

Strömungsgeschwindigkeit und Schwebstofftransport in einem Tidefluß

(Dargestellt am Beispiel der Elbe)

Von Hans Rohde

Summary

The report describes model tests performed in a hydraulic model of the tidal river Elbe to examine the current conditions at a constant average tide and a afflux of upper water in steps varied between 0 and 2000 m³/s. The current velocities measured in various cross-sections of the model are absolutely comparable among one another. Therefore graphs can be drawn, which show the distribution of the average current velocity at each specific time along the entire tidal river in dependence upon the afflux of upper water. By aid of these graphs „real ways of ebb and flood“ can be computed, which give hints to the transport of suspended matter in the Elbe river. The hints are discussed and compared with sedimentpetrografical and biological observations in nature.

Um die Geschwindigkeitsverhältnisse eines Tideflusses exakt erfassen und daraus Rückschlüsse auf den Schwebstofftransport ziehen zu können, muß die Strömungsgeschwindigkeit in zahlreichen Meßquerschnitten, die über die gesamte Flußlänge verteilt sind, bekannt sein. Da in den einzelnen Meßquerschnitten nacheinander gemessen werden muß, sind die für die verschiedenen Meßquerschnitte ermittelten Ganglinien der Strömungsgeschwindigkeit in der Regel nicht unmittelbar miteinander vergleichbar. Jede Ganglinie gilt nur für die bestimmte Tide des Meßtages und den dabei vorhandenen Oberwasserzufluß. Um daher die Geschwindigkeitsverhältnisse für einen ganzen Tidefluß beschreiben zu können, müßte eine sehr große Anzahl von Messungen in den einzelnen Querschnitten

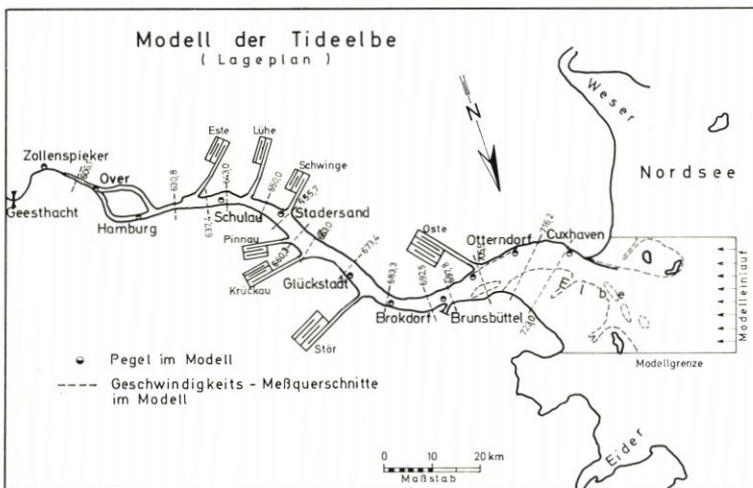


Abb. 1. Lageplan des Elbmodells

ausgeführt worden sein, damit man diejenigen einander zuordnen kann, die unter gleichen hydrologischen Bedingungen zustande gekommen sind. Bei dem großen Aufwand, den schon jede einzelne Querschnittsmessung der Geschwindigkeit erfordert (1), ist es aber unmöglich, die erforderliche Zahl von Messungen jemals zu erreichen. Die Möglichkeit, den Geschwindigkeitszustand eines Tideflusses unter überall gleichen Bedingungen zu erfassen, bietet dagegen der hydraulische Modellversuch.

Bei der Bundesanstalt für Wasserbau in Hamburg befindet sich ein Modell, das die Tideelbe von See bis Geesthacht im Längenmaßstab 1:500 und Tiefenmaßstab 1:100 geometrisch ähnlich darstellt. Die Tide wird bei Scharhörn eingesteuert, das Oberwasser bei Geesthacht zugegeben. Abb. 1 zeigt den Lageplan. In diesem Modell wurden folgende Versuche ausgeführt: An der seewärtigen Modellgrenze wurde immer dieselbe, mittleren Verhältnissen entsprechende Tide eingesteuert. An der oberen Modellgrenze bei Geesthacht wurden nacheinander folgende Oberwassermengen zugegeben: 0, 300, 600, 1200 und 2000 m³/s. An den in Abb. 1 eingetragenen insgesamt 15 Meßquerschnitten wurden die Strömungsgeschwindigkeiten gemessen. Die Meßquerschnitte im Modell stimmten mit Meßquerschnitten in der Natur überein. Dadurch ist ein Vergleich mit Naturmessungen möglich. Corioliseffekt und Dichteinflüsse wurden im Modell nicht nachgebildet.

Abb. 2 zeigt für die Meßquerschnitte bei Cuxhaven (km 723), Stadersand (km 655,7) und Over (km 606,1) einige Ergebnisse der Geschwindigkeitsmessungen. Unten sind die Querschnitte aufgezeichnet und darin die Meßpunkte eingetragen. Darüber sind gemittelte Ganglinien der Strömungsgeschwindigkeit für drei Stufen des Oberwasserzuflusses angegeben. Der durch die Messungen erfaßte Querschnittsbereich ist für die Überlegungen hinsichtlich des Schwebstofftransportes besonders interessant. Die mittlere Geschwindigkeit des Gesamtquerschnittes ist in jedem Fall kleiner. Abb. 2 läßt erkennen, wie sich die Geschwindigkeitsganglinien mit dem Oberwasserzufluß verändern. Noch in Cuxhaven bewirkt die Zunahme des Oberwassers eine Abnahme der Flutstromgeschwindigkeiten und eine Verkürzung der Flutstromdauer. Ebbestromgeschwindigkeiten und Ebbestromdauer nehmen mit der Zunahme des Oberwassers zu. Zu erkennen ist auch die typische Form der Geschwindigkeitsganglinien: Steiler Anstieg des Flutstroms, ausgeprägtes Flutstrommaximum, flacher Abfall zum Kenterpunkt K_f . Der Ebbestrom steigt vom Kenterpunkt K_f langsam an, sein Maximum ist weniger ausgeprägt. Der Ebbestrom bleibt über eine längere Zeit etwa konstant und fällt dann verhältnismäßig steil zum Kenterpunkt K_e ab. Bei km 606,1, oberhalb der Hamburger Stromspaltung, tritt bei hohem Oberwasser kein Flutstrom auf.

Abb. 3 zeigt, über die Flußlänge aufgetragen, die über die Flut- bzw. Ebbestromdauer gemittelten mittleren Geschwindigkeiten, die Maximalwerte und die Verhältniswerte von Flut- zu Ebbestrom sowie Flut- und Ebbestromdauer. Es ist zu erkennen, daß der Einfluß des Oberwassers überall in der Unterelbe deutlich hervortritt. Die Abnahme der Maximalgeschwindigkeiten stromaufwärts ist stärker als die Abnahme der gemittelten

Geschwindigkeiten. Interessant sind die Verhältniswerte $\frac{v_f}{v_e}$. Bei den Maximalwerten

ist die Flutstromgeschwindigkeit bis zu einem Oberwasserzufluß von 1200 m³/s fast immer größer als die Ebbestromgeschwindigkeit, der Verhältniswert ist größer als 1. Bei den gemittelten Geschwindigkeiten – mit Ausnahme für den Oberwasserzufluß 0 – ist der Ebbestrom fast immer größer als der Flutstrom, der Verhältniswert ist kleiner als 1.

Aus den Geschwindigkeitsganglinien, wie sie in Abb. 2 für die Querschnitte 723, 655,7 und 606,1 dargestellt sind, wurden nun für jeden untersuchten Oberwasserzufluß Stundenzustandslinien der Strömungsgeschwindigkeit entwickelt. Sie sind auf Abb. 4 für 600 m³/s

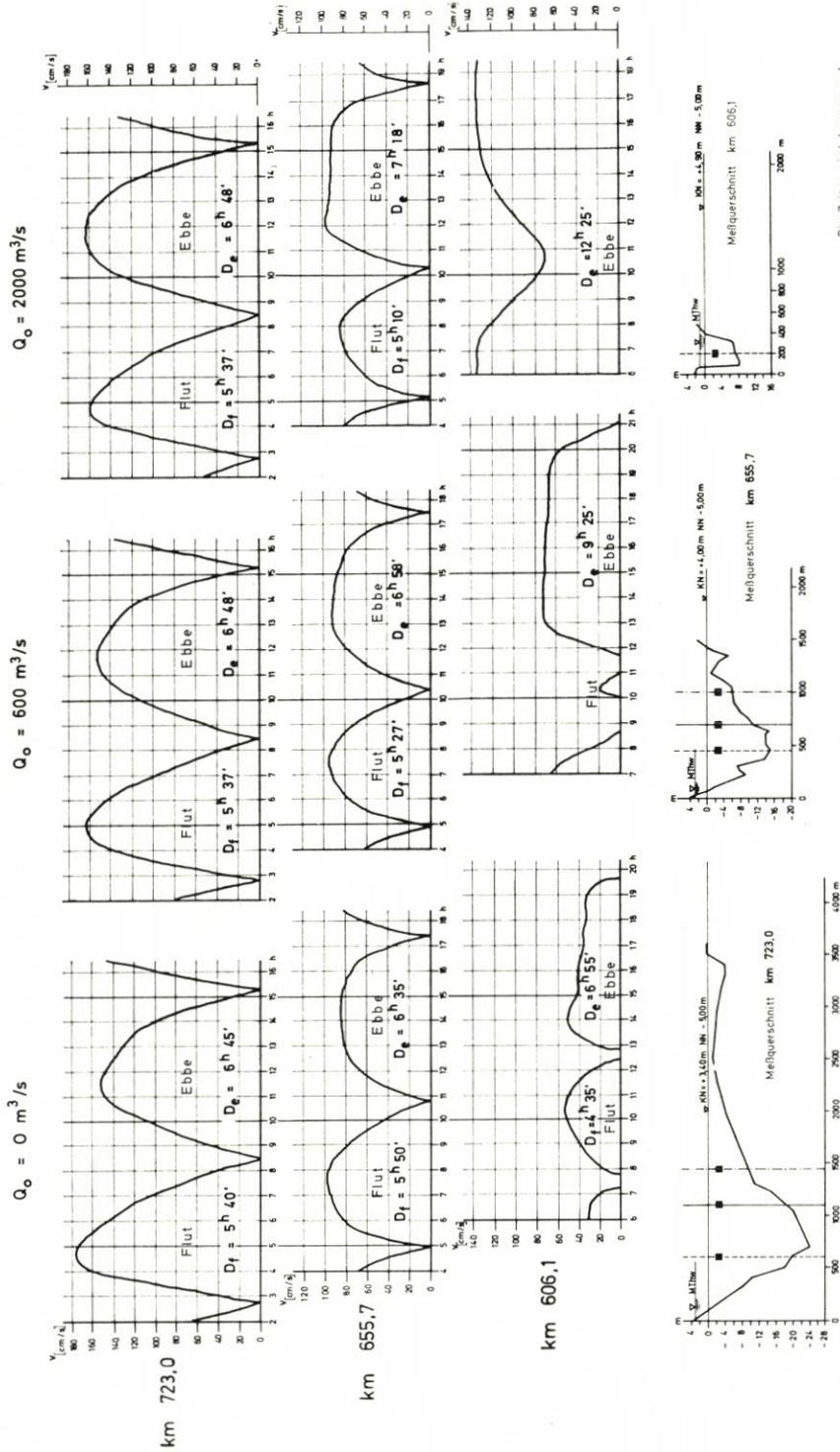


Abb. 2. Strömungsgeschwindigkeiten bei km 723, 655,7 und 606,1 bei verschiedenen Oberwasserzflüssen (gemessen im Modell)

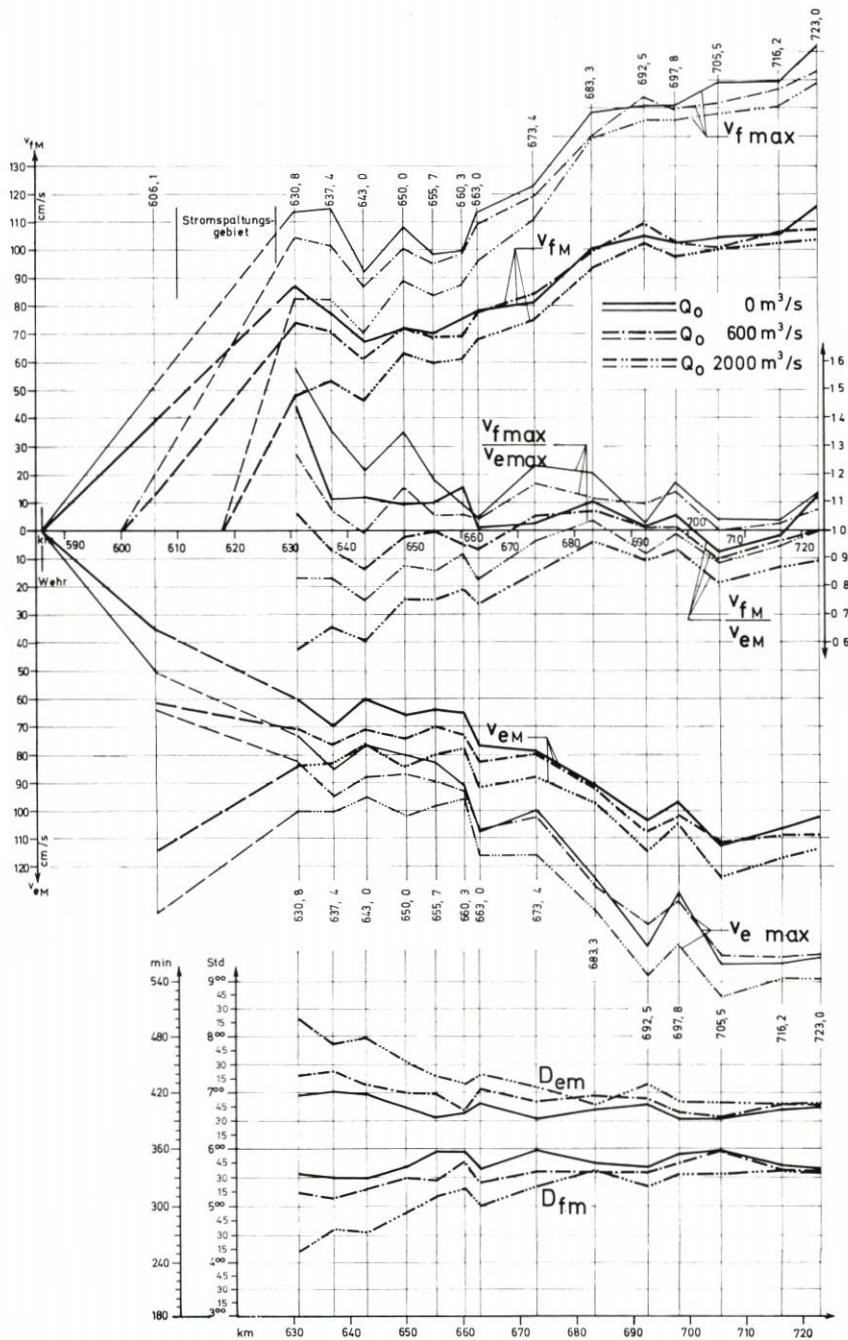


Abb. 3. Mittlere und maximale Strömungsgeschwindigkeiten sowie Flut- und Ebbestromdauer zwischen Cuxhaven und Hamburg (gemessen im Modell)

Oberwasserzufluß dargestellt. Die Linien geben den Geschwindigkeitszustand für den gesamten Flußlauf zu bestimmten Zeitpunkten an. Diese Stundenlinien der Strömungsgeschwindigkeit können für eine exakte Ermittlung der Ebbe- und Flutwege benutzt werden:

Ein Wasserteilchen, das bei Cuxhaven zur Stunde 3 beginnt sich mit der Geschwindigkeit 25 cm/s stromaufwärts zu bewegen, legt in einer Stunde, wenn zunächst vereinfachend angenommen wird, daß sich die Geschwindigkeit während dieser Stunde nicht ändert, einen Weg von 0,9 km stromaufwärts zurück. An dieser Stelle beträgt die Ge-

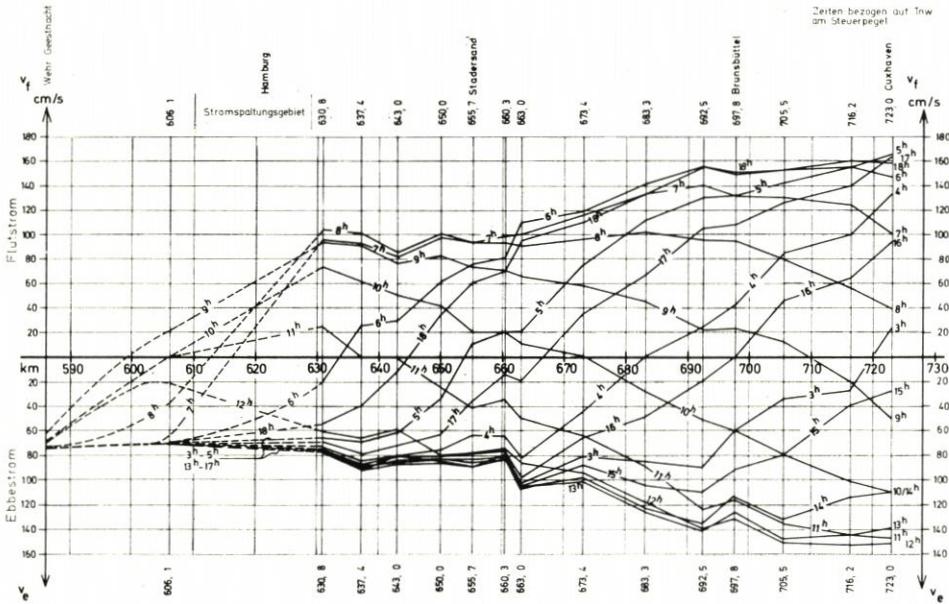


Abb. 4. Stundenlinien der Strömungsgeschwindigkeit der Tideelbe bei einem Oberwasserzufluß von $600 \text{ m}^3/\text{s}$ (Modell)

schwindigkeit zur Stunde 4 130 cm/s . Wird diese Geschwindigkeit für die nächste Stunde als maßgebend angenommen, so beträgt der Weg in dieser Stunde $4,6 \text{ km}$ und die Geschwindigkeit an dem erreichten Ort zur Stunde 5 155 cm/s . Auf diese Weise ergibt sich durch Iteration schließlich der Flut- bzw. Ebbeweg des betrachteten Wasserteilchens. Die Ermittlung ist um so genauer, je enger die Meßquerschnitte liegen und je kleiner die Zeitschritte gewählt werden. Damit steigt die Rechenarbeit aber beträchtlich.

Mit Hilfe der Stundenlinien wurden für die 5 Oberwasserstufen wahre Flut- und Ebbeweg für den Flußabschnitt zwischen Cuxhaven und Hamburg ermittelt. Sie sind auf Abb. 5 über die Flußlänge aufgetragen. Man erkennt die starke Abhängigkeit der Wege vom Oberwasserzufluß. Interessant ist das Verhältnis von Flut- und Ebbewegen zueinander. Beim Fehlen eines Oberwasserzuflusses sind die Flutwege meistens größer als die Ebbeweg. Bei $300 \text{ m}^3/\text{s}$ Oberwasser ist der Unterschied zwischen den Flut- und Ebbewegen nur gering, das Verhältnis liegt im Mittel bei $0,95$. Erst bei mehr als $600 \text{ m}^3/\text{s}$ ist das Überwiegen der Ebbeweg stark ausgeprägt. Diese Betrachtung der Ebbe- und Flutwege hat zunächst Bedeutung für die Abwasserbewegung in der Unterelbe. Man kann die Abwasserbewegung mit guter Näherung der Bewegung der Wasserteilchen gleichsetzen. Das bedeutet, daß ohne Oberwasserzufluß oder bei sehr geringem Oberwasserzufluß leichte

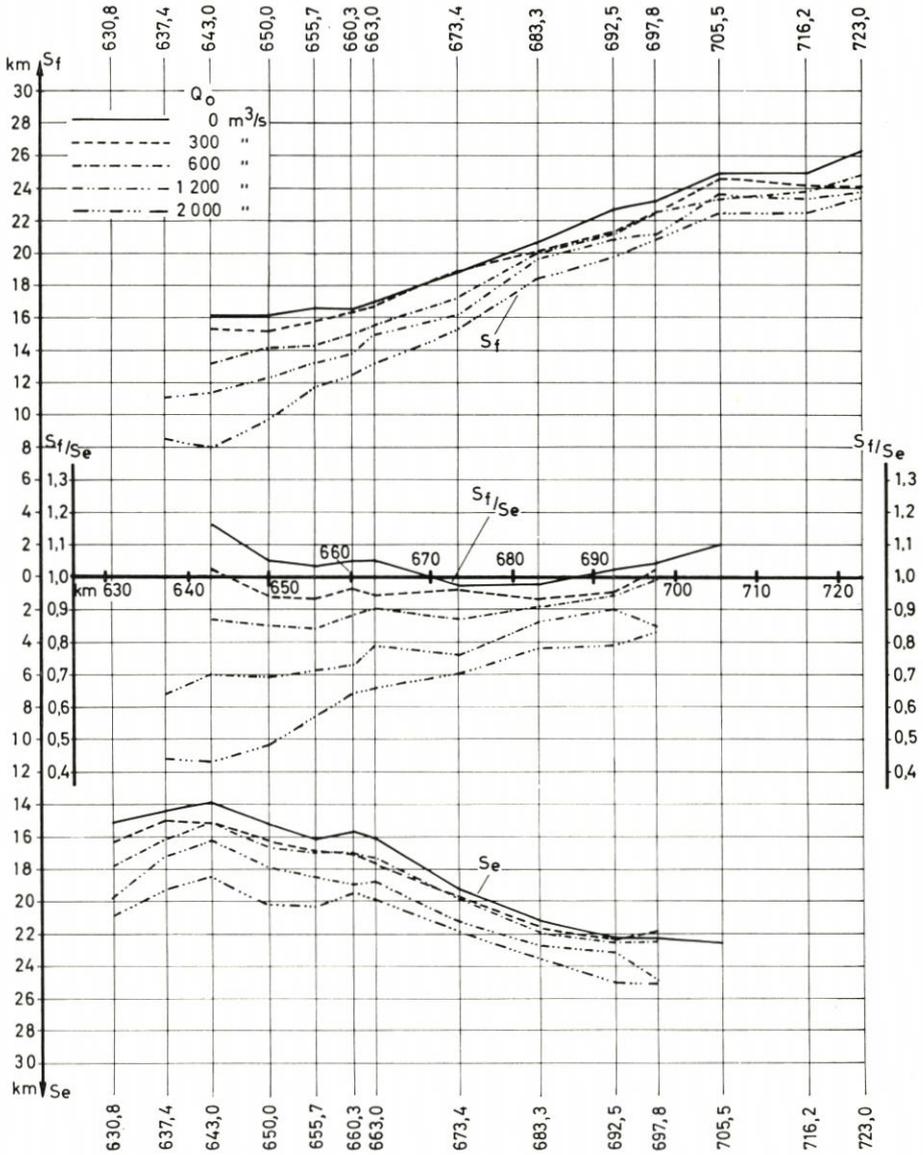


Abb. 5. Wahre Flut- und Ebbewege (Modell)

organische Schwebstoffe oder gelöste Stoffe, die etwa bei Brunsbüttel oder Stadersand eingeleitet werden, bei längerer Dauer des geringen Oberwasserzufflusses bis nach Hamburg gelangen können. Naturbeobachtungen bestätigen dieses Ergebnis. Unter ungünstigen Oberwasserbedingungen wurde marines Plankton z. B. bei Lühesand festgestellt (2). Es sind auch schon rezente Seeigelstacheln und Diatomeenschalen in Bodenproben im Gebiet des Hamburger Hafens gefunden worden (3).

Aus der Betrachtung der Geschwindigkeitsverhältnisse und der Ebbe- und Flutwege lassen sich auch Hinweise auf die Sandbewegung gewinnen. Die Sohle der Unterelbe be-

steht vorwiegend aus feinkörnigem Sand, der überwiegend in Suspension transportiert wird. Durch die Turbulenz werden Sandkörner aus der Sohle herausgelöst, in Querschnittsbereiche mit höherer Geschwindigkeit gebracht und dort in Richtung der Hauptströmung beschleunigt. Durch die Schwere sinken die Sandteilchen allmählich wieder ab und kommen in Bereiche niedrigerer Geschwindigkeit. Eine qualitative Abschätzung des Schwebstofftransportes ist mit Hilfe der Stundenlinien und der Geschwindigkeitsganglinien möglich:

Der steile Flutstromanstieg (Abb. 2) hat eine hohe Turbulenz zur Folge. Sand- und Schluffteile können von der Sohle aufgenommen und in höhere Bereiche des Querschnittes gebracht werden. Das hohe Flutstrommaximum hat einen großen Flutweg zur Folge. Die Flutstromgeschwindigkeit nimmt nach dem Maximum allmählich ab, wobei die Schwebstoffbewegung zunächst noch stromaufwärts weitergeht. Von einer bestimmten Geschwindigkeit an beginnt sich das suspendierte Material abzusetzen. Diese kritische Geschwindigkeit kann für die einzelnen Schwebstoffanteile unterschiedlich groß sein. Nach Kentern des Flutstroms vergeht noch eine längere Zeit, bis die Ebbestromgeschwindigkeit die kritische Größe erreicht hat, bei der größere Mengen des Schwebstoffes wieder aufgenommen werden. Weil bei geringem und mittlerem Oberwasserzufluß die Maximalgeschwindigkeiten bei Ebbestrom kleiner sind als die maximalen Flutstromgeschwindigkeiten und infolge der kleineren Ebbestrombeschleunigung die Turbulenz geringer ist, wird in diesem Fall vom Ebbestrom weniger Schwebstoff aufgenommen als vom Flutstrom. Die Abfallzeit des Ebbestroms ist relativ kurz, der Schwebstoff kann sich daher nicht vollständig absetzen, und auf das teilweise noch in Suspension befindliche Material wirkt dann schon wieder der Flutstrom ein. Nimmt man z. B. als kritische Geschwindigkeit 30 cm/s an, so betragen nach Abb. 2 bei $Q_0 = 600 \text{ m}^3/\text{s}$ die Zeiten um K_e , während der die kritische Geschwindigkeit unterschritten ist, bei km 723 30 und bei km 655,7 35 Minuten, die entsprechenden Zeiten um K_f dagegen 40 und 55 Minuten.

Bei der Ermittlung der Ebbe- und Flutwege aus den Stundenlinien lassen sich die unterschiedlichen Transportverhältnisse des Ebbe- und Flutstroms berücksichtigen: Wenn die kritischen Geschwindigkeiten für die einzelnen Flußabschnitte bekannt sind, beginnt man mit der Ermittlung der Ebbewege erst, wenn die kritische Geschwindigkeit überschritten ist. Die Ermittlung der Flutwege kann dagegen schon eher nach der Ebbestromkenterung beginnen. Das bedeutet eine relative Vergrößerung der Flutwege und relative Verkleinerung der Ebbewege. In der gleichen Richtung wirkt, daß der von der Sohle aufgenommene Schwebstoff durch die größere Turbulenz des Flutstroms in höhere Bereiche des Flußquerschnittes gebracht wird, in denen größere Geschwindigkeiten vorhanden sind. Bei dem weniger turbulenten Ebbestrom wird das Maximum der Schwebstoffkonzentration tiefer und in einem Querschnittsbereich kleinerer Geschwindigkeiten liegen. Auch die Dichteströmungen im unteren Flußabschnitt begünstigen eine stromaufwärts gerichtete Schwebstoffbewegung. Bei niedrigem Oberwasserzufluß reicht die Brackwasserzone weiter stromaufwärts als bei hohen Zuflüssen. Im Brackwasserbereich kommt es aus der Überlagerung der Dichteströmung mit der Flut- bzw. Ebbeströmung in Sohlennähe zu einer mehr oder weniger starken Zunahme der Flutstromgeschwindigkeit und Verringerung der Ebbestromgeschwindigkeit. Der relativ starke und turbulente Flutstrom nimmt daher besonders viel Material an der Sohle auf und transportiert es in relativ hohen Querschnittsbereichen stromaufwärts.

Alle genannten Faktoren begünstigen also den stromaufwärts gerichteten Schwebstofftransport gegenüber dem stromabwärts gerichteten. In der Unterelbe kann daher der stromaufwärts gerichtete Sandtransport mengenmäßig überwiegen, auch wenn

die aus den Strömungsgeschwindigkeiten ermittelten Flutwege etwas kleiner sind als die Ebbewege. Wie Abb. 5 gezeigt hat, sind bei Oberwasserzuflüssen, die kleiner als $600 \text{ m}^3/\text{s}$ sind, die Ebbewege überall nur wenig größer als die Flutwege. Zum Teil sind Flut- und Ebbewege gleich groß, in einigen Fällen sind die Flutwege sogar größer als die Ebbewege. Bei Oberwasserzuflüssen unter $600 \text{ m}^3/\text{s}$ liegen daher die Voraussetzungen dafür vor, daß Sand als Schwebstoff von See stromaufwärts bis in den Raum von Hamburg gelangen kann.

Naturbeobachtungen bestätigen diese Überlegungen: In Jahren mit geringem Oberwasserzufluß sind die Baggermengen in der Unterelbe besonders groß. In diesen Jahren werden aber in dem Stauraum des Wehres Geesthacht größere Sandmengen aus dem

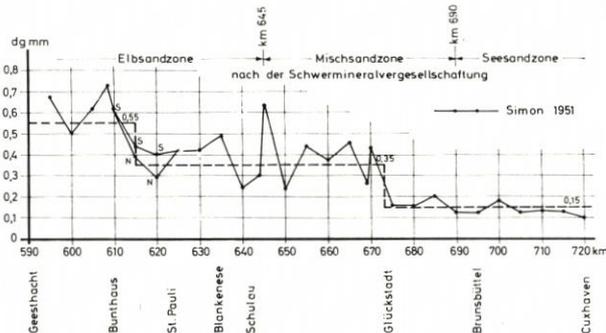


Abb. 6. Gemittelte Korndurchmesser des Elbesandes zwischen Cuxhaven und Zollenspieker

Geschiebe- und Schwebstofftransport der Mittel- und Unterelbe zurückgehalten und auch die Nebenflüsse werden der Unterelbe nur wenig Sand zuführen. Abb. 6 zeigt die Korngrößen des Elbesandes zwischen Cuxhaven und Geesthacht nach Untersuchungen von 1951 (5). Es sind drei Bereiche zu erkennen. Aus der Schwermineral-Vergesellschaftung werden ebenfalls drei Bereiche unterschieden, die Seesandzone, die bis Brunsbüttel reicht, die Mischsandzone zwischen Brunsbüttel und Schulau und oberhalb die Elbsandzone (5). Auch diese Darstellung läßt erkennen, daß Sand von See bis in die Nähe von Hamburg gelangt. Man muß daher annehmen, daß der in der Unterelbe gebaggerte Sand zum Teil jedenfalls aus der Nordsee ergänzt wird.

Die geschilderten Modellversuche haben den großen Einfluß des Oberwassers auf die Strömungsgeschwindigkeiten und damit auf die Flut- und Ebbewege der Unterelbe sowie das Verhältnis von Flut- und Ebbewegen zueinander gezeigt. Diese Faktoren sind wiederum für den Schwebstofftransport von großer Bedeutung. Aus diesen Feststellungen ergeben sich einige wichtige Hinweise für künftige Ausbauten, wie auch für die Unterhaltung der Unterelbe als Schifffahrtstraße. Das Verklappen von gebaggertem Boden und das „Aufwühlen“ der Flußsohle bei Ebbestrom, die zur Vergrößerung der Schwebstoffmengen führen, müssen bei geringerem Oberwasserzufluß unterbleiben. Wasserentnahmen aus der tidefreien Elbe sollten bei geringen Oberwasserzuflüssen weitgehend eingeschränkt werden, um die Zeiten zu verkürzen, in denen mit Sandeintrieb von See zu rechnen ist. Alle Ausbaumaßnahmen müssen so gestaltet werden, daß Ebbestromgeschwindigkeit und -beschleunigung im Verhältnis zu Flutstromgeschwindigkeit und -beschleunigung vergrößert werden und daß keine Bereiche mit besonders niedrigen Geschwindigkeiten entstehen, in denen es bei geringerem Oberwasserzufluß zu Ablagerungen im Fahrwasser kommen kann.

Schriftenverzeichnis

1. KLEIN, H. A.: Ermittlung des Durchflusses aus Strömungsmessungen im Tidegebiet. Mitteilungen des Franzius-Inst. der TH Hannover, H. 14, 1958.
2. LUCHT, F.: Hydrografie des Elbe-Ästuars. Archiv für Hydrobiologie, Suppl. Bd. XXIX II, 1964.
3. NÖTHLICH, I.: Untersuchungen über den Schlickhaushalt in der Unterelbe. Mitteilungen der WSD Hamburg Nr. 17, 1967.
4. ROHDE, H.: Eine Studie über die Entwicklung der Elbe als SchiffsstraÙe. Mitteilungen des Franzius-Inst. der TU Hannover, H. 36, 1971.
5. SIMON, W. G.: Untersuchungsergebnisse an Grundproben aus dem Gebiet der Elbe zwischen Scheelenkuhlen und Cuxhaven und ihre Ausdeutung hinsichtlich der Sandwanderung 1951. Mitteilung Nr. 8 der WSD Hamburg, 1953.