

## Abteilung II — Seeschifffahrt

### Thema 2:

**Mittel zur Bekämpfung der Sandwanderung längs der Küsten, um den Schutz der Strände, Dünen, Flußmündungen und Hafeneinfahrten sicherzustellen.  
Herstellung von künstlichen Stränden.**

Dipl.-Ing. Eberhard Garrelts, Ltd. Regierungsbaudirektor Wasser- und Schiffahrtsdirektion Aurich; Dipl.-Ing. Hermann Harten, Bundesanstalt für Wasserbau; Dr.-Ing. Günter Hovers, Oberregierungsbaurat Wasser- und Schiffahrtsamt Bremerhaven; Dr. rer. nat. Fritz Lucht, Wasser und Schiffahrtsdirektion Hamburg; Dipl.-Ing. Horst Oebius, Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Berlin; Dipl.-Ing. Friedrich Ohlmeyer, Bundesanstalt für Wasserbau; Dr.-Ing. Hans Rohde, Ltd. Regierungsbaudirektor Bundesanstalt für Wasserbau; Dipl.-Ing. Joseph Sindern, Regierungsbaudirektor Wasser- und Schiffahrtsdirektion Kiel; Dr.-Ing. Hans-Joachim Vollmers, Regierungsbaudirektor Bundesanstalt für Wasserbau; Dipl.-Ing. Volker Wigand, Regierungsbaudirektor Wasser- und Schiffahrtsamt Wilhelmshaven.

### Thema des Berichtes:

Die Ausbauten der Mündungstrecken der deutschen Tidenströme und deren Einfluß auf die Sandbewegung.

### Zusammenfassung

Die Tideästuarien an der deutschen Nordseeküste sind die Zufahrten zu den wichtigsten deutschen Seehäfen. Mit Rücksicht auf die wachsenden Schiffsgrößen und die Zunahme der Zahl der verkehrenden großen Schiffe mußten diese Wasserstraßen im Laufe der Zeit ausgebaut werden. In der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts wurde zunächst mit dem Ausbau der Tideflüsse oberhalb ihrer Mündung begonnen, in der Elbe zwischen Hamburg und Stadersand, in der Weser zwischen Bremen und Bremerhaven, in der Ems zwischen Emden und der Knock. Die Entwicklung des Schiffsverkehrs machte immer neue Ausbauten mit weiter gesteckten Ausbauzielen notwendig. Dabei erstreckten sich die Ausbaumaßnahmen weiter stromabwärts bis in die Mündungstrecken, die seewärtigen Bereiche der Ästuarien.

Für die Erhaltung der Ausbauwassertiefen spielt besonders in den seewärtigen Bereichen der Ästuarien die Sandbewegung eine erhebliche Rolle. Der Boden der südlichen Nordsee, in die die deutschen Tidenströme münden, besteht vorwiegend aus feinem Sand. Aus dem Sandreservoir der südlichen Nordsee wird aus der küstenparallelen Sandbewegung unter dem Einfluß der Gezeitenströmungen Sand in die Ästuarien eingetrieben. Dieser Sand gelangt zum Teil weit in die Tidenströme hinein, kommt zur Ablagerung und muß durch aufwendige Unterhaltungsbaggerungen beseitigt werden. Im Verhältnis zu dem von See eingetriebenen Sand spielt der aus den Niederschlagsgebieten oberhalb der Tidegrenzen der Ströme herantransportierte Sand besonders in den seewärtigen Bereichen der Ästuarien nur eine untergeordnete Rolle. Umfang und Art der Sandbewegung und -ablagerung sind in den einzelnen deutschen Tideästuarien unterschiedlich. Sie sind abhängig von den morphologischen und hydrologischen Bedingungen des jeweiligen Ästuars.

In der vorliegenden Arbeit werden die hydrologischen und morphologischen Verhältnisse der einzelnen deutschen Tideästuarien und deren Entwicklung geschildert. Es wird über die Maßnahmen berichtet, die in den seewärtigen Bereichen der Ästuarien bisher ausgeführt oder geplant sind, um die Sandbewegung zu beeinflussen und damit günstige Fahrwasserverhältnisse mit möglichst wirtschaftlichem Unterhaltungsaufwand zu erhalten. Im Abschnitt 2 (Oebius, Ohlmeyer, Vollmers) werden Ausführungen über allgemeine Erkenntnisse zur Sandbewegung, besonders in Ästuarien, ihre Kontrolle und die Möglichkeiten ihrer Beeinflussung durch künstliche Maßnahmen gemacht. Es werden Kriterien angegeben, die für die verschiedenen Erscheinungsformen der Gewässersohle maßgebend sind. Eine physikalische Deutung ist bisher noch nicht möglich. Bei der Beeinflussung der Sandbewegung zur Verbesserung der Fahrwasserverhältnisse wird zwischen der direkten Methode der Baggerung und der indirekten Methode unterschieden. Bei der indirekten Methode soll durch Baumaßnahmen auf die natürlichen Kräften unterworfenen Querschnittsbildung Einfluß genommen werden. Dabei ist zu unterscheiden zwischen den klassischen Mitteln der Strombauwerke und anderen Mitteln zur Beeinflussung der Sandbewegung, die in besonders gelagerten Fällen angewandt werden können.

Die Baggerung als Methode für Ausbau und Unterhaltung wird sich auch in den seewärtigen Bereichen der Ästuarien wohl nie ganz vermeiden lassen. Es muß aber das Ziel sein, durch Baumaßnahmen die natürliche Entwicklung so zu lenken, daß ein Zustand erreicht wird, der es erlaubt, eine für die Schifffahrt günstige stabile Lage der Fahrrinnen bei ausreichender Wassertiefe mit wirtschaftlich vertretbarem Baggeraufwand zu erhalten. Dabei wird das Maß der Vertretbarkeit des Aufwandes von der Bedeutung der betreffenden Schifffahrtstraße abhängig sein. Es dürfte auch bei dem heutigen Stande der Naßbaggertechnik aussichtslos sein, im äußeren Bereich eines Ästuars eine Fahrrinne völlig gegen die natürlichen Entwicklungstendenzen allein durch Baggerung halten zu wollen.

Zur Stabilisierung der Lage von Fahrrinnen in den Mündungstrecken der deutschen Tideströme sind seit dem Ende des vorigen Jahrhunderts Strombauwerke — Systeme von Leitdämmen und Buhnen — gebaut worden. Die ersten derartigen Bauwerke wurden an der Außenweser — Abschnitt 3 (Hovers) — errichtet. Von größter Bedeutung für die Entwicklung der Fahrwasserverhältnisse war der Entschluß, von 1922 an den westlichen Arm der Stromspaltung als Fahrwasser auszubauen und das bisher benutzte Fahrwasser im östlichen Arm aufzugeben. Diesem Entschluß waren umfangreiche hydrologische Untersuchungen vorausgegangen, die die Tendenz der natürlichen Entwicklung erkennen ließen. Die damalige Entscheidung hat sich als richtig erwiesen.

Das System der Strombauwerke an der Außenweser ist mit den Forderungen an eine Verbesserung der Fahrwasserverhältnisse immer mehr ausgebaut worden und soll in Zukunft noch erweitert werden. 1909 bis 1937 wurde an der seewärtigen Einfahrt der Jade — Abschnitt 4 (Wigand) — ein System von Strombauwerken auf Minsener Oog errichtet, das die Verschiebung der tiefen Rinne nach Westen aufhalten und einen Teil des west-östlich transportierten Sandes festhalten sollte. Diese Ziele konnten weitgehend erreicht werden. Die Vertiefungen des Jedefahrwassers nach 1950 wurden ausschließlich durch Baggerungen erreicht. Dabei sind die besonderen Verhältnisse, die durch das große „Spülbecken“ des Jadebusens gegeben sind, von ausschlaggebender Bedeutung. Die Strombauten an Außenweser und Jade sind bisher vorwiegend auf Grund empirischer Überlegungen nach intensiven hydrologischen Untersuchungen unternommen worden. Für die Planung weiterer Ausbauten ist ein Jade/Außenweser-Modell im Aufbau.

Die Fahrwasserverhältnisse der Außenelbe — Abschnitt 5 (Lucht, Vollmers) — waren bis zum 2. Weltkrieg für die Schifffahrt ausreichend. Erst 1938 wurde mit dem Bau eines Strombauwerkes, dem 9,25 km langen Leitdamm Kugelbake begonnen. Die hauptsächlichen Baumaßnahmen wurden von 1955 bis 1968 ausgeführt. Das Ziel der Stabilisierung des Fahrwassers konnte erreicht werden. Eine Verlängerung des Dammes ist vorgesehen. Im Verlaufe der Bauausführung des Leitdammes an der Elbemündung wurden einzelne Bauabschnitte durch Versuche an einem hydraulischen Modell mit fester Betonsole überprüft. Die geplante Verlängerung des Leitdammes und die günstigste Linienführung der Mittelrinne wird an einem Modell mit beweglicher Sohle aus gekörntem Kunststoff untersucht.

Die Eider — Abschnitt 6 (Harten, Sindern) — hat für die Schifffahrt nur noch eine geringe Bedeutung. Die Abdämmung der Eider, die 1936 aus landeskulturellen Gründen erfolgte, bewirkte eine außerordentlich starke Versandung ihrer Tidestrecke, die sich allmählich bis in den Mündungsbereich fortsetzte. Ein mündungsnahes Sperrbauwerk, das die Eiderniederung vor Sturmfluten schützen soll, ist zurzeit in Bau. Um Schifffahrt und Vorflut aufrecht zu erhalten, wurde mit Hilfe von Modellversuchen eine Spülmethode entwickelt: Durch Speicherung der gesamten Tidewassermenge und ihren Auslaß bei Ebbe nach einer Rückhaltezeit soll ein Spülstrom erzeugt werden, der unterhalb des Sperr- und Schleusenbauwerkes eine ausreichende Rinne offenhält und oberhalb eine weitere Versandung verhindert. Mit dem Spülbetrieb kann voraussichtlich 1973 begonnen werden.

In der Ems — Abschnitt 7 (Garrelts, Ohlmeyer) — sind 2 voneinander sehr unterschiedliche Abschnitte vorhanden. Auf den unteren Abschnitt wirkt sich die Wassermenge des Dollart so aus, daß hier die notwendigen Fahrwassertiefen mit vertretbarem Baggeraufwand ohne zusätzliche Strombaumaßnahmen gehalten werden können. Große Massen müssen dagegen im oberen Abschnitt zwischen Emden und der Knock (Abb. 1), dem Emdener Fahrwasser, ständig gebaggert werden. Um den Baggeraufwand herabzumindern, sind in diesem Abschnitt Strombauwerke ausgeführt worden. Mit Hilfe von Modelluntersuchungen wurden Überlegungen angestellt, die Fahrwasserhältnisse der Ems zu verbessern und zugleich eine Einschränkung der Baggermassen zu erreichen. Dabei wurden sowohl Leitwerke und Bühnen im unteren Abschnitt als auch ein Spülbetrieb in dem oberen Abschnitt und die Verlagerung der Brackwasserzone durch Umleitung der Ems durch den Dollart untersucht. Die Versuche und Planungen sind noch nicht abgeschlossen.

Die Ausführungen des Berichtes zeigen, daß es allgemein gültige Richtlinien für den Ausbau von Tideströmen nicht gibt. Baggerungen und Bauwerke zur Beeinflussung der Sandbewegung müssen als Ausbaumittel einander sinnvoll ergänzen. Welche Maßnahmen im einzelnen für den Ausbau jeweils angewendet werden, ist in starkem Maße von den morphologischen und hydrologischen Verhältnissen des betreffenden Ästuars abhängig. Wichtige Hilfsmittel für die Ausbauplanungen, auf die nicht verzichtet werden kann, sind wasserbauliche Modellversuche, bei denen die Entwicklung zu Modellen mit beweglicher Sohle geht, sowie in Zukunft in verstärktem Maße mathematisch-numerische Berechnungen. Grundlage aller Ausbauplanungen ist aber die genaue Untersuchung der natürlichen morphologischen und hydrologischen Verhältnisse der betreffenden Ästuarien, um großräumige Entwicklungen zu erkennen und die künstlichen Maßnahmen diesen Tendenzen anpassen zu können. Außerdem ist die Kenntnis der Mechanismen der Feststoffbewegung in den Ästuarien sowie die gegenseitige Beeinflussung aller hydrologischen Faktoren von ausschlaggebender Bedeutung. Diese Kenntnisse sind noch lückenhaft. Es bedarf hier noch erheblicher grundlegender Forschungen durch Untersuchungen in der Natur, im Labor und in der Theorie.

**Inhalt**

	Seite
1. Vorbemerkungen .....	200
2. Grundlegende Betrachtungen .....	202
2.1. Erscheinungsformen der Gewässersohle .....	202
2.2. Kontrolle der Sandbewegungen .....	205
2.3. Beeinflussung der Sandbewegungen .....	206
3. Der Ausbau der Außenweser .....	208
3.1. Das Stromgebiet der Außenweser .....	208
3.2. Der Ausbau der Außenweser bis zum Jahre 1922 .....	209
3.3. Die Ausbaumaßnahmen von 1922 bis zur Gegenwart .....	210
4. Der Ausbau des Jadefahrwassers .....	212
4.1. Die natürlichen Verhältnisse der Jade .....	212
4.2. Die Ausbaumaßnahmen bis 1939 .....	213
4.3. Die Entwicklung seit 1945 .....	215
5. Die Maßnahmen in der Außenelbe .....	216
5.1. Das Stromgebiet der Außenelbe .....	216
5.2. Der Leitdamm Kugelbake .....	217
5.3. Modellversuche .....	219
6. Die Versandung der Eider und die Maßnahmen zu ihrer Beeinflussung .....	220
6.1. Die Entwicklung der Verhältnisse .....	220
6.2. Die Maßnahmen zur Beeinflussung der Sandbewegung .....	222
7. Ausbauten und Ausbauplanungen an der Ems .....	224
7.1. Die bisher ausgeführten Ausbaumaßnahmen .....	224
7.2. Untersuchungen für künftige Ausbauten .....	225
8. Folgerungen .....	227

**1. Vorbemerkungen**

Die Mündungsstrecken der deutschen Tidenströme (Abb. 1) sind als Zufahrten zu den wichtigsten deutschen Seehäfen seit dem Ende des vorigen Jahrhunderts durch immer weitere Ausbauten den ständig wachsenden Schiffsgrößen angepaßt worden (20). Durch die Ausbauten wurde in starkem Maße in die Sandbewegungsvorgänge eingegriffen, da der Boden der südlichen Nordsee im Mündungsbereich der deutschen Tidenströme vorwiegend aus Feinsand besteht (11), der durch die in den Ästuarien wirkenden natürlichen Kräfte — z. B. Gezeitenströmung und Wellen — bewegt wird und Umlagerungen unterworfen ist. Daher ist für die Ausbauten wie auch für die Erhaltung der Ausbautiefen die Kenntnis der Sandbewegung und ihrer Mechanismen von großer Bedeutung.



Der vorliegende Bericht behandelt die in den einzelnen Tideästuarien (Abb. 1) ausgeführten und geplanten Ausbaumaßnahmen. Die jeweiligen Ausbaumethoden, die nach vorausgegangenen genauen Naturbeobachtungen, Modellversuchen und theoretischen Berechnungen zur Anwendung kamen, sind stark von den unterschiedlichen hydrologischen und morphologischen Verhältnissen der einzelnen Ästuarien abhängig. Deshalb sind in Tabelle 1 einige hydrologische Daten der deutschen Tideästuarien zusammengestellt.

## 2. Grundlegende Betrachtungen

### 2.1. Erscheinungsformen der Gewässersohle

v	Strömungsgeschwindigkeit .....	[cm/s]
u <sub>*</sub>	Schubspannungsgeschwindigkeit .....	[cm/s]
L	Länge .....	[cm]
D	charakteristischer Korndurchmesser .....	[cm]
ρ <sub>s</sub> ; ρ	Dichte des Materials, des Wassers .....	[g/cm <sup>3</sup> ]
ρ'	relative Dichte des Materials = $\frac{\rho_s - \rho}{\rho}$ .....	[1]
g	Normfallbeschleunigung .....	[cm/s <sup>2</sup> ]
ν	kinematische Zähigkeit .....	[cm <sup>2</sup> /s]
D <sub>*</sub>	sedimentologischer Durchmesser = $\left(\frac{\rho' \cdot g}{\nu^2}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot D$ .....	[1]
Re <sub>*</sub>	Reynolds-Zahl = $\frac{u_* \cdot D}{\nu}$ .....	[1]
Fr	Froude-Zahl = $\frac{v}{\sqrt{g \cdot L}}$ .....	[1]

Der Feststofftransport in Tideregimen gehört zu den besonders komplexen Vorgängen, da Beschleunigung und Verzögerung der Strömung Erosion und Sedimentation beeinflussen. Formelmäßige Zusammenhänge dafür sind bis heute nicht bekannt. Der Feststofftransport im Gewässer vollzieht sich sowohl als Transport in Suspension als auch als Sohltransport. Es ist zwischen dem Transport bei ebener Sohle und dem Transport in Transportkörpern zu unterscheiden. Die Transportkörper als Erscheinungsformen der Gewässersohle sind dabei von ebenso großer Bedeutung wie der Transportvorgang selbst. Die Abmessungen der Sohlformen können bei der Beurteilung der Solltiefe für die Schifffahrt eine wesentliche Rolle spielen.

Für die Klassifizierung der Sohlformen gibt es in den verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen auch verschiedene Begriffe, die außerdem in den einzelnen Ländern unterschiedlich sind. Unter der Grundvoraussetzung, daß das Auftreten der verschiedenen Sohlformen ein physikalischer Vorgang ist, lassen sich allgemein vier Stadien der Sohle eines offenen Gerinnes unterscheiden:

- a) Riffel .....
  - b) Ebene Sohle, flaches Bett .....
  - c) Dünen, Großriffel .....
  - d) Antidünen .....
- (Fr ≤ 1)  
(Fr < 1)  
(Fr < 1)  
(Fr ≥ 1)

	Niederschlagsgebiet		Oberwasserzufluß				Entfernung und Fahrwassertiefe			MThb 1956/65	mittlere Flut- wasser- menge T <sub>f</sub>
	Gesamt F <sub>N</sub>	Tidegeb. F <sub>NT</sub>	MQ	NNQ	HHQ	$\frac{NNQ}{HHQ}$	Von See bis ...	Länge	vor- handene Wasser- tiefe unter SKN		
	km <sup>2</sup>	km <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s		km	m	cm	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
Ems	15 030	5 870	80	Versen		$\frac{1}{240}$	Möwensteert	35	11,5	229	780
				Emden	70		8,5	298	45		
				Herbrum	125		3,2	174	0		
Jade	1 100	1 100	~0	~0	~0	—	Wilhelmshaven	47	17,9/16,7	369	400
Weser	46 340	8 130	310	Intschede		$\frac{1}{70}$	Bremerhaven	60	12,0	345	140
				Bremen	120		8,0	341	15		
				Hemelingen	130		3,5	320	0		
Elbe	148 500	13 560	700	Darchau		$\frac{1}{30}$	Cuxhaven	36	12,0	287	650
				Hamburg	135		12,0	252	70		
				Geesthacht	173		2,5	95	0		
Eider	2 075	343	(14)	Nordfeld		—	Hundeknöll	25	2,5	312	35
				Tönning	38		2,0	302	12		
				Nordfeld	59		2,0	225	0		

Tabelle 1: Hydrologische Kennwerte der deutschen Tideästuarien

„Riffel“ (Kleinformen) sind unregelmäßige Sohlnebenheiten. „Dünen“ (Großformen), vielfach auch Großriffel genannt, haben eine regelmäßige Form, die die Richtung der überwiegenden Strömungskomponente klar erkennen läßt. Daneben kommt auch die Kombination „Dünen, von Riffeln überlagert“ vor. „Antidünen“ treten bei überkritischer Strömung auf und bewegen sich gegen die Strömungsrichtung.

Eine physikalische Erklärung für das Auftreten der verschiedenen Sohlformen ist bis heute nicht bekannt. Es wurden aber von vielen Autoren Kriterien entwickelt, die eine Abgrenzung der Erscheinungsform in Abhängigkeit von dimensionslosen Parametern gestatten. Auf die zahlreichen Möglichkeiten kann hier nicht eingegangen werden. Eine gute Zusammenstellung der meisten bisher bekannten Methoden wurde in (12) gegeben.

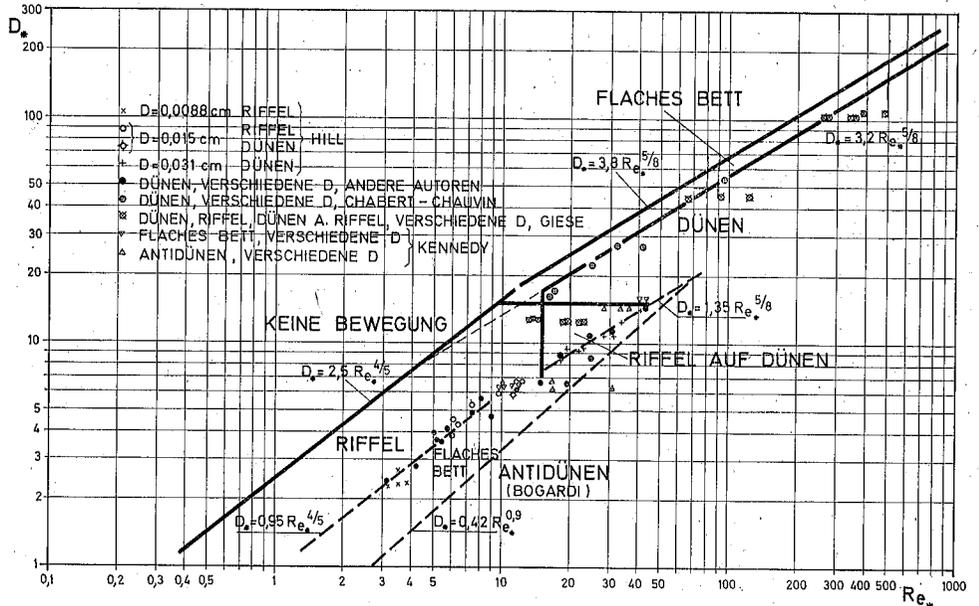


Abb.2: Die Erscheinungsformen der Gewässersohle in Abhängigkeit von dimensionslosen hydraulischen Parametern bei richtungskonstanter Strömung

Eine praktische Möglichkeit zur Definition der Erscheinungsform läßt sich mit den Parametern  $Re_*$  und  $D_*$  aufzeigen. Die in (1) und (23) genannten Kriterien sind in Abb. 2 enthalten. Man erkennt, daß der Korndurchmesser bei der Abgrenzung der einzelnen Bereiche eine wesentliche Rolle spielt. Unterhalb von  $D_* \sim 8$  ( $\cong D \sim 0,03$  cm) treten nur „Riffel“ auf, während im Bereich  $8 < D_* < 15$  „Riffel“ und „Riffel auf Dünen“ auftreten können. Dieser Bereich entspricht einer Korndurchmesserskala  $0,03$  cm  $< D < 0,06$  cm. Mit diesen Kriterien läßt sich für die deutschen Tidenströme folgende Übersicht aufstellen:

Strom	D (cm)	Sohlenbeschaffenheit
Ems	0,02	Kleinformen
Jade	0,05	Großformen
Weser	0,05	Großformen
Elbe	0,05	Großformen
Eider	0,01	Kleinformen

Es muß aber gesagt werden, daß die vorstehenden Bemerkungen nur allgemeine Hinweise geben können, da die bisherigen Untersuchungen lediglich für richtungskonstanten Abfluß gelten. Außer den genannten Sohlformen sind als Transportkörper besonderer Art in den Ästuarien noch die Barren, Platen oder Sände zu erwähnen, die für die Morphologie der Ästuarien eine große Bedeutung haben, und deren Verlagerungen sich in relativ großen Zeitspannen vollziehen.

## 2.2. Kontrolle der Sandbewegungen

Die Kontrolle des Feststofftransports ist eine wichtige Voraussetzung für die Planung und Durchführung von Baumaßnahmen zum Schutz und Erhalt der Schiffahrtswege. Es ist bisher nicht gelungen, Methoden und Geräte zu entwickeln, die die modernen Anforderungen bezüglich Genauigkeitsgrad und Aussagewert in jeder Weise erfüllen. Es bleibt daher vorerst nur eine Kombination mehrerer Methoden übrig. Ganz allgemein gibt es zwei Möglichkeiten, die Sandbewegung zu kontrollieren:

1. Naturmessungen mit geeigneten Verfahren
2. Modellversuche

Zur Kontrolle des Sedimenttransportes in der Natur gibt es drei Methoden:

- a) Direkte Messung mit geeigneten Geräten
- b) Messung mit Leitstoffen
- c) Vergleichende Gebietsaufnahme.

Die erste Methode wird in Binnenregimen praktiziert, im Tidegebiet läßt sich die Sohlbewegung kaum ungestört feststellen.

Die bekannteste Methode der Sedimentbewegungskontrolle im deutschen Küstenbereich ist zur Zeit die der Messung mit radioaktiven und lumineszierenden Tracern (16). Bei radioaktiven Leitstoffen wird bisher meistens die Oberflächenmarkierung eines Naturesandes angewandt. Im allgemeinen hat dieses Verfahren den Nachteil, daß kein definierter Zusammenhang zwischen der Aktivität des Kornes und seiner Masse besteht, um die Transportgeschwindigkeit des Kornes exakt festzulegen. Volumenproportionale Markierung, z. B. durch Thermodiffusion, ist bisher für die benötigten Sandmengen und die Gleichzeitbedingung der Aktivierung nicht möglich. Ein anderes, bereits getestetes Verfahren nach der Zählratenbilanz von SAUZAY (in [16]) hat den Nachteil eines sehr großen technischen Aufwandes, der in keinem Verhältnis zum Ergebnis steht. Dennoch ist diese Methode zur Zeit die einzige, die auch quantitative Aussagen über die Sandbewegung gestatten würde, da mit ihrer Hilfe auch die Dicke der bewegten Schicht ermittelt werden kann. An einer Verbesserung dieses Verfahrens wird gearbeitet. Luminoforen als Leitstoffe haben den Vorteil, daß mit ihnen das Sediment zeitunabhängig und verschiedenartig markiert werden kann. Da die Verfolgung des markierten Materials allerdings nur mit Hilfe von Bodenproben möglich ist, ist dieses Verfahren ziemlich zeitaufwendig. Bei Entnahme von ungestörten Bodenproben jedoch gestattet diese Methode einen Einblick in die Form des Sedimenttransportes, wenn verschiedenfarbige Luminoforen in definierten Zeitabständen nacheinander eingebracht werden. Zusätzliche Informationen lassen sich durch sedimentpetrografische und granulometrische Untersuchungen gewinnen.

Vergleichende Gebietsaufnahmen können zur Kontrolle der Sedimentbewegung herangezogen werden. Die Höhenaufnahme erfolgt dabei durch Lotung (Echolot) oder bei trockenfallenden Flächen mit Hilfe nivellitischer Aufmessung oder Luftbildkartierung nach dem Wasserlinienverfahren. Aus der Verschiebung der Höhenlinien oder aus Tiefenänderungsplänen (14) kann in Verbindung mit einer planimetrischen Auswertung auf

den langfristigen Sedimenttransport geschlossen werden. Zeit-Weg-Linien geben für ein bestimmtes Profil die Veränderung der Höhenlinien als Funktion von Zeit und Entfernung von einem Nullpunkt (Weg) (7).

Modellversuche sind ein Hilfsmittel zur Kontrolle des Feststofftransports. Während Vorgänge mit richtungskonstantem Abfluß schon länger durch Modelle simuliert werden, ist diese Technik für großflächige Untersuchungen von Tidedrömen nicht so geläufig, da die Übertragbarkeit auf Naturverhältnisse gerade bei Modellen mit fester Sohle schwierig ist. Inzwischen haben jedoch neuere Erkenntnisse in der Ähnlichkeitsmechanik (4) und verbesserte Meßmethoden den Weg gezeigt, auch Modelluntersuchungen mit beweglicher Sohle als Mittel zur Abschätzung des Feststofftransportes einzusetzen (5).

Bei Modellen mit fester Sohle zur Kontrolle und Voraussage von Sandbewegung spielt die Meßtechnik die entscheidende Rolle, da in diesem Fall der Umweg über die örtliche Strömungsgeschwindigkeit gewählt werden muß. Durch schrittweise Anpassung der festen Sohle an die aus den Strömungsparametern vermuteten Änderungen der Morphologie, läßt sich ein Endzustand annähernd vorausbestimmen. Modelle mit beweglicher Sohle haben demgegenüber den großen Vorteil, daß die Veränderungen in der Morphologie unmittelbar verfolgt werden können. Sie haben den Nachteil, daß es gewöhnlich langjähriger Erfahrungen bedarf, um derartige Modelle ohne großen Zeitaufwand naturähnlich einspielen zu können. Ist dies jedoch einmal geschehen, können innerhalb weniger Tage Zeiträume simuliert werden, die in der Natur Jahre und Jahrzehnte bedeuten. Neben der Verfolgung unmittelbarer Vorgänge werden dadurch auch Voraussagen langfristiger Umlagerungen und Zustände möglich. Damit rechtfertigt das Ergebnis auch den kostspieligen Modellaufbau und die lange Versuchsdauer, zumal für besonders wichtige Regionen des Küstenraumes Normmodelle gebaut werden können, die für wiederholte Untersuchungen unter verschiedenen Bedingungen zur Verfügung stehen.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die Feststoffbewegung bisher nicht befriedigend direkt bestimmt werden kann. Für den jeweiligen speziellen Fall läßt sich nur durch eine sinnvolle Kombination der beschriebenen Verfahren unter Beachtung der bekannten physikalischen oder empirischen Grundlagen eine optimale Beurteilung aufstellen. Das bedeutet ein gewissenhaftes Studium des Untersuchungsgebietes anhand von historischen Karten, Peilplänen, Kartierungen und Zeit-Weg-Linien zum Verständnis der Langzeitveränderungen, direkte Messungen, um die Nullzeitbewegung des Sediments festzuhalten und darauf aufbauend Modellversuche.

### 2.3. *Beeinflussung der Sandbewegungen*

Die Mittel und Methoden einer Verbesserung der Fahrwasserverhältnisse im Tidebereich sind vielfältig. Grundsätzlich lassen sie sich in zwei Hauptgruppen einteilen: direkte und indirekte. Die direkte Methode, die Erweiterung (meist Vertiefung) einer Rinne durch Baggern führt zwar unmittelbar zum Ziel, ist aber vielfach teuer, da ständige Sandeintreibungen und Sohlumlagerungen einen laufenden Baggerbetrieb erfordern. Entscheidend für die Wirtschaftlichkeit ist, wo und wie gebaggert wird. Durch die indirekte Methode soll mit Hilfe von Baumaßnahmen auf die natürlichen Kräften unterworfenen Querschnittsausbildung Einfluß genommen werden. Beide Methoden werden sich im allgemeinen zweckmäßigerweise ergänzen müssen.

Im Hinblick auf die eingangs genannten Erscheinungsformen der Sandbewegung gibt es bei der indirekten Methode eine Reihe von Regelungsprinzipien zur Querschnittsgestaltung und damit günstigen Beeinflussung der Strömungsverhältnisse zur Verringerung des Baggeraufwandes. Meistens ist dabei eine seewärts gerichtete Sandverfrachtung das Ziel oder die Einschränkung des Sandtransports schlechthin. Dabei soll, soweit wirt-

schaftlich vertretbar, die Gesamtsedimentation so gering wie möglich gehalten werden. Mittel dazu sind:

1. *Buhnen*. Einschränkung der Abflußbreite bei Tnw, Stabilisierung der Ufer.
2. *Längswerke, Leitwerke*. Stabilisierung der Ufer, Einschränkung der Abflußbreite. Sie legen Sandplatten fest, verhindern das Ausweichen der Rinnen und die Bildung von Stromspaltungen mit Ebbe- und Flutrinnen, hemmen Quereintreibungen von Sand in die Fahrrinne.
3. *Abdämmung von Nebenrinnen* dienen ebenfalls der Zusammenfassung des Abflusses in einer Rinne.
4. *Begradigungen* bewirken eine Verringerung der Reibungswiderstände.

Derartige „klassische“ Regelungsmaßnahmen wurden zunächst in den Tideflüssen oberhalb der Mündungstrecken ausgeführt, in der Weser, der Elbe und Ems (20) in der 2. Hälfte des vorigen Jahrhunderts und zwar allein auf Grund von theoretischen Überlegungen und praktischen Erfahrungen und ohne vorherige Modellversuche. Im seewärtigen Teil der Tidengewässer ist es dagegen erheblich schwerer — nur auf Grund von theoretischen Überlegungen und der Erfahrungen im flußartigen Teil — die Wirkung solcher künstlichen Eingriffe auf die Strömungsverhältnisse und die Rinnengestaltung vorauszusagen. Das ist vor allem darauf zurückzuführen, daß die einen Tidestrom begrenzenden Wattgebiete mit diesem eine hydrologische Einheit bilden. Trotzdem sind solche Regelungsmaßnahmen seit Anfang dieses Jahrhunderts in der Außenweser und der Außenjade und später auch in der Außenelbe ausgeführt worden (20).

Neben den oben unter 1. bis 4. genannten klassischen Methoden bestehen weitere, zum Teil neuartige und erst in jüngster Zeit realisierbare Möglichkeiten zur Beeinflussung der Sandbewegung und damit zur Verbesserung der Schiffahrtswege im Tidebereich:

5. *Vergrößerung des Flutraumes*, z. B. durch Anlage neuer tideoffener Hafenbecken oberhalb der Regulierungsstrecke. Dadurch wird eine Zunahme der Tidewassermenge erreicht, die zu einer Ausräumung der Querschnitte führt. Diese Methode läßt sich bei dem Ausbau des Hamburger Hafens zwischen 1880 und 1915 erkennen (20) (z. B. auch Abb. 10 f).
6. *Freispülen* mit Hilfe eines Sperrwerkes, wobei der Ebbestrom einige Zeit zurückgehalten wird und dann mit erhöhtem Gefälle einen intensiven Spülstrom erzeugt (Abb. 10 c).
7. *Verlagerung der Brackwasserzone*, die eine zusätzliche Sedimentation und eine Intensivierung des Flutstroms an der Sohle bewirkt, durch Umleitung des Süßwasserzuflusses (z. B. Abb. 10 e).
8. *Neuanschluß* eines Hafens oder einer Flußstrecke an das tiefe Fahrwasser unter Umgehung sedimentationsgefährdeter Flußstrecken.
  - a) *Tideoffener Seekanal* (geringe Eintreibung, da nur durch relativ geringen Füllstrom bei Flut verursacht) oder
  - b) *Kanal mit Seeschleuse* (keine Eintreibungen).

Während die Möglichkeit 8 eine Umgehung des Sedimentationsbereichs vorsieht, kann durch die übrigen 7 Methoden die Querschnittsgestaltung aktiv beeinflußt werden.

Welcher dieser Methoden, ggf. im Zusammenwirken mit Baggerungen, der Vorzug zu geben ist, wird durch die örtlichen Verhältnisse bestimmt. In den folgenden Abschnitten

wird jeweils erläutert, welche der genannten Regelungsprinzipien zur Beeinflussung der Sandbewegung in den einzelnen deutschen Tideästuarien zur Anwendung gekommen sind oder in Zukunft ausgeführt werden sollen.

### 3. Der Ausbau der Außenweser

#### 3.1. Das Stromgebiet der Außenweser

Die Außenweser ist die seewärtige Zufahrt des Hafens Bremerhaven und zur Unterweser mit den Häfen Nordenham, Brake und Bremen. Der erste Ausbau der Unterweser nach Plänen von FRANZIUS, die Unterweserkorrektur, begann schon 1883. Stromspaltungen wurden auf der Strecke zwischen Bremen und Bremerhaven durch Abdämmen von Nebenarmen beseitigt, Krümmungen abgeflacht und die Strömung im Hauptarm durch Buhnen und Leitwerke zusammengefaßt (2). Erst im letzten Jahrzehnt des vorigen Jahrhunderts wurden auch Ausbauten in der Außenweser notwendig. Über diese bis in die Gegenwart andauernden Maßnahmen und ihre Wirkung soll in diesem Abschnitt berichtet werden.

Die Weser hat eine trichterförmige Mündung, die sich von Bremerhaven rd. 50 km seewärts erstreckt. Sie nimmt als Stromrinne ihren Verlauf zwischen ausgedehnten Wattgebieten. 10 km unterhalb von Bremerhaven spaltet sich die Rinne in einen westlichen Arm — in dem seit 1922 das Fahrwasser liegt — und einen östlichen, der bis 1922 als Fahrwasser genutzt wurde. Eine Sandbank — die Robbenplate — trennt beide Arme auf eine Länge von 10 km. Unterhalb der Robbenplate vereinigen sich beide Arme, um erneut durch eine Sandbank — die Tegelerplate — auf eine Länge von mehr als 10 km getrennt zu werden. Dies wiederholt sich noch ein drittes Mal, bevor die Mündungsarme der Weser, die Neue- und Alte Weser in die offene Nordsee münden (Abb. 1).

Durch die periodisch ablaufenden Gezeitenströmungen, die bei einem mittleren Tidehub zwischen 2,80 m an der Mündung und 3,50 m bei Bremerhaven örtlich Strömungsgeschwindigkeiten von mehr als 2,0 m/s erzeugen, außerdem durch Sekundärströmungen und Seegang, die durch meteorologische Ereignisse bedingt sind, wird das vorwiegend feinsandige Sohlmaterial mit einsetzender Flut je nach Stärke und Dauer der Strömungseinwirkung in Bewegung gesetzt und unterschiedlich weit transportiert. Bei nachlassendem Strom erfolgt die Ablagerung des bewegten Materials. Nach Kenterung des Flutstroms erfolgt in Ebbe-Richtung ein entsprechender Erosions-, Transport- und Sedimentationsvorgang. Das Material des Gewässerbettes befindet sich also in einem dauernden Umlagerungsprozeß. Das Resultat, welches alle transportwirksamen Strömungskräfte letztlich hervorrufen, ist ein morphologischer Zustand, wie er ungefähr in einer Tiefenkarte zum Ausdruck kommt. Abb. 3 zeigt die Veränderungen der obersten Stromspaltungsstrecke der Außenweser im vereinfachten Kartenvergleich für einen fast 80jährigen Zeitraum (10).

Die Stromrinnen im inneren Mündungstrichter neigen zur seitlichen Verlagerung. Da infolge der auf die Tideströmungen rechtsablenkenden Kraft aus der Erdrotation Uferabbrüche beidseitig erfolgen, kommt es in ihnen zu neuen Mittelgrundbildungen. In der Teilrinne einer Stromspaltung gewinnt häufig eine Stromrichtung das Übergewicht. Es bilden sich typische Flut- und Ebberinnen aus. Diese Sekundärspaltungen gefährden stets den Bestand eines Fahrwassers.

Das Strombaugeschehen in der Außenweser ist zeitlich in zwei Hauptabschnitte zu unterteilen:

- a) in die Zeit vor 1922, als das Fahrwasser östlich der Robbenplate durch den Wurster Arm verlief  
und
- b) in die Zeit nach 1922. 1922 erfolgte nach sorgfältiger Vorbereitung die Umlegung des Fahrwassers in die von der Natur begünstigte westliche Teilrinne, den Fedderwarder Arm. In dieser Rinne liegt es auch heute.

### 3.2. *Der Ausbau der Außenweser bis zum Jahre 1922*

Mit der Indienstellung großer Passagierdampfer mit Tiefgängen von 7,80 m in den achtziger Jahren des vorigen Jahrhunderts wurde auch der künstliche Ausbau von Fahrinnen in den Stromrinnen der Außenweser notwendig. Als Ausbaumittel wendete FRANZIUS zunächst unmittelbar unterhalb Bremerhavens Leitdämme an (2). Sie sollten dazu dienen, störende Nebenarme von der Hauptrinne zu trennen und die Tideströmungen und damit die Durchflußmengen in ihnen zugunsten der Hauptrinne zu schwächen. Durch einen 5,6 km langen Leitdamm (1891) und einen weiteren 1,6 km langen (1893) gelang es, im Verlauf von 2 Jahrzehnten zwei Nebenarme gänzlich zum Verlanden zu bringen. Die verbliebene Hauptrinne war anfangs jedoch zwischen den Wattkanten noch viel zu breit. Die Stromverstärkung reichte daher in ihr nicht aus, um allein durch die Erhöhung der Selbstströmungskraft die Sohle in der Fahrwassertrasse zu vertiefen.

Durch Baggerungen mußte ab 1896 ergänzend eingegriffen werden. Während im Bereich der beidseitig angelegten Leitdämme in den folgenden Jahren ein Ausbauerfolg erkennbar wurde, verschlechterten sich die Fahrwasserverhältnisse in der unterhalb gelegenen Stromspaltung zusehends. Den Grund dafür glaubte man in der Vergrößerung der aus dem Fahrwasser im Bereich des Dwars-Gats nach Norden abzweigenden Teilrinnen zu sehen. Es wurde versucht, diese Rinnen in der damals gebräuchlichen Buschbauweise zu durchdämmen. Dies gelang nicht. Die Dämme wurden noch während des Baues von der Strömung unterspült und weggerissen (18). Die östliche Wattkante wurde querab der Robbenplate vom Ebbestrom hart angegriffen und abgebrochen. Es gelang, sie zeitweilig durch Bühnen lagestabil zu machen. Diese Bauwerke waren in ihrem Charakter passiv. Sie waren nicht in der Lage, die großräumigen morphologischen Veränderungen, die in den beiden Stromrinnen um die Robbenplate erfolgten, zu beeinflussen.

Für die Entwicklung einer Stromspaltung ist die langjährige Veränderung der Durchflußmengen in den Teilrinnen entscheidend. Wie langjährige Beobachtungen ergeben haben, verhalten sich die Durchflußmengen in den Teilrinnen bei Ebbestrom wie ihre Querschnitte unterhalb von MTnw (Fo). Da die Querschnitte der westlichen Teilrinne nach 1900 trotz der beabsichtigten Schwächung durch das Verklappen von Baggerboden größer wurden, ist anzunehmen, daß in dieser Zeit eine ständige Zunahme der anteiligen Durchflußmengen erfolgte. Auch der Bau des Leitdammes Robbensüdsteert (1910) (Abb. 3) konnte diese Entwicklung nicht aufhalten. Als Beispiel zeigt Abb. 4 die Veränderung des Profils km 83 (in Abb. 3).

Die Folge der natürlichen Vergrößerung der westlichen Nebenrinne war die Einleitung einer Stromrinnenverwilderung im oberen Teil der östlichen Hauptrinne. Die Folgen für die Schifffahrt waren katastrophal. Es gelang bis 1914 trotz der Beseitigung von jährlich mehr als 4 Mio m<sup>3</sup> Boden aus dem 200 m breiten Fahrwasser und dem Bau von weiteren Strombauwerken an der Robbenplate nicht, die östliche Hauptstromrinne wieder zu stabilisieren und in ihr die anteiligen Durchflußmengen wieder zu vergrößern. Diese Bemühungen sind letztlich gescheitert, weil die großräumige morphologische Entwicklung trotz aller Ausbaumaßnahmen (Anwendung von Bühnen und Baggerungen) einem parallel zum Fahrwasser verlaufenden Spaltungsarm das Übergewicht gab.

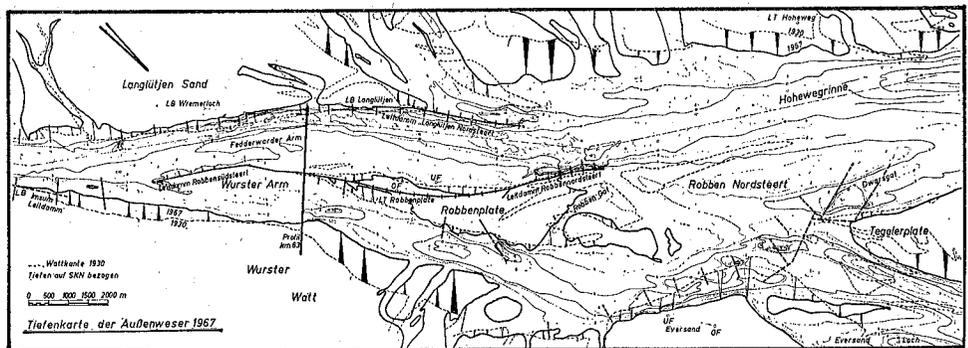
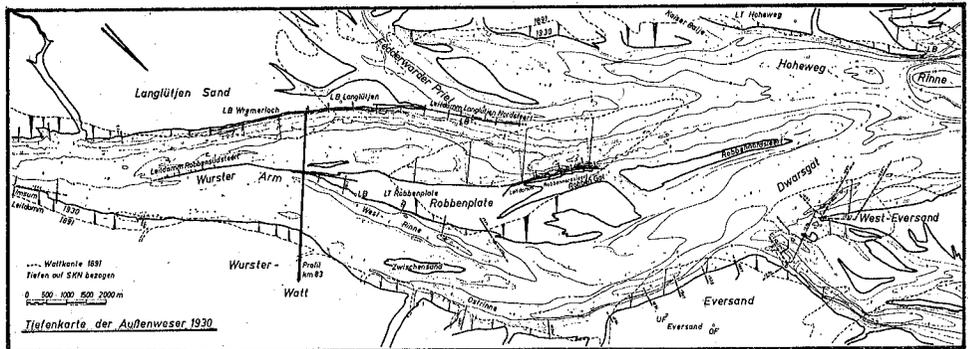
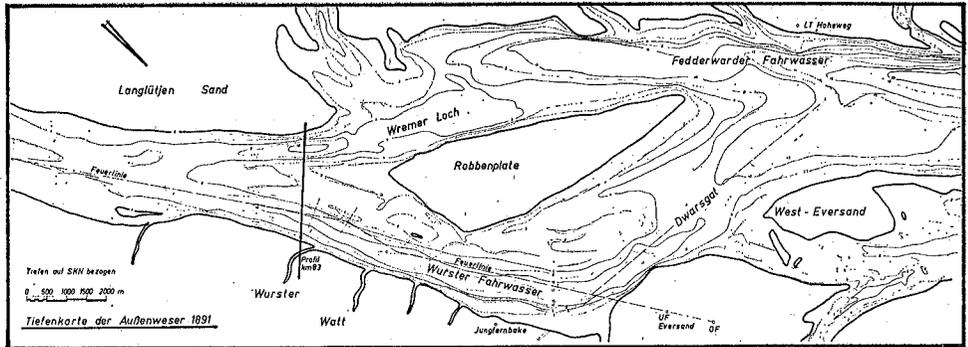


Abb. 3: Morphologische Entwicklung in der Außenweser

Dies ist ein Beispiel dafür, daß es zwingend notwendig ist, die Tendenzen der großräumigen morphologischen Umlagerungen festzustellen, bevor eine Regelungsmaßnahme begonnen wird. Es bedarf dann der weiteren Überwachung aller wesentlichen Veränderungen im Ästuar, um rechtzeitig neue, das Fahrwasser gefährdende Entwicklungen erkennen und ihnen mit geeigneten Mitteln begegnen können (10).

### 3.3. Die Ausbaumaßnahmen von 1922 bis zur Gegenwart

In der Zeit des 1. Weltkrieges entwickelte sich die Stromspaltung, wie Abb. 4 zeigt, weiter zuungunsten des Fahrwassers, so daß der Entschluß gefaßt wurde, das Fahrwas-

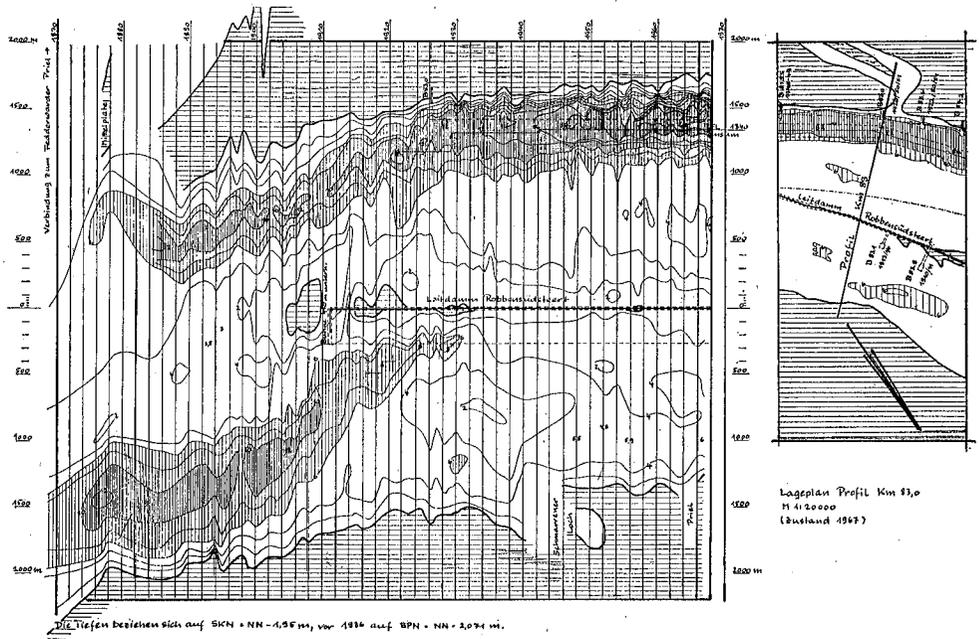


Abb. 4: Zeitliche Änderung der Tiefenlinien im Profil km 83 der Außenweser

ser in die westliche Stromrinne zu verlegen. Diesem Entschluß gingen umfangreiche hydrologische Messungen in der Zeit von 1913 bis 1922 voraus (17). An Modellversuche für die Regelung eines Ästuars war damals allerdings noch nicht zu denken. Aus den Messungen erkannte PLATE die gesetzmäßige großräumige Entwicklung und entwarf einen umfassenden Plan, der durch ein System beidseitig angelegter Strombauwerke in Verbindung mit Baggerungen die natürlichen vorteilhaften Entwicklungsvorgänge in der westlichen Stromrinne verstärken und so einen schnellen und dauerhaften Ausbaurfolg bringen sollte (18). PLATE korrigierte die westliche Stromrinne so, daß die Tidewelle in sie leicht einlaufen konnte. Das Abdrängen des Ebbestromes oberhalb der Stromspaltung zum neuen Fahrwasser in der westlichen Rinne wurde durch die großflächige Aufhöhung der Sohle mit Baggerboden und dem Bau stromabweisender Bühnen mit flachen Kopfneigungen (1:12) erreicht. Die Erhöhung der Ebbedurchflusssmengen in der neuen Hauptrinne erzwang ein Damm vor dem Einlauf in die Ostrinne. Die Scheitelbereiche in Krümmungen wurden durch einzelne Bühnengruppen stabilisiert. Eine Fahrwassertiefe von 10 m unter MSpTnw (= SKN) konnte so erreicht werden.

In den folgenden Jahrzehnten hat sich der Durchflusssmengenanteil in dem neuen Fahrwasser ständig erhöht, der Fo-Querschnitt damit ständig vergrößert (Abb. 4). Der Ausbaurfolg zeigte sich in einem gleichmäßigen Rückgang der jährlichen Baggermengen.

Nach 1950 ist verstärkt versucht worden, Einfluß auf die Durchflusssmengenentwicklung in der Stromspaltung zu nehmen, um eine weitere Vertiefung des Fahrwassers vorzubereiten. Das System der Strombauwerke wurde bis heute auf insgesamt 33 km ausgebaut und der gegenseitige Abstand der Bühnen verdichtet (Abb. 8). Dadurch gelang die Vergrößerung der Durchflusssmengen in der Hauptrinne. Allerdings ist es nur teilweise gelungen, die Tidedrömmungen innerhalb des eigentlichen Fahrwassers auf der Westseite der Hauptrinne zu verbessern. Es ist eine neue Ebberinne entlang des Leitdammes Robbensüddeert entstanden, die das Fahrwasser unterhalb ungünstig beeinflusst (Abb. 3).

Nach 50jähriger Beobachtung ist die Richtigkeit der Ausbauentcheidung von 1922 voll bestätigt worden (24) (10). Die Vertiefung des Fahrwassers von derzeit 10 m unter SKN auf heute 12 m bei 200 m Sohlenbreite, wodurch Schiffen von 13 m Tiefgang unter Ausnutzung der Tidewelle die Fahrt nach Bremerhaven ermöglicht wird, konnte nur erreicht werden; weil eine bereits durch Strombauwerke weitgehend stabilisierte Stromrinne zur Verfügung stand. Wenn das Fahrwasser in der Außenweser in dem Abschnitt oberhalb der Tegeler Plate heute als relativ lagestabil und unterhaltungsfreundlich bezeichnet werden kann, so nur deshalb, weil es in den letzten 50 Jahren gelungen ist, die großräumig ablaufenden morphologischen Veränderungen im Ästuar der Außenweser hinreichend genau zu erfassen und ihren Einfluß auf die Veränderungen der Schiffahrtsrinnen vorherzusagen. Die morphologischen Umlagerungen finden in den Stromrinnen der Außenweser indes weiterhin statt. Neue Untersuchungen haben ergeben, daß sie, die bislang die Rinnenentwicklung des westlichen Fedderwarde Armes begünstigt haben, unterhalb der Robbenplate in der zweiten Stromspaltung seit mehr als 20 Jahren einen für den Bestand des heutigen Fahrwassers in der Hohewegrinne ungünstigen Verlauf nehmen (10).

Es ist vorgesehen, die hydrologischen Untersuchungen auf den Abschnitt der zweiten Stromspaltung und auf den Riffgürtel im Bereich der äußeren Mündungsrinnen auszuweiten und zu intensivieren. In einem Großmodell von der Jade- und Wesermündung im Maßstab 1 : 800 / 1 : 100 (Abb. 1) soll versucht werden, die Eignung weiterer Strombaumaßnahmen unterhalb der Robbenplate zu untersuchen. Es wird in Zukunft notwendig sein, das einmal begonnene Strombaukonzept, welches sich in 50 Jahren bewährt hat, seewärts zu erweitern. Es gilt, auch diese bisher noch nicht direkt beeinflussten Abschnitte des Ästuars im Interesse der dauerhaften Erhaltung eines weiter ausbaufähigen Fahrwassers zu stabilisieren. Das Ziel im Bereich der Außenweser ist, aktiv unter Einbeziehung der natürlichen morphologischen Entwicklungen Einfluß auf die Tideströmungen zu nehmen, um die Räumwirkung der Strömung für den Erhalt des Fahrwassers zu nutzen. Der Einsatz von Baggergeräten zur Beseitigung von Eintreibungen aus der Fahrwassertrasse wird aber auch weiterhin erforderlich bleiben. Strombauwerke und Baggerungen ergänzen einander.

#### 4. Der Ausbau des Jedefahrwassers

##### 4.1. Die natürlichen Verhältnisse der Jade

Das Jedefahrwasser ist die Zufahrt nach Wilhelmshaven. Es weist von der natürlichen Morphologie her günstigste Voraussetzungen auf. Während es sich bei Ems, Weser, Elbe und Eider um durch Tideeinwirkung des Meeres ausgeweitete Strommündungen handelt mit wechselnden Oberwasserzuflüssen und der Bildung von Brackwasserzonen, ist die Jade eine Meeresbucht ohne landseitigen Zufluß von Bedeutung (Tabelle 1, Abb. 1). Durch die hydraulisch besonders günstige Form dieser Meeresbucht mit dem großen Spülbecken des durch Sturmflutwirkung zwischen dem 12. und 16. Jahrhundert entstandenen Jadedbusens (21) und der Verengung vor Wilhelmshaven besitzt das Jedefahrwasser infolge der Räumkraft des sehr kräftigen Tidestromes schon von Natur große und beständige Wassertiefen und einen gestreckten Verlauf ohne wesentliche Stromspaltungen und -krümmungen. Infolgedessen ist die Fahrwasserstrecke „Innenjade“ (von der Linie Schillig-Mellum bis Wilhelmshaven) relativ problemlos, auch für die künstliche weitere Vertiefung.

Im Gegensatz zur Innenjade sind in der Außenjade mit ihren verzweigten und von Natur unstablen Stromrinnen infolge der dort ständigen Umlagerungen im Bereich der vor den ostfriesischen Inseln verlaufenden west-östlichen Sandbewegung Schwierigkei-

ten für den sich seit dem Ende des 19. Jahrhunderts entwickelnden Verkehr mit tiefgehenden Schiffen aufgetreten, die eine künstliche Beeinflussung der Sandbewegungen erforderten.

#### 4.2. Die Ausbaumaßnahmen bis 1939

Die erste Baumaßnahme, mit der vor etwa 100 Jahren begonnen wurde, war die Sicherung der stark gefährdeten Insel Wangerooge, deren Bestand als westliche Einfassung der Außenjade noch heute von großer Bedeutung ist (13) und ständig Erhaltungsaufwand erfordert.

Zuverlässige Peilungen, die seit 1859 von der Außenjade und vom Gebiet um Wangerooge vorliegen, zeigen, daß der Sand am Nordstrand von Wangerooge nach Osten durch die Blaue Balje bis nach Minsener Oog wandert (Abb. 5). Bevor dort die Strombauwerke geschaffen wurden, durchquerte der Sand in Form von Platen von hier aus in nordöstlicher Richtung die Außenjade. Das bedeutete, daß in diesem Bereich stets zwei bis drei Rinnen vorhanden waren (Wangerooger Fahrwasser, Minsener Rinne, Alte Jade) (Abb. 5), von denen die jeweils tiefste als Hauptfahrwasser diente. Dabei gab es Zeiträume, in denen keine der Rinnen die erforderliche Tiefe und Breite aufwies, um als Fahrwasser dienen zu können. Als sich um die Jahrhundertwende auf Grund genauerer Vermessungen abzeichnete, daß sich die Außenwaser in die damals als Hauptfahrwasser dienende „Alte Jade“ verlegen und der Hauptstrom der Außenjade in eine der westlich gelegenen Rinnen gedrängt würde, versuchte man zunächst durch Baggerungen diese Tendenz aufzuhalten, jedoch ohne Erfolg.

Mit Zunahme der Göße und des Tiefganges der auf der Jade verkehrenden Schiffe wurde es notwendig, ein lagebeständiges Fahrwasser zu schaffen. Das konnte nur dadurch geschehen, daß die Bewegung des Sandes durch die Außenjade in Form von Platen verhindert wurde. Zu diesem Zweck wurde 1909 begonnen, Strombauwerke auf der Wattinsel Minsener Oog zu errichten. Diese war nachweisbar seit langer Zeit dauernd nach Südwesten zurückgewichen. Die Außenjade wurde daher zunehmend breiter, verlor an Stromkraft und Tiefe, insbesondere in ihren östlichen Teilen. Die bestehende Tendenz einer Verschiebung der tiefen Rinne nach Westen sollte durch ein Regelungswerk auf Minsener Oog aufgefangen werden, das die fest liegende Flanke bilden sollte, an der sich eine beständige tiefe Rinne entwickeln und halten konnte. Das sich vertiefende Wangerooger Fahrwasser sollte über eine tiefe Eckrinne, die durch den Bau der großen Bühne A sich bilden und nach zusätzlicher Ausbaggerung erhalten sollte, mit der Old-Oog-Rinne verbunden werden, womit auch die erforderliche Richtungsumlenkung des Hauptstromes zu erreichen war. Außerdem sollte ein Teil des westöstlich wandernden Sandes in den Raum zwischen dem „Hauptdamm“ und der Bühne A aufgefangen und dadurch vom Hauptfahrwasser, der Old-Oog-Rinnen ferngehalten werden (13).

Der Bau dieser Regelungswerke wurde 1931 im wesentlichen abgeschlossen (Abb. 5). Damit war in Verbindung mit zeitweiliger Baggerung in der Eckrinne ein stabiles Fahrwasser in der Außenjade geschaffen worden, das allen damals gestellten Anforderungen in bezug auf ausreichende Tiefe und leichte Befahrbarkeit entsprach. Die Strombauwerke auf Minsener Oog bewirkten, daß die Sandmassen nicht mehr als zusammenhängende Platen, sondern in gleichmäßigem Fluß die Jade durchwandern (3).

Nach jahrzehntelangen weiteren Erfahrungen und fortlaufenden Untersuchungen steht jetzt fest, daß das Strombauwerk auf Minsener Oog seine Aufgaben voll erfüllt hat und auch heute noch den bedeutenden Eckpfeiler für die Umlenkung des Fahrwassers aus einer NW-SO-Richtung in die N-S-Richtung darstellt. Diese Wirkung ist auch für die durch Baggerungen vorgenommene weitere künstliche Vertiefung des Jade-Fahrwassers von großer Bedeutung. Die Selbstströmungskraft des Stromes in der tiefen Rinne

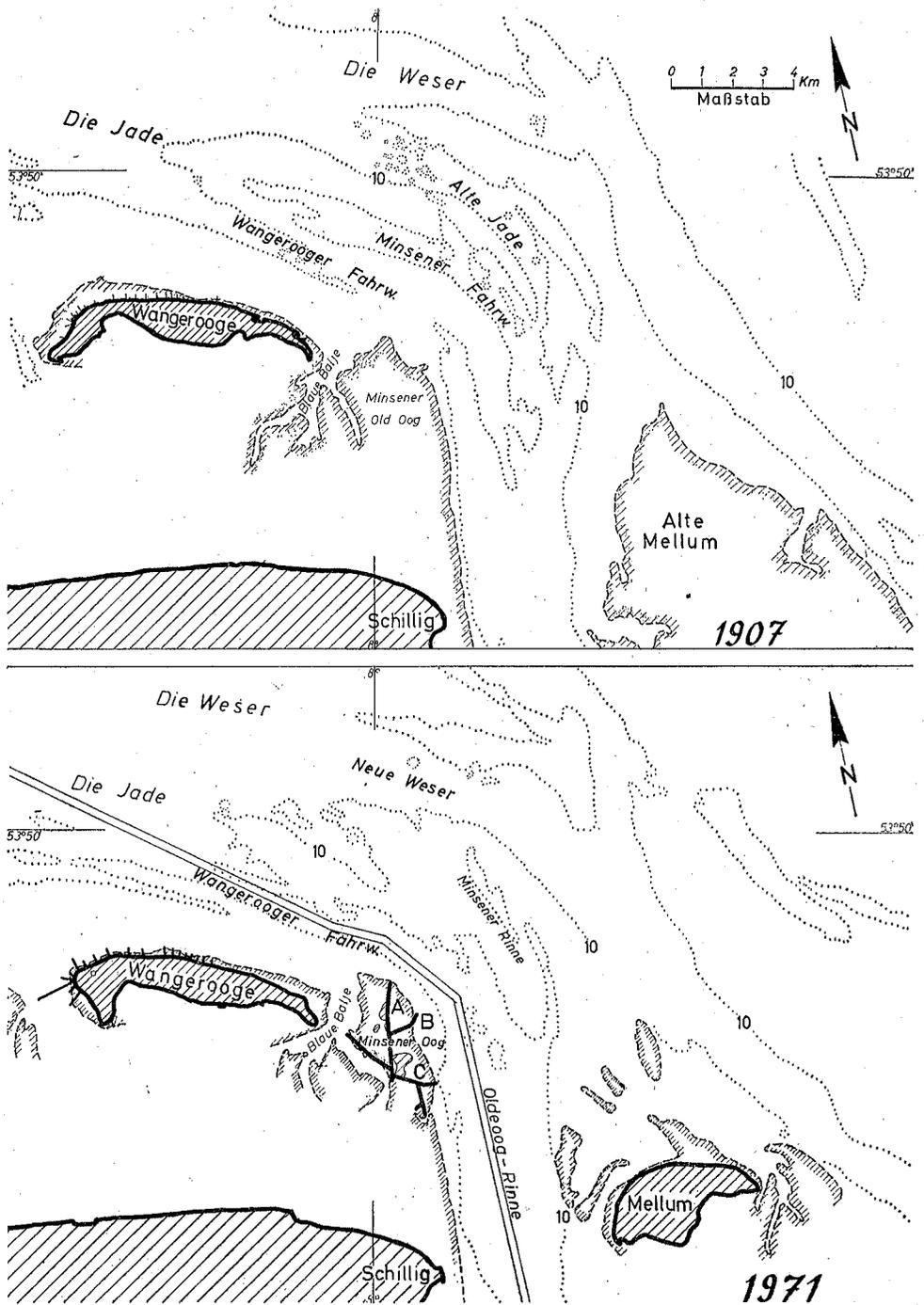


Abb. 5: Morphologische Entwicklung der Außenjade

im Bereich der Buhnen A, B und C ist durch deren Einfluß so erheblich, daß in diesem Fahrwasserabschnitt die Wiedereintreibungen von Sand relativ gering und damit die erforderlichen Baggermengen unerheblich bleiben. Die fortlaufende Instandhaltung des umfangreichen Buhnensystems auf Minsener Oog ist daher gerechtfertigt und erforderlich.

Die Planung dieser Strombauwerke ist seinerzeit nur auf Grund empirischer Überlegungen vorgenommen worden. Über Einzelheiten der Ausführung und Wirkung sind in beschränktem Umfange Modellversuche ausgeführt worden. Ob es zweckmäßig sein wird, die vorhandenen Strombauwerke noch durch weitere zu ergänzen, steht heute noch nicht fest. Diese Fragestellung soll in einem Modell der Jade und Außenweser untersucht werden (Abb. 1).

#### 4.3. Die Entwicklung seit 1945

Obwohl von 1942 bis 1956 in der Jade nicht mehr gebaggert worden war, wies das Fahrwasser der Innenjade größtenteils noch Tiefen von 12 m und mehr unter MSpTnw (SKN) auf, während in der Außenjade, im Wangerooger Fahrwasser, sich Untiefen mit etwa 9 m unter SKN gebildet hatten. Als dann ab 1959 mit der Großtankschiffahrt nach Wilhelmshaven zu rechnen war, wo eine Tankerlöschanlage mit Tanklager und Pipeline-Verbindung zu den Raffinerien des Rhein-Ruhr-Gebiets errichtet wurde, mußte das Jade-Fahrwasser ab 1957 für größere Schiffstiefgänge ausgebaut werden. Diese Vertiefungsarbeiten, zunächst auf 12 m unter SKN, sind ausschließlich durch Baggerungen ausgeführt worden, wobei der Schwerpunkt in der Außenjade liegen mußte. Die Lage der Fahrwassertrasse, die eine 300 m breite vertiefte Rinne darstellt, richtete sich nach dem von früher her stabilisierten Hauptfahrwasser (Abb. 5).

In Anpassung an die sehr schnelle Entwicklung der Tankergrößen wurde ab 1964 das Ausbauziel der Fahrwasservertiefung auf 13 m, dann auf 15 und 17 m und schließlich auf 18,5 m unter SKN (Tiefe vor Wilhelmshaven) erweitert. Es können seit Ende 1971 Schiffe mit 18,5 m (61') Tiefgang und ab Ende 1973 mit 20,0 m (65'5") — etwa 250.000 tdw — unter Ausnutzung der Tide nach Wilhelmshaven fahren. Die großen Baggermassen aus diesen erheblichen Fahrwasservertiefungen konnten bisher an geeigneten Stellen östlich und nördlich des Fahrwassers verklappt werden. Bei diesen Ausbauarbeiten traten die mit der großräumigen Sandbewegung verbundenen Probleme an den Stellen hervor, wo regelmäßig ein Wiedereintreiben von Sand in die vertiefte Rinne auftritt. Das ist vornehmlich im äußeren Teil des Wangerooger Fahrwassers, also im Bereich der natürlichen W-O-Sandbewegung vor den Inseln der Fall, aber auch im Bereich der einzigen Stromspaltung in der Innenjade, am Eingang und Ausgang des Heppenser Nebenfahrwassers. Falls sich im hydraulischen Modell hierfür keine wirksamen und auch wirtschaftlich vertretbaren Strombaumaßnahmen ermitteln lassen, wird man sich in diesen Fahrwasserbereichen mit ständigen Unterhaltungsbaggerungen helfen müssen (25).

Gewisse Schwierigkeiten bei der Vertiefung und der Erhaltung der Fahrwasserrinne bereitet der Streckenabschnitt zwischen Minsener Oog und der Linie Schillig-Mellum, in dem die in Abschnitt 2.1 erläuterten Dünen (Großriffeln) auftreten, die sich stetig neu bilden. Diese Großformen werden durch die Stromwirkung aus Grobsand und Schill quer zur Stromrichtung aufgebaut. Sie steigen in regelmäßigen Abständen sehr steil aus Tiefen von 18 und 19 m bis auf Tiefen von 13 und 14 m unter SKN empor. Aus ihrer Form — von Süden flach ansteigend und nach Norden steil abfallend — läßt sich die Resultierende aus Flut- und Ebbestromrichtung erkennen. Sie weist nach Norden, und das ist ein Indiz dafür, daß nur wenig von dem in der Außenjade von Westen nach Osten transportierten Sand in die Innenjade eindringen kann. Für den Ausbau brauchten zwar meist nur die Kuppen dieser Fünen abgebaggert zu werden. Es ist jedoch nicht möglich, mit Hopperbaggern auf den 30 bis 50 m breiten Kuppen der Dünen

quer zur Stromrichtung zu baggern. Der Schleppsaugkopf fährt zur Erzielung einer wirtschaftlichen Baggerleistung das Bodenprofil voll aus. So wird beim Abbaggern einer Kuppe das gesamte Bodenprofil einschließlich der Täler tiefergelegt. Das hat trotz der Mehrbaggerungen den Vorteil, daß die einmal erreichte Baggersohlenlage sich längere Zeit hält. Werden dagegen nur die Kuppen der Großriffel abgebagert, so bauen sich diese in sehr kurzer Zeit bis zu ihrer ursprünglichen Höhe wieder auf (25).

Für die Planung, Durchführung und Überwachung der nunmehr seit 15 Jahren laufenden Vertiefung des Jade-Fahrwassers und für die Abschätzung des späteren Erhaltungsaufwandes sind sehr eingehende gewässerkundliche Untersuchungen ausgeführt worden. Ihr Ziel war und ist in erster Linie, die Gesetzmäßigkeiten der Sandbewegung im Bereich der Jade zu erforschen. Neben umfangreichen Strömungsmessungen sind dazu auch Naturmessungen zur Kontrolle der Sandbewegungen im Bereich der Außenjade ausgeführt worden. Dabei handelte es sich neben Lotungen auch um Messungen mit Hilfe radioaktiver Leitstoffe. Diese Messungen haben zu brauchbaren qualitativen Aussagen geführt, die jedoch noch durch Untersuchungen in dem hydraulischen Modell ergänzt werden müssen.

## 5. Die Maßnahmen in der Außenelbe

### 5.1. Das Stromgebiet der Außenelbe

Als Außenelbe wird das Gebiet seewärts der Linie Cuxhaven-Friedrichskoog (Abb. 1) bezeichnet. Die anschließende Strecke des Tideflusses Elbe bis zum Hamburger Hafen ist die Unterelbe. Außenelbe und Unterelbe bilden die seewärtige Zufahrt nach Hamburg, den Unterelbehäfen und dem Nord-Ostsee-Kanal. Die Strecke von See bis Brunsbüttel ist die verkehrsreichste deutsche Seeschiffahrtstraße — sowohl hinsichtlich der Anzahl der verkehrenden Schiffe als auch der beförderten Gütermengen — und auch eine der verkehrsreichsten Wasserstraßen der Erde (20). Hydrografisch ist die Außenelbe der seewärtige Teil des Mündungstrichters der Elbe, der stromaufwärts etwa bis Brunsbüttel reicht.

Die Elbe hat von allen deutschen Tideflüssen den größten Oberwasserzufluß und die größte Flutwassermenge in geomorphologisch vergleichbaren Querschnitten in Mündungsnähe (Tabelle 1). Verglichen mit den anderen Tideflüssen hat die Elbe bis nach Hamburg die günstigsten Fahrwasserverhältnisse, die den seit der Mitte des vorigen Jahrhunderts ständig wachsenden Schiffsgrößen zunächst allein durch Baggerungen im oberen Abschnitt der Unterelbe angepaßt werden konnten. Erste Stromregelungsbauwerke wurden um die Jahrhundertwende unterhalb von Hamburg notwendig, weiter unterhalb erst zwischen 1921 und 1936 in 2 eng begrenzten Teilabschnitten (20). Im übrigen waren Baggerungen, die seit der Jahrhundertwende auch unterhalb von Brunsbüttel in größerem Umfang ausgeführt wurden, das hauptsächliche Ausbaumittel (20).

Die Außenelbe läßt sich nach der Morphologie in 2 Abschnitte gliedern. Den äußeren Abschnitt bildet eine tiefe, breite und sehr lagestabile einheitliche Rinne, die von der inneren Deutschen Bucht bis Scharhörn reicht (Abb. 1). Irgendwelche Regelungsmaßnahmen sind in diesem Abschnitt bisher nicht notwendig gewesen. Der daran anschließende Abschnitt wird auf beiden Seiten durch hohe Watten flankiert. Er ist gekennzeichnet durch ein ständiges Umlagerungen unterworfenen instabiles System von Rinnen und dazwischenliegenden Sänden (7). Durch die Verlagerungen der Sände und Rinnen ist dieser Abschnitt von jeher für die Schifffahrt schwierig gewesen. Mehrfach konnte ein Zyklus beobachtet werden, daß sich an der Nordseite des Wattes eine Plate als Ablagerungsfläche von Sand bildete und sich nach Süden quer durch den Strom bewegte bis sie das südliche Watt bei Neuwerk erreichte (9)(15). Die Plate hat eine langgestreckte Form, ihre Längsachse liegt in Richtung der Gezeitenströmung. Relativ günstige Fahr-

wasserverhältnisse lagen immer vor, wenn ein Zweirinnen-System vorhanden war, eine südliche Flut- und eine nördliche Ebberinne. Stromzustände, bei denen 3 Rinnen vorhanden waren, ergaben ungünstige Fahrwasserverhältnisse. Der günstigste morphologische Zustand für die Schifffahrt wäre das Vorhandensein nur einer Rinne. Ein solcher Zustand ist aber nur einmal für eine kurze Zeit (um 1880) vorhanden gewesen.

Im Gegensatz zu der Sandbewegung in sich quer zur Stromachse der Außenelbe bewegendes Platen und Sänden, die für die Entwicklung der Fahrwasserverhältnisse eine sehr große Bedeutung hat, ist die Bedeutung der Sandbewegung in der Längsrichtung der Außenelbe für deren Fahrwasserverhältnisse geringer. Sie ist nur insoweit wichtig, als sie zum Aufbau der Platen und Sände beiträgt oder in Großriffeln vonstatten geht. Solche Großriffel — sowohl Flut- als auch Ebbestromformen — sind an mehreren Stellen in der Außenelbe vorhanden (7) (15). Es besteht ein enger Zusammenhang zwischen den jeweils herrschenden Windverhältnissen in Stärke und Richtung und der Menge des in die Elbe ein- und auswandernden Sandes (14). Durch Massenberechnungen, die auf Tiefenänderungsplänen beruhen, konnte nachgewiesen werden, daß — bei Betrachtung längerer Zeiträume von mehreren Jahrzehnten — in der Außenelbe ein dynamisches Gleichgewicht des Materialtransportes besteht (14). Durch Baggerungen wird dieses Gleichgewicht nicht gestört, wenn das Material lediglich aus der Fahrrinne entfernt und an anderer Stelle des Stromgebietes wieder abgelagert wird. Das Gleichgewicht der Sandbewegung kann jedoch durch Strombauwerke erheblich beeinflußt werden.

## 5.2. Der Leitdamm Kugelbake

Bis 1938 war die Außenelbe der freien Entfaltung der natürlichen Kräfte überlassen gewesen. Nur stellenweise waren geringe Eingriffe durch Baggerungen erfolgt. Erst mit dem 1938/39 begonnenen Bau des Leitdammes Kugelbake wurden die Strömungs- und Sandbewegungsverhältnisse erheblich beeinflußt. Die Arbeiten waren während des Krieges unterbrochen, sie wurden erst 1950 wieder aufgenommen und 1970 vorläufig beendet. Die hauptsächlichlichen Bauarbeiten konzentrierten sich auf die Zeit von 1955 bis 1968. Ziel des Leitdammbaus war es

- a) die schädlichen Einflüsse der natürlichen periodischen Umbildungen der Topographie auf das Fahrwasser weitestgehend auszuschalten und es dadurch zu stabilisieren, und
- b) die selbständige Erhaltung eines Fahrwassers zu bewirken, das ohne zu umfangreiche Unterhaltungsbaggerungen den Ansprüchen der Schifffahrt an Tiefe und Breite genügt.

Der Damm, der in seinem derzeitigen Ausbau eine Länge von 9,25 km in Schüttsteinbauweise hat, schließt unterhalb von Cuxhaven bei der „Kugelbake“ an das Festland an (Abb. 1) und verläuft auf dem „Mittelgrund“. Vom Landanschluß bis auf 3 km Länge liegt die Dammkrone 1,80 m über SKN, fällt dann auf 2,5 km Länge bis auf SKN + 0,6 m und behält diese Höhe auf seiner restlichen Länge (6). Die Kronenbreite beträgt 3,5 bis 5,0 m. Die Böschungsneigungen sind beiderseits je nach Strömungsangriff 1:2 bis 1:3. Die günstigste Höhenlage der Dammkrone wurde im Elbmodell mit fester Sohle (Abb. 1) der Bundesanstalt für Wasserbau in Hamburg ermittelt. Erst als 1968 der 1961 erfolgte Durchbruch des Kugelbakenfahrwassers durch das Watt zwischen dem landseitigen Ende des Leitdammes und dem Festland geschlossen war, konnte der Damm hydraulisch voll wirksam werden. Bis zur Schließung der Lücke am landwärtigen Ende des Leitdammes war das südlich des Leitdammes gelegene Neuwerker Fahrwasser die hauptsächlichliche Flutrinne gewesen. Danach sandet sie rasch auf.

Die unmittelbare Wirkung des Leitdammes bestand zunächst darin, daß er die Sedimentation vor seinem Endpunkt und an seinen Flanken begünstigte. Sie nahm mit dem

Baufortschritt seit 1950 ständig zu. Der frühere Luechtergrund vereinigte sich mit dem Mittelgrund, auf dem der Leitdamm liegt. Abb. 6 zeigt die Ganglinien der Sandanhäufung von 1908 bis 1970. Es ist das Volumen des Mittelgrundes über 2 charakteristischen Tiefenlinien dargestellt. Deutlich ist zu erkennen, wie ab 1950 mit dem Dammbau eine erhebliche Volumenzunahme einsetzt, die in jüngster Zeit abzuklingen scheint. Diese Sandansammlung in der Umgebung des Leitdammes, die auf den Längstransport des Materials zurückgeht, war nicht der ursprüngliche Zweck des Bauwerks, sondern eine Nebenwirkung. Sie hat sich aber bisher nicht schädlich ausgewirkt.

Insgesamt ist nach dem Bau des Leitdammes in der Außenelbe ein Einfuhrüberschuß von Sand festgestellt worden. Es ist nicht ermittelt, in welchem Umfange die bedeu-

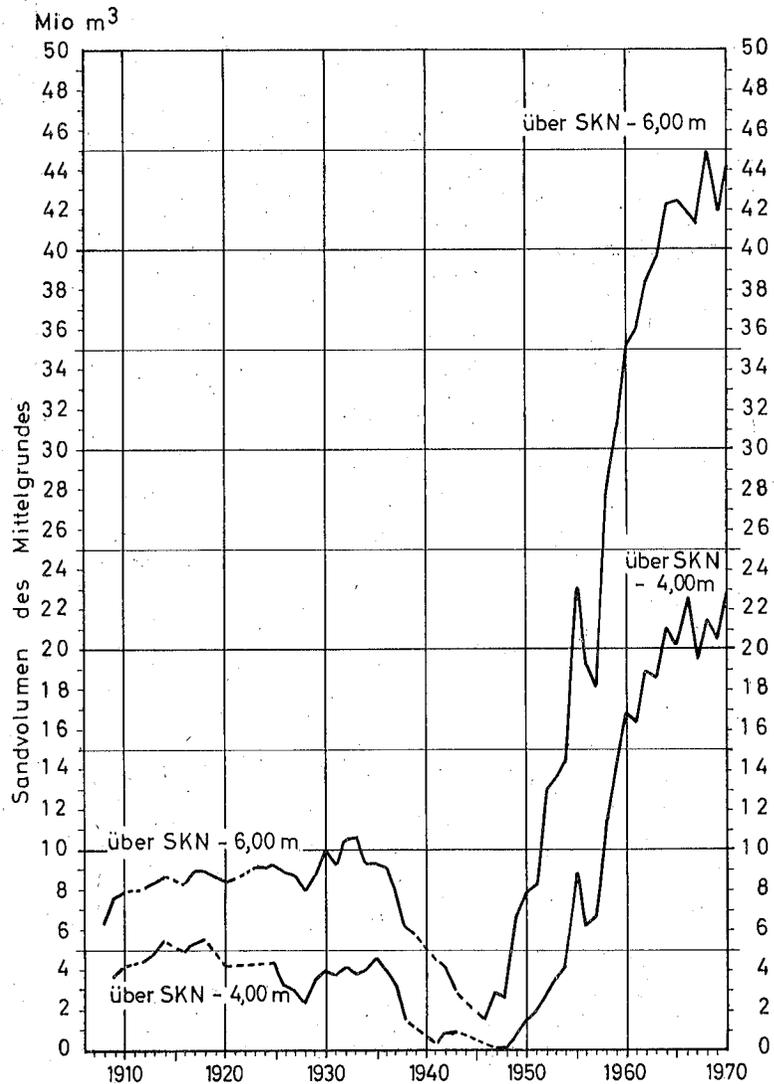


Abb. 6: Veränderung des Sandvolumens des Mittelgrundes in der Außenelbe

tende Sandansammlung am Leitdamm auf die Einfuhr aus der Nordsee unmittelbar zurückzuführen ist und wieweit interne Umlagerungen daran beteiligt sind. Es ist zu erwarten, daß die Akkumulation am Leitdamm noch eine Reihe von Jahren anhalten wird, daß sich dann aber ein neuer Gleichgewichtszustand in der gesamten Außenelbe einstellt. Das Neuwerker Fahrwasser verliert seine Funktion als Flutrinne des Elbefahrwassers und wird vermutlich in einigen Jahrzehnten nur noch ein Großpriel des Neuwerker Watts sein (7). Durch die Neubildung des „Neuen Luechtergrundes“ ist nordwestlich des Leitdammes ein System aus 2 Rinnen, der „Norderrinne“ und der „Mittelrinne“ entstanden (Abb. 7). Dabei bildet sich die Mittelrinne zur Flutrinne aus. Zur Zeit benutzt die einkommende Schifffahrt die Mittelrinne und die ausgehende Schifffahrt die Norderrinne. Ein solches Zweirinnen-System ist grundsätzlich der stabilste Zustand des Außenelbegebietes zwischen Scharhörn und Cuxhaven. Die Norderrinne neigt jedoch zu natürlicher Verwilderung, die der ausgehenden Großschifffahrt zunehmende Schwierigkeiten bereiten wird. Es ist daher das Ziel der weiteren Strombauarbeiten in der Außenelbe, die Mittelrinne so auszubauen, daß sie als Hauptfahrwasser für die ein- und ausgehende Großschifffahrt dienen kann. Dazu sind verstärkte Baggerungen notwendig, die so angesetzt sein müssen, daß die Mittelrinne die hydraulisch beste Form erhält. Günstig ist, daß der Leitdamm den südlichen Rand der Mittelrinne stabilisiert und den Flutstrom in diese Rinne leitet. Es ist geplant, den Leitdamm möglichst bald um 3,2 km zu verlängern, um diese Wirkung zu erhöhen.

### 5.3. Modellversuche

Die Komplexität der Verhältnisse in einem Gebiet wie dem Elbeästuar macht es außerordentlich schwierig, die Wirkung von Bauwerken auf die Strömungs- und Sandbewegungsvorgänge und damit auf die Veränderung von Rinnen und Sänden vorauszusagen. Neben intensiven Naturbeobachtungen sind hydraulische Modelle bis heute die einzig brauchbaren Hilfsmittel dafür. Bei der Bundesanstalt für Wasserbau in Hamburg befindet sich ein Modell der Elbe mit fester Betonsohle von seewärts Scharhörn bis zur Tidegrenze bei Geesthacht mit den Maßstäben 1:500 für die Längen und 1:100 für die Tiefen. In diesem Modell sollen insbesondere Ausbaumaßnahmen der Unterelbe untersucht werden. In ihm wurden auch Versuche für die Höhenlage des Leitdammes Kugelbake ausgeführt. Modelle mit fester Sohle haben den Nachteil, daß aus den hydraulischen Kennwerten einer starren Morphologie Rückschlüsse auf die Entwicklung der Gewässersohle gezogen werden müssen. Dieser Nachteil ist besonders bei Untersuchungen für das Mündungsgebiet eines Tidestromes, in dem die Umlagerungen der Rinnen und Sände die wesentliche Rolle spielen, von entscheidender Bedeutung. In jüngster Zeit wird deshalb versucht, auch großflächige Tidemodelle mit beweglicher Sohle für die Lösung örtlich begrenzter Probleme einzusetzen.

Ein derartiges Modell des Außerelbebereichs wurde in den Maßstäben 1:800/1:100 mit einem mobilen Kunststoffbett aus Hostyren-Körnern gebaut, um geeignete Maßnahmen zur Stabilisierung der Fahrrinnen untersuchen zu können. Seine Grenzen entsprechen etwa denen des Modells mit fester Sohle (Abb. 1). Da Tidemodelle mit beweglicher Sohle bisher nicht zum Standard des wasserbaulichen Versuchswesens gehören, waren langwierige Vorversuche bis zur Funktionsfähigkeit des Modells notwendig (5). Im folgenden sollen die ersten praktischen Ergebnisse mitgeteilt werden, die aus den Untersuchungen für den Leitdamm Kugelbake im Zusammenhang mit dem Ausbau der Mittelrinne für die ein- und ausgehende Schifffahrt stammen (Abb. 7). Die Versuche wurden in 2 Abschnitten ausgeführt:

- a) Linienführung der Leitdammverlängerung (I, II, III)
- b) Lage der Mittelrinne (IV, V, VI).

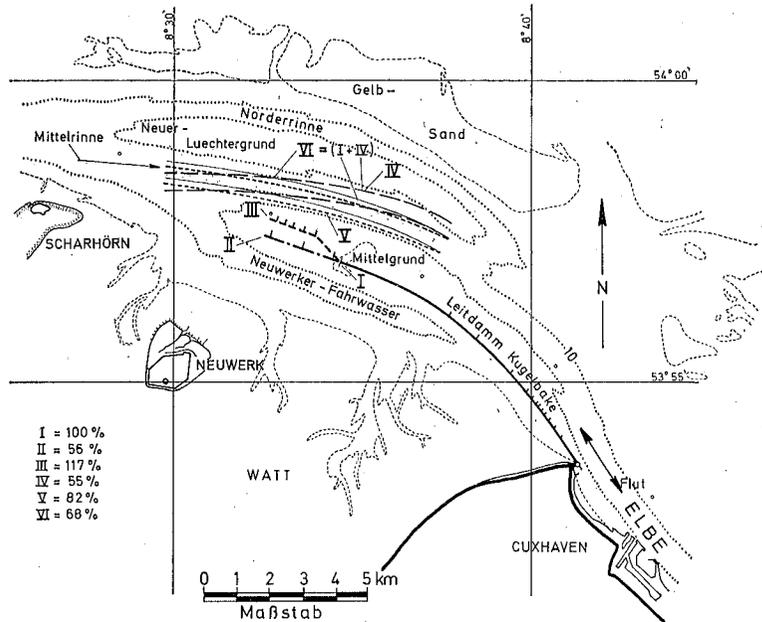


Abb. 7: Modellversuche für die Gestaltung der Mittelrinne und die Verlängerung des Leitdammes Kugelbake in der Außenelbe

Bei beiden Versuchsreihen war die Mittelrinne auf 500 m Sohlbreite und SKN -12 m Tiefe ausgebaut. Jeder Versuch dauerte 3 Wochen, das entspricht einer natürlichen Extrapolationszeit von 15 Jahren. Das danach gemessene Verlandungsvolumen wurde auf ein Jahr reduziert und in (%) angegeben (Versuch I = 100 %). Die untersuchten Zustände und die Ergebnisse sind in Abb. 7 eingetragen. Versuch I ist der in der Natur vorhandene Zustand des Leitdammes mit ausgebauter Mittelrinne. Die tangentielle Verlängerung des Leitdammes (II) ist mit 56 % eindeutig günstiger als der abgelenkte Zustand (III) mit 117 %. Für die Versuche mit veränderter Achse der Mittelrinne wurde deshalb die Leitdammverlängerung II zugrunde gelegt. Die Ergebnisse der Varianten IV (55 %), V (82 %) und VI (68 %) zeigen jedoch, daß die jetzt in der Natur vorhandene Lage der Mittelrinne offenbar optimal ist. Als geeignete Ausbaumaßnahme bietet sich deshalb die tangentielle Verlängerung des Leitdammes mit verbreedeter Mittelrinne an.

Die empfindliche Reaktion des Modells auf relativ kleine Veränderungen und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse haben gezeigt, daß es möglich ist, für derartige Fragestellungen auch große Tidemodelle mit beweglicher Sohle einzusetzen.

## 6. Die Versandung der Eider und die Maßnahmen zu ihrer Beeinflussung

### 6.1. Die Entwicklung der Verhältnisse in der Eider

Die Eider hat in früheren Jahrhunderten eine erhebliche Bedeutung für die Schifffahrt gehabt, insbesondere als Teil eines Verkehrsweges zwischen Nord- und Ostsee. Seit dem Bau des Nord-Ostsee-Kanals ist die Verkehrsbedeutung der Eider stark zurückgegangen, ein Großschiffahrtsweg ist sie heute nicht mehr (20). Wenn in dem vorliegenden Bericht der Eider ein besonderer Abschnitt gewidmet wird, so deshalb, weil die Eider ein Beispiel dafür ist, wie durch künstliche Eingriffe die Sandbewegung ungünstig be-

einflußt werden kann und weil mit der in Ausführung befindlichen mündungsnahen Abdämmung erstmals das Prinzip des Freispülens (Abschnitt 2.3) als Mittel zur Beeinflussung der Sandbewegung im Großen erprobt werden soll.

Die hydrologischen Verhältnisse der unteren Eider sind gekennzeichnet durch einen verhältnismäßig engen und langen Flußschlauch, der sich an eine Trichterformung anschließt und nur ein kleines Niederschlagsgebiet entwässert (Tabelle 1). Durch Eindeichungen und Abdämmungen von Nebenflüssen konnte die Tide seit dem frühen Mittelalter immer weiter stromaufwärts gelangen und um 1700 das 100 km oberhalb von Tönning liegende Rendsburg erreichen. Die Verkleinerung des Niederschlagsgebietes der Eider durch den Bau des Eiderkanals (1784) und des Nord-Ostsee-Kanals (1895) in Verbindung mit Deicherhöhungen führte zu einer Verstärkung der Tidebewegung und zu Verlandungserscheinungen im oberen Tidegebiet unterhalb von Rendsburg (19). Die Mündungstrecke war durch diese Maßnahmen bis dahin noch nicht beeinträchtigt worden.

Zum Schutze der Eiderniederung oberhalb von Friedrichstadt gegen Sturmfluten wurde 1936 die Abdämmung bei Nordfeld gebaut (Abb. 1). Diese Abdämmung setzte der Tidebewegung eine feste Grenze. Die Vorflut wird durch ein Siel mit 5 Öffnungen, die Schifffahrt durch eine Schleuse aufrechterhalten. Die Abdämmung Nordfeld liegt im Gegensatz zu den Abdämmungen von Ems, Weser und Elbe in verhältnismäßig geringer Entfernung von der Mündung (Tabelle 1) und ist damit ein starker Eingriff in die Tidebewegung. Durch die Reflexion der Tidewelle an der Abdämmungsstelle wurde die Tidewelle umgeformt, das Thw wurde etwas aufgehöhht, das Tnw stärker abgesenkt (Abb. 8). Infolge des tiefer eintretenden Tnw in Verbindung mit einer Verschiebung des Ebbestrom-Kenterpunktes zum Tnw läuft die Tidewelle bei eintretender Flut in einen kleinen Querschnitt ein; die Reibung ist dabei größer und der Vorderhang der Welle steilt sich auf. Dadurch treten relativ große Flutgeschwindigkeiten ein. Abb. 8 zeigt an einem Beispiel, wie Ebbe- und Flutstromgeschwindigkeit vor dem Bau der Abdämmung (1935) zueinander standen und wie sie sich nach der Abdämmung (1936) geändert haben.

Der stärkere Flutstrom brachte Feinsand aus dem Gebiet der Außeneider in die Tideeider und der schwächer gewordene Ebbestrom war nicht mehr in der Lage, diesen

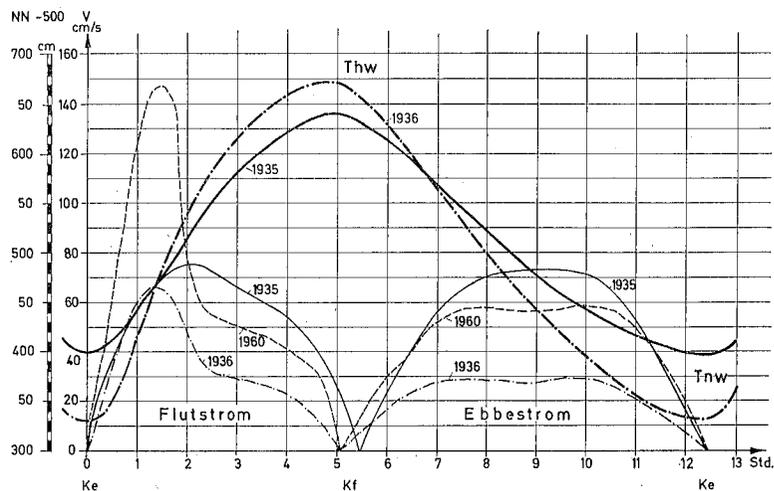


Abb. 8: Strömungsgeschwindigkeiten in der Tideeider 3,5 km unterhalb von Friedrichstadt. Tidekurven am Pegel Friedrichstadt

Sand zurück zur See zu transportieren. So kam es zur Ablagerung von Sand, wodurch die Tidewelle weiter verformt und die Strömungsverhältnisse in zunehmendem Maße verschlechtert wurden, wie es die Darstellung der Stömungsgeschwindigkeiten für 1960 in Abb. 8 zeigt. Die Ablagerung von Sand begann zunächst im Flußabschnitt zwischen Nordfeld und Friedrichstadt und setzte sich allmählich weiter stromabwärts fort bis in die Außeneider hinein. Insgesamt haben sich in der Eider von 1936 bis heute zwischen der Seegrenze und der Abdämmung Nordfeld rd. 50 Mio m<sup>3</sup> Sand abgelagert (22).

#### 6.2. Maßnahmen zur Beeinflussung der Sandbewegung

Um Vorflut und Schiffbarkeit aufrechtzuerhalten, wurden nach dem 2. Weltkrieg im Bereich Friedrichstadt/Nordfeld zunächst Buhnen gebaut. Sie erwiesen sich, ebenso wie Baggerungen, als erfolglos, um die Versandung zu verringern. Nur durch einen systematischen Spülbetrieb mit dem Sielbauwerk Nordfeld ließ sich ein Erfolg erreichen. Durch Einlaß von Flutwasser in den abgedämmten Teil der Eider, die Binneneider, und Auslaß zur Verstärkung des Ebbestromes konnte eine Ausräumung der Flußquerschnitte im Bereich bis etwa Tönning erreicht und der Fortschritt der Versandung vermindert werden. Wegen der geringen für die Spülung zur Verfügung stehenden Wassermengen war der Erfolg allerdings nur begrenzt.

1959 wurde mit intensiven Vorarbeiten zur Lösung der durch die Versandung geschaffenen Probleme begonnen. Es wurden zahlreiche Lösungsmöglichkeiten untersucht. Zur Beurteilung dienten vor allem die drei Gesichtspunkte

- a) Sicherung des Eidergebietes gegen Sturmfluten
- b) Schaffung einer optimalen Vorflut und
- c) Aufrechterhaltung des Wasserverkehrs in dem nach 1936 möglich gewesenem Umfang.

Wichtigstes Hilfsmittel zur Erarbeitung und Beurteilung der Lösungsvorschläge war der wasserbauliche Modellversuch. Es stand dafür ein Modell der Eider von Rendsburg bis zur See bei der Bundesanstalt für Wasserbau in Hamburg (Maßstab 1:250/1:50) und ein Modell der Außeneider (Maßstab 1 : 600 / 1 : 100) beim Franzius-Institut der TU Hannover zur Verfügung (Abb. 1) (8) (22). Die Vorarbeiten ergaben eindeutig, daß sich mit den „klassischen Methoden“ (Abschnitt 2.3) der Errichtung von Strombauwerken das Problem der weiteren Versandung der Eider nicht lösen läßt. Die Herstellung des früheren Zustandes durch Beseitigung der Abdämmung Nordfeld verbunden mit sehr umfangreichen Baggerungen und dem Bau eines Sturmflutsperrwerkes erwies sich als wirtschaftlich untragbare Lösung. Als Lösungsmöglichkeiten, durch die alle 3 oben angeführten Forderungen erfüllt werden, ergaben sich die beiden Gruppen:

1. Abdämmung in der Tideeider oder in der Außeneider mit Ableitung der Eider in ein anderes Stromgebiet (z. B. Hever oder Süderpiep) durch einen Seekanal mit Schleuse. Diese Lösung entspricht dem in Abschnitt 2.3 unter 8 b genannten Regelungsprinzip.
2. Abdämmung unterhalb von Tönning mit Freispülen eines Außentiefs durch intensiven Spülbetrieb mit dem neuen Sielbauwerk (Abschnitt 2.3 Prinzip 6).

Aus wirtschaftlichen Gründen fiel die Entscheidung zugunsten der Lösung 2, wobei sich als zweckmäßigste Lage der Abdämmung die Linie Hundeknöll—Vollerwiek ergab (Abb. 1). Die Abmessungen der zum Spülen notwendigen Sielöffnungen und die zweckmäßigste Systematik des künstlichen Spülbetriebes wurden durch Modellversuche ermittelt (8). Das Siel erhält 5 Öffnungen von je 40 m l. W. Diese Öffnungen sind bei Flutstrom geöffnet, so daß die Tide normalerweise in den Flußabschnitt zwischen der neuen Abdämmung und Nordfeld (Tideeider) ungehindert einlaufen kann. Beim Kentern des

Flutstroms werden die Öffnungen geschlossen und die eingelaufene Flutwassermenge bis zu 2 Stunden zurückgehalten. In dieser Zeit ist der Wasserstand vor dem Siele etwas abgesunken. Durch den anschließenden Auslaß der zurückgehaltenen Flutwassermenge wird der Ebbestrom erheblich verstärkt. Wie die Modellversuche ergeben haben, ist bei Rückhaltezeiten von 2 Stunden eine ausreichende Spülwirkung bis etwa 5,5 km unterhalb und 9,5 km oberhalb des Sperrwerkes zu erwarten.

Abb. 9 zeigt die im Modellversuch für eine mittlere Tide ermittelten Tide- und Geschwindigkeitskurven für eine Meßstelle 1,5 km oberhalb des Sielbauwerkes. Zusätzlich ist es möglich, durch entsprechenden Betrieb des Sieles die Flutstromgeschwindigkeiten noch zu drosseln. Auf Grund der günstigen Erfahrungen des Spülbetriebes mit dem Siele Nordfeld wird erwartet, daß durch intensiven Spülbetrieb mit den großen bei der neuen Abdämmung zur Verfügung stehenden Flutwassermengen eine für Vorflut und Schifffahrt ausreichende Rinne in der Tide- und der Außeneider freigespült werden kann und mindestens der weiteren Versandung Einhalt geboten wird. Es wird außerdem erwartet, daß der Spülbetrieb zu einer Stabilisierung der Rinnen in der Außeneider beitragen wird. Früher waren die Schifffahrtrinnen dort sehr starken Änderungen in ihrer Lage unterworfen (22). Das Siele wird bei Sturmfluten rechtzeitig geschlossen und schützt so die Eiderniederungen vor Sturmfluten. Für die Schifffahrt ist eine Schleuse vorhanden.

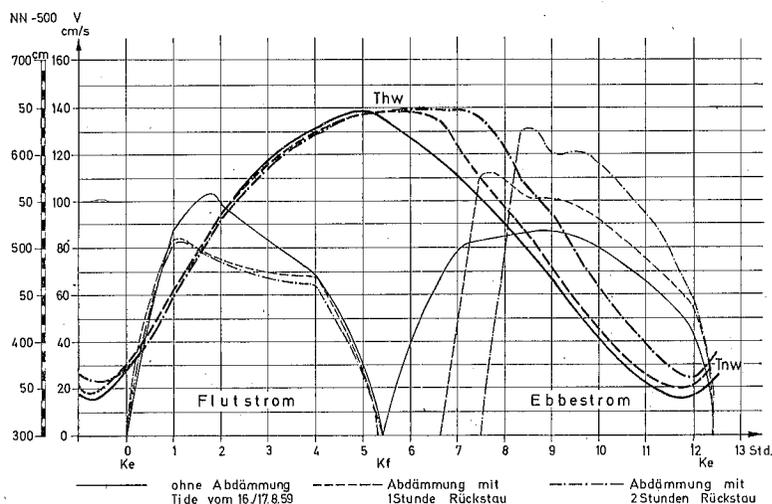


Abb. 9: Strömungsgeschwindigkeiten im Modellversuch 1,5 km oberhalb des neuen Eiderdammes. Modelltidekurven am Pegel Hundeknöll

Mit dem Bau der neuen Eiderabdämmung ist 1967 begonnen worden. Der 5 km lange Damm auf dem nördlichen Watt, das Sielbauwerk und die Schleuse sind fertiggestellt. 1972 soll die Abdämmung des bisherigen Eiderlaufes südlich des Sielbauwerkes erfolgen, so daß 1973 mit dem Spülen begonnen werden kann, dessen zweckmäßigste Steuerung sich erst im praktischen Betrieb ergeben wird. In der ersten Zeit sind starke Veränderungen in der Morphologie der Außeneider zu erwarten. Es ist dringend erforderlich, die hydrologischen und morphologischen Untersuchungen ohne Unterbrechung auch nach Fertigstellung der Abdämmung intensiv weiterzuführen, um eine optimale Wirksamkeit des Spülbetriebes unter Berücksichtigung aller Belange zu erreichen.

## 7. Die Ausbauten und Ausbauplanungen an der Ems

### 7.1. Die bisher ausgeführten Ausbaumaßnahmen

Die Emsmündung hat ihre Verkehrsbedeutung als Fahrwasser von See zu den Häfen Emden und Delfzijl sowie zu den weiter stromauf gelegenen Häfen Leer und Papenburg. Diese Strecke ist durch 2 sehr unterschiedliche Abschnitte gekennzeichnet, das Emders Fahrwasser vom Emders Hafen bis zu der Landecke „Knock“ und den Abschnitt von der Knock bis zur See.

Im Abschnitt unterhalb der Knock wirkt sich auf die Strömungsgeschwindigkeit und damit auf die Sandbewegung der durch Sturmflutwirkung zwischen dem 14. und 16. Jahrhundert entstandene Dollart (21) günstig aus. Er stellt für die obere Strecke dieses Abschnittes, den Gatjebogen und das Ostfriesische Gatje, ein Spülbecken dar (Abb. 1). Von der gesamten Flutwassermenge von rd. 160 Mio m<sup>3</sup>, die den Querschnitt in Höhe der Knock durchströmt, gehören etwa  $\frac{2}{3}$  zum Flutraum des Dollart und  $\frac{1}{3}$  zum Tidefluß Ems. Unterhalb der Dollarteinmündung treten mehrere Stromspaltungen auf. Die natürlichen Verhältnisse waren aber immer so, daß jeweils eine Rinne einer Stromspaltung ausreichende Fahrwassertiefen für die Schifffahrt aufwies. Außer einer Befestigung der Südwestecke der Insel Borkum durch Buhnen, um einen nordöstlichen Festpunkt für das Emsfahrwasser zu schaffen, waren bisher keine Strombauwerke zur Stabilisierung der Rinnen und Erhaltung der Fahrwassertiefen erforderlich. Nur in begrenztem Umfang muß an einigen Stellen gebaggert werden.

Die eigentlichen Schwierigkeiten für die Zufahrt nach Emden treten in dem oberhalb der Knock gelegenen Emders Fahrwasser auf. Dieser Abschnitt wird durch die Spülwirkung des Dollart kaum noch beeinflußt, so daß nur eine verhältnismäßig geringe Tidewassermenge zur Wirkung kommt. Außerdem liegt hier die Brackwasserzone. Starke Schlickablagerungen und eine durch Fluträumung verstärkte Sandeintreibung aus dem unterhalb anschließenden Abschnitt sind die Folge. Zudem liegt die Mündung des Emders Fahrwassers an der Anlandungen begünstigenden Innenseite des Gatjebogens. Die umfangreichen Maßnahmen zur Schaffung eines ausreichenden Fahrwassers zum Emders Hafen konzentrierten sich daher seit der Jahrhundertwende auf den Ausbau des Emders Fahrwassers und der Knock. Das älteste und wohl wichtigste Bauwerk ist dort das Geise-Leitwerk oder Leitdamm Geise (Abb. 10). Es soll möglichst weitgehend die Wassermassen des Dollart von denen des Emders Fahrwassers trennen, um Querströmungen zu verhindern, durch die sowohl Sand- und Schlickmengen vom Dollart in das Emders Fahrwasser gelangten, und die auch zumindest zeitweise die Räumkraft im Emders Fahrwasser schwächten. Es sind drei Bauabschnitte zu unterscheiden: Das alte Geise-Leitwerk aus dem Jahre 1890, das neue Geise-Leitwerk 1933 und der Leitdamm Geise 1965 (21). Die Tatsache, daß das Bauwerk des nächsten Bauabschnitts jeweils um etwa 450 m näher an das Emders Fahrwasser gelegt worden ist, gibt einen Hinweis auf die zunehmende Wirkung der Räumkraft, die mit dieser Einengung des Emders Fahrwassers angestrebt wurde.

Als Ergänzung dieser Regelungsmaßnahmen ist nördlich des Emders Fahrwassers 1922 der Seedeich Emden-Knock fertiggestellt worden, der das Strombett begradigte und es ebenfalls zur Erhöhung der Räumkraft einengte. Außerdem sind durch diese Eindeichung des Larrelt-Wybelsumer Watts Ablagerungsflächen für die im Emders Hafengebiet und im Emders Fahrwasser gebaggerten Schlick- und Sandmassen geschaffen worden. Die Nachteile der früheren Methode, bei der das Baggergut im Dollart verklappt wurde und von dort wieder in das Fahrwasser gelangen konnte, waren damit beseitigt.

Zur Verbesserung der Fahrwasserverhältnisse im Bereich der Knock ist 1934/35 der Leitdamm Knock fertiggestellt worden. Durch diesen Damm, dessen Kronenhöhe auf MThw lag, wurde die Knockster Nebenrinne, die von dem über das Wattgebiet des Rysumer Nackens laufenden Flutstrom geschaffen war, abgedämmt (21) (Abb. 10). Weiterhin war dadurch die zwischen Hauptfahrwasser und Nebenrinne liegende „Mittelplate“ festgelegt, die ständig in südwestlicher Richtung in das Hauptfahrwasser vorgetragen wurde. Die schließlich noch erwartete Wirkung, wonach sich in dem so geschaffenen Becken zwischen Damm und Landesschutzdeich der vom Flutstrom mitgeführte Sand ablagern würde, trat schneller ein als erwartet. Schon einige Jahre nach Fertigstellung des Leitdamms war das Becken weitgehend aufgesandet. Es wird seitdem eingedeicht und als Ablagerungsfläche für den im Emdener Fahrwasser und an der Knock angefallenen Baggerboden benutzt. Durch diesen an der Innenseite des Bogens an der Knock gebauten Leitdamm konnten die Quereintreibungen von Sand durch den Flutstrom zwar größtenteils unterbunden werden, die Mittelplate bildet sich — wenn auch im kleineren Umfange — jedoch nach wie vor, da die im Bogen verlaufende Fahrrinne zur Außenseite hin ausweichen konnte.

Durch die vorgenannten Regulierungsmaßnahmen konnten die Baggerungen zur Aufrechterhaltung der angestrebten Fahrwassertiefe bedeutend eingeschränkt werden. Für die Erhaltung der Fahrwassertiefe von SKN—7,0 m, die für den Schiffsverkehr bis 1958 ausreichte, waren aber immer noch 2,0 bis 2,5 Mio m<sup>3</sup> Sand und Schlick jährlich im Emdener Fahrwasser und an der Knock zu baggern. Die Baggermenge stieg ab 1964 auf 6,5 bis 7,0 Mio m<sup>3</sup> jährlich an, als das Fahrwasser auf SKN —8,50 m vertieft war und die durch Baggerungen zu unterhaltende Fahrwasserstrecke sich dabei von rd. 8 km auf rd. 20 km bis ins Ostfriesische Gatje und ins Dukegat ausgedehnt hatte. Für die Baggerungen zur Erhaltung der Fahrwassertiefen haben sich auch auf der Ems Hopperbagger gegenüber Eimerkettenbaggern als wirkungsvoller erwiesen. Der im Emdener Fahrwasser und im Gatjebogen anfallende Baggerboden wird auf Spülflächen im Wybelsumer Polder und auf dem Rysumer Nacken untergebracht. Die im Ostfriesischen Gatje und weiter seewärts gebaggerten Massen werden in Höhe von Borkum verklappt, was bisher zu keinen eindeutig feststellbaren Nachteilen für die angrenzenden Fahrwasserbereiche geführt hat. Damit auch die inzwischen immer größer gewordenen Massengutschiffe den Emdener Hafen erreichen können, ist in der Alten Ems/Dukegat ein Leichterplatz eingerichtet worden, dessen Zufahrt zur Zeit auf eine Tiefe von SKN —12,50 m ausgebaut wird.

## 7.2. Untersuchungen für künftige Ausbauten

In dem Bestreben, den erheblichen Umfang der jährlichen Unterhaltsbaggermengen zu verringern und darüber hinaus einen weiteren Ausbau des Emsfahrwassers zu verwirklichen, sind entsprechende Ausbaumöglichkeiten untersucht worden. Dabei wurde nicht nur an die klassischen Methoden (1) bis 4) Abschnitt 2.3) gedacht, sondern auch neuartige Wege in Betracht gezogen, um die besonderen Schwierigkeiten der Seeschiffahrtstraße Ems zu überwinden (Methoden 5) bis 7) aus Abschnitt 2.3). Die Wirksamkeit der verschiedenen Regelungsmaßnahmen konnte in einem Tidemodell mit fester Sohle weitgehend bestimmt werden. Das Modell umfaßt die gesamte Tideems und hat die Maßstäbe 1:500 für Längen und Breiten und 1:100 für die Tiefen (Abb. 1). Die erfolgversprechenden Regelungsmaßnahmen sind in Abb. 10 wiedergegeben und sollen nachstehend beschrieben werden. Die Buchstaben der einzelnen Beschreibungen weisen auf die entsprechend bezeichneten Darstellungen in Abb. 10 hin:

- a) Ein System von Buhnen und Leitwerken konzentriert die Strömung im Gatjebogen auf den nördlichen Querschnittsteil zur Freihaltung des Schiffahrtsweges. Eine Öffnung im Längswerk ermöglicht die Zufahrt nach Delfzijl. Die lokale Wirkung der

Maßnahme ist gut, die Tideschwingung wird jedoch gedämpft, wodurch der Tidehub bei Emden um 7 cm abnimmt.

- b) In diesem Bereich sollen die auseinanderlaufenden Flut- und Ebbeströme durch Leitwerke und Buhnen auf eine Rinne konzentriert werden. Auch hier zeigt sich eine sehr gute Wirkung (Zunahme der Strömungsgeschwindigkeit bis zu 80 %), die aber nur auf den Raum der Regulierungsbauwerke beschränkt bleibt. Die Abnahme des Tidehubes bei Emden infolge der Dämpfung der Tidewelle beträgt 11 cm und südlich vom Paapsand 13 cm.

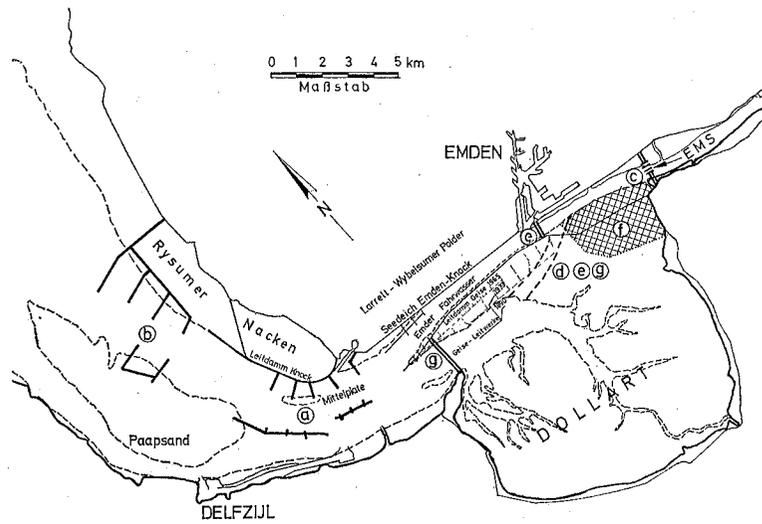


Abb. 10: Im Modell untersuchte Ausbauplanungen für die Ems

Diese „klassischen“ Regelungsmaßnahmen bringen nur relativ geringe örtliche Vorteile, die nicht den hohen Bauaufwand rechtfertigen. Durch leistungsfähige Baggergeräte und moderne Baggermethoden lassen sich derartige Fahrwasserstrecken auch bei weiterer Fahrwasservertiefung wirtschaftlicher unterhalten. Für die Regelung der Strecke oberhalb des Gatjebogens wurden die in Abschn. 2.3 genannten Regelungsprinzipien 5, 6 und 7 untersucht:

- c) Ein Sperrwerk, das bei Thw geschlossen wird, erzeugt nach zweistündiger Rückhaltung infolge des größeren Gefälles einen kräftigen, kurzzeitigen Spülstrom mit etwa 60 bis 70 % Geschwindigkeitszunahme bei Ebbestrom im Emden Fahrwasser, aber auch oberhalb des Sperrwerkes (Prinzip 6), der für die Schifffahrt nicht unbedenklich ist. Das Tnw wird oberhalb des Sperrwerkes während einer „Spültide“ um etwa 20 bis 30 cm höher liegen, wodurch die Landesentwässerung erschwert wird. Durch intermittierenden Spülbetrieb läßt sich dieser Nachteil jedoch einschränken. Ohne Spülung schwingt die Tide frei durch das geöffnete Sperrwerk, das bei Sturmflut zum Schutz der oberhalb gelegenen Flußdeiche geschlossen werden kann. Der hier vorgeschlagene Spülbetrieb entspricht dem künftig bei der Eider geplanten (Abschnitt 6.2).
- d) Eine Verbindungsrinne zwischen Ems und Dollart bewirkt einen zusätzlichen Flutstrom vom Dollart zur Ems, während der Ebbestrom in dieser Rinne nur gering ist. Das führt zu einer Vergrößerung des Verhältnisses  $v_e/v_f$  die aber relativ gering ist.

- e) Die gleiche Rinne in Verbindung mit einer Abdämmung der Ems oberhalb von Emden verwirklicht das Prinzip 7. Bei dieser als besonders günstig anzusehenden Lösung wird nicht nur die Brackwasserzone in den Dollart verlegt, sondern die Geschwindigkeiten im Emdener Fahrwasser, das zu einem offenen Seekanal geworden ist, sind so gering, daß — außer an der Einfahrt — mit keiner nennenswerten Feststoffbewegung und Sedimentation gerechnet werden kann. Außerdem ergeben sich günstigere Strömungsverhältnisse im Gatjebogen.
- f) Durch Abaggerung von Wattflächen oberhalb von Emden bis auf eine Tiefe von 1 m unter SKN wird ein zusätzlicher Flutraum geschaffen (Regelungsprinzip 5), der mit einem hochwasserfreien Damm zum Dollart abgeschlossen wird. Dabei können auch Teile des Dollarts dem Flutraum der Ems zugeschlagen werden. Die Geschwindigkeit des Tidenstroms vergrößert sich um 10 bis 30 cm/s infolge des zusätzlichen Flutraumes von rd. 18 Mio m<sup>3</sup>.
- g) Der oft gemachte Vorschlag, durch eine Abdämmung des Dollart und eine Verbindung zwischen Dollart und Ems die Strömungsgeschwindigkeiten im Emdener Fahrwasser erheblich zu vergrößern, hat sich im Modell als unbrauchbar erwiesen. Zwar haben sich der Flutstrom auf 1,50 m/s und der Ebbestrom auf 2,20 m/s erhöht, das Tideniedrigwasser steigt jedoch um 1,30 m und das Tidehochwasser fällt um 0,40 m. Wegen der Abnahme des Tidehubes verringern sich die Strömungsgeschwindigkeiten im gesamten übrigen Ästuar wesentlich.

Neben den hier geschilderten sind noch weitere Varianten und Kombinationen verschiedener Regelungsmaßnahmen im Modell untersucht worden, die sich aber als weniger günstig oder unbrauchbar erwiesen haben. Welche der untersuchten Ausbaumaßnahmen zur Ausführung kommen wird, ist noch nicht entschieden. Weitere Modellversuche mit beweglichem Sohlenmaterial sollen für die am günstigsten angesehenen Regelungsmaßnahmen ausgeführt werden, um unmittelbare Aussagen über Sohlveränderungen zu erhalten. Erst wenn dann die Relation zwischen Wirksamkeit und Aufwand (Bau- und Unterhaltungskosten) ganz zu übersehen ist, kann über die Ausführung entschieden werden.

## 8. Folgerungen

Aus den Teilberichten über die einzelnen deutschen Tideästuarien ergeben sich als Folgerungen:

1. Allgemeingültige Regeln für den Ausbau der Mündungsstrecken von Tidenströmen gibt es nicht. Die zu ergreifenden Maßnahmen sind immer abhängig von den jeweiligen hydrologischen und morphologischen Verhältnissen des Ästuars.
2. Allen Ausbauplanungen müssen sorgfältige hydrologische Untersuchungen vorausgehen, um die natürlichen Verhältnisse des Ästuars zu erforschen sowie großräumige Tendenzen zu erkennen, auf die der Ausbau Rücksicht nehmen muß.
3. Durch großflächige hydraulische Tidemodelle sind die günstigsten Regelungsmaßnahmen im einzelnen zu ermitteln. Die Technik der Tidemodelle mit beweglicher Sohle ist für diesen Zweck weiterzuentwickeln.
4. Neben den „klassischen“ Regelungsmitteln — Buhnen, Leitdämme —, durch die auf Strömung und Feststoffbewegung in den Mündungsstrecken der Tidenströme eingewirkt werden kann, sind weitere Methoden entwickelt worden, die sich in besonders gelagerten Fällen anwenden lassen. Daneben wird man für Ausbau und Unterhaltung meistens nicht auf Baggerungen verzichten können. Baumaßnahmen und Baggerungen ergänzen und stützen einander.

5. Weitere grundlegende Untersuchungen in der Natur und den Laboratorien sowie theoretische Untersuchungen sind notwendig, um die Zusammenhänge zwischen Feststoffbewegung und den hydrologischen Faktoren unter den instationären Bedingungen der Tide zu erforschen.

#### Schrifttumsverzeichnis

- [1] BONNEFILLE, R.: Etude d'un critère de début d'apparition des rides et des dunes fluviales. Bull. du CREC Nr. 11, Chatou 1965.
- [2] FRANZIUS, L.: Die Korrektion der Unterweser und Projekt zur Korrektion der Außenweser, Leipzig 1895.
- [3] FREDE, G.: Die Arbeiten zur Verbesserung des Fahrwassers der Jade. Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft 1937.
- [4] GEHRIG, W.: Über die Frage der naturähnlichen Nachbildung der Feststoffbewegung in Modellen. Mitt. Franzius-Institut TU Hannover, Nr. 29, 1965.
- [5] GIESE, E., TEICHERT, J., VOLLMERS, H.: Das Tideregime der Elbe; hydraulisches Modell mit beweglicher Sohle. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Nr. 31, 1972.
- [6] GIESE, E.: Fahrwasserumbildungen in der Unter- und Außenelbe. Die Wasserwirtschaft 1971, H. 3.
- [7] GOHREN, H.: Studien zur morphologischen Entwicklung des Elbemündungsgebietes. Hamburger Küstenforschung, H. 14, 1970.
- [8] HARTEN, H.: Abdämmung der Eider; Modellversuche im Tidemodell. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Nr. 30, 1970.
- [9] HENSEN, W.: Die Entwicklung der Fahrwasserverhältnisse der Außenelbe. Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft 1939/40.
- [10] HOVERS, G.: Der Einfluß von Strombauwerken auf die morphologischen Veränderungen in Stromrinnen im Mündungsbereich eines Tideflusses, erläutert am Beispiel der Außenweser. Diss. TU Braunschweig 1972.
- [11] JARKE, J.: Der Boden der südlichen Nordsee. Deutsche Hydrografische Zeitschrift, 1956, H. 1.
- [12] JENSEN, P.: Synthèse des principales recherches sur les dunes et les rides fluviales. Bull. de la Direction des Etudes et Recherches, Nr. 2 Série A, Chatou 1970.
- [13] KRÜGER, W.: Die Jade, das Fahrwasser Wilhelmshavens, ihre Entstehung und ihr Zustand. Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft, 1937.
- [14] LUCHT, F.: Die Sandwanderung im unteren Tidegebiet der Elbe. Deutsche Hydrografische Zeitschrift, 1953, H. 6.
- [15] LUCHT, F.: Hydrographie des Elbeästuars. Archiv Hydrobiologie Suppl. Bd. XXIX, 1964.
- [16] PAHLKE, H., GRIMM-STRELE, J.: Messung von Sandbewegung mit Leitstoffen, Versuchsanstalt für Wasserbau u. Schiffbau, Bericht Nr. 530/70, Berlin 1970.
- [17] PLATE, L.: Die Entwicklung des Wurster- und Fedderwarder Armes. Bremen 1921 (unveröffentlicht).
- [18] PLATE, L.: Die Vertiefung der Außenweser durch den Ausbau des Fedderwarder Armes. Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft, 1926.
- [19] ROHDE, H.: Die Änderung der hydrografischen Verhältnisse des Eidergebietes durch künstliche Eingriffe. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen 1965, Sonderheft.
- [20] ROHDE, H.: Die Entwicklung der Wasserstraßen im Bereich der deutschen Nordseeküste. Die Küste, H. 20, 1970.
- [21] SCHUBERT, K.: Ems und Jade. Die Küste, H. 19, 1970.
- [22] SINDERN, J.: Die Eider und ihre Probleme. Wasser-Jahrbuch 1969.
- [23] VOLLMERS, H., GIESE, E.: Discussion to „Instability of Flat Bed in Alluvial Channels" Hill etc. Journal Hydraulics Division ASCE, Vol. 96, HY 6, 1970.
- [24] WALTHER, F.: Die morphologische und hydrologische Entwicklung der Außenweser im Hinblick auf neue Fahrwasserausbauten, Bremen 1967 (unveröffentlicht).
- [25] WIGAND, V.: Jade-Fahrwasser und Hafen Wilhelmshaven; Stand und weiterer Ausbau. Hansa 1972, Nr. 2.