfortschritts vorhandenen Wassertransport, einer zur Küste parallelen Strömung (longshore-drifting) und einem seewärts erfolgenden Rückströmen des Wassers (ripp-Strömung) besteht, überlagert die Küstenströmung vor den west- und ostfriesischen Inseln.

*) vergl. Schrifttum hierzu [24] [34]

***) vergl. Schrifttum hierzu [70]

Hinsichtlich des Massentransportes ist sehr wesentlich, daß es unter dem Einfluß des ständigen Wechsels der Faktoren (Schwankungen der Gezeiten von Tide zu Tide, Änderung der meteorologischen Verhältnisse) zu einem häufigen und unregelmäßigen Fluktuieren der Sandbewegung kommen muß. Die Sandeinfuhr an der Nordsee geht unregelmäßig und stoßweise vor sich. Dieser Umstand der Materialumlagerung läßt sich durch die wiederholten Kornanalysen und durch die unstetige Veränderung der morphologischen Formen in Abhängigkeit von Zeit- und Wetterfaktoren deutlich erkennen. Die Abb.26 zeigt den Wechsel der Korngrößen in der Eidermündung.

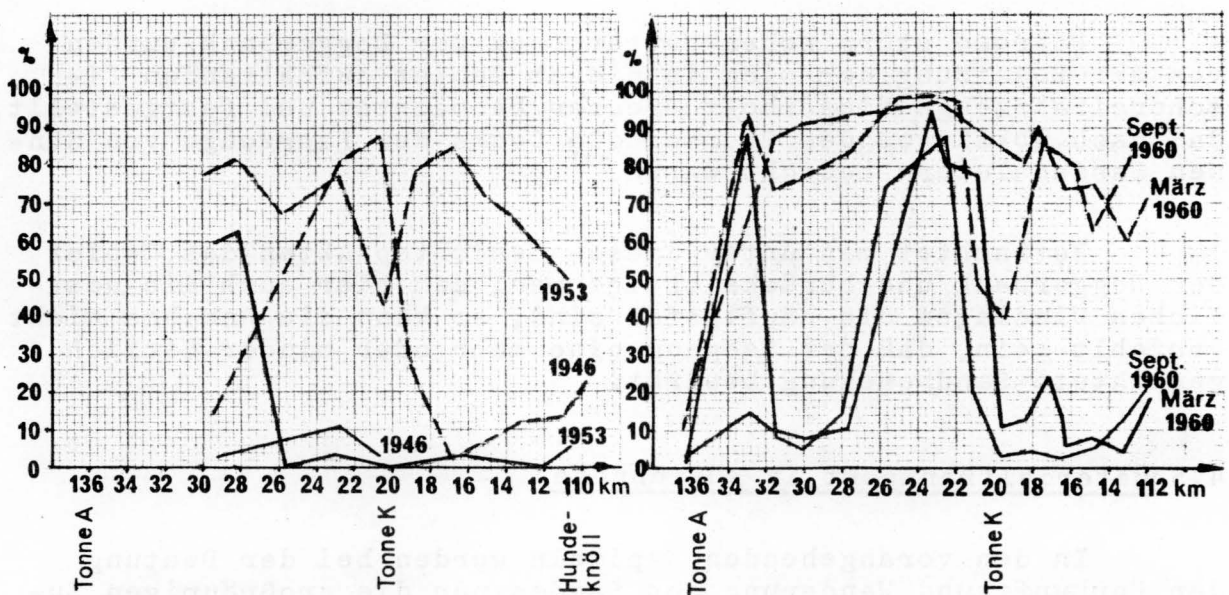


Abb.26 Kornverteilungslängsschnitt in der Außeneider 1946 und 1953 (Einzelproben) bzw. März 1960 und September 1960 (Mittel aus 2 bis 3 Proben) für den Korngrößenbereich 0,1 - 0,2 mm (---) und 0,2 - 0,5 mm (—) Durchmesser (nach Unterlagen des WSA Tönning [74])

Die eingetriebenen Sandmengen werden in den Ästuarien, wie auch aus den Untersuchungen im Wangerooger Fahrwasser ersichtlich ist, über längere Zeit verarbeitet und der Zustand des Gleichgewichts wieder hergestellt.

Aus den Beispielen der Betrachtung der Hydrodynamik, Morphologie und Sedimentologie wird einmal die Kompliziertheit der Sandbewegung deutlich und zum zweiten, welche veränderlichen Transportverhältnisse ein Partikel von der Aufwirbelung bis zur Ablagerung durchläuft (Durchgang durch Rippelformen, Absatz auf submarine Sedimentationskörper, Hin- und Herbewegung durch die Gezeiten in Ästuarien, Längs- und Quertransport durch die Brandungsströmung, Wiederaufnahme durch Turbulenz). Natürlich ist das vorgetragene Schema nicht vollständig, wie das vorhandene Material selbst nicht vollständig ist.

Man kann verallgemeinernd sagen, daß die Quelle des wandernden Sandes in der Nordsee zu suchen ist. Es treten gleichzeitig verschiedene Nährgebiete auf, wobei aufgrund des unterschiedlichen mineralogischen Aufbaus (Abb.27) zwischen dem östlichen und westlichen Teil eine gewisse Abweichung zu bestehen scheint, die keinesfalls auf getrennte Transportrichtungen deuten muß, vielmehr beinhalten die Unterschiede die prämarinen Verhältnisse.

Die Hapterscheinungen des Sandtransports sind die submarinen Sanddünen, die ein System veränderlicher, temporärer Umlagerungsoberflächen darstellen.

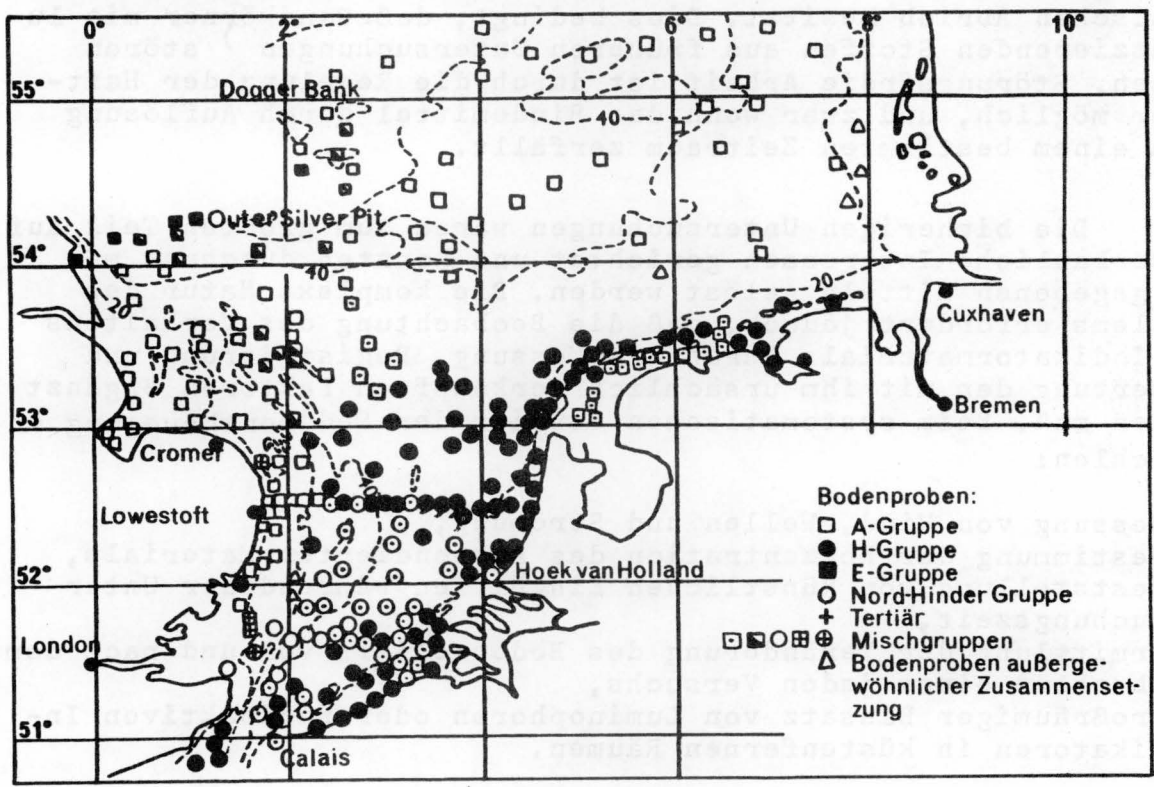


Abb.27 Petrographische Provinzen in der südlichen Nordsee (nach J.A. Baak [1])

In dem Mündungsbereich angekommene Sandwellen unterliegen den Gesetzmäßigkeiten, die in dem Gebiet der Rinnen, Platten und Sände herrschen. Der Sand wandert sowohl auf den Rücken der Sandbänke und Platen, als auch in den Rinnen unter tidebedingten zickzackförmigen Bewegungen in Richtung des Innern der Deutschen Bucht. Bauliche Maßnahmen können diesen Sandstrom nur beeinflussen.

5. Einige Gedanken über die zukünftige Entwicklung zur Verbesserung der Untersuchungsmethodik

Zur Verbesserung und Verfeinerung der Untersuchungsmetho-

dik sollen nachfolgende Überlegungen dienen:

Der Bau eines einwandfrei arbeitenden automatischen Luminophoren-Auszählgerätes, das nur die künstlich lumineszierenden Körner auszählt, würde den Wirkungsgrad und die Rationalisierung der Methode erheblich verbessern. Den Auswertevorgang könnte man derartig beschleunigen, daß dadurch erhebliche Einsparungen an Personalkosten möglich wären.

Die Praxis hat ergeben, daß der zum Fixieren der Luminophoren verwendete Wasserglas mindestens zwei bis drei Jahre beständig bleibt, also einen sehr hohen Widerstand gegen den mechanischen Abrieb besitzt. Dies bedingt, daß Sandkörner mit lumineszierenden Stoffen aus früheren Untersuchungen stören können. Störungsfreie Arbeit ist durch die Regelung der Halbdauer möglich, und zwar wenn das Bindemittel durch Auflösung nach einem bestimmten Zeitraum zerfällt.

Die bisherigen Untersuchungen waren zum größten Teil auf wasserbauliche Interessen gerichtet und konnten durchaus mit den gegebenen Mitteln gelöst werden. Die komplexe Natur des Problems erfordert jedoch, daß die Beobachtung des Verhaltens des Indikatormaterials durch die Messung, Registrierung und Auswertung der mit ihm ursächlich verknüpften Faktoren ergänzt werden muß. Beim systematischen Studium der Sedimentbewegung zu empfehlen:

1. Messung von Wind, Wellen und Strömung,
2. Bestimmung der Konzentration des suspendierten Materials,
3. Feststellung von künstlichen Eingriffen während der Untersuchungszeit,
4. Ermittlung der Veränderung des Bodenreliefs vor und nach dem Abschluß eines jeden Versuchs,
5. großräumiger Einsatz von Luminophoren oder radioaktiven Indikatoren in küstenfernen Räumen.

Die Messung sollte in morphologisch problematischen Gebieten entlang ausgewählter Profile bei gleichzeitiger Ermittlung der Bodenreliefänderung durchgeführt werden.

Die Voraussetzungen zu den einwandfreien Untersuchungen sind erfüllt, wenn die Beobachtungen der wandernden Luminophoren und der radioaktiv gekennzeichneten Sande mit gleichzeitigen Messungen der hydrometeorologischen Elemente erfolgt. Somit ist die gewisse strenge Vergleichbarkeit der Einzelergebnisse gewährleistet und kann zum Erfolg führen.

Natürlich kann die Durchführung des skizzierten Arbeitsprogramms, das ein optimales darstellt, aus mancherlei Gründen nicht immer und überall realisiert werden. Durch die Lösung von Teilproblemen ist es möglich, näherungsweise zu Erkenntnissen über die Natur der Sandbewegung zu gelangen.

6. Schlußbemerkungen

Die bisherigen Ergebnisse der Untersuchungen haben gezeigt, daß die Anwendung der Luminophoren und radioaktiven Indikatoren beim Studium der Sedimentbewegung, bei der Erforschung der Versandungsprozesse in Häfen und Fahrrinnen, bei der Ermittlung der günstigen Abladeplätze für das bei der Baggerei anfallende Baggergut erfolgreich ist.

Vor allem haben die letzten Untersuchungen, die bei einer Wassertiefe von 20 m durchgeführt wurden, die Erkenntnisse gebracht, daß die von der BAW entwickelte Methodik mit radioaktiven Leitstoffen auch für größere Wassertiefen erfolgreich eingesetzt werden kann.

Ferner wird aus dem Gesagten deutlich, daß nicht allein das wandernde Sandkorn zu betrachten ist, sondern vor allem die morphologische Form selbst in ihrer Veränderlichkeit erfaßt werden muß, da über die Typen der Formwanderung auch Erkenntnisse über den primären Ursachen gewonnen werden können.

Die Forderungen der Forschung und die Bedürfnisse der Praxis können durch die Fortentwicklung der Untersuchungsmethodik erfüllt werden.

- [1] Baak, J.A. : Regional Petrology of the Southern North Sea Thesis. Leiden 128, 1930
- [2] Bahr, M. : Die Entwicklung des Küstenvorfeldes zwischen Meve und Elbe seit dem Ende des 16. Jahrhunderts. unveröff. Bericht Küstenausschuß Nord- u. Ostsee
- [3] Berthois, L. : Recherches sur les sediments de la mer du Nord et de la mer d'Irlande. Rev.Trav.Inst. Pêches Maritimes Paris 1951 81:465-554
- [4] Bonnefille, R. : Essais de synthèse des lois de début d'entraînement des sédiments sous l'action d'un courant en régime continu. Bull. du Centre de Rech. et d'Essais de Chatou Nr. 5:67-72, Paris 1963
- [5] Bonnefille, R. u. Perneckner, L. : Le début d'entraînement des sédiments sous l'action de la houle. Bull. du Centre de Rech. et d'Essais de Chatou Nr. 15:27-32, Paris 1966
- [6] Bundesanstalt für Wasserbau : Untersuchung der Sandwanderung im Gebiet der Außenweser - Messungen im Juni/Juli 1961 - (unveröff. Bericht).
- [7] Bundesanstalt für Wasserbau : Sandwanderungsuntersuchungen mittels radioaktiver Isotope auf der Elbe bei Cuxhaven - Sept. 1963 - Hamburg 1963 (unveröff. Bericht)
- [8] Bundesanstalt für Wasserbau : Untersuchung des Schlicktransports in der Kanalreebe vor Brunshüttelkoog mit radioaktiven Leitstoffen April/Mai 1964 (unveröff. Bericht)
- [9] Bundesanstalt für Wasserbau : Untersuchung der Sandwanderung im Eider Fahrwasser mit radioaktiven Leitstoffen - Juni/Juli 1964 - (unveröff. Bericht)
- [10] Bundesanstalt für Wasserbau : Untersuchung der Sandwanderung in der Blauen Balje und in Wangerooger Fahrwasser mit radioaktiven Leitstoffen - Aug./Sept. 1964 - (unveröff. Bericht)
- [11] Bundesanstalt für Wasserbau : Untersuchung der Sandwanderung in der Außenweser im Gebiet Robben-Nordsteert mit radioaktiven Isotopen - Juni 1965 - (unveröff. Bericht)
- [12] Bundesanstalt für Wasserbau : Die Entwicklung der Eidermündung (unveröff. Bericht)
- [13] Bundesanstalt für Wasserbau : Sandwanderungsmessungen mit radioaktiven Isotopen im Wangerooger Fahrwasser - Juni/Juli 1965 - und in der Harleimündung - Sept./Okt. 1965 - (unveröff. Bericht)
- [14] Bundesanstalt für Wasserbau : Bericht über einen Testversuch mit Luminophoren im Wattgebiet von Scharhörn 1963/1964 (unveröff. Bericht)
- [15] Bundesanstalt für Wasserbau : Bericht über einen kombinierten Versuch mit Isotopen und Luminophoren im Wattgebiet Neuwerk-Scharhörn im Jahre 1965 (unveröff. Bericht)
- [16] Bundesanstalt für Wasserbau : Gutachten über die Auswirkungen der Strombaumaßnahmen zwischen km 77 und 81 der Außenweser auf die Strömungs- und Durchflußverhältnisse im Fedderwarder und Wurster Arm (unveröff. Bericht)
- [17] Bundesanstalt für Wasserbau : Sandwanderungsmessungen mit radioaktiven Isotopen im Gebiet des Wangerooger Fahrwassers - Juni/Juli 1966 und Sept./Okt. 1966 (unveröff. Bericht)
- [18] Druns, E. : Handbuch der Wellen, der Meere und Ozeane. Veröff. d. Seehydr. Dienstes DDR, 246 S. Berlin 1955
- [19] Dietrich, G. : Die natürlichen Regionen von Nord- und Ostsee auf hydrographischer Grundlage (Kieler Meeresforsch.) 7:35-69 Kiel 1950
- [20] Dietrich, G. : Meereskunde der Gegenwart - Aufgaben und Ergebnisse. Naturwiss. Rdsch. 16: 465-473 Stuttgart 1963
- [21] Deutsches Hydrographisches Institut : Atlas der Gezeitenströme für die Nordsee, den Kanal u. die Britischen Gewässer DHI, Hamburg 1963
- [22] Dillo, H.G. : Sandwanderung in Tideflüssen. Mitt. d. Franzius-Inst. Grund- und Wasserbau TH Hannover, 17: 135-253 Hannover 1960
- [23] Dingle, R.V. : Sand waves in the North-Sea mapped by continuous reflection profiling. Marine Geol. 3: 391-400
- [24] Dolezal, R., Petersen, M., Becher, H., Götte, H., Schulze-Pillot, G., Tomschke, R., Röttcher, R., Nachtigall, K.H., Seibold, E. : Entwicklung und Untersuchung eines radioaktiven Indikatorverfahrens zur Messung der Kinetik, der Erosion und des Sandtransportes an sandigen Brandungsküsten. Duratom 2167 d, abgefaßt v. Landesamt f. Wasserwirtschaft Schleswig-Holstein, Kiel (1965)
- [25] Gierloff-Emden, H.G. : Mehrgungen und Lagunen. Gesetzmäßigkeiten ihrer Formenbildung und Verbreitung. Peterm. Geogr. Mitt. 105: 81 - 92, 161.176, Gotha 1961
- [26] Göhren, H. : Beitrag zur Morphologie der Jade- und Wesermündung. Die Küste 13: 140 - 146, Heide 1965
- [27] Gripp, K. : Entstehung und künftige Entwicklung der Deutschen Bucht. Aus d. Archiv d. dt. Seewetteramt. u. d. Marineobservatoriums 63, Nr. 2 (1944)
- [28] Hensen, H. : Die Entwicklung der Fahrwasser-Verhältnisse in der Außenelbe Jg. Hafengeb. Ges., 18: 91-165, Berlin 1941
- [29] Hundt, C. : Die Abbruchursachen an der Nordwestküste des Ellenbogens auf Sylt. Die Küste 6: 3-39, Heide 1957
- [30] Jarke, J. : Eine neue Bodenkarte der südlichen Nordsee. Dtsch. Hydr. Zeitschrift 9: 1-9 Hamburg 1956
- [31] Jolliffe, I.P. : A Study of Sand Movements on the Lowestoft Sandbank Using Fluorescent Tracers. Geogr. J. 129: 480-493, London 1963
- [32] Klein, H.A. : Beobachtung des Schlicktransportes in einem Tidefluß mit Hilfe radioaktiver Leitstoffe. Die Wasserwirtschaft 50: 95-101
- [33] Klein, H.A. : Strömungsverhältnisse und Wassermengen der Tide-Elbe (Messungen 1958-60) Mitt. d. WSD Hamburg Nr. 11, Hamburg 1960
- [34] Lamprecht, H.O. : Uferveränderungen und Küstenschutz auf Sylt. Die Küste 6: 39-93, Heide 1957
- [35] Laucht, H. und Göhren, H. : Zwischenbericht über die Forschungsarbeiten im Wattgebiet Neuwerk/Scharhörn. Schriftenreihe d. Beh. f. Wirtschaft u. Verkehr d. Freie u. Hansestadt Hamburg
- [36] Lucht, F. : Geschiebe- und Sinkstofftransporte in der Elbe. Mitt. d. Geol. Staatsinst. Hamburg. H. 23: 68-75, Hamburg 1954
- [37] Lüders, K. : Entstehung und Aufbau von Großrücken mit Schillbedeckung in Flut- bzw. Ebberückern der Außenjade. Senkenbergiana 11: 123-142, Frankfurt/Main 1929
- [38] Lüneburg, H. : Zur Sedimentsverteilung in der Außenweser zwischen Hoheweg und Roter Sand. Veröff. Inst. f. Meeresforschung in Bremerhaven 7: 11-15, Bremerhaven 1961
- [39] Lüneburg, H. : Über die Erosion und den Sedimenttransport am Knechtsand und Eversand. Veröff. Inst. f. Meeresforschung, Bremerhaven 7: 277-294, Bremerhaven 1961
- [40] Lüneburg, H. : Ursprung und Transport der Sedimente in den Watttrinnen des Gradyb-Systems bei Esbjerg. Folia Geogr. Danica, Tom 10: 1-33, København 1966
- [41] Oberkommando d. Kriegsmarine : Atlas der Bodenbeschaffenheit des Meeres 1. Lieferung. Südl. Nordsee und Deutsche Bucht
- [42] Müller, C.D., Nachtigall, K.H., Reineck, H.E., Seibold, E., Vollbrecht, K. : Der Knechtsand. Eine Untersuchung über Material und Materialtransport mit der Luminophorenmethode und anderen vergleichenden Methoden. Forschungsstelle Horderney 1964 16: 143-203, Horderney 1965
- [43] Perneckner, L. und Vollmers, H. : Neue Betrachtungsmöglichkeiten des Feststofftransports in offenen Gerinnen. Wasserwirtschaft 12: 386-391, 1965

- [44] Piest, J. : Die Bestimmungen des Tiefwasserseeganges aus seinen skaler spektralen Komponenten bei bekannten Windverhältnissen. Dtsch.Wetterdienst, Seewetteramt, Einzelveröffentl.Nr.43, Hamburg 1964
- [45] Prätje, O. : Die Bodenbedeckung der westeuropäischen Meere. Handbuch d.Seefischerei Nordeuropas Band I, Heft 3, Stuttgart 1949
- [46] Prätje, O. : Die Deutung der Steingründe in der Nordsee als Endmoränen. Dtsch.Hydr. Zeitschr., 4:106-114, Hamburg 1951
- [47] Prätje, O. und Schüler, E. : Bodenkartierung des Seegbietes Hoofden (südl.Nordsee) mit Hilfe von Grundproben und Echogrammen. Dtsch.Hydr.Zeitschr.5:189-196, Hamburg 1953
- [48] Reid, W.J. : Coastal Experiments with Radioactive Tracers. Recent Work on the Coast of Norfolk. The Dock and Harbour Auth. 453: 84-88
- [49] Reid, W.J., Jolliffe, I.P. : Coastal Experiments with Fluorescent Tracers. Measuring Quantity and Direction of Littoral Drift. The Dock and Harbour Auth., 484: 341-345
- [50] Reineck, H.E. : Sedimentgefüge im Bereich der südlichen Nordsee. Abh.Senckenb.Naturf.Ges.505: 1-138, Frankfurt a.H. 1963
- [51] Robinson, A.H.V. : Residual currents in relation to shoreline evolution of the East Anglian coast. Marine Geology 3: 51-84
- [52] Rohde, H. : Die Kornzusammensetzung der Watt- sände zwischen Elbe und Eider. Wasserwirtschaft 53: 15-21
- [53] Roll, H.U. : Die Meereswellen in der südlichen Nordsee. Dtsch.Wetterdienst, Seewetteramt, Einzelveröffentl.Nr.8
- [54] Ruck, K.W. : Erfahrungen mit Sandwanderungsuntersuchungen mittels Luminophoren. Wasserwirtschaft (im Druck)
- [55] Sagor, G. : Die Größtgeschwindigkeiten der Gezeitenströme zur mittleren Springzeit in der Nordsee, dem Kanal und der Irischen See. Beitr.Meereskunde 1: 19-26, Berlin 1961
- [56] Schnoor, E. : Demonstration der Berechnung der von Seegang mobilisierten und von einer Transportströmung verfrachteten Sandmengen vermittels einiger Berechnungsbeispiele (unveröffentl.Bericht der BAW/AK 1967)
- [57] Schulz, H. : Erfahrungen und Erkenntnisse bei der Untersuchung der Sandbewegung in den Küstengewässern mit radioaktiven Leitstoffen. Wasserwirtschaft 57: 301-307
- [58] Schulz, H. und Heyn, G. : Sandwanderungsuntersuchungen mit radioaktiven Isotopen im deutschen Küstengebiet der Nord- und Ostsee in den Jahren 1961/62. Dtsch.Gewässerkundl.Mitt. 7:29 1963
- [59] See- und Ozeanhandbücher : Nr. 2006 Nordsee, Natl.Teil von Hontsholm bis Terschelling, Hamburg (DHI) 1958
- [60] Simon, W.G. : Bericht über Untersuchungsergebnisse an Grundproben aus dem Bereich der Außenelbe vom Sommer 1959. Mitt. d.WSD Hamburg Nr.12, Hamburg 1961
- [61] Simon, W.G. : Geschichte des Elbe-Ästuars von der Überflutung der Nordsee nach der letzten Vereisung bis zur Gegenwart, nach dem Stand der Kenntnisse von 1964. Abhand.u.Verh.Naturwiss.Ver. in Hamburg, N.F.Bd.IX: 163-206 1964, Hamburg 1965
- [62] Stocks, Th. : Der Boden der südlichen Nordsee. Eine neue Tiefenkarte der südl.Nordsee. Dtsch.Hydrogr.Zeitschr.9:266-280, Hamburg 1956
- [63] Straaten, L.H.U.van : Meggariples in the dutch wadden Sea and in the basin of Arcachon (France), Geol.en.Mijnb.n.ser., 15: 1-11, Leiden 1953
- [64] Stride, A.H. and Cartwright, D.E. : Sand Transport at Southern End of the North Sea, The Dock and Harbour Auth. 447: 323-324
- [65] Stride, A.H. : A Pattern of Sediment Transport for Sea Flowers around Southern Britain. The Dock and Harbour Auth. 467:145-147
- [66] Terwindt, J.H.J., de Jong, J.D., Milk, van der E. : Sediment Movement and Sediment Properties in the Lower Rhine (Rotterdam Waterways) Ver.Kon. Ned.Geol.Mijnbouwk Gen.Geol.Ser. 21-2: 243-258 1963
- [67] Valentin, H. : Die Grenze der letzten Vereisung in Nordseeraum. Verh. 30, Dt.Geogr. Tag.Hamburg 1955, Wiesbaden 1957
- [68] Veen, J. van : Ebnen Vloedschaar systemen in der Nederlandse Getigwateren. Tijdschr.Koninkl.Nederl.Aard Genootsch. 43-65
- [69] Veenstra, H.J. : Geology of the Hinder Banks, Southern North Sea, Hydr.Newsletter Vol. 1: 72-80 The Hague
- [70] Veenstra, H.J. : Geology of the Dogger Bank Area North Sea, Marine Geology 3: 245-262, Amsterdam
- [71] Völpel, F. : Studie über das Verhalten weiterwandernder Flachsesande in der südl.Nordsee. Dtsch.Hydrogr.Zeitschr., 12: 64-76 Hamburg 1959
- [72] Völpel, F. und Sanu, Gy. : Reliefänderung in der Tideströmungsrinne des Hangerooger Fahrwassers im Verlaufe einer Sturmperiode und in der darauf folgenden Periode mit ruhigen Wetterlagen. Mitt.d. BAW, 24: 1-20 Karlsruhe 1966
- [73] WSA Brenerhaven : Gewässerkundl. Untersuchungsbericht. Die Auswirkungen von Strombaumaßnahmen zwischen km 77,0 und 81,0 der Außenweser auf Strömungsverhältnisse und Morphologie. WSA Brenerhaven (unveröffentl. Bericht) Brenerhaven 1961
- [74] WSA Tönning : Die Eider - Grundlagenstudie Abschnitt 4 - Vorarbeiten zur Lösung des Eiderproblems (unveröffentl. Bericht des WSA Tönning) Tönning 1963
- [75] Walden, H. und Piest, J. : Vergleichsmessungen des Seeganges mit verschiedenen Meßgeräten zur Prüfung des Seegangs-Beschleunigungsschreibers mit Film-Ritz-Aufzeichnung und Auswertung. Dt.Wetterdienst, Seewetteramt Einzelveröffentl. Nr. 30, Hamburg 1961.

