

Abteilung II — Seeschifffahrt

Frage 2

Richtung und Gestalt der Zufahrten zu den Seehäfen und Verbesserung der Schifffahrtsrinne bis ins tiefe Wasser. — Vertiefung und Erhaltung der Tiefen. — Einfluß von Strömungen, Wellen, Wind und Sandbewegung.

Von Dr.-Ing. Wulf Niebuhr, Ministerialrat, Bundesministerium für Verkehr, Bonn; Dr.-Ing. Theodor Janssen, Oberregierungsbaurat, Wasser- und Schifffahrtsdirektion Aurich; Dipl.-Ing. Max Krause, Präsident der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Hamburg; Dr.-Ing. Friedrich Müller, Regierungsbaurat, Wasser- und Schifffahrtsamt Emden; Dipl.-Ing. Martin Schreiber, Wasser- und Schifffahrtsamt Emden; Dr.-Ing. Friedrich Walther, Präsident der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Aurich.

Thema:

- I. Richtung und Gestaltung der Zufahrten zu den deutschen Nordseehäfen und Verbesserung der Schifffahrtsrinnen.**
- II. Über eine Möglichkeit, in der Brackwasserzone tideunterworfenen Ästuarien durch Beeinflussung der Richtung bzw. Größe der vorhandenen Räumungskraft die Fahrwassertiefe zu verbessern bzw. zu erhalten.**

Zusammenfassung

I. Richtung und Gestaltung der Zufahrten zu den deutschen Nordseehäfen und Verbesserung der Schifffahrtsrinnen

Nach einem allgemeinen Überblick über die Geographie der deutschen Nordseeküste werden die besonderen Verhältnisse an der ostfriesischen Inselküste, die von den Mündungen der Ems, Jade, Weser und Elbe unterbrochen bzw. begrenzt wird, geschildert. Die an dieser Küste vorherrschende west-ost gerichtete Sandbewegung ist einerseits bestimmend für den Charakter der Küste, andererseits verursacht sie Versandungen in den Mündungen, sowie auch Verlagerungen der Zufahrten zu den deutschen Seehäfen. Die hierbei auftretenden Probleme werden aufgezeigt, die wichtigsten für die einzelnen Flüsse maßgebenden hydrologischen Daten wie Tidehöhe, Flut- und Ebbe- wassermengen und Oberwassermengen werden mitgeteilt.

Es folgt eine allgemeine Beschreibung der Entwicklung und des gegenwärtigen Zustandes der einzelnen Zufahrten. Im Gebiet der Emsmündung hat im Laufe des letzten Jahrhunderts eine Verschwenkung der Zufahrt aus einer ursprünglich mehr nördlichen Richtung in eine Nordwest-Südost-Richtung stattgefunden. In der Außenjade waren zur Offenhaltung einer Wassertiefe von zunächst 10 m umfangreiche Regulierungsbauwerke und regelmäßige Baggerungen notwendig. Die Wassertiefe in der neuen Weser hält sich zumeist ohne Baggerungen auf 10 m, in der alten Weser auf 12—13 m und in der Elbe außerhalb von Scharhörn auf 20 m. Im ganzen läßt sich feststellen, daß im äußeren Mündungsbereich von Jade, Weser und Elbe sowohl die Wassertiefen wie auch die Stabilität der Stromrinnen von Westen nach Osten zunehmen.

Dort, wo sich bereits ausgedehnte Wattengebiete gebildet haben (Mündungsbucht), weisen die Stromrinnen in ihrer Lage, z. T. durch wasserbauliche Maßnahmen, wie Regu-

lierungsbauwerke und Baggerungen, unterstützt, bereits eine große Stabilität auf. Die zunehmenden Ansprüche der immer größer werdenden Seeschiffe erforderten besonders in den Unterläufen der Flüsse, d. h. oberhalb der Mündungsbuchten, umfangreiche wasserbauliche Maßnahmen. In der Ems wurde schon verhältnismäßig früh (seit 1870) mit größeren Regulierungsbauten begonnen. Diese, in Verbindung mit Baggerungen, ermöglichten eine Vergrößerung der Fahrwassertiefe von ursprünglich etwa 3,0—3,5 m auf heute 8,0 m unter Kartennull (= MSprTnw). In der Unterweser wurde mit den ersten umfangreichen Ausbaumaßnahmen im Jahre 1887 nach Plänen und unter der Leitung von Ludwig Franzius begonnen. Diese und die folgenden Ausbauten führten zu einem vollen Erfolg. Unter Ausnutzung der Tide können auf der Weser heute Schiffe bis zu 9,6 m Tiefgang verkehren. In der Elbe suchte man zunächst ausschließlich durch Baggerungen die erforderlichen Fahrwassertiefen herzustellen bzw. zu erhalten. Die Fahrwassertiefe ist hier allein durch Baggerung von $2\frac{1}{2}$ —3 m auf 8 m unter MThw gebracht worden. Erst um die Jahrhundertwende begann man mit dem planmäßigen Ausbau des Stromes. Durch diesen Ausbau, wiederum in Verbindung mit Baggerungen, gelang es, eine Fahrwassertiefe von 10 m unter Kartennull herzustellen. Die laufend für die Unterhaltung erforderlichen Baggerungen betrugen hierbei i. M. 1,7 Mill. m³ jährlich. Zur Zeit ist der Ausbau auf 11 m im Gange.

Die Ausbaumaßnahmen haben außer z. T. erheblichen Veränderungen der Wasserstände, z. B. Vergrößerung des Tidehubes von 0,20—0,30 auf 3,20 m in Bremen, bzw. von 2,0 auf rd. 2,40 m in Hamburg, Veränderungen der Tidewassermengen und auch eine Verschiebung der Brackwasserzone stromauf zur Folge gehabt. Die Tidehubvergrößerungen wurden hierbei hauptsächlich durch entsprechende Senkungen der Niedrigwasserstände hervorgerufen.

Der Ausbau der Zufahrten erfolgt nach folgenden Grundsätzen:

Vermehrung der Tidewassermenge durch Beseitigung aller Hindernisse, wie Nebenarme, Engstellen, starke Krümmungen.

Bildung eines von oben nach unten allmählich sich trichterförmig verbreiternden Stromlaufes mit schwachen Krümmungen.

Herstellung eines der jeweils zur Verfügung stehenden Tidewassermenge angepaßten Querschnittes, so daß die für die Selbstströmung des Flusses erforderliche Stromgeschwindigkeit gewährleistet ist.

In einem weiteren Abschnitt wird über Bodensedimente, Korngrößenverteilung und Sinkstofftransport in den Mündungsgebieten berichtet. Einige wichtige und für das Geschehen in diesen Gebieten aufschlußreiche Untersuchungsergebnisse werden mitgeteilt:

1. Die Sinkstoffbewegung im Tidegebiet spielt sich hauptsächlich in schwebender Form, d. h. im gesamten Querschnitt ab, während die Geschiebebewegung unmittelbar auf der Sohle für den Gesamttransport ohne Bedeutung ist, weil im allgemeinen die Korngrößen im Mündungsgebiet klein sind. Nur dort, wo gröberes Geschiebe ($> 0,2$ mm) vorherrscht, kann auch die Geschiebebewegung unmittelbar an der Sohle von Bedeutung sein.
2. Die Sinkstoffbewegung ist örtlich verschieden, sie hängt außer vom Korndurchmesser und der Kornform der Sedimente vom jeweiligen Schlickgehalt sowie von der Beschaffenheit der Flußsohle ab. Die Grenzgeschwindigkeit v_0 , bei der die Bewegung beginnt, wurde für einen mittleren Korndurchmesser von 0,11 bis 0,15 mm zu etwa 15 cm/s (gemessen 0,5 m über Grund) und für einen mittleren Korndurchmesser von 0,3 bis 0,4 mm zu etwa 20 cm/s gefunden.

3. Eine gesetzmäßige Beziehung zwischen dem mittleren Sinkstofftransport und der mittleren Stromgeschwindigkeit ist bei sonst gleichen örtlichen Bedingungen nur für den Fein- und Mehlsandgehalt ($> 0,05$ mm), nicht dagegen für den Anteil an schluffigen Sinkstoffen ($< 0,05$ mm) gegeben. Als Annäherung für den Sinkstofftransport $\bar{S}$ (sandiger Anteil) kann die Beziehung genannt werden:

$$S = C \cdot v^\alpha \left(1 - \frac{v_0}{v}\right)$$

worin C eine von den örtlichen Bedingungen abhängige Konstante, v die mittlere und v_0 die Grenzgeschwindigkeit, bei der die Bewegung beginnt, bedeuten. α ergab sich für Sand zu ~ 4 .

4. In der Lotrechten verhält sich der Gehalt an Fein- und Mehlsand ($> 0,05$ mm) in 10, 30, 50 und 70 cm über Grund etwa wie 100 : 51 : 37 : 29 (Ems-Messung), Werte, wie sie ähnlich auch van Veen angibt (100 : 54 : 34 : 28) (5). Der Gehalt an Mehlsand und Schluff ($< 0,05$ mm) erreicht demgegenüber bei 30 bis 50 cm über Grund sein Maximum.

Berechnungen über den Sandhaushalt in der Elbemündung haben weiter ergeben, daß eine erhebliche wechselseitige Ein- und Ausfuhr von Sand mit dem Gezeitenstrom stattfindet, wobei zeitweise die Einfuhr und zeitweise die Ausfuhr überwiegt. Eine gewisse Abhängigkeit von den jeweiligen meteorologischen Verhältnissen scheint hierbei gegeben.

II. Über eine Möglichkeit, in der Brackwasserzone tideunterworfenen Astuarien durch Beeinflussung der Richtung bzw. Größe der vorhandenen Räumungskraft die Fahrwassertiefe zu verbessern bzw. zu erhalten

Ausgehend von der Tatsache, daß in einem Tidefluß die Stabilität der Flußsohle, Anlandung oder Erosion, von der resultierenden Räumungskraft abhängt, wird eine Möglichkeit aufgezeigt, durch künstliche Beeinflussung der Räumungskraft stabile Verhältnisse im Fluß bzw. im Fahrwasser zu erreichen. Gleichgewicht, d. h. eine unveränderte Sohlenlage, wird herrschen, wenn genau so viel Geschiebe mit der Ebbe stromab, wie mit der Flut stromauf verfrachtet wird. Da aus verschiedenen Gründen ein solches Gleichgewicht aber praktisch nicht erreichbar ist, wird man entweder ein Übergewicht der stromab gerichteten Räumkraft oder der stromauf gerichteten Räumkraft anzustreben haben, wobei dann allerdings unterhalb bzw. oberhalb der in Frage stehenden Strecke mit einer Versandung zu rechnen ist. Die Notwendigkeit zu baggern wird hierbei also nicht beseitigt, es kann aber ggf. die Baggerstelle aus der Schiffahrtsrinne heraus verlegt werden und damit können unliebsame Störungen für die Schifffahrt vermieden werden. Im Brackwassergebiet besteht oft ein Übergewicht der stromauf gerichteten Räumkraft infolge des hier wirksamen Dichte-Gefälles. In diesem Falle kann es in Frage kommen, unter Ausnutzung des schon natürlich gegebenen Übergewichtes der Fluträumung diese noch künstlich zu verstärken. Das hierbei anzuwendende Verfahren, Zusammenarbeit zwischen Modell und Rechnung, der rechnerische Ansatz für die Räumkraft bzw. für eine dieser Räumkraft proportionalen Größe von der Form:

$$B \cdot \int_0^D v^\alpha dt,$$

da es ja nur auf das jeweilige Verhältnis von Fluträumung zu Ebberäumung ankommt, wird am Beispiel „Emder Fahrwasser“ im einzelnen geschildert.

Inhalt

	Seite
I. Richtung und Gestaltung der Zufahrten zu den deutschen Nordseehäfen und Verbesserung der Schiffahrtsrinnen	205
A. Allgemeiner Überblick über die Zufahrtswege zu den deutschen Nordseehäfen	205
B. Vergleichende Betrachtung über die Mündungen der Ems, Jade, Weser und Elbe	209
1. Allgemeine Beschreibung	209
2. Der äußere Mündungsbereich	209
3. Die Mündungsbuchten von Ems, Jade, Weser und Elbe	212
4. Der Unterlauf von Ems, Weser und Elbe	213
C. Ausbaumaßnahmen in den Strommündungen	214
1. Die Ems	214
2. Die Jade	215
3. Die Weser	216
4. Die Elbe	220
D. Entstehung und Herkunft der Bodenablagerungen, Grenzgeschwindigkeiten, Bodensedimente, Korngrößenverteilung und Sinkstofftransport (Untersuchungsergebnisse)	225
E. Folgerungen	229
II. Über eine Möglichkeit, in der Brackwasserzone tideunterworfenen Ästuarien durch Beeinflussung der Richtung bzw. Größe der vorhandenen Räumungskraft die Fahrwassertiefe zu verbessern bzw. zu erhalten.	230
Schrifttumsverzeichnis	235

I. Richtung und Gestaltung der Zufahrten zu den deutschen Nordseehäfen und Verbesserung der Schiffahrtsrinnen

A. Allgemeiner Überblick über die Zufahrtswege zu den deutschen Nordseehäfen

Die Ströme Ems, Weser und Elbe sowie die erst in historischer Zeit entstandene Meeresbucht der Jade (Bild 1) bilden in ihren Mündungsbuchten ausgedehnte Wattflächen und ein System von natürlichen Stromrinnen, deren Lage, Ausdehnung und Wassertiefe unter Einwirkung der Naturkräfte (Seegang, Brandung, Strömung) ständigen Änderungen unterworfen ist.

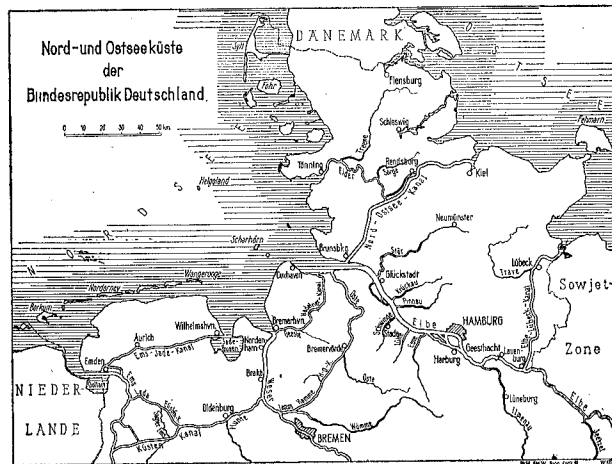


Bild 1

Nord- und Ostseeküste der Bundesrepublik Deutschland

Die Haupttrinnen haben in den Mündungsbuchten (außerhalb der Festlandküste) heute durchweg einen von Nordwesten nach Südosten gerichteten Verlauf. Außerhalb der Inselkette sind sie fast westöstlich gerichtet. Sie kehren sich also der von Westen anlaufenden Flutwelle entgegen.

Noch in historischer Zeit hatten die Zufahrten außerhalb der Festlandküste eine mehr nördlich gerichtete Mündung; das Verschwenken in die Nordwest-Südostrichtung ging schrittweise vor sich. Hierbei wird die Veränderung der meteorologischen Verhältnisse, insbesondere die Zunahme der Häufigkeit des Auftretens von Westwinden in der nördlichen Hemisphäre seit Beginn des vorigen Jahrhunderts, mitgewirkt haben. Diese Erklärung macht u. a. deutlich, warum auch die Jade, die im Bereich des Festlandes etwa Nord-Süd verläuft, im Bereich von Minsener Oog deutlich das Bestreben nach einer Verschwenkung in die Nordwest-Südost-Richtung zeigt.

Zwischen der Ems- und Jademündung hat sich als Fortsetzung der westfriesischen Inseln die Kette der ostfriesischen Schwemmsand-Inseln gebildet, die den nördlichen Abschluß des dem Festland vorgelagerten Wattengebietes bildet. Dieses Wattengebiet umfaßt eine Breite von 6 bis 10 km. Entlang der Inselküste findet unter dem Einfluß der vorwiegend von Westen nach Osten gerichteten Wirkung der Naturkräfte eine Wanderung feiner Sandmassen in west-östlicher Richtung statt. Diese Sanddrift birgt das Hauptproblem der Offenhaltung der Schiffahrtsrinnen zu den deutschen Nordseehäfen in sich, und zwar in doppelter Beziehung:

- a) Dort, wo die west-östliche Sanddrift die Flußmündungen kreuzt, entstehen Untiefen und Platen im Fahrwasser. Dieser Erscheinung kann durch künstliche Mittel (außer Baggerungen) kaum begegnet werden.
- b) Mit dem Flutstrom gelangt Sand auch in die Flußmündungen hinein und führt hier zu unliebsamen Ablagerungen. Zur Bekämpfung dieser Mißstände werden außer Baggerungen auch Ausbaumaßnahmen verschiedener Art durchgeführt.

Im inneren Winkel der Deutschen Bucht haben Ems, Jade, Weser und Elbe große Mündungstrichter gebildet, durch welche die vor der ostfriesischen Küste vorhandene Inselkette unterbrochen wird (Bild 2).

Nördlich der Elbemündung besteht die Westküste Schleswig-Holsteins dann wieder aus Watten und Inseln. Sie ist allerdings wegen ihrer anderen Lage zur Richtung der wirkenden Naturkräfte und wegen der anders gearteten geologischen Verhältnisse nicht so regelmäßig ausgebildet wie die ostfriesische Inselküste.

Die Strommündungen bilden von alters her für die Seeschifffahrt den natürlichen Zugang zum Binnenland. In ihnen sind daher auch bereits vor mehr als tausend Jahren

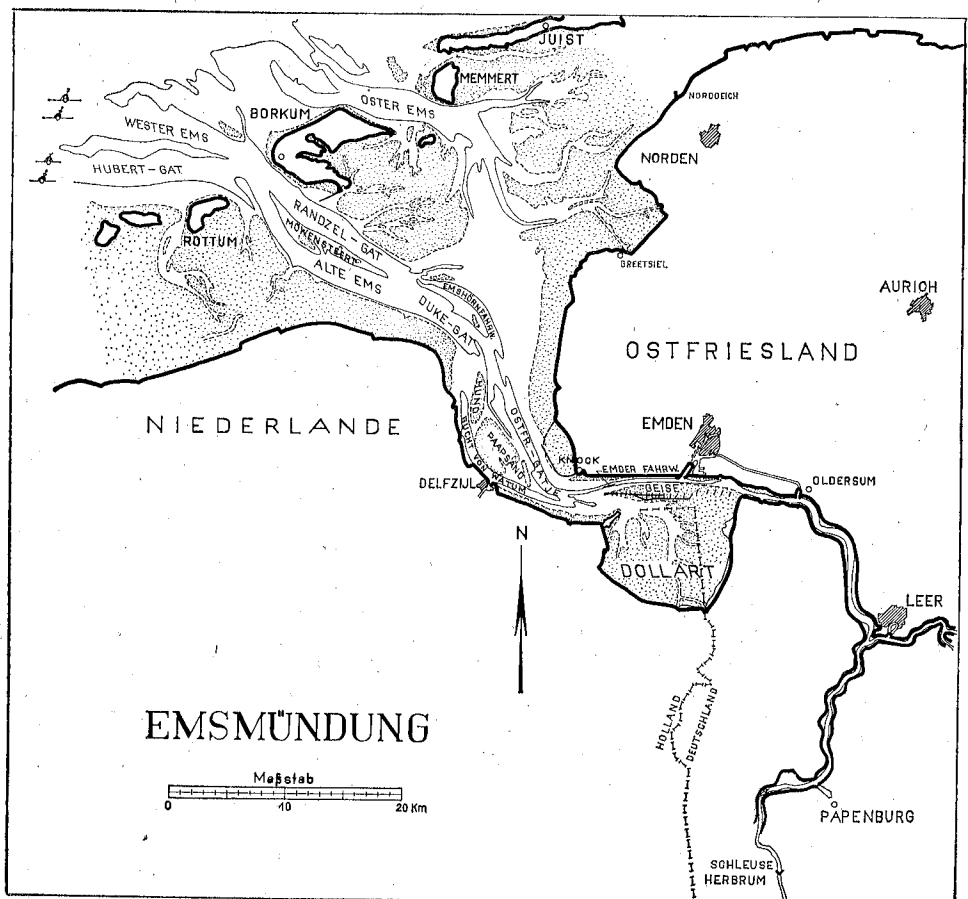


Bild 2
Emsmündung

die alten Hafenstädte Emden, Bremen und Hamburg entstanden. Mit der fortschreitenden Entwicklung des Handels und der Seeschifffahrt kamen neue Häfen hinzu, die weiter abwärts gegründet wurden, da die bis zu den älteren Häfen von Natur vorhandenen Fahrwasserverhältnisse für die größeren Seeschiffe nicht mehr ausreichten.

Die Entfernungen vom äußeren Bereich der Strommündungen bis zu den einzelnen Häfen sind beträchtlich. Sie sind für die wichtigsten Häfen nachstehend angegeben:

Ems		Jade	Weser		Elbe
Von Borkum bis:		von Wangerooge bis:	von Leuchtturm Roter Sand bis:	von Feuerschiff „Elbe I“ bis:	
Emden	48 km	Wilhelmshaven	Bremerhaven	Cuxhaven	40 km
Leer	75 km	45 km	49 km	Brunsbüttelkoog	
Papenburg	90 km		Nordenham	56 km	70 km
			Brake	73 km	Hamburg-St. Pauli
			Bremen	109 km	140 km

Von den aufgeführten Häfen haben Emden, Wilhelmshaven, Bremerhaven und Cuxhaven etwa gleiche Entfernungen von 40 bis 49 km von der offenen See. Aber von ihnen ist nur Emden einer der alten Häfen, während Bremerhaven, Cuxhaven und Wilhelmshaven als Häfen erst seit 100 bis 150 Jahren hervorgetreten sind. Wilhelmshaven hat trotz der günstigen natürlichen Voraussetzungen des Jadefahrwassers als Handelshafen erst seit 1958 erhebliche Bedeutung für den Verkehr von Großtankern erlangt, nachdem dort großzügige Löschanlagen für Öl errichtet worden sind.

Mit dem ständigen Anwachsen der Schiffsgrößen und insbesondere der Schiffstiefgänge mußten seit mehr als 100 Jahren an den Zufahrten zu den deutschen Seehäfen umfangreiche Maßnahmen durchgeführt werden, um diese den gesteigerten Anforderungen anzupassen. Diese Entwicklung ist im Hinblick auf die weitere Größenentwicklung der Seeschiffe noch nicht abgeschlossen. Von ausschlaggebender Bedeutung für die Ausbaufähigkeit der Fahrwasser sind die natürlichen morphologischen und hydrologischen Gegebenheiten, wie Küstengestaltung, das Ausmaß der Gezeitenbewegung, die in jeder Tide bewegten Flut- und Ebbwassermengen und die Abflussmengen aus dem Binnenland. Schließlich ist — namentlich in den äußeren Mündungsbereichen — noch die (in der Stromrichtung gesehen) nach rechts gerichtete Wirkung der Erdrotation auf die Wasserbewegung zu berücksichtigen. Diese Gegebenheiten können durch wasserbautechnische Maßnahmen nur z. T. und auch nur bis zu gewissen Grenzen beeinflusst werden. Je größer aber die Tidenhübe, die Flut- und Ebbwassermengen sowie der Abfluß aus dem Binnenland in den Strommündungen sind, um so günstiger sind auch die Voraussetzungen für die Offenhaltung ausreichend tiefer und breiter Stromrinnen.

Um einen Überblick über die Gezeitenbewegung an der deutschen Nordseeküste zu geben, werden nachstehend die mittleren Tidenhübe an verschiedenen Punkten der Seeschiffahrtstraßen aufgeführt:

Ems		Jade	Weser		Elbe	
Borkum	2,20 m	Wangerooge-Ost	Roter Sand	2,75 m	Cuxhaven	2,90 m
Emden	3,00 m	2,80 m	Bremerhaven		Brunsbüttelkoog	
Leerort	2,45 m	Wilhelmshaven		3,40 m		2,65 m
Papenburg	1,65 m	3,60 m	Nordenham	3,40 m	Hamburg-St. Pauli	
			Brake	3,35 m		2,30 m
			Bremen	3,20 m		

Die folgende Zusammenstellung der Flut- und Ebbwassermengen ermöglicht einen Vergleich über die in den verschiedenen Stromgebieten unterschiedlichen hydrologischen Grundlagen.

Flut- und Ebbwassermengen bei mittlerem Tidehub
und mittlerem Oberwasserabfluß:

Stromgebiet	Ortsbezeichnung	Flutwassermenge (Mill. m ³)	Ebbwassermenge (Mill. m ³)
Ems	Dollart und Emden Fahr- wasser	197,0	199,0
	Emden Fahrwasser (Geise- spitze)	67,0	83,0
	Emden	44,0	52,0
	Leerort	13,0	14,5
Jade	Wilhelmshaven	399,6	399,6
Weser	Bremerhaven-Blexen	119,0	132,0
	Brake	52,1	65,1
	Veegesack	17,4	30,1
Elbe	Cuxhaven (ohne Klotzen- loch)	540,6	592,0
	Brunsbüttelkoog	377,9	404,3
	Wedel	105,4	131,8

Ebenso zeigen die nachstehenden Angaben über die sekundlichen Abflußmengen aus dem Binnenland für höchstes Hochwasser, Mittelwasser und niedrigstes Niedrigwasser die Unterschiede in der Bedeutung der Ströme Ems, Weser und Elbe. An der Jade ist ein nennenswerter Abfluß aus dem Binnenlande nicht vorhanden, da sie eine reine Meeresbucht ist.

Abflüsse aus dem Binnenland (Oberwassermengen):

Stromgebiet	Pegel	Höchstes Hochwasser HHQ (m ³ /s)	Mittel- wasser MQ (m ³ /s)	Niedrigstes Niedrigwasser NNQ (m ³ /s)
Ems	Herbrum	1 269	73	6,5
Weser	Intschede	3 370	311	51
Elbe	Artlenburg	3 400	660	190

*B. Vergleichende Betrachtung über die Mündungen der Ems, Jade, Weser und Elbe***1. Allgemeine Beschreibung**

Zwischen der niederländischen Insel Rottum und der deutschen Insel Juist liegt das Mündungsgebiet der Ems, die mit ihren Mündungsarmen Wester- und Osterems die Insel Borkum umfaßt.

Östlich der Insel Wangerooge wird die bis dahin geschlossene Inselkette durch die Mündungsgebiete der Jade, Weser und Elbe unterbrochen. Innerhalb dieser Mündungsgebiete haben sich zwischen den Stromrinnen ausgedehnte Wattengebiete gebildet, die zwischen Weser und Elbe nördlich und südlich des Großen Knechtsandes durch selbständige bedeutende Wattströme (Tegeler Rinne, Norder- und Westertill) gefüllt und entleert werden.

Die hier zwischen den Stromsystemen liegenden Wattzungen sind jedoch so schmal, daß sich auf ihnen die Bildung dauerhafter Düneninseln nach dem Vorbild der ostfriesischen Inseln nicht vollziehen konnte. Ansätze hierzu sind aber überall erkennbar, wie die über das mittlere Tidehochwasser hochgewachsenen, teilweise mit Dünen bestandenen Sände bzw. Wattinseln Minsener-Oog, Alte Mellum, Scharhörn und Trischen (sowie die Insel Neuwerk) beweisen. Sie alle säumen den seeseitigen Rand der zwischen den Stromrinnen liegenden Wattgebiete. Auch am seeseitigen Rand des Großen Knechtsandes ist von jeher die Bildung hochwasserfreier Sandplatten erkennbar; sie haben aber nicht annähernd die gleiche Stabilität wie die übrigen genannten Sände.

Die entlang der ostfriesischen Inseln von Westen nach Osten gerichtete Sandwanderung setzt sich durch das Mündungsgebiet der drei Ströme unter den veränderten hydrologischen Voraussetzungen in besonderen Formen fort.

Nach dem Festland zu befinden sich die Mündungsbuchten im engeren Sinn und anschließend weiter landeinwärts die Unterläufe der Ströme selbst, die bereits zwischen festen Ufern liegen.

Das Mündungsgebiet der Ströme läßt sich daher in drei Zonen einteilen:

Der äußere Mündungsbereich, in welchem die Stromrinnen stark veränderlich sind,

die Mündungsbucht, in welcher sich breite Wattengebiete gebildet haben und die Stromrinnen ihrer Lage nach, durch wasserbauliche Maßnahmen unterstützt, bereits eine größere Stabilität aufweisen,

der Unterlauf der Ströme, der zwischen festen Ufern liegt.

2. Der äußere Mündungsbereich

Die vorwiegend in west-östlicher Richtung wirkenden Naturkräfte erfahren in ihrer Richtung und Stärke beim Eintritt in die Mündungsbuchten Veränderungen. Seegang und Brandung verlieren an Stärke, je mehr sie in die Gebiete flacheren Wassers und in das Wattengebiet eintreten. Die entlang der Inseln bei Flut nach Osten, bei Ebbe nach Westen gerichteten Gezeitenströmungen haben dort normalerweise nur Geschwindigkeiten von wenigen Dezimetern je Sekunde. Im äußeren Mündungsbereich wird die Richtung der Strömungen bei Flut aus der West-Ostrichtung in südöstliche bzw. später südliche Richtung abgebogen. Bei Ebbe ist der Vorgang umgekehrt. In diesen Hauptstromrichtungen haben sich auch die großen natürlichen Stromrinnen gebildet, welche als Fahrwasser für die Schifffahrt benutzt werden.

Hier erreichen die Stromgeschwindigkeiten in den Rinnen bei normalen Tiden Werte bis 1,50 m/s oder auch etwas mehr. Derartige Stromgeschwindigkeiten sind in der Lage, die anstehenden feinen Sande aufzuwirbeln und in Bewegung zu halten. Sie bewegen sich in den Stromrinnen bei Flutstrom nach dem Land zu, bei Ebbe nach See zu. Da die Richtung der Stromrinnen bzw. die Richtung und Lage des Hauptstromstrichs innerhalb der breiten Stromrinnen bei Flut- und Ebbestrom häufig verschieden sind, und sich ggf. auch kreuzen, findet ein kompliziertes Zusammenspiel von Seegang, Brandung und Strömung statt, deren resultierende Wirkung die Richtung und das Ausmaß der Sandverlagerungen bestimmt. Diese Zusammenhänge und sich hierbei etwa ergebende Entwicklungstendenzen können nur durch ständige örtliche Messungen und Beobachtungen geklärt werden.

Die Kette der westfriesischen (niederländischen) Inseln ist von der der ostfriesischen (von Juist bis Wangerooge) durch den Einschnitt der beiden Emsmündungsarme (einschl. der von ihnen umschlossenen Insel Borkum) deutlich abgesetzt. In Nordsüdrichtung gemessen beträgt der Sprung etwa 15 km. (Bild 2). Von den beiden die Insel Borkum umfassenden Ströme, Wester- und Osterems, ist der letztere hydrologisch gesehen heute nicht mehr als Emsmündungsarm anzusprechen; er ist nur noch ein Seegatt für das zwischen Juist und dem Festland sich ausdehnende große Wattengebiet.

Die Westerems ist durch langgestreckte Sande, die durch die die Strommündung kreuzenden Sandmassen ständig genährt werden, in zwei Rinnen aufgeteilt: das Hubertgatt und die Westerems (im engeren Sinn). Am Punkt ihres Zusammentreffens, dort, wo der äußere Mündungsbereich in die Mündungsbucht übergeht, ist das Fahrwasser abgelenkt; hier lehnt es sich an die Sandinsel Borkum an. Die Insel Borkum gewährleistet die feste Lage des Fahrwassers an dieser Stelle und wird mit aus diesem Grunde bewußt durch Schutzmaßnahmen gehalten. In der Mündungstrecke sind infolge der großen durchströmenden Wassermengen von Natur aus überall ausreichende Wassertiefen vorhanden, so daß hier keine besonderen Maßnahmen erforderlich sind.

Während sich im Bereich der Inselkette der größte Teil der Sandwanderung bis zu einer Wassertiefe von etwa 6 m längs der Küste vollzieht, formieren sich beim Eintritt in den äußeren Mündungsbereich der Jade die Sandmassen in große Sandbänke von sichelförmiger Gestalt, die sich auf eine Zone von 10–15 km Breite verteilen. Mit ihren Südausläufern speisen sie die am Rande der Wattzungen gelegenen hohen Sande und Wattinseln. Ihre Hauptmasse überquert die in eine Reihe von Stromrinnen aufgespaltenen Mündungen der Jade und Weser in nordöstlicher Richtung, bis sie schließlich zur Elbmündung gelangen (Bild 3). Hierbei finden periodische Verlagerungen der tiefen Stromrinnen statt, bei denen in Zeitabschnitten von etwa 60–70 Jahren etwa gleiche Zustände auftreten.

Die äußeren Stromrinnen in diesem Gebiete, wie das „Wangerooger Fahrwasser“, die „Neue Weser“ und die dazwischen liegenden Rinnen, haben eine vom WNW nach OSO weisende Richtung, während die anschließenden Rinnen, die „Old-Oog-Rinne“ von NNW nach SSO und die „Weserfahrt“ von NW nach SO gerichtet sind. An den Knickpunkten dieser Rinnen besteht eine verstärkte Neigung zur Bildung von Barren. In besonderer Form ist das nördlich von Minsener Oog der Fall, wo sich der von Westen nach Osten wandernde Sand unter dem Einfluß der Blauen Balje sammelt und periodisch in Form von Platen die Wanderung in nordöstlicher Richtung antritt.

So ist die Lage der Sandbänke und der Stromrinnen (und ihrer Talwege) zwischen „Wangerooge“ und der „Alten Weser“ ständigen Veränderungen unterworfen. Es ist schwierig, in diesem äußeren Bereich durch Baggerungen oder Baumaßnahmen beständige und ausreichend tiefe Fahrwasser zu schaffen. In dem jetzigen Hauptfahrwasser

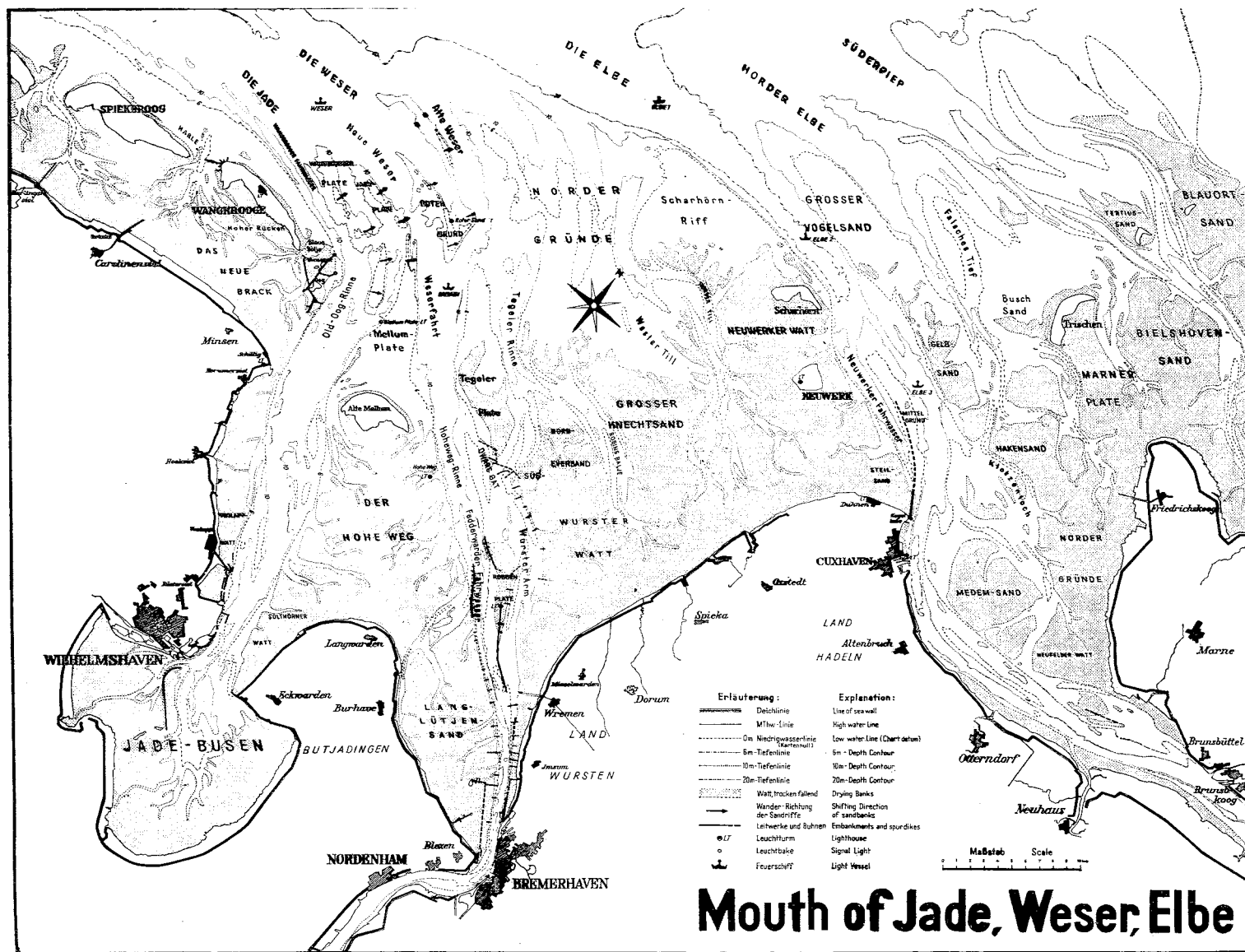


Bild 3
Mündung von Jade, Weser, Elbe

der Jade konnte das nur durch die Festlegung der unmittelbar östlich Wangerooge verlaufenden Rinnen, des Wangeroooger Fahrwassers und der Old-Oog-Rinne geschehen. Die hier durchgeführten Baumaßnahmen und die im Gang befindliche Vergrößerung der Wassertiefen auf 12 m werden im Abschnitt C näher beschrieben.

In den beiden Mündungsarmen der Weser, der „Neuen Weser“ und der „Alten Weser“, in deren Gabelung der „Rote Sand“ liegt, haben sich ausreichende Tiefen zumeist von selbst gehalten, wenngleich sich auch die Lage dieser Rinnen in längeren Zeiträumen verändert und die Wassertiefen wechseln.

Sowohl in den Mündungsrinnen der Jade wie auch der Weser ist es möglich gewesen, in der Jade durch regelmäßige, in der Weser nur durch gelegentliche Baggerungen Wassertiefen von mindestens 10 m unter Kartennull (= MSpr.Tnw) aufrecht zu erhalten. Die „Alte Weser“ weist sogar seit längeren Jahren ohne Nachhilfe von Baggerungen durchgehende Wassertiefen von 12 bis 13 m auf.

Die Mündung der „Elbe“ weist demgegenüber im äußeren Bereich bereits eine sehr stabile Lage, eine große Breite und reichliche Wassertiefen auf; von See bis nordöstlich von Scharhörn sind Wassertiefen von 20 m vorhanden. Die Ursache für diese günstigen Verhältnisse liegt einmal darin, daß sich zwischen der Weser- und Elbmündung die heranwandernden Sandmassen auf den „Norder Gründen“, dem „Großen Knechtsand“ und dem von Cuxhaven bis Scharhörn reichenden großen Wattrücken des „Neuwerker Watts“ auf ein sehr großes Gebiet verteilen können, und daß zum anderen die Elbe erheblich größere Wassermengen zur Verfügung hat als die anderen Ströme. Daher kann sich hier eine breitere und tiefere Stromrinne ausbilden bzw. halten.

Im ganzen läßt sich feststellen, daß im äußeren Mündungsbereich von Jade, Weser und Elbe sowohl die Wassertiefen wie auch die Stabilität der Stromrinnen von Westen nach Osten zunehmen. In diesem Bereich waren in der Jade zur Offenhaltung einer Wassertiefe von zunächst 10 m umfangreiche Regulierungsbauwerke und regelmäßige Baggerungen notwendig, die Wassertiefen in der „Neuen Weser“ halten sich zumeist ohne Baggerungen auf 10 m, in der „Alten Weser“ auf 12 bis 13 m und in der Elbe außerhalb von Scharhörn auf 20 m.

3. Die Mündungsbuchten von Ems, Jade, Weser und Elbe

In den Mündungsbuchten verlaufen die Stromrinnen zwischen den bei jeder Ebbe trocken fallenden Wattgebieten. Hier besteht schon die Möglichkeit, durch den Bau von Leitwerken und Buhnen im Verein mit Baggerungen die Lage und die Wassertiefen der Stromrinnen wirksam zu beeinflussen, jedoch sind die Verhältnisse in den betrachteten Mündungen sehr verschieden.

Die Mündungsbucht der Ems reicht von Borkum bis zum Dollart. Die Erhaltung des Fahrwassers hängt wesentlich vom Bestand des Dollarts mit seiner Spülwirkung (120 Mill. m³) ab. Der Dollart ist durch einen hohen Wattrücken, die Geise, von der Ems — dem sogenannten Emden Fahrwasser — fast vollkommen abgeschlossen.

Für die Ems ist das Vorhandensein jeweils zweier Stromrinnen nebeneinander, von denen die eine bogenförmig, die andere gerade (Sehne) verläuft, charakteristisch. Es folgen nacheinander die Alte Ems und das Randzelgatt mit dem Möwensteert dazwischen, der Emshörnbogen und das Dukegatt, die die Emshörnplate einschließen, und schließlich die Bucht von Watum und das ostfriesische Gatje mit dem Paapsand und dem Hund dazwischen. In jüngster Zeit (seit etwa 100 Jahren) haben sich die Sehnen, die die Mäanderbogen abschneiden, auf deren Kosten immer stärker ausgebildet. Das Hauptfahrwasser verläuft daher jetzt vorwiegend in den Sehnen, Randzelgatt, Dukegatt und

ostfriesisches Gatje. Nur an den Übergängen — vor allem vom ostfriesischen Gatje nach dem Emdr Fahrwasser — gibt es zeitweise Versandungen, die aber durch Baggerung behoben werden können. Der Fahrwasserbogen südlich des ostfriesischen Gatje an der Knock zeigt von jeher Verlagerungen und Verwilderungen. Durch einen an der Innenseite des Bogens hergestellten Leitdamm sind die Verhältnisse zwar verbessert, doch nicht stabilisiert worden (1).

In der Jade zwischen Mellum und Wilhelmshaven hat sich von jeher durch die Spülwirkung der Flut- und Ebbwassermengen des Jadebusens (399 Mill. m³) eine breite und zumeist mehr als 13 m tiefe Stromrinne offen gehalten. Die natürliche Offenhaltung der Hauptrinne wird auch durch einige unbedeutendere Nebenrinnen bei der Geniusbank und der Hocksieplate nicht entscheidend gestört. Die Spülwirkung wird dadurch besonders wirksam, daß die gesamten Flut- und Ebbwassermengen bei Wilhelmshaven durch die nur rd. 4 km breite Ausflußöffnung des Jadebusens ein- und ausströmen müssen.

In der Außenweser zwischen Leuchtturm „Hoher Weg“ und Bremerhaven sind beiderseits der Robbenplate zwei Stromrinnen, der Wurster-Arm mit dem Dwarsgat und der Fedderwarder-Arm vorhanden, von denen seit 1929 der letztere als Hauptfahrwasser dient. Da die Ebbwassermenge der Weser bei Bremerhaven mit 132 Mill. m³ bedeutend geringer ist als in der Jade bei Wilhelmshaven, sind im Gegensatz zur Jade hier die Voraussetzungen für die Offenhaltung größerer Wassertiefen ungünstiger. Seit 1893 mußten daher zwischen Bremerhaven und dem Nordende der Robbenplate umfangreiche Leitdämme und Buhnen errichtet und Baggerungen durchgeführt werden, um das heutige Fahrwasser der Außenweser von 10 m Wassertiefe bei Kartennull zu schaffen. Die Fahrwassertiefe von 10 m ist in der Außenweser heute von See bis Bremerhaven vorhanden und kann auch mit vertretbaren Baggerkosten aufrecht erhalten werden. Über die durchgeführten und geplanten Baumaßnahmen vgl. Abschnitt C.

Die Mündungsbucht der Außenelbe von Scharhörn bis Cuxhaven bzw. bis zur Oste-Mündung weist eine verhältnismäßig große Breite auf. Die Hauptstromrinne hat sich auf diesem Abschnitt in ausreichender Breite im allgemeinen auf 11 m Wassertiefe bei Kartennull, in der Flußkrümmung oberhalb von Cuxhaven sogar erheblich tiefer, gehalten. Nur auf einer Strecke von etwa 15 km Länge ist die hier angestrebte Wassertiefe von 11,0 m unter Kartennull von Natur aus nicht ständig vorhanden. Unterhalb von Cuxhaven im Gebiet des Mittelgrundes, wo eine erhebliche Ausweitung der Querschnitte eintritt und die Hauptstromrinne aus WNW-OSO-Richtung in die Richtung NW-SO umschwenkt, verlaufen Ebbe- und Flutrinne getrennt, so daß hier infolge Stromspaltung Barrenbildungen auftreten. Die hierdurch veranlaßten Arbeiten werden in Abschnitt C näher beschrieben.

4. Der Unterlauf von Ems, Weser und Elbe.

Im Unterlauf der Ems, dem sogenannten Emdr Fahrwasser, liegen die Hauptschwierigkeiten für Erstellung bzw. Erhaltung der geforderten Wassertiefe. Von Natur aus waren auf dieser Strecke oberhalb des Wirkungsbereichs des Dollarts als Spülbecken, nur geringe Fahrwassertiefen vorhanden. Erst umfangreiche Strombaumaßnahmen, ein Längswerk mit Buhnen auf der Geise, der Bau eines Seedeichs von Emden bis zur Knock, und Baggerungen haben hier das Fahrwasser mit der Zeit von 2,5 bis 3 auf 7,2 m unter Kartennull gebracht. Zur Zeit werden Regulierungsbauwerke erstellt und Baggerungen durchgeführt, wodurch eine Wassertiefe von 8 m erreicht werden soll. An das Emdr Fahrwasser schließt an der Emdr Hafenkanal, der zusammen mit den alten und neuen Umschlagbecken den Emdr Seehafen bildet.

Der obere Teil der J a d e (Jadebusen) ist eine Meeresbucht, deren innerer Teil nicht mehr der Großschifffahrt dient. Die großen Flut- und Ebbewassermengen des Jadebusens reichen aus, um — wie beschrieben — von Wilhelmshaven nach See zu in der Mündungsbucht ein breites Fahrwasser von ausreichender Tiefe offenzuhalten.

Der Unterlauf der W e s s e r von Bremen bis Bremerhaven (U n t e r w e s e r) hat eine Länge von rd. 67 km. Der Strom verläuft zwischen festen Ufern. Die Wasserspiegelbreite bei MThw beträgt bei Bremen etwa 200 m und wächst bis Nordenham auf etwa 1000 m an. Dieser Abschnitt dient als Zufahrtsstraße zu den Häfen in Bremen-Stadt, Brake und Nordenham. Von Natur aus war die Unterweser in den Jahren vor 1887 nur für den Verkehr von Schiffen mit 2 bis 3 m Tiefgang geeignet. Seitdem sind umfangreiche Regulierungsarbeiten durchgeführt worden, so daß heute das Fahrwasser eine Wassertiefe von rd. 8,0 m unter Kartennull und unter Hinzurechnung des Tidehubs von über 11,00 m bei mittlerem Tidehochwasser aufweist. Die durchgeführten Regulierungsarbeiten bedeuten erhebliche Eingriffe in die Stromverhältnisse und hatten starke Veränderungen der hydrologischen Faktoren zur Folge (vgl. Abschnitt C).

Die U n t e r e l b e hat von Hamburg bis Cuxhaven eine Länge von rd. 100 km. Der Flußlauf weitet sich bereits dicht unterhalb von Hamburg zu Wasserspiegelbreiten bei MThw von 1,5 bis 2,0 km aus; diese erreichen bei Brunsbüttelkoog 2,5 km. Unterhalb von Brunsbüttelkoog erfolgt dann der Übergang in die breite Mündungsbucht. Durch diese große Ausdehnung des Unterlaufs sind die großen Flut- und Ebbewassermengen (bei Cuxhaven 592 Mill. m³) bedingt, durch welche auch in der Unterelbe die Voraussetzungen zur Offenhaltung einer breiten Stromrinne gegeben sind. Die verhältnismäßig große Gesamtbreite des Unterlaufs begünstigte allerdings die Bildung von Nebenrinnen und Barren. Zur Schaffung und Offenhaltung der jetzt vorhandenen Wassertiefe von 10,0 m im Hauptfahrwasser, deren Vergrößerung auf 11,0 m im Gange ist, waren seit Jahrzehnten umfangreiche Stromregulierungsarbeiten und Baggerungen erforderlich (vgl. Abschnitt C).

C. Ausbaumaßnahmen in den Strommündungen

1. Die Ems

In der Ems sind Ausbaumaßnahmen zur Verbesserung der Fahrwasserverhältnisse bisher ausschließlich im Raume der Knock und oberhalb hiervon getroffen worden. Als erste Maßnahme dieser Art wurde Ende des vorigen Jahrhunderts (1870—1890) das alte Geiseleitwerk auf der Geise errichtet. Hierauf folgte in den Jahren 1899—1901 in Anpassung an die natürliche sich immer deutlicher abzeichnende Verlagerung des Stromes aus der Bucht von Watum in das Ostfriesische Gatje die Durchbaggerung der südlichen Barre des Ostfriesischen Gatje, die zu einem vollen Erfolg führte (2). Im Zuge des weiteren Ausbaues des Emder Fahrwassers wurden, abgesehen von Baumaßnahmen im Hafengebiet Emden selbst, nacheinander der Seedeich Emden-Knock (1914—1922), das Leitwerk an der Knock (1930—1932), das neue Leitwerk auf der Geise nebst Bühnen am Leitwerk und am Seedeich (1932—1933) errichtet und schließlich im Jahre 1934 eine Erhöhung des Leitwerkes an der Knock um rd. 1,0 m auf + 3,0 m über Kartennull vorgenommen. Im Laufe der Jahre ist hierdurch eine Erhöhung der natürlichen Wassertiefe im Emder Fahrwasser von 3,0—3,5 m unter Kartennull auf 5,5—6,0 m eingetreten. Auf einzelnen Strecken haben sich sogar Wassertiefen von 6,5—7,0 m eingestellt. Für die Herstellung bzw. Erhaltung einer durchgehenden Fahrwassertiefe von mindestens 7,0 m waren auf der genannten rd. 10 km langen Strecke jährliche Unterhaltungsbaggerungen von $1,0\text{—}1,2 \times 10^6 \text{ m}^3$ erforderlich, die fast ausschließlich auf bestimmte festliegende Strecken beschränkt blieben.

Zur Zeit ist der Ausbau des Emder Fahrwassers für eine Wassertiefe von 8,0 m durch verstärkte Baggerungen und den weiteren Einbau von Regulierungsbauwerken (Erneuerung und hochwasserfreier Ausbau des Leitwerkes auf der Geise, sowie bühnenartige Einbauten zu beiden Seiten des Fahrwassers) im Gange. Über die Grundsätze dieses Ausbaues sowie die besondere Problematik, die auf dieser im Brackwassergebiet der Ems liegenden Strecke vorliegt, wird im Teil II ausführlich berichtet. Auf die Bedeutung des Dollart als Spülbecken für die Erhaltung der Fahrwassertiefen unterhalb der Knock wurde bereits hingewiesen. Eine Eindeichung des Dollart zum Zwecke der Landgewinnung, wie sie zeitweise besonders von niederländischer Seite angestrebt wurde, würde zur Folge haben, daß die heutige Spülwirkung des Dollart mit 120 Mill. m³ Fassungsvermögen wegfällt. Untersuchungen über die sich hierbei ergebenden veränderten Strömungsverhältnisse in den Querschnitten unterhalb des Dollart wurden in einem Tidemodell mit fester Sohle im Maßstab 1 : 100 für die Tiefen und 1 : 500 für die Breiten und Längen durchgeführt. Als Ergebnis wurde festgestellt, daß bei einer Eindeichung die Stromgeschwindigkeiten, insbesondere die Ebbgeschwindigkeiten unmittelbar unterhalb des Dollart bis auf weniger als 50 % ihres bisherigen Wertes vermindert werden, wobei das Verhältnis Ebbgeschwindigkeit/Flutgeschwindigkeit zugunsten letzterer verschlechtert wird. Die mit der Flut eindringenden Sandmengen können dann vom Ebbstrom nicht mehr ausreichend geräumt werden, d. h. eine schnelle Versandung der unterhalb des Dollart gelegenen Strecke wäre die unausbleibliche Folge. Auch Versuche mit Teileindeichung des Dollart führten zu ungünstigen Ergebnissen. Nur durch umfangreiche und kostspielige Regulierungsbauten in der Ems bis in das Dukegatt hinein, die in keinem Verhältnis zum erzielbaren Nutzen stehen, könnte dieser ungünstigen Wirkung entgegengesetzt werden. Der Gedanke einer Eindeichung des Dollart wurde deshalb fallengelassen.

2. Die Jade

Wie bereits ausgeführt, ist der Jadebusen für die Unterhaltung und den Ausbau des Jadedefahrwassers lebensnotwendig. Es werden und dürfen aber auch keine Eindeichungen, die den Speicherraum verkleinern würden, in ihm vorgenommen werden. Ein Leitwerk im Jadebusen führt einen Teil des ein- und ausströmenden Gezeitenwassers an den Wilhelmshavener Hafeneinfahrten vorbei, wodurch die Zufahrten zu diesen offengehalten werden.

Während des 1. Ausbau-Abschnittes, der von 1903—1918 reicht, bildete die „Alte Jade“, die jetzt noch als Nebenrinne benutzt wird, das Hauptfahrwasser. Dieses verlief zwischen den Sänden im äußeren Mündungsgebiet der Jade und konnte nur durch Baggerungen aufrecht erhalten werden. Seit 1909 wurde auf Minsener Oog zur Festlegung der Insel ein Bühnen- und Leitwerkssystem von insgesamt 11 km Länge gebaut (Bild 3). Auf dem hohen Watt wurde Packwerk verlegt, in tiefen Lagen und namentlich an den Köpfen der Dämme wurden Sinkstücke verwendet. Eine aufgesetzte Steinkiste machte die Hauptwerke befahrbar. Das Korrektionswerk sollte gleichzeitig auch regulierend auf die eingangs erwähnte ständige Sanddrift von West nach Ost an der Nordseite der ostfriesischen Inseln einwirken. Das angestrebte Ziel war damals, ein 10,5 m unter Kartennull tiefes Fahrwasser zu schaffen und zu erhalten. Die hierzu erforderlichen jährlichen Baggermengen stiegen von zunächst etwa 500 000 m³/Jahr bald an und erreichten 1916 mit 4,2 Mill. m³ ein Maximum. Insgesamt wurden von 1903—1918 16,6 Mill. m³ oder 1,04 Mill. m³/Jahr gebaggert. Eine Zeit lang hielt sich das Fahrwasser auch ohne Baggerung noch auf 10 m Tiefe, verlandete dann aber (ab 1922) rasch und wurde schließlich durch das jetzige Hauptfahrwasser (Wangerooger Fahrwasser und Old-Oog-Rinne) abgelöst.

Der 2. Ausbau-Abschnitt umfaßt die Zeit von 1926 bis 1942. Durch Baggerungen, die im Jahre 1926 begannen, wurde 1931 in dem neuen Fahrwasser wieder eine Tiefe von 8,5 m unter Kartennull, 1941 eine Tiefe von 10 m erreicht. Die Baggermengen betrugen in der Zeit von 1926—1942 insgesamt 26,6 Mill. m³ oder 1,39 Mill. m³/Jahr. Hierbei ist zu beachten, daß die Baggermengen mit dem Wirksamwerden des erwähnten Korrektionswerkes auf Minsener Oog geringer wurden. Betrug die durchschnittliche Baggermenge in der Zeit von 1926—1936 noch 1,54 Mill. m³/Jahr, so sank sie in der Zeit von 1937—1942 auf 1,11 Mill. m³/Jahr.

In der letzten Kriegs- und in der Nachkriegszeit wurden am Fahrwasser keine Unterhaltungsarbeiten mehr unternommen, das Fahrwasser versandete wieder. Die Bauwerke wurden nicht nur nicht unterhalten, sondern z. T. sogar zerstört.

Der 3. Ausbau-Abschnitt endlich umfaßt die Wiederherstellung des Fahrwassers in Verbindung mit der Errichtung einer Umschlaganlage für große Oltanker in der Jade. Ein schon im Jahre 1940 erwogener Plan der Herstellung einer Fahrwassertiefe von 12 m wurde wieder aufgegriffen. Das Ausbauziel konnte nach Instandsetzung des in Verfall geratenen Korrektionswerkes auf Minsener Oog durch Baggerungen im wesentlichen erreicht werden. In den Jahren 1957 bis 1960 wurden zu diesem Zweck im Gebiete des Wangerooger Fahrwassers bei einer Fahrwasserbreite von 300 m auf einer Strecke von 16 km Länge rd. 8,0 Mill. m³ gebaggert. Die rechnerische Baggermenge nach den vor der Baggerung durch Peilung festgestellten Tiefenverhältnissen betrug hierbei rd. 3,0 Mill. m³, d. h. die tatsächliche Baggermenge war um mehr als 100 % größer als die rechnerische. In der Innenjade wurden gleichzeitig bei 300 m Fahrwasserbreite und 22 km Baggerstrecke 3,7 Mill. m³ bei 1,5 Mill. m³ rechnerischer Baggermenge gebaggert. Die Mehrbaggerungen sind auf die laufenden Sandeintreibungen zurückzuführen, die zugleich auch einen Anhalt für die voraussichtlich in Zukunft erforderlichen Unterhaltsbaggerungen geben. Zuverlässige Voraussagen können aber nicht gemacht werden.

Untersuchungen über einen weiteren Ausbau auf 13 m sind im Gange. Zur Einschränkung der dann voraussichtlich erforderlichen vermehrten Unterhaltsbaggerungen sowie zur Stabilisierung der Verhältnisse werden sich weitere umfangreiche und kostspielige Baumaßnahmen, wozu vielleicht auch eine Durchdämmung der Blauen Balje gehört, nicht vermeiden lassen. Da der Meeresgrund an der Ausmündung des Wangerooger Fahrwassers in der offenen See auf 14—14,5 m unter Kartennull liegt, dürfte dies die überhaupt größte Tiefe sein, für die ein Ausbau des Jadfahrwassers noch sinnvoll ist.

3. Die Weser

Das Fahrwasser der Unter- und Außenweser hat in früheren Jahrhunderten für den Verkehr der damaligen Seeschiffe genügt. Als die Schiffe größer wurden, gründete Bremen nach verschiedenen Zwischenlösungen im Jahre 1827 an der Mündung der Weser den Vorhafen Bremerhaven, bis zu dem sich dann der eigentliche Verkehr mit Seeschiffen abwickelte. Die Güter wurden seitdem auf der Unterweser zwischen Bremen und Bremerhaven auf Leichtern befördert.

Bremen strebte jedoch auch nach 1827 immer danach, den unmittelbaren Anschluß der Stadt an die Seeschiffahrt wieder zu gewinnen. Um dieses Ziel zu erreichen, ergab sich die Notwendigkeit, eine durchgreifende Korrektur zunächst der Unterweser vorzunehmen, später aber wurde auch auf der Außenweser von Bremerhaven nach See das Fahrwasser den wachsenden Schiffsgrößen anzupassen.

In den 80er Jahren des vorigen Jahrhunderts hatte die Unterweser bei Niedrigwasser Wassertiefen von nur 2,5 bis 3,5 m. Unter Ausnutzung der Tide konnten damals

Seeschiffe bis zu 3,0 m Tiefgang bis Bremen gelangen. Im Jahre 1887 wurde mit dem ersten Ausbau der Unterweser nach Plänen und unter Leitung von Ludwig Franzius begonnen. Bei diesem Ausbau sollte die Wassertiefe so vergrößert werden, daß unter Ausnutzung der Tide Seeschiffe mit 5,0 m Tiefgang bis Bremen verkehren konnten. Grundsatz war hierbei, durch Beseitigung von Nebenarmen, Engstellen und starken Krümmungen ein geschlossenes Fahrwasser zu schaffen und gleichzeitig den Tidehub zu vergrößern, um damit die größeren Flut- und Ebbwassermengen zur Offenhaltung des Fahrwassers auszunutzen. Zur Herstellung und Sicherung des Fahrwassers war die Vornahme umfangreicher Bagerungen sowie der Bau von zahlreichen Leitwerken und Buhnen erforderlich. Die Bauarbeiten wurden bis 1895 beendet und führten zu einem vollen Erfolg.

In den folgenden Jahrzehnten wurden in Anpassung an die weiter wachsenden Schiffsgrößen weitere Vertiefungen und Verbreiterungen der Unterweser vorgenommen. Der letzte Ausbau wurde Ende 1958 abgeschlossen. Heute beträgt die Wassertiefe rd. 8,0 m unter Kartennull. Die Breite des Fahrwassers vergrößert sich nach See zu. Sie beträgt in der Sohle

von Bremen bis zur Lesum-Mündung	100 m,
von der Lesum bis zur Hunte-Mündung	120 m,
von der Hunte-Mündung bis Bremerhaven	150 m.

Die neuen Ausbaumaßnahmen erforderten wiederum die Durchführung umfangreicher Bagerungen.

Auf großen Strecken der Unterweser war im Lauf der Jahrzehnte zur Erreichung des heutigen Zustandes eine Vertiefung der früheren Flußsohle um insgesamt 6 bis 8 m erforderlich. Der anfallende Baggerboden wurde teils verklappt, zum größten Teil aber zur Aufhöhung von Ufergelände aufgespült. Die zur Erhaltung der Fahrwassertiefe erforderlichen laufenden Baggermengen halten sich in mäßigen Grenzen. In den letzten Jahren wurden zwischen Bremen und Nordenham jährlich 800 000 bis 1 000 000 m³ Boden gebaggert. Schwerpunkte für die Unterhaltungsbaggerungen liegen zwischen der Lesum- und Hunte-Mündung, unterhalb von Brake und insbesondere oberhalb von Nordenham. Oberhalb von Nordenham sind die häufigen Baggerungen durch die Lage der Brackwasserzone und die über normal große Breite des Strombetts bedingt.

Das Ziel der Korrektionsarbeiten mußte es sein, die laufenden Baggerungen für die Erhaltung der Fahrwassertiefe möglichst gering zu halten. Dieses wurde an der Unterweser durch die schon genannten Regulierungsbauwerke in befriedigendem Maße erreicht. Es wurden bereits durch Franzius sogenannte „Korrektionslinien“ festgelegt, durch welche die Breite des Stromes in der Niedrigwasserlinie bestimmt wird. Der Abstand dieser Korrektionslinien wird von Bremen nach See zu entsprechend dem Anwachsen der Flut- und Ebbwassermengen größer.

Von Bremen bis unterhalb von Brake sind in diesen Korrektionslinien zur Festlegung der Fahrwasserbreite streckenweise Leitwerke gebaut, die, soweit erforderlich, nach rückwärts durch Querdämme an das Ufer angeschlossen und nach dem Fahrwasser zu durch Buhnen gesichert wurden.

Unterhalb von Brake sind in den letzten Jahrzehnten auch auf Strecken, wo keine Leitwerke vorhanden sind, zahlreiche Buhnen errichtet, die, vom festen Ufer ausgehend, bis an die Korrektionslinien über MThw liegen, nach dem Fahrwasser zu aber unter Wasser bis in die Tiefe des Stromes reichen (Unterwasser-Buhnen). Hierdurch wird eine schärfere Zusammenfassung der Strömung im Fahrwasser und eine Verminderung der Baggerungen erreicht.

Die Oberkante der Leitwerke liegt im allgemeinen 50 bis 80 cm über dem MTnw. Sie bestehen aus Buschpackung, die mit Draht und Pfählen im Untergrund verankert wird. Diese Bauart ist jedoch wenig widerstandsfähig. Sie wird sowohl durch Eisgang wie auch durch die bei dem gewachsenen Schiffsverkehr mit großen Schiffen größeren Sog- und Fahrtwellen in verstärktem Maße angegriffen, so daß die Lebensdauer oft nur wenige Jahre beträgt. Es werden zur Zeit Versuche mit widerstandsfähigeren Bauweisen unter Verwendung von Steinen durchgeführt.

Bei den Buhnen war früher auch die Buschbauweise und die weitgehende Verwendung von Sinkstücken üblich. Heute werden Sinkstücke als Unterlage für die unter Wasser liegenden Teile der Buhnen verwendet, die Buhnenkörper selbst bestehen jedoch aus Schüttsteinen. Über Niedrigwasser werden ebenfalls Schüttsteine verwendet, die erforderlichenfalls als Packwerk versetzt werden.

In früheren Jahrzehnten bestand an der Unterweser nur auf kürzeren, dem Stromangriff besonders ausgesetzten Teilstrecken die Notwendigkeit zur Sicherung der Ufer bis über die Höhe des mittleren Tidehochwassers. Da aber sowohl die Zahl der verkehrenden Schiffe wie auch ihre Größe und Wasserverdrängung und die Fahrtgeschwindigkeit stark gewachsen sind, haben auch die Angriffe auf die Ufer beträchtlich zugenommen. Zwischen Bremen und der Hunte-Mündung sowie auf Teilstrecken weiter unterhalb werden daher in den kommenden Jahren umfangreiche Uferbefestigungen gebaut werden müssen. Einfache Schüttsteinböschungen mit der Neigung 1:3 haben sich im engen Fahrwasser der Weser als ungenügend erwiesen. Es werden daher Pflasterböschungen oder auch Befestigungen mit Bitumen gewählt werden müssen. Die Böschungsbefestigungen sollen hierbei 1,0 bis 1,25 m über das mittlere Tidehochwasser hochgeführt werden.

Die an der Unterweser ausgeführten Ausbaumaßnahmen bedeuteten starke Eingriffe in den natürlichen Zustand dieses relativ kleinen Tidestromes. Infolgedessen sind auch starke Veränderungen der Tideverhältnisse eingetreten. Während bei Bremerhaven seit 1887 der mittlere Tidehub mit 3,30 bis 3,40 m praktisch unverändert geblieben ist, hat er sich in Bremen von 0,20 bis 0,30 m auf rd. 3,20 m vergrößert. Die Tidehubvergrößerung wurde hauptsächlich durch eine entsprechende Senkung der Niedrigwasserstände hervorgerufen.

Das Fahrwasser der Unterweser hat heute, bezogen auf Kartennull, eine Wassertiefe von rd. 8,00 m. Rechnet man den mittleren Tidehub hinzu, dann sind bei mittlerem Tidehochwasser Wassertiefen von über 11,0 m vorhanden. Unter Ausnutzung der Tide können daher im jetzigen Zustand bei enger Anpassung an das Tidehochwasser und bei normalen Tiden Schiffe bis zu 9,60 m Tiefgang mit 20 000 bis 22 000 t Tragfähigkeit bis Bremen verkehren.

Untersuchungen über eine weitere Vertiefung des Fahrwassers der Unterweser um 0,50 m auf 8,50 m bei Kartennull sind z. Z. im Gange.

In der Außenweser haben sich die Lage und Bedeutung der Stromrinnen im Laufe der Jahrhunderte zum Teil wesentlich verändert. Als Fahrwasser wurde im 19. Jahrhundert der „Wurster Arm“ und das „Dwars Gat“ benutzt (Bild 3). Als in den 80er Jahren Schnell dampfer mit 7,8 m Tiefgang ab Bremerhaven eingesetzt wurden, genügte das Fahrwasser in seinem natürlichen Zustand nicht mehr. Es wurden seit 1890 von Bremerhaven ausgehend umfangreiche Regulierungsbauwerke und Baggerungen ausgeführt. Im Jahre 1893 wurde gegenüber von Bremerhaven in etwa 6 km Länge ein Leitdamm, der sogenannte „Franzius-Damm“, ausgeführt, durch den auf diesem Abschnitt ein geschlossenes Fahrwasser geschaffen wurde.

In den folgenden Jahrzehnten wurde immer wieder versucht, durch Baggerungen und Regulierungswerke ein ausreichendes Fahrwasser im Wurster Arm und Dwars Gat auszubauen und offen zu halten. Diese Bemühungen hatten keinen Dauererfolg. Zeitweise mußten jährlich mehr als 4 Mill. m³ Sand gebaggert werden. Inzwischen deutete sich jedoch von Natur aus eine Zunahme der Wassertiefen in dem westlich der „Robbenplate“ liegenden „Fedderwarder Arm“ an. Hier bahnte sich der Flutstrom in der Sehne des durch Wurster Arm und Dwars Gat gebildeten Bogens eine tiefer werdende Stromrinne. Im Jahre 1922 wurde daher das Hauptfahrwasser auf einer Länge von 19 km vom Wurster Arm in den Fedderwarder Arm verlegt und letzterer von 1922—27 durch Herstellung von Strombauwerken und Ausführung von Baggerungen auf 10,0 m Wassertiefe, bezogen auf Kartennull, gebracht. Diese Fahrwassertiefe ist heute als Mindesttiefe von See bis Bremerhaven in mindestens 200 m Breite überall vorhanden.

Die Offenhaltung des Fahrwassers erforderte in den 30er Jahren laufende Baggerungen von etwa 2,5 Mill. m³ jährlich. In den letzten Jahren brauchten jedoch nur noch 1,0 bis 1,4 Mill. m³ jährlich gebaggert zu werden. Die Unterhaltungsbaggerungen erstrecken sich überwiegend auf die Stromstrecke zwischen Bremerhaven und Robbenplate. Auf dieser Strecke muß in der Hauptsache an der Nordschleuse, an der Abzweigung des Wurster Armes vom Hauptfahrwasser sowie westlich der Robbenplate (seitliche Eintreibungen) gebaggert werden. Die Baggerungen werden von Hopper-Saugbaggern ausgeführt. Der Baggerboden wird außerhalb des Fahrwassers verklappt.

Im Bereich des Fedderwarder-Armes wurde die Festlegung des Fahrwassers durch Anlage von Leitdämmen in einer Gesamtlänge von mehr als 11 km am Nord- und Südende der Robbenplate sowie am Nordausläufer des „Langlütjen Sandes“ gesichert. Auf der Robbenplate wird auf Grund der neueren Entwicklung die Verbindung der beiden Leitdämme am Nord- und Südende erforderlich. Die Oberkante dieser Leitdämme liegt etwa 70—80 cm über Kartennull. Die Leitdämme selbst und die übrigen Uferstrecken zwischen Bremerhaven und Robbenplate sind durch zahlreiche, bis ins tiefe Wasser reichende Buhnen gesichert; diese Arbeiten werden in den kommenden Jahren noch ergänzt. Die Bauweise der Leitdämme und Buhnen entspricht der an der Unterweser: Sinkstücke als Grundlage, auf denen Schüttsteine in der erforderlichen Stärke aufgelagert werden. Soweit erhältlich, wird hier auch Bleischlacke aus einer nahe gelegenen Hütte mit Erfolg verwendet.

Das Fahrwasser der Außenweser hat heute überall eine Wassertiefe
von mindestens 10 m bei Niedrigwasser
und über 13 m bei mittl. Tidehochwasser.

Diese Tiefen sind auch im äußeren Mündungsbereich in den beiden Zufahrtsrinnen der „Alten Weser“ und der „Neuen Weser“ mit „Weserfahrt“ vorhanden. Sie gestatten bis Bremerhaven unter Ausnutzung der Tide den Verkehr von Schiffen mit 11,0 bis 11,5 m Tiefgang und 45 000 t Tragfähigkeit (für Tanker) bzw. 40 000—42 000 t Tragfähigkeit (für Trockenfrachter).

Erwogen wird eine weitere Vertiefung des Fahrwassers auf 11,0 m bzw. später 12,0 m. Die Voraussetzungen hierfür sind verhältnismäßig günstig. Wie in Abschnitt B bereits angedeutet, haben sich in der „Alten Weser“, östlich des „Roten Sandes“, seit längeren Jahren bereits durchgehende Wassertiefen von 12 bis 13 m unter Kartennull in ausreichender Breite eingestellt. Tiefen von 12,0 m sind größtenteils auch bis zum Südende der Robbenplate vorhanden. Größere Ausbauarbeiten zur Erreichung der angestrebten Fahrwassertiefen werden daher auf dem Stromabschnitt Bremerhaven bis zum Südende der Robbenplate von nur 10—12 km Länge beschränkt bleiben können. Ob und wann

weitere Maßnahmen hier durchgeführt werden, wird davon abhängen, ob die zukünftige Entwicklung des Güterumschlages in Bremerhaven und Nordenham den Einsatz größerer Schiffe erfordert.

4. Die Elbe (Bild 4)

Die ersten künstlichen Eingriffe in die Stromlandschaft entsprangen dem Wunsche des Menschen, möglichst große Teile der Marschen für die Besiedelung reif und zugleich kulturfähig zu machen. Sie beschränkten sich auf Deichbauten. Vermutlich waren solche Deicharbeiten um das Jahr 1000 bereits im Gange. In den folgenden Jahrhunderten ausgeführte strombautechnische Maßnahmen galten zunächst vornehmlich dem Hochwasserschutz des Marschenlandes.

Kennzeichnend für den Strom waren die zahlreichen Sände. Die Wassertiefen oberhalb der Schwingemündung waren gering. An vielen Stellen waren bei Niedrigwasser nur 2—3 m Wassertiefe vorhanden, so daß die Schiffe nur unter Ausnutzung der Tidewelle solche Stellen passieren konnten. Erstmals im 16. und 17. Jahrhundert war als klare Zielsetzung der Arbeiten am Strom die Verbesserung der Fahrwasserverhältnisse im Interesse der inzwischen sehr lebhaft gewordenen hamburgischen Schifffahrt richtungsweisend. Eine Verbesserung der Fahrwasserverhältnisse auf der Unterelbe versuchte man zunächst allein durch Baggerungen zu erreichen. Beachtliche Verbesserungen wurden mit diesen aber erst erreicht, nachdem Hamburg 1833 und 1837 auf Anraten englischer Ingenieure jeweils einen Dampfbagger beschafft hatte. Zwei weitere Bagger deutscher Bauart kamen 1845 und 1859 hinzu. Seit dieser Zeit stiegen die jährlichen Baggerleistungen ständig. 1848 wurden erstmalig 1 Mill. m³ Boden auf der Unterelbe gebaggert, 1899 wurde die 2 Mill.-Grenze überschritten. Die Fahrwassertiefe der Unterelbe ist in dieser Zeit allein durch Baggerungen auf 8 m unter MThw gebracht worden.

Um die Jahrhundertwende erforderten die mit der Zunahme der Seeschifffahrt sehr schnell anwachsenden Tiefgänge der Schiffe auch größere Fahrwassertiefen, die nur in Verbindung mit entsprechenden Regulierungsmaßnahmen hergestellt bzw. gehalten werden konnten. So begann man den Strom planmäßig auszubauen und zu regeln. Das Ziel, das man sich damals für diesen Ausbau setzte, war die Schaffung eines möglichst sich selbst erhaltenden Fahrwassers von mindestens 10 m Tiefe unter Kartennull bei einer Sohlenbreite von 200 m oberhalb und 400 m unterhalb der Störmündung. In der Außenelbe unterhalb von Cuxhaven wurde eine Fahrwassertiefe von 11 m unter Kartennull angestrebt.

Als allgemeiner Grundsatz für den Ausbau galt wie bei der Weser, daß die Flutwassermenge zu vermehren sei und zu diesem Zweck der Flutwelle zur Belebung ihres Laufes nach oben möglichst alle Hindernisse aus dem Wege zu räumen seien, woraus sich die Ausbildung eines von oben nach unten allmählich sich trichterförmig verbreiternden Stromlaufes mit schwachen Krümmungen ableitet. Die Regulierungslinien sind dem natürlichen Lauf des Fahrwassers unter Abschwächung der vorhandenen starken Krümmungen weitgehend angepaßt. Als Regulierungsbreite wurden unterhalb des Hamburger Hafens 370 m und bei der Schwingemündung 1100 m angenommen, wobei der Öffnungswinkel der Regulierungslinien nicht gleichmäßig, sondern auf Strecken mit übergroßen Querschnitten um $\frac{1}{3}$ bis $\frac{1}{2}$ kleiner als auf den übrigen Strecken bemessen worden ist.

Auf der Elbstrecke unterhalb der Schwingemündung waren auf großen Strecken von Natur aus so große Stromtiefen vorhanden, daß sie bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts den damaligen Ansprüchen der Seeschifffahrt genügten. Sie wurde aus diesem Grunde auch nicht in den Plan einer durchgehenden Regelung einbezogen in der Annahme, daß

auf absehbare Zeit an den Stellen mit unbefriedigenden Fahrwasserverhältnissen die erforderlichen Tiefen mit erträglichen Mitteln durch Baggerungen hergestellt und erhalten werden könnten.

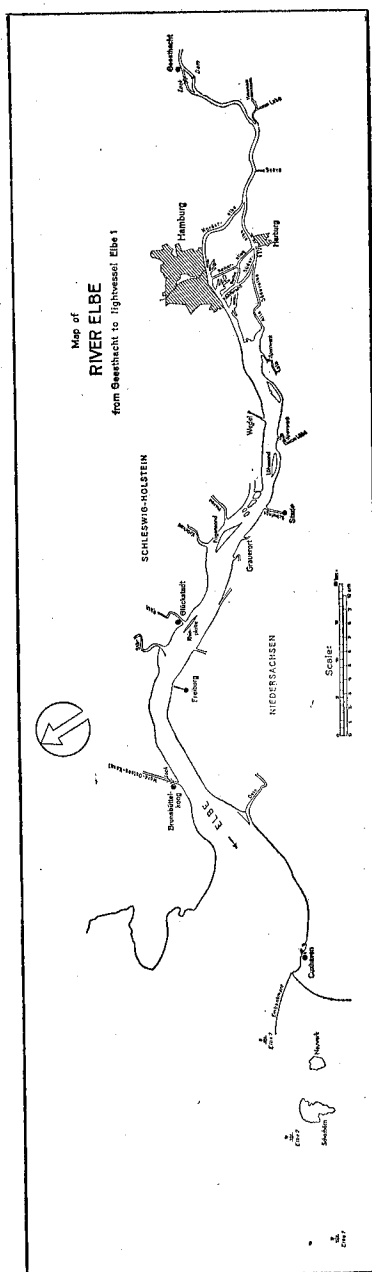


Bild 4

Die Elbe von Geesthacht bis zum Feuerschiff Elbe 1

Die Regulierungsmaßnahmen erstreckten sich daher zunächst nur auf den oberen Teil der Untereibe von Hamburg-Altona bis zur Schwingemündung (1901—1914). Gleichzeitig wurden im Hamburger Hafen neue Wasserflächen von rd. 5,3 Mill. m² geschaffen. Diese Maßnahmen führten im Hamburger Gebiet zu einer Absenkung des Niedrigwassers, während das Hochwasser nicht wesentlich beeinflusst wurde. Hierdurch erhöhte sich der Tidehub in Hamburg um 18 cm.

Schon 13 Jahre später ergab sich jedoch die Notwendigkeit, auf zwei Stromstrecken unterhalb der ausgebauten Strecke, im Stromspaltungsgebiet der Insel Pagensand und im Gebiet der Ostebank unterhalb Brunsbüttelkoogs, durchgreifende Teilregulierungen vorzunehmen, weil an diesen Stellen die jährlichen Baggerungen das wirtschaftlich vertretbare Maß zunehmend überschritten und außerdem nicht von bleibendem Erfolg begleitet waren. Diese Stromregulierungen wurden in der Zeit von 1926—1936 mit Erfolg durchgeführt.

In der Außenelbe wurde zur Behebung eintretender Verflachungen im Gebiet des Mittelgrundes, auf die bereits eingangs (B, 3) hingewiesen ist, im Jahre 1939 mit dem Bau eines Leitwerkes von 9,2 km Länge (Kugelbakendamm) begonnen. Von Cuxhaven ausgehend, führt dieser Damm längs des Neuwerker Wattes; er soll das Neuwerker Fahrwasser an seinem oberen Ende abschließen und damit die Bildung einer einheitlichen Stromrinne begünstigen. Aus Mangel an hinreichenden Erfahrungen für den Bau eines derartigen rd. 9 km langen und durch seine Lage zur offenen See besonders gefährdeten Strombauwerkes sah der im Jahre 1938 aufgestellte Entwurf unter Übertragung der bisher oberhalb von Cuxhaven und auf den anderen Seewasserstraßen des Nordseegebietes angewendeten Bauweise eine Kronenhöhe von 0,50 m über MTnw vor. Auf Grund der im Laufe der mehr als 20jährigen Entwicklung seit Beginn der Bauarbeiten gesammelten Erkenntnisse wird eine Höherlegung der Krone auf MThw erwogen, da die Durchströmung des alten Neuwerker Fahrwassers zur Elbe hin bisher praktisch noch kaum geschwächt ist. Die Untersuchungen hierüber sind jedoch noch nicht abgeschlossen.

In der Oberelbe, d. h. oberhalb von Hamburg, ist infolge der Baumaßnahmen im Hamburger Hafengebiet und in der Untereibe eine rückschreitende Erosion der Flußsohle eingetreten. Diese führte zu einer Absenkung der Wasserstände, insbesondere des Tnw. Letzteres ist in Geesthacht, 41 km oberhalb von Hamburg, in der Zeit seit der Jahrhundertwende um rd. 80 cm abgesunken. Bei Fortschreiten der Erosion, deren Ende noch nicht abzusehen war, war mit Trockenschäden auf den angrenzenden landwirtschaftlich genutzten Gebieten zu rechnen. Aus diesem Grunde sowie zur Verbesserung der Schifffahrtswege auf der Oberelbe wurde die Abschleusung der Elbe durch den Bau einer Staustufe bei Geesthacht beschlossen und durchgeführt. Die Staustufe nebst Schleuse wurde im Jahre 1959 in Betrieb genommen.

Infolge der in der Tide-Elbe angeführten Baumaßnahmen in den letzten Jahrzehnten, wie Stromregelungen, Baggerungen und Hafenbauten, und infolge der hieraus eingetretenen natürlichen Erosion sind teilweise erhebliche Querschnittsveränderungen, vorwiegend Vergrößerungen, eingetreten. Diese Veränderungen hatten wieder Rückwirkungen auf den Tideverlauf, auf die Größe des Tidehubes, auf die Tidewassermengen bei Flut- und Ebbstrom und damit auf die Tideströmungen, auf die Sohlenmorphologie und auf die resultierende Sandwanderung. So ist der Tidehub in Hamburg seit der Jahrhundertwende um rd. 40 cm größer geworden und zwar im wesentlichen durch entsprechendes Absinken des Tideniedrigwassers, während das Tidehochwasser nur unbedeutend um etwa 9 cm angestiegen ist. Oberhalb von Hamburg sind zum Teil wesentlich größere Veränderungen des Tidehubes bis zu 90 cm Vergrößerung (Zollenspieker) eingetreten. Unterhalb von Hamburg haben sich die Tidehübe, bedingt durch die unterschiedliche Wirkung einer Ausbaumaßnahme, ob diese unterhalb oder oberhalb der

betrachteten Stelle durchgeführt wird, verschieden entwickelt. So ist in Glückstadt eine Verringerung des Tidehubes um 26 cm festzustellen, die vermutlich darauf zurückzuführen ist, daß die in diesem Gebiet vor dem Ausbau der oberhalb gelegenen Strecke wirksame Reflexion durch diesen mehr oder weniger abgebaut worden ist. In Cuxhaven ist in der gleichen Zeit das MThw um 9 cm und gleichzeitig das MTnw um 11 cm angestiegen. Dieser Anstieg der Wasserstände ist im wesentlichen wohl auf die relative Verschiebung des Meeresspiegels zum Festland zurückzuführen, die in Cuxhaven rd. 22 cm in 100 Jahren beträgt. Die Verminderung des Tidehubes um 2 cm dürfte ihre Ursache in Veränderungen der Außensände haben. Bemerkenswert erscheint hieran, daß auch die Häufigkeit der Sturmfluten (= Wasserstände höher als 1 m über MThw) in Hamburg relativ zu Cuxhaven angestiegen ist, wobei dieser Anstieg sich nur auf die mittleren Sturmfluten bis etwa 2,0 m über MThw zu erstrecken scheint. Für höhere Sturmfluten konnte ein solcher Anstieg bisher nicht festgestellt werden.

Die mit dem Ausbau erstrebte Vermehrung der Flutwassermenge ist nur im oberen Teil der Ausbaustrecke eingetreten, während unterhalb eine Verkleinerung zu verzeichnen ist. Seit Beginn des Ausbaues hat sich der Gesamflutraum der Elbe Hamburg/Cuxhaven um 4,5 v. H. verkleinert. Gleichwohl ist der Ausbau hinsichtlich der Fahrwasservertiefung erfolgreich gewesen, was zu dem Schluß berechtigt, daß eine Vergrößerung der Flutwassermenge für den Erfolg einer Regelung dann keine unbedingte Voraussetzung ist, wenn diese bereits ausreicht, um einen Durchflußquerschnitt mit der angestrebten Wassertiefe zu erhalten.

Als Regulierungsbauwerke sind bei den Fahrwasserregelungen der Unterelbe in erster Linie Buhnen gebaut worden, die als einfache, aus Schüttsteinen von 25–40 kg Gewicht bestehende Steinkörper mit einer Kronenbreite von 1–2 m, Seitenböschungen 1:1 und Kopfneigungen 1:4 ausgebildet und in der Regel auf einer Sinkstückunterlage geschüttet worden sind. Auch der Leitdamm unterhalb von Cuxhaven wird in ähnlicher Weise, hier wegen der starken Brandungsangriffe jedoch in einer Kronenbreite von 7 m, einer Böschungsneigung 1:2 zum Watt und 1:3 zum Strom hin, mit Abdeckung durch schwere Felsen oder Betonklötze ausgebildet. Bei der Ostebankregelung — zwischen der Ostermündung und Brunsbüttelkoog — ergab sich wegen der im Brackwassergebiet vor sich gehenden sehr schnellen Verlandung zwischen den Buhnen die Möglichkeit, den ganzen Buhnenkörper mit Ausnahme des Kopfes bis zu einer Höhe von 1 m unter MTnw aus Sinkstücken, deren cbm-Preis gegenüber dem Schüttsteinpreis seinerzeit wesentlich billiger war, herzustellen.

Hinsichtlich der Höhenlage der Buhnenkronen ist früher davon ausgegangen worden, daß von einem allmählichen Ansteigen der Kronenhöhen von der Mündung aufwärts eine zunehmende stärkere Konzentrierung der Strömung auf das Fahrwasser bei Ebbe und Flut erwartet wurde. Demzufolge sind die Buhnen von der Köhlbrandmündung im Hamburger Hafen aufwärts auf Mittelwasser und abwärts von Mittelwasser gleichmäßig auf etwa 1 m über MTnw bei der Schwingemündung abnehmend gelegt worden. Nach diesem Grundsatz sind auch die Buhnen bei den Teilregelungen bei Pagensand 0,70 m und oberhalb der Ostermündung 0,50 m über MTnw gewählt worden. Neuere Erkenntnisse haben jedoch gezeigt, daß es zur Erzielung tunlich großer Stromgeschwindigkeiten und eines für die Räumung erforderlichen möglichst großen Verhältnisses der mittleren Ebbstromgeschwindigkeit zur mittleren Flutstromgeschwindigkeit richtiger ist, die Kronen der Strombauwerke im Bereich des Tidegebietes, in dem die Kenterpunkte nicht mit MThw und MTnw zusammenfallen, möglichst nicht über MTnw hochzuführen, abgesehen von verwilderten Stromstrecken, die einer Stromführung auch bei höheren Wasserständen bedürfen, oder daß wegen einer leichteren Unterhaltungsmöglichkeit eine Höhenlage etwas über MTnw erwünscht ist.

Leit- und Deckwerke sind bei den Stromregelungen im Unterebbegebiet nur in geringem Umfange zur Ausführung gekommen, obwohl diese eine bessere Stromführung als Buhnen gewährleisten, die durch die großen Abstände, ihren Verlauf quer zur Stromrichtung und die Kolkbildung vor ihren Köpfen eine glatte Wasserbewegung behindern. Der Grund liegt im wesentlichen darin, daß die Regulierungslinien ganz überwiegend nicht gleichzeitig auch die Begrenzung des Fahrwassers bilden, da dieses nur einen Teil der Regulierungsbreiten einnimmt, andererseits bei Buhnen leichter die Möglichkeit zu nachträglicher Veränderung der Ausbaulinie besteht. Für die Wahl eines Leitdammes für die Außenelberegulierung sprachen außer den oben erwähnten Vorteilen vor allem die wesentlich geringeren Kosten gegenüber einem Buhnen-Ausbau und die Unsicherheit eines festen Anschlusses der Buhnenwurzeln im Watt, deren Bestand durch Prillbildung und Hinterströmung gefährdet wäre.

Die nachstehende Zusammenstellung gibt eine Übersicht über die auf der Unter- und Außenelbe auf der 140 km langen Strecke zwischen Feuerschiff „Elbe 1“ und Hamburg — jedoch ohne die Häfen — im Laufe der Jahrzehnte im Fahrwasser gebaggerten Mengen. Hierbei sind die im Zusammenhang mit den Ausbaumaßnahmen durchgeführten einmaligen Neubaggerungen einbegriffen:

Zeitraum	Baggerungen	Fahrwassertiefe unter Kartennull
1871—1880	5,8 Mill. m ³	6 m
1881—1890	9,5 Mill. m ³	
1891—1900	13 Mill. m ³	
1901—1910	41,7 Mill. m ³	10 m
1911—1920	35 Mill. m ³	
1921—1930	24 Mill. m ³	
1931—1940	39 Mill. m ³	
1941—1950	18 Mill. m ³	
1951—1959 *)	22 Mill. m ³	10 bzw. 11 m

*) Im Jahre 1957 sind die Baggerungen zur Erstellung einer Fahrwassertiefe von 11 m in Angriff genommen worden.

An reinen Unterhaltungsbaggerungen waren im Durchschnitt der letzten 12 Jahre (1945—1956) vor Inangriffnahme der Vertiefung des Fahrwassers auf 11 m jährlich 1,7 Mill. m³ zu baggern. Die in diesem Zeitraum jährlich angefallenen Mengen waren dabei keineswegs gleichmäßig. Sie schwankten zwischen ~ 1,0 Mill. m³/Jahr und über 2,0 Mill. m³/Jahr. Bild 5 zeigt eine Gegenüberstellung der jährlichen Baggermengen,

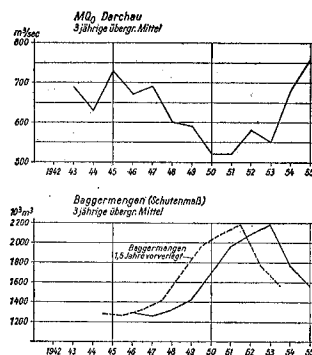


Bild 5

Jährliche Baggermengen und mittlere Oberwasserführung der Elbe

aufgetragen als 3jährige übergreifende Mittel, mit der jeweiligen mittleren Oberwasserführung der Elbe. Ein enger Zusammenhang zwischen beiden Größen ist unverkennbar. Mit abnehmender Oberwasserführung steigt die Baggermenge. Die Ursache hierfür ist darin zu sehen, daß die Strömungsgeschwindigkeiten vom Oberwasser merkbar beeinflußt werden. Mit abnehmendem Oberwasser wird der Flutstrom gestärkt und der Ebbstrom geschwächt. Das für die resultierende Geschiebepbewegung maßgebliche Verhältnis von Ebbgeschwindigkeit zur Flutgeschwindigkeit wird zugunsten letzterer verändert und damit die Transportkraft des Flusses nach See zu geschwächt.

D. Entstehung und Herkunft der Bodenablagerungen, Grenzgeschwindigkeiten, Bodensedimente, Korngrößenverteilung und Sinkstofftransport (Untersuchungsergebnisse)

Forscht man nach den Gründen der Entstehung der durch Baggerungen laufend zu beseitigenden Ablagerungen im Fahrwasser, dann fällt bei den wesentlichen Baggerstellen auf, daß offenbar Unstetigkeiten (überbreite Querschnitte, Spaltungen des Flußbettes) in erster Linie beteiligt sind, so in der Unteren Elbe beim Hanskalbsand, beim Lühesand, beim Dwarsloch, am Süden de von Pagensand und bei der Rhineplate — soweit nicht der Sand durch während des Tideablaufes zeitweilig auftretende Querströmungen in die Fahrrinne eingetrieben wird. In diesem Zusammenhang wurde auch die Frage einer für die natürliche Offenhaltung des Fahrwassers hinreichend großen Strömungsgeschwindigkeit untersucht. Es wurde der Versuch unternommen, eine Korrelation zwischen jährlicher Versandungshöhe und der jeweilig örtlich zugehörigen mittleren Ebbstromgeschwindigkeit v_{em} herzustellen. Bild 6 zeigt entsprechende Auftragungen für

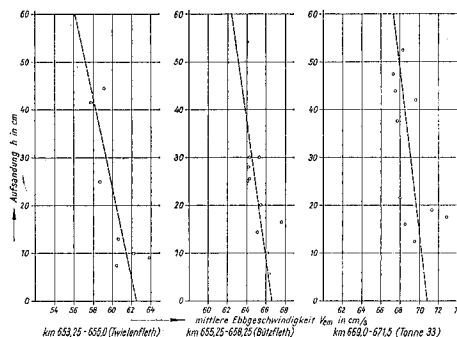


Bild 6

Korrelation zwischen jährlicher Versandungshöhe und der örtlich zugehörigen mittleren Ebbstromgeschwindigkeit für drei charakteristische Baggerstellen der Unterelbe

einige charakteristische Baggerstellen der Unterelbe. Als Versandungshöhen sind hierbei die Mittelwerte für den Zeitraum 1945 bis 1956, in denen besondere Ausbaumaßnahmen nicht zur Durchführung gekommen sind, eingetragen. Sie wurden errechnet aus den jährlich erforderlichen Baggermengen. Eine gewisse Abhängigkeit der genannten Größen voneinander, Zunahme der jährlichen Aufsandung mit abnehmender örtlicher Geschwindigkeit, ist erkennbar. Hiernach müßten in den fraglichen Gebieten mittlere Ebbgeschwindigkeiten von mindestens 63–67 m/s (zwischen Schulau und Bützfleth) vorhanden sein, um eine Selbstströmung des Flusses zu gewährleisten. Unterhalb dieser Strecke (Tonne 33) liegen sie offenbar höher, bei etwa 71 cm/s.

Untersuchungen über die Herkunft der jährlich aus der Elbe zu baggernden Bodenmengen haben zu folgenden Schlußfolgerungen geführt:

Das im Flußbett wandernde bzw. sich ablagernde Material stammt im wesentlichen aus 3 Bereichen.

1. Im Gebiet der Oberelbe, in dem noch keine Tidebewegung vorhanden ist, besteht das Geschiebe aus Quarzsanden mit einer mittleren Korngröße von 0,6—1 mm. Dieses wandert in Form von Bänken mit einer Geschwindigkeit von 60—80 m in 4 Wochen stromabwärts. Die Höhe der Strombänke beträgt in diesem Streckenabschnitt selten mehr als 0,5—1,0 m. Die auf diese Weise transportierten Feststoffmengen sind jedoch verhältnismäßig klein gegenüber den Mengen, die in Suspension als Sinkstoffe oder Schwebstoffe wandern. Im ganzen wird die jährliche Feststoffmenge, die aus der Elbe oberhalb der Tidegrenze kommt, auf 2 Mill. t geschätzt.

Mit dem Übergang in das Tidegebiet ändert sich auch der Vorgang der Sandwanderung grundsätzlich. Von nun an ist Richtung und Größe der Resultierenden aus Ebbe- und Flutstrom maßgebend für die Richtung der Sandbewegung und die transportierte Menge. Oberhalb von Hamburg überwiegt jedoch die abwärts gerichtete Bewegung noch erheblich. Ein Großteil des Oberelbegeschiebes wird am und unterhalb des Überganges vom binnenschiffstiefen zum seeschiffstiefen Wasser, d. h. im Hamburger Hafengebiet, abgelagert und durch Baggerungen wieder beseitigt. Hierbei handelt es sich im wesentlichen um die Korngrößen von 0,5 mm und größer. Es ist deshalb in der Hauptsache nur die Sinkstoff- und Schwebstofffracht, die von der Oberelbe her insbesondere bei Hochwasser in das untere Tidegebiet gelangt.

2. Es besteht kein Zweifel, daß der Sand in der Außenelbe, sowie auch zum großen Teil in der Unterelbe, aus der Nordsee stammt. Die Ergebnisse eingehender petrographischer, sowie sedimentologischer Untersuchungen, das Auffinden von Foraminiferen und Seeigeltaschen auf dem Schwarztonnensand lassen schließen, daß der Sandeintrieb von See bei Pagensand noch eine große Rolle spielt. Das Auffinden der leichten großen Diatomeen der Küstenzone im Schlick des Hamburger Hafens gibt den Hinweis, daß Schwebstoffe der Nordsee sogar bis Hamburg gelangen können.
3. Der Ursprung der Baggermengen ist aber auch an Ort und Stelle zu suchen, sie stammen sowohl aus der Sohlenerosion sich vertiefender Strecken, sowie aus dem Abbruch der Wattkanten und Vorländer und schließlich aus der Neubildung von Schlick in der Brackwasserzone aus den im Flußwasser kolloidal gelösten Substanzen. Wie stark die Sedimentation von Schlick in der Brackwasserzone sein kann, geht aus der Verschlickung der Schleusenvorhöfen von Brunsbüttelkoog hervor, in denen der Schlickbefall 70 cm im Monat beträgt.

In der Ems, Jade, Weser und Elbe sind seit längerem umfangreiche Untersuchungen über Art, Zusammensetzung bzw. Kornverteilung der Sedimente auf der Flußsohle und auf den Watten ausgeführt, sowie auch Messungen des Sinkstofftransportes selbst vorgenommen worden. Im einzelnen kann hier auf die Messungen selbst nicht näher eingegangen werden, nur deren wichtigste Ergebnisse sollen mitgeteilt werden.

In den Mündungsgebieten herrscht unterhalb der Brackwasserzone im allgemeinen Feinsand ($< 0,2$ mm) vor. Nach See zu werden die Sedimente, namentlich in den Stromrinnen, etwas gröber, mit Korngrößen bis zu 1,0 mm. Auf den Watten sind sie im allgemeinen feiner. In der Brackwasserzone überwiegt der Anteil an Schluff ($< 0,06$ mm) stark, mit Ausnahme einiger Gebiete stärkerer Strömungen, in denen ebenfalls Feinsande anstehen. Eine Kornanalyse der Bodensedimente im Fahrwasser der Elbe zwischen Schnakenburg, rd. 300 km oberhalb der Elbmündung, und Scharhörn in der Elbmündung

ergab eine Abnahme der mittleren Korngröße von 1 mm bei Schnakenburg auf 0,15 mm bei Glückstadt. Hierbei ist beim Übergang vom binnenschifftiefen zum seeschifftiefen Wasser in Hamburg ein deutlicher Abfall der mittleren Korngröße von etwa 0,7 mm auf 0,3 mm erkennbar. In der Brackwasserzone zwischen Glückstadt und Cuxhaven schwankt der Korndurchmesser zwischen 0,15 und 0,05 mm. Erst unterhalb von Cuxhaven treten in den Stromrinnen wieder Korngrößen bis zu 1 mm auf. Hieraus ergibt sich eine Sortierung des Bodensedimentes vom Groben zum Feinen stromab bis Glückstadt, ein Zeichen für den auf dieser Strecke überwiegend stromab gerichteten Transport. Unterhalb findet offenbar eine mit der Oberwasserführung und der jeweiligen Flutwassermenge schwankende Ein- und Ausfuhr von Sand statt. Zu dem gleichen Ergebnis haben auch eingehende petrographische Untersuchungen geführt.

Der Sinkstofftransport wurde an mehreren Stellen sowohl in der Ems wie auch in der Elbe durch Messung der Verteilung des Sinkstoffgehaltes in der Vertikalen, in den verschiedenen Tidephasen und bei gleichzeitiger Messung der jeweiligen Stromgeschwindigkeiten bestimmt. Bild 7 zeigt eine entsprechende Sinkstoffgehaltskurve für eine Meß-

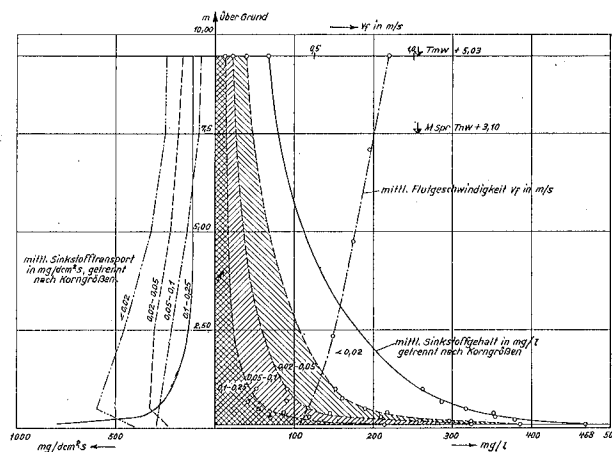


Bild 7

Sinkstoffgehaltskurve für eine Meßstelle in der Elbmündung

stelle in der Emsmündung. Die Sinkstoffproben wurden hierbei in 8 Tiefenstufen und in Zeitabständen von je 20 Minuten entnommen, wobei besonderer Wert auf die Verhältnisse in Bodennähe gelegt wurde. Hier wurde in 10, 20, 30, 40, 50, 70 und 100 cm Höhe über Grund gemessen. Jede Probe wurde auch kornanalytisch bestimmt. Eingetragen wurden die über die ganze Tide gemittelten Werte. Auf der linken Seite der gleichen Darstellung ist der entsprechende Sinkstofftransport dargestellt. Aus der Darstellung erkennt man, daß der Transport des sandigen Anteils ($> 0,05$ mm) in der Nähe des Bodens stark anwächst. Für den schluffigen Anteil ($< 0,05$ mm) ergab sich ein Maximum 30 bis 50 cm über Grund. Andererseits sieht man aber auch, daß die Schicht unmittelbar über die Sohle (0–10 cm über Grund), in der keine Messungen vorgenommen werden können, für den Gesamttransport ohne große Bedeutung ist. Etwa 95 % des Sinkstofftransportes erfolgen oberhalb dieser Schicht. Zur Berechnung der Gesamttransportmenge genügt es daher völlig, die Sinkstoffgehaltskurve bis zur Sohle zu extrapolieren, wie es in diesem Falle geschehen ist (3). Die Messung wurde in einem Gebiet beweglichen Feinsandes ausgeführt, die Kurve zeigt daher die Form, wie sie am häufigsten im Mündungsgebiet mit starker Sandbewegung und geringem Schlammanteil

vorkommt. Bei anderer Beschaffenheit des Untergrundes und der Korngrößen, z. B. fester Untergrund bzw. hoher Schlickanteil, können sich auch andere Sinkstoffgehalts- bzw. Sinkstofftransportkurven ergeben (4).

Die vorbeschriebene Art der Messung gibt nur Auskunft über den Sinkstofftransport an der Meßstelle selber. Um festzustellen, wie sich die Sände im Mündungsgebiet von Jahr zu Jahr verlagern und welche Sandmassen dabei bewegt werden, wurde noch ein anderer Weg eingeschlagen. Die Peilpläne zeitlich aufeinander folgender Jahre werden miteinander verglichen und die Differenz in Stufen von 5 dm aufgetragen. Man erhält eine Karte, die die Veränderungen der Topographie der Flußsohle während eines Jahres wiedergibt. Von der Unter- und Außenelbe sind alle Peilpläne seit 1910 in dieser Weise bearbeitet worden. Auf diese Weise war es möglich, einen Einblick in den Sandhaushalt größerer Gebiete und auf einen längeren Zeitraum zu erhalten. Diese sich über Jahrzehnte erstreckenden Untersuchungen haben ergeben, daß die Sandzufuhr aus der Nordsee unregelmäßig und stoßartig vor sich geht, während sich der Ausgleich durch Abtrieb im allgemeinen auf mehrere Jahre verteilt. Die zeitlichen Abstände, in denen sich der Ausgleich vollzieht, wechseln; Materialansammlung und Ausräumung erfolgen meistens nicht gleichzeitig.

Offenbar ist die zu beobachtende Sandwanderung im wesentlichen abhängig von der Zufuhr von Sand aus der Nordsee. Ist die mit dem west-östlich gerichteten Küstenstrom an den äußersten Rand der Flußmündung transportierte Sandmenge groß, dann wandert auch in größerem Umfange Sand in das untere Tidegebiet ein. Ist das Angebot an Nordseesand am Eingag in die Flußmündung gering, dann findet unter Umständen eine Sandausfuhr statt. Die Erklärung für solche Schwankungen ist möglicherweise in wechselnden meteorologischen Verhältnissen über der Nordsee zu suchen. Jedenfalls haben die Windbeobachtungen beim Feuerschiff „Elbe 1“ gezeigt, daß Westwind die Sandeinfuhr in das Elbe-Ästuar fördert, während Ostwind das Gegenteil bewirkt.

Als Ergebnis der geschilderten und anderer zahlreicher Messungen über den Geschiebe- bzw. den Sinkstofftransport in den genannten Stromgebieten kann folgendes festgestellt werden:

1. Die Sinkstoffbewegung im Tidegebiet spielt sich hauptsächlich in schwebender Form, d. h. im gesamten Querschnitt, ab, während die Geschiebebewegung unmittelbar auf der Sohle für den Gesamttransport ohne Bedeutung ist, weil im allgemeinen die Korngrößen im Mündungsgebiet klein sind. Nur dort, wo größeres Geschiebe ($> 0,2$ mm) vorherrscht, kann auch die Geschiebebewegung unmittelbar an der Sohle von Bedeutung sein.
2. Die Sinkstoffbewegung ist örtlich verschieden, sie hängt außer vom Korndurchmesser und der Kornform der Sedimente vom jeweiligen Schlickgehalt sowie von der Beschaffenheit der Flußsohle ab. Die Grenzgeschwindigkeit v_0 , bei der die Bewegung beginnt, wurde für einen mittleren Korndurchmesser von 0,11 bis 0,15 mm zu etwa 15 cm/s (gemessen 0,5 m über Grund) und für einen mittleren Korndurchmesser von 0,3 bis 0,4 mm zu etwa 20 cm/s gefunden.
3. Eine gesetzmäßige Beziehung zwischen dem mittleren Sinkstofftransport und der mittleren Stromgeschwindigkeit ist bei sonst gleichen örtlichen Bedingungen nur für den Fein- und Mehlsandgehalt ($> 0,05$ mm), nicht dagegen für den Anteil an schluffigen Sinkstoffen ($< 0,05$ mm), gegeben. Als Annäherung für den Sinkstofftransport S (sandiger Anteil) kann die Beziehung genannt werden:

$$S = C \cdot v^\alpha \left(1 - \frac{v_0}{v}\right).$$

worin C eine von den örtlichen Bedingungen abhängige Konstante, v die mittlere und v_0 die Grenzgeschwindigkeit, bei der die Bewegung beginnt, bedeuten. α ergab sich für Sand zu ~ 4 .

4. In der Lotrechten verhält sich der Gehalt an Fein- und Mehlsand ($> 0,05$ mm) in 10, 30, 50 und 70 cm über Grund etwa wie 100 : 51 : 37 : 29 (Ems-Messung), Werte, wie sie ähnlich auch van Veen angibt (100 : 54 : 34 : 28) (5). Der Gehalt an Mehlsand und Schluff ($< 0,05$ mm) erreicht demgegenüber bei 30 bis 50 cm über Grund sein Maximum.

E. Folgerungen

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die jahrzehntelangen Bemühungen, in den deutschen Nordseehäfen ausreichende Fahrwassertiefen zu schaffen und zu erhalten, bisher erfolgreich gewesen sind. Die Fahrwassertiefen konnten hierbei von einer ursprünglich vorhandenen natürlichen Tiefe von etwa 3—3½ m auf 8 m (Ems-Fahrwasser, Weser) bzw 11 m (Elbe) vergrößert werden. Die Erfolge wurden durch Baggerungen in Verbindung mit Regulierungsmaßnahmen erzielt. Als Regulierungsbauten kamen Buhnen und Leitwerke zur Anwendung.

Für den Ausbau in den Unterläufen der Flüsse waren hierbei folgende Grundsätze maßgebend:

Vermehrung der Flutwassermenge durch Beseitigung aller Hindernisse, wie Nebenarme, Engstellen, starke Krümmungen,

Bildung eines von oben nach unten allmählich sich trichterförmig verbreiternden Stromlaufes mit schwachen Krümmungen,

Herstellung eines der jeweils zur Verfügung stehenden Tidewassermenge angepaßten Querschnittes, so daß die für die Selbstströmung des Flusses erforderliche Stromgeschwindigkeit gewährleistet ist.

Auch in den äußeren Bereichen der Flußmündungen, in denen der Fluß keine feste Führung mehr hat, waren den örtlichen Verhältnissen angepaßte Ausbaumaßnahmen erfolgreich. So in der Außenjade, in der durch Errichtung eines Korrektionswerkes auf Minsener Oog eine Stabilisierung des Jedefahrwassers erreicht werden konnte. In der Außenweser (Ausbau des Fedderwarder Arms) durch Herstellung von Strombauwerken auf der Robenplate. Das letztere Beispiel zeigt aber, daß in diesem Gebiet Ausbaumaßnahmen nur dann von Erfolg sind, wenn sie der von Natur aus sich anbahnenden natürlichen Entwicklung entgegenkommen. Die jahrelangen Bemühungen, in dem parallel zum Fedderwarder Arm verlaufenden Wurster Arm ein ausreichendes Fahrwasser offenzuhalten, blieben erfolglos. Es ist also wichtig, besonders in diesem Gebiet durch eingehende und lang andauernde Beobachtungen und Kartenvergleiche, die Richtung und Intensität der immer vorhandenen Tendenz zur Verlagerung der Hauptstromrinnen zu erforschen. Die in der Außenelbe in Angriff genommenen Arbeiten zur Errichtung eines Leitdammes haben bisher noch nicht zum gewünschten Erfolg geführt. Untersuchungen über zusätzliche Maßnahmen sind im Gange. In den letzten Jahren in Angriff genommene umfangreiche Baggerungen in der Außenjade zur Erzielung einer Fahrwassertiefe von 12 m waren erfolgreich. Die Bewährung dieser Maßnahmen bleibt abzuwarten.

Die Ausbaumaßnahmen haben außer z.T. erheblichen Veränderungen der Wasserstände, z.B. Vergrößerung des Tidehubes von 0,20—0,30 auf rd. 3,20 m in Bremen bzw. von 2,00 auf rd. 2,40 m in Hamburg, Veränderungen der Tidewassermengen und auch eine Verschiebung der Brackwasserzone stromauf zur Folge gehabt. Die Tidehubvergrößerun-

gen wurden hierbei hauptsächlich durch entsprechende Senkungen der Niedrigwasserstände hervorgerufen.

Lage und Gestalt der Zufahrten in den Mündungsgebieten werden durch die dort vorhandene starke Sandverdriftung beeinflusst. Berechnungen über den Sandhaushalt in der Elbmündung haben ergeben, daß eine erhebliche Ein- und Ausfuhr von Sand mit dem Gezeitenstrom stattfindet, wobei zeitweise die Einfuhr und zeitweise die Ausfuhr überwiegt. Eine gewisse Abhängigkeit von den jeweiligen meteorologischen Verhältnissen scheint hierbei gegeben.

Wenn auch der Geschiebehaushalt in den Flußmündungen über lange Zeiträume gesehen, wie die Massenberechnung auf Grund der Tiefenänderungspläne der letzten 50 Jahre in der Elbmündung ergeben hat, ausgeglichen zu sein scheint, so fordert doch die Seeschifffahrt eine Fahrrinne von stets gleichbleibender Tiefe. Hierdurch entsteht die praktisch nicht zu verwirklichende Forderung nach einer Stromrinne mit völlig stetigem Verlauf der Geschwindigkeiten im Sinne einer resultierend stromab gerichteten Sandverfrachtung.

Da dieses Idealziel nicht erreichbar ist, wird man auch in Zukunft mit mehr oder weniger großen Unterhaltungsbaggerungen besonders in den Strommündungen rechnen müssen. Stromregulierungswerke werden in den Mündungsgebieten wegen der sehr hohen Kosten nur dort, wo mit vertretbarem technischem Aufwand eine Unterhaltung des Fahrwassers allein durch Baggerungen nicht mehr möglich ist, in Betracht zu ziehen sein.

II. Über eine Möglichkeit, in der Brackwasserzone tideunterworfenen Ästuarien durch Beeinflussung der Richtung bzw. Größe der vorhandenen Räumungskraft die Fahrwassertiefe zu verbessern bzw. zu erhalten.

Im Tidefluß ist die relative Lage der Sohle der Schifffahrtsrinne zur gewölbten Fläche des „Seekarten-Nulls“ (= MSprTnw) ständiger Veränderung unterworfen, auch dort, wo sie — im Endeffekt — für längere oder kürzere Zeiten stabil erscheint. Sie lebt im Rhythmus der Gezeiten, deren 2 Tideströmungen — der Flut- und der Ebbstrom — sie täglich verändern und, so wie der stete Tropfen den Stein höhlt, so führen die kleinsten jede Tide erzeugten Veränderungen der Sohlenhöhenlage zu Vertiefungen bzw. Erhöhungen derselben. Bleibt der Tidefluß sich überlassen, nimmt die Lebendigkeit der Sohle im allgemeinen ab und strebt einer Gleichgewichtslage zu, sofern nicht erneutes Leben des gesamten Flußbettes durch seitliche Verlagerungen der Rinnen, Stromspaltungen, Bildung und Veränderung von Sanden, Platen und Watten eintritt, was dann mitunter zu schlagartigem Aufleben des Spiels der Tiefenveränderungen führen kann.

Wir betrachten nicht diesen Fall, sondern Tideflüsse bzw. Flußabschnitte, deren Hauptschifffahrtsrinnen keine kurzfristigen horizontalen „Schlangenbewegungen“ durchführen, sondern solche, in denen trotz ziemlicher Stabilität im Grundriß die Schifffahrtsrinne in vertikaler Hinsicht lebendig ist, d. h. an gewissen Stellen sich vertieft und an anderen immer wieder versandet. Immer wieder heißt: Auch dann wieder, wenn man der Versandung durch Baggerung begegnet. Eine Ausbaggerung — und gar eine besonders tiefgreifende, besonders schnell erfolgende oder besonders kurzstreckige — stört den, den pendelnden Geschiebetrieb bewirkenden Energiehaushalt des Flusses und muß dadurch die Sohle zu verstärktem Leben anregen. Denn mit jeder Sohlenänderung ist, da sie eine Querschnittsveränderung bedeutet, auch eine Geschwindigkeitsveränderung, also eine Änderung der potentiellen Ursache zur Geschiebeverlagerung, verbunden. Der

örtlich in seinem Eigenleben gestörte Fluß „reagiert“, um — so schnell als er kann — gleich- und auch andersortige Veränderung zur Wiederherbeiführung seines ihm eigenen Regimes vorzunehmen. Seine Antwort auf den künstlichen Eingriff kann nur eine Versandung sein, zunächst eine Neuansandung in der Baggerstelle, aber auch Verstärkungen oder das Neuauftreten anderweitiger Versandungen. Keine Menschenhand würde diese Erscheinung verhindern können, sie vermag bestenfalls lenkend auf sie einzuwirken.

Sowohl für solche störungsbedingten wie auch für solche aus dem Naturgeschehen entspringenden Versandungen bezieht der Tidefluß das die Sohlenaufhöhungen bildende Sandmaterial aus seinen Materialeingängen, wenn auch der erste Zugriff in die Eigenvorräte des Ästuars greift. Selbst dann, wenn weder die See noch das Oberwasser Sandlieferanten wären, könnten in Tideflüssen Versandungen — jedoch mit Ausräumungen an anderen Orten verbunden — stattfinden, denn die Tideflußsohle besteht aus Sand (von Natur aus unbewegliche, etwa felsige Flußsohlen sollen hier von der Betrachtung ausgeschlossen bleiben), der unvermeidbar von den Flut- bzw. Ebbströmungen aufgewirbelt und hin und her geführt wird (es sei denn, die Tideströmungen wären so gering, daß keine das Sandkorn aufhebende Turbulenz entsteht). Nicht immer aber halten sich die Sandtransporte aus der eigenen Masse im Gleichgewicht. Die Tidestromdauern und die Form der beiden Äste der Tidekurve sprechen da als primäre Erscheinungen ein großes Wort für das Zustandekommen bzw. das Nichtzustandekommen eines solchen Gleichgewichtes mit.

Aber das die Versandung in Tideflüssen bildende Sandkorn wird nicht im Ästuar geboren. Es stammt in erster Linie aus den Sandverdriftungen in der freien See, die entlang der Küste an den Flußmündungen vorbeiführen und welche die in die Flußmündung eindringenden Flutströme mächtig mit turbulent transportierten Geschiebefrachten nähren. Wenn diese Frachten auch mit einem Flutstrom höchstens auf die Länge des Flutweges eindringen und mit dem darauffolgenden Ebbstrom ungefähr gleich weit zurückgetrieben werden, so dringt ein Teil doch im Endergebnis stromauf weiter vor und muß irgendwo verbleiben. (In der Ems z. B. bestreitet der bei Borkum eindringende Seesand bis Emden — also auf rd. 50 km Flußlänge — den Aufbau der Flußmorphologie, von Verschlickungen abgesehen. Günstigenfalls könnten diese Sandmengen sich — theoretisch gedacht — gleichmäßig über die ganze Breite des Emsmündungstrichters verbreiten und würden dann diese jährlich in der Größenordnung von ungefähr 1 cm aufhohen). De facto sind es immer bestimmte Gebiete, in denen die Versandungen auftreten. Und wenn diese der Schifffahrtsrinne gefährlich werden, muß — will man hier die Versandungserscheinung vertreiben — ihre „Ursache an Ort und Stelle“ gesucht bzw. erkannt werden. Die Frage des nach Abhilfe ausschauenden Ingenieurs muß lauten: Warum wird das bewegte Sandkorn abgelagert und warum gerade hier? Die Frage nach der Herkunft des Sandkorns wird dem Ingenieur wenig Ratschläge erteilen können, wie er die Ablagerungen an diesem Ort vermeiden kann. Denn man wird z. B. die Invasion des Seesandes — wenn man sie nicht selbst verschuldet hat (etwa durch Entzug von Flutspeicherraum) — in einem Mündungstrichter nie vermeiden können. Aber man kann die Eindringlinge bei ihrer örtlichen Passage beeinflussen. An der Marschrichtung wird man nicht viel ändern können, wohl aber allerhand an dem Marschtempo, genauer gesagt, an den beiden Marschtempos in Flut- und Ebbstromrichtung. Diese beiden werden von den Stromgeschwindigkeiten beider Strömungen beeinflusst, und hier muß der Hebel angesetzt werden.

Ein zunächst allgemein dargelegtes Beispiel soll zeigen, wie man — und zwar auf ungewöhnliche Art — die Fahrwasserverhältnisse verbessern kann, und zwar in einem in der Brackwasserzone befindlichen Abschnitt eines Tideflusses, in welchem bei Nichtvorhandensein von Stromspaltungen, bei mäßiger Breite und beim Bedürfnis nach

Sohlenvertiefung letztere nicht durch eine für die Schifffahrt nicht mehr tragbare Breiteinschränkung erreicht werden kann.

Diese Verbesserung kann wegen unerlaubter Breiteinschränkung nicht durch Vertiefung bei gleichbleibender Querschnittsgröße erreicht werden. Eine Vergrößerung der Querschnittsfläche ist daher unvermeidlich. Sie wird aber dann unvermeidlich zur Versandung führen bzw. eine evtl. vorher vorhandene Versandungstendenz vergrößern, wenn sie lediglich im alleinigen, vertiefenden Ausbaggern besteht. In diesem Falle würde nicht mehr als ein ständiges, diesen ganzen Abschnitt umfassendes Baggerbedürfnis entstehen.

Es ist interessant, daß man dieses für die Verbesserung unvermeidliche Baggerbedürfnis zwar nicht aus der Welt schaffen, aber aus diesem Abschnitt heraus verlagern kann. Hierzu bedarf es einer solchen Querschnittsveränderung, die bei mäßig verengenden Einbauten so vertieft, daß im Endeffekt die vorhin erwähnte Querschnittsvergrößerung entsteht. Die neuen vergrößerten Querschnitte werden dann nicht zu Versandungen führen, wenn durch sie erreicht wird, daß die sandverlagernde Wirkung einer der beiden Tidenströmungen die der anderen überwiegt, und zwar längs des ganzen Abschnittes in gleichem Ausmaß überwiegt, d. h. man muß Ebb- oder Flutüberlegenheit erzeugen (d. h. Stabilität der Sohle bei einseitigem Durchmarsch des Sandes). Gleich große zu Null resultierende Sandtransporte der Ebbe und der Flut erzeugen zu wollen, wäre unangebracht, da eine solche die Absicht zur Verlagerung der Versandung zu nichte machen würde. Nun kann man das Überwiegen eines der beiden Sandtransporte über den anderen durch Querschnittsgestaltung so erzeugen, daß es der Ebbstrom oder der Flutstrom ist, welcher den resultierend ablagerungsfreien Durchmarsch des Sandes bewirkt. Mit klassischen Hilfsmitteln kann man grundsätzlich beides erreichen. Für Ebbstabilität (Ebbräumung) ist erforderlich, daß der Niedrigwasserquerschnitt verkleinert und der — hierdurch allerdings unten verkleinerte — Hochwasserquerschnitt in seinem oberen Teil vergrößert wird. Eine Niedrigwasserquerschnitt-Verkleinerung ist aber bei unveränderter Sohlenbreite mit der Vertiefung nicht vereinbar. Deshalb kommt es im vorliegenden Fall nicht in Frage, die Ebbstromgeschwindigkeiten relativ zur Flutströmung verstärken zu wollen, zumal die in der Brackwasserzone im unteren Querschnittsteil den Ebbstrom bremsende Dichteströmung (Brackwassereffekt) hierdurch nicht beseitigt werden kann. Außerdem hieße das, der bereits erwähnten Sandinvasion entgegenarbeiten zu wollen.

Ungewöhnlich, aber nach dem eben Gesagten sich mit greifbar naher Logik direkt anbietend, ist es dagegen, sich des Flutstromes zu bedienen, d. h. auf die Erzeugung einer Flutstabilität (oder auch Fluträumung) hinzuzielen. Der hierfür nötigen Niedrigwasserquerschnittsvergrößerung wird bereits durch die angestrebte Sohlenvertiefung Rechnung getragen. Die erforderliche Verkleinerung des oberen Teiles des Hochwasserquerschnittes läßt sich durch Einbauten — die überdies zur Vergleichmäßigung der Vorgänge im Strom willkommen sind — bewerkstelligen. Im Gegensatz zu einer Ebbräumung wird jetzt der Brackwassereffekt ausgenutzt, denn er wirkt besonders in der an Geschiebeführung reichen Sohlennähe flutstromverstärkend, und die von See her eindringenden Sande passieren jetzt störungsfrei den Regulierungsabschnitt. In beiden Fällen wird in der Regulierungsstrecke nicht gebaggert werden müssen. Durch beide Regulierungsarten wird das jedoch nicht vermeidbare Baggerbedürfnis verlagert, bei der Ebbräumung aus dem Abschnitt nach See hin, bei der Fluträumung nach oberhalb hin. In beiden Fällen hat man es in der Hand, durch Querschnittsvergrößerung — natürlich durch tunlichst erreichbare Verbreiterung bzw. Vertiefung — den an der Ablagerung in der Regulierungsstrecke gehinderten Sand eine Falle zu stellen. Gelingt es, diesen Sandfang möglichst kurz zu gestalten, dann hat man den Vorteil der Konzentrierung

der Baggerungen gewonnen, und wenn dem so ist, daß die zu regulierende Strecke am Ende des Seeschiffahrtsweges liegt, dann bringt eine Fluträumung noch den Vorteil, daß der Bagger aus dem Fahrwasser verschwinden kann.

So einleuchtend an diesem Beispiel die Empfehlung einer Fluträumung ist, es ist leichter gesagt als getan. Die Dimensionierung der Querschnitte — übrigens bei der Ebbräumung schwieriger — erfordert eine ausgezeichnete Kenntnis der durch sie herbeigeführten Geschwindigkeiten. Insbesondere auf ihren unterschiedlichen zeitlichen Verlauf (die alleinige Erfassung ihrer Mittelwerte genügt nicht) bei Ebbe und Flut kommt es an; denn dieser Unterschied reguliert die Erscheinungen von Versandung, Räumung und Stabilität.

Überlegungen, rechnerische Untersuchungen und Modellversuche haben gezeigt, daß es der zeitliche Verlauf dieser Geschwindigkeiten ist, der bestimmend dafür wird, ob der örtliche Sandtransport in der Ebbstrom- oder in der Flutstromrichtung überwiegt. Dabei kommt es gar nicht so sehr darauf an, mit welchem Formelansatz man die „Geschiebefracht“ des Augenblicks erfaßt, sondern daß man sie tatsächlich in allen Augenblicken erfaßt. Es ist auch gar nicht nötig, diese Geschiebefracht überhaupt mengenmäßig zu erfassen (bzw. dies zu versuchen), es genügt, einen ihr proportionalen Wert heranzuziehen. Ob man nun für eine solche „Geschiebefrachtproportionale“ mit dem

Geschiebetriebansatz $B \cdot \int_0^D v^2 (v - v_0) dt$ (darin B = Flußbreite, D = Tidestromdauer,

v = eine tiefenmäßig ausgesuchte Stromgeschwindigkeit, v_0 = eine kornaufhebende Grenzgeschwindigkeit, t = Zeit) verwendet, oder allein mit Ansätzen wie

$$B \cdot \int_0^D v^3 dt \quad \text{oder} \quad B \cdot \int_0^D v^4 dt$$

arbeitet, ist gar nicht so ausschlaggebend. Wesentlich ist eine genaue, vielortige Kenntnis des zeitlichen Verlaufs von v , wofür Messungen allein nicht ausreichend sind, schon deshalb, weil sie in der erforderlichen Dichte und erforderlichen Querschnittsanzahl nie gleichzeitig erfolgen können.

Seit aber die modernen Tidewellenberechnungsmethoden (6) (7) und sichere Kubisierungsverfahren (8) zur Verfügung stehen, bildet — sowohl für Nachberechnungen (des Naturzustandes) wie auch für Vorausberechnungen (von Regulierungszuständen) — die sehr genaue Berechnung des v -Verlaufs in beliebig eng gelegten Flußquerschnitten kein Problem mehr. Die für die Berücksichtigung des Brackwassereffektes notwendigen Grundlagen sind durch Messungen sehr gut erfaßbar.

Die für die Kenntnis des Geschwindigkeitsverlaufs nach der Regulierung erforderliche Tidewellenvorausberechnung steht jedoch vor der Schwierigkeit, die bei ihr benötigten neuen (durch den Eingriff veränderten) Widerstandswerte des Flusses zu erraten bzw. anzunehmen. Diese Schwierigkeit ist — besonders hier bei der großen Empfindlichkeit der Geschiebefrachtproportionalen auf feinste Unterschiede im v -Verlauf — nicht zu unterschätzen. Jedoch durch iterative Zusammenarbeit von Modellen und Tidewellenberechnung läßt sie sich hinreichend aus der Welt schaffen, allerdings nur dann, wenn man im Modell — nobel im Maßstab und unermüdlich bei der Herbeiführung der für die Naturähnlichkeit notwendigen „Überhöhungsrauhigkeit“ — mit überaus präzisen und nicht sparsam placierten, vor allem die Sohlennähe erfassenden Geschwindigkeitsmessungen arbeitet und auch in der Lage ist, die Brackwasserverhältnisse nachzuahmen.

Daß eine Tideflußregulierung in einem unzulänglich tiefen, trotz laufender Ausbaggerung stets wieder aufsandenden Ästuarabschnitt mit dem Ziel der flutseitigen Ausräumung — verbunden mit der Verlagerung des Bagger-Erfordernisses nach oberhalb — kein Phantasie-Projekt darstellt, zeigt die zur Zeit in Deutschland im Bau befindliche Regulierung des rd. 10 km langen, in der Brackwasserzone gelegenen Abschnittes „Emder Fahrwasser“ der Ems. Hier traten bei der Planung, iterativ zusammenarbeitend, also sich gegenseitig gleiches Gewicht zusprechend, Berechnung und Modell in Aktion. Es ist interessant, daß gerade hierdurch — völlig unabhängig voneinander — nach den ersten Schritten der Zusammenarbeit Modell und Rechnung als wirksamste Lösung des Ziels (Verhinderung der Versandungen und Vertiefung) die oben herausgestellte flutseitige Räumung mit oberhalb anschließendem künstlichen Sandfang anrieten, ein m. E. erstmaliges Unterfangen. Die Modellversuche wurden von Prof. Hensen im Franzius-Institut der Technischen Hochschule Hannover, die Rechnung vom Wasser- und Schiffsamt Emden durchgeführt.

Die Zusammenarbeit beginnt nach Wahl einer für maßgeblich erachteten Tide mit der rechnerischen rohen Ermittlung geeigneter Querschnitte durch eine Tidevorausberechnung, für welche eine vorangegangene Tidewellennachberechnung des Naturzustandes Annäherungswerte für die Widerstandsbeiwerte des Flusses eingebracht hat. Sowohl die Tide der Nachberechnung wie jene der Vorausberechnung gelangt jetzt in das Modell, (welches — aus Maßstabsgründen nicht bis zur Tidegrenze reichend — der beiderseitigen Beschickung mit Tidekurven bedarf). Erstere, damit die Naturähnlichkeit des Modells für den Naturzustand — als Voraussetzung für die spätere Erreichung der Naturähnlichkeit von sowohl Modell wie Rechnung für den Ausbauzustand — gewährleistet ist, und letztere, um für den nächsten Iterationsschritt der die erste Querschnittsannahme verbessernden Rechnung verbesserte Widerstandsbeiwerte des Regulierungszustandes zu liefern. Für diese nach jedem, falls erforderlich, weiteren Iterationsschritt nötige Querschnittsverbesserung bietet die sogenannte „Räumbetrachtungslinie“ eine sehr praktische Handhabe zur Kontrolle, ob bzw. wie weit das Ziel — die Fluträumung — erreicht worden ist. Diese Linie, welche in der Auftragung der Differenz (Flutwert minus Ebbwert) der bereits erwähnten Geschiebefracht-Proportionalen über der Flußachse besteht, muß bei Fluträumung tunlichst ohne Gegengefälle nach See hin flach abfallen. Für Flutstabilität (also für Sohlenstabilität bei flutseitig resultierendem Transportdurchgang) könnte sie auch horizontal verlaufen, doch gibt man ihr sozusagen „als Reserve“ die leichte Neigung, um die Flußsohle zur Selbstvertiefung anzuregen.

So einfach das Rezept klingt, so groß sind seine Ansprüche auf hohen Rechenaufwand, fleißiges Kubizieren, höchste Modellpräzision und auf beiden Seiten Unermüdlichkeit im Ausfeilen des noch nicht voll befriedigend Erreichten.

Da die Modelltechnik bereits in der Lage ist, von sich aus (direkt modellbeobachtend, nicht modellrechnend) Voraussagen über künftiges Geschiebeverhalten durch effektive Geschiebenachahmung (Vestyron) und durch Brackwassernachahmung zu machen, ist eine zusätzliche Möglichkeit für die Beurteilung der rein rechnerischen — in Zusammenarbeit mit dem Modell gewonnenen — Voraussagen über das Sohlenverhalten nach der Regulierung gegeben. Bei der Planung der Regulierung des Emders Fahrwassers hat die Modellaussage das Vertrauen in die rechnerische Aussage gestärkt.

Schrifttumsverzeichnis

- (1) Wetzel, Günter: „Die Ems als SeeschiffsstraÙe“. Handbuch für Hafenbau und Umschlagtechnik. Band 4, Hamburg 1959, Seite 88.
- (2) Niebuhr, Wulf: „Über die neuere Entwicklung der Außenems und ihre vermutlichen Ursachen“. Die Küste, März 1952. Band I, Heft 1, Seite 43—62.
- (3) Niebuhr, Wulf: „Beobachtungen über den Sandtransport in der unteren Ems“. Die Küste, Jahrg. 4/1955, Seite 67—92.
- (4) Lucht, Fritz: „Hydrographische Messungen in der Außenelbe“. Die Wasserwirtschaft (früher Deutsche Wasserwirtschaft). Sonderheft: Vorträge auf der gewässerkundlichen Tagung am 19./20. Sept. 1951 in Hamburg, Seite 22—26.
- (5) van Veen, Joh.: „Eenige Opmerkingen over het Zandtransport van Stroomen“. Tijdschrift van Het Koninklijk Nederlandsch Aardrijkskundig Genootschap, Amsterdam 1936, Seite 161—172.
- (6) Schnoor, Ernst: „Anwendung des Differenzenverfahrens bei der Tidewellenberechnung in den von den Gezeiten beeinflussten Flüssen“. Der Bauingenieur 34 (1959) Heft 6, Seite 231—240.
- (7) Hensen, Walther: „Die Berechnungen von Tidewellen in Tideflüssen“. Die Küste, Lg. 7, Doppelheft 1958/1959, Seite 1—19.
- (8) Schnoor, Ernst: „Leitfaden für das Kubizierungsverfahren“. Mitteilungen der Hanoverschen Versuchsanstalt für Grundbau und Wasserbau Franzius-Institut der Technischen Hochschule Hannover, Heft 16, 1959, Seite 144—190.