

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Article, Published Version

**Dietz, Johann W.**

## **Untersuchungen in den Tidemodellen der Außenstelle Küste**

Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102880>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Dietz, Johann W. (1987): Untersuchungen in den Tidemodellen der Außenstelle Küste. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 60. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 33-78.

### **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.



UNTERSUCHUNGEN IN DEN TIDEMODELLEN DER  
AUSSENSTELLE KÜSTE

Investigations in tidal models  
at the coastal department

Johann Wolfgang Dietz, Dr.-Ing., Baudirektor in der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW).



Geboren 1932. Studium des Bauingenieurwesens an der Universität Karlsruhe von 1952 bis 1959. Seit 1959 in der Bundesanstalt für Wasserbau und dort ab 1964 Leiter des Referats "Stauregelungen". 1968 Promotion an der Universität Karlsruhe über die Kolkbildung in feinen oder leichten Sohlmaterialien bei strömendem Abfluß. Von 1974 bis 1981 Lehrbeauftragter an der Fachhochschule Karlsruhe im Fach Wasserbau.

Seit 1981 Leiter des Referats "Wasserbauliches Versuchswesen, Naturversuche" und Vertreter des Leiters der Außenstelle Küste in Hamburg. Ab 1983 Lehrbeauftragter an der Fachhochschule Hamburg im Fach Wasserwirtschaft und Wasserbauliches Praktikum.

Veröffentlichungen u.a. über Staustufen, Wehre, Sperrwerke, Querströmungen in Vorhafenzufahrten, Kolkbildung, Sohlensicherungen und Modelluntersuchungen.

Inhaltsangabe

Bei der Außenstelle Küste in Hamburg wurden zwischen den Jahren 1959/60 und 1974 im Zuge der geplanten Ausbaumaßnahmen der Tideflüsse mit den entsprechenden Investitionsmitteln vier großflächige Tidemodelle der Ästuarie Elbe (mit fester und mit beweglicher Sohle), Ems und Jade/Weser erbaut und in Betrieb genommen. Am Beispiel der Untersuchungsaufgaben der letzten Jahre in zeitlicher Reihenfolge befaßt sich die vorliegende Arbeit mit diesen vier großflächigen Tidemodellen und mit ihren Möglichkeiten zur Untersuchung der anstehenden Fragen. Zunächst wird aber in einer kurzen Zusammenfassung auf die Modell- und Versuchstechnik in diesen Tidemodellen sowie auf einige wichtige Ähnlichkeitsmechanische Aspekte, insbesondere für die Untersuchungen mit beweglicher Sohle, eingegangen. Die Schlußbetrachtung wendet sich der Entwicklung und dem zunehmenden Einsatz der mathematischen Tidemodelle zu, die in einigen Bereichen den hydraulischen Modellen überlegen sind.

Summary

Between 1959 and 1974 the coastal department of the Federal Waterway Engineering and Research Institute in Hamburg built up four large sized hydraulic models of the estuaries Elbe (one with fixed bed and another one with movable bed), Ems and Jade/Weser. The institute was to study the problems resulting from the then planned improvement of the rivers for navigation. This report deals with the model tests carried out since that time beginning with a glance on the test techniques and the laws of similarity for tidal models especially those with movable bed. It explains the possibilities one has to investigate actual problems and finally attends to the development and the increasing use of mathematical models which are in some respect better than the hydraulic models.

I N H A L T

	Seite
1 Übersicht	35
2 Ähnlichkeitsbetrachtungen und Modelltechnik	36
3 Untersuchungen in den Tidemodellen	39
3.1 Elbmodell mit fester Sohle	39
3.1.1 Allgemeines	39
3.1.2 Modellversuche Rhinplatte/Brammerbank (1980 - 1982)	41
3.1.3 Auswirkung des 13,5 m-Ausbaus auf den Tideverlauf (1983 - 1984)	43
3.1.4 Modellversuche Pagensand/Schwarztonnen- sand (1984 - 1986)	48
3.1.5 Modellversuche Bühnen Fährmannssand (1986)	52
3.2 Elbmodell mit beweglicher Sohle	54
3.2.1 Allgemeines	54
3.2.2 Untersuchungen des Sedimenteintriebs in die Fahrrinne (1982 - 1986)	56
3.3 Emsmodell	61
3.3.1 Allgemeines	61
3.3.2 Modellversuche für die Umleitung der Ems (1966 - 1983)	62
3.3.3 Modellversuche für den Ausbau der Unterems zwischen Papenburg und Emden (1981/82 und 1986/87)	65
3.4 Jade-Weser-Modell	69
3.4.1 Allgemeines	69
3.4.2 Wasserstandsuntersuchungen (1982/83)	71
4 Schlußbetrachtung	74
5 Schrifttum	76

## 1 Übersicht

Das Referat "Wasserbauliches Versuchswesen, Naturversuche" führt Untersuchungen und gutachtliche Beratungen für Ausbau- und Unterhaltungsmaßnahmen der Wasserstraßen im Küstengebiet aus, und zwar mit Hilfe von Modellversuchen, von Naturuntersuchungen, sowie von theoretischen Arbeiten und Berechnungen. Entsprechend diesem im Organisationsplan für die BAW formulierten Auftrag ist dieses Referat fachlich in die beiden Gruppen "Wasserbauliches Versuchswesen" und "Naturversuche" unterteilt.

Die Gruppe "Wasserbauliches Versuchswesen" befaßt sich mit der Durchführung von Modelluntersuchungen, um alle wasserbautechnischen Fragen zu untersuchen, die mit dem Ausbau der Wasserstraßen im Küstengebiet und deren Unterhaltung zusammenhängen. Diese Modellversuche werden zum einen für einzelne Bauwerke oder Bauwerksteile in größermaßstäblichen Einzel- oder Teilmodellen, in hydraulischen Rinnen und Wellenbecken ausgeführt - man spricht in diesem Fall auch von sogenannten Bauwerksmodellen. Zum anderen - und dies war in den zurückliegenden Jahren der häufigere Fall - bedient sich das "Wasserbauliche Versuchswesen" bei der AK der ständig vorgehaltenen großflächigen Tidemodelle für Elbe, Ems und Jade/Weser.

Die nachfolgenden Ausführungen sollen sich ausschließlich mit diesen Tidemodellen und den in ihnen ausgeführten Untersuchungen befassen.

Die großflächigen Tidemodelle aller deutschen Tideästuare sind auf dem fast 8 ha großen Gelände der Außenstelle Küste in Hamburg-Rissen in mehreren großen Hallen aufgebaut (siehe Lageplan auf Bild 7 in der Arbeit von Rohde im gleichen Heft). Es handelt sich um Dauermodelle, die viele Jahre bestehen bleiben und in dieser Zeit für Untersuchungen aller wasserbaulichen Probleme in den Ästuaren ständig betriebsbereit zur Verfügung stehen. Neben den Untersuchungen von Ausbau- und Unterhaltungsmaßnahmen sind auch Fragen nach der Beeinflussung der hydrologischen Verhältnisse durch andere Maßnahmen am und im Gewässer zu beantworten (z.B. Untersuchungen über Einleitungen von Abwasser und Kühlwasser in die Ästuare, Sturmflutuntersuchungen, Linienführung von Deichen, Abdämmen von Nebenflüssen). In jüngster Zeit stehen betont Probleme der Fahrwasserunterhaltung (Baggerungen, Verklappungen) und der Sedimentbewegung in den Tideästuaren als Untersuchungsaufgabe an. Zur Untersuchung dieser Fragen nach dem komplizierten Sedimenttransport in den Tideflüssen bedient man sich entweder eines Tidemodells mit beweglicher Sohle, das für den Bereich der Außenelbe als "Elbmodell mit beweglicher Sohle" bei der Außenstelle Küste (AK) zur Verfügung steht, oder man rüstet in den festen Tidemodellen einzelne Modellabschnitte vorübergehend mit einer beweglichen Modellsohle aus. Als Modellfeststoff dient in allen Fällen der Leichtkunststoff Polystyrol.

Die wichtigsten Untersuchungen in den Tidemodellen der AK in den letzten Jahren können wie folgt genannt werden: 13,5 m-Ausbau der Elbe, Sturmflutuntersuchungen für die Unterelbe, Stromregulierungen an der Elbe, Sandbewegungen und Fahrwasser-eintreibungen in der Elbe, Strömungsverhältnisse im Jade-Weser-Gebiet, Umleitung der Ems durch den Dollart und Bau eines neuen Großhafens bei Emden ("Dollarthafenprojekt") sowie Ausbau der Ems zwischen Papenburg und Emden.

Am Beispiel der Untersuchungsaufgaben der letzten Jahre befaßt sich die vorliegende Arbeit mit den vier großflächigen Tidemodellen der AK für Elbe (mit fester und mit beweglicher Sohle) Ems und Jade/Weser und mit ihren Möglichkeiten zur Untersuchung der anstehenden Fragen.

Zunächst aber soll in einer kurzen Zusammenfassung auf die Modell- und Versuchstechnik in diesen Tidemodellen sowie auf einige wichtige Ähnlichkeitsmechanische Aspekte, insbesondere für die Untersuchungen mit beweglicher Sohle, eingegangen werden.

## 2 Ähnlichkeitsbetrachtungen und Modelltechnik

Tidemodelle mit fester Sohle werden grundsätzlich nach dem Ähnlichkeitsgesetz von Froude betrieben. Hierzu darf auf das umfangreiche Fachschrifttum (z.B. /3/13/14/15/) verwiesen werden. Für Tidemodelle mit beweglicher Sohle und für einzelne Modellabschnitte mit beweglicher Sohle müssen noch weitergehende Modellkriterien und Ähnlichkeitsgesetze beachtet werden, die sich aus dem Gleichsetzen der Reynoldszahlen des Kornes  $Re_*$  und der erweiterten Froudezahl des Kornes  $Fr_*$  in Natur und Modell ergeben /4/5/6/.

Es läßt sich nachweisen (u.a. /20/), daß in dem auf diesen Forderungen beruhenden Modelltyp die Fließwiderstände und die Geschwindigkeitsprofile automatisch nicht richtig abgebildet werden. Diese Probleme lassen sich durch eine Verzerrung oder Überhöhung des Modells teilweise beheben.

Bei Tidemodellen ist auch aus Gründen des großen Breite-/Tiefenverhältnisses der Tideästuare in Verbindung mit einer für das Modell zu fordernden Mindestwassertiefe eine Verzerrung (Überhöhung) unumgänglich, das heißt, es werden für Längen (bzw. Breiten) und Tiefen unterschiedliche Modellmaßstäbe gewählt.

Die Entscheidung für ein verzerrtes Modell mit beweglicher Sohle schließt die Wahl von Sand als Modellfeststoff aus. Andererseits würden die feinkörnigen Sedimente der Tideströme in der Natur bei ihrer geometrischen Verkleinerung feine, Adhäsionseinflüssen unterliegende Sedimente im Modell erforderlich machen, so daß man schon allein aus diesem Grund auf leichtere aber gröbere Feststoffe im Modell umsteigen muß.

Für die Tidemodelle mit beweglicher Sohle hat sich die Benutzung von Polystyrol als Modellfeststoff hervorragend bewährt. Die Dichte dieses Leichtkunststoffes beträgt  $\rho_s = 1053 \text{ kg/m}^3$ ; die äquivalenten Kugeldurchmesser des extrudierten zylindrischen Materials liegen zwischen 1,0 bis 3,2 mm. Bei stark überhöhten Tidemodellen mit beweglicher Sohle ist es nicht mehr möglich, die Reibungsverluste allein durch die Sohlreibung ähnlich nachzubilden. Es treten daher unmaßstäblich große Strömungsgeschwindigkeiten auf. Als Folge ergeben sich zu hohe Sohlverformungen (d.h. eine starke Überzeichnung der Dünen), die nicht mit den aus der Natur bekannten geometrischen Formen übereinstimmen. Als Korrektur dieses unmaßstäblichen Einflusses verwendet man eine "Zeitverlängerung", d.h. die Dauer der Einzeltide im Modell wird gedehnt und somit eine Verminderung der Fließgeschwindigkeit erreicht. Hiervon werden die Gefälleverhältnisse nicht berührt /7/8/9/.

Nach YALIN /18/ läßt sich der Maßstabsfaktor  $\alpha$  für die Zeitverlängerung darstellen als

$$\alpha = \frac{\sqrt{h_r}}{v_r} = \frac{\sqrt{h_n/h_m}}{v_n/v_m}$$

Für ein Froudemodell erhält man  $\alpha = 1$ ; wird dagegen  $v_m$  größer als dem Ähnlichkeitsgesetz von Froude entspricht, dann erhält man Werte  $\alpha > 1$ . Demnach ist die Zeitverlängerung stets so zu wählen, daß die resultierenden Geschwindigkeitsverhältnisse letztlich wieder dem Froudeschen Ähnlichkeitskriterium genügen.

Im allgemeinen kann man davon ausgehen, daß bei den üblichen Maßstäben von langen, einseitig gesteuerten Tidemodellen mit Maßstabszahlen von  $L_r = 500 - 800$  etwa ab einer 5-fachen Überhöhung ( $n = 5$ ) eine Zeitverlängerung erforderlich ist ( $\alpha > 1,0$ ), während bei geringeren Überhöhungen das Modell nach Froude betrieben werden kann ( $\alpha = 1,0$ ). Nach den Erfahrungen im Elbmodell mit beweglicher Sohle kann der praktisch noch erreichbare Höchstwert der Zeitdehnung mit 1,4 genannt werden. Bei größeren Zeitdehnungen besteht die Gefahr, daß in Modellen mit einseitiger Tidesteuerung die Wasserspiegelgefälle und damit die Tideströmungen nicht mehr naturähnlich nachgebildet werden. Bei verhältnismäßig langen Tidemodellen können sich je nach den örtlich vorliegenden Gefälleverhältnissen unterschiedliche Maßstabsfaktoren  $\alpha$  für die Zeitdehnung ergeben, was möglicherweise der Anordnung einer beweglichen Modellsohle auf ganzer Länge des Tideregimes im Wege stehen kann.

Von größter Bedeutung für ein Tidemodell mit beweglicher Sohle ist die Forderung, daß im Modell die gleichen Sohlformen wie in der Natur, das heißt die entsprechenden Transportkörper vorliegen müssen, um richtige Ergebnisse zu erhalten. Hinsichtlich der Kriterien für das Auftreten der Transportkörper darf auf das einschlägige Fachschrifttum verwiesen werden (z.B. /18/20/).

Nachdem für ein Tidemodell mit beweglicher Sohle die vorher definierte Zeitdehnung theoretisch bestimmt und empirisch überprüft worden ist und der vorher genannte Nachweis hinsichtlich des Auftretens der gleichen Transportkörper in Natur und Modell geführt ist, muß der sogenannte "morphologische Zeitmaßstab" ermittelt werden. 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 erfolgen, als es nach dem von Froude angegebenen Zeitmaßstab zu erwarten war. Der morphologische Zeitmaßstab muß empirisch durch "historische Versuche" (Kartenvergleiche Natur - Modell) ermittelt werden. Er nimmt in praktischen Fällen alle Ungenauigkeiten und Unsicherheiten bei der Wahl der Maßstäbe auf /4/7/.

Die Steuerung aller großflächigen Tidemodelle der AK erfolgt als sogenannte einseitige Steuerung einer vorgegebenen Tide an der seeseitigen Modellgrenze, wobei der Tidefluß bis zu seiner Tidegrenze nachgebildet ist. Grundsätzlich wird dabei eine Steuerklappe so bewegt, daß die dadurch an der Steuerstelle im Modell erzeugte Tidekurve mit der bekannten Tidekurve übereinstimmt (Steuerung der Wasserspiegellagen). Hierzu wird das Verfahren der photoelektrischen Abtastung gewählt. Die gezeichnete Tidekurve (Steuerkurve) wird durch eine Fotozelle abgetastet. Istwert und Sollwert werden elektronisch miteinander verglichen und veranlassen die Steuerbefehle. So lassen sich beliebige Tidefolgen im Modell reproduzieren. Die bei einer einseitigen Steuerung erforderliche Nachbildung des gesamten Ästuars bis zu seiner oberen Tidegrenze ist manchmal durch die Größe einer vorhandenen Versuchshalle oder durch die Wirtschaftlichkeit einer hierfür erforderlichen neuen Versuchshalle begrenzt. In diesen Fällen kann man sich mit einer Verschwenkung bzw. Abwinkelung und/oder einer Spiegelung einzelner Modellabschnitte behelfen, sofern diese vom eigentlichen Untersuchungsgebiet weit genug entfernt liegen. Als Beispiel für ein derartiges Vorgehen können die Tidemodelle für die Elbe mit beweglicher Sohle, für die Ems und für die Jade/Weser angeführt werden.

Die in einem Tidemodell ablaufenden instationären Vorgänge erfordern die fortlaufende Registrierung der Meßdaten und damit eine weitgehende Konzentration der Meß- und Steuergeräte, die wiederum vollautomatisch arbeiten. Die entsprechenden Meßgeräte zur Ermittlung der Wasserstände, Strömungsgeschwindigkeiten nach Größe und Richtung sowie der Sohllagen der beweglichen Modellsohle sind vorhanden. Die Erfassung der Meßwerte erfolgt zentral im Steuer- und Meßraum durch Punktdrucker und simultan durch digitale Speicherung, die Verarbeitung, Auswertung und Darstellung der Daten in einem Rechner samt Plotter.

### 3 Untersuchungen in den Tidemodellen

Die vier großflächigen Tidemodelle der Ästuarie Elbe, Ems und Jade/Weser wurden zwischen den Jahren 1959/60 und 1974 im Zuge der geplanten Ausbaumaßnahmen der Tideflüsse mit den entsprechenden Investitionsmitteln erbaut und in Betrieb genommen. Die bei der nachfolgenden Beschreibung dieser Modelle herangezogenen Untersuchungsbeispiele sind nicht nach dem fachlichen Inhalt, sondern in der zeitlichen Reihenfolge der Versuchsdurchführung geordnet. Im großen und ganzen sind es Untersuchungsaufgaben der letzten fünf Jahre. Soweit die Ergebnisse einzelner Untersuchungen im Fachschrifttum veröffentlicht und damit allgemein zugänglich sind, werden diese unter Hinweis darauf nur kurz angesprochen.

#### 3.1 Elbmodell mit fester Sohle

##### 3.1.1 Allgemeines

Das Elbmodell mit fester Sohle ist in seinen Grundformen 1959/60 gebaut worden. Unter den heute noch bestehenden Tidemodellen ist es damit das älteste Modell der BAW - AK. Es ist nicht nur in Fachkreisen bekannt, sondern viele Bevölkerungskreise wissen von der Existenz dieses Modells, das in älteren Stadtplänen von Wedel sogar den Namen für die BAW hergibt, die hierin schlichtweg als "Elbmodell" bezeichnet wird. Seit der Inbetriebnahme im Jahr 1966 ist es als Dauermodell ständig in Betrieb gewesen, um die seitdem geplanten und verwirklichten Ausbauten der Unterelbe und andere Maßnahmen am Strom zu untersuchen /1/.

Die äußere Grenze des Modells liegt im Westen bei km 752 (etwa Position des ehemaligen Feuerschiffs Elbe 2); dort liegt die Steuerstelle für die Tide. Die obere Grenze des Modells liegt beim Wehr Geesthacht (km 585); dort erfolgt die Zugabe der jeweils erforderlichen Oberwasserzuflüsse. Das Modell bildet demnach eine Streckenlänge von 167 km nach. Mit einem Längenmaßstab von 1 : 500 ergibt dies eine Achslänge des Modells von etwa 334 m. Der Höhenmaßstab beträgt aus meßtechnischen Gründen 1 : 100, womit eine 5-fache Überhöhung verbunden ist. Die Nebenflüsse sowie 30,0 km Flußlänge oberhalb Geesthacht sind schematisch nach Fließlänge und Tidevolumen nachgebildet (Bild 1).

Das Modell ist in einer langgestreckten Leichtbauhalle untergebracht, die im Grundriß mehrfach abgeknickt ist. Die Achslänge der Halle beträgt etwa 340 m; die Hallenbreiten liegen zwischen 8 und 45 m.

Das Elbmodell mit fester Sohle (E.m.f.S.) ist in erster Linie geeignet für Wasserstandsuntersuchungen (einschließlich Sturmflutuntersuchungen), Geschwindigkeitsmessungen nach Größe und Richtung, sowie für die großflächigen Ermittlungen des Strömungsverlaufs (Strömungsaufnahmen) und insbesondere auch für die Untersuchung der Einflüsse baulicher Maßnahmen (z.B. Fahrwasservertiefungen, Leitdämme, Bühnen, Stromspaltungen) auf diese Strömungsgrößen.



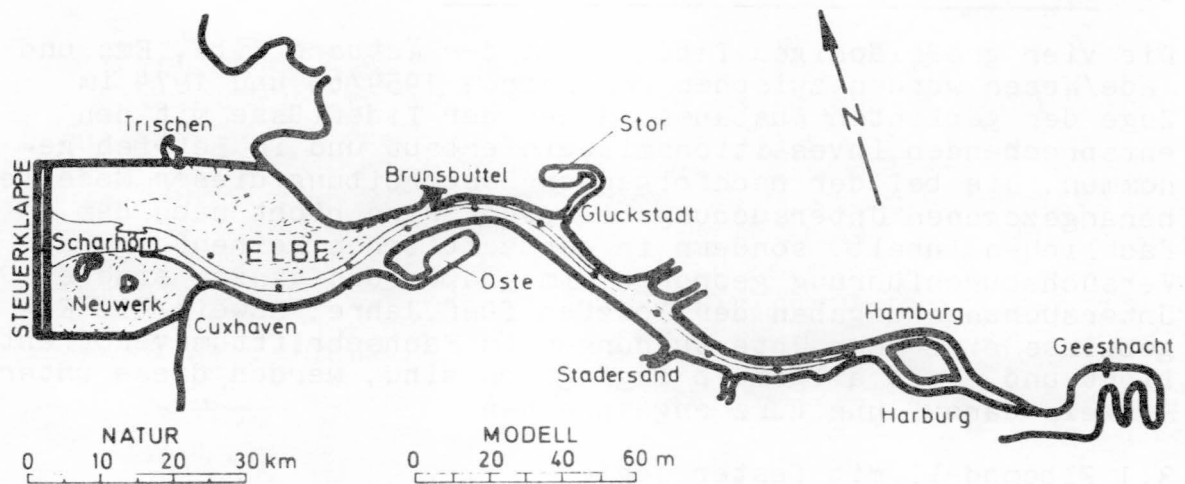


Bild 1 Übersichtsplan Elbemodell mit fester Sohle

Wie frühere Untersuchungen für den Böschrücken (im Bereich Brunsbüttel) und die nachfolgend näher erläuterten Modellversuche für die Abschnitte Rhinplatte/Brammerbank und Pagensand/Schwarztonnensand mit gutem Erfolg gezeigt und bestätigt haben, kann das E.m.f.S. zumindest in Teilabschnitten mit einer beweglichen Modellsohle ausgerüstet werden, so daß auch entsprechende Untersuchungen mit beweglicher Sohle möglich sind. Dadurch können die Versuche mit fester Sohle entweder gestützt und abgesichert oder mit weiterreichenden Ergebnissen und Informationen verbessert und verfeinert werden. Entsprechend den unterschiedlichen Örtlichkeiten und Tidesituationen (unterschiedliche Gefälleverhältnisse) mußten bei den genannten Untersuchungsaufgaben unterschiedliche Zeitdehnungen gewählt werden (Erläuterung der Zeitdehnung siehe Abschnitt 2). Diese sich aus Ähnlichkeitsmechanischen Gründen ergebende Notwendigkeit einer abschnittsweise unterschiedlichen Zeitdehnung läßt es nicht zu, das Elbemodell mit fester Sohle auf ganzer Länge mit einer beweglichen Sohle zu betreiben. Wohl aber können - wie bisher - abschnittsweise Untersuchungen mit beweglicher Sohle auf guten Ähnlichkeitsmechanischen Grundlagen und mit genügender Aussagesicherheit durchgeführt werden.

Die wichtigsten Untersuchungen im E.m.f.S. waren bisher u.a.:

- Auswirkungen der Fahrwasservertiefung auf 12,0 m und 13,5 m unter MTnw auf Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten
- Verbesserung der Fahrwasserverhältnisse in Stromspaltungsabschnitten
- Abdämmung von Nebenflüssen
- Möglichkeiten zur Sturmflutsicherung des Landes an der Untereibe (hierzu darf auf die umfangreiche Arbeit von BERNDT/HARTEN/ROHDE /1/ verwiesen werden).

In Verbindung mit dem 13,5 m-Ausbau der Elbe und insbesondere mit einzelnen sich hieraus ergebenden größeren Strombaumaßnahmen in Stromspaltungsabschnitten befand sich das Elbmodell mit fester Sohle seit 1980 mit den nachfolgend näher beschriebenen Untersuchungsaufgaben ständig in Betrieb, der auch zur Winterzeit nicht unterbrochen wurde. Für den Winterbetrieb waren in der Halle mobile Heizlüfter installiert.

### 3.1.2 Modellversuche Rhinplatte/Brammerbank (1980 - 1982)

Bei den Modellversuchen zur Stromregulierung an der Rhinplatte im Rahmen des 13,5 m-Ausbaus der Fahrrinne und zur Aufspülung einer Baggergutdeponie an der Brammerbank ging es um folgende Probleme. Die Überbreite der Elbe zwischen Hollerwettern und Bielenberg sowie der bogenförmige Verlauf der Hauptrinne schaffen ungünstigste Strömungsverhältnisse. Sichtbare Formen dafür sind die Sandbänke Brammerbank und die in zwischen aufgespülte Rhinplatte. Die Flutströmung aus dem Außenbogen beaufschlagt das Glückstädter Fahrwasser, dessen Durchflußquerschnitt dafür nicht ausreicht. Im Bereich der Nordspitze der Rhinplatte entsteht dadurch ein Querspiegelgefälle in Richtung Hauptrinne. Dies führt zu Querströmungen und zu Strömungsangriffen an der Nordspitze der Rhinplatte.

Aufgabe der Modellversuche war es, durch bauliche Maßnahmen am Kopf und im Einflußbereich der Rhinplatte die Strömungsverhältnisse zu verbessern sowie die Querströmungen zu ermäßigen. Gleichzeitig sollten die Maßnahmen zur Instandsetzung des Leitwerks an der Rhinplatte optimiert und eine Verringerung der Sedimentverfrachtung zur Fahrrinne angestrebt werden. In Verbindung mit diesen Untersuchungen sollte für eine eventuelle spätere Baggergutdeponie die bestmögliche Lage, Form und Höhe des geplanten Spülfeldes ermittelt werden. Die Verbesserung der Zufahrtsverhältnisse zur Wischhafener Süderelbe stand ebenfalls als Untersuchungsaufgabe an.

Die zunächst mit fester Sohle durchgeführten Modellversuche brachten das Ergebnis, daß durch den Einbau einer oder mehrerer Bühnen unterhalb der Rhinplatte ein Teil der Flutströmung schon vorher in die Hauptrinne abgelenkt wird und sich dadurch eine Ermäßigung der Querströmung vor der Inselspitze einstellt. Dieser Effekt kann allein schon durch die als Bühne II bezeichnete Anordnung erzielt werden (Bild 2).

Auf dem gleichen Bild wird auch die in den Versuchen optimierte Form des Spülfeldes gezeigt. Bei dieser Versuchsvariante muß eine Rinne, die zwischen Brammerbank und dem Krautsander Watt liegt und als Fahrwasser für die Fähre Glückstadt - Wischhafen dient, 800 m nach oberstrom verlegt werden.

Um die bei diesen Versuchen mit fester Sohle an den Kriterien der Wasserstände, des Strömungsverlaufs und der Fließgeschwindigkeiten nach Größe und Richtung erzielten Ergebnisse in ihrer Wirkung auf die Sedimentbewegung und die morphologischen Sohländerungen (Erosion - Ablagerung) zu überprüfen und letzten Endes abzusichern, wurde der Untersuchungsabschnitt zwischen

Strom-km 671 (etwa Bielenberg) und km 683,5 (Brokdorf) mit einer beweglichen Modellsohle ausgerüstet, für die nach entsprechenden Ähnlichkeitsuntersuchungen und auch nach früheren Erfahrungen (siehe Abschnitte 2 und 3.1.1) der Leichtkunststoff Polystyrol gewählt wurde. Der theoretische Maßstabsfaktor für die Zeitdehnung ergab sich zu  $\alpha = 1,20$ .

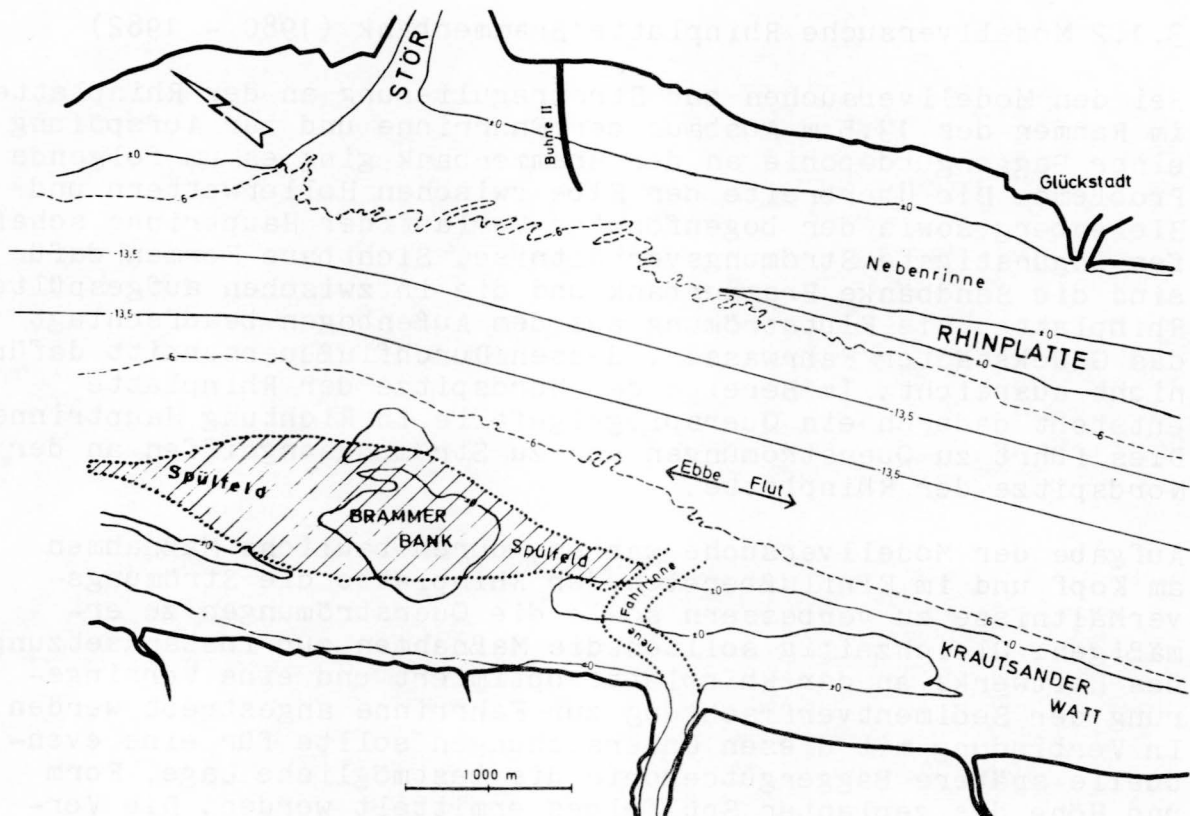


Bild 2 Lageplan der Versuchsvarianten im Bereich der Rhinplatte und der Brammerbank

Für das Spülfeld in der früher vorgestellten langgestreckten Form ergab sich, daß mit ihm eine vorteilhafte Stabilisierung des Wischhafener Fahrwassers erreicht werden kann, wenn auch die komplexen Wattveränderungen im Raum Krautsander Watt und Brammerbank und die sich hierbei seit Jahren zeigende Verlagerung des Wischhafener Fahrwassers nach unterstrom bei dieser Versuchsaussage etwas zur Vorsicht mahnen. Als Nachteil des Spülfeldes muß vermerkt werden, daß es einen zusätzlichen Druck der Strömung auf die Nordseite der Fahrrinne und auf die Nordspitze der Rhinplatte bewirkt, der auch zu einer starken Kolkbildung an der Nordspitze der Rhinplatte führt. Wegen der Änderung des Baggerkonzepts bzw. des Bodenumlagerungsverfahrens wurde das Spülfeld-Vorhaben aufgegeben. Eine spätere Realisierung wäre nach den Versuchsergebnissen nur in Verbindung mit einer Abgrabung der Brammerbank Nord sinnvoll.

Während bei den Versuchen mit fester Sohle primär eine vorteilhafte Wirkung von Buhne II auf die Strömungsverhältnisse erkannt werden konnte, zeigten die danach durchgeführten Versuche mit beweglicher Sohle sehr nachteilige Sekundäreffekte. Und zwar bildet sich vor Kopf von Buhne II gerade wegen der gewollten Umlenkung auf die Strömung und infolge der dadurch eintretenden Konzentration der Strombahnen innerhalb kurzer Zeit ein außerordentlich tiefer Kolk aus. Zusätzlich sind in der Einfahrt zum Glückstädter Fahrwasser nachteilige Verlandungen zu beobachten.

Aus diesen Gründen wurde vom Bau einer kostspieligen Buhne II vorerst Abstand genommen, zumal die Stromsohle im Glückstädter Fahrwasser und an der Nordspitze Rhinplatte in den letzten Jahren stabil geblieben ist und auch in absehbarer Zeit nicht mit einer verstärkten Strömungswirkung eines eventuellen Spülfeldes gerechnet werden muß. Inzwischen wurde die Rhinplatte durch eine sichelförmige Verschwenkung des Dammes an der Nordspitze und dem Ausbau gemäß den Versuchsergebnissen saniert und befestigt. Die bisher angestellten Naturbeobachtungen haben ergeben, daß eine optimale Überströmung der ausgebauten Nordspitze insofern vorliegt, als die noch verbleibende Querüberströmung für das Bauwerk unschädlich ist und die Geschiebeeinwanderung in die Fahrrinne deutlich ermäßigt ist. Die Südspitze und der Mittelteil der Insel Rhinplatte wurden entsprechend den Versuchsergebnissen unverändert beibehalten. Die großräumigen im Modell festgestellten Strömungsverhältnisse haben sich in der Natur bestätigt.

### 3.1.3 Auswirkung des 13,5 m-Ausbaus auf den Tideverlauf (1983 - 1984)

Im Sinne der klassischen Möglichkeiten eines Tidemodells mit fester Sohle erfolgten in den Jahren 1983 bis 1984 die Untersuchungen über den Tideverlauf in der Elbe zwischen Scharhörn und Zollenspieker nach dem 13,5 m-Ausbau. Hierbei ging es um die Ermittlung der Wasserstände, der Fortschrittszeiten, der Flut- und Ebbedauer, der Strömungsgeschwindigkeiten sowie der Flut- und Ebbestromdauer für verschiedene vorgegebene Formen der Steuer- bzw. Eingangstide bei verschiedenen Oberwasserabflüssen.

Am Beispiel einer den mittleren Verhältnissen entsprechenden Tide vom 7./8.10.1978 wird im folgenden der Einfluß des Oberwasserszuflusses auf die vorher genannten hydrologischen Tidegrößen gezeigt, wobei man, dargestellt über den Gesamtverlauf der Elbe im Längsschnitt, die bekannten qualitativen Zusammenhänge erhält, die schon Rohde /12/ aufgrund von Schrifttumangaben über Wasserstandsmessungen in der Natur einschließlich deren Deutung und aufgrund von früheren analogen Modellversuchen im Elbemodell mit fester Sohle eingehend beschreibt.

Demnach lassen die Versuchsergebnisse in Cuxhaven keinen Einfluß des Oberwassers auf MTnw, MThw und MThb erkennen. Eine Abhängigkeit ist jedoch in Hamburg und in abnehmendem Maße an den weiter stromabwärts liegenden Pegeln vorhanden und reicht etwa bis Brunsbüttel (Bild 3).

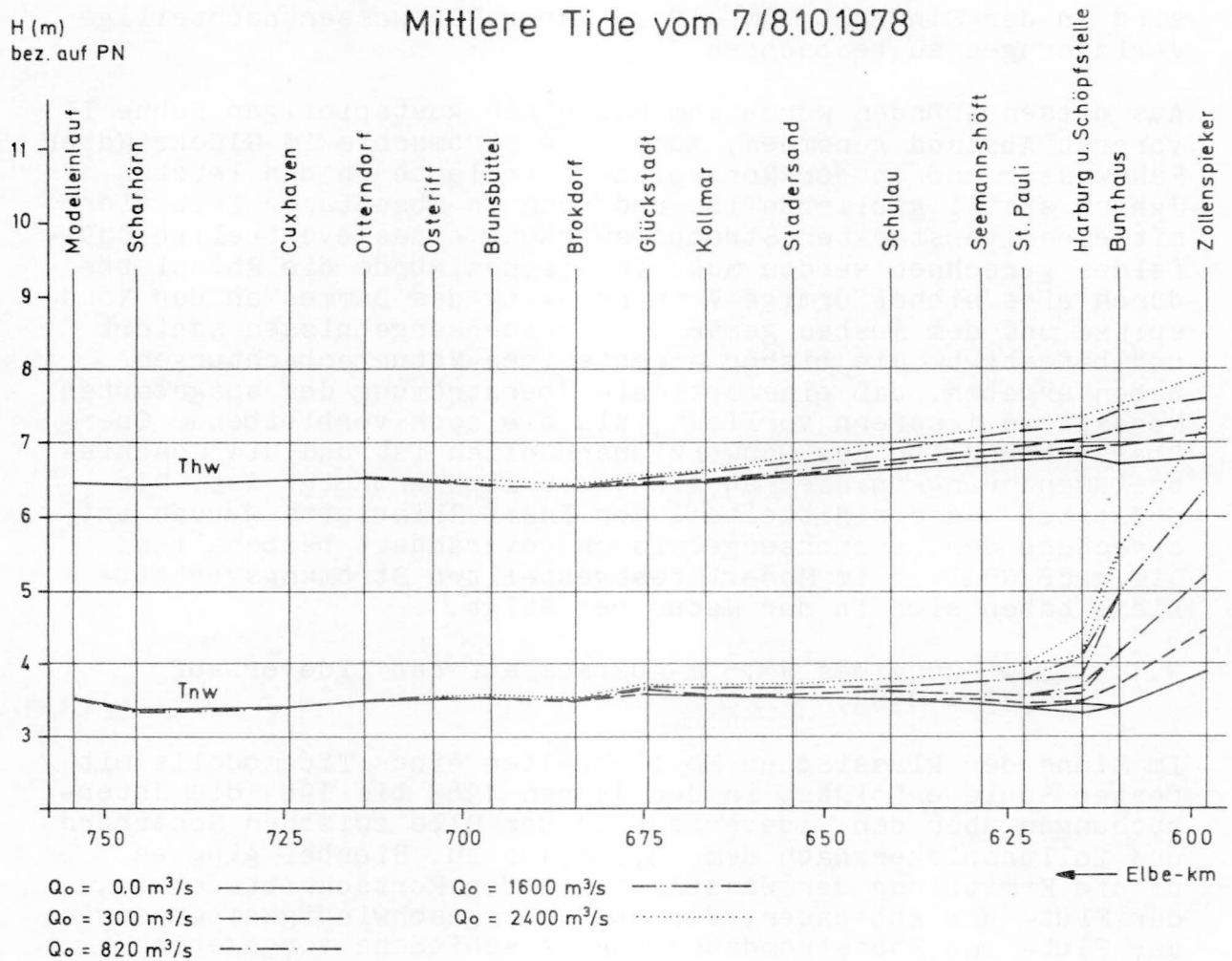


Bild 3 Einfluß des Oberwasserzuflusses  $Q_o$  auf die Scheitelwasserstände  $T_{nw}$  und  $T_{hw}$  in der Untereibe

Im Sinne der Abhängigkeit von Wasserstand, Fortschrittszeiten und Flut- bzw. Ebbedauern zeigt sich der Einfluß des Oberwassers auch bei den zuletzt genannten hydrologischen Größen (Bild 4).

Bei der Beurteilung der Fortschrittszeiten  $F_{T_{nw}}$  und  $F_{T_{hw}}$  ist deren relativ starke Streuung infolge der Meß- und Auswerttoleranzen und der Meßtaktdauer zu berücksichtigen, die nur zum Teil durch Mittelbildung über fünf Einzelergebnisse geglättet werden konnte.

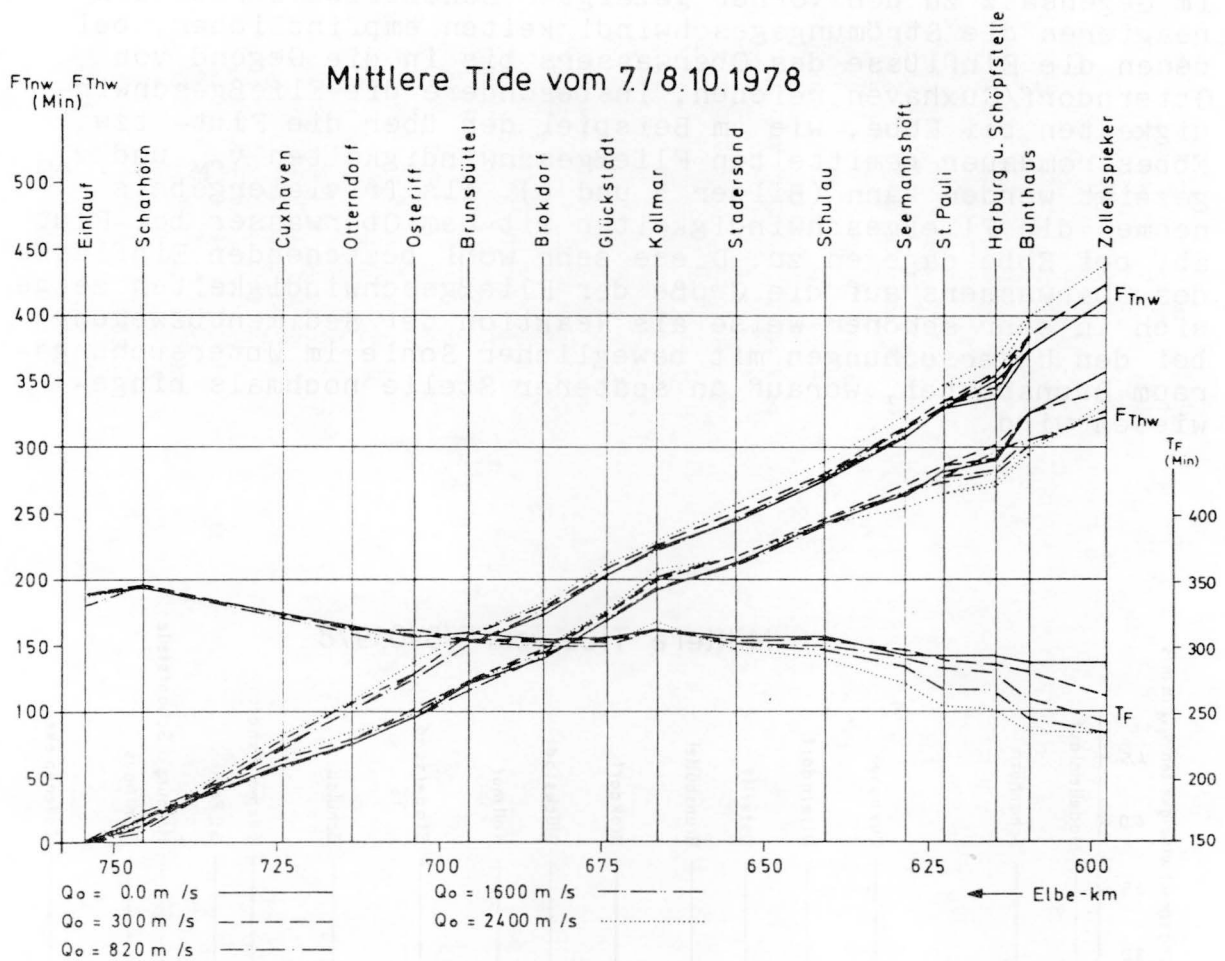


Bild 4 Einfluß des Oberwasserzuflusses  $Q_0$  auf die Fortschrittszeiten  $F_{Tnw}$  und  $F_{Thw}$  sowie auf die Flutdauer  $T_F$  in der Unterelbe

Mit wachsendem Oberwasserzufluß verstärkt sich die Zunahme der  $F_{Tnw}$  und die Abnahme der  $F_{Thw}$ . Im Tnw-Bereich dominieren die zusätzliche Verstärkung des Ebbestroms durch das Oberwasser und das starke Gefälle. Die Einflüsse der Reibung und der Reflexion werden überdeckt. Beim  $F_{Thw}$  wird die Abnahme durch höheren Wasserstand und Reflexion hervorgerufen. Überdeckt sind der Einfluß des verstärkten Ebbestroms und des vergrößerten Gefälles. Es fällt auf, daß besonders für  $Q_0 = 2400 \text{ m}^3/\text{s}$  die Abnahme des  $F_{Thw}$  weniger weit nach unterstrom reicht wie die Zunahme des entsprechenden  $F_{Tnw}$ . Außerdem wechselt bei Schulau die Tendenz. Weiter stromab kann man aus den Ergebnissen auf eine geringe Zunahme der Fortschrittszeiten mit dem Oberwasserzufluß schließen. Hier dominiert möglicherweise der verstärkte Ebbestrom und eine geringe Gefällezunahme.

Bei den Flutdauern  $T_F$  beginnt oberhalb von Kollmar die mehr oder weniger große  $T_F$  Abnahme der Flutdauer in Abhängigkeit vom Oberwasserzufluß.

Im Gegensatz zu den vorher gezeigten Scheitelwasserständen reagieren die Strömungsgeschwindigkeiten empfindlicher, bei denen die Einflüsse des Oberwassers bis in die Gegend von Otterndorf/Cuxhaven reichen, insbesondere die Fließgeschwindigkeiten bei Ebbe, wie am Beispiel der über die Flut- bzw. Ebbestromdauer gemittelten Fließgeschwindigkeiten  $v_{fM}$  und  $v_{eM}$  gezeigt werden kann (Bilder 5 und 6). Als Trivialergebnis nehmen die Fließgeschwindigkeiten mit dem Oberwasser bei Flut ab, bei Ebbe dagegen zu. Diese sehr wohl bestehenden Einflüsse des Oberwassers auf die Größe der Fließgeschwindigkeiten zeigen sich in sehr schöner Weise als Reaktion der Sedimentbewegung bei den Untersuchungen mit beweglicher Sohle im Untersuchungsraum Brunsbüttel, worauf an späterer Stelle nochmals hingewiesen wird.

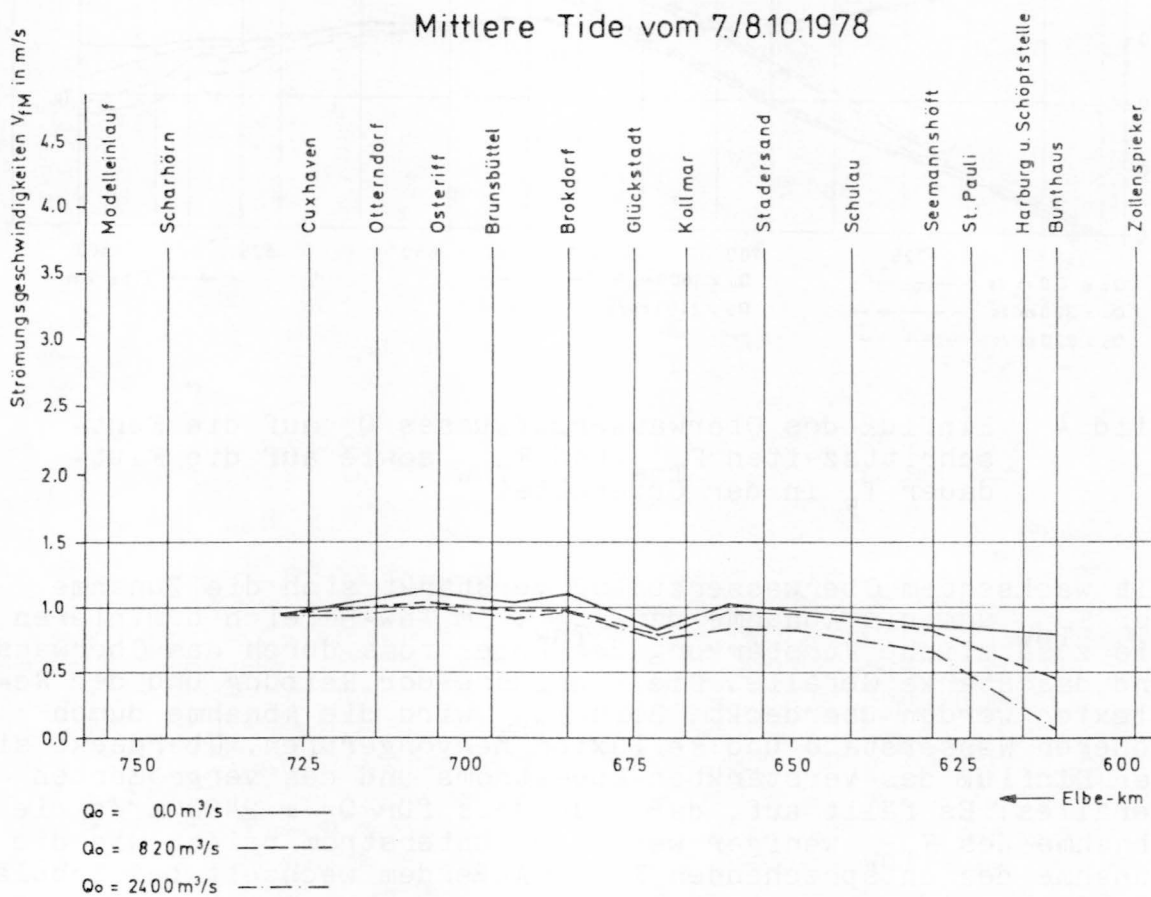


Bild 5 Einfluß des Oberwasserzuflusses  $Q_0$  auf die Flutstromgeschwindigkeiten  $v_{fM}$  in der Unterelbe

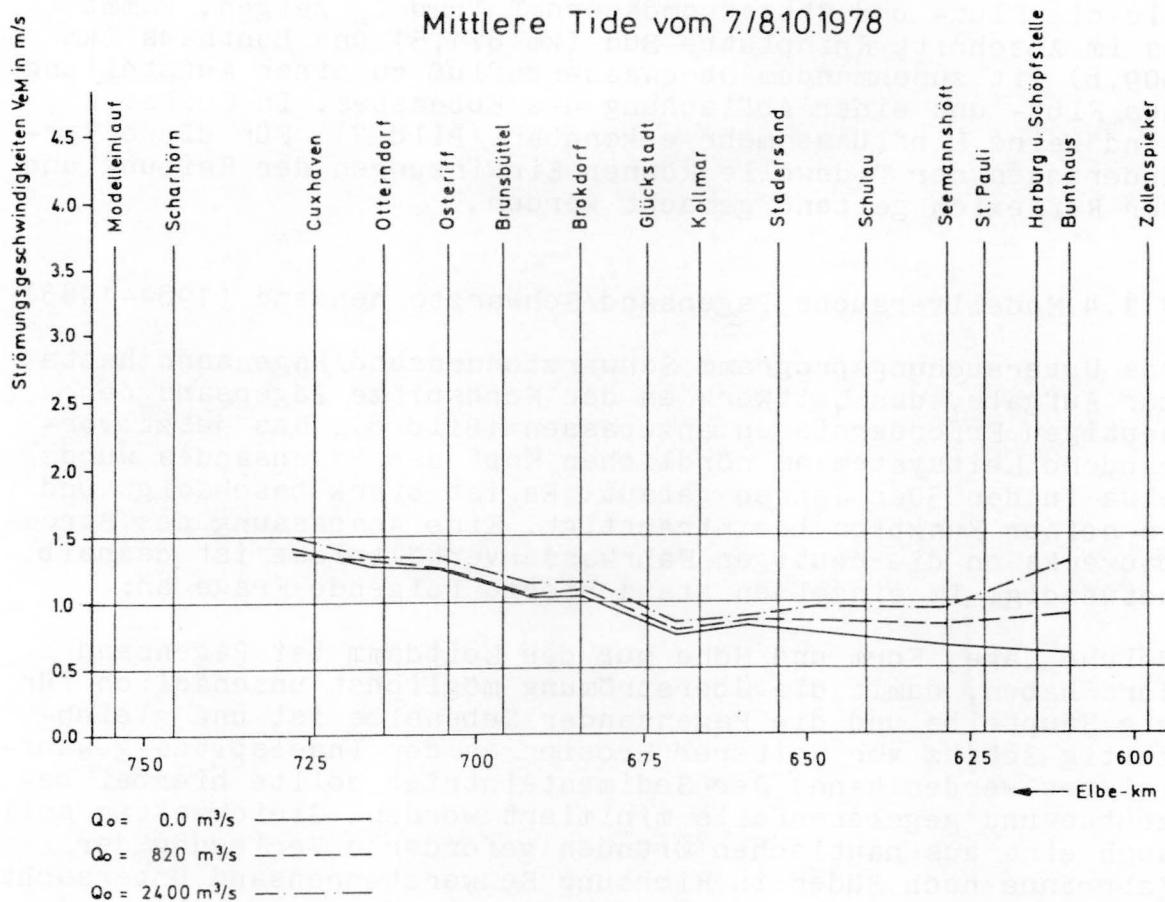


Bild 6 Einfluß des Oberwasserzuflusses  $Q_o$  auf die Ebbestromgeschwindigkeiten  $v_{eM}$  in der Unterelbe

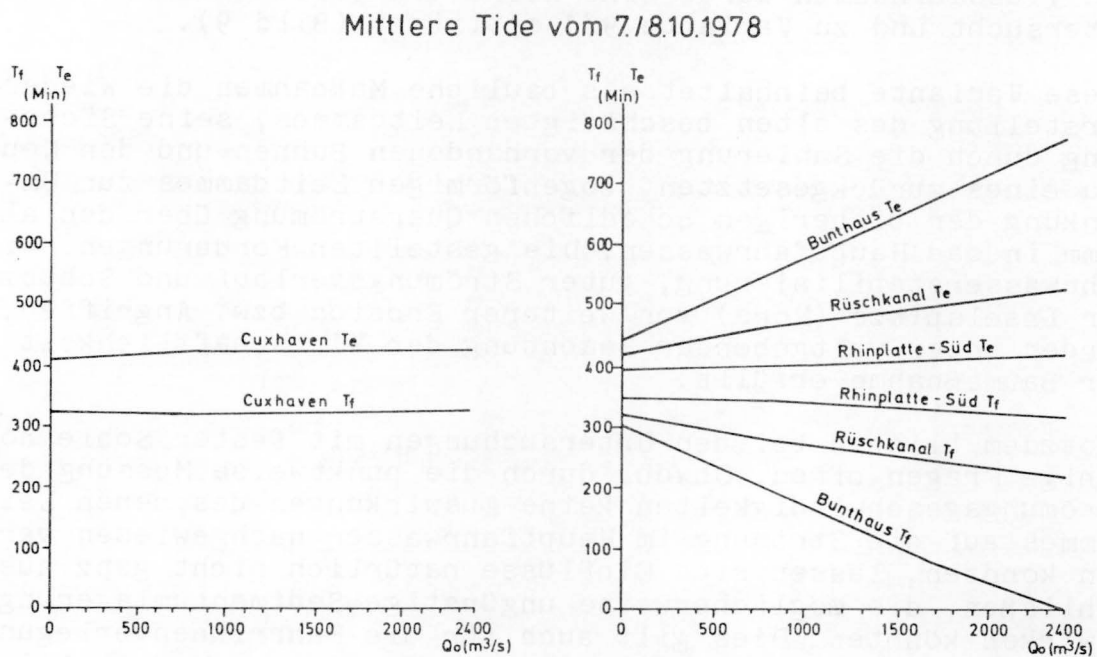


Bild 7 Einfluß des Oberwasserzuflusses  $Q_o$  auf die Flutstrom- u. Ebbestromdauer  $T_f$  u.  $T_e$  in der Unterelbe



Wie die Flut- und Ebbestromdauern  $T_f$  und  $T_e$  zeigen, kommt es im Abschnitt Rhinplatte-Süd (km 671,5) und Bunthaus (km 609,8) mit zunehmendem Oberwasserzufluß zu einer Aufsteilung des Flut- und einer Abflachung des Ebbeastes. In Cuxhaven sind keine Einflüsse mehr erkennbar (Bild 7). Für diese Veränderungen der Tidewelle können Einwirkungen der Reibung und der Reflexion geltend gemacht werden.

#### 3.1.4 Modellversuche Pagensand/Schwarztonnensand (1984-1986)

Das Untersuchungsprogramm Schwarztonnensand/Pagensand hatte zur Aufgabe, das Leitwerk an der Nordspitze Pagensand den heutigen Erfordernissen anzupassen (Bild 8). Das jetzt vorhandene Leitsystem am nördlichen Kopf des Pagensandes wurde etwa in den 30er Jahren gebaut. Es ist stark beschädigt und in seiner Funktion beeinträchtigt. Eine Anpassung des Strombauwerks an die heutigen Fahrwasserverhältnisse ist deshalb notwendig. Im einzelnen stand hierzu folgende Frage an:

Welche Lage, Form und Höhe muß der Leitdamm bei Pagensand Nord haben, damit die Überströmung möglichst unschädlich für die Hauptelbe und die Pagensander Nebelbe ist und gleichzeitig Schutz vor weiterer Erosion an der Inselfspitze gewährleistet werden kann? Der Sedimenteintrieb sollte hierbei beachtet und gegebenenfalls minimiert werden. Gleichzeitig sollte auch eine aus nautischen Gründen geforderte Verlegung der Fahrrinne nach Süden in Richtung Schwarztonnensand untersucht werden.

Mit Hilfe von Wasserstands- und Geschwindigkeitsmessungen, Strömungsaufnahmen, Beobachtungen des Strömungsgeschehens und Videoaufnahmen wurde eine Reihe von Leitdammvarianten untersucht und zu Variante 9/1 optimiert (Bild 9).

Diese Variante beinhaltet als bauliche Maßnahmen die Wiederherstellung des alten beschädigten Leitdammes, seine Sicherung durch die Sanierung der vorhandenen Bühnen und den Neubau eines zurückgesetzten, bogenförmigen Leitdammes zur Umlenkung der bisherigen schädlichen Querströmung über den alten Damm in das Hauptfahrwasser. Die gestellten Forderungen, wie Fahrwasserstabilisierung, guter Strömungsverlauf und Schutz der Inselfspitze (Nord) vor weiterer Erosion bzw. Angriffen, werden unter weitgehender Beachtung der Wirtschaftlichkeit der Baumaßnahme erfüllt.

Trotzdem blieben bei den Untersuchungen mit fester Sohle noch einige Fragen offen. Obwohl durch die punktweise Messung der Strömungsgeschwindigkeiten keine Auswirkungen des neuen Leitdammes auf die Strömung im Hauptfahrwasser nachgewiesen werden konnten, lassen sich Einflüsse natürlich nicht ganz ausschließen, die möglicherweise ungünstige Sedimentumlagerungen bewirken könnten. Dies gilt auch für die Fahrrinnenverlegung nach Süden zum Schwarztonnensand, die im festen Modell keine meßbaren Veränderungen zeigte.

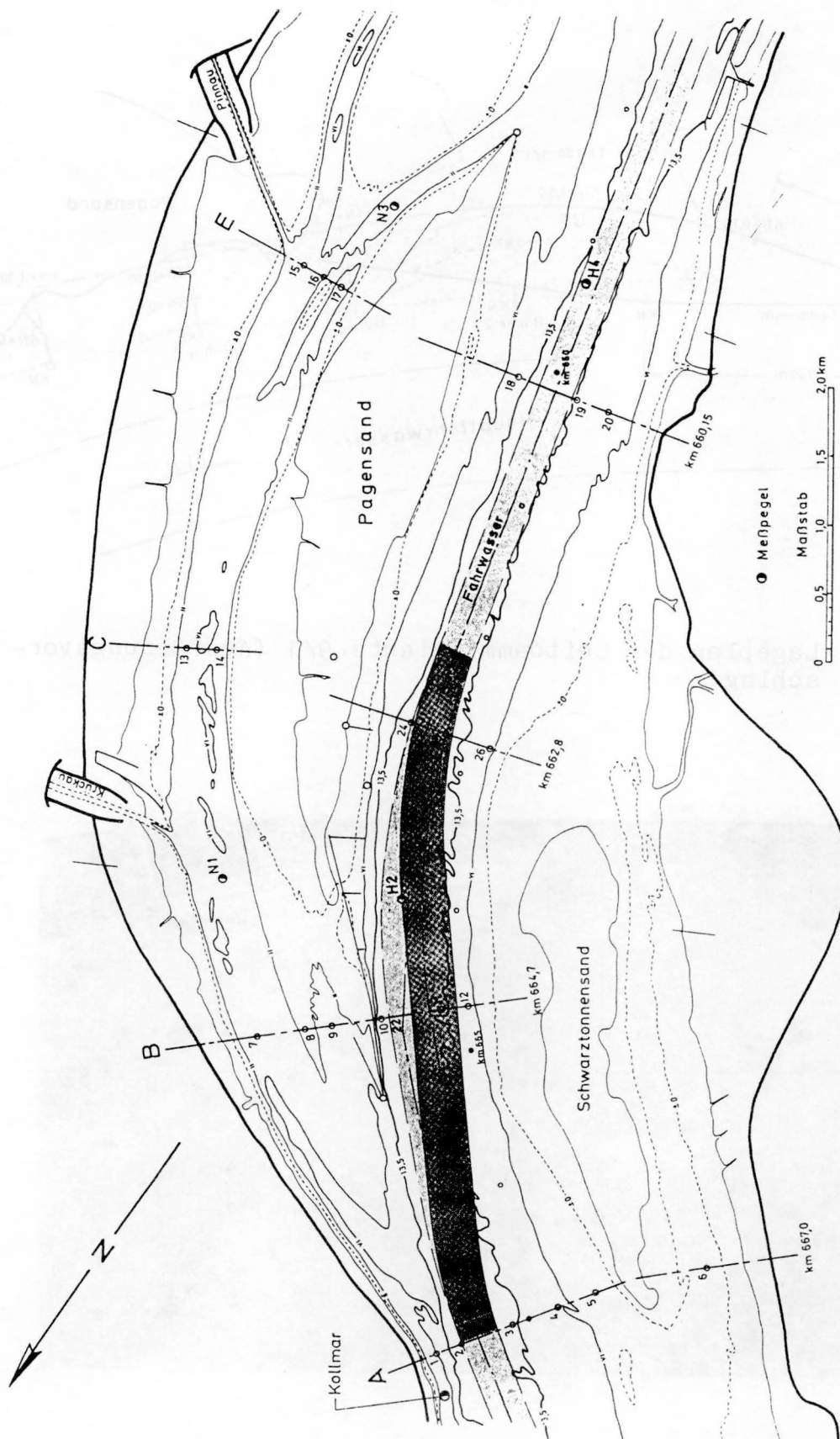


Bild 8 Lageplan Pagensand/Schwarztonnensand mit den Meßstellen im Modell

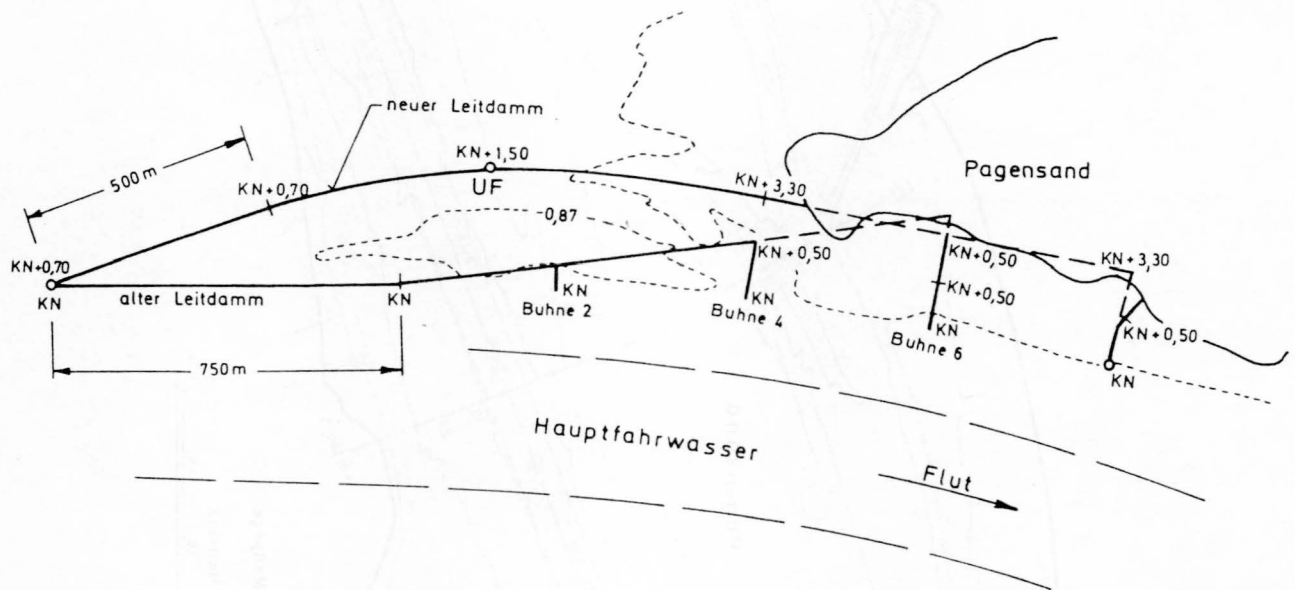


Bild 9 Lageplan der Leitdammvariante 9/1 (Ausführungsvorschlag)



Bild 10 Bewegliche Sohle im Modell. Blick nach unterstrom, rechts Pagensand

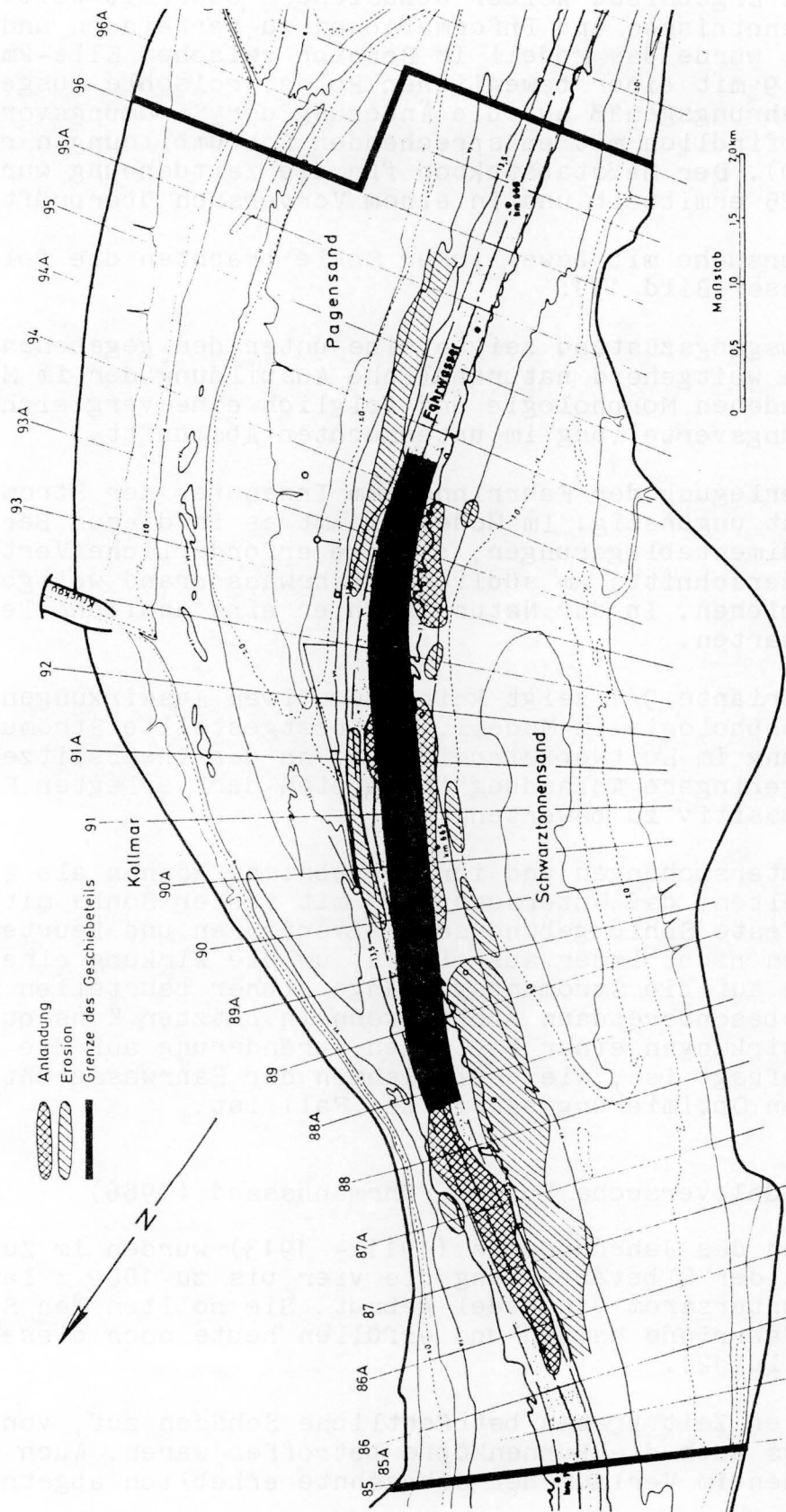


Bild 11 Lageplan Pagensand/Schwarztonnensand; Anlandung und Erosion bei Variante 9/1

Um diese Ergebnisse weiter abzusichern oder mit weiterreichenden Erkenntnissen und Informationen zu verfeinern und zu verbessern, wurde das Modell im Bereich zwischen Elbe-km 659,3 und 669,9 mit einer beweglichen Polystyrolsohle ausgerüstet, die erfahrungsgemäß auf die Änderung der Strömungsvorgänge sehr empfindlich mit entsprechenden Sohlumbildungen reagiert (Bild 10). Der Maßstabsfaktor für die Zeitdehnung wurde zu  $\alpha = 1,25$  ermittelt und in einem Vorversuch überprüft.

Diese Versuche mit beweglicher Sohle brachten die folgenden Ergebnisse (Bild 11):

- Der Ausgangszustand zeigte eine unter den gegebenen Verhältnissen weitgehend naturähnliche Ausbildung der im Modell vorhandenen Morphologie und folglich eine vergleichbare Strömungsverteilung im untersuchten Abschnitt.
- Die Verlegung der Fahrrinne zum Innenufer der Stromkurve hin ist ungünstig. Im Modell kommt es in diesem Bereich zu Sedimentablagerungen, die die erforderliche Vertiefung des Querschnitts am südlichen Fahrwasserrand weitgehend ausgleichen. In der Natur ist hier eine ähnliche Tendenz zu erwarten.
- Die Variante 9/1 zeigt keine negativen Auswirkungen auf die Morphologie im Modell. Die festgestellte Strömungsberuhigung im Leitwerksbereich und an der Inself Spitze, sowie eine geringere Anlandung im Bereich der verlegten Fahrrinne sind positiv zu bewerten.

Diese Untersuchungen und ihre Ergebnisse können als Beispiel dafür gelten, daß Untersuchungen mit fester Sohle mit ihren an die feste Sohle gebundenen Meßverfahren und Beurteilungskriterien nicht immer ausreichen, um die Wirkung einer Baumaßnahme auf die Strömungsvorgänge sicher beurteilen zu können, insbesondere dann nicht, wenn in letzter Konsequenz nach den Auswirkungen einer baulichen Veränderung auf die bewegliche Sohle gefragt ist, wie es im Rahmen der Fahrwasserunterhaltung und deren Optimierung häufig der Fall ist.

### 3.1.5 Modellversuche Bühnen Fährmannssand (1986)

Zu Beginn des Jahrhunderts (1911 - 1913) wurden im Zusammenhang mit der Elbevertiefung die vier bis zu 1000 m langen Bühnen unterstrom von Wedel gebaut. Sie sollten den Strom in der Fahrrinne halten und erfüllen heute noch dieselbe Funktion (Bild 12).

In letzter Zeit traten beträchtliche Schäden auf, von denen besonders auch die Bühnenköpfe betroffen waren. Auch wurden die Bühnen im Verlauf der Jahrzehnte erheblich abgetragen.

In den vergangenen Jahren war im Bereich der Bühnenfelder ein Massensterben von Wasservögeln infolge Botulismus zu beobachten.

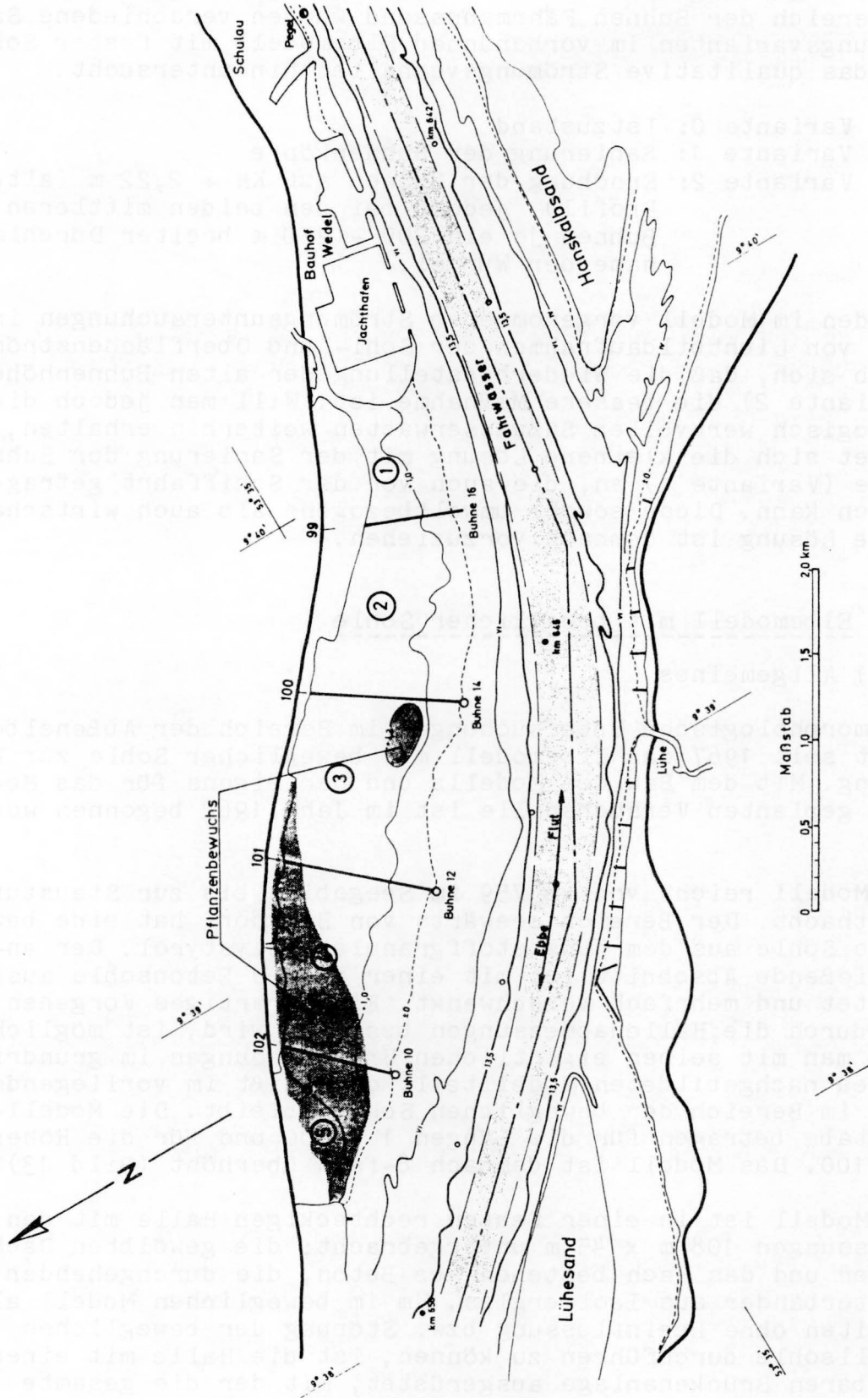


Bild 12 Lageplan Buhnen Fährmannssand

Vor dem Hintergrund dieser ökologisch ungünstigen Situation im Bereich der Bühnen Fährmannsand wurden verschiedene Sanierungsvarianten im vorhandenen Elbmodell mit fester Sohle auf das qualitative Strömungsverhalten hin untersucht.

Variante 0: Istzustand

Variante 1: Sanierung der Bühnenköpfe

Variante 2: Erhöhung der Bühnen auf KN + 2,22 m (altes Profil), jedoch bei den beiden mittleren Bühnen je ein 200 - 250 m breiter Durchlaß nahe der Wurzel.

Bei den im Modell vorgenommenen Strömungsuntersuchungen in Form von Lichtbildaufnahmen der Sohl- und Oberflächenströmung ergab sich, daß die Wiederherstellung der alten Bühnenhöhe (Variante 2) die bessere Maßnahme ist. Will man jedoch die ökologisch wertvollen Süßwasserwatten weiterhin erhalten, bietet sich die kleinere Lösung mit der Sanierung der Bühnenköpfe (Variante 1) an, die auch von der Schifffahrt getragen werden kann. Diese sowohl umweltbezogene als auch wirtschaftliche Lösung ist demnach vorzuziehen.

### 3.2 Elbmodell mit beweglicher Sohle

#### 3.2.1 Allgemeines

Für morphologische Untersuchungen im Bereich der Außenelbe steht seit 1967 das Elbmodell mit beweglicher Sohle zur Verfügung. Mit dem Bau des Modells und der eigens für das Modell geplanten Versuchshalle ist im Jahr 1962 begonnen worden.

Das Modell reicht von km 759 im Seegebiet bis zur Staustufe Geesthacht. Der Bereich seewärts von Brokdorf hat eine bewegliche Sohle aus dem Kunststoffgranulat Polystyrol. Der anschließende Abschnitt ist mit einer festen Betonsohle ausgestattet und mehrfach verschwenkt. Ein derartiges Vorgehen, das durch die Hallenabmessungen bestimmt wird, ist möglich, wenn man mit seinen eigentlichen Untersuchungen im grundrißgetreu nachgebildeten Modellteil, das heißt im vorliegenden Fall im Bereich der beweglichen Sohle, bleibt. Die Modellmaßstäbe betragen für die Längen 1 : 800 und für die Höhen 1 : 100. Das Modell ist demnach 8-fach überhöht (Bild 13).

Das Modell ist in einer festen rechteckigen Halle mit den Abmessungen 108 m x 45 m untergebracht; die gewölbten Dachbinder und das Dach bestehen aus Beton, die durchgehenden Fensterbänder aus Isolierglas. Um im beweglichen Modell alle Arbeiten ohne Beeinflussung bzw. Störung der beweglichen Modellsohle durchführen zu können, ist die Halle mit einer fahrbaren Brückenanlage ausgerüstet, mit der die gesamte Modellfläche bestrichen werden kann. Die komplizierten baulichen Anlagen des Modells, wie Steueranlage, Verteilernetz für die flächenhafte Be- und Entwässerung des Modells von

unten sowie die elektronischen Steuer-, Meß- und Registriergeräte werden in der Arbeit von GIESE/TEICHERT/VOLLMERS /5/ beschrieben.

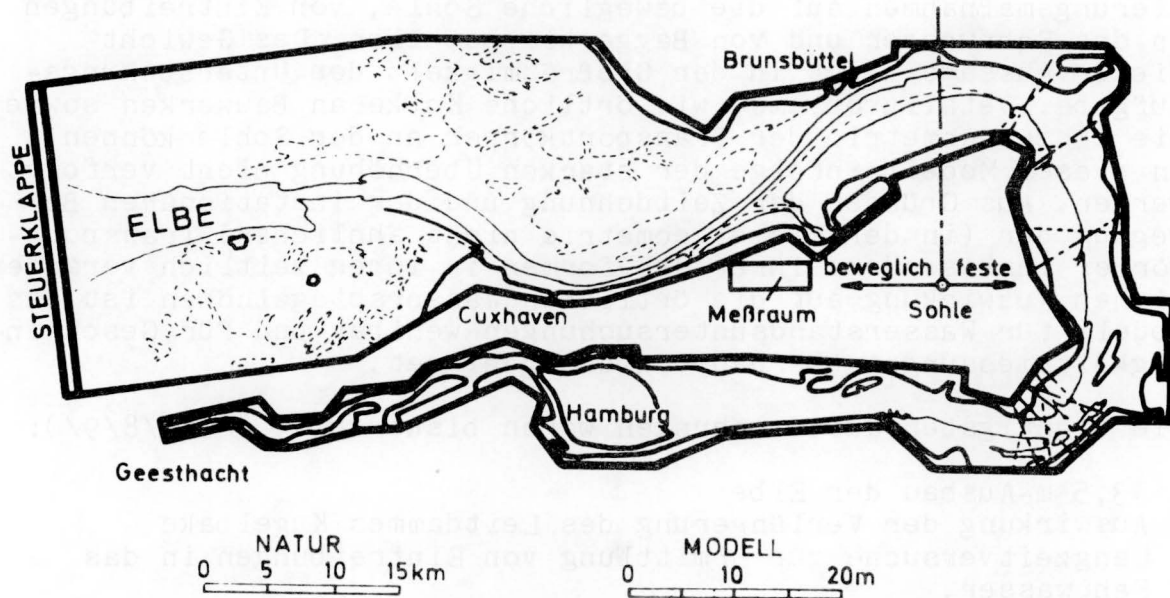


Bild 13 Übersichtsplan Elbemodell mit beweglicher Sohle

Die Ähnlichkeitsmechanischen Grundlagen der vorher genannten Modellmaßstäbe in Verbindung mit der Wahl des Modellfeststoffes wurden in den eingehenden theoretischen Untersuchungen von GEHRIG /4/ geschaffen, die in den danach folgenden Arbeiten von GIESE u.a. /5/6/7/8/9/ insbesondere auch im Hinblick auf die Versuchstechnik beim Tidebetrieb (Zeitdehnung) weiter vertieft und vervollkommen worden sind. Mit der Planung, dem Bau und dem Betrieb eines Tidemodells mit beweglicher Sohle anfangs der 60er Jahre hat die BAW - AK damals Neuland betreten; in Deutschland war bis zu diesem Zeitpunkt kein vergleichbares Tidemodell in dieser Größenordnung mit einem Leichtkunststoffgranulat betrieben worden. Der Vorteil von Untersuchungen mit beweglicher Sohle lag aber auf der Hand. Durch sie kann der Einfluß baulicher Maßnahmen auf die morphologischen Vorgänge an der Stromsohle direkt erkannt werden und muß nicht über den Umweg von Gefälle- und Geschwindigkeitsmessungen mit den diesem Verfahren innewohnenden Unsicherheiten aufgespürt werden. Die später durchgeführten Versuche Rhinplatte/Brammerbank und Pagensand/Schwarztonensand (siehe Abschnitte 3.1.2 und 3.1.4) sollten diesen Vorzug, das heißt die größere Aussagesicherheit einer Primärmessung an der Sohle nachhaltig bestätigen. Mit der Kenntnis des morphologischen Modellmaßstabs, der in der vergleichenden Betrachtung historischer Zeitreihen in Modell und Natur empirisch ermittelt worden ist und nach dem 57 Modelltiden einem Naturjahr entsprechen, lassen sich bei den Modellversuchen mit beweglicher Sohle auch Aufschlüsse über die zeitlichen Veränderungen der Morphologie gewinnen /11/.



Entsprechend seiner Zweckbestimmung ist das Elbemodell mit beweglicher Sohle in erster Linie geeignet für die Untersuchung von großräumigen Sedimentbewegungen an der Sohle, von Sohlumbildungen und Verlagerungen unter der Wirkung der Strömung, für die Untersuchung der Einflüsse von Bauvorhaben und Regulierungsmaßnahmen auf die bewegliche Sohle, von Eintreibungen in das Fahrwasser und von Baggerklappstellen. Das Gewicht dieser Aussage liegt in der Großräumigkeit der Untersuchungsaufgabe. Detailprobleme, wie örtliche Kolke an Bauwerken sowie die Einzelgeometrie der Transportkörper an der Sohle können in diesem Modell infolge der starken Überhöhung nicht verfolgt werden. Aus Gründen der Zeitdehnung und der instationären Bewegung der (in der Einzelgeometrie nicht ähnlichen) Transportkörper insbesondere ihrer Großformen in ihrer zeitlich veränderlichen Auswirkung auf die örtlichen Wasserspiegelhöhen ist das Modell für Wasserstandsuntersuchungen weniger und für Geschwindigkeitsmessungen überhaupt nicht geeignet.

Die wichtigsten Untersuchungen waren bisher u.a. (/6/7/8/9/):

- 13,5 m-Ausbau der Elbe
- Auswirkung der Verlängerung des Leitdammes Kugelbake
- Langzeitversuche zur Ermittlung von Eintreibungen in das Fahrwasser.

Nach dem Umbau des Modells auf den Sohlzustand 1981 erfolgten seit 1982 die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen des Sedimenteintriebs in die Fahrrinne im Bereich des Wasser- und Schiffsamtes Cuxhaven.

### 3.2.2 Untersuchungen des Sedimenteintriebs in die Fahrrinne (1982 - 1986)

In bestimmten Abschnitten der Elbe müssen zur Unterhaltung ausreichender Fahrwassertiefen häufig Unterhaltungsbaggerungen ausgeführt werden. In anderen Abschnitten (in Übertiefen oder seitlich des Fahrwassers) wird das gebaggerte Material wieder verklappt. Da die Möglichkeit besteht, daß bei dieser Bodenumlagerung das eingebrachte Material wieder kurz oder lang in die Fahrrinne eintreiben kann und dadurch die Wirtschaftlichkeit der Unterhaltungsbaggerungen nachhaltig beeinflußt werden kann, wurden im Elbemodell mit beweglicher Sohle mit Hilfe von radioaktiven Tracern Modellversuche über die zweckmäßigsten Bodenumlagerungsstellen durchgeführt. Zweck der Untersuchungen war die Ermittlung der Transportrichtung und -größe des Feststoffstromes in den relevanten Untersuchungsgebieten zur Minimierung der Unterhaltungsbaggermengen und zur Überprüfung der Eignung von Bodenumlagerungsstellen. Die Versuche wurden sowohl für den Bereich der Ostemündung (Osteriff und Neufelder Sand) als auch für den Großraum Steineriff, Spitzsand, Luechtergrund und Mittelgrund durchgeführt.

Der Betrieb des Modells erfolgte mit einem Tidezyklus eines synodischen Monats mit 57 Tiden. Als Tracer dienten jeweils 25 g bromiertes Polystyrol, das durch kurzzeitige Neutronenbestrahlung aktiviert wird. Dabei entsteht das Bromisotop

Br- 82, ein schwacher  $\gamma$ -Strahler mit einer Halbwertszeit von 36 Stunden. Die während der Kenterung an einer Stelle im Modell eingebrachte Menge wird durch die Strömungsaktivität verteilt und verfrachtet. Nach einer Laufzeit von 150 Tiden wird das Ausbreitungsfeld mit einer Berthold-Sonde und einem Szintillationszähler punktweise aufgenommen.

Die Auswertung zielt auf die Erfassung der Linien gleicher Strahlungsraten, die ein unmittelbares Abbild der Stoffverteilung darstellen (Bild 14). Die Lage des Massenschwerpunktes läßt sich ebenfalls aus dem Zahlenraster durch die Bildung der Momente erster Ordnung bestimmen. Die Verteilungsfigur und der Schwerpunktsvektor (Pfeil zwischen Einbringepunkt und Massenschwerpunkt) sind die Beurteilungskriterien für die Transportrichtung und mit Vorsicht auch für die Intensität der Feststoffbewegung im Untersuchungsabschnitt.

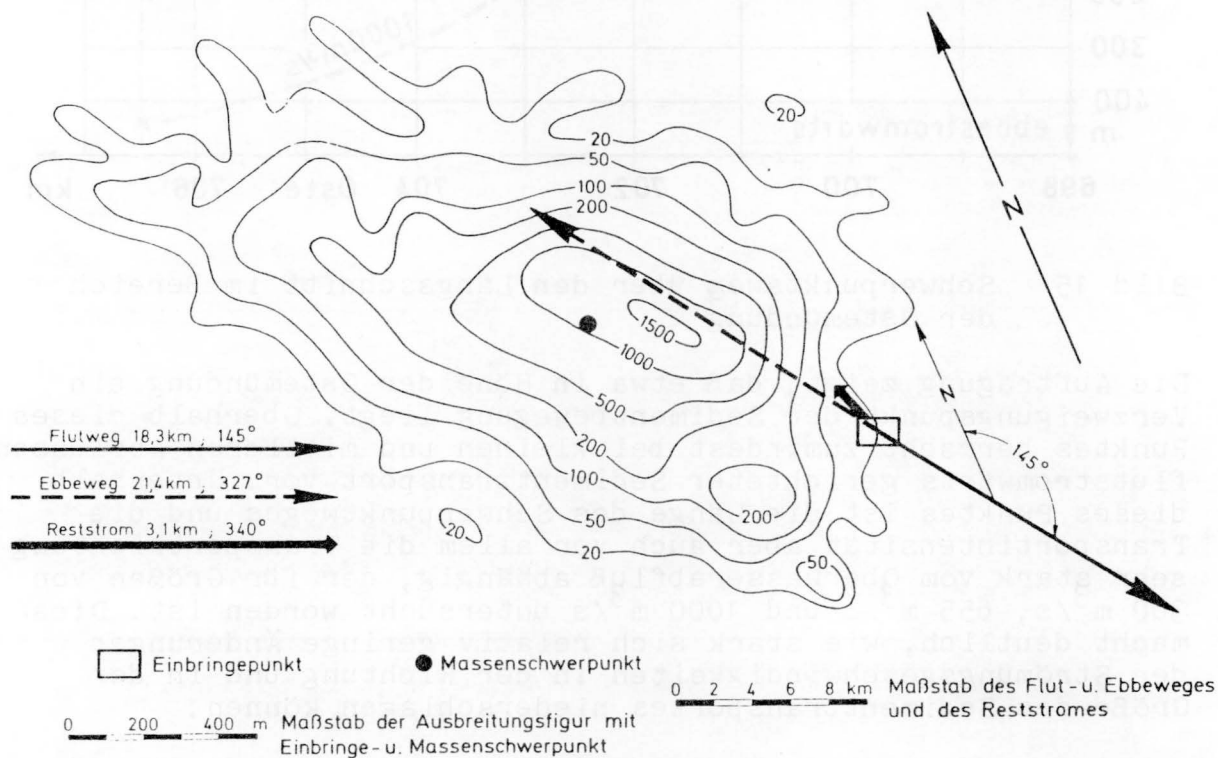


Bild 14 Linien gleicher Strahlungsraten mit Vektoren von Flutweg, Ebbeweg und Reststrom

Bei den Modellversuchen für den Raum der Ostemündung (Osteriff und Neufelder Sand) war zunächst nach dem Einfluß des Oberwasserzuflusses auf die Größe und Richtungen der Schwerpunktswege gefragt. Bei der Betrachtung dieser Versuchsergebnisse darf nochmals der früher gezeigte Zusammenhang zwischen Oberwasser und Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten in Erinnerung gebracht werden, der sich bei der Darstellung der Schwerpunktswege der radioaktiven Tracer über den Längsschnitt der Elbe zwischen km 698 und 707 als direkte Reaktion der Sedimentbewegung noch auffälliger ausdrückt (Bild 15).

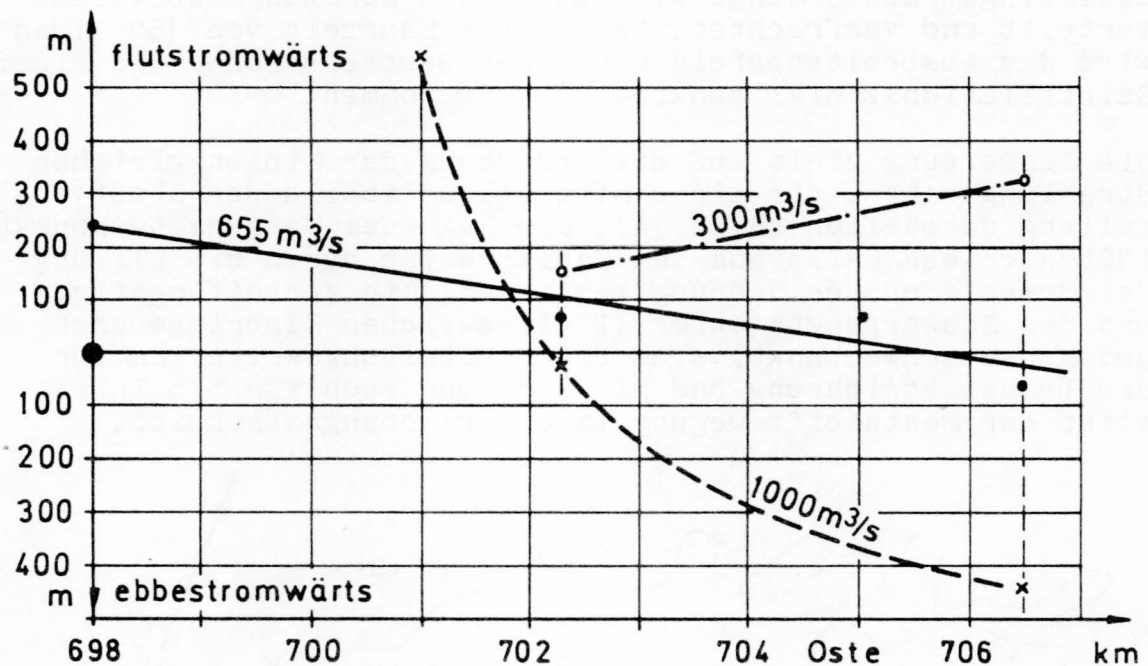


Bild 15 Schwerpunktweg über den Längsschnitt im Bereich der Ostemündung

Die Auftragung zeigt, daß etwa in Höhe der Ostemündung ein Verzweigungspunkt der Sedimentbewegung liegt. Oberhalb dieses Punktes herrscht zumindest bei kleinen und mittleren Abflüssen flutstromwärts gerichteter Sedimenttransport vor. Unterhalb dieses Punktes ist die Länge des Schwerpunktweges und die Transportintensität aber auch vor allem die Transportrichtung sehr stark vom Oberwasserabfluß abhängig, der für Größen von  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $655 \text{ m}^3/\text{s}$  und  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$  untersucht worden ist. Dies macht deutlich, wie stark sich relativ geringe Änderungen der Strömungsgeschwindigkeiten in der Richtung und in der Größe des Sedimenttransportes niederschlagen können.

Trägt man die bei mittleren Abflußverhältnissen bestehenden Transportrichtungen schematisch in einen Lageplan ein, ohne daß die Länge der Pfeile der Stärke des Feststofftransportes zugeordnet ist, erhält man einen guten Überblick über die im Untersuchungsgebiet vorherrschenden Tendenzen der Feststoffbewegung (Bild 16). Wohlbemerkt reagieren die Transportrichtungen auf eine Änderung des Oberwasserzuflusses in der vorher gezeigten Weise.

Die praktische Folgerung aus diesen Versuchsergebnissen besteht in der Beibehaltung der bisherigen Bodenumlagerungsstelle bei den Tonen 49/51, zumal auch andere mögliche Bodenumlagerungsstellen weit entfernt liegen und die Verlagerung in Seitenräume mit geringen Tiefen aus Gründen des vorhandenen Baggergeräts nicht möglich ist.

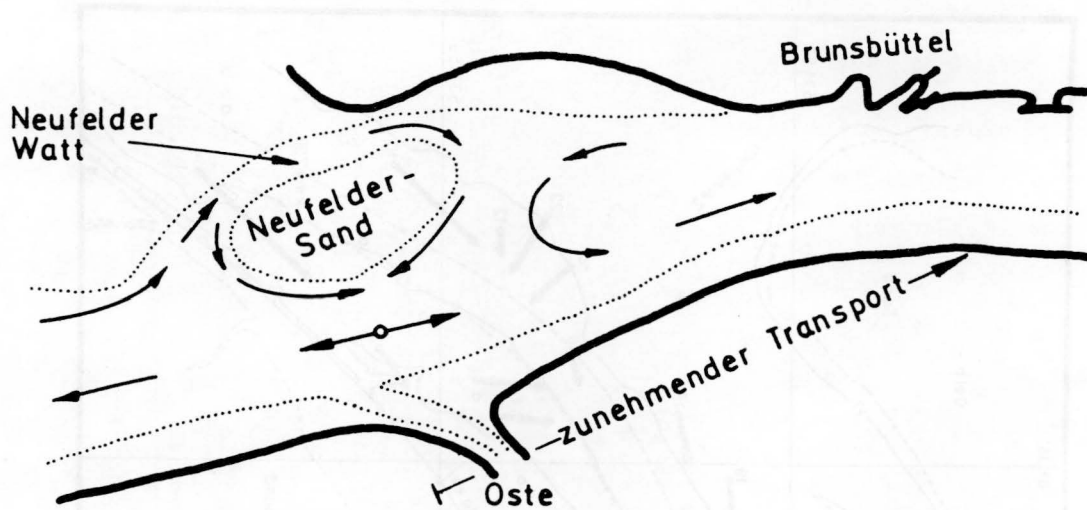


Bild 16 Übersicht der Tendenzen der Feststoffbewegung im Bereich der Ostemündung/Neufelder Sand

Wesentlich mehr Einbringepunkte wurden im Raum zwischen Cuxhaven und Scharhörn, das heißt zwischen km 729 und 745 für etwas über dem Mittelwert liegende Abflußverhältnisse ( $Q_0 = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ ) untersucht, wie auch die Eintragung der Vektoren der Schwerpunktswege in den Lageplan dieses Gebiets erkennen läßt (Bild 17).

Demnach haben die Modellversuche ergeben, daß im Neuwerker Fahrwasser - besonders auf der Südseite - ein starker, landwärts abnehmender Sandtransport von See her stattfindet. Der Mittelgrund wird hauptsächlich von der Seeseite her genährt, erhält auch einen Zustrom von der Landseite durch einen nördlich des Damms vorhandenen Netto-Transport in Ebberichtung. Der Materialabtrag vom Mittelgrund erfolgt sowohl an seiner Südflanke (landwärts) als auch an seiner Nordecke (seewärts). Hier kreuzt der natürliche Sandstrom die Fahrrinne in Richtung zum Neuen Luechtergrund. Die Norderrinne weist einen seewärts stark zunehmenden Nettotransport in Ebbestromrichtung auf.

Hinsichtlich der Eignung der bisherigen Bodenumlagerungsstellen lassen die Modellversuche in Verbindung mit umfangreichen vom Wasser- und Schiffsamt Cuxhaven vorgenommenen Strömungsuntersuchungen in der Natur /10/ folgende Aussagen zu.

Im Bereich des Steinriffs treibt der größte Teil des zwischen den Tonnen 29/31 eingebrachten Bodens mit dem Ebbestrom auf kurzem Weg bei den Tonnen 25/27 wieder in die Fahrrinne ein. Die Bodenumlagerungsstelle wurde daher im Sommer 1984 geschlossen. Seitdem trat eine deutliche Reduzierung des Baggeraufwandes ein.

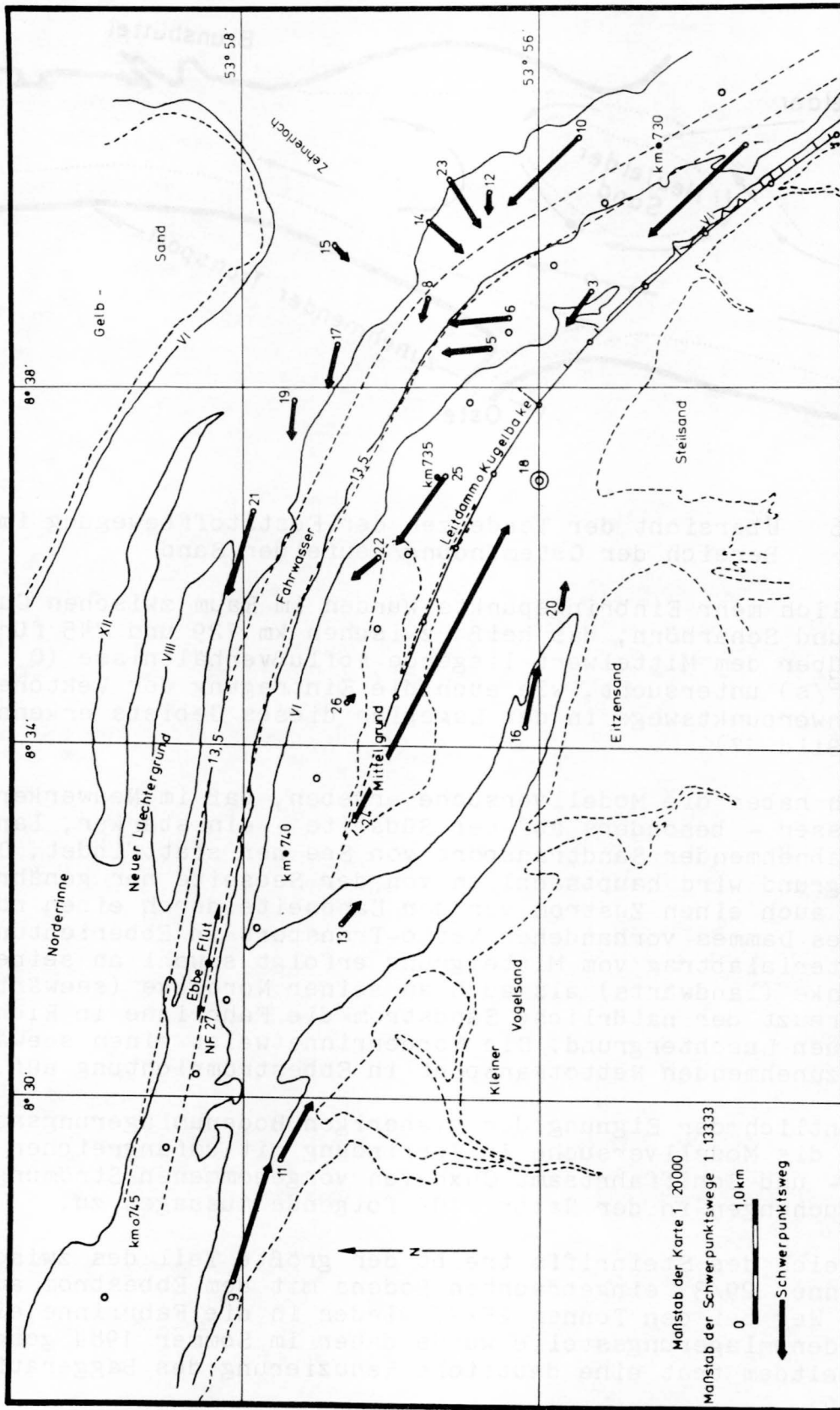


Bild 17 Lageplan der Vektoren der Schwerpunktswege

Für das Untersuchungsgebiet Spitzsand/Luechtergrund konnte im Modell festgestellt werden, daß ein Teil des zwischen den Tonnen 28/30 eingebrachten Bodens in nordwestlicher Richtung wieder in die Fahrrinne verfrachtet wird. Auch hier stehen die Versuchsergebnisse im Einklang mit Strömungsuntersuchungen in der Natur, wie auch ein am Einbringepunkt 10 von der BAW mit einem radioaktiven Tracer durchgeführter Naturversuch in der Tendenz diese Aussagen stützen konnte /10/. Als Konsequenz dieser Ergebnisse wurde die Bodenumlagerungsstelle Ende 1984 nach den Tonnen 26/28 verlegt, was eine Reduzierung des Baggeraufwandes mit sich brachte.

Der Sedimentkreislauf um den Mittelgrund und die im Modell beobachtete ausgeglichene Feststoffbilanz über den Leitdamm Kugelbake lassen den Schluß zu, daß der Leitdamm seine fahrinnenstabilisierende Funktion (noch) erfüllt. Es bleibt abzuwarten und sollte weiteren Untersuchungen vorbehalten bleiben, wie sich die zunehmende Verflachung des Neuerker Fahrwassers auf die Transportvorgänge der Feststoffe im Hauptfahrwasser auswirken wird.

### 3.3 Emsmodell

#### 3.3.1 Allgemeines

Das Modell der Tideems erfaßt den Bereich vom Wehr Herbrum bis zur seewärtigen Linie Rottum - Borkum - Memmert (Bild 18). Es wurde im Jahr 1965 erbaut und im Jahr 1966 mit dem Ziel in Betrieb genommen, Untersuchungen zur Verminderung der Unterhaltungsbaggerungen und zur Verbesserung der Fahrwasserhältnisse im Ostfriesischen Gatje und im Emdener Fahrwasser vorzunehmen. Das Emsmodell ist später durch die Untersuchungen für das Dollarthafenprojekt bekannt geworden.

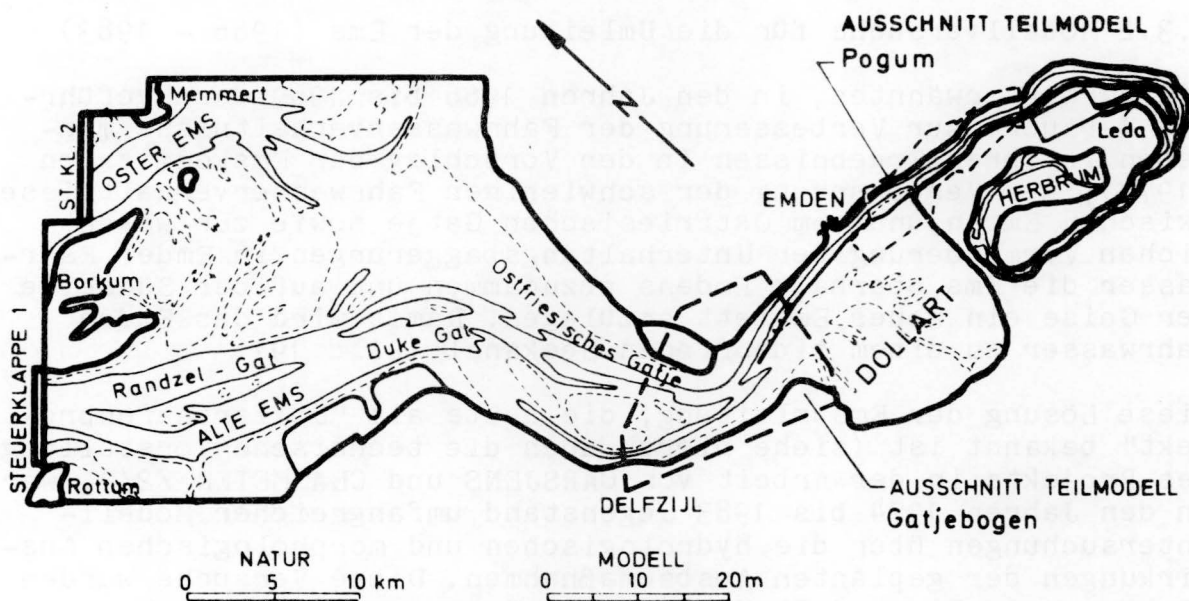


Bild 18 Übersichtsplan Emsmodell

Der obere Abschnitt der Unterems ist ab Oldersum mehrfach verschwenkt und in einzelnen kurzen Abschnitten auch gespiegelt. Die Modelltide wird durch zwei seeseitige voneinander unabhängige Steueranlagen in der Oster Ems und Wester Ems erzeugt. Die Modellhalle des Emsmodells entspricht in ihrer Leichtbauweise der des Elbmodells mit fester Sohle. Auch sie ist im Grundriß abgeknickt und in ihren Breiten, die zwischen 20 m und 50 m liegen, dem hydraulischen Modell angepaßt. Die Achslänge der Halle ergibt sich damit zu knapp 145 m.

Die Modellmaßstäbe betragen für die Längen 1 : 500 und für die Höhen 1 : 100; das Modell ist demnach 5-fach überhöht. Diese Modellmaßstäbe stimmen mit denen des Elbmodells mit fester Sohle überein, so daß auch hier die Ähnlichkeitsmechanischen Voraussetzungen für Geschiebeversuche auf begrenzten Modellabschnitten gegeben sind. Im Rahmen der später erläuterten Untersuchungen für die Emsumleitung (Dollarthafenprojekt) wurden auf dem Modellabschnitt Pogum - Rysumer Nacken derartige Geschiebeversuche mit dem Leichtkunststoff Polystyrol als Modellfeststoff vorgenommen. Der theoretische Wert für die Zeitdehnung (siehe Abschnitt 2) wurde zu  $\alpha = 1,0 \div 1,1$  ermittelt; es brauchte daher im Modell keine Zeitdehnung berücksichtigt zu werden.

Der morphologische Zeitmaßstab wurde bei den anfänglichen Geschiebeversuchen für die Ems in Anlehnung an frühere Untersuchungen ähnlicher Art /5/6/9/ zunächst zu 100 Modelltiden  $\hat{=}$  1 Jahr angenommen, da vergleichende historische Versuche, wie sie für die Elbe ausgeführt worden sind, nicht vorhanden waren. Bei den Bauphasenversuchen für das Dollarthafenprojekt wurden dann 80 Modelltiden  $\hat{=}$  1 Jahr gewählt. Diese morphologische Umrechnung konnte später durch Vergleiche mit Baggermengen aus der Natur verifiziert werden.

### 3.3.2 Modellversuche für die Umleitung der Ems (1966 - 1983)

Die vorher erwähnten, in den Jahren 1966 bis 1969 durchgeführten Versuche zur Verbesserung der Fahrwasserverhältnisse mündeten in ihren Ergebnissen in den Vorschlag der Emskommission (1974), zur Verbesserung der schwierigen Fahrwasserverhältnisse zwischen Emden und dem Ostfriesischen Gatlje sowie zur wesentlichen Verminderung der Unterhaltungsbaggerungen im Emdener Fahrwasser die Ems oberhalb Emdens abzdämmen und auf der Südseite der Geise ein neues Emsbett anzulegen. Damit wird das Emdener Fahrwasser zu einem tideoffenen Seekanal (Bild 19).

Diese Lösung der Emsumleitung, die heute als "Dollarthafenprojekt" bekannt ist (siehe hierzu auch die technische Vorstellung des Projekts in der Arbeit von CARSHJENS und CLASMEIER /2/), war in den Jahren 1974 bis 1983 Gegenstand umfangreicher Modelluntersuchungen über die hydrologischen und morphologischen Auswirkungen der geplanten Ausbaumaßnahmen. Diese Versuche wurden nicht nur im Tidemodell der Ems mit fester und beweglicher Sohle vorgenommen, sondern wichtige an die Bauwerke gebundene Detailprobleme sowie die Ermittlung der zweckmäßigsten Bau-

folgen des Projekts wurden in die zweiseitig gesteuerten größermaßstäblichen Tide-Teilmodelle Gatjebogen (Baujahr 1977) und Pogum (Baujahr 1979) verlagert /11/, die speziell für diese Aufgaben errichtet worden sind.

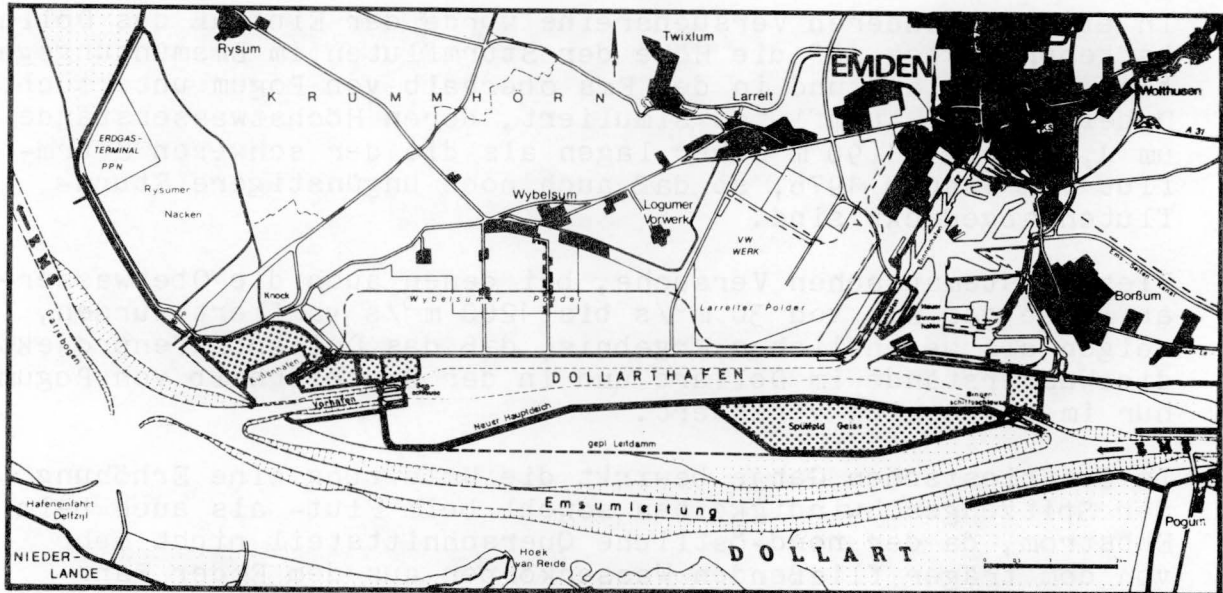


Bild 19 Lageplan Dollarthafenprojekt

Im Gatjebogenmodell (Modellmaßstab 1 : 240 / 1 : 60) erfolgte in den Jahren 1978 bis 1980 die Untersuchung der neuen Einfahrt zum seeseitigen Schleusenvorhafen und der Bauablauf, unter Einhaltung der chronologischen Reihenfolge der einzelnen Bauabschnitte mit fester und beweglicher Sohle. Entsprechend dieser Versuchsaufgabe umfaßte das Modell den Bereich der jetzigen Ems von der Landmole Knock bis unmittelbar oberhalb der Hafeneinfahrt Emden einschließlich der Emsumleitung bis Hoek van Reide.

Das Teilmodell Pogum (Modellmaßstab 1 : 200 / 1 : 50), das den Bereich von unterhalb der neuen Binnenschiffsschleuse bis nach Gandersum nachbildet, hatte die Aufgabe, detaillierte Untersuchungen für den Bereich der Pogumer Kurve, insbesondere für die Führung des Trenndammes Hoher Sand und des Leitdammes Geise, für die Zufahrt zur Binnenschiffsschleuse und zum Nachweis der morphologischen Stabilität der Umleitungsrinne auszuführen. Diese Tideversuche erfolgten in den Jahren 1980 bis 1982 ebenfalls mit fester und beweglicher Sohle.

Alle in den Jahren 1966 bis 1983 durchgeführten Modellversuche für die Ems und die Umleitung der Ems finden ihren Niederschlag in insgesamt 14 umfangreichen Berichten bzw. Gutachten der BAW (Teilberichte und Kurzgutachten sind hiervon ausgenommen), aus denen sich in zusammengefaßter Form die folgenden Ergebnisse entnehmen lassen (siehe auch /2/).



### Versuche mit fester Sohle

Die Versuche mit fester Modellsohle haben ergeben, daß durch das geplante Projekt die Wasserstände der Ems zwischen Borkum und Herbrum bei mittlerer Tide praktisch unverändert bleiben.

In einer besonderen Versuchsreihe wurde der Einfluß des Dollarthafenprojektes auf die Höhe der Sturmfluten im Emsmündungsgebiet, im Dollart und in der Ems oberhalb von Pogum untersucht. Dabei wurden Sturmfluten simuliert, deren Höchstwasserstände um 1,0 m bzw. 1,90 m höher lagen als die der schweren Sturmflut von Januar 1976, so daß auch noch ungünstigere Sturmfluten abgedeckt sind.

Diese systematischen Versuche, bei denen auch die Oberwasserabflüsse der Ems von  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  bis  $1200 \text{ m}^3/\text{s}$  variiert wurden, zeigen als wesentliches Ergebnis, daß das Dollarthafenprojekt die Wasserstände im Dollart und in der Ems oberhalb von Pogum nur im cm-Bereich verändert.

Im Ostfriesischen Gatje bewirkt die Umleitung eine Erhöhung der Spitzengeschwindigkeiten sowohl beim Flut- als auch beim Ebbstrom, da der nord-östliche Querschnittsteil nicht mehr von dem träger fließenden Wasserkörper aus dem Emder Fahrwasser durchströmt wird.

Im Gatjebogen ist eine ausgeglichenerere Geschwindigkeitsverteilung zu erwarten als im heutigen Zustand. Die hohen Geschwindigkeitsspitzen, die Teilursache für die morphologische Unruhe sind, werden gekappt.

Auch im Dollartmund nehmen die Geschwindigkeiten durch die Umleitung zu.

Die günstige Lage der Umleitungsrinne zum gesamten Strömungsfeld ist ein entscheidender Vorteil gegenüber dem heutigen Zustand, denn eine wesentliche Ursache des Sandeintrags in die heutige Fahrrinne infolge der Schrägüberströmung der Plaaten wird weitgehend vermieden.

Insgesamt paßt sich die geplante Ausbaumaßnahme sehr gut den bestehenden Tideverhältnissen an, so daß hierdurch weder in der unmittelbaren noch weiteren Umgebung Beeinflussungen der hydrologischen Verhältnisse zu befürchten sind.

Die vorgesehenen Maßnahmen erfordern weder eine Änderung des Deichbesticks der vorhandenen Hauptdeiche noch der bestehenden Vorflutverhältnisse.

### Versuche mit beweglicher Sohle

Bei den Geschiebeversuchen wurden in mehreren Versuchsreihen Lage und Querschnitt der Emsumleitungsrinne sowie deren Anbindung an die anschließenden Stromstrecken untersucht. Ferner wurden die zweckmäßigste Fahrwasserführung am Gatjebogen mit

Einbindung der neuen Hafenzufahrten nach Delfzijl und Emden, die optimale Lage und die Abmessungen der Schleusenvorhöfen und Einfahrtsbauwerke, der Spül- und Leitdammführung auf der Geise, die Auswirkungen der durch die Umleitung bedingten Veränderungen des Flutraumes sowie der zukünftige Aufwand für Unterhaltungsbaggerungen ermittelt.

Einen weiteren Schwerpunkt bildeten die Modellversuche zur Erkennung der durch die einzelnen Bauphasen bewirkten Veränderungen der morphologischen Verhältnisse. Dazu wurde der gesamte Bauablauf systematisch unter Einhaltung der zeitlichen Reihenfolge und der Dauer eines jeden Bauabschnitts im Modell simuliert. Durch diese Untersuchungen sollten die optimale Reihenfolge der Baumaßnahmen, eventuell kritische Phasen und gegebenenfalls geeignete Gegenmaßnahmen untersucht werden.

Mit den aus den Einzelversuchen hervorgegangenen optimierten Lösungen wurde als abschließender Modellversuch im Tidemodell der Ems mit beweglicher Sohle der "Langzeitversuch" gefahren, um die morphologische Stabilität der neuen Rinne, ihre Erosions- und Sedimentationsbereiche sowie die nach Einstellung des Gleichgewichtszustandes zu erwartenden Wiedereintreibungen zu prognostizieren. Ausgangszustand für diesen Langzeitversuch, der auf die Natur umgerechnet einen Zeitraum von 12 Jahren umfaßt, war die aus den Einzelversuchen resultierende Gesamtsituation nach Durchführung aller Baumaßnahmen.

Dieser Langzeitversuch hat die Kombination der in den Einzelversuchen gefundenen günstigen Lösungen für die Bauwerksanordnungen bestätigt. Wie bereits in den vorangegangenen Modellversuchen festgestellt, wird nach Eintreten des Gleichgewichtszustandes im Gatjebogen durch die in einer gestreckteren Rinne zusammengefaßten Wassermengen mit verstärkter Räumkraft die Sedimentation gegenüber dem heutigen Zustand stark abnehmen. Insgesamt hat sich die Umleitungsrinne im Modell im wesentlichen als lagestabil erwiesen.

Im Jahr 1984 unterzeichneten die Bundesrepublik Deutschland, die Niederlande und das Land Niedersachsen in Emden den "Ems-Dollart-Vertrag", der inzwischen von Deutschland ratifiziert worden ist. Die Zustimmung der Niederlande steht noch aus. Die Gesamtkosten des Projektes sind mit Preisstand 1985 zu 1,3 Mrd. DM veranschlagt. Die Bauzeit würde 10 Jahre betragen, wobei der Dollarthafen schon nach 7 Jahren nutzbar wäre.

### 3.3.3 Modellversuche für den Ausbau der Unterems zwischen Papenburg und Emden (1981/82 und 1986/87)

Das erste Ausbaukonzept sah vor, hauptsächlich im Bereich der Unterems oberhalb der Ledamündung größere Fahrwassertiefen und Fahrwasserbreiten herzustellen, um dadurch für größere Schiffsneubauten in Papenburg eine Ein-Tidenfahrt nach Emden zu ermöglichen. Hiernach sollte nach dem Ausbau der Unterems für mittlere Tideverhältnisse und Oberwasserzuflüsse in der

Ems die Ausbautiefe etwa ab Papenburg 6,50 m und zwischen Leerort und Emden zunehmend von 7,00 m bis 8,30 m betragen. Im Zuge dieser Ausbaumaßnahmen mußten auch die bisher zu engen Streckenabschnitte bei Stapelmoor und Weekeborg aufgeweitet werden.

Die Aufgabe der Modellversuche bestand darin, Wasserstandsveränderungen in der Ausbaustrecke nach Einbau der neuen Fahrrinnenbreiten-, -tiefen und -krümmungen festzustellen und gegebenenfalls Maßnahmen zu suchen und aufzuzeigen, mit denen größere Wasserstandsänderungen reduziert werden können.

Da bei diesem Versuchsziel ausschließlich nach der Höhenlage der Scheitelwasserstände gefragt war und überdies das Schwergewicht der Untersuchungen auf der vergleichenden Betrachtung verschiedener Ausbauplantagen lag, konnten die Versuche in aller Vorsicht bei der Wertung der Versuchsergebnisse im abgeknickten Teil des Tidemodells der Ems durchgeführt werden. Tatsächlich ergab sich bei der Verifizierung dieses Modellabschnitts (Modelleichung) eine sehr gute Übereinstimmung zwischen der in der Natur gelaufenen Tide vom 29.02.1980 und der im Modell simulierten Tide.

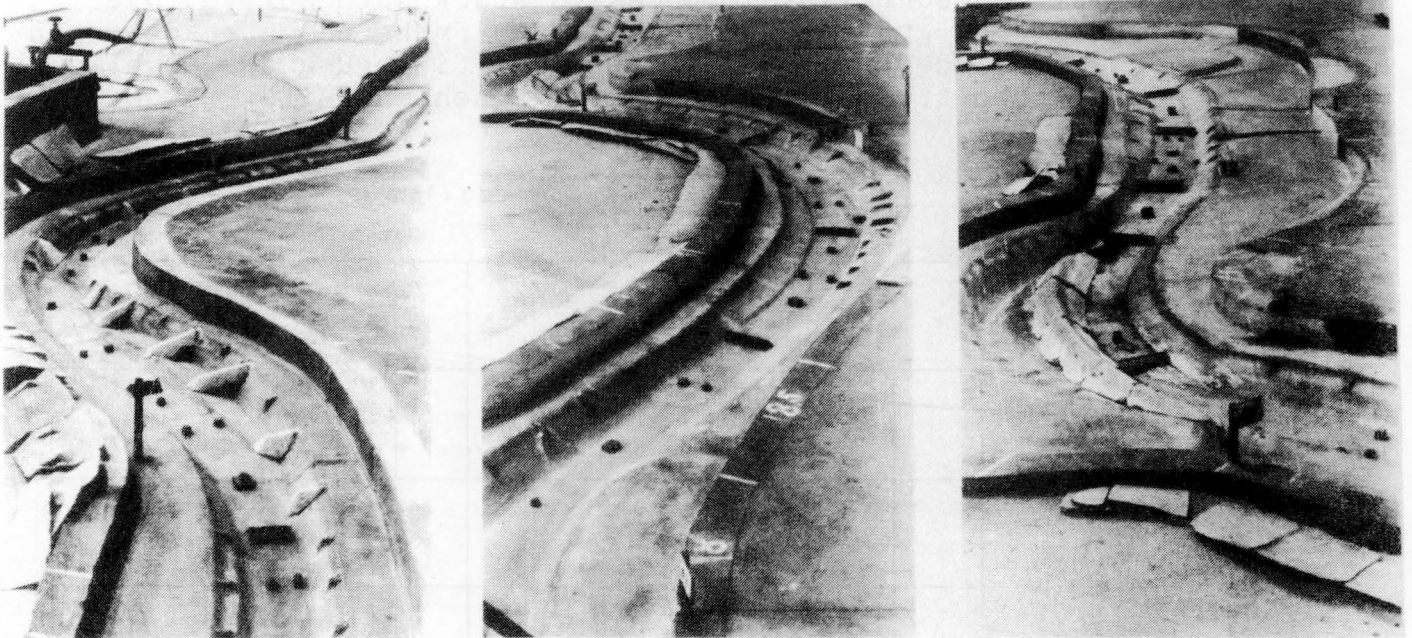
Nach mehreren Versuchsreihen, in denen unter anderem auch die Wirkung von zusätzlichen Buhnen und Buhnengruppen sowie von Buhnenverlängerungen auf die Tnw- und Thw-Werte untersucht worden ist und die auch eine Optimierung zwischen Papenburg und Leerort zur Hebung des Tnw zum Inhalt hatten, konnte ein brauchbarer Ausführungsvorschlag erarbeitet werden. Bei dieser Lösung sind verlängerte oder zusätzliche Buhnen nur bei der Abflachung Stapelmoor und dem nach unterstrom folgenden Prallhang sowie bei Kloster Muhde (6 Buhnen zwischen km 12,700 und km 13,600) eingebaut. Der bei Weekeborg erforderliche Durchstich kann bei dieser Lösung als einfacher Trenndamm ohne Stummelbuhnen ausgeführt werden (Bild 20).

Wie die Versuchsergebnisse am Beispiel mittlerer Tide- und Abflußverhältnisse in der Ems zeigen (Bild 21), reagiert das Thw nur geringfügig auf die untersuchten Ausbaumaßnahmen. Beim Tnw dagegen läßt sich dies nur für den Bereich unterhalb der Ledamündung feststellen. Weiter oberhalb tritt mit einer Spitze bei Papenburg (-0,23 m) eine nachteilige Absenkung der Tideniedrigwasserstände auf.

Bei den Modelluntersuchungen wurden auch die Auswirkungen des Emsbaues auf die Wasserstände bei Sturmflut verfolgt. Grundlage bildete die in der Natur gelaufene Sturmflut vom 3./4. Januar 1976, die zusätzlich um einen Meter angehoben wurde. Abgesehen von geringen Hebungen bei Herbrum um 7 cm und Bollingerfähr um 5 cm, zeigen die Wasserstände für das HThw nach dem Ausbau allgemein nur wenig Veränderungen.

Inzwischen wurde das Planungskonzept nicht zuletzt aus Kostengründen insofern geändert, als ihm jetzt eine Zwei-Tidenfahrt mit einer verminderten Ausbautiefe von 5,70 m bei Papenburg zugrundeliegen soll. Ein Teil der baulichen Maßnahmen des

früheren Ausbaukonzepts, wie die Abflachung der Krümmungen in Stapelmoor und Weekeborg, der Bau von Buhnen (ohne die Buhnengruppe bei Kloster Mühle) und ein Teilausbau für die Wassertiefen bei MThw (Stand 1986) sind mittlerweile abgeschlossen worden.



Blick in Ebberichtung von km 20,0 auf die Krümmung Stapelmoor

Blick in Ebberichtung von km 8,0 (im Hintergrund Krümmung Weekeborg)

Blick in Ebberichtung von km 10,0 auf die Krümmung Weekeborg

Bild 20 Lichtbildaufnahmen vom Modell mit dem eingebauten Ausführungsvorschlag

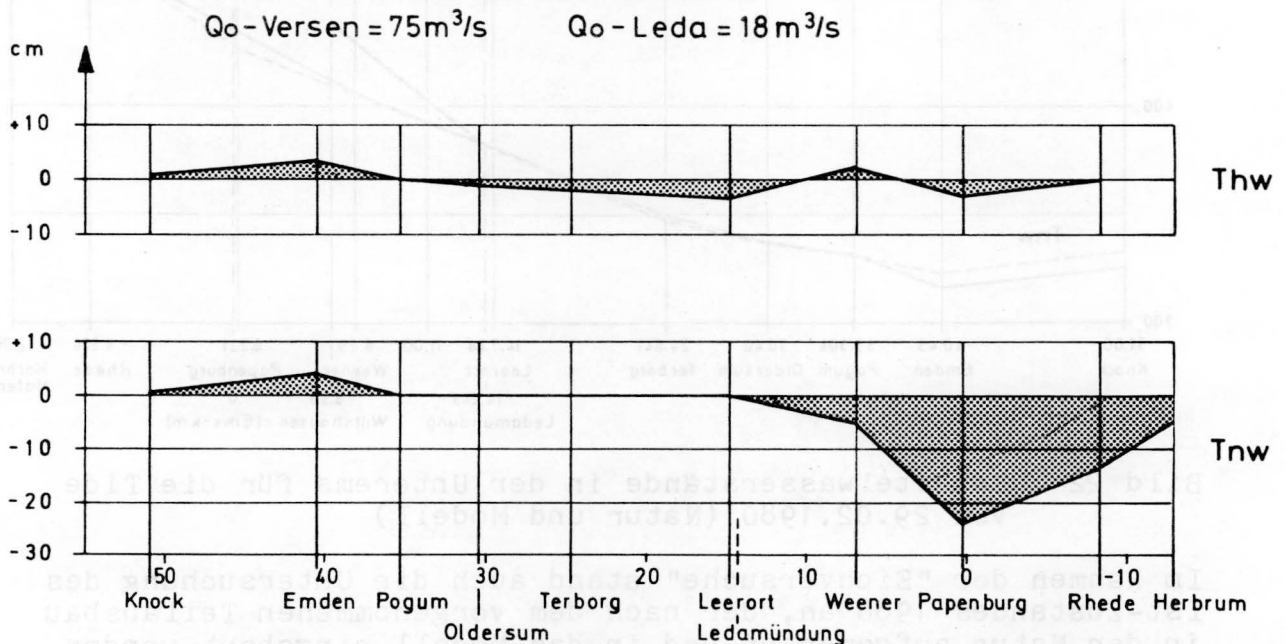


Bild 21 Wasserspiegeldifferenzen zwischen dem Ausbauvorschlag 1981/82 und dem Istzustand (Natur) für die Tide vom 29.02.1980 (mittlere Tide)

Infolge dieser Planumstellung mußten zum Ende des Jahre 1986 die Modellversuche im Tidemodell der Ems neu aufgegriffen werden. Das früher formulierte Versuchsziel ist geblieben: Ermittlung der Wasserstände und gegebenenfalls Planung und Optimierung von Buhnen oder Buhnengruppen, falls die Absenkung des Tideniedrigwasserstandes zu stark sein sollte. Die verhältnismäßig große Zeitspanne zu den früheren Untersuchungen machte es erforderlich, erneut eine Verifizierung des Modells für den Abschnitt Herbrum - Knock vorzunehmen (Bild 22).

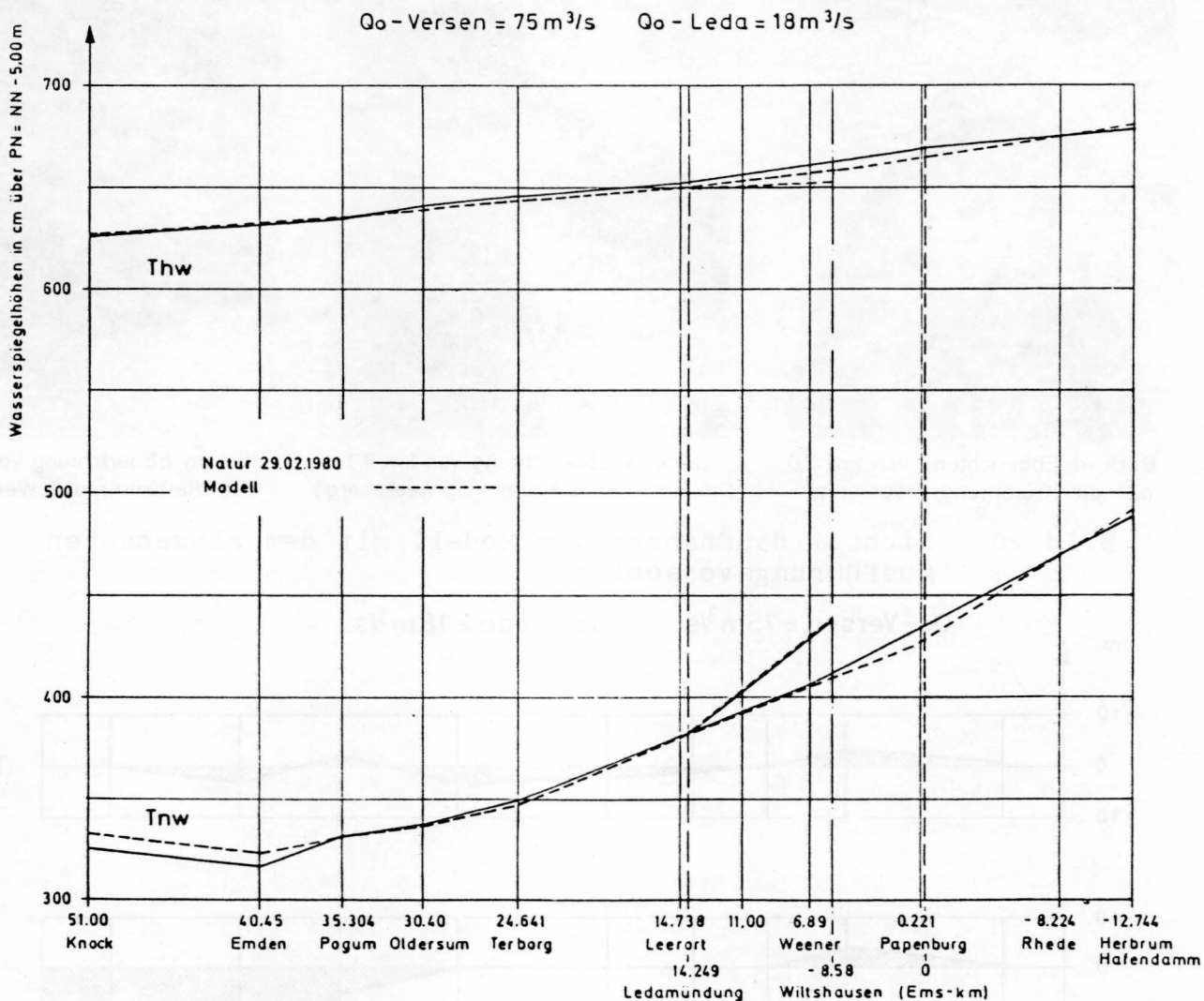


Bild 22 Scheitelwasserstände in der Unterems für die Tide vom 29.02.1980 (Natur und Modell)

Im Rahmen der "Eichversuche" stand auch die Untersuchung des Ist-Zustandes 1986 an, der nach dem vorgenommenen Teilausbau in der Natur aufgemessen und in das Modell eingebaut worden ist. Zum Redaktionsschluß dieser Arbeit waren die Versuche hierzu noch nicht abgeschlossen.

### 3.4 Jade-Weser-Modell

#### 3.4.1 Allgemeines

zur Untersuchung verschiedener Regulierungsmaßnahmen zum Ausbau des Fahrwassers von Jade und Außenweser und ihrer gegenseitigen Beeinflussung wurde in den Jahren 1971 bis 1974 ein gemeinsames Modell des Weser- und Jadeästuars und des vorgelagerten Seebereichs bei der BAW - AK aufgebaut (Bild 23).

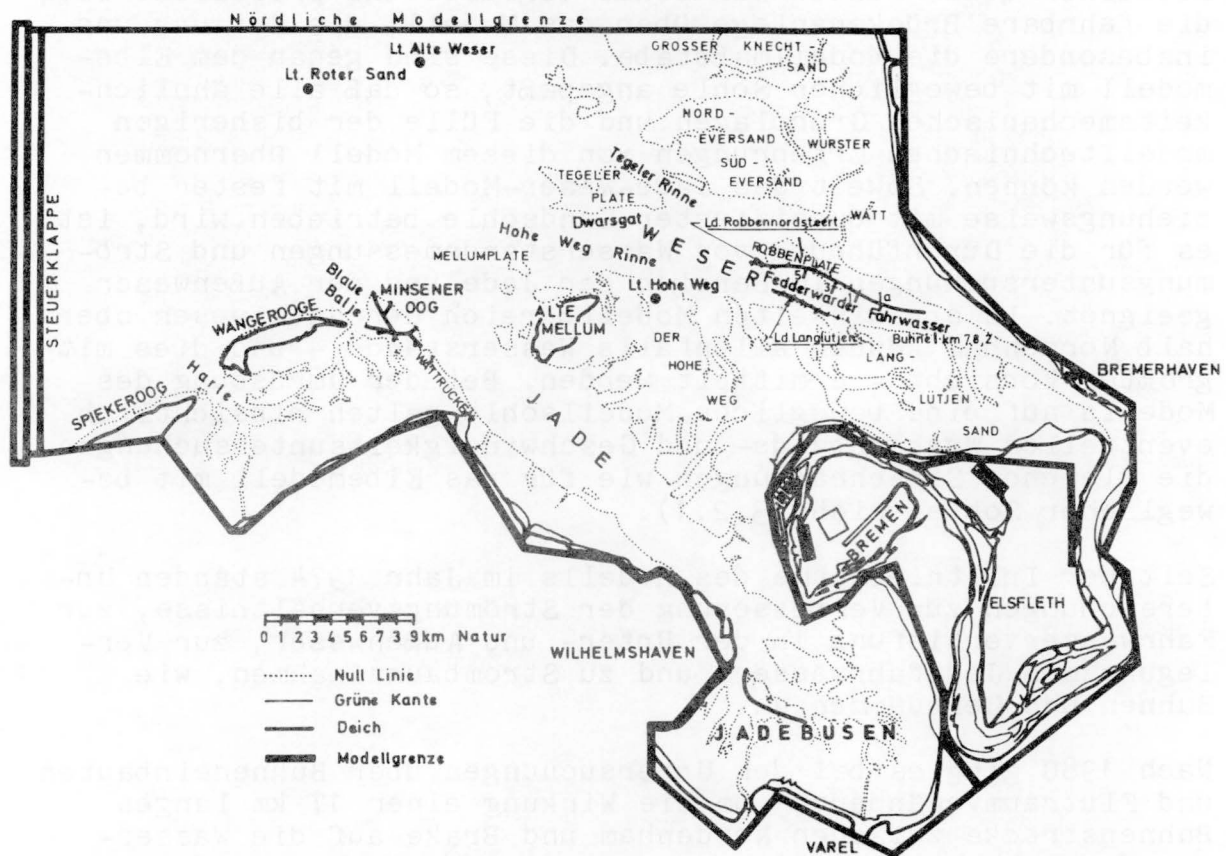


Bild 23 Übersichtsplan Jade-Weser-Modell

Der Maßstab des Modells beträgt bei einer 8-fachen Überhöhung 1 : 800 für die Längen und 1 : 100 für die Höhen. Das Modell ist auf der Seeseite einseitig gesteuert und erstreckt sich bis zur (unnatürlichen) Tidegrenze beim Weserwehr Bremen-Hemelingen. Die Unterweser von Nordenham bis Bremen ist mehrfach verschwenkt, was die Untersuchungsmöglichkeiten auf den äußeren Bereich begrenzt, wenn man von Wasserstandsuntersuchungen absieht, die bei vorsichtiger Handhabung auch im verschwenkten Modellbereich möglich sind. Der Jadebusen ist in seinem gesamten Bereich nachgebildet.

Das Modell ist in einer Leichtbauhalle untergebracht, deren Grundelement, abgesehen von einigen dem Modell angepaßten seitlichen Anbauten, rechtwinklig ist; die Hallenfläche beträgt 4425 m<sup>2</sup>. Die Halle ist mit einer fest installierten Heizungsanlage versehen und mit einer fahrbaren Brückenanlage ausgerüstet.

Das Jade-Weser-Modell ist in seiner modell- und gerätetechnischen Ausstattung als Geschiebemodell konzipiert, wenn auch bisher noch keine Geschiebeversuche durchgeführt worden sind. Zu diesem Konzept gehören die wasserdichte Modellwanne aus Beton zur Aufnahme der beweglichen Modellsohle, die temporär mit einer quasi festen Sandsohle verfüllt und profiliert ist, die fahrbare Brückenanlage über das Modell, die Heizung und insbesondere die Modellmaßstäbe. Diese sind genau dem Elbmodell mit beweglicher Sohle angepaßt, so daß alle Ähnlichkeitsmechanischen Grundlagen und die Fülle der bisherigen modelltechnischen Erfahrungen von diesem Modell übernommen werden können. Soweit das Jade-Weser-Modell mit fester beziehungsweise mit quasi fester Sandsohle betrieben wird, ist es für die Durchführung von Wasserstandsmessungen und Strömungsuntersuchungen im Bereich der Jade und der Außenweser geeignet. Im abgewinkelten Modellbereich der Unterweser oberhalb Nordenham können allenfalls Wasserstände - und dies mit größter Vorsicht - ermittelt werden. Bei der Umrüstung des Modells auf eine bewegliche Modellsohle gelten hinsichtlich eventueller Wasserstands- und Geschwindigkeitsuntersuchungen die gleichen Einschränkungen wie für das Elbmodell mit beweglicher Sohle (siehe 3.2.1).

Seit der Inbetriebnahme des Modells im Jahr 1974 standen Untersuchungen zur Verbesserung der Strömungsverhältnisse, zur Fahrwasservertiefung in der Unter- und Außenweser, zur Verlegung des Jedefahrwassers und zu Strombaumaßnahmen, wie Bühnen und Leitdämmen an.

Nach 1980 ging es bei den Untersuchungen über Buhneneinbauten und Flutraumveränderung um die Wirkung einer 17 km langen Bühnenstrecke zwischen Nordenham und Brake auf die Wasserstände im Bereich Bremen. Eine weitere Versuchsaufgabe war der Einfluß von zusätzlichen tideoffenen Hafenbecken und der Abdämmung Ochtum und Lesum auf die vorher genannten Wasserstände.

Im Rahmen der Versuche zur Verbesserung der Fahrwasserverhältnisse in der Außenweser wurde der Bereich Fedderwarder Fahrwasser überprüft. Grundlage für den Ausgangsversuch war der augenblickliche Zustand in der Natur, ergänzt durch vier Stichbühnen zwischen Stromkilometer 84 und 88. Diese Bühnenkonstellation konnte als wesentliche Verbesserung der Fahrwasserverhältnisse in früheren Versuchen gefunden werden. Mit dem Ziel, weitere Verbesserungen zu erreichen, wurden zusätzliche Untersuchungen mit Verlängerung des Leitdammes Robbennordsteert um ca. 2,5 km, Verkürzung des Leitdammes Langlütjen und einer Stichbühne am Leitdamm Robbennordsteert

durchgeführt. Dabei bringt die Leitdammverlängerung eine Stabilisierung der Fahrwasserverhältnisse.

### 3.4.2 Wasserstandsuntersuchungen (1982/83)

In analoger Weise zu den früher beschriebenen Untersuchungen über den Einfluß des Oberwassers auf den Tideverlauf in der Elbe (siehe 3.1.3) wurden auch im Jade-Weser-Modell die Wasserstände in der Jade und Weser sowie die Fortschrittszeiten der Tide für verschiedene vorgegebene Formen der Steuer- bzw. Eingangstide bei wechselnden Oberwasserzuflüssen  $Q_0$  ermittelt. Die grundlegenden Zusammenhänge zwischen Oberwasserabfluß, Wasserstand und Fortschrittszeit und die darin eingeschlossenen Einflüsse der Reibung und Reflexion machen es verständlich, daß auch diese Untersuchungen für das Jade-Weser-Ästuar analoge Ergebnisse zur Elbe gebracht haben, wie es am Beispiel einer mittleren Tide vom 09./10.10.1978 gezeigt werden kann.

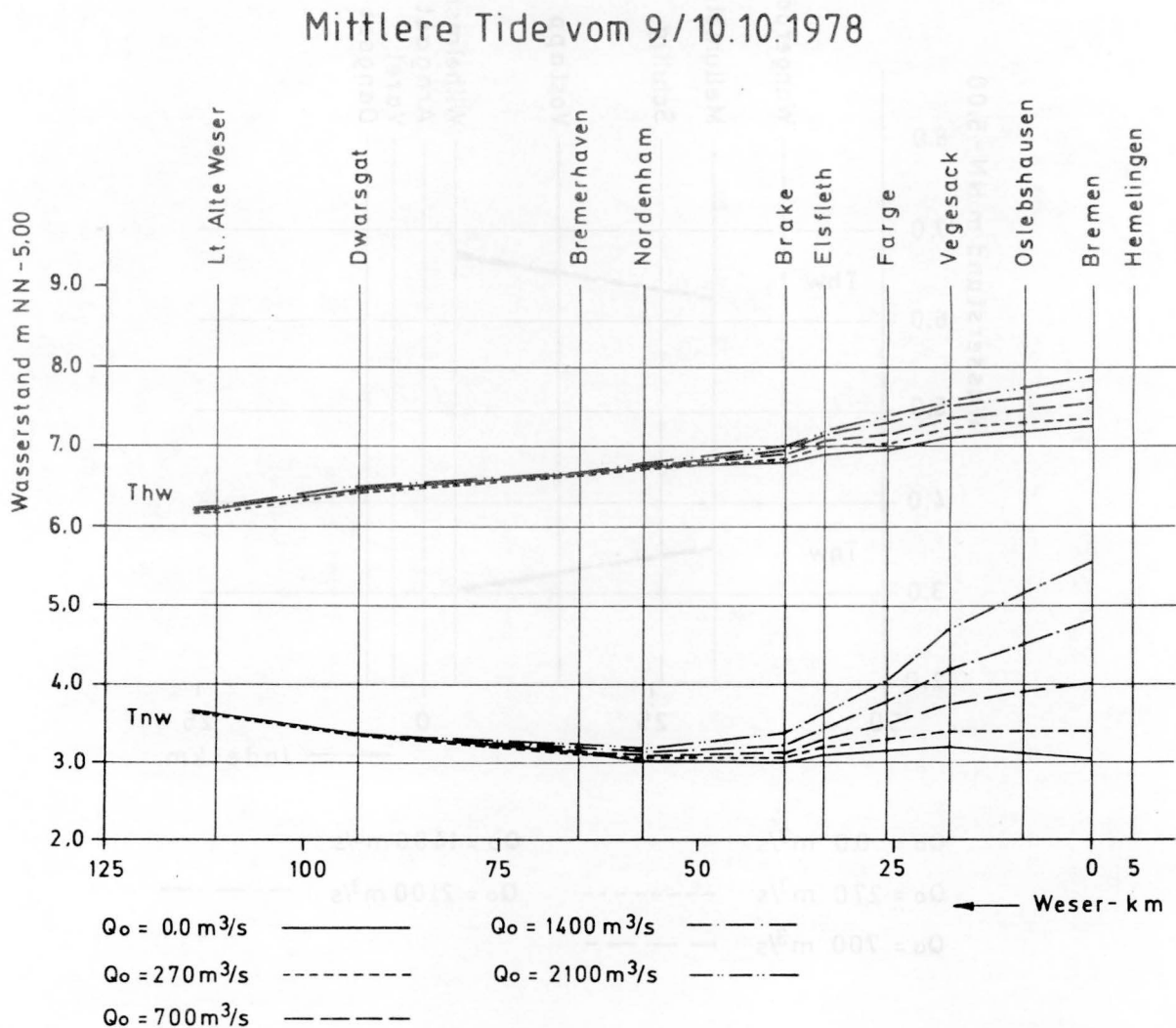


Bild 24 Einfluß des Oberwasserzuflusses  $Q_0$  auf die Scheitelwasserstände  $T_{nw}$  und  $T_{hw}$  in der Unter- und Außenweser



Mit wachsendem Oberwasserzufluß  $Q_o$  steigt das Tideniedrigwasser kräftiger als das Tidehochwasser, womit sich auch der Einfluß des Oberwassers bei Tnw deutlich weiter nach unterstrom erstreckt und bis unterhalb Bremerhaven reicht, als beim Thw, bei dem sich der OW-Einfluß schon bei Nordenham verliert (Bild 24). Ergänzend hierzu soll noch darauf hingewiesen werden, daß die im Rahmen dieser Versuche ermittelten Scheitelwasserstände für hohe Oberwasserzuflüsse ( $Q_o = 1400 \text{ m}^3/\text{s}$  bzw.  $2100 \text{ m}^3/\text{s}$ ) im Bereich Bremen noch um ca. 15 bis 20 cm im Thw und 50 cm im Tnw angehoben werden müssen, da die eingeeichete Rauheit für Versuche mit höheren Wasserständen nicht repräsentativ ist.

### Mittlere Tide vom 9./10.10.1978

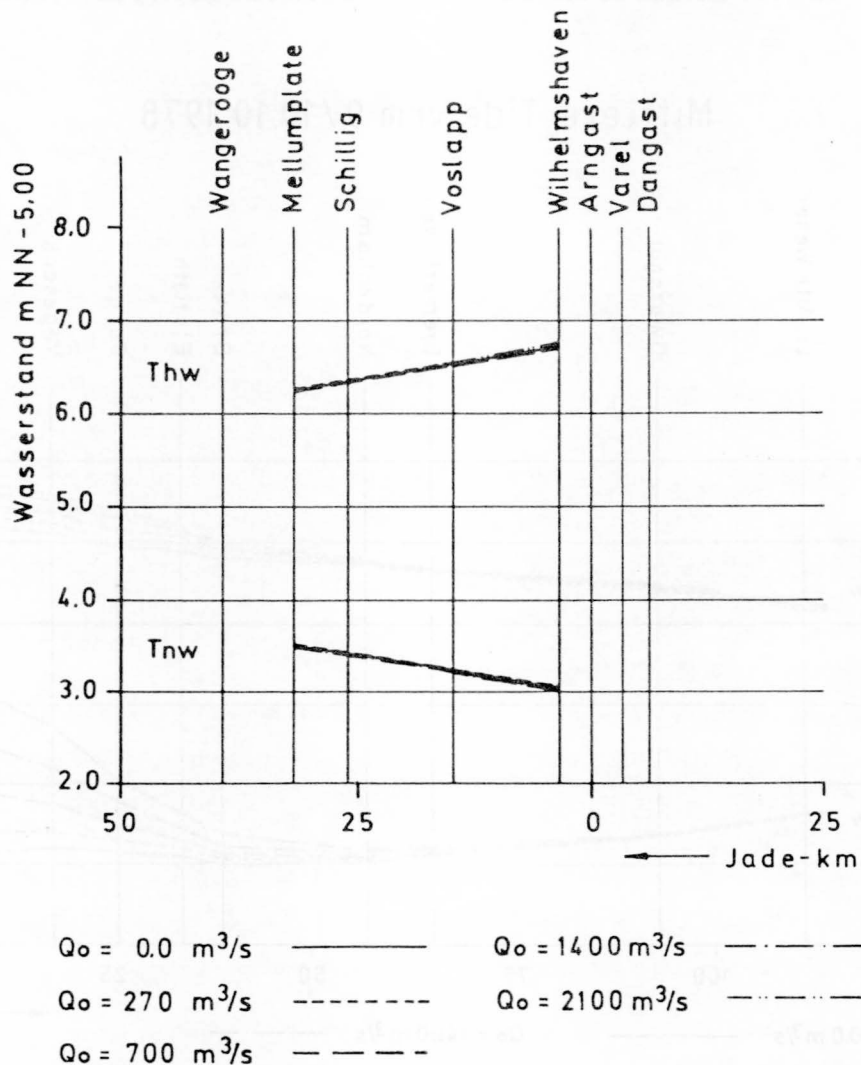


Bild 25 Einfluß des Oberwasserzuflusses  $Q_o$  in der Weser auf die Scheitelwasserstände Tnw und Thw in der Jade

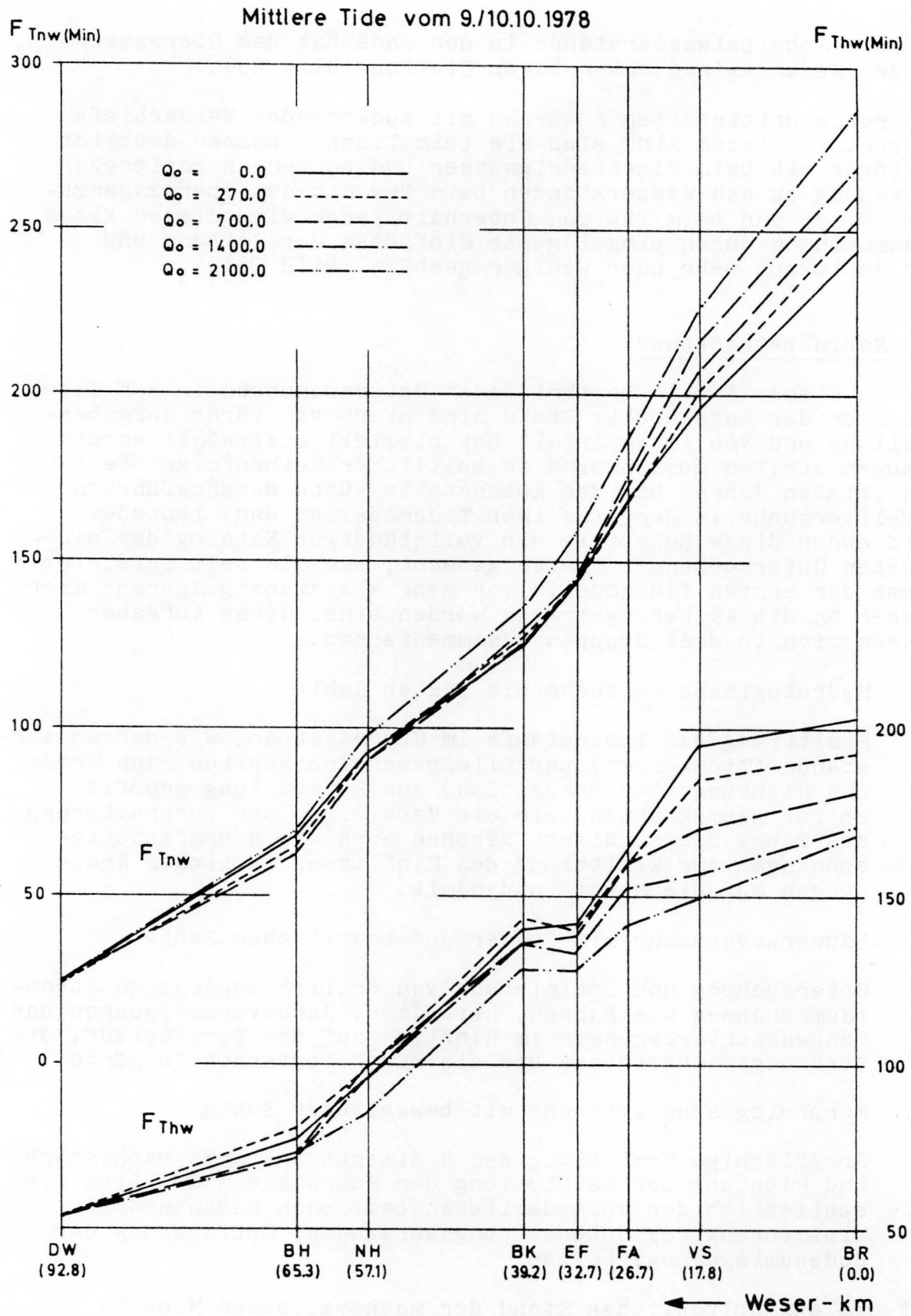


Bild 26 Einfluß des Oberwasserzuflusses  $Q_0$  auf die Fortschrittszeiten  $F_{Tnw}$  und  $F_{Thw}$  in der Unter- und Außenweser

Auf die Scheitelwasserstände in der Jade hat das Oberwasser in der Weser keinen erkennbaren Einfluß (Bild 25).

Die Fortschrittszeiten  $F$  werden mit zunehmender Wassertiefe kürzer. In diesem Sinn sind sie beim Tidehochwasser deutlich geringer als beim Tideniedrigwasser und nehmen in reziproker Beziehung zu den Wasserständen beim Thw mit dem Oberwasserzufluß  $Q_0$  ab und beim Tnw zu. Unterhalb Farge wird dieser klare Zusammenhang durch eingelagerte Einflüsse der Reibung und der Reflexion mehr oder weniger gestört (Bild 26).

#### 4 Schlußbetrachtung

Die in dieser Arbeit beschriebenen Untersuchungen in den Tidemodellen der Außenstelle Küste sind nicht von ihrer Aufgabenstellung und von ihrem Inhalt her speziell ausgewählt worden, sondern stellen ausnahmslos in zeitlicher Reihenfolge die in den letzten Jahren bei der Außenstelle Küste durchgeführten Modellversuche in den einzelnen Tidemodellen dar. Trotzdem wird durch diese Beispiele ein vollständiger Katalog der wichtigsten Untersuchungsaufgaben genannt, wie sie seit Inbetriebnahme der ersten Tidemodelle vor mehr als zwanzig Jahren immer wieder an die AK herangetragen worden sind. Diese Aufgaben lassen sich in drei Gruppen zusammenfassen.

##### 1) Hydrologische Versuche mit fester Sohle

Ermittlung des Tideablaufs im Gesamtästuar, wie der Wasserstände (Tidekurven) und Fließgeschwindigkeiten nach Größe und Richtung (Strömungsatlas) zur Beurteilung großflächiger Baumaßnahmen, wie die Vertiefung und Verbreiterung des Fahrwassers. Hierzu gehören auch die Sturmflutuntersuchungen zur Ermittlung des Einflusses baulicher Änderungen auf die Sturmflutdynamik.

##### 2) Bauwerksversuche mit fester und beweglicher Sohle

Untersuchung und Optimierung von örtlich begrenzten Strombaumaßnahmen wie Bühnen, Leitdämme, Stromverzweigungen und Fahrwasserverlegungen im Hinblick auf den Tideverlauf, die Strömungsverhältnisse und die morphologischen Vorgänge.

##### 3) Morphologische Versuche mit beweglicher Sohle

Großflächige Ermittlung des Sedimenttransports nach Stärke und Richtung zur Beurteilung der Fahrwasserstabilität einschließlich der erforderlichen baulichen Maßnahmen zur Minimierung des Unterhaltungsaufwandes; Optimierung der Bodenumlagerungsstellen.

Bei dem augenblicklichen Stand der mathematischen Modelle und der erkenn- und abschätzbaren Entwicklung auf diesem Gebiet, können die in der ersten Gruppe zusammengefaßten hydrologischen Untersuchungsaufgaben schon jetzt ohne Einschränkung in entsprechenden mathematischen Tidemodellen behandelt werden,

wie sie beispielsweise für die Elbe und das Jade-Weser-Ästuar bei der BAW entwickelt und geeicht worden sind und für zukünftige Fragen auf diesem Gebiet bereit stehen. Die zu untersuchenden baulichen Maßnahmen lassen sich als geometrische Größen mathematisch exakt formulieren und somit leicht in das mathematische Modell einbringen. Bei dem hier angesprochenen Aufgabenkomplex arbeiten mathematische Modelle nicht nur schneller und weniger personalaufwendig und damit wesentlich kostengünstiger als physikalische Tidemodelle, sondern liefern auch alle relevanten Daten über ein beliebig engmaschiges Netz von Meß- bzw. Kontrollpunkten, was in physikalischen (hydraulischen) Modellen selbst mit einer Vielzahl von Messungen und Versuchsserien nicht zu erreichen wäre. Auch hinsichtlich der Anpassungsmöglichkeit an bauliche Veränderungen in den simulierten großen Systemen (Ästuare) sind mathematische Modelle den hydraulischen Tidemodellen überlegen.

Anders sieht es bei der Gruppe der Bauwerksversuche mit fester und beweglicher Sohle aus. Hier ist es derzeit nicht möglich, die verhältnismäßig kleinräumigen dreidimensionalen Strömungsvorgänge in Bauwerksnähe und ihre Einflüsse auf die bewegliche Sohle physikalisch - mathematisch so zu formulieren, daß eine verlässliche Untersuchung in einem mathematischen Modell möglich wäre. Beispielsweise ist es derzeit nicht denkbar, daß die Optimierung aller Bauwerke und Strombaumaßnahmen beim Dollarthafenprojekt in einem mathematischen Modell erfolgen könnte, wie auch die Optimierung von Bühnen (Stacks) und Bühnengruppen nach Zahl, Abständen und Abmessungen eine mathematische Behandlung ausschließt. Bei derartigen Untersuchungen wird das hydraulische Tidemodell weiter gefragt sein. Möglich, ja sogar wahrscheinlich ist jedoch, daß das hydraulische Tidemodell dann nicht das gesamte Ästuar umfaßt, sondern nur einen Teilbereich, der in einem zweiseitig gesteuerten großmaßstäblichen Ausschnittsmodell simuliert wird, das seine Randwerte aus einem nicht direkt gekoppelten mathematischen Modell des Ästuars bezieht. Nach neuerem Verständnis wird dies auch als hybrides Modell bezeichnet, dessen Ergebnisse am Ende wieder in das mathematische Modell des großen Systems (Ästuare) eingehen.

Für die in der dritten Aufgabengruppe zusammengefaßten Fragen nach dem Sedimenttransport stehen heute bei mehreren Instituten schon sogenannte mathematische Sedimenttransportmodelle zur Verfügung. Das Sedimenttransportmodell verarbeitet die vom Strömungsmodell errechnete raumzeitliche Geschwindigkeitsverteilung, indem empirisch die vertikal gemittelte Fließgeschwindigkeit des numerischen Modells in eine für die Sedimentbewegung relevante Geschwindigkeitsgröße in Sohlhöhe umgewandelt wird und zum anderen hieraus der Feststofftransport mit bestimmten empirischen Relationen für die Geschiebebewegung ermittelt wird. Hierfür bieten sich je nach den örtlichen Verhältnissen und den angegebenen Gültigkeitsbereichen die verschiedenen bekannten "Geschiebeformeln" u.a. auch die von ZANKE /20/ an. Bei diesem Vorgehen bestimmt natürlich die verwendete empirische Relation den Wert, die Genauigkeit

und die Aussagekraft der Ergebnisse aus dem mathematischen Modell. Jedoch können mit einem solchen Modell schon gute Ergebnisse über die Transportverteilung in einem bestimmten Untersuchungsraum und Aussagen über Erosions- und Sedimentationszonen gewonnen werden. Ein mathematisches Sedimenttransportmodell wird umso verlässlicher, je mehr es mit einer quantitativen flächenhaften Kartenauswertung, mit petrographischen Untersuchungen und/oder Tracermessungen in der Natur verifiziert werden kann. Auch bieten sich zur "Eichung" eines derartigen Modells Paralleluntersuchungen in einem Tide-  
modell mit beweglicher Sohle an.

Dieser hier angesprochene Parallelbetrieb von hydraulischem und mathematischem Modell ist natürlich generell ein Verfahren, die "Eichung" aller mathematischen Modelle der Ästuare zu verbessern, insbesondere dann, wenn die Naturmessungen lückenhaft sind oder Anteile enthalten, die auf Wirkungen des Windes, des Seegangs (bei geringer Wassertiefe) und der Dichteströmung zurückzuführen sind.

Mit der Neu- und Weiterentwicklung der mathematischen Tide-  
modelle der BAW für die Ästuare Elbe, Jade/Weser und Ems können sich hiermit neue Aufgaben für die Tidemodelle der Außen-  
stelle Küste ergeben. Dies sind ausgesprochen günstige Voraus-  
setzungen, die nur bei der BAW vorhanden sind und die genutzt  
werden sollten.

## 5 Schrifttum

- /1/ BERNDT, D., HARTEN, H., u. ROHDE, H.: Hydraulische Modellversuche zum Sturmflutgeschehen in der Unterelbe (1976-1980). In: Die Küste (1983) Nr. 38.
- /2/ CARSJENS, R. u. CLASMEIER, H.-D.: Projekt Dollarthafen, technische Vorstellung. In: Jahrbuch der Hafenbau-  
technischen Gesellschaft, 41 (1985/86).
- /3/ FALLDORF, W.: Anwendung, Einsatz und Aussagefähigkeit von hydraulischen Tidemodellen. In: Mitt. a.d. Franzius-Institut der  
Universität Hannover, (1980) Nr. 50.
- /4/ GEHRIG; W.: Flußmodelle mit beweglicher Sohle. In: Wasserbauliches Versuchswesen, DVWW Mitt. (1978), Nr. 4.
- /5/ GIESE, E., TEICHERT, J. u. VOLLMERS, H.: Das Tideregime der Elbe. Hydraulisches Modell mit beweglicher Sohle. In: Mitt.-Bl.d. Bundesanstalt für Wasser-  
bau (1972), Nr. 31.
- /6/ GIESE; E. u. VOLLMERS, H.: Das Tidemodell der Elbe mit beweg-  
licher Sohle. In: Die Küste (1973),  
Nr. 22.

Dietz: Untersuchungen in den Tidemodellen der AK

- /7/ GIESE, E.,  
HARTEN, H. u.  
VOLLMERS, H.: Erfahrungen mit dem Betrieb von Tide-  
modellen mit beweglicher Sohle. In:  
Die Küste (1975), Nr. 27.
- /8/ GIESE, E. u.  
VOLLMERS, H.: Tidemodelle mit beweglicher Sohle.  
In: Wasserbauliches Versuchswesen  
DVWW-Mitt. (1978) Nr. 4.
- /9/ GIESE, E.: Das Tideregime der Elbe: Hydraulisches  
Modell mit beweglicher Sohle (Forts.).  
In: Mitt.-Bl.d. Bundesanstalt für Was-  
serbau (1980), Nr. 48.
- /10/ KÖGEL, U. u.  
OHLMEYER, F.: Optimizing Dumping Sites Near Dredged  
Channels. In: Proceedings of the 19th  
ICCE, Houston/Texas, 1984.
- /11/ OHLMEYER, F.: Some Case Studies To Optimize Dredging  
By The Use Of Hydraulic Models With  
Movable Bed. Paper E3, International  
Conference on "Numerical and Hydraulic  
Modelling of Ports and Harbours", Bir-  
mingham, 1985.
- /12/ ROHDE, H.: Eine Studie über die Entwicklung der  
Elbe als Schifffahrtsstraße. In: Mitt.  
a.d. Franzius-Institut der Universität  
Hannover (1971), Nr. 36.
- /13/ SCHWARZE, H. u.  
VOLLMERS, H.: Tidemodelle mit fester Sohle. In: Was-  
serbauliches Versuchswesen, DVWW-Mitt.  
(1978), Nr. 4.
- /14/ SCHWARZE, H.: Untersuchung von Baumaßnahmen im Tide-  
gebiet. In: Mitt. a.d. Franzius-Insti-  
tut der Universität Hannover, (1985),  
Nr. 60.
- /15/ SEIFERT, R.: Modellversuche für Tideflüsse. In:  
Jahrbuch der Hafenbautechnischen  
Gesellschaft, 15 (1936).
- /16/ VOLLMERS, H.: Möglichkeiten und Beispiele für die  
Benutzung von Tidemodellen mit beweg-  
licher Sohle. In: Mitt. a.d. Institut  
für Wasserbau und Wasserwirtschaft,  
RWTH Aachen (1975), Nr. 7.
- /17/ WULZINGER, W.: Sedimenttransport und Sohlumbildung  
im Tidemodell der Elbe mit beweglicher  
Sohle. In: Mitt.-Bl.d. Bundesanstalt  
für Wasserbau (1981), Nr. 50.

- /18/ YALIN, S.: On the Geometrically Similar Reproduction of Dunes in a Tidal Model with Movable Bed. In: Proceedings of the 13th International Conference on Coastal Engineering, Vancouver, Canada (1972), Volume II, S. 1143 - 1153.
- /19/ ZANKE, U.: Über die Naturähnlichkeit von Geschiebeversuchen bei einer Gewässersohle mit Transportkörpern. In: Mitt. a.d. Franzius-Institut der Universität Hannover, (1976), Nr. 44.
- /20/ ZANKE, U.: Grundlagen der Sedimentbewegung. Berlin: Springer, 1982.