

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Article, Published Version

**Wulzinger, Werner**

## **Sedimenttransport und Sohlausbildung im Tidemodell der Elbe mit beweglicher Sohle**

Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102941>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Wulzinger, Werner (1981): Sedimenttransport und Sohlausbildung im Tidemodell der Elbe mit beweglicher Sohle. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 50. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 59-82.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Dipl.-Ing. W. W u l z i n g e r

SEDIMENTTRANSPORT UND SOHLAUSBILDUNG IM TIDEMODELL  
DER ELBE MIT BEWEGLICHER SOHLE

Sediment Transport and Bed Formation in the Tidal  
Model with Movable Bed

Inhaltsangabe

In dem hydraulischen Tidemodell der Elbe mit beweglicher Sohle an der BAW, Abteilung Küste wurden vom Teilprojekt B2 "Sedimenttransport in Tideästuaren" des SFB 79 bei Langzeitversuchen der Sedimenttransport und die Entwicklung der Sohlformen an exemplarischen Ausschnitten analysiert. Hierfür wurden Fotoserien der morphologischen Entwicklung mit hydraulischen Messungen und Traceruntersuchungen verglichen.

Summary

Sediment transports and long term bed form developments were analysed in sample sections of the hydraulic Elbe River tidal model with movable bed by the Project B2 "Sediment Transport in Tidal Estuaries" of the SFB 79. Photo series of morphological development were compared with hydraulic measurements and tracer investigations.

I N H A L T

	Seite
1 Einleitung	61
2 Problemstellung	61
3 Allgemeines	61
3.1 Untersuchungen des Teilprojekts B2 des SFB 79 im Elbmodell mit beweglicher Sohle	61
3.2 Das Elbmodell mit beweglicher Sohle	62
3.3 Die Meßeinrichtungen	63
3.4 Langzeitversuche mit jährlicher und zwei- jährlicher Baggerung der Fahrrinne	64
3.5 Die vergleichenden Fotoaufnahmen im Modell	65
4 Beispiele der Untersuchungen	65
4.1 Medembereich	65
4.1.1 Fahrrinnennahes Gebiet	67
4.1.2 Fahrrinnenferne Gebiete	70
4.2 Kratzsandgebiet	76
4.3 Rinnensystem zwischen Klotzenloch und Kratzsand	78
5 Zusammenfassung	80
6 Literatur	81

## 1 Einleitung

Der Sedimenttransport in Ästuaren infolge von Tideströmungen ist volkswirtschaftlich von großer Bedeutung. Die Baggerungen zur Erhaltung und Verbesserung der Schifffahrtswege verursachen enorme Kosten. Eng verknüpft mit dem Sedimenttransport sind die Sohlformerscheinungen. Hydraulische Tidemodelle mit beweglicher Sohle sind bislang das verlässlichste Mittel zur Prognose morphologischer Entwicklungen. Die mathematischen Modelle haben in den letzten Jahren auf diesem Gebiet große Fortschritte erzielt. Die weitere Entwicklung des mathematischen Modells wird zeigen, welche Aufgaben es rationeller lösen kann als das hydraulische Tidemodell.

## 2 Problemstellung

Für die Baggerung und Verklappung von Sohlmaterial ist es wünschenswert, Kenntnisse über die Ursachen und Formen des Feststofftransportes an der Sohle zu haben. Darüber hinaus sind für die Schifffahrt die höchsten Erhebungen von Sohlkörpern in der Fahrrinne maßgebend. In der Natur weiß man von sehr stabilen Dünenstrecken; benachbarte Abschnitte der Fahrrinne können eine glatte Sohle aufweisen, ohne daß es hierfür bereits eine endgültige Erklärung gibt. Die anstehenden Bodenarten und eingetriebene Sedimente spielen dabei zweifellos eine wichtige Rolle. In einem hydraulischen Tidegroßmodell mit beweglicher Sohle können im allgemeinen weder unterschiedliche Bodenarten noch Schwebstoffe berücksichtigt werden. Dagegen bietet ein solches Modell gegenüber Untersuchungen in der Natur manche Vorteile wie Überschaubarkeit, direkte Beobachtung der Transportabläufe, Beeinflussbarkeit der Bedingungen, Gleichzeitigkeitsmessungen, beliebig häufige Wiederholungen von Transportvorgängen und schließlich auch die Möglichkeit, einen Versuch zu unterbrechen und das Erscheinungsbild der Sohle in seiner Gesamtheit zu betrachten und fotografisch festzuhalten.

## 3 Allgemeines

### 3.1 Untersuchungen des Teilprojekts B2 des SFB 79 im Elbemodell mit beweglicher Sohle

Das Teilprojekt B2 mit dem Thema "Sedimenttransport in Tideästuaren" und das Vorgängerprojekt, das auch mit B2 bezeichnet war, hatten die Möglichkeit, im Elbemodell mit beweglicher Sohle bei der Bundesanstalt für Wasserbau, Abteilung Küste in Hamburg-

Rissen zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Sedimenttransport und Sohlformerscheinungen bei Auftragsversuchen Beobachtungen des Transportgeschehens zu machen und vergleichende Fotoserien aufzunehmen.

### 3.2 Das Elbemodell mit beweglicher Sohle

Die Theorie und Technik des Tidemodells mit beweglicher Sohle wurde im wesentlichen bei der Bundesanstalt für Wasserbau am Beispiel des Elbemodells entwickelt. Das Elbemodell mit beweglicher Sohle ist seit 1967 in Betrieb. Mit umfangreichen historischen Versuchen wurde der morphologische Zeitmaßstab bestimmt. Danach entsprechen rund 12,4 Stunden Versuchsdauer einem Naturjahr. Bild 1 zeigt den Teil des Modells, der mit einer beweglichen Sohle ausgestattet ist. Am linken Rand des Bildes befindet sich der Modelleinlauf mit der Steuerklappe. Die strichpunktierte Linie bei St. Margarethen am rechten Rand zeigt den Übergang zum Modellteil mit fester Sohle an. Das Elbeästuar ist bis zur Tidegrenze beim Wehr Geesthacht im Modell nachgebildet. Das Modell ist höhenverzerrt, die Maßstäbe sind 1:800 für die Längen und 1:100 für die Höhen.

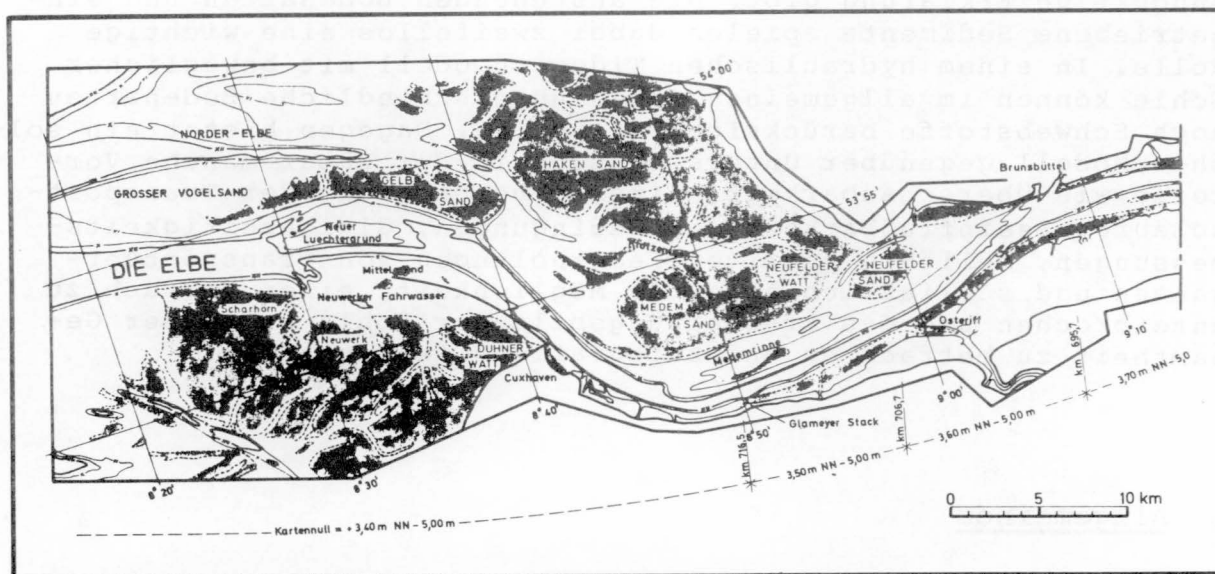


Bild 1 Das Tidemodell der Elbe, Modellteil mit beweglicher Sohle von der See bis St. Margarethen

Im Modellteil mit beweglicher Sohle liegt das Geschiebematerial auf einer stufenförmigen Betonschale auf. Es ist ein Polystyrol-Granulat mit einem Korndurchmesser von 1,5 - 2,0 mm und einer Dichte  $\rho_s = 1050 \text{ kg/m}^3$ . Die starke Mobilität des Geschiebes verlangt besondere, flächenhaft wirkende Füll- und Entleereinrichtungen. Die Sohle wird mittels nach den jeweiligen Kartenunterlagen angefertigten Blechprofilen eingeformt. Diese haben einen gegenseitigen Abstand von 1,25 m, d.i. 1 km in der Natur.

### 3.3 Die Meßeinrichtungen

Wasserstände werden in dem Elbmodell mit beweglicher Sohle mit vibrierenden Spitzentastern gemessen. In einer zentralen Meßstation werden die Meßwerte mit 6-Farben-Punktdruckern aufgezeichnet. Die Punktfolge beträgt 1 Sekunde. Es können auch Wasserspiegeldifferenzen im Maßstab 5:1 bzw. 10:1 registriert werden.

Strömungsgeschwindigkeiten und Strömungsrichtungen werden mit kombinierten Strömungs-Richtungs-Meßgeräten, System Delft, gemessen. Es sind Mikroflügel mit Unterbrecherring; zur Registrierung der Strömungsrichtung haben die Geräte eine Richtungsfahne mit Nachfahrautomatik. Die Strömungsgeschwindigkeiten werden ebenso wie die auf Nord bezogenen Strömungsrichtungen mit den 6-Farben-Punktdruckern registriert.

Die Sohlprofile werden mit einem bei der Bundesanstalt für Wasserbau entwickelten System aufgenommen. Die Aufnahme erfolgt bei überstautem Modell auf optischem Weg von einem Meßfloß aus. Die Sohle wird längs der Profillinien vor Beginn des Versuchs, in Zwischenstadien und nach Versuchsende aufgezeichnet, wobei sich das Meßfloß mit konstanter Geschwindigkeit an einem gespannten Seil entlangzieht.

Um bessere Aussagen über die Bewegungsrichtung und -intensität des Sohlmaterials machen zu können, wurden bei einigen Versuchen radioaktive Tracer verwendet. Hierzu wird eine geringe, festgelegte Menge des Geschiebes mit elementarem Brom markiert und im Kernreaktor mit Neutronen bestrahlt. Dabei entsteht das radioaktive Isotop Brom 82 mit der Halbwertszeit von 36 Stunden. Das radioaktive Material wird in einer wasserlöslichen Plastikfolie in das Modell eingebracht. Nach 150 Tiden bzw. 114 Tiden bei dem Langzeitversuch mit zweijährlicher Baggerung wird die Umgebung des Einbringepunktes nach  $\gamma$ -Strahlen abgesehen. Dafür ist ein Szintillationszähler an einem verfahrbaren Ausleger auf der Bedienungsbrücke des Modells montiert. Man erhält ein Feld von Impulsraten, das noch auf einen einheitlichen Zeitpunkt korrigiert werden muß. Es werden Linien gleicher Strahlungsraten gezeichnet. Näherungsweise geben sie ein Bild der Sedimentverfrachtung wieder.

### 3.4 Langzeitversuche mit jährlicher und zweijährlicher Baggerung der Fahrrinne

Zwei Varianten eines Langzeitversuchs über 20 Naturjahre mit jährlicher bzw. zweijährlicher Baggerung der Fahrrinne bis zur Solltiefe von 13,5 m unter KN boten eine gute Möglichkeit, morphologische Entwicklungen im Modell mittels Fotoserien zu verfolgen. Bei der Variante 1 schlossen sich nach 10 Jahren mit jährlicher Baggerung zwei 5-Jahre-Zeiträume mit Zwischenbaggerung an. Bei Variante 2 wurde bis zum 20. Jahr alle zwei Jahre eine Zwischenbaggerung der Fahrrinne vorgenommen. Für jede Baggerung wurde das Modell vorsichtig entwässert. In den kurzen Zeiten, in denen das Modell trocken oder teilentleert war, konnten Fotoaufnahmen gemacht werden, soweit es der Versuchsbetrieb zuließ.

Bei den beiden Versuchsvarianten war die Morphologie nach Kartenunterlagen von 1975 mit Sonderpeilungen 1976 im Modell eingeformt. Es sollte festgestellt werden, "in welcher Größenordnung sich die Eintreibungen in die Fahrrinne zeitabhängig entwickeln, wenn Zwischenbaggerungen ausgeführt werden" (1978, Das Tideregime der Elbe, Elbmodell mit beweglicher Sohle, 12. Bericht). Die Varianten 1 und 2 sollten miteinander verglichen werden. Die Zwischenbaggerungen wurden in der Weise durchgeführt, daß Hilfsprofile mit dem Sollquerschnitt der Fahrrinne in das entwässerte Modell eingesetzt wurden und Sohlmaterial, das in den Sollquerschnitt hineinragte, von der Bedienungsbrücke aus abgebaggert wurde. Dieses Baggergut wurde ausgelitert. Daneben wurden aus den Sohlprofilen in der sonst üblichen Weise die erforderlichen Baggermengen bestimmt, nämlich durch Ausplanimetrieren der in den Sollquerschnitt hineinragenden Querschnittsflächen und Multiplizieren mit dem Abstand. Bei einigen der 2-Jahre-Laufzeiten der Variante 2 wurden Tracermessungen nach der beschriebenen Methode durchgeführt.

Normalerweise wird bei den Auftragsversuchen im Elbmodell mit beweglicher Sohle ein Zeitraum von 10 oder 15 Naturjahren ohne Zwischenbaggerung, jedoch mit Zwischenaufzeichnung der Sohlprofile nach 5 bzw. auch nach 10 Jahren, durchfahren. Bei derartigen Versuchen war es nur möglich, den Endzustand einer langen morphologischen Entwicklung im trockenen Modellzustand fotografisch festzuhalten. Solche Versuche haben den Vorteil, daß sich morphologische Veränderungen relativ ungestört vollziehen können, während das An- und Abschalten sowie das Entleeren und Füllen des Modells bei Zwischenbaggerungen die Gefahr ungewollter Sohlumbildungen in sich bergen. Andererseits sind größere Eintreibungen in die Fahrrinne über Jahre hinweg naturunähnlich, da die Solltiefe der Fahrrinne in der Natur stets gewährleistet sein muß.

### 3.5 Die vergleichenden Fotoaufnahmen im Modell

Die Fotoaufnahmen, von denen hier berichtet wird, wurden gemacht, um sie untereinander und mit den Messungen im Modell vergleichen zu können. Es sind Vergleichsfotos von weit über 100 genau fixierten Modellausschnitten, teilweise systematische, die Fläche abdeckende hallenparallele Aufnahmen von Rasterpunkten aus, teils auf besonders interessante Sohlabschnitte gerichtete Aufnahmen. Alle Bilder sind Schrägaufnahmen, die meisten von der Bedienungsbrücke aus bei höchster Brückenposition. Daneben wurden auch Nahaufnahmen von einzelnen Sohlkörpern, teilweise mit dazugehörigen Übersichtsbildern, gemacht. Bei den Nahaufnahmen wurde längs durch die Sohlkörper eine Plexiglas-scheibe mit Rastereinteilung in die Geschiebesohle eingedrückt.

Bei einigen wenigen Endzuständen von Versuchen konnte zur Orientierung und besseren Lokalisierung der Sohlformerscheinungen ein Rasternetz über dem Modell ausgespannt werden, das aus gespannten Schnüren und darangehängten Papierfähnchen gebildet wird.

## 4 Beispiele der Untersuchungen

Im folgenden werden Beispiele der Beobachtung und Analyse des Sedimenttransportes und der Entwicklung der Sohlformen erläutert.

### 4.1 Medembereich

Der Ausschnitt der Tiefenkarte von 1976 (Bild 2) zeigt den Medembereich mit den angrenzenden Gebieten. Die Beispiele aus dem Medembereich sind aus der Variante 2 des Langzeitversuchs, d.h. der Variante mit zweijährlicher Baggerung der Fahrrinne, ausgewählt, da bei diesem Versuch neben den hydraulischen Messungen bei den eingetragenen Meßpunkten Traceruntersuchungen durchgeführt wurden. Lediglich die Meßergebnisse zu den Punkten 7 und IK1 wurden bei anderen Versuchen gewonnen. In dem Lageplan sind die Ausbreitungsgebiete des radioaktiv markierten Materials mit den Linien gleicher Strahlungsraten eingetragen. Entsprechend dem zweijährlichen Baggerrhythmus sind die Ausbreitungsgebiete nach 114 Tiden im Modell dargestellt, während den Ausbreitungsgebieten bei den Meßpunkten 7 und IK1 150 Tiden Modell-Laufzeit zugrunde liegen.



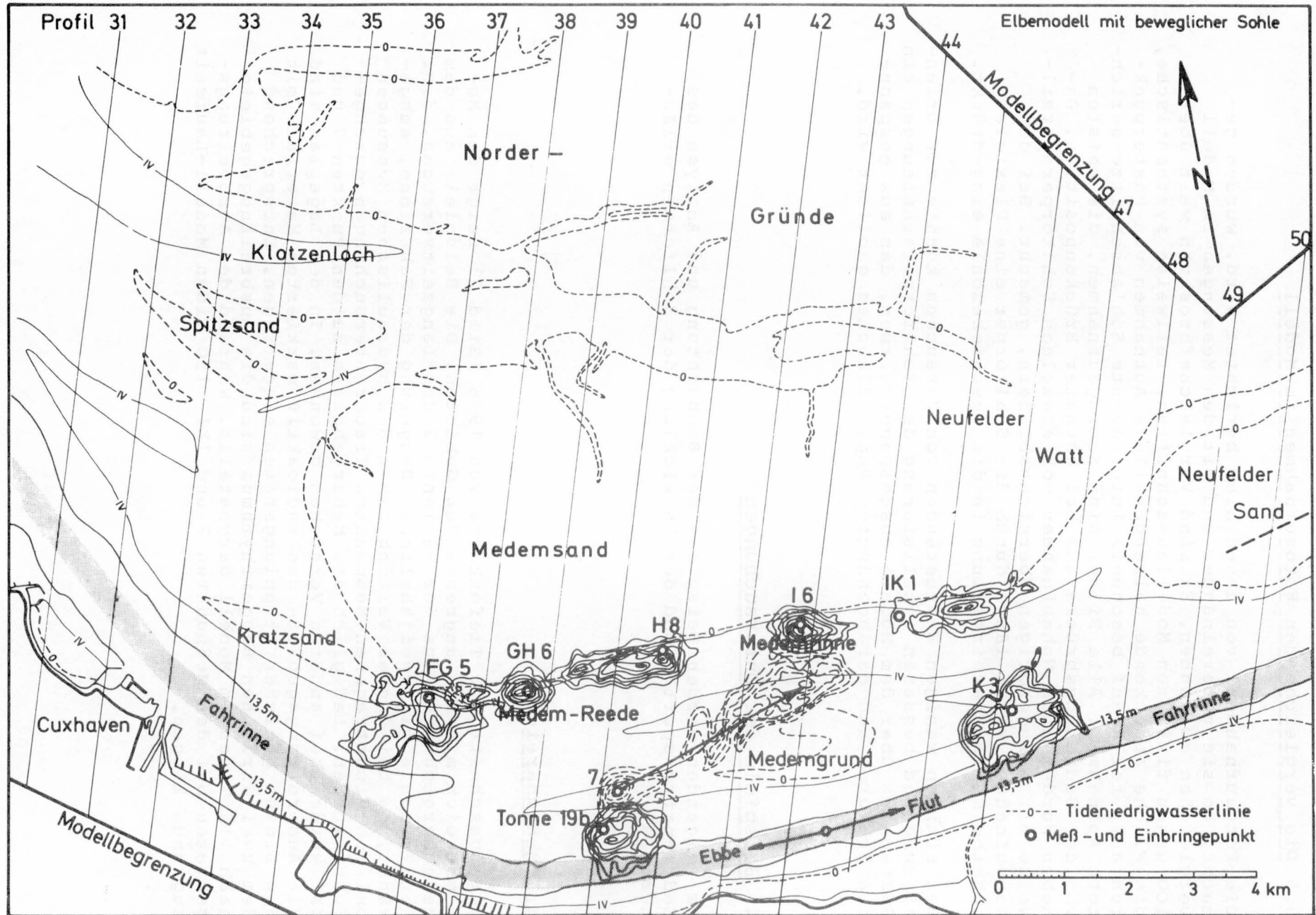


Bild 2 Tiefenkarte der Elbe 1976 mit Meßpunkten für hydraulische Messungen bzw. Einbringepunkten für radioaktive Tracer im Modell. Ausbreitungsgebiete nach 114 bzw. 150 Tiden mit Linien gleicher Strahlungsraten

4.1.1 Fahrrinnennahes Gebiet

Es wird zunächst der Meßpunkt Tonne 19b (vgl. Bild 2) betrachtet. Er liegt auf dem südlichen Hang des nach Cuxhaven hin abfallenden langgestreckten Rückens des Medemgrundes. Die im Modell durchgeführten Tracermessungen für diesen Meßpunkt zeigen, daß sich das Zentrum des markierten Materials zur Fahrrinne hin verlagert hat. Die Ausbreitung erfolgt wesentlich stärker nach oberstrom als nach unterstrom.

Das Ausbreitungsgebiet ist ungefähr kreisförmig. Die Linien gleicher Strahlungsraten sind stark zerklüftet und deuten möglicherweise auf eine unruhige Sohle mit großen Sohlkörpern hin. Der Versuch mit radioaktiv markiertem Material wurde zwischen dem 4. und 6. Jahr (Natur) durchgeführt.

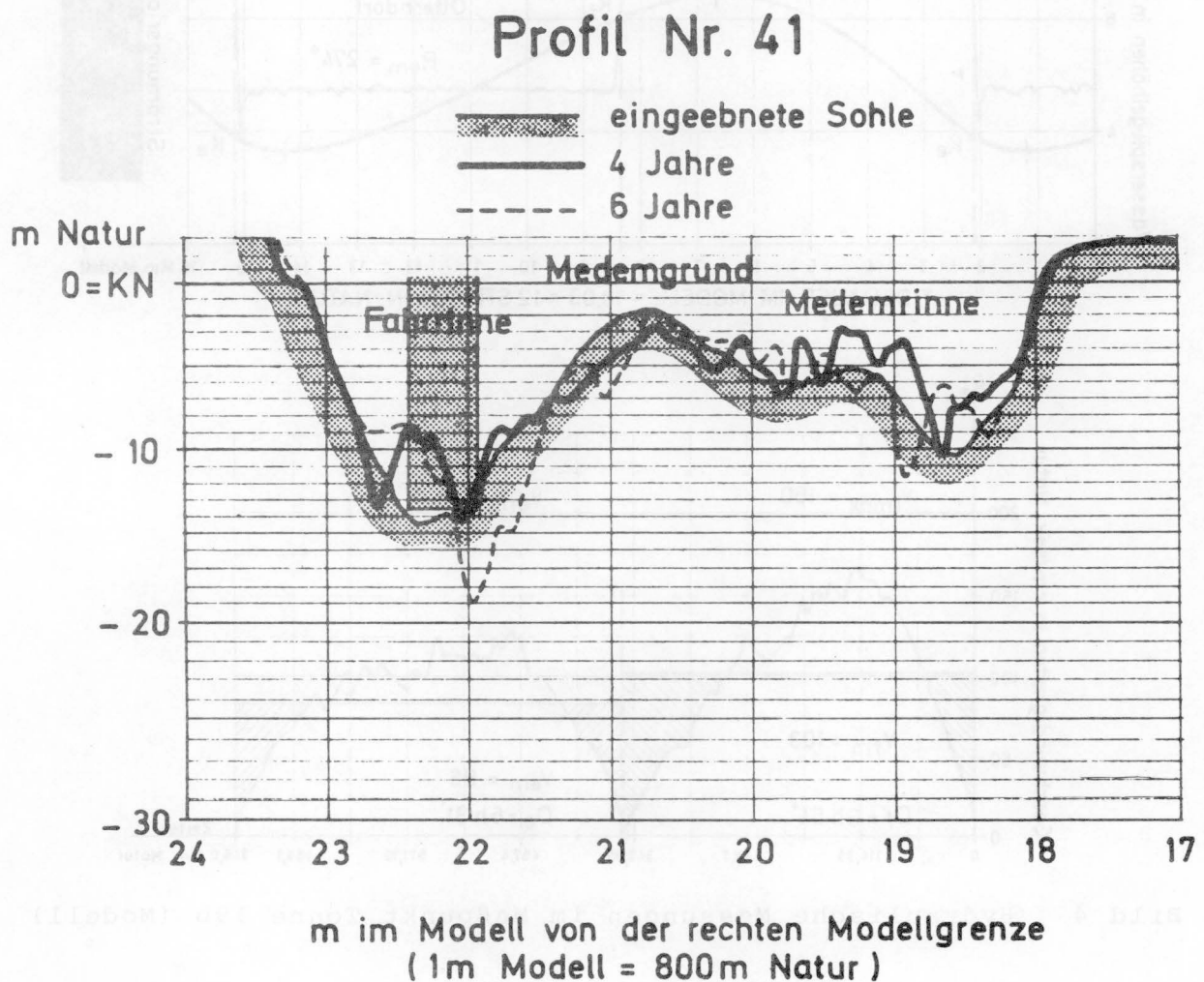


Bild 3 Sohlprofilaufzeichnungen im Profil 41 (Modell)

Die Sohlprofilschriebe im Profil 41 nach dem 4. und 6. Jahr (Bild 3) zeigen jeweils starke Eintreibungen in die Fahrrinne.

Die im Modell am Meßpunkt Tonne 19b ausgeführten hydraulischen Messungen sind in Bild 4 wiedergegeben.

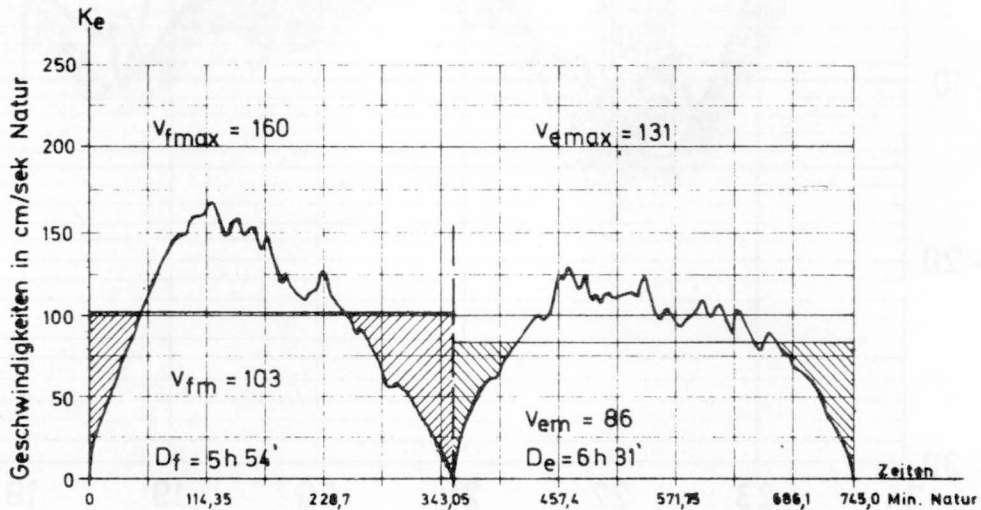
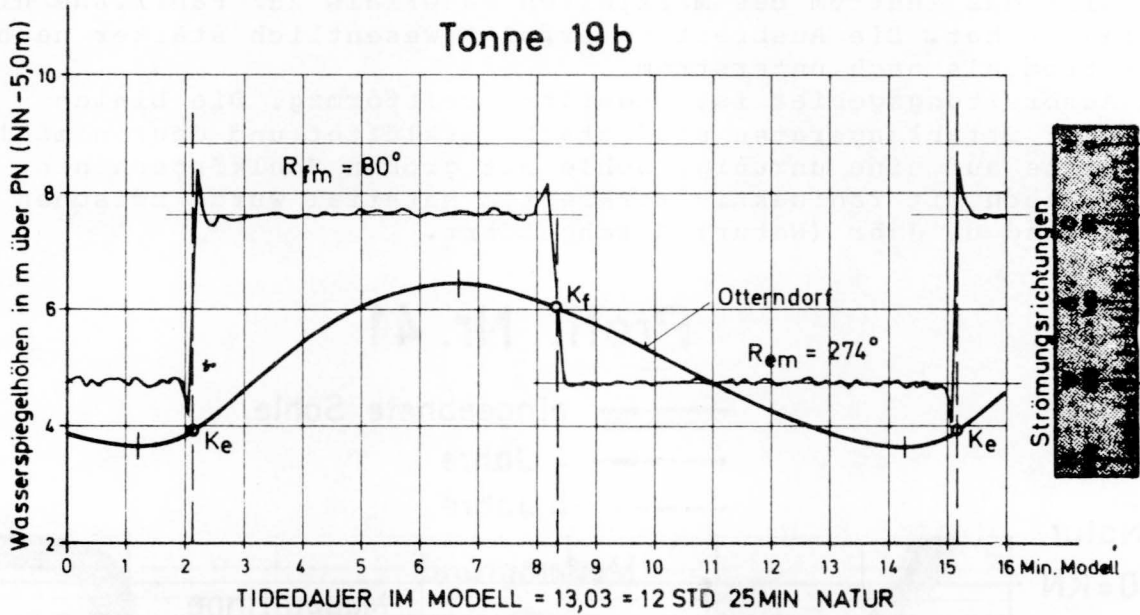


Bild 4 Hydraulische Messungen im Meßpunkt Tonne 19b (Modell)

Die Tidekurve des nächstgelegenen Pegels Otterndorf weist die typische verzernte Sinusform auf.

Die Strömungsrichtungen im Meßpunkt Tonne 19b bilden miteinander einen von 180° deutlich abweichenden Winkel. Der Flutstrom erreicht einen wesentlich höheren Wert als der Ebbstrom. Der Ebbstrom weist einen langgestreckten höheren Bereich auf. Die Maximalgeschwindigkeit liegt jeweils ungefähr im ersten Drittelpunkt. Nach den Strömungsmessungen ist eine geringe Wanderge-

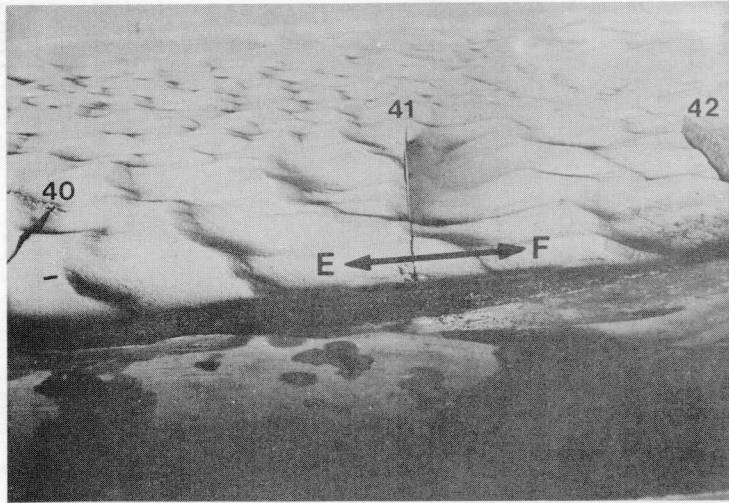


Bild 1 : 4 Jahre

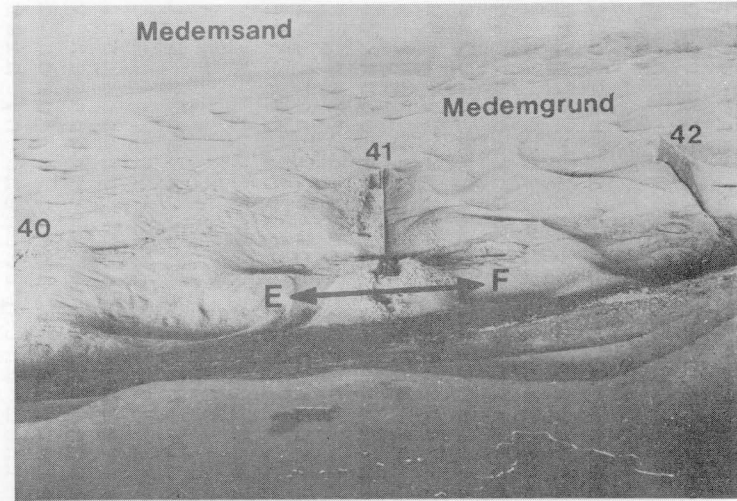


Bild 2 : 6 Jahre



Bild 3 : 6 Jahre



Bild 4 : 8 Jahre

Bild 5 Vergleichsfotoaufnahmen zum Meßpunkt Tonne 19b

schwindigkeit der Dünen nach oberstrom zu erwarten. Aus den Messungen der Strömungsrichtung und Strömungsgeschwindigkeit wurde der Reststromvektor bestimmt. Er weist von der Fahrrinne weg; die Traceruntersuchungen zeigten jedoch einen Materialtransport zur Fahrrinne hin an.

In Bild 5 sind einige der Fotoaufnahmen, die für den Vergleich mit den hydraulischen Messungen herangezogen werden, wiedergegeben. Oben werden Seitenansichten des Gebietes zwischen Profil 40 bis 42 nach dem 4. und 6. Versuchsjahr, unten Schrägaufnahmen von der Meßbrücke aus auf den Großraum des Tracermeßgebietes bei Tonne 19b nach dem 6. und 8. Versuchsjahr gezeigt. Auf den Bildern 5a und 5b sieht man die zum Ausbaggern der Fahrrinne eingesetzten Hilfsprofilbleche 40 bis 42; der Einbringepunkt des radioaktiven Materials liegt ein wenig rechts vom hinteren Ende des Hilfsprofilbleches 40. Bei den Fotos nach dem 6. Jahr (Bilder 5b und 5c) sind die Konturen der Sohlkörper durch das Aufsetzen der Sonde im Suchgebiet verwischt.

Bei den Dünen im Bereich der Hilfsprofilbleche haben sich keine durchgehenden Käme ausgebildet, da die Geschwindigkeits- und Höhenunterschiede quer zur Fahrrinne vermutlich zu groß sind. Ein weiterer Grund dürften die unterschiedlichen Richtungen von Flut- und Ebbstrom sein. Die Dünen sind bei Tonne 19b durch den Flutstrom geformt, während sie auf einem entsprechenden, hier nicht gezeigten Foto eines Versuchsabschnittes, nach dem das Modell ausnahmsweise statt bei Thw bei Tnw abgestellt worden ist, nicht so stark durch den Ebbstrom geprägt sind. Das stimmt mit den Messungen überein.

Bei den Bildern 5c und 5d erkennt man das Glameyer Stack, an dem die Fahrrinne unmittelbar vorbeiführt. An dem Stack hat sich eine tiefe Auskolkung gebildet. Nach dem 6. Jahr schneidet das Hilfsprofil 41 tief in einen Sohlkörperkamm ein, was in der Sohlprofilzeichnung als "Eintreibung" registriert wird. Auf den Bildern 5c und 5d ist die langgezogene Bank, die sich bis zur höchsten Stelle des Medemgrundes bei Profil 44 hinaufzieht, zu erkennen. Zwischen dem 6. und 8. Jahr hat sich die Bank weiter geglättet. Bei dem Bild nach dem 8. Versuchsjahr (Bild 5d), das weiter nach links verschwenkt ist, bilden die scharfe Kante des Medemsandes und die formenreich gestaltete Medemrinne den linken Bildabschluß.

#### 4.1.2 Fahrrinnenferne Gebiete

Vom Einbringepunkt 7, der nur etwa 600 m, d.h. 75 cm im Modell, vom Meßpunkt Tonne 19b zur Medemrinne hin liegt, wurde bei einer anderen Versuchsreihe radioaktiv markiertes Material schräg über die obengenannte, langgestreckte Bank bis nahe an das Profil 44 (d.h. über ca. 4 Profildistanzen!) befördert. Die Materialausbreitung nach 150 Tiden ist in Bild 2 (Tiefenkarte) gestrichelt dargestellt. In einem Zwischengebiet wurde kein markiertes Material gefunden. Ein Schwerpunkt blieb an der Einbringestelle,

ein zweiter Schwerpunkt hat sich bei Profil 43 am südlichen Rand der Medemrinne gebildet. Es hat den Anschein, daß derartige Materialverfrachtungen ohne bleibende Verbindung zwischen Einbringepunkt und Sedimentationsgebiet nur beim Auftreten glatter Bänke in Verbindung mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten möglich sind.

Hart an der Kante des Medemsandes liegt unterhalb von Profil 41 der Meßpunkt H8. Wie aus der Übersichtskarte (Bild 2) zu ersehen ist, ist dieses Gebiet für eine kräftige Flutströmung kaum zugänglich. Dementsprechend breitet sich das radioaktiv markierte Sohlmaterial in Ebbstromrichtung aus. Auch beim Meßpunkt GH6 ist diese Tendenz festzustellen.

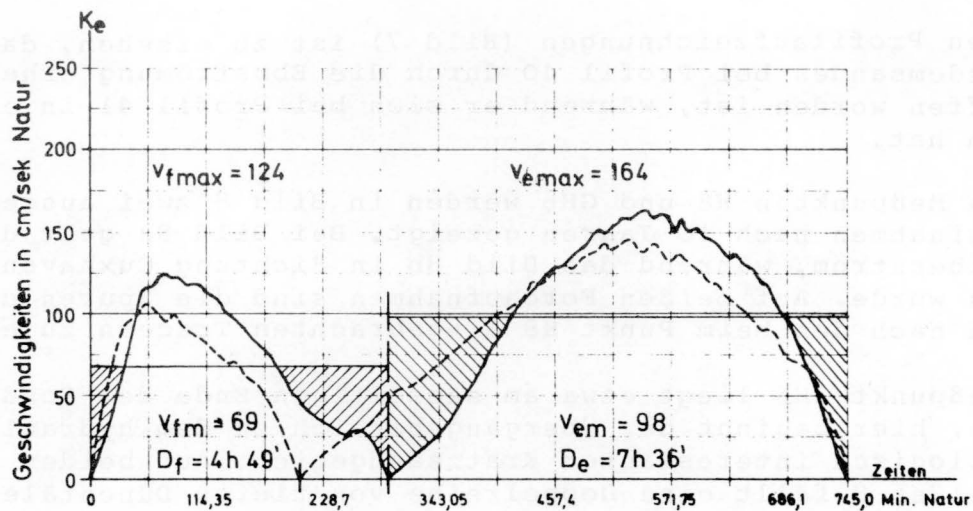
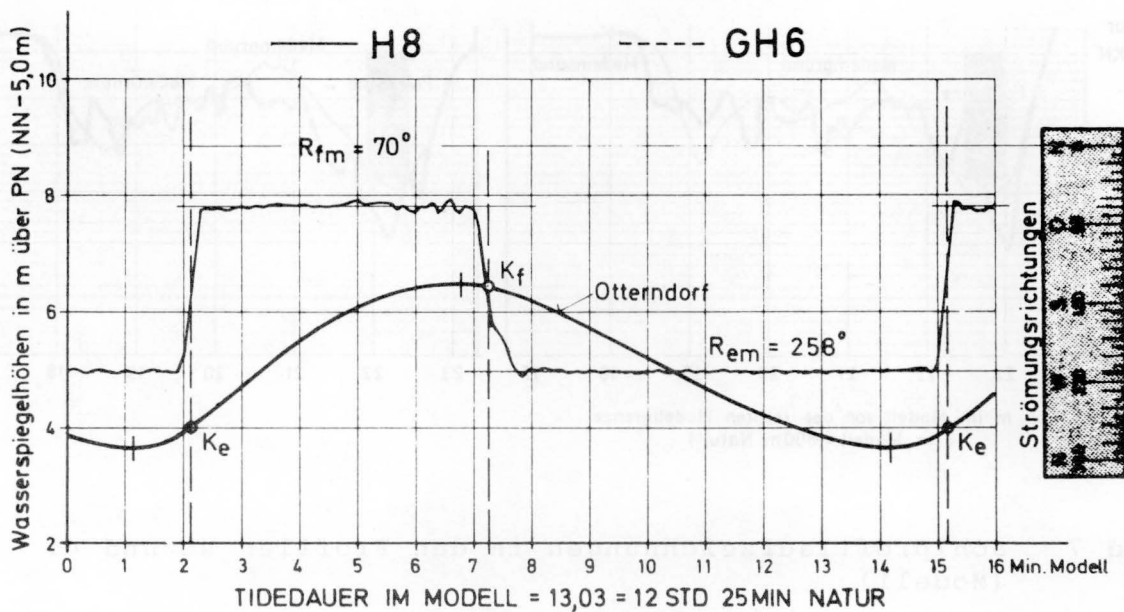


Bild 6      Hydraulische Messungen im Meßpunkt H8 (Modell)

Die Darstellung der im Modell gemessenen hydraulischen Daten für Punkt H8 (Bild 6) - durchgezogene Linien - zeigt, daß der Flutstrom an Stärke und Dauer weit hinter dem Ebbstrom zurückbleibt. Das Ausklingen des Flutstroms mit niedriger Geschwindigkeit fällt bei dem Meßpunkt GH6 - gestrichelt eingezeichnet - fort. Die Kenterung des Flutstroms erfolgt dort bemerkenswerterweise vor dem Thw, während die Kenterung beim Meßpunkt H8 noch nach dem Tidehochwasser einsetzt.

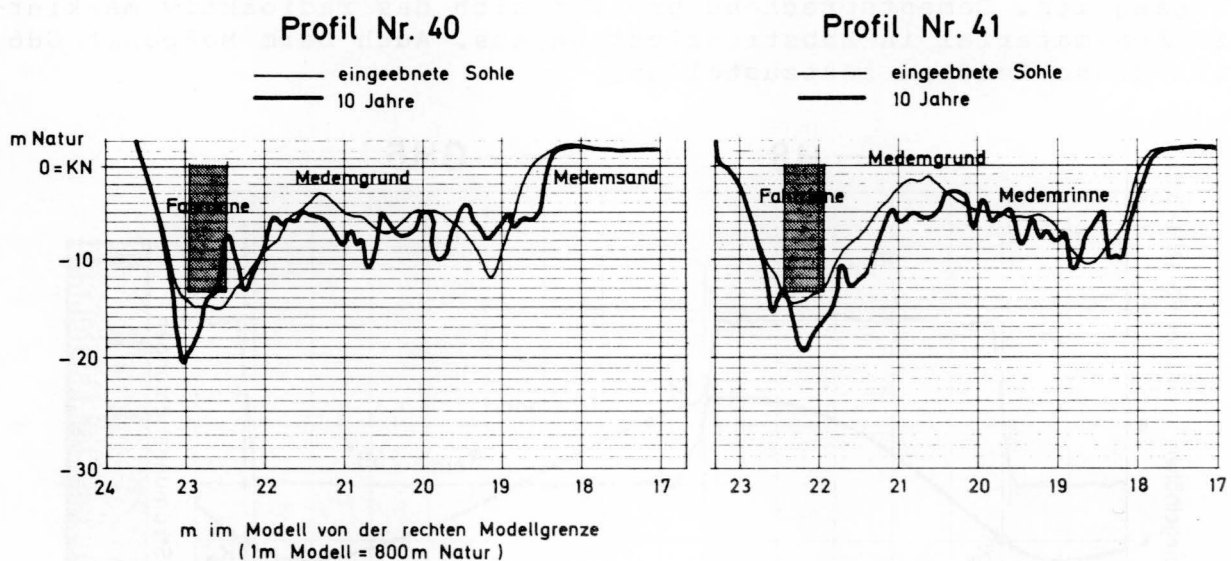


Bild 7 Sohlprofilauzeichnungen in den Profilen 40 und 41 (Modell)

Aus den Profilaufzeichnungen (Bild 7) ist zu ersehen, daß der Rand des Medemsandes bei Profil 40 durch die Ebbströmung erheblich angegriffen worden ist, während er sich bei Profil 41 in etwa gehalten hat.

Zu den Meßpunkten H8 und GH6 werden in Bild 8 zwei ausgewählte Fotoaufnahmen nach 10 Jahren gezeigt. Bei Bild 8a geht der Blick nach oberstrom, während das Bild 8b in Richtung Cuxhaven aufgenommen wurde. Auf beiden Fotoaufnahmen sind die Spuren der Sondierungen nach den beim Punkt H8 eingebrachten Tracern zu erkennen.

Der Meßpunkt GH6 liegt etwa am seeseitigen Ende der Sondierungsspuren; hier beginnt der Übergangsbereich zu dem hydraulisch und morphologisch interessanten Kratzsandgebiet. Auf beiden Fotos des Bildes 8 fällt eine Doppelreihe von tiefen Dünentälern auf. Möglicherweise deuten sie auf strahlenförmige Geschwindigkeitskonzentrationen hin, die bei der Reflexion des Flutstroms an dem stark befestigten Ufer oberhalb von Cuxhaven entstanden sein könnten. Oberhalb von Profil 41 wurde die Kante des Medemsandes bzw. des Neufelder Watts von den schräg auftreffenden Flut- und Ebbströmen angegriffen.



Bild 8a 10 Jahre



Bild 8b 10 Jahre

Bild 8 Vergleichsfotoaufnahmen zu den Meßpunkten H8 und GH6

Auf der Fotoaufnahme vom oberen Teil der Medemrinne (Bild 9) ist an der Form der Dünen am Sand- bzw. Wattrand der nach oberstrom hin stärker werdende Einfluß des Flutstroms abzulesen. Vorne links im Bild sind typische Tidedünen mit breiten Tälern und schmalen Kammereichen zu erkennen. Hier liegt der Meßpunkt I6.

Wie die hydraulischen Messungen für den Punkt I6 (Bild 10) zeigen, hat der Flutstrom hier schon denselben Maximalwert, aber noch nicht denselben Mittelwert erreicht wie der Ebbstrom.



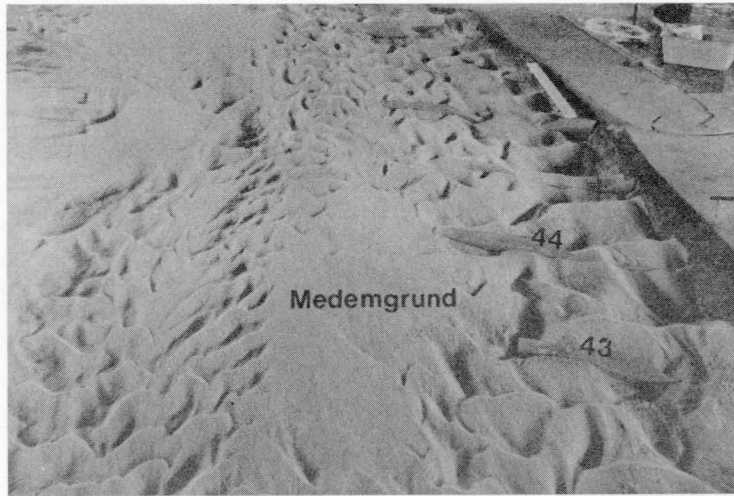


Bild 9 Vergleichsfotoaufnahme vom oberen Teil der Medemrinne (10 Jahre)

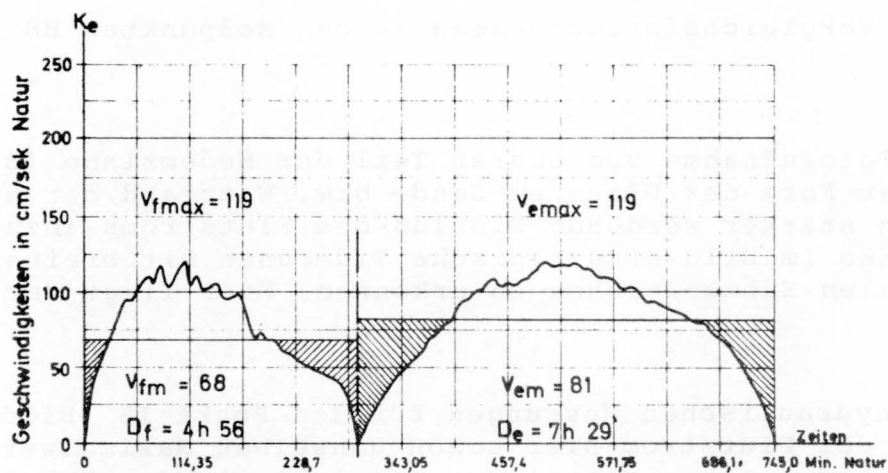
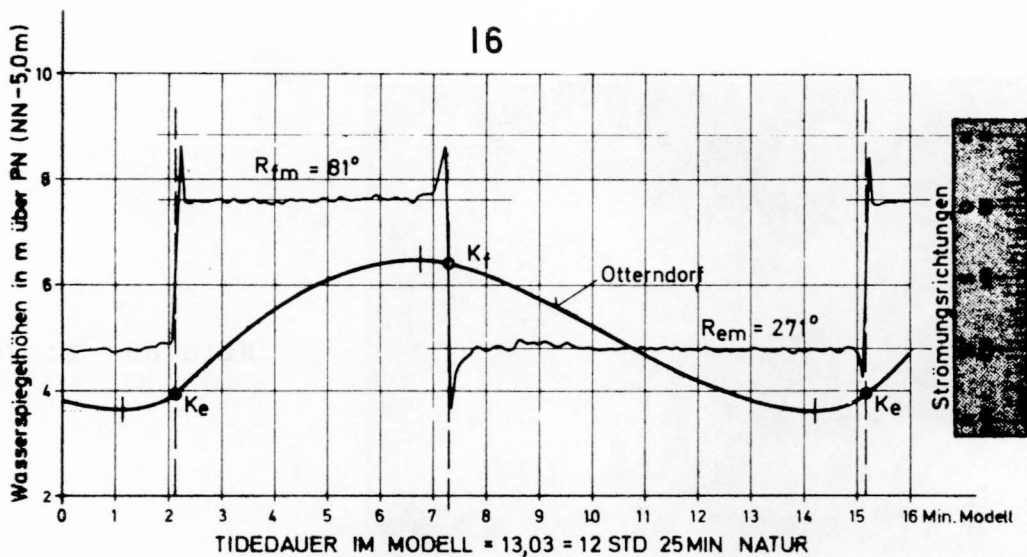


Bild 10 Hydraulische Messungen im Meßpunkt I6 (Modell)

Eineinhalb Profile weiter nach oberstrom, beim Meßpunkt IK1 (Bild 11), ist das Verhältnis der Maximalgeschwindigkeiten nach den Messungen im Modell 3:2.

Die Ausbreitungsgebiete der radioaktiven Tracer auf dem Übersichtsplan (Bild 2) weisen für I6 etwa ausgeglichene Verhältnisse aus, entgegen den hydraulischen Messungen, mit einer leichten Tendenz nach oberstrom. Das bei IK1 eingebrachte Material hat sich bis auf geringe Spuren in Flutstromrichtung verlagert. Hier hat sich offensichtlich die Größe der Flutstromgeschwindigkeit wesentlich stärker ausgewirkt als die Dauer der Ebbstromgeschwindigkeit.

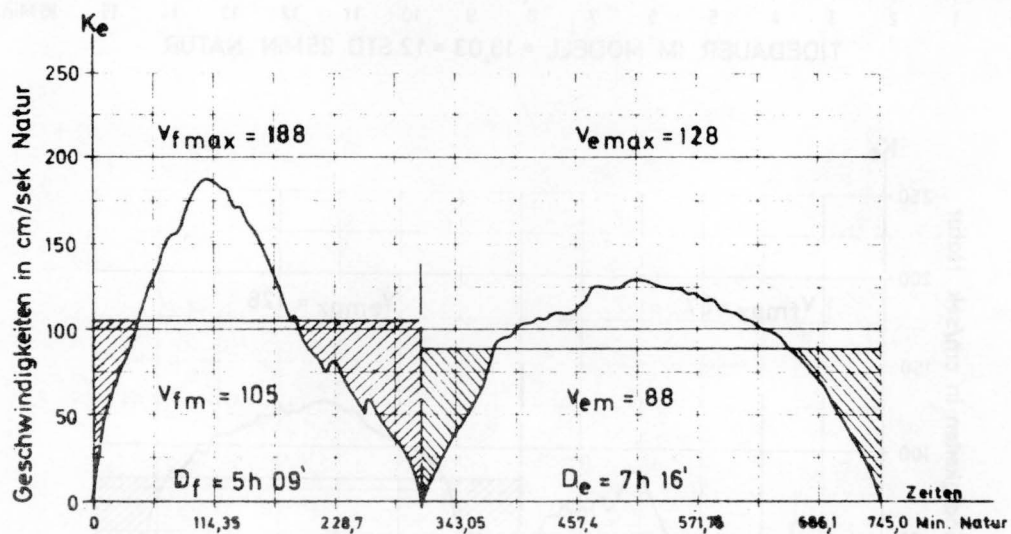
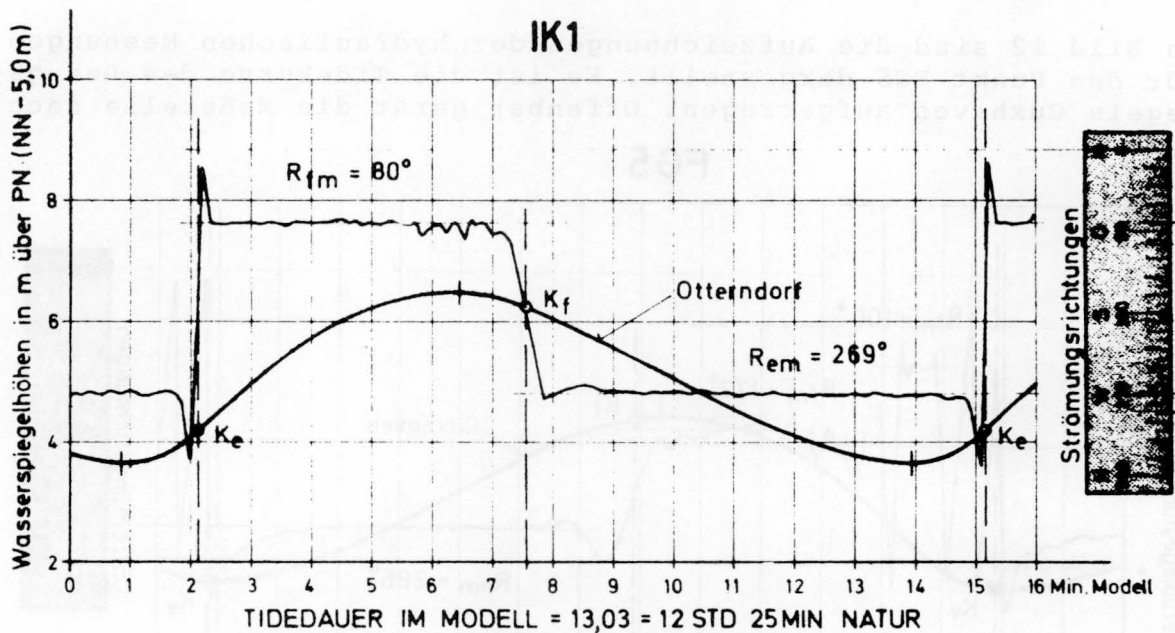


Bild 11 Hydraulische Messungen im Meßpunkt IK1 (Modell)

4.2 Kratzsandgebiet

Es wurde bereits der Kratzsand erwähnt. Er ragt nur wenig über KN hinaus (s. Bild 2). Wegen seiner besonderen Lage an einer Einschnürungsstelle des tiefen Wassers und seiner Funktion im Elbästuar ist er, wie in der Natur, im Modell starken Veränderungen unterworfen. Der Flutstrom nimmt in der zweiten Hälfte der Flutstromdauer seinen Weg über das Kratzsandgebiet etwa parallel zur Fahrrinne, während der Ebbstrom aus der Medemrinne bzw. der Medem-Reede in Verlängerung der Medemsandkante verläuft. Beim Meßpunkt FG5 bilden Flut- und Ebbstrom miteinander einen Winkel von  $114^\circ$ .

In Bild 12 sind die Aufzeichnungen der hydraulischen Messungen für den Punkt FG5 dargestellt. Es ist die Tidekurve des Bezugspegels Cuxhaven aufgetragen. Offenbar gerät die Meßstelle nach

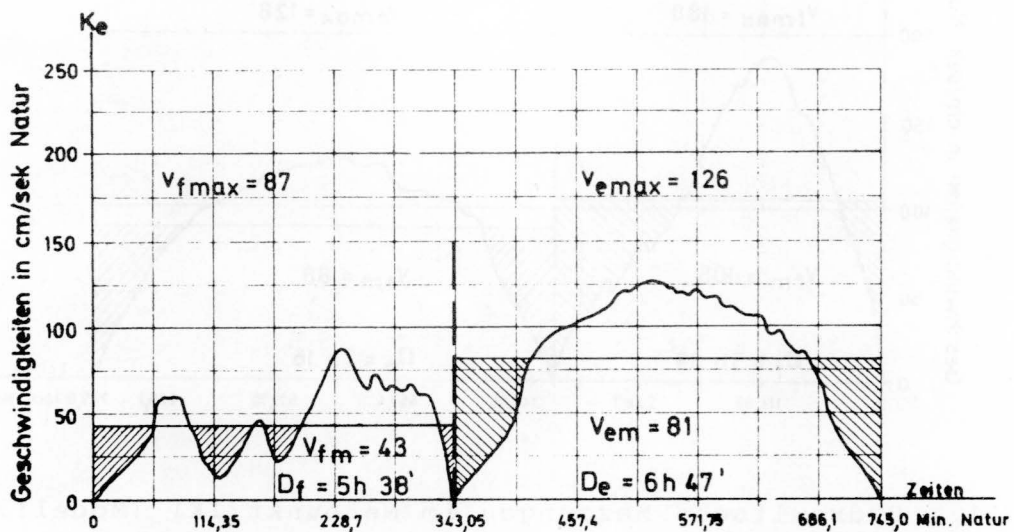
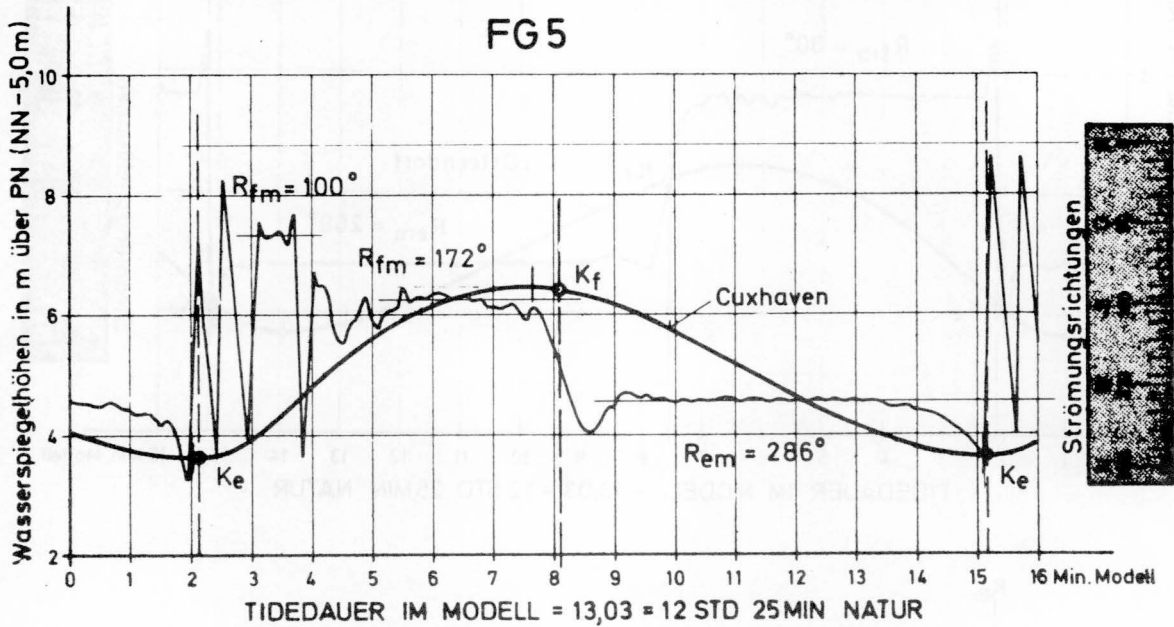


Bild 12 : Hydraulische Messungen im Meßpunkt FG5 (Modell)

der Kenterung des Ebbstroms, die unmittelbar nach T<sub>nw</sub> erfolgt, in den Einfluß einer Walze, die ihre Lage ständig ändert; zwischenzeitlich verläuft die Flutströmung parallel zur Verlängerung der Medemsandkante. Allmählich pendelt sich eine Flutströmung ein, deren Richtung etwa der westlichen Kante des Medemsandes entspricht, d.h. die Strömung erfolgt über das Kratzsandgebiet. Dementsprechend weist die Flutstromgeschwindigkeit starke Schwankungen auf und erreicht bei weitem nicht die Grösse der Ebbstromgeschwindigkeit.

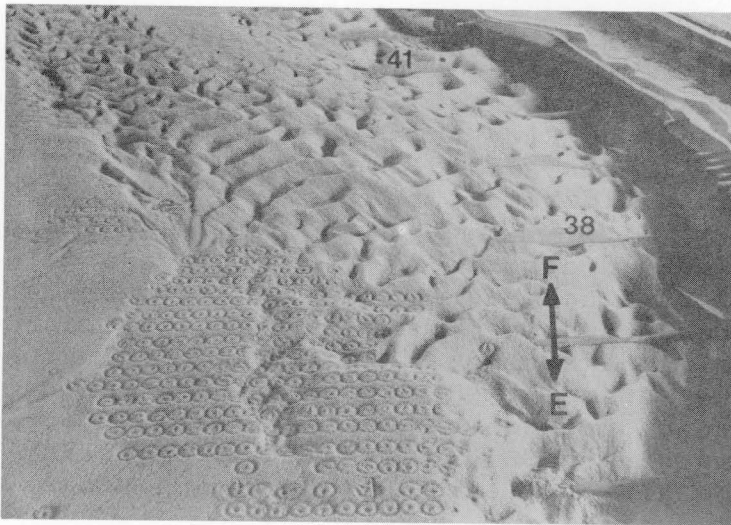


Bild 13a 18 Jahre

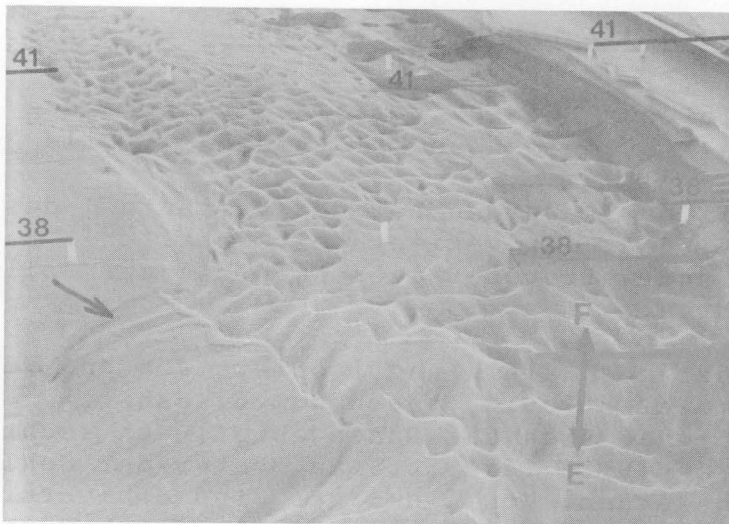


Bild 13b 20 Jahre

Bild 13 Vergleichsfotografien zum Kratzsandgebiet

Bild 13a zeigt die Spuren der Tracersondierungen beim Meßpunkt FG5 nach 18 Versuchsjahren. Bild 13b stellt den Zustand des Gebietes nach 20 Versuchsjahren dar. Zur besseren Orientierung und zum Auswerten der Fotos sind bei diesem Endzustand des Versuchs Schnüre mit Positionsfahnen über das Modell gespannt. Links unten auf den beiden Fotos sind die Bankbildungen am binnenseitigen Ende des Kratzsandes, rechts die tiefe Fahrrinne vor dem niedersächsischen Ufer mit den Hilfsprofilblechen zum Ausbaggern der Fahrrinne zu sehen. Der linke Bildrand schneidet durch den Medemsand. Die Medem-Reede bzw. die Medemrinne mit der glatten Ebbrinne schließen sich nach rechts an.

Der Bogen der Rinne (s. Pfeil), die den Abschluß der Bank zum Medemsand hin bildet, bestimmt die am Meßpunkt FG5 in der zweiten Hälfte der Flutstromdauer gemessene Strömungsrichtung. Die Vielfalt der Formen, Größen und Richtungen der Sohlkörper auf den beiden Fotoaufnahmen ist ein Abbild der komplizierten Strömungsverhältnisse in diesem Elbabschnitt.

Ähnlich zerrissen wie das Bild der Strömungsrichtungen sind die in die Tiefenkarte (Bild 2) eingetragenen Linien gleicher Strahlungsraten der Traceruntersuchungen bei FG5. Die Verteilung stimmt jedoch sinnvoll mit den Messungen der Strömungsrichtungen und -geschwindigkeiten überein: Sohlmaterial, das von der Ebbströmung in Verlängerung der Medemsandkante transportiert wird, verdriftet die Flutströmung nach Süden und es wird möglicherweise über den Medemgrund hinweg wieder der Medemrinne zugeführt.

#### 4.3 Rinnensystem zwischen Klotzenloch und Kratzsand

Es folgt noch ein Beispiel zur Entwicklung eines Dünenfeldes aus dem Bereich zwischen Klotzenloch und Kratzsand (s. Bild 2).

Die Fotoaufnahmen des Bildes 14 wurden bei der Variante 1 des Langzeitversuchs gemacht, d.h. der Variante mit jährlicher Baggerung bis zum 10. Jahr und weiteren Baggerungen bis zur Solltiefe nach 15 und 20 Jahren.

Das Dünenfeld war zunächst noch klein und isoliert von anderen Gebieten mit Dünenvorkommen (Bild 14a, nach dem 8. Jahr). Nach 15 Jahren (Bild 14b) hat sich das Dünengebiet nach rechts ausgedehnt. Nach 20 Jahren (Bild 14c) ist das Muster der Sohlformation regelmäßiger geworden. Von links her sind Sohlvertiefungen durch Geschiebe, das sich auf glatter Sohle fortbewegt hat, verschüttet worden. Die neue Dünenstrecke nach rechts hat sich verbreitert. Bild 14d, aus einem anderen Blickwinkel aufgenommen, zeigt, daß sich eine bedeutende Dünenstrecke bis zur Medem-Reede gebildet hat. Mit dem Entstehen der deutlich flutbetonten Dünenstrecke war ein bemerkenswerter Geschiebetransport verbunden, wie man aus Sohlprofilzeichnungen und in dem Bild 14d an der Eintreibung (s. Pfeil) in die Medem-Reede zwischen



Bild 1 : 8 Jahre



Bild 2 : 15 Jahre



Bild 3 : 20 Jahre

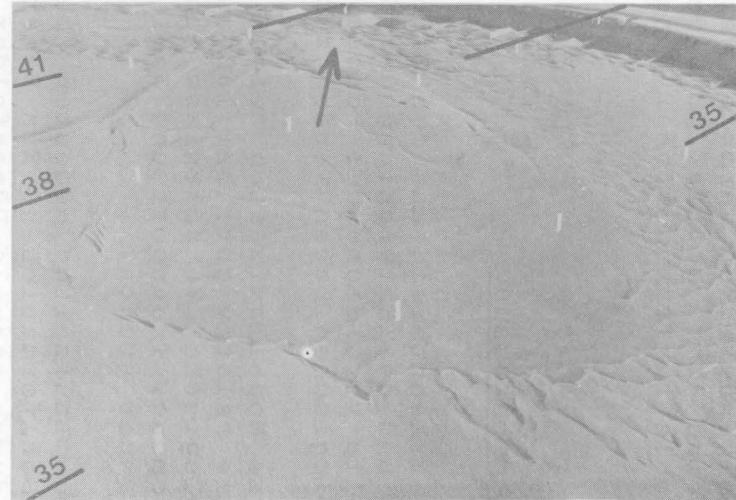


Bild 4 : 20 Jahre

Bild 14 Fotoaufnahmen zur Entwicklung eines Dünenfeldes im Bereich zwischen Klotzenloch und Kratzsand

den Profilen 38 und 40 erkennt. Wie es zur Ausbildung einer breiten durchgehenden Dünenstrecke zur Medem-Reede hin kam, kann folgendermaßen vermutet werden: Durch ständige Erosion wurde eine Rinne so tief, daß der Sedimenttransport auf flacher Sohle in Transport bei Dünenbildung umschlug.

## 5. Zusammenfassung

Einige Erkenntnisse aus den Beobachtungen des Sedimenttransportes und der Entwicklung der Sohlformen und aus der Analyse mit Hilfe vergleichender Fotoserien sowie hydraulischen und morphologischen Daten werden zusammenfassend genannt:

1. Kurze Modellaufzeiten zeigen die Wirkung der Strömung auf die Sohle relativ gut; bei langen Modellaufzeiten werden die morphologischen Verhältnisse zunehmend unübersichtlicher, da Strömung, Transport und Sohle in ständiger Wechselwirkung zueinander stehen.
2. Lange Laufzeiten bedeuten aber nicht in jedem Fall verwirrende Sohlformationen. Ein Beharrungszustand zeichnet sich gerade durch stabile Dünenfelder aus.
3. Lange parallele Dünenkämme sind ein Zeichen für gleichmäßige Strömungsverhältnisse in der Querrichtung der Dünen und antiparallelen Verlauf von Ebbe- und Flutströmung in Längsrichtung der Dünen.
4. Große Transportweiten treten bei Sedimentbewegung auf glatter Sohle auf.
5. Dünenfelder sind relativ stabil; es kommt gelegentlich vor, daß sie von glatten Bänken verschüttet werden.
6. Die Zuhilfenahme von Reststromvektoren zur Bestimmung des Sedimenttransportes im hydraulischen Modell des Elbästuars hat sich als zweifelhaft erwiesen. Bei der Bestimmung der Reststromvektoren müßten die einzelnen Bereiche des Geschwindigkeitsverlaufs eventuell bewertet werden.
7. Die fotografische Aufnahme von Sohlgebieten in aufeinanderfolgenden Kenterungszeiten  $K_f$  und  $K_e$  wäre wünschenswert. Andererseits kann man in vielen Fällen von der Form der Sohlkörper bei  $K_f$  auf die ungefähre Form bei  $K_e$  schließen.
8. Fotoaufnahmen der gezeigten Art können ein geeignetes Hilfsmittel zur Beurteilung der komplizierten Zusammenhänge zwischen Strömung, Transport und Sohle sein. Mit derartigen Fotoaufnahmen können flächendeckend Sohlzustände erfaßt werden.

## 6 Literatur

- Allen, J.R.L. : Current ripples. Their relation to patterns of water and sediment motion. Amsterdam: North-Holland Publishing Company (1968)
- Bundesanstalt für Wasserbau : Das Tideregime der Elbe. Elbemodell mit beweglicher Sohle. 11. Bericht, Modellversuche für Sandwanderungsmessungen mit radioaktiven Tracern (Mai 1977) (unveröffentlicht)
- Bundesanstalt für Wasserbau : Das Tideregime der Elbe. Elbemodell mit beweglicher Sohle. 12. Bericht, Morphologische Langzeitversuche zur Ermittlung der Eintreibungen in die Fahrrinne, hydraulische Messungen und Traceruntersuchungen im Medembereich. (Januar 1978) (unveröffentlicht)
- Führböter, A. : Zur Mechanik der Strömungsriffel. Mitt. des Franzius-Instituts der TH Hannover (1967), H. 29 S. 1-35
- Gehrig, W. : Über die Frage der naturähnlichen Nachbildung der Feststoffbewegung in Modellen. Mitt. des Franzius-Instituts der TH Hannover (1967) H. 29 S. 213-308
- Giese, E., Teichert, J. und Vollmers, H.J. : Das Tideregime der Elbe. Hydraulisches Modell mit beweglicher Sohle. Mitteilungsblatt der BAW (1972) Nr. 31 S. 1-32
- Giese, E. : Das Tideregime der Elbe. Hydraulisches Modell mit beweglicher Sohle. (Fortsetzung der Veröffentlichung im Mitteilungsblatt Nr. 31 der BAW). Mitteilungsblatt der BAW (1980) Nr. 48 S. 1-55
- Giese, E. und Vollmers, H.J. : Tidemodelle mit beweglicher Sohle. In: Wasserbauliches Versuchswesen. DVWW-Mitteilungsheft (1978) Nr. 4 S. 139-155



- Göhren, H. : Untersuchungen über die Sandbewegung im Elbemündungsgebiet. Hamburger Küstenforschung (1971) H. 19
- Harten, H. : Model trials with movable bed section for improving the main navigational channel of the Elbe River. Proc. 16th Congress of IAHR, Sao Paulo (1975)
- Mundschenk, H. : Zur Quantifizierung von Sedimentbewegungen im Bereich alternierender Tide-Strömungen. Deutsche Gewässerkundl. Mitteilungen (1979) H. 5 S. 122-137
- Nasner, H. : Über das Verhalten von Transportkörpern im Tidegebiet. Mitt. des Franzius-Instituts der TU Hannover (1974) H. 40 S. 1-149
- Rohde, H. : Sandbewegungsuntersuchungen mit radioaktiven Tracern im hydraulischen Modell und in der Natur. Die Küste (1977) H. 31 S. 32-42
- Stehr, E. : Grenzschicht - theoretische Studie über die Gesetze der Strombank- und Riffelbildung. Hamburger Küstenforschung (1975) H. 34
- Ulrich, J. : Die Verbreitung submariner Riesen- und Großrippeln in der Deutschen Bucht. Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift. Reihe B, Nr. 14. Hamburg: Deutsches Hydrographisches Institut (1973)
- Vollmers, H.J.  
Sündermann, J. und  
Wulzinger, W. : Feststofftransport bei Tidewellen. In: Sandbewegung im Küstenraum. Rückschau, Ergebnisse und Ausblick; ein Abschlußbericht. Dt. Forschungsgemeinschaft. Boppard: Boldt (1979)
- Yalin, M.S. : On the geometrically similar reproduction of dunes in a tidal model with movable bed. Proc., 13th Intern. Conference on Coastal Engineering, Vancouver (1972)