

Strömungsänderungen durch fahrende Schiffe im Neßmersieler Außentief

Von Ernst MÜLLER und Helmut BINEK

Zusammenfassung

Durch Bodendruckmessungen im Neßmersieler Außentief wurden mit Hilfe der Bernoulli-Gleichung die Übergeschwindigkeiten neben fahrenden Schiffen ermittelt.

Die normierten Ergebnisse zeigen, daß die Größe der Schiffe, die Wassertiefe und somit das Querschnittsverhältnis „n“ den dominierenden Einfluß auf die Übergeschwindigkeiten besitzen.

Die größte mittlere Übergeschwindigkeit beträgt ca. 40 % der Schiffsgeschwindigkeit gegen Wasser, die größte maximale Übergeschwindigkeit ca. 110 %, wobei in beiden Fällen das Querschnittsverhältnis $n = 3$ ist.

Als Endergebnis werden zwei Diagramme gegeben, in denen gemittelte (integrierte) Übergeschwindigkeiten $\frac{\Delta V_m}{V_w}$ und die Maximalwerte $\frac{\Delta V_{\max}}{V_w}$ über dem Querschnittsverhältnis $n = \frac{A_{AT}}{A_M}$ aufgetragen worden sind.

Summary

The changes in flow on the side of running ships have been determined from pressure measurements on the bottom of the Neßmersieler Außentief with the aid of Bernoulli equation.

Dimensionless results show the dominating influence of the ship size, the waterdepth and consequently the ratio of cross-sectional areas „n“.

The highest mean backflow value amounts to 40 % of the ship's speed against water with absolute maximum values amounting to about 110 %, whereby the ratio of cross-sectional areas in both cases is $n = 3$.

In conclusion two diagrams are presented in which the integrated mean backflow and the maximum values of the backflow dependent on ratio of cross-sectional areas are plotted.

Inhalt

1. Einleitung	65
2. Aufgabenstellung	66
3. Vorarbeiten	66
4. Theoretische Überlegungen	66
5. Meßtechnik, Meßplatz	73
6. Versuchsdurchführung	76
7. Auswertung	80
8. Ergebnisse	80
9. Symbolverzeichnis	87
10. Schriftenverzeichnis	88

1. Einleitung

Im Rahmen der Untersuchungen, die zur Stabilisierung der Außentiefs an der deutschen Nordseeküste, d. h. gegen Versandung und Verschlickung, durchgeführt werden, sollten auf

Veranlassung des Bundesministers für Forschung und Technologie (BMFT) von der Versuchsanstalt für Binnenschiffbau Duisburg (VBD) Messungen durchgeführt werden, die den Einfluß der Schifffahrt auf den Sedimenttransport deutlich machen.

Die VBD-Untersuchungen sollten helfen, die komplexen Zusammenhänge zwischen Fahrwasserquerschnitt, Schiffstiefgang, Fahrgeschwindigkeit, Rückstromgeschwindigkeit und Wasserspiegelabsenkungen, die für den Transport von Sohlenmaterial mitbestimmend sind, zu klären.

Während einer Vorbesprechung am 17. 5. 1982 im Bauamt für Küstenschutz, Norden, wurden zwischen den beteiligten Stellen

- dem Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten Schleswig-Holstein, Kiel,
- dem Bauamt für Küstenschutz, Norden,
- und der Versuchsanstalt für Binnenschiffbau, Duisburg,

die Aufgaben besprochen und festgelegt.

2. Aufgabenstellung

Für die Versuchsanstalt ergab sich folgende Aufgabe:

Messung und Quantifizierung der durch Motorschifffahrt verursachten hydrodynamischen Komponenten unter verschiedenartigen Parameterkombinationen wie Schiffgröße, Fahrtrichtung, Fahrgeschwindigkeit, Tideverhältnisse, Schwebstoffkonzentrationen.

3. Vorarbeiten

Zur Bestimmung eines geeigneten Meßplatzes fand am 17. 5. 1982 eine Ortsbesichtigung am Neßmersieler Außentief statt. Dabei konnten die geographischen Verhältnisse bei verschiedenen Wasserständen in Augenschein genommen (Abb. 1a-c) und die geeigneten Querschnitte für die Messungen festgelegt werden (Abb. 2).

In der Zeit vom 23.-27. 8. 1982 sind Vorversuche zur Erprobung der Meßtechnik durchgeführt worden.

Die VBD hat während dieser Vorversuche Druckänderungen am Boden der Fahrrinne des Außentiefs gemessen, während einige Schiffe durch den Meßquerschnitt fuhren. Der Meßgeber war ca. 500 m vom Hafenkopf und ca. 18 m seitlich vom Leitdamm entfernt installiert worden (s. Abb. 2). Eine Anordnung des Gebers in Außentiefmitte (Längsachse) hätte bei Fahrt der Baltrumfähren bei extremem Niedrigwasser zu Beschädigungen des Druckgebers und der Bodenplatten der Fährschiffe führen können, was auf jeden Fall zu vermeiden war.

Bei den Vorversuchen konnten die Änderungen des Wasserdrucks durch die Fahrt von drei Schiffen unterschiedlicher Größe gemessen werden. Die Meßwerte wurden drahtlos mit Hilfe einer PCM-Anlage (Puls-Code-Modulation) vom Meßquerschnitt zu den instationären Empfangs- und Aufzeichnungsgeräten am Hafenkopf übertragen.

4. Theoretische Überlegungen

Jedes Hindernis in strömendem Wasser bzw. jedes fahrende Schiff in ruhigem Wasser verursacht im umgebenden Wasser eine Druckveränderung, die wiederum eine Geschwindig-



Abb. 1a-c

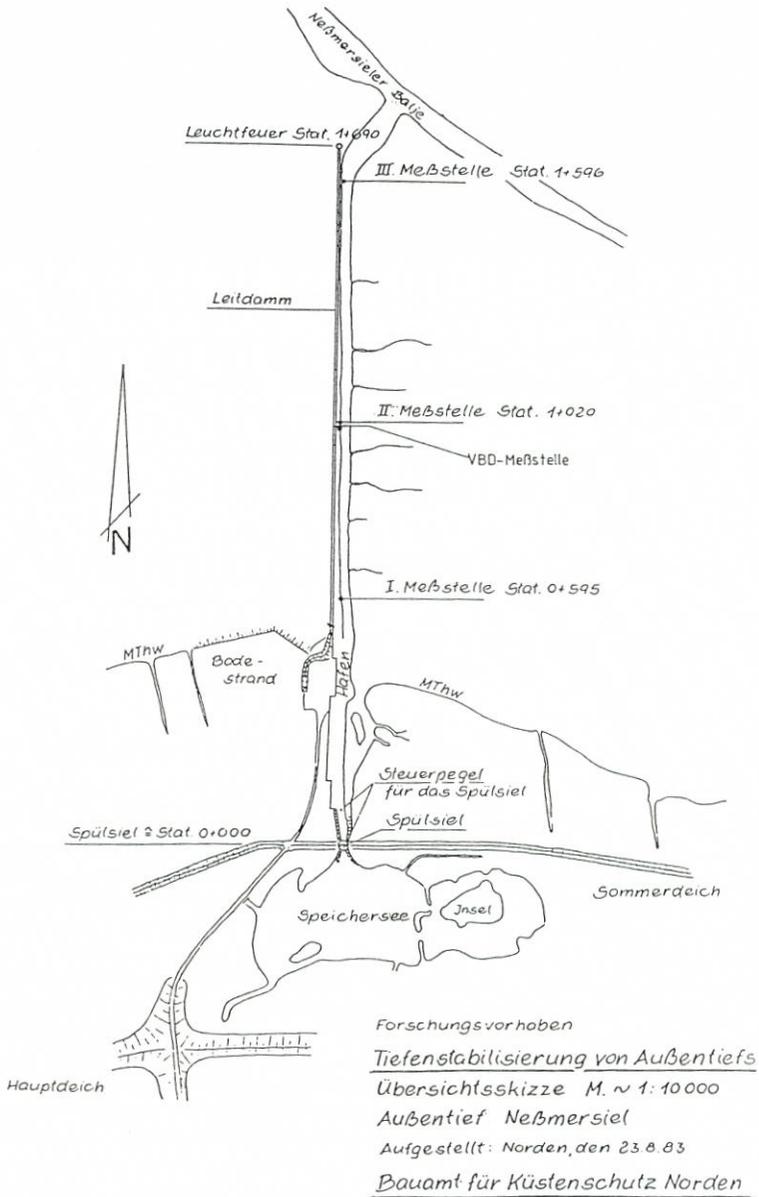
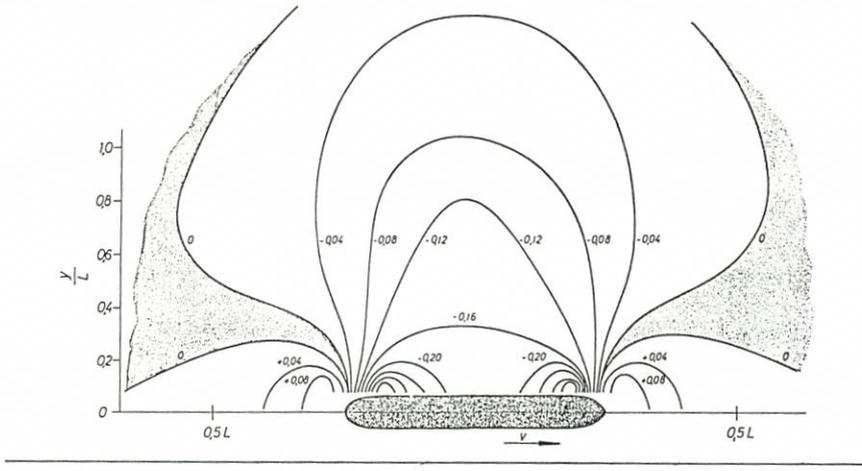


Abb. 2

keitsänderung der Wasserteilchen bedingt. An der Wasseroberfläche wird die Druckänderung als Verformung sichtbar, und zwar als lokale Störung, die mit dem Schiff mitläuft, und als freie oszillierende Oberflächenwellen, die hinter dem Schiff zurückbleiben (MÜLLER, 1966). Die lokale Verformung besteht aus Erhebungen an Bug und Heck, dem sog. Bug- und Heckstau, und einer Absenkung im Mittschiffsbereich, der sog. Mittschiffsmulde. Auf begrenzter Wassertiefe bildet sich diese lokale Verformung bereits bei geringen Fahrgeschwindigkeiten stark aus (s. Abb. 3). Durch die Mittschiffsmulde, die eine relativ große seitliche Ausdehnung besitzt, wird die Wassertiefe, und damit der Wasserquerschnitt, neben dem Schiff beträchtlich



Niveaulinien neben einem fahrenden Schiff Δh [m]

MS „Johann Welker“ ; L = 80,0 m ; B = 9,5 m ; T = 2,0 m ; V = 13 km/h = 7 kn

Abb. 3

verringert. Demzufolge muß nach der Kontinuitätsbedingung das Wasser in diesem Bereich mit vermehrter Geschwindigkeit am Schiff vorbeiströmen. Die hier bereits vorhandene, aus der Verdrängung des Schiffes resultierende Übergeschwindigkeit wird dadurch noch weiter vergrößert.

Im seitlich und tiefenmäßig begrenzten Fahrwasser, z. B. in einem Kanal, ist die lokale Wasseroberflächenverformung deutlich verändert gegenüber unbeschränkter Fahrwasserbreite (MÜLLER, 1969). Die Mittschiffmulde weitet sich zu einer Seitenmulde aus, d. h., sie erstreckt sich neben dem Schiff über dessen gesamte Länge. Dabei ändert sich die Muldentiefe innerhalb eines Querschnitts zwischen Bordwand und Kanalwand nur unwesentlich (s. Abb. 4). Die Bug- und Heckstaugebiete werden flächenmäßig geringer, so daß sie nur schwierig aufzumessen sind.

MS „Johann Welker“ im Dortmund- Ems- Kanal

Tiefgang T = 2,0 m ; Wassertiefe h = 3,5 m ; Schiffsgeschw.: v = 9,0 km/h \cong 4,9 kn

$$n = \frac{A_{AT}}{A_M} = 5,7$$

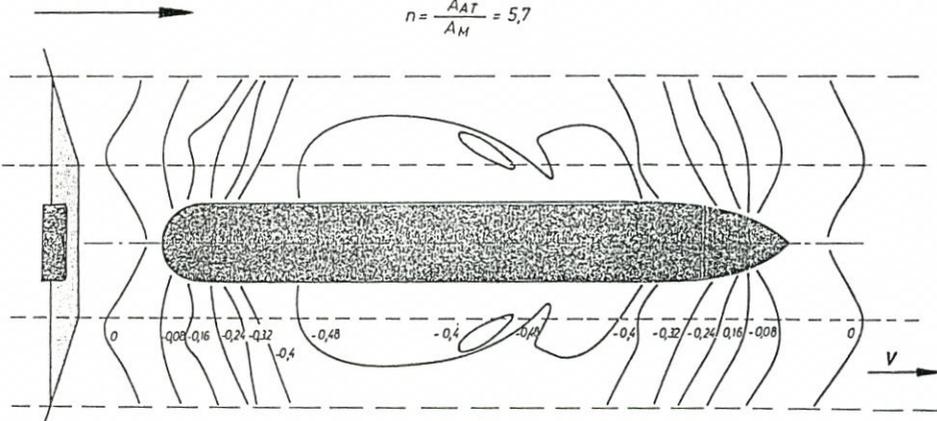


Abb. 4

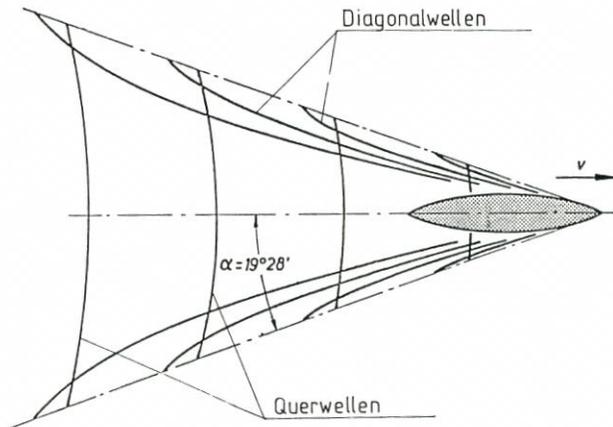


Abb. 5

Deutlich sichtbare, freie Oberflächenwellen (s. Abb. 5), die Einfluß auf die Druckverteilung am Schiffskörper nehmen, entstehen i. allg. erst bei Geschwindigkeiten, die FROUDESchen Längenzahlen

$$F_n = \frac{V}{\sqrt{g \cdot L}} > 0,18 \quad (1)$$

entsprechen.

Bei geringer werdender Wassertiefe verändert sich das Wellenbild, was sich in Abhängigkeit von der FROUDESchen Tiefenzahl

$$F_{nh} = \frac{V}{\sqrt{g \cdot h}} \quad (2)$$

darstellt. Im unterkritischen Geschwindigkeitsbereich

$$F_{nh} < 1 \text{ bzw. } V < \sqrt{g \cdot h}$$

öffnet sich der Winkel der Diagonalwellen mit zunehmender Geschwindigkeit. Die Länge der Querwellen wird immer größer, bis sie bei Erreichen der kritischen Zahl

$$F_{nh} = 1 \text{ (Stauwellengeschwindigkeit)}$$

gänzlich verschwunden sind. Der Winkel der Diagonalwellen hat sich dann von $\alpha = 19^\circ 28'$ auf $\alpha = 90^\circ$ geöffnet, d. h., die Wellenfront steht senkrecht zur Schiffsängsachse. Im überkritischen Geschwindigkeitsbereich schließt sich der Diagonalwinkel wieder. Bei etwa 2,5- bis 3facher Stauwellengeschwindigkeit ist der Kelvinwinkel wieder erreicht.

Die kommerzielle Schifffahrt fährt auf begrenzter Wassertiefe – vor allem im Kanal – im unterkritischen Geschwindigkeitsbereich. Ausnahmen sind Hochgeschwindigkeitsfahrzeuge wie Schnellboote, Gleitboote, Tragflügelboote etc.

Die Fahrwasserverhältnisse in einem Außentief sind mit denen in einem Kanal von unregelmäßigem Querschnitt zu vergleichen. Die Wasseroberflächenverformung und damit die Druck- und Geschwindigkeitsänderungen neben dem Schiff werden denen in einem Kanal gleichen. Bei Fahrgeschwindigkeiten, die erheblich unter der kritischen Geschwindigkeit liegen, kann der Strömungsverlauf neben dem Schiff hier in erster Näherung als eindimensional angenommen werden, d. h., merkliche Veränderungen der Geschwindigkeit finden nur in Längsrichtung statt:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = V_0 + u \equiv V_0 + \Delta V \neq 0; \quad \frac{\partial \Phi}{\partial y} = v \approx 0; \quad \frac{\partial \Phi}{\partial z} = w \approx 0 \quad (3)$$

mit Φ Geschwindigkeitspotential
 V_0 Anströmgeschwindigkeit einer Parallelströmung, Schiffsgeschwindigkeit
 $u \equiv \Delta V$, v , w Komponenten der Störgeschwindigkeit, Zusatzgeschwindigkeit

Damit kann angenommen werden, daß die Bernoulligleichung

$$\rho/2 V_0^2 + \rho gh + p_0 = \rho/2 (V_0 + \Delta V)^2 + \rho g (h + \Delta h) + p_0 + \Delta p \quad (4)$$

im gesamten betrachteten Strömungsbereich Gültigkeit besitzt. Hierbei wird stationäre Strömung vorausgesetzt, d. h.

$$\frac{\partial (V_0 + u)}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

Die linke Seite der Gleichung (4) gibt die hydrodynamischen Verhältnisse in ungestörter Strömung wieder, die rechte Seite die in gestörter Strömung. Dabei bedeuten weiter

- g = Erdbeschleunigung
- h = Wassertiefe
- p_0 = konstanter Druck (Atmosphärendruck)
- ρ = spez. Masse, Dichte
- Δh = Wasseroberflächenverformung, Änderung der Ortshöhe
- Δp = Änderung der Druckhöhe

Setzt man in Gleichung (4) die Fahrgeschwindigkeit des Schiffes gegenüber Wasser V_w gleich der Anströmgeschwindigkeit V_0 , also

$$V_w = V_0 \quad (6)$$

und faßt die Wasseroberflächenverformung Δh , also die Änderung der geometrischen Höhe, und die Änderung der Druckhöhe Δp zusammen (eindimensionale Strömung) und betrachtet diese als Änderung des statischen Drucks

$$\Delta p_{\text{stat.}} = \rho g \Delta h + \Delta p, \quad (7)$$

so läßt sich Gleichung (4) umformen in

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \sqrt{1 - \frac{\Delta p_{\text{stat.}}}{\rho/2 V_w^2}} - 1 \quad (8)$$

Aus der Messung der statischen Druckänderung $\Delta p_{\text{stat.}}$ und der Bestimmung der Schiffsgeschwindigkeit gegen Wasser

$$V_w = V_L \pm V_{\text{Str}} \equiv V_0 \quad (9)$$

- V_L = Geschwindigkeit des Schiffes gegenüber Land
- V_{Str} = Geschwindigkeit der Tideströmung

läßt sich somit die Übergeschwindigkeit, die das fahrende Schiff in Längsrichtung im umgebenden Wasser induziert, ermitteln.

Daß die Anwendung dieser Methode zur Ermittlung der Rückstromgeschwindigkeit eines in einem Kanal fahrenden Schiffes quantitativ zu erfreulich genauen Ergebnissen führt, ist von MÜLLER (1969) nachgewiesen worden.

$h = 3,5\text{ m}$ $v = 8,0\text{ km/h} \approx 4,3\text{ kn}$ $T = 2,5\text{ m}$
 Abstand der Meßstelle aus Kanalmitte = $6,5\text{ m}$

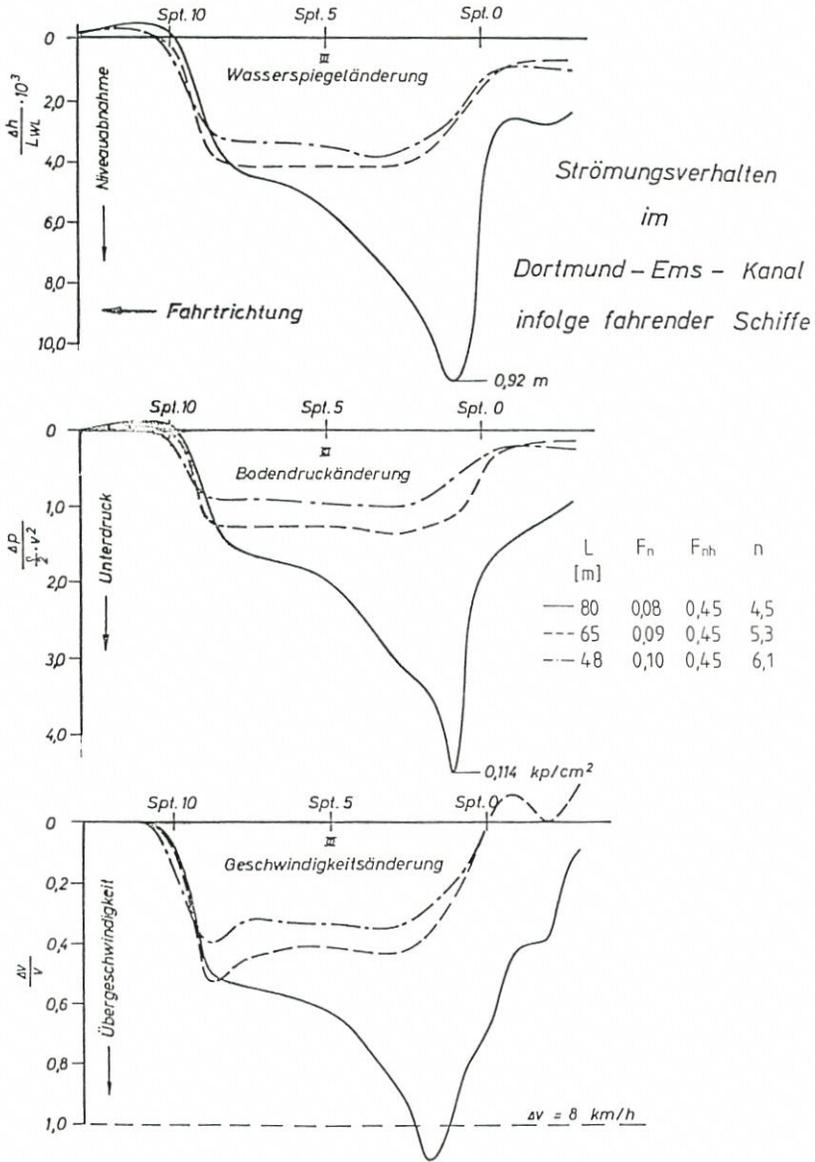


Abb. 6

In Abb. 6 werden die hydrodynamischen Veränderungen in unmittelbarer Nähe längs dreier unterschiedlicher Schiffe im Dortmund-Ems-Kanal gezeigt. Wassertiefe, Fahrge-
 schwindigkeit und Tiefgang waren konstant. Das Verhältnis von Kanalquerschnitt zu Schiffs-
 Hauptspantquerschnitt war jedoch unterschiedlich. Für die beiden kleineren Schiffe erge-
 ben sich über die gesamte Schiffslänge (Spant 10 \approx Vorsteven, Spant 0 \approx Achtersteven) jew-
 eils annähernd gleichbleibende Werte, d. h., die Bernoulligleichung (4) ist in der dargelegten Form

gültig. Für das größere Schiff zeigt sich eine erhebliche Änderung. Im Hinterschiffsbereich bildet sich ein starkes, örtlich begrenztes Unterdruckgebiet aus, sichtbar durch eine tiefe Wasserspiegelabsenkung, die mit starken Übergeschwindigkeiten verbunden ist. Die Strömung ist hier nicht mehr stationär. Es besteht die Gefahr der Grundberührung infolge starker Parallelabsenkung des Schiffes und achterlicher Vertrimmung. Das größere Schiff fährt offensichtlich zu schnell.

In diesem Fall deutet ein Vergleich der „normalen“ FROUDESchen Tiefenzahl

$$F_{nh} = \frac{V}{\sqrt{g \cdot h}} = \frac{8}{3,6 \sqrt{9,81 \cdot 3,5}} = 0,379$$

mit der „örtlichen“ FROUDESchen Tiefenzahl im Bereich der starken Muldenvertiefung

$$F_{nh}^x = \frac{(V + \Delta V)}{\sqrt{g \cdot (h - \Delta h)}} = \frac{(8 + 8)}{3,6 \sqrt{9,81 (3,5 - 0,92)}} = 0,883$$

die hydrodynamischen Veränderungen an, die ein im begrenzten Fahrwasser fahrendes Schiff verursacht. Die Strömungsgeschwindigkeit in der Mulde erreicht fast die Stauwellengeschwindigkeit. In diesem Bereich läßt sich Gleichung (4) nicht mehr exakt anwenden.

5. Meßtechnik, Meßplatz

Bei jedem Versuch ist anzustreben, die gesuchte physikalische Größe direkt zu messen. Im vorliegenden Fall wäre das die Strömungsgeschwindigkeit des Wassers nach Richtung und Größe.

Bekannte handelsübliche Geschwindigkeitsmeßgeber besitzen jedoch eine zu niedrige

Anordnung der Meßgeber auf der Meßplatte (1984)

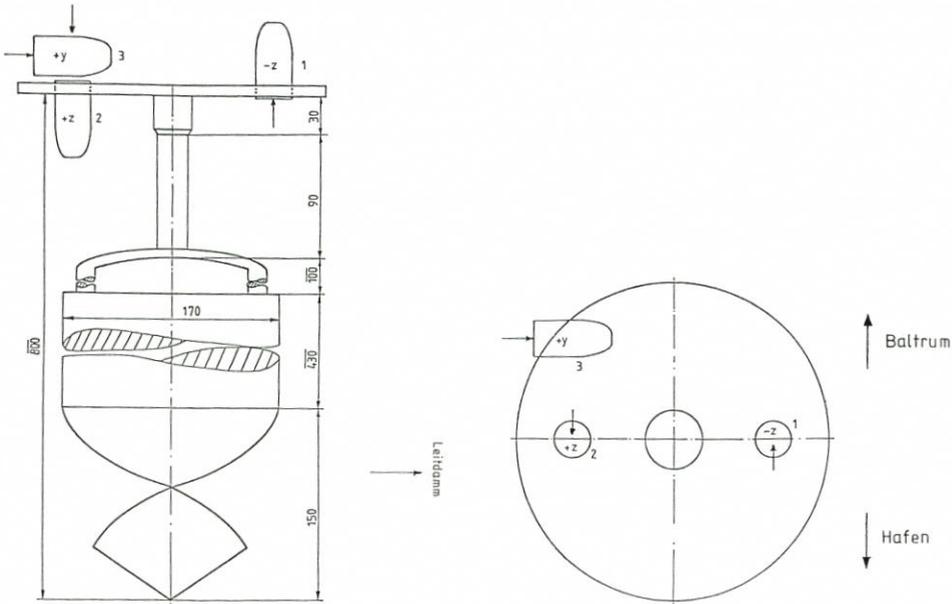


Abb. 7

Eigenfrequenz, so daß die Wiedergabe der zu messenden Größe phasenversetzt und damit auch amplitudenverfälscht erfolgt.

Deshalb wurde auf die indirekte Ermittlung der Geschwindigkeit durch Messen der Druckänderung und Erreichen der Geschwindigkeitsänderung nach Gleichung (8) ausgewichen. Es wurden Druckmeßgeber verwendet mit einem Meßbereich von 0 bis 0.075 M Pa. Diese Druckgeber sind auf einer Scheibe montiert worden, die wiederum an einem Erdbohrer angeschweißt war (Abb. 7). Dieser Erdbohrer wurde soweit in die Sohle des Außentiefs eingebracht, bis die Trägerscheibe bündig mit OK Sohle abschloß. Die Druckgeber sind im Modelltank der VBD sowohl statisch als auch dynamisch kalibriert worden. Die Kalibrierungen zeigten, daß die an den Meßpunkten auftretende Verdrängungsströmung bei Vorbeifahrt des Schiffes überwiegend parallel zur Schiffslängsachse verlief.

Die Durchführung der Versuche erfolgte im Zeitraum von zwei Jahren (1983 u. 1984), wobei die Meßtechnik des 2. Jahres gegenüber dem 1. Jahr etwas verändert worden ist.

Aufgrund der Ergebnisse des Jahres 1983 wurde die Anordnung der Druckmeßgeber auf der Trägerscheibe für die Messungen in 1984 geändert. Zusätzlich wurde in einem 5 m vom Meßquerschnitt entfernten Querschnitt ein Geschwindigkeitsmeßgeber der Norddeutschen Seekabelwerke installiert, der Geschwindigkeiten in einer Ebene, also in zwei Richtungen aufnehmen kann. Obwohl dessen Eigenfrequenz für die Messungen zu niedrig war, sollte eine Kontrollmessung damit erfolgen, um einen Anhaltspunkt für die auftretenden Geschwindigkeiten in Querrichtung zu erhalten.

Einen Eindruck vom Außentief, von der Lage der Meßstelle und den Schwierigkeiten beim Anbringen der Meßgeber und der Datenübertragungsgeräte vermitteln die Fotoaufnahmen der Abbn. 8 bis 10.



Abb. 8



Abb. 9



Abb. 10

6. Versuchsdurchführung

Nach dem Aufbau der Meßkette erfolgte eine Überprüfung der Geräte, bevor mit den Messungen begonnen wurde. Der seitliche Abstand der Schiffe ist während der Meßfahrten nicht gemessen worden. Die Schiffsführer hatten die Anweisung erhalten, möglichst in Mitte Außentief zu fahren.

Versuche August 1983: Meßbeginn war der 29. 8. 1983, 12.00 Uhr. Die letzte Messung erfolgte am 1. 9. 1983 nach 14.00 Uhr. Als Versuchsobjekte standen zur Verfügung:

Kutter WESTERDIECK: Länge 10,5 m, Breite 3,25 m, Tiefgang 0,7 m

Fähre BALTRUM I: Länge 45,7 m, Breite 12,0 m, Abladetiefgang 0,8 m
und diverse Sportfahrzeuge, d. h. Motorboote und Segelyachten.

Es sind insgesamt 33 Messungen durchgeführt worden, wovon 18 auf die BALTRUM I entfielen, 8 auf die WESTERDIECK und 7 auf Sportboote.

Die Abbn. 11 bis 19 zeigen die Schiffsquerschnitte des Kutters WESTERDIECK und der Fähre BALTRUM I, eingezeichnet in den Meßquerschnitt des Neßmersieler Außentiefs bei den verschiedenen untersuchten Wasserständen.

Versuche September 1984: Diese Versuchsreihe begann am 5. 9. 1984 um 17.35 Uhr und endete am 7. 9. 1984 gegen 10.15 Uhr. Versuchsobjekte waren ebenfalls wieder der Kutter WESTERDIECK (Abmessungen s. o.) und die Fähre BALTRUM I (Abmessungen s. o.). Zusätzlich standen

Kutter MEMMERT: Länge 16 m, Breite 4,22 m, Tiefgang 0,9 m und

Fähre BALTRUM III: Länge 35,0 m, Breite 7,0 m, Tiefgang 0,8 m
für die Messungen zur Verfügung sowie 4 Sportboote.

Neßmersieler Außentief Station 1+000

Versuchsdatum 18.8.1983

Kutter WESTERDIEK

L = 10,5 m

B = 3,25 m

T = 0,7 m

$\frac{h}{T} \approx 2,9$; $n = \frac{A_{AT}}{A_M} \approx 45,9$ (bez. auf 50 m Außentiefbreite)

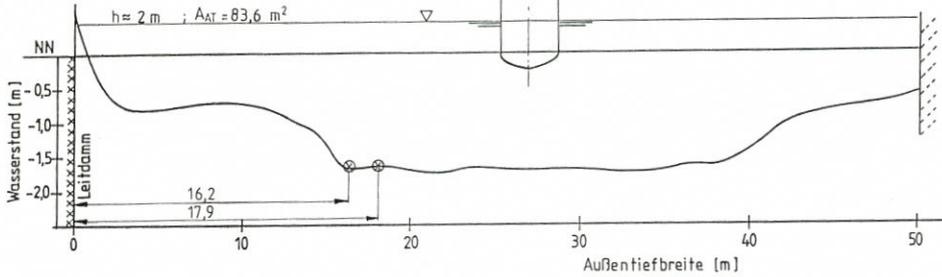


Abb. 11

Neßmersieler Außentief Station 1+000

Versuchsdatum 18.8.1983

Kutter WESTERDIEK

L = 10,5 m

B = 3,25 m

T = 0,7 m

$\frac{h}{T} \approx 2,7$; $n = \frac{A_{AT}}{A_M} \approx 44,6$ (bez. auf 50 m Außentiefbreite)

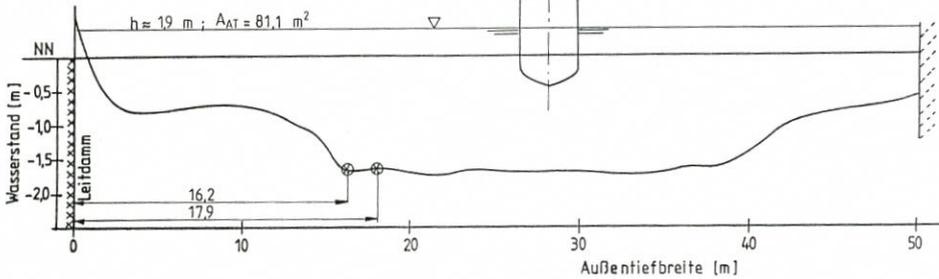


Abb. 12

Neßmersieler Außentief Station 1+000

Versuchsdatum 18.8.1983

Kutter WESTERDIEK

L = 10,5 m

B = 3,25 m

T = 0,7 m

$\frac{h}{T} \approx 1,4$; $n = \frac{A_{AT}}{A_M} \approx 20,3$ (bez. auf 50 m Außentiefbreite)

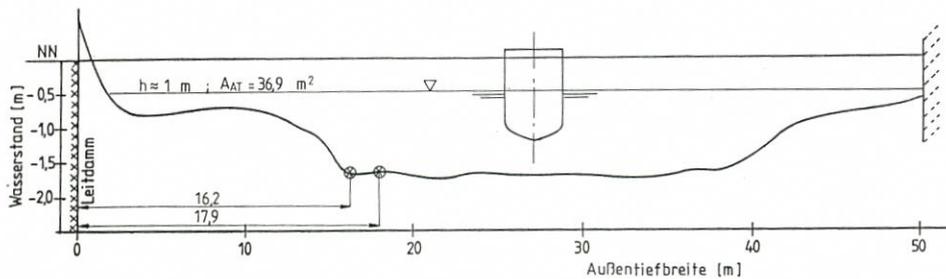


Abb. 13

Neßmersieler Außentief Station 1+000

Versuchsdatum 18.8.1983

$$\frac{h}{T} \approx 3,3 \quad ; \quad n = \frac{A_{AT}}{A_M} \approx 13,5 \quad (\text{bez. auf } 50 \text{ m Außentiefbreite})$$

Fähre BALTRUM I

$L_{üa} = 45,7 \text{ m}$

$L_{cwl} = 43,7 \text{ m}$

$B = 12,0 \text{ m}$

$T \approx 0,8 \text{ m}$

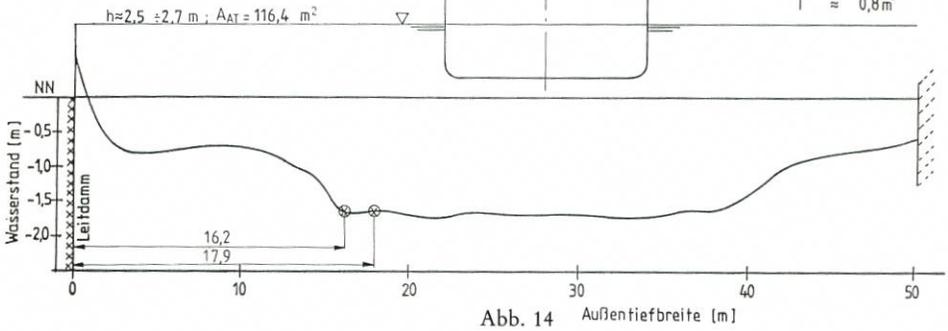


Abb. 14 Außentiefbreite [m]

Neßmersieler Außentief Station 1+000

Versuchsdatum 18.8.1983

$$\frac{h}{T} \approx 2,9 \quad ; \quad n = \frac{A_{AT}}{A_M} \approx 12 \quad (\text{bez. auf } 50 \text{ m Außentiefbreite})$$

Fähre BALTRUM I

$L_{üa} = 45,7 \text{ m}$

$L_{cwl} = 43,7 \text{ m}$

$B = 12,0 \text{ m}$

$T \approx 0,8 \text{ m}$

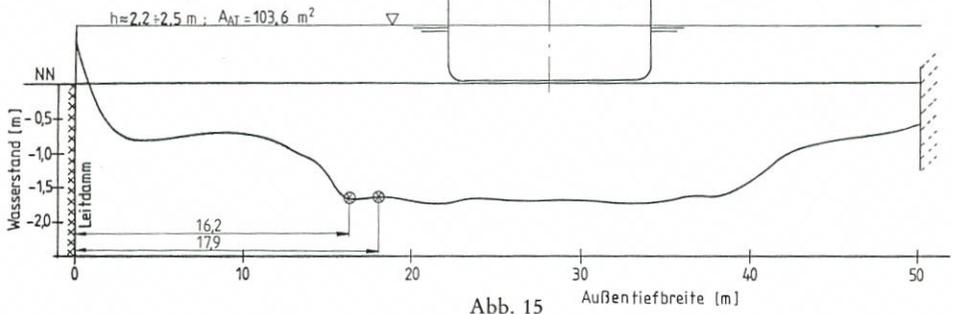


Abb. 15 Außentiefbreite [m]

Neßmersieler Außentief Station 1+000

Versuchsdatum 18.8.1983

$$\frac{h}{T} \approx 2,3 \quad ; \quad n = \frac{A_{AT}}{A_M} \approx 9,1 \quad (\text{bez. auf } 50 \text{ m Außentiefbreite})$$

Fähre BALTRUM I

$L_{üa} = 45,7 \text{ m}$

$L_{cwl} = 43,7 \text{ m}$

$B = 12,0 \text{ m}$

$T \approx 0,8 \text{ m}$

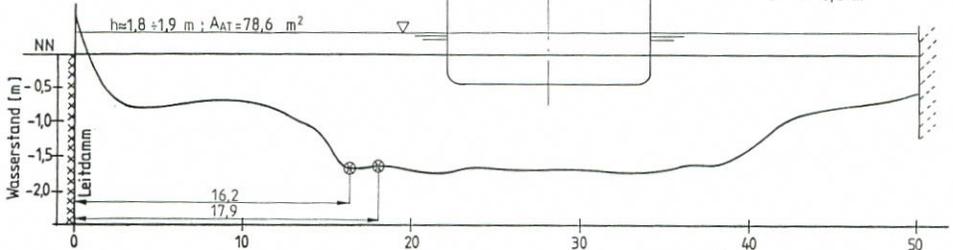


Abb. 16 Außentiefbreite [m]

Neßmersieler Außentief Station 1+000

Versuchsdatum 18.8.1983

$$\frac{h}{T} \approx 1,9 \quad ; \quad n = \frac{A_{AT}}{A_M} \approx 7,1 \quad (\text{bez. auf } 50 \text{ m Außentiefbreite})$$

Fähre BALTRUM I

- $L_{ü,a} = 45,7 \text{ m}$
- $L_{cwl} = 43,7 \text{ m}$
- $B = 12,0 \text{ m}$
- $T \approx 0,8 \text{ m}$

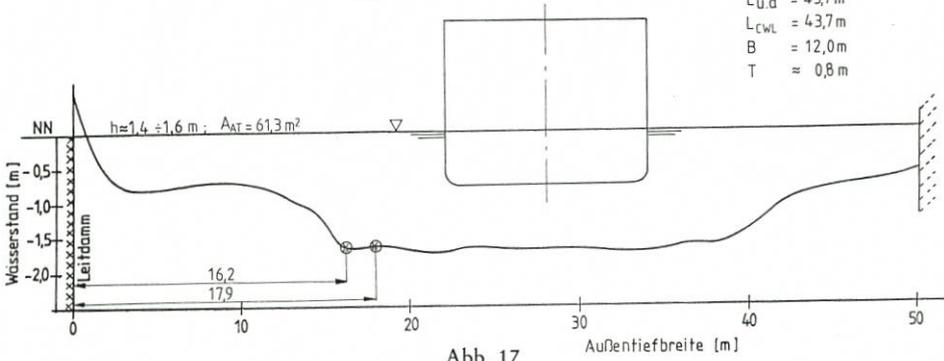


Abb. 17

Neßmersieler Außentief Station 1+000

Versuchsdatum 18.8.1983

$$\frac{h}{T} \approx 1, \quad ; \quad n = \frac{A_{AT}}{A_M} \approx 6,2 \quad (\text{bez. auf } 50 \text{ m Außentiefbreite})$$

Fähre BALTRUM I

- $L_{ü,a} = 45,7 \text{ m}$
- $L_{cwl} = 43,7 \text{ m}$
- $B = 12,0 \text{ m}$
- $T \approx 0,8 \text{ m}$

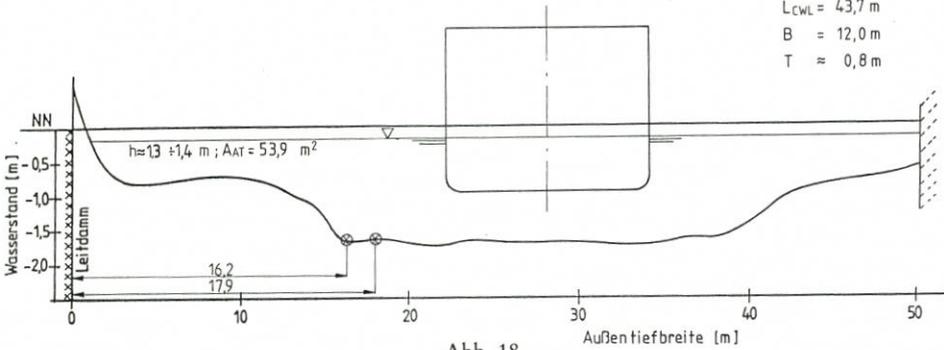


Abb. 18

Neßmersieler Außentief Station 1+000

Versuchsdatum 18.8.1983

$$\frac{h}{T} \approx 1,4 \quad ; \quad n = \frac{A_{AT}}{A_M} \approx 4,6 \quad (\text{bez. auf } 50 \text{ m Außentiefbreite})$$

Fähre BALTRUM I

- $L_{ü,a} = 45,7 \text{ m}$
- $L_{cwl} = 43,7 \text{ m}$
- $B = 12,0 \text{ m}$
- $T \approx 0,8 \text{ m}$

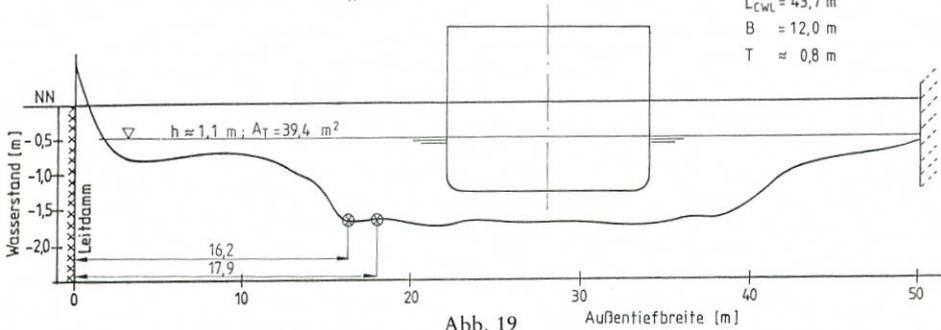


Abb. 19

Es konnten 25 Messungen durchgeführt werden, davon 3 mit der BALTRUM I, 2 mit der BALTRUM III, 10 mit der MEMMERT, 4 mit der WESTERDIECK und 6 mit Sportfahrzeugen.

Die Querschnittsrelationen für diese Meßreihe sind für Kutter WESTERDIECK, Kutter MEMMERT, Fähre BALTRUM III und Fähre BALTRUM I in den Abbn. 20 bis 28 dargestellt.

7. Auswertung

Bereits bei der Auswertung der Meßergebnisse des Jahres 1983 zeigte sich, daß alle Geber den Druckverlauf unabhängig von ihrer Anordnung auf der Befestigungsscheibe nahezu gleichwertig wiedergaben. Dadurch konnte die weitere Bearbeitung vereinfacht werden.

Die Ergebnisse wurden als dimensionslose Größen $\Delta V/V_w$ bzw. DV/VW (EDV-Bezeichnung) über dem dimensionslosen Weg $\frac{x}{L}$ bzw. $2X/L$ aufgetragen (s. als Beispiel Abbn. 29 bis 33). Dabei bedeuten

$2X/L = -1$ Bug im Meßquerschnitt

$2X/L = 0$ Mitte Schiff im Meßquerschnitt

$2X/L = 1$ Heck im Meßquerschnitt

Alle weiteren Erklärungen sind im Symbolverzeichnis gegeben.

Die Strömungsänderungen, die der Kutter WESTERDIECK hervorruft, sind zwar deutlich meßbar, jedoch relativ gering. Die Wassertiefen lagen mit Ausnahme einer Fahrt bei ca. $h = 2$ m, wodurch auch das Querschnittsverhältnis „n“ einen großen Wert erreichte.

Stärkere Übergeschwindigkeiten ergeben sich neben dem fahrenden Kutter MEMMERT. Auch hier ist der Einfluß der Wassertiefe bzw. der n-Zahl eindeutig zu ersehen.

Ganz wesentliche Rückstromgeschwindigkeiten werden durch die beiden Fähren BALTRUM I und BALTRUM III erzeugt. Die Unterdruckmulde und damit das Übergeschwindigkeitsgebiet bildet sich hier bei Wassertiefen $h \geq 2$ m annähernd symmetrisch zum Hauptspant aus. Erst bei Wassertiefen unter $h = 2$ m wird die Mulde asymmetrisch, und es kommt zu einer Vertiefung und damit sehr hohen Wassergeschwindigkeiten im Achterschiffsbereich.

Bei einigen Diagrammen ist zu sehen, daß die durch die Oberflächenwellen bedingten oszillatorischen Druckänderungen auf den Gewässerboden noch durchschlagen. Die Amplituden dieser Änderungen sind aber deutlich geringer als die Maximalwerte der Unterdrücke bzw. Übergeschwindigkeiten, die aus der lokalen Verformung resultieren.

8. Ergebnisse

Die im vorigen Kapitel genannten Abbildungen zeigen recht klar die erheblichen Übergeschwindigkeiten neben bzw. unter fahrenden Schiffen im begrenzten Fahrwasser. Für jede der auswertbaren Fahrten wurden eine mittlere Übergeschwindigkeit durch Integration bestimmt und diese Werte über einem geeigneten Parameter aufgetragen. Als unabhängige Variable (Abszissenwert) bot sich das im Wasserbau vielfach benutzte Querschnittsverhältnis

$$n = \frac{\text{Außentiefquerschnitt}}{\text{Schiffshauptspant}} = \frac{A_{AT}}{A_M}$$

an.

Versuchsdatum 5.-7.9.1984

Kutter „WESTERDIEK“

$$\frac{h}{T} \approx 3,1 ; n = \frac{A_{AT}}{A_M} \approx 4,63 \text{ (bez. a. 50m Außentiefbreite u. NN)}$$

L = 10,5 m
B = 3,25 m
T = 0,7 m

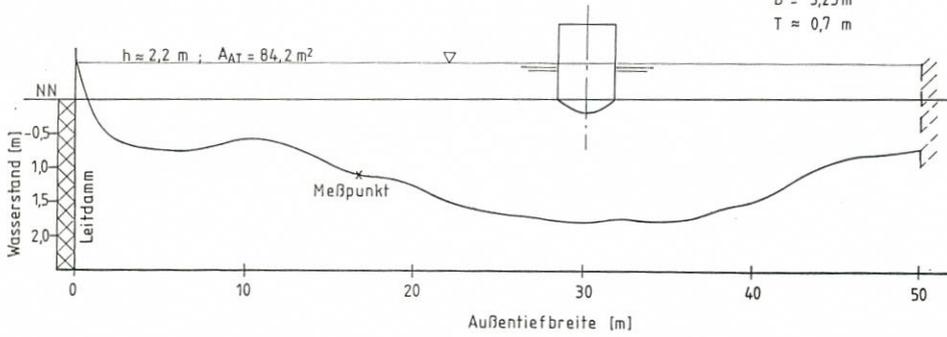


Abb. 20

Neßmersieler Außentief Station 0+951,5

Versuchsdatum 5.-7.9.1984

Kutter MEMMERT

$$\frac{h}{T} \approx 2,3 ; n = \frac{A_{AT}}{A_M} \approx 25,2 \text{ (bez. auf 50m Außentiefbreite)}$$

L = 16,0 m
B = 4,22 m
T = 0,9 m

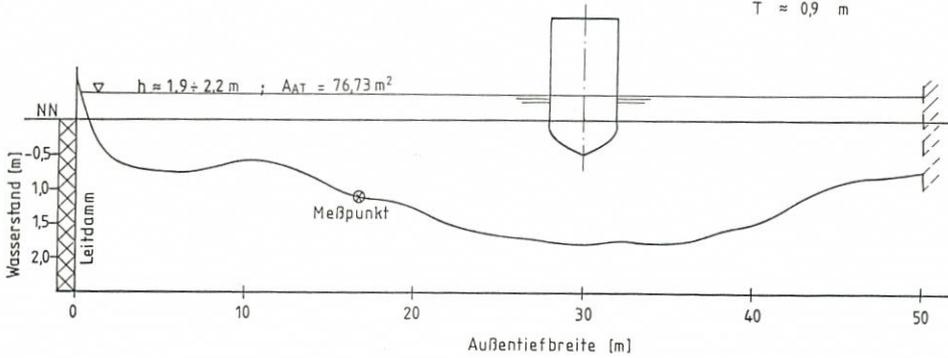


Abb. 21

Neßmersieler Außentief Station 0+951,5

Versuchsdatum 5.-7.9.1984

Kutter MEMMERT

$$\frac{h}{T} \approx 1,8 ; n = \frac{A_{AT}}{A_M} \approx 19,5 \text{ (bez. auf 50m Außentiefbreite)}$$

L = 16,0 m
B = 4,22 m
T = 0,9 m

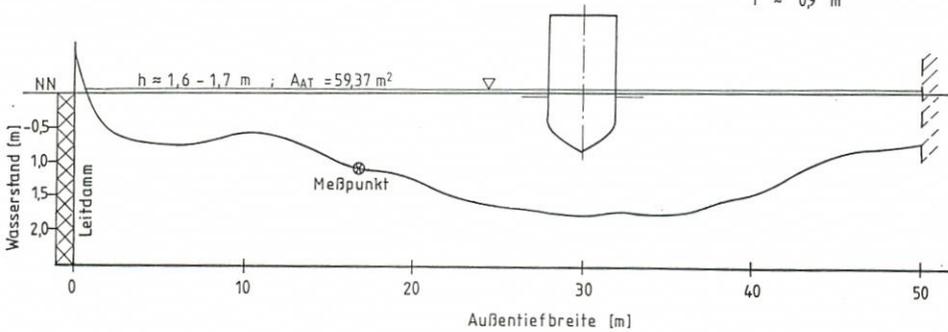


Abb. 22

Neßmersieler Außentief Station 0+951,5

Kutter MEMMERT

Versuchsdatum 5.-7.9.1984

L = 16,0 m

$\frac{h}{T} \approx 1,3$; $n = \frac{A_{AT}}{A_M} \approx 10,7$ (bez. auf 50 m Außentiefbreite)

B = 4,22 m

T ≈ 0,9 m

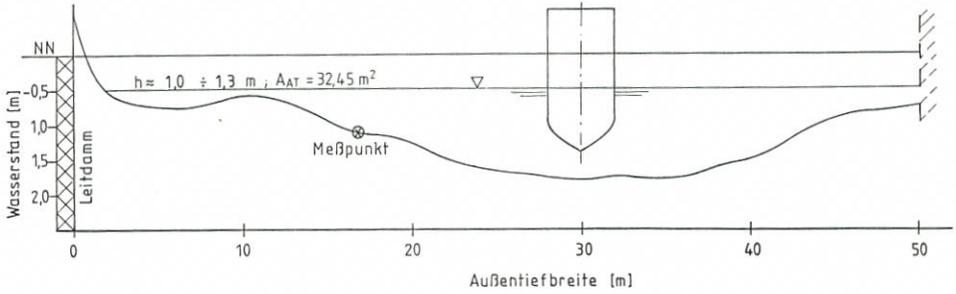


Abb. 23

Neßmersieler Außentief Station 0+915,5

Fähre BALTRUM III

Versuchsdatum 5.-7.9.1984

Lüa = 35,0 m

$\frac{h}{T} \approx 1,4$; $n = \frac{A_{AT}}{A_M} \approx 6$ (bez. auf 50 m Außentiefbreite)

B = 7,0 m

T ≈ 0,8 m

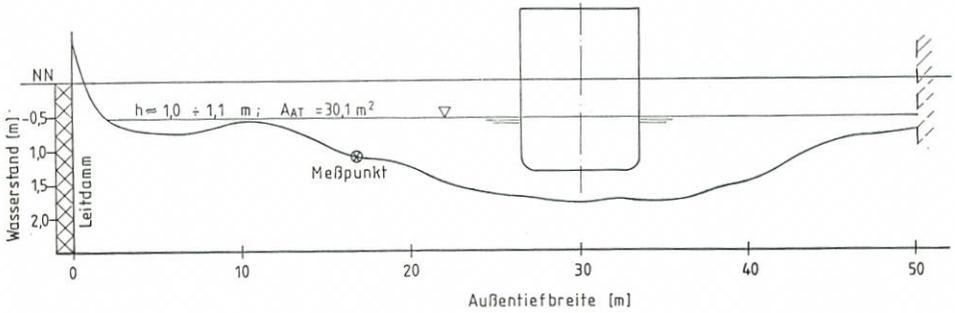


Abb. 24

Neßmersieler Außentief Station 0+951,5

Fähre BALTRUM III

Versuchsdatum 5.-7.9.1984

Lüa = 35,0 m

$\frac{h}{T} \approx 1,1$; $n = \frac{A_{AT}}{A_M} \approx 5,2$ (bez. auf 50 m Außentiefbreite)

B = 7,0 m

T ≈ 0,8 m

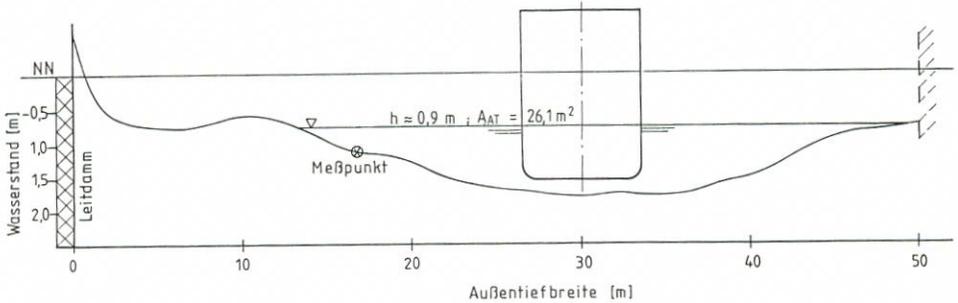


Abb. 25

Neßmersieler Außentief Station 0+951,5

Versuchsdatum 5.-7.9.1984

Fähre BALTRUM I

$\frac{h}{T} \approx 2,6$; $n = \frac{A_{AT}}{A_M} \approx 0,9$ (bez. auf 50 m Außentiefbreite)

$L_{üa} = 45,7$ m
 $L_{cwl} = 43,7$ m
 $B = 12,0$ m
 $T \approx 0,8$ m

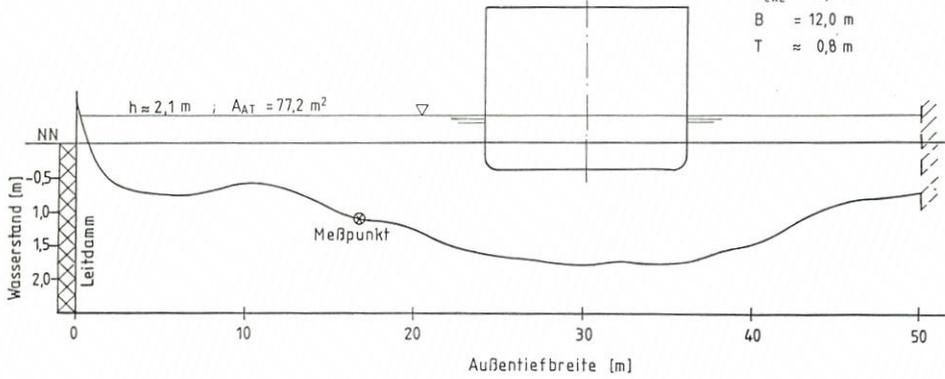


Abb. 26

Neßmersieler Außentief Station 0+951,5

Versuchsdatum 5.-7.9.1984

Fähre BALTRUM I

$\frac{h}{T} \approx 1,4$; $n = \frac{A_{AT}}{A_M} \approx 3,5$ (bez. auf 50 m Außentiefbreite)

$L_{üa} = 45,7$ m
 $L_{cwl} = 43,7$ m
 $B = 12,0$ m
 $T \approx 0,8$ m

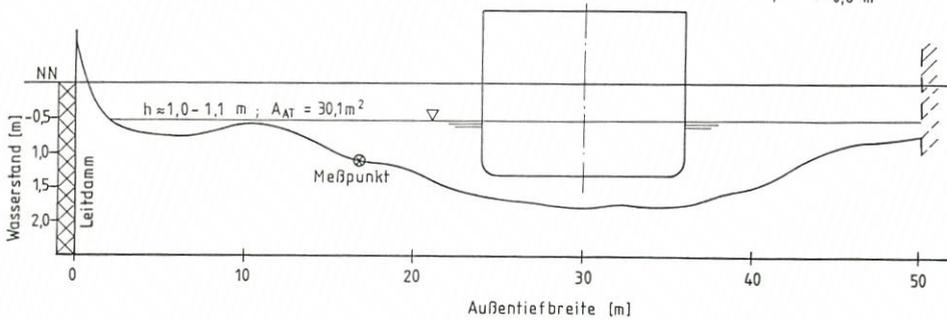


Abb. 27

Neßmersieler Außentief Station 0+951,5

Versuchsdatum 5.-7.9.1984

Fähre BALTRUM I

$\frac{h}{T} \approx 1,1$; $n = \frac{A_{AT}}{A_M} \approx 3,0$ (bez. auf 50 m Außentiefbreite)

$L_{üa} = 45,7$ m
 $L_{cwl} = 43,7$ m
 $B = 12,0$ m
 $T \approx 0,8$ m

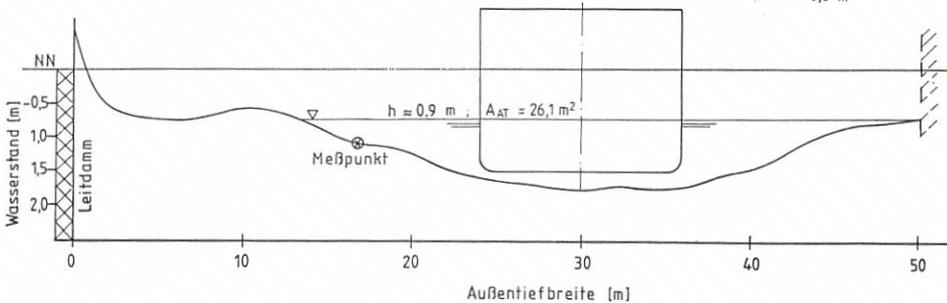


Abb. 28

Versuche 29.8.-1.9.1983 Einfahrt Neßmersiel

MS "BALTRUM I"

$$n = \frac{\Delta L}{\Delta H} \approx 12$$

Fahrt	Dat.	Uhrz.	BEZ.	VG (KN)	VG (M/S)	VST (M/S)	VW (M/S)	H (M)	H/T
9	29.8.83	14.35	Flut ◻	6.259	3.220	0.060	3.160	2.33	2.91
16	30.8.83	15.35	Flut *	6.162	3.170	0.050	3.120	2.47	3.09
23	30.8.83	18.18	Ebbe ■	4.685	2.410	-0.220	2.630	2.15	2.69
29	31.8.83	15.45	Flut ▲	5.384	2.770	0.180	2.590	2.17	2.71

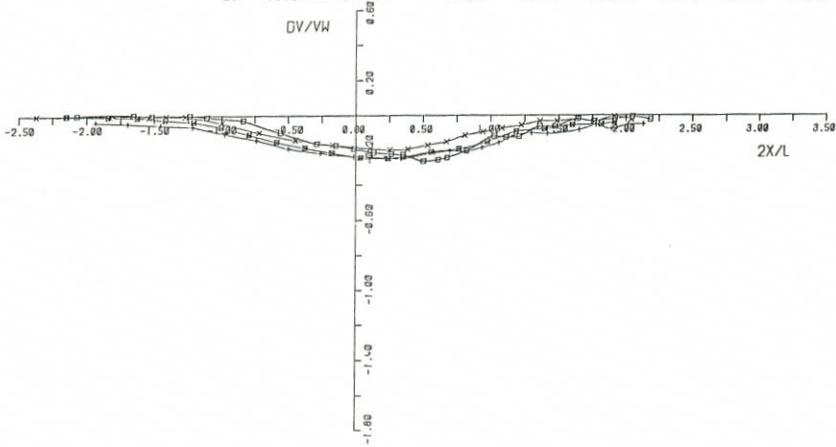


Abb. 29

Versuche 29.8.-1.9.1983 Ausfahrt Neßmersiel

MS "BALTRUM I"

$$n = \frac{\Delta L}{\Delta H} \approx 7.1$$

Fahrt	Dat.	Uhrz.	BEZ.	VG (KN)	VG (M/S)	VST (M/S)	VW (M/S)	H (M)	H/T
4	29.8.83	13.03	Flut ◻	3.538	1.820	-0.190	2.010	1.59	2.00
14	30.8.83	13.23	Flut *	3.460	1.780	-0.170	1.950	1.49	1.86
27	31.8.83	13.55	Flut ■	2.788	1.430	-0.250	1.680	1.40	1.75

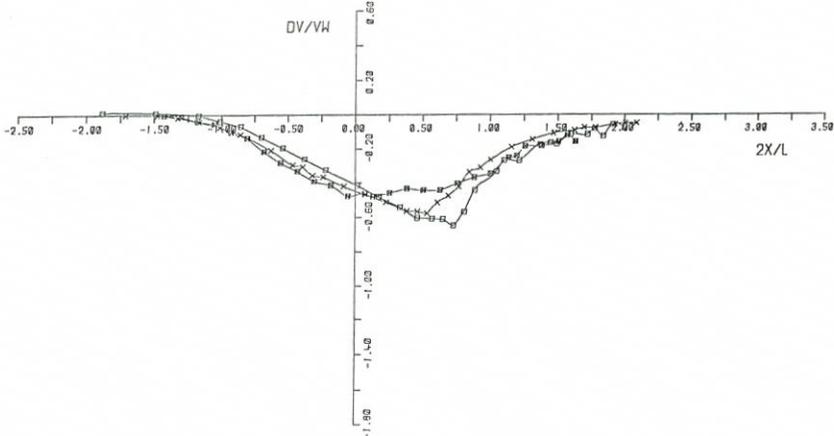


Abb. 30

Versuche 29.8.-1.9.1983 Einfahrt Neßmersiel

MS "BALTRUM I"

$$n = \frac{\Delta L}{\Delta M} \approx 4.6$$

Fahrt	Dat.	Uhrz.	Flut	BEZ.	VG(KN)	VG(M/S)	VST(M/S)	VH(M/S)	H(M)	H/T
26	31.8.83	13.18	Flut	o CVPXI	3.832	1.560	0.240	1.320	1.05	1.31
31	1.9.83	13.55	Flut	x CVPXI	2.819	1.450	0.250	1.200	1.06	1.33

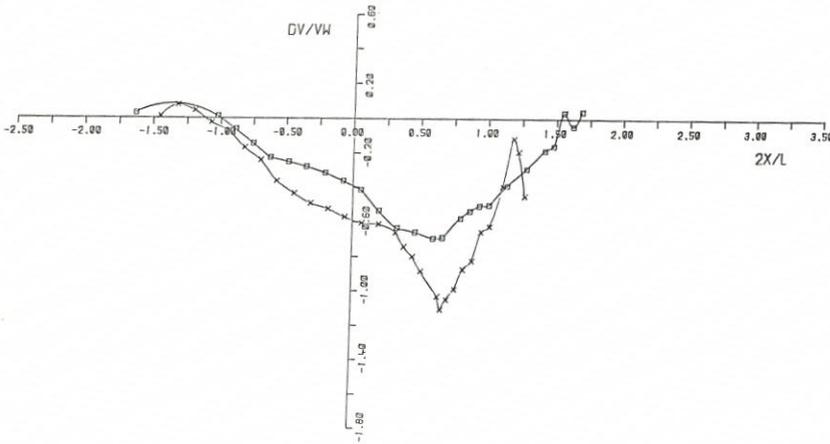


Abb. 31

Versuche 5.9.-7.9.1984 Neßmersiel

Kutter "MEMMERT"

$$n = \frac{\Delta L}{\Delta M} \approx 10.7$$

H/T	Fahrt	Dat.	Uhrz.	Ausfahrt	Flut	BEZ.	VG(KN)	VG(M/S)	VST(M/S)	VH(M/S)	H(M)
1.09	4	5.9.84	18.00	Ausfahrt	o	CVPY	5.561	2.861	-0.808	2.941	0.985
1.43	8	5.9.84	18.50	Einfahrt	x	CVPY	6.821	3.509	0.825	3.164	1.284
1.43	16	6.9.84	12.10	Einfahrt	o	CVPY	5.777	2.972	-0.200	3.172	1.291

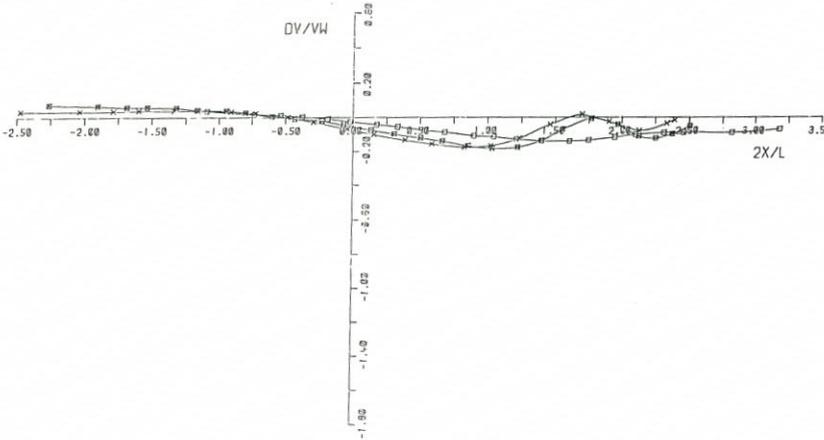


Abb. 32

Versuche 5.9.-7.9.1984 Ausfahrt Neßmersiel

Fahrt	H/T	n = $\frac{\Delta L}{\Delta t}$	Dat.	Uhrz.	MS	BEZ.	VG (KN)	VC (M/S)	VST (M/S)	VH (M/S)	H (M)
6	1.32	≈ 3.5	5.9.84	18.10	MS "BALTRUM I" Flut	CVPY	3.563	1.833	-0.035	1.868	1.050
18	1.42	≈ 6.0	6.9.84	19.10	MS "BALTRUM III" Flut	CVPY	3.293	1.694	-0.175	1.869	1.132

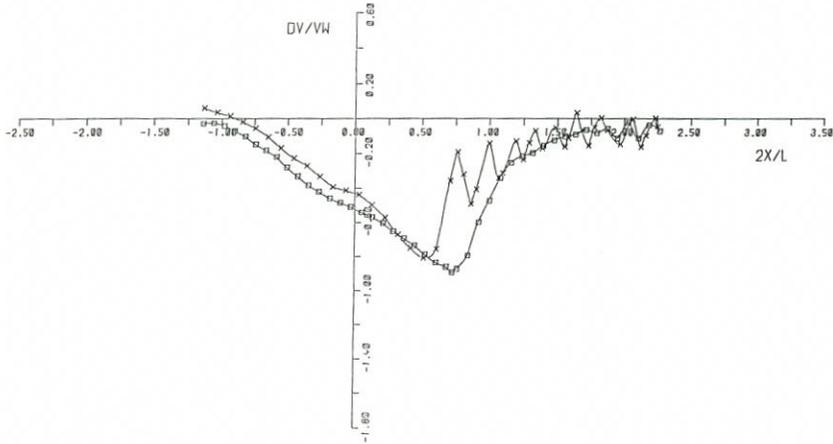


Abb. 33

In Abb. 34 sind diese Mittelwerte der axialen Übergeschwindigkeiten aller Messungen aufgetragen. Es zeigt sich eine erwartete deutliche Zunahme der Rückstromgeschwindigkeit mit geringer werdender n -Zahl. Die Fahrgeschwindigkeiten der Schiffe sind als Parameter nicht erkennbar. Die größte mittlere Übergeschwindigkeit liegt bei ca. 40 % der Schiffsgeschwindigkeit gegen Wasser für $n \approx 3$.

Ähnlich verhalten sich die Maximalwerte der axialen Übergeschwindigkeiten (Abb. 35). Die Zunahme mit geringer werdender n -Zahl ist aber bei diesen Werten erheblich größer. Der größte Wert liegt hier bei 110 % der Fahrgeschwindigkeit gegen Wasser. Der Einfluß der Tideströmung auf die Ergebnisse ist durch den Bezug auf die Geschwindigkeit gegen Wasser V_W eliminiert worden. Dadurch ergeben sich keine merklichen Differenzen bei Ein- und Ausfahrt der Schiffe.

Nachdrücklich muß betont werden, daß diese Diagramme nur Gültigkeit besitzen für das Neßmersieler Außentief. Erhebliche Änderungen in den Abmessungen des Außentiefs können zu völlig anderen Kurvencharakteristiken führen. Eine Allgemeingültigkeit dieser n -Abhängigkeit ist nicht nachgewiesen worden. Aus diesem Grund wurde darauf verzichtet, beide dargestellten Kurven durch eine mathematische Funktion zu approximieren.

Die Messungen zeigten einwandfrei, daß in den sehr kleinen Querschnitten des Neßmersieler Außentiefs durch die Verdrängungsströmung infolge Fahrt größerer Schiffe erhebliche Rückstromgeschwindigkeiten neben den Schiffen und – was gefolgert werden darf – auch unter dem Schiffsboden entstehen. Dadurch wird das lose Bodenmaterial aufgewirbelt. Zu welcher Verwirbelung des Sediments es dann durch Einwirkung des Schraubenstrahls kommt, konnte im Rahmen der bisherigen Untersuchungen nicht geklärt werden. Es ist zu empfehlen, dieser Frage nachzugehen. Dabei müßte jedoch die Meßtechnik verändert werden.

Weiterhin ist zu empfehlen, die im Neßmersieler Außentief durchgeführten Messungen auch in anderen Außentiefs durchzuführen, um die Allgemeingültigkeit der Ergebnisse zu überprüfen oder zu sichern. Eine zweidimensionale Messung sollte zukünftig angestrebt werden.

Mittlere axiale Übergeschwindigkeiten
neben einem fahrenden Schiff
im Neßmersieler Außentief

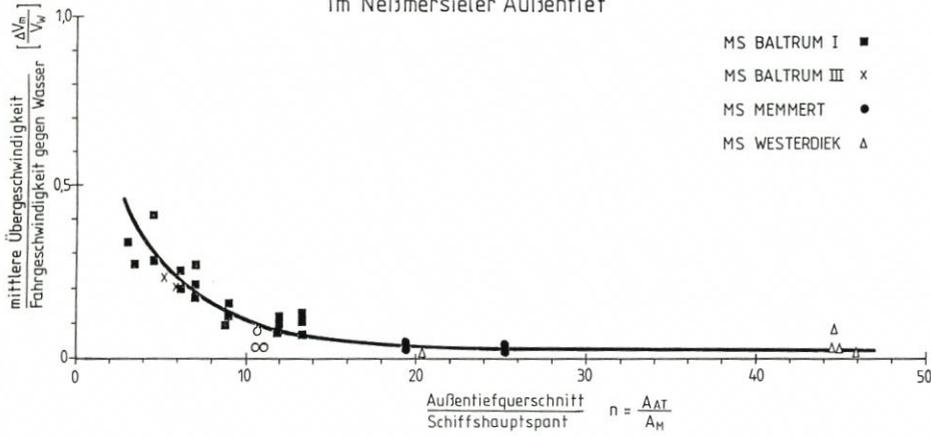


Abb. 34

Maximalwerte der axialen Übergeschwindigkeiten
neben einem fahrenden Schiff
im Neßmersieler Außentief

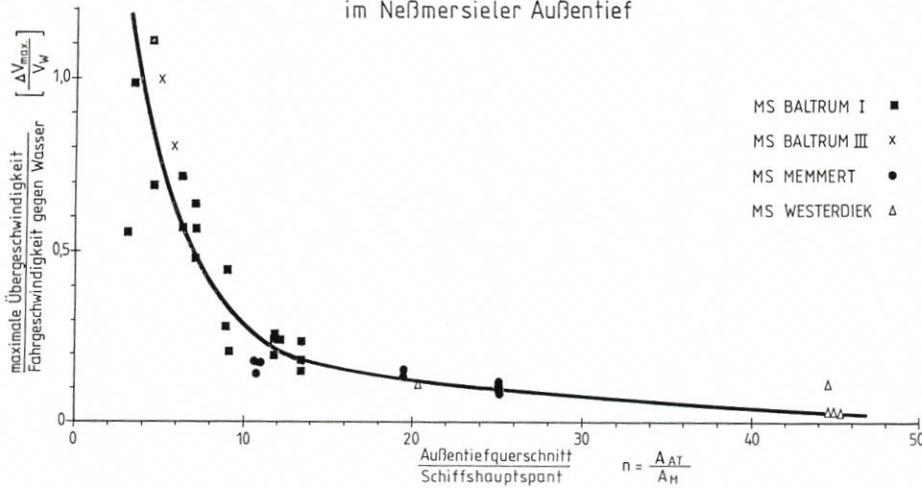


Abb. 35

9. Symbolverzeichnis

- A_{AT} Querschnitt des Außentiefs
- A_M Hauptspantfläche des Schiffes
- B Schiffsbreite
- $DV = \Delta V = u$ Zusatzgeschwindigkeit, Übergeschwindigkeit, Rückstromgeschwindigkeit (in axialer Richtung)
- $F_n = \frac{V}{\sqrt{g \cdot L}}$ Froude Längenzahl

$F_{nh} = \frac{V}{\sqrt{g \cdot h}}$	Froude Tiefenzahl
g	Gravitationskonstante
h	Wassertiefe
L	Schiffslänge
$L_{\text{ü.a.}}$	Länge des Schiffes über alles
L_{WL}	Länge des Schiffes in der Wasserlinie
$n = \frac{A_{AT}}{A_M}$	Querschnittsverhältnis, -zahl
p_0	Atmosphärendruck
t	Zeit
T	Schiffstiefgang
u, v, w	Komponenten der Störgeschwindigkeit
V	Geschwindigkeit allgemein
V_0	Anströmgeschwindigkeit, Schiffsgeschwindigkeit
V_L	Geschwindigkeit gegenüber Land
V_{Str}	Strömungsgeschwindigkeit
V_w, VW	Geschwindigkeit gegen Wasser
x, X	Längskoordinate
α	Wellenöffnungswinkel
ρ	spez. Masse
Φ	Geschwindigkeitspotential
Δh	Wasserflächenverformung
Δp	Druckänderung

10. Schriftenverzeichnis

- BINEK, H. u. MÜLLER, E.: Einzelfahrten von Schubverbänden in Schifffahrtskanälen. HANSA, Jg. 113, H. 8, 1976.
- BINEK, H. u. MÜLLER, E.: Passieren von Schubverbänden in Schifffahrtskanälen. HANSA, Jg. 114, H. 20, 1977.
- FELKEL, K.: Die Problematik der Sohlenerosion des Oberrheins. Zeitschrift für Binnenschifffahrt u. Wasserstraßen, Nr. 8, 1977.
- GROLLIUS, W.: Druckmessungen bei Schrägschleppversuchen mit frei krägendem Modell auf begrenzter Wassertiefe. Schiff und Hafen, H. 6, 1979.
- KAUFMANN, W.: Technische Hydro- und Aeromechanik. Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1954.
- KNISS, H. G.: Kriterien und Ansätze für die technische und wirtschaftliche Bemessung von Auskleidungen in Binnenschifffahrtskanälen. Diss., TU Braunschweig, 1982.
- MÜLLER, E.: Untersuchung der Verformung der Wasseroberfläche durch die Verdrängungsströmung bei der Fahrt eines Schiffes auf flachem Wasser. VBD-Mitteilung Nr. 83, 1966.
- MÜLLER, E.: Untersuchung der Wasserflächenverformung beim Begegnen zweier Schiffe im Kanal. VBD-Mitteilung Nr. 101, Teil 2, 1969.
- MÜLLER, E. u. BINEK, H.: Systematische Modellversuche mit Schubleichterverbänden. Schiff und Hafen, H. 11, 1976.
- PLATE, U. u. KEIL, G. W.: Sediment-Transport in einem Seeschifffahrtskanal. Die Küste, H. 21, 1971.
- SCHÄLE, E.: Strömungsmessungen in einem Stillwasserkanal trapezförmigen Querschnitts. Schiff und Hafen, Jg. 20, H. 4-9, 1968.
- SCHRÖDER, H. TH. u. HOFMANN, W.: Beanspruchung der Böschung eines Schifffahrtskanals. Schiff und Hafen, Jg. 20, H. 4-9, 1968.