

Die Stabilität von Tiderinnen und ihre Abhängigkeit von Strombaumaßnahmen

Von Volker Barthel

Zusammenfassung

Es haben sich bereits viele Autoren mit der Sandwanderung vor der deutschen Küste der Nordsee beschäftigt. Besonders die Bewegung der Sandbänke und Tiderinnen im Weser-ästuar war Objekt einiger Arbeiten mit verschiedenen Resultaten.

Systematische Untersuchungen an ausgewählten Querschnitten zeigen, daß die Wanderung der Bänke und Rinnen in einigen Bereichen sich stetig fortsetzt. Die wichtige Schifffahrtsrinne hat jedoch in den letzten 30-40 Jahren eine gewisse Stabilität erhalten, weil die Sandwanderung in einer anderen Form als früher vor sich geht.

Diese Erscheinung fällt zusammen mit umfangreichen und entscheidenden Strombaumaßnahmen im inneren Teil der Außenweser.

Strömungsmessungen im Untersuchungsgebiet weisen darauf hin, daß eine konzentrierte Tideströmung in den tiefen Rinnen für gute Selbstströmung und damit ausreichende Tiefe für die Schifffahrt sorgt. Es erscheint nach den vorliegenden Untersuchungen sicher, daß die gegenwärtig nur noch unbedeutende Wanderung des Hauptschiffahrtsweges keine umfangreichen Maßnahmen im Bereich der Schifffahrt, der Baggerei und des Seezeichenbaues mehr erfordert.

Summary

Many authors have dealt with the migration of sand off the German North Sea coast. In particular, the movement of sandbanks and deep channels in the Weser estuary has been the subject matter of several investigations providing different results.

Systematic investigations of selected cross-sections show that the movement steadily continues in some regions. The important shipping channel, however, has maintained a certain stability during the last 30 to 40 years, because the migration of sand occurs in a manner other than that of former times.

This phenomenon coincides with the extensive and decisive river improvement measures in the inner part of the Weser estuary.

Current measurements in the investigation area demonstrate that concentrated tidal currents in the deep channels permit good self-evacuation of sand and, thereby, guarantee a sufficient clearance for shipping purposes.

After these investigations, it appears certain that the present still only negligible shifting of the main channel does not require extensive measures in the field of shipping, dredging, and navigation marks.

Inhalt

1. Einführung	145
2. Morphologische Veränderungen	146
3. Strömungsmessungen	150
4. Ergebnisse	153
5. Schriftenverzeichnis	154

1. Einführung

Die Mündungen der schiffbaren Flüsse der Bundesrepublik Deutschland im Bereich der Nordsee sind tief einschneidende Buchten mit einem Untergrund aus feinsandigem Material. Auf Abb. 1 kann man einen Teil der Deutschen Bucht mit den großen Tide-ästuarien Ems, Jade, Weser und Elbe sehen. Das Untersuchungsgebiet, das im folgenden behandelt werden soll, liegt innerhalb des Weserästuars.

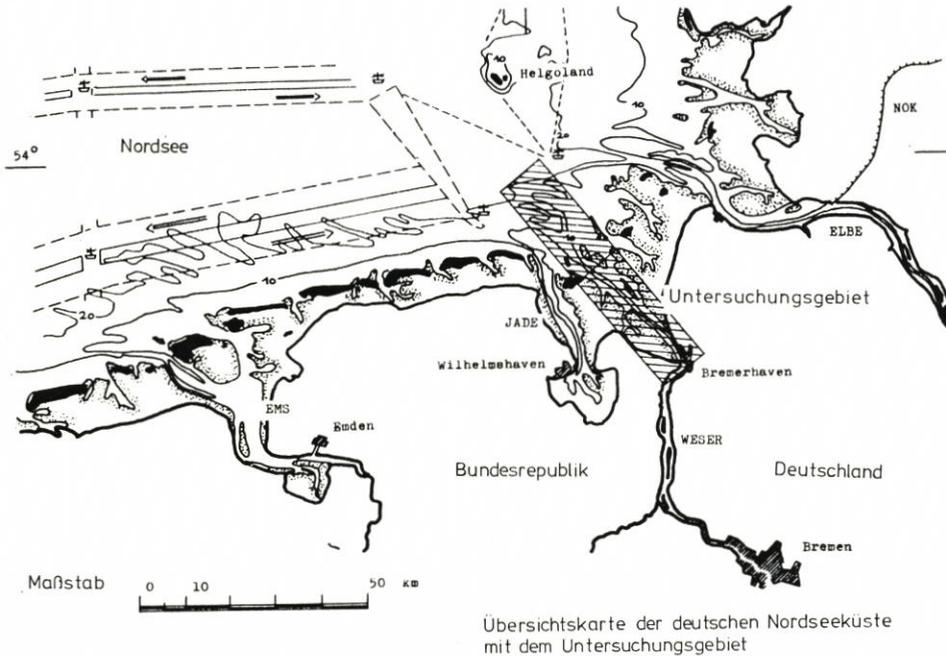


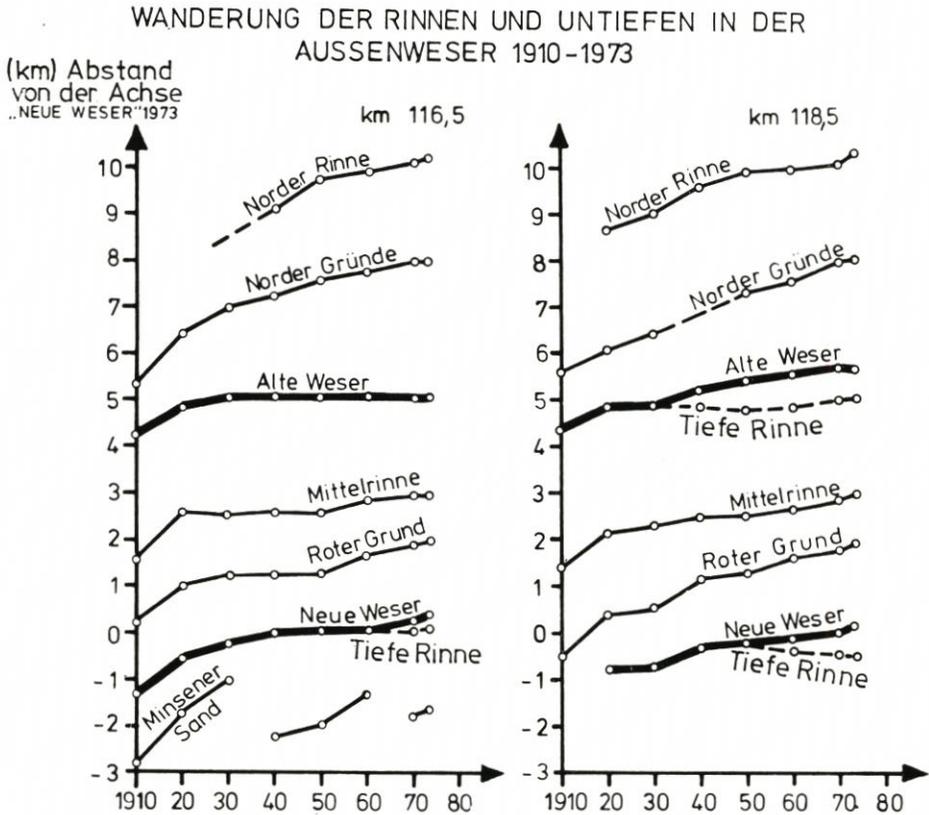
Abb. 1

Einige Erklärungen zur Situation: Die Außenweser hat eine Länge von etwa 60 km und erstreckt sich von der offenen See bis Bremerhaven, einem bedeutenden Umschlagshafen für Erz, Autos, Südfrüchte, Stückgut u. a. m. Außerdem besitzt Bremerhaven eins der größten und modernsten Containerterminals Europas. Etwa 65 km stromauf liegt Bremen mit seinen wichtigen Häfen an der Unterweser. Zwischen Bremen und Bremerhaven befinden sich außerdem noch die Häfen von Nordenham und Brake. Schiffe mit einem Tiefgang bis zu 44" können Bremerhaven anlaufen, bis Bremen ist ein Tiefgang von 35" möglich.

Die atlantische Tidewelle dringt in einer breiten Front in die Nordsee ein und hat ihren größten Tidehub auf der rechten Seite, d. h. an der schottischen Küste. Infolge der Reflexion und unter dem Einfluß des Corioliseffektes bildet sich in der südlichen Nordsee eine entgegen dem Uhrzeiger drehende Tidewelle (Amphidromie) aus. Die vorherrschenden Tideströmungen gehen während der Flut in dieselbe Richtung, die Ebbeströmungen haben eine vorherrschende Richtung von Osten nach Westen. Die Tidewelle dringt in die Ästuarieen ein und wird dort entsprechend der lokalen Morphologie des einzelnen Ästuarieen reflektiert, absorbiert und deformiert. Diese Erscheinungen sind jedoch gut bekannt.

2. Morphologische Veränderungen

Die nachgewiesene, in nordöstlicher Richtung verlaufende Sandwanderung vor der deutschen Küste, die durch Seegang und Strömungen hervorgerufen ist, bringt Material aus dem Reservoir der Nordsee und erodierten Sand von den Ostfriesischen Inseln. Dieses Material überquert die Ästuarie und erzeugt einen andauernden Bewegungsvorgang der Rinnen und Sände im Riffgebiet.



In Abb. 2 kann man die Wanderung der Rinnen und Sände in zwei Querschnitten der Außenweser von 1910 bis 1975 sehen. Die zwei bedeutenden schiffbaren Tiderinnen mit Tiefen bis zu 20 m sind die Neue Weser und die Alte Weser. Die sie umgebenden Sandbänke erheben sich bis zu einer Höhe von 2,5 m unter Wasseroberfläche. Die weniger bedeutenden Rinnen sind nicht unmittelbar mit dem weiteren Verlauf der Weser verbunden. Die Grafik zeigt die Bewegung der Schwerachsen der bedeutendsten Sandbänke und Rinnen, bezogen auf eine feste Linie. Die Bewegung kann man ebenso auf einer vereinfachten Darstellung in Abb. 3 sehen. Es sind die Umrißlinien der 10-m-Linie in der Neuen Weser in den Zuständen von 1940, 1960 und 1975 aufgetragen. Die mittlere Wandergeschwindigkeit beträgt

- auf der Westseite: rd. 20 m pro Jahr,
- auf der Ostseite: rd. 60 m pro Jahr i. Durchschnitt.

Wegen dieser augenscheinlichen und nachweisbaren Wanderung mußten die schiffbaren Rinnen, die Tonnen und die festen Seezeichen (z. B. Leuchttürme, Richtbaken usw.) in der Vergangenheit häufig verlegt bzw. aufgegeben werden.

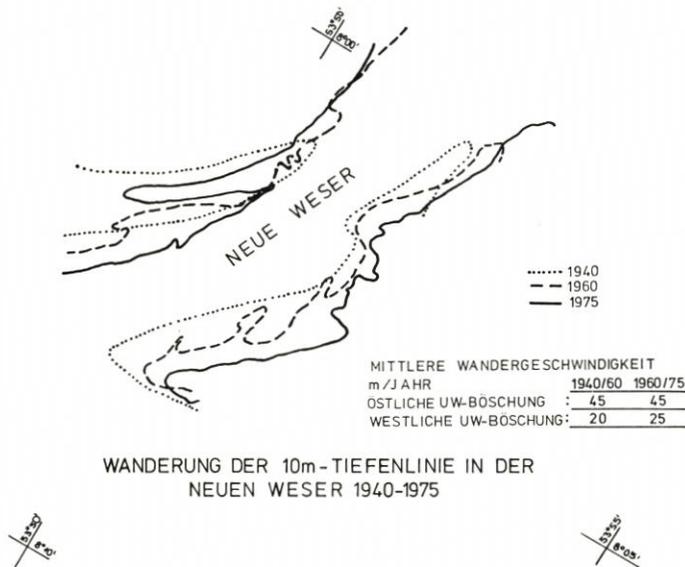


Abb. 3

Die Gesetzmäßigkeiten dieser Sandwanderung im Riffbereich sind bereits von mehreren Autoren behandelt worden (GÖHREN, 1965; PLATE, 1935; POPPEN, 1912). Die Untersuchungen brachten verschiedene Resultate: Bei einigen wurde festgestellt, daß eine Sandbank 60 bis 70 Jahre braucht, um die Entfernung zur nächsten zurückzulegen. PLATE (1935) spricht von der „Wiederkehr ähnlicher Formen“ in der Riffzone. GÖHREN (1965) bringt eine ausgedehnte Wertung aller dieser Untersuchungen und zeigt, daß eine Wiederkehr ähnlicher Zustände alle 110 bis 120 Jahre wahrscheinlich ist.

Es gibt Karten der Außenweser bis ins Jahr 1859 zurück, die ausreichend genau für eine generelle Untersuchung der Sandwanderung im Riffgebiet sind. Seit 1910 sind die Karten jedoch so genau, daß man der Bewegung einzelner Querschnitte folgen kann. Nach einer umfassenden Untersuchung der morphologischen Änderung ab 1910 bis heute ergibt sich, daß die Sandwanderung in den entscheidenden Bereichen des Riffgebiets heute anders als früher vor sich geht. Diese Erkenntnis scheint von wesentlicher Bedeutung für die Schifffahrt, den Bau von Seezeichen und die Baggerei zu sein.

In früheren Zeiten wurde das Eindringen der Tidewelle im Riffbereich durch ein Labyrinth von flachen Kanälen und Sandbänken verzögert, die über das ganze Ästuar verteilt waren. Der Sand, der von West nach Ost wanderte, überquerte das Ästuar in großen Bänken und Unterwasserdünen, deren Krone oft nur 2–3 m unter der Wasseroberfläche lag. Diese wellenförmige Bewegung schien zu einer Wiederkehr gleicher Zustände in der Morphologie in einer Periode von 110–120 Jahren zu führen. Die Gesetzmäßigkeit in der Wiederkehr gleicher Zustände erforderte jedoch eine Entwicklung, die unbeeinflusst von allen künstlichen Maßnahmen im Tidegebiet war.

Eine neuere und gründliche Untersuchung der Entwicklung in 8 Querschnitten im

Riffgebiet zeigt, daß die Wanderung der großen Sandbänke in Teilen der Querschnitte im Zeitraum 1920–1930 fast zum Stillstand kommt. In Abb. 2 kann man diesen Effekt besonders in der Neuen und in der Alten Weser sehen. Der Anstieg der Kurven für die Neue und die Alte Weser geht gegen Null, während er in der Zeit zwischen 1859 und 1920 stetig war. Die Ergebnisse der anderen Querschnitte zeigen den gleichen Trend.

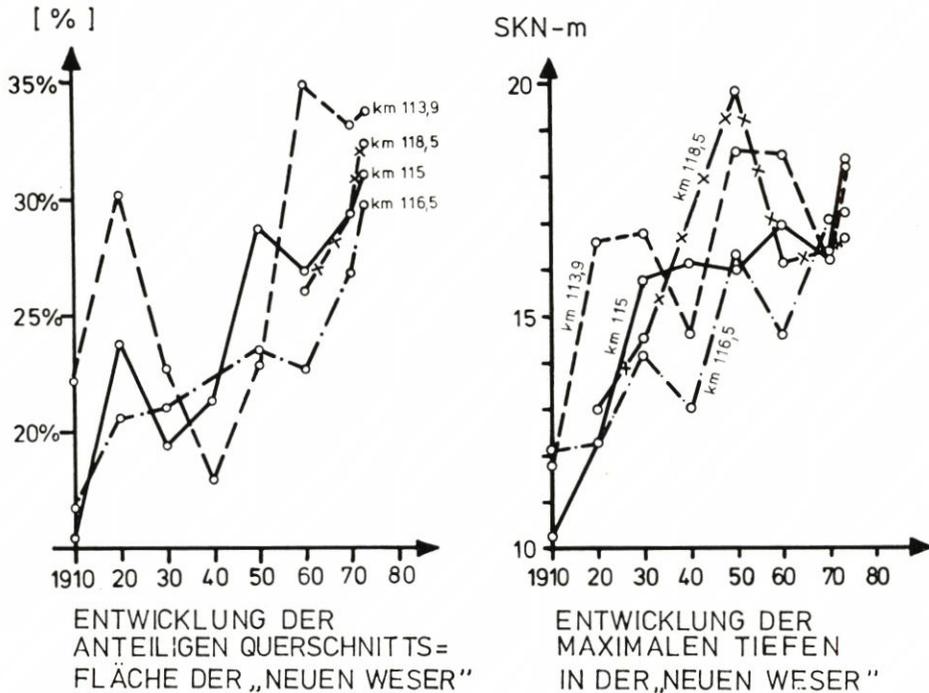


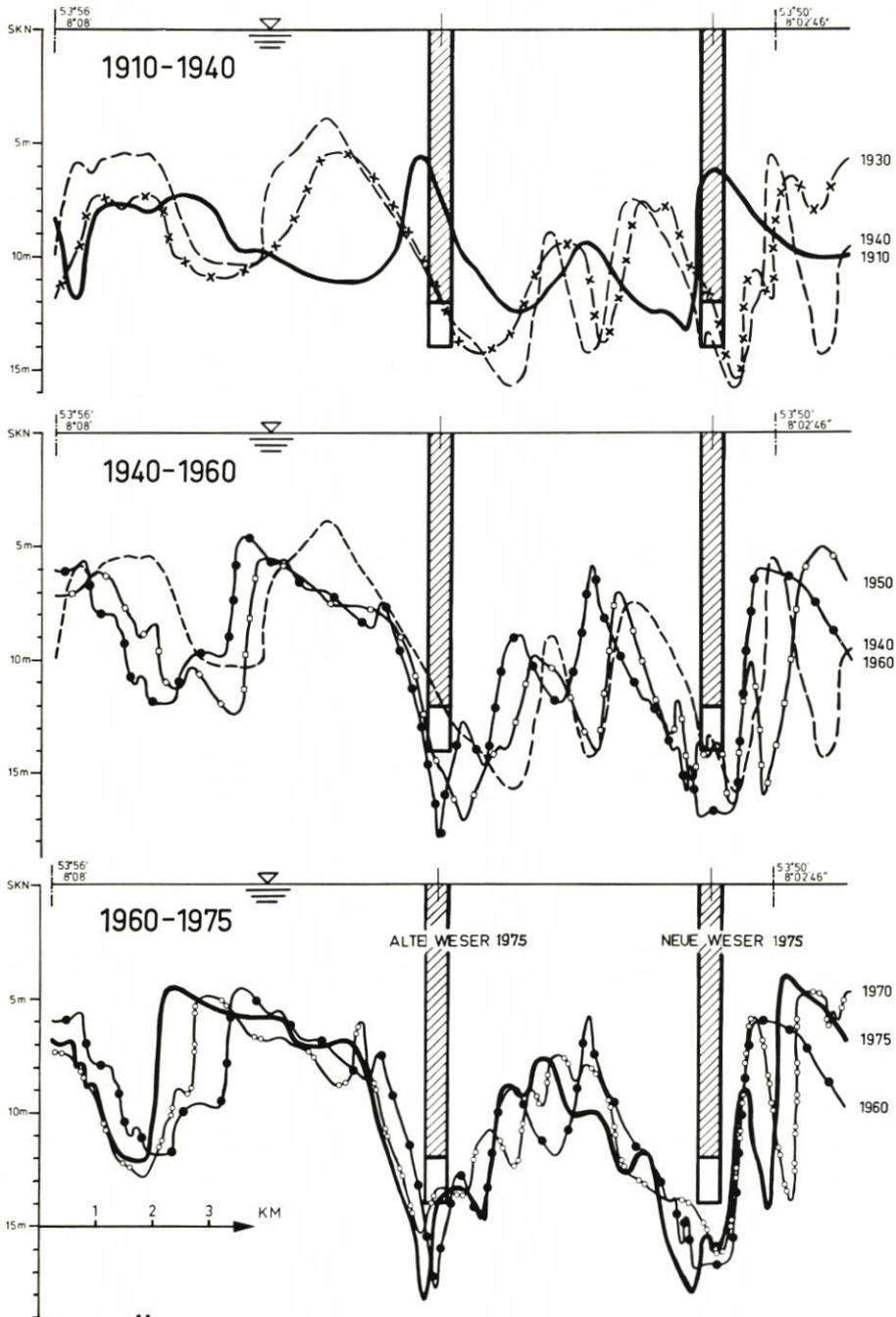
Abb. 4

Abb. 4 zeigt die Entwicklung der Rinne Neue Weser (NW). Im linken Teil sieht man, daß die anteilige Querschnittsfläche der NW seit 1930 von 21 auf 33 % im Mittel angestiegen ist. Die Entwicklung der max. Tiefen in der NW zeigt im rechten Teil ebenfalls eine ansteigende Tendenz. Im Bereich der AW ist dieses nicht so ausgeprägt.

In Abb. 5 ist für Außenweser km 115 die Entwicklung dargestellt, die sich in fast allen sorgfältig untersuchten Querschnitten in ihrer chronologischen Aufeinanderfolge zeigte:

Vor 1920/30 überqueren große Sandbänke das Ästuar und führen zu einer dauernden Änderung der Schifffahrtswege und zum Wandern der Sandbänke zwischen ihnen. Von diesem Zeitpunkt an ändert sich jedoch das Verhalten. Die Unterwasserböschungen, die sich von West nach Ost der tiefen Rinne nähern, werden steiler; eine schmale Unterwasserbank löst sich von diesem Abhang und bewegt sich mit schnell abnehmender Größe bis zur Rinnensohle der NW, wo sie sich zwischen den dort vorhandenen Großriffeln verliert.

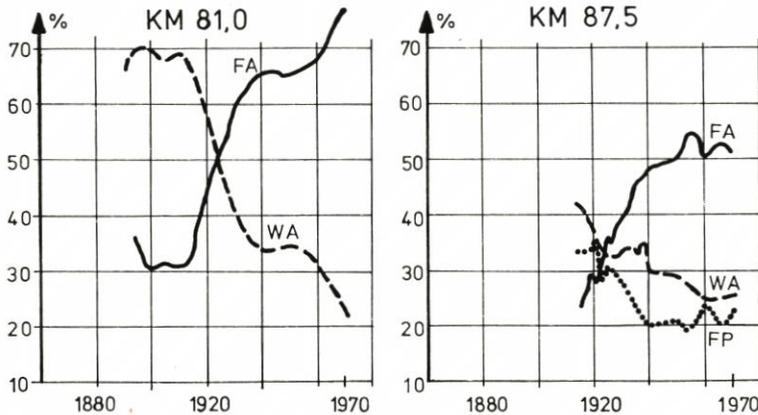
Wie ist diese Änderung im Verhalten zu erklären? Schon 1935 konnte nachgewiesen werden, daß die Bewegung im Riffbereich den Zustand der Schifffahrtsrinne im inneren Teil der Außenweser beeinflusste. Eine gegenseitige Beeinflussung zwischen innerem und äußerem Teil konnte jedoch noch nicht festgestellt werden.



VERÄNDERUNG DES QUERSCHNITTS KM 115
VON 1910-1975

Abb. 5

In der Zeit von 1920 bis 1930 wurden große und bedeutende Strombaumaßnahmen und Baggerungen im mittleren Bereich der AW ausgeführt und beeinflussten die hydraulischen Verhältnisse sehr günstig. Die Verlagerung des schlecht zu unterhaltenden Schiffahrtsweges vom Wurster Arm in den Fedderwarder Arm, der Bau einer großen Anzahl von Buhnen und Leitdämmen sowie Baggerungen führten zu einem weniger behinderten Eindringen der Tidewelle und beeinflussten die Konzentration der Tideströmungen in einer positiven Weise. Die darauf folgende morphologische Entwicklung im Außenweserbereich zeigte, daß die Strombauwerke in Verbindung mit Baggerarbeiten ihre beabsichtigte Wirkung voll erzielt hatten.



ENTWICKLUNG DER ANTEILIGEN QUERSCHNITTE F_0 DER TEILRINNEN „FEDDERWARDER ARM“ (FA), „WURSTER ARM“ (WA) und „FEDDERWARDER PRIEL“ (FP)

Abb. 6

Eine umfassende Untersuchung dieser Vorgänge wurde 1970 bis 1972 durchgeführt; Teilergebnisse sind auf der 14. CEC in Kopenhagen 1974 vorgetragen worden. Die Untersuchungen über die Auswirkung der Strombauwerke der AW auf die morphologische Entwicklung zeigten, daß besonders die günstigen Vorgänge im Rinnenbereich bald nach den entscheidenden Strombaumaßnahmen begannen (HOVERS, 1974). Die max. und mittleren Stromgeschwindigkeiten wuchsen in Bereichen der Rinne um bis zu 30 %. Die Verteilung der Tidewassermengen in Stromspaltungsbereichen ist von entscheidender Bedeutung für das hydraulische Verhalten bzw. die Räumkraft der Einzelquerschnitte. Die Entwicklung dieser Verteilung war ebenfalls zufriedenstellend, wie Abb. 6 in einem Beispiel zeigt. Außerdem wurde der gesamte Fluß bis nach Bremen von 1890 bis heute auf 12 m in der AW bzw. 8,7 m in der UW vertieft. Der mittlere Tidehub in der UW wuchs infolge des Ausbaus, z. B. bei Bremen, von 0,25 m auf 3,50 m.

3. Strömungsmessungen

Da aus früheren Jahren keine Strömungsmessungen aus dem Untersuchungsgebiet vorliegen, ist in diesem Bereich kein Vergleich möglich.

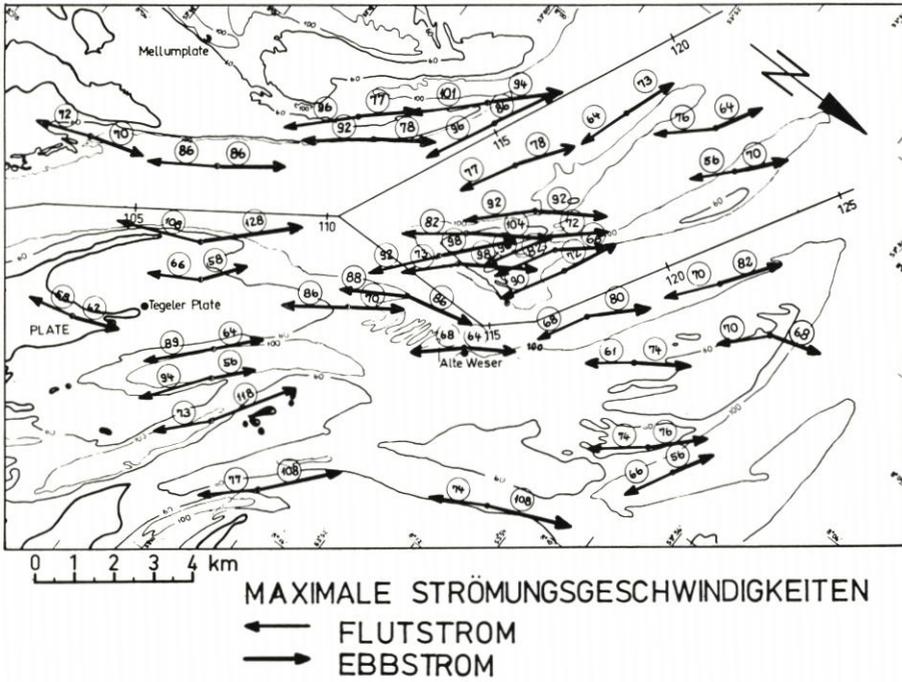


Abb. 7

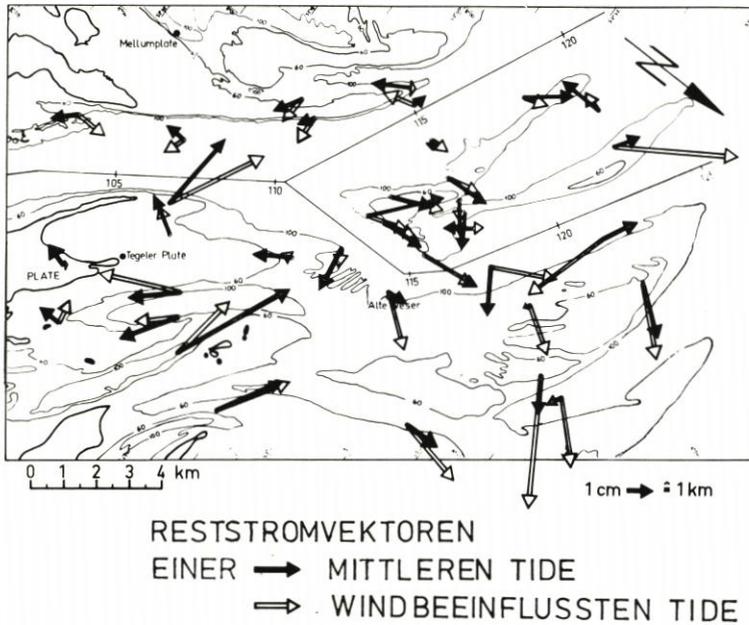


Abb. 8

Es wurden 1973–1975 trotzdem eine große Anzahl von Dauerstrommessungen im Gesamtgebiet durchgeführt, um die heutigen Verhältnisse im Riffgebiet bzw. die Bean-

spruchung der Rinnen und Bänke durch die Strömungen genau zu beschreiben. Alle Strömungsmesser waren etwa 1,5 bis 2,0 m über Grund befestigt, um die bodennahen Strömungen zu erfassen. Die Auswertungsmethode für die Meßwerte, die von einer Kamera aufgenommen werden, ist gut bekannt (GÖHREN, 1965). Dabei wurde besonderer Wert auf die Verhältniswerte

$$\frac{V_{e,max}}{V_{f,max}} \quad \text{und} \quad \frac{SV_e}{SV_f} \quad \text{gelegt. (Abb. 7, 8)}$$

$SV_{e,f}$ = Betrag des Vektors $V_{e,f}$

$$V_{e,f} = \int_{K_{f,e}}^{K_{e,f}} v_i dt$$

Die Interpretation aller Meßwerte führt zu der folgenden Charakteristik der Strömungen im Untersuchungsgebiet: Die Strömungen mit hoher Geschwindigkeit liegen in den tiefen Rinnen, besonders an der Westseite der NW. Die Intensität der Strömungen, d. h. der Betrag der Geschwindigkeit bezogen auf seine Einflußzeit, ist in diesen Gebieten ebenfalls am größten. Die Zeit geringen Sandtransportes ($v \leq 25-30$ cm/s) ist hier sehr kurz (~ 1 Std.) und wächst, je näher man zur Ostseite der Rinne bzw. des gesamten Untersuchungsgebietes kommt (3,5 Stunden).

Die Strömungsrichtungen, die beeinflußt werden durch Wind und Drehtiden, weisen auf die mögliche Transportrichtung des Bodenmaterials. Der Reststromvektor

$$V = \int_{K_e}^{K_e} v_i dt$$

zeigt die Versetzung eines Wasserteilchens während einer Tide. Dabei kann man in Abb. 8 erkennen, daß die Richtungen der Reststromvektoren nur in der NW mit der Richtung der Rinnenachse in etwa übereinstimmen. In den anderen Bereichen, besonders auf den Sandbänken, ist eine entscheidende Versetzung in nordöstliche Richtung zu erkennen. Die Abhängigkeit der Reststromvektoren bzw. ihrer Richtungen von windbeeinflussten Tiden ist sehr stark.

Die Verhältnisse

$$\frac{V_{e,max}}{V_{f,max}} \quad \text{und} \quad \frac{SV_e}{SV_f}$$

die hier nicht im einzelnen aufgeführt werden sollen, zeigen schließlich, daß in der NW die Flutströmungen vorherrschen und in der AW dagegen stärkere Ebbeströmungen vorhanden sind.

Es ist bekannt, daß die Sandwanderung etwa proportional zur 4. bzw. 6. Potenz der Strömungsgeschwindigkeiten ist (DILLO, 1960; GÖHREN, 1968). Daher schließt das Auswertungsprogramm die Berechnung der Sandwanderungskennwerte

$$\sum_{D_f} \frac{1}{(V_f - V_{gr}) \cdot V_f^3} \quad \text{und} \quad \sum_{D_e} \frac{1}{(V_e - V_{gr}) \cdot V_e^3} \quad \text{ein.}$$

V_{gr} = Grenzwert der Geschwindigkeit für den Beginn der Sandwanderung (~ 25 cm/s)

$D_{f,e}$ = Flut- bzw. Ebbestromdauer

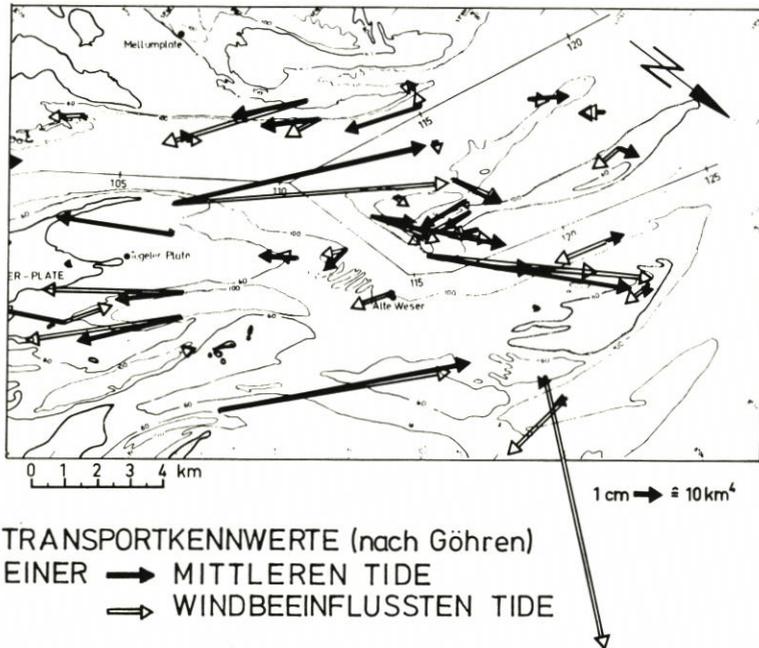


Abb. 9

Abb. 9 zeigt die Resultierenden der Transportkennwerte, die einen weiteren Anhalt für die Richtung und den Betrag der Sandbewegung im Untersuchungsgebiet geben.

4. Ergebnisse

Vergleicht man die Ergebnisse der Strömungsmessungen mit den Ergebnissen der Untersuchungen zur morphologischen Veränderung, so sieht man folgende Vorgänge im Riffbereich:

Angeregt durch Wellenbewegung und bewegt durch Tideströmungen wird der Sand an den steilen Unterwasserböschungen der Neuen und Alten Weser erodiert und überquert die tiefen Rinnen auf ihrem Grund in Form von Großriffeln, die selten die erforderliche Schifffahrtstiefe einengen. Auf dem Rücken der ausgedehnten Sandbänke bewegt sich der Sand im Zickzackkurs mit einer resultierenden Nordostrichtung. Dabei kommt die Bewegung in kleinen Riffeln ebenso vor wie das Wandern größerer Unterwasserdünen. An einigen Stellen erreichen die Unterwasserböschungen eine Geschwindigkeit bis zu 60 m/Jahr. Die mittlere Geschwindigkeit beträgt jedoch 20 bis 30 m/Jahr. Beide tiefen Rinnen ändern ihre Querschnittsform; die wichtige tiefe Schifffahrtstiefe in der NW jedoch ist nahezu stabil.

Neben den Tideströmungen hat besonders die Wellenbewegung einen erheblichen Anteil am Sandwanderungsgeschehen. Deswegen hängen die Wanderrichtung und -geschwindigkeit auch von den jeweiligen Wind- und Seegangsverhältnissen ab. Es wird eine Aufgabe für die nächsten Jahre sein, den Anteil des Seegangeinflusses am Prozeß der Sandbewegung durch Messungen herauszufiltern.

Als Nebenprodukt der Untersuchungen gibt die Darstellung der Umhüllenden eines Querschnitts in verschiedenen Jahren (Abb. 5) einen Anhalt für die Bestimmung des Materials (sedimentiert oder gewachsen), das beim Baggern angefundnen werden kann.

5. S c h r i f t e n v e r z e i c h n i s

- DILLO, H. G.: Sandwanderung in Tideflüssen. Mitt. Franzius-Inst. d. TU Hannover, H. 17, 1960.
- GÖHREN, H.: Beitrag zur Morphologie der Jade- und Wesermündung. Die Küste, H. 13, 1965.
- GÖHREN, H.: Meßwertaufbereitung von Dauerstrommessungen mit Hilfe der elektronischen Datenverarbeitung. Dtsch. Gew.-kdl. Mitt., Jg. 9, H. 2, 1965.
- GÖHREN, H.: Triftströmungen im Wattenmeer. Mitt. Franzius-Inst. d. TU Hannover, H. 30, 1968.
- HOVERS, G.: Morphological Changes in a Fine Sand Tidal Estuary After Measures of River Improvement. Proc. 14th Coastal Eng. Conf. Copenhagen, 1974.
- PLATE, L.: Forschung als Grundlage für den Ausbau der Außenweser. Deutsche Wasserwirtschaft, H. 4, 1935.
- POPPE, H.: Die Sandbänke an der Küste der Deutschen Bucht der Nordsee, Ann. d. Hydrogr., Bd. 40, 1912.
- WSA Bremerhaven: Verschiedene unveröffentlichte Dienstberichte.