

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Giese, Egon

Fahrwasserumbildungen in der Unter- und Außenelbe

Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/103038>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Giese, Egon (1972): Fahrwasserumbildungen in der Unter- und Außenelbe. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 32. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 89-108.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Ing. (grad.) E. G i e s e

FAHRWASSERUMBILDUNGEN IN DER
UNTER- UND AUSSENELBE

Transformations of the navigation channel
in the tidal area of the river Elbe

Der vorliegende Aufsatz behandelt u.a. die historische Entwicklung der Fahrwasserverhältnisse im unteren Elbegebiet, die als Grundlage für das Modell mit beweglicher Sohle dienen. Über dieses wurde bereits im Mitt.Bl. der BAW Nr.31 (S.1-32) berichtet. Wegen des engen Zusammenhangs beider Aufsätze wird besonders darauf verwiesen.

I n h a l t

	Seite
1. Vorbemerkungen	91
2. Die Notwendigkeit künstlicher Eingriffe	92
3. Das Geschiebematerial in der Elbe	92
4. Äußere Einflüsse auf die Morphologie	92
4.1 Die Tide und ihre Erscheinungsformen	92
4.2 Meteorologische Einflüsse	92
4.3 Physikalische Einflüsse	93
5. Die historische Entwicklung der Fahrwasser- verhältnisse im unteren Elbegebiet	93
6. Die morphologische Gleichgewichtstheorie als mögliche Grundlage für zukünftige Re- gelungsarbeiten im Seegebiet	97

Egon Giese

Fahrwasserumbildungen in der Unter- und Außenelbe

Die naturbedingten morphologischen Umgestaltungen erschweren im Bereich der Unterelbe von Brunsbüttel bis Scharhörn die Stabilisierung der Fahrrinnen für die Großschifffahrt.

In dieser Arbeit wird auf die Notwendigkeit künstlicher Eingriffe hingewiesen und das Geschiebematerial sowie die äußeren Einflüsse auf die Morphologie charakterisiert. Ferner werden die historischen Entwicklungen und die Wirkung der bisher ausgeführten Regelungsarbeiten beschrieben, die als Grundlage für ein Modell der Elbe im Einflußbereich der Tide dienen.

Das Modell wird zur Zeit bei der Bundesanstalt für Wasserbau, Außenstelle Küste in Hamburg untersucht. Es hat eine bewegliche Sohle aus Polystyrolkörnchen, der Längenmaßstab beträgt 1 : 800, der Höhenmaßstab 1 : 100. Anhand von historischen Versuchen soll für das Modell ein morphologischer Zeitmaßstab gefunden werden, um später Voraussagen für zukünftige Baumaßnahmen zeitabhängig interpretieren zu können.

Morphological instabilities, caused by natural conditions, complicate the stability of the navigation channels for high capacity ships in the area of the lower Elbe from Brunsbüttel to Scharhörn.

This paper points to the necessity of artificial manipulations, and bed material as well as external powers are characterized in their effect on morphology. Furthermore historical developments and action of existing training works are described which serve as data for a model of the river Elbe in the tidal area.

Model investigations are in full activity at the Bundesanstalt für Wasserbau, Außenstelle Küste in Hamburg. The model has a movable bed with grains of polystyrol and the scale in length is 1:800 and in height 1:100. By means of tests a morphological time scale should be estimated to allow later on predictions for constructions in future with real time relations.

Literaturangaben

- [1] Fischer: Hydrographie des Küstengebietes. Verlag von Dietrich Reimer, Berlin 1955
- [2] Hensen: Die Entwicklung der Fahrwasserhältnisse in der Außenelbe. Jahrbuch der Hafenbautechn. Gesellschaft 1939/40, Berlin 1941
- [3] Lucht: Hydrologie des Elbe-Ästuars. Archiv für Hydrobiologie, Suppl.-Bd. XXIX, Stuttgart, Febr. 1964
- [4] O'Brien: Equilibrium Flow Areas of Inlets on Sandy Coasts. Journal of the Waterways and Harbors Division, Vol. 95, No. WW1, Febr. 1969
- [5] Simon: Untersuchungsergebnisse an Grundproben aus dem Gebiet der Elbe zwischen Scheelenkuhlen und Cuxhaven und ihre Ausdeutung hinsichtlich der Sandwanderung. Mitteilungen der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Hamburg, Nr. 11, 1953
- [6] —: Bilanzbericht über das Tidegebiet der Elbe. Küstenausschuß Nord- und Ostsee Hamburg, August 1950 (unveröffentlicht)
- [7] —: Unveröffentlichte Berichte des Wasser- und Schifffahrtsamtes Cuxhaven über die Entwicklung der Fahrwasserhältnisse in der Elbe von Brunsbüttel bis zur See
- [8] —: Das Tideregime der Elbe, Elbmodell mit beweglicher Sohle, 1. Bericht, Hamburg, Oktober 1969. Unveröffentlichter Bericht der Bundesanstalt für Wasserbau, Außenstelle Küste

1. Vorbemerkungen

Im Bereich der Unter- und Außenelbe von Brunsbüttel bis Scharhörn (siehe Übersichtsplan in Bild 1) sind Maßnahmen zur Erhaltung und zum weiteren Ausbau der für die Großschifffahrt erforderlichen Wassertiefe und Fahrwasserbreite notwendig. Trotz umfangreicher Naturstudien über die Sandwanderung im Elbeästuar ist es bisher nicht gelungen, gültige Voraussagen über die Wahrscheinlichkeit von Sohlveränderungen zu machen.

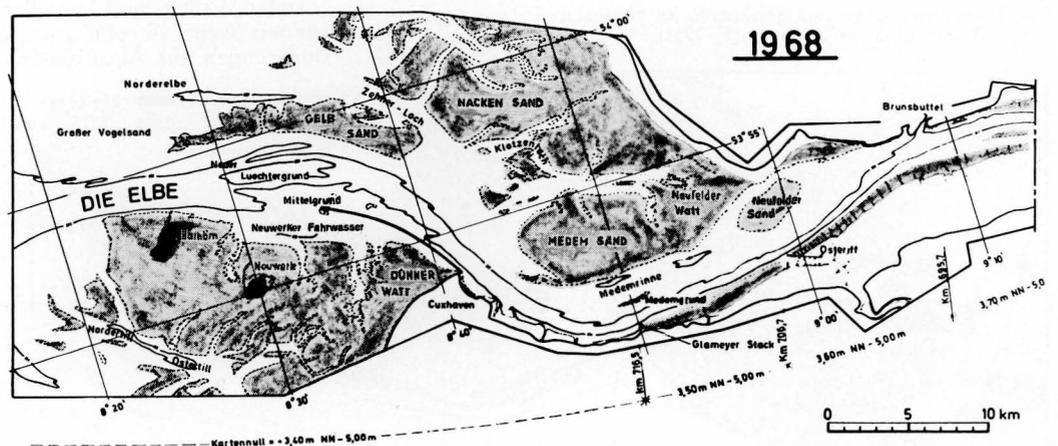
Die Bundesanstalt für Wasserbau, Außenstelle Küste, hat den Auftrag, in einem Modell mit beweglicher Sohle die Feststoffbewegungen im Tidegebiet und die notwendigen Maßnahmen

für eine Stabilisierung der Fahrwasserhältnisse zu untersuchen. Umfangreiche Auswertungen von Meß- und Beobachtungswerten waren daher vorab erforderlich, um die morphologischen Entwicklungstendenzen in ihren Grundzügen interpretieren zu können.

Im Zusammenhang mit der zunehmenden Bedeutung der Küstenforschung für die Schifffahrt soll dieser Beitrag aufzeigen, mit welchen Schwierigkeiten zu rechnen ist, bis aus den bisher spärlichen Kenntnissen über die Naturvorgänge sowohl in quantitativer als auch in qualitativer Hinsicht eine wissenschaftliche Grundlage für die zukünftigen Aufgaben im Küstenraum entwickelt werden kann. Obgleich das Schwerpunktprogramm der Deutschen Forschungsgemeinschaft „Sandbewegung im deutschen Küstenraum“ in letzter Zeit sehr aktiviert wird, bedarf es sicherlich noch eines erheblichen Zeitaufwandes für eine intensive Forschung, bis die mit den Gesetzen der Litoralprozesse befaßten Wissenschaften wie Ozeanographie, Ingenieurwissenschaften, Geologie, Physik und Geodäsie, zu einer brauchbaren Deutung der komplexen Vorgänge kommen.

Der mit den anstehenden Bauaufgaben befaßte Ingenieur kann zum gegenwärtigen Zeitpunkt, und die besonderen Ereignisse fordern es jetzt, nur aus den historischen Entwicklungen und nur bedingt aus neueren Forschungsergebnissen Schlußfolgerungen ziehen. Als Hilfsmittel stehen hierzu u. a. hydraulische Modelle zur Verfügung, die mit einer beweglichen Sohle ausgestattet sein müssen. In einem Modell kann nur ein Teil der komplexen Vorgänge hinreichend genau qualitativ überprüft werden: die Zusammenhänge der Morphologieänderungen besonders großer Ästuarien lassen sich aber hierdurch besser übersehen.

Bild 1. Lageplan des Elbeästuars



2. Die Notwendigkeit künstlicher Eingriffe

Die aus meist feinem Sand bestehende Küste ist unter der Einwirkung der Tide fortwährend in Bewegung. Wenn man trotzdem von einem allgemeinen Gleichgewichtszustand der Morphologie im Küstenvorfeld ausgeht, so ist hiermit nicht ein statischer Zustand gemeint, sondern er ist dynamisch zu verstehen. Oft stellen sich periodische Umbildungen heraus, die die Stabilität der Schifffahrtsrinnen innerhalb der Ästuarien beeinflussen. In früherer Zeit genügte es, die oft wechselnden Fahrrinnen durch Verlegung der Betonung zu markieren, aber durch die ständig wachsenden Schiffgrößen und damit der Forderung für eine allgemeine Vertiefung der Fahrrinne müssen neuerdings die bisher auf die oberen Strecken des Tideflusses beschränkten Regelungsarbeiten auf das Seegebiet ausgedehnt werden.

Für das Elbegebiet wurde schon 1935 aufgrund von Forderungen der Marine im Zusammenhang mit der Vertiefung und Verbreiterung des Nord-Ostsee-Kanals auch eine entsprechende Verbesserung für das Elbefahrwasser unterhalb von Brunsbüttel bis zur See angestrebt. Es wurde ein Regelungsentwurf aufgestellt, dessen Hauptelement ein von der Kugelbake ausgehender, rund 9 km langer Damm war. Dieser für eine bevorzugte Flutregelung entworfene Damm (Steinschüttung) wurde erst 1968 mit der Schließung der Lücke an der Kugelbake nach fast 20jähriger Bauzeit fertiggestellt. Es steht heute fest, daß mit der zunehmenden hydraulischen Wirkung des Damms Stabilisierungstendenzen der Fahrrinnen eingetreten sind. Die angegebene Teilregelung förderte jedoch noch nicht die gewünschte Selbsteintiefung, so daß weitere Maßnahmen erforderlich werden.

3. Das Geschiebematerial in der Elbe

Die mittleren Korndurchmesser D der Elbesohle zwischen Strom-km 470 und 750 sind in Bild 2 bei gleichzeitiger Nennung der wichtigsten Pegel aufgetragen [3]. Von Geesthacht bis Glückstadt nehmen die Korndurchmesser ziemlich gleichmäßig ab, während im Mündungsbereich dagegen örtlich rasch wechselnde Kornzusammensetzungen auftreten. In diesem Geschiebeband

Bild 2. Mittlere Korndurchmesser des Elbegeschiebes [3]

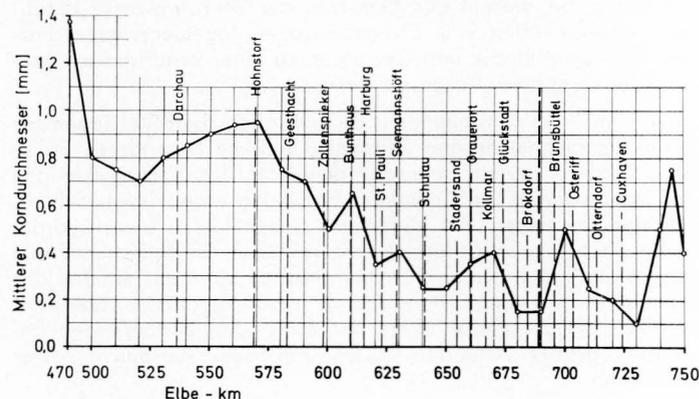
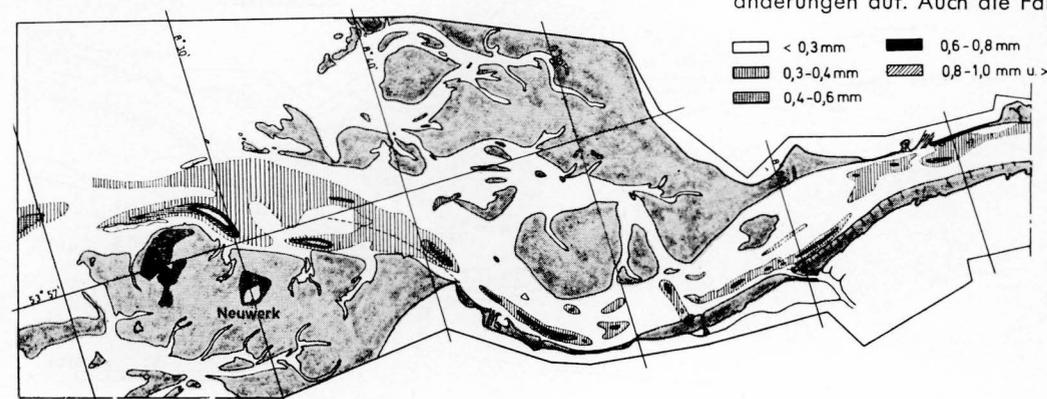


Bild 3. Kornfraktionen des Sediments im Elbeästuar (Linien gleicher D-Werte [5], 1951)



werden aber nur unvollkommen die genaueren örtlich sehr verschiedenen Verhältnisse berücksichtigt. Wesentlich differenziertere Angaben sind in Bild 3 enthalten, in der die Linien gleicher D-Werte eingetragen sind. Es können besonders auffällige Entmischungszonen festgestellt werden. Die Bereiche mit Übergängen zu größeren Korndurchmessern stehen in Zusammenhang mit Vertiefungen der Sohle infolge besonderer Strömungsangriffe und damit sehr lebhafter Sohlumlagerungen.

4. Äußere Einflüsse auf die Morphologie

4.1 Die Tide und ihre Erscheinungsformen

Die Gezeitenwellen unterscheiden sich von den durch Wind erzeugten Meereswellen durch ihre im Vergleich zur Wassertiefe außerordentlich große Länge. Zum Aufbau der Gezeitenwellen sind erhebliche horizontale Verschiebungen der Wassermassen erforderlich, die sich bei geringer vertikaler Veränderung in den Gezeitenströmungen äußern.

Die Periode der Gezeit von einem Hochwasser bis zum folgenden beträgt nach genauen Beobachtungen des Wasserstandes an den Küstenpegeln im Mittel 12 h 25 min. In der Deutschen Bucht, besonders aber im Tidegebiet der Flüsse, ist die Dauer der Flut in der Regel kürzer als die Ebbe. Der Tidehub (Differenz zwischen Tidehochwasser [Thw] und dem Mittel der beiden benachbarten Tideniedrigwasser [Tnw] erreicht seinen Höchstwert zur Springzeit, er wird am geringsten zur Nippzeit. Dieser von den Mondphasen abhängige Wechsel wird die halbmonatliche Ungleichheit genannt, demnach haben Spring- und Nippzeit eine Folge von durchschnittlich $7\frac{3}{8}$ Tagen. Für die Nordsee sind in Bild 4 Linien gleichen Springtidehubs und die Stundenlinien eingetragen. Primär wird die von Norden vom Atlantik und sekundär die von Süden aus der Straße von Dover kommende Gezeitenwelle durch die ablenkende Kraft der Erdrotation (Corioliskraft) zu einer Drehtide (Amphidromie) umgeformt. Durch Reibungserscheinungen wird im südlichen Teil der Nordsee der Tidehub verringert, wobei sich auch die Eintrittszeit des Hochwassers verspätet. Letzteres ist aus der Form der speichenförmig angeordneten Flutstundenlinien zu erkennen.

In Bild 5 sind die Veränderungen des Wasserstandes in Bezug zur Zeit für verschiedene Elbe-Pegel bei mittleren Verhältnissen eingetragen. Es muß erwähnt werden, daß infolge Reflexionserscheinungen der Strom nach den Scheitelwerten des Thw und Tnw kentert, d.h. in diesen Punkten kehren sich die Strömungsrichtungen zur Flut oder Ebbe um. Die Lagen der Stromkenterungspunkte können zur Ermittlung des Arbeitsvermögens einer Tidewelle herangezogen werden.

Durch die Änderung von Querschnitten, verursacht durch die Ausbauarbeiten zur Vertiefung des Elbefahrwassers, werden die Form und Höhenlagen der Tidewelle, die durchfließenden Wassermengen und die Strömungsgeschwindigkeiten beeinflusst, zusätzliche Änderungen entstehen durch wechselnde Oberwasserabflüsse.

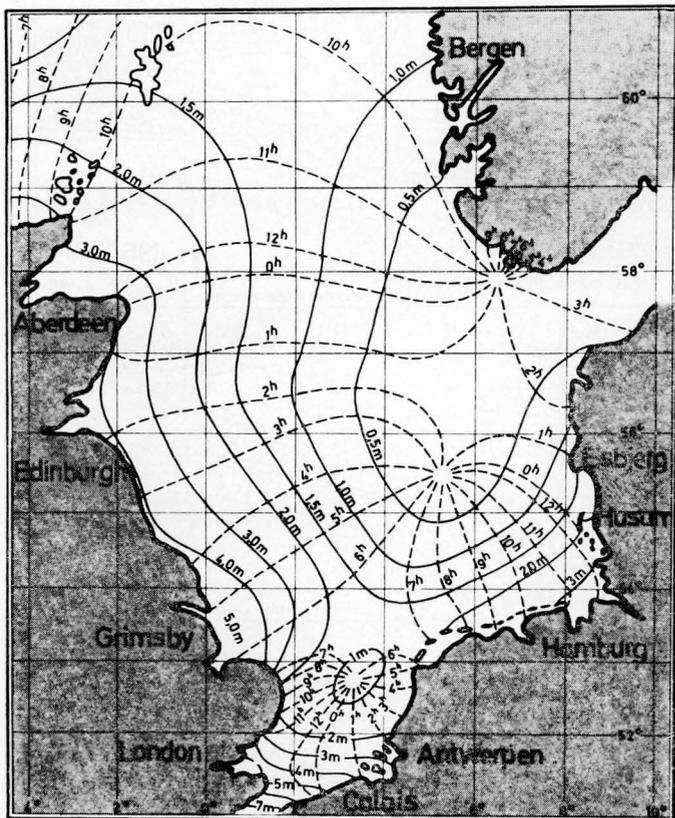
4.2 Meteorologische Einflüsse

Unter Wellen- und Sturmflutangriffen treten an der Küste, besonders wenn sie abbruchgefährdet ist, sehr augenfällige Veränderungen auf. Auch die Fahrrinnen werden hiervon betroffen,

aber im Zusammenhang mit der durch Tideeinwirkung erzeugten Strömung und der daraus resultierenden, permanenten Materialverfrachtung ist der durch Wellen und Sturmfluten bedingte Einfluß infolge nur kurzzeitiger Wirksamkeit meist gering.

Wellen- und Sturmflutangriffe haben unmittelbare Bedeutung für den Küsten-, Deich- und Strandschutz, für die ebenfalls ingenieurwissenschaftliche Untersuchungen notwendig sind.

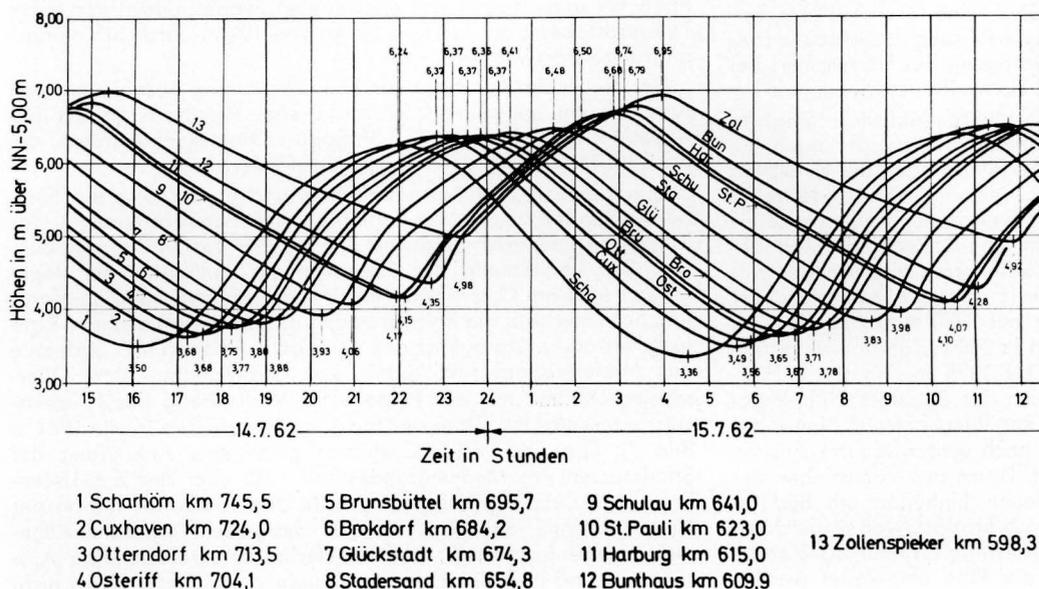
Bild 4. Linien gleichen Springtidehubes und Flutstundenlinien (aus Gezeitentafel des DHI) [1]



4.3 Physikalische Einflüsse

Im Mündungsgebiet von Tideflüssen werden durch das Zusammentreffen des süßen Flußwassers mit dem bei Flutstrom eingedrungenen Seewasser und durch Temperatureinflüsse die Strömungsvorgänge beeinflusst. Grundsätzlich handelt es sich um das Problem der Mischung zweier verschieden schwerer Flüssigkeiten. Da das Seewasser schwerer ist als Flußwasser, tritt an der Sohle eine stromauf und an der Oberfläche stromab gerichtete Dichteströmung ein. Bei Flutstrom werden daher die Strömungsgeschwindigkeiten an der Oberfläche kleiner und diejenigen der Sohle größer sein, als sie unter gleichen hydraulischen Voraussetzungen in Wasser homogener Dichte wären. Bei Ebbestrom

Bild 5. Die gelaufene mittlere Tide vom 14./15. 7. 1962



dagegen wird die Oberflächenströmung verstärkt und die Sohlströmung verzögert.

Hensen [2] hat in seiner Arbeit über die Entwicklung der Fahrwasserhältnisse in der Außenelbe eingehende Erklärungen über den Einfluß der Dichteunterschiede abgegeben und auch Vermutungen über den Einfluß auf den Geschiebetrieb angedeutet. Allgemein ist festzustellen, daß es bis heute nicht gelungen ist, die Theorie durch brauchbare Nachweise aus Naturmessungen zu untermauern. Dazu sind die Vielzahl der äußeren Einflüsse zu komplex und auch die Meßmethoden noch ungenügend entwickelt. Es sind zum Beispiel die Einflüsse der Turbulenz auf die Dichte, die daraus resultierende Verteilung der Geschwindigkeiten in der Vertikalen als Stützelement für den Schweb und die Verformung der Sohle unter Strömungseinfluß noch weitgehend ungeklärt. Weiterhin ist auch der Einfluß des Corioliseffektes, der auf der Nordhälfte der Erde eine Ablenkung der Strömungen nach rechts bewirkt, in seiner tatsächlichen Wirkung auf die Sohle nicht definiert.

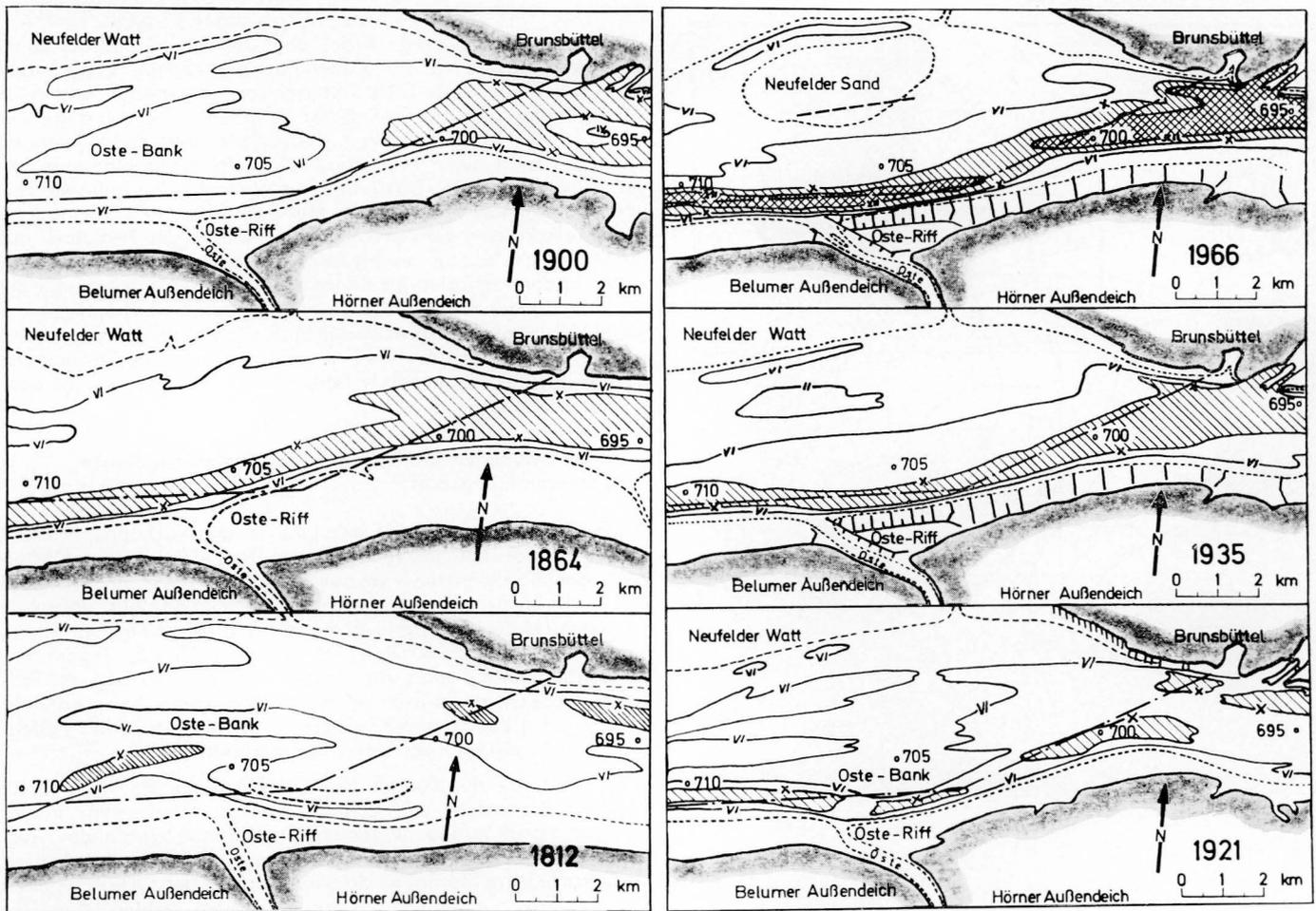
5. Die historische Entwicklung der Fahrwasserhältnisse im unteren Elbegebiet

Für das Mündungsgebiet der Elbe ist das vorhandene ältere Kartenmaterial nur teilweise verwendbar. Die durchgeführten Peilungen beschränkten sich auf die Hauptfahrinnen, während die Wattgebiete meist unberücksichtigt blieben. Aus dem vorhandenen Material wurden geeignete Karten zusammengestellt, um besonders die Entwicklung der Morphologie von Beginn dieses Jahrhunderts an, bis zur Neuzeit verfolgen zu können. Teilweise erschien es notwendig, vor allem wenn entsprechende Unterlagen greifbar waren, zeitlich noch weiter zurückzugreifen, um die Entwicklung noch klarer herauszustellen.

Zunächst soll der Bereich der Ostemündung (Bild 7, 1910) zwischen Brunsbüttel und Cuxhaven betrachtet werden. In diesem zur Verwilderung neigenden Stromgebiet wurde das Auseinanderlaufen des Flut- und Ebbestromes besonders begünstigt. Dazu kamen die Störungen der Abzweigung der Oste am linken und des jetzt versandeten Klotzenloches am rechten Ufer. Der oberhalb Brunsbüttel in einer scharfen Kurve straff geführte Ebbestrom verlor in der Erweiterungsstrecke seine natürliche Führung und teilte sich in eine nördliche und südliche Stromrinne, von denen der gleichfalls sich spaltende Flutstrom vorwiegend die südliche Rinne aufsuchte. Hierdurch entstand ein ständig fortschreitender Abbruch dieses Ufers und damit eine ständig zunehmende Krümmung. Zwischen den Stromrinnen kam es zu ausgedehnten Ablagerungen, die sich immer mehr nach dem linken Ufer zu verbreiteten. Als Folge der immer enger und gekrümmter werdenden Stromrinne am Südufer, setzte sich die nördliche Rinne durch, spaltete die Ablagerung und bildete einen Sand, die Ostebank, die sich im weiteren Verlauf der Entwicklung schließlich am Ende ihrer Südwanderung an das Südufer anlegte. Aus alten Karten ist zu schließen, daß dieser Vorgang eine mehrfache Wiederholung fand.

In Bild 6 wird diese Entwicklung, ausgehend vom Jahre 1812 bis in die Neuzeit nachgewiesen. Zum besseren Vergleich ist der Verlauf der Richtfeuerlinie eingetragen. Die Peilung von 1864 zeigt besonders günstige Stromverhältnisse. Das Flußbett ist durchgehend auf über 10 m unter Karten-Nullvertieft. Hierbei hat sich infolge der vorher erwähnten Sandanlagerung das Südufer weit nach Norden vorgeschoben. Das Neufelder Watt vor dem nördlichen Ufer verbreiterte sich ebenfalls stark. Bemerkenswert ist auch die Verlagerung der Ostemündung um rund

Bild 6. Sohlbildungen im Bereich der Ostemündung



1 km stromabwärts zu einer spitzwinkligen Einmündung in die Elbe.

Um 1900 ist die Rückbildung zu ungünstigeren Stromverhältnissen zu erkennen. Sie äußert sich durch den starken Abbruch des Osteriffs, einer dadurch entstandenen scharfen Krümmung, sowie durch die neu entstandene Ostebank. Die über 10 m tiefe Flut- und Ebberinne hat sich im Bereich der Ostemündung wieder verflacht.

1921 ist eine Verbesserung eingetreten. Ursächliche Beeinflussungen sind natürlich auch durch Veränderungen des unterhalb gelegenen Stromgebietes entstanden. Es wurde bereits das Klotzenloch erwähnt, das im Laufe der Zeit seine Grundrißform, seinen Querschnitt und damit die Wasserführung mehrfach verändert hat. Durch eine zunehmende Verengung des Fahrwassers bei Cuxhaven wurde das Einlaufen der Tidewelle erschwert.

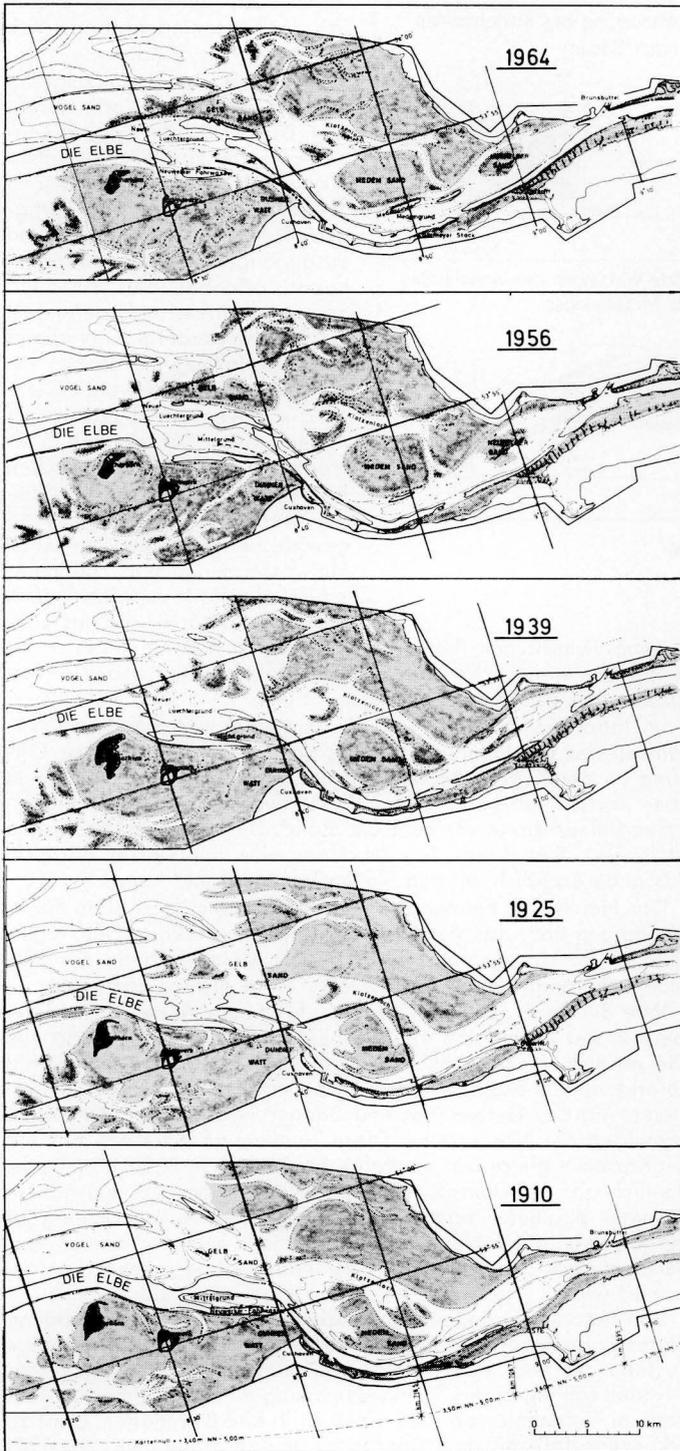
Zur Aufrechterhaltung der Schifffahrt waren künstliche Eingriffe notwendig geworden. Seit 1903 nahmen die Baggerungen zu. Nach Abbruch der Baggerungen im Winter gingen die erreichten Vertiefungen allerdings oft wieder verloren. Die angestrebte Tiefe von 10 m unter Kartennull (KN) wurde nur stellenweise erreicht, meist kam man nicht über 8 m hinaus. Regelnde Maßnahmen wurden mehrfach geplant, sie scheiterten aber an den Kosten. Erst nach dem 1. Weltkrieg wurde als erste Maßnahme der Bau eines Längswerkes am Osteriff mit 2350 m Länge elbseitig mit acht angeschlossenen Stacks von je 200 m Länge und 1610 m längs der Oste geplant und 1922 bis 1925 fertiggestellt. Hierdurch sollte dem verstärkten Abbruch des Südufers Einhalt geboten werden. Als Vorbild für den Regelungsentwurf diente der Stromzustand von 1864. Der später noch weitergeführte Ausbau ist im Lageplan von 1935 dargestellt. Durch das Verschieben der Stacks und die Anordnung von neuen Einheiten am Südufer wurde eine Abflachung der Krümmung erreicht, wobei gleichzeitig die Ostebank abgebagert und auch die Ostemündung spitzwinkliger und weniger störend in die Elbe eingeleitet werden

mußten. Die planmäßig ausgeführten Regelungsarbeiten führten nach dem Peilplan von 1935 zu einer wesentlichen Verbesserung der Stromrinne. Auch in navigatorischer Hinsicht traten Erleichterungen ein. Als bemerkenswert wie günstig sich das Südfahrwasser entwickelt hat, beweist die Entstehung des Neufelder Sandes. Diese Sandablagerung am Nordufer war erwünscht, sie wurde 1939 durch den Bau eines Leitdammes von 2900 m Länge parallel zu den Regelungsbauwerken am Osteriff gefördert. Der im Peilplan von 1966 eingetragene Verlauf des Leitdammes sollte später in gerader Richtung bis nach Hermannshof geführt werden. Er hatte ursprünglich eine Höhe von 60 cm über dem heutigen KN und ist jetzt voll eingesandet, wobei jedoch der letzte Teil nach oberstrom in einer Länge von 100 m durch Strömungsangriff zerstört wurde.

Der Neufelder Sand hat zur Zeit bereits eine Ausdehnung von rund 4,5 km Länge und 2,0 km Breite. Hierdurch ist die gewünschte Verkleinerung des Stromquerschnittes eingetreten, die die Selbsttieftiefung der Fahrinne gefördert hat.

Durch diese Regelungsmaßnahmen und die Bildung des Neufelder Sandes wurde das Einlaufen der Ebberströmung in das Klotzenloch zunächst erschwert und ab 1969 fast völlig unterbunden. Die Verstärkung der Ebberströmung im Südteil der Regelungsstrecke am Osteriff und damit dessen Schwächung im Nordteil, hat unterhalb die Ebberströmung in eine mehr nördliche Richtung verlagert. Darauf ist der verstärkte Abbruch der Südkante des Medemsandens und damit eine Strombreiten- und Querschnittszunahme mit der Folge einer Verflachung des Fahrwassers unterhalb des Glameyer Stack zurückzuführen (Karte 1964 in Bild 7). Die vom WSA Cuxhaven gemessene Anhäufung der Sandmassen des Medemgrundes seit 1945 über der 6-m-Tiefenlinie ist in Bild 8 [7] eingetragen. In diesem Bereich sind in der Hauptfahrinne Sandeintreibungen festgestellt worden. Allgemein wurde festgestellt, daß im Herbst eine selbstständige Ausräumung und im Frühjahr eine Anlandung stattfindet. Es ist nicht

Bild 7. Morphologische Umbildungen des Elbeästuars von 1910–1964



nachzuweisen, ob hierfür veränderte Oberwasserführungen, die jahreszeitlich auftretenden Ungleichheiten der Tiden oder Temperatureinflüsse verantwortlich sind. Einer Anlandung kann offenbar nur durch energische und umfangreiche Baggerungen entgegengewirkt werden. Nach neueren Messungen der Strömungsverhältnisse im Meßprofil Glameyer Stack führt die Medemrinne, bezogen auf den Gesamtquerschnitt, bei Flut ca. 45% und bei Ebbe sogar 48% des Durchflusses ab. Hierdurch tritt noch deutlicher in Erscheinung, welche Schwierigkeiten für die Stabilisierung der südlichen Hauptfahrinne vorhanden sind.

Für die Außenelbe kann die Beurteilung der Wirkung von bettgestaltenden Kräften durch eine Untersuchung der geschichtlichen Entwicklung erfolgen. Hensen [2] hat in seiner Arbeit über die Entwicklung der Fahrwasserhältnisse in der Außenelbe anhand von älteren Elbekarten versucht, offensichtliche Änderungen

der Morphologie vergleichend zu verfolgen. Grundsätzlich stellte sich der in Bild 9 näher erläuterte periodische Verlauf der Umbildungen von Sänden und Stromrinnen in der Außenelbe heraus.

Als Beginn der Periode wird ein Stromzustand angenommen, bei dem die Elbemündung frei von Mittelsänden im Fahrwasser ist. Durch die Flutströmung über das Watt zwischen dem Festland und den Wattinseln Neuwerk und Scharhörn sowie als Küstenversetzung findet ständig eine Sandzufuhr von Süden und Westen zur Elbe statt. Hierdurch wird die Wattkante in die Elbe vorgedrückt. Dieser Zuwachs wird dadurch kompensiert, daß der Flutstrom die Wattkante wieder abschält.

Die Insel Neuwerk schirmt die Sandzufuhr von Süden ab. Vor der Insel ist nur der angreifende Flutstrom wirksam, daher bricht hier das Watt dauernd ab. Der Flutstrom streicht infolge der Rechtsablenkung, begünstigt durch die Aufnahmefähigkeit der Elbe entlang, während der Ebbestrom nach Norden gerichtet ist und eine Sandwanderung zum und über den großen Vogelsand bewirkt. Dieser Vorgang wird ebenfalls durch die Rechtsablenkung begünstigt. Allgemein werden durch den Watabbruch vor Neuwerk die Breite und damit der Durchflußquerschnitt des Stromes vergrößert und die Strömungsgeschwindigkeiten kleiner. Als Folge treten Ablagerungen auf, die aus dem Sand entstehen, den die Flutströmung in der einen und die Ebbeströmung in der anderen Richtung verfrachtet.

Mit der Zunahme der Einbuchtung, die aus dem fortschreitenden Watabbruch vor Neuwerk entsteht, verlagern sich die Hauptströmungen allmählich nach Norden und führen zu einer Abspaltung der Ablagerung. Es entsteht ein Mittelsand, der entsprechend der Strömungsverlagerung an der Südseite anwächst und an seiner Nordseite abgetragen wird, so daß daraus im ganzen eine Südwanderung des Mittelsandes entsteht. Weiterhin schaffte sich der behinderte Ebbestrom einen Durchbruch zwischen dem Großen Vogelsand und dem Gelbsand nach der Nordereibe. Dieser Durchbruch, das Lüchterloch, besteht aber nicht lange, denn nach dem Verlanden der Stromrinne vor dem Neuwerker Watt, in der die Wasserbewegung mit der Zunahme der Einbuchtung immer schwächer wird und dem gleichzeitigen Anlegen des Mittelsandes an das Watt, verlandet auch die Durchbruchsrinne.

Diese von Hensen ermittelten Vorgänge lassen sich anhand des alten Kartenmaterials in viermaliger Wiederholung nachweisen. Es hat ein Anschluß des Mittelsandes an das Neuwerker Watt stattgefunden:

1. am Ende des 16. Jahrhunderts (nach 1588)
2. am Ende des 17. Jahrhunderts (um 1700)
3. am Ende des 18. Jahrhunderts (vor 1787)
4. am Ende des 19. Jahrhunderts (um 1880)

Soweit die Karten ausweisen, haben die Fahrwassertiefen im Laufe der periodischen Entwicklung im allgemeinen mindestens 10 m unter dem mittleren Tideniedrigwasser (MTnw) betragen, nur auf kurzen Strecken haben sie sich zu ungünstigen Zeitpunkten bis auf 9 m ermäßigt. Vertiefungen auf den verbesserungsbedürftigen Strecken suchte man seit Anfang dieses Jahrhunderts meist ohne rechten Erfolg durch Baggerungen zu erreichen. Mitunter waren die Verhältnisse nach der Baggerung schlechter als vorher oder besserten sich vorübergehend ohne diese. Es stand fest, daß sich ohne stabilisierende Regulierungsbauwerke an den natürlichen, sich über das große Gebiet der Elbmündung abspielenden Naturvorgängen nichts ändern konnte. Eine durchgehende Wassertiefe von 11 m unter MTnw, die nach dem beim Übergang der Wasserstraßen von den Ländern auf das Reich abgeschlossenen Staatsvertrag angestrebt werden sollte, wurde nicht erreicht.

Bild 8. Zeitliche Veränderung des Volumens verschiedener Sände [7]

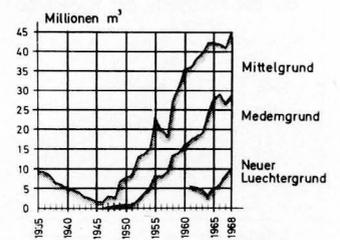
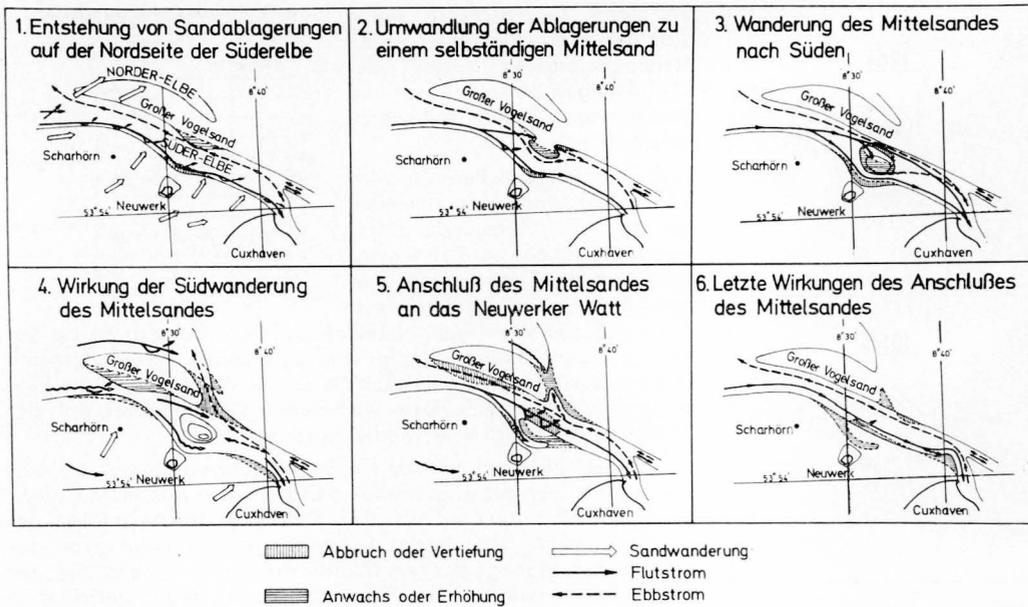


Bild 9. Periodischer Verlauf der Umbildung von Sänden und Stromrinnen in der Außenelbe [2]



Bei der Suche nach geeigneten künstlichen Eingriffen zur Verbesserung der Fahrwasserverhältnisse entstand der schon unter 2. erwähnte Plan für den Bau des von der Kugelbake ausgehenden Leitdammes, der in schlanker Kurve zum Mittelgrund führen und später unter Ausnutzung der geringen Tiefen auf diesem, bis Scharhörn verlängert werden sollte. Die für den Flutstrom gedachte Regelung sollte in der Hauptrinne auch den Ebbestrom aufnehmen. Es wurde erwartet, daß damit die nachteilige Überkreuzung von Flut- und Ebbestrom unterhalb der Kugelbake unterbunden wird.

Die 1939 begonnenen, jedoch Anfang des Krieges wieder eingestellten Dammbauarbeiten sind erst 1949 wieder aufgenommen worden. Das zunächst gesteckte Ziel für eine Länge von 9,2 km wurde 1968 erreicht. Die Kronenhöhe von km 0 bis km 3 beträgt 1,80 m über KN, dann folgt ein schräger Abfall bis km 5 auf die Höhe von 0,60 m über KN und von km 5 bis km 9,2 verläuft die Dammkrone horizontal auf 0,6 m über KN. Der neue Dammlängsschnitt wurde nach Modellversuchen bei der Bundesanstalt für Wasserbau in Hamburg-Rissen gebaut.

Die Veränderung der Morphologie in der Außenelbe in diesem Jahrhundert soll durch den Vergleich der Karten für die Jahre 1910, 1925, 1939, 1956 und 1964 (Bild 7) aufgezeigt werden. Als markante Tiefenlinie ist die dem augenblicklichen Ausbau zugrundeliegende 12-m-Linie unter Karten-Null eingetragen. Diese Zeitabschnitte sind gleichzeitig Stufenfolgen für den Ablauf der historischen Versuche im Modell, um einen entsprechenden Morphologiemastab bestimmen zu können.

Ausgehend von km 715, etwas oberhalb Glameyer-Stack, ist in dem Tiefenplan von 1910 ein durchgehendes 12 m tiefes Fahrwasser vorhanden, das nur zu beiden Seiten des Mittelgrundes Verengungsstellen aufweist. Der Mittelgrund hat sich weitgehend dem Südufer genähert, er ist nur durch das Neuwerker Fahrwasser vom Duhner Watt getrennt. Vom Vogelsand ausgehend, beginnt eine neue Südwanderung eines Sandes. Allgemein sind die Sände des Vogel- und Gelbsandes klein. Das Klotzenloch, die Verbindung der Unterelbe in Richtung des Unterlaufes der Oste um den Medemsand herum zur Außenelbe erscheint ausgeprägt.

In dem Tiefenplan von 1925 ist die Verschlechterung der Fahrwasserverhältnisse deutlich zu erkennen. Die 12 m Tiefenlinie ist zweimal unterbrochen. Vogelsand und Gelbsand sind größer geworden und von hier ausgehend ist die weitere Südverlagerung eines Sandes zu bemerken. Nach der Teilregulierung am Osteriff wird das Klotzenloch merklich flacher.

Im Jahre 1939 hat die Verschlechterung weiter zugenommen. Die Sandbildung südlich des Vogelsandes ist weiter angewachsen. Dieser „Neue Luechtergrund“ zeigt eine beginnende Ablösung vom Vogelsand. Er ist auch weiter stromauf gewandert und sucht offenbar einen Anschluß an den Mittelgrund. Mit der Eintiefung

der Unterelbe versandet das Klotzenloch zunehmend. Nördlich der Ostemündung bildet sich der Neufelder Sand.

Die Karte von 1956 zeigt im Seebereich geringe Verbesserungen. Die Sinkstücke für den Leitdamm waren zu dieser Zeit etwa bis km 9,2 ausgelegt, der Damm selbst aber nur bis km 1,8 fertiggestellt. Teile der vom Vogelsand ausgegangenen Sandwanderung haben offenbar den Anschluß an den Mittelgrund gefunden. Im Fahrwasserbereich erscheint eine Zweiteilung der Rinnen um den Neuen Luechtergrund. Gelbsand und Vogelsand sind weiter angewachsen, wobei das Südufer nach Norden zurückgewichen ist. Wie später noch nachgewiesen wird, scheinen hier Gleichgewichtsverhältnisse zwischen Flutwassermenge und Fließquerschnitt eine Rolle zu spielen, denn mit dem Baufortschritt des Leit-

dammes weicht das Profil nach Norden aus. Bemerkenswert ist ferner die weitere Verlandung des Klotzenloches und die Vergrößerung des Neufelder Sandes.

Im Jahre 1964 kann man bereits von einer hydraulischen Wirksamkeit des Leitdammes sprechen, der mit Ausnahme einer Öffnung an der Kugelbake auf ganzer Länge eine Höhe von 0,6 m über Karten-Null hatte. Dieser Plan zeigt die Zunahme der Eintiefung einer Rinne vor dem Gelbsand. Der Neue Luechtergrund ist isoliert. Seit dieser Zeit führt das eine Fahrwasser nördlich, das andere südlich um den Neuen Luechtergrund herum.

Das Neuwerker Fahrwasser fängt die nördlich gerichtete Sandwanderung über das Watt auf, es verlandet merkbar. Der Vogelsand ist im Norden angewachsen, das Klotzenloch an der Elbseite zugesandet und der Neufelder Sand größer geworden.

Wie die Beobachtungen ab 1964 bis heute zeigen, tritt allgemein in der Außenelbe eine Stabilisierung der Verhältnisse ein. Die nördlichen und südlichen Wattkanten haben sich nur wenig verändert. Mit einer allgemeinen neuerdings beobachteten Verkleinerung des Gelbsandes und Baggerungen in der Mittelrinne verwildert die Norderrinne. Diese Tendenz zeichnet sich anhand der Kartenvergleiche für die Jahre 1966 bis 68 in Bild 10 [7] sehr deutlich ab. Zwischen den Tonnen 7 und 7a hat sich ein hakenförmiger Ausläufer nach Westen vorgeschoben, gleichzeitig ist die Nordkante des Neuen Luechtergrundes nach Norden gewandert, wodurch das Fahrwasser der Norderrinne erheblich eingeschnürt wird.

Von besonderer Bedeutung für die morphologische Entwicklung dieses Fahrwasserabschnittes in der Außenelbe ist der jeweilige Zustand des nach dem Bau des Leitdammes sich ständig verändernden Mittelgrundes. Die Ansammlung dieser Sandmassen über der 6 m Tiefenlinie von 1935 bis 68 ist in Bild 8 enthalten. Es ist zu erkennen, daß mit dem Baufortschritt des Leitdammes bis 1964 ein ständig steigender Zuwachs erfolgte, danach trat ein Gleichgewichtszustand ein und erst ab 1968 ist wieder ein Ansatz für eine steigende Tendenz erkennbar.

In diesem Zusammenhang interessiert auch die Veränderung der Sandmassen des Neuen Luechtergrundes. Die seit 1961 registrierten Beobachtungen, die ebenfalls in Bild 8 enthalten sind und das jeweilige Volumen über der 10 m Linie ausweisen, zeigen bis 1964 eine geringe Abnahme und ab 1964 eine ständige Zunahme.

Zusammenfassend läßt sich für diese Stromstrecke feststellen, daß die großräumige Entwicklung offenbar weiter günstig abläuft. Die beginnende Aufsandung des Neuwerker Fahrwassers und auch die deutliche Verwilderung der Norderrinne liegt im Interesse der weiteren Entwicklung der Mittelrinne. Sie hat auch seit Jahren kaum ihre Lage verändert, zumindest nicht im mittleren und westlichen Teil.

Bild 10. Die Fahrrinnen in der Außenelbe von 1966-68

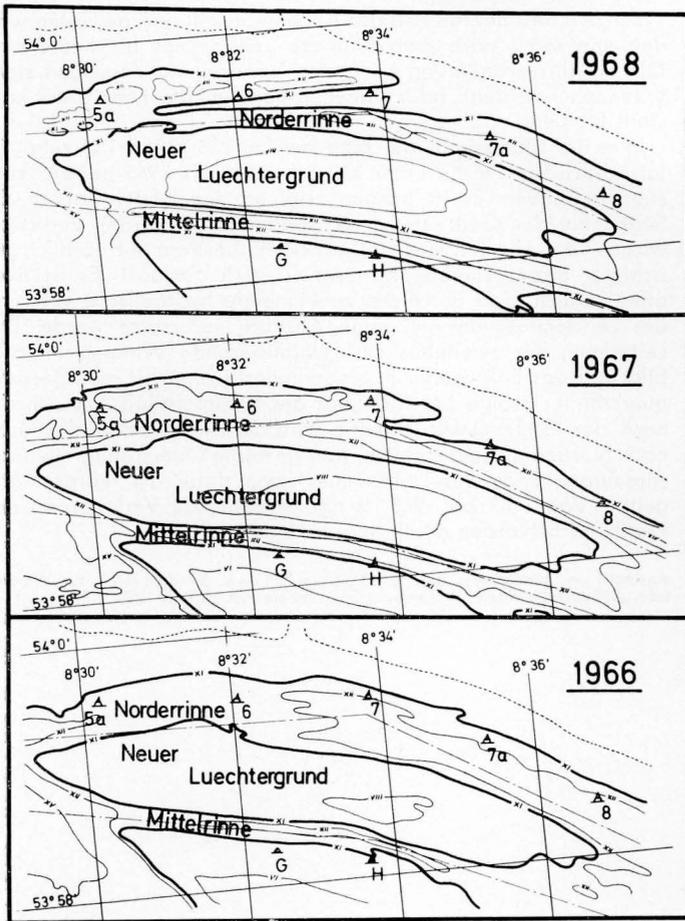
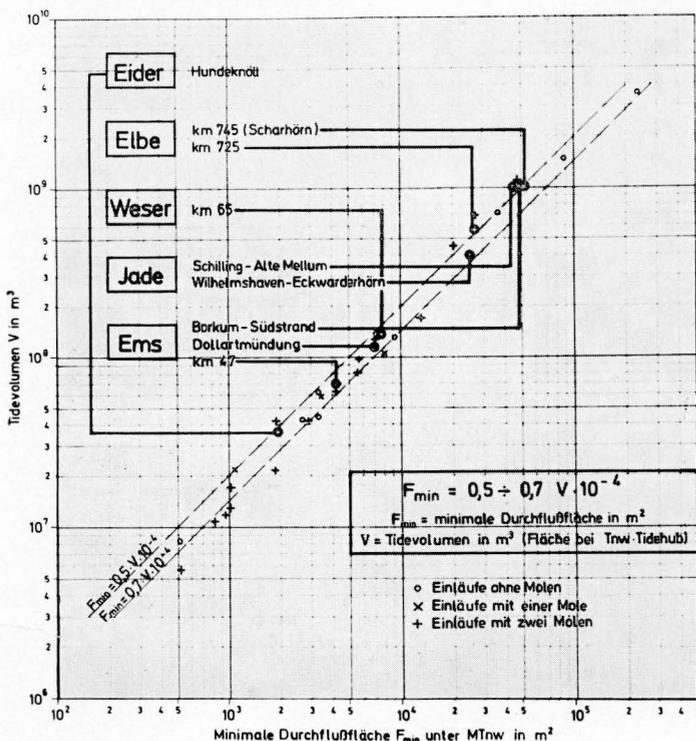


Bild 11. Abhängigkeit des minimalen Querschnittes vom Tidevolumen



Zahlentafel I. Tidevolumen und minimale Durchflußfläche verschiedener Ästuarien, Buchten oder Häfen des amerikanischen Kontinents und der deutschen Nordseeküste

Bezeichnung (Ästuar, Bucht oder Hafen)	Örtlichkeit	Tidevolumen V in m³	minimale Durchflußfläche F _{min} in m²
1	2	3	4
a) ohne Molen			
Delaware Bay	Atlantik	3,54 · 10 ⁹	2,32 · 10 ⁵
Golden Gate	Pazifik	1,445 · 10 ⁹	8,71 · 10 ⁴
Elbe, km 745 Scharhörn	Nordsee	1,02 · 10 ⁹	5,05 · 10 ⁴
Ems, Borkum Südstrand	Nordsee	1,01 · 10 ⁹	4,80 · 10 ⁴
Jade, Schillig — Alte Mellum	Nordsee	1,00 · 10 ⁹	4,50 · 10 ⁴
Willapa	Pazifik	7,08 · 10 ⁸	3,66 · 10 ⁴
Elbe, km 725	Nordsee	5,60 · 10 ⁸	2,70 · 10 ⁴
Jade, Wilhelmshaven — Eckwarderhörn	Nordsee	4,00 · 10 ⁸	2,50 · 10 ⁴
Weser, km 65	Nordsee	1,365 · 10 ⁸	7,75 · 10 ³
North Edisto River	Atlantik	1,295 · 10 ⁸	9,25 · 10 ³
Dollartmündung	Nordsee	1,15 · 10 ⁸	7,00 · 10 ³
Ems, km 47	Nordsee	7,00 · 10 ⁷	4,20 · 10 ³
Fire Island	Atlantik	6,18 · 10 ⁷	3,31 · 10 ³
Tomales Bay	Pazifik	4,47 · 10 ⁷	3,34 · 10 ³
Jones Inlet	Atlantik	4,25 · 10 ⁷	2,69 · 10 ³
Eider Hundeknöll	Nordsee	3,80 · 10 ⁷	1,96 · 10 ³
Punta Banda	Pazifik	8,47 · 10 ⁶	5,09 · 10 ²
b) mit einer Mole			
Rockaway	Atlantik	1,05 · 10 ⁸	8,00 · 10 ³
Tillamook	Pazifik	5,97 · 10 ⁷	3,43 · 10 ³
East Rockaway	Atlantik	2,155 · 10 ⁷	1,07 · 10 ³
c) mit zwei Molen			
Columbia	Pazifik	1,081 · 10 ⁹	4,72 · 10 ⁴
Grays Harbor	Pazifik	6,88 · 10 ⁸	2,65 · 10 ⁴
Galveston	Golf von Mexiko	4,50 · 10 ⁸	2,04 · 10 ⁴
Charleston	Atlantik	1,63 · 10 ⁸	1,34 · 10 ⁴
Humboldt	Pazifik	1,24 · 10 ⁸	7,01 · 10 ³
San Diego	Pazifik	9,55 · 10 ⁷	5,74 · 10 ³
Coos Bay	Pazifik	8,05 · 10 ⁷	5,68 · 10 ³
Umpqua	Pazifik	6,24 · 10 ⁷	4,29 · 10 ³
Absecon	Atlantik	4,20 · 10 ⁷	2,91 · 10 ³
Morichee	Atlantik	4,45 · 10 ⁷	1,895 · 10 ³
Yaquina	Pazifik	2,19 · 10 ⁷	1,84 · 10 ³
Nahalem	Pazifik	1,70 · 10 ⁷	1,04 · 10 ³
Siuslaw	Pazifik	1,31 · 10 ⁷	1,02 · 10 ³
Mission Bay	Pazifik	1,19 · 10 ⁷	9,66 · 10 ²
Coquille	Pazifik	1,10 · 10 ⁷	8,38 · 10 ²
Newport-Beach	Pazifik	5,60 · 10 ⁶	5,47 · 10 ²

6. Die morphologische Gleichgewichtstheorie als mögliche Grundlage für zukünftige Regelungsarbeiten im Seegebiet

Naturgemäß müssen sich für Ästuarien oder Häfen und Buchten an sandigen Küsten unter Tideeinfluß langperiodische Gleichgewichtsbedingungen zwischen dem Tidevolumen, d. h. dem Durchfluß und dem Durchflußquerschnitt einstellen. O'Brien [4] fand dies bei der Untersuchung verschiedener Ästuarien des amerikanischen Kontinents bestätigt.

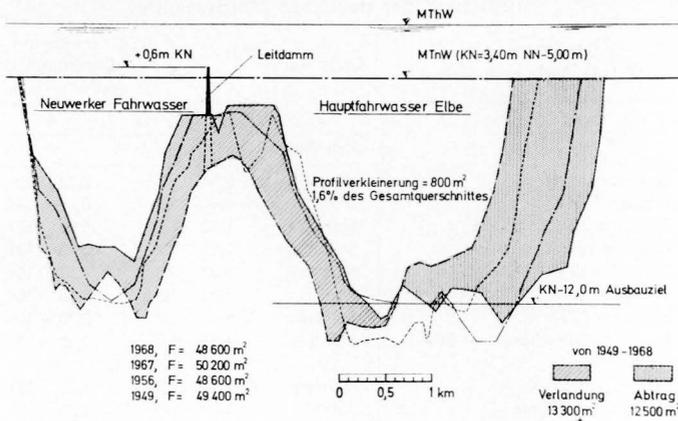
Die Liste in Zahlentafel I enthält Angaben über die Tidevolumen oder Flutwassermengen und die minimalen Durchflußflächen unter dem mittleren Tideniedrigwasser, Meeresspiegel oder auch Karten-Null.

Die Angaben O'Briens sind durch bekannte Verhältnisse unserer Flüsse an der Nordseeküste ergänzt worden. Die Einläufe sind in Einläufe ohne Molen, mit einer Mole und mit zwei Molen unterteilt. Die graphische Auftragung der Ergebnisse in Bild 11 zeigt, daß ein Gleichgewichtsverhältnis für Einläufe an sandigen Küsten mit beweglicher Sohle unter Tideeinwirkung vorhanden sein muß, ohne daß es hierbei eine Rolle spielt, ob sie durch Molen geschützt sind. Es besteht eine Abhängigkeit zwischen dem minimalen Querschnitt und dem Tidevolumen. Die Gleichung

$$F_{min} = 0,5 \div 0,7 V \cdot 10^{-4}$$

worin F_{min} die minimale Durchflußfläche in m² und V das Tidevolumen in m³ sind, berücksichtigt einen geringen Streubereich,

Bild 12. Querprofil der Elbe bei km 736, Profilverlagerung nach Norden mit zunehmendem Baufortschritt des Leitdammes



der wahrscheinlich nach Örtlichkeit und damit nach Sanddrift, Kornfraktion und andere äußeren Einflüssen verschieden sein kann. Für die Nordsee ist F_{min} $0,5 \div 0,6$ anzusetzen, wobei der Faktor 0,5 für die weiter seewärts liegenden Querschnitte mit feinerer Kornfraktion des Sohlmaterials zu wählen ist, während der

Faktor 0,6 weiter stromauf liegende Querschnitte mit größerem Material berücksichtigt.

Für den besonderen Fall der Außenelbe soll nachgewiesen werden, inwieweit nach dem Bau des Leitdammes bis heute eine Querschnittsveränderung bzw. eine Verlagerung desselben stattgefunden hat, denn nach dieser Theorie müßte F_{min} etwa konstant bleiben.

Wie der Querschnitt der Elbe bei km 736 (Bild 12) zeigt, ist tatsächlich die Fläche unter KN von 1949 bis 1968 nahezu konstant geblieben. Es ist bekannt, daß in den letzten Jahren die Südkanten des Gelb- und Vogelsandes nach Norden zurückgewichen sind. Hierfür wird vielfach der Ebbestrom mit nördlich gerichteter Stromkomponente verantwortlich gemacht. Es ist aber offensichtlich, daß durch die zunehmende hydraulische Wirkung des Leitdammes der genannte Abbruch verursacht wurde. Der Leitdamm, der zweifellos eine stabilisierende Wirkung im Hinblick auf das Fahrwasser hat, verkleinerte zunächst den Gesamtquerschnitt. Infolge der Mobilität des Sohlmaterials hat sich die nach der Gleichgewichtstheorie erforderliche Querschnittsfläche nach Norden ausgedehnt. Der hier gezeigte Querschnitt, etwa am seeseitigen Ende des Leitdammes kann dafür als repräsentativ gelten. Von 1949 bis 1968 ist die zunehmende Verlagerung des Profils nach Norden deutlich zu erkennen.

Anschrift des Verfassers: Ing. (grad.) Egon Giese, Bundesanstalt für Wasserbau, Außenstelle Küste, 2 Hamburg 56, Wedeler Landstraße 153