

Beobachtungen über den Einfluß des Oberwassers auf die Sandbewegung in der Außenweser

Von Harald Göhren

Inhalt

1. Vorbemerkungen	157
2. Faktoren für die Sandbewegung in Tideflüssen	157
a. Der Tidehub	160
b. Der Windeinfluß	160
c. Das Oberwasser	160
3. Statistische Bearbeitung	160
a. Beobachtungsdaten	160
b. Ergebnis der statistischen Auswertung	162
4. Deutung des statistischen Ergebnisses	165
a. Der Einfluß des Oberwassers auf die Sandbewegung	165
b. Folgerungen für die Fahrwasserunterhaltung	167
5. Zusammenfassung	169
6. Schriftenverzeichnis	169

1. Vorbemerkungen

In den für die Schifffahrt zu unterhaltenden Fahrrinnen unserer Tideflüsse treten häufig Sandablagerungen auf, die die Erhaltung der festgelegten Solltiefen oft schwierig und kostspielig machen. Die Beseitigung derartiger Versandungen — sei es durch Baggerung, sei es durch strombautechnische Maßnahmen — erfordert stets vordringlich, ihre Ursachen eingehend zu erforschen. Bei den sehr verwickelten Vorgängen im Tidegebiet und den in dieser Beziehung noch lückenhaften theoretischen Kenntnissen ist das oft schwierig. Die Gesetzmäßigkeiten der Umbildung des Strombettes, Größe und Richtung resultierender Feststoffbewegungen sind noch weitgehend unbekannt (1).

In der gestreckten und gut ausgebauten Fahrrinne der Außenweser (Abb. 1) zwischen Bremerhaven (Strom-km 67) und Imsum (Strom-km 75) treten häufig und unregelmäßig Versandungen auf und erfordern oft den Einsatz von Baggern. Mit verschiedenen Methoden, jedoch ohne eindeutiges Ergebnis wurde bereits mehrfach versucht, die Ursachen und damit gegebenenfalls auch Möglichkeiten der Einwirkung zu finden (9, 11).

Eine im Jahre 1961 vom Verfasser durchgeführte statistische Untersuchung ergab einen Zusammenhang der Sandeintreibungen mit dem Oberwasserabfluß der Weser. Da ähnliche Gesetzmäßigkeiten vermutlich auch in anderen Tideflüssen auftreten, sollen Untersuchungsmethode und Ergebnis nachfolgend beschrieben werden.

2. Faktoren für die Sandbewegung in Tideflüssen

Die Sandbewegung in Tideflüssen ist sowohl theoretisch als auch empirisch nur schwer erfaßbar, weil die Gesetzmäßigkeiten des Sandtransportes in strömendem Wasser noch nicht genügend erforscht und die für Natur- und Modellmessungen zur Verfügung stehenden Methoden noch durchaus unbefriedigend sind.

Naturmessungen zur quantitativen Erfassung des Sandtransportes in einem Stromquerschnitt, wie sie an vielen Stellen ausgeführt worden sind (u. a. 6, 7), ergeben kaum mehr als Aufschlüsse

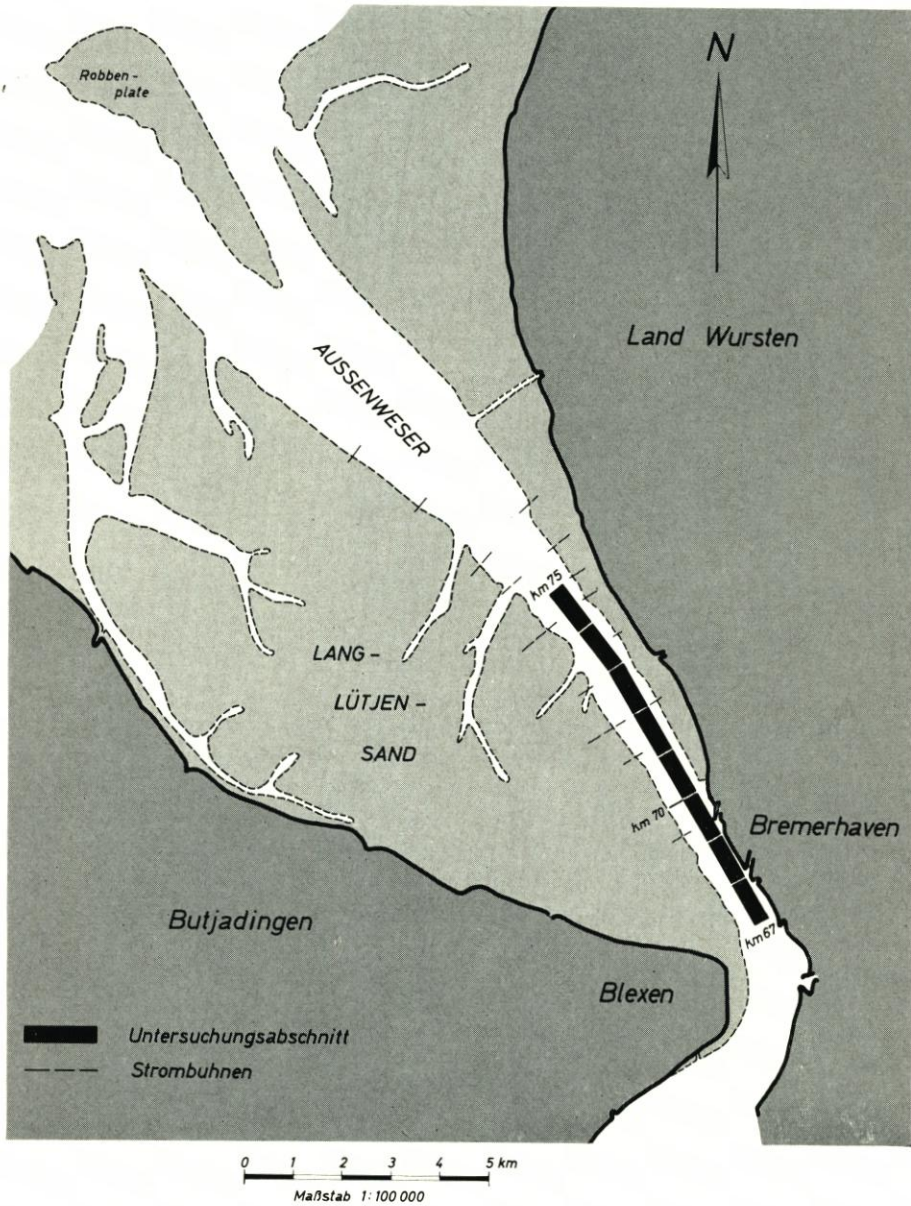


Abb. 1. Lageplan der Außenweser von Bremerhaven bis zur Robbenplate

über die Größenordnung der transportierten Mengen. Die Frage, ob in bestimmten Stromabschnitten Sedimentation oder Erosion überwiegen, kann nicht durch Feststoffmessungen gelöst werden, da die messungsbedingten Ungenauigkeiten größer sind als die auftretenden Differenzwerte.

Allgemein herrscht heute die Ansicht, daß in unseren Tideflüssen großräumig und langzeitlich ein Gleichgewicht des Sandtransportes besteht. Es handelt sich aber um ein sehr labiles Gleichgewicht, das sowohl durch menschliche Eingriffe als auch durch natürliche Faktoren, die die Tidebewegung beeinflussen, gestört werden kann (4). Die wichtigsten dieser Faktoren sind:

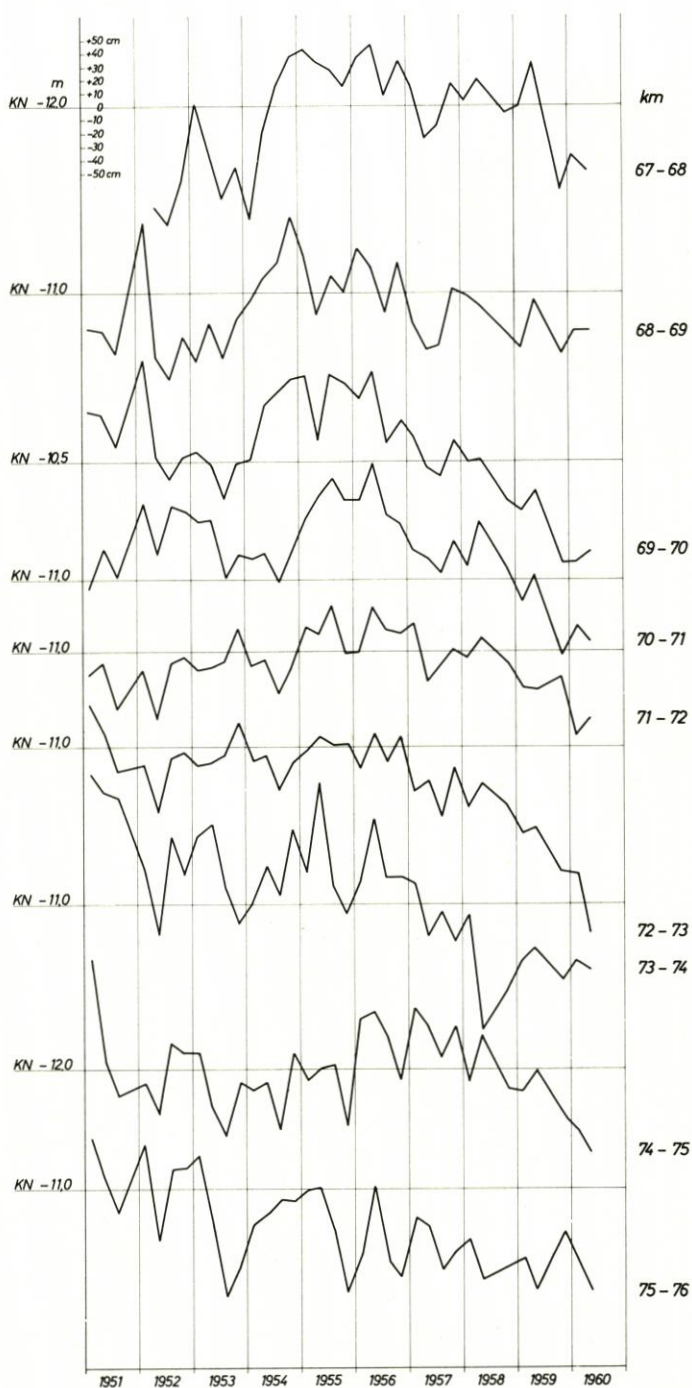


Abb. 2. Ganglinien der mittleren Fahrwassertiefen zwischen km 67 und 76 der Außenweser

- a. Der Tidehub. Die Intensität der Gezeitenströmungen hängt unmittelbar von der Amplitude der vertikalen Gezeitenbewegung, dem Tidehub ab. Die bekannten periodischen Schwankungen des Tidehubs werden sich daher auch auf die resultierende Sandbewegung in einem Tidefluß auswirken.
- b. Der Windeinfluß. Eine unmittelbare Wirkung des Windes auf die Strom- und Sandbewegung entsteht durch die Anfachung von Triftströmungen und die Erhöhung der Turbulenz im Wasser und damit des Transportvermögens für suspendierte Feststoffe. Mittelbar beeinflusst der Wind durch den Wasserstau an der Küste und in flachem Wasser die Strömungsvorgänge.
- c. Das Oberwasser. Im Oberlauf eines Tidestromes wird bei zunehmendem Oberwasserabfluß die Flutströmung schwächer, die Ebbeströmung stärker und damit auch die Sandbewegung in Ebbestromrichtung. Im Unterlauf, im Bereich der Mischungszone zwischen Seewasser und Flußwasser sind die Vorgänge sehr unübersichtlich. Die Mischungszone, in der Dichteströmungen entstehen, verschiebt sich mit Veränderung des Oberwassers. Gleichzeitig verändert sich auch der in stark turbulenten Strömungssystemen für die Intensität der Dichteströmung maßgebende horizontale Dichtegradient (5), der durch die Veränderung des Salzgehaltes je Längeneinheit dargestellt werden kann. Da Dichteströmungen eine Sandbewegung in Flutstromrichtung fördern, können also im Oberlauf und im Unterlauf eines Tideflusses durchaus entgegengesetzte Sandbewegungstendenzen durch hohes Oberwasser entstehen.

Zu diesen äußeren Faktoren, deren Auswirkungen auf die Sandbewegung quantitativ nicht erfaßbar sind, kommen besonders im Mündungsgebiet des Tideflusses weitere Einflüsse wie Strombettverlagerungen, Stromspaltungen, Sandbankveränderungen usw. Die Aufgabe, die ursächlichen Faktoren beobachteter Versandungen oder Erosionen in einem Tidefluß zu finden, ist daher in den meisten Fällen äußerst schwierig. Wenn ein zuverlässiges Beobachtungsmaterial zur Verfügung steht, kann eine statistische Untersuchung zum Erfolg führen, wie im folgenden Abschnitt nachgewiesen werden soll.

3. Statistische Bearbeitung

a. Beobachtungsdaten

Die eingangs schon beschriebenen unregelmäßigen Versandungen im Fahrwasser der Außenweser sind besonders in dem 8 km langen Fahrwasserabschnitt unterhalb Bremerhavens zwischen Strom-km 67 und 75 zu beobachten. Das Fahrwasser wird hier drei- bis viermal jährlich durch Längspeilungen vermessen, und zwar in stets gleichbleibenden Profilen und mit annähernd konstanten Lotpunkt-Abständen. Aus allen verfügbaren Peilungen der Jahre 1951 bis 1960 wurden durch Mittelbildung über alle Lotzahlen die mittleren Tiefen jeweils 1000 m langer Teilstrecken und der Gesamtstrecke zwischen km 67 und 75 gebildet. Die Tiefenganglinien der Teilstrecken sind in Abbildung 2 dargestellt. Die Tiefenschwankungen in den Teilstrecken sind bemerkenswert groß, ein Hinweis auf die Veränderlichkeit der Stromsohle in diesem Gebiet. Eine gewisse Gleichgängigkeit der Kurven ist zu erkennen.

Als mögliche ursächliche Faktoren für die Tiefenschwankungen wurden das Oberwasser der Weser (nach Abflußbeobachtungen am Pegel Intschede), Schwankungen des Tidehubs und meteorologische Einflüsse in Rechnung gestellt. Für einen ersten Korrelationsansatz erschien es dabei zulässig, den Windeinfluß durch den Gang des Tidehochwassers auszudrücken. Dem lag die Überlegung zugrunde, daß in dem im inneren Mündungstrichter der Außenweser liegenden Untersuchungsabschnitt der indirekte (auf die Wasserstände wirkende) Windeinfluß größer sein dürfte als der direkte Einfluß.

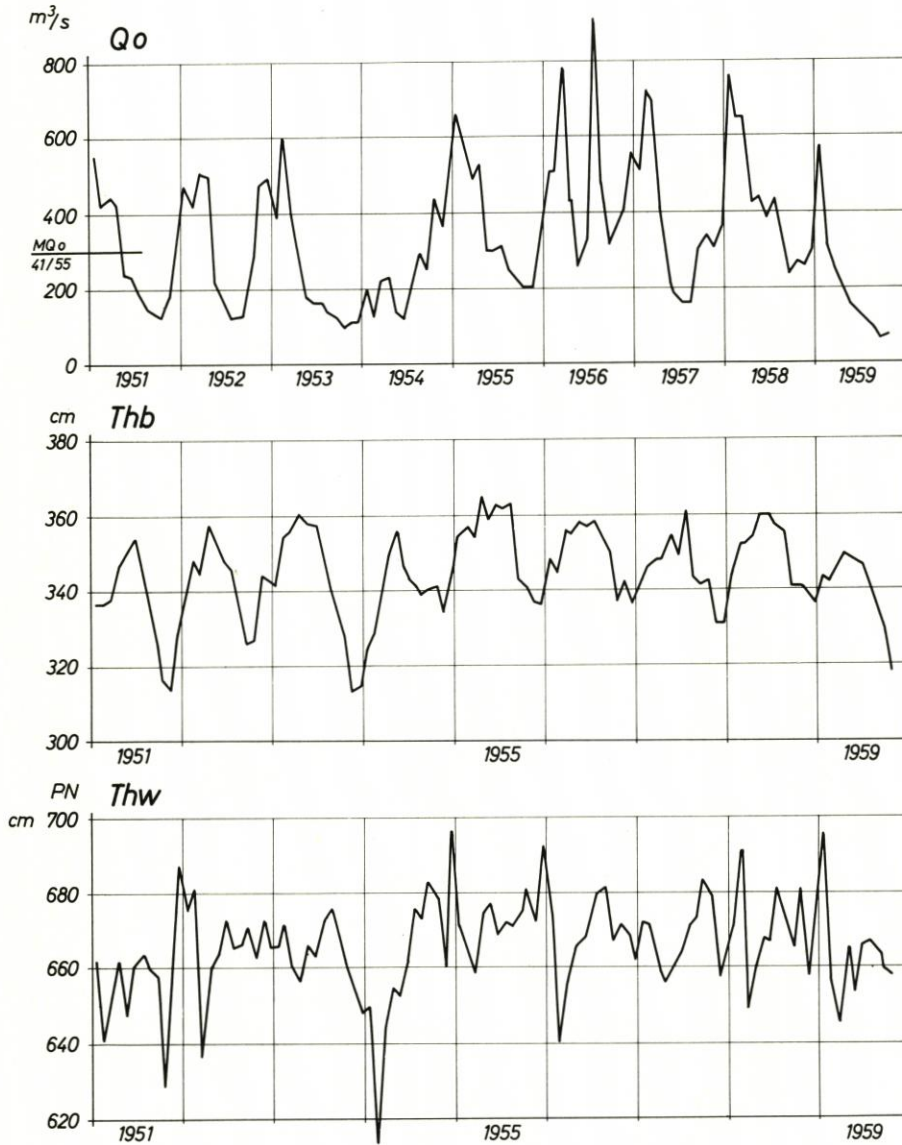


Abb. 3. Ganglinien der Monatsmittel des Oberwassers bei Intschede (Mittelweser) sowie des Thb und Thw bei Bremerhaven von 1951 bis 1959

Abbildung 3 zeigt die Ganglinien der Monatsmittel der drei Faktoren. Das Oberwasser weist in den Jahren 1951 bis 1953 und 1957 bis 1959 den typischen Jahresgang mit geringem Abfluß im Sommer und Abflußspitzen im Winter und Frühjahr auf. Der Sommer 1959 ist besonders abflußarm. Anomale Verhältnisse liegen 1954 und 1956 vor. 1954 fehlt das erhöhte Frühjahrshochwasser, 1956 tritt der höchste Abfluß des gesamten Zeitraumes im Sommer auf. Die Ganglinie des Tidehubes (in der die halbmonatlichen Ungleichheiten durch die Mittelbildung ausgeschaltet sind) weist einen ausgeprägten Jahresgang mit einer Amplitude zwischen 20 und 40 cm auf. Vergleicht man die Gang-

linien in Abbildung 2 und 3, so erkennt man, daß die charakteristischen Schwankungsperioden in der Größenordnung durchaus übereinstimmen.

b. Ergebnis der statistischen Auswertung

Mit Hilfe der Korrelationsrechnung können die Zusammenhänge zwischen physikalischen Vorgängen geprüft werden. Ein Kriterium für die Echtheit eines vermuteten Zusammenhanges gibt der in einer hier nicht zu erläuternden mathematischen Operation (8) errechnete Korrelationskoeffizient.

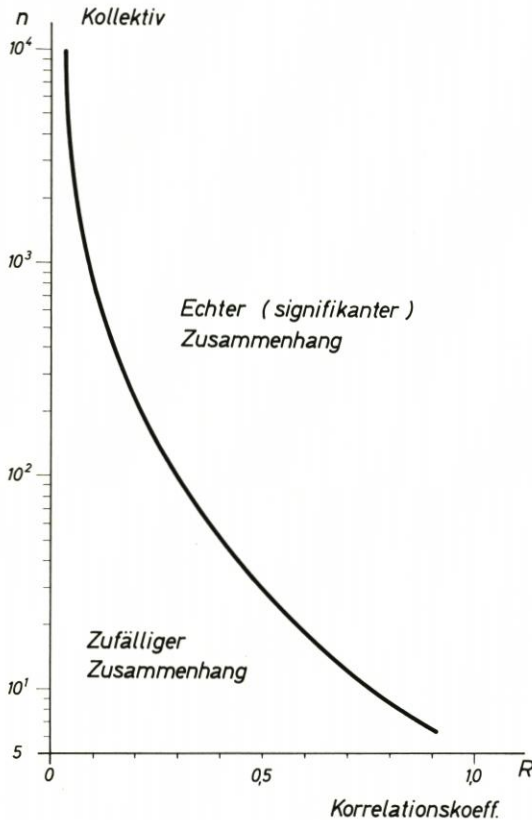


Abb. 4. Grenze zwischen zufälligem und echtem Zusammenhang

In Abbildung 4 ist dargestellt, wie die Grenze zwischen zufälligem und echtem Zusammenhang in Abhängigkeit von der Anzahl der Beobachtungsdaten verläuft.

Der Ansatz einer linearen Mehrfachkorrelation zwischen den mittleren Tiefen des gesamten Untersuchungsabschnittes und den zugeordneten Quartalsmitteln des Oberwassers, des Tidehubes und des Tidehochwassers ergab: Zwischen den Tiefenschwankungen und dem Gang des Tidehubes sowie des Tidehochwassers läßt sich kein Zusammenhang nachweisen. Ein echter Zusammenhang besteht jedoch zwischen Tiefenänderungen und Oberwasserabfluß. Dieser Zusammenhang wurde daher weiter verfolgt.

Der in der linearen Mehrfachkorrelation gefundene partielle Korrelationskoeffizient von $R = 0,54$ konnte durch einen Potenzansatz auf $R = 0,65$ verbessert werden. (Beide Werte liegen bei $n = 27$ über der Zufallsgrenze, wie aus Abbildung 4 zu entnehmen ist.) Die gefundene Beziehung ist in Abbildung 5 dargestellt. Wenn man berücksichtigt, daß bei der Bildung der mittleren Fahrwassertiefen nur ein 200 m breiter Streifen aus der rund 800 m breiten Stromrinne erfaßt wurde und daß die Zuordnung der Tiefenwerte, die ja nur einen Augenblickszustand der Stromsohle darstellen, zu den Quartalsmitteln des Oberwassers ziemlich willkürlich ist, so muß man das Ergebnis als recht

befriedigend bezeichnen. Es besagt, daß bei steigendem Oberwasser die Fahrwassertiefen abnehmen und umgekehrt. Nach den in Abbildung 6 aufgetragenen Ganglinien ist der Zusammenhang besonders eindeutig in den Jahren von 1951 bis 1953 und 1957, also in Jahren mit normalen Abflußverhältnissen. Zwischen 1954 und 1956 ist die Übereinstimmung weniger gut, was auf die außergewöhnlichen Abflußverhältnisse dieser Jahre zurückgeführt werden kann. Faßt man die Beobachtungsreihen noch zusammen und bildet Jahresmittel, so werden die Abflußschwankungen weiter ausgeglichen. Die in Abbildung 7 dargestellten Ganglinien der Jahresmittel zeigen erwartungsgemäß ein hohes Maß an Übereinstimmung. Der Korrelationskoeffizient beträgt bei 7 Wertepaaren $R = 0,93$.

Schließlich wurde noch untersucht, ob sich die Beziehungen zum Oberwasser auch im Gang der mittleren Tiefen der 1000 m langen Teilabschnitte (vgl. Abb. 2) auffinden lassen. Der Einfachheit halber wurde dabei wieder ein linearer Ansatz gewählt. In Abbildung 8 sind die Korrelationskoeffizienten der Teilstrecken und die zugehörigen Streuungen der mittleren Tiefen aufgetragen. Die Korrelationskoeffizienten aller Teilabschnitte liegen unter dem für die Gesamtstrecke ermittelten Wert.

*Mittlere Fahrwassertiefe unter Kartennull
zwischen km 67 und 75
(Quartalspeilungen)*

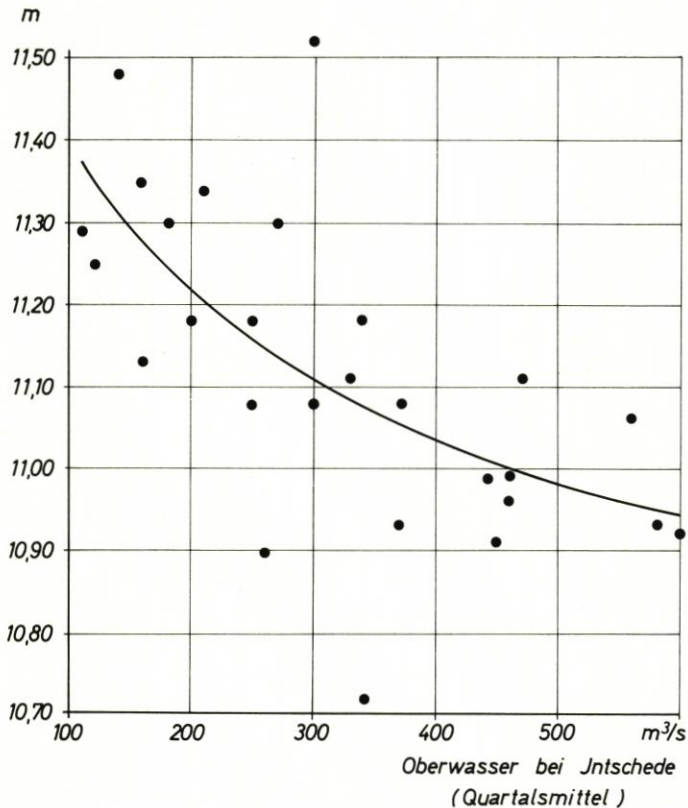


Abb. 5. Abhängigkeit der mittleren Fahrwassertiefe zwischen km 67 und 75 der Außenweser vom Oberwasser

Der Mittelwert ($R = 0,38$) liegt jedoch bei 216 Wertepaaren immer noch im signifikanten Bereich. Dieses Ergebnis läßt den Schluß zu, daß innerhalb des Untersuchungsabschnittes noch andere, auf engem Raum stattfindende Strombettveränderungen auftreten.

Sowohl der Korrelationskoeffizient als auch die Tiefenschwankungen sind am unteren und oberen Ende des untersuchten Fahrwasserabschnittes größer als im dazwischenliegenden Bereich. Daraus läßt sich auch schließen, daß der willkürlich abgegrenzte Stromabschnitt von km 67 bis km 75 nicht mit der vom Oberwasser beeinflussten Versandungszone übereinstimmt. Weiter oberhalb und unterhalb werden die Verhältnisse ähnlich sein. Das Beobachtungsmaterial reichte jedoch nicht aus, die Untersuchung weiter auszudehnen.

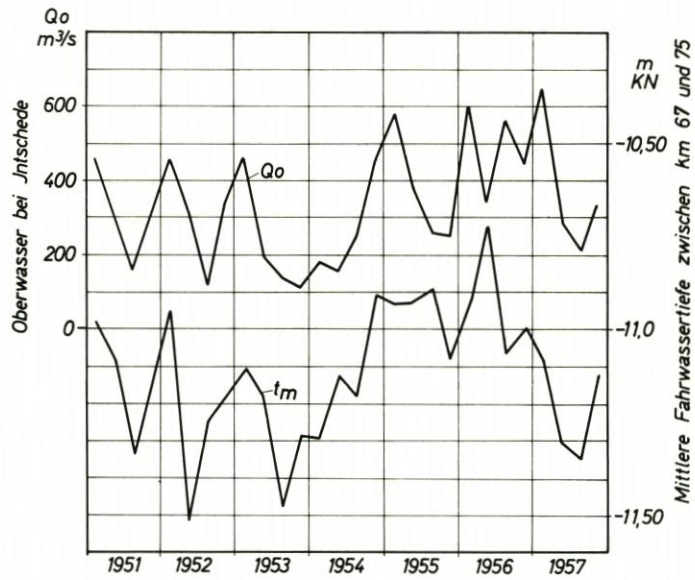


Abb. 6. Ganglinien der mittleren Fahrwassertiefe der Außenweser zwischen km 67 und 75 und des Quartalsmittels des Oberwassers

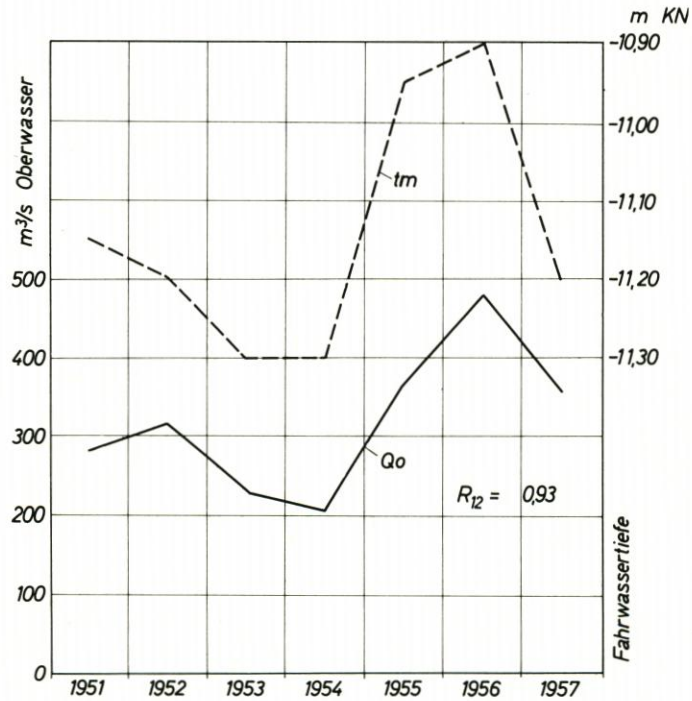


Abb. 7. Ganglinien der Jahresmittel des Oberwassers und der mittleren Fahrwassertiefen zwischen km 67 und 75 der Außenweser

4. Deutung des statistischen Ergebnisses

a. Der Einfluß des Oberwassers auf die Sandbewegung

Eine statistische Untersuchung, wie sie hier durchgeführt wurde, kann nur den Nachweis liefern, ob vermutete Zusammenhänge zwischen verschiedenen Größen, die durch Beobachtungsreihen erfaßt sind, vorhanden und echt sind. Eine gefundene kausale Beziehung muß in jedem Fall theoretisch zu



Abb. 8. Grundstreuung der mittleren Fahrwassertiefe zwischen km 67 und 75 der Außenweser und Korrelation zum Oberwasser

begründen sein. Für den im vorigen Abschnitt dargestellten Zusammenhang zwischen der Sandbewegung im Fahrwasser der Außenweser unterhalb Bremerhavens und dem Oberwasserabfluß kann folgende Erklärung gefunden werden:

Nach der für jeden Stromquerschnitt in einem Tidefluß gültigen Gleichung

$$T_f + D \int Q_0 \cdot dt = T_e,$$

die besagt, daß die einlaufende Flutwassermenge (T_f) um den Betrag des über die volle Tidestromdauer (D) summierten Oberwassers (Q_0) kleiner ist als die auslaufende Ebbwassermenge (T_e), wird durch Zunahme des Oberwasserzuflusses die mittlere Ebbestromgeschwindigkeit

$$V_{em} = \frac{T_e}{F_{em} \cdot D_e}$$

und damit die anteilmäßige Transportkraft der Ebbeströmung vergrößert. Diese Wirkung nimmt von der Tidestromgrenze ($T_f = 0$, $T_e = Q_0$) bis zur Mündung ($T_f \approx T_e$) ständig ab (2).

In der Mischungszone von Fluß- und Seewasser treten Dichteströmungen auf. Diese Erscheinung ist bereits an vielen Stellen (u. a. 2, 3, 5) behandelt worden und bedarf hier keiner weiteren Erläuterung mehr. Da die Verteilung der Sinkstoffe in der Vertikalen nicht gleichmäßig ist, sondern die größten Konzentrationen in Sohlennähe beobachtet werden, kann es bei Vorhandensein eines starken Dichtegefälles zu einem unerwünschten, stromaufwärts gerichteten resultierenden Sandtransport kommen. Maßgebend für die Intensität der den Tideströmungen überlagerten Dichteströmung ist der

Absolutwert des horizontalen Dichtegradienten oder in diesem Falle des Salzgehaltsgradienten $\frac{ds}{dx}$

(Veränderung des Salzgehaltes je Längeneinheit). Die Abnahme des Salzgehaltes vom See- zum Süßwasser erfolgt nicht linear. Es zeichnet sich eine Stelle des stärksten Salzgehaltsgradienten ab, an der auch die stärksten Dichteströmungen auftreten. Dieser Bereich, der das Zentrum der Mischungszone darstellt, verschiebt sich mit wachsendem Oberwasser stromab. Dabei nimmt das Dichtegefälle absolut zu. Abbildung 9 zeigt den Salzgehalt in zwei Längsprofilen der Tideweser von Brake bis zum Feuerschiff „Weser“ (10). Die Profile wurden bei unterschiedlichem Oberwasser aufgenommen. An den Gradientkurven erkennt man ohne weiteres den Einfluß des Oberwassers auf die Maximalwerte

des Gradienten. Bei $Q_0 = 118 \text{ m}^3/\text{s}$ liegt $\max \frac{ds}{dx}$ mit 0,9 zwischen km 50 und 60, d. h. noch in der

Unterweser bei Nordenham. Bei $Q_0 = 630 \text{ m}^3/\text{s}$ wächst der Wert auf 1,25 und liegt bei km 80 in der Außenweser.

Vereinfachend kann man daher bei Ausklammerung aller übrigen Faktoren bezüglich der Wirkung des Oberwassers auf den resultierenden Sandtransport folgendes aussagen:

Hohes Oberwasser bewirkt im Oberlauf eines Tideflusses eine resultierend stromab gerichtete Sandbewegung. Weiter unterhalb nimmt die Räumkraft des Ebbestromes ständig ab. Der stromabwärts bewegte Sand gelangt schließlich in den Bereich des maximalen Salzgehaltsgradienten, in dem örtlich zumindest ein Gleichgewicht der Transportkräfte von Flut- und Ebbestrom auftreten kann. Hier muß es dann notwendigerweise zu Ablagerungen kommen. Die verstärkte Dichteströmung in der stromab gewanderten Hauptmischungszone stellt gleichsam eine Barriere für den aus dem Oberlauf des Tideflusses abgetriebenen Sand dar.

Es ist anzunehmen, daß der Sand bei abnehmendem Oberwasser wieder stromaufwärts transportiert wird, und zwar mit der ebenfalls wieder stromaufwärts rückenden Mischungszone. So brähte der sehr niederschlags- und abflußarme Sommer 1959 starke Versandungen im Fahrwasser der Unterweser oberhalb Bremerhavens, während sich die Verhältnisse in der Außenweser sehr günstig entwickelten. Es dürfte sich also bei den beobachteten Sandeintreibungen um einen mit der Brackwasserzone wandernden, vagabundierenden Sandkörper handeln. Damit findet man auch eine befriedigende Erklärung für einige Ergebnisse der statistischen Untersuchung, zum Beispiel für die Tatsache, daß das Korrelationsergebnis für die Teilstrecken viel schlechter ausgefallen ist als für die Gesamtstrecke. Man muß annehmen, daß die Lage der Versandungszone sehr veränderlich ist. Bei extrem hohem Oberwasser wird sie sogar noch weiter stromabwärts wandern, wobei die Tiefen im Untersuchungsabschnitt wieder zunehmen können. Sowohl der in Abbildung 3 dargestellte Verlauf der Ganglinien in den Jahren 1955 und 1956 als auch der asymptotische Verlauf der Ausgleichskurve bei hohem Oberwasser in Abbildung 5 lassen diesen Vorgang vermuten. Die gefundene Beziehung stellt sicherlich nur eine erste Näherung an die sehr komplizierten Vorgänge dar. Die grundsätzliche Tendenz dürfte jedoch kaum anzuzweifeln sein.

An dieser Stelle sei noch hervorgehoben, daß es sich bei der beschriebenen Zone ständig wechselnder Versandungen im Fahrwasser der Außenweser unterhalb Bremerhavens nicht um die von

W. HENSEN (2) beschriebene „Gleichgewichtszone des Sandtransportes“ handelt. Diese Gleichgewichtszone liegt sehr viel weiter nach See zu. HENSEN vermutet sie etwa im Mündungsbereich der Außenweser bei Rotersand.

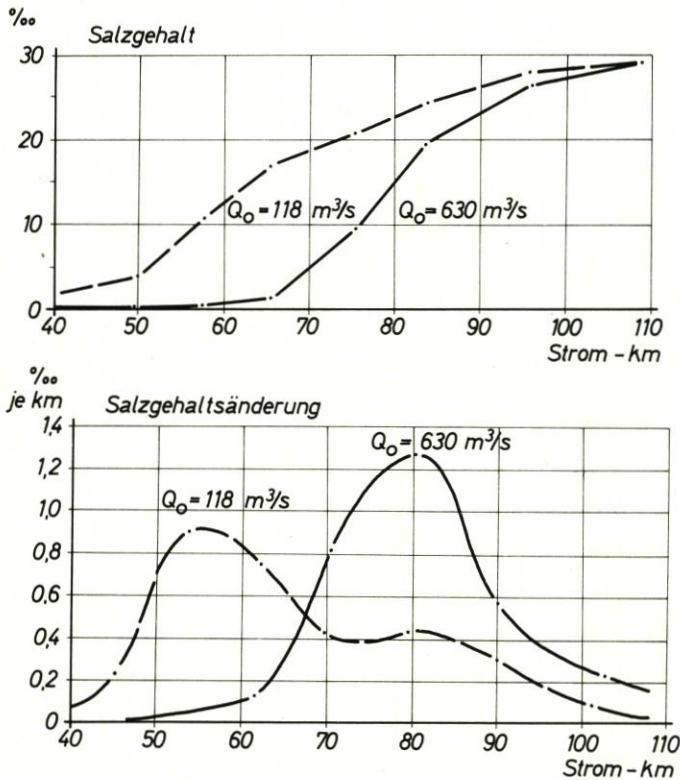


Abb. 9. Salzgehalt und Salzgehaltsgradient bei Tidehochwasser zwischen Brake (Unterweser) und Feuerschiff „Weser“

b. Folgerungen für die Fahrwasserunterhaltung

Das wesentliche Ergebnis der Untersuchung lautet:

Bei hohem Oberwasser treten in der Außenweser unterhalb Bremerhavens starke Sandeintreibungen auf.

Bei abnehmendem Oberwasser verschwinden sie wieder, und zwar ohne erkennbaren Einfluß der Unterhaltungsbaggerungen. (Diese Frage wurde gesondert untersucht und konnte eindeutig geklärt werden.)

Dieses Ergebnis ist für die Aufgaben der Fahrwasserunterhaltung von unmittelbarer Bedeutung. Bei einer Beobachtung der Oberwasserhältnisse kann die Entwicklung des Fahrwasserzustandes in etwa vorhergesagt und bei der Disposition der Baggereinsätze berücksichtigt werden. Auch die Gewißheit, daß starke Versandungen nach Durchgang der Abflußwelle wieder selbsttätig ausgeräumt werden, ist wertvoll und kann zur Vermeidung mancher voreiligen oder übertrieben aufwendigen Gegenmaßnahme beitragen.

Das vorliegende Material ermöglicht eine einigermaßen zuverlässige Berechnung des Massentransportes. Legt man die ermittelte Ausgleichskurve zugrunde und extrapoliert das Ergebnis auf den gesamten Stromquerschnitt, so erhält man eine Sandmenge von rund 3 Millionen m^3 , die sich bei



Abb. 10. Die Fahrwassertiefen der Außenweser zwischen km 67 und 75 in den Jahren 1952 und 1956

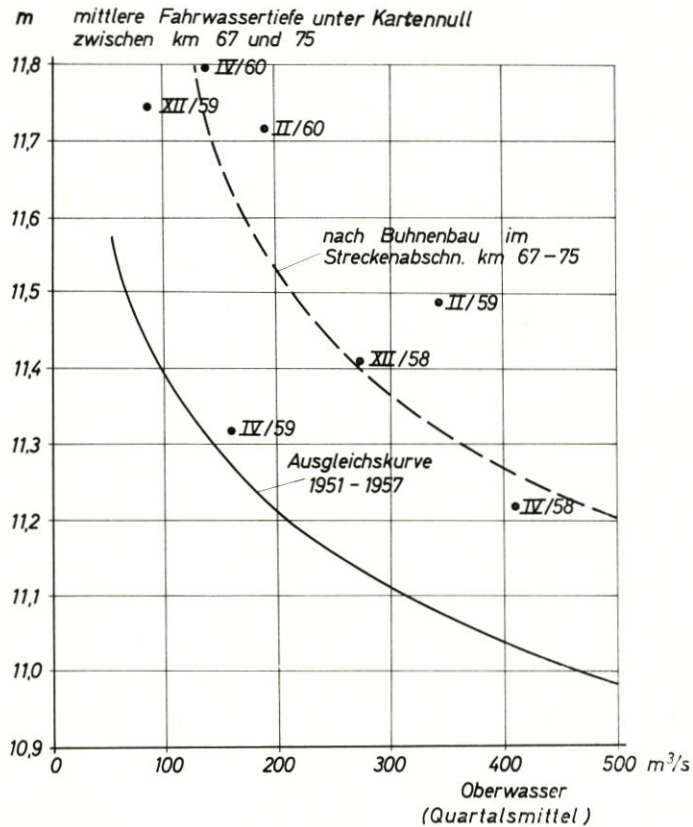


Abb. 11. Einfluß von Strombaumaßnahmen auf die Fahrwassertiefen der Außenweser zwischen km 67 und 75 einer Zunahme des Oberwassers (Quartalsmittel) von 100 auf 600 m³/s im betrachteten Stromabschnitt ablagert.

Abbildung 10 zeigt die Extremlagen innerhalb des Untersuchungszeitraumes, die Fahrwassertiefen im Sommer 1952 und im Sommer 1956, und läßt das Ausmaß der Versandung erkennen. Die Ablagerungen vom Sommer 1952 bis zum Sommer 1956 werden auf rund 5 Millionen m³ geschätzt.

Die Untersuchung wurde zunächst für den Zeitraum von 1951 bis 1957 durchgeführt. Aus den Jahren vor 1951 lagen nicht genügend Fahrwasserpeilungen vor. 1957 wurden umfangreiche Strombaumaßnahmen zur Verbesserung der Fahrwasserhältnisse eingeleitet, die zusätzliche Veränderungen des Strombettes erwarten ließen. Im Streckenabschnitt km 67 bis 75 wurden drei neue Strombuhnen am linken Ufer gebaut (Abb. 1). Der Erfolg dieser Baumaßnahmen, der sich bald in einer Verringerung der Unterhaltungsbaggerungen zu zeigen schien, konnte nach Kenntnis der oberwasserbedingten Versandungserscheinungen erst unter Berücksichtigung der Oberwasserhältnisse beurteilt werden. In Abbildung 11 sind die mittleren Tiefen des Streckenabschnittes km 67 bis 75 aus sieben Aufnahmen der Jahre 1958 bis 1960 in Abhängigkeit vom Oberwasser aufgetragen. Zum Vergleich ist die Ausgleichskurve der Abbildung 5 mit eingezeichnet. Auch für den Zeitraum 1958 bis 1960 besteht eine eindeutige Beziehung zwischen Fahrwassertiefe und Oberwasser und läßt sich ohne Zwang durch eine Ausgleichskurve darstellen. Die mittlere Ordinattendifferenz zwischen beiden Kurven beträgt rund 30 cm und gibt ein echtes Maß für die durch den Buhnenbau erreichte Fahrwasserverbesserung.

5. Zusammenfassung

In einem 8 km langen Streckenabschnitt der Außenweser unterhalb Bremerhavens sind häufig starke Sandeintreibungen zu beobachten. Es wird nachgewiesen, daß die Versandungen vom Oberwasserabfluß abhängen. Sie treten bei hohem Oberwasser auf und werden auf die damit zusammenhängende Verstärkung der Ebbeströmung in der Unterweser zurückgeführt. Bei abnehmendem Oberwasser verschwindet der abgelagerte Sand wieder und wird vermutlich durch den Flutstrom und durch Dichteströmungen in der Unterweser zurücktransportiert. Die mit statistischen Methoden geklärten Zusammenhänge werden physikalisch begründet.

6. Schriftenverzeichnis

1. DILLO, H. G.: Sandwanderung in Tideflüssen. Mitteilung d. Franzius-Instituts f. Grund- u. Wasserbau der Techn. Hochschule Hannover, H. 17, 1960.
2. HENSEN, W.: Die Entwicklung der Fahrwasserhältnisse in der Außenelbe. HTG-Jahrbuch 1939 bis 1940.
3. HENSEN, W.: Eindringen von Salzwasser in Gezeitenflüsse. Mitteilungen d. Franzius-Instituts f. Grund- u. Wasserbau der Techn. Hochschule Hannover, H. 3, 1953.
4. Küstenausschuß Nord- und Ostsee, Gutachtergruppe Eider: Gutachten über die Vorschläge zur Behebung der Schwierigkeiten in der Eider. Die Küste Jg. 12, 1964.
5. AGNEW, R.: Estuarine Currents and Tidal Streams. Coastal Engineering, Vol. 2, 1961.
6. LUCHT, F.: Die Sandwanderung im unteren Tidegebiet der Elbe. Deutsche Hydrographische Zeitschrift, Bd. 6, 1953.
7. NIEBUHR, W.: Beobachtungen über den Sandtransport in der unteren Ems. Die Küste, Jg. 4, 1955.
8. SCHROEDER, G.: Die Korrelationsrechnung und ihre Anwendung in der Wasserwirtschaft. Bielefeld 1950.
9. SIMON, W. G.: Sedimentpetrographische Untersuchungen der Grundproben aus der Außenweser. Gutachten über die Ursache von Versandungserscheinungen im Fahrwasser der Außenweser. (Amtlicher Bericht, nicht veröffentlicht.)
10. Wasser- und Schifffahrtsdirektion Bremen: Die Entwicklung der Salzgehaltsverhältnisse der Unterweser seit Beginn des Ausbaues. (Amtlicher Bericht, nicht veröffentlicht.)
11. Wasser- und Schifffahrtsamt Bremerhaven: Untersuchungen über die Ursachen der periodischen Ablagerungen bei km 69—71 und km 72—74 der Außenweser. (Amtlicher Bericht, nicht veröffentlicht.)