

# Untersuchungen im hydraulischen Modell über die zweckmäßige Linienführung und Höhe des Leitdammsystems „Pagensand Nord“ in der Unterelbe

Von GEORG VISSCHER und GOTTFRIED WOLF

## Zusammenfassung

Das Leitdammsystem „Pagensand-Nord“ liegt in einem exponierten Stromspaltungsgebiet der Unterelbe. Es wurde in den 30er Jahren gebaut und mußte nach mehreren Vertiefungen der Fahrrinne neu konzipiert werden. Durch Untersuchungen in einem physikalischen Modell wurden Trassenführung und Höhenlage mehrerer Systemvarianten untersucht, um eine hydraulisch und wirtschaftlich günstige Lösung zu finden.

## Summary

*The training wall "Pagensand-Nord" is situated in an exposed bifurcation of the lower Elbe Estuary. As it was constructed in the thirties, it had to be modified to the new conditions following the deepening of the shipping channel. The location and height of the training wall were investigated in a physical model in order to obtain an hydraulically favorable solution.*

## Inhalt

1. Allgemeines . . . . .	90
2. Stromspaltungsgebiet Pagensand. . . . .	91
2.1 Örtliche Lage. . . . .	91
2.2 Beschreibung des Stromspaltungsgebietes . . . . .	91
2.2.1 Vor dem 10-m-Ausbau . . . . .	91
2.2.2 Nach dem 12-m-Ausbau . . . . .	92
2.2.3 Nach dem 13,5-m-Ausbau = Istzustand . . . . .	94
3. Untersuchungen am hydraulischen Modell . . . . .	97
3.1 Grundlagen für die Modellversuche. . . . .	97
3.2 Aufgabenstellung an die Modellversuche . . . . .	97
3.3 Modell und Meßtechnik . . . . .	97
3.4 Versuche mit fester Sohle . . . . .	101
3.4.1 Ausgangszustand . . . . .	101
3.4.2 Leitdammsvariante – Erhöhung des alten Leitdamms . . . . .	104
3.4.3 Leitdammsvariante – Zurückgesetzte neue Leitdamms-trasse . . . . .	107
3.5 Versuche mit beweglicher Sohle . . . . .	108
3.5.1 Ausgangszustand . . . . .	109
3.5.2 Zustand mit neuem Leitdamms . . . . .	113
4. Ausblick . . . . .	114
5. Schriftenverzeichnis . . . . .	115

## 1. Allgemeines

Die Unterhaltung der tiefen Fahrrinne der Unter- und Außenelbe ist eine primäre Aufgabe der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV), um die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs zu garantieren. Da für diese Aufgabe jährlich hohe Aufwendungen für Unterhaltungsbaggerungen getätigt werden müssen, ist es notwendig, stets Mittel und Wege zu suchen, diese Kosten zu minimieren.

Die Mittel und Methoden einer Erhaltung und Verbesserung der Fahrwasserverhältnisse im Tidebereich sind äußerst vielfältig und lassen sich in folgende drei Hauptgruppen unterteilen:

1. Anpassung der tiefen Fahrrinne an die natürlichen Gegebenheiten der Strömungsverhältnisse und des Sedimenttransportes durch Verlegen oder Verschwenken derselben,
2. Durchführung von Wasserbaumaßnahmen, die durch ihre Wirkung eine Sedimentverfrachtung in die tiefe Fahrrinne verhindern oder zumindest spürbar verringern,
3. Einsatz von modernen Baggergeräten, die Verflachungen und Einengungen der tiefen Fahrrinne, verursacht durch Sedimenteintreibungen oder Sohlumlagerungen, beseitigen.

Infolge des Einsatzes von modernen, leistungsfähigen Baggergeräten und der technologischen Entwicklung in den letzten zwei Jahrzehnten auf dem Gebiet der Baggertechnologie und Ortung hat im Bereich des Küstenvorfeldes und der Mündung des Tideflusses die Baggerung wesentlich an Bedeutung zugenommen. Hier erfolgt in der Regel die Unterhaltung mit Schleppekopf-Saugbaggern als wirtschaftlichste Methode.

Anders stellt sich das Problem im Tidestrom selbst dar. In diesem Bereich können mit wesentlich geringeren Investitionen als im Küstenvorfeld wasserbauliche Maßnahmen geplant und gebaut werden, die aktiv die Querschnittsgestaltung, die Strömungsverhältnisse und den Sedimenttransport so beeinflussen, daß eine Verringerung des Unterhaltungsbaggeraufwandes erzielt wird. Einen möglichst hohen Gleichgewichtszustand im Tidestrom nach den erfolgten Ausbaumaßnahmen – zuletzt auf 13,5 m unter Kartennull – wieder herzustellen, ist Ziel der wirtschaftlichen Aufgabenerfüllung der Fahrinnenunterhaltung. Bei der Planung von Regelungsbauwerken können folgende Einzelbauwerke zu Regelungssystemen kombiniert werden:

1. Bühnen zur Einschränkung der Abflußbreite bei Tnw und zur Stabilisierung der Ufer- und Flachwasserbereiche,
2. Leitdämme zur Festlegung von Inseln und Wattzonen, zur Regelung von Stromspaltungen und damit zur Steuerung, zur Verminderung von seitlichem Sedimenteintrieb und zur Vermeidung von für die Fahrrinne schädlichen Querschnittsaufweitungen,
3. Watt- und Ufervorspülungen mit und ohne Fußsicherungen zur Regelung der Durchflußquerschnitte mit gleichzeitiger Schaffung von ökologisch wertvollen Flachwasserzonen.

Darüber hinaus bieten sich Möglichkeiten der Verbesserung der Fahrwassersituation durch Abdämmung von Nebenrinnen und durch Begradigung von Krümmungen. Diese Mittel des Wasserbaus sollten nur im äußersten Fall und sehr begrenzt angewandt werden, da sie einen zu starken Eingriff in das Tideregime mit sich bringen und somit in angrenzenden Bereichen ein neues Ungleichgewicht bewirken. Darüber hinaus würde der natürliche Charakter des Tideflusses stark beeinträchtigt. Erfahrungen im Bereich der Unterelbe haben gezeigt, daß mit den Kombinationen der unter 1 bis 3 genannten Einzelbauwerke gute Erfolge für die Erhaltung der Fahrinnentiefe und Minimierung der Unterhaltungsbaggerungen erzielt werden können und darüber hinaus Flachwasserbereiche geschaffen werden, die einer natürlichen Aufschlickung unterliegen und den Sauerstoffeintrag in das Gewässer erhöhen. Grundsätzlich bleibt festzustellen, daß es keine allgemein gültigen Richtlinien für die Freihaltung der

Zufahrten zu den deutschen Seehäfen gibt. Unterhaltungsbaggerung und Wasserbauwerke müssen sich einander sinnvoll ergänzen.

## 2. Stromspaltungsgebiet Pagensand

### 2.1 Örtliche Lage

Das Stromspaltungsgebiet im Bereich der Elbinsel Pagensand (Abb. 1) war noch in der ersten Hälfte der zwanziger Jahre eine „verwilderte“ Tideflußstrecke mit dem hochwasserfreien Mittelgrund Pagensand und seinem oberstromigen Watt „Hungrier Wolf“ im nördlichen Teil und den Wattinseln des Schwarztonnensandes im südlichen Teil des Querschnittes. Trotzdem waren schon seit über hundert Jahren davor erfolgreiche Bemühungen vorausgegangen, diesen schwierigen Streckenbereich der Unterelbe den jeweiligen Erfordernissen des Schiffsverkehrs anzupassen (ROHDE, 1971). Dieser Bereich erstreckt sich auf etwa 12 km Länge von Elbe-km 658 bei Bützfleth bis km 670 querab der Ruthenstrommündung.

### 2.2 Beschreibung des Stromspaltungsgebietes

#### 2.2.1 Vor dem 10-m-Ausbau

Infolge des überbreiten Querschnittes (Abb. 1) in diesem Krümmungsbereich liefen Flut- und Ebbstrom auseinander, führten sedimentverfrachtende Querströmungen zur Verflachung der Fahrinne fortschreitend nach Norden und letztlich zu einem sich ständig verkleinernden Krümmungsradius der Hauptelbe (SCHÄTZLER, MEISEL, 1937).

### Stromspaltungsgebiet vor dem 10m-Ausbau

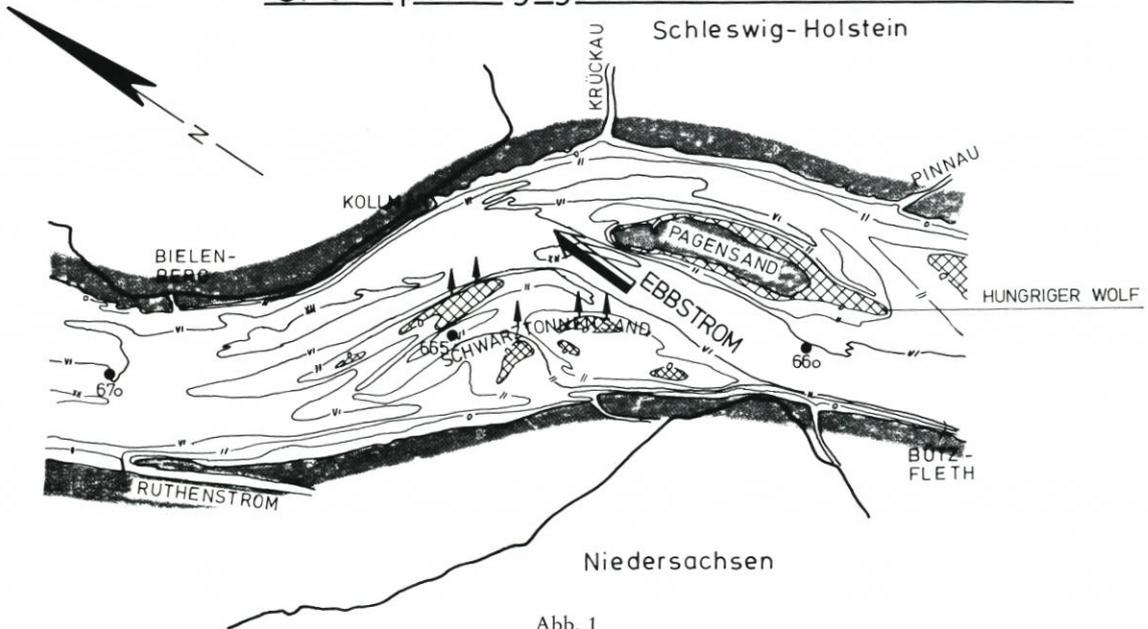


Abb. 1

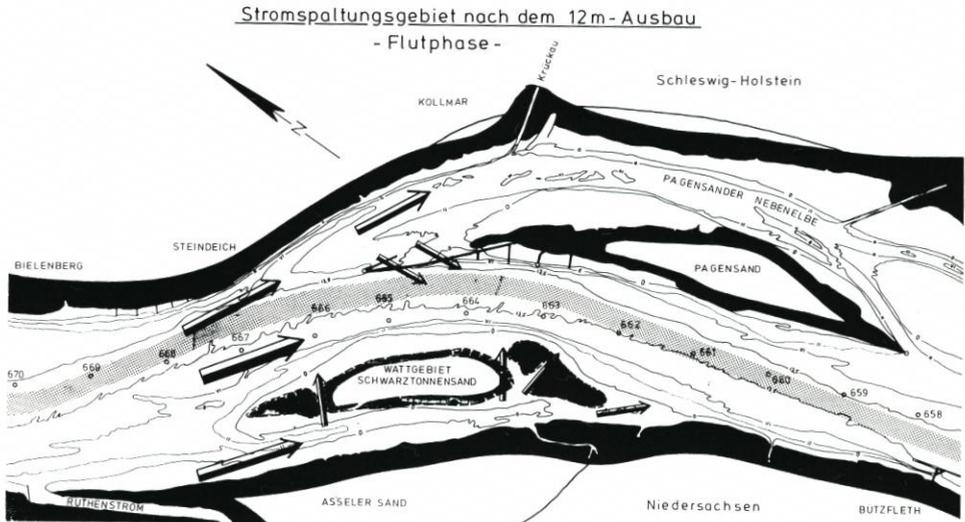


Abb. 2

Die dadurch auftretenden Schwierigkeiten für die Unterhaltung und die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs führten nach eingehenden Messungen in der Natur zu der sich heute darstellenden Elbinsel Pagensand. Durch die Formgebung von Insel und Leitwerk, die in den Jahren 1928 bis 1937 entstanden sind, wurden folgende Verbesserungen erreicht:

- Bessere Fassung der Tideströme im Krümmungsbereich Elbe-km 663 bis 665,
- Unterbindung des Ebbstromverlaufs in eine nach Kollmar (Norden) gerichteten Rinne,
- Abflachung der übermäßig scharfen Krümmung und Schaffung eines stabileren Querschnittsverhältnisses,
- Stabilisierung des bis dahin stetig nach Nordost nachdrängenden Schwarztonnensandes und
- Verminderung des Sedimenttransportes durch Festlegung des Wattes „Hungrier Wolf“.

Dieses nach neun Jahren Bauzeit 1937 fertiggestellte Regelungsbauwerk erfüllt noch heute die ihm damals zugedachte Aufgabe. Lediglich das Leitdammsystem mit seinen Buhnen muß einerseits saniert und andererseits den geänderten Rahmenbedingungen nach dem Ausbau der tiefen Fahrrinne auf 13,5 m unter KN angepaßt werden. Schon nach Fertigstellung stellte sich damals die Frage, ob die erreichte Fahrwasserverbesserung ohne weitere Regelung am südlichen Elbufer auf die Dauer von Bestand sein würde. Diese Frage kann aus heutiger Sicht dahingehend beantwortet werden, daß es dieser Regelung dringend bedurfte, um eine Stabilisierung der Fahrwasserhältnisse zu erreichen.

### 2.2.2 Nach dem 12-m-Ausbau

Im Rahmen des 12-m-Ausbaues der Unterelbe 1964 bis 1969 wurden verstärkt in diesem durch seine Dreiteilung des Querschnittes noch immer schwierigen und unterhaltungsintensiven Strombereich eingehende hydrologische Messungen vorgenommen (Abb. 2). Dabei zeigte sich eindeutig, daß der Leitdamm zwar noch seine stromführende Wirkung besitzt, aber das zergliederte Wattgebiet Schwarztonnensand schwerpunktmäßig infolge der sedimentverfrachtenden Querströmungen die tiefe Fahrrinne bei Pagensand Mitte ständig mit schluffhaltigen Feinsanden auflandete.

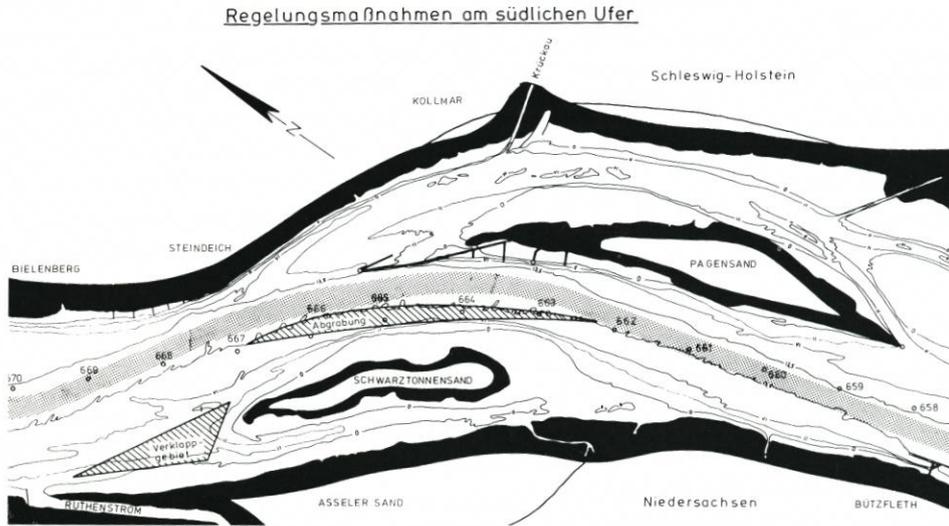


Abb. 3

Aus diesem Grunde wurde, erhärtet durch die anschließend durchgeführten Modellversuche im Modell mit fester Sohle bei der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) – Außenstelle Küste –, das zergliederte Wattgebiet zur Insel Schwarztonnensand „mit einer mittleren Aufspülhöhe von MThw + 1,50 m vereinigt“ (Abb. 3). Diese Insel wurde in den Jahren 1972 bis 1977 ausschließlich mit kohäsionslosem Material, Sand unterschiedlicher Körnung, durch Hopperbagger aufgespült.

Dabei wurde ausschließlich mit natürlichen Böschungen gearbeitet. Die Böschungsneigungen stellten sich, abhängig vom in der Unterhaltung anfallenden Sand, über MThw mit 1:20 bis 1:25 unter dem Wasserspiegel je nach Anströmung mit 1:10 bis 1:6 ein. Vor Aufspülung der Insel wurde ebenfalls im Rahmen der Unterhaltungsbaggerei in den Jahren 1970 bis 1971 der südliche Querschnittsbereich zwischen den 2-m- und 4-m-Tiefenlinien durch Verklappungen um durchschnittlich 1,50 m aufgehöhht. Diese Verklappungen erfolgten tideabhängig mit flachgehenden Geräten in einem Dreieck, das von der Ruthenstrommündung zur Wattspitze im Norden und durch die 2-m-Tiefenlinie vor dem Ufer Asseler Sand im Süden begrenzt wurde.

Damit konnte die vorher ufernah verlaufende Flutstromkomponente nach Osten in die Hauptelbe abgedrängt werden. Dies war vor der Aufspülmaßnahme notwendig, um die Beaufschlagung der Flutrinne infolge der starken Flutstromkomponente, die aus Trägheit und Rechtsablenkung zu erklären ist, abzuschwächen. Parallel zu den zwei genannten Maßnahmen zur Regelung am südlichen Ufer mußte als Ausgleich für die Querschnittseinengung durch die Inselaufspülung am Nordrand des Schwarztonnensandes eine Abgrabung erfolgen (Abb. 3). Diese Abgrabung in Höhe von 6 Mio m<sup>3</sup> zwischen den Elbe-km 663 bis 667 erfolgte in den Jahren 1970 bis 1978 ausschließlich durch Entnahme Dritter für Aufspülzwecke.

Mit dieser langgestreckten Führung des Flutstromes am südlichen Ufer wurde die sich hinter dem Watt „Schwarztonnensand“ vormals aufstauende Flutstromkomponente derart abgeschwächt, daß eine gleichmäßige Durchströmung des Hauptelbequerschnittes im Bereich des Leitdammes Pagensand eintrat und die sedimentverfrachtende Querströmung über das Watt aufgrund des Querspiegelgefälles zur Hauptelbe unterbunden wurde.

Als Folge war zu verzeichnen, daß die Unterhaltungsbaggermengen in dem sich aufwei-

tenden Querschnitt zwischen Elbe-km 659 und 662 um 600 000 m<sup>3</sup> jährlich vermindert werden konnten.

Die im Profil Elbe-km 664,7 vor und nach der Aufspülmaßnahme durchgeführten Strömungsmessungen, deren Ergebnisse in nachfolgender Tabelle aufgeführt sind, untermauern die vorgenannten Feststellungen beim Vergleich der Durchflußwerte und Strömungsgeschwindigkeiten während der Flutphase.

Tab.1. Ergebnisse vor und nach der Aufspülung des Schwarztonnensandes im Meßprofil Elbe-km 664,7

	Hauptelbe		Pagensander Nebanelbe	
	Flut 1972/1976	Ebbe 1972/1976	Flut 1972/1976	Ebbe 1972/1976
Qm (m <sup>3</sup> /s)	9600/9839	9820/9776	3480/2270	2270/1485
Vm (m/s)	0,75/0,77	0,89/0,83	0,62/0,44	0,63/0,33
Vmax (m/s)	1,07/1,10	1,20/1,13	0,91/0,66	0,93/0,54

### 2.2.3 Nach dem 13,5-m-Ausbau = Istzustand

Das 1937 fertiggestellte Leitdammsystem wurde auf Sinkstücken gegründet und als Schüttsteinkörper gebaut. Infolge seiner exponierten Lage im Tidestrom ist es einer sehr hohen Belastung aus Quer- und Längsströmung, aus Schiffsschwell und Windwellen sowie aus Eisabtrag unterworfen. Diese Belastung führte zu erheblichen Schäden an dem ursprünglich auf MTnw +0,80 m und mit Böschungen von 1:2 gebauten Leitdamm. Damit wird er seiner stromführenden Aufgabe nicht mehr voll gerecht, so daß sich im einzelnen folgende Situation darstellt:

#### Flutphase (Abb. 4)

Der im Scheitelpunkt der flachen Krümmung Steindeich sich ausdehnende kräftige Flutstrom beaufschlagt die Pagensander Nebanelbe aufgrund des überbreiten Eintrittsquerschnittes mehr, als nach stromauf an Wassermenge abgeführt werden kann. Daraus resultiert ein Stau, der besonders im ersten Drittel der Flutphase 10 cm überschreitet und zu starken Querströmungen über das vorhandene Leitwerk während der gesamten Tide in die Hauptelbe führt. Dabei werden Querströmungen von 0,56 m/s über der Dammatrasse gemessen. In kritischen Bereichen, in denen der Damm stärker zerstört ist, treten Strömungsgeschwindigkeiten von max. 1,5 m/s auf. Dieses Erscheinungsbild hat sich nach der Eindeichungsmaßnahme Wedel-Haseldorf durch Abdämmung der Haseldorfer Binnenelbe noch verstärkt. Ferner führten auch die im Abschnitt 2.2.2 genannten Regelungsmaßnahmen dazu, daß die Hauptelbe vermehrt von der Strömung angenommen wird und damit die Pagensander Nebanelbe eine Verflachungstendenz aufweist.

Vergleicht man in diesem Zusammenhang die Ergebnisse der Strömungsmessungen 1972 und 1976, so ist festzustellen, daß sich Durchflußmenge und Strömungsgeschwindigkeit bei Flut verringert haben. Im einzelnen haben sich im Einflußbereich des Leitdamms folgende Tendenzen eingestellt:

Stromspaltungsgebiet nach dem 13,5m-Ausbau

- Flutphase -

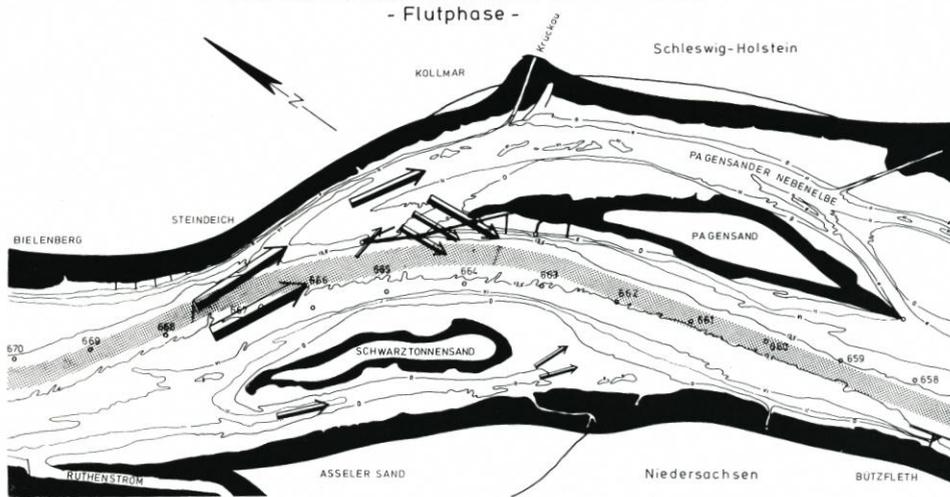


Abb. 4

- Abtrag der hochwasserfrei aufgespülten Inselfspitze jährlich um 25 bis 30 m,
- Rinnenbildung vor Kopf der Insel, die die Einbindung des Leitdammes in die Insel äußerst gefährdet,
- Vergrößerung des Eintrittsquerschnittes zur Nebemelbe durch den teilweise zerstörten Leitdamm im Bereich der Inselfspitze,
- Erhöhung des Wasserspiegelgefälles und damit der Querströmung,
- verstärkte binnenseitige Umströmung der unbefestigten Inselfspitze und
- Sedimenteintrieb in die tiefe Fahrrinne querab der Insel infolge sedimentverfrachtender Querströmung und Abtrag der Inselfspitze.

Ebbephase (Abb. 5)

Auch der infolge der Trägheit und Rechtsablenkung nach Norden tendierende Ebbstrom verliert teilweise seine Führung und strömt in die Pagensander Nebemelbe.

Verstärkt wird diese Tendenz wieder durch die nicht harmonisierten Ein- und Austrittsquerschnitte der Nebemelbe und durch ihre Verlandung oberstromig, so daß sich in den letzten Jahren im Bereich der Nordspitze ein vergrößertes Querspiegelgefälle hin zur Pagensander Nebemelbe eingestellt hat.

Die Auswertung der 1972 und 1976 durchgeführten Strömungsmessungen (Tabelle) ergeben eine Verringerung der Durchflußmenge in der Hauptelbe und führen damit auch zu einer Verringerung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit. Während 1972 bei etwa vergleichbaren Tiden ein  $V_{me}$  von 0,89 m/s gemessen wurde, betrug der Wert 1976 für  $V_{me}$  „nur“ noch 0,83 m/s. Diese Ergebnisse sind ein Indiz dafür, daß der Leitdamm stärker überströmt und die Rinne vor Kopf der Insel stärker durchströmt wird als in den vorangegangenen Jahren.

Die Strömungsgeschwindigkeiten über den Leitdamm betragen 0,58 m/s und erreichen Maximalwerte von 1,5 m/s in zerstörten Leitdambereichen.

Stromspaltungsgebiet nach dem 13,5m-Ausbau  
- Ebbsphase -

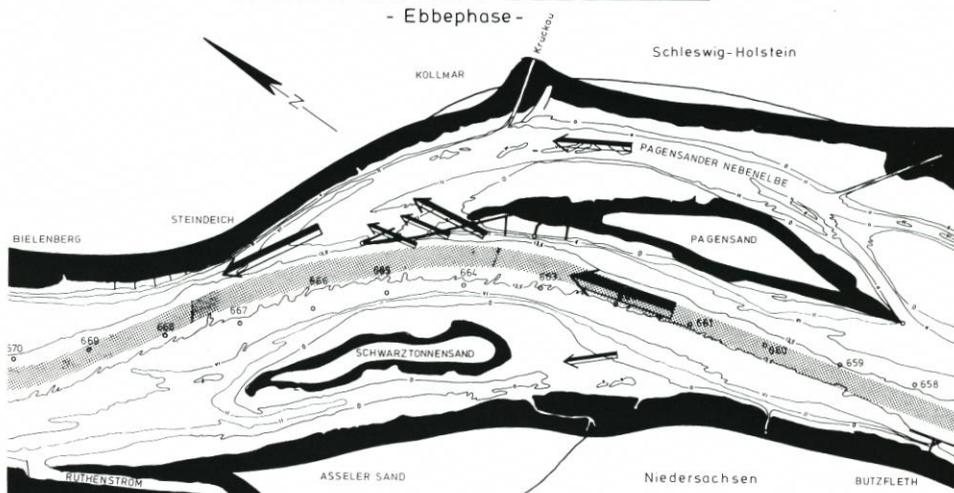


Abb. 5

Stromspaltungsgebiet nach Abschluß der  
Regelungsmaßnahmen

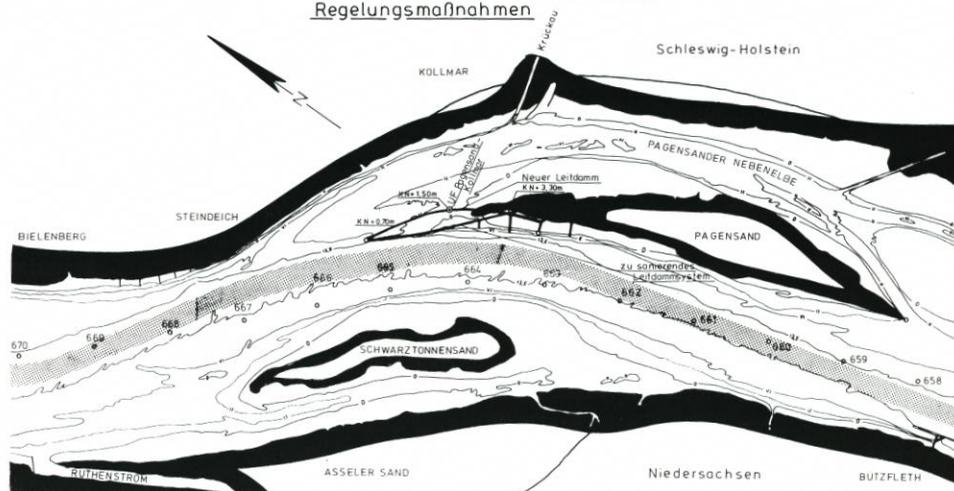


Abb. 6

Für die Pagensander Nebelndeibe ergibt die Auswertung der Strömungsmessungen sowohl bei Flut- als auch bei Ebbstrom eine Verminderung von Durchfluß und Geschwindigkeit.

Daraus ergeben sich folgende Tendenzen:

- Bei ablaufender Tide starke Anströmung des schleswig-holsteinischen Ufers,
- ungenügende Stromführung bewirkt eine noch ungleichere Durchströmung des Querschnittes, als dies im Krümmungsbereich querab Steindeich ohnehin zu erwarten ist,
- abgeschwächte Räumkraft in der tiefen Fahrrinne,
- Verflachungen im Innenriß der Krümmung,
- langfristig zu erwartende Verkleinerung des Krümmungsradius und
- erhöhter Angriff des Vorlandes am Nordufer.

### 3. Untersuchungen am hydraulischen Modell

#### 3.1 Grundlagen für die Modellversuche

Es war erforderlich, den Istzustand durch gewässerkundliche Untersuchungen zu dokumentieren und deren Ergebnisse der mit der Untersuchung im hydraulischen Modell mit fester Sohle beauftragten BAW-Außenstelle Küste in Rissen – zur Verfügung zu stellen. In einzelnen mußten folgende Daten aus Naturmessungen bereitgestellt werden, um den komplexen Bewegungsablauf im Stromspaltungsgebiet Pagensand erfassen zu können:

- Tiefenpläne, die die Querschnittsentwicklung der letzten 10 Jahre erkennen lassen,
- Bodenkartierungen des Sohlenmaterials aus diesem Strombereich,
- Strömungsmessungen mit Richtungsanzeige und den daraus resultierenden Durchflußmengen in der Haupt- und Nebelbe,
- Strömungsmessungen in der Achse des Leitdammes,
- Wasserspiegelmessungen durch Pegelaufzeichnungen.

Auf der Grundlage dieser Daten erfolgte die Überprüfung der Naturähnlichkeit des Modells.

#### 3.2 Aufgabenstellung an die Modellversuche

Aufgrund der Erfahrungen aus dem sich unterhalb anschließenden Stromspaltungsgebiet „Rhinplatte“ und den Naturmessungen wurde für die Modelluntersuchungen ein Leitdammkonzept erarbeitet, das insbesondere die Linienführung und Höhenentwicklung der Krone beinhaltete. Für festgelegte Grundvarianten wurde folgende Zielsetzung *vorgegeben*, die sowohl bei Normaltiden als auch um 2,0 m erhöhten Tiden untersucht werden sollten:

- Ausgewogenere Aufteilung der Durchflußmengen für die Haupt- und Nebelbe,
- Wiederherstellung und Verbesserung der Stromführung am Prallhang der Hauptelbe,
- Unterbindung der Rinnenbildung und der sedimentverfrachtenden Querströmung,
- Einfädung der unvermeidbaren breitflächigen Querströmung über den Leitdamm in eine langsame, uferparallele Strömungskomponente bei auflaufenden Tiden,
- Abbau von Erosionen am Inselkopf und an der Leitdammspitze,
- Abdrängen des ablaufenden Tidestromes nach Süden, um die Fahrrinnenverhältnisse zu verbessern und den Angriff am schleswig-holsteinischen Ufer zu mindern,
- Schutz der aufgespülten Insel gegen Abtrag durch Schwell und Sunk der dicht vorbeifahrenden Großschiffahrt und Windwellenangriff aus nordwestlichen Richtungen,
- Schaffung von ökologisch wertvollen Flachwasserzonen, die zwischen dem Leitdammsystem zur natürlichen Aufschlickung führen,
- wirtschaftlichste Lösung für die Gesamtmaßnahme und
- Darstellung möglicher Auswirkungen auf die hydraulischen Verhältnisse ober- und unterhalb des Stromspaltungsgebietes.

#### 3.3 Modell und Meßtechnik

Die Versuche wurden im Elbmodell mit fester Sohle der Bundesanstalt für Wasserbau – Außenstelle Küste in Hamburg-Rissen – (BAK-AK) durchgeführt. Es handelt sich um ein Vollmodell mit einer festen Sohle aus Beton. Es erstreckt sich von der Staustufe Geesthacht bis seewärts von Scharhörn. Der Maßstab der Längen beträgt 1:500, die Höhe 1:100 (5fach

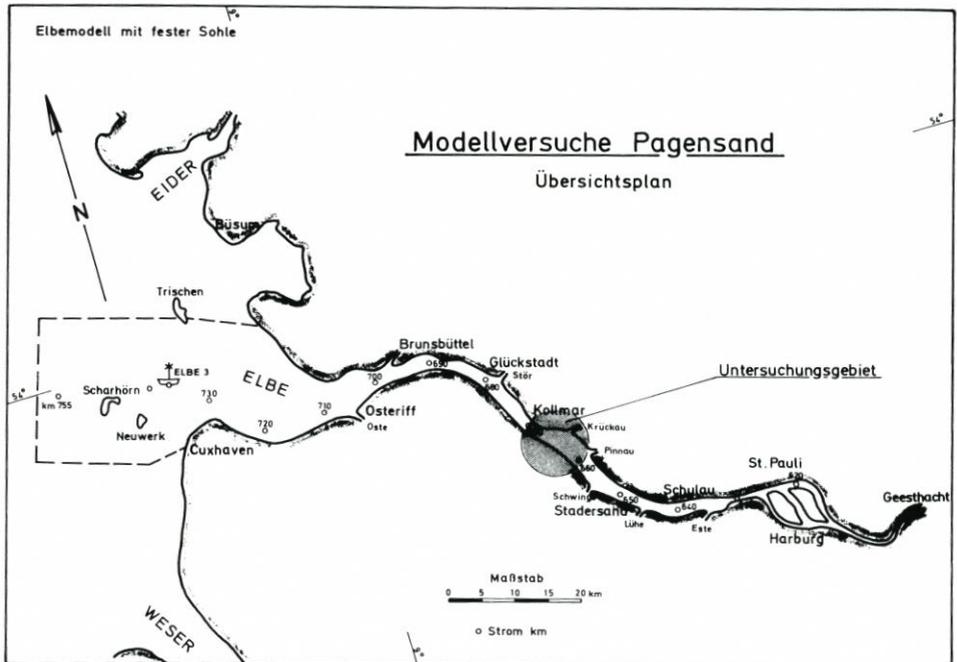


Abb. 7

überhöht) (Rohde, 1971). Die Grenzen des Modells sowie die Lage des Untersuchungsschnittes werden im Übersichtsplan der Elbe gezeigt (Abb. 7).

Im allgemeinen ist es für die Untersuchungsaufgaben in Tidemodellen mit fester Sohle ausreichend, Tidefolgen von gleichen Tiden und konstanten Oberwasserzuflüssen ablaufen zu lassen. Grundsätzliche Einflüsse von Baumaßnahmen auf das Untersuchungsgebiet sind so durch Vergleich der erhaltenen Meßwerte übersichtlich zu erfassen. Wiederholungen von Versuchen sind rasch und problemlos möglich (Kobus, 1984). Die als Basis für eine Steuertide ausgewählte Naturtide muß deshalb gewissen Anforderungen genügen:

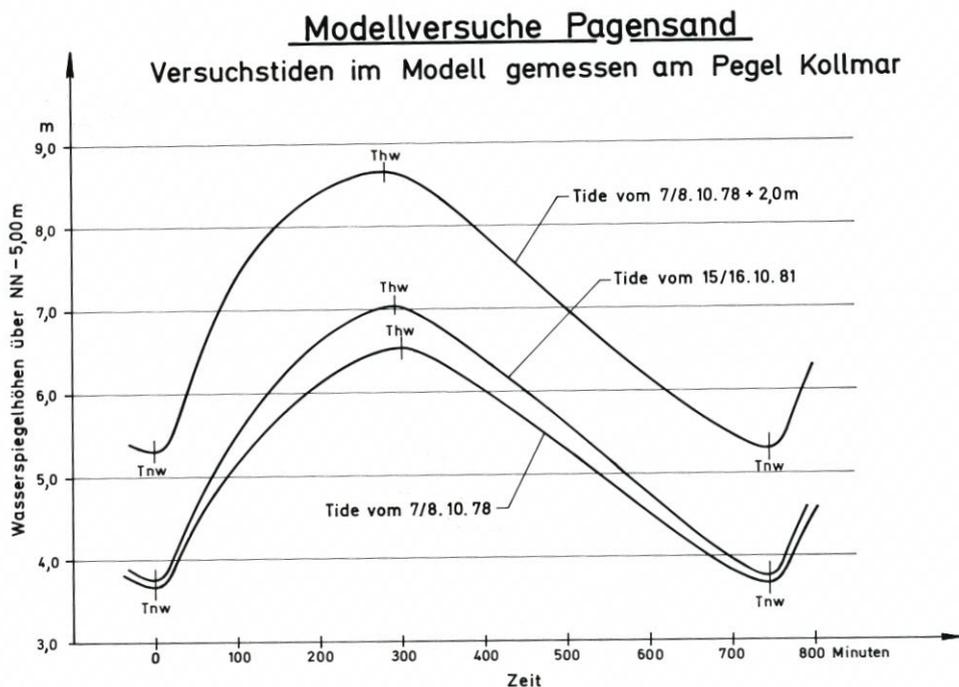
- In etwa zeitliche Übereinstimmung der Tide mit der ausgewählten Morphologie im Modell,
- möglichst geringe Abweichungen der Scheitelwerte, der Wasserstände und auch der Werte für die Flut- und Ebbedauer bei den entsprechenden Vor- und Nachtiden,
- geringer Windeinfluß.

Entsprechend der genannten Kriterien wurde für die anstehenden Versuche die Naturtide vom 15./16. 10. 1981 ausgewählt. Es handelt sich hier um eine Springtide mit einem gegenüber dem Jahresmittel um ca. 0,5 m größeren Tidehub. Die Wirkung des geplanten neuen Leitwerks kann so auch bei den verhältnismäßig häufig auftretenden erhöhten Wasserständen, die auch mit höheren Stromgeschwindigkeiten verbunden sind, verdeutlicht werden.

Einige Versuchsvarianten wurden zusätzlich noch mit einer mittleren Tide (Naturtide vom 7./8. 10. 1978) untersucht. Damit sollte sichergestellt werden, daß eventuell bei mittleren Verhältnissen eintretende Veränderungen der hydraulischen Gegebenheiten nicht durch die höhere Springtide abgeschwächt und so nicht erkannt werden. Die Naturtide von 1978 entspricht der mittleren Tide des Jahres 1979.

Um die Wirkung der Baumaßnahmen bei sturmflutähnlichen Verhältnissen zu prüfen, wurde diese Tide für einige ausgewählte Versuche noch um +2 m im Niveau angehoben (Abb. 8).

Elbmodell mit fester Sohle



Die Versuchstiden (Naturtiden vom 15./16. 10. 1981 und vom 7./8. 10. 1978) konnten im Modell nach entsprechender Rauigkeitsanordnung zufriedenstellend nachgefahren werden. Abb. 9 zeigt beispielhaft die verlegten Rauigkeitselemente im Modellabschnitt bei Brunsbüttel. Die Aufzeichnung der Scheitelwerte von Brunsbüttel bis Hamburg zeigte eine gute Übereinstimmung mit der Natur. Ebenso verhält es sich bei Flut- und Ebbedauer sowie bei den Tidelaufzeiten (Abb. 10, Abb. 11).

Die Wasserstände wurden von automatischen Pegeln, sogenannten vibrierenden Spitzentastern, aufgenommen, analog aufgezeichnet und einer zentralen Datenerfassungsanlage zugeleitet. Die Meßgenauigkeit liegt unter Laborbedingungen bei  $\pm 1/10$  mm oder entsprechend umgerechnet bei  $\pm 1$  cm in der Natur. Die Pegelstandorte im Modell entsprechen denen in der Natur. Zusätzlich wurden für spezielle Messungen noch Sonderpegel eingesetzt (DIETZ/BERNDT 1982).

Strömungsrichtungen und -geschwindigkeiten werden über einen kombinierten Richtungs- und Geschwindigkeitsmesser (Mikroflügel) aufgenommen und an die Meßzentrale weitergeleitet. Die Genauigkeit der Geschwindigkeitsaufnahme liegt bei ca.  $\pm 4$  cm/s (Natur). Der Zeittakt der Meßregistrierung liegt bei 2,5 min (Natur).

Zusätzlich zur Punktmessung mit Meßgeräten wurde das Strömungsbild vom nördlichen Mündungsbereich der Pagensander Nebenelbe bis zum Schwarztonnensand großflächig mit Fotoaufnahmen von Stromschwimmern festgehalten. Gezielte Einfärbungen des Wassers ergaben Aufschluß über die Strömungsrichtung in Sohlennähe. Videoaufzeichnungen einiger Versuchsvarianten unterstützen die Auswertung der Meßergebnisse und boten gleichzeitig die Möglichkeit der Reproduzierbarkeit wichtiger Phasen im Versuchsablauf.

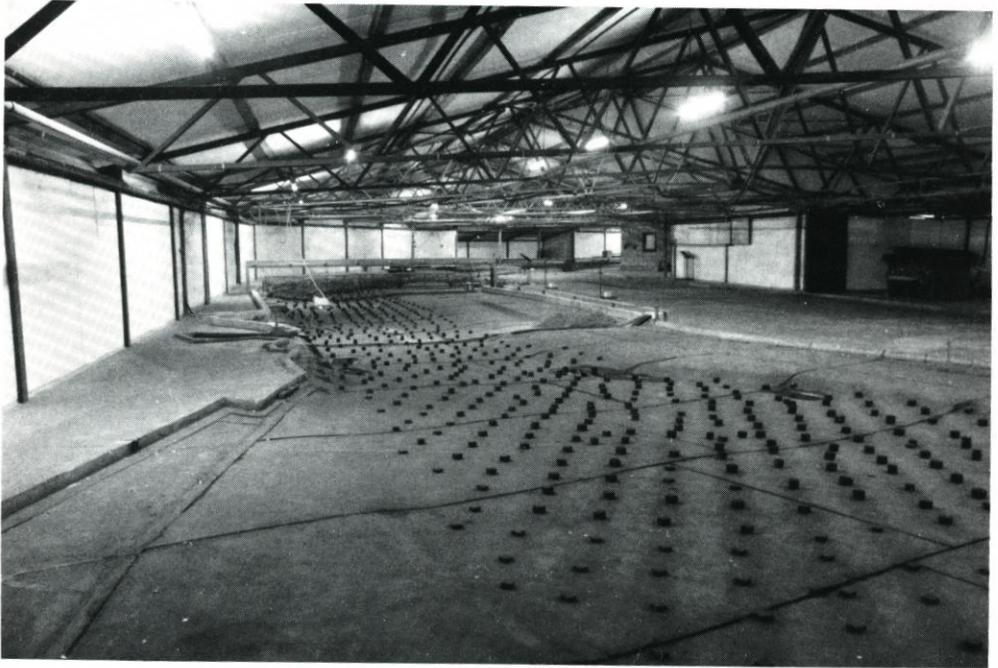


Abb. 9: Blick vom Neufelder Watt in Richtung Oberstrom

Elbmodell mit fester Sohle

### Modellversuche Pagensand

Vergleich der Tidekurve Kollmar vom 15/16. 10. 1981

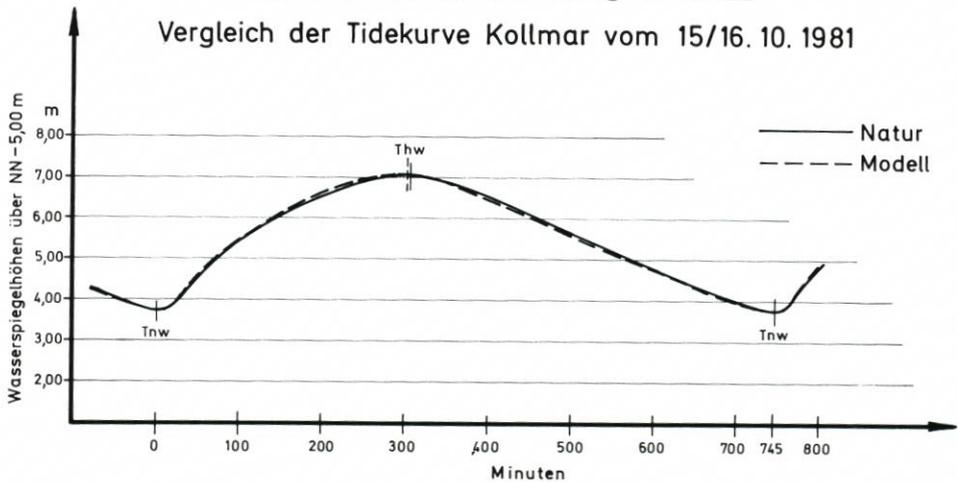


Abb. 10

Im folgenden Text sind alle Angaben über Längen, Höhen, Geschwindigkeiten, Wasserstände usw. bereits umgerechnet auf Naturwerte. Unter den mittleren Fließgeschwindigkeiten ist das zeitliche Mittel der Geschwindigkeiten über die Flut- bzw. Ebbstromdauer zu verstehen.

ELBEMODELL MIT FESTER SOHLE

MODELLVERSUCHE PAGENSAND

SCHEITELWERTE DER VERSUCHSTIDE

TIDE VOM 15. / 16. 10. 1981

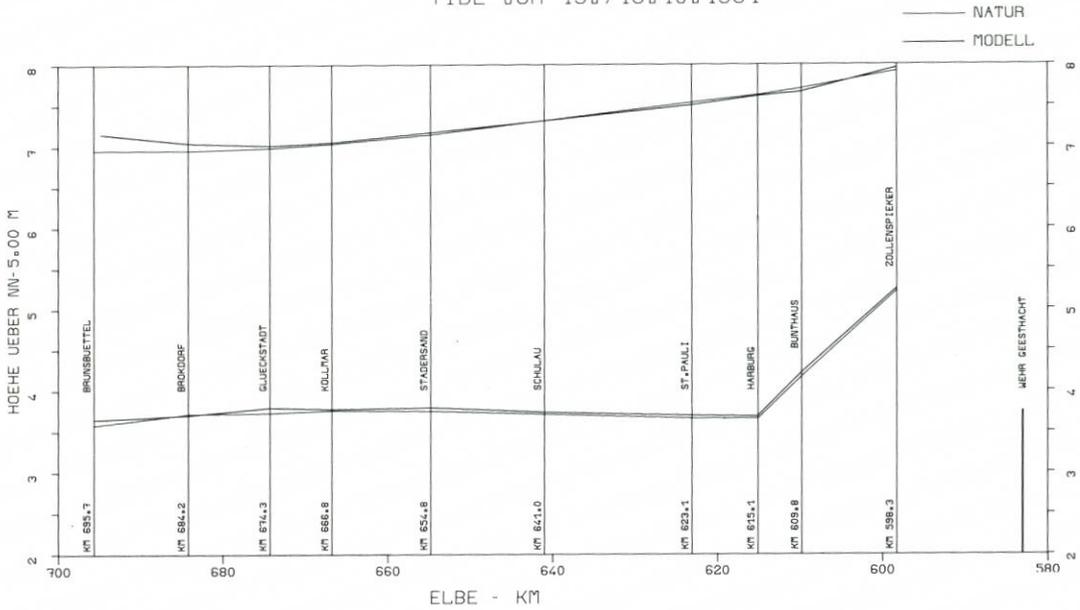


Abb. 11

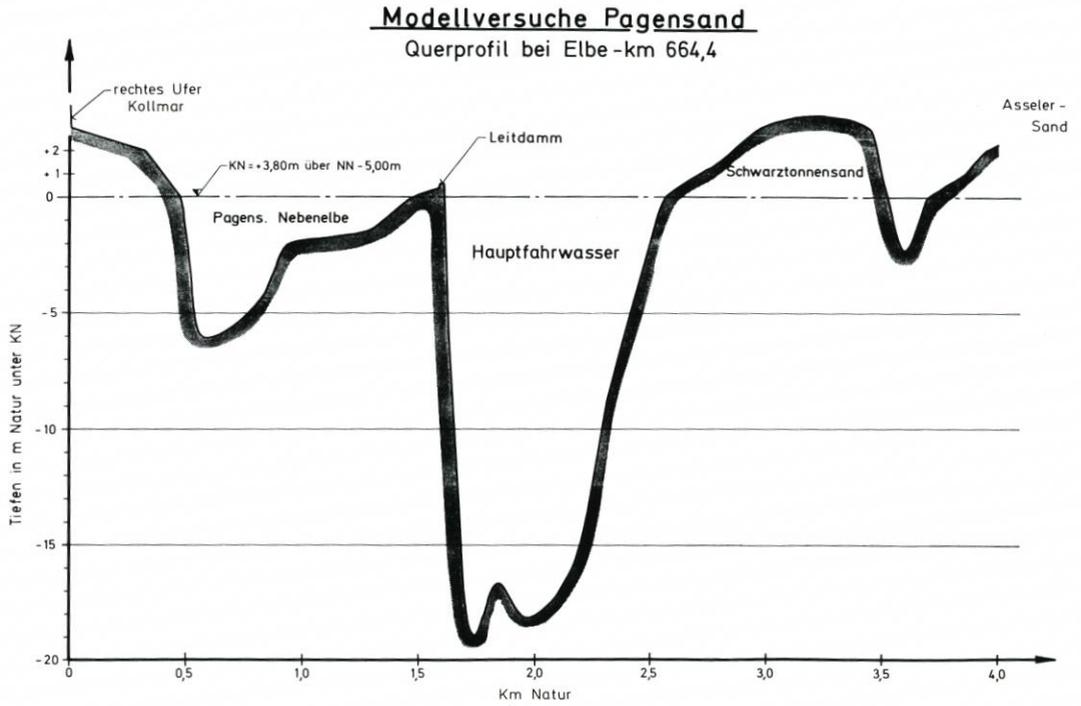
## 3.4 Versuche mit fester Sohle

## 3.4.1 Ausgangszustand

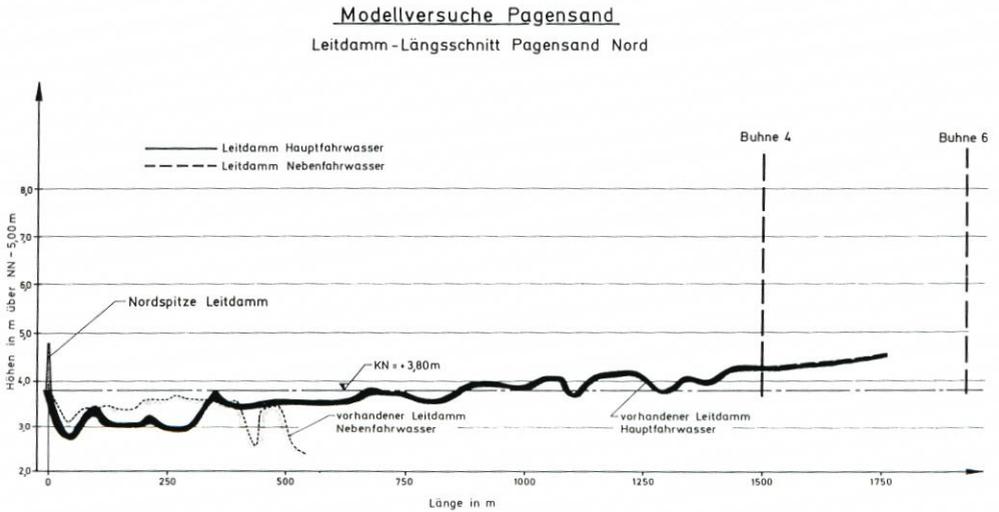
Auf der Grundlage der vom Auftraggeber formulierten Fragestellung wurde von der BAW-AK ein Konzept mit mehreren Leitwerk-Varianten vorgelegt. Daraus wurden in Zusammenarbeit mit dem Wasser- und Schiffsamt Hamburg zunächst einige ausgewählt, die untersucht werden sollten. Praktische Erfahrungen mit schon fertiggestellten ähnlichen Bauwerken (Rhinplatte) gaben entscheidende Hinweise zur ersten Variantenauswahl. Die Baumaßnahmen, die die größten meßbaren Veränderungen versprachen, wurden zuerst untersucht. Aus den laufenden Ergebnissen heraus entstanden dann weitere verfeinerte Versuchsvarianten. Unter Berücksichtigung der Tatsache, daß einige Varianten noch mit unterschiedlichen Tiden untersucht wurden, ergab sich eine Gesamtversuchsreihe von 18 verschiedenen Variationen zur Optimierung der Leitdammlage und -gestaltung. Im folgenden wird auf zwei grundsätzlich verschiedene Leitdammgestaltungen näher eingegangen.

Die Morphologie im Untersuchungsgebiet ist nach Peilungen des Jahres 1982 erstellt (Abb. 12). Der Nahbereich des Leitwerks und die Inselspitze Pagensand sind, wie schon unter 3.3 erwähnt, durch Sonderpeilungen und Aufzeichnungen vor Ort sowie durch Luftaufnahmen bei Tnw genauestmöglich aktualisiert (1984/85). Die maßgeblichen Beschädigungen am Leitwerk sind im Modell entsprechend berücksichtigt. Die Sandbank an der nördlichen Seite

Elbemodell mit fester Sohle



Elbemodell mit fester Sohle



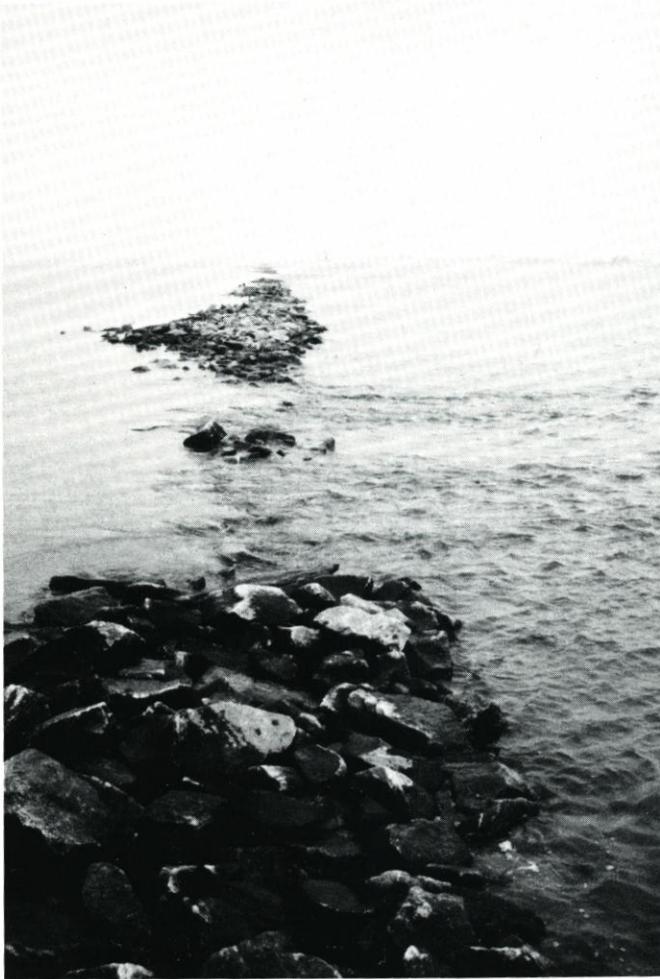


Abb. 14: Leitdamm Pagensand, Blick zur Spitze in Richtung Nordwest

des Leitdammes in der Pagensander Nebelbe ist ebenfalls originalgetreu nachgebildet. Der Damm wird teilweise überdeckt. Ein Längsschnitt des Haupt- und Flügeldammes verdeutlicht die erheblichen Schäden (Abb. 13).

Der Hauptdamm an der Fahrwasserseite ist durchgehend dick eingezeichnet und dunkelgrau unterlegt, der seitliche Flügeldamm in der Pagensander Nebelbe ist gestrichelt und hellgrau unterlegt. Deutlich sind die durch Strömung und Eisgang entstandenen Löcher im Leitwerk im Bereich 0–350 m und bei ca. 1300 m zu erkennen.

Abb. 14 zeigt den geschädigten Leitdamm in der Natur etwa in Höhe der Buhnentonne 4 bei Tnw.

Zur Feststellung und zum Vergleich der im Ausgangszustand vorhandenen hydraulischen Gegebenheiten im Modell wurden, wie erwähnt, Strömungsaufnahmen von der Sohl- und Oberflächenströmung hergestellt. Die Aufnahmen zeigen, daß der nördliche Kopf der Insel Pagensand frontal von der Flutströmung angegriffen wird. Dies verursacht eine Erosion der

Inselspitze, verbunden mit einem Materialtransport quer zur Spitze, überwiegend in Richtung zum Fahrwasser. Die Kopie einer Luftaufnahme zeigt die aus diesen Strömungen resultierende Form des Inselkopfes (Abb. 15). Die Schwimmaufnahmen von der Wasseroberfläche lassen diesen Effekt im Modell nur schwach erkennen (Abb. 16). Farbaufnahmen von der durch Einfärbung sichtbar gemachten sohnnahen Strömung bestätigen jedoch auch im Modell die in der Natur auftretenden Querströmungen. Ähnlich verhält es sich mit der Querrinne, die schräg zwischen Buhnentonne 2 und 4 vom Fahrwasser zur Nebelbe verläuft. Während die Richtung der Oberflächenschwimmer bei bestimmten Tidephasen über die Rinne hinweg in die Nebelbe weisen, zeigen die Farbfotos, daß die Rinne von der Sohlströmung bei Flut in Richtung Fahrwasser beaufschlagt wird (Abb. 17). Danach resultiert ein Materialtransport vom Inselkopf in das Fahrwasser.

In der Ebbephase dringt der Strom gleich hinter der Inselspitze quer über den Leitdamm in die Nebelbe hinein. Die Farbaufnahmen verdeutlichen, daß sich die Strömung dabei, vermutlich durch die vorhandene Sandbank, in der Querrinne konzentriert und so die Rinnenbildung weiter unterstützt.

### 3.4.2 Leitdammvariante - Erhöhung des alten Leitdammes

Ein Teil des Versuchsprogramms Pagensand befaßte sich mit der Untersuchung eines neuen Leitdammes auf der schon bestehenden Leitdammtrasse, die aus dem Hauptdamm am Fahrwasserrand und einem kleineren Flügeldamm in der Pagensander Nebelbe besteht. Die Variante sieht eine unterschiedlich angeordnete Erhöhung des Leitwerks vor. Der kurze Flügeldamm in der Nebelbe wird konstant auf KN +0,70 m aufgeschüttet. Der Leitdamm am Hauptfahrwasser bekommt von der Spitze an in Richtung Pagensand auf einer Länge von 500 m eine Höhe von KN +0,70 m und steigt dann an bis zur Wurzel der Buhne 6 auf KN +3,65 m. Etwa hier bindet er in den hochwasserfreien Teil der Insel Pagensand ein (Abb. 18).

Die Versuche im Modell, insbesondere die Aufnahmen der Oberflächenströmungen, zeigten, daß eine alleinige Erhöhung der vorhandenen Dammkrone keine befriedigende Lösung darstellt. Die Anströmung der Inselspitze bei Flutstrom wird besonders bei höheren Wasserständen kaum gemindert. Die Erhöhung der Krone auf KN +0,70 m im ersten Trassenabschnitt ab der Leitdammspitze bewirkt eine Verstärkung der Strömung am Prallufer um ca. 10-15 %. Eine bessere Abschirmung der Inselspitze und damit eine Verminderung der Geschwindigkeiten ließe sich jedoch nur durch eine weitere Erhöhung der Krone erreichen. Das hätte wiederum einen erhöhten Strömungsdruck auf den Prallhang und das Bauwerk zur Folge. Das Ufer fällt gerade in diesem Bereich sehr steil zum Fahrwasser hin ab. Die Böschungsneigung sowie die Tatsache, daß sich der Hang seit langer Zeit trotz der starken Strömung (Wassertiefe hier bis zu 22,0 m) nicht nachprüfbar verändert hat, deuten auf ein sehr festes, offensichtlich kohäsives Bodenmaterial (gewachsenes Ufer) hin. Trotzdem ist nicht auszuschließen, daß über längere Sicht gesehen, z.B. durch ein Ausspülen eingelagerter Sandlinsen, ein Zurückweichen des Prallufers eintreten kann. Die Gründung eines neuen Leitdammes unmittelbar am Steilhang ist daher auch im Hinblick auf das höhere Gewicht des Bauwerks als problematisch anzusehen.

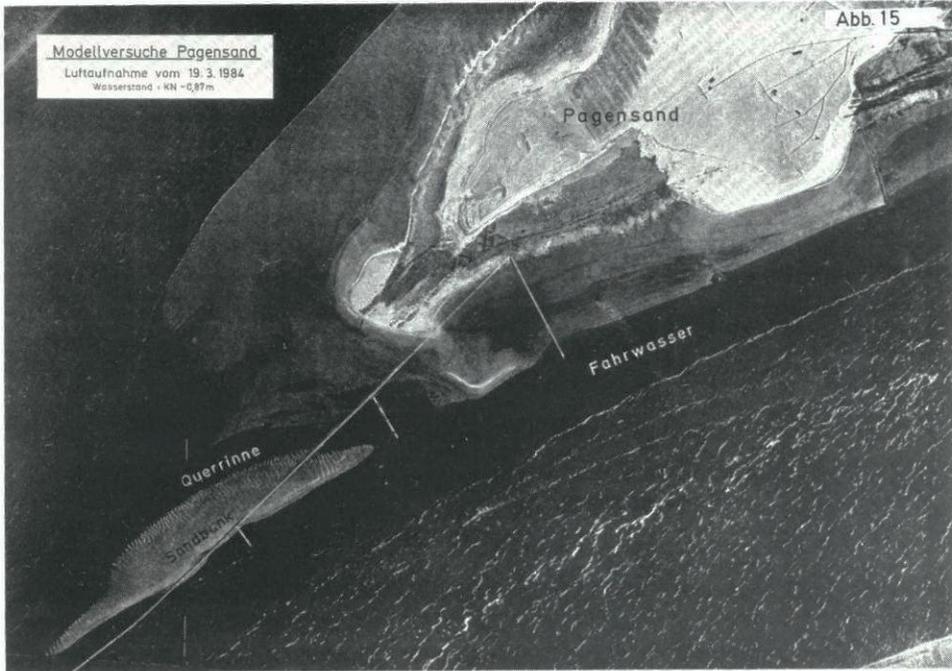


Abb. 15

Modellversuche Pagensand

Ausgangszustand 1984

Wasserstand 6,50 m über NN - 5,00 m

Aufnahmebereich zwischen Elbe - km 663,0 und 666,5

Oberflächenströmung

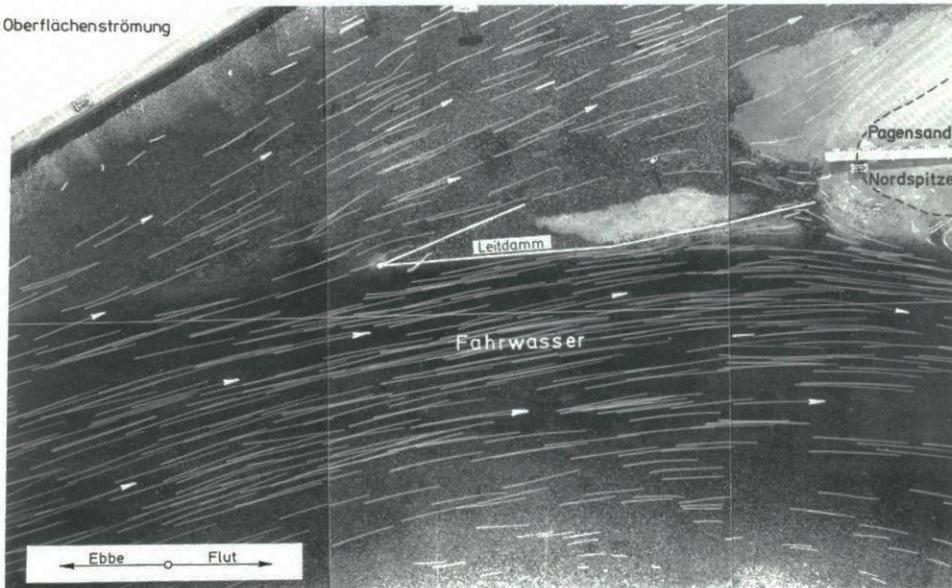
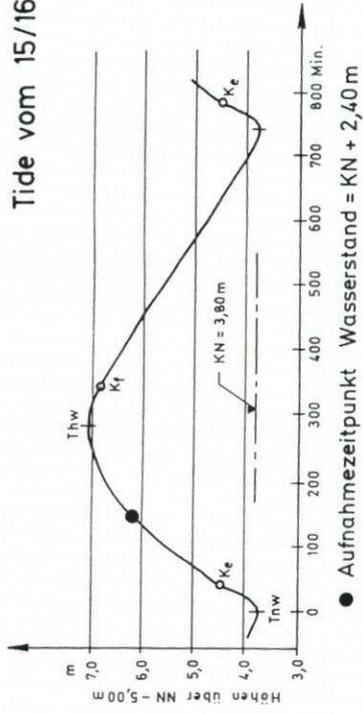


Abb. 16

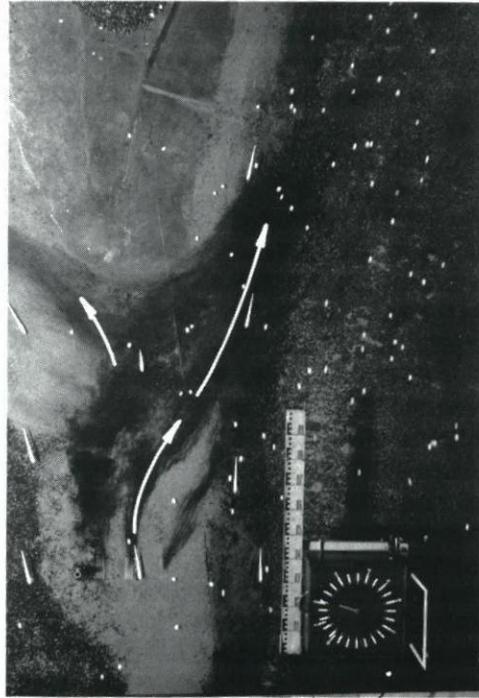
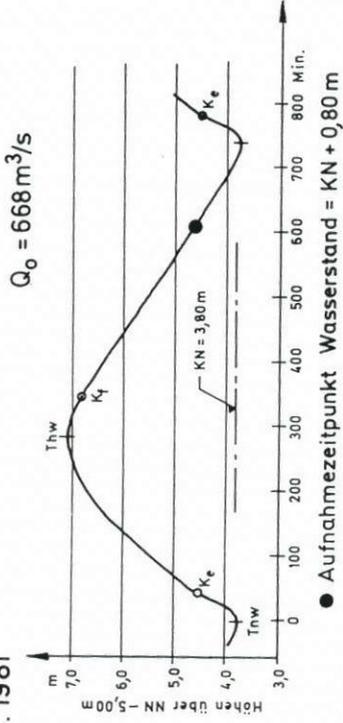
Elbmodell mit fester Sohle

# Modellversuche Pagensand

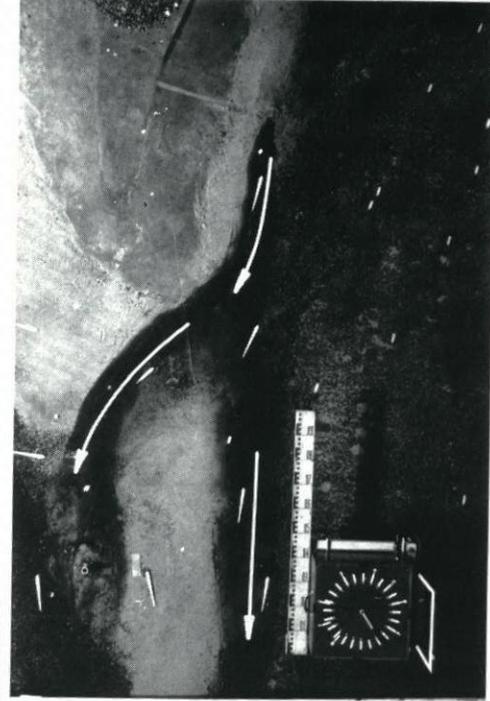
Tide vom 15/16. 10. 1981



Ausgangszustand



Flut



Ebbe

Sohlströmung

Abb. 17

Elbmodell mit fester Sohle

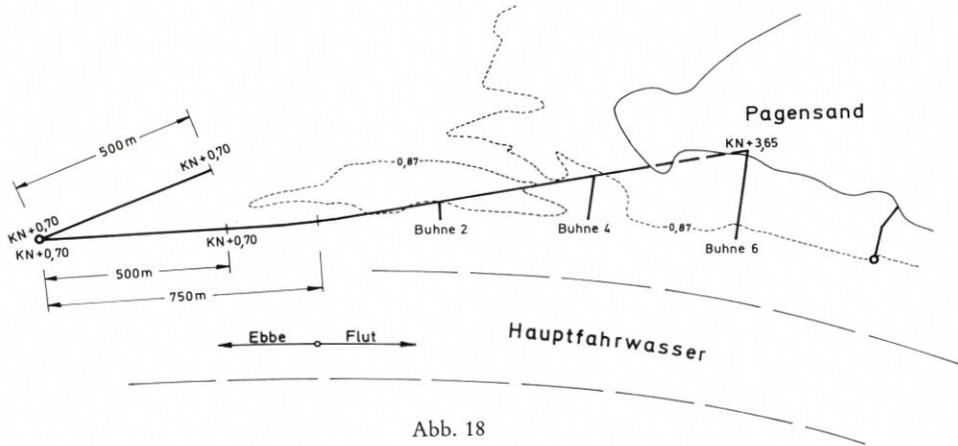
Modellversuche Pagensand

Abb. 18

## 3.4.3 Leitdammvariante – Zurückgesetzte neue Leitdammtrasse

Im Gegensatz zu der zuvor erwähnten Lösung sieht die folgende Variante eine teilweise Neutrassierung vor. Bei der Festlegung der Linienführung flossen die bisherigen Modellergebnisse und auch bestehende praktische Erfahrungen mit dem Leitdamm an der Rhinplatte ein. Der projektierte Leitdamm wird bogenförmig ab der bestehenden Trasse des Flügeldammes durch die Pagensander Nebenelbe zur Spitze des Pagensandes geführt. Der Flügeldamm wird in das neue Bauwerk einbezogen. Der Einbindepunkt in die Elbinsel liegt etwas nördlich des alten Leitdammes (Abb. 19).

Im weiteren Verlauf einiger Untersuchungen mit unterschiedlichen Kronenhöhen des neuen Leitwerkes in Verbindung mit verschiedenen Höhenlagen des alten Leitdammes und seinen vorgelagerten Buhnen konnte eine hydraulisch und wirtschaftlich befriedigende Lösung zur Gestaltung des neuen Leitsystems am Pagensand gefunden werden. Der neue Leitdamm wird in Abschnitten von KN + 0,70 m auf eine Höhe von KN + 3,30 m gebracht und bindet fahrwasserseitig in die Nordspitze des Pagensandes ein. Der vorhandene, beschädigte Leitdamm wird saniert und erreicht bei Buhnentonne 4 eine Höhe von KN + 0,50 m. Die Leitdammspitze liegt bei KN. Die Buhnen am Fahrwasser werden ebenfalls wieder hergestellt. Die Höhen der Buhnenköpfe erreichen KN. An der Buhnenwurzel binden sie höhen-gleich in den Leitdamm ein.

Der zurückgesetzte Leitdamm, wie er abschließend projektiert wird, bietet hier mehrere Vorteile. Die Gründung der Trasse bringt keine Probleme derart, wie in 3.4.2 geschildert. Der bestehende 500 m lange Flügeldamm wird in die Trasse miteinbezogen. Durch die bogenförmige Trassenführung wird die Inselfspitze weitgehend vor schädlicher Anströmung auch bei erhöhten Tiden geschützt. Es ist anzunehmen, daß sich in dem entstehenden Dreieck – Unterfeuer, Einbindungspunkt, Inselnordufer – eine Auflandungszone bildet, ein aus ökologischer Sicht durchaus begrüßenswerter Effekt. Die bei Flut über den vorhandenen alten

## Modellversuche Pagensand

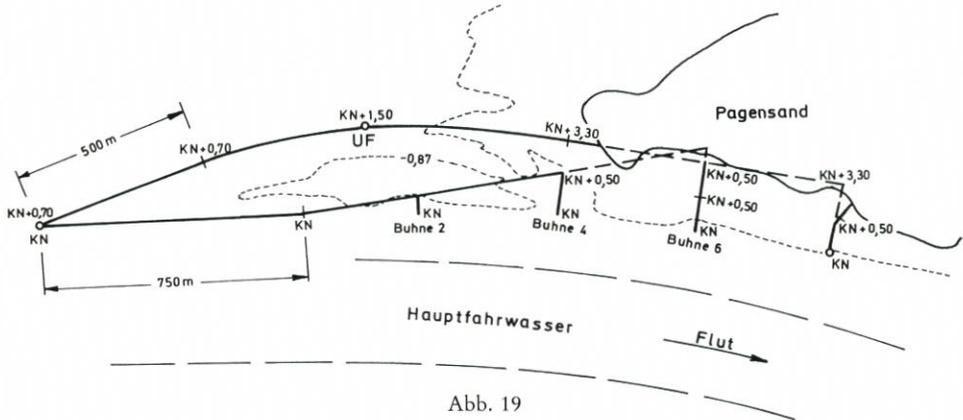


Abb. 19

Damm Richtung Nebelbe strömenden Wassermengen werden erst parallel geführt und dann infolge der Bogenform des neuen Damms allmählich in das Fahrwasser zurückgeleitet. Es treten bei keiner Tidephase nennenswerte Querströmungen auf. Bei Ebbstrom bewirkt der neue Damm eine günstige Strömungsführung in der Mündung der Nebelbe. Fotoaufnahmen belegen ein annähernd tangenciales Einfließen des Ebbstroms aus der Nebelbe in das Fahrwasser.

Der vorhandene Leitdamm und die vorgelagerten Buhnen müssen saniert werden, da sie ebenfalls einen wichtigen Beitrag zur Stabilisierung der Fahrrinne leisten. Die Buhnen halten im weiteren Verlauf des Prallufers hohe Strömungsgeschwindigkeiten vom Uferbereich fern und konzentrieren bei Niedrigwasser die Strömung in der Fahrrinne. Der alte Leitdamm, besonders im vorderen Abschnitt an der Spitze, schützt die obere Kante des Steilhangs und mindert die Strömung im Leitwerksbereich. Die bogenförmige Leitdammtrassierung zeigt auch unter verschiedenen Tideverhältnissen die besten Ergebnisse. Die Höhenlagen von Damm- und Buhnenkronen sind über verschiedene Varianten optimiert. Negative Strömungsveränderungen in der Neben- und Hauptelbe können nicht festgestellt werden.

### 3.5 Versuche mit beweglicher Sohle

Zur weiteren Absicherung der Ergebnisse aus den Versuchen mit fester Sole wurde die ermittelte Leitdammausführung noch mit einer beweglichen Sohle im Modell untersucht. Auswirkungen auf die Strömung im Hauptfahrwasser durch den neuen Leitdamm konnten mit der punkweisen Messung von Strömungsgeschwindigkeiten nicht festgestellt werden. Trotzdem lassen sich örtliche Einflüsse natürlich nicht ausschließen. Das in Geschiebeversuchen verwendete Sohlmaterial (Polystyrol) reagiert sehr empfindlich auf Veränderungen und läßt dies durch Sohlumbildung im Modell erkennen. Durch Vergleich der Morphologiestruktur ist es daher möglich, weitere Aussagen zu erhalten.

Das Elbmodell mit fester Sohle wurde für die oben angeführten Modellversuche im

Bereich zwischen Elbe-km 659,3 und 669,9 umgebaut. Die Größe des Untersuchungsbereichs richtet sich nach der für diese vergleichenden Versuche notwendigen Mindestausdehnung und nach modelltechnischen Gegebenheiten. Der Aufbau der Flußmorphologie erfolgte mit den Querprofilen aus den Versuchen mit fester Sohle, so daß bei allen Versuchen der gleiche Ausgangszustand gewährleistet werden konnte.

Verschiedene Bodenarten können im Modell in ihrem Bewegungsverhalten nicht nachgebildet werden, da nur ein homogenes Material (Polystyrol) zur Verfügung steht. Im Querschnitt vorkommende Uferböschungen, die durch die 5fache Höhenverzerrung im Modell für das verwendete Sohlmaterial zu steil war, mußten durch Filtermatten fixiert werden. Bildet man sie im Modell aus Polystyrol nach, halten sie ihre Form nicht und verändern deshalb den Querschnitt unzulässig, das Modell wird naturunähnlich. Zusätzlich wird durch die gegebene „Verzahnung“ des Polystyrols mit den Filtermatten ein besserer Übergang von beweglicher Sohle zu fester Sohle hergestellt. Aus diesen Gründen wurde die gesamte Südflanke des Pagensandes einschließlich Leitdamm und, in nordwestl. Verlängerung des Dammes, die Unterwasserkante zur nördlichen Mündung der Pagensander Nebenelbe bis Steindeich befestigt. Alle über MThw liegenden Flußufer sind ebenfalls mit Matten ausgelegt, desgleichen der über Wasser liegende Teil des Schwarztonnensandes.

Die zum Betrieb und zur Kontrolle des Modells notwendigen Meßgeräte entsprechen denen, die auch bei Versuchen mit fester Sohle eingesetzt werden. Die Aufzeichnung der Polystyrol-Sohle vor bzw. nach den Versuchen erfolgte mit einem sogenannten Lichtfloß. Es mißt, auf der Wasseroberfläche schwimmend, die je nach Sohltiefe unterschiedliche Reflexion eines ausgesendeten Lichtstrahls und wandelt diese Information in elektrische Spannung um. Ein Drucker zeichnet das Sohlprofil auf. Meßmarken im Modell garantieren eine konkrete Zuordnung der gemessenen Tiefen.

Aus Vorversuchen wurde eine Versuchsdauer von 200 Tiden ermittelt, d. h., nach diesem Zeitraum hatte sich eine annähernd „stabile“ Sohlformation gebildet; die Höhenlage der Dünen blieb konstant. Die Tidedauer wurde zur Verminderung der Strömungsgeschwindigkeiten im Modell um den Faktor  $\alpha = 1,25$  gedehnt (DIETZ/OHLMAYER, 1986). Zur Ausbildung einer gewissen Grundrauhigkeit im Untersuchungsgebiet (Dünenbildung) wurden vor jedem Versuch 10 Vortiden gefahren. Die angegebenen Dünenhöhen sind im folgenden auf Naturwerte umgerechnet. Unter Berücksichtigung des Modellhöhenmaßstabs (1:100) und des Durchmessers der Polystyrolteilchen (0,7–2,4 m) muß eine Meßtoleranz von 1,0 m (Natur) eingeräumt werden.

### 3.5.1 Ausgangszustand

In den Untersuchungen mit beweglicher Sohle konnten die natürlichen Verhältnisse ausreichend genau nachgebildet werden. Die Lage der Riffelstrecken und der Gebiete mit glatter Sohlensausbildung stimmen im wesentlichen mit der Natur überein. Daraus läßt sich in erster Näherung schließen, daß die Strömungsverteilung im Untersuchungsgebiet im Modell mit der Natur vergleichbar ist. Die Materialbilanz des Modellabschnitts ist in etwa ausgeglichen. Die Geschiebemengen, die sich in den ober- und unterstromseitigen Auffanggräben nach Versuchsende befinden, sind im Verhältnis zu den bewegten Geschiebemengen im Modell minimal und bei beiden Varianten in etwa gleich groß.

Im Hauptstrom stellt sich schon nach kurzer Versuchsdauer eine ausgeprägte Riffelung der Sohle ein. Die Höhe der Dünen ist je nach Stromabschnitt verschieden. Vor Steindeich, etwa zwischen den Profilen 88 und 89a, liegen die maximalen Dünenhöhen bei ca. 4–7 m, in den anderen Bereichen, etwa in Höhe des Leitdammes oder weiter oberstrom bei Grauerort,

# Modellversuche Pagensand

Ausgangszustand

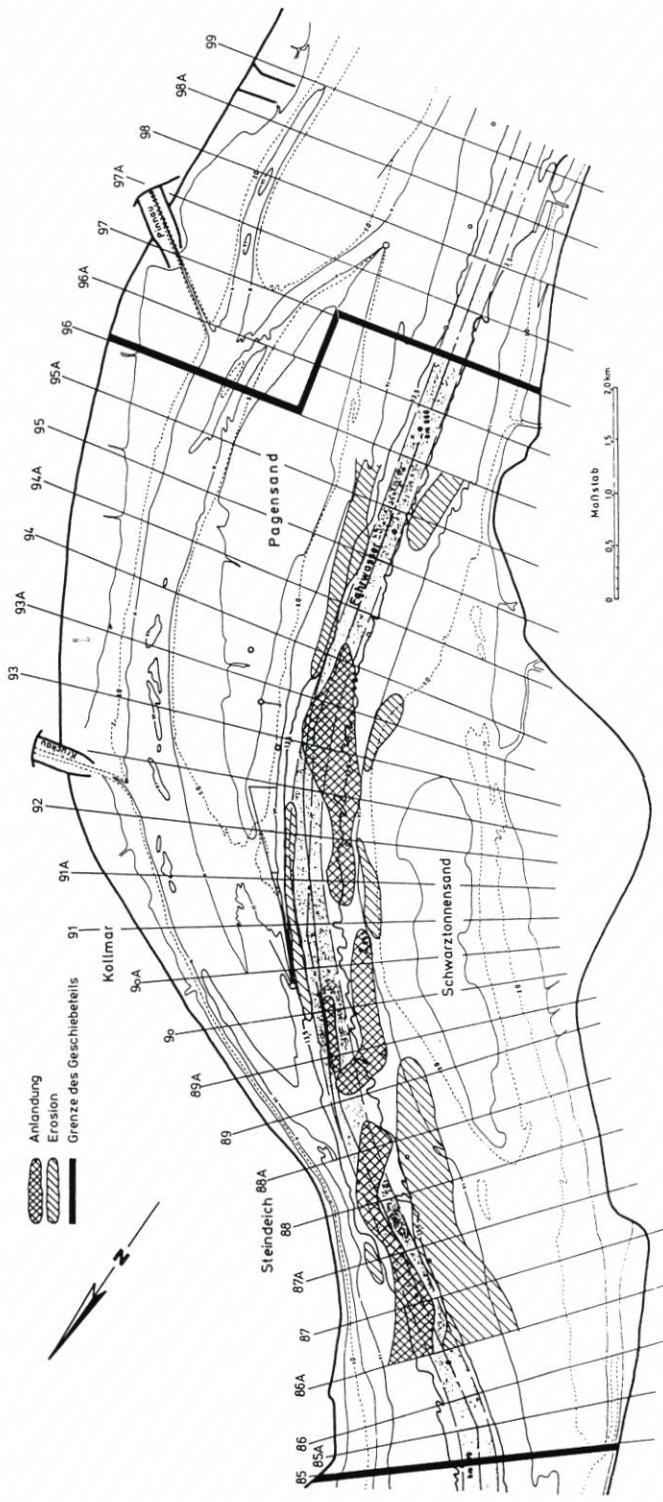


Abb. 20

### Modellversuche Pagensand Neuer Leitdamm

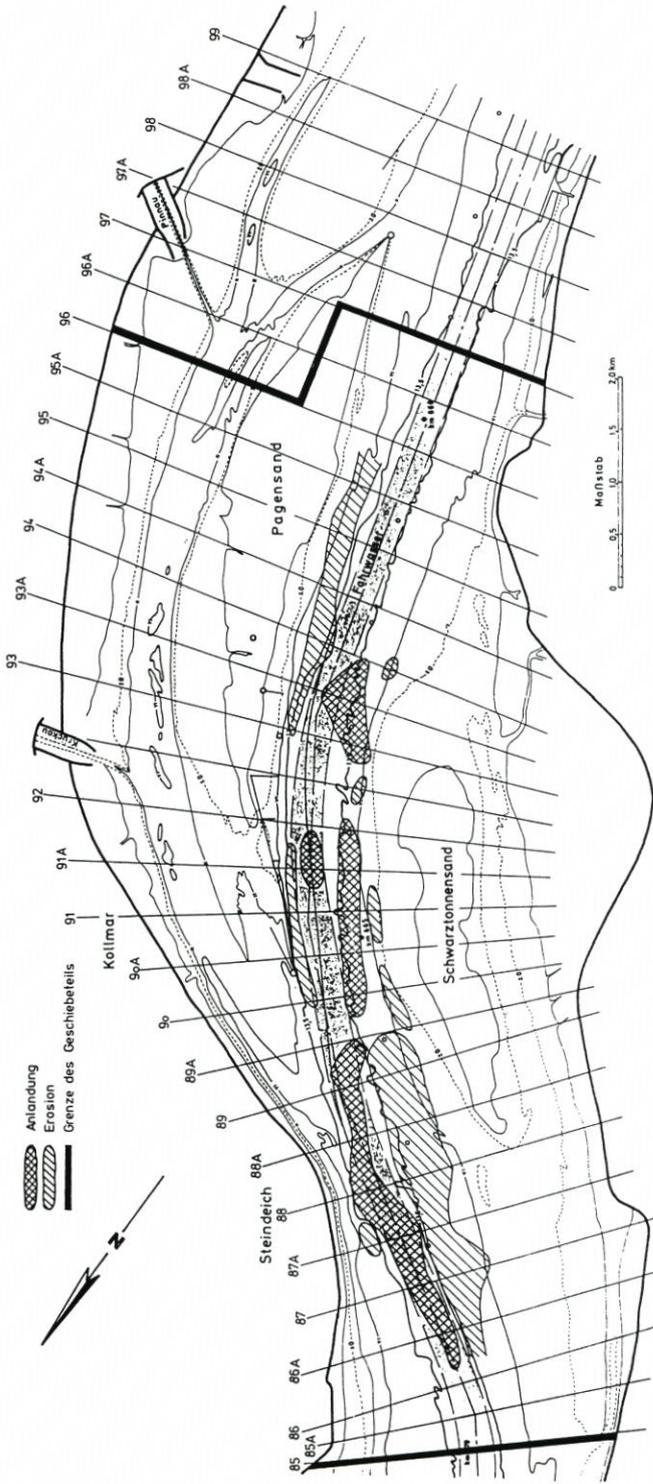


Abb. 21

bei ca. 3,0 m. Die Dünenhöhe ist im Modell etwa 2fach überhöht, ein Wert, der auch bei anderen Modellversuchen der BAW-AK festgestellt wurde. Die Transportkörper erreichen bei Steindeich eine absolute Höhe im Modell von bis zu 12,0 m KN. In der Natur sind hier ebenfalls sehr hohe Formationen (Höhe bis zu 4 m) vorhanden, die teilweise mit den Kämmen bis an die Solltiefe von 13,5 m KN heranreichen.

Abb. 20 zeigt im Grundriß die aus den Querprofilen ermittelten wichtigsten Erosions- bzw. Anlandungszonen im Untersuchungsgebiet nach 200 Tiden sowie die Lage der Meßprofile.

Erosionszonen liegen vor allem am südlichen Rand der Fahrrinne in Höhe der Nordspitze Schwarztonnensand, etwa zwischen der 6-m- und 13,5-m-Linie sowie weiter oberstrom an der gleichen Uferseite bei den Profilen 91A und 93A zwischen der 0-m- und 6-m-Linie, weiter an der Südseite des Pagensandes am Leitdamm und auf der gleichen Seite etwa ab Profil 94. Bei den letztgenannten Bereichen handelt es sich weniger um eine Vertiefung des bestehenden Profils, als um ein seitliches Zurückweichen des Prallhanges in größeren Tiefen.

Auflandungszonen liegen überwiegend an der Nordflanke des Schwarztonnensandes zwischen den Profilen 89A und 93A von der 6-m- bis 13,5-m-Linie mit Schwerpunkt etwa bei der 11-m-Linie. Das südliche Ende der Anlandungszone erstreckt sich in Höhe der Profile 93, 93A unter Dünenbildung schräg in die Hauptrinne hinein, reicht aber nur mit den höchsten Kämmen an die Solltiefe von 13,5 m KN heran.

Bei der Anlandungszone weiter unterstrom vor Steindeich im Fahrwasser handelt es sich um keine echte Sohlerrhöhung. Bedingt durch die Sohlauflaufzeichnung mit Querprofilen ist nicht auszuschließen, daß nur Dünenkämme bzw. nur Dünentäler aufgezeichnet werden. Die von Profil zu Profil stark schwankende Morphologie deutet in diesem Fall schon darauf hin. Die Auswertung von zusätzlichen Längsprofilen belegt, daß sich das Sohlniveau im betrachteten Bereich von Profil 86A-88A nicht signifikant verändert hat. Eine eventuelle quantitative Auswertung solcher Riffelstrecken ist aufgrund des großen Fehlers nicht sinnvoll.

Die Sohlveränderungen entlang des südlichen Ufers der Fahrrinne sind weitgehend nicht oder nur schwach durch Riffelbildung beeinflusst, die Aufzeichnungsgenauigkeit ist daher ausreichend. Deshalb kann hier eine *vergleichende* quantitative Auswertung vorgenommen werden. In Abb. 22 sind die Querschnittsveränderungen in den einzelnen Meßprofilen für den Bereich des südlichen Fahrrippenufers am Schwarztonnensand angegeben. Die Werte wurden durch Differenzbildung zwischen den Ordinaten der Querschnittskurven unter KN von der glatten Sohle (Versuchsbeginn) bzw. nach 200 Tiden (Versuchsende) erstellt. In den beiden Nebenebenen (Pagensand, Schwarztonnensand) zeigt das Geschiebe aufgrund geringer Geschwindigkeiten in weiten Bereichen nur sehr geringe oder gar keine Reaktion in der vorgegebenen Versuchszeit. Lediglich in den Mündungsbereichen findet Materialtransport statt, teilweise jedoch nur während kurzer Tidephasen. Der gleiche Effekt ist auch in der Natur zu beobachten (Schwarztonnensander Nebenebbe). In der Pagensander Nebenebbe besteht der Untergrund in großen Bereichen aus Schlick.

In der Leitdammspitze zwischen Haupt- und Flügeldamm kolkt das Geschiebe mehrere Meter tief aus, das Material wird vom Flutstrom parallel zum Hauptdamm in Richtung Pagensand transportiert (Stromfächer). Dieser Kolk ist im Modell zu stark ausgebildet, ist aber auch in der Natur vorhanden und deutet auf große Strömungsgeschwindigkeiten hin.

Wie erwähnt, liegt vor der Nordspitze des Schwarztonnensandes am südlichen Rand der Fahrrinne ein Gebiet mit ausgeprägter Erosionstendenz. Da an der unterstromigen Grenze des Abschnitts mit beweglicher Sohle sich kaum Geschiebmaterial ansammelt, kann nur der Flutstrom als Verursacher angesehen werden. Nach Beobachtungen im Modell wird dieses Material während der Flutstromdauer zu einem Teil am Nordhang des Schwarztonnensandes

## MODELLVERSUCHE PAGENSAND

Materialbilanz fuer die Profile 86A-94 am Fahrwasser Schwarztonnensand

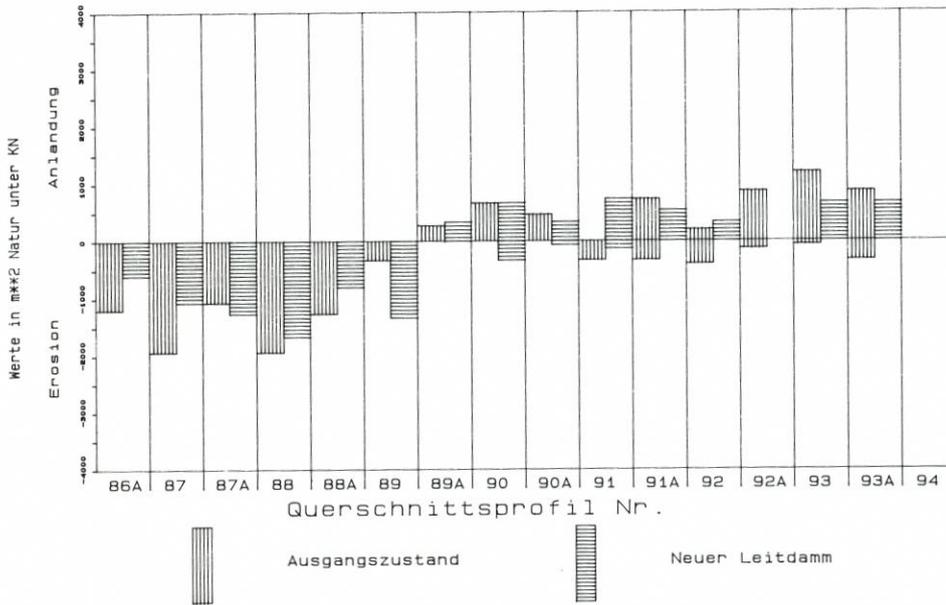


Abb. 22

entlang bis zum Kurvenausgang (Profile 93, 94) transportiert, wo es sich ablagert. Der Ebbstrom nimmt Teilmengen dieses Materials wieder auf. Durch die zum Leeufer gerichtete Querströmung in der Fahrwasserkurve und vermutlich während des oben erwähnten Materialtransports bei Flut kommt es zu den beschriebenen Anlandungen am Nordhang des Schwarztonnensandes. Genaue Vergleiche mit der Sohlenentwicklung in der Natur sind hier leider kaum möglich, da am Schwarztonnensand in den letzten Jahren einige Veränderungen vorgenommen worden sind.

### 3.5.2 Zustand mit neuem Leitdamm

Es zeigt sich im Grundsatz die gleiche Morphologiestruktur wie im Ausgangszustand (Abb. 21). Die Lage des Riffelfeldes im Hauptstrom und die Höhe der Riffel sind im wesentlichen vergleichbar. Die Geschiebereaktion in den Nebenrinnen ist ebenfalls sehr gering. In den entsprechenden Modellbereichen, in denen eine Sohlbewegung stattfindet, treten gegenüber dem Ausgangszustand nur wenig Veränderungen ein. Eine Ausnahme ist das Gebiet zwischen altem und neuem Leitdamm sowie die nähere Umgebung der Inselspitze. Es findet hier keinerlei Sohlbewegung mehr statt. Eine Auskolkung am Schnittpunkt der beiden Leitdämme (nördliche Leitdammspitze) ist zwar noch vorhanden, jedoch wesentlich geringer.

Die Lage der Erosions- und Anlandungszonen ist ähnlich verteilt. Am Nordhang des Schwarztonnensandes treten geringere Erosionen bzw. Anlandungen auf (Abb. 22). Die Erosion im Profil 89 ist auf ein großes Riffelfeld am Rand der Riffelstrecke zurückzuführen.

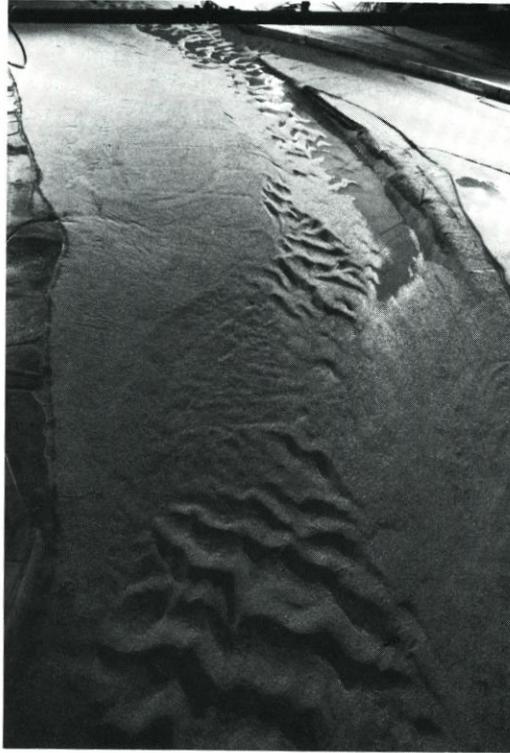


Abb. 23: Versuch mit beweglicher Sohle, Blick nach unterstrom auf die Nordspitze Pagensand mit neuem Leitdamm

Im Ausgangszustand zu beobachtende Materialauskolkungen bei den Profilen 91 bis 93A zwischen der 0- und 6-m-Linie treten kaum auf. Die Auflandung bei den Profilen 91, 93A erstreckt sich nicht in die Hauptrinne hinein, sondern verbleibt mehr in Ufernähe.

Abb. 23 zeigt das Untersuchungsgebiet nach Versuchsende.

Die Wirkung des geplanten neuen Leitsystems auf die Strömungsverhältnisse im Stromspaltungsgebiet Pagensand/Schwarztonnensand ist als äußerst positiv zu bewerten. Das Leitwerk verursacht keine negativen Strömungsveränderungen im gesamten Untersuchungsgebiet.

#### Ausblick

Mit dem in Abb. 6 dargestellten Leitdammsystem „Pagensand Nord“, das in enger Zusammenarbeit zwischen dem Wasser- und Schiffsamt Hamburg und der Bundesanstalt für Wasserbau – Außenstelle Küste erarbeitet wurde, werden die sich über Jahrzehnte erstreckenden Regelungsmaßnahmen in diesem Streckenabschnitt ihren Abschluß finden.

Es ist zu erwarten, daß nach Fertigstellung des Leitdammsystems ein recht gutes Zusammenwirken zwischen Unterhaltungsbaggerungen und Regelungsbauwerken erreicht wird. Es ist beabsichtigt, dies durch hydraulische Messungen und Baggermentwicklungen zu dokumentieren.

Die Baumaßnahme wurde im Mai 1987 begonnen und wird nach einer Bauzeit von drei

Jahren 1989 abgeschlossen sein. Als technisch und wirtschaftlich günstigste Bauweise wurde ein Schüttsteinkörper gewählt, dessen Abdeckung im stark querüberströmten Bereich des Leitdammes auf 970 m Länge mit kolloidalem Zementmörtel verklammert wird.

Die Baukosten werden mit insgesamt 10 Mio. DM veranschlagt.

### 5. Schriftenverzeichnis

- DIETZ, J. W. u. OHLMEYER, F.: Untersuchungen des Sedimenteintriebs in die Fahrrinne im Bereich WSA Cuxhaven. Allgemeines über Modellversuche mit radioaktiven Tracern (unveröffentlicht). BAW, 1986.
- DIETZ, J. W. u. BERNDT, D.: Modellversuche Brammerbank/Rhinplatte (unveröffentlicht). Gutachten Nr. 181, 1982.
- FLÜGGE, G.: Gewässerkundliche Studie Elbe – Wassergütestelle Elbe, Hamburg, 1984.
- KOBUS, H.: Wasserbauliches Versuchswesen – Schriftenreihe des DVWK, H. 39, 1984.
- ROHDE, H.: Eine Studie über die Entwicklung der Elbe als Schifffahrtsstraße. Mitt. des Franzius-Inst. der TU Hannover, H. 36, 1971.
- SCHÄTZLER, J. TH. u. MEISEL, K.: Stromregelungsarbeiten in der Unterelbe bei der Ostebank und bei Pagensand. Die Bautechnik, H. 27/28, 1937.