

Strömungsvorgänge in Hafenmündungen

Von Hans Vollmers

Zusammenfassung

Die Interpretation von Ablösungszonen in seitlichen Erweiterungen wie Hafenmündungen, Bühnenfeldern usw. ist für den Wasserbauingenieur von Bedeutung, da diese Austauschprozesse mit der temporären Speicherung von transportierten Stoffen oder Wärme zusammenhängen. Wenn sich das mitgeführte Material unkontrolliert absetzt, kann es gerade bei Hafenmündungen zu erheblichen Störungen des Schiffsverkehrs kommen. Die Vorgänge sind im Tidegebiet durch den rhythmischen Wechsel der Strömungsrichtung besonders kompliziert. Es wird versucht, nach einer schematischen Analyse der Strömungsvorgänge an einem praktischen Beispiel die Schwierigkeiten beim Entwurf einer Hafenmündung zu zeigen.

Summary

The interpretation of turbulence zones in lateral enlargements such as harbour mouths, groin fields, etc., is of great importance for the hydraulic engineer because these exchange processes interact with the temporary storage of transported material or warmth. In the case of an uncontrolled deposition of sediment, especially in the region of harbour mouths, considerable disturbance to navigation may occur. The processes in tidal estuaries are especially complicated, due to the rhythmical change of flow directions. According to a schematic analysis of the flow processes, an attempt will be made – by means of a practical example – to show the difficulties which occur in the planning of a harbour mouth.

Zwei wichtige Punkte müssen bei der Planung einer Hafenmündung an einem durchströmten Gerinne beachtet werden:

1. Die Schifffahrt soll behinderungsfrei ein- und ausfahren können (große Mündungsbreite).
2. Die Sedimentation soll möglichst gering sein (kleine Mündungsbreite).

Diese Bedingungen sind widersprüchlich. Hafenmündungen sind seitliche Erweiterungen, in denen sich allgemein Ablösungszonen ausbilden, die durch Wirbel angefacht werden. Diese mehr oder weniger großen Ablösungszonen werden „Walzen“ genannt. Man unterscheidet Walzen verschiedener Ordnung, die sich aus der Abhängigkeit von der Drehbewegung initiiierenden Strömung ergibt (Abb. 1).

Die Ablagerung von Feststoffen in seitlichen Erweiterungen hängt von der Charakteristik der Walzen ab, da der Austausch von Flüssigkeitsmaterial mit dem Austausch der darin enthaltenen Feststoffe korrespondiert. Entsprechend der Schemaskizze in Abb. 1 lagert sich das gröbere Material in der Zone a und das feinere Material in der Zone b ab.

Ganz allgemein lassen sich die Ursachen für die Verlandung aus den folgenden Bewegungseffekten nach MAGENS (1958) erklären:

1. *Stromeffekt* (Walze im Hafenmund durch Energieaustausch)
2. *Tideeffekt* (Auffüllen des Hafenmundes während der Flutphase)
3. *Dichteeffekt* (Dichteströmung durch unterschiedlichen Salzgehalt im Ästuar und im Hafenmund, s. Abb. 2)

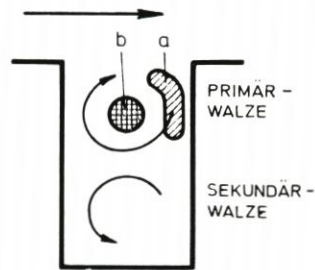


Abb. 1

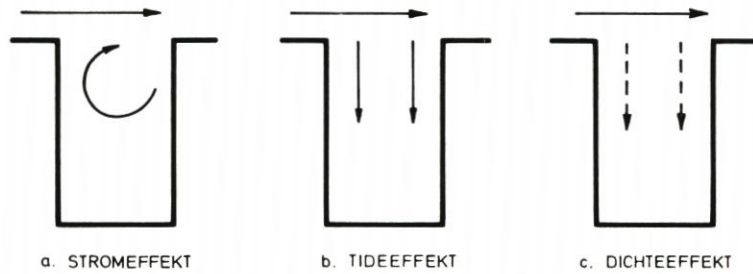


Abb. 2

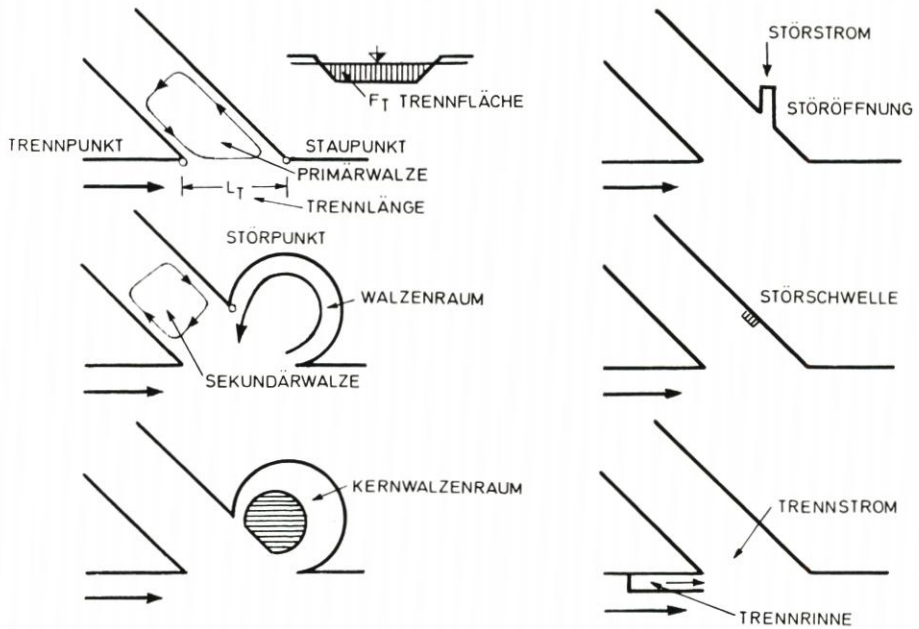


Abb. 3

Der Stromeffect ist maßgebend für die Ablagerungen in Hafenmündungen an Wasserstraßen mit richtungskonstanter Strömung. Wenn man in diesen Fällen die Primärwalze beeinflussen kann, wird sich die Sedimentation auch entsprechend verhalten. Abb. 3 zeigt Möglichkeiten zur Veränderung bzw. zur Verlagerung der Primärwalze.

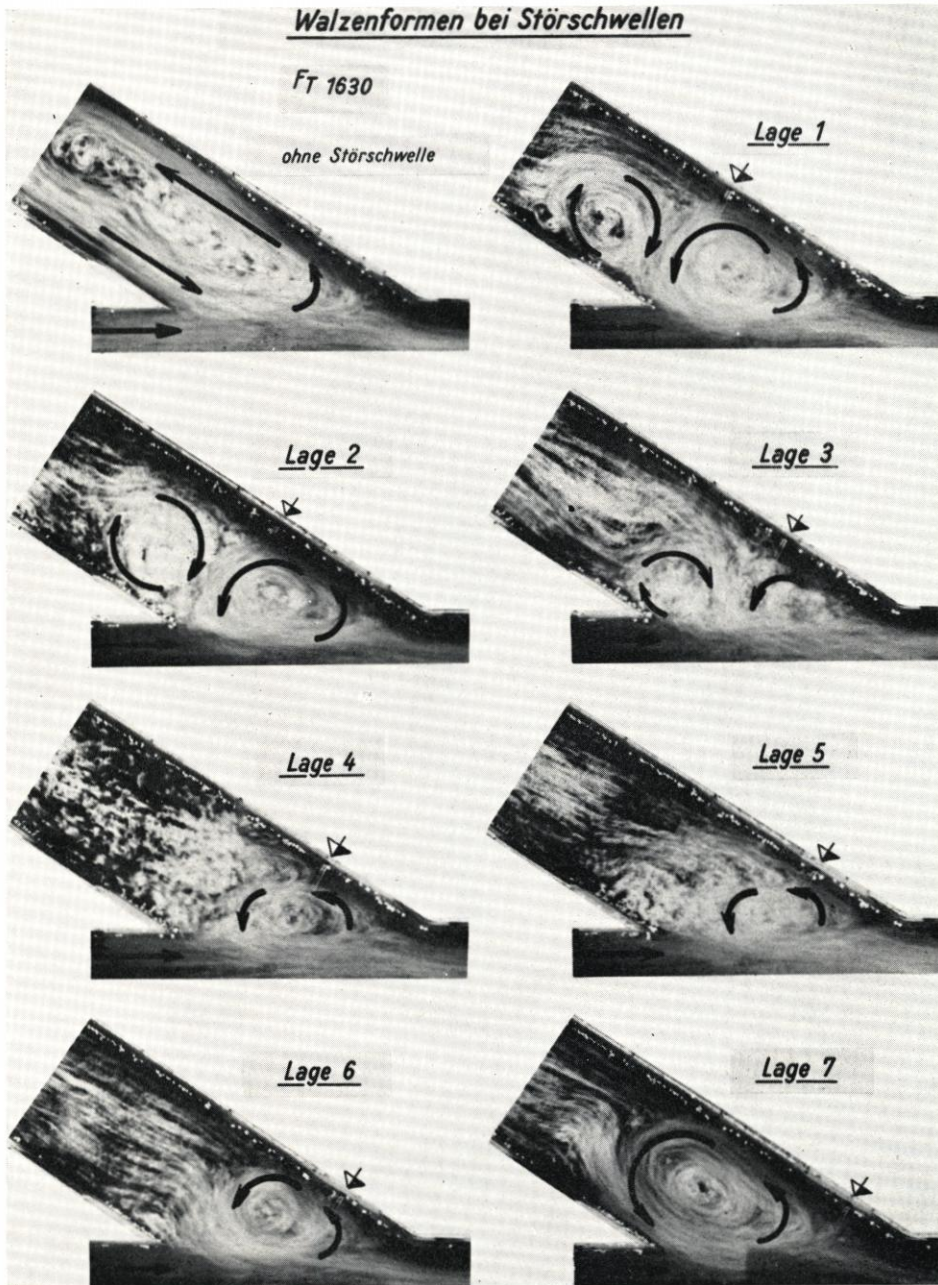


Abb. 4

„Walzenraum“, „Kernwalzenraum“, „Störöffnung“ (Störstrom) und „Störschwelle“ sind Maßnahmen, die auf einer Veränderung der Unterstromgeometrie beruhen.

Ebenso ist es möglich, die Trennzone zwischen Strömung und Walze zu beeinflussen. „Trennrinne“ und „Trennstrom“ verändern den Geschwindigkeitsgradienten. Der Trenn-

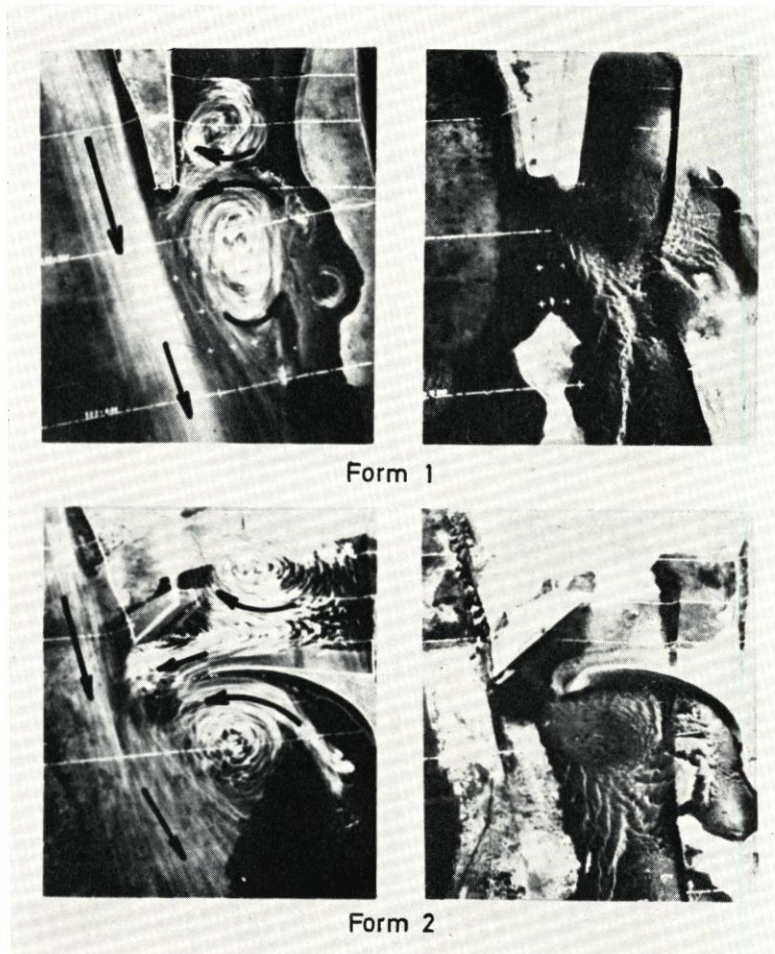


Abb. 5

strom kann künstlich erzeugt werden oder aber natürlich aus dem Fluß stammen. Dabei nimmt man vorteilhaft nur die geringer feststoffbelasteten oberen Schichten. Das wird erreicht durch eine Schwelle am Einlauf der Trennrinne.

Die Beeinflussung der Primärwalze durch eine Störschwelle wird in Abb. 4 gezeigt. Die Pfeile bedeuten jeweils die Lage der Schwelle. Die praktische Anwendung eines Walzenraumes soll an einem Hafenmund im Rhein demonstriert werden (Abb. 5). Im oberen Bildteil sieht man die Situation vor Änderung der Geometrie; Primärwalze und Ablagerungen liegen im Mündungsbereich. Unten erkennt man Strömung und Ablagerungszone nach dem Umbau, die Mündung bleibt frei.

In Ästuarien ist es außerordentlich schwierig, eine befriedigende Lösung zu finden, da sich die Strömungsrichtung rhythmisch ändert. Wenn man den Dichteeffekt einmal vernachlässigt, läßt sich das Strömungsgeschehen wie folgt beschreiben (Abb. 6):

Während der Flutströmung überlagern sich Strom- und Tideeffekt, d. h., die Strömungsintensität am Staupunkt wird verstärkt. Bei Ebbströmung wirken beide Effekte

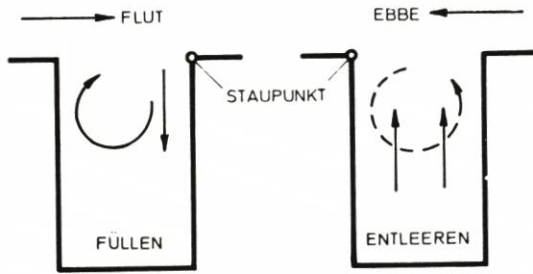


Abb. 6

EMSMODELL

Längen 1:500
Tiefen 1:100
Zeit 1:50

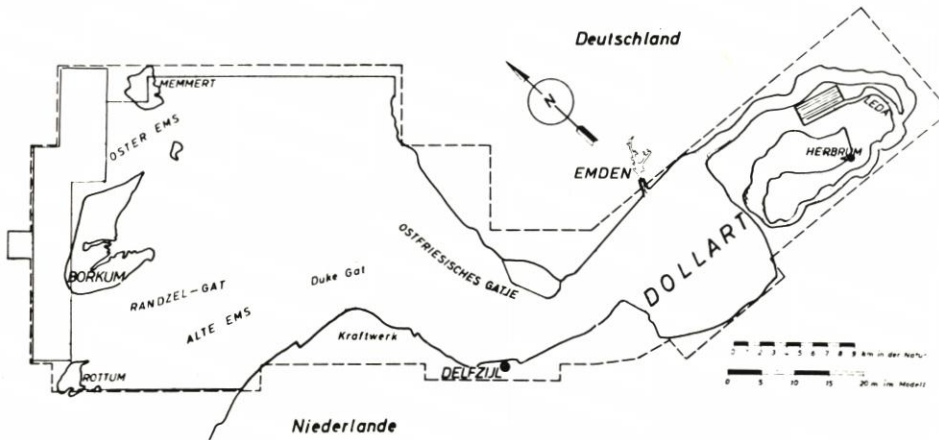
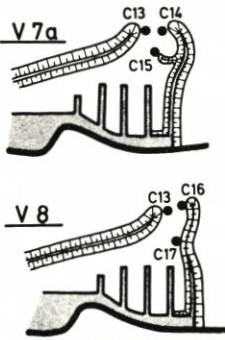


Abb. 7

VARIANTEN DER EINFAHRT 2



EMSÄSTUAR LAGEPLAN EINFARTEN DELFZIJL

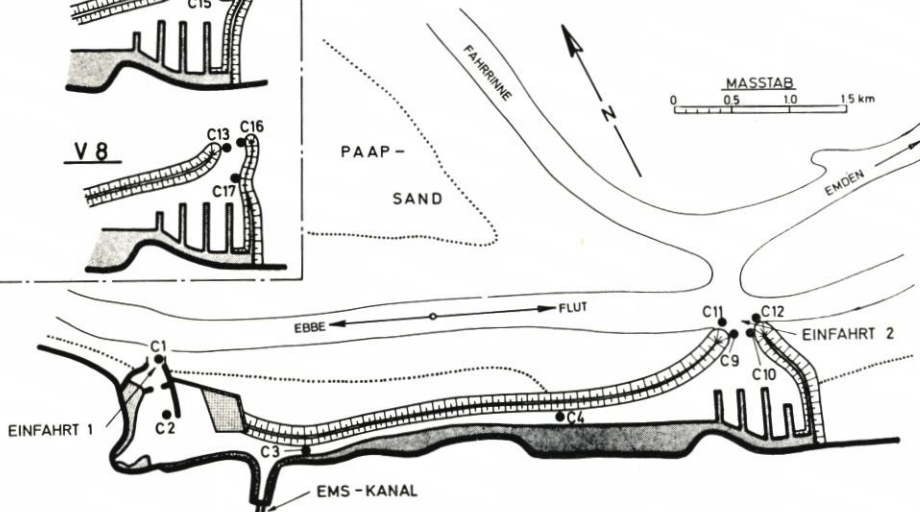


Abb. 8

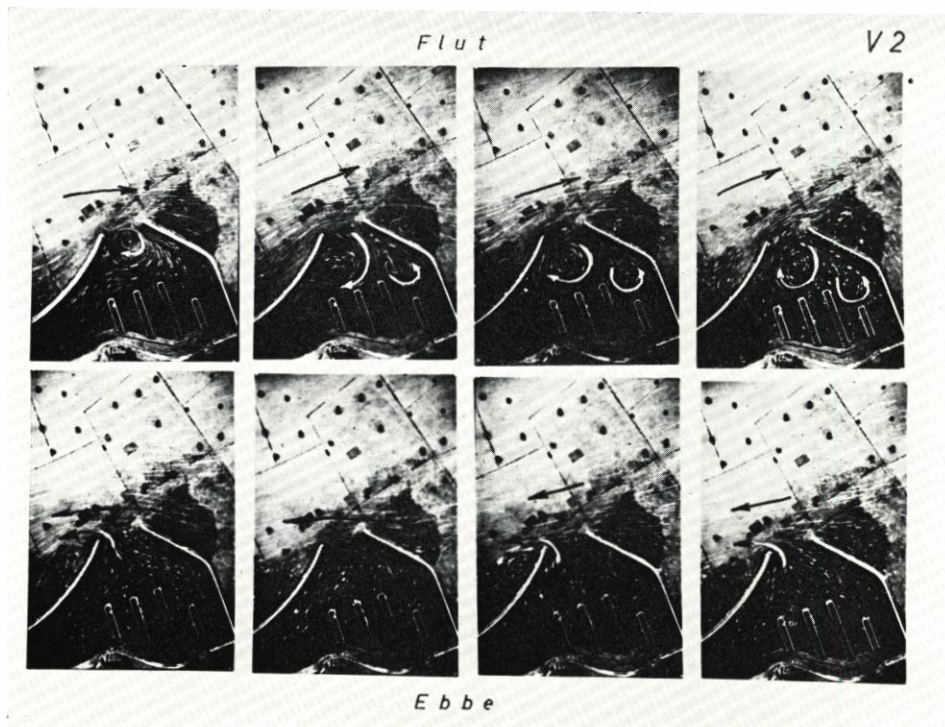


Abb. 9

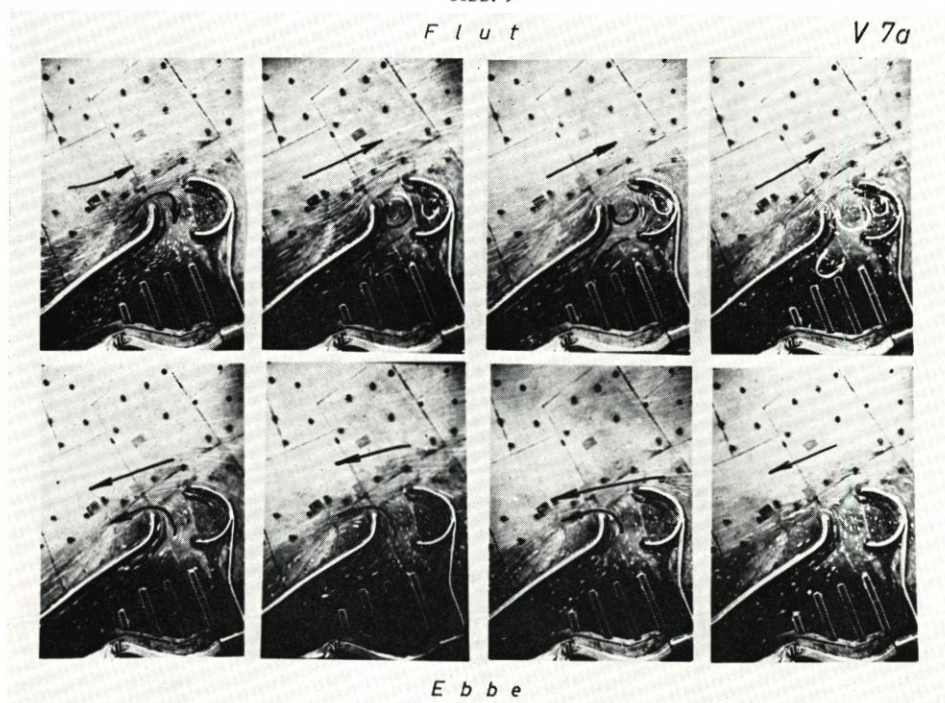


Abb. 10

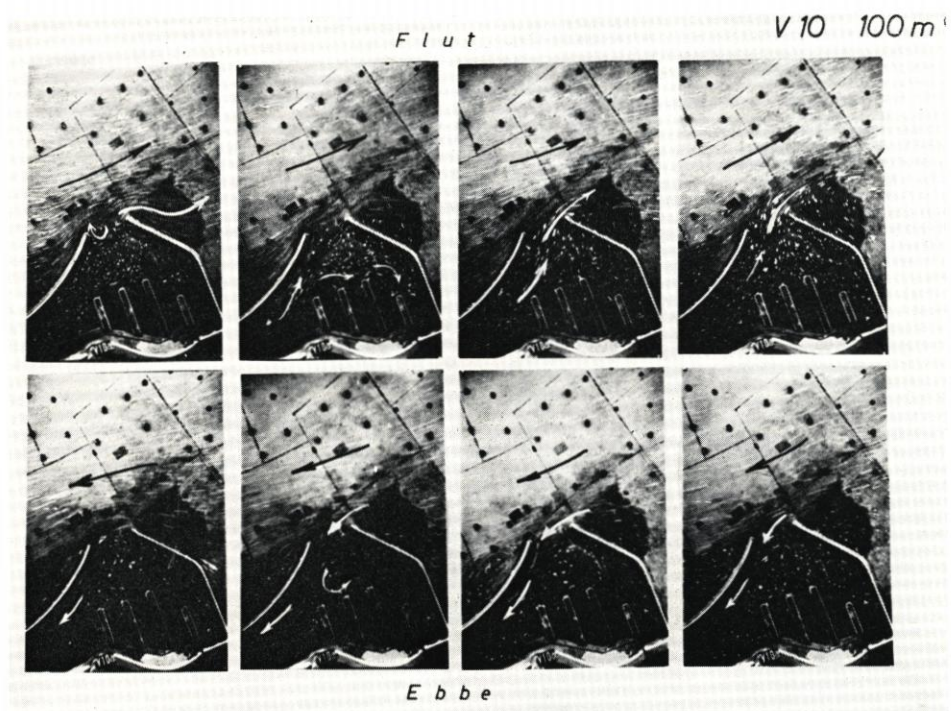


Abb. 11

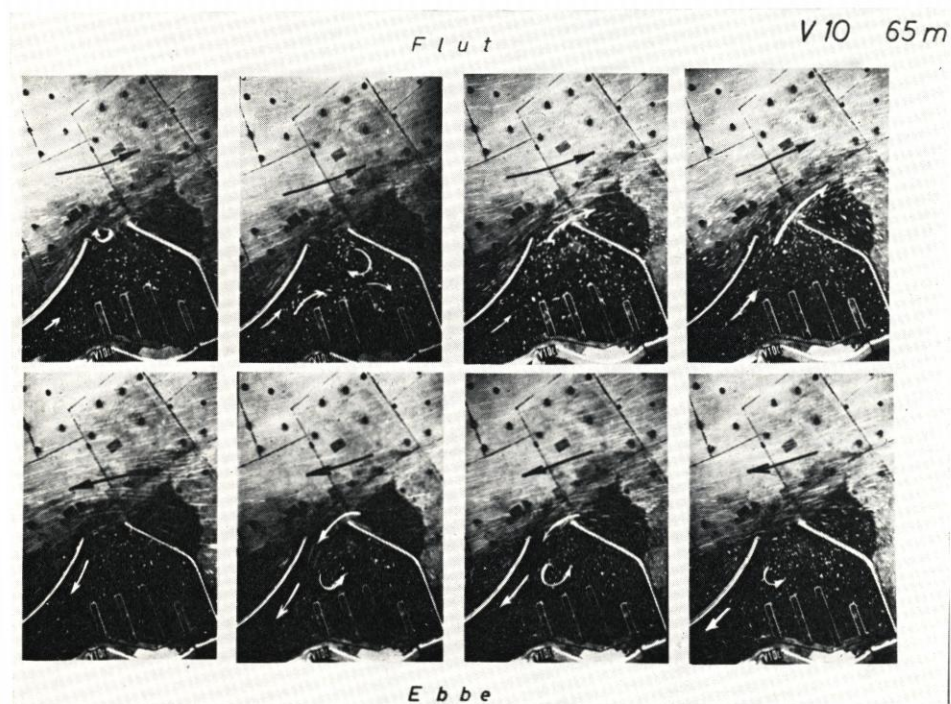


Abb. 12

gegeneinander. Da Walzen allgemein nur einen geringen Energieinhalt besitzen, lassen sich diese Gebilde durch geringe Strömungsimpulse verändern oder zerstören.

Diese allgemeinen Überlegungen bildeten die Grundlage für die Untersuchung einer Hafenmündung am Emsästuar im Tidegroßmodell der Ems bei der BAW in Hamburg. Das Modell mit den Maßstäben 1 : 500 horizontal und 1 : 100 vertikal umfaßt das Emsästuar von Borkum bis zur Tidegrenze bei Herbrum (Abb. 7). Es hat eine feste Sohle; Teilausschnitte werden jedoch auch mit mobilem Bettmaterial untersucht. Da die Ems Grenzfluß zwischen den Niederlanden und der Bundesrepublik Deutschland ist, werden in diesem Modell Fragestellungen beider Verwaltungen (Rijkswaterstaat und Wasser- und Schifffahrtsverwaltung) untersucht. Unter anderem betraf das die neue Einfahrt in den Hafen Delfzijl.

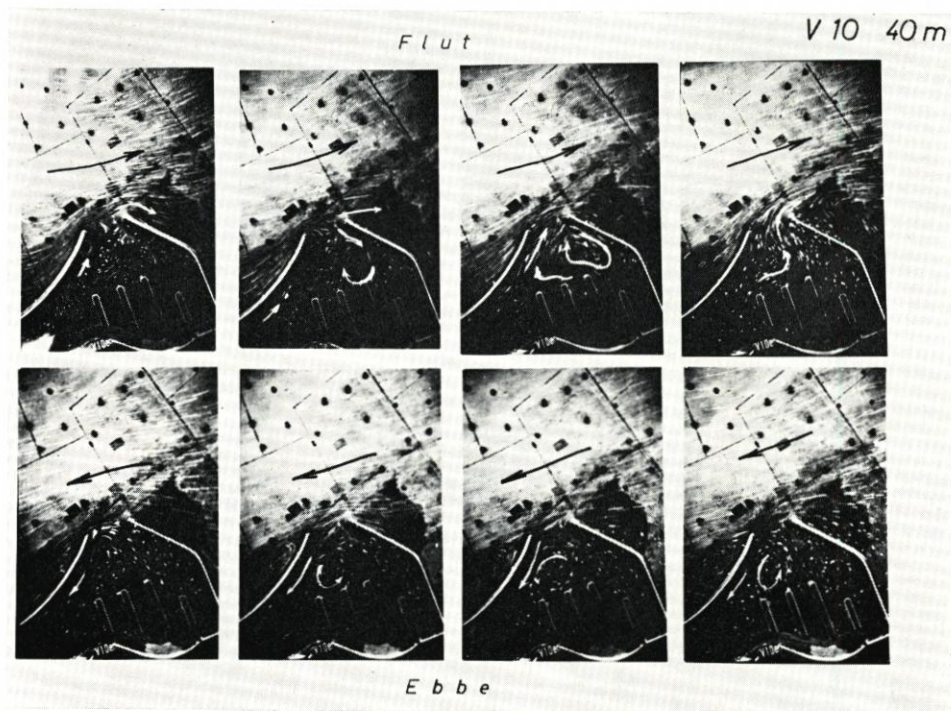


Abb. 13

Die allgemeine Situation des Hafens Delfzijl ist aus Abb. 8 ersichtlich. Vor etwa 20 Jahren bestand der Hafen nur aus dem linken Becken, die Zufahrt erfolgte noch teilweise aus der Bucht von Watum. Wegen der dort beginnenden Verlandung mußte eine neue Zufahrt aus dem Gattjebogen gebaggert werden. Die zunehmende Industrialisierung und neue Verlandungstendenzen im Bereich der alten Einfahrt initiierten den Ausbau des Hafens nach Osten und den Bau einer neuen Einfahrt. Die alte Einfahrt sollte später geschlossen werden. Im Gegensatz zu anderen Hafenentwicklungen mehr senkrecht zur Hauptstromrichtung ist der Hafen Delfzijl praktisch ein Parallelkanal unter Tideeinfluß. Es war zu erwarten, daß nach Schließung der alten Einfahrt in der neuen Zufahrt relativ ungünstige Strömungsverhältnisse auftreten würden. Die Modellversuche hatten daher das Ziel, diese Situation zu untersuchen und gegebenenfalls zu verbessern.

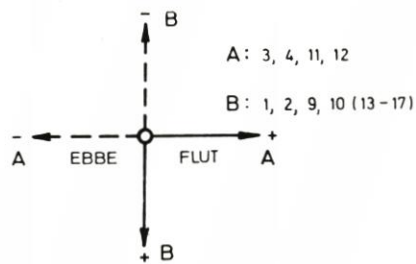


Abb. 14

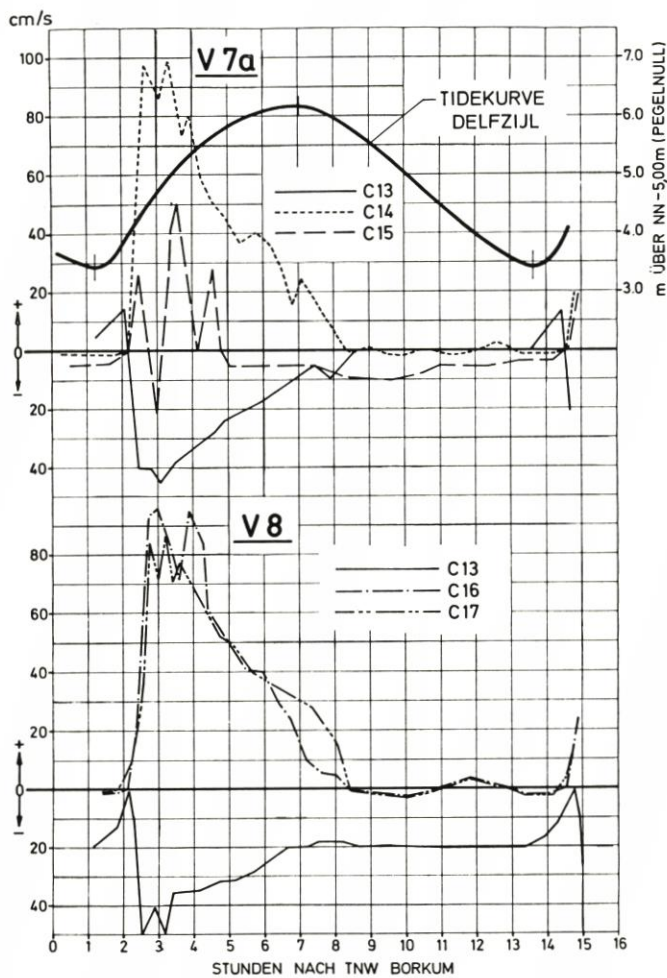


Abb. 15

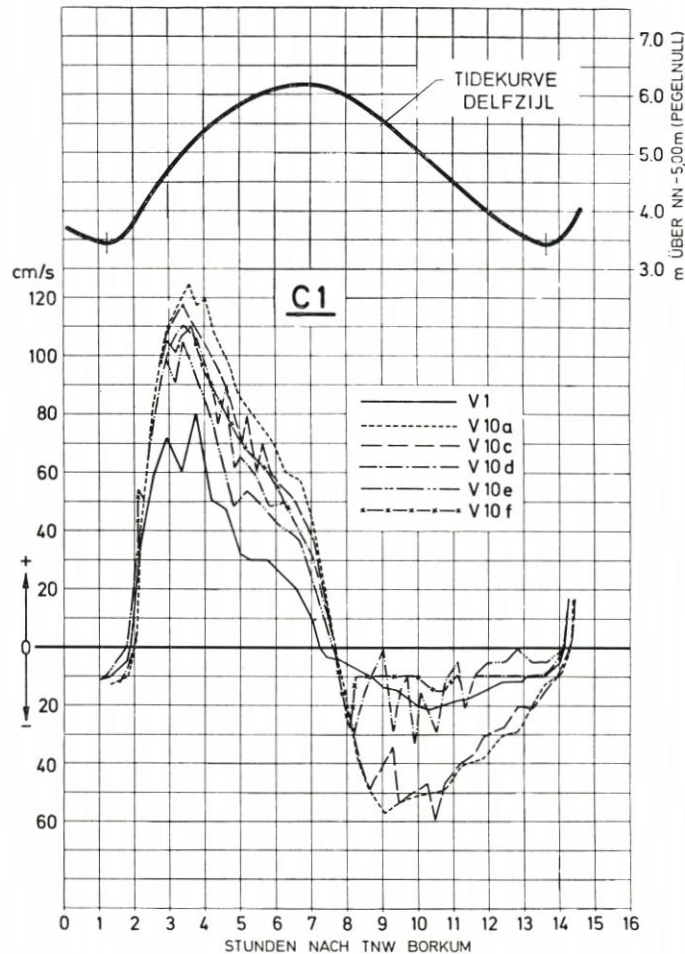


Abb. 16a

Die Beurteilung der verschiedenen untersuchten Varianten erfolgte mit Hilfe der durch Papierschnitzel sichtbar gemachten und photographisch festgehaltenen Oberflächenströmungen sowie durch Messungen der Strömungsgeschwindigkeiten an verschiedenen Punkten in mittlerer Wassertiefe.

Die Strömungsverhältnisse für V 2 (neue Einfahrt offen, alte Einfahrt geschlossen) sind aus Abb. 9 ersichtlich. Während der Flut konzentriert sich die Strömung an der rechten Mole und erzeugt im Hauptbecken eine kräftige Walze. Strom- und Tideeffekt überlagern sich. Während der Ebbe eliminiert der Tideeffekt (Entleerung des Hafens) den Stromeffekt, es bildet sich keine Walze aus. In diesem Falle ist der Stromeffekt durch die abweisende Wirkung der rechten Mole besonders gering.

Abb. 10 zeigt beispielhaft, daß sich durch einen Walzenraum die Primärwalze nicht verändern läßt. Nur in der ersten Flutphase tritt eine relativ gleichmäßige Einströmung auf, später erscheinen wieder großräumige Walzen.

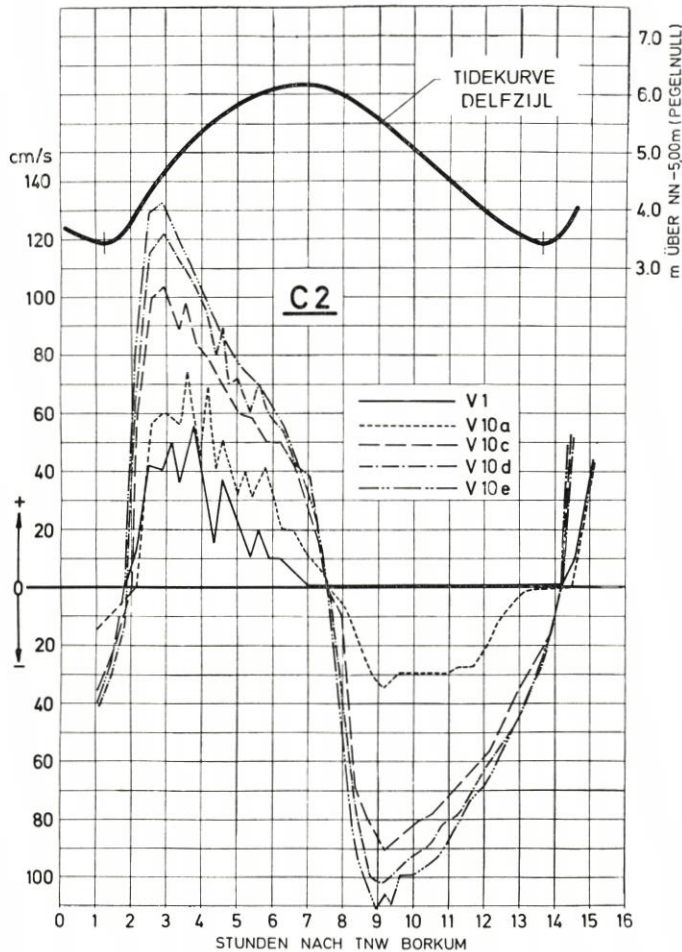


Abb. 16b

Durch geometrische Veränderungen ließ sich die Überlagerung von Strom- und Tideeffekt nicht beeinflussen. Als einzige Möglichkeit, ausgeglichene Strömungsverhältnisse zu erzeugen, bot sich nur der Verzicht auf die Schließung der alten Einfahrt an. In einer systematischen Versuchsserie mit verschiedenen Öffnungsbreiten (100, 65, 50, 40 m) der alten Einfahrt konnte gezeigt werden, daß sich die Strömungsverhältnisse beeinflussen lassen. Diese Entwicklung soll mit Hilfe der Oberflächenströmungen diskutiert werden.

- a) 100 m (Abb. 11): Das Energiegefälle ist ausreichend, um ein Einströmen an der rechten Mole zu verhindern. In der ersten Flutphase tritt praktisch keine Bewegung auf. Später entwickelt sich in der Mündung ein gleichmäßiges Ausströmen. Während der Ebbe kehrt sich der Vorgang um. Die Einströmung erfolgt an der linken Mole, im Hafenmund dreht eine kleine Walze.
- b) 65 m (Abb. 12): Bei dieser Öffnungsbreite sind die Strömungsverhältnisse an der Oberfläche nahezu die gleichen wie bei 100 m Breite.

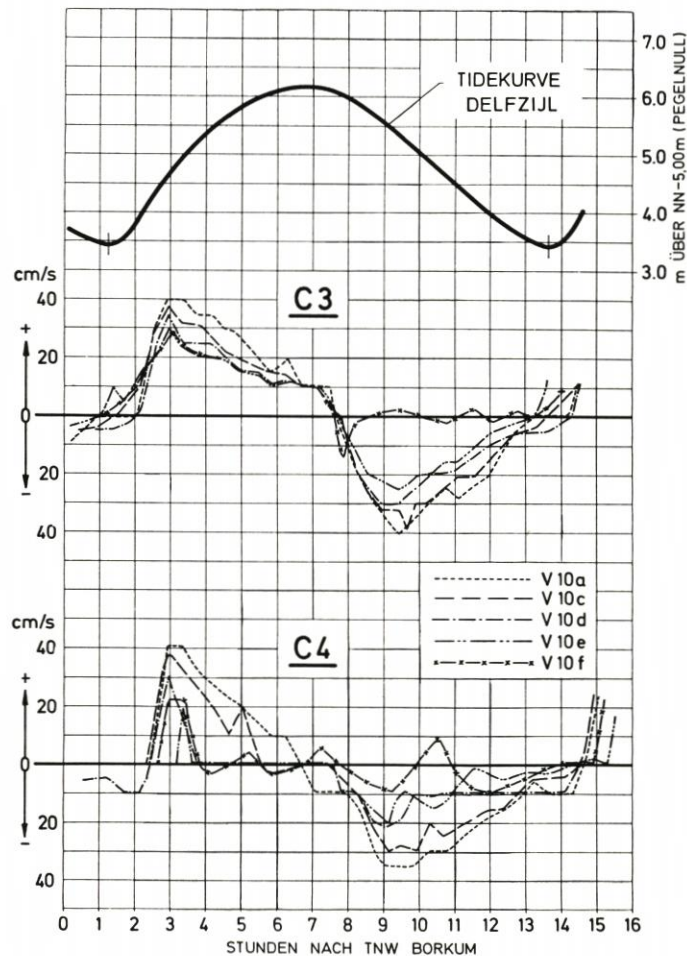


Abb. 17

c) 40 m (Abb. 13): Diese Breite ist nicht mehr ausreichend, um die Bildung einer Walze, d. h. Einstürmen an der rechten Mole in den ersten Flutphasen, zu verhindern. Erst bei Flutphase 4 (rechts) tritt Ausströmen auf.

Während der Ebbe sind die Strömungsverhältnisse bei allen untersuchten Öffnungsweiten praktisch gleich.

Um die Beobachtungen der Oberflächenströmungen zu verifizieren, wurden die Strömungsgeschwindigkeiten mit Pendelströmungsmessern in mittlerer Tiefe an mehreren Punkten (Abb. 8) gemessen. Bedingt durch die Eigenart dieser Meßgeräte wurden die Geschwindigkeiten entweder in Flut-/Ebbichtung oder senkrecht dazu gemessen. Abb. 14 (in Verbindung mit Abb. 8) erklärt die für die einzelnen Punkte benutzten Richtungen und Vorzeichen für die im folgenden diskutierten Ergebnisse.

Aus den Messungen für die Varianten V 7a und V 8 sind große Einstömungsgeschwindigkeiten in den Punkten C 14 und auch C 16 zu erkennen (Abb. 15). Die Schwin-

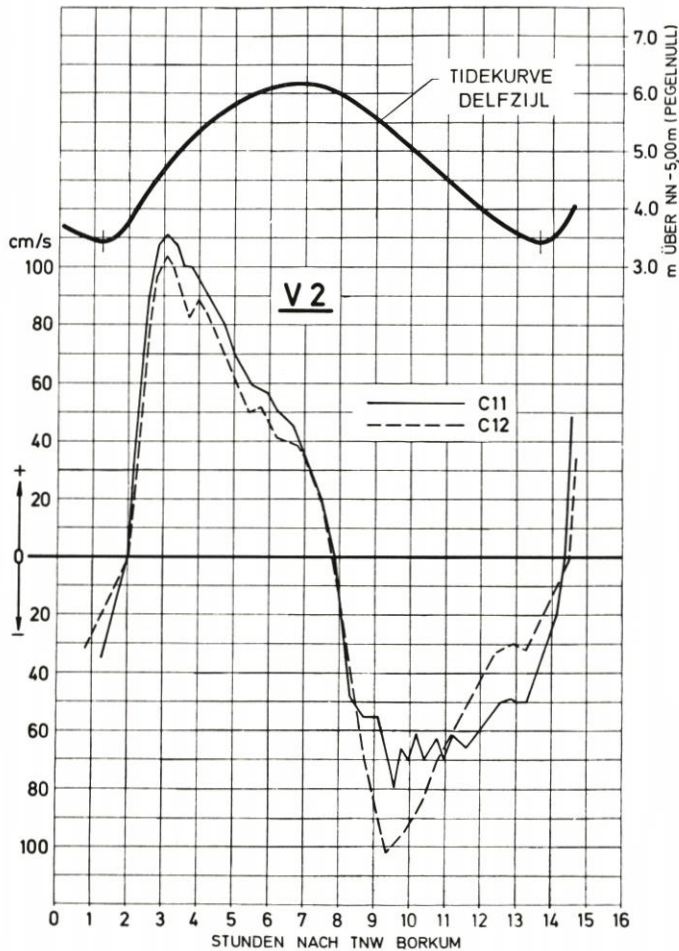


Abb. 18

gungen in C 15 sind durch die Lage des Meßgerätes bedingt. Die Ausströmung im Punkt C 13 hat für V 7a und V 8 die gleiche Charakteristik.

Die Abbildungen 16 bis 19 zeigen die Ergebnisse der Versuchsserie V 10 (verschiedene Öffnungsweiten der alten Einfahrt) im Vergleich mit V 1 (vorhandener Zustand ohne Hafenerweiterung und neue Einfahrt) und V 2 (neue Einfahrt, alte Einfahrt geschlossen). Im Punkt C 1 (Abb. 16a) kann man deutlich die Zunahme der Strömungsgeschwindigkeit mit der Breite der alten Einfahrt erkennen. Die Abnahme der Werte im Punkt C 2 mit der Zunahme der Breite hängt mit der Lage dieses Punktes und der damit verbundenen Beeinflussung durch den Eintrittsstrahl zusammen (Abb. 16b und 8).

Im Hafenkanal sind die Geschwindigkeitsmessungen ohne weiteres zu erklären. Mit abnehmender Öffnungsbreite nehmen die Strömungsgeschwindigkeiten ebenfalls ab. Das wird besonders deutlich während der Ebbe im Punkt C 4 (Abb. 17).

Die Meßpunkte C 11 und C 12 liegen in der Hauptströmung vor der neuen Einfahrt.

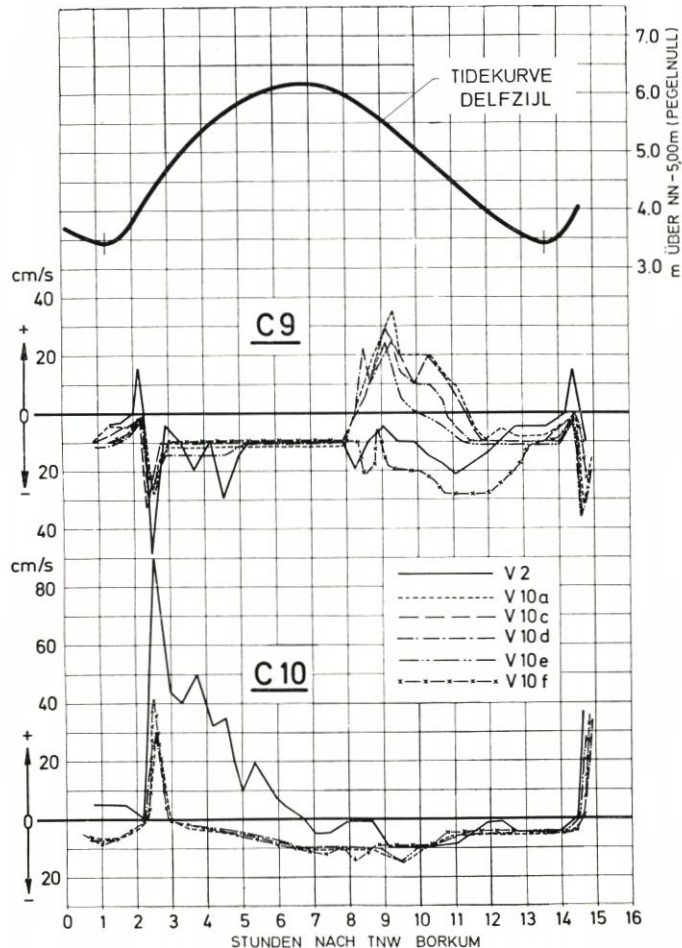


Abb. 19

Die Geschwindigkeitsverteilung ist typisch für einen Tidestrom. Die kleineren und oszillierenden Ebbgeschwindigkeiten in C 11 werden durch die rechte Mole und die Ausströmung aus dem Hafen beeinflusst bzw. provoziert (Abb. 18).

Im Punkt C 10 ist der Unterschied der Strömungsverhältnisse zwischen geschlossener und geöffneter alter Einfahrt besonders gut zu erkennen. Die Einstörmrate ist während des Flutstroms sehr hoch; bei Ebbe tritt eine geringe Ausströmung auf. In C 9 läßt sich während der gesamten Tide Ausströmung feststellen. Bei Flut dreht hier die Walze aus der Mündung heraus, bei Ebbe wird der Hafen entleert (Abb. 19).

In der Versuchsserie V 10 ist die Abstufung sowohl während der Flut als auch während der Ebbe in Abhängigkeit von der Öffnungsbreite der alten Einfahrt sehr gut zu erkennen. Für V 10f tritt bei Ebbe keine Einstömung auf, da bei diesem Versuch die alte Einfahrt beim Einsetzen des Ebbstromes geschlossen wurde.

Auf Grund der Modellversuche wurde empfohlen, die alte Einfahrt zunächst nicht

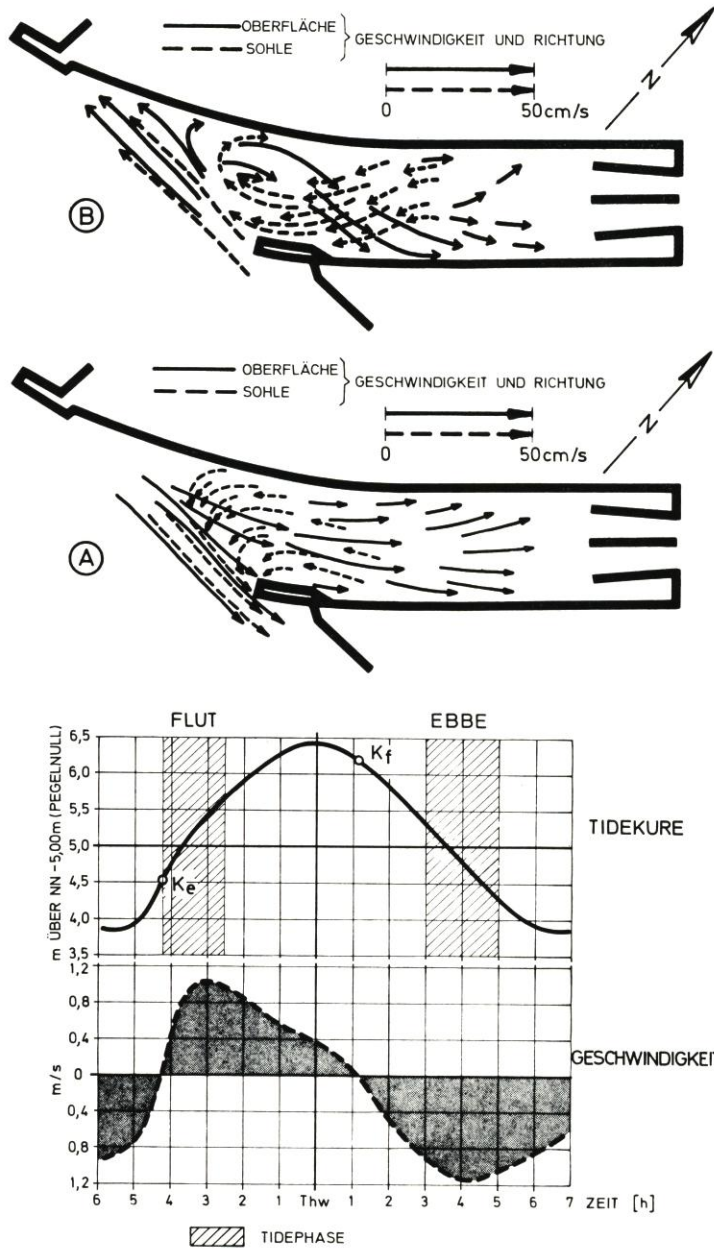


Abb. 21

MAGENS, C.: Untersuchungen der Ursachen und des Vorgangs der Verschlickung der Schleusenvorhöfen zu Brunsbüttelkoog. Mitt. Blatt BAW, Nr. 10, 1958.

VOLLMERS, H.: Ergebnisse systematischer Untersuchungen von Maßnahmen zur Verringerung der Schwebstoffablagerungen in Binnenhafenmündungen. Die Wasserwirtschaft, H 9, 1964.

VOLLMERS, H.: Versuchsbericht „Hafeneinfahrt Delfzijl“. BAW (unveröffentlicht), 1969.

WIERECKY, N.: Strömungsmessungen in den Vorhöfen Brunsbüttel. Versuchsprotokolle WBA Brunsbüttel (unveröffentlicht), 1975.