

Sandbewegungsuntersuchungen mit radioaktiven Tracern im hydraulischen Modell und in der Natur

Von H a n s R o h d e

Z u s a m m e n f a s s u n g

Um im Elbeästuar geeignete Stellen zu finden, an denen Baggergut abgelagert werden kann, ohne wieder in das Fahrwasser zu gelangen, sind seit 1973 Untersuchungen in einem Modell der Elbe mit beweglicher Sohle ausgeführt worden. Dabei wurde die Verfrachtung von radioaktivem Sohlenmaterial unmittelbar gemessen. Zum Vergleich wurden in der Natur an zwei Stellen entsprechende Untersuchungen ausgeführt. Es ergaben sich gute Übereinstimmungen der Bewegungsrichtungen des radioaktiven Tracers im Modell und in der Natur. In der Natur waren Transportwege und Transportgeschwindigkeiten aber erheblich größer als im Modell. Diese Unterschiede werden auf unterschiedliches Transportverhalten – reiner Geschiebetransport im Modell, Geschiebe- und Suspensionstransport in der Natur – zurückgeführt.

S u m m a r y

To find ideal places where dredged spoil could be deposited without danger of being retransported into the fairway, investigations have been performed since 1973 in a hydraulic model of the Elbe Estuary with a movable bed. Thereby the spreading of radioactive bed material was measured direct. For comparison corresponding investigations were undertaken at two places in the field. These investigations revealed a good harmony between the spreading direction of the radioactive tracers in the model and in the field. In the field however the transport distances were longer and the spreading took place more quickly than in the model experiment. These differences are to be traced back to differences in the transportation behavior: Transportation only as bedload in the model, transportation as bedload and in suspension in the field.

Die Unter- und Außenelbe ist die Seeschiffahrtsstraße mit dem stärksten Schiffsverkehr in Deutschland. Für die Schaffung und Erhaltung der für die Großschiffahrt erforderlichen Fahrwassertiefe werden Strombauwerke und Baggerungen gleichermaßen angewandt (ROHDE, 1971). Um die Zweckmäßigkeit dieser Maßnahmen im einzelnen zu untersuchen, sind bei der Außenstelle Küste der Bundesanstalt für Wasserbau in Hamburg große hydraulische Modelle des Elbeästuars vorhanden. Die Probleme, die sich aus der Verlagerung der Sände und der Fahrwasser sowie aus dem Sedimenttransport ergeben, werden insbesondere in einem Modell mit beweglicher Sohle aus Polystyrolkörnern untersucht (ROHDE, 1971). Einzelheiten über Aufbau, Instrumentierung und Fragen der Maßstabsverhältnisse dieses Modells sind von VOLLMERS bei der 13. International Conference on Coastal Engineering 1972 in Vancouver vorgetragen worden (VOLLMERS u. GIESE, 1972). Abb. 1 zeigt das Elbeästuar und die äußere Grenze des Modells, dessen Längenmaßstab 1:800 und dessen Tiefenmaßstab 1:100 beträgt. Abb. 2 zeigt einen Blick auf das Modell etwa von der Insel Neuwerk aus in Richtung des Flutstromes.

1973 wurde in dem Modell erstmals ein Versuch unternommen, die Verlagerung des beweglichen Sohlenmaterials mit Hilfe von radioaktiven Isotopen direkt zu messen. Es

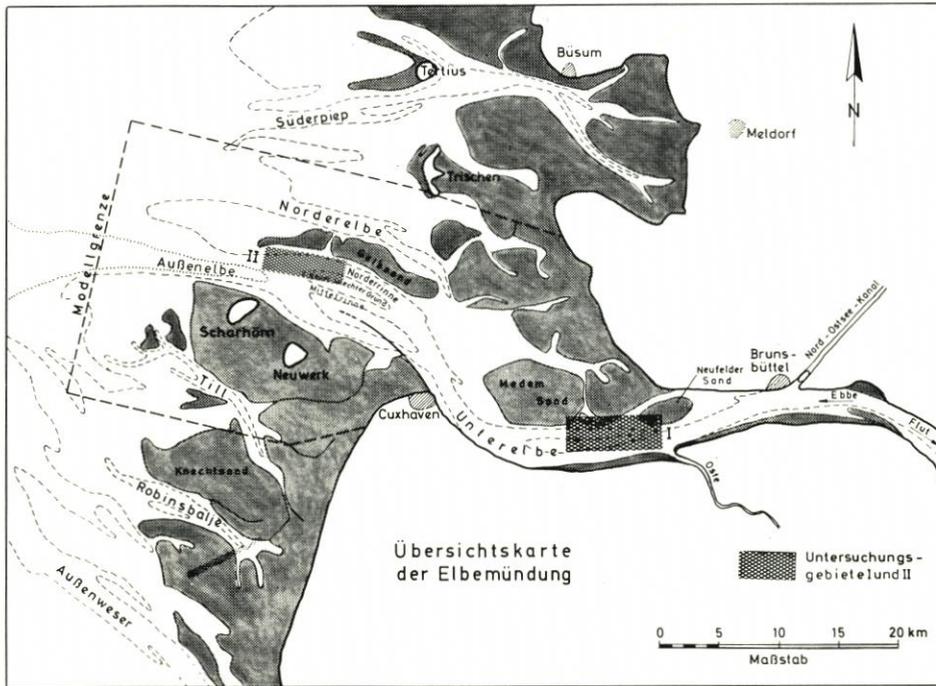


Abb. 1. Elbeästuar und äußere Grenzen des Modells mit beweglicher Sohle



Abb. 2. Das Elbemodell mit beweglicher Sohle

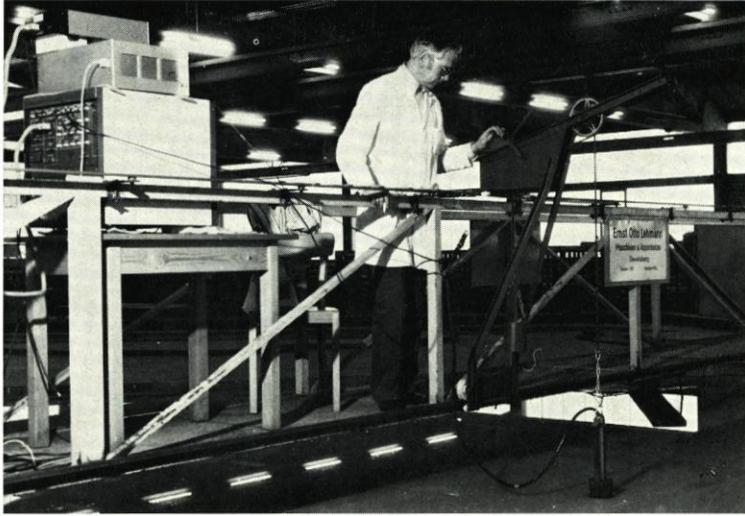


Abb. 3. Meßeinrichtung für die Untersuchung der Ausbreitung von radioaktivem Material im Modell

war die Aufgabe, im Elbeästuar geeignete Stellen zu finden, an denen Baggergut aus der Fahrrinne abgelagert werden kann, ohne daß die Gefahr besteht, daß das Material durch die Strömung wieder an Stellen transportiert wird, wo es die Schifffahrt behindert. Die Ablagerungsstellen müssen von tiefgehenden Hopperbaggern erreicht werden können. Um die Verfrachtung von verklapptem Baggergut zu untersuchen, wurde an eine geringe Menge des Modell-Sohlenmaterials das Isotop Brom 82 angelagert (Halbwertszeit 36 Stunden). Jeweils 25 g mit einer Aktivität von 10 Microcurie (μCi) wurden nacheinander an verschiedenen Orten in das Modell eingebracht, und es wurde die Verteilung des Materials nach einer Zeit von jeweils 150 Tiden untersucht und mit den herrschenden Strömungsverhältnissen verglichen. Hieraus ergab sich eine Wertung für die verschiedenen Ablagerungsstellen des Baggergutes. Abb. 3 zeigt die Messung der Ausbreitung des radioaktiven Materials im Modell mit einem Szintillationszähler. Das Zählgerät hängt an einem Ausleger, der quer zur Bewegungsrichtung der verfahrbaren Meßbrücke bewegt werden kann, die das gesamte Modell überspannt. Es kann so jeder Punkt der Modellfläche mit dem Zählgerät erreicht werden. Links im Bild ist der Drucker zu erkennen, mit dem die Meßwerte registriert werden. Über Einzelheiten dieser Modelluntersuchungen hat VOLLMERS bei dem 15. IAHR Kongreß in Istanbul berichtet (VOLLMERS u. GIESE, 1973).

Bisher fehlte noch der Vergleich zwischen den Isotopenmessungen in dem hydraulischen Modell und entsprechenden Messungen in der Natur. Für diesen Vergleich wurden die in Abb. 1 angegebenen Stellen I in der Unterelbe zwischen Brunsbüttel und Cuxhaven und II in der Außenelbe nordostwärts von der Insel Scharhörn ausgewählt. Über diese Untersuchungen und ihre Ergebnisse soll im folgenden berichtet werden. Fast 50 ähnliche Untersuchungen mit radioaktiven Tracern sind seit 1960 von der Außenstelle Küste der Bundesanstalt für Wasserbau in Hamburg im Küstengebiet der Nordsee ausgeführt worden. Über die dabei angewandten Verfahren der Markierung, des Einbringens auf die Gewässersohle sowie der Messung der Radioaktivität und ihrer Ausbreitung auf der Gewässersohle ist in (BAW, 1970; GÖTTE u. BECKER, 1965; SCHULZ u. MEYN, 1963) ausführlich berichtet worden.

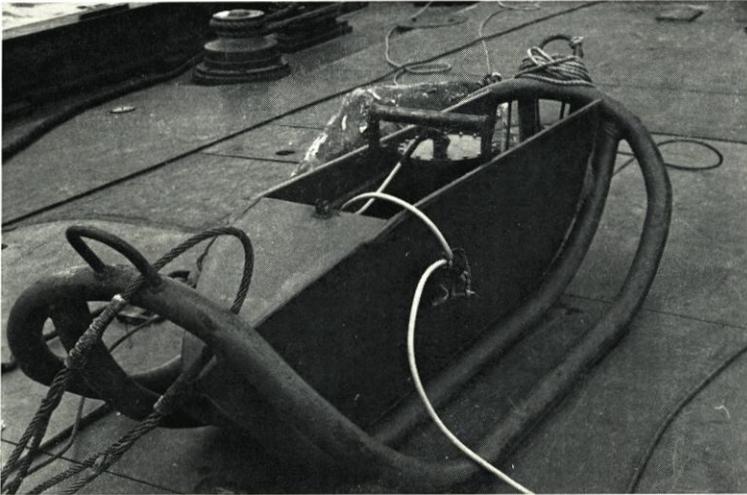


Abb. 4. Der neue Meßschlitten, Seitenansicht



Abb. 5. Der Meßschlitten von unten

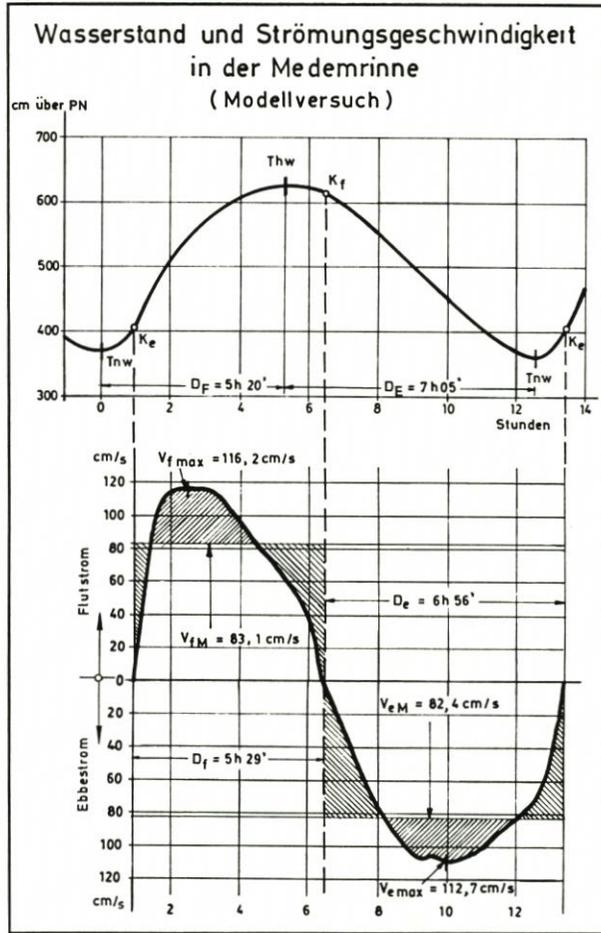


Abb. 6. Tidekurve und Ganglinie der Strömungsgeschwindigkeit im Verklappungsgebiet Medemrinne (Modellmessungen)

Bei allen bisherigen Untersuchungen kam es lediglich darauf an, die Sandbewegung qualitativ zu erfassen, also Aussagen über die Hauptbewegungsrichtung des Sandes zu gewinnen. Es sind zur Zeit Untersuchungen im Gange, künftig auch quantitative Aussagen machen zu können, also Aussagen über die Menge des in den verschiedenen Richtungen transportierten radioaktiven Materials. Ein Verfahren dazu ist von MUNDSCHEK (1972) angegeben worden. Für dieses Verfahren wurde von der Außenstelle Küste der Bundesanstalt für Wasserbau ein neuer, besonders schwerer Meßschlitten konstruiert, den die Abbildungen 4 und 5 zeigen. Abb. 4 ist eine Seitenansicht des Schlittens, der im Meßeinsatz hinter einem Schleppschiff auf der Gewässersohle hergezogen wird. Abb. 5 zeigt die Unterseite des Schlittens und verdeutlicht gleichzeitig seine Größe. Am hinteren Ende ist die Meßsonde zu erkennen. Dieser Meßschlitten hat sich sehr gut bewährt. Er ist außerordentlich stabil und richtet sich nach einem Umkippen von selbst wieder auf. Der Abstand der Meßsonde vom Boden bleibt praktisch immer konstant, was für die Vergleichbarkeit der Meßwerte, besonders bei quantitativen Untersuchungen, von großer

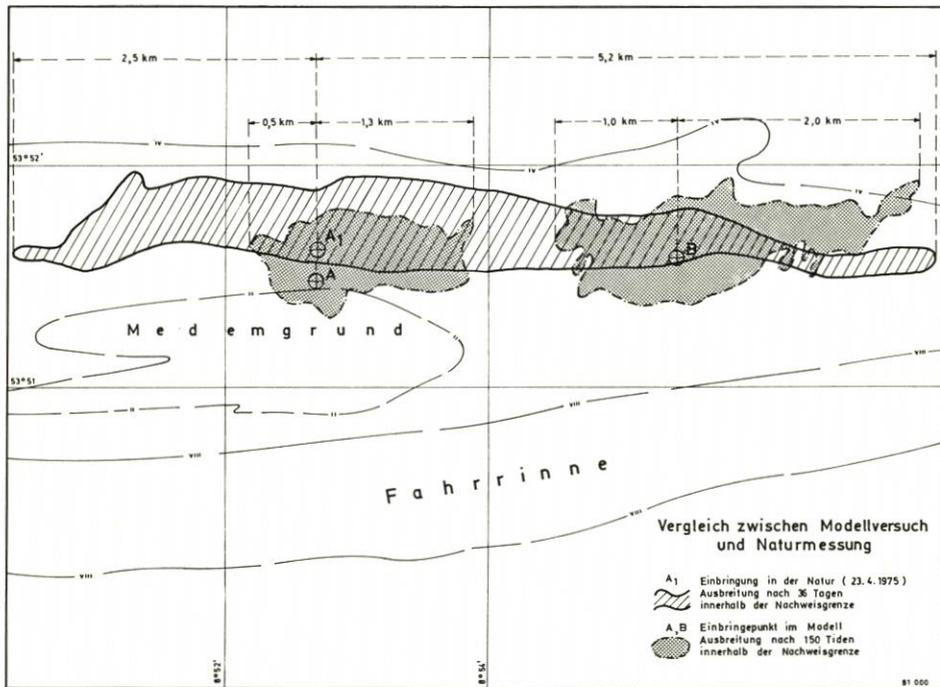


Abb. 7. Vergleich der Tracerausbreitung in der Medemrinne im Modell und in der Natur (Lageplan)

Bedeutung ist. Die Registrierung der Meßwerte erfolgt an Bord des Schleppschiffes durch einen Drucker. Dieser Meßschlitten wurde auch bei den in der vorliegenden Arbeit geschilderten Untersuchungen in der Unter- und Außenelbe verwendet, obwohl die Ausbreitung des radioaktiven Sandes nur qualitativ erfaßt werden sollte.

Das Untersuchungsgebiet I liegt westlich des Neufelder Sandes. Die Medemrinne, eine Nebenrinne der Unterelbe, hat ausreichende Tiefen, um von tiefgehenden Hopperbaggern befahren werden zu können. Die Rinne ist von dem eigentlichen Fahrwasser durch einen Sandrücken, den Medemgrund, getrennt. Strömungsmessungen ergaben eine gegenüber der Ebbestromgeschwindigkeit etwas größere Flutstromgeschwindigkeit; die Ebbestromdauer war dagegen größer als die Flutstromdauer. Abb. 6 zeigt die Tidekurve und die Ganglinie der Strömungsgeschwindigkeit am östlichen Ende der Medemrinne, wie sie im Modellversuch gemessen wurden. Aufgrund der Strömungsgeschwindigkeiten kann nicht eindeutig geschlossen werden, wie sich die Sandbewegung vollziehen wird. Im Modell wurden an zwei Punkten, am östlichen Ende der Medemrinne (Punkt A) und 3 km östlich davon (Punkt B), nacheinander jeweils 25 g radioaktives Sohlenmaterial eingebracht und die Ausbreitung nach 150 Modelltiden gemessen. In Abb. 7 sind die Flächen, in denen radioaktives Material nachgewiesen werden konnte, dunkel angelegt. Es ergab sich dabei eine eindeutige Bewegung in Richtung auf die flutwärts gelegene, ausgedehnte Sandplatte, den Neufelder Sand. Ein Sandtransport in das Fahrwasser wurde nicht beobachtet.

Im Frühjahr 1975 wurde nun in unmittelbarer Nähe des Modelleinbringungspunktes A in der Natur eine Menge von 10 kg Sand auf der Flußsohle abgelagert, der mit 3 Curie Scandium 46 (Halbwertszeit 84 Tage) gekennzeichnet war. Die Anlagerung des

Isotops unmittelbar an die Oberfläche der Sandkörner erfolgte durch ein chemisches Verfahren (GÖTTE u. BECKER, 1965) ohne Vorbehandlung des Sandes mit Wasserglas (Na_2SiO_3). Die Ausbreitung des Materials wurde mit einem Szintillationszähler gemessen. Das Zählgerät war in dem in Abb. 4 und 5 gezeigten schweren Meßschlitten eingebaut, der von einem Schiff über Grund gezogen wurde. Zur Kontrolle und zur genauen Abgrenzung des Gebietes, in dem radioaktiver Sand nachweisbar war, wurden außerdem zahlreiche Bodenproben entnommen und mit einem Vielkanalanalysator γ -spektrometrisch untersucht. Die Fläche, in der innerhalb von 36 Tagen radioaktiver Sand in der Natur nachgewiesen werden konnte, ist in Abb. 7 schraffiert dargestellt.

Die Untersuchungen ergaben eine gute Übereinstimmung zwischen der Ausbreitungsrichtung des radioaktiven Tracers im Modell und in der Natur. Sowohl in der Natur als auch im Modell fand ein überwiegender Transport in Flutrichtung statt, auf den Neufelder Sand zu. Kein radioaktives Material wurde im Fahrwasser gefunden. Während der gesamten Untersuchungszeit von 36 Tagen blieb die Aktivität in der Nähe der Einbringestelle am größten. Dagegen waren in der Ausbreitungszeit erhebliche Unterschiede zwischen dem Modell und der Natur zu erkennen. Betrachtet seien zunächst die Einbringungspunkte A und A 1: Im Modell betrug die nach 150 Tiden gemessene größte Ausbreitung in Flutstromrichtung 1,3 km, in Ebbestromrichtung nur 0,5 km. Die Ausbreitungsstrecke war also in Flutrichtung 2,6mal größer als in der Ebbestromrichtung. Im Naturversuch lag die Einbringestelle 250 m nördlicher. Schon nach 36 Tagen oder 72 Tiden wurde in einer Entfernung von 5,2 km in Flutstromrichtung und 2,5 km in Ebbestromrichtung radioaktives Material gefunden. Die Ausbreitung in Flutstromrichtung war also 2,1mal größer als in Ebbestromrichtung.

Am östlichen Ende des in der Natur festgestellten Ausbreitungsgebietes lag im Modell der Einbringepunkt B. Auch das hier eingebrachte Material breitete sich in Flutstromrichtung doppelt so weit aus wie in Ebbestromrichtung (2,0 km und 1,0 km). Die Ausbreitungsrichtung stimmte auch gut mit der im Naturversuch festgestellten überein.

Abb. 8 zeigt die Radioaktivität, wie sie in der Natur in Längserstreckung der Ausbreitung nach 3 und 4 Wochen gemessen wurde. Die Punkte sind die auf den Tag des Einbringens umgerechneten Meßwerte. Die gestrichelte Linie gleicht diese Werte aus und gibt ein Bild von der Verteilung der Radioaktivität. Der logarithmische Maßstab, auf den sich diese Darstellung bezieht, ist links in der Abbildung angegeben; die Dimension ist Nanocurie (nCi). Die Stufenkurve zeigt die Verteilung der Radioaktivität im Modellversuch; der Maßstab ist rechts in der Abbildung angegeben, die Dimension ist Impulse pro Minute. nCi und Imp/min sind nicht unmittelbar zu vergleichen, sondern mit der Abbildung soll nur die Form der beiden Verteilungskurven einander gegenübergestellt werden. Es ist deutlich zu erkennen, daß in beiden Fällen der Anstieg links, also westlich des Einbringepunktes, sehr steil ist. Das Maximum ist etwas nach rechts verschoben. Die Hauptmasse des radioaktiven Sohlmaterials hat sich im Modellversuch offensichtlich stark nach rechts (Osten) verlagert; ein zweites Maximum hat sich ausgebildet. Die stärkere Verlagerung nach Osten, in Richtung des Flutstromes, ergibt auch die Verteilungskurve in der Natur.

Der Vergleich der Untersuchungen zeigt, daß in der Natur die Ausbreitung wesentlich schneller erfolgt als im Modellversuch. Das Verhältnis zwischen den Ausbreitungsweiten in Ebbe- und Flutstromrichtung war zwar in Modell und Natur etwa gleich groß, absolut war aber in der Natur in etwa der halben Anzahl von Tiden in Flutstromrichtung die Entfernung vom Einbringepunkt, in der noch radioaktives Material nachgewiesen werden konnte, viermal, in Ebbestromrichtung fünfmal größer als im Modellversuch.

Dabei ist noch zu bedenken, daß im sogenannten morphologischen Modell-Zeitmaßstab eine Modelltide eine größere Zeitspanne darstellt als eine Naturtide. Diese starken Unterschiede in der Ausbreitungsgeschwindigkeit sind in erster Linie auf Unterschiede zwischen dem Transportverhalten des Modell-Sohlenmaterials und des Natursandes zurückzuführen. Das Modell-Sohlenmaterial wird vorwiegend als Geschiebe, ein größerer Teil des

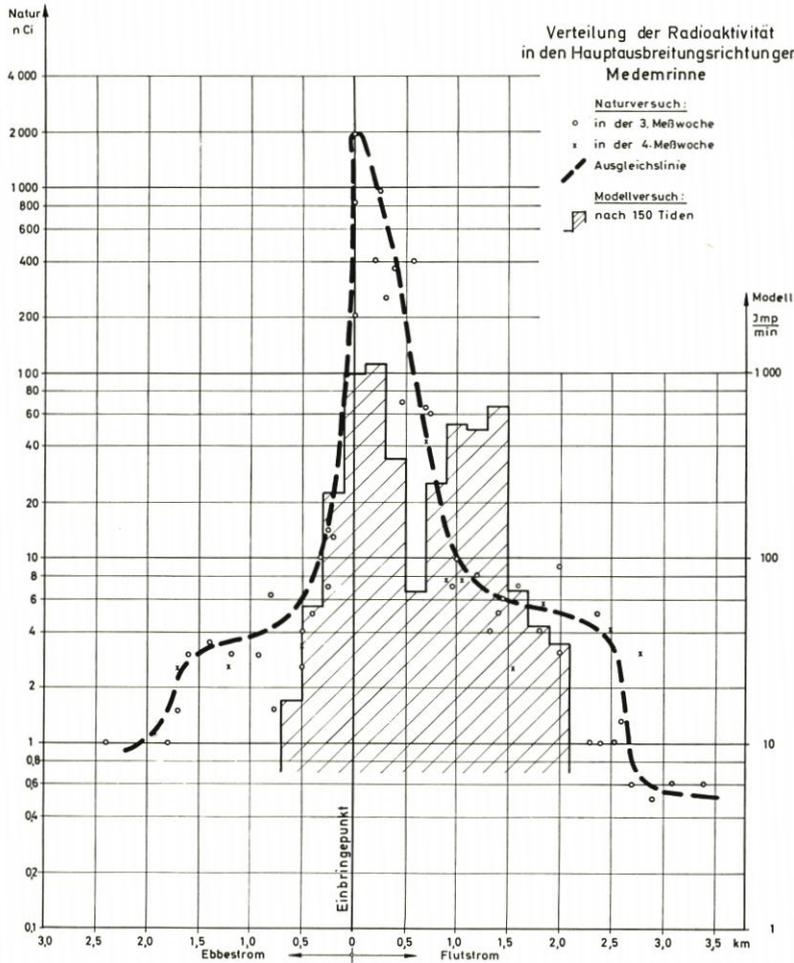


Abb. 8. Ausbreitung des Tracers in der Medemrinne im Modell und in der Natur (Verteilung der Radioaktivität in der Hauptausbreitungsrichtung)

Sandes in der Natur dagegen in Suspension transportiert. Insbesondere die weiter von der Einbringestelle entfernten radioaktiven Sandmengen, die nur an einzelnen Punkten gefunden wurden, dürften in Suspension an ihren Ablagerungsort gelangt sein. Nur in einem Teil der Strecke, in der der Sand als geschlossener Streifen nachgewiesen werden konnte, wird in der relativ kurzen Beobachtungszeit der radioaktive Sand als Geschiebe transportiert worden sein.

Im Herbst 1975 wurde eine weitere Untersuchung in der Außenelbe ausgeführt. Das Untersuchungsgebiet II lag am westlichen Ende der Norderrinne, die von der als Haupt-

fahwasser dienenden Mittelrinne durch den Neuen-Luechter-Grund getrennt ist. Der Einbringepunkt lag dabei in der Nähe des in (VOLLMERS u. GIESE, 1973) beschriebenen Einbringepunktes 1 im Modell mit beweglicher Sohle. Bei dieser Untersuchung wurde mit dem Isotop Chrom 51 ($Cr\ 51$, Halbwertszeit 28 Tage) gearbeitet; die Anlagerung erfolgte nach Vorbehandlung des Sandes mit Wasserglas (BAW, 1970). Es wurden 100 kg

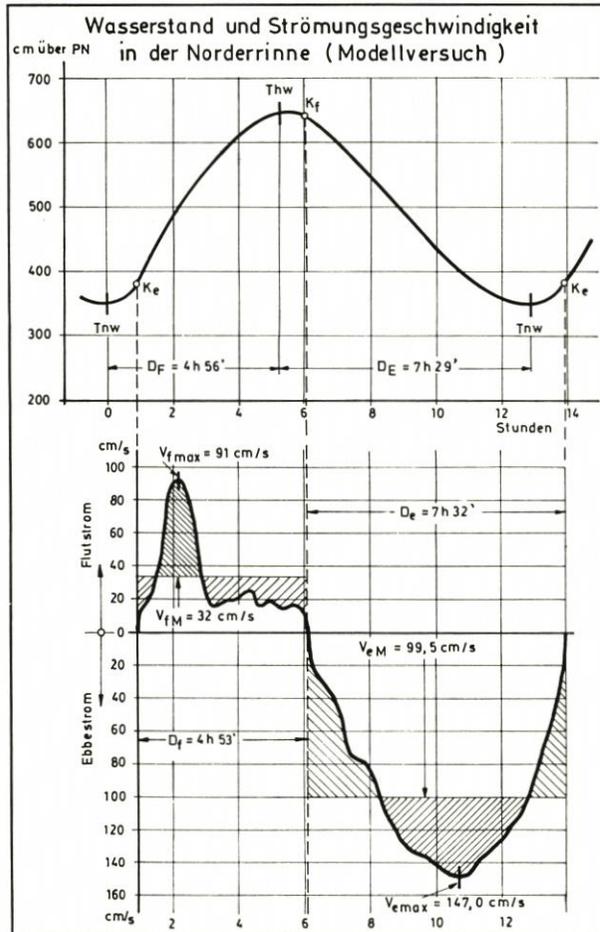


Abb. 9. Tidekurve und Ganglinie der Strömungsgeschwindigkeit im Verklappungsgebiet Norderinne (Modellmessungen)

Sand mit einer Aktivität von 20 Curie verwendet. Chrom 51 ist für derartige Untersuchungen nicht so gut geeignet wie Scandium 46, weil es eine kürzere Halbwertszeit und eine weniger energiereiche γ -Strahlung hat. Wie Abb. 9 zeigt, herrscht in der Nähe des Einbringepunktes eindeutig die Ebbestromgeschwindigkeit vor. Entsprechend war auch ein vorwiegender Transport des Sandes in dieser Richtung zu erwarten. Die nach 150 Modelltiden gemessene Ausbreitung des radioaktiven Sohlenmaterials ist in Abb. 10 als dunkle Fläche dargestellt. Die Fläche, in der bereits 5 Tage oder 10 Tiden nach dem Einbringen in der Natur radioaktiver Sand nachgewiesen werden konnte, ist schraffiert ge-

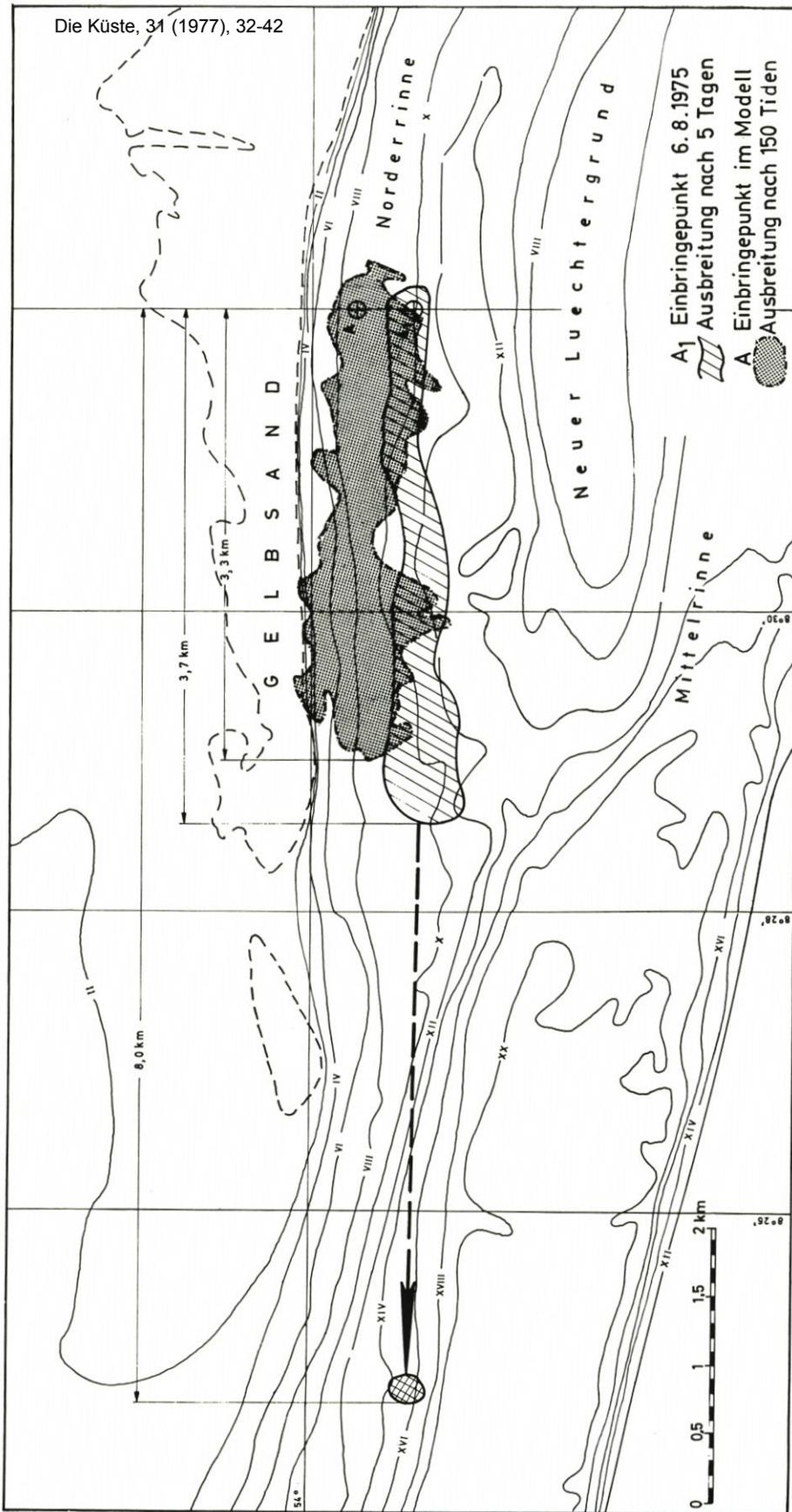


Abb. 10. Vergleich der Tracerausbreitung in der Norderrinne im Modell und in der Natur (Lageplan)

kennzeichnet. Auch hier stimmen die Transportrichtungen gut überein; in Flutstromrichtung fand praktisch kein Transport statt. Besonders interessant ist, daß 3 Wochen nach dem Einbringen in 8 km Entfernung vom Einbringepunkt eine begrenzte Stelle mit stark erhöhter Radioaktivität am Rande des Hauptfahrwassers gefunden werden konnte. Sie ist in Abb. 10 doppelt schraffiert. An dieser Stelle bilden sich häufiger Sandablagerungen. Die Untersuchungen in der Norderrinne der Außenelbe bestätigen die Ergebnisse, die sich bei den Untersuchungen in der Medemrinne ergeben hatten. Auch hier erfolgte die Ausbreitung in der Natur sehr viel schneller als im Modellversuch, was auf den Transport in Suspension zurückzuführen ist. Das in 8 km Entfernung gefundene radioaktive Material wird ausschließlich in Suspension transportiert worden sein.

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß Versuche mit radioaktiven Tracern in einem Modell mit beweglicher Sohle wertvolle Hinweise auf den in der Natur zu erwartenden Sedimenttransport geben können. Insbesondere läßt sich die Hauptbewegungsrichtung feststellen. In der Natur werden aber in kürzerer Zeit größere Transportweiten erreicht, weil der Transport zu einem Teil in Suspension vonstatten geht. Bei den Modellversuchen konnte die Verlagerung der Gesamtmenge des eingebrachten radioaktiven Materials exakt erfaßt werden. Das ist bei den Untersuchungen in der Natur bisher noch nicht möglich. Da sich bei den nur qualitativen Naturuntersuchungen aber die gleichen Haupttransportrichtungen ergaben wie im Modellversuch und auch die Form der Verteilungskurven ähnlich war, ist anzunehmen, daß damit auch ein Hinweis auf die transportierten Mengen gegeben ist. In dem Gebiet, in dem in der Natur die höhere Radioaktivität gemessen wurde, ist trotz der größeren Möglichkeit einer Vermischung und Überlagerung mit inaktivem Sand der stärkere Sandtransport zu erwarten.

Weitere Vergleiche zwischen Modellversuchen und Untersuchungen in der Natur müssen noch Einzelheiten klären, besonders auch das unterschiedliche Transportverhalten. Dazu ist es notwendig, den Transport des radioaktiven Sandes in der Natur nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ zu untersuchen. Derartige Untersuchungen sind für die Zukunft geplant.

Schriftenverzeichnis

- BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU (BAW): Tätigkeitsbericht 1968–1969. Teilbericht Außenstelle Küste, Fachgruppe Seebaugrundlagen. Karlsruhe, 1970.
- GÖTTE, H. u. BECKER, H.: Verfahren zur Oberflächenmarkierung von natürlichem Sand mit Radionukliden. EURATOM-Ber. 2167.d, 1965.
- MEYN, G.: Anwendung radioaktiver Isotope bei der Untersuchung der Sandwanderung. Atomkernenergie, Bd. 17, Lfg. 1, 1971.
- MUNDSCHEK, H.: Methodische Beiträge zur quantitativen Erfassung von Sedimentbewegungen, Teil II. Dtsch. Gew.-kdl. Mitt., H. 6, 1972.
- ROHDE, H.: Eine Studie über die Entwicklung der Elbe als Schifffahrtsstraße. Mitt. Franzius-Inst. der TU Hannover, H. 36, 1971.
- SCHULZ, H. u. MEYN, G.: Sandwanderungsuntersuchungen mit radioaktiven Isotopen im deutschen Küstengebiet der Nord- und Ostsee in den Jahren 1961/62. Dtsch. Gew.-kdl. Mitt., H. 2, 1963.
- VOLLMERS, H. u. GIESE, E.: Elbe Tidal Model with Movable Bed. Proc. 13th Int. Conf. on Coast. Eng., Vancouver, 1972.
- VOLLMERS, H. u. GIESE, E.: Das Tidemodell der Elbe mit beweglicher Sohle. Die Küste, H. 24, 1973.
- VOLLMERS, H. u. GIESE, E.: Measurement of Sediment Transport by Radioactive Tracers in a Tidal Model with Movable Bed. Proc. XV. IAHR Congress, Vol. 1, A 4, Istanbul, 1973.