

# Die Messung von Dichteströmungen in einem idealisierten Tidemodell

Von Timm Stückrath

## 1. Einführung

Die Durchmischung von Süß- und Salzwasser in den Brackwassergebieten von Tideflüssen wird durch zwei Einflüsse gekennzeichnet: die turbulente Diffusion und die Dichteströmung.

Die turbulente Diffusion kann aus der Verteilung des Salzgehalts in Flußlängsrichtung und in lotrechter Richtung abgeleitet werden; die Dichteströmung wird aus den Strömungsprofilen in lotrechten Achsen bestimmt.

Die physikalische Beschreibung der Durchmischung von Süß- und Salzwasser in einer geschlossenen mathematischen Form ist nicht möglich, da die turbulente Diffusion und die Dichteströmung von so unterschiedlichen Größen wie der Tide, dem Oberwasser, der Form und Rauigkeit des Flußbettes und Gravitations- und CORIOLISKräften abhängen.

Die Forschung auf diesem Gebiet hat besonders zur Vorhersage der mittleren Salzgehaltsverteilung in Flußlängsachse wichtige Ergebnisse erzielt. Neben anderen Verfassern haben IPPEN und HARLEMAN (11, 12) festgestellt, daß das Diffusionsgesetz von FICK in eindimensionaler Anwendung zur Beschreibung der mittleren Salzgehaltsverteilung in Flußlängsrichtung herangezogen werden kann und daß die turbulente Energiedissipation der Tidewelle, die Querschnitte und das Oberwasser zutreffende Parameter ergeben, um Brackwassergebiete nach dem Zustand der Durchmischung einzuteilen.

Es muß jedoch noch eingehend erforscht werden, wie die Dichteströmungen in den Brackwassergebieten von Tideflüssen beeinflußt werden. Die bisherige Forschung über Dichteströmungen hat sich vornehmlich auf tidefreie Flußmündungen beschränkt, in denen das schwere Salzwasser und das leichtere Süßwasser in Schichten getrennt sind. Die Modellversuche, die im FRANZIUS-INSTITUT in Hannover mit Unterstützung durch die DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT durchgeführt wurden, hatten deshalb die Aufgabe, einen Beitrag zur Erforschung der Dichteströmung in durchmischten Brackwassergebieten zu liefern.

## 2. Beschreibung des Modells

Die Rinne, in der die Versuche durchgeführt wurden, ist auf Abbildung 1 dargestellt. Sie hatte eine Länge von 40 m, eine Breite von 0,4 m und eine mittlere Wassertiefe von 0,15 m.

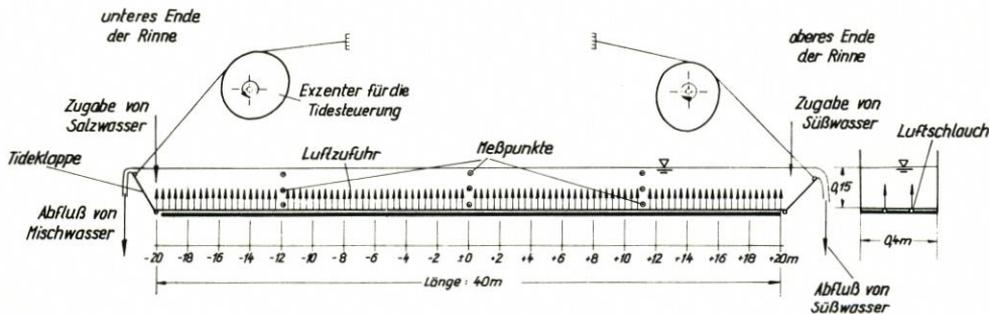


Abb. 1. Schematische Darstellung der Tiderinne

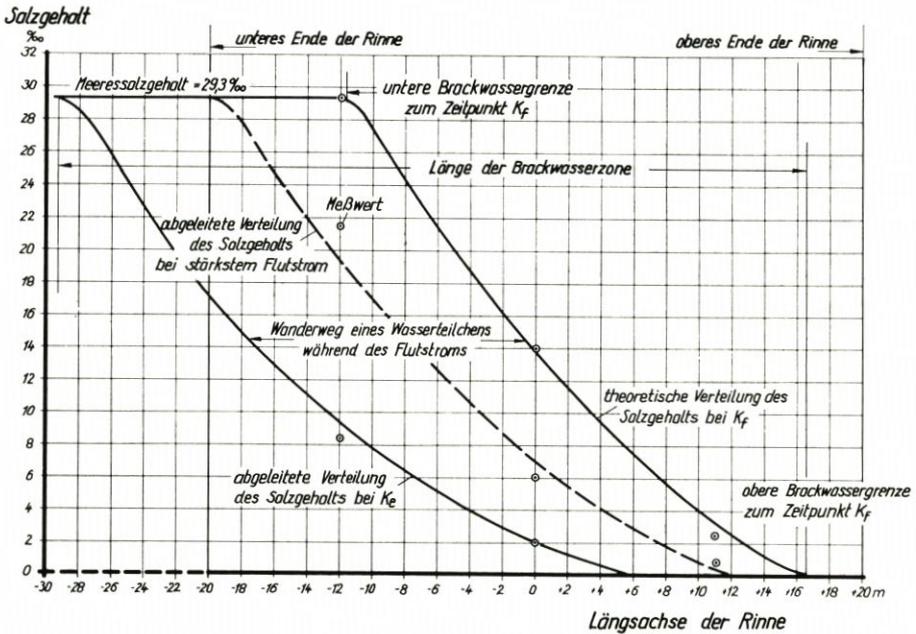


Abb. 2. Verteilung des mittleren Salzgehalts in der Rinne (Versuch 149)

Das Modell wurde am oberen Ende mit Süßwasser, am unteren Ende mit Salzwasser gespeist. Die Tide wurde durch Tideklappen erzeugt, die durch Exzenter bewegt wurden. In der Rinne

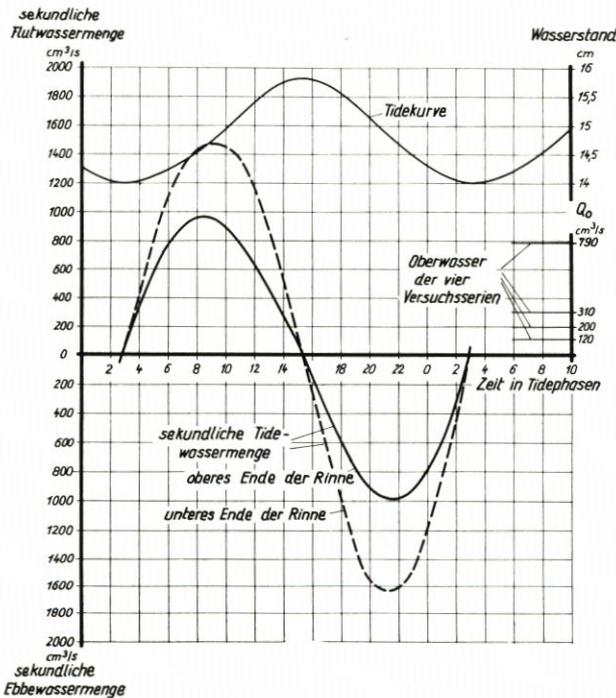


Abb. 3. Sekundäre Tide- und Oberwassermengen

bildete sich eine Brackwasserzone aus, die durch die Wasserzugabe und den Überfall über die Tideklappen so gehalten wurde, daß die obere Brackwassergrenze niemals das obere Ende der Rinne erreichte, während die untere Brackwassergrenze durchaus über das untere Ende der Rinne hinauswandern konnte (Abb. 2).

Da die natürliche Turbulenz in dem Modell sehr gering war, wurde Luft in fein verteilten Blasen vom Boden in die Rinne eingeleitet und damit eine künstliche Turbulenz erzeugt. Da eine gleichbleibende Luftzufuhr eine konstante Energiedissipation je Massen- oder Volumeneinheit bewirkt, auch wenn sich die Wassertiefe ändert, ist die Einleitung von Luft ein gutes Mittel, um in Tidemodellen eine gleichbleibende erhöhte Turbulenz zu erzeugen.

Rund 70 Modellversuche wurden ausgeführt und dabei drei Parameter in den folgenden Grenzen verändert:

- a. Mittlere Strömungsgeschwindigkeit des Oberwassers von 0,20 bis 1,35 cm/s (in 4 Serien),
- b. Salzgehalt des Meeres von 0 bis 35 ‰,
- c. Luftzufuhr von 4 bis 85 cm<sup>3</sup>/s · m<sup>2</sup>.

Da die Tide im Modell keinen nennenswerten Einfluß auf die Turbulenz hatte, wurden alle Versuche mit einer gleichbleibenden Tide durchgeführt. Der Tidehub betrug 1,8 cm, die Tidedauer 30 Minuten. Die Tidewassermengen während einer Tidedauer (die Tide wurde in 24 Phasen aufgeteilt) und das Oberwasser sind Abbildung 3 zu entnehmen.

Der Salzgehalt wurde über die elektrische Leitfähigkeit des Salzwassers an 9 Festpunkten in 3 Meßlotrechten und je 3 Wassertiefen gemessen (Abb. 1). Die geringen Strömungsgeschwindigkeiten wurden mit elastisch eingespannten Stauscheiben aufgenommen, die auf Abbildung 4 dargestellt sind.

Die Stauscheiben waren an starren Aluminiumdrähten aufgehängt, die vor ihrer Einspannung in eine dünne Blattfeder mündeten. Bei einer Auslenkung der Pendel durch die Strömung war die elastische Verformung allein auf die Blattfedern beschränkt. Die Krümmung der Blattfedern wurde durch Dehnmeßstreifen aufgenommen. Über eine Eichkurve konnten mit diesen Strömungsmessgeräten Strömungsgeschwindigkeiten zwischen 0,2 cm/s und 10 cm/s mit guter Genauigkeit gemessen werden.

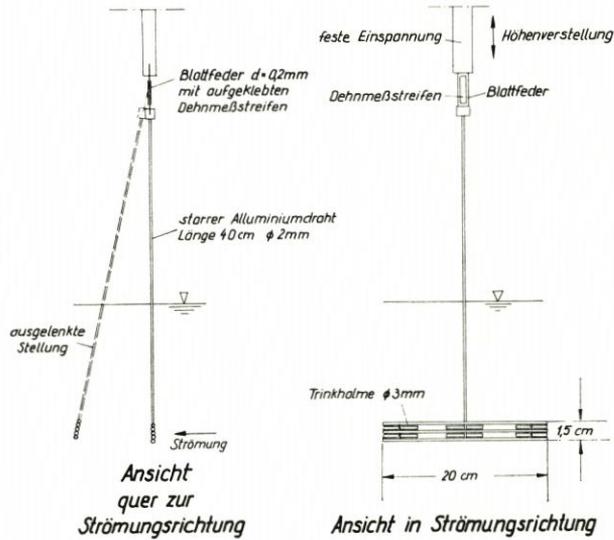
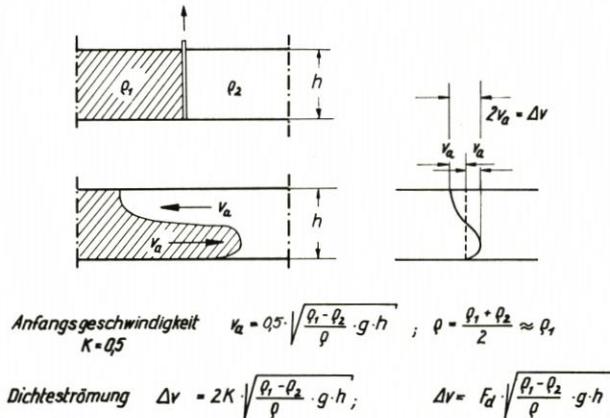


Abb. 4. Stauscheibe zum Messen von geringen Strömungsgeschwindigkeiten



### 3. Salzgehaltsverteilung

Da das Gesetz von FICK in zahlreichen Veröffentlichungen (5, 8, 9, 14, 15) für natürliche Brack-

$$\text{FROUDEsche Dichtezahl } F_d = \frac{\Delta v}{\sqrt{\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho} \cdot g \cdot h}}$$

$$\text{FROUDEsche Zahl: } \rho_2 = 0; F_r = \frac{v}{\sqrt{g \cdot h}}$$

Abb. 5. Die Anfangsgeschwindigkeit

wassergebiete mit verschiedenen Durchmischungsgraden zur Beschreibung der Salzgehaltsverteilung bereits mit Erfolg herangezogen werden konnte, war es zweckmäßig, auch die Modellversuche des FRANZIUS-INSTITUTS mit dieser mathematischen Verknüpfung zu ordnen und zu prüfen. Eine ausführliche Beschreibung der Modellversuche und ihrer Auswertung wurde vor kurzem veröffentlicht (16). Daher soll hier nur angemerkt werden, daß die gemessene Salzgehalts-

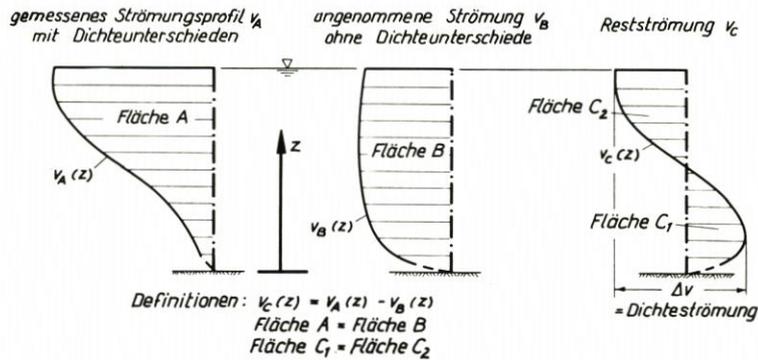


Abb. 6. Definition der Dichteströmung

verteilung mit diesem Gesetz gut anzunähern war, wie auch das Beispiel auf Abbildung 2 beweist.

Bei der Anwendung des Diffusionsgesetzes von FICK wurde statt der Energiedissipation der Tidewelle, die in natürlichen Gewässern neben dem Oberwasser den Durchmischungsgrad bestimmt, die Energiedissipation der Luftzufuhr benutzt. Dabei konnten die Versuche des MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY zum Vergleich herangezogen werden, bei denen in einer tidefreien Rinne die künstliche Turbulenz durch bewegte Drahtgitter erzeugt wurde (6, 7, 10).

Für die Analyse der Dichteströmungen ist es nicht unbedingt erforderlich, die Salzgehaltsverteilung theoretisch vorherbestimmen zu können. Um auf die Dichteströmung schließen zu können, muß nur vorausgesetzt werden (z. B. durch Messungen in der Natur oder im Modell), daß die Salzgehaltsverteilung an jedem Punkt zu jeder Zeit bekannt ist.

#### 4. Dichteströmungen

Das Schulbeispiel der Dichteströmungen ist die Bestimmung der Anfangsgeschwindigkeit  $v_a$ , die auftritt, wenn eine lotrechte Trennwand zwischen zwei Flüssigkeiten unterschiedlicher Dichte ( $\rho_1$  und  $\rho_2$ ) plötzlich beseitigt wird (Abb. 5).

Die Gleichung, die diese Geschwindigkeit beschreibt, lautet:

$$v_a = K \cdot \sqrt{\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho} \cdot g \cdot h}$$

K = Konstante

$\rho_1$  = Dichte der schwereren Flüssigkeit

$\rho_2$  = Dichte der leichteren Flüssigkeit

$\rho$  =  $1/2 (\rho_1 + \rho_2)$  bei Süß- und Salzwasser:  $\rho \cong \rho_1$

g = Erdbeschleunigung

h = Wassertiefe.

Viele Untersuchungen wurden bereits ausgeführt, um die Anfangsgeschwindigkeit zu bestimmen. Neben anderen Verfassern haben O'BRIEN und CHERNO (13), KEULEGAN (zitiert in [4]), YIH (zitiert in [3]) und BAHR (4) mit Modellversuchen nachgewiesen, daß die Konstante K den Wert 0,5 hat. ABRAHAM und v. D. BURGH (2) konnten die gleiche Größe der Konstanten theoretisch beweisen, ALLEN und PRICE (3) bestimmten sie an Schiffsschleusen.

Wenn nach Abbildung 5 die lotrechte Trennwand beseitigt worden ist, ergibt sich die Dichteströmung zu:

$$\Delta v = 2v_a$$

Damit kann die Ausgangsgleichung umgeformt werden zu:

$$\Delta v = 2K \sqrt{\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho} \cdot g \cdot h}$$

oder

$$F_d = 2K = \frac{\Delta v}{\sqrt{\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho} \cdot g \cdot h}}$$

$F_d$  wird die FROUDESche Dichtezahl genannt; für die Anfangsgeschwindigkeit ist  $F_d = 1$ .

In einer natürlichen Flußmündung kann die Dichteströmung  $\Delta v$  definiert werden als der Unterschied zwischen dem gemessenen Strömungsprofil und einem Strömungsprofil, das sich bei fehlender Dichte ausbilden würde (Abb. 6).

Die Versuche im FRANZIUS-INSTITUT haben gezeigt, daß die FROUDESche Dichtezahl auch für die Beschreibung der Dichteströmung in durchmischten Brackwassergebieten einen zutreffenden Parameter liefert, wenn man in einer Lotrechten mit  $\rho_1$  die Dichte an der Sohle und mit  $\rho_2$  die Dichte an der Oberfläche bezeichnet.

Auf Abbildung 7 werden die über die Tide gemittelten Dichteunterschiede aller drei Meßlotrechten des Modells mit den durchschnittlichen Dichteströmungen verglichen. Es zeigt sich, daß alle Einzelergebnisse eine durchschnittliche FROUDESche Dichtezahl  $F_d < 1$  ergeben.

Die Ausgleichsgerade gibt:

$$F_d \cong 0,6.$$

Dichteströmung  $\Delta v$

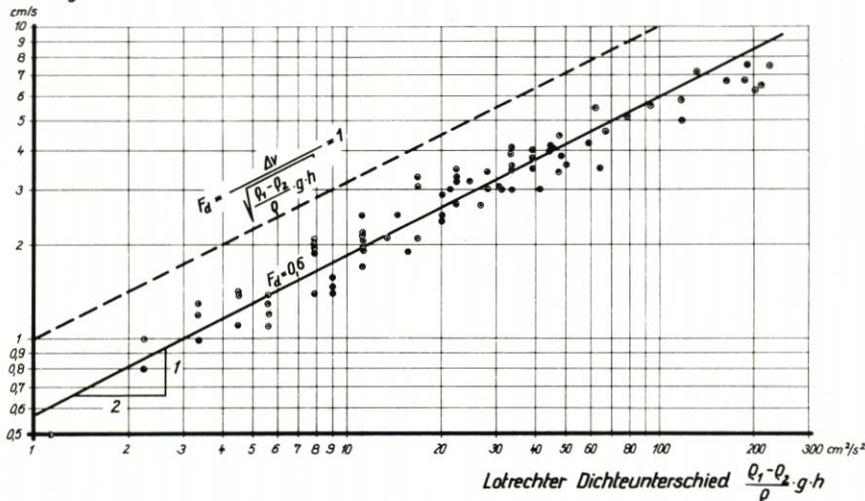


Abb. 7. Durchschnittliche Dichteströmung in Abhängigkeit vom lotrechten Dichteunterschied

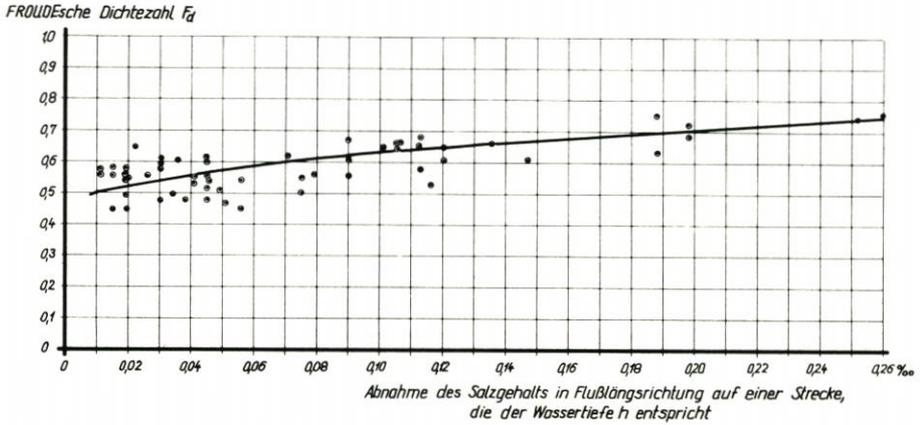


Abb. 8. Abhängigkeit der FROUDESchen Dichtezahl von der Länge der Brackwasserzone

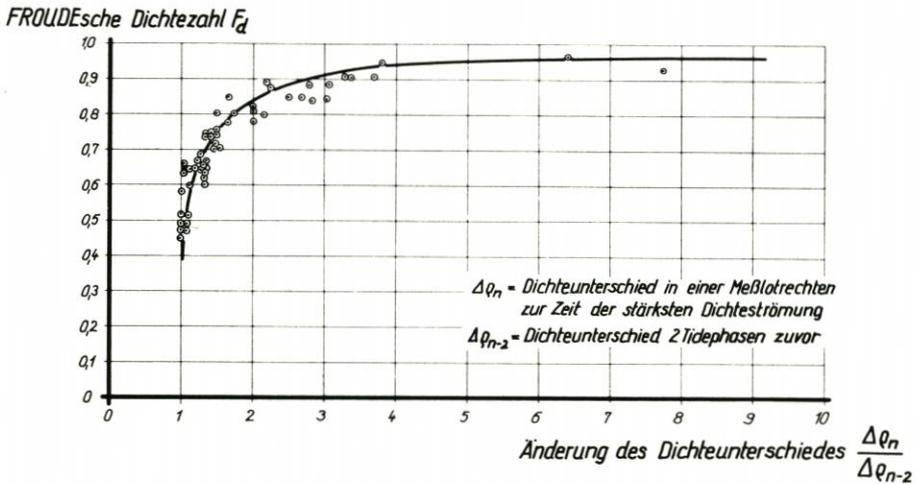


Abb. 9. Abhängigkeit der FROUDESchen Dichtezahl von der Änderung des lotrechten Dichteunterschiedes, Beispiel: Maximalwerte

Auf Abbildung 8 sind die nach Abbildung 7 errechneten durchschnittlichen FROUDESchen Dichtezahlen der Abnahme des Salzgehalts in Flußlängsrichtung gegenübergestellt. Um Brackwassergebiete mit verschiedener Wassertiefe und verschiedenem Meeressalzgehalt vergleichen zu können, ist als Abszisse in Abbildung 8 die Salzgehaltsabnahme in ‰ angegeben, die sich in Flußlängsachse auf einer Strecke von der Größe der Wassertiefe ergibt.

Aus Abbildung 8 kann quantitativ abgelesen werden, was ABBOTT (1) bereits in anderer Formulierung aus Naturbeobachtungen geschlossen hat: Wenn in zwei Brackwassergebieten gleicher mittlerer Tiefe die gleiche lotrechte Salzgehaltsverteilung auftritt, aber verschiedene Längen der Brackwasserzonen vorliegen, so ist die kürzere Brackwasserzone durch höhere Dichteströmungen gekennzeichnet.

Abbildung 8 konnte nicht die Abhängigkeit der Dichteströmungen von der zeitlichen Änderung der Salzgehaltsverteilung zeigen, da sie von Ausgangswerten abgeleitet wurde, die über die Tidedauer gemittelt wurden. Die Abhängigkeit der Dichteströmungen von der zeit-

lichen Änderung des Salzgehalts kann Abbildung 9 für die Maximalwerte der Dichteströmungen entnommen werden. In der Rinne traten die größten Dichteströmungen auf, kurz bevor der größte Salzgehalt an der Sohle bei den einzelnen Meßlotrechten gemessen wurde; daher wurde auf Abbildung 9 versucht, den Zustand vor der größten Dichteströmung mit dem Zustand zur Zeit der größten Dichteströmung zu vergleichen.

$\Delta\varrho_n$  bezeichnet den lotrechten Dichteunterschied zur Zeit der größten Dichteströmung,  $\Delta\varrho_{n-2}$  den Dichteunterschied, der 2/24 einer Tidedauer zuvor aufgetreten ist. Für Versuche, bei denen keine Änderung des Dichteunterschiedes auftrat, ergibt die Abszisse den Wert 1. Für diesen Abszissenwert liefert Abbildung 9 die FROUDESche Dichtezahl  $F_d = 0,5$  bis  $0,6$ . Wenn keine schnelle Änderung des Dichteunterschiedes in einem Brackwassergebiet auftritt, kann daher die Dichteströmung nach Abbildung 7 bestimmt werden ( $F_d \cong 0,6$ ).

Wenn jedoch die Abszisse  $\frac{\Delta\varrho_n}{\Delta\varrho_{n-2}}$  gegen  $\infty$  strebt, nähert sich  $F_d$  dem Grenzwert 1.

Bei diesem Grenzfall ändert sich der Dichteunterschied plötzlich, es entstehen damit ähnliche Bedingungen wie bei der Anfangsgeschwindigkeit, für die die FROUDESche Dichtezahl  $F_d = 1$  (Abb. 5) exakt gilt.

## 5. Schlußbetrachtung

Im FRANZIUS-INSTITUT wurden Modellversuche mit idealisierten Brackwassergebieten durchgeführt, bei denen die Salzgehaltsverteilung beliebig geändert werden konnte. Die gemessenen Dichteströmungen zeigten eine Abhängigkeit von der lotrechten Salzgehaltsverteilung, der Salzgehaltsverteilung in Flußlängsachse und der zeitlichen Änderung des Salzgehalts.

## 6. Schrifttum

1. ABBOTT, M. B.: Salinity effects in estuaries. Sears Foundation, J. Marine Research 18 (1960), 2.
2. ABRAHAM, G., und v. D. BURGH, P.: Pneumatic reduction of salt intrusion through locks. Proc. ASCE, J. Hydraulics Division (1964).
3. ALLEN, F. H., und PRICE, W. A.: Density currents and siltation in docks and tidal basins. Dock and Harbour (Juli 1959).
4. BARR, D. I. H.: Densimetric exchange flow in rectangular channels. La Houille Blanche (1963).
5. GOLE, C. V., und THAKER, V. S.: Progressive salinity intrusion during dry season in the Hooghly estuary. Proc. 13th Congress IAHR 3, Subj. C. Kyoto (1969).
6. HARLEMAN, D. R. F., JORDAN, J. M., und LIN, J. D.: The diffusion of two fluids of different density in a homogenous turbulent field. Massachusetts Inst. Techn., Hydrodyn. Laboratory, Techn. Report 31 (1959).
7. HARLEMAN, D. R. F., McDOUGALL, D. W., GALVIN, C. J., und HOOPES, J. A.: An analysis on one-dimensional convective diffusion phenomena in an idealized estuary. Massachusetts Inst. Techn., Hydrodyn. Laboratory, Techn. Report 42 (1961).
8. HARLEMAN, D. R. F., und HOOPES, J. A.: The prediction of salinity intrusion changes in partially mixed estuaries. 10th Congress IAHR, Vol. 1; 1.15. London (1963).
9. HARLEMAN, D. R. F., und ABRAHAM, G.: One dimensional analysis of salinity intrusion in the Rotterdam Waterway. Delft Hydraulics Laboratory 44 (1966).
10. IPPEN, A. T., HARLEMAN, D. R. F., und LIN, J. D.: Turbulent diffusion and gravitational convection in an idealized estuary. Massachusetts Inst. Techn., Hydrodyn. Laboratory, Techn. Report 38 (1960).
11. IPPEN, A. T., und HARLEMAN, D. R. F.: One dimensional analysis of salinity intrusion in estuaries. Corps of Eng. U.S. Army, Committee on Tidal Hydraulics, Techn. Bull. 5 (1961).

12. IPPEN, A. T. ed.: Estuary and coastline hydrodynamics. McGraw-Hill, 1966.
13. O'BRIEN, M. P., und CHERNO, J.: Model law for motion of salt water through fresh. Transactions ASCE 99, (1934).
14. PARTENSKY, H. W., und LOUCHARD, L.: Etude sur le variation cyclique de la salinité moyenne dans l'estuaire du Saint-Laurent. Université de Montréal, Ecole Polytechn. Division d'Hydraulique (1967).
15. PARTHENIADES, E.: Field investigations to determine sediment sources and salinity intrusion in the Maracaibo estuary, Venezuela. Massachusetts Inst. Techn., Hydrodyn. Laboratory, Report 94 (1966).
16. STÜCKRATH, T.: Über die Durchmischung von Süß- und Salzwasser in den Brackwasser-gebieten von Tideflüssen. Mitt. Franzius-Inst. 35 (1970).