

Erfahrungen mit dem Betrieb von Tidemodellen mit beweglicher Sohle

Von Egon Giese, Hermann Harten und Hans Vollmers

Summary

The BAW performs investigations for tidal estuary models of the German North Sea coast. Some of these models, fitted with a movable bed, serve for special research with regard to expected morphological changes in connection with the enlargement and maintenance of the navigation channels.

In addition to basic similarity and scale relations, references are given for special criteria in connection with the nature of the light weight model sediment. Due to the premise that model dunes should be geometrically similar to their counterparts in prototype, an extension of the time scale must be considered, however with respect to the distortion. Furthermore the grain diameter and the grain density affect the mobility and roughness conditions.

Some information on model construction is given and finally some test results are discussed which serve for the statement of nature-like conditions. O'Brien's relations between minimum flow area and tidal prism could be verified both by model tests and calculation which have a special bearing on the enlargement of navigation channels.

It should be stated that movable bed models have definite advantages over fixed bed models because there is a direct interaction between fluid motion and sediment processes.

Einleitung

Bei der ökonomischen Entwicklung der Ästuarbereiche ergeben sich besondere Probleme im Zusammenhang mit der Unterhaltung und dem Ausbau der Wasserstraßen. Der Sedimenttransport spielt hierbei eine sehr wichtige Rolle. Obgleich die hydrodynamischen Vorgänge heute mit Hilfe mathematischer Verfahren hinreichend genau dargestellt werden können, sind die Kenntnisse über den verursachten Sedimenttransport, die Bildung von Riffeln und Dünen und langperiodische morphologische Veränderungen noch weitgehend ungeklärt.

Trotzdem braucht der Ingenieur für seine Planungen Unterlagen über den Sedimenttransport. Ein wertvolles Hilfsmittel ist das hydraulische Modell mit beweglicher Sohle, das technisch so entwickelt wurde, daß die natürlichen Wechselwirkungen zwischen Strömungen und Sedimenttransport nachvollzogen werden. Solche Modelle gehören bisher noch nicht zum allgemeinen Standard der Wasserbauversuchsanstalten, und weiterhin sollte erwähnt werden, daß sie nicht leicht zu handhaben sind. Dies ist wahrscheinlich auf einen Mangel an geeigneten Ähnlichkeitskriterien zurückzuführen, durch die entsprechende Versuchsergebnisse sicherzustellen sind. Es gibt jedoch neuere, etwas vereinfachte Ableitungen von Ähnlichkeitsbeziehungen, die für verzerrte Tidemodelle mit beweglicher Sohle verwendet werden können.

Die Erfahrungen, die man mit dem Elbmodell I in der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) in Hamburg gemacht hat, gaben Anregungen für die Untersuchung besonderer Zustände in anderen großen Tidemodellen der deutschen Nordseeküste.

Es sind, nach der geografischen Lage von West nach Ost geordnet, folgende Modelle:

a) Emsmodell	Maßstäbe 1 : 500/100
b) Jade-Weser-Modell	Maßstäbe 1 : 800/100
c) Elbmodell I	Maßstäbe 1 : 800/100
d) Elbmodell II	Maßstäbe 1 : 500/100
e) Eidermodell	Maßstäbe 1 : 250/ 50

(Die Maßstäbe beziehen sich auf den Längen- und Höhenmaßstab eines Modells; die im Modell dargestellte Länge, dividiert durch die Höhe, gibt das Verhältnis der Höhenverzerrung n an.)

Die Untersuchungen betreffen morphologische Veränderungen in den Bereichen der Wasserstraßen, die Wirkung von Regelungsbauwerken, Verklappstellen des Baggergutes, Veränderungen der Wasserspiegellagen in Verbindung mit der Vertiefung von Schifffahrtskanälen, neue Hochwasserschutzdeiche und den Einfluß von Sturmfluten für die Modelle a bis d und die Abdämmung eines Tideflusses für Modell e im Hinblick auf die unterstrom- und oberstromseitige Kolkssicherung des Wehrbereiches.

Gleichungen und Erläuterungen

Mit folgenden dimensionslosen Parametern kann der Sedimenttransport beschrieben werden:

$$R_* = \frac{u_* \cdot D}{\nu} \quad (\text{Reynolds-Zahl}) \quad (1)$$

$$F_* = \frac{u_*^2}{\rho' \cdot g \cdot D} \quad (\text{Froude-Zahl}) \quad (2)$$

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

(Sedimentologischer Durchmesser)

$$G_* = \frac{q'_s}{\rho \cdot u_*^3} ; g_* = \frac{q'_s}{\rho_s \cdot g \cdot D \cdot u_*} \quad (4)$$

(Transportzahlen)

u_*	= Schubspannungsgeschwindigkeit	[L · T ⁻¹]
D	= charakteristischer Korndurchmesser	[L]
ν	= kinematische Zähigkeit	[L ² · T ⁻¹]
ρ, ρ_s	= spezifische Dichte der Flüssigkeit und des Feststoffmaterials	[M · L ⁻³]
ρ'	= relative spezifische Dichte = $\frac{\rho_s - \rho}{\rho}$	[1]
g	= Fallbeschleunigung	[L · T ⁻²]
q'_s	= spezifischer Feststofftransport	[dyn L ⁻¹ · T ⁻¹]

$$(\wedge) = (L, h, D, \rho') \quad (5)$$

(Vergleich zwischen Natur- und Modellparametern)

Diese Beziehungen eignen sich für die Beschreibung verschiedener Erscheinungen. Man erhält eine Ähnlichkeitsfunktion aus dem Vergleich von Natur und Modellparametern in Gleichung 5, worin die Größen L = Länge, h = Wassertiefe, D = Korndurchmesser und ρ' = relative spezifische Dichte die Grundlage für das Modell liefern. Da die Ästuarien unseres Küstenbereiches zu den voll durchmischten Arten zählen, in denen der Salzgehalt

gleichförmig von der seeseitigen Mündung bis in den Fluß hinein abnimmt und auch das Frischwasser und Salzwasser in der Vertikalen nahezu gut durchmischt sind, werden Dichteeinflüsse in den durch die Ähnlichkeitskriterien beschriebenen Strömungen vernachlässigt.

Die Maßstabsbeziehungen für Modelle mit beweglicher Sohle sind ausführlich in einem Beitrag zur „13. Coastal Engineering Conference“ erwähnt, der auch in „Die Küste“ erschienen ist. Die Maßstabsbeziehungen basieren auf Rauigkeitsbedingungen des Sohlmaterials, wofür verschiedene Leichtstoffmaterialien berücksichtigt sind. GEHRIGS Ableitungen zeigen eine gute Übereinstimmung mit dem empirisch entwickelten Ausdruck von LACEY und INGLIS. Dies kann für eine erste Festlegung der Modellmaßstäbe genügen.

Entsprechend der Forderung, daß die Bildung von Dünen im Modell den Sohlverformungen in der Natur geometrisch ähnlich sein sollte, mußte eine Erweiterung des Zeitmaßstabes nach FROUDE eingeführt werden, was im allgemeinen für Verzerrungen > 5 zu beachten ist. Für das Elbmodell I mit einer Verzerrung $n = 8$ berücksichtigt die Erweiterungszahl α , die zuerst empirisch gefunden und später theoretisch bestätigt wurde, die Abweichung von einem „Froude-Modell“. YALIN hat in seinem Beitrag zur 13. CEC (6) gleichfalls eine entsprechende Ableitung beschrieben, er nannte seinen Erweiterungsfaktor ξ .

Die Berechnungen für die Zeitverlängerung basieren auf dem Zusammenwirken zwischen mittlerer Abflußgeschwindigkeit und dem Sedimenttransport, ausgehend von den

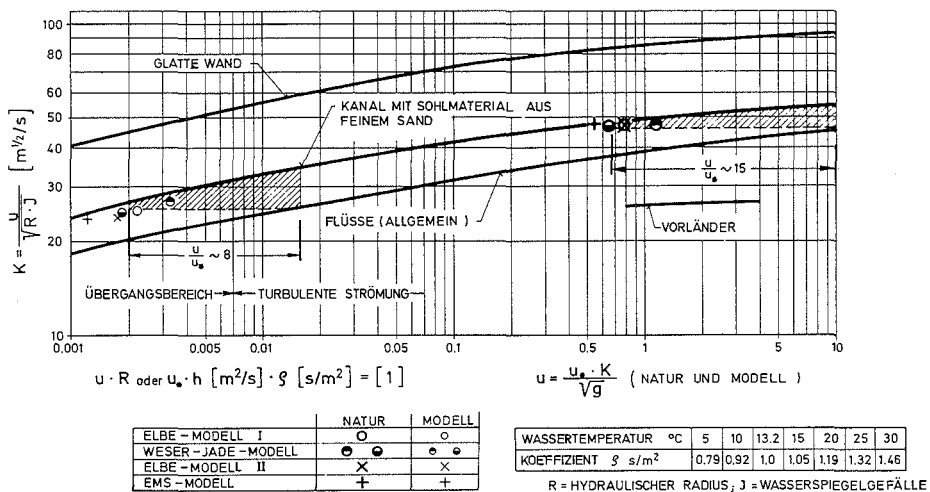


Abb. 1. Rauigkeitskoeffizient K in Beziehung zur Kreyschen Kennzahl $u \cdot R \cdot \rho$ oder $u \cdot R$, wenn $\rho \sim 1$ (Wassertemperatur $13,2^\circ \text{C}$)

Schubspannungsverhältnissen. Das Wasserspiegelgefälle, die Wassertiefe, Korndurchmesser und Dichte des Feststoffes sowie kinematische Zähigkeit der Flüssigkeit und Rauigkeitskoeffizienten des ganzen Systems sind kennzeichnende Größen.

Der Gedanke, mit Modellen zu arbeiten, die nicht dem Ähnlichkeitsgesetz von FROUDE unterliegen, ist nicht neu. In der früheren „Preußischen Versuchsanstalt“ in Berlin, wo Casey und Shields ihre grundlegenden Forschungsarbeiten ausführten, entwickelte KREY eine Modelltechnik für Flüsse mit gleichförmig stationärem Abfluß. Unter Verwendung natürlicher Sände, deren feinste Anteile ausgesiebt wurden, um den kohäsiven Einfluß aus-

zuschließen, konnte eine Übereinstimmung mit einem naturähnlichen Sedimenttransport durch vorgegebene steilere Gefälle für das Modell und die Wasserspiegellagen ($\sim 1 : 600$) erreicht werden. In diesen Fällen mußten die einzelnen Durchflusssmengen in Abhängigkeit von verschiedenen Wassertiefen geeicht werden.

In der grafischen Auftragung in Abb. 1 nach KREY, einem dimensionsbehafteten Rauigkeitsbeiwert K in Abhängigkeit zur Kreyschen Kennzahl, einer Art Reynolds-Zahl, sind Natur- und Modellwerte der deutschen Ästuarien vermerkt. Für $u \cdot R$ wird zunächst $u_* \cdot h$ (Schubspannungsgeschwindigkeit mal Wassertiefe) eingesetzt. Folgt man den Ordinaten bis zum Parameter für Kanäle mit einem Sohlmaterial aus feinen Sänden, können auch alle Rauigkeitskoeffizienten der betrachteten Flußabschnitte bestimmt und weiter

die mittleren Fließgeschwindigkeiten $u = \frac{u_* \cdot K}{\sqrt{g}}$ sowohl für die Natur als auch für das

Modell berechnet werden. Der Vergleich dieser Ergebnisse zeigt schließlich eine Abweichung vom Froudeschen Gesetz, wie es in ähnlicher Weise auch von YALIN beschrieben wird. Die in dem Modell zu intensive Mobilität des Sohlmaterials kann durch die Zeitverlängerung $\alpha = \frac{\lambda u}{\lambda y}$ vermindert werden.

vermindert werden.

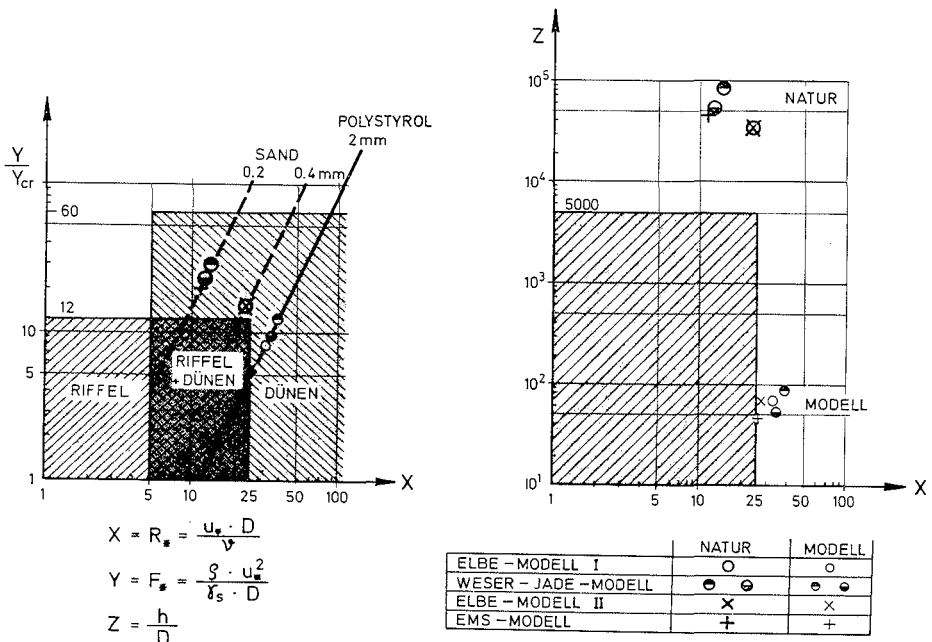


Abb. 2. Yalins Kriterien über die geometrisch ähnliche Nachbildung von Dünen in einem Modell mit beweglicher Sohle [6]

Die Überprüfung von Natur- und Modellwerten mit YALINs Kriterien ist in Abb. 2 enthalten. Auf der linken Seite wird in der Abhängigkeit Y/Y_{cr} zu X die Erscheinung von Riffeln auf Dünen nicht zu erwarten sein, wenn Polystyrol mit einem Durchmesser ≥ 2 mm gewählt wird (Y_{cr} ist die Froude-Zahl des Kornes bei Beginn der Bewegung). In dem Modell muß X (die Reynolds-Zahl des Kornes R_*) nach YALIN immer > 25 sein. Um die Ähnlichkeit von Dünen zu erhalten, sollten sowohl die Natur- als auch die Modell-

werte außerhalb des schattierten Bereiches in der Abhängigkeit X zu Y liegen (rechte Seite in Abb. 2). Diese Voraussetzungen sind für alle Modelle mit Höhenverzerrungen zwischen 5 und 8 gegeben. Die erforderliche Abweichung von einem FROUDE-Modell hat jedoch eine obere Grenze. Versuche mit dem Elbmodell I ergaben, daß mit einer 8fachen Höhenverzerrung nur α - oder ξ -Werte bis 1,5 für dieses relativ lange Ästuar mit einseitiger Tidesteuerung erreicht werden konnten. Geht man darüber hinaus, verflacht das Wasserspiegelgefälle im letzten Teil der Ebephase. Nur für kurze Ästuarien oder Abschnitte mit zweiseitiger Tidesteuerung können Verlängerungsfaktoren von mehr als 1,5 für die Tidedauer vorgesehen werden.

Deshalb wird auch durch die Rauigkeitskoeffizienten bei ähnlich reproduzierten Sohlverformungen das Maß der Höhenverzerrung n begrenzt. Auf der linken Seite unter A der grafischen Auftragung in Abb. 3 ist eine Korrelation zwischen α und der Verzerrung n in Abhängigkeit von verschiedenen Längenmaßstäben λ_y für das Modell dar-

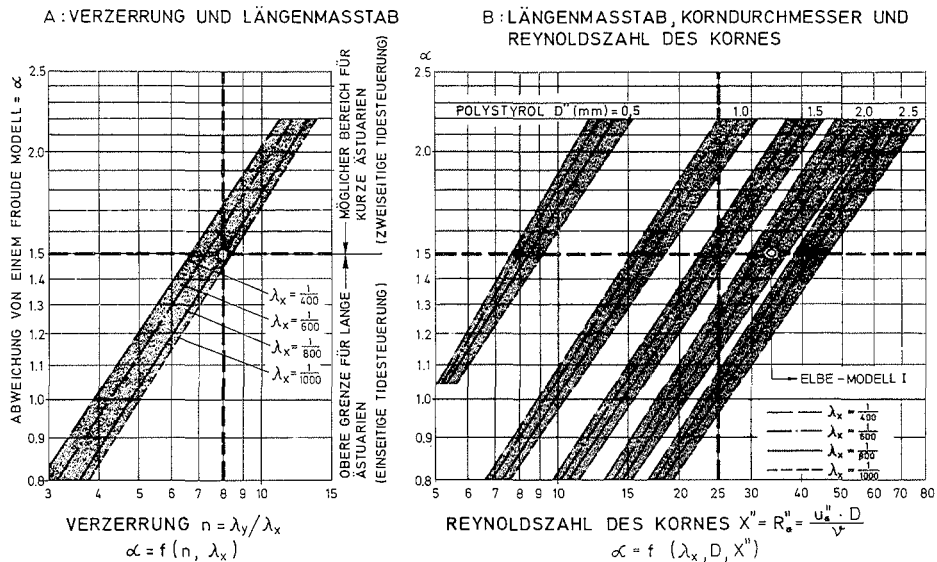


Abb. 3. Korrelation der Abweichung von einem Froude-Modell (Beispiel Elbe-Ästuar, $u_* = 0,0575$ m/s)

gestellt. Da nur der Bereich $1 < \alpha < 1,5$ zur Verfügung steht, kann mit der oberen Begrenzung von $\alpha = 1,5$ in Verbindung mit einem Längenmaßstab 1 : 800 nur eine Höhenverzerrung von $n = 8$ berücksichtigt werden. Dies wurde für das Elbmodell I mit einem sich daraus ergebenden und geeigneten Vertikalmaßstab mit 1 : 100 gewählt. Die Berechnungen für das Elbmodell sind im Anhang zusammengestellt, die Bezeichnungen entsprechen YALINS Interpretierungen (6).

Es muß jedoch erwähnt werden, daß die zuerst empirisch bestimmte Zeitverlängerung für das Modell mit $\alpha = 1,4$ während der Versuche beibehalten wurde. Bei geringeren Höhenverzerrungen nimmt dementsprechend die Zeitverlängerung wieder ab. Dies führt zu einer Annäherung an das Froudesche Ähnlichkeitsgesetz für Höhenverzerrungen < 5 . Hieraus ist auch zu erkennen, daß man oft bei hochverzerrten Modellen mit fester Sohle Schwierigkeiten hat, eine geeignete künstliche Rauigkeit zu finden, die die Reproduktion ähnlicher Wasserspiegelgefälle ermöglicht. Eine weitere Korrelation des Korndurchmes-

sers von Polystyrol mit YALINS Grenzwerten für $X > 25$ auf der rechten Seite in Abb. 3 unter B zeigt den zur Verfügung stehenden engen Bereich innerhalb $1 < \alpha < 1,5$. Es konnten aber Polystyrolkörner mit einem Durchmesser von etwa 2 mm beschafft werden, die diesen Forderungen genügten. Von besonderer Bedeutung ist der morphologische Zeitmaßstab, das ist das notwendige Zeitverhältnis für gleiche Veränderungen der Morphologie in der Natur und im Modell. Die Beziehungen des kennzeichnenden Transportes hängen von den F_* -Werten oberhalb der im Shieldschen Diagramm gegebenen kritischen Werte ab (Beginn des Geschiebetransportes).

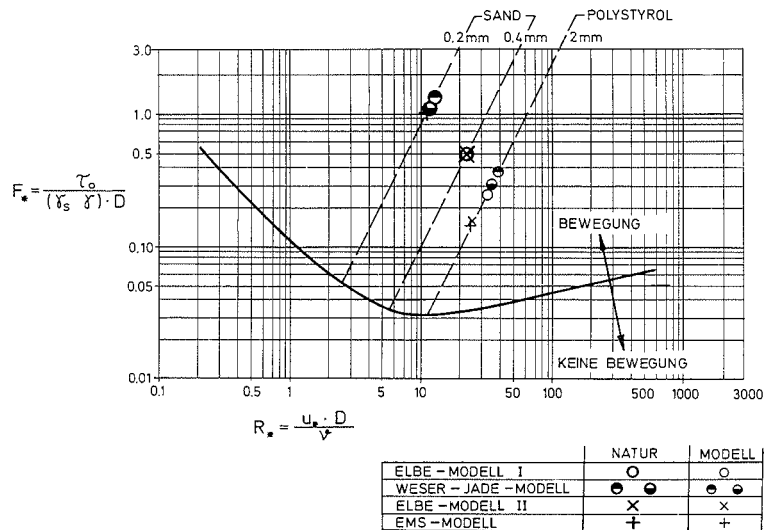


Abb. 4. Shields-Diagramm

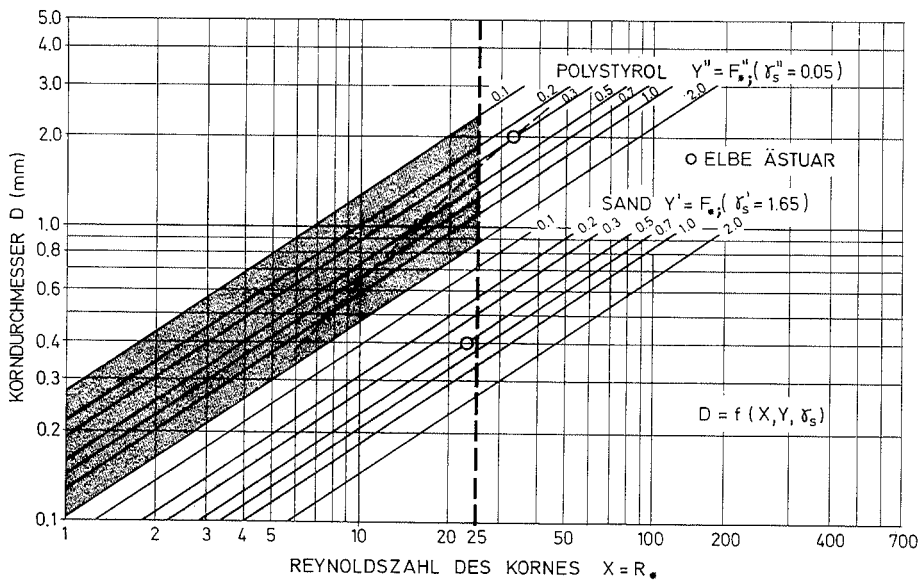


Abb. 5. Korrelation von Korndurchmesser, Reynolds-Zahl des Kornes, Froude-Zahl des Kornes und Dichte des Sohlmaterials

Die Natur- und Modellwerte der deutschen Ästuarien sind in Abb. 4 vermerkt und zeigen den Einfluß von Korndurchmesser und Dichte. Eine relativ hohe Mobilität kann in der Natur und eine verminderte im Modell nachgewiesen werden, beide werden durch maximale Geschwindigkeiten während des steilsten Anstieges oder Absenkung in den Flut- und Ebbephasen verursacht.

Die grafische Darstellung in Abb. 5 ist eine veränderte Darstellung des Shields-Diagrammes mit einer Korrelation des Korndurchmessers zur Reynolds-Zahl des Kornes. Parameter sind die Froude-Zahl des Kornes und die Dichte des Kornes. Natürlicher Sand (Korndurchmesser 0,4 mm) zeigt ein F_* von 0,5. Das verwendete Polystyrol mit Durchmesser 2 mm ergibt nach Berechnungen für das Modell der Elbe ein $F_* \sim 0,3$ und folglich eine geringere Mobilität. In dem Modell würde für $F_* = 0,5$ ein Korndurchmesser von 1,0 mm erforderlich sein, das bedeutet aber, daß dies bereits außerhalb des gültigen Bereiches liegt, der $X = R_* > 25$ (rechts von der gestrichelten Linie) sein muß.

Die morphologische Ähnlichkeit kann als eine Zeitbeziehung ausgedrückt werden, in der natürliche Veränderungen in einem Modell reproduziert werden können. Historische Untersuchungen ergaben, daß die Entwicklungen im Modell viel schneller erfolgten, als es nach dem von FROUDE angegebenen Zeitmaßstab zu erwarten war. Der morphologische Zeitmaßstab wurde danach empirisch mit 1 : 705 gefunden (2 Minuten im Modell entsprechen etwa 1 Tag in der Natur).

Hinweise auf den Modellbau

Modelle mit beweglicher Sohle sollten in geschlossenen, heizbaren Hallen untergebracht werden, um große Abweichungen der Wassertemperaturen zu vermeiden. Es ist zu empfehlen, daß das nachgebildete Tideästuar den ganzen Bereich des Tideeinflusses umfaßt, denn nur so kann die Wirkung von Kunstbauten genau eliminiert werden. Soll eine Kombination von Modellabschnitten mit fester und mit beweglicher Sohle berücksichtigt werden, sind in den Abschnitten mit fester Sohle modelltechnische Vereinfachungen möglich, die dann nur sekundäre Funktionen haben. Das Elbemodell I ist in einer Versuchshalle von 40×112 m untergebracht, dazu waren im oberen Flußabschnitt verschiedene Abweichungen von der natürlichen Linienführung notwendig, um das Modell in der Halle optimal unterzubringen.

Zusätzlich zu der üblichen Ausstattung von Versuchshallen sollten verfahrbare Bedienungsrampen vorhanden sein, mit denen die gesamte Fläche der Halle überspannt werden kann. Auf diese Weise können notwendige Arbeiten und Messungen ausgeführt werden, ohne das Modell selbst zu betreten. Von den Rampen werden auch vor einem Versuch die Profilbleche gezogen, die zur Einformung eines bestimmten morphologischen Ausgangszustandes dienen.

Neben den besonderen Einrichtungen für die Tidesteuerung, wie z. B. das steuerbare Sektorwehr, die genaue quantitative Zuflußverteilung entsprechend dem Durchflußquerschnitt und der elektronisch optischen Tidekurvenabtastung, muß die flächenhaft wirkende Be- und Entwässerungsanlage besonders erwähnt werden. Diese Einrichtung hat eine bedeutende Funktion für den Erfolg der Versuche (5).

Versuchsergebnisse

Die Versuche im Elbemodell I ergaben bezüglich der historischen morphologischen Entwicklung eine gute Übereinstimmung zwischen Natur und Modell. Die Wechselbezie-

hungen zwischen alternierenden Fließvorgängen in einer Tide und dem dadurch verursachten Sedimenttransport kann unter Beachtung der hydrodynamischen Ähnlichkeit für den ganzen Astuarraum besser im Modell als in der Natur erfaßt werden.

Detaillierte Angaben über die ersten praktischen Versuche zur Überprüfung des Stabilisierungseffekts für einen neuen ausgebauten Schifffahrtsweg nordwestlich von Cuxhaven sind in den Proceedings der 13. CEC (5) enthalten. Die minimale örtliche Eintreibungsverteilung wurde bei Versuchsreihe II mit einer tangentialen Verlängerung des bestehenden Leitdammes erreicht. Kontrollmessungen in der Natur mit Echolotungen zeigen

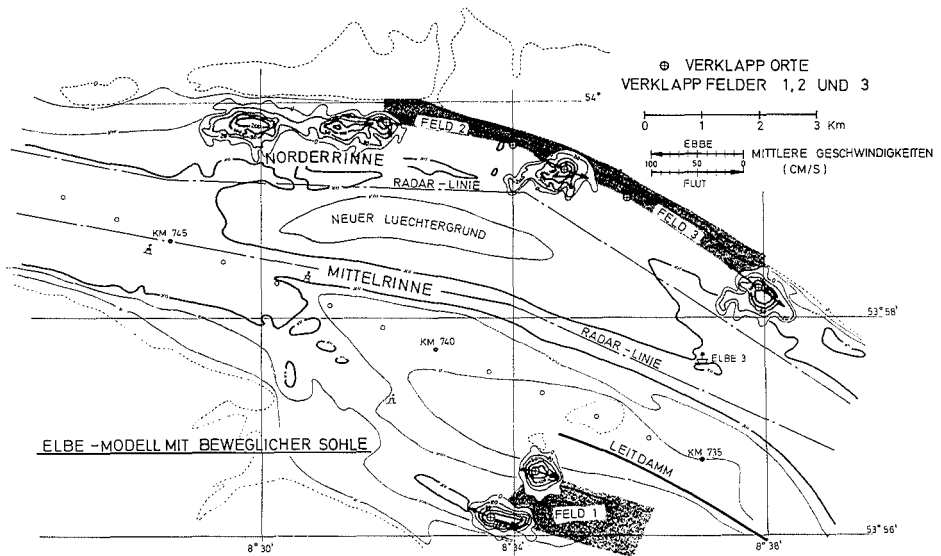


Abb. 6. Die Ausbreitung verklappten Materials in der Außenelbe (Modelluntersuchungen im Elbmodell I mit beweglicher Sohle unter Verwendung radioaktiver Tracer, Linien gleicher Gammastrahlungen nach 150 Tiden)

die Tendenz zunehmender Stabilisierungsentwicklungen an. Es mußte eine neue Methode entwickelt werden, um die Ausbreitung von zuerst gebaggerten und später verklappten Materials zu messen. Dies ist im Zusammenhang mit der Unterhaltung und Vertiefung der größeren Schifffahrtsrinnen von Bedeutung.

Für Baggergutdeponien in der Außenelbe konnte nachgewiesen werden, daß das abgelagerte Material nicht in die erweiterte Mittelrinne zurücktransportiert wird. Als Beispiele können die in Abbildung 6 angegebenen Meßpunkte dienen. Um die Ausbreitung des aus Kunststoff bestehenden Modellfeststoffes (Polystyrol) messen zu können, muß dieser selbst als Tracer dienen. Die Einzelkörner werden durch ein an ihre Oberfläche gebundenes Element radioaktiv gemacht. Für diesen Zweck wird Brom verwendet, das chemisch an Polystyrol gebunden wird. Die Dauer der erwähnten Versuche geht über 150 Tiden, das sind etwa 33 Stunden im Modell. Dies entspricht etwa der Halbwertszeit von Brom. Weitere Einzelheiten sind in einem Beitrag zum IAHR-Kongreß in Istanbul 1973 beschrieben (8).

Eine große Flächenbaggerung wurde im Elbmodell II untersucht. Zu diesem Zweck ist ein Modellabschnitt mit einer beweglichen Sohle ausgestattet worden. Die Naturähnlichkeit war auch hier sehr gut.

Es sollen aus dem Fluß $8,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ Sand entnommen werden, um Industrieflächen auf dem Vorland aufzuspülen. Die Baggerfelder mit den Bezeichnungen I-IV liegen außerhalb der Hauptschiffahrtsrinne, und die Erweiterung des Querschnitts begünstigt die hydraulischen Bedingungen. Der Durchfluß wird ausgeglichener, die Strömungen zeigen mehr rinnenparallele Richtungen, und die Sohldeformationen werden geglättet.

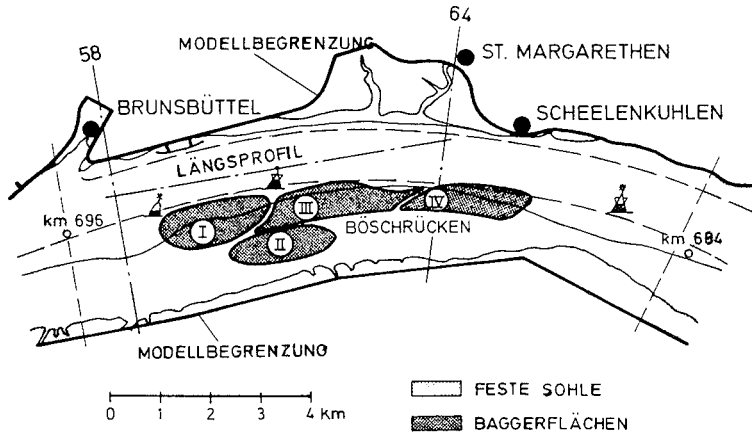


Abb. 7. Lageplan des Elbe-Abschnittes zwischen Brunsbüttel und Scheelenkuhlen (km 684 bis km 696)

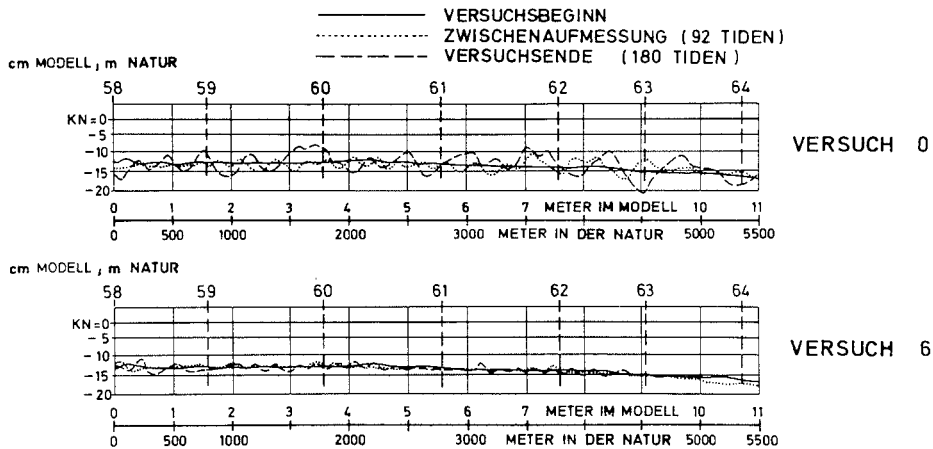


Abb. 8. Längsprofil der Elbe zwischen den Modellprofilen 58-64 (Versuche 0 und 6 im Elbe-modell II, Teilabschnitt mit beweglicher Sohle)

Die Ergebnisse in Abbildung 8 für Versuch 0, damit ist der bestehende Zustand gemeint, zeigen im Längsprofil eine relativ unstetige Dünenbildung mit unterschiedlichen Höhen. Versuch 6 zeigt das gleiche Längsprofil nach der Baggerung mit der mehr geglätteten Sohle. Diese Entwicklungen erklären die Wechselbeziehungen der Flüssigkeit-Sedimentbewegung und die Wirkung von Regulierungsmaßnahmen.

Schl u ß f o l g e r u n g e n

Die Technik für Tidemodelle mit beweglicher Sohle ist in den letzten Jahren wesentlich weiterentwickelt worden. Versuchsergebnisse wurden jedoch nur spärlich veröffentlicht. Die Erfahrung hat gezeigt, daß solche Modelle sehr nützlich sind und daß sich auch bei nur geringfügigen konstruktiven Veränderungen sehr differenzierte morphologische Entwicklungen abzeichnen, die von den äußeren Kräften und der Sohltopographie geprägt werden.

Die Abhängigkeiten zwischen minimalem Durchflußquerschnitt und dem Tidevolumen nach O'BRIEN (2) konnten sowohl durch Rechnung als auch Modellversuche überprüft werden. Mit einer vereinfachten Berechnungsmethode in einem metrischen System wird für bestimmte Querschnitte von Ästuarien der deutschen Nordseeküste deren ähnliches Verhalten mit den Ästuarien an der Pazifikküste nachgewiesen (3). Diese Abhängigkeiten haben eine besondere Bedeutung für den Ausbau der Wasserstraßen.

Abschließend sollte noch einmal hervorgehoben werden, daß Modelle mit beweglicher Sohle erhebliche Vorteile gegenüber Modellen mit fester Sohle haben, da eine unmittelbare Wechselwirkung zwischen Flüssigkeitsströmung und Sedimenttransport stattfindet.

S c h r i f t e n v e r z e i c h n i s

- (1) GEHRIG: Über die Frage der naturähnlichen Nachbildung der Feststoffbewegung in Modellen. Mitteilungen des Franzius-Instituts für Grund- und Wasserbau der Technischen Hochschule Hannover, Heft 29, 1967.
- (2) M. P. O'BRIEN: Equilibrium Flow Areas of Inlets on Sandy Coasts. Journal of the Waterways and Harbors Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, February, 1969.
- (3) GIESE: Fahrwasserumbildungen in der Unter- und Außenelbe. Die Wasserwirtschaft, Heft 3, 1971.
- (4) GIESE, TEICHERT, VOLLMERS: Das Tideregime der Elbe, Hydraulisches Modell mit beweglicher Sohle, Mitteilungsblatt der BAW, Nr. 31, 1972.
- (5) VOLLMERS, GIESE: Elbe Tidal Model with Movable Bed, 13th International Conference on Coastal Engineering, Vancouver B.C., Canada, und Das Tidemodell der Elbe mit beweglicher Sohle, Die Küste, 1973, Heft 24.
- (6) YALIN: On the Geometrically Similar Reproduction of Dunes in a Tidal Model with Movable Bed. 13th International Conference on Coastal Engineering, Vancouver B.C., Canada, 1972.
- (7) GIESE, TEICHERT, VOLLMERS: The Tidal Regime of the Elbe-River, Hydraulic Model with Movable Bed. International Symposium on River Mechanics, Bangkok, Thailand, 1973.
- (8) VOLLMERS, GIESE: Measurement of Sediment Transport by Radioactive Tracers in a Tidal Model with Movable Bed. 15th Congress of the IAHR, Istanbul, Turkey, 1973.

A n h a n g

Berechnungen für das Elbmodell I mit beweglicher Sohle

$$h' = 13.5 \text{ m}$$

$$D' = 0.4 \text{ mm}$$

$$L' = 28.3 \text{ km}$$

$$H = 0.7 \text{ m}$$

$$J' = 2.5 \cdot 10^{-5}$$

Zwischen Brunsbüttel und Cuxhaven

$$\gamma_s'/\gamma' = 1.65$$

$$\nu' = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}; \quad g = 9.81 \text{ m/s}^2; \quad \mathcal{G} = \nu'/g = 101.94 \text{ kp s}^2/\text{m}^4$$

Sohlmaterial im Modell: Polystyrol $\gamma_s'' = 0.05$; $D'' = 2 \text{ mm}$

$$\lambda_{\gamma_s'} = \frac{0.05}{1.65} = \frac{1}{33}; \quad \lambda_D = \frac{0.002}{0.0004} = 5$$

$$\lambda_Y = \frac{1}{100} \quad \text{Höhenverhältnis}$$

$$n = \frac{\lambda_Y}{\lambda_X} = 8 \quad \text{Höhenverzerrung}$$

$$\lambda_X = \frac{1}{800} \quad \text{Längenverhältnis}$$

$$Z' = \frac{h'}{D'} = \frac{13.5}{0.0004} = 33750$$

$$\lambda_Z = \frac{67.5}{33750} = \frac{1}{500}$$

$$Z'' = \frac{h''}{D''} = \frac{0.135}{0.002} = 67.5$$

$$X' = \frac{u_*' \cdot D'}{\nu'}; \quad u_*' = \sqrt{\frac{\tau'}{\mathcal{G}}}; \quad \tau' = \gamma' \cdot h' \cdot J' = 1000 \cdot 13.5 \cdot 2.5 \cdot 10^{-5} = 0.3375$$

$$u_*' = \sqrt{\frac{0.3375}{101.94}} = 0.0575 \text{ m/s}$$

$$X' = \frac{0.0575 \cdot 0.0004}{10^{-6}} = 23 \quad Y'_{cr} = 0.035 \text{ (Shields)}$$

$$Y' = \frac{101.94 \cdot 0.0575^2}{1650 \cdot 0.0004} = 0.51 \quad Y'/Y'_{cr} = \frac{0.51}{0.035} = 14.57$$

$$X'' = \frac{u_*'' \cdot D''}{\nu''}; \quad u_*'' = \sqrt{\frac{\tau''}{\mathcal{G}}}; \quad \tau'' = \gamma'' \cdot h'' \cdot J'' = 1000 \cdot 0.135 \cdot 2 \cdot 10^{-4} = 0.027$$

$$u_*'' = \sqrt{\frac{0.027}{101.94}} = 0.0163 \text{ m/s}$$

$$X'' = \frac{0.0163 \cdot 0.002}{10^{-6}} = 32.6 \quad Y''_{cr} = 0.032 \text{ (Shields)}$$

$$Y'' = \frac{101.94 \cdot 0.0163^2}{50 \cdot 0.002} = 0.271 \quad Y''/Y''_{cr} = \frac{0.271}{0.032} = 8.47$$

$$\lambda_X = \frac{32.6}{23.0} = 1.42; \quad \lambda_Y = \frac{0.271}{0.51} = \frac{1}{1.88}$$

$$\begin{aligned} u_*' \cdot h' &= 0.0575 \cdot 13.5 = 0.776 && \left(\text{Krey'sche Kennzahl } u_* \cdot R \cdot g ; g = 1 \right) \\ u_*'' \cdot h'' &= 0.0163 \cdot 0.135 = 0.0022 && \left(\text{Wassertemperatur } 13.2^\circ\text{C}; R = h \right) \end{aligned}$$

Wähle den Rauigkeitskoeffizienten K aus der Krey'schen Grafik (Abb. 3) für Kanäle mit Bettmaterial aus feinem Sand

$$K' = 47 ; K'' = 25$$

$$\frac{u}{u_*} = \frac{K \cdot \sqrt{h \cdot J}}{\sqrt{\tau}} = \frac{K \cdot \sqrt{h} \cdot \sqrt{J} \cdot \sqrt{g}}{\sqrt{\tau} \cdot h \cdot J \cdot \sqrt{g}} = \frac{K}{\sqrt{g}}$$

$$\text{Prototyp: } u' = \frac{u_*' \cdot K'}{\sqrt{g}} = \frac{0.0575 \cdot 47}{3.14} = 0.86 \text{ m/s}$$

$$\text{Modell: } u'' = \frac{u_*'' \cdot K''}{\sqrt{g}} = \frac{0.0163 \cdot 25}{3.14} = 0.13 \text{ m/s}$$

$$u = \frac{u''}{u'} = \frac{0.13}{0.86} = 0.15$$

Notwendige Zeitverlängerung für die Tidedauer nach Froude:

$$\alpha = \frac{\lambda_u}{\lambda_x} = \frac{0.15}{\sqrt{\frac{1}{100}}} = 1.5$$

[Berechnungen mit dem "Technischen System": kp, m, s]