

Das Tidemodell der Elbe mit beweglicher Sohle

Von Hans Vollmers und Egon Giese

Summary

The BAW was contracted to perform investigations for an estuary tidal model of the Elbe-river. This model, fitted with a movable bed, serves for special research with regard to expected morphological changes in connection with the enlargement, and maintenance of the main navigation channel in the sea area.

Since in tidal estuaries the interaction of fluid and solid material is almost completely unknown, these investigations were carried out to evaluate future structure design and dredging work. The movable bed procedure seems more advantageous than the speculative interpretation of sediment movement derived only from flow velocities in fixed bed models.

The horizontal scale of the model is 1:800, the vertical scale 1:100. After basic considerations i.e. similarity, hydrology, morphology, specifications of the modelling technique are given and finally test results are discussed.

Einleitung

Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) wurde beauftragt, ein Ästuar-Tidemodell der Elbe (Nordsee) zu untersuchen. Das Modell, das mit einer beweglichen Sohle ausgestattet ist, dient für die Untersuchung zweckmäßiger Maßnahmen für die Erweiterung und Unterhaltung des Hauptfahrwassers im Seebereich.

Weil in Tideästuarien die Wechselwirkung zwischen Flüssigkeit und Feststoffmaterial weitgehend unbekannt ist, wurden Versuche ausgeführt, um die auftretenden morphologischen Veränderungen festzustellen. In diesem Zusammenhang werden bauliche Maßnahmen und Baggerungen, die bereits ausgeführt wurden, oder geplante Maßnahmen für die Natur berücksichtigt. Diese Untersuchungen haben gute Ergebnisse gezeigt und scheinen bessere Erfolge zu ermöglichen als spekulative Aussagen über Sedimentbewegungen, die aus Fließgeschwindigkeiten in einem Modell mit fester Sohle abgeleitet werden.

Der Horizontalmaßstab des Modells ist 1:800, der vertikale Maßstab 1:100. Nach grundlegenden Betrachtungen über Ähnlichkeit, Hydrologie bzw. Morphologie werden Einzelheiten über die Modelltechnik beschrieben und abschließend einige Versuchsergebnisse diskutiert.

Ähnlichkeitsbetrachtungen

Im allgemeinen kann der Sedimenttransport in offenen Gerinnen für Modelle nicht nur mit Hilfe des Gesetzes von FROUDE beschrieben werden, da der vollkommen rauhe Bereich der Widerstandszahl nicht erreicht wird. Deshalb scheint es notwendig, Kompromisse zwischen den Ähnlichkeitsgesetzen von FROUDE und REYNOLDS zu machen.

Der spezifische *Feststofftransport* kann in folgender Form ausgedrückt werden:

$$q_s' = f(S, S', g, \nu, D, w, u_*)$$

worin

$$u_* = \sqrt{g \cdot h \cdot l_e}$$

Es bedeuten:

$\rho, \rho_s =$	spezifische Dichte der Flüssigkeit und des Sohlmaterials	[ML ⁻³]
$\rho' =$	relative spezifische Dichte = $\frac{\rho_s - \rho}{\rho}$	[1]
$g =$	Normfallbeschleunigung	[LT ⁻²]
$\nu =$	kinematische Zähigkeit	[L ² T ⁻¹]
$w =$	Fallgeschwindigkeit des Kornes in ruhendem Wasser	[LT ⁻¹]
$u_* =$	Schubspannungsgeschwindigkeit	[LT ⁻¹]
$h =$	Wassertiefe	[L]
$D =$	charakteristischer Korndurchmesser	[L]
$I_e =$	Energieliniengefälle	[1]
$q'_s =$	spezifischer Feststofftransport	[dynL ⁻¹ T ⁻¹]
$\kappa =$	Karman Konstante	[1]

Mit diesen charakteristischen Werten können dimensionslose Parameter gebildet werden:

REYNOLDS-Zahlen:

$$R_* = \frac{u_* \cdot D}{\nu} ; \quad R_w = \frac{w \cdot D}{\nu}$$

FROUDE-Zahlen:

$$F_* = \frac{u_*^2}{g' g D} ; \quad F_w = \frac{w^2}{g' g D}$$

Sedimentologischer Durchmesser:

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

Es wurde ermittelt, daß die Kennzahlen F_* und R_* besonders geeignet für die Beschreibung von Transportvorgängen sind. GEHRIG [1] hat Ähnlichkeitsbeziehungen durch den Vergleich dieser Zahlen für das Modell und die Natur entwickelt. Diese Abhängigkeiten erlauben die Bestimmung der horizontalen und vertikalen Modellmaßstäbe sowie Einzelheiten der Materialkonstanten D und ρ' . Die Bedingungen hierfür sind:

Das Modell muß verzerrt sein und die Widerstandszahl im Bereich $R_* < 70$ liegen.

Die Ausgangsgleichungen sind:

$$R_* = \frac{\sqrt{g h_N I_{eN}} D_N}{\nu_N} = \frac{\sqrt{g h_N K I_{eN}} D_N}{\sqrt{\hat{h}_N} \nu_N \hat{D}}$$

$$F_* = \frac{g h_N I_{eN}}{g' g D} = \frac{g h_N I_{eN} K \hat{D} \hat{g}'}{g' g \hat{h} D}$$

Das Symbol ($\hat{\quad}$) bezeichnet die Kehrwerte des Ähnlichkeitsmaßstabes, $K = \frac{\hat{h}}{h}$

ist die Ähnlichkeitsbeziehung der Verzerrung. Aus diesen Definitionen können zwei Gleichungen abgeleitet werden:

$$(\hat{\quad}) h^3 = L^{1.5} g' \quad (1)$$

$$(\hat{\quad}) D^3 = g'^{-1} \quad (2)$$

In den Abbildungen 1 und 2 sind diese Gleichungen dargestellt. Hieraus können geeignete Maßstabsbeziehungen entwickelt werden. Die folgenden Gesichtspunkte sollten jedoch berücksichtigt werden:

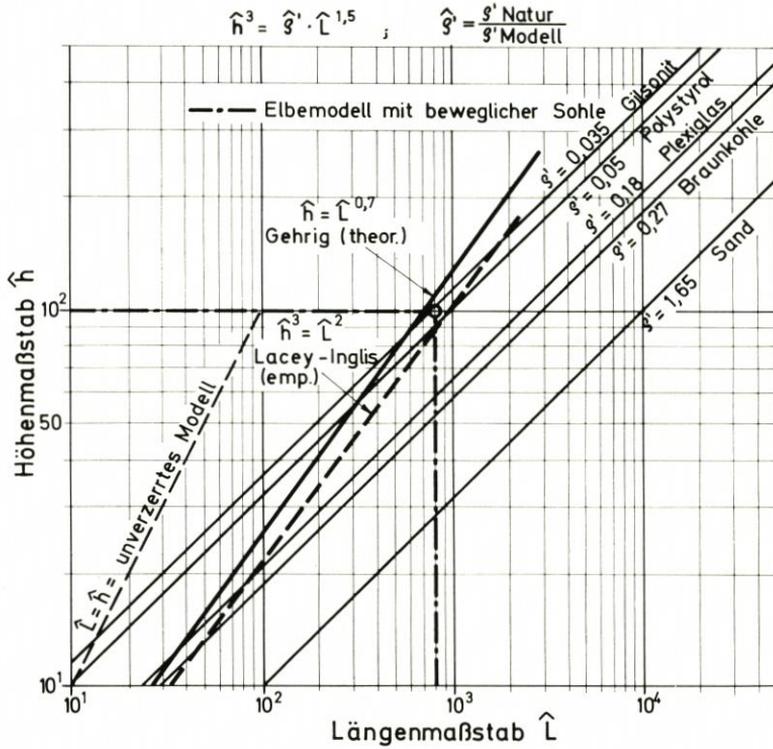


Abb. 1. Maßstabsbeziehungen für Modelle mit beweglicher Sohle [1]

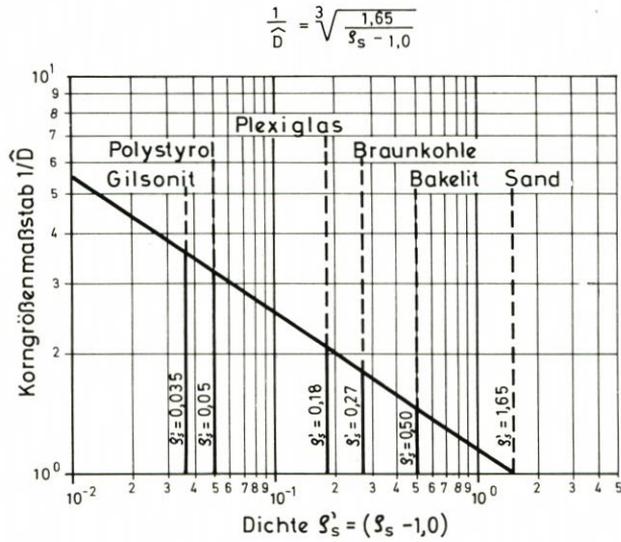


Abb. 2. Maßstabsbeziehungen zwischen der Dichte und dem Korndurchmesser des Sohlmaterials im Modell [1]

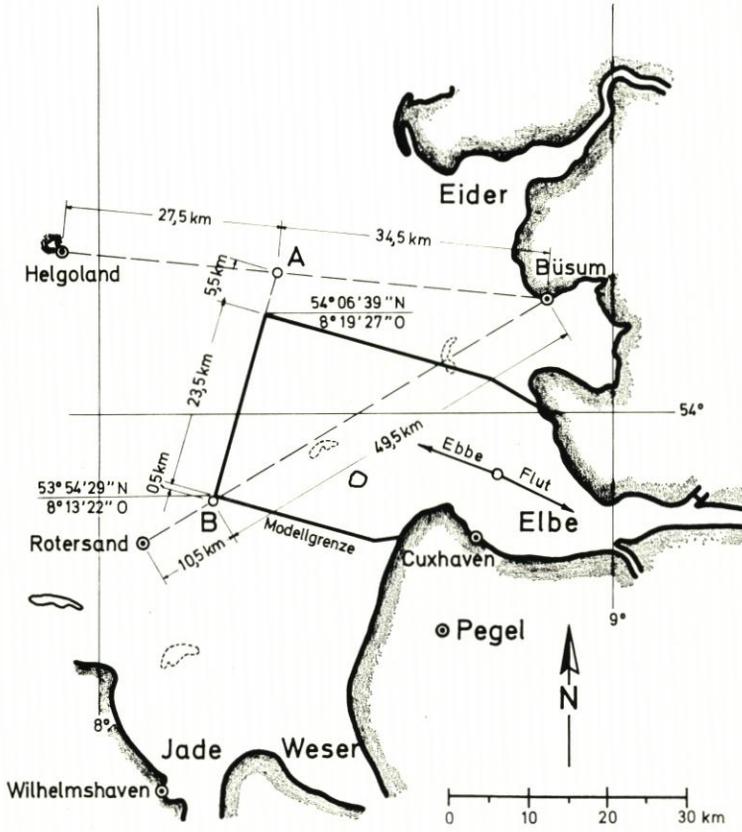


Abb. 3. Modellgrenzen im Seebereich

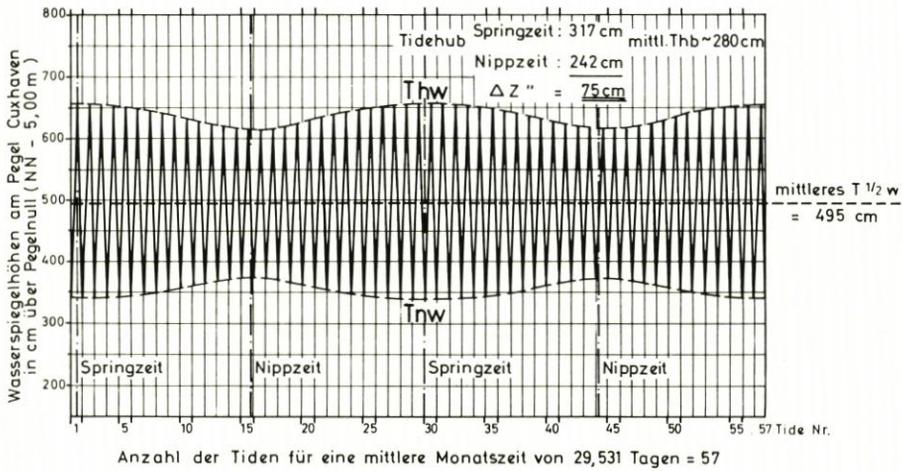


Abb. 4. Mittlere monatliche Tidekurven (Pegel Cuxhaven)

- a) Die Längenbeziehung \hat{L} des Modells wird von der vorhandenen Fläche bestimmt.
- b) Die Höhenbeziehung \hat{h} hängt von der Genauigkeit der Bestimmung der Wasserspiegel-lagen ab.
- c) Verzerrung und Modellabfluß beeinflussen \hat{L} und \hat{h} .
- d) \hat{D} und $\hat{\zeta}$ werden von dem vorhandenen oder beschaffbaren Material bestimmt.
- e) Der Zeitmaßstab wird besonders bei Tidemodellen zunächst empirisch bestimmt werden müssen.

Hydrologische und morphologische Grundlagen

Die Begrenzungen für den Seeteil des Tidemodells (Abb. 3) wurden nach eingehenden historischen Voruntersuchungen festgelegt [2]. Der Modelleinlauf enthält besondere Einrichtungen für die Steuerung der Tidewellen. Die Fließgeschwindigkeiten, Fließrichtungen und Wasserspiegelgefälle zeigen nach der Auswertung gute Übereinstimmung zwischen Modell und Natur innerhalb eines großen Bereiches verschiedener Formen der Tide-welle.

Im Modell wird es nicht genügen, Folgen mittlerer Tiden ablaufen zu lassen, um natürliche Verhältnisse wiederzugeben. Es wurde deshalb ein monatlicher Zyklus mit 57 verschiedenen Tiden und halbmonatiger Ungleichheit zwischen Nipp- und Springzeit zu-grunde gelegt (Abb. 4).

Die gewählten Maßstäbe für das Modell erfordern ein sehr mobiles Sohlmaterial mit einer spezifischen Dichte von $1,05 \text{ g/cm}^3$. Das Material hat einen einheitlichen Korndurch-messer ($D \sim 2 \text{ mm}$) und bildet unter Fließbedingungen selbst eine ausreichende Rauhgig-keit. Da die Versuche mehrere Jahre dauern werden, darf das Material nicht seine Eigen-schaften ändern. Das Plastik-Material POLYSTYROL befriedigt die Forderungen, aber es ist in der Anschaffung teuer. Für eine mittlere Schichtdicke von etwa 10 cm wurden etwa 120 000 kp benötigt. Die den Kunststoffen eigene Hydrophobie kann durch Zugabe von Netzungsmitteln vermindert werden. Im allgemeinen wurde eine gute Übereinstim-mung der morphologischen Umformungen zwischen Natur und Modell nachgewiesen, wenn die Tideperiode im Modell modifiziert wird.

Dichteströmungen und Coriolisbeschleunigung sind in verzerrten Modellen mit be-weglicher Sohle nur schwer zu realisieren, deshalb wurden sie hier auch nicht berücksich-tigt. Trotzdem war eine gute Übereinstimmung der Strömungsparameter nachzuweisen.

Der Modellbau

Das Modell wurde von den Grenzen im Seeteil (Abb. 3) bis zum äußersten Ende des Tideeinflusses am Wehr Geesthacht aufgebaut. In der Längsachse werden etwa 170 km dargestellt (Abb. 5).

Neben den besonderen Einrichtungen für die Erzeugung der Tide mittels eines steuer-baren Sektorverschlusses dienen 11 regulierbare Fallrohre, die über die Einlaufbreite (30 m) verteilt sind, für die genaue Wassermengenverteilung entsprechend den Quer-schnittsverhältnissen. Vor den Versuchen wird die bewegliche Sohle mit Hilfe eingesetzter Profibleche (sie werden später wieder entfernt) eingeformt. Die Profile ruhen auf einem stufenförmigen Unterbau aus Beton (Abb. 6).

Das Modell hat ein flächenhaft wirkendes Be- und Entwässerungssystem, so daß die eingeformte Morphologie nicht durch Füllung oder Entleerung zerstört werden kann (Abb. 7). Messungen und Beobachtungen sind von verfahrenbaren Bedienungsbrücken aus möglich [3].

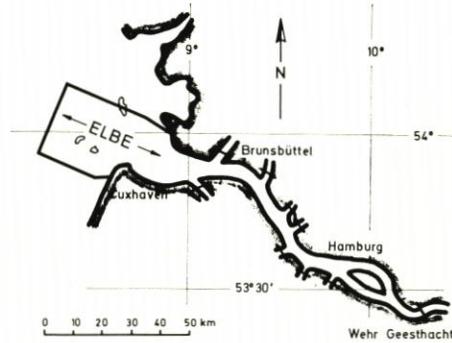


Abb. 5. Die Elbe von der See bis zum äußersten Punkt des Tideinflusses (Wehr Geesthacht)

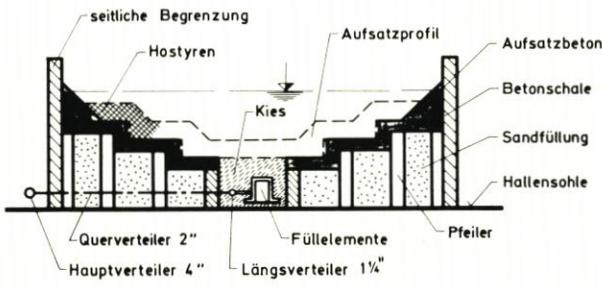


Abb. 6. Modellteil mit beweglicher Sohle (schematisch)

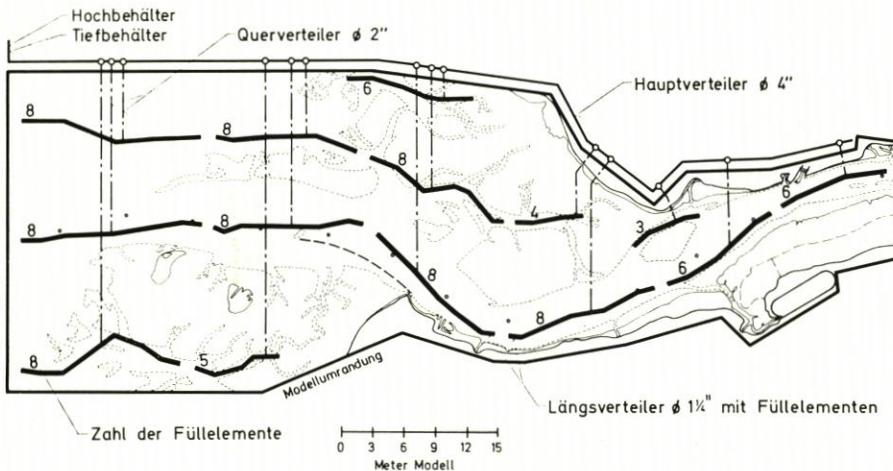


Abb. 7. Verteilernetz für die flächenhaft wirkende Be- und Entwässerung

Die elektronischen Meßgeräte

Durch ein elektronisch-optisches System werden die Tidekurven abgetastet, die auf einem endlosen Folienband aufgezeichnet sind. Vibrierende Spitzentaster, *System Delft*, mit Fernübertragung sind als Istwertgeber für die Tiderzeugung und als Meßpegel in-

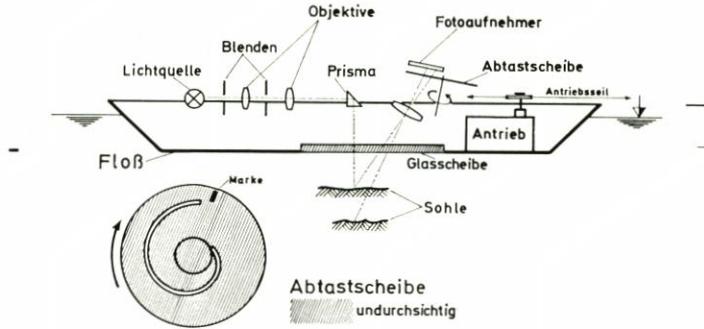


Abb. 8. Elektronisch-optisches Gerät für die Aufmessung der Morphologie

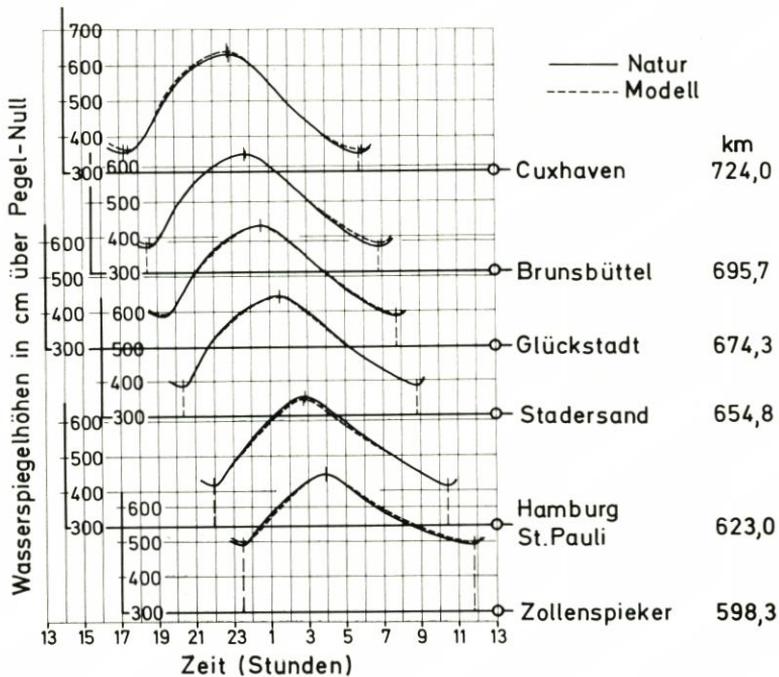


Abb. 9. Vergleich von Tidekurven im Modell und in der Natur

stalliert. Die Steuerung und Registrierung der Meßwerte erfolgt von einem zentralen Meßstand aus. Weiterhin sind folgende Meßvorgänge – gleichfalls mit Fernübertragung – möglich: Wasserspiegelgefälle, Geschwindigkeiten, die mit Mikroflügeln gemessen werden, Strömungsrichtungen und die Messung der morphologischen Änderungen durch ein elektronisch-optisches System, das auf einem Floß montiert ist (Abb. 8). Dieses Gerät kann bis zu Wassertiefen von 32 cm (32 m Natur) unterhalb einer erforderlichen Überdeckungshöhe von 10 cm verwendet werden.

Dies muß bei der Gestaltung des Einlaufes berücksichtigt werden. Die Profilaufmessungen werden bei Dunkelheit ausgeführt, weil der Einfluß von Fremdlicht außerordentlich stark ist.

Überprüfung der Ähnlichkeit

Die Kontrolle der Ähnlichkeit wird in zwei Bereiche unterteilt:

- a) Dynamische Ähnlichkeit
- b) Morphologische Ähnlichkeit

Zu a): Im Modell gemessene Wasserspiegellagen, Fließgeschwindigkeiten und Fließrichtungen sowie Flut- bzw. Ebbedauern wurden mit Naturzuständen verglichen. Hierfür wurde das Gesetz von FROUDE benutzt. Die Modellfläche, die später mit einer beweglichen Sohle ausgestattet wurde, bestand aus einer quasi festen Sandsohle mit künstlich eingeformter Oberflächenrauigkeit. Alle genannten Parameter zeigten gute Übereinstimmungen, als Beispiel mag die Darstellung verschiedener gemessener Tidekurven dienen (Abb. 9).

Zu b): Die morphologische Ähnlichkeit kann als eine Zeitbeziehung bezeichnet werden, durch die natürliche Sohlveränderungen in dem Modell wiedergegeben werden. Es wurden hierfür historische Untersuchungen ausgeführt, für die der Zeitraum von 1910 bis 1970 herangezogen wurde. Die Tidedauer, die zunächst nach FROUDE bestimmt wurde, mußte mit einem Faktor 1,4 erweitert werden, um geeignete Werte für die Rauigkeit und Sohlveränderungen zu erhalten. Es wurde schließlich ein morphologischer Zeitmaßstab von 1 : 705 festgelegt (ein Tag in der Natur dauert etwa 2 Minuten im Modell).

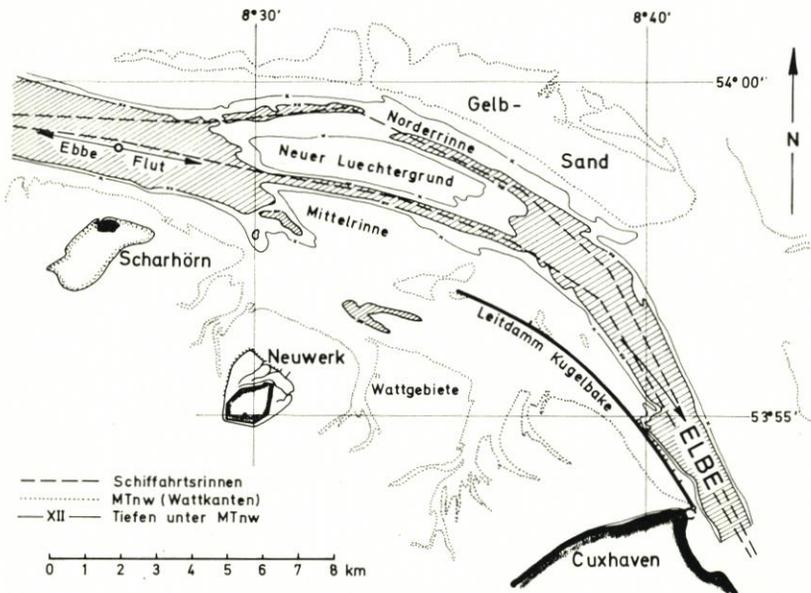


Abb. 10. Teil des Elbe-Ästuars (nordwestlich von Cuxhaven, 1969)

Erste praktische Modellversuche

Die ersten Versuche wurden ausgeführt, um den Stabilisierungseffekt für den Mittelrinnenausbau in der Außnelbe zu überprüfen, der den natürlichen Entwicklungstendenzen eines Fahrwassers nord-westlich von Cuxhaven angepaßt wurde.

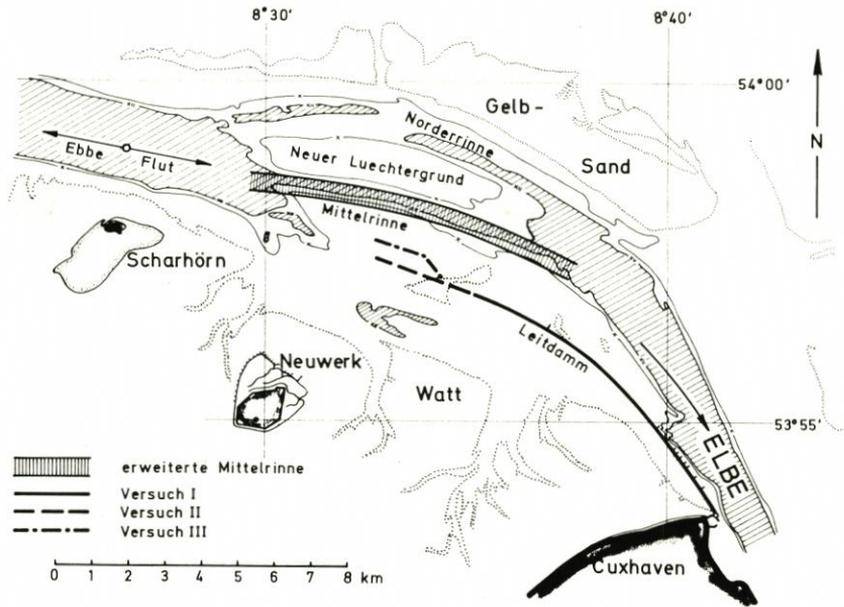


Abb. 11. Entwurfsvarianten für eine Leitdammverlängerung

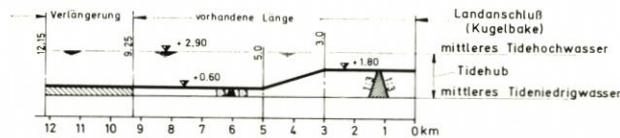


Abb. 12. Längsschnitt des Leitdammes mit Einzelheiten der Kronenform

Bis heute benutzen die ausgehenden und einkommenden Schiffe zwei Fahrwasser, die Mittlerinne und die Norderrinne (Abb. 10). Es ist vorgesehen, die Mittlerinne für den gesamten Verkehr und besonders für größere Schiffe zu verbreitern und zu vertiefen. In den vergangenen Jahrzehnten führte die bestehende Zweiteilung des Schifffahrtsweges zu instabilen Verhältnissen, die durch die verschiedenen Flut- und Ebbestömungsrichtungen für die Schifffahrt aufgetreten sind. Nach der 1968 erfolgten Fertigstellung eines 9,25 km langen Leitdammes im Seebereich (Abb. 10), trat eine gewisse Stabilisierung ein, jedoch sind die Schifffahrtsstraßen noch zu flach. Der neue Entwurf für die Erweiterung der Mittlerinne enthält zusätzlich einen Ausbau des Leitdammes (etwa 3 km Verlängerung). Deshalb wurden zwei Entwurfsvarianten im Vergleich mit der bestehenden Länge des Leitdammes untersucht.

In Abb. 11 bezeichnet Versuch I den bestehenden Zustand des Leitdammes, Versuch II eine tangentielle Verlängerung und Versuch III eine abgelenkte Form des verlängerten Leitdammes. Den vorhandenen Längsschnitt des Leitdammes zeigt Abb. 12. Der Damm besteht aus Steinschüttung auf Sinkstücken.

Die neue erweiterte und vertiefte Mittlerinne (500 m Breite, 12 m Tiefe unterhalb Karten-Null) wurde im Modell vor dem Versuch als vorhanden eingebaut. Jeder Versuch dauerte im Modell 186 Stunden, das entspricht in der Natur einem Zeitabschnitt von 15 Jahren. Die gemessenen Eintreibungen am Ende dieser Zeit innerhalb des neu ausgebag-

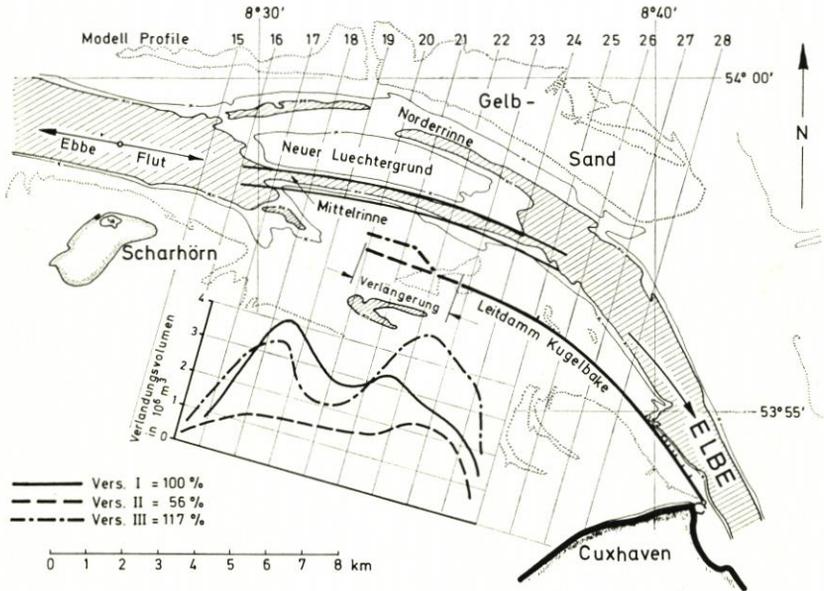


Abb. 13. Versuchsergebnisse der gemessenen Eintreibungen in die neue Mittelrinne in Bezug zu einer Verlängerung des Leitdammes

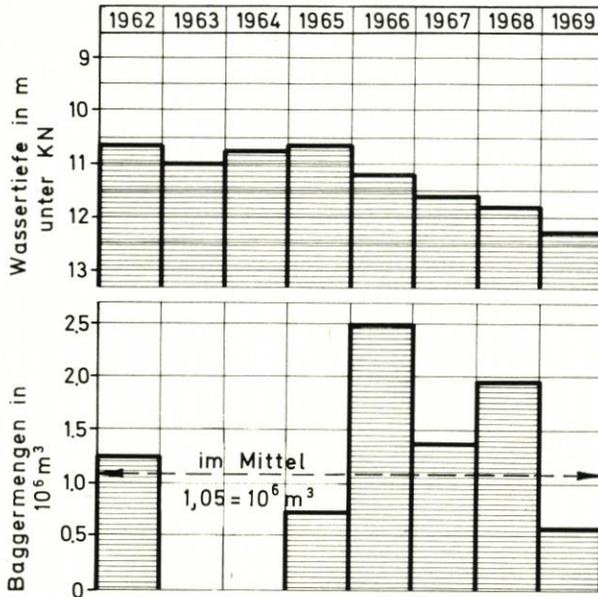


Abb. 14. Entwicklung der mittleren Wassertiefe in Bezug zu den Baggerungen in der Natur

gerten Schifffahrtskanals wurden auf Jahresmengen umgerechnet und durch eine Prozentzahl spezifiziert (Versuch I = 100 %).

Die in Abb. 13 eingetragenen Ergebnisse in Prozentzahlen und örtlicher Verteilung zeigen ein minimales Volumen bei Versuch II mit tangentialer Verlängerung des Leitdammes.

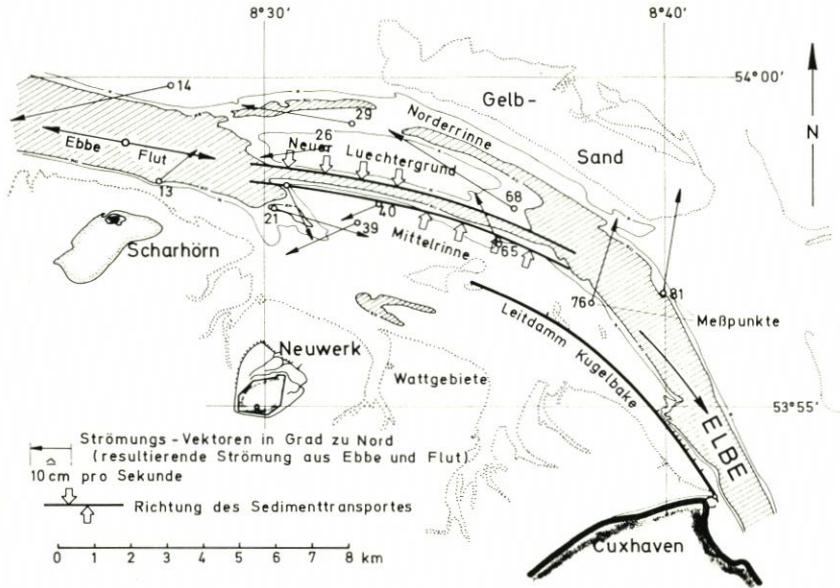


Abb. 15. Verlandungsdynamik im Bereich der Mittelrinne

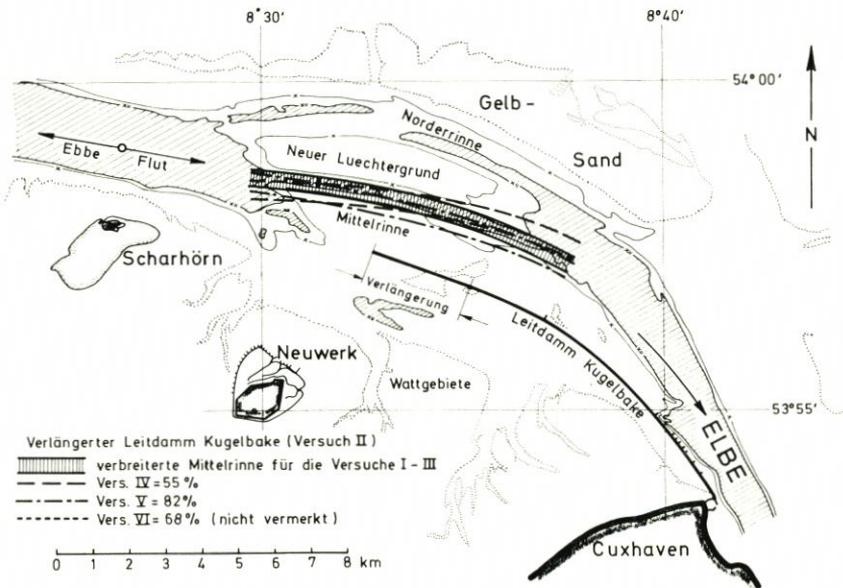


Abb. 16. Lageänderungen der Mittelrinne

Bei Versuch I, mit der bestehenden Länge des Leitdammes, wurden die Eintreibungen in die Mittelrinne von $1,475 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ pro Jahr gemessen (Modellvolumen mit den Modellmaßstäben multipliziert und dividiert durch die Anzahl der Versuchsjahre). Der Kanal hatte hierbei eine Breite von 500 m. Als Vergleichsmöglichkeit für die Baggermengen im Modell und in der Natur kann Abb. 14 verwendet werden.

Nach Angaben aus der Natur wurde eine mittlere Baggermenge von $1,05 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ pro Jahr (1962–1969) für eine mittlere Fahrwasserbreite von 350 m berechnet. Mit einem Erweiterungsfaktor für die Breite von $500/300 = 1,43$ wächst dieses Volumen auf $1,50 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ an und entspricht tatsächlich etwa dem im Modell gemessenen Wert. Diese Übereinstimmung ist sicherlich überraschend, für die Beurteilung der Varianten werden aber zweckmäßig nur die qualitativen Ergebnisse benutzt. Die Versuche zeigen deutlich, daß eine Möglichkeit besteht, die Baggermengen in der Mittelrinne zu vermindern, wenn der Leitdamm nach Form II verlängert wird.

Die komplexen Verlandungserscheinungen werden in Abb. 15 dargestellt. Die verschiedenen Eintreibungsrichtungen, die aus Naturbeobachtungen bekannt sind und auch im Modell gut nachvollzogen werden, entstehen aus den auseinanderlaufenden Flut- und Ebbeeströmungen. Die resultierenden Fließrichtungen, die für verschiedene Meßpunkte vermerkt sind, erklären die Abhängigkeit zwischen Sedimenttransport und Fließrichtungen und erläutern die Schwierigkeiten für die Stabilisierung des Schiffahrtsweges.

Weitere Versuche befaßten sich mit einer veränderten Linienführung der Mittelrinne. Einzelheiten sind in Abb. 16 enthalten. Die gemessenen Verlandungsvolumina sind ebenfalls in Prozentzahlen im Vergleich mit Versuch I angegeben. Der Leitdamm ist dabei nach Versuch II mit einer Gesamtlänge von 12,25 km bei allen Varianten (IV bis VI) unverändert geblieben.

Die Ergebnisse zeigen, daß eine kleine Drehung der Mittelrinne entgegen dem Uhrzeigersinn (Versuch IV) etwa die gleiche Prozentzahl wie bei Versuch II ergibt (55 % zu 56 %). In diesem Fall ist aber der Navigationskurs ungünstiger. Versuch V behandelt eine Näherung der Mittelrinne in Richtung Leitdamm, hierbei wird eine Zunahme der Eintreibungen festgestellt (82 %). Bei Versuch VI wird für die Mittelrinne eine Kombination aus den Versuchen IV und V berücksichtigt, die wieder zu einer Verminderung der Eintreibung führt (68 %). Die Versuche zur Ermittlung einer optimalen Linienführung zeigen die außerordentliche Sensibilität der beweglichen Sohle und den Einfluß kleiner konstruktiver Änderungen. Auf der anderen Seite kann man sehen, daß der in der natürlichen Entwicklung entstandene Kanal, der jetzt durch den Leitdamm stabilisiert wird, offenbar eine optimale Linienführung angenommen hat.

Schlußfolgerungen

Der vorliegende Bericht über ein Tidemodell mit beweglicher Sohle erläutert die erfolgreich nachvollzogene Wiedergabe des morphologischen Geschehens in einem Tideästuar. Die Wertung verschiedener Entwurfsvarianten für eine Verlängerung des Leitdammes zeigt minimale Baggermengen für die Mittelrinne bei der tangentialen Verlängerung (Versuch II). Es ist zu erwähnen, daß die gemessenen Verlandungsvolumina nur qualitativ untereinander verglichen wurden. Trotz gewisser Vereinfachungen sind Modelle mit beweglicher Sohle eine wertvolle Unterstützung beim Entwurf von Baumaßnahmen mit den dazugehörigen Baggarbeiten.

Schriftenverzeichnis

- [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] GIESE: Fahrwasserumbildungen in der Unter- und Außenelbe. Die Wasserwirtschaft, März 1971.
- [3] GIESE, TEICHERT, VOLLMERS: Das Tideregime der Elbe. Hydraulisches Modell mit beweglicher Sohle. Mitteilungs-Blatt der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) Nr. 31, Karlsruhe 1972.