

## Abteilung II — Seeschifffahrt

### 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 Schiffsstraßen müssen Unterhaltungs- und Ausbaumaßnahmen verstärkt durchgeführt werden. Diese Maßnahmen umfassen im wesentlichen den Bau von Bühnen, Längswerken, Seeschleusen, Sperrwerken, die Verlegung von Schiffsrinnen, 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 t dw 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 Korrekturen 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 Fahrwasserhältnisse 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 Schifffahrt 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 richtungweisend 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.

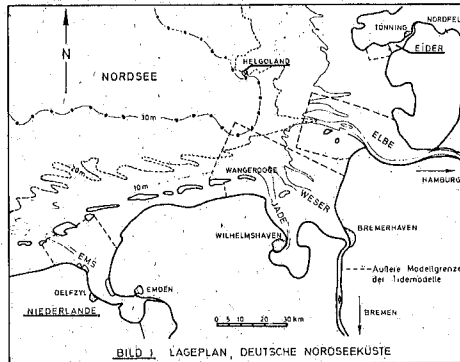


Abb. 1: Lageplan, Deutsche Nordseeküste

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 Schifffahrtsrinne. 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 Emdener Fahrwassers binnenseitig und seeseitig als erfolgversprechend angesehen werden kann. Durch den Abschluß des Emdener Fahrwassers bietet sich die Möglichkeit, mit einer großflächigen Aufspülung des Bereichs Geiseleitwerk neues Hafens- und Industriegebiet zu schaffen (Abb. 2).

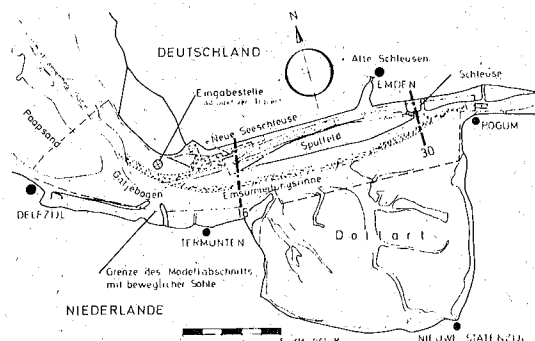


Abb. 2: Lageplan, Ems im Bereich Delfzijl + Emden

Tabelle I

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

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 Emders 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 Dollarttrinne (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

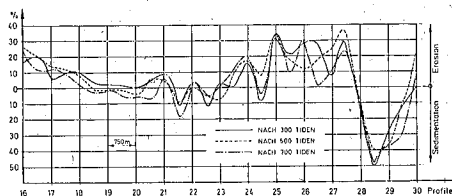


Abb. 3: Veränderung des Gesamtquerschnitts im Dollart

Gatjebogen wichtig ist. Die Arbeitsmethoden und die Meßtechnik mit radioaktivem Granulat wird eingehend 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 Fahrinne 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 Fahrinne 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 Löschrücke, 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		max. Schiffsgrößen		mittl. Tragfähigkeit [tdw]	Baggermenge [Mill m <sup>3</sup> ]	Bemerkungen
		bei der Ölpier [m]	bei der Ansteuerungstonne „Jade“ [m]	Tiefgang voll abgeladen [m]	[Fuß]			
12	1958-63	12,0	12,0	13,5	(44)	60 000	16	geringste Tiefe vor Ausbau ca. SKN - 10 m
13	1964-67	13,0	14,1	14,5	(47,5)	90 000	20	
(15	1967-69	15,0	16,1	16,8	(55)	170 000	47,4) <sup>77</sup>	
(17	1969-71	16,7	17,9	18,5	(61)	200 000	29,6)	
18,5	1971-73	18,5	19,7	20,0	(65,5)	250 000	(61)	

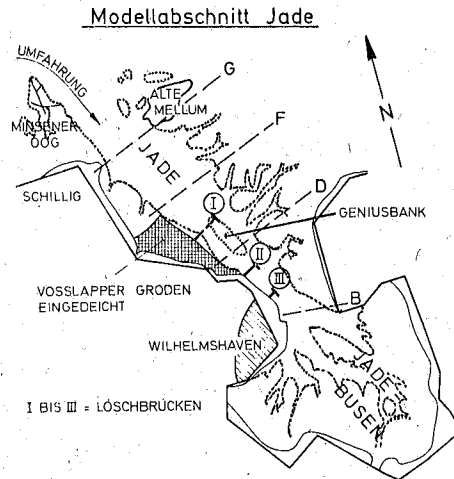


Abb. 4: Lageplan, Jade

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.

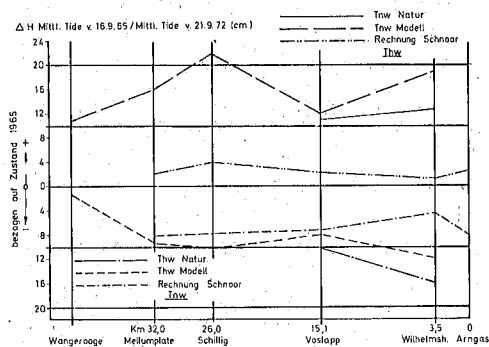


Abb. 5: Differenzwasserstände

In Tabelle 3 ist der Faktor  $\mathcal{K} = \frac{V_{eM}}{V_{fM}}$  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:

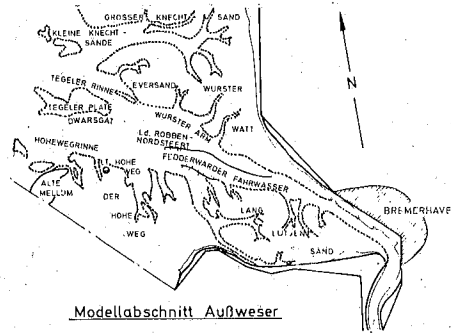
1. Die Geniusbank ist ein Mittelgrund, der möglicherweise durch den Ebbstrom in das Fahrwasser abgedrängt wird (Abb. 4).
2. Die Umfahrung Minsener Oog ist eine starke Strömungs- und Fahrwasserkrümmung (Abb. 4).
3. Das Fahrwasser der Außenjade, das im Bereich der Platenwanderung liegt, muß stellenweise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





Modellabschnitt Außenweser

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 Korrekturen 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 Leitdamms 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).

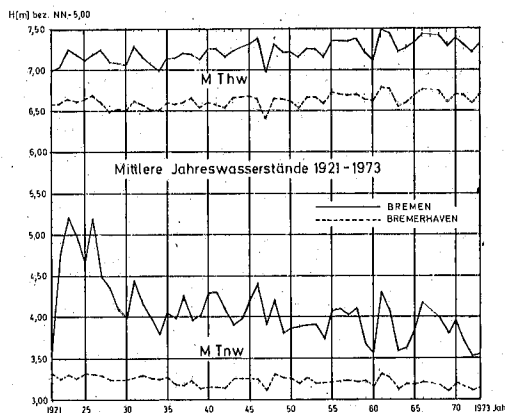


Abb. 7











