Abteilung II — Seeschiffahrt

Thema 2

Verbesserung und Unterhaltung der Fahrwasser und Überwachung der Tideverhältnisse in den Ästuarien in bezug auf die durch Gezeiten, Wellen und an der Mündung auftretenden Dünung ausgeübte Energie

Dipl.-Ing. Hermann Harten, Bauoberrat, Bundesanstalt für Wasserbau; Dr.-Ing. Hans-Joachim Vollmers, Baudirektor, Bundesanstalt für Wasserbau.

Thema des Berichtes:

Modelluntersuchungen zu Ausbaumaßnahmen in den deutschen Tideflüssen.

Zusammenfassung

Mit dem Anwachsen der Schiffsgrößen und der Zunahme der Verkehrsdichte auf den Schiffahrtsstraßen müssen Unterhaltungs- und Ausbaumaßnahmen verstärkt durchgeführt werden. Diese Maßnahmen umfassen im wesentlichen den Bau von Buhnen, Längswerken, Seeschleusen, Sperrwerken, die Verlegung von Schiffahrtsrinnen, Unterhaltungsbaggerungen, Vertiefung von Wasserstraßen und die Ablagerung von Baggergut. Weiter wurden Baumaßnahmen zur Verbesserung der Vorflut und zum Sturmflutschutz erforderlich. Da die Beurteilung der oben genannten Maßnahmen, d. h. ihre Auswirkungen auf das Tidegeschehen i. a. nicht hinreichend genau mit Hilfe theoretischer Überlegungen oder aus der Erfahrung heraus erfaßt werden kann, wird deren Qualität durch einen Modellversuch überprüft.

Der vorliegende Bericht befaßt sich mit den Tideästuarien Ems, Jade, Weser, Elbe und Eider.

Ems — Abschnitt 2 (Vollmers)

Die Emsrinne soll in den Dollart verlegt und das Emdener Fahrwasser durch Aufspülen im Bereich des Geiseleitwerkes und Abdämmung durch eine Schleuse an der Geisespitze zu einem tidefreien Hafenbecken werden. Dadurch können zusätzlich die komplizierten morphologischen und schwierigen navigatorischen Verhältnisse im Gatjebogen verbessert werden, wie durch Modellversuche nachgewiesen wurde.

Jade — Abschnitt 3 (Harten)

Die Jade wurde auf SKN −18,5 m vertieft und mit den erforderlichen Entladeeinrichtungen versehen. Dadurch ist ein Tiefwasserhafen entstanden, der von Schiffen mit 250 000 tdw angelaufen werden kann. Die Änderungen des Tidegeschehens durch Vertiefen des Fahrwassers von SKN −12 m auf SKN −18,5 m wurden rechnerisch vorausbestimmt und die natürlichen Verhältnisse mit den morphologischen Zuständen 1965 und 1972 in einem hydraulischen Modell überprüft.

Weser — Abschnitt 4 (Harten)

In den letzten 50 Jahren wurden an der Weser größere Ausbaumaßnahmen und Korrektionen vorgenommen. Die vorteilhaften Auswirkungen auf das Tidegeschehen — die Tidewelle kann ungehinderter in das Ästuar einströmen — zeigen sich in einer Zunahme des Tidehubes.

Im augenblicklichen Ausbauzustand können Schiffe mit 100 000 tdw Bremerhaven anlaufen. Eine weitere Verbesserung der Fahrwasserverhältnisse ist unter besonderen Voraussetzungen die Vertiefung der Hohewegrinne. Das haben Vorversuche im Modell gezeigt.

Elbe — Abschnitt 5 (Harten)

Die Elbe wird auf SKN −13,5 m vertieft. Außerdem werden Untersuchungen zur optimalen Sturmflutsicherung gemacht.

Hier sollen jedoch Untersuchungen zur Baggergutgewinnung zum Aufspülen von Industrieland beschrieben werden.

Im hydraulischen Modell mit Teilabschnitt in beweglicher Sohle konnte nachgewiesen werden, daß am Böschrücken bei Brunsbüttel durch Erweitern einer Engstelle auf einen optimalen Durchflußquerschnitt (nach O'Brien) Riffel- und Dünenstrecken abgebaut werden, d. h. die Sohle in der Hauptrinne wird stabilisiert.

Eider — Abschnitt 6 (Harten)

Umfangreiche Versuche am Eidermodell haben zu dem Grundkonzept der Abdämmung in der Linie Hundeknöll — Vollerwiek geführt. Es konnten nach Fertigstellung des Sperrwerkes viele Naturmessungen mit den Meßergebnissen der Modellversuche verglichen werden. Die Übereinstimmung ist gut.

Inhalt

Seite
1. Vorbemerkungen 138
2. Ems 139
3. Jade 142
4. Weser 144
5. Elbe 146
6. Eider 148
7. Schlußbemerkung 150

1. Vorbemerkungen

Im folgenden werden Fragestellungen aus den maßgebenden Tideästuarien des deutschen Küstenbereiches diskutiert. Das sind die Seeschiffahrtsstraßen Elbe, Weser, Jade, Ems und die Eider, die für die Schiffahrt allerdings keine große Bedeutung hat, sondern in erster Linie Vorfluter für das Eidereinzugsgebiet ist (Abb. 1).

Aus der Vielzahl anliegender Probleme, bei deren Lösung Modellversuche erforderlich sind oder bereits richtungsweisend waren, können im Rahmen dieses Berichtes nur einige Beispiele ausführlicher beschrieben werden.

Die wichtigsten hydrologischen Kennwerte und Modellzahlen der hier genannten Tideästuarien sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

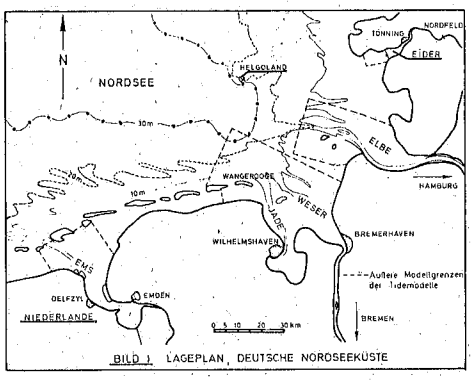

Abb. 1: Lageplan, Deutsche Nordseeküste

2. Ems

Die Seeschiffahrtsstraße Ems als Zufahrt zu den Häfen Emden und Delfzijl hat in den Bereichen Ostfriesisches Gatje, Gatjebogen und Emdener Fahrwasser drei Abschnitte, in denen zeitweise intensive Unterhaltungsbaggerungen notwendig sind (Abb. 2).

Besonders komplizierte Strömungsverhältnisse herrschen im Gatjebogen. Hier läuft die natürliche Strömung schräg zum künstlich offenzuhaltenden Fahrwasser. Die Hauptströmung zwischen dem Ostfriesischen Gatje und dem Dollart kreuzt die Schiffahrtsrinne. Die Nebenrinnen „Ems" und „Bucht von Watum" sind Abzweigungen mit erheblich geringerer Wasserführung.

Die komplexen Strömungsverhältnisse dieses Abschnittes sind außerdem Ursache und Ergebnis der inhomogenen morphologischen Struktur dieses Gebietes. Durch all die genannten Faktoren sind auch die besonderen Schwierigkeiten im Hinblick auf die Navigation und den Umfang der Baggerungen bedingt.

Das alles gab Veranlassung, die Möglichkeiten einer Verbesserung der Verhältnisse zu untersuchen. Dafür wurde insbesondere ein hydraulisches Tidemodell des Emsästuars mit den Maßstäben 1 : 500 (horizontal) und 1 : 100 (vertikal) benutzt. Bei diesen Untersuchungen stellte sich heraus, daß eine Verlegung der Emsrinne in den Dollart bei gleichzeitiger Abdämmung des Emder Fahrwassers binnenseitig und seeseitig als erfolgversprechend angesehen werden kann. Durch den Abschluß des Emder Fahrwassers bietet sich die Möglichkeit, mit einer großflächigen Aufspülung des Bereichs Geiseleitwerk neues Hafen- und Industriegelände zu schaffen (Abb. 2).

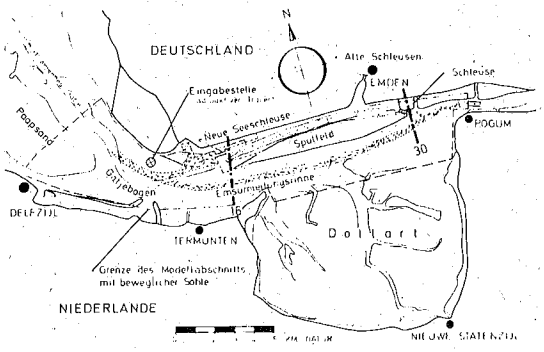

Abb. 2: Lageplan, Ems im Bereich Delfzijl ÷ Emden

Tabelle 1

	Hydrologische Kennwerte							Modellzahlen									
									Maßstab								
	v. d. Seegrenze	Länge [km]	Wassertiefe SKN [m]	mittl. Flutwassermenge MT, [$10^6 m^3$]	Oberwasserabfluß [m^3/s] MQ	NNQ	HNQ	Modell	Längen	Höhen	Geschwind.	Abflußmenge	Rauminhalt	Zeit	Modellabschnitt [km] Natur	Modellänge [m]	Vorrangig
Ems	Mövensteert Emden Herbrum	35 70 125	11,5 8,5 3,2	780 4,5 0	80	5	1200	Ems	1:500	1:100	1:10	$1:50.10^4$	$1:25.10^6$	1:50	102,5	205	Schiffahrt
Jade	Wilhelmshaven	47	18,5	400	0	0	0	Jade-Weser	1:800	1:100	1:10	$1:80.10^4$	$1:64.10^6$	1:80			
Weser	Bremerhaven Bremen Hemelingen	60 120 130	12,0 8,0 3,5	140 15 0	310	50	3500										
Elbe	Cuxhaven Hamburg	36 135	12,0 12,0	650 70	700	130	3900	Elbe m. fest. Sohle	1:500	1:100	1:10	$1:50.10^4$	$1:25.10^6$	1:50	170	340	
	Geesthacht	173	2,5	0				Elbe m. bew. S.	1:800	1:100	1:10	$1:80.10^4$	$1:64.10^6$	1:80			
Eider	Hundeknöll Tönning Nordfeld	25 38 59	2,5 2,0 2,0	35 12 0	(14)	0	(140)	Eider	1:250	1: 50	1:7,07	$1:25.10^4$	$1:6.25.10^6$	1:35,36	59	236	Vorfl.

Der ohnehin notwendige Neubau der Seeschleuse Emden kann dabei am seeseitigen Ende des neuen Hafens erfolgen.

Die neue Lösung bietet folgende Vorteile:

1. Die bisherigen Schwierigkeiten bei der Freihaltung des Emder Fahrwassers, die sehr wesentlich aus dem Mißverhältnis zwischen der Tidewassermenge und dem vorhandenen Querschnitt resultieren, entfallen. Das soll kurz erläutert werden: Nach O'Brien besteht ein Zusammenhang zwischen dem Tidevolumen und dem Querschnitt. Danach würden sich stabile Verhältnisse nur bei einer Wassertiefe von etwa 6 m ausbilden. Die Gültigkeit dieser Hypothese wurde während des Krieges bestätigt, als über einen längeren Zeitraum nicht gebaggert werden konnte.

   Die Tiefe in der neuen Emsrinne im Dollart wird sich etwa in dieser Größenordnung einpendeln. Die Durchfahrt kleinerer Schiffseinheiten in die obere Ems ist daher ohne Störung möglich.

2. Das komplizierte vorhandene getrennte Füll- und Entleerungssystem Dollart und Ems wird harmonisiert. Dollart und Ems strömen geschlossen durch einen Querschnitt. Dadurch wird auch eine schiffahrtstechnisch günstigere Linienführung im Bereich des Gatjebogens möglich.

Die Umleitung der Ems durch den Dollart bedeutet einen erheblichen Eingriff in das Regime des Stromes. Es ist daher ohne weiteres verständlich, daß (die zunächst globalen) Voruntersuchungen nicht ausreichend waren, um die Veränderungen im einzelnen aufzuzeigen bzw. die Stabilität der neuen Linienführung nachzuweisen. Dafür mußten eingehendere Untersuchungen im Modell ausgeführt werden, die sich in drei Abschnitte gliedern:

a) Morphologische Versuche
b) Hydrologische Versuche
c) Durchmischungsversuche

Hier soll nur über den Komplex „Morphologie" berichtet werden.

Die beste heute bekannte Methode, relativ sichere Aussagen über zu erwartende Veränderungen im Stabilitätsverhalten einer natürlichen mobilen Gerinnesohle zu machen, ist der Modellversuch mit beweglicher Sohle. Die ähnlichkeitstheoretischen Voraussetzungen und die Technik für Tidegroßmodelle wurden bei der Bundesanstalt für Wasserbau seit längerer Zeit entwickelt, so daß bei der Anwendung auf das Emsmodell ein hinreichendes Maß an Sicherheit in bezug auf die Versuchsergebnisse zu erwarten war.

Bei den Versuchen stellte sich heraus, daß die geplante Linienführung sowohl für den Umleitungsabschnitt im Dollart als auch im Gatjebogen sehr stabil blieb. Als Beispiel für das Beharrungsvermögen der Umleitungsrinne im Dollart sind in Abb. 3 die prozentualen Veränderungen des Gesamtquerschnitts im Bereich der Dollartrinne (1000 m Breite) nach 300, 500 und 700 Tiden aufgetragen. Profil 16 und 30 sind in Abb. 2 gekennzeichnet.

Bei den Untersuchungen der „morphologischen Veränderungen im Gatjebogen" wurde auch ein Versuch mit radioaktiven Tracern ausgeführt, der für die Deutung der Vorgänge im

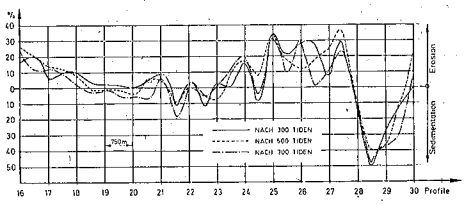

Abb. 3: Veränderung des Gesamtquerschnitts im Dollart

Gatjebogen wichtig ist. Die Arbeitsmethoden und die Meßtechnik mit radioaktivem Granulat wird eigehend in dem Versuchsbericht der BAW „Morphologische Veränderungen im Gatjebogen" beschrieben. Der Einbringepunkt ist in Abb. 2 wiedergegeben. Er wurde so gewählt, weil hier im Bereich der Mittelplate bereits bei früheren Versuchen eine intensive Geschiebebewegung festgestellt worden war, was auch Naturbeobachtungen bestätigt haben. Nach 100 Modelltiden erfolgte die Aufmessung. Die Ergebnisse sind in Bildern mit Linien gleicher Strahlungsintensität zusammengefaßt.

Der Längstransport ist erheblich intensiver, wobei der Fluttransport überwiegt. Interessant ist, daß sich das Maximum etwa 250 m westwärts in Richtung zum Fahrwasser, quer zur Hauptströmungsrichtung verlagert hat und an der ursprünglichen Einbringstelle kaum etwas liegengeblieben ist. Dieser Test zeigt deutlich, daß der Feststofftransport von See über die Mittelplate erfolgt, und daß die Mittelplate ihre Massen durch Vorschieben nach Westen an die Fahrrinne abgibt, was auch aus anderen Versuchen erkannt worden war. Dieser Versuch lieferte für die Deutung der Ergebnisse wichtige Hinweise. Die relativ gute Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse mit radioaktiven Leitstoffen auf die Natur wurde inzwischen durch einen Vergleichsversuch im Elbmündungsgebiet nachgewiesen.

Die neue Zufahrt zum Hafen Delfzijl bleibt in ihrer Lage auch nach Verlegung der Fahrrinne im Gatjebogen sehr stabil und weist nur geringe Sedimentation auf.

Die Untersuchungen für die Abschnitte b. Hydrologie und c. Durchmischung sind jetzt ebenfalls im wesentlichen abgeschlossen. Aus allen vorliegenden Ergebnissen kann geschlossen werden, daß sich insgesamt gesehen die Verhältnisse im Emsästuar durch die geplante Rinnenverlegung verbessern werden.

3. Jade

Die in der jüngsten Vergangenheit ständig wachsenden Schiffsgrößen machten den Ausbau eines Tiefwasserhafens für Schiffskörper bis 250 000 twd notwendig. Aufgrund der hydrologischen und morphologischen Verhältnisse war die Jade zum Ausbau geeignet. Im Jahre 1956 wurde daher entschieden, daß Wilhelmshaven Ölumschlaghafen mit einer Löschbrücke, einem Tanklager und einer Pipeline zu Raffinerien im Rhein- und Ruhrgebiet werden soll. Mit dem Ausbau wurde zügig begonnen. Das Fahrwasser wurde von SKN −12 m (1965) auf SKN −18,5 m (1972/73) (Tabelle 2) vertieft und gleichzeitig mit den notwendigen Entladeeinrichtungen versehen (Abb. 4).

Durch eine Vorausberechnung nach dem Differenzenverfahren sollten die Auswirkungen der Fahrwasservertiefung bei gleichzeitiger Eindeichung aller Wattflächen am Westufer der

Tabelle 2

Ausbau [m]	Baggerzeit	Ausbautiefe unter SKN bei der Ölpier [m]	Ausbautiefe unter SKN bei der Ansteuerungstonne „Jade" [m]	max. Schiffsgrößen Tiefgang voll abgeladen [m]	max. Schiffsgrößen Tiefgang voll abgeladen [Fuß]	max. Schiffsgrößen mittl. Tragfähigkeit [tdw]	Baggermenge [Mill m³]	Bemerkungen
12	1958–63	12,0	12,0	13,5	(44)	60 000	16	geringste
13	1964–67	13,0	14,1	14,5	(47,5)	90 000	20	Tiefe vor
(15	1967–69	15,0	16,1	16,8	(55)	170 000	47,4) 77	Ausbau ca.
(17	1969–71	16,7	17,9	18,5	(61)	200 000	29,6)	SKN –
18,5	1971–73	18,5	19,7	20,0	(65,5)	250 000	(61)	10 m

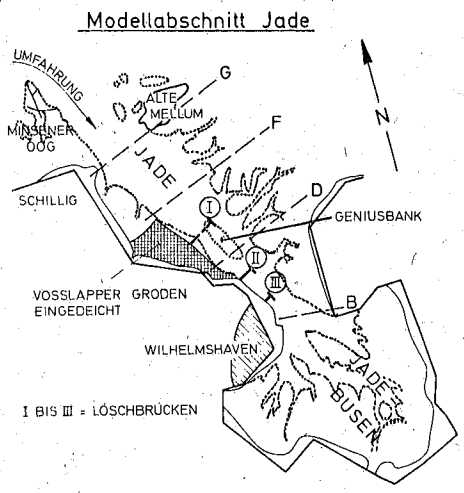

Abb. 4: Lageplan, Jade

Innenjade zwischen Schillighörn und Voslapp bestimmt werden. Das Rechenmodell konnte naturgemäß nur von den damaligen morphologischen und hydrologischen Verhältnissen ausgehen. Im Vergleich zum unveränderten Ausgangszustand 1965 kommt es zu einem Absinken des Tnw zwischen 4,5 und 8,6 cm, während das Thw geringfügig ansteigt, d. h., der Tidehub wird größer. Dieses Ergebnis ist logisch erklärbar. Durch Erweitern des Durchflußquerschnitts als auch durch Wegnahme von seitlichem Flutraum wächst der Tidehub.

Tatsächlich aber nimmt der Tidehub in der Natur ab, d. h. das Tnw steigt und das Thw fällt. Offensichtlich werden die relativ geringen Wasserstandsänderungen, die durch das Vertiefen der Rinne und Vordeichungen hervorgerufen wurden, durch andere Einflüsse — wie z. B. natürliche morphologische Änderungen, sowie meteorologische Verhältnisse und der sich daraus ergebenden Beeinflussung des Tidegeschehens — überlagert. Das hydraulische Modell geht von den Gegebenheiten der Natur aus (Tide, Morphologie, Ausbauzustand und Eindeichung des Voslapper Groden). Es stimmt daher weitgehend mit den Naturmessungen überein. Auf der graphischen Darstellung (Abb. 5) sind die Wasserstandsdifferenzen zwischen den mittleren Tiden von 1965 und 1972 für die Natur und das hydraulische Modell, sowie die Ergebnisse des Rechenmodells graphisch aufgetragen.

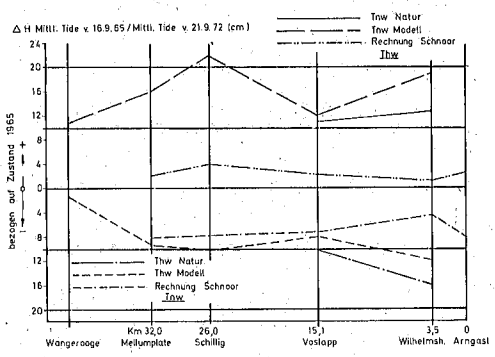

Abb. 5: Differenzwasserstände

In Tabelle 3 ist der Faktor $\mathcal{H} = \frac{V_{eM}}{V_{fM}}$ für vier Meßquerschnitte (G, F, D, B, Abb. 4) zusammengestellt.

Das Verhältnis aus den mittleren Querschnittsgeschwindigkeiten (V_{eM}, V_{fM}) läßt Schlüsse auf das Transportverhalten der Tidebewegung zu.

Die Modellwerte der Zustände 1965 und 1972 weichen nur wenig voneinander ab, d. h. die Vertiefung und Vordeichung verändert im Gesamtabschnitt nur wenig. Örtliche Strömungsumlagerungen sind vorhanden, werden aber i. a. durch Mittelbildung über den Querschnitt eliminiert.

Die Tendenz der Modellergebnisse — z. B. deutliches Überwiegen des Ebbstromes in D — stimmt mit den Naturwerten überein (Tabelle 3).

Tabelle 3

Meßquerschnitt	G	F	D	B
Modell, Zustand 1965	1,07	1,02	1,222	1,074
Modell, Zustand 1972	1,10	1,04	1,228	1,09
Natur, Zustand 1965	1,09	1,11	1,31	1,05

Die wertmäßige Abweichung läßt sich mit der unterschiedlichen Meßmethodik erklären. Im Modell wird mit Mikroflügeln 2 cm unter Tnw gemessen, das sind SKN −2 m in der Natur. Die Strömungsgeschwindigkeiten in der Natur wurden mit Schaufelradstrommessern ca. 3 m über der Sohle aufgenommen und nicht auf repräsentative mittlere Verhältnisse umgerechnet.

Nach Abschluß der Ausbaumaßnahme 18,5 m sind Unterhaltungsbaggerungen notwendig. Es ergeben sich drei Schwerpunktbereiche:

1. Die Geniusbank ist ein Mittelgrund, der möglicherweise durch den Ebbstrom in das Fahrwasser abgedrängt wird (Abb. 4).
2. Die Umfahrung Minsener Oog ist eine starke Strömungs- und Fahrwasserkrümmung (Abb. 4).
3. Das Fahrwasser der Außenjade, das im Bereich der Platenwanderung liegt, muß stellenweise gebaggert werden (Abb. 1).

4. Weser

Die Weser ist Seeschiffahrtsstraße nach Bremerhaven, Bremen und zu Industrieansiedlungen im übrigen Weserbereich. Mit wachsenden Schiffstiefgängen mußten auch die Ausbaumaßnahmen zur Verbesserung der Fahrwasserverhältnisse verstärkt vorangetrieben werden. Neben Vertiefen der Unterweser waren besonders in der Außenweser schwierige Strombaumaßnahmen zu bewältigen. Die Außenweser besteht aus einem Doppelrinnensystem mit Tegeler Rinne, Wurster Arm im Nordosten und südwestlich davon die Hohewegrinne mit anschließendem Fedderwarder Fahrwasser. Dazwischen liegen Platen (Tegeler Plate, Robbenplate) und den Mündungsbereich abgrenzende Sände und Wattrücken (Mellum Plate, Der Hohe Weg und Kleine Knechtsände, Eversand, Wurster Watt) (Abb. 6).

Ein wesentlicher Eingriff in den Fahrwasserverlauf war die Verlegung des Fahrwassers vom Wurster Arm in die Fedderwarder Rinne mit gleichzeitiger Vertiefung auf SKN −10 m. Diese

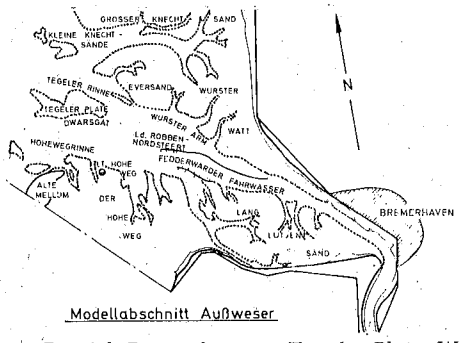

Abb. 6: Bereich Bremerhaven – Tegeler Plate, Weser

Ausbaumaßnahme wurde 1928 abgeschlossen. Am Pegel Bremen wurde das durch deutliches Absinken der mittleren Jahreswasserstände im Tnw registriert (Abb. 7). Weitere Vertiefung der Außenweser auf SKN −12 m, der Unterweser auf SKN −9 m, sowie Unterhaltsarbeiten und Korrektionen führten insgesamt zu einem Anwachsen des Tidehubes, der hauptsächlich durch Absinken des Tnw und nur zu einem geringen Teil auf Anheben des Thw zurückzuführen ist (Abb. 7).

Die Unterweser ist bis Nordenham auf SKN −11 m und bis Brake auf SKN −10 m ausgebaut. Der Abschnitt Brake bis Bremen wird auf SKN −9 m vertieft. Heute können unter Ausnutzung der Tide Containerschiffe mit 13,5 m (44 Fuß) Tiefgang und 100 000 tdw nach Bremerhaven und Massengutschiffe mit 9,70 m (32 Fuß) Tiefgang und 30 000 tdw bei einer Längenbegrenzung von 180 m nach Bremen fahren. Eine Verbesserung der Fahrwasserverhältnisse im Außenweserbereich ist möglicherweise die Vertiefung und Verbreiterung der Hohewegrinne bei gleichzeitigem Verbau des Dwarsgats.

Im Modell wurde festgestellt, das in der ersten Flutphase das Dwarsgat aus der Hohewegrinne, mit wachsender Überströmung der Tegeler Plate aber von Norden her gefüllt wird. Ein Austausch von Wassermassen zwischen Dwarsgat und Wurster Arm ist bei mittleren Tideverhältnissen nicht festzustellen, d. h., die Wassermengen aus dem Dwarsgat fließen vor Kopf des Leitdammes Robbennordsteert und auch über den Leitdamm selbst in das Hauptfahrwasser zurück. Der Leitdamm ist daher, das wird auch durch die Natur bestätigt, harten Strömungsangriffen ausgesetzt und durch einen Priel von der Nordseite her gefährdet (Abb. 6).

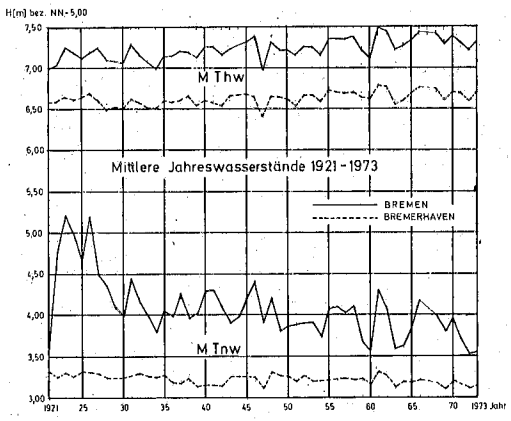

Abb. 7

Durch Erweiterung der Hohewegrinne soll das Auslenken von Teilwassermengen aus der Hauptrinne wenigstens teilweise unterbunden und das nachteilige Rückströmen über den Leitdamm Robbennordsteert vermindert werden.

Weil bereits kleine Änderungen von Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen, die aber von Meßgeräten kaum noch erfaßt werden, im Verlauf der sich ständig wiederholenden Tidebewegung erhebliche Auswirkungen auf die Morphologie haben können, sollten Modellversuche zu Eingriffen von entscheidender Bedeutung für die Schiffahrt mit beweglicher Sohle gemacht werden.

In Langzeitversuchen läßt sich dann die Stabilität dieser Baumaßnahme prüfen. Weiter muß die Auswirkung der veränderten Strömung auf das verklappte Baggergut im Dwarsgat mit radioaktiven Tracern untersucht werden.

5. Elbe

Wie alle anderen Seeschiffahrtsstraßen hat auch die Elbe als Zufahrt zum Nordostseekanal und Seehafen Hamburg Probleme, die in der Unterhaltung der Ausbautiefe, in weiterer Vertiefung (SKN − 13,5 m) und Sicherung gegen Sturmfluten liegen.

Für die Stabilisierung des Außenelbefahrwassers (Regulierungsmaßnahmen und Bestimmung günstiger Baggerklappstellen mit radioaktiven Leitstoffen) wurden Untersuchungen am Elbemodell mit beweglicher Sohle gemacht.

Alle Probleme der Unterelbe und auch die Sturmflutsicherung werden am Modell mit fester Sohle untersucht.

Hier soll aus der Vielzahl von Problemen das der Baggergutgewinnung zur Aufspülung von Gelände für Industrieansiedlung am Baggervorhaben Böschrücken diskutiert werden.

Für Industrieansiedlung soll bei Brunsbüttel an der Unterelbe Außendeichland aufgespült werden. Aus wirtschaftlichen Gründen muß das erforderliche Baggergut aus dem Stromregime der Elbe außerhalb des Hauptfahrwassers entnommen werden. Die Entnahme darf jedoch die hydraulischen und morphologischen Verhältnisse im Hauptfahrwasser nicht nachteilig beeinflussen.

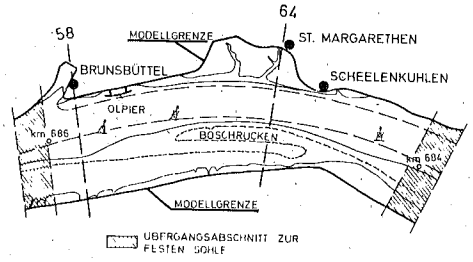

Abb. 8: Modellabschnitt mit beweglicher Sohle

Weil Rückschlüsse auf morphologische Veränderungen aus Fließgeschwindigkeits- und Strömungsmessungen in Modellen mit fester Sohle mit zahlreichen Unsicherheitsfaktoren behaftet sind, wurde ein hinreichend großer Teilabschnitt (144 m^2) des Modells mit beweglichem Material (Hostyren ϱ_s = 1,05 g/cm^3) ausgestattet (Abb. 8).

Es wurden Kurzzeitversuche (180 Tiden ≙ 563 F-Tage in der Natur) und Langzeitversuche (1200 Tiden ≙ 22 F-Jahre in der Natur) gemacht, wobei ein Feststofftag (F-Tag) im Modell in 2,33 Minuten abläuft.

Als Erreichen der Naturähnlichkeit wurde ein Zustand angesehen, bei dem die anfänglich glatt eingeformte Sohle, durch den Tidestrom derart umgebildet wurde, daß das Rauhigkeitsverhalten den oberhalb und unterhalb des beweglichen Abschnitts liegenden Modellteilen mit fester Sohle entsprach. Die Thw- und Tnw-Linien über den Längsschnitt des Flusses und der Verlauf der Wasserstände über die Tidedauer (Form der Tidekurven) stimmen dann mit den Sollwerten (Naturwerte) überein. Gleichzeitig wurden in Natur und Modell Sohlformen verglichen. Die Längen der Einzeldünen konnten aufgrund der Rauhigkeit des Einzelkornes nicht erreicht werden (Abb. 9). Über die Fläche gesehen, entspricht die Rauhigkeit jedoch den natürlichen Verhältnissen.

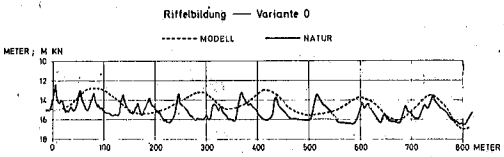

Abb. 9: Riffelbildung

In einem Längsschnitt (Profile 58 – 64) kann die Entwicklung der Sohle im Verlauf von 180 Modelltiden gezeigt werden. Im Modell wurden gegenüber der Ölpier Eintreibungen in das Fahrwasser festgestellt. Es ist die einzige Stelle, an der in diesem Bereich auch in der Natur gebaggert werden muß (Profil 60).

Auch sind die großen Kolktiefen in der Engstelle St. Margarethen zu erkennen (Profil 63). Es konnte eine gute Naturähnlichkeit erreicht werden, die sowohl auf hydraulischen Daten als auch auf charakteristischen morphologischen Eigenheiten des Versuchsbereiches (Dünenhöhen, Eintreibungen, Kolktiefen) gegründet ist (Abb. 10, obere Darstellung).

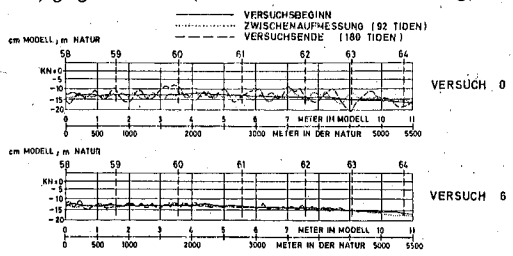

Abb. 10: Längsschnitt

Ein günstiger Vorschlag zur Entnahme der gewünschten Baggermenge ($8{,}5 \cdot 10^6\ m^3$) konnte mit der Erweiterung des Hauptrinnenquerschnitts entlang der Nordseite des Böschrückens im hydraulischen Modell ermittelt werden (Versuch 6). Diese Erweiterung kommt den hydraulischen Erfordernissen dieses Bereiches entgegen. Es konnte eine Stabilisierung der Hauptrinne erreicht werden. Es besteht die Möglichkeit, mit Hilfe der von O'Brien gefundenen Gleichgewichtsbeziehung zwischen Durchflußquerschnitt und Tidevolumen eines Ästuars, einen hydraulischen Optimalquerschnitt zu berechnen.

Die Beziehung lautet

$$F_{min} = F_{opt} = \eta \cdot v \cdot 10^{-4}$$

wobei η zwischen 0,5 und 0,7 variieren kann und von der Kornfraktion des Sohlmaterials abhängt. Für den inneren Mündungsbereich der Elbe kann $\eta = 0{,}6$ angenommen werden. Das Tidevolumen oberhalb km 688,1 beträgt $V \approx 360 \cdot 10^6\ m^3$. Dann ergibt sich mit

$$F_{opt} = 0{,}6 \frac{360 \cdot 10^6}{10^4}$$

$$= 21\,600\ m^3$$

und $$F_{vorh} = 20\,420\ m^3$$

ein $$\Delta F = 1\,180\ m^3$$

Die Erweiterung des Querschnitts im Querprofil 64 durch die Entnahme beträgt 1200 m³. Das entspricht etwa der notwendigen Vergrößerung des Durchflußquerschnitts nach O'Brien und bestätigt die Richtigkeit dieser Annahmen. Die Sohlevolutionen sind im Vergleich zum Ausgangszustand (Versuch 0) erheblich verringert (Abb. 10). Im Langzeitversuch traten größere Sohlverformungen in der Hauptrinne auf, der Böschrücken bleibt jedoch stabil und als natürliches Strombauwerk erhalten.

6. Eider

In den Proceedings des 23. Internationalen Schiffahrtskongresses wurden die Probleme, die zu den Gedanken der Eiderabdämmung geführt haben, eingehend beschrieben.

Durch umfangreiche Modellversuche wurde das Grundkonzept für die Abdämmung gefunden. So konnten z. B. Empfehlungen zur optimalen Trassenführung der Abdämmung in der Linie Hundeknöll — Vollerwiek (Abb. 11), zur Baufolge, Sielbreite, Schwellenhöhe, Schleusenlage und zum Betrieb der Wehrverschlüsse gegeben werden. Außerdem wurden die Einflüsse ermittelt, die die Abdämmung im Nah- und Fernbereich des Eiderästuars hervorruft.

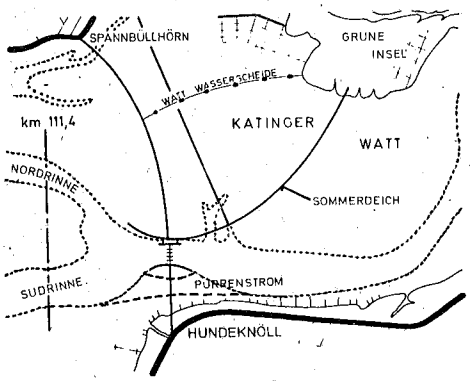

Abb. 11: Abdämmungslinie Hundeknöll – Vollerwick

Es ist schwierig, vergleichbare Messungen aus Modell und Natur zu bekommen. So werden im Modell Messungen bei einer sich immer unter gleichen Bedingungen wiederholenden Mittleren-, Spring- oder Sturmtidenfolge gemacht. In der Natur dagegen ist nahezu keine Tide der anderen gleich, und selbst wenn man versucht, die Meßergebnisse auf mittlere Verhältnisse umzurechnen, ist dieses fehlerbehaftet. Außerdem unterscheiden sich die Meßmethoden in Natur und Modell. So werden in der Natur Strömungsgeschwindigkeiten mit Schaufelrädern ca. 2 bis 3 m über der Sohle gemessen oder mit Ottflügeln die Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit in einer Meßlotrechten bestimmt. Im Modell wird dagegen i. a. wegen der Größe der Stauscheiben von Pendelströmungsmessern (1,5 x 4,0 cm) bzw. der Propellerdurchmesser von Mikroflügeln (1,0

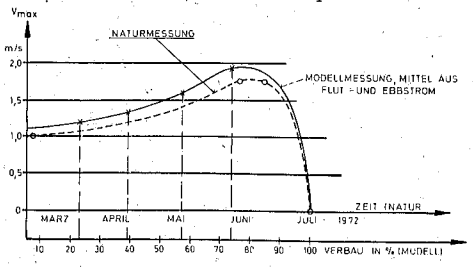

Abb. 12: Verbau des Purrenstroms

bis 3,0 cm) eine Punktmessung gemacht, d. h. die Strömungsgeschwindigkeit wird in einem Meßpunkt in einer möglichst repräsentativen Tiefe aufgenommen.

Wegen der obengenannten Schwierigkeiten und weil häufig Naturmessungen überhaupt fehlen, kommt man außerordentlich selten zu einer Relation von Natur- und Modellwerten. Um so erfreulicher ist es, daß man nach Fertigstellung des Sperrwerks eine große Zahl von Meßergebnissen der Modellversuche mit Naturmessungen vergleichen konnte,

a) Geschwindigkeiten beim Schließen des Purrenstromes (Abb. 12).

b) Tidekurven im Wehrbereich
Nach der Abdämmung zeigt sowohl die Modell- als auch die Naturtidekurve im letzten Viertel des Flutastes für ca. 1 Stunde erheblich verlangsamten Anstieg, um dann in einer weiteren Stunde verstärkt zum Thw aufzulaufen (Abdämmungs- oder Reflexionseffekt).

c) Maximale Fließgeschwindigkeiten in den Sperrwerksöffnungen. Ein Vergleich der maximalen Strömungsgeschwindigkeiten ist nur global möglich, da die Naturwerte von meteorologischen Verhältnissen und jeweiligem Tideverlauf abhängig sind.

In Tabelle 4 sind die im Modell ermittelten maximalen Geschwindigkeiten den Naturmessungen gegenübergestellt.

Tabelle 4

Lfd. Nr.	Bezeichnung	Flut [cm/s]	Ebbe [cm/s]	Bemerkungen
1	Modell, mittlere Tide	296	285	4. Öffnung [4]; [6]
2	Modell, Springtide	322	310	[4]; [6]
3	Natur, Springtide	300 bis	350	[1]
4	Natur	360	320	3. Öffnung [3]

d) Maximale Durchflußmengen
Einen Vergleich der maximalen Durchflußmengen bei voll geöffneten Wehrverschlüssen zwischen Natur und Modell zeigt Tabelle 5.

Tabelle 5

Bezeichnung	max. Durchfluß [m³/s]		Tidewassermenge [106 M3]		Bemerkungen
	Flut	Ebbe	Flut (T_f)	Ebbe (T_e)	
Modell	3580	2800	42,30	42,18	Springtide [4] Morphologie 1964 [6]
	Kubizierung				
Natur	3200	2800			Springtide [3] Morphologie 1972

e) Aufteilung der Tidewassermenge im Bereich Nord- und Südrinne. Die Aufteilung der Tidewassermengen T_i und T_e auf Nord- und Südrinne ist in Tabelle 6 in Prozenten angegeben. Die Abweichung zwischen Natur und Modell beträgt 4 %. Bei Ebbe stimmen die Prozentzahlen überein.

Tabelle 6

Sperrwerk km 109,9; Wehrverschlüsse voll geöffnet

Tidephase	Südrinne [10^6 m^3]	%	Nordrinne [10^6 m^3]	%	S + N [10^6 m^3]	Bemerkungen
Flut (Modell)	20,94	47	23,54	53	44,48	Meßquerschnitt km 111,4
Flut (Natur)	22,10	43	29,66	57	51,76	
Ebbe (Modell)	22,15	45	26,70	55	48,85	
Ebbe (Natur)	24,30	45	29,31	55	53,61	

Die maximalen Abweichungen Modell- und Naturwert liegen etwa bei 10 %. Die hier erreichte gute Übereinstimmung bestärkt allgemein die Aussagekraft von Modellversuchen.

7. Schlußbemerkung

Im Zeichen des steigenden Schiffsverkehrs und in jüngster Vergangenheit wachsender Schiffsgrößen ist die Regulierung der Wasserstraßen eine unabänderliche Notwendigkeit. Hierbei kann der Modellversuch einen erheblichen Beitrag leisten.

Schrifttumsverzeichnis

Bundesministerium für Verkehr: Deutsche Berichte zum XXIII. Internationalen Schiffahrtskongreß, Ottawa 1973

Bundesministerium für Verkehr: Jahresberichte des BMV, Bonn 1973

Bundesanstalt für Wasserbau: Tidewellenberechnung für die Jade, Hamburg 1971, unveröffentlicht

Bundesanstalt für Wasserbau: Jade-Weser Modell, Naturähnlichkeit 1965, Hamburg 1975, Bericht 2, unveröffentlicht

Bundesanstalt für Wasserbau: Morphologische Veränderungen im Gatjebogen, Modellversuche, Hamburg 1973, unveröffentlicht

Cordes, F.: Eiderdamm Hundeknöll–Vollerwiek, Bautechnik 11, 12/1970; 9, 10, 11/1971; 7, 8/1972

Cordes, F.; Knieß, H. G.: Meßprogramm Eiderdamm, Wasserwirtschaft 7/1972

Giese, E.; Harten, H.; Vollmers, H.: Experience with Movable Bed Tidal Models; Coastel Engineering Conference Copenhagen, 1974

Gehrig: Über Fragen der naturähnlichen Nachbildung der Feststoffbewegung in Modellen; Mitteilungen des Franzius-Instituts für Grund- und Wasserbau d. Technischen Universität Hannover 1967, Heft 29

Harten, H.: Abdämmung der Eider, Modellversuche im Tidemodell; Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, 1970, Nr. 40

Harten, H.: Modelluntersuchungen für Regulierungsmaßnahmen im Tidegebiet, Vortragsveranstaltung der Bundesanstalt für Wasserbau 1969, unveröffentlicht

Harten, H.: Model Trials with Movable Bed Section for Improving the Main Navigational Channel of the Elbe River; XVIth Congress of the IAHR, Sao Paulo, Brazil, 1975

Harten, H.; Knieß, H. G.: Eiderdamm, Natur- und Modellmessungen, Wasserwirtschaft, Heft 12, 1976

Hensen; Wegener: Ausbau der seewärtigen Zufahrten zu den deutschen Nordseehäfen; Hansa, Hamburg 1971, Nr. 15

Hovers, G.: Der Einfluß von Strombauwerken auf die morphologische Entwicklung der Stromrinnen im Mündungsgebiet eines Tideflusses, untersucht am Beispiel der Außenweser; Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, 1973, Nr. 34

O'Brien: Equilibrium Flow-Areas of Inlets on Sandy Coasts, Journal of the Waterways and Harbor Division, Proc. of American Society of Civil Engineers, 1969

Rohde, H.; Timon, A.: Die Versandung der Eider; Weiterführung der Untersuchungen und künstlicher Spülbetrieb; Wasserwirtschaft 1969, Heft 6 und 8

Sindern, J.; Harten, H.: Sanbewegung und künstlicher Spülbetrieb in der Eider; Proc. 23. International Navigation Congress, Ottawa 1973

Vollmers, H.: Großflächige Tidemodelle. Das Gas- und Wasserfach, 42, 1969

Vollmers, H.; Giese, E.: Elbe Tidal Model with Movable Bed; 13th International Conference on Coastel Engineering, Vancouver, 1972

Yalin: On the Geometrically Similar Reproduction of Dunes in a Tidal Model with Movable Bed; 13th International Conference on Coastel Engineering, Vancouver 1972