

Mitteilungsblatt
der
Bundesanstalt für Wasserbau

Nr. 43

KARLSRUHE · DEZEMBER · 1978

ISSN 0572 - 8501

Mitteilungsblatt

der

Bundesanstalt für Wasserbau

Nr. 43

KARLSRUHE · DEZEMBER · 1978

ISSN 0572 - 8501

I N H A L T

	Seite
<p>D i e t z</p> <p>STRÖMUNGSABWEISER UND/ODER DURCHBROCHENE TRENNMOLE ALS MITTEL ZUR VERMINDERUNG DER QUERSTRÖMUNGEN IN OBEREN VORHAFENZUFahrTEN AM BEISPIEL DER NEUEN MAINSTAUSTUFE KROTZENBURG. 29 Bilder</p> <p>Flow diverting device and/or perforated separating wall as means for diminishing cross currents in lock approaches</p>	1 - 41
<p>K n i e ß</p> <p>BELASTUNGEN DER BÖSCHUNGEN DES NORD-OSTSEE-KANALS DURCH SCHIFFSVERKEHR - ERGEBNISSE VON NATURMES- SUNGEN - 27 Bilder, 13 Tabellen</p> <p>The loading of the slopes of the Nord-Ostsee-Kanal (Kiel- Canal) by passing ships - results of measurements in na- ture -</p>	43 - 90

- Wiedergabe der Aufsätze mit Quellenangabe gestattet -
Das Mitteilungsblatt erscheint in unregelmäßiger Folge im
Eigenverlag der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW),
Kußmaulstraße 17, 7500 Karlsruhe 21

STRÖMUNGSABWEISER UND/ODER DURCHBROCHENE TRENNMOLE
ALS MITTEL ZUR VERMINDERUNG DER QUERSTRÖMUNGEN IN
OBEREN VORHAFENZUFahrTEN AM BEISPIEL DER NEUEN
MAINSTAUSTUFE KROTZENBURG

Flow diverting device and/or perforated separating
wall as means for diminishing cross currents in
lock approaches

Zusammenfassung

Im Rahmen der Modellversuche für den oberen Schleusenvorhafen Krotzenburg wurde in systematisch angelegten Versuchsreihen der Einfluß der Öffnungsfläche in durchbrochenen Trennmolen, der Molen- bzw. Vormolenlänge und der Lage des Strömungsabweisers auf die Größe der Quergeschwindigkeiten im Fahrwasser oberhalb der Trennschleuse auf einer breiten, teils sogar allgemein gültigen Basis verfolgt. Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit dem Ergebnis dieser Untersuchungen.

Summary

Systematic test series have been carried out in the course of model investigations for the head approach of the navigation lock Krotzenburg (river Main). The aim was to find out the effect of

1. the opening area in perforated separating walls,
2. the dam length and
3. the position of the flow diverting device

on the cross flow velocities near the upper pier head. This article shows the results of the tests.

I N H A L T

	Seite
1. Übersicht und Aufgabenstellung	3
2. Aufbau der Versuche	5
3. Verfahren der Messung und Auswertung	6
4. Ergebnisse der Modelluntersuchungen	10
4.1 Untersuchung des Ausgangsentwurfs	11
4.2 Maßnahmen zur Verminderung der Quergeschwindigkeit	16
4.2.1 Allgemeines zur durchbrochenen Trennmole und zum Strömungsabweiser	16
4.2.2 Einfluß der Öffnungsfläche der durchbrochenen Trennmole	18
4.2.3 Einfluß und zweckmäßigste Lage des Strömungsabweisers	23
4.2.4 Einfluß der Molen- bzw. Vormolenlänge	25
4.3 Untersuchung des Ausführungsvorschlages	29
4.4 Fahrten mit einem ferngesteuerten Modellschiff	33
5. Zusammenfassung	39
6. Literatur	40

1. Übersicht und Aufgabenstellung

Im Rahmen der Umkanalisierung des Mains zwischen Offenbach und Großkrotzenburg wird nach der neuen Schleuse Kesselstadt als weiteres Projekt zur Verbesserung der Schifffahrtsverhältnisse oberhalb Offenbach die neue Staustufe Krotzenburg errichtet / 5 / . Im Gegensatz zu Kesselstadt muß die neue 300 m lange und 12.00 m breite Schleuse flußseits der alten Kammer angeordnet werden, da die ufernahe Bebauung am linken Ufer den Bau einer neuen Schleuse hier nicht zuläßt (Abb. 1).

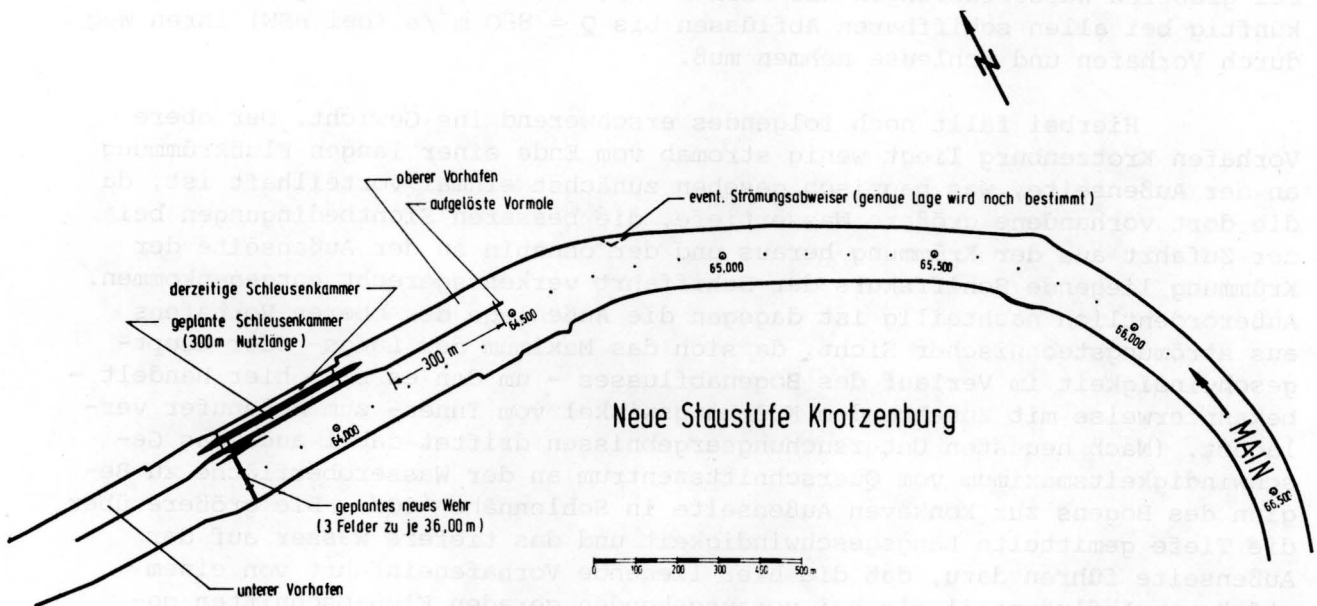


Abb. 1: Lageplan der neuen Mainstufe Krotzenburg

Da bei der vorbeschriebenen Lage der neuen Schleuse das alte Wehr nicht erhalten werden kann, muß der Neubau des Wehres hier gleichzeitig mit dem Schleusenneubau und nicht in einem späteren Bauabschnitt (wie bei Kesselstadt) betrieben werden. Das neue Wehr wird in Höhe des Schleusenunterhauptes angeordnet und wie alle im Untermain bestehenden Wehranlagen drei Wehrfelder erhalten. Die Durchflußbreite der einzelnen Wehrfelder beträgt 36 m, wobei als Verschlüsse Fischbauchklappen in Frage kommen. Das alte Walzenwehr wird abgebrochen.

Durch den Bau der zweiten Schleuse und der damit verbundenen Verbreiterung des Vorhafens auf rund 66 m wird unter Beibehaltung der linksseitigen Uferführung das Verhältnis der Vorhafenbreite b_v zur Breite b_w des dem Wehr zufließenden Stromes von bisher 0,22 auf 0,57 vergrößert.

Man weiß nun aufgrund einer eingehenden Betrachtung der Strömungsverhältnisse und der durch sie gegebenen Fahrbedingungen für die Schifffahrt in den oberen Vorhafenzufahrten an der Mosel / 4 / , daß dieses Verhältnis b_v / b_w in die Stärke und das Ausmaß der Querströmungen hineinwirkt und sich bei ungünstig großen Verhältniswerten bei stärkeren Abflüssen Schifffahrtsschwernisse einstellen können. Neuerdings bei der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) angestellte systematische Modelluntersuchungen von oberen Vorhafenzufahrten können ins einzelne gehend zeigen, daß die Umlenkung des gegen die Einfahrt gerichteten Strömungsanteils um den Kopf der Trennmole in den Zuströmbereich des Wehres umso schärfer und auf umso breiterer Front vonstatten geht, je stärker der Fluß durch den Vorhafen eingengt wird. Oder anders ausgedrückt,

die die Intensität einer Querströmung kennzeichnenden Quergeschwindigkeiten v_q und damit die auf das Schiff wirkenden lateralen Strömungskräfte nehmen mit dem Verhältnis b_v / b_w zu (selbstverständlich auch mit der Größe des Abflusses).

Damit erhebt sich jetzt die Frage, in welchem Ausmaß die neuen Schiffahrtsanlagen an der Staustufe Krotzenburg das Strömungsfeld im Zufahrtbereich des oberen Vorhafens ungünstig verändern und ob sich dabei infolge zu starker Querströmungen Schiffahrtserschwernisse ergeben können, zumal es bei der neuen Staustufe nicht mehr möglich sein wird, daß die Schifffahrt bei größeren Wasserführungen wie bisher direkt durch das Wehr geht, sondern künftig bei allen schiffbaren Abflüssen bis $Q = 880 \text{ m}^3/\text{s}$ (bei HSW) ihren Weg durch Vorhafen und Schleuse nehmen muß.

Hierbei fällt noch folgendes erschwerend ins Gewicht. Der obere Vorhafen Krotzenburg liegt wenig stromab vom Ende einer langen Flußkrümmung an der Außenseite, was nautisch gesehen zunächst einmal vorteilhaft ist, da die dort vorhandene größere Wassertiefe, die besseren Sichtbedingungen bei der Zufahrt aus der Krümmung heraus und der ohnehin an der Außenseite der Krümmung liegende Schiffskurs der Schifffahrt verkehrsgerecht entgegenkommen. Außerordentlich nachteilig ist dagegen die Außenlage des oberen Vorhafens aus strömungstechnischer Sicht, da sich das Maximum der Längs- oder Hauptgeschwindigkeit im Verlauf des Bogenabflusses - um den es sich hier handelt - bekannterweise mit zunehmendem Krümmungswinkel vom Innen- zum Außenufer verlagert. (Nach neuesten Untersuchungsergebnissen driftet dabei auch das Geschwindigkeitsmaximum vom Querschnittszentrum an der Wasseroberfläche zu Beginn des Bogens zur konkaven Außenseite in Sohlennähe /10/. Die größere über die Tiefe gemittelte Längsgeschwindigkeit und das tiefere Wasser auf der Außenseite führen dazu, daß die hier liegende Vorhafeneinfahrt von einem stärkeren Abflußanteil als bei vorausgehenden geraden Flußabschnitten getroffen wird. Dies hat gegenüber dem Normalfall eine Erhöhung der Quergeschwindigkeiten zur Folge (Krümmungseffekt).

Bei der Entwurfbearbeitung für die neue Staustufe Krotzenburg interessieren die hier beschriebenen strömungstechnischen Probleme mehr von der bautechnischen Seite, indem sich die Frage stellt, ob die geplanten Baumaßnahmen genügen, um vor dem Hintergrund der späteren Fahrbedingungen für die Schifffahrt einwandfreie Strömungsverhältnisse im Bereich der oberen Vorhafenzufahrt zu gewährleisten. Für die Planungsarbeit ist auch weiter von Bedeutung, welche baulichen Maßnahmen gegebenenfalls ergriffen werden müssen, um Verbesserungen bezüglich der Schifffahrtsverhältnisse zu erreichen.

Hier sind die bei den Modelluntersuchungen für die Staustufe Kesselstadt/Main /1/ /3/ erprobten Einrichtungen wie durchbrochene Trennmole bzw. Vormole und Strömungsabweiser besonders zu nennen. Im zuerst genannten Fall kommt es auf die optimale Molenlänge und die Dimensionierung der Durchflußöffnungen und beim Strömungsabweiser auf dessen richtige Lage an. Mit Uferabgrabungen, Änderungen in der Uferführung und Vertiefung der Flußsohle sind weitere Mittel zur Entschärfung der Querströmungen und Verringerung der Quergeschwindigkeiten bekannt, die aber im vorliegenden Fall aus Gründen der ufernahen Bebauung, des Landschaftsschutzes (vorhandene Baumreihen entlang des Ufers) und des Kostenumfanges (es müßten auf großer Länge neue Deckwerke erstellt werden) erst dann näher in Betracht gezogen werden sollten, wenn die zuerst genannten baulichen Verbesserungsmaßnahmen nicht zum Ziele führen.

Um diese hier genannten wasserbaulichen Probleme in strömungstechnisch einwandfreier und wirtschaftlich günstiger Weise für die Aufstellung eines baureifen Entwurfs für die Vorhafen- und Uferbauwerke

im Oberwasser lösen zu können, wurden bei der BAW im Auftrag der Neubau-
abteilung für den unteren Main, Aschaffenburg, Modellversuche durchge-
führt, deren Ergebnisse Gegenstand der vorliegenden Arbeit sind.

2. Aufbau der Versuche

Für die Wahl des Modellmaßstabes von 1 : 50 waren in erster Linie
die guten Erfahrungen von den im gleichen Maßstab durchgeführten Modell-
untersuchungen Kesselstadt /1/ /3/ entscheidend, die in ihrer Auf-
gabenstellung ebenfalls die Untersuchung der Strömungsverhältnisse im
Bereich der oberen Vorhafenzufahrt als einen Programmpunkt enthielten und
auch in den Abflußgrößen - wichtig vor allem beim maßgebenden höchsten
Schiffahrtswasserstand - nahezu mit den Gegebenheiten in Krotzenburg über-
einstimmten. Dieser Maßstab ließ die Lösung der gestellten Versuchsaufgabe
sowohl über den Weg der bewährten und wegen ihrer Einfachheit häufig ange-
wandten "Kerzenmethode" zur Ermittlung der Quergeschwindigkeit aus Licht-
bildaufnahmen von schwimmenden Kerzen (siehe /2/ /9/) als auch mit
direkten Messungen der lateralen Strömungskräfte auf ein im Zwangskurs
fahrendes Modellschiff (siehe /2/ /3/) zu. Auch bei den schon er-
wähnten systematischen Vorhafenuntersuchungen hat sich dieser Modellmaß-
stab für die Anwendung der Kerzenmethode bewährt, indem eine ausreichende
Empfindlichkeit gegenüber den zu messenden Größen gegeben war.

Da die Strömungsverhältnisse in Krümmungen und unterstrom von
ihnen, d.h. die Ausbildung und Intensität der Sekundärströmung sehr stark
von der "Vorgeschichte" des betrachteten Abschnitts abhängen /8/ , war
es wichtig, die vor der Staustufe liegende Flußkrümmung so weit wie mög-
lich nachzubilden. Der Modellanfang wurde daher auf Main-km 67,000 gelegt.
Das Modellende konnte mit der Achse der neuen Wehranlage bei Main-km 63,736
zusammenfallen.

Die seitlichen Modellgrenzen konnten sich nach dem höchsten im
Modell zu untersuchenden Wasserstand, dem HSW (= höchster Schiffahrtswasser-
stand) richten, der im allgemeinen die größten Quergeschwindigkeiten bringt,
da die Strömungsgeschwindigkeiten und damit auch deren Querkomponenten zur
Fahrtrichtung des Schiffes mit der Wasserführung anwachsen /3/ /4/
/9/ (Abb. 2).

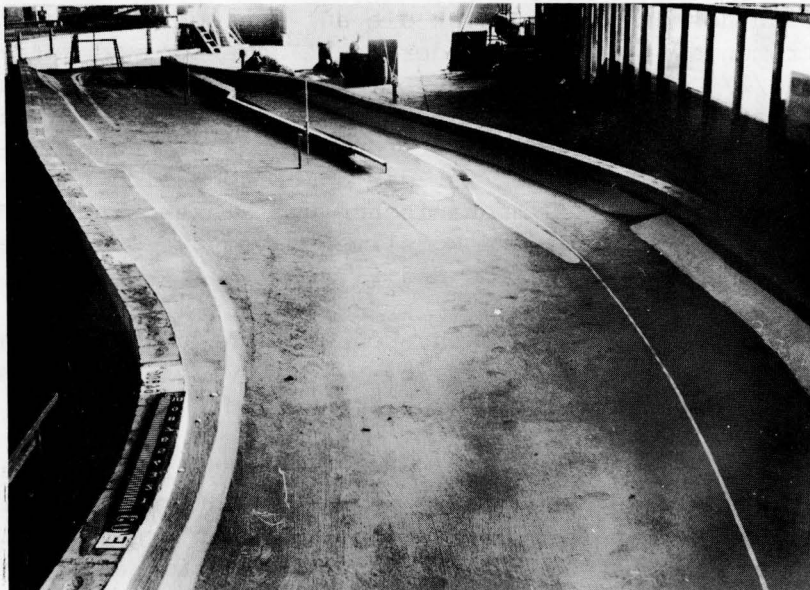


Abb. 2: Blick auf das Modell vom Oberwasser (rechts im Modell der Untersuchungs-
bereich mit der Vorhafeneinfahrt)

Die Modellversuche wurden für die folgenden Abflüsse vom Mittelwasser bis zum höchsten Schifffahrtswasserstand (HSW) durchgeführt.

	(Q = 160 m ³ /s	(MW)
Normalstau	(Q = 350 m ³ /s	
101,71 m ü. NN	(Q = 550 m ³ /s	
Aufgabe des Stauziels	Q = 880 m ³ /s	(HSW)

Die Übertragung der im Modell gemessenen Größen in die entsprechenden Naturwerte bzw. umgekehrt wurde - wie bei allen Fließvorgängen mit freier Oberfläche - nach dem Ähnlichkeitsgesetz von Froude vorgenommen, wonach die Froude-Zahl

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot t}} \dots\dots\dots (1)$$

in Natur und Modell gleich groß sein muß.

Hinsichtlich der Versuchsfahrten mit einem ferngesteuerten Modellschiff kann bei der Anwendung des Froude-Gesetzes auf die Schiffsgeschwindigkeit keine Ähnlichkeit erwartet werden, worauf später nochmals speziell hingewiesen wird.

3. Verfahren der Messung und Auswertung

Das einfachste und bei der BAW am häufigsten angewandte Verfahren zur Ermittlung der Quergeschwindigkeiten ist die sog. Kerzenaufnahme /2/ /9/. Der Vorteil dieser Schwimmermessung liegt im verhältnismäßig geringen Aufwand, was den Meßplatz, die Meßgeräte und die Durchführung der Messungen angeht. Nachteilig ist die nur von Hand durchzuführende Auswertarbeit und die relativ große Streuung der Meßergebnisse, die beonders bei kleinmaßstäblichen Modellen die Aussagegenauigkeit merklich einschränken kann.

Seit einigen Jahren führt die BAW bei Vorhafenuntersuchungen auch sogenannte Schiffskraftmessungen an einem auf Zwangskurs fahrenden Modellschiff durch, an dessen Bug und Heck die auf den Schiffskörper wirkenden seitlichen Strömungskräfte während der Fahrt gemessen und aufgezeichnet werden können /2/ /3/ /4/. Vorteil dieses Verfahrens ist die hohe Auflösung auch gegenüber den kleinsten Strömungskräften, und daß die Auswertung aller Meßgrößen bis zur Plotteraufzeichnung in die EDV-Anlage vorgenommen werden kann. Nachteilig ist der außerordentlich hohe Aufwand für die Installation der gesamten mechanischen und elektronischen Meßeinrichtung und die Bindung an bestimmte Modellmaßstäbe, für die diese Anlage bisher gebaut worden ist (z.Z. 1 : 50 und 1 : 100).

Wie wir später sehen werden, können auch durch Versuchsfahrten mit einem ferngesteuerten Modellschiff /6/ /7/ wichtige Informationen zur Gestaltung einer Vorhafeneinfahrt erhalten werden.

Da die hier zu behandelnden Modellversuche für die Staustufe Krotzenburg aufgrund der vorgegebenen straffen Bautermine möglichst schnell zu den für die Aufstellung des Entwurfs notwendigen Ergebnissen kommen sollten, griff man auf die mit einem geringen Installationsaufwand für den Meßplatz verbundene "Kerzenmethode" zurück, die sich in Verbindung mit dem

Modellmaßstab von 1 : 50 bei den schon mehrmals angesprochenen Modellversuchen Kesselstadt wie auch bei den systematischen Vorhafenuntersuchungen als ausreichend empfindliches Beurteilungskriterium bewährt hat.

Bei dem Verfahren der Kerzenaufnahme bestimmt man die Oberflächengeschwindigkeit der Strömung durch Lichtbildaufnahmen von schwimmenden Kerzen oder neuerdings auch von schwimmenden Beleuchtungskörpern (Glühbirnchen mit Batterie auf einem Styroporplättchen), deren Weglänge in der Zeiteinheit durch elektrisch gesteuerte Unterbrechung der Belichtungszeit festgehalten wird.

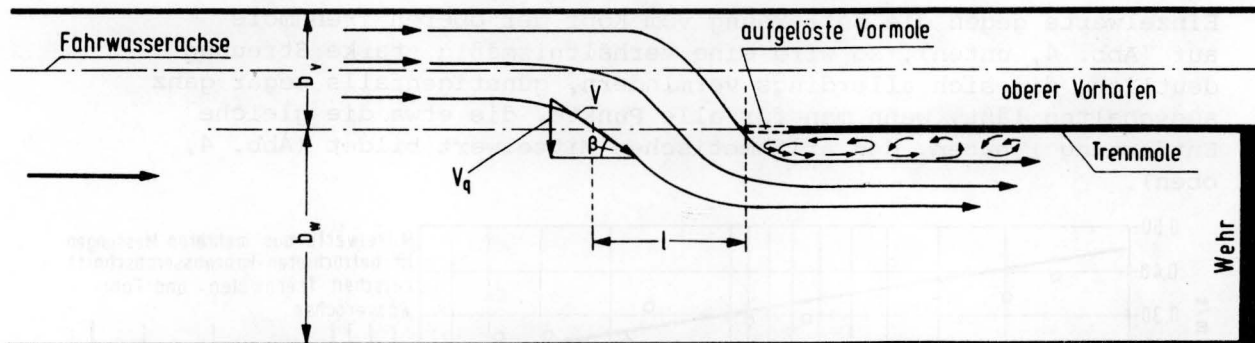


Abb. 3: Definition der Quergeschwindigkeit v_q im Bereich der oberen Vorhafenzufahrt

Wertet man die fotografischen Geschwindigkeitsaufnahmen so aus, daß man ihnen die Komponente senkrecht zur Schiffachse (Fahrwasserachse) entnimmt, dann erhält man die sog. Quergeschwindigkeit (Abb. 3).

$$v_q = v \cdot \sin \beta \dots \dots \dots (2),$$

die für die Betrachtung des Strömungsfeldes im Einfahrtbereich des Vorhafens im Hinblick auf die seitliche Belastung eines Schiffes eine repräsentative Größe ist, da sowohl die Querkräfte als auch die Schiffsverdrehmomente vom Quadrat der auf die Lateralfläche des Schiffes wirkenden mittleren Quergeschwindigkeit abhängen. In der vorher genannten Beziehung (2) für v_q stellt β den Winkel zwischen der jeweiligen Schwimmbahn und der Fahrwasserachse dar; er wird als Anströmungswinkel β bezeichnet.

Wendet man sich nun dem Auswertverfahren für die Kerzenaufnahmen näher zu, so lassen sich nach der örtlichen Abgrenzung des Untersuchungsbereichs zwei Methoden unterscheiden.

In den früheren Jahren, so auch bei den Modelluntersuchungen für die Mosel, war es bei der BAW noch üblich, die Quergeschwindigkeiten nur an einzelnen Punkten entlang eines in 10 m Abstand zur Trennmole angenommenen fiktiven Schiffahrtsweges zu bestimmen und diese Werte v über den Weg bzw. den Ortskoordinaten aufzutragen. Der Nachteil dieser v_q Methode liegt darin, daß nur die Komponenten entlang des einmal angenommenen Schiffahrtsweges erfaßt werden, die aber für den gesamten von der Schiffahrt beanspruchten Einfahrtbereich nicht ausreichend repräsentativ sind. Da es sich hierbei um Einzelwerte handelt, sind deren Streuungen auch noch verhältnismäßig groß.

Um diese Nachteile zu vermeiden, zielen die Auswertungen in jüngster Zeit darauf ab, nicht nur das enge Revier entlang des angenommenen Schiffahrtsweges parallel zur Trennmole zu sehen, sondern die Querkomponenten der Strömungsgeschwindigkeit in einem breiteren Fahrwasserabschnitt, und zwar zwischen Trennmolen- und Fahrwasserachse, in manchen Fällen auch noch darüber hinaus näher zum Ufer hin, zu ermitteln (s. Abb. 3).

Da bei dieser zweiten Methode mehr Schwimmerbahnen als bei dem zuerst beschriebenen Verfahren erfaßt werden, erhält man eine größere Zahl von Einzelwerten, die sich noch vervielfachen läßt, wenn man mehrere voneinander unabhängige Kerzenaufnahmen durchführt und diese ebenfalls auswertet. Trägt man all diese Einzelwerte gegen die Entfernung vom Kopf der oberen Trennmole auf (Abb. 4, unten), so wird eine verhältnismäßig starke Streuung deutlich, die sich allerdings vermindern, günstigenfalls sogar ganz ausschalten läßt, wenn man für alle Punkte, die etwa die gleiche Entfernung l haben, den arithmetischen Mittelwert bildet (Abb. 4, oben).

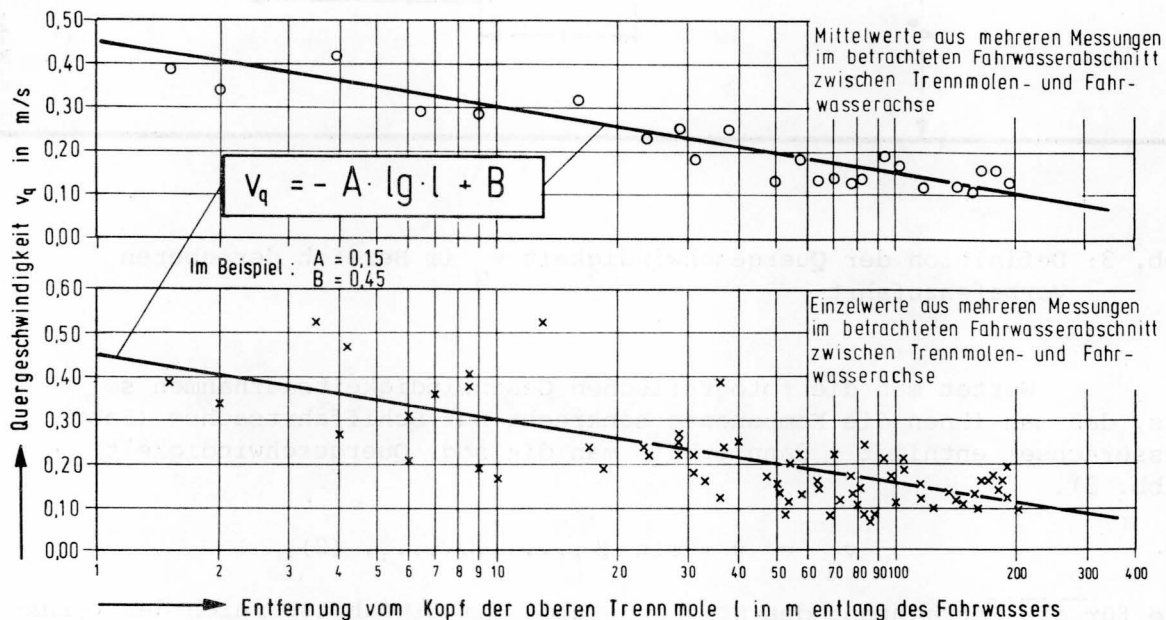


Abb. 4: Verfahren der Auswertung. Darstellung der Quergeschwindigkeiten v_q gegen die Entfernung l vom Kopf der oberen Trennmole

Nach dem Ergebnis der schon mehrmals erwähnten systematischen Vorhafenuntersuchungen streuen im Notfall einer Vorhafenabtrennung die derart ermittelten Quergeschwindigkeiten v_q bei ihrer Darstellung gegen die Entfernung l auf einem einfach logarithmischen Papier um eine Gerade, für die folgende empirische Gleichung angeschrieben werden kann:

$$v_q = -A \cdot \lg l + B \dots\dots\dots (3)$$

Hierin stellen A (Richtungsfaktor der Geraden) und B (deren Abschnitt auf der normal geteilten v_q - Achse bei $l = 1,0$ m) zwei dimensionsbehaftete Größen dar, die von der mittleren Strömungsgeschwindigkeit v_m , dem Verhältnis $\frac{b_v}{b_w}$ und anderen örtlichen Bedingungen (z.B. Uferführung, Gestaltung der Trennmole) abhängig sind. Wohlgedemert handelt es sich hier um eine Auswertmethode bzw. um einen Beurteilungsmaßstab und nicht um eine mathematisch-physikalische Beschreibung des Strömungsvorgangs.

Nach dieser zweiten Methode ist bei den vorliegenden Modellversuchen verfahren worden, wobei in diesem besonderen Fall noch folgende Erläuterungen hinzugefügt werden müssen.

Da das Fahrwasser im Einfahrtbereich des Vorhafens einen gekrümmten Verlauf hat, wurden die im Untersuchungsbereich liegenden Auswertstellen auf die flußseitige Fahrwasserbegrenzung projiziert und ihre Entfernung l vom Kopf der Trennmole entlang der Abwinklung gemessen. Die Länge des Untersuchungsbereichs betrug 200 bis 250 m, um sicher in das oberstromige Revier zu gelangen, wo die Quergeschwindigkeiten unter 0,20 m/s liegen. Die unterstromige Abgrenzung war durch den Kopf der Trennmole vorgegeben, wobei die Kerzenaufnahmen nur eine Auswertung für $l \geq 1,0$ m zuließen. Für jede Versuchsvariante wurde in drei oder mehr getrennten Meßreihen jeweils eine Kerzenaufnahme vorgenommen und aus allen hieraus ermittelten Einzelwerten in der vorher beschriebenen Weise für etwa übereinstimmende Werte l das arithmetische Mittel gebildet (siehe Beispiel auf Abb. 4).

Die Beurteilung der einzelnen Varianten sowie ihr Vergleich untereinander kann nun sowohl über die Auftragung $v_q = f(\lg l)$ erfolgen (für alle wichtigen Untersuchungsfälle werden diese Auftragnungen bei der Behandlung der Ergebnisse angeboten), als auch über die Größen A und B geführt werden, die für jeden Untersuchungsfall ermittelt worden sind und einen übersichtlichen Vergleich aller Ergebnisse ermöglichen.

Bei der Entwicklung von Verbesserungsvorschlägen, spätestens aber bei der Beurteilung des Ausführungsvorschlages hinsichtlich der sich aus den Querströmungen ergebenden Schifffahrtsbedingungen stehen wir vor der Frage, welcher Grenzwert der Quergeschwindigkeit uns die beginnenden Schifffahrterschwerisse in der oberen Vorhafenanfahrt anzeigt. Hierüber geben die für die zur Zeit noch bestehende Staustufe Kesselstadt/Main angestellten Modellversuche in Verbindung mit Naturmessungen im Bereich des oberen Vorhafens Fankel/Mosel nähere Auskunft /4/. Und zwar sind uns für diese beiden Vorhäfen Strömungsfelder im Bereich der oberen Zufahrten und demnach auch die Quergeschwindigkeiten bekannt, die von der Schifffahrt noch ohne Erschwernis durchfahren werden können (Abb. 5).

Im Fall Fankel dürfte nach den bisherigen Erfahrungen damit die Grenzkurve für beginnende Erschwernisse gezeigt sein.

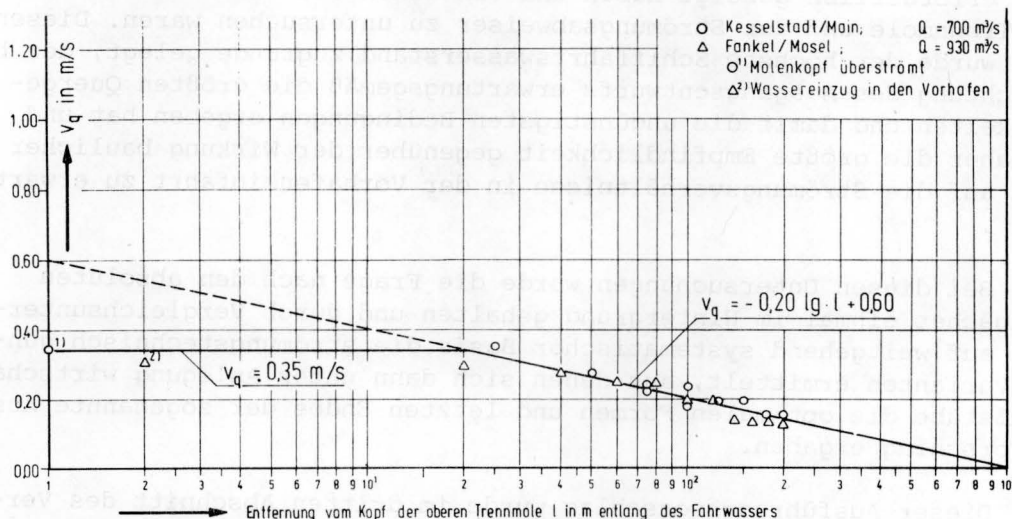


Abb. 5: Grenzwerte der Quergeschwindigkeiten in oberen Vorhafenzufahrten

Demnach genügt es in den beiden vorher gezeigten Fällen, wenn eine Quergeschwindigkeit von 0,20 m/s, wie sie bis vor wenigen Jahren als höchstzulässiges Maß für obere Vorhafenzufahrten galt, nur im Vorbereich der Einfahrt eingehalten wird, der 100 bis 150 m oberhalb der Molenspitze (rund 1 1/2 bis 2 Schiffslängen) endet. Bei einer derart begrenzten Querströmung ist das Schiff bei seiner weiteren Fahrt in Richtung Einfahrt in der Lage, seinen Kurs so zu halten, daß es die bis zur Höhe des Molenkopfes zunehmenden Quergeschwindigkeiten ohne weiteres hinnehmen kann, wenn sie das Maß von 0,35 m/s nicht übersteigen.

Da es sich in den vorliegenden Untersuchungsfällen um verhältnismäßig enge, auf eine Einzelschleuse ausgelegte Vorhäfen handelt (Vorhafenbreite bei Kesselstadt 30 m, bei Fankel 46 m), die wenig Raum zum Ausmanövrieren von Querströmungen lassen, dürften die vorher genannten Werte die untere Grenze bilden. Bei breiteren Vorhäfen, wie man sie bei Doppelschleusen findet, mit ihren entsprechend günstigeren Fahrbedingungen darf eine Erhöhung dieser Grenzwerte vorgenommen werden.

Im hier zu behandelnden Fall des oberen Vorhafens Krotzenburg, wo die Vorhafenbreite im Endzustand des Ausbaues 66 m betragen wird, darf auf diese Überlegungen bei der Diskussion des Ausführungsvorschlages zurückgegriffen werden.

4. Ergebnisse der Modelluntersuchungen

Das Versuchsprogramm war unter Beachtung der früher formulierten Aufgabenstellung in drei zeitlich aufeinander folgende Abschnitte gegliedert.

Im ersten Abschnitt ging es um die Untersuchung des sogenannten Ausgangsentwurfs für die neue Staustufe Krotzenburg ohne zusätzliche Verbesserungsmaßnahmen. Diese Untersuchung wurde für alle früher genannten Abflüsse bzw. Wasserstände vom MW bis HSW vorgenommen. Sie sollte Aufschluß über die Größe der Quergeschwindigkeit geben, wie sie sich ohne weitergehende verbessernde Baumaßnahmen oder Schikanen einstellen würden und einen Bezug für alle weiteren Untersuchungen bringen. Von dieser Plattform aus ließen sich Art und Umfang der Verbesserungsmaßnahmen leichter bestimmen.

Im zweiten und wohl wichtigsten Abschnitt ging es um die Entwicklung von Verbesserungsvorschlägen, wie sie sich nach der ersten Versuchsreihe als erforderlich gezeigt haben und von denen vornehmlich die durchbrochene Trennmole und der Strömungsabweiser zu untersuchen waren. Diesen Versuchen wurde der höchste Schiffahrtswasserstand zugrunde gelegt, der bei der Betrachtung des Ausgangsentwurfs erwartungsgemäß die größten Quergeschwindigkeiten und damit die ungünstigsten Bedingungen ergeben hat und von dem daher die größte Empfindlichkeit gegenüber der Wirkung baulicher Maßnahmen auf die Strömungsverhältnisse in der Vorhafeneinfahrt zu erwarten war /3/ .

Bei diesen Untersuchungen wurde die Frage nach den absoluten Größen zunächst einmal im Hintergrund gehalten und durch Vergleichsuntersuchungen auf weitgehend systematischer Basis die strömungstechnisch günstigsten Varianten ermittelt, aus denen sich dann unter Anlegung wirtschaftlicher Maßstäbe die optimalen Formen und letzten Endes der sogenannte Ausführungsvorschlag ergaben.

Dieser Ausführungsvorschlag wurde im dritten Abschnitt des Versuchsprogramms wieder für die ganze Skala der früher genannten Abflüsse getestet, so daß ein umfassender Vergleich mit den Verhältnissen des Aus-

gangsentwurfs möglich ist, der noch einmal die erzielten Verbesserungen deutlich aufzeigen kann. Im Vergleich mit Meßwerten und Erfahrungen aus dem Freiland lassen sich die am Ausführungsvorschlag erzielten Ergebnisse auch absolut werten.

4.1 Untersuchung des Ausgangsentwurfs

Die Strömungsaufnahmen zeigen den für eine obere Vorhafenfahrt typischen Verlauf der Oberflächenströmung (Abb. 6, oben). Demnach wird die über die gesamte Flußbreite ankommende Strömung durch den Vorhafen abrupt eingeeengt, wodurch der gegen die Einfahrt gerichtete und größtmäßig von der Vorhafenbreite b_v abhängige Abflußanteil erst nach einer mehr oder weniger scharfen Umlenkung wieder in das eigentliche Flußbett und auf den Weg zum Wehr kommt.

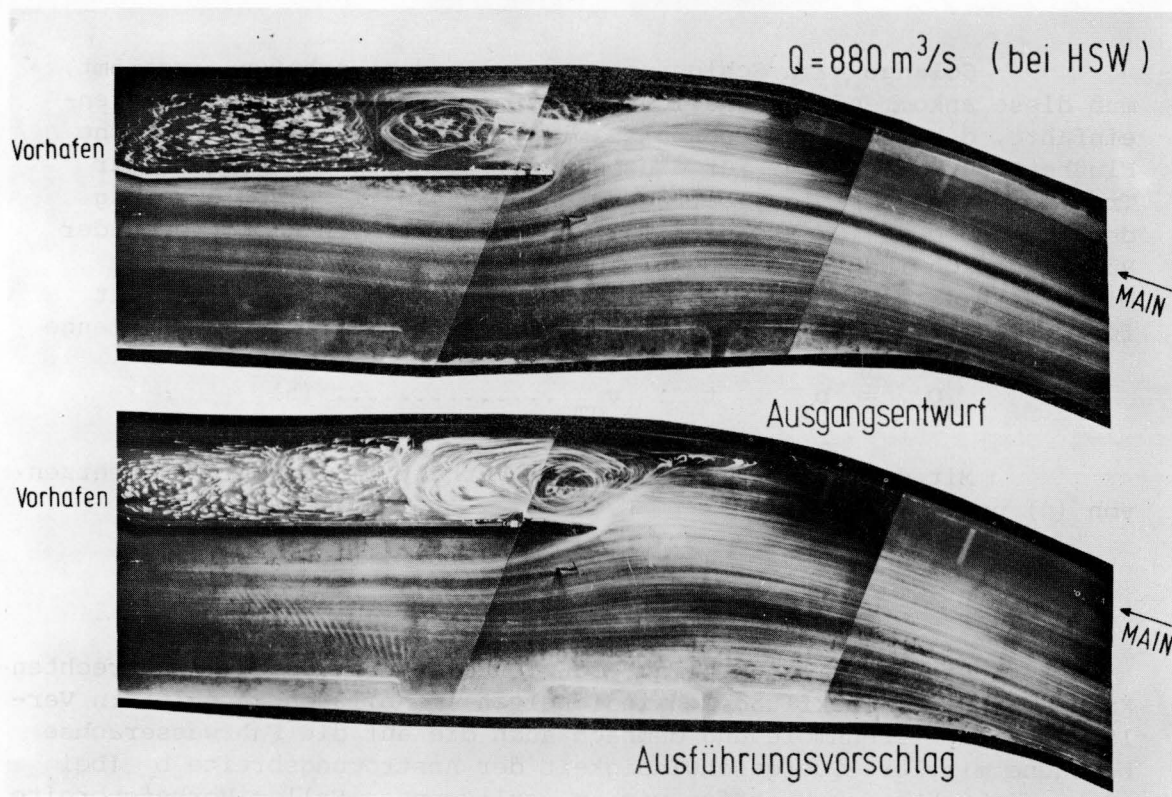


Abb. 6: Verlauf der Oberflächenströmung beim Ausgangsentwurf und beim Ausführungsvorschlag

Der Einfluß der Vorhafenbreite b_v auf diesen Strömungsvorgang macht folgende allgemeine Betrachtung deutlich. Für einen in genügend großer Entfernung von der Trennmolenspitze liegenden Querschnitt V-V senkrecht zur Fahrwasserachse, wo die Quergeschwindigkeiten nahezu null sind, kann die den Vorhafen anströmende sekundliche Wassermenge zu

$$Q_v = b_v \cdot t \cdot v_{vm} \dots \dots \dots (4)$$

angegeben werden. Hierin stellt t die Wassertiefe und v_{vm} die mittlere Strömungsgeschwindigkeit in diesem Querschnitt der Breite b_v dar (Abb. 7).

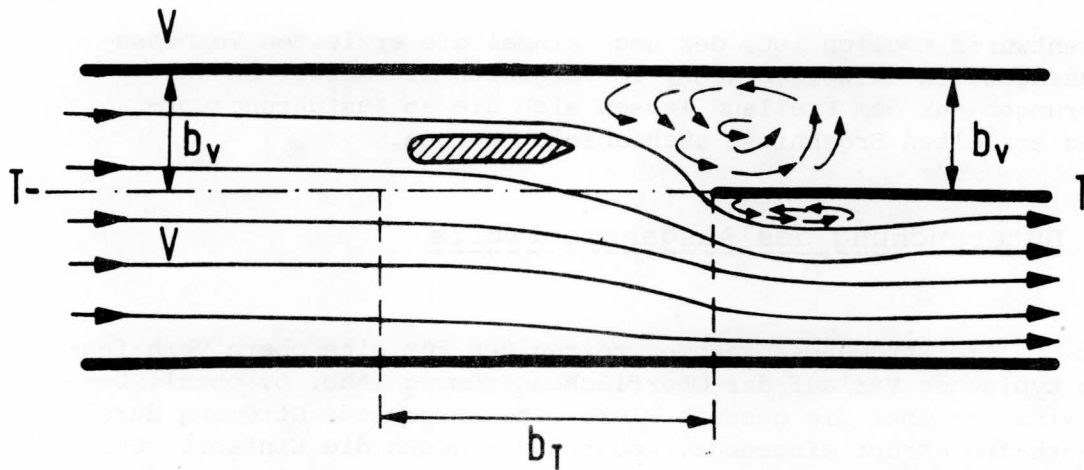


Abb. 7: Strömungsverhältnisse im Bereich der oberen Vorhafenzufahrt

Solange kein Schleusungswasser in den Vorhafen einströmt, muß diese ankommende sekundliche Wassermenge noch vor der Vorhafeneinfahrt, d.h. vor der Trennmolenspitze, wieder in das eigentliche Flußbett zurückfließen. Für diesen Rückfluß, der nunmehr quer zur Trennmolenachse erfolgt, beträgt die Abflußbreite in Verlängerung der Trennmole b_T (Querschnitt T-T). Die senkrechten Komponenten der Rückflußgeschwindigkeit sind die Quergeschwindigkeiten v_q , deren Mittelwert über die Breite b_T mit v_{qm} bezeichnet wird. Damit gilt für den Rückfluß der unter (4) ermittelten sekundlichen Wassermenge

$$Q_T = b_T \cdot t \cdot v_{qm} \dots \dots \dots (5)$$

Mit der Kontinuitätsbedingung erhält man durch Gleichsetzen von (4) und (5)

$$v_{qm} = \frac{bv}{b_T} \cdot v_{vm} \dots \dots \dots (6)$$

Diese Beziehung zeigt, daß der mittlere Wert der senkrechten Komponenten der Rückflußgeschwindigkeiten im Abflußquerschnitt in Verlängerung der Trennmole und demnach auch die auf die Fahrwasserachse bezogene mittlere Quergeschwindigkeit der Anströmungsbreite b_v (bei nicht einbuchtenden Vorhöfen wie im vorliegenden Fall = Vorhafenbreite b_v) und der mittleren Anströmungsgeschwindigkeit v_{vm} direkt proportional und der Rückflußbreite b_T umgekehrt proportional sind.

Das mit Beziehung (6) niedergeschriebene Ergebnis gibt auch Auskunft darüber, wie stark sich der im einleitenden Abschnitt erläuterte Krümmungseffekt in der Größe der Quergeschwindigkeiten niederschlägt, wenn man sich zurückruft, daß die mittlere Anströmungsgeschwindigkeit auf den Vorhafen v_{vm} bei dessen Außenlage größer ist als bei der Normal- oder Innenlage. Hinsichtlich der Außenlage des Vorhafens macht die vorher angestellte Betrachtung noch ein zweites deutlich. Während im Normalfall einer Vorhafenanströmung die beiden verwendeten Bezugsquerschnitte für die Anströmung V-V und die Rückströmung T-T aufeinander senkrecht stehen und die Umlenkung der Strömung von einem zum anderen Querschnitt damit 90° beträgt, ergibt sich bei der Anordnung des Vorhafens am konkaven Ufer einer Flußkrümmung ein größerer Winkel zwischen den beiden Bezugsquerschnitten und damit eine schärfere Krümmung der Strombahnen, was nach Beziehung (2) wiederum zu einer Zunahme der Quergeschwindigkeit v_q führen muß.

Infolge dieser zunächst allgemein beschriebenen, jedoch in dieser Art auch beim Vorhafen Krotzenburg auftretenden Strömungsvorgänge (s. Abb. 6), beginnen schon in größerer Entfernung zur Vorhafeneinfahrt die Richtungen der Schifffahrt (definiert durch die Fahrwasserachse) und der Strömung auseinanderzulaufen, wenn auch die Unterschiede zunächst nur wenige Grad betragen. Im hier zu behandelnden Fall Krotzenburg nimmt etwa 100 m oberstrom der Einfahrt der Umlenkwinkel β (bezogen auf das Schiff spricht man auch von Anströmungswinkel) mit abnehmender Entfernung zur Einfahrt deutlich zu und kann in Höhe des Trennmolenkopfes 90° und mehr betragen.

Die Auswertung der Schwimmerbahnen auf den Kerzenaufnahmen hinsichtlich des Umlen-(Anströmungs-)winkels β nach dem gleichen Verfahren der Mittelbildung wie bei den Quergeschwindigkeiten v_q (siehe Abschnitt 3) zeigt, daß dieses eben gezeichnete Strömungsbild vom Abfluß bzw. vom Wasserstand unabhängig ist (Abb. 8), wenn man über die verfahrensspezifische Streuung der einzelnen Meßgrößen hinwegsieht.

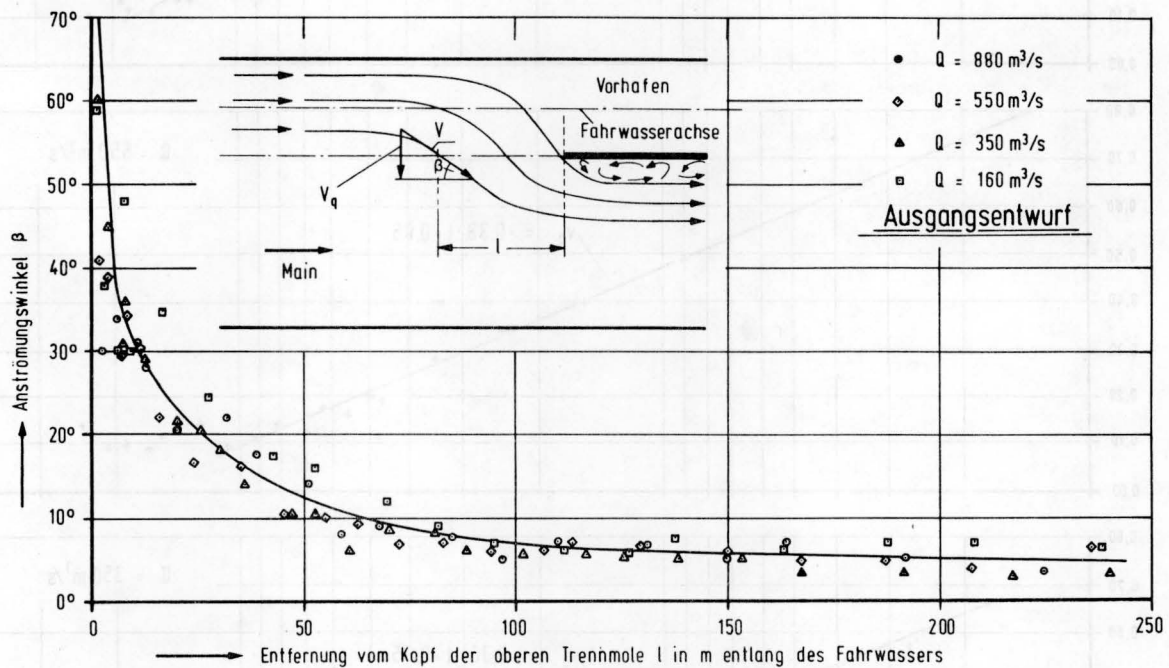


Abb. 8: Anströmungswinkel β im Bereich der oberen Vorhafenzufahrt beim Ausgangsentwurf

Selbstverständlich gilt diese Aussage nur für den Fall, daß die festen Ränder der Strömung nicht durch den Wasserstand verschoben werden, von dem man unter Vernachlässigung des geringen Böschungseinflusses hier ausgehen darf. Wir sehen später, daß feste Öffnungen in der Trennmole, die mit veränderlichem Wasserstand unterschiedlich stark durchströmt werden, den Winkel β sehr wohl in eine Abhängigkeit vom Wasserstand bzw. vom Abfluß bringen können. Dieses Ergebnis steht im Einklang mit den schon mehrmals erwähnten systematischen Vorhafenuntersuchungen, nach denen die Richtung der Strömung im Bereich der oberen Vorhafenzufahrt nur vom Ort und der Geometrie der Ränder (insbesondere vom Verhältnis b_v/b_w), nicht aber von der Stärke des Abflusses abhängig ist.

Nach der früher niedergeschriebenen Beziehung (2) müssen auch die Quergeschwindigkeiten v_q anwachsen, wenn β mit abnehmender Entfernung vom Kopf der Trennmole zunimmt (Abb. 9). Die Auftragungen für die vier Untersuchungsabflüsse können zeigen, daß die

durch Beziehung (3) beschriebenen Ausgleichsgeraden nur für

$$1 \text{ m} \leq l \leq 100 \text{ m}$$

gültig sind, was mit den besonderen örtlichen Verhältnissen zusammenhängt.

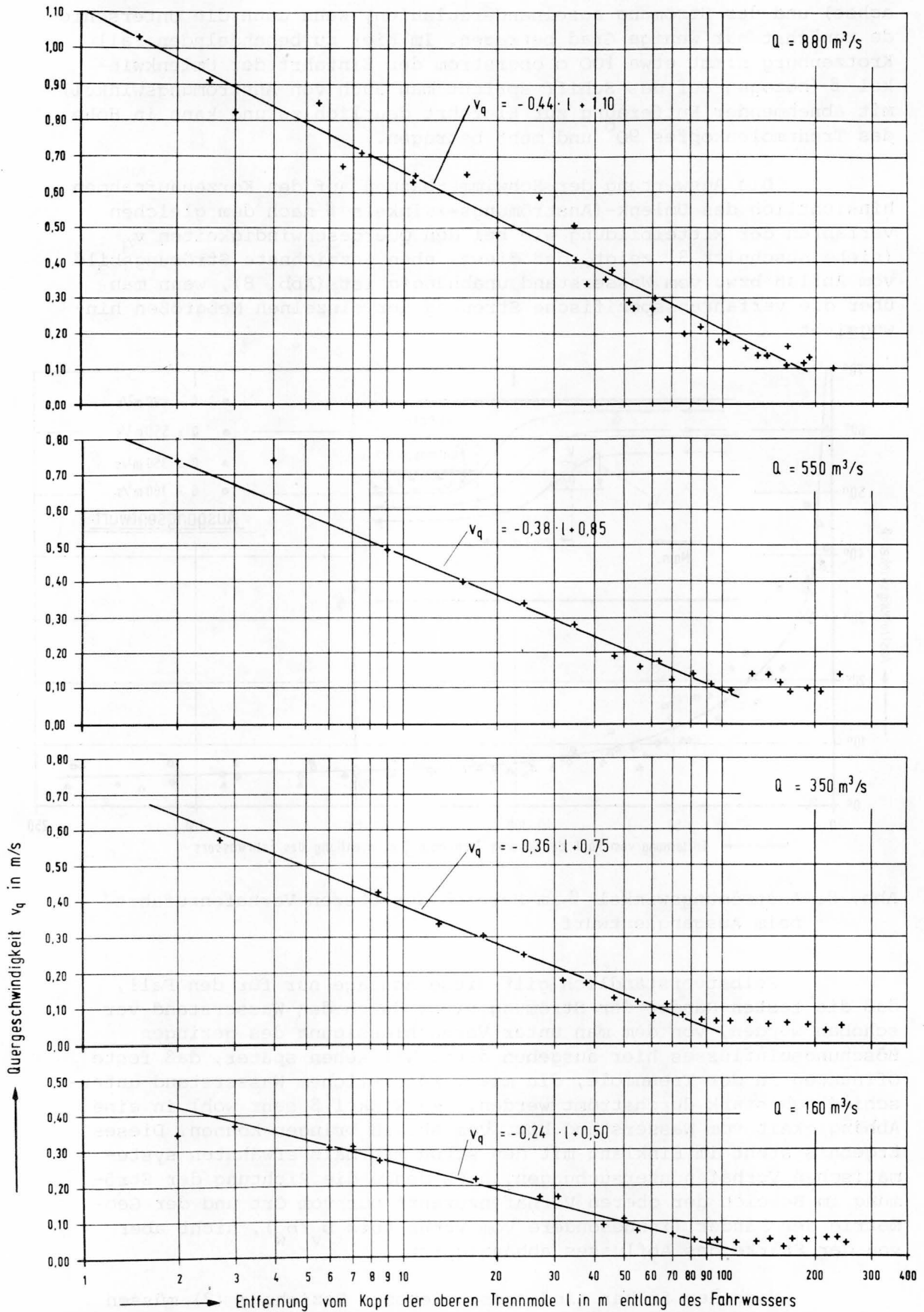
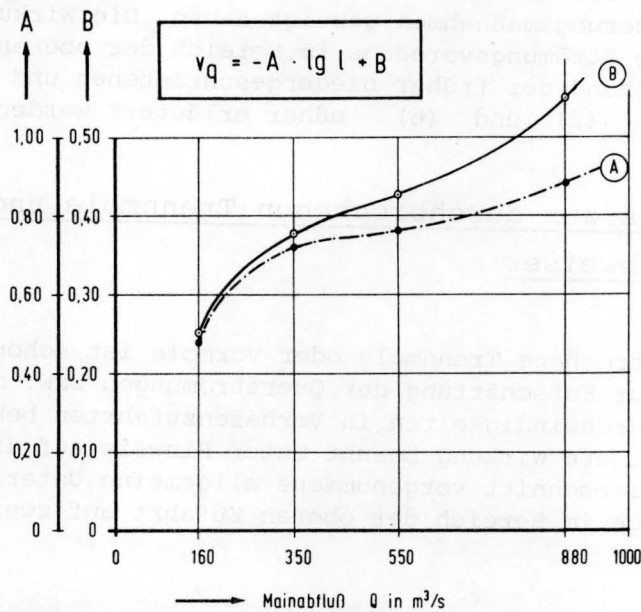


Abb. 9: Quergeschwindigkeiten v_q im Bereich der oberen Vorhafenzufahrt beim Ausgangsentwurf

Ermittelt man daraus für jeden untersuchten Abflußfall die dimensionsbehafteten A- und B-Werte (mit l in m und v_q in m/s) und trägt diese gegen den Abfluß Q auf (Abb. 10), so wird wieder die schon früher begründete Zunahme der Quergeschwindigkeiten v_q mit dem Abfluß deutlich. Im vorliegenden Fall fällt der steile Anstieg der A- und B-Kurven und damit der Quergeschwindigkeiten v_q auf, wenn der Mainabfluß von $MQ = 160 \text{ m}^3/\text{s}$ auf einen noch verhältnismäßig häufigen Wert von $Q = 350 \text{ m}^3/\text{s}$ anschwillt; die Zunahme der Quergeschwindigkeiten beträgt für diese verhältnismäßig enge Abflußspanne schon rd. 50 %. Infolge der damit angezeigten Querströmungen dürften beim Ausgangsentwurf (ohne weitergehende Verbesserungsmaßnahmen) für diesen Abfluß schon erste Schifffahrtserschwernisse zu erwarten sein, wie man auch im Vergleich mit den kritischen Werten der Quergeschwindigkeit (vergl. Abb. 5 mit Abb. 9) erkennen kann.



Q in m³/s	A	B
160	0,24	0,50
350	0,36	0,75
550	0,38	0,85
880	0,44	1,10

Abb. 10: Abhängigkeit der A- und B-Werte vom Abfluß Q beim Ausgangsentwurf

Bei stärkeren Mainabflüssen bis hin zum Abfluß beim höchsten Schiffahrtswasserstand (HSW) nimmt die Intensität der Querströmungen entsprechend dem vorher gezeigten Zusammenhang noch weiter zu; die Quergeschwindigkeiten sind beim HSW jetzt etwa doppelt so groß wie bei $MQ = 160 \text{ m}^3/\text{s}$. Aufgrund dieser starken Querströmungen im Einfahrtbereich des oberen Vorhafens beim Ausgangsentwurf sind nach allen bisherigen Erfahrungen und selbst bei großzügiger Handhabung des im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten Beurteilungsmaßstabs für die Schifffahrt Erschwernisse und Havariegefahren vorauszusagen.

Mit diesem Ergebnis steht außer Frage, daß der Ausgangsentwurf allein nicht ausreicht, um einwandfreie Strömungsbedingungen zu gewährleisten, wie sie die Leichtigkeit und Sicherheit des Schiffs-

verkehrs in der Vorhafeneinfahrt verlangen. Es müssen daher zusätzliche bauliche Maßnahmen zur Verminderung der Querströmungen im Einfahrtsrevier des Vorhafens ergriffen werden, denen die Ausführungen im nächsten Teilabschnitt gewidmet sind.

4.2 Maßnahmen zur Verminderung der Quergeschwindigkeit

Aus den im einleitenden Abschnitt genannten Gründen sollten von allen bekannten Möglichkeiten zur Verminderung der Querströmungen in Vorhafenzufahrten /3/ zunächst nur die durchbrochene Trennmole bzw. Vormole und der oberstrom der Vorhafenzufahrt angebrachte Strömungsabweiser in Anspruch genommen werden, wie sie sich auch bei den Modelluntersuchungen für die Mainstaustufe Kesselstadt /1/ /3/ als wirksame Verbesserungsmaßnahmen gezeigt haben. Die Wirkung dieser Bauwerke auf die Strömungsvorgänge im Bereich der oberen Vorhafenzufahrt kann anhand der früher niedergeschriebenen und abgeleiteten Beziehungen (2) und (6) näher erläutert werden.

4.2.1 Allgemeines zur durchbrochenen Trennmole und zum Strömungsabweiser

Die durchbrochene Trennmole oder Vormole ist schon seit langem als Mittel zur Entschärfung der Querströmungen bzw. zur Verminderung der Quergeschwindigkeiten in Vorhafenzufahrten bekannt /9/. Ihre günstigste Wirkung beruht unter Hinweis auf die im vorangegangenen Teilabschnitt vorgenommene allgemeine Untersuchung der Strömungsvorgänge im Bereich der oberen Zufahrt auf zwei Effekten (Abb. 11).

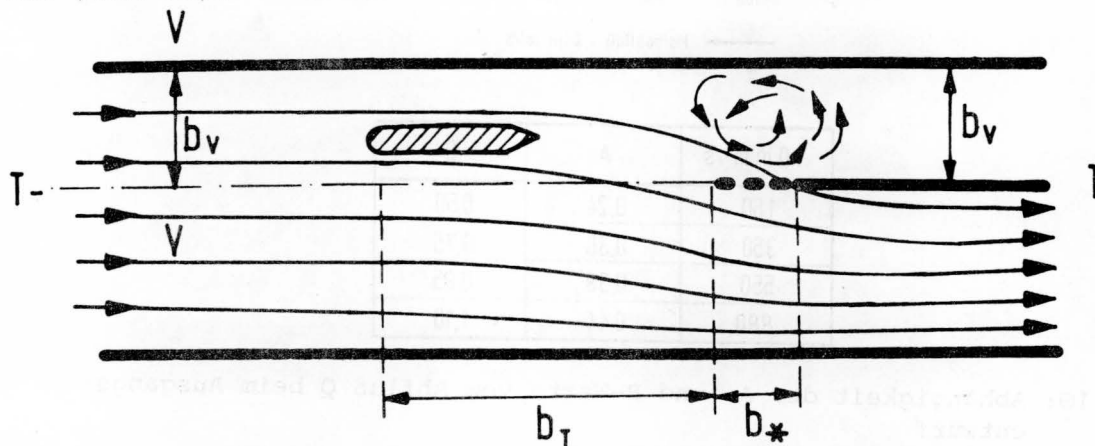


Abb. 11: Abschwächung der Querströmungen durch Anordnung einer durchbrochenen Trennmole

Erstens wird durch die Anordnung einer durchbrochenen Mole die früher mit b_T bezeichnete Ausflußbreite in Verlängerung der Trennmole durch eine zusätzliche Durchströmungsbreite b_* in der durchbrochenen Trennmole vergrößert, was nach der früher niedergeschriebenen Beziehung (6) eine Verminderung der mittleren Quergeschwindigkeit v_{qm} bewirkt. Da auch unten abgeschrägte Tauchwände zur Diskussion stehen können, ist es richtiger, wenn man die Betrachtung nicht über die Durchflußbreite, sondern über den durchströmten Querschnitt führt, der durch die zusätzliche Öffnungsfläche der durchbrochenen Trenn- bzw. Tauchmole vergrößert wird und in der gleichen Weise in die Verringerung von v_{qm} eingeht.

Der zweite günstigste Effekt der durchbrochenen Vormole beruht auf der Verringerung des Anströmungswinkels β , die nach Beziehung (2) zu einer Reduzierung der Quergeschwindigkeit v_q führt. Infolge der durchbrochenen Trennmole kommt es zu einem Wassereinzug in den Teil des Vorhafens, der durch sie abgegrenzt wird. Dadurch fächert die Strömung weiter auf, was mit einer Abflachung der Strombahnen verbunden ist, wenn man diese auf die Fahrwasserachse der Schifffahrt bezieht. Diese Verringerung des Anströmungswinkels β wird später noch im einzelnen nachgewiesen.

Über die Dimensionierung einer durchbrochenen Trennmole hinsichtlich Größe und Zahl der Öffnungen findet man im Fachschrifttum nur wenig Hinweise /4/ /9/. Nicht selten spielen bei der Gestaltung eines derartigen Bauwerks konstruktive oder statische Gründe eine vorrangige Rolle, wie auch die Frage, ob durchbrochene Mole (mit senkrecht bis zur Sohle schlitzförmig verlaufende Öffnungen) oder Tauchwand - bei nachgewiesener Übereinstimmung in der hydraulischen Wirksamkeit - häufig aufgrund konstruktiver Überlegungen entschieden wird. Nach Jambor /9/, und spätere Untersuchungen bestätigen diese Beobachtung, sollte die durchbrochene Mole bzw. Tauchwand von ihrer geschlossenen Wurzel an der festen Trennmole (ohne Öffnungen) bis zu ihrer Spitze mehr und mehr Öffnungen zum Durchströmen anbieten und dadurch einen kontinuierlichen Übergang vom nicht durchströmten Bauwerk bis zum voll umströmten Molenkopf herstellen. Für das gesamte Öffnungsverhältnis

$$\lambda_{\ddot{o}} = \frac{\text{Summe der Öffnungsfläche } A_{\ddot{o}}}{\text{gesamte benetzte Molenfläche } A_M} \dots\dots (7)$$

gibt Jambor einen günstigen Wert von $\lambda_{\ddot{o}} = 40\%$ an.

Bezüglich der Länge einer durchbrochenen Mole ist darauf zu achten, daß sie möglichst wenig von dem Molenabschnitt in Anspruch nimmt, der als Liegeplatz vorgehalten werden muß, da die Gefahr nicht ganz ausgeschlossen werden kann, daß infolge der gegen die durchbrochene Trennmole gerichteten Strömung ein von hier aus startendes Schiff Erschwernisse beim Ablegen hat. Andererseits sollte aber eine durchbrochene Mole, wenn man sie in Verlängerung der festen, von der Zahl der Liegeplätze her dimensionierten Trennmole als sogenannte Vormole anordnet, die Gesamtlänge der Mole (fester + durchbrochener Teil) nicht übermäßig groß werden lassen, da sie nach den Versuchsergebnissen Kesselstadt /1/ /3/ dann wieder Verschlechterungen bringen kann.

Viel weniger ist von der Anordnung eines Strömungsabweisers oberhalb der Einfahrt (s. Abb. 1) bekannt, wenn man von den jüngsten Ergebnissen der Modellversuche Kesselstadt /1/ /3/ absieht, die für diesen speziellen Untersuchungsfall eine günstige Wirkung dieses Bauwerks auf die Strömungsverhältnisse im Einfahrtbereich des oberen Vorhafens - allerdings in Verbindung mit einer Änderung der Uferführung - nachweisen konnten (Abb. 12).

Durch einen Abweiser oberhalb des Vorhafens wird die Strömung vom Vorhafen weg gegen das eigentliche Flußbett gelenkt, wodurch erstens der gegen die Einfahrt gerichtete Abflußanteil eine geringere Breite $b_{v*} < b_v$ hat, was sich nach Beziehung (6) in einer Verminderung der mittleren Quergeschwindigkeit ausdrückt und sich zweitens die Strombahnen in Bezug zur Fahrwasserachse flacher legen (Verminderung von β), was nach Beziehung (2) die absolute Quergeschwindigkeit herabsetzt.

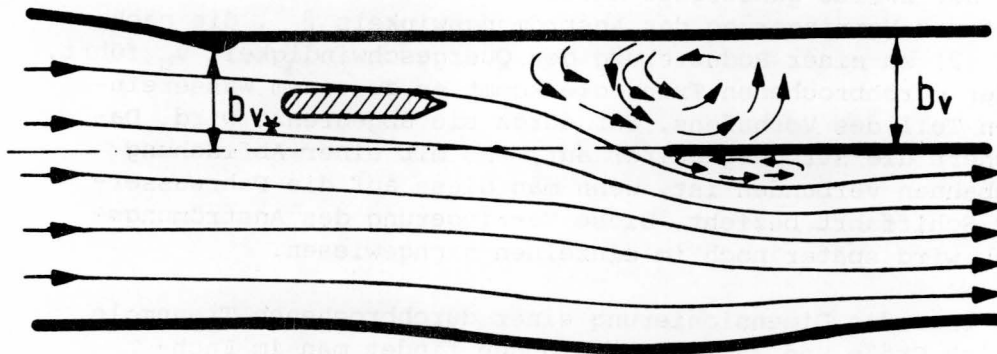


Abb. 12: Abschwächung der Querströmungen durch Strömungsabweiser und Änderung der Uferführung

Es läßt sich fast schon geometrisch erklären, daß ein Strömungsabweiser möglichst weit vom Ufer in den Flußquerschnitt hinausgeführt werden muß und auch nicht allzu weit oberhalb der Einfahrt liegen darf, wenn er die vorher beschriebene günstige Wirkung auf den Verlauf der Strömung erreichen soll. Andernfalls legen sich die Stromfäden unterhalb des Abweisers wieder an das Ufer an und der gewünschte Effekt wird nicht eintreten. Die vorher genannten Prämissen können nicht selten schon das Ende des Abweisers sein, wenn durch die Anordnung des Abweisers die Schiffahrtsrinne tangiert wird und der Abweiser selbst zu örtlichen Störungen in der Strömung und damit zu einer Beeinträchtigung des Schiffsverkehrs führt. Selbstredend sind Einbauten in der Schiffahrtsrinne nicht möglich.

Sowohl die Dimensionierung der durchbrochenen Trennmole, wie auch die richtige, strömungswirksame Anordnung eines Abweisers muß nach dem augenblicklichen Stand unseres Wissens immer dann noch Gegenstand von Modellversuchen sein, wenn die größtmögliche Wirksamkeit unter dem geringsten Kostenaufwand erreicht werden soll.

4.2.2 Einfluß der Öffnungsfläche der durchbrochenen Trennmole

Vorversuche mit fünf verschiedenen Vormolen gaben einen ersten Aufschluß darüber, daß es hinsichtlich der Größe der Quergeschwindigkeiten im Fahrwasser oberhalb der Molenspitze unerheblich ist, ob die Oberkante der Durchflußöffnungen in der Trennmole horizontal verläuft oder mit dem Ziel der Schaffung eines kontinuierlichen Übergangs von der festen Trennmole zum voll unterströmten Molenkopf abgeschrägt ist, sondern daß überwiegend die Öffnungsfläche A_0 in die Größe der Quergeschwindigkeiten hineinwirkt. Um dieses nur dem Raum oberhalb der Einfahrt zugeordnete Ergebnis weiter abzusichern und das Maß der durch eine durchbrochene Trennmole zu erzielende Verbesserung klarer abzugrenzen, wurden bei den folgenden Untersuchungen über den Einfluß der Öffnungsfläche A_0 insgesamt drei Molentypen in Tauchwandbauweise betrachtet, deren konstruktive Gestaltung sowie das Systemmaß von 4,50 für ein Tauchwandfeld von der bestehenden Unabhängigkeitsmole der Doppelschleuse Eddersheim/Main übernommen wurden.

1) Molentypen A' bis C' (Abb. 13):

Die Öffnungshöhe bleibt über die Länge l_0 der durchbrochenen Mole konstant. Die Unterkante der Tauchwand liegt mit 0,50 m verhältnismäßig flach unter dem Normalstau, was dann möglicherweise Erschwernisse für die Schifffahrt bringen kann, wenn die Mole oder ein Teilabschnitt von ihr als Liegeplatz genutzt werden soll.

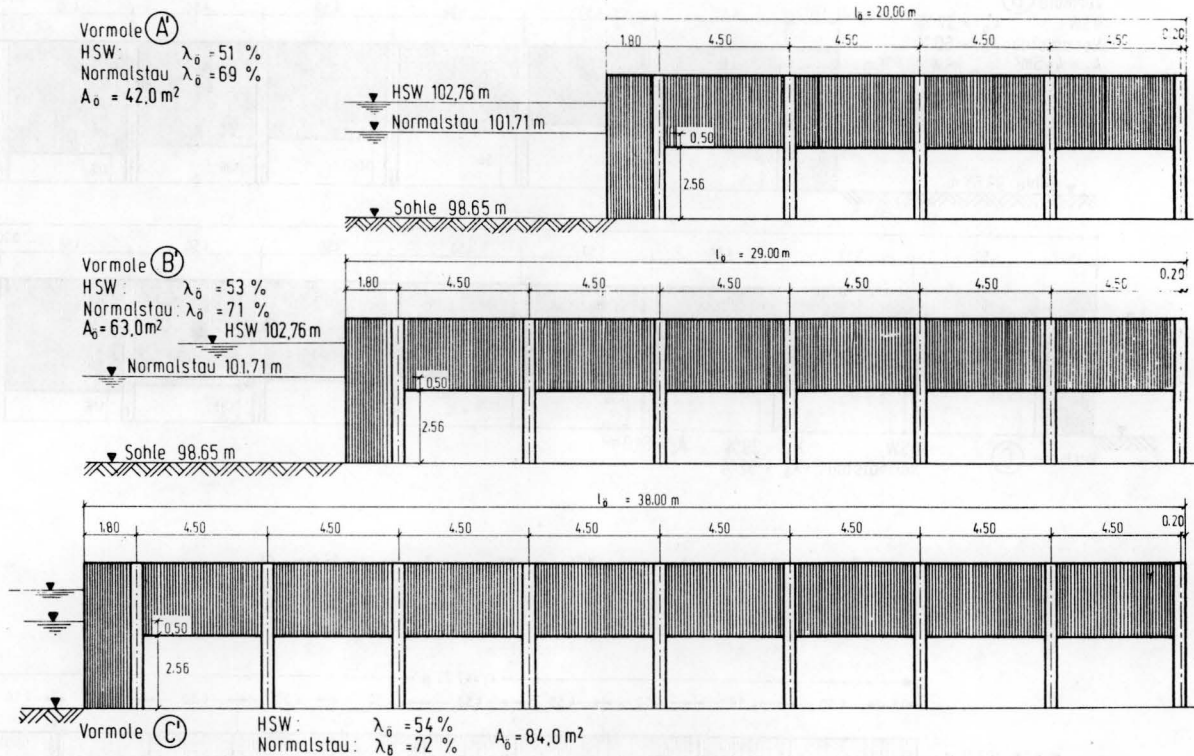


Abb. 13: Längsschnitte der untersuchten Vormolen A' bis C'

2) Molentypen A bis C (Abb. 14):

Die Öffnungshöhe nimmt von der Wurzel der durchbrochenen Mole bis zur Molenspitze feldweise zu und bildet damit einen kontinuierlichen Übergang vom festen Teil der Trennmole ohne Öffnungen bis zum umströmten Molenkopf, wo die Überdeckung beim Normalstau wieder 0,50 m beträgt.

Gegenüber dem vorher beschriebenen Molentyp ist nun die Gefahr der Beeinträchtigung der Liegeplätze infolge der gegen die Durchflußöffnungen gerichteten Strömung geringer, vor allem, wenn diese im letzten Teil der durchbrochenen Mole liegen. Andererseits ist dadurch die Öffnungsfläche A_0 im Verhältnis zur Länge l_0 der Mole verhältnismäßig gering.

3) Molentypen D bis E (Abb. 15):

Die Vorteile des zuerst genannten Molentyps hinsichtlich der verhältnismäßig großen Öffnungsfläche A_0 und des zweiten Typs hinsichtlich der besseren Liegeplatznutzung sind hier miteinander verknüpft worden.

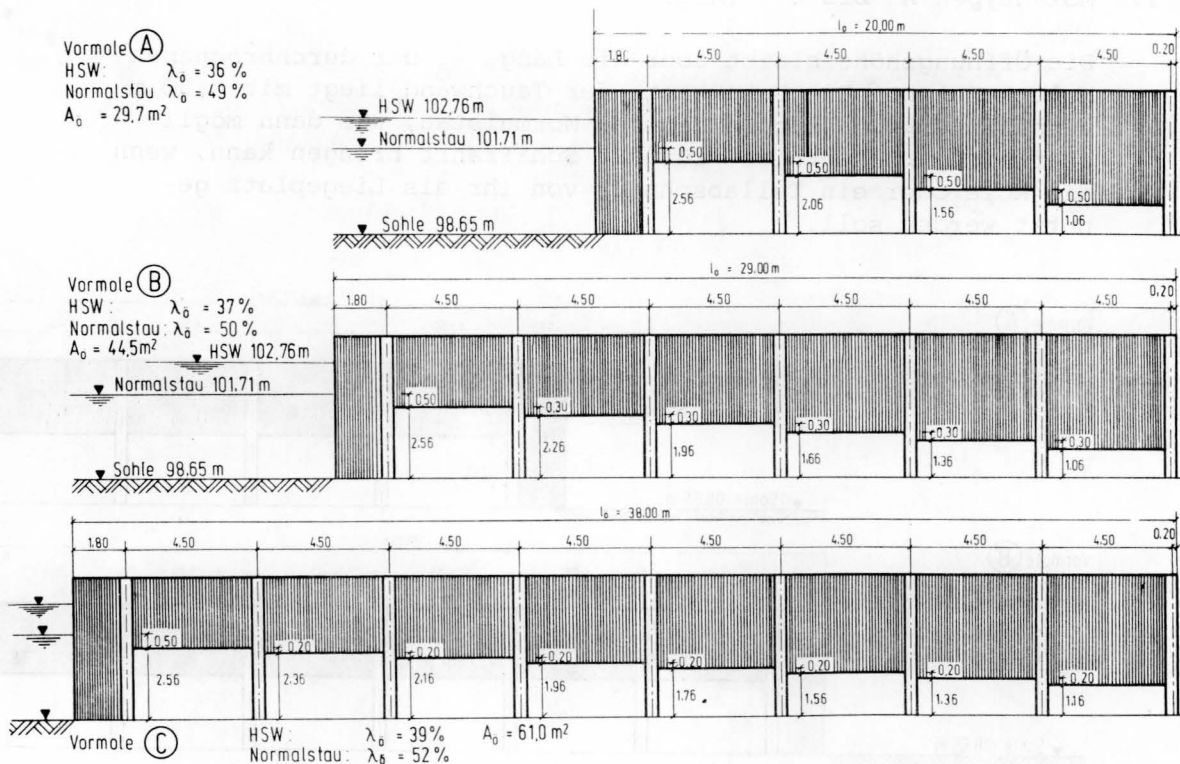


Abb. 14: Längsschnitte der untersuchten Vormolen A bis C

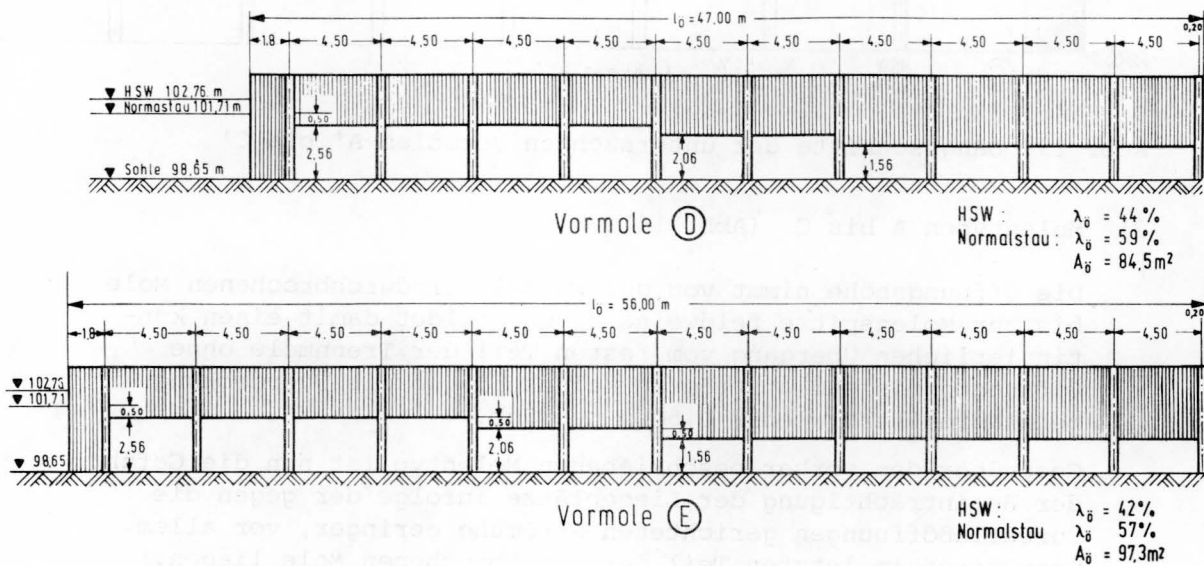


Abb. 15: Längsschnitte der untersuchten Vormolen D bis E

Alle untersuchten Molentypen sind in dieser ersten Versuchsreihe unabhängig von ihrer Länge l_0 (=Länge des Molenteils mit Öffnungen) zunächst so angeordnet worden, daß die Gesamtlänge der Trennmole $l_{ges} = 320$ betragen hat, so daß im Hinblick auf die $l = 300\text{ m}$ lange Ausgangsmole (bemessen nach der Zahl der Liegeplätze) eine Vormolenlänge von $l_v = 20\text{ m}$ gegeben war. Wenn man nun noch die Länge des Molenteils ohne Öffnungen mit l_f bezeichnet, kann ganz allgemein, auch für die später folgenden Versuchsreihen,

geschrieben werden:

$$l + l_v = l_{ges} \dots\dots\dots (8)$$

$$l_F + l_{\ddot{o}} = l_{ges} \dots\dots\dots (9)$$

Die Darstellung der aus den Meßergebnissen ermittelten A- und B-Werte, die nach der uns schon bekannten Beziehung (3) die Größe der Quergeschwindigkeit v_q repräsentieren können, gegen die Öffnungsfläche $A_{\ddot{o}}$ führt wieder zu dem schon bei den Vorversuchen erkennbaren Ergebnis, daß die Quergeschwindigkeiten im Fahrwasser oberhalb der Einfahrt mit zunehmendem Querschnitt der Durchflußöffnungen in der Trennmole abnehmen, wobei deren Form und das Maß ihrer Überdeckung durch den Wasserspiegel keinen Einfluß haben (Abb. 16). Demnach finden wir bei der Vormole E die geringsten Quergeschwindigkeiten vor, die jetzt schon auffällig unter denen des Ausgangsentwurfes liegen, was wir für unsere späteren Untersuchungen hier schon festhalten wollen.

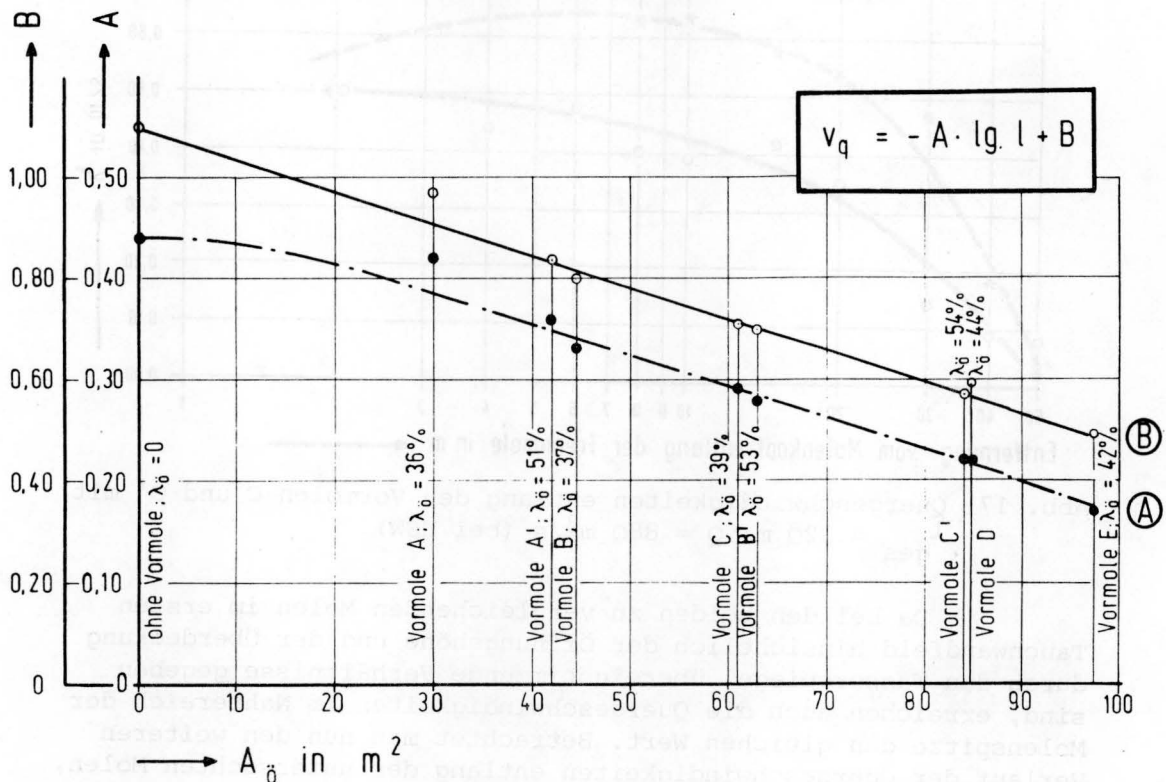


Abb. 16: Abhängigkeit der A- und B-Werte von der Öffnungsfläche $A_{\ddot{o}}$ der durchbrochenen Vormolen A bis E und A' bis C' mit $l_{ges} = 320$ m; $Q = 880$ m³/s (bei HSW)

Die vorher getroffene Aussage hinsichtlich des alleinigen Einflusses von $A_{\ddot{o}}$ stützt sich auf den Vergleich der Formen A' mit B, B' mit C und C' mit D, der überdies zeigen kann, daß das mit Beziehung (7) definierte Öffnungsverhältnis $\lambda_{\ddot{o}}$, das bei den drei vorher genannten Vergleichspaaren jeweils deutlich verschieden ist, keine Rolle bei der Stärke der Querströmungen oberhalb der Vorhafenzufahrt spielt.

Allerdings ist es jetzt an der Zeit, auf die Quergeschwindigkeiten entlang der gegen den Vorhafen gerichteten Seite der durchbrochenen Trennmole einzugehen. Für die Größe der Quergeschwindigkeiten in diesem vorhafenseitigen Längsschnitt ist es tatsächlich

nicht unwichtig, ob die durchbrochene Trennmole eine nach vorne zunehmende Öffnungshöhe (Molen A bis E) oder eine konstante Öffnungshöhe (Molen A' bis C') hat, wie am Beispiel der Molen C und C' gezeigt wird (Abb. 17).

- Mole C (veränderliche Öffnungshöhe)
 - * Mole C' (konstante Öffnungshöhe)
- } $Q = 880 \text{ m}^3/\text{s}$ (bei HSW)

Mittelwerte aus Flügelmessungen über eine Meßtiefe von 1,25 und 2,00 m

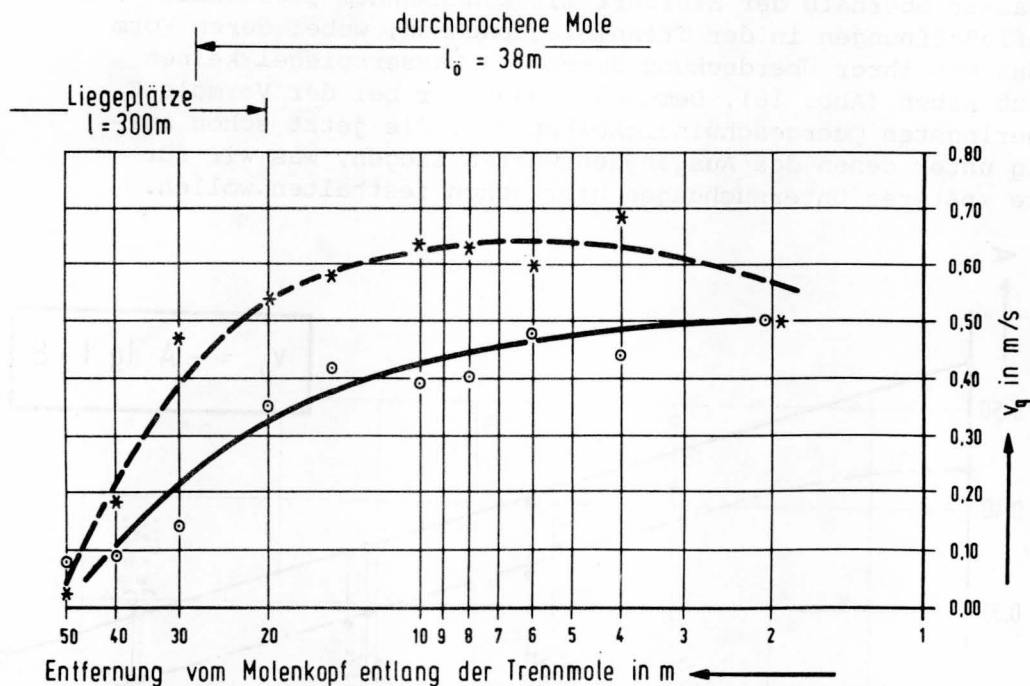


Abb. 17: Quergeschwindigkeiten entlang den Vormolen C und C' mit $l_{\text{ges}} = 320 \text{ m}$; $Q = 880 \text{ m}^3/\text{s}$ (bei HSW)

Da bei den beiden zu vergleichenden Molen im ersten Tauchwandfeld hinsichtlich der Öffnungshöhe und der Überdeckung durch den Wasserspiegel übereinstimmende Verhältnisse gegeben sind, erreichen auch die Quergeschwindigkeiten im Nahbereich der Molenspitze den gleichen Wert. Betrachtet man nun den weiteren Verlauf der Quergeschwindigkeiten entlang der untersuchten Molen, so zeigt dieser einen verständlichen Zusammenhang mit der jeweiligen Öffnungshöhe; nimmt die Öffnungshöhe ab (Mole C), werden auch die Quergeschwindigkeiten geringer; bleibt die Öffnungshöhe konstant (Mole C'), halten sich auch die Quergeschwindigkeiten in einem höheren Bereich, so daß zweifelsfrei die kontinuierliche Abnahme der Öffnungshöhe von der Molenspitze bis zur Wurzel (Mole C) zu geringeren Quergeschwindigkeiten entlang der Mole führt und damit hinsichtlich der Querströmungen in diesem Teil des Fahrwassers und eventuell dort angeordneter Liegeplätze vorteilhafter ist.

Anmerkung:

Es handelt sich hier um die Ergebnisse von Flügelmessungen, die bei Schräg- und Walzenströmungen nicht unproblematisch sind, da die Ermittlung der stark schwankenden Strömungsrichtungen und die richtige Einstellung des Flügels hierzu recht

schwierig ist, was in die nach Beziehung (2) errechneten v_G - Werte eingeht. Die auf Abb.17 gezeigten Werte sollen daher nur für einen Vergleich der Formen C und C' untereinander herangezogen werden, nicht aber für eine absolute Wertung verwendet werden.

4.2.3 Einfluß und zweckmäßigste Lage des Strömungsabweisers

In diesem Stadium der Untersuchungen bestand noch die aus dem verständlichen Wunsch nach einem geringen Kostenumfang aller Verbesserungsmaßnahmen kommende Vorstellung, die durchbrochene Trennmole möglichst kurz aber wirksam zu wählen und das noch notwendige Restmaß an Verbesserungen über den Weg des Strömungsabweisers zu suchen. Aus diesem Grund wurden die Untersuchungen über den Einfluß des Strömungsabweisers auf die Querströmungen im Zufahrtsbereich des Vorhafens und die sich hieraus ergebende zweckmäßigste Lage mit der Vormole C' geführt. Später sollte ggfs. für einen ausreichend strömungswirksamen Ablenker auch die eine oder andere Form der Vormole betrachtet werden.

Insgesamt lagen den Modellversuchen acht verschiedene Anordnungen des Strömungsabweisers zugrunde (Abb. 18), wobei die variierten Abstände in Vorhafennähe mit 50 m noch verhältnismäßig eng gewählt waren, weiter stromauf jedoch auf 100 m gedehnt worden sind. Der einzelne Abweiser ist jeweils bis zum Rand des Fahrwassers geführt worden, so daß er je nach der Führung und Lage der Fahrrinne in bezug zum Ufer in Vorhafennähe verhältnismäßig kurz war, weiter stromauf jedoch eine beachtliche Breite b_L hatte, von der eine große Wirksamkeit zu erhoffen war.

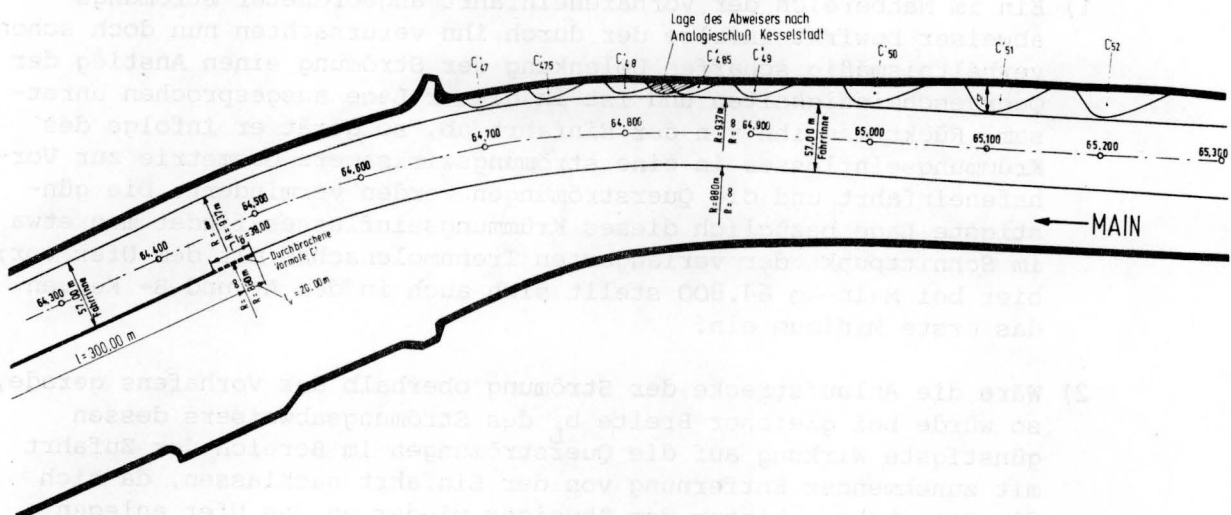


Abb. 18: Untersuchte Lagen des Strömungsabweisers; Lageplan

In der Auftragung der A- und B- Werte gegen die jeweilige Lage des Strömungsabweisers auf der mit der Main-Kilometrierung unterteilten Abszisse (Abb. 19) wird der Fall ohne Strömungsabweiser (also Vormole C' allein) durch die horizontal verlaufenden A- und B-Linien angegeben, die damit ein Bezugsniveau bilden, das uns mit einem Blick mitteilen kann, ob die Querströmungen mit einem Abweiser in einer

bestimmten Lage schwächer oder stärker sind, je nach dem ob die A- und B- Werte unter oder über diesem "Null-Pegel" liegen.

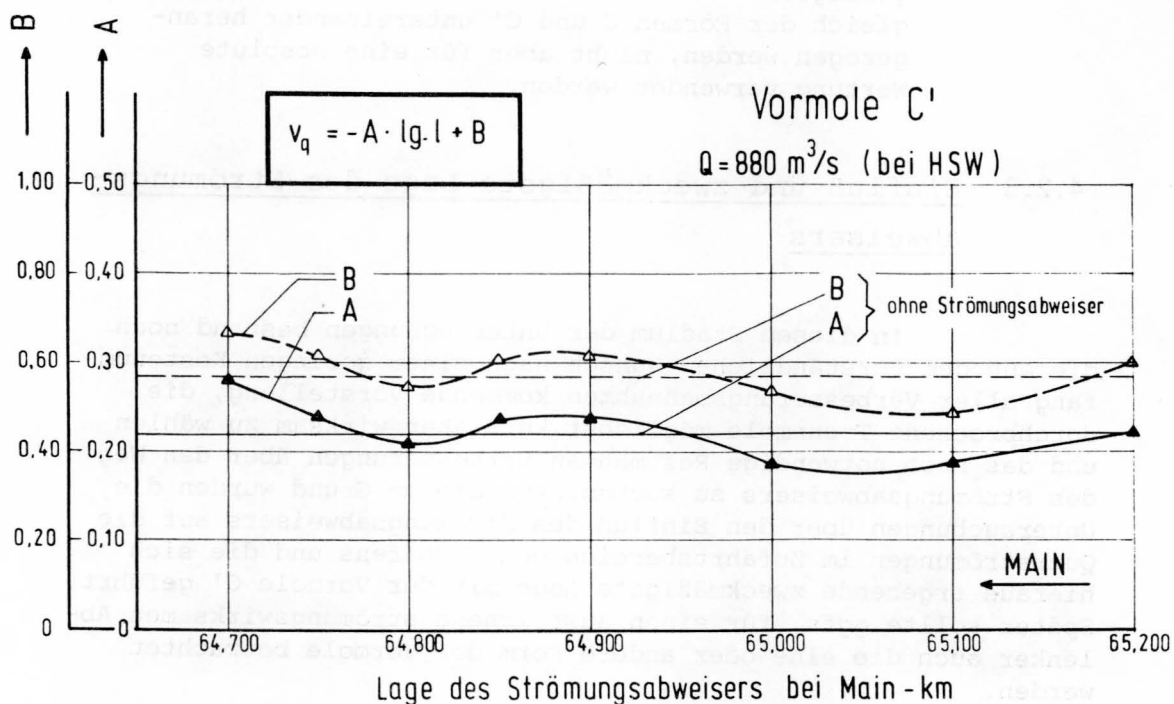


Abb. 19: Abhängigkeit der A- und B- Werte für verschiedene Lagen des Strömungsabweisers; Q = 880 m³/s (bei HSW)

Tatsächlich schwanken auch die A- und B- Werte um diese Bezugshorizontale und bilden im Untersuchungsbereich ein ausgeprägtes Maximum und zwei deutliche Minima, je nachdem welcher der folgenden gleichzeitig wirkenden und sich überlagernden Effekte mit der Lageveränderung des Abweisers mehr oder weniger Gewicht erhält.

- 1) Ein im Nahbereich der Vorhafeneinfahrt angeordneter Strömungsabweiser bewirkt infolge der durch ihn verursachten nun doch schon verhältnismäßig scharfen Umlenkung der Strömung einen Anstieg der Quergeschwindigkeiten und ist in dieser Lage ausgesprochen unrat-sam. Rückt man ihn von der Einfahrt ab, so gerät er infolge des Krümmungseinflusses in eine strömungswirksamere Geometrie zur Vorhafeneinfahrt und die Querströmungen werden vermindert. Die gün-stigste Lage bezüglich dieses Krümmungseinflusses findet man etwa im Schnittpunkt der verlängerten Trennmolenachse mit dem Ufer vor; hier bei Main-km 64.800 stellt sich auch in den A- und B- Kurven das erste Minimum ein.
- 2) Wäre die Anlaufstrecke der Strömung oberhalb des Vorhafens gerade, so würde bei gleicher Breite b_L des Strömungsabweisers dessen günstigste Wirkung auf die Querströmungen im Bereich der Zufahrt mit zunehmender Entfernung von der Einfahrt nachlassen, da sich die Strombahnen hinter dem Abweiser wieder an das Ufer anlegen könnten. Infolge des vorher genannten Krümmungseinflusses tritt dieser Effekt nur gestört oder abschnittsweise auf, man erkennt ihn jedoch am steigenden Verlauf der A- und B- Kurven aus ihren beiden Minima heraus. Am Ende des Untersuchungsbereichs bei Main-km 65.200 verliert sich der Einfluß des Abweisers, obwohl dort seine Breite b_L besonders groß ist.
- 3) Ein Strömungsabweiser vermindert nach den früher im Abschnitt 4.2.1 angestellten Überlegungen die Quergeschwindigkeiten im

Bereich der Vorhafenzufahrt umso mehr, je größer seine Breite b_L ist. Dieser Effekt drückt sich in den A- und B- Kurven durch eine fallende Tendenz zwischen km 64.900 und km 65.100 aus, da für diesen Abschnitt infolge des vom Ufer abrückenden Fahrwassers eine größere Breite b_L gewählt werden konnte.

Demnach erhielte man die geringsten Quergeschwindigkeiten, würde man den Strömungsabweiser bei Main-km 65.100 anordnen (Variante C'₅₁). Der Lageplan auf Abb. 18 zeigt aber, daß das Bauwerk mit einer vorspringenden Breite von ungefähr $b_L = 25$ m und einer umlaufenden Länge von rund 90 m (ein größerer Teil hiervon müßte in Spundwandbauweise erstellt werden) außerordentlich aufwendig wäre. Die durch eine solche Maßnahme zu erzielenden Verbesserungen würden demnach in keiner vernünftigen Beziehung zu den Erstellungskosten stehen, die Maßnahme würde daher nicht angemessen sein. Hinzu kommt, daß ein solches bis zum Rand des Fahrwassers vorspringendes Bauwerk in seiner sicher auch in das Fahrwasser hineinreichenden Einflußzone unruhige Strömungen und Wirbelbildungen hervorrufen würde, so daß sich die Schifffahrt scheuen könnte, nahe an das Bauwerk heranzufahren, wodurch die tatsächliche Fahrwasserbreite nicht ganz ausgenutzt wäre.

Sicherlich würde es eine nachhaltige Hilfe sein, wenn man die Wirkung eines Abweisers bei km 65.100 durch eine deutliche Zurücknahme des Ufers oberhalb des Abweisers und eine gleichzeitige Abflachung des gegenüberliegenden Innenbogens zwischen km 64.700 und km 65.000 unterstützen könnte. Dadurch würde wie im Fall Kasselstadt /3/ dafür gesorgt werden, daß die Strömung auf die andere Flußseite pendelt und letztlich ohne scharfe Umlenkung vor der Vorhafeneinfahrt im Oberwasser des Wehres liegt (s. Abb. 12). Es wurde aber schon gesagt, daß derartige eingreifende Ufermaßnahmen nicht in Frage kommen konnten.

Zur Lösung der gestellten Aufgabe bietet sich vielmehr ein einfacherer Weg an. Vergleicht man die Quergeschwindigkeiten oberhalb der Vorhafeneinfahrt bei Variante C'₅₁ (Abweiser bei km 65.100 und Vormole C') mit den früher für die Vormole E erzielten Ergebnissen, dann stellt man eine etwaige, im Rahmen der Versuchsgenauigkeit liegende Übereinstimmung fest.

Variante	A	B
E	0,17	0,50
C' ₅₁	0,19	0,49

Da die Vormole E mit $l_o = 56,00$ m nur um 18,00 m länger ist als die Vormole C', aber keinen Strömungsabweiser braucht, um auf das gleiche Ergebnis zu kommen und überdies entlang ihrer gegen das Fahrwasser gerichteten Seite infolge der veränderlichen Öffnungshöhe die geringeren Quergeschwindigkeiten auftreten, wird für die weiteren Untersuchungen zur Entwicklung eines Ausführungsvorschlags die Vormole E zugrundegelegt.

4.2.4 Einfluß der Molen- bzw. Vormolenlänge

Mit den bisher gewonnenen Versuchsergebnissen bestand nun Klarheit darüber, daß die Quergeschwindigkeiten im Bereich der oberen Vorhafenzufahrt mittels einer durchbrochenen Vormole nach

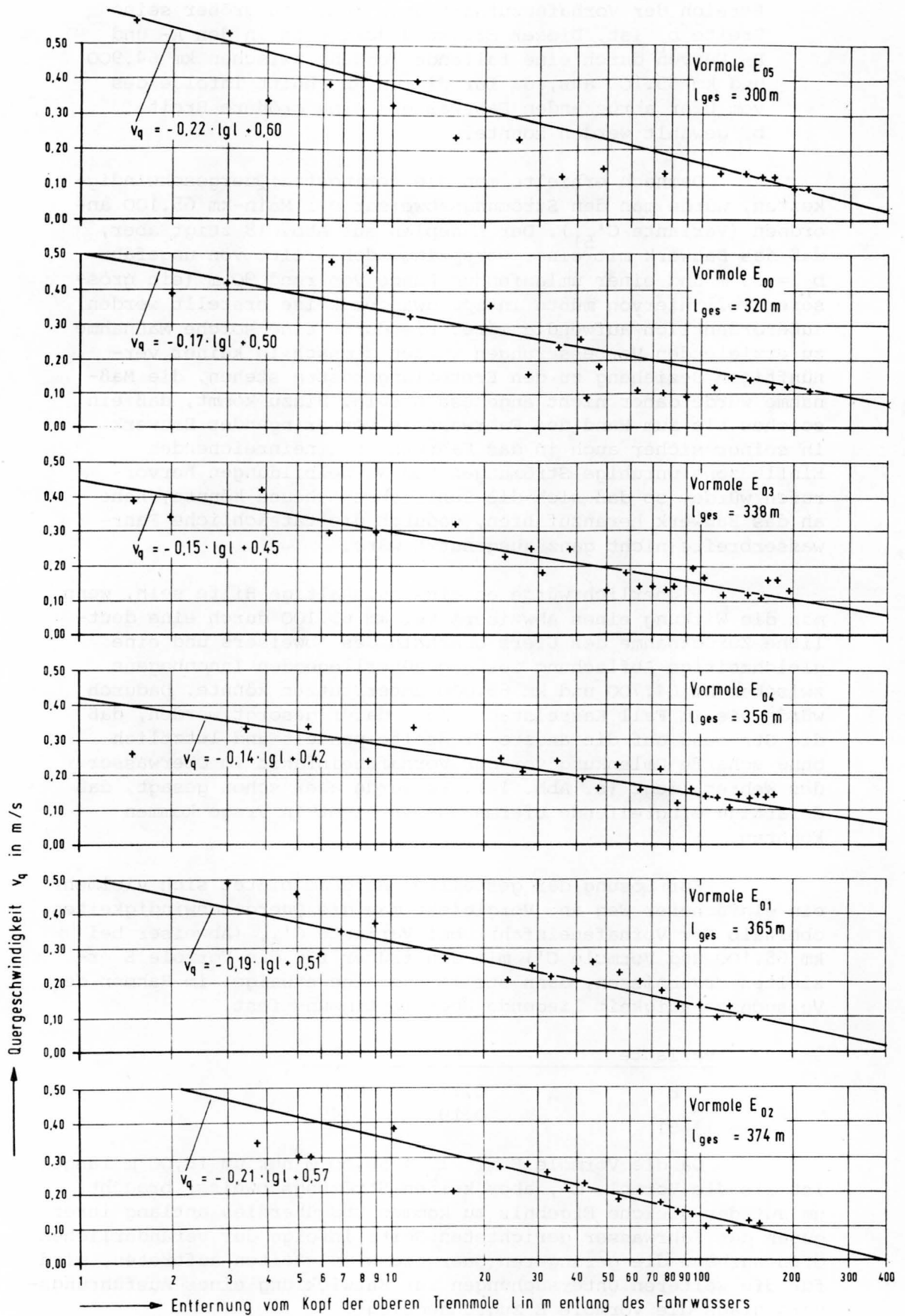


Abb. 20: Quergeschwindigkeiten v_q im Bereich der oberen Vorhafenzufahrt bei verschiedenen Molen bzw. Vormolenlängen für die Vormole E; $Q = 880 \text{ m}^3 / \text{s}$ (bei HSW)

Form E (siehe Abb. 15), ohne die zusätzliche Maßnahme eines Abweisers oder anderer baulicher Schikanen, auf Werte vermindert werden können, die im Bereich der früher genannten Grenzwerte (siehe Abb. 5) liegen. Man hatte auch eine klare Vorstellung von der Länge einer derartigen Trennmole ($l_v = 56,00 \text{ m}$), von der Größe ($A_v = 97,3 \text{ m}^2$) und der Anordnung der Öffnungen (zunehmende Öffnungshöhe). Was nun zu klären war, war die Frage nach der zweckmäßigsten Anordnung dieser durchbrochenen Vormole in Verbindung mit der Vorhafentrennmole ohne Öffnungen, d.h. die Frage nach der Gesamtlänge l_{ges} der Vorhafentrennmole.

Theoretisch waren zwei Randfälle mit allen denkbaren Zwischenlösungen möglich. Auf der einen Seite konnte man die durchbrochene Mole ganz in die für die Liegeplätze erforderlichen Trennmole integrieren, so daß sich eine Gesamtlänge von 300 m ergab. Auf der anderen Seite konnte man sie aber mit unterschiedlicher Länge dieser Trennmole vorsetzen. Als äußerster Grenzfall ist hier eine Gesamtlänge von $l_{\text{ges}} = 374 \text{ m}$ untersucht worden. Der Gesamtlänge der Vorhafentrennmole waren praktisch aber durch die Krümmung des Fahrwassers Grenzen gesetzt, wenn man eine gekrümmte Trennmole oder eine stärkere Abwinkelung derselben weg vom Fahrwasser vermeiden wollte.

Die Auftragung der für verschiedene Gesamtlängen ermittelten Quergeschwindigkeiten gegen die Entfernung vom Kopf der Trennmole (Abb. 20) bringt für sich allein keine neuen Erkenntnisse, wenn man von den qualitativen Hinweisen absieht, die der Vergleich der Einzeldiagramme untereinander geben kann. Nimmt man jedoch wieder eine Auswertung hinsichtlich der Steigung (A-Wert) und des Achsenabschnitts (B-Wert) der einzelnen Ausgleichsgeraden vor und trägt diese A- und B-Werte gegen die untersuchten Gesamtlängen auf, so wird für die betrachtete Vormole E folgendes deutlich (Abb. 21).

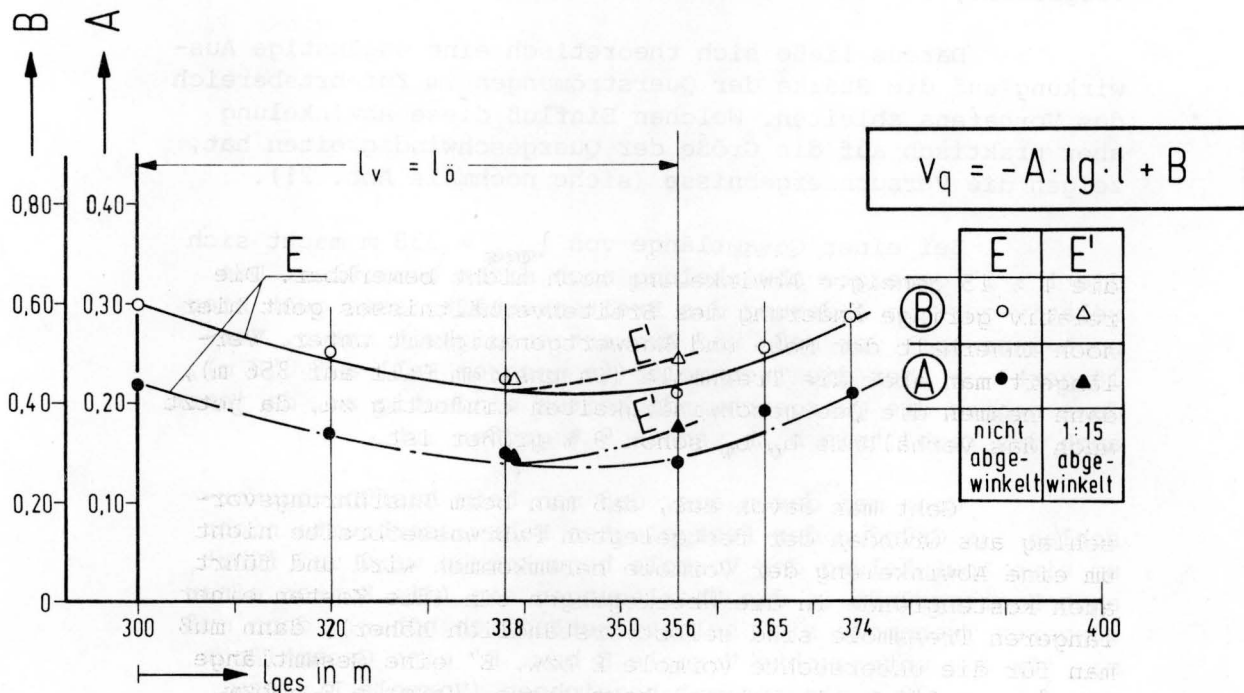


Abb. 21: Abhängigkeit der A- und B-Werte von der Molenlänge für die Vormolen E und E'; $Q = 880 \text{ m}^3/\text{s}$ (bei HSW)

Es existiert ohne Zweifel ein Längenbereich, für den sich im Raum oberhalb der Vorhafenzufahrt die geringsten Quergeschwindigkeiten einstellen. Dieser Bereich kann nach den Versuchsergebnissen auf $l_{ges} = 338$ m bis 356 m abgesteckt werden. Bei kürzeren Gesamtlängen, bei denen die durchbrochene Mole weiter in die $l = 300$ m "Liegeplatzmole" geschoben wird, nehmen die Quergeschwindigkeiten wieder zu, wie die Verhältnisse auch dann ungünstiger werden, wenn man, jetzt in die andere Richtung gehend, eine längere Mole als $l_{ges} = 356$ m wählt. Dieses zuletzt genannte Ergebnis konnte schon bei den Modellversuchen Kesselstadt beobachtet werden /3/. Vermutlich hat diese Abhängigkeit der Quergeschwindigkeit von der Länge der Trennmole bei konstanter Öffnungsfläche A_o in der Lage des Vorhafens am Außenufer der Flußkrümmung ihre Ursache, indem sich bei der Längenänderung verschiedene Winkel zwischen Trennmole, Fahrwasserachse und Strömung ergeben, die im vorher abgegrenzten Bereich am günstigsten kombiniert sind und dadurch das Minimum der Quergeschwindigkeiten bewirken.

Bevor wir nun die Frage nach der optimalen Länge der Trennmole endgültig beantworten, wollen wir noch das Ergebnis einiger Zusatzversuche abwarten, die sich aus folgenden Überlegungen ergeben haben:

Infolge der Fahrwasserkrümmung, die unmittelbar am Kopf der 300 m langen Trennmole einsetzt, ragen längere Trennmolen bzw. Vormolen in das Fahrwasser hinein. Mit der Mole E' wurde daher auch eine Form untersucht, bei der die Vormole in der Neigung 1 : 15 nach außen abgewinkelt worden ist, um gegen den Fahrwasserrand noch einen gewissen Sicherheitsabstand zu wahren. Durch diese Ablenkung wird das Breitenverhältnis b_v/b_w (Vorhafen/Wehrströmung) von bisher 0,57 (s.a. Abschnitt 1) je nach der untersuchten Gesamtlänge der Mole ($l_{ges} = 338$ m und 356 m) auf 0,60 bzw. 0,62 vergrößert, was eine Zunahme von 5 % bzw. 9 % bedeutet.

Daraus ließe sich theoretisch eine ungünstige Auswirkung auf die Stärke der Querströmungen im Zufahrtsbereich des Vorhafens ableiten. Welchen Einfluß diese Abwinkelung aber praktisch auf die Größe der Quergeschwindigkeiten hat, zeigen die Versuchsergebnisse (siehe nochmals Abb. 21).

Bei einer Gesamtlänge von $l_{ges} = 338$ m macht sich die 1 : 15 geneigte Abwinkelung noch nicht bemerkbar. Die relativ geringe Änderung des Breitenverhältnisses geht hier noch innerhalb der Meß- und Auswertgenauigkeit unter. Verlängert man aber die Trennmole (in unserem Fall auf 356 m), dann nehmen die Quergeschwindigkeiten eindeutig zu, da jetzt auch das Verhältnis b_v/b_w schon 9 % größer ist.

Geht man davon aus, daß man beim Ausführungsvorschlag aus Gründen der festgelegten Fahrwasserbreite nicht um eine Abwinkelung der Vormole herumkommen wird und führt auch Kostengründe in die Überlegungen ein (die Kosten einer längeren Trennmole sind selbstverständlich höher), dann muß man für die untersuchte Vormole E bzw. E' eine Gesamtlänge von $l_{ges} = 338$ m als optimal bezeichnen (Vormole E_{03} bzw. E'_{03}).

4.3 Untersuchung des Ausführungsvorschlages

Die bisherigen Untersuchungen haben uns Schritt für Schritt zu einem Ausführungsvorschlag geführt, der durch eine $l_0 = 56,00$ m lange durchbrochene Mole nach Form E (Abb. 15) gekennzeichnet ist, die so in die Vorhafentrennmole eingebunden wird, daß die Gesamtlänge dieser Mole $l_{ges} = 338$ m beträgt. Diese Anordnung haben wir mit E_{O3} bezeichnet. Die durchbrochene Vormole, also jener Molenteil, der über eine Länge von $l = 300$ m hinausgeht, wird in der Neigung $1 : 30$ abgewinkelt, womit ein ausreichender Sicherheitsabstand zum Fahrwasser gewährleistet ist (Abb. 22).

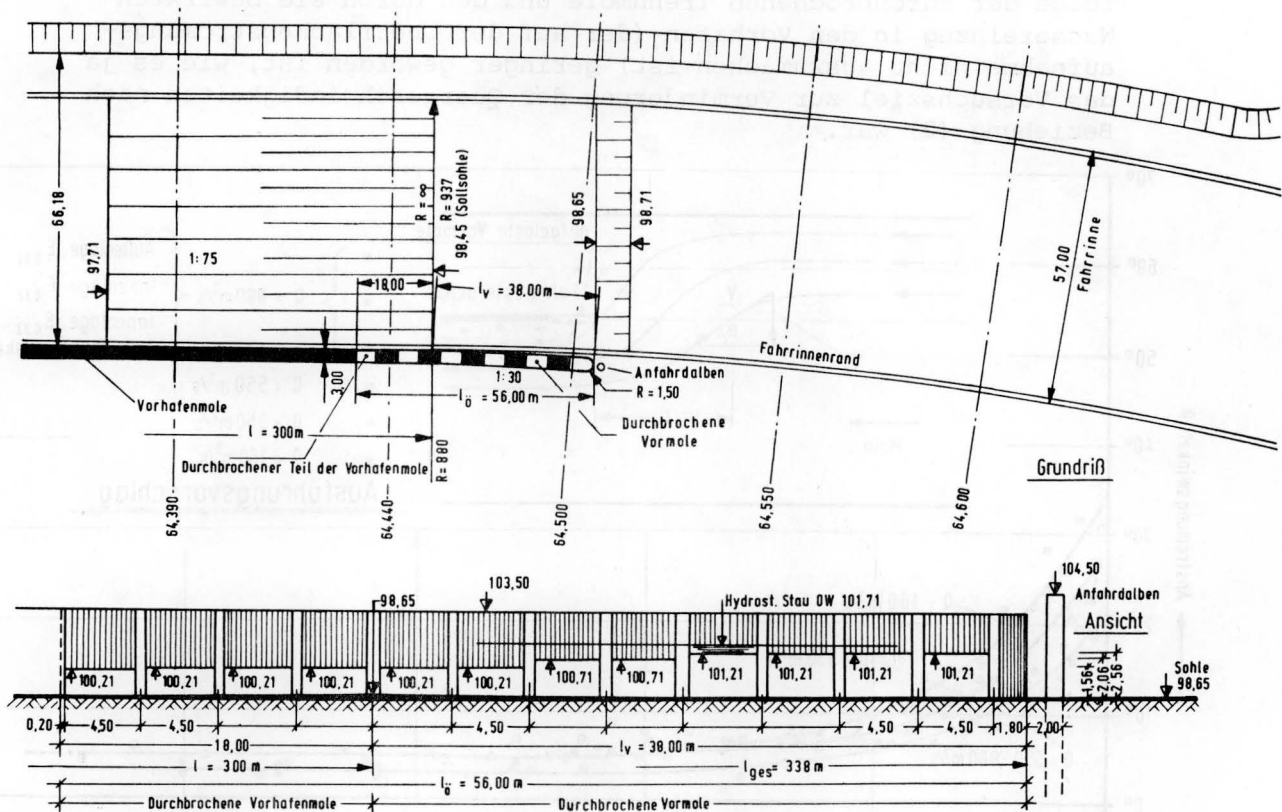


Abb. 22: Ausführungsvorschlag für die durchbrochene Trennmole (Form E_{O3}); Lageplan und Ansicht

Da zum Stand der Modellversuche noch nicht abzusehen war, welche Breite die durchbrochene Mole erhalten wird, sicherlich wird sie schmaler als die 3,0 m breite Vorhafentrennmole werden, wurde diese Frage bei den weiteren Untersuchungen insofern offengehalten, als die durchbrochene Mole zum einen an der Außenseite der Trennmole (Form E_{O31}) und zum anderen an deren Innenseite (Form E_{O32}) bindig, jedoch ohne Abwinkelung angeordnet worden ist. Mit E_{O33} wurde letzten Endes die innen bindig angelegte und $1 : 30$ abgewinkelte Vormole untersucht, wie sie die größten Vorzüge aufweist, da die Schifffahrt keine vorspringenden Ecken vorfinden wird, die selbst in abgerundeter Form hinderlich sein können.

Auch diesmal wollen wir uns - wie schon bei den analogen Untersuchungen für den Ausgangsentwurf - zunächst dem Strömungsverlauf im Oberwasser zuwenden (siehe hierzu nochmals Abb. 6).

Beim Vergleich Ausgangsentwurf - Ausführungsvorschlag, den wir bei der eingehenden Betrachtung des Ausführungsvorschlags jetzt immer führen wollen, erkennen wir mit dem ersten Blick keine grundlegenden Veränderungen im Strömungsverlauf, wenn man davon absieht, daß die Mole jetzt 38 m länger geworden ist und das für die Vorhafeneinfahrt typische Strömungsfeld damit um dieses Maß weiter oberstrom liegt. Allerdings haben wir hier eine Aufnahme der Oberflächenströmung vor uns, die nur verhältnismäßig wenig darüber besagt, in welcher Weise die tiefer liegenden Öffnungen das Strömungsfeld beeinflussen, was besonders für die in der Einfahrt drehende Ablösungswalze gilt. Und trotzdem sehen wir beim längeren Hinschauen, daß die Strombahnen jetzt in bezug zur Fahrwasserachse flacher liegen, der Anströmungswinkel infolge der durchbrochenen Trennmole und den durch sie bewirkten Wassereinzug in den Vorhafen (der auf der Oberflächenströmungsaufnahme nicht auszumachen ist) geringer geworden ist, wie es ja das Versuchsziel zur Verminderung der Quergeschwindigkeiten nach Beziehung (2) war.

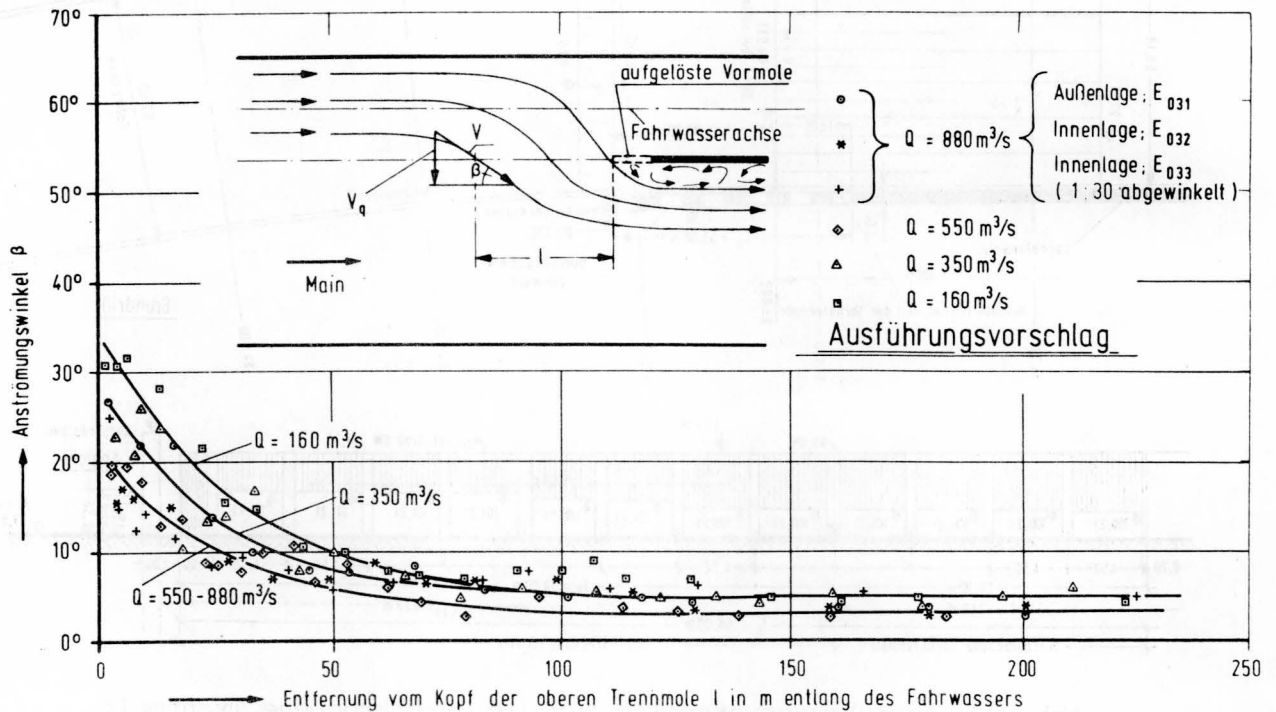


Abb. 23: Anströmungswinkel im Bereich der oberen Vorhafenzufahrt beim Ausführungsvorschlag

Diese Verminderung von β läßt sich anhand der Versuchsergebnisse noch klarer nachweisen (Abb. 23 im Vergleich mit Abb. 8) indem die Kurven $\beta = f(l)$ jetzt deutlich flacher liegen und auch der sogenannte Molenkopfeffekt /3/ /4/ dadurch entschärft ist, daß das Strömungsfeld im Nahbereich der Trennmole und vor allem am Molenkopf wesentlich geringere Anströmungswinkel aufweist. Im Gegensatz zu den Ergebnissen am Ausgangsentwurf, bei dem die Anströmungswinkel von der Größe des Abflusses bzw. vom Wasserstand unabhängig ist, finden wir jetzt durch die tiefliegenden Öffnungen und die unterschiedliche Öffnungshöhe in der durchbrochenen Trennmole bedingt eine klare Abhängigkeit vom Abfluß bzw. vom Wasserstand vor und zwar derart, daß die durchbrochene Mole umso stärker von der Strömung angenommen und infolgedessen der Anströmungswinkel β umso mehr vermindert wird, je höher das Wasser bzw. der Abfluß

ansteigt. Wie sich dies in den Quergeschwindigkeiten im Bereich der Vorhafenzufahrt auswirkt, zeigen die Versuchsergebnisse (Abb. 24).

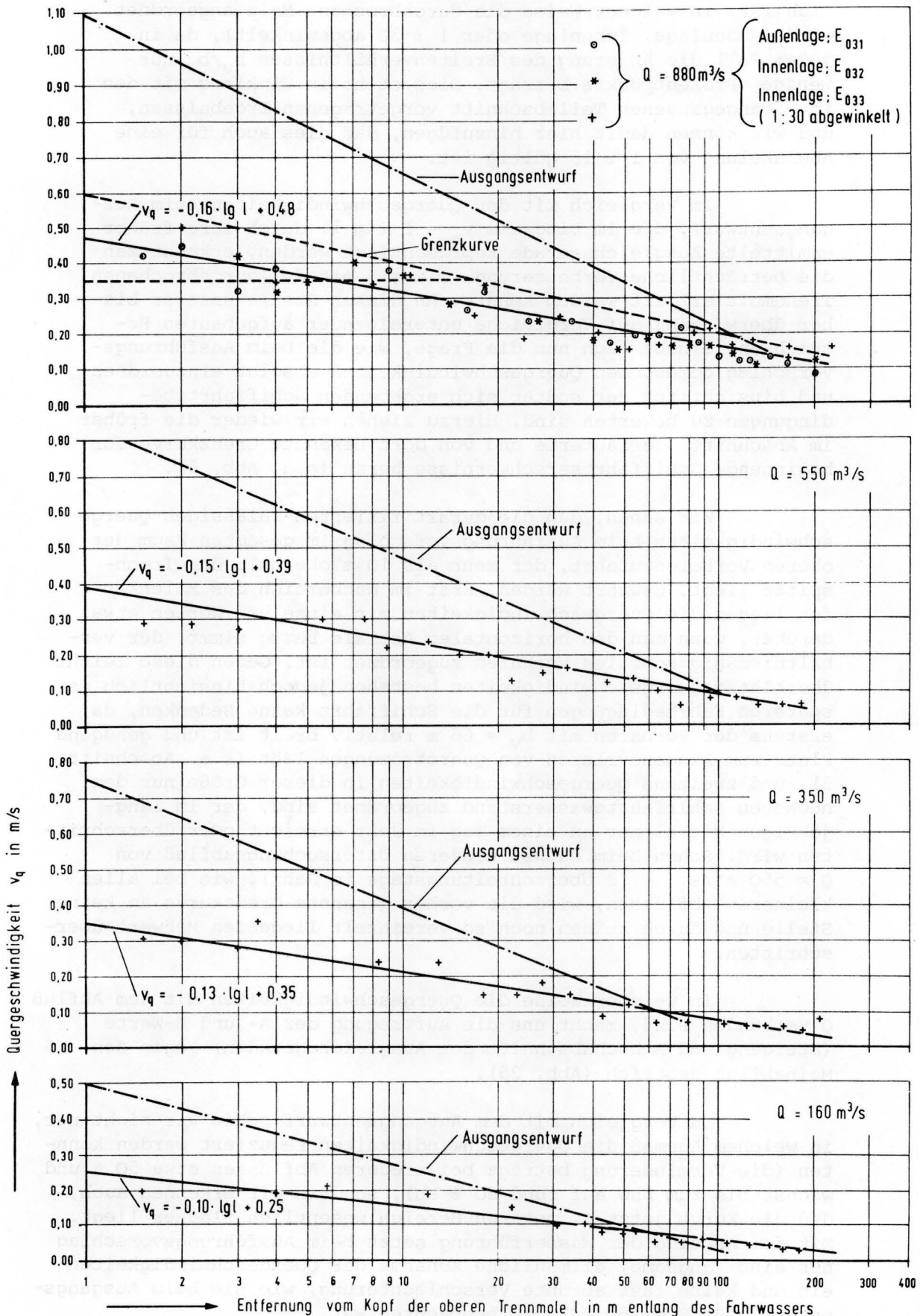


Abb. 24: Quergeschwindigkeiten v_q im Bereich der oberen Vorhafenzufahrt beim Ausführungsvorschlag

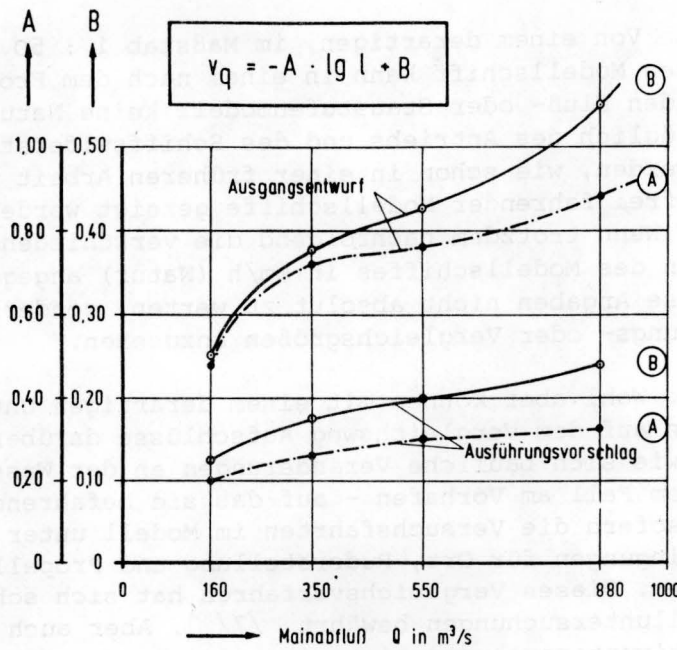
Beginnt man die Betrachtung zunächst mit dem höchsten Schiffahrtswasserstand ($Q = 880 \text{ m}^3/\text{s}$), so haben die bei ihm durchgeführten Untersuchungen ergeben, daß es unerheblich ist, in welcher Weise die durchbrochene Mole angeordnet wird (Außenlage, Innenlage oder $1 : 30$ abgewinkelt), da in jedem Fall die Änderung des Breitenverhältnisses b_v/b_w nur wenige Prozentpunkte beträgt. Dies steht in Einklang mit den im vorangegangenen Teilabschnitt vorgetragenen Ergebnissen, und wir können damit hier hinzufügen, daß dies auch für eine Abwinkelung von $1 : 15$ gültig ist.

Im Vergleich mit den Quergeschwindigkeiten beim Ausgangsentwurf, die im Diagramm $v_q = f(\lg l)$ durch ihre früher ermittelte Ausgleichsgerade repräsentiert werden, erkennt man die beträchtliche Verbesserung, wie sie mit der durchbrochenen Trennmole erzielt werden konnte. An dieser Stelle unserer bisher überwiegend auf Vergleiche untereinander aufgebauten Betrachtung erhebt sich nun die Frage, wie die beim Ausführungsvorschlag gemessenen Quergeschwindigkeiten absolut einzuordnen und hinsichtlich der später sich ergebenden Schiffahrtsbedingungen zu bewerten sind. Hierzu ziehen wir wieder die früher im Abschnitt 3 erläuterte und von dort bekannte Grenzkurve für beginnende Schiffahrtserschwerisse heran (s.a. Abb. 5).

Wir sehen, daß die derart fixierten zulässigen Quergeschwindigkeiten beim Ausführungsvorschlag im gesamten Raum der oberen Vorhafenzufahrt, der mehr als 10 m oberhalb der Trennschleuse liegt, gewahrt werden. Erst im Nahbereich des Molenkopfes liegen die Quergeschwindigkeiten mit einzelnen Werten etwas darüber, wenn man den horizontalen Ast als Bezug nimmt, der verhältnismäßig schmalen Vorhäfen zugeordnet ist. Gegen diese leicht überhöhten Quergeschwindigkeiten bestehen jedoch hinsichtlich der späteren Fahrbedingungen für die Schiffahrt keine Bedenken, da erstens der Vorhafen mit $b_v = 66 \text{ m}$ relativ breit ist und genügend Platz zum Ausmanövrieren von Querströmungen läßt (s.a. Abschnitt 3), und zweitens Quergeschwindigkeiten in dieser Größe nur dem höchsten Schiffahrtswasserstand zugeordnet sind, der im langjährigen Mittel nur an einem Tag im Jahr erreicht oder überschritten wird. Schon beim nächst niederen Untersuchungsabfluß von $Q = 550 \text{ m}^3/\text{s}$ (13 Überschreitungstage im Jahr), wie bei allen kleineren Abflüssen, wird die vorher genannte Grenzkurve an keiner Stelle und durch keinen noch so vereinzelt liegenden Meßwert überschritten.

In welcher Weise die Quergeschwindigkeiten mit dem Abfluß Q verbunden sind, macht uns die Auftragung der A- und B-Werte (Steigung und Achsenabschnitt der Ausgleichsgeraden) gegen den Mainabfluß deutlich (Abb. 25).

Im Vergleich mit dem Ausgangsentwurf sehen wir nicht nur, in welchem Ausmaß die Quergeschwindigkeiten reduziert werden konnten (die Verminderung beträgt bei niederen Abflüssen etwa 50 % und wächst bis zum HSW auf rund 60 % an), sondern wir erkennen auch, daß die Kurve jetzt im unteren Bereich wesentlich flacher liegt. Mit dem Anstieg der Wasserführung setzt beim Ausführungsvorschlag nur eine langsame, allmähliche Zunahme der Quergeschwindigkeiten ein und keine fast abrupte Verschlechterung, wie sie beim Ausgangsentwurf für $Q > 160 \text{ m}^3/\text{s}$ zu beobachten war.



Q in m³/s	A	B
160	0,10	0,25
350	0,13	0,35
550	0,15	0,39
880	0,16	0,48

Abb. 25: Abhängigkeit der A- und B-Werte vom Abfluß Q beim Ausführungsvorschlag

4.4 Fahrten mit einem ferngesteuerten Modellschiff

Von einem anderen zur Zeit laufenden Staustufenmodell stand kurzfristig ein selbstfahrendes, ferngesteuertes Modellschiff im Maßstab 1 : 50 zur Verfügung, das dem Regelselbstfahrertyp "Johann Welker" (auch "Europaschiff" genannt) entspricht und eine Länge von 80,00 m, eine Breite von 9,50 m und eine normale Abladetiefe von 2,50 m aufweist.

Dieses Modellschiff ist so eingerichtet, daß es über einen Kurzwellenempfänger Signale von einem tragbaren Sender empfangen kann und dadurch während der Fahrt die ferngesteuerte Betätigung des Ruders möglich ist. Das Modellschiff hat ferner einen zwischen Energiequelle und den Motor geschalteten, von Hand einstellbaren elektrischen Widerstand. Er ermöglicht innerhalb weiter Grenzen die Einstellung einer bestimmten Drehzahl des Motors und damit auch des auf der gleichen Welle sitzenden Propellers. Auf diese Art kann die Fahrgeschwindigkeit des Modellschiffes reguliert werden, allerdings nur vor Beginn einer jeden Fahrt und nicht ferngesteuert während der Versuchsfahrt. Die Fahrten mit dem beschriebenen Modellschiff können daher nur mit einer konstanten Propellerzahl durchgeführt werden.

Von einem derartigen, im Maßstab 1 : 50 stark verkleinerten Modellschiff kann in einem nach dem Froude-Gesetz arbeitenden Fluß- oder Staustufenmodell keine Naturähnlichkeit bezüglich des Antriebs und des Schiffswiderstandes erwartet werden, wie schon in einer früheren Arbeit über den Einsatz frei fahrender Modellschiffe gezeigt worden ist

/6/. Wenn trotzdem nachfolgend die verschiedenen Geschwindigkeiten des Modellschiffes in km/h (Natur) angegeben werden, sind diese Angaben nicht absolut zu werten, sondern nur als Beurteilungs- oder Vergleichsgrößen anzusehen.

Wohl aber können mit einem derartigen Untersuchungsverfahren auf dem Vergleichsweg Aufschlüsse darüber gewonnen werden, wie sich bauliche Veränderungen an der Wasserstraße - in unserem Fall am Vorhafen - auf das sie befahrende Schiff auswirken, sofern die Versuchsfahrten im Modell unter den gleichen Startbedingungen für Ort, Ruderstellung und Propellerzahl vor sich gehen. Dieses Vergleichsverfahren hat sich schon bei mehreren Modelluntersuchungen bewährt /7/. Aber auch bei derartigen Relativuntersuchungen ist eine gewisse Vorsicht bei der Beurteilung der Versuchsergebnisse angebracht, da die frei gesteuerten Fahrten des Modellschiffes subjektiven Einflüssen des Laboranten unterliegen, der das Ruder über den Sender bedient und dessen Reaktionsschnelligkeit in diese Fahrten einfließt. Diese Einflüsse treten beim Wechsel des "Steuermannes" am Modellschiff besonders deutlich hervor. Dadurch wird trotz der Wahrung gleicher Startbedingungen die Reproduzierbarkeit der Modellfahrten beeinträchtigt. Über diese Schwierigkeit kann nur eine sehr große Zahl von Versuchsfahrten hinweghelfen.

Neben diesen schon vorweg erkennbaren Problemen kam beim speziellen Einsatz des Modellschiffes im Modell Krotzenburg noch der herrschende Krümmungseffekt der Strömung hinzu, der unabhängig von der Ausbildung der Trennmole schon weit oberhalb der Vorhafenzufahrt eine Verdrehung des Schiffes bewirkte und dort schon ausgleichende Reaktionen am Ruder erforderlich machte, um das Schiff im Vorfeld der Vorhafenzufahrt kursgerecht, d.h. parallel zur Schifffahrtsachse aufzustrecken, was nicht immer auf Anhieb gelungen ist.

Die Versuchsfahrten wurden nur für den Fall des talfahrenden Schiffes durchgeführt, der wegen der verminderten Steuerfähigkeit bei der Fahrt mit der Strömung und der Engstelle Vorhafeneinfahrt voraus (Nadelöhreffekt) kritischer als die Bergfahrt ist. Um auf der sicheren Seite zu liegen, wurde bei den einzelnen Versuchsfahrten auch angenommen, daß sich das Schiff in der linken Fahrwasserhälfte und damit näher an der Trennmole im Bereich der stärkeren Querströmung bewegt, was dann eintreten kann, wenn das Schiff bei geschlossener Schleuse an der Trennmole einen Liegeplatz aufsuchen muß. Hierzu wurde auf die Modellsohle eine gestrichelte Hilfsachse (siehe Abb. 26 und 27) gezeichnet, die bei Übereinstimmung mit der Achse des fahrenden Modellschiffes die Einhaltung des geringstmöglichen Sicherheitsabstandes zur Trennmole von $s = 5,0$ m gewährleistet. Die einzelnen Positionen des Modellschiffes wurden durch Fotoaufnahmen mit einem Lichtblitzstroboskop in gewissen, je nach der Geschwindigkeit des Modellschiffes gewählten Zeitabständen festgehalten.

Die Versuche wurden sowohl für den Ausführungsvorschlag als auch für den nochmals eingebauten Ausgangsentwurf durchgeführt; der Umbau der Trennmole ließ sich im Modell verhältnismäßig einfach bewerkstelligen.

Wenn auch beim Ausgangsentwurf sehr hohe Quergeschwindigkeiten gemessen worden sind, mit denen sich nach allen bisherigen Erfahrungen in der Großausführung beträchtliche Schifffahrtserschwerisse ergeben würden, zeigte sich bei den Versuchsfahrten mit dem ferngesteuerten Modellschiff zunächst ein anderes, günstigeres Bild. Nach einigen Übungsfahrten erlangte der "Steuermann" am Sender eine derartige Fertigkeit und Sicherheit beim Navigieren des Modellschiffes, daß er selbst beim HSW das Schiff ohne nennenswerte Schwierigkeiten und einigermaßen gut im Kurs liegend in den Vorhafen einsteuern konnte, wenn er rechtzeitig, d.h. schon weit oberhalb der Vorhafenzufahrt den Kurs des Schiffes gegen die herrschende (und ihm von den Versuchen her gut bekannte) Querströmung richtete. Allerdings waren fortlaufend Korrekturen in der Ruderstellung erforderlich, die es mit sich brachten, daß schon die geringste Unaufmerksamkeit oder Nachlässigkeit in der Ruderbetätigung zu einer starken Verdrehung des Schiffes führten, die in ungünstigen Fällen nicht mehr vor der Einfahrt auszusteuern war und mit einer Kollision am Molenkopf endete. Wie nach der Messung der Quergeschwindigkeiten zu erwarten war, gingen die Versuchsfahrten mit abnehmender Wasserführung immer besser vonstatten; beim Mittelwasser waren keinerlei Erschwerisse mehr erkennbar.

Zu einer ganz anderen und jetzt in Einklang mit den Strömungsmessungen stehenden Beurteilung kam man dann, wenn man einen direkten Vergleich mit den Versuchsfahrten beim Ausführungsvorschlag anstellte. Es zeigte sich bei einer größeren Zahl von Versuchsfahrten, daß die Wahrscheinlichkeit einer Kollision mit dem Molenkopf beim Ausführungsvorschlag geringer ist, da man sich schon das eine oder andere Mal eine kleine Unaufmerksamkeit oder Verzögerung in der Ruderbetätigung leisten konnte, ohne gleich schwerwiegende, zu Kursabweichungen führende Verdrehungen des Schiffes zu erhalten.

Neben diesem wohl mehr subjektiv zu wertenden Ergebnis war objektiv, d.h. meßbar festzustellen, daß das Modellschiff beim Ausführungsvorschlag viel näher an der Trennmole fahren konnte als beim Ausgangsentwurf, bei dem es praktisch nicht möglich war, den Kurs entlang der früher erläuterten gestrichelten Linie zu nehmen, es sei denn, man hätte sehr große Schiffsgeschwindigkeiten gewählt (Abb. 26).

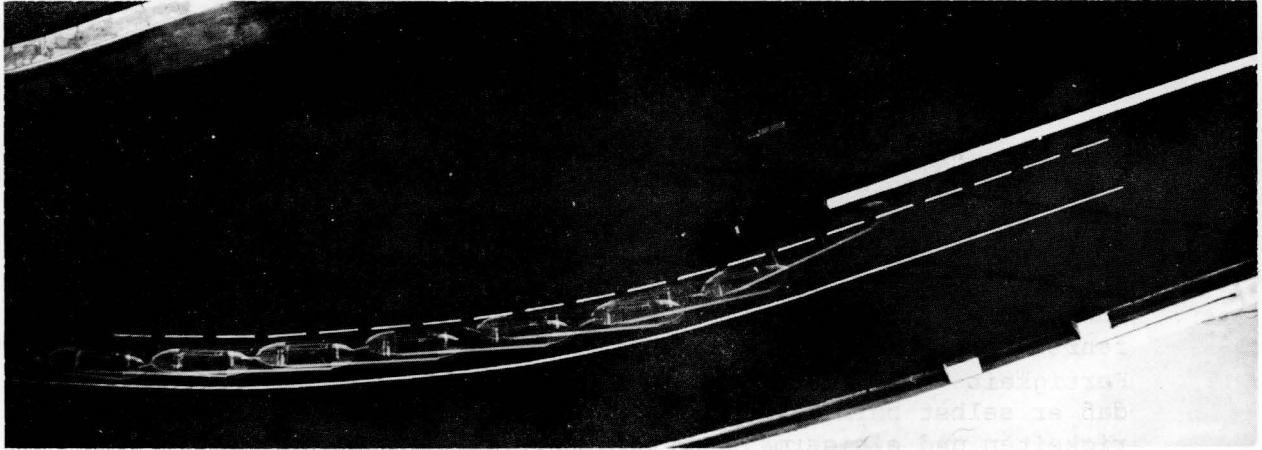


Abb. 26: Intermittierende Lichtbildaufnahme von der Talfahrt des Modellschiffes in den Vorhafen beim Ausgangs-entwurf

Im Bild ist deutlich zu erkennen, wie das Modellschiff schon weit oberhalb der Vorhafeneinfahrt gegen die Querströmung, d.h. mit dem Bug gegen das Ufer, gehalten wurde.

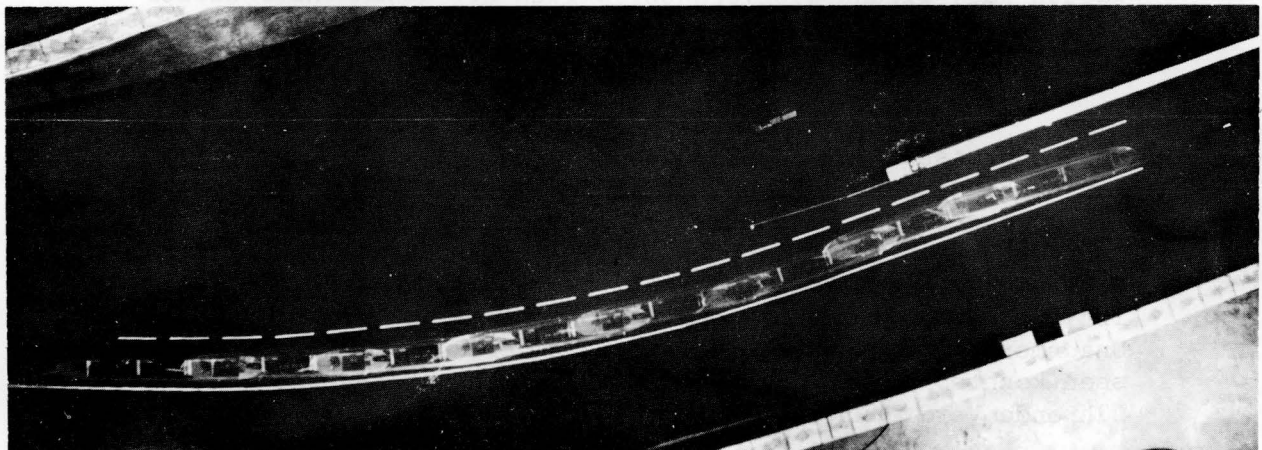


Abb. 27: Intermittierende Lichtbildaufnahme von der Talfahrt des Modellschiffes in den Vorhafen beim Ausführungsvorschlag

Dagegen sehen wir auf der nächsten intermittierenden Lichtbildaufnahme des fahrenden Modellschiffes (Abb. 27), daß sich das Schiff beim Ausführungsvorschlag verhältnismäßig leicht im Kurs links der Fahrwasserachse halten ließ; erst im Innern des Vorhafens war eine schwache Wirkung der gegen die durchbrochene Mole gerichteten Strömung erkennbar, die aber leicht ausgesteuert werden konnte.

Ein zweites Meßergebnis erlangt beim Vergleich Ausgangsentwurf - Ausführungsvorschlag eine noch größere Bedeutung. Unabhängig von der Gestaltung der Trennmole mußte das Modellschiff eine gewisse Mindestgeschwindigkeit haben, um die in jedem Fall wirkenden Querströmungen zu überwinden und ohne Kollision mit der Trennmole in den Vorhafen zu gelangen. Diese erforderlichen Mindestgeschwindigkeiten des Modellschiffes waren meßbar, indem man eine größere Zahl von Versuchsfahrten mit jeweils veränderter Schiffsgeschwindigkeit durchführte und die Grenzggeschwindigkeiten der beginnenden Kollision festhielt (Abb. 28).

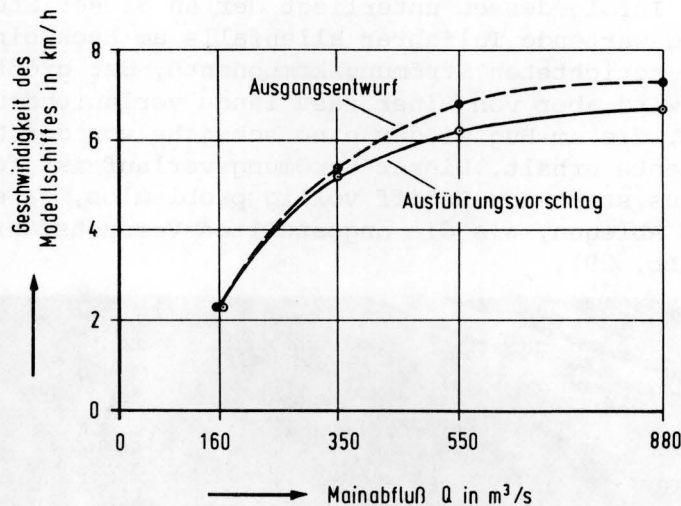


Abb. 28: Erforderliche Mindestgeschwindigkeiten des Modellschiffes bei der Vorhafenzufahrt in Abhängigkeit vom Abfluß

Vergleicht man nun die für den Ausgangsentwurf und für den Ausführungsvorschlag gemessenen Mindestgeschwindigkeiten (sie dürfen nach den früher angestellten Überlegungen zur Ähnlichkeit des frei fahrenden Modellschiffes quantitativ nicht auf die Bedingungen in der Natur übertragen werden, sondern nur als Vergleichs- bzw. Beurteilungszahlen dienen), so stellt man einen Unterschied zugunsten des Ausführungsvorschlages fest; die durch die durchbrochene Trennmole bewirkte Verminderung der Querströmung führt zu einer Herabsetzung dieser Mindestgeschwindigkeit. Oder anders ausgedrückt: Beim ungünstigeren Ausgangsentwurf braucht das Schiff eine größere Geschwindigkeit, um die kräftigeren Querströmungen oberhalb der Einfahrt ohne schwerwiegende Kursabweichungen durchfahren zu können. Es verdient auch erwähnt zu werden, daß sich deutliche Unterschiede in der erforderlichen Mindestgeschwindigkeit erst bei größeren Abflüssen ($Q > 350 \text{ m}^3/\text{s}$) ergaben.

Im letzten Teil der Untersuchungen mit dem ferngesteuerten Modellschiff ging es um die Frage, inwieweit die gegen die durchbrochene Trennmole gerichtete Strömung das Ablegen der an der Trennmole festgemachten Schiffe erschwert, wobei nochmals daran erinnert werden soll, daß bei einer im Planungsentwurf ausgewiesenen Liegeplatzlänge von 300m nur ein 18,00 m langer Molenabschnitt Öffnungen aufweist.

Bevor wir nun auf das Ergebnis dieser Ablegeversuche mit dem Modellschiff eingehen, rufen wir uns nochmals den schon früher beschriebenen Strömungsverlauf in Erinnerung zurück, nach dem in der Einfahrt eine im Uhrzeigersinn drehende Ablösungswalze liegt, in der die gegen die Trennmole gerichteten Strömungskomponenten vom Kopf der durchbrochenen Trennmole zum Vorhafeninnern immer geringer werden, teilweise null sind (reine Längsströmung) und sich am Ende der durchbrochenen Mole sogar in Richtung Fahrwasser umkehren. Gerade in diesem Bereich enden die Liegeplätze.

Infolgedessen unterliegt der an dieser Stelle auf eine Schleusung wartende Talfahrer allenfalls am Heck einer gegen die Trennmole gerichteten Strömungskomponente, der größte Teil des Schiffes wird aber von einer fast längs verlaufenden Strömung beansprucht, die am Bug wieder eine schwache von der Mole weg weisende Komponente erhält. Dieser Strömungsverlauf ist für das vom Liegeplatz aus startende Schiff völlig problemlos, ja er begünstigt sogar das Ablegen, wie die angestellten Versuchsfahrten zeigen können (Abb. 29).

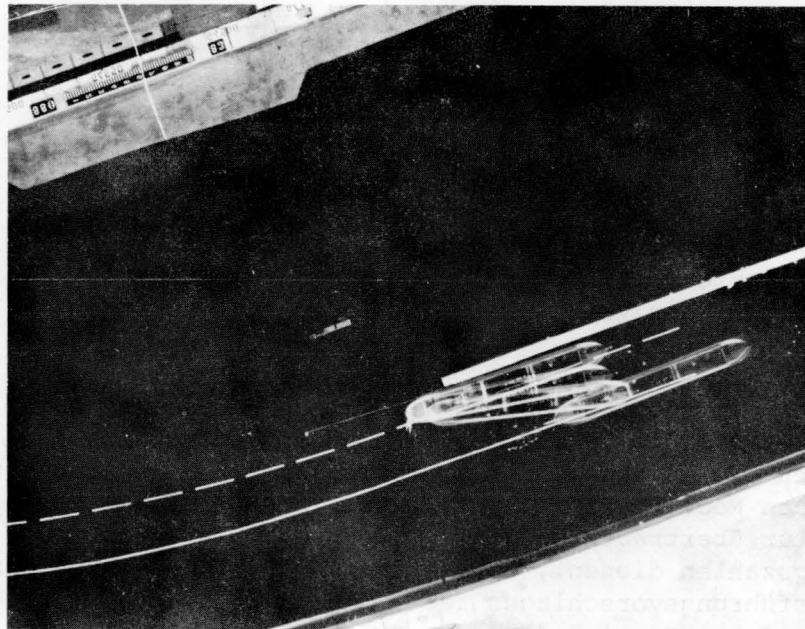


Abb. 29: Intermittierende Lichtbildaufnahme des von der Trennmole ablegenden Modellschiffes

Die mit gleichen Zeitintervallen vorgenommene Serienaufnahme zeigt, wie das an der Mole liegende Schiff (Pos. 1) verhältnismäßig schnell mit dem Bug freikommt (Pos. 2), sich schräg auf ganzer Länge von der Mole lösen kann (Pos. 3) und auf den Kurs in Richtung Schleuse kommt (Pos. 4), obwohl im Modell mit dem höchsten Schifffahrtswasserstand ($Q = 880 \text{ m}^3/\text{s}$) die ungünstigsten Bedingungen mit der stärksten Zuströmung zur durchbrochenen Mole gegeben waren.

5. Zusammenfassung

Der obere Vorhafen Krotzenburg liegt wenig stromab vom Ende einer langgezogenen Flußkrümmung an deren Außenseite, was abgesehen von den nautischen Vorzügen einer solchen Außenlage (Sicht, Wassertiefe) strömungstechnisch den Nachteil hat, daß die Quergeschwindigkeiten im Bereich der Vorhafenzufahrt infolge des Krümmungseffektes besonders groß sind und Schifffahrtsschwernisse mit sich bringen können.

Nach dem Ergebnis der im Maßstab 1 : 50 durchgeführten Modellversuche mußten bauliche Maßnahmen zur Verminderung der Querströmungen ergriffen werden. Aus Gründen der ufernahen Bebauung, des Landschaftsschutzes und der Erhaltung vorhandener Deckwerke sollte nach Möglichkeit von einer großräumigen Änderung der Uferführung im Oberwasser Abstand genommen werden, sondern auf bekannte und bewährte Maßnahmen wie Strömungsabweiser und/oder durchbrochene Trennmole zurückgegriffen werden.

In systematisch angelegten Versuchsreihen wurde der Einfluß der Öffnungsfläche einer durchbrochenen Trennmole, der Molen- bzw. Vormolenlänge und der Lage des Strömungsabweisers auf die Größe der Quergeschwindigkeiten im Fahrwasser oberhalb der Trennschärpe auf einer breiten, teils sogar allgemein gültigen Basis verfolgt.

Demnach nehmen die Quergeschwindigkeiten im Bereich der Vorhafenzufahrt mit anwachsendem Querschnitt der Durchflußöffnungen in der Trennmole ab, wobei deren Form und das Maß ihrer Überdeckung durch den Wasserspiegel keinen meßbaren Einfluß haben. Hinsichtlich der Gesamtlänge der Trennmole bei konstanter Öffnungsfläche existiert ein Längenbereich, innerhalb dessen sich die geringsten Quergeschwindigkeiten ergeben. Bedingt durch die Lage des Vorhafens am Ende der Flußkrümmung und durch die gekrümmte Fahrwasserführung werden die Strömungsverhältnisse sowohl mit der Verkürzung der Trennmole als auch mit deren Verlängerung wieder ungünstiger. Die Flußkrümmung spielt auch bei der günstigsten Lage des Strömungsabweisers hinsichtlich der Querströmung eine Rolle. Hier kommen aber noch dessen vorspringende Breite und dessen Entfernung von der Vorhafeneinfahrt als wichtige Einflußgrößen hinzu, die bei der Lageveränderung des Abweisers mit wechselndem Gewicht auf die Strömungsvorgänge oberhalb der Vorhafenzufahrt einwirken, so daß im Untersuchungsbereich ein ausgeprägtes (ungünstiges) Maximum und zwei deutliche (günstige) Minima der Quergeschwindigkeiten zu erkennen sind.

Aufgrund dieser Ergebnisse konnten zwei Alternativlösungen herausgearbeitet werden, bei denen sich etwa übereinstimmende und alles in allem auch beim HSW ausreichend geringe Quergeschwindigkeiten ergaben.

Variante C' ₅₁: Kombination einer 38,00 m langen durchbrochenen Trennmole Form C' (Abb. 13) mit einem Strömungsabweiser bei Main-km 65.100; Gesamtlänge der Trennmole 320 m (Abb. 18).

Variante E₀₃: Anordnung einer 56,00 m langen durchbrochenen Trennmole ohne Abweiser; Gesamtlänge der Trennmole 338 m (Abb. 22)

Da die zuerst genannte Lösung C'₅₁ infolge des bis zum Fahrwasserrand reichenden Abweisers baulich aufwendiger als die Lösung E₀₃ wäre, der mächtige Abweiser sich auch in der notwendigen Spundwandausführung wohl schlecht in das Bild der Flußlandschaft einpassen ließe und sicherlich auch örtliche Störungen der Strömung im Fahrwasser bewirken würde, wurde die Variante E₀₃ als Ausführungsvorschlag gewählt.

Eingehende Untersuchungen an diesem Ausführungsvorschlag (Abb. 24) haben ergeben, daß die Verminderung der Quergeschwindigkeiten gegenüber dem Ausgangsentwurf bei kleinen Wasserführungen etwa 50 % beträgt und bis zum Abfluß beim HSW sogar auf rund 60 % anwächst. Die durch die Strömungsverhältnisse beim Ausführungsvorschlag gegebenen Fahrbedingungen für die Schifffahrt können für einen weiten Abflußbereich (bis $Q = 550 \text{ m}^3/\text{s}$) mit gut und für den Abfluß bei HSW ($Q = 880 \text{ m}^3/\text{s}$) mit ausreichend bewertet werden. Der zuletzt genannte Abfluß wird im langjährigen Mittel nur an einem Tag im Jahr erreicht oder überschritten. Diese sich auf die späteren Schifffahrtsbedingungen beziehende Aussage konnte sowohl durch bekannte Grenzwerte für die zulässigen Quergeschwindigkeiten als auch durch Versuchsfahrten mit einem ferngesteuerten Modellschiff abgesichert werden.

Nach den Versuchsergebnissen ist es unerheblich, in welcher Weise die schmälere durchbrochene Mole an die breitere Vorhafentrennmole angeschlossen wird (innen oder außen bindig) und auch die geplante Abwinkelung von 1 : 30 schlägt sich nicht in der Größe der gemessenen Quergeschwindigkeiten nieder, da in jedem dieser Fälle die Änderung des Vorhafenbreitenverhältnisses b_v/b_w nur wenige Prozentpunkte beträgt. Für die Schifffahrt dürfte der Innenanschluß vorteilhafter sein, da eine vorspringende Ecke am Fahrwasserrand vermieden wird.

6. Literatur

- /1/ BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU : Modelluntersuchungen W 315 für die neue Mainstaustufe Kesselstadt. Teilmittgutachten 1 bis 6 vom Okt. 1973 bis Mai 1975 (unveröffentlicht)
- /2/ DIETZ, J. W. : Modelluntersuchung der Schleusenvorhöfen an der Rheinstaustufe Iffezheim. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 21 (1973) H. 35, S. 90 - 121
- /3/ DIETZ, J.W. und PULINA, B. : Verminderung der Querströmungen in den Zufahrten von Schleusenvorhöfen. Zeitschrift für Binnenschifffahrt und Wasserstraßen 102 (1975) H. 5, S. 147 - 159

- /4/ DIETZ, J.W. und PULINA, B. : Zur Problematik der Querströmungen in Vorhafenzufahrten und ihre Untersuchung im Modell. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 24 (1976) H. 40, S. 49 - 70
- /5/ EUJEN, D. M. : Der Ausbau der Bundeswasserstraße Main oberhalb Offenbach. Zeitschrift für Binnenschifffahrt und Wasserstraßen 104 (1977) H. 6., S. 288 - 291
- /6/ FELKEL, K. : Der Einsatz frei fahrender Modellschiffe beim flußbaulichen Versuch. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 10 (1962) H. 18, S. 3 - 17
- /7/ FELKEL, K. : Modellversuche für den Ausbau der Binger-Loch-Strecke des Rheins mit nur einer Schifffahrtsrinne. Wasserwirtschaft 64 (1974) H. 2, S. 49 - 55
- /8/ GÖTZ, W. : Sekundärströmungen in aufeinander folgenden Gerinnekrümmungen. Mitt. a. d. Theodor-Rehbock-Flußbaulaboratorium d. Universität Karlsruhe, Heft 163 (1975)
- /9/ JAMBOR, F. : Lage und Gestaltung der Schleusen und ihrer Zufahrten. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 8 (1960) H. 15, S. 3 - 13
- /10/ MECKEL, H. und VENG HEANG CHHUN : Einfluß der Sohlausbildung auf die Strömungsverhältnisse in Gerinnebögen. Leitmotiv Wasser. Festschrift a. d. Theodor-Rehbock-Flußbaulaboratorium d. Universität Karlsruhe (1975) S. 243 - 257

BELASTUNGEN DER BÖSCHUNGEN DES NORD-OSTSEE-KANALS
DURCH SCHIFFSVERKEHR

- ERGEBNISSE VON NATURMESSUNGEN -

The loading of the slopes of the Nord-Ostsee-Kanal (Kiel-Canal)
by passing ships

- results of measurements in nature -

Zusammenfassung

Am Nord-Ostsee-Kanal, der seit 1965 verbreitert wird, wurden von 1975 bis 1977 die bei Schiffsverkehr im Bereich der Kanalböschungen entstehenden Belastungen wie Absenk, Rückströmung und Wellen in ausgewählten Querschnitten gemessen. Die Ergebnisse werden mit früher durchgeführten Modellversuchen und mit theoretischen Ansätzen verglichen, um daraus für die Bemessung von Ufersicherungen wirklichkeitsgetreue Belastungsansätze aufzustellen.

Summary

At the Nord-Ostsee-Kanal (Kiel - Canal) which has been enlarged since 1965 the loading of the canal slopes like drawdown, return flow und waves were measured from 1975 to 1977. The results are compared with former model tests and with theoretical investigations to get actual types of loading for proportioning bank protections.

I N H A L T

	Seite
1. Vorgang	46
1.1 Ziel der Untersuchung	46
1.2 Durchführung	47
2. Dauermessungen (1. Meßreihe)	47
2.1 Meßanlage	48
2.2 Aufzeichnungen	48
2.3 Auswertung	49
2.4 Ergebnisse	50
2.4.1 Absenk z	50
2.4.2 Wellen H'	52
3. Einzelmessungen (2. Meßreihe)	53
3.1 Meßanlage	53
3.2 Durchführung	55
3.3 Auswertung	56
3.4 Ergebnisse	56
3.4.1 Einzelergebnisse	57
3.4.2 Rangfolge	59
3.4.3 Häufigkeitsverteilung von z	59
3.4.4 Rückstromgeschwindigkeiten	60
3.4.5 Wellen	60
4. Korrelation beider Meßreihen	62
4.1 Vorgehen	62
4.2 Ergebnisse	63

	Seite
5. Vergleichsuntersuchungen	66
5.1 Schiffstypen	67
5.2 Modellversuche der SOGREAH	67
5.2.1 Kanalquerschnitte	68
5.2.2 Rückströmung	69
5.2.2.1 Zeitlicher Verlauf	
5.2.2.2 Größtwerte	
5.2.3 Schädlicher Schiffsverkehr	73
5.2.4 Abbau der Belastung	73
5.3 Theoretische Ansätze	74
5.3.1 Rückströmung	74
5.3.1.1 Mittige Fahrt	
5.3.1.2 Außermittige Fahrt	
5.3.1.3 Größtwerte	
5.3.2 Wellen	80
5.3.2.1 Mittige Fahrt	
5.3.2.2 Außermittige Fahrt	
5.3.2.3 Größtwerte	
6. Folgerungen	83
6.1 Unterwasserböschungen	83
6.2 Ufersicherungen	84
6.2.1 Vorhandene Ausbildung	84
6.2.2 Verbesserte Ausbildung	86
7. Begriffe / Bezeichnungen	87
8. Literatur	89

1. Veranlassung

Der Nord-Ostsee-Kanal (NOK) wird seit 1965 im Rahmen eines umfangreichen Sicherungsprogramms ausgebaut, indem das Profil unter Beibehaltung der Wassertiefe von 11 m im Wasserspiegel von bisher 102,5 m auf 162 m und an der Sohle von 44 m auf 90 m verbreitert wird. Die Erosion der unbefestigten Unterwasserböschung infolge Schiffsverkehr soll dadurch auf ein wirtschaftlich vertretbares Maß gemindert werden. /2/ /12/.

Die Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord erteilte der BAW den Auftrag zur Ermittlung der für die Bemessung von Ufersicherungen am Nord-Ostsee-Kanal maßgebenden Belastungen. Gleichzeitig sollten Rückschlüsse auf die durch den Ausbau der Kanalprofile tatsächlich erreichten Belastungsminimierungen gewonnen werden, wobei Vergleiche zu den 1964/66 durchgeführten Natur- und Modelluntersuchungen zu ziehen waren.

1.1 Ziel der Untersuchung

Ziel der Untersuchung war die Bestimmung der durch Schiffsverkehr in unmittelbarer Nähe der Kanalböschung verursachten Belastungen sowie deren Ereignishäufigkeit, die für die Bemessung von Ufersicherungen maßgebend sind:

1. Bereich und Größe der vom Schiffsverkehr verursachten Belastungen von Rückströmung, Absenk und Wellen,
2. Abhängigkeit zwischen Belastung und verursachender Schiffsbewegung,
3. Wahrscheinlichkeit und Ereignishäufigkeit der Belastungen.

Die Untersuchungen erstreckten sich im wesentlichen auf ein altes und ein ausgebautes Profil, so daß aus den Ergebnissen Aussagen über die durch den Ausbau des Kanalprofils tatsächlich erreichte Verringerung der Belastung des Kanalbetts und ein Vergleich mit den dem Ausbau des Nord-Ostsee-Kanals zugrunde liegenden Natur- und Modelluntersuchungen zu erhalten war.

Die Messungen wurden in 2 Schritten durchgeführt. Im 1. Schritt wurden in einem alten und in einem neuen Profil in Form von Dauermessungen die bei Schiffsvorbeifahrt entstehenden Absenkwerte in Ufernähe ermittelt, die für beide Profile charakteristische Belastungshäufigkeiten ergaben.

Im 2. Schritt wurden in den gleichen Profilen ausführliche Messungen innerhalb eines kurzen Zeitraums durchgeführt, die Größe und Verlauf der Strömungsverhältnisse ergaben. Aus den Ergebnissen beider Meßreihen konnten dann für beide Profile charakteristische Belastungsspektren aufgestellt werden, aus denen für das jeweilige Profil Größe und Ereignishäufigkeit der Belastung abzuleiten sind.

Die Ergebnisse der Naturmessungen wurden dann mit denen der früher durchgeführten Natur- und Modelluntersuchungen sowie mit neueren theoretischen Ansätzen in Beziehung gesetzt, um einerseits die Ergebnisse zu überprüfen und andererseits daraus Richtwerte für die Bemessung von Uferdeckwerken am Nord-Ostsee-Kanal abzuleiten.

1.2 Durchführung

Vom Auftraggeber wurden für die Untersuchungen die in Abb. 1 angegebenen Profile als repräsentativ ausgewählt, wobei außer der Profilform die für den Betrieb der Meßanlagen erforderliche Stromversorgung zu beachten war:

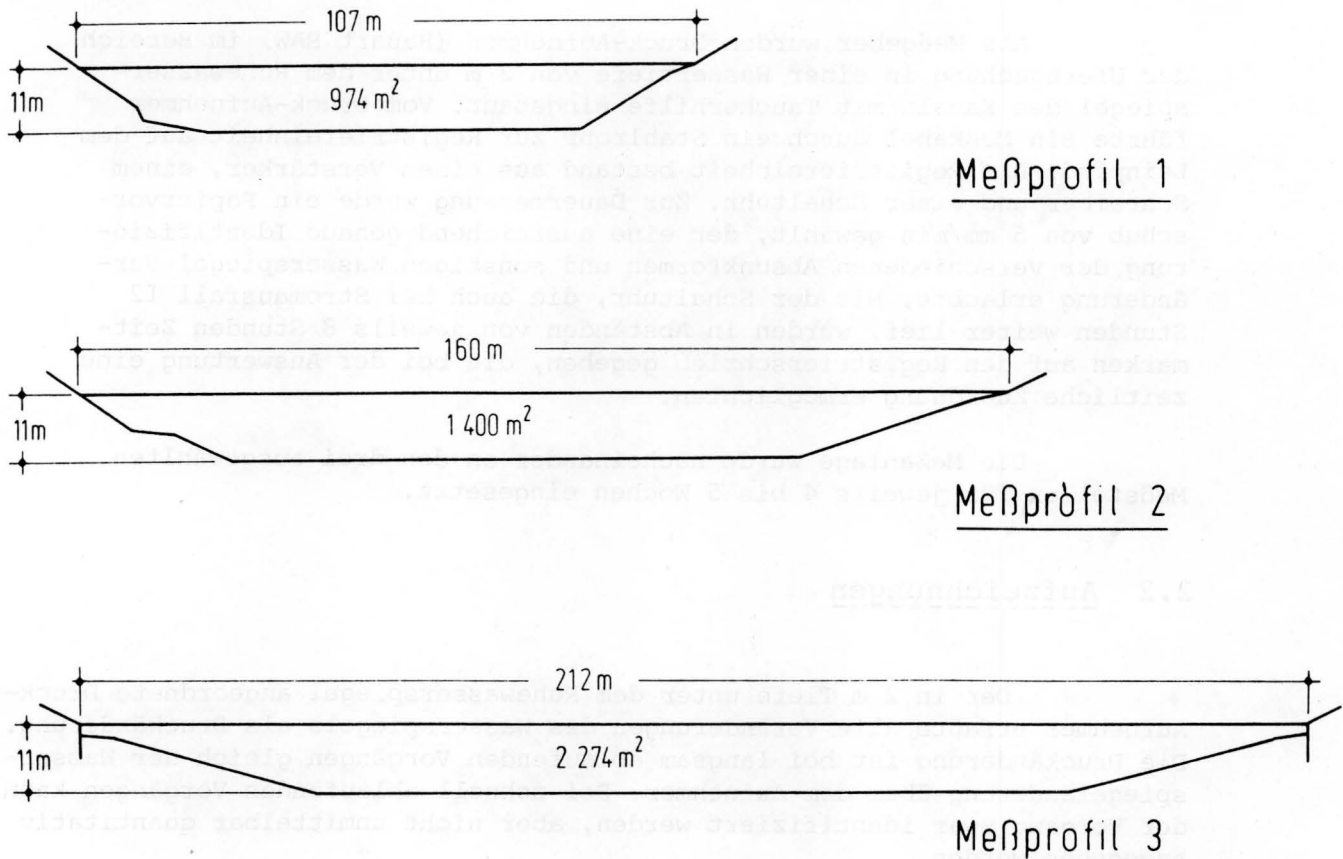


Abb. 1: Meßprofile der Naturmessungen

Die Messungen der 1. und 2. Meßreihe wurden vom Winter 1975/76 bis Winter 1976/77 mit Unterstützung des Auftraggebers durchgeführt. Sie bilden außerdem die Grundlage für das bei Rendsburg begonnene Meßprogramm zur Erfassung von Belastungen und Reaktionen neuartiger Uferdeckwerke in hängender Bauweise.

2. Dauermessungen (1. Meßreihe)

In der 1. Meßreihe wurden in Dauermessungen die im Bereich der Kanalböschungen unter Einbeziehung aller Zufälligkeiten und seltenen, aber für die Belastung üblichen Ereignisse erfaßt. Der bei Schiffsvorbeifahrt in Ufernähe gemessene Absunk z wird hierbei als repräsentatives Maß für die Intensität der durch Rückströmung entstehenden Belastung der Unterwasser-Böschung angesehen, sofern von lokalen Belastungskonzentrationen bei extrem außermittiger Fahrt und von Begegnungen abgesehen wird. Der Absunk kann mit verhältnismäßig geringem Aufwand auch über längere Zeit gemessen und registriert werden, wobei zunächst eine direkte Zuordnung von Absunk und verursachender Schiffsbewegung als Einzelereignisse im Rahmen der 1. Meßreihe nicht angestrebt wurde.

2.1 Meßanlage

Die Meßanlage ist so konzipiert und aufgebaut worden, daß Dauermessungen im Winter 1975/76 über einen Zeitraum von 4 bis 5 Monaten mit möglichst geringem Aufwand durchgeführt werden konnten. Um repräsentative Meßergebnisse zu erhalten, durfte die Schifffahrt weder vom Einbau noch vom Betrieb der Meßanlagen Kenntnis erhalten.

Als Meßgeber wurden Druck-Aufnehmer (Bauart BAW) im Bereich der Uferböschung in einer Wassertiefe von 2 m unter dem Ruhewasserspiegel des Kanals mit Taucherhilfe eingebaut. Vom Druck-Aufnehmer führte ein Meßkabel durch ein Stahlrohr zur Registriereinheit auf dem Leinpfad. Die Registriereinheit bestand aus einem Verstärker, einem Schreiber und einer Schaltuhr. Zur Dauermessung wurde ein Papiervorschub von 5 mm/min gewählt, der eine ausreichend genaue Identifizierung der verschiedenen Absinkformen und sonstigen Wasserspiegel-Veränderung erlaubte. Mit der Schaltuhr, die auch bei Stromausfall 12 Stunden weiter lief, wurden in Abständen von jeweils 8 Stunden Zeitmarken auf den Registrierschrieb gegeben, die bei der Auswertung eine zeitliche Zuordnung ermöglichten.

Die Meßanlage wurde nacheinander an den drei ausgewählten Meßstellen für jeweils 4 bis 5 Wochen eingesetzt.

2.2 Aufzeichnungen

Der in 2 m Tiefe unter dem Ruhewasserspiegel angeordnete Druck-Aufnehmer erfaßte alle Veränderungen des Wasserspiegels als Druckänderung. Die Druckänderung ist bei langsam ablaufenden Vorgängen gleich der Wasserspiegeländerung über dem Aufnehmer. Bei schnell ablaufenden Vorgängen kann der Vorgang zwar identifiziert werden, aber nicht unmittelbar quantitativ angegeben werden.

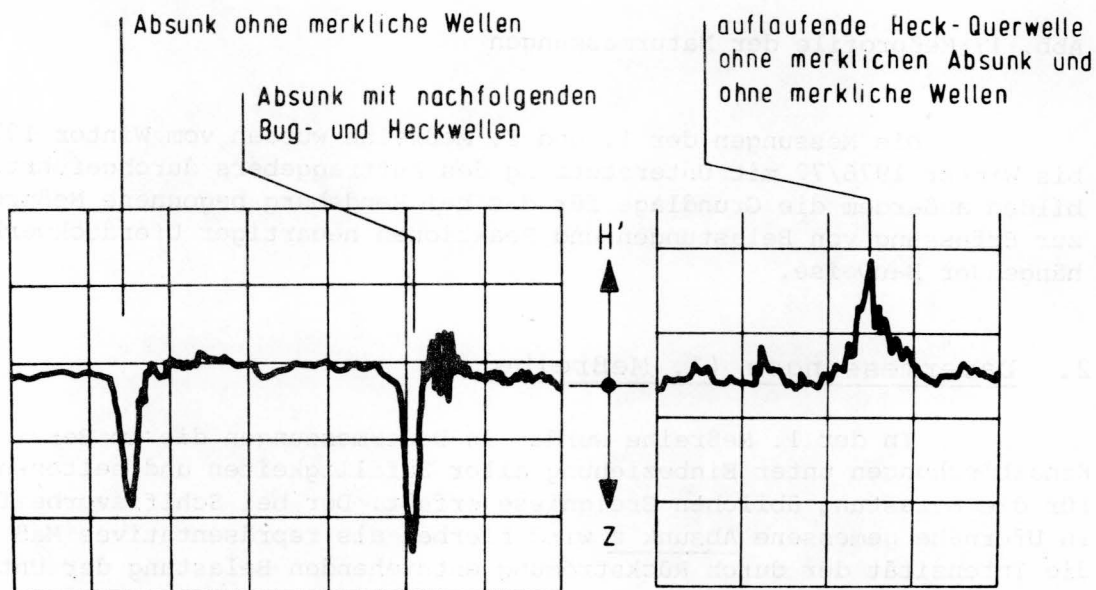


Abb. 2: Ausschnitt aus Meßschrieb

Die Abb. 2 zeigt die bei Schiffsvorbeifahrt charakteristischen Meßsignale: den ausgeprägten Absink mit nachfolgender Heckquerwelle sowie Oberflächenwellen mit geringer Periodendauer. Als Absinkwerte gelten dabei

die Wasserspiegeländerungen unterhalb des jeweils vor der Schiffsvorbeifahrt vorhandenen Ruhewasserspiegels. Da sich an jeder Meßstelle nur ein Aufnehmer befand, kann aus dem Verlauf der Meßsignale weder auf die Geschwindigkeit noch auf die Fahrtrichtung des verursachenden Schiffs geschlossen werden.

2.3 Auswertung

Die Meßschriebe wurden zunächst hinsichtlich der Absunkwerte z ausgewertet, um eine Klassierung der Absunkwerte und daraus die Berechnung von Belastungsspektren zu ermöglichen. Hierzu wurden Klassenstufen von 0,05 m gewählt und nur Absunkwerte größer als 0,15 m berücksichtigt. Kleinere Meßwerte wurden lediglich für die Ermittlung der Schiffsvorbeifahrten innerhalb eines Meßintervalls mitgezählt. Die so ermittelten Schiffsvorbeifahrten stimmen jedoch nicht mit den tatsächlichen Schiffsvorbeifahrten überein, da nur solche Schiffe mitgezählt werden können, die auffallende Veränderungen des Wasserspiegels verursachen. Kleine und zudem langsam fahrende Schiffe werden nicht berücksichtigt, so daß die Zahl der tatsächlichen Schiffsvorbeifahrten, die sich aus der Verkehrsstatistik des NOK ergibt, größer oder allenfalls gleich der aus den Meßschrieben ermittelten Anzahl ist. Die Belastungsspektren der Meßstellen werden dadurch jedoch nur unwesentlich beeinflusst.

Die Meßdaten wurden außerdem in Teil-Intervallen von jeweils 8 Stunden ausgewertet, um etwa mögliche Häufungen zu bestimmten Tageszeiten festzustellen:

1. Teil - Intervall : 04 - 12 Uhr
2. Teil - Intervall : 12 - 20 Uhr
3. Teil - Intervall : 20 - 04 Uhr

In einem weiteren Schritt wurden die Meßschriebe hinsichtlich der bei Schiffsvorbeifahrt entstehenden ufernahen Wellenhöhen H' ausgewertet, wobei wiederum Klassenstufen von 0,05 m gewählt und nur Wellenhöhen größer als 0,20 m berücksichtigt wurden.

Da die gemessenen Druckänderungen in 2m Wassertiefe nicht gleich der schnell verlaufenden Wasserspiegeländerung bei Durchgang von Bug- und Heckwellen ist, mußten die gemessenen Wellenhöhen H_m näherungsweise nach folgender Beziehung umgerechnet werden:

$$H' = H_m \frac{\cosh(0,314 n)}{\cosh(0,314 n \cdot m)}$$

$$H_m = \text{gemessene Druckamplitude}$$

$$H' = \text{Wellenhöhe } H \text{ in Ufernähe}$$

$$n = \frac{H}{d}$$

$$d = \text{Wassertiefe (2 m)}$$

$$m = \frac{s}{d}$$

$$s = \text{Höhe des Druckaufnehmers über Grund } \approx 0,2 \text{ m}$$

2.4 Ergebnisse

2.4.1 Absunk

Die in den Teil-Intervallen von jeweils 8 Stunden ermittelten Absunkwerte weisen bei allen drei Meßstellen eine weitgehend gleichmäßige Verteilung von Größe und Ereignishäufigkeit auf, so daß grundsätzlich bei allen ausgewerteten Meßintervallen eine gleichmäßige Belastung über alle Tageszeiten angenommen werden kann.

Für jede Meßstelle und jedes Meßintervall wurden Größe und Ereignishäufigkeit des Absunks in Form von relativen Summenhäufigkeiten $F(z)$ ermittelt, die in der Abb. 3 angegeben sind.

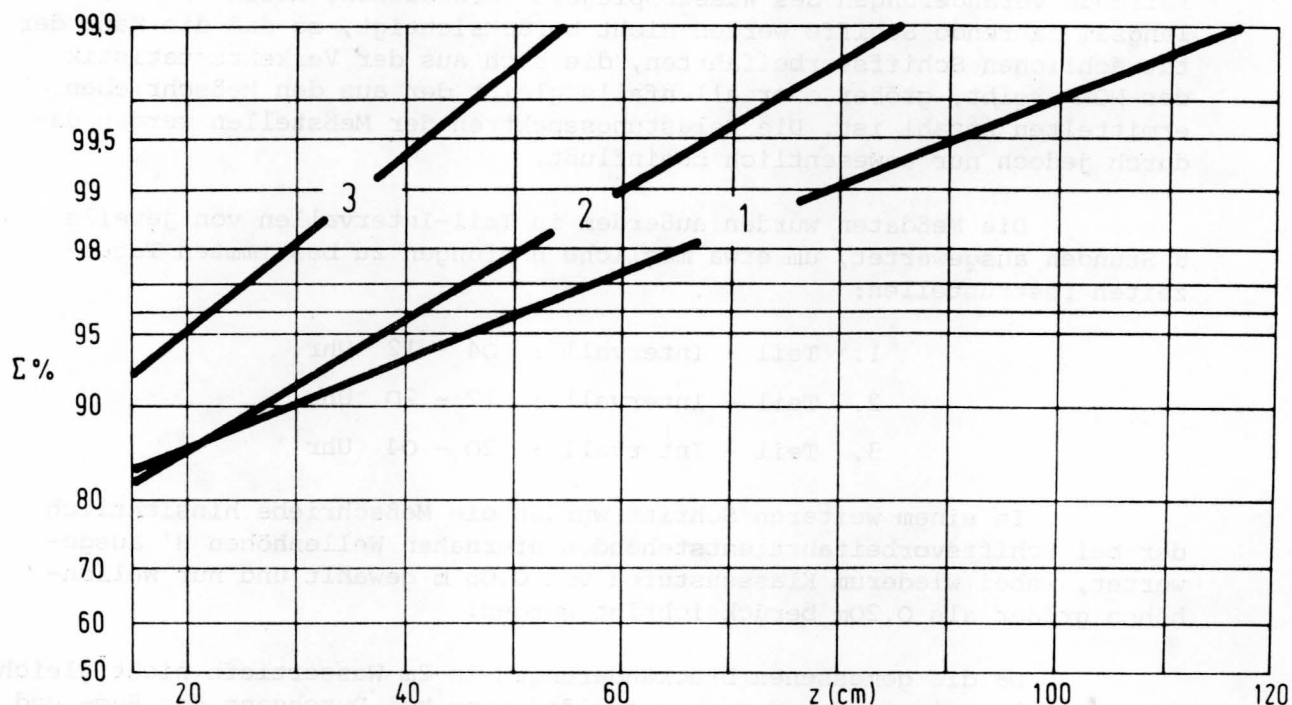


Abb. 3: Summenhäufigkeiten $F(z)$ des Absunks z

Für die drei Meßstellen ergeben sich ausgeprägte und charakteristische Summenhäufigkeitskurven, die auf unterschiedlich große Belastung der drei Kanalprofile hinweisen.

Bei einer in allen Meß-Intervallen durchschnittlichen Schiffs-passage von rd. 100 Schiffen in 24 Stunden, bedeuten die Summenhäufigkeiten folgende Ereigniswahrscheinlichkeiten:

Summenhäufigkeit $F(z)$

80	%	-	20 Ereignisse / Tag
90	%	-	10 Ereignisse / Tag
95	%	-	5 Ereignisse / Tag
98	%	-	2 Ereignisse / Tag
99	%	-	1 Ereignis / Tag
99,5	%	-	1 Ereignis / 2 Tage
99,9	%	-	1 Ereignis / 10 Tage

Die relativen Summenhäufigkeiten $F(z)$ zeigen, daß die Absunkwerte im neuen Profil der Meßstelle 2 bei gleicher Ereignishäufigkeit um durchweg 35 % kleiner sind als im alten Profil der Meßstelle 1, wobei von einem gleichstrukturierten Schiffsverkehr in beiden Meßzeiträumen (jeweils 4 Wochen) ausgegangen werden kann. Die Absunkwerte im Sonderprofil der Meßstelle 3 (Rader Durchstich) sind gegenüber denen der Meßstelle 1 um mehr als die Hälfte kleiner. Die Abb. 4 stellt die sich daraus ergebende Abhängigkeit zwischen Absunk z und der Querschnittsfläche A_0 des Kanalprofils für ausgewählte Ereignishäufigkeiten dar.

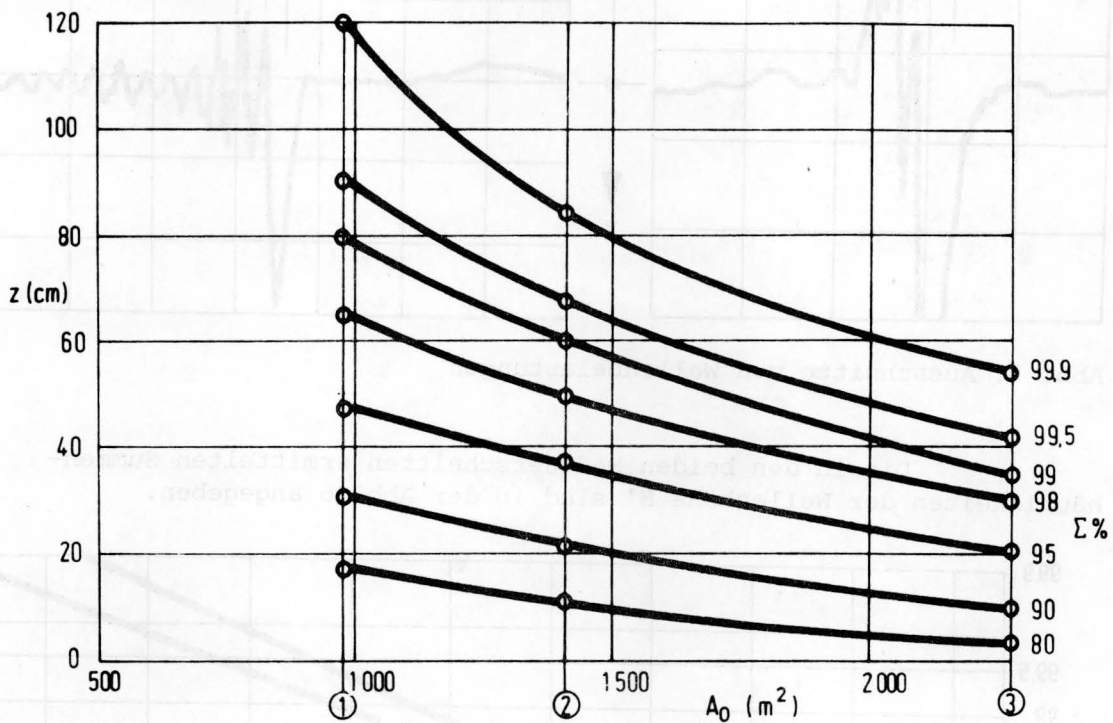


Abb. 4: Absunk z in Abhängigkeit von der Querschnittsfläche A_0

Bei allen drei Meßstellen wird übereinstimmend deutlich, daß nur allenfalls 20% der passierenden Schiffe merkliche Belastungen verursachen. Hierbei bleiben zunächst die die Schiffspassage kennzeichnenden Parameter wie

- Schiffsgröße
- Schiffsgeschwindigkeit
- Abstand vom Ufer

unberücksichtigt, auf die noch gesondert eingegangen wird.

2.4.2 Wellen

Die Auswertung der Meßschriebe erstreckte sich in erster Linie auf die in den Meßquerschnitten 1 und 2 erfaßten Größtwerte von Bug- und Heckwellen, da nur ein geringer Teil der Schiffsvorbeifahrten eine eindeutige Auswertung zuließ.

Die Aufzeichnungen beider Meßstellen enthielten eine Reihe ausgeprägter Wellenbelastungen, die u.a. von kleinen, aber schnell und dicht am Ufer fahrenden Schiffen verursacht sein dürften, da gleichzeitig ein nur geringer Absenk gemessen wurde. Die Abb. 5 zeigt in Ausschnitten einige markante Meßaufzeichnungen.

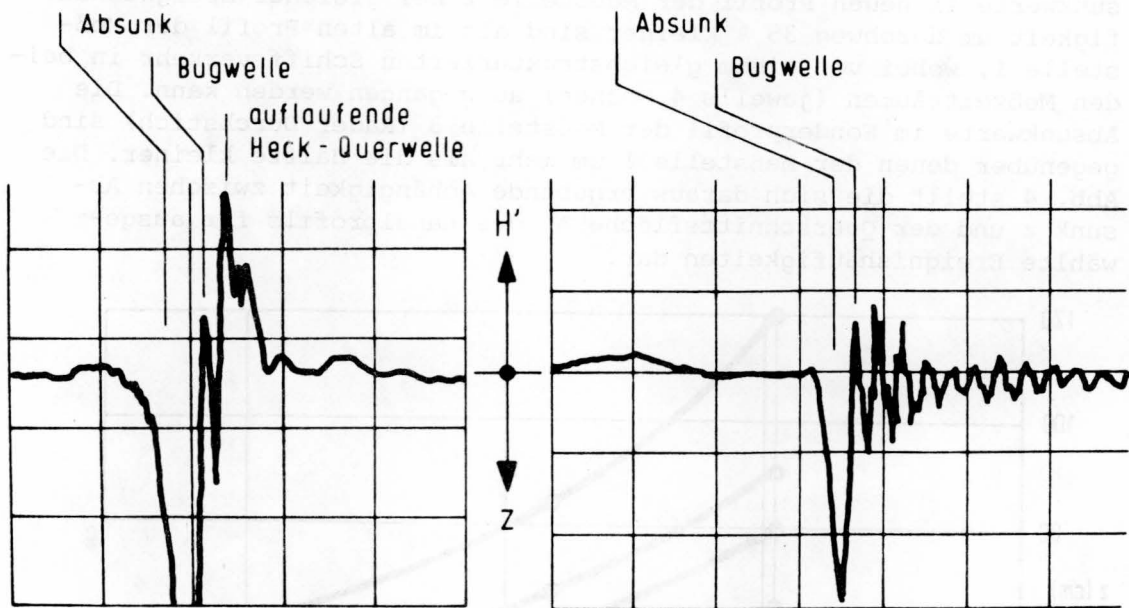


Abb. 5: Ausschnitte von Wellenbelastungen

Die in den beiden Meßquerschnitten ermittelten Summenhäufigkeiten der Wellenhöhe H' sind in der Abb. 6 angegeben.

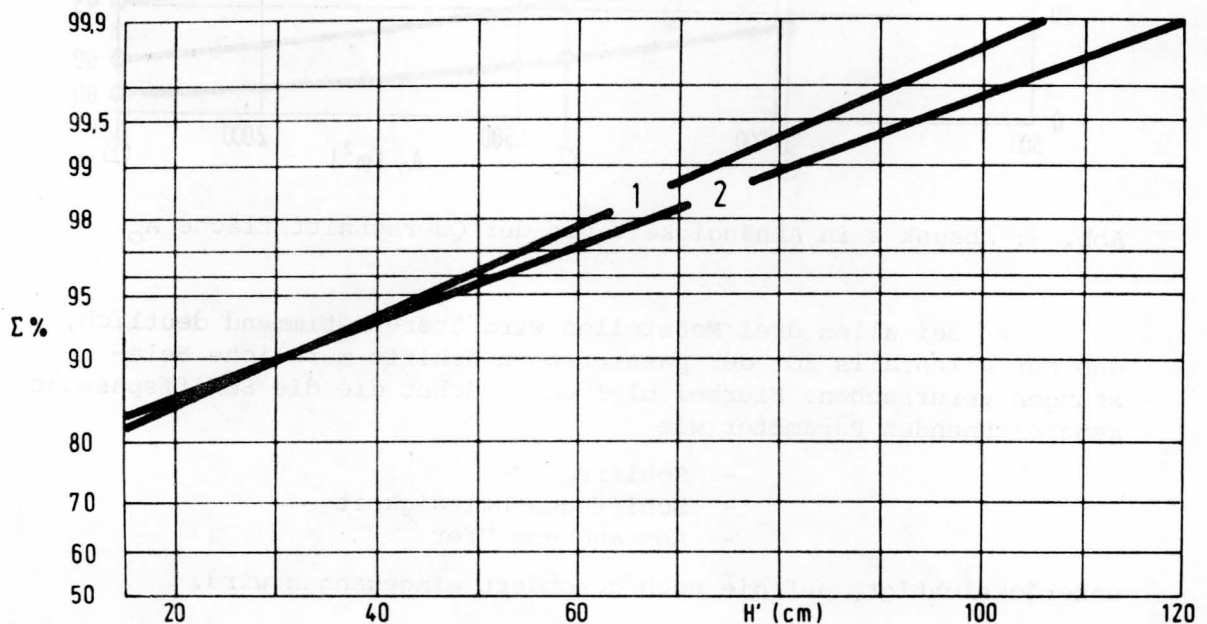


Abb. 6: Summenhäufigkeit der Wellenhöhen H'

Die Summenhäufigkeiten beider Meßquerschnitte stimmen in Verlauf und Größe weitgehend überein, wobei eine etwas stärkere Belastung des Ufers des 2. Meßquerschnitts (neues Kanalprofil) zu erkennen ist.

3. Einzelmessungen (2. Meßreihe)

An den gleichen Meßstellen der 1. Meßreihe wurden im Sommer 1976 nacheinander gezielte Einzelmessungen durchgeführt, mit denen die Abhängigkeit zwischen Absenk und Rückströmung einerseits und der sie verursachenden Schiffspassage andererseits erfaßt werden sollten. Um möglichst repräsentative Meßdaten zu erhalten, wurden durchweg gewöhnliche Schiffspassagen mit allen damit zwangsläufig verbundenen Zufälligkeiten in die Untersuchung einbezogen.

3.1 Meßanlage

Meßgeber, Datenerfassung und Art der Durchführung wurden in Anlehnung an früher an anderen Wasserstraßen durchgeführte Messungen ausgelegt, so daß mit den zur Verfügung stehenden Mitteln und Terminen eine optimale Datenausbeute zu erhalten war. Als Meßgeber wurden eingesetzt (Abb. 7):

Anzahl	Typ	Art der Messung
3	P (BAW)	Strömungsgeschwindigkeit in 2 Richtungen, v_x v_y
2	VBD	Strömungsgeschwindigkeit in 1 Richtung, v_x
3	D (BAW)	Wasserspiegellage, z
2	MS (BAW)	Belastung einzelner Steine der Decklage

Zur Datenerfassung war in einem Bauwagen unmittelbar an der Meßstelle eine Meßstation mit folgenden Geräten aufgebaut:

- 2 Magnetbandspeicher mit je 5 Kanälen
- 1 Schreiber mit 6 Kanälen
- 1 Schreiber mit 1 Kanal
- 12 TF-Verstärker

Alle Meßdaten wurden analog registriert. Dieser Aufbau der Meßstation ermöglichte außer gezielten Messungen auch Messungen bei unbesetzter Station, die wichtige Ergebnisse brachten.

Die Meßgeber wurden entsprechend der Aufgabenstellung überwiegend im Bereich der Böschung angeordnet. Lediglich 1 Strömungs-Aufnehmer (Typ VBD) wurde auf der Sohle eingesetzt. Zum möglichst schnellen Ein- und Abbau der Meßgeber wurden diese zusammen mit den Zuleitungskabeln auf Ankersteinen (Betonplatten 50 x 50 x 10 cm) befestigt und in der vorgesehenen Anordnung an Land zu einer Geräteketten zusammenggebaut.

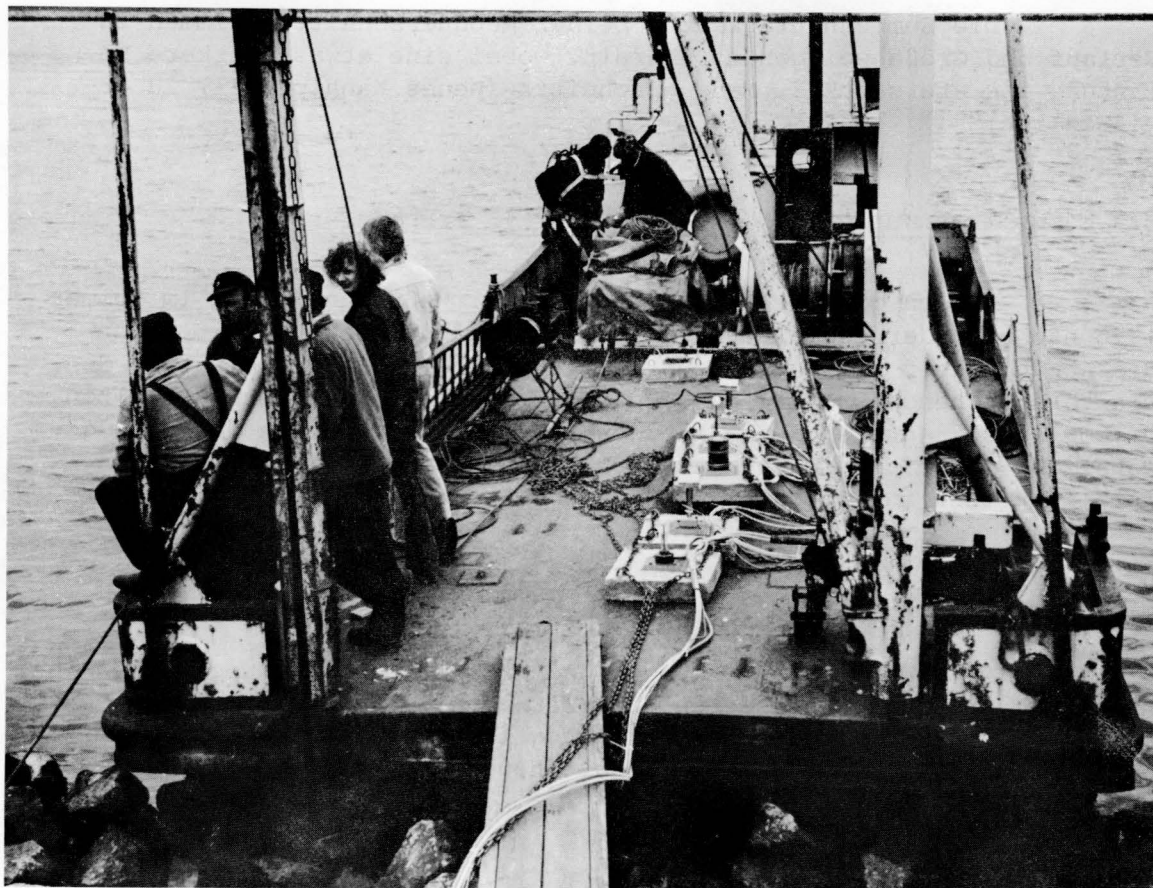


Abb. 7: Meßaufnehmer

Die an Stahlketten befestigten Ankersteine und Kabel wurden auf einem Prahm ausgelegt und von dort innerhalb einer kurzfristig vereinbarten Verkehrssperrung von ca. 15 Minuten Dauer an Böschung und Sohle abgelegt. Die Meßanlage war danach sofort einsatzbereit und wurde jeweils 4 Tage betrieben.

Die Anordnung der Meßgeber in den Meßprofilen 1 und 2 ist in der Abb. 8a und 8b angegeben.

Meß-Aufnehmer

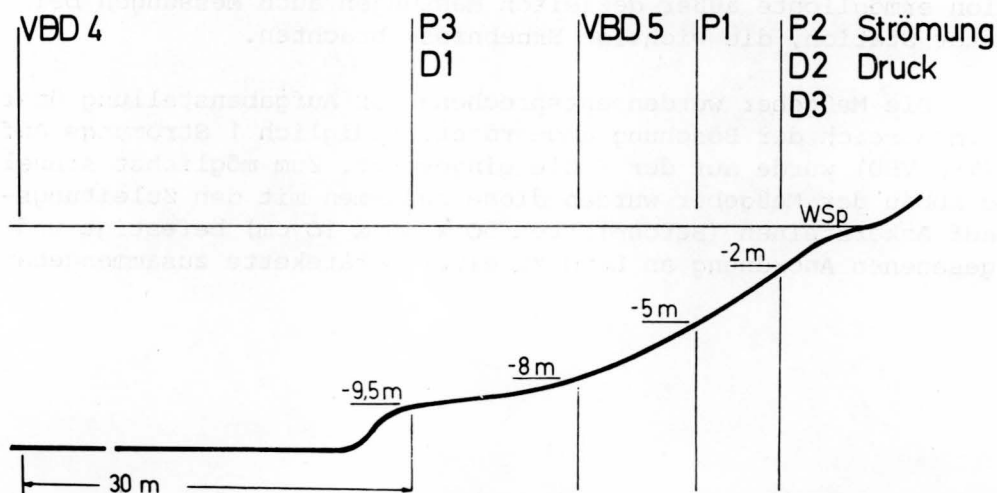


Abb. 8a: Anordnung der Meßgeber im Meßprofil 1

Meß-Aufnehmer

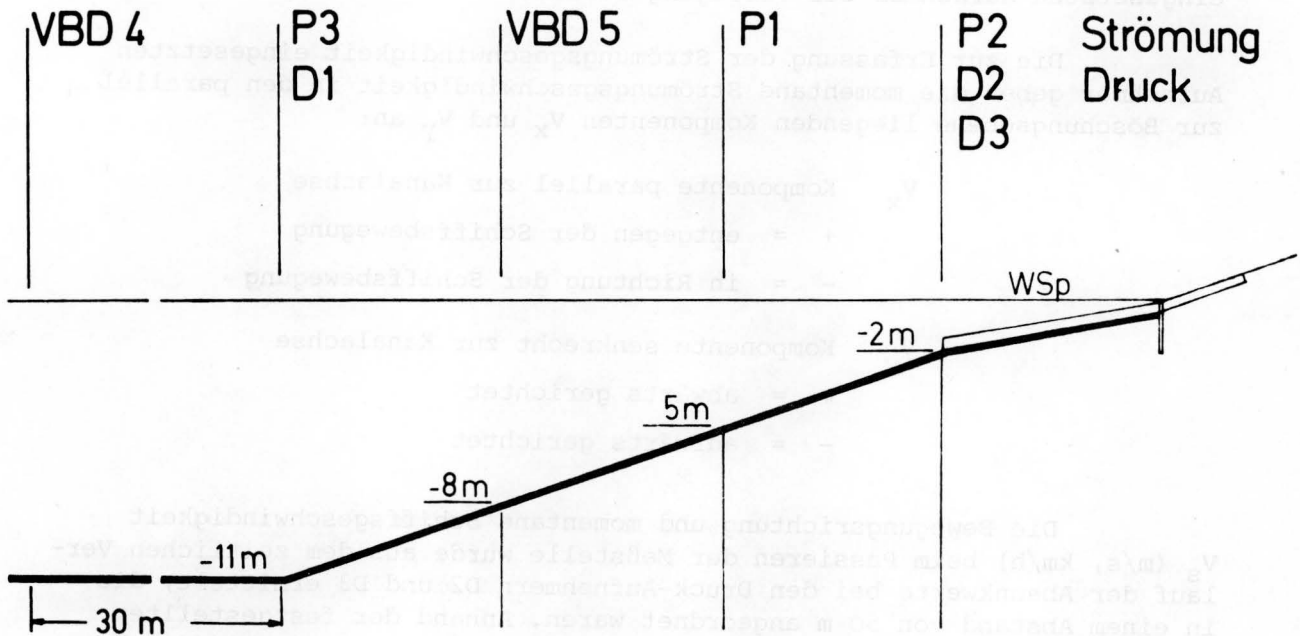


Abb. 8b: Anordnung der Meßgeber im Meßprofil 2

Da die Meßstelle 3 bereits nach den Absunkmessungen der 1. Meßreihe sehr geringe Belastungen erwarten ließ, wurde hier nur ein Strömungs-Aufnehmer vor der Spundwand ausgelegt.

3.2 Durchführung

Bei Tage wurden alle Meßgeber eingesetzt und die jeweilige Schiffsvorbeifahrt mit Namen, Heimathafen und Fahrtrichtung der Schiffe registriert. Aus diesen Daten konnten die weiteren Daten der Schiffsabmessungen nachträglich ermittelt werden.

Bei Nacht wurden nur einige repräsentative Meßgeber betrieben, aus deren Meßdaten sowohl die Strömungsverhältnisse als auch die verursachende Schiffsbewegung rekonstruiert werden konnten. Hierbei waren jedoch die eigentlich interessierenden Daten der Schiffsabmessungen mit einer gewissen Unsicherheit zu rekonstruieren, da die Schiffsbewegung lediglich aus Uhrzeit und Fahrtrichtung zu ermitteln war.

Bei allen Messungen wurde festgestellt, daß bei erkennbarer Besetzung der Meßstation nahezu alle Schiffe die für sie geltende Höchstgeschwindigkeit einhielten und oftmals sogar kurz vor dem Passieren der Meßstelle erheblich unterschritten. War die Besetzung der Meßstation nicht erkennbar, so wurden die zugelassenen Höchstgeschwindigkeiten oft und erheblich überschritten. Dies war mit ein Grund, weshalb bei dem begrenzten Meßaufwand auf eine Messung des Abstandes vom Ufer verzichtet werden mußte.

3.3 Auswertung

Bei den Meßstellen 1 und 2 fiel der auf der Kanalsole angeordnete Strömungs-Aufnehmer (Typ VBD) bereits nach kurzer Zeit aus, so daß für die Auswertung nur die Meßdaten der im Böschungsbereich eingesetzten Aufnehmer zur Verfügung stehen.

Die zur Erfassung der Strömungsgeschwindigkeit eingesetzten Aufnehmer geben die momentane Strömungsgeschwindigkeit in den parallel zur Böschungsebene liegenden Komponenten V_x und V_y an:

V_x	Komponente parallel zur Kanalachse
+	= entgegen der Schiffsbewegung
-	= in Richtung der Schiffsbewegung
V_y	Komponente senkrecht zur Kanalachse
+	= abwärts gerichtet
-	= aufwärts gerichtet

Die Bewegungsrichtung und momentane Schiffsgeschwindigkeit V_s (m/s, km/h) beim Passieren der Meßstelle wurde aus dem zeitlichen Verlauf der Absunkwerte bei den Druck-Aufnehmern D2 und D3 ermittelt, die in einem Abstand von 50 m angeordnet waren. Anhand der festgestellten Schiffsdaten wurden vom Auftraggeber die weiteren Daten der Schiffsabmessungen rekonstruiert und zur Verfügung gestellt.

Die Meßdaten wurden einerseits zur Darstellung des Belastungsvorgangs in Form von repräsentativen Einzelereignissen und andererseits zur Kombination mit den Ergebnissen der 1. Meßreihe ausgewertet. Eine sinnvolle Kombination der Ergebnisse der Dauer- und Einzelmessungen war jedoch nur für die Meßstellen 1 und 2 möglich.

Aus der Kombination mit den Ergebnissen der Dauermessungen (Ereignishäufigkeit des Absunks z) konnten Ereignishäufigkeiten für die Rückstromgeschwindigkeiten abgeleitet werden. Für bestimmte Ereignisgrade wurden für die Meßstellen 1 und 2 die aus V_x und V_y resultierenden größten Rückstromgeschwindigkeiten V_{res} in Form von Belastungsspektren aufgestellt.

Außer den Meßdaten von Absunk und Rückströmung wurden auch die bei den Einzelmessungen erfaßten Oberflächenwellen ausgewertet und zu der verursachenden Schiffspassage in Beziehung gesetzt. Für die Auswertung wurden die an den Meßpunkten D2 / D3 in 2 m Tiefe unter dem Wasserspiegel erhaltenen Meßdaten verwendet, die unmittelbar einer Schiffspassage zugeordnet werden konnten und deren Aufzeichnung eine eindeutige Auswertung zuließ. Da die in 2 m Tiefe gemessenen Druckschwankungen nicht der zugehörigen Wellenhöhe entsprechen, mußten die erhaltenen Meßdaten nach der in Ziffer 2.3 angegebenen Beziehung korrigiert werden. Die von Schiffen verursachten Bug- und Heckwellen sind quantitativ nur von den Meßstellen 1 und 2 ausgewertet worden.

3.4 Ergebnisse

Die Ergebnisse der 2. Meßreihe werden nachfolgend zunächst ohne Kombination mit denen der 1. Meßreihe angegeben.

3.4.1 Einzelereignisse

Als charakteristisches Beispiel der bei Schiffsvorbeifahrt im Böschungsbereich entstehenden Rückströmung wird das Ereignis Nr. 119/76 erläutert.

Ereignis 119/76 1. Schiffsdaten:

L_S	=	114,74 m
B_M	=	16,64 m
D_S	=	6,6 m
n	=	13,42 m
V_S	=	5,46 m/s
Tonnage	=	4204 BRT

2. Messung : Meßstelle 2
 Datum : 10.05.1976,
 18.03 Uhr
 Geber : alle

Die Abb. 9 stellt den zeitlichen Verlauf der Rückstromgeschwindigkeit am Meßaufnehmer P1 in einer Tiefe von NN - 5 m dar. Die auf Magnetband gespeicherten Daten sind in der vorliegenden Wiedergabe über einen 4 Hz-Tiefpaß gefiltert worden, so daß Signale (z.B. Störsignale vielfältigen elektrischen Ursprungs) mit einem Frequenzgang über 4 Hz nicht enthalten sind.

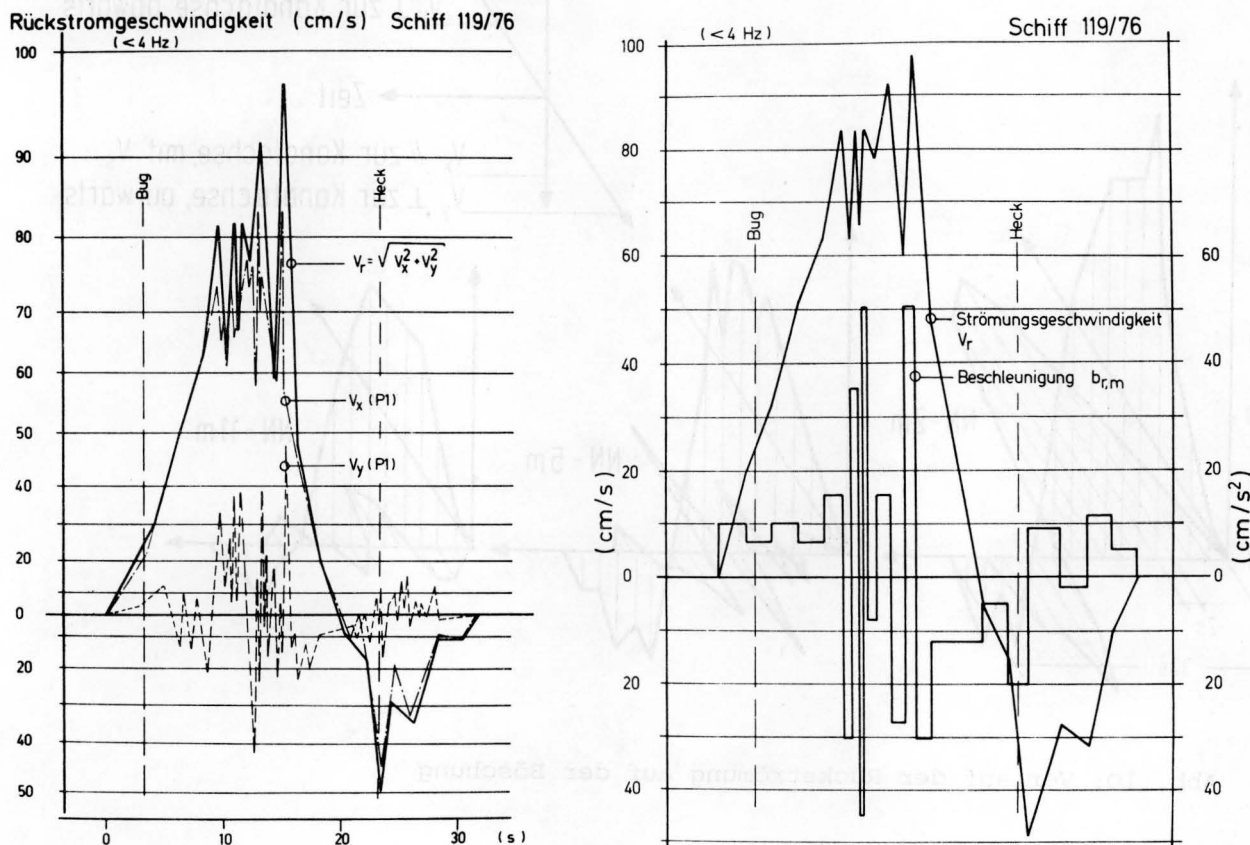


Abb. 9: Verlauf der Rückströmung in 5 m Tiefe

Es wird deutlich, daß die Rückströmung stark pulsierend verläuft, wobei eine mittlere Periodendauer von $T_m = 1,5$ Sekunden und eine mittlere Geschwindigkeitsänderung von $\Delta V_m = 20$ cm/s zu beobachten ist. Die parallel zur Kanalachse gerichtete Komponente V_x überwiegt. Die bei Passieren des Schiffshecks erkennbare Richtungsänderung von V_x verläuft nicht so schnell wie bei ähnlichen Vorgängen in Binnenschiffahrtskanälen bei Schiffsvorbeifahrten mit gleichem n -Verhältnis. Die senkrecht zur Kanalachse gerichtete Komponente V_y verläuft nicht vorherrschend in einer Richtung, sondern ändert ihre Richtung analog zur Pulsation.

In der Abb. 9 sind die aus den Komponenten V_x und V_y ermittelte resultierende Strömungsgeschwindigkeit V_r und die daraus abgeleiteten mittleren Beschleunigungen $b_{r,m}$ dargestellt. Die größten Beschleunigungen treten zur Zeit der größten Rückstromgeschwindigkeit und bei Änderung der Strömungsrichtung von V_x beim Durchgang des Schiffshecks auf.

Die Abb. 10 zeigt die Rückstromgeschwindigkeiten V_x , V_y an den auf der Böschung verteilten Meßstellen. Die V_x - Komponente nimmt vom unteren Rand der Böschungsbefestigung (NN - 2 m) bis zur Sohle (NN - 11 m) geringfügig ab. Die V_y - Komponente ist im oberen Bereich der Böschung ausgeprägt abwärts gerichtet. Im tiefer gelegenen Böschungsbereich ist keine vorherrschende Strömungsrichtung von V_y mehr zu erkennen. Die Intensität der Pulsation nimmt von oben nach unten ab. Dieses Ergebnis veranschaulicht die große Belastung des im oberen Böschungsbereich liegenden Deckwerks und insbesondere dessen unteren Randes im Übergangsbereich zur unbefestigten Böschung.

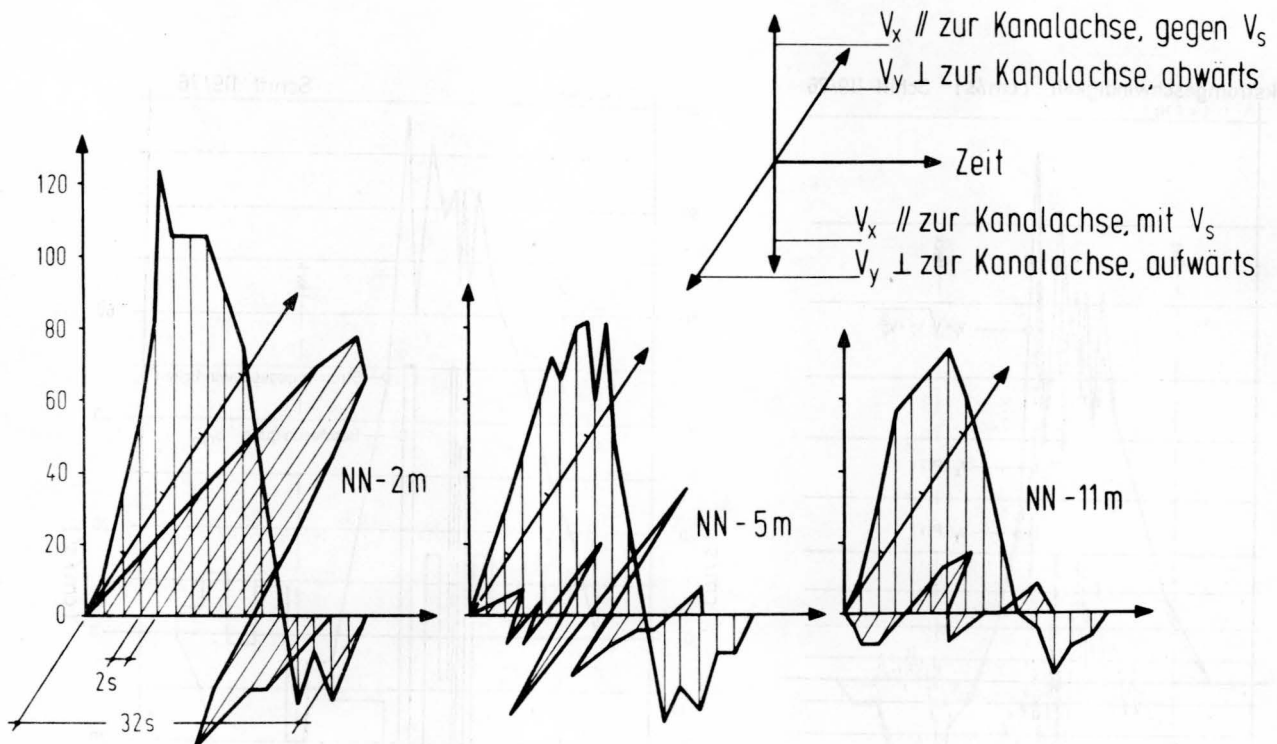


Abb. 10: Verlauf der Rückströmung auf der Böschung

3.4.2 Rangfolge

Für die Meßprofile 1 und 2 sind die darin gemessenen Einzelereignisse nach der Größe der dabei gemessenen Rückstromgeschwindigkeit V_r in Form einer Rangliste aufgestellt worden. Die jeweils 10 größten Ereignisse sind in der Tab. 1 angegeben, wobei die größten Rückstromgeschwindigkeiten durchweg an der Meßstelle P2 (NN - 2 m) gemessen wurden.

Rang	Schiff Nr.	Tag/Nacht		$n = \frac{F_K}{F_S}$	Schiffs- größe BRT	$V_{r,max}$ cm/s	V_{schiff}	
		T	N				m/s	km/h
1	408		N	5,6	9267	252	-	
2	382	T		4,5	25532	221	4,31	15,5
3	163		N	5,7	9355	209	-	
4	190	T		4,7	30039	180	3,90	14,0
5	442	T		6,0	8854	176	4,81	17,2
6	191		N	5,1	10129	166	-	
7	187	T		8,5	3809	160	-	
8	392	T		6,6	4668	151	5,68	20,5
9	173	T		8,9	8383	149	-	
10	198		N	7,4	3166	143	-	
1	135		N	10,7	4054	207	-	
2	78	T		7,2	9268	202	4,80	17,3
3	24		N	6,9	12202	176	-	
4	138		N	43	361	171	-	
5	119	T		12,6	4206	169	5,81	20,9
6	100		N	41	500	153	-	
7	103		N	14	3420	146	-	
8	57	T		7,2	21205	142	4,5	16,0
9	133		N	8,7	11827	139	-	
10	14	T		9,5	9453	133	5,0	18,0

bei Nacht ist keine eindeutige
Angabe von V_{schiff} möglich

Tab. 1: Rangfolge der 10 größten Einzelereignisse
bei den Meßstellen 1 und 2

Die Aufstellung zeigt das komplexe Verhältnis zwischen Rückstromgeschwindigkeit, n -Verhältnis und Schiffsbewegung. Es fällt auf, daß durchweg kleine bis mittelgroße Schiffe zu den jeweils 10 größten Ereignissen zählen.

Die zulässigen Schiffsgeschwindigkeiten von 12 und 15 km/h werden innerhalb dieser Rangfolge mehrmals überschritten.

3.4.3 Häufigkeitsverteilung von z

Aus den in den Meßprofilen 1 und 2 in der 2. Meßreihe erfaßten jeweils rd. 200 Einzelereignissen ergaben sich für den an dem Meßpunkt D2 (NN - 2 m) gemessenen Absenk z Häufigkeitsverteilungen, die mit den entsprechenden Verteilungen der 1. Meßreihe übereinstimmen, so daß die Ergebnisse beider Meßreihen bei den weiteren statistischen Ermittlungen korreliert werden konnten.

3.4.4 Rückstromgeschwindigkeiten

Aus den Einzelereignissen wurden die größten gemessenen Rückstromgeschwindigkeiten V_x und V_y für die jeweiligen Meßpunkte P2 bis P3 in Abhängigkeit zu dem beim gleichen Ereignis gemessenen Absink z an der Meßstelle D2 in Beziehung gesetzt.

Für jeden Meßpunkt der beiden Meßprofile ergeben sich daraus Beziehungen in der Form

$$V_{x,i} = f(z)$$

$$V_{y,i} = f(z)$$

Im Bereich der hier interessierenden Absinkwerte zwischen 0,15 m und 1,20 m ergibt sich eine direkte Proportionalität. Sie sind für beide Meßstellen in der Abb. 11 dargestellt.

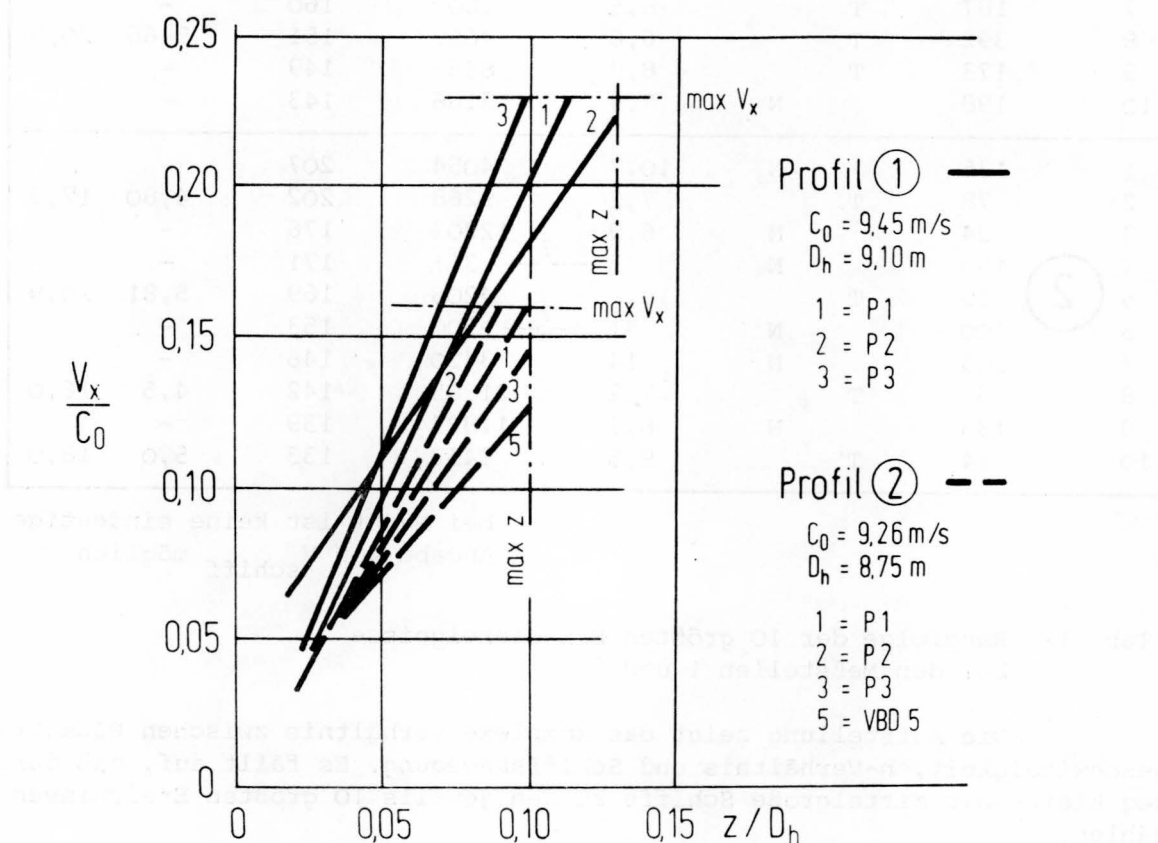


Abb. 11: Abhängigkeit zwischen Rückstromgeschwindigkeit V_x und Absink z

3.4.5 Wellen

Bei der Auswertung der an den Meßstellen 1 und 2 gemessenen Bug- und Heckwellen wurden nur Wellen berücksichtigt, deren Höhe H' in Ufernähe größer als 20 cm war.

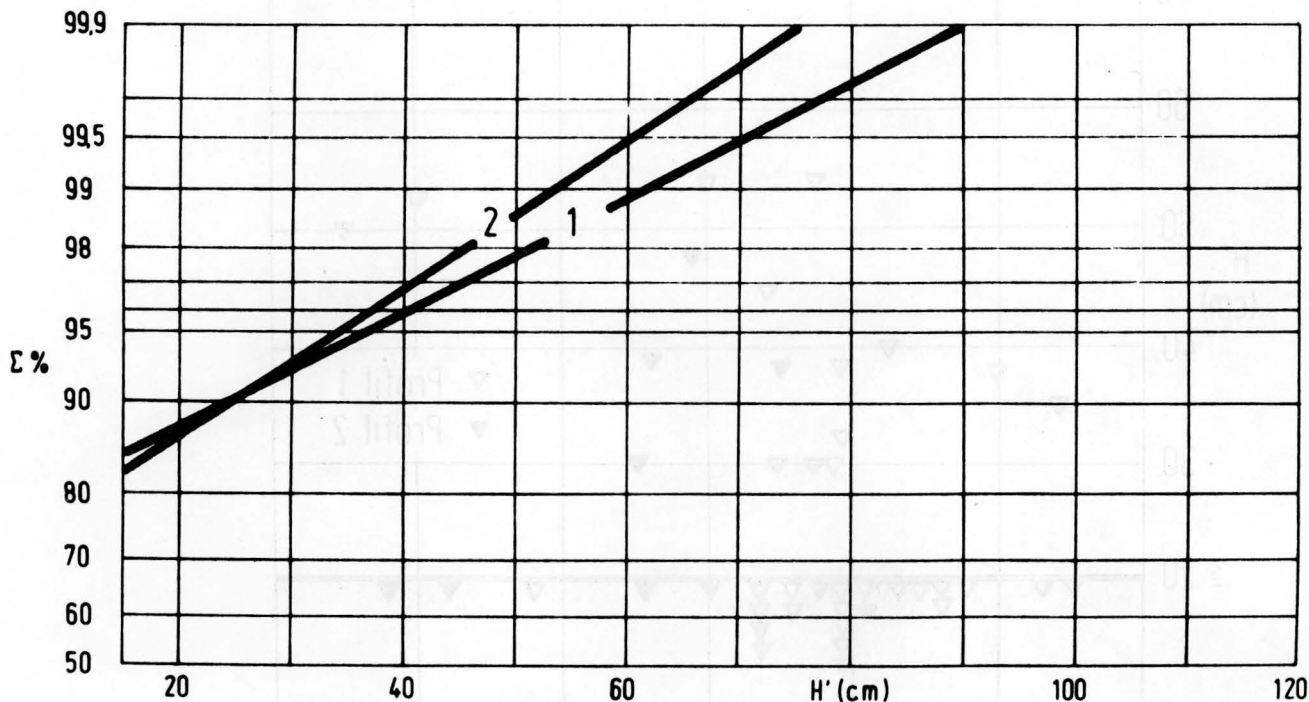


Abb. 12: Summenhäufigkeiten der Wellenhöhen H'

Die in Abb. 12 angegebenen rel. Summenhäufigkeiten der Wellenhöhen H' zeigen für beide Meßquerschnitte nur geringe Unterschiede, die im Meßquerschnitt 1 (altes Profil) etwas größere Wellenhöhen als im Meßquerschnitt 2 ergeben. Die größten Wellenhöhen betragen:

Meßquerschnitt	1	:	H'	99,9	=	90 cm
Meßquerschnitt	2	:	H'	99,9	=	75 cm

Sie sind kleiner als die in der 1. Meßreihe erhaltenen Wellenhöhen, in der allerdings eine größere Anzahl von Ereignissen erfaßt werden konnte.

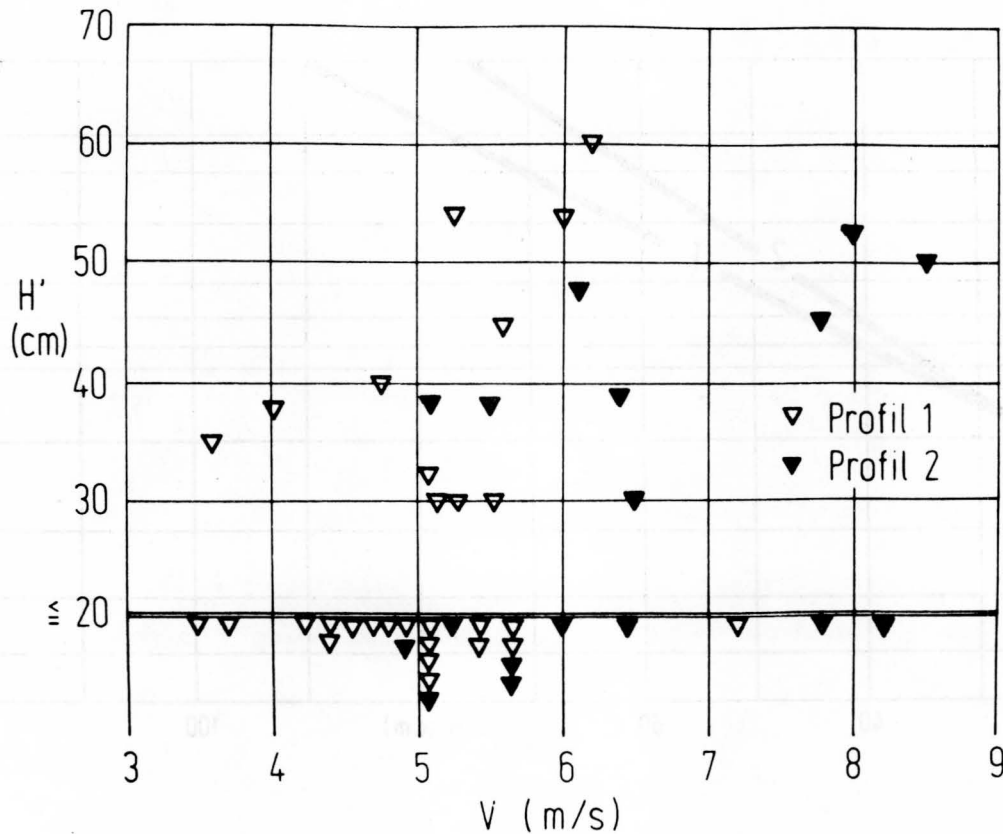


Abb. 13: Wellenhöhe H' und Schiffsgeschwindigkeit V_s

Die Gegenüberstellung von Wellenhöhen und Schiffsgeschwindigkeit in Abb. 13 ergibt für beide Meßquerschnitte keine deutliche Abhängigkeit. Als Trend kann lediglich festgestellt werden, daß im Meßquerschnitt 2 wesentlich größere Schiffsgeschwindigkeiten gemessen wurden, die jedoch nicht zwangsläufig größere Wellenhöhen als im Meßquerschnitt 1 verursachen. Es fällt ferner auf, daß eine Reihe von Schiffen trotz großer Geschwindigkeit praktisch keine Wellen verursacht ($H' < 20$ cm).

4. Korrelation beider Meßreihen

Die rel. Summenhäufigkeiten der Absunkwerte z der 1. und 2. Meßreihen stimmen jeweils für die Meßstellen 1 und 2 überein, so daß in beiden Meßreihen ein für die statistische Untersuchung gleich strukturierter Schiffsverkehr angenommen werden kann und die Ergebnisse beider Meßreihen korreliert werden können.

4.1 Vorgehen

Die Ergebnisse der 1. und 2. Meßreihe wurden wie folgt korreliert:

1. Meßreihe : Häufigkeitsverteilung von den Absunkwerten z an den Meßprofilen 1 und 2 in Form von relativen Summenhäufigkeiten über einen Zeitraum von jeweils 4 Wochen.

Meßprofil 1 : $F_{z,1}$

Meßprofil 2 : $F_{z,2}$

2. Meßreihe : Häufigkeitsverteilung der Absunkwerte z an den Meßprofilen 1 und 2 in Form von relativen Summenhäufigkeiten über den Zeitraum von Einzelmessungen der 2. Meßreihe

Aus den Einzelmessungen wird die Beziehung zwischen dem Absunk z und der größten Rückstromgeschwindigkeit an den auf der Böschung angeordneten Meßaufnehmern ermittelt.

$$V_{x,i} = f(z)$$

$$V_{y,i} = f(z)$$

3. Belastungsspektrum : Aus der Kombination der rel. Summenhäufigkeiten

$F_{z,1}$ und $F_{z,2}$

mit den für die beiden Meßprofile gültigen Beziehungen

$$V_{x,i} = f(z) \text{ und } V_{y,i} = f(z)$$

können die rel. Summenhäufigkeiten für die auf der Böschung auftretenden Rückstromgeschwindigkeiten angegeben werden:

Meßprofil 1 : $F_{V_{x,i,1}}$, $F_{V_{res,i,1}}$

Meßprofil 2 : $F_{V_{x,i,2}}$, $F_{V_{res,i,2}}$

4.2 Ergebnisse

Die Abb. 14 stellt die rel. Summenhäufigkeiten für die Rückstromgeschwindigkeit V_x in den beiden Meßprofilen dar, aus denen folgende Tendenzen zu erkennen sind.

1. : Die Rückstromgeschwindigkeiten V_x sind im 2. Meßprofil (ausgebautes Kanalprofil) bei gleicher Ereignishäufigkeit um durchschnittlich 40 % geringer als im 1. Meßprofil.

2.: Im 1. Meßprofil nehmen die Rückstromgeschwindigkeiten bei großen Ereignissen von oben nach unten zu, während sie im 2. Meßprofil von oben nach unten abnehmen.

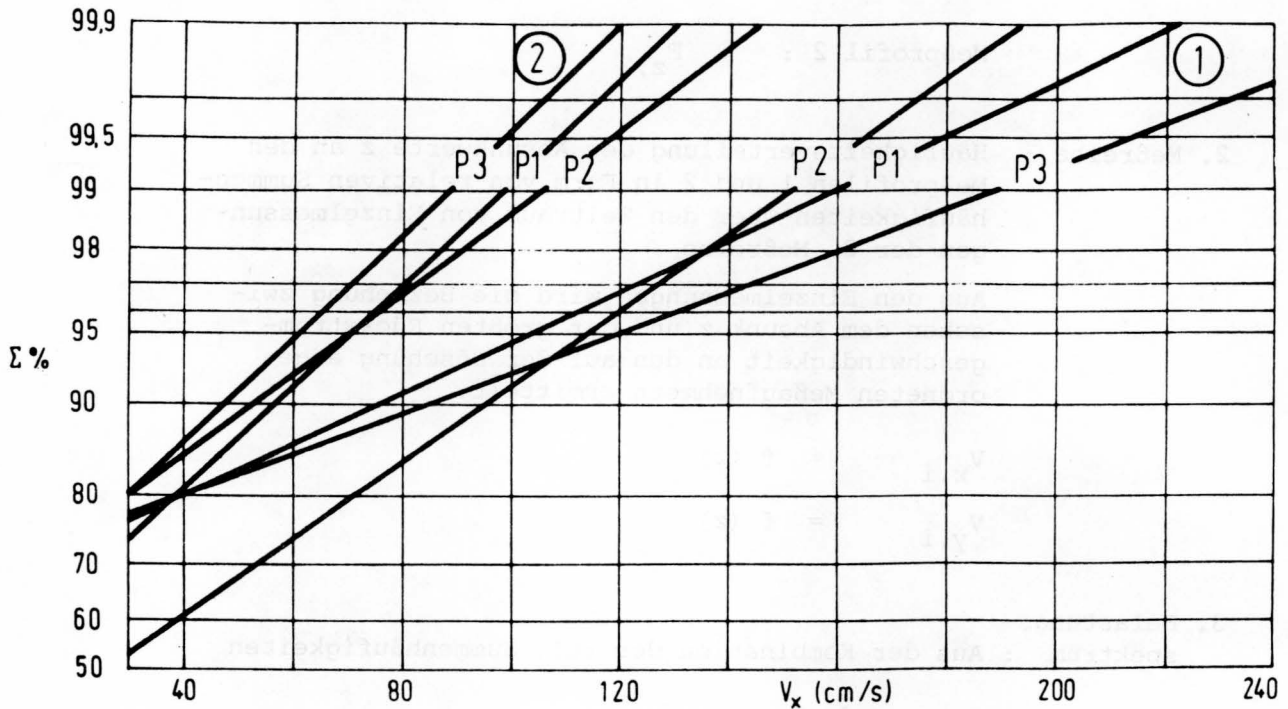


Abb. 14: Summenhäufigkeit von V_x

Zur weiteren Verdeutlichung der im Bereich der Böschung bei Schiffsvorbeifahrt entstehenden Belastung werden die Rückstromgeschwindigkeiten für ausgewählte Ereignishäufigkeiten dargestellt. Als charakteristische Ereignishäufigkeiten werden die Summenhäufigkeiten von 80, 90, 98, 99,5 und 99,9 $\Sigma\%$ gewählt.

Die senkrecht zur Kanalachse gerichtete Komponente V_y der Rückströmung schwankt in Richtung und Größe stark und nimmt mit zunehmender Tiefe der Böschung ab. Im Mittel gilt für den oberen Bereich der Böschung:

$$\max V_y = 0,65 \cdot \max V_x$$

Für die sich daraus ergebende maximale resultierende Strömungsgeschwindigkeit kann folgende Näherung angesetzt werden:

$$\max V_{res} = 1,19 \cdot V_x$$

Die Abb. 15 stellt die für beide Meßprofile ermittelten Belastungsspektren für die Rückstromgeschwindigkeit V_{res} (Resultierende aus V_x und V_y) dar.

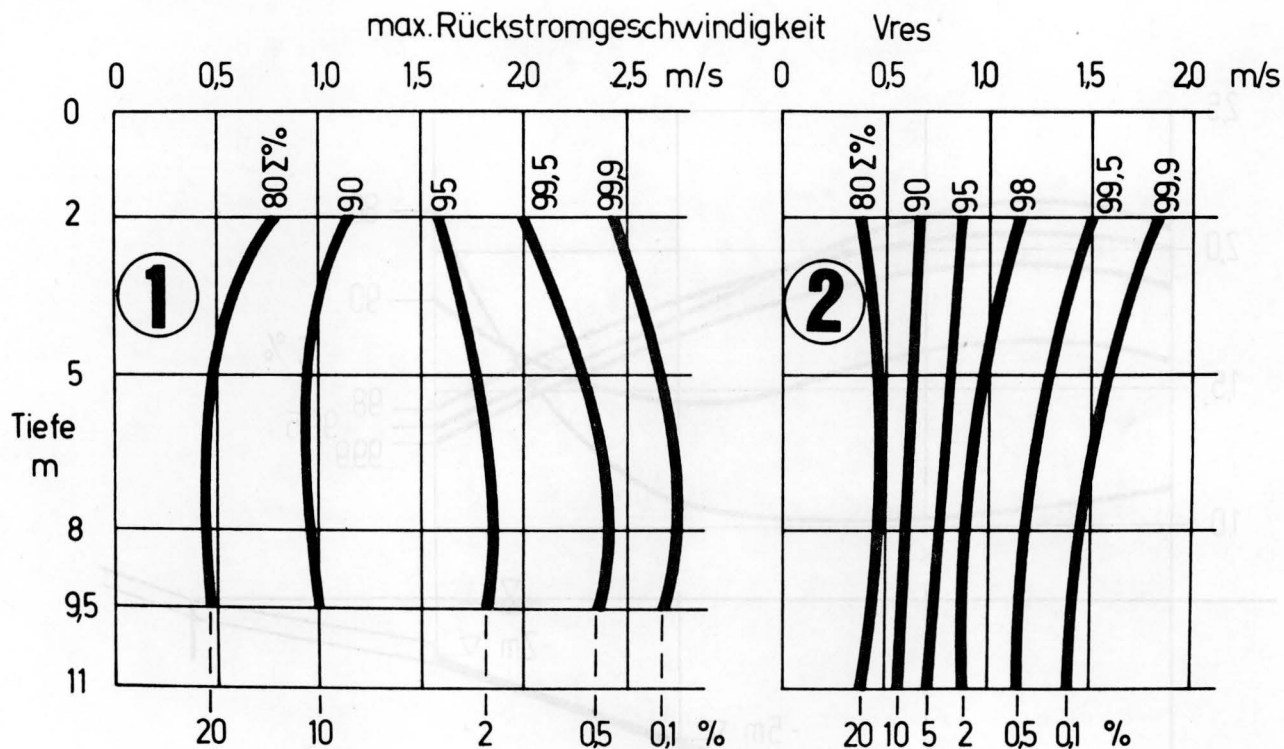


Abb. 15: Rückstromgeschwindigkeit V_{res}

1. Meßprofil (alter Kanalquerschnitt)

Die Rückstromgeschwindigkeiten V_{res} verlaufen bei den Ereignishäufigkeiten von 80 und 90 $\Sigma\%$ nahezu gleichmäßig über den Böschungsbereich von oben bis unten und betragen bei 80 $\Sigma\%$ 50 cm/s und bei 90 $\Sigma\%$ 100 cm/s. Bei den darüber liegenden Ereignishäufigkeiten von 98 bis 99,9 $\Sigma\%$ nehmen die Rückstromgeschwindigkeiten von oben nach unten geringfügig zu. Die Strömungsgeschwindigkeit von 150 cm/s wird von 5 % aller Schiffe erreicht und überschritten.

2. Meßprofil (neuer Kanalquerschnitt)

Die Rückstromgeschwindigkeiten V_{res} nehmen im neuen Kanalprofil durchweg im Böschungsbereich von oben nach unten bei den höheren Ereignisstufen ab und verlaufen bei geringeren Ereignisstufen nahezu gleichmäßig. Die Rückstromgeschwindigkeit von 150 cm/s wird nur im oberen Böschungsbereich oberhalb von NN - 6 m von 0,1 % aller Schiffe erreicht und überschritten.

Abbau der Belastung

Der sich aus den o.a. Belastungsspektren ergebende Abbau der Rückströmung V_{res} vom alten Kanalprofil (Meßprofil 1) zum neuen Kanalprofil (Meßprofil 2) wird für die ausgewählten Ereignishäufigkeiten in der Abb. 16 angegeben.

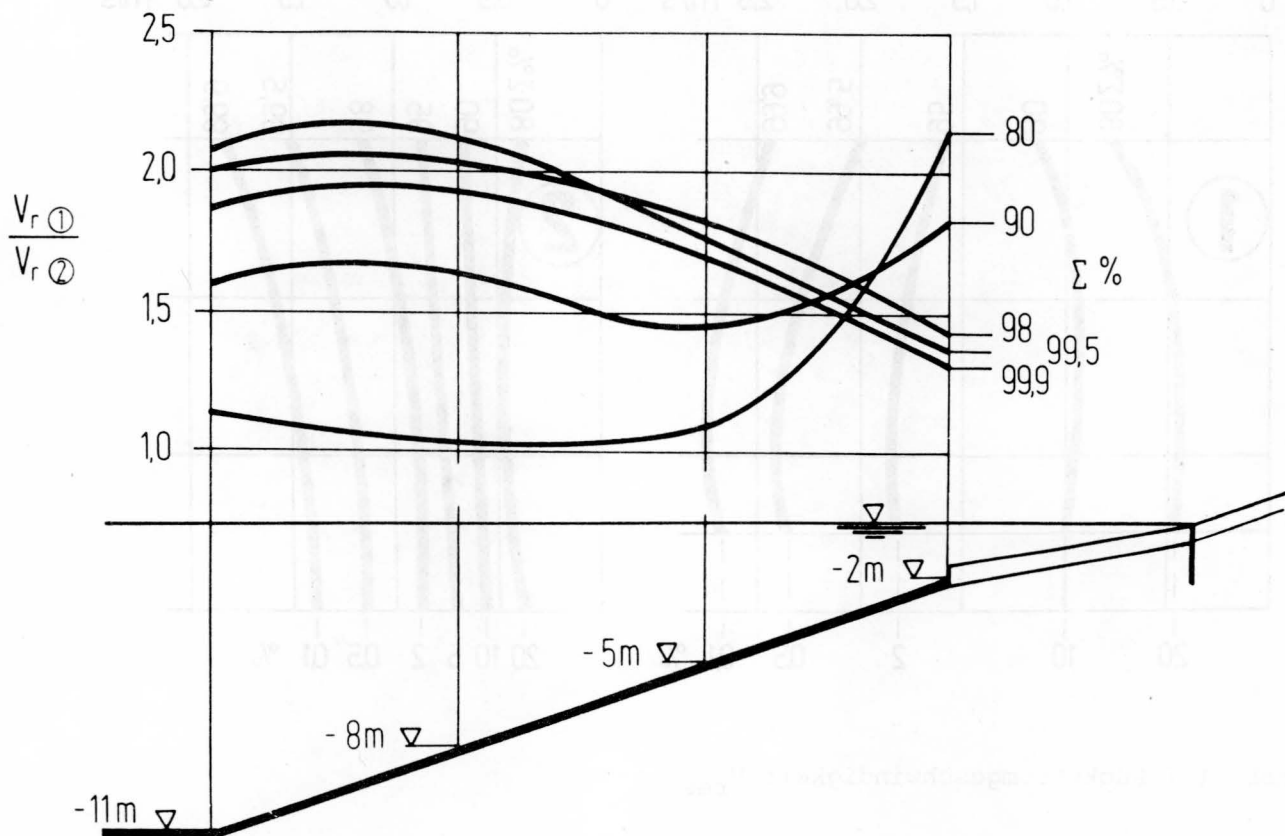


Abb. 16: Abbau der Rückströmung V_{res}

Bei der Ereignishäufigkeit von 80 $\Sigma \%$ wirkt sich der Belastungsabbau sehr ausgeprägt im oberen Böschungsbereich oberhalb NN - 5 m aus und erreicht am Fuß der Böschungsbefestigung einen Abbaugrad von 2,14, die Rückstromgeschwindigkeit V_{res} wird dort von 75 cm/s auf 35 cm/s bei einer Ereignishäufigkeit von 80 $\Sigma \%$ abgebaut. Bei den höheren Ereignisstufen liegt der Abbau zwischen 1,33 und 2,09, wobei im oberen Böschungsbereich der geringste Abbau stattfindet.

5. Vergleiche

Aus dem Vergleich der aus den Naturmessungen erarbeiteten Ergebnissen mit denen der 1964/66 durchgeführten Natur- und Modelluntersuchungen sowie mit neueren theoretischen Ansätzen sollen die für die Ufersicherungen maßgebenden Belastungswerte abgesichert werden. Der Vergleich erstreckt sich dabei auf

- Absenk z
- Rückströmung V_r
- Wellen H'

jeweils im alten und neuen Kanalprofil.

5.1 Schiffstypen

Für die Vergleiche werden entsprechend der in /12/ vorgenommenen Schematisierung des schädlichen Schiffsverkehrs folgende Schiffskategorien berücksichtigt:

Modellversuche : T1 T2 T3 T4

Naturmessungen : T1' T2' T3' T4' T5'

Die für den Vergleich wichtigen Daten der Schiffstypen sind in der Tabelle 2 angegeben.

Kategorie	Schiffsgröße (BRT)	Länge L_S (m)	Breite B_M (m)	Tiefgang D_S (m)	Fläche A_M (m ²)	$\frac{A_{o1}}{A_M} = n_1$	$\frac{A_{o2}}{A_M} = n_2$
T 1	12.500		21,95	9,50	198,10	4,92	7,07
T 1'	12.500	169,40	21,19	9,50	191,24	5,09	7,32
T 2	8.000		20,51	8,50	165,60	5,88	8,45
T 2'	8.000	146,64	20,65	8,50	166,75	5,84	8,40
T 3	5.000		17,68	7,50	126,0	7,73	11,11
T 3'	5.000	129,29	18,80	7,00	125,02	7,79	11,20
T 4	3.500		19,06	4,85	87,80	11,09	15,95
T 4'	3.500	129,29	18,80	4,90	87,51	11,13	16,00
T 5'		57,99	9,51	3,40	30,72	31,71	45,57

Tab. 2: Schiffstypen

5.2 Modellversuche der SOGREAH

In Fortsetzung der von der Untersuchungsstelle Nord-Ostsee-Kanal am NOK durchgeführten Naturmessungen der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Kiel bei der

SOGREAH
(Société Grenobloise d'Etudes et d'Applications
Hydrauliques)
Grenoble, Frankreich

Modellversuche mit Schiffen im Maßstab 1 : 25 durchgeführt, deren Ergebnisse in Verbindung mit denen der Naturmessung die Grundlage des Ausbauprogramms des NOK bilden.

Neben einer grundsätzlichen Klärung des Vorgangs des Böschungsabtrages sollten die Modelluntersuchungen die Bestimmung des technisch optimalen Kanalquerschnitts und der darin zulässigen Schiffsgeschwindigkeiten ermöglichen. Für die Beurteilung der Kanalquerschnitte und deren Belastung dienten die Kriterien "schädlicher Schiffsverkehr" und "Böschungsabtrag" /2/ /12/.

Schiffsverkehr

Aus dem durchschnittlichen Schiffsverkehr und den zuvor durchgeführten Naturmessungen wurde angenommen, daß nur 10 % aller Schiffe ein n-Verhältnis von kleiner als 12 besitzen und als Schadensverursacher in Betracht zu ziehen waren. Dieser Anteil wurde weiter in die Kategorien T1 bis T4 aufgeteilt, so daß eine Schematisierung des schädlichen Schiffsverkehrs erhalten wurde - s. Abb. 17 -.

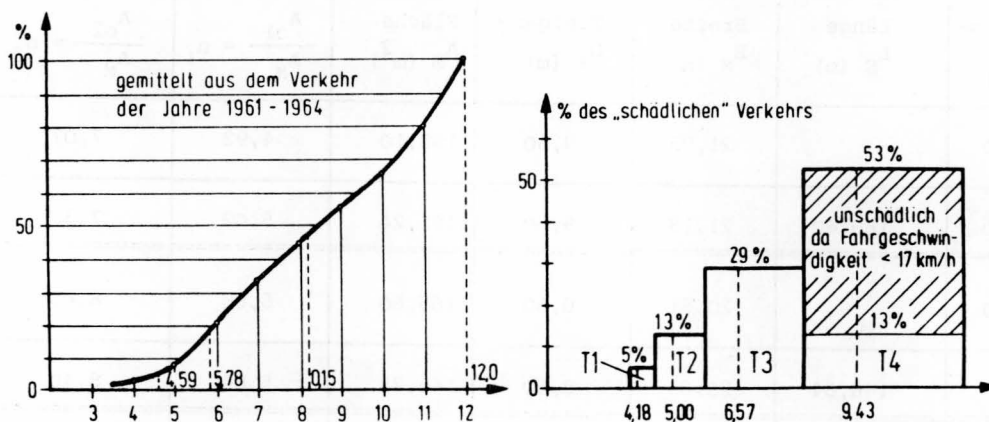


Abb. 17: Zusammensetzung des schädlichen Schiffsverkehrs nach /12/

Dieser schädliche Schiffsverkehr ist in erster Linie auf Grund der Querschnittsverhältnisse und bestimmter zulässiger Schiffsgeschwindigkeiten festgelegt worden, wobei weitere für die Belastung der Kanalböschungen wichtige Einflüsse unberücksichtigt blieben:

- Einhaltung bzw. Überschreitung der zulässigen Schiffsgeschwindigkeiten,
- außermittige Fahrt
- Begegnen und Überholen von Schiffen
- Bug- und Heckwellen

Als Maß für die Belastbarkeit eines Kanalprofils wurde in den Modellversuchen der Böschungsabtrag in Abhängigkeit von Kanalprofil, Schiffskategorie und Schiffsgeschwindigkeit ermittelt und über Transitmaßstäbe auf Naturverhältnisse übertragen. Der folgende Vergleich erstreckt sich deswegen nur auf die hydraulischen Ergebnisse, nicht aber auch quantitativ auf den damit gekoppelten Böschungsabtrag.

5.2.1 Kanalquerschnitt

Zum Vergleich der aus den Modelluntersuchungen und der aus den Naturmessungen gewonnenen Ergebnisse wurden folgende Kanalprofile verwendet, die sich in ihren wesentlichen Abmessungen und hydraulischen

Kenndaten entsprechen:

Meßquerschnitt	1	---	Profil	C_α
Meßquerschnitt	2	---	Profil	C_β

5.2.2 Rückströmung

Zum Vergleich der bei Schiffspassage in Böschungsnähe entstehenden nahen Rückströmungen wurden deren zeitlicher Verlauf und die in der 2. Meßreihe erhaltenen Größtwerte untersucht.

5.2.2.1 Zeitlicher Verlauf

Der Verlauf der Rückströmung weist in den Naturmessungen wesentliche Abweichungen gegenüber den Modellversuchen auf, die in der Abb. 18 vereinfacht dargestellt sind.

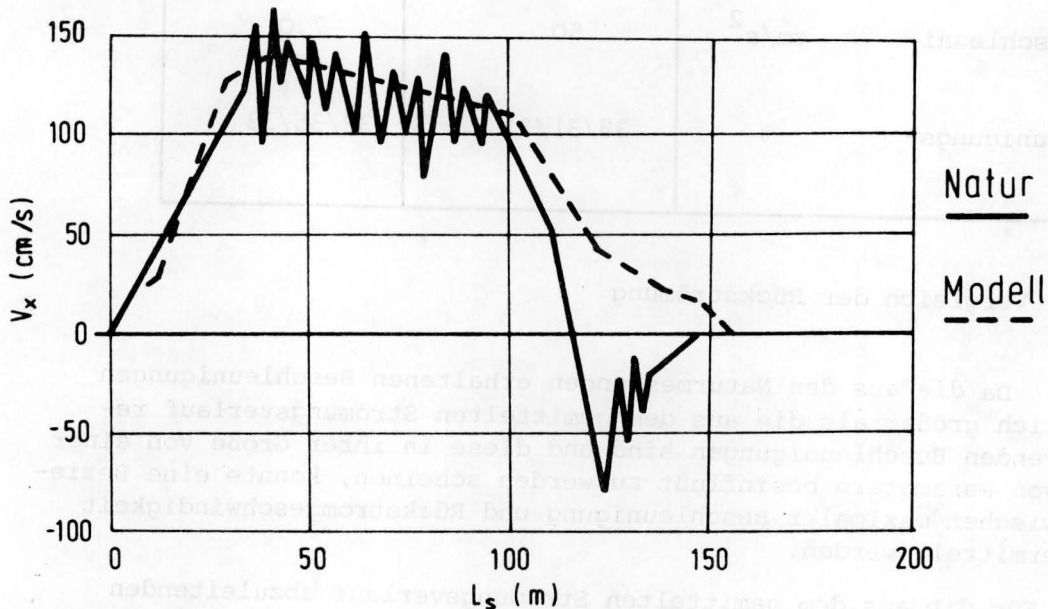


Abb. 18: Verlauf der Rückströmung auf der Böschung

Die in der 2. Meßreihe der Naturmessungen erfaßten Einzelereignisse, die alle Schiffskategorien mit unterschiedlichen Schiffsgeschwindigkeiten umfassen, zeigen einen Verlauf der Rückströmung in unmittelbarer Böschungsnähe, bei dem die Rückströmung nicht nur parallel zur Kanalachse (V_x) in mehr oder weniger stetigen Grundphasen der Beschleunigung, stetigen Strömung und Verzögerung verläuft, sondern von einer Makroturbulenz überlagert ist, deren Intensität mit der Böschungstiefe abnimmt. Diese überlagernde Pulsation bewirkt sowohl in x- als auch in y-Richtung ausgeprägte Änderungen der Rückströmung in Größe und Richtung, wobei Beschleunigungen und Verzögerungen entstehen, die wesentlich größer als die der drei Grundphasen sind. Dieses wird im folgenden Vergleich in Tab. 3 für die Böschungsmitte (NN - 5 m) angegeben:

		2. Meßreihe Nr. 119/76	C_{β} - Versuch T3
Schiff	B_M m	16,64	17,68
	D_M m	6,6	7,50
	n -	13,4	11,11
	V_S km/h	19,67	19,00
Rückströmung, max V_x	cm/s	80	72
mittl. Beschleunigung	cm/s ²	7,5	7,0
max. Beschleunigung	cm/s ²	50	7,0
Beschleunigungsanteile	%	38/31/31	32/35/33

Tab. 3: Vergleich der Rückströmung

Da die aus den Naturmessungen erhaltenen Beschleunigungen wesentlich größer als die aus dem gemittelten Strömungsverlauf resultierenden Beschleunigungen sind und diese in ihrer Größe von einer Reihe von Parametern beeinflusst zu werden scheinen, konnte eine Beziehung zwischen maximaler Beschleunigung und Rückstromgeschwindigkeit nicht ermittelt werden.

Für die aus dem gemittelten Strömungsverlauf abzuleitenden Beschleunigungen wurden die in den Modellversuchen ermittelten Beziehungen bestätigt.

5.2.2.2 Größtwerte

Die Größtwerte des Absunks und der Rückströmung der in der 2. Meßreihe erfaßten Einzelereignisse, die den Schiffskategorien T1 bis T3 zugeordnet werden konnten, wurden mit denen der Modelluntersuchungen der Versuchsreihen C_{α} und C_{β} verglichen. Vergleichsbasis bildete hierbei die Schiffsgeschwindigkeit V_S , mit der Rückströmung und Absunk ermittelt und den gemessenen Werten gegenüber gestellt wurden.

Absunk

Für die in Ufernähe ermittelten und gemessenen Absunkwerte z wird das Verhältnis α_z wie folgt definiert und in Abb. 19 für beide Meßquerschnitte dargestellt:

$$\alpha_z = \frac{z \text{ (Modell)}}{z \text{ (Messung)}}$$

Bei dem Meßquerschnitt 1 sind die Verhältniswerte sowohl größer als auch kleiner als 1 und streuen von 0,75 bis 1,30, wobei die der Schiffskategorie T1 zugeordneten Werte gleich oder kleiner als 1 sind. Bei dem Meßquerschnitt 2 sind nahezu alle Verhältniswerte kleiner als 1 und streuen zwischen 0,68 und 1,03. Das bedeutet, daß insbesondere bei dem Meßquerschnitt 2 die Mehrzahl der miteinander vergleichbaren Ereignisse größere Absunkwerte in der Natur als im Modellversuch ergeben und Abweichungen bis 32 % möglich sind.

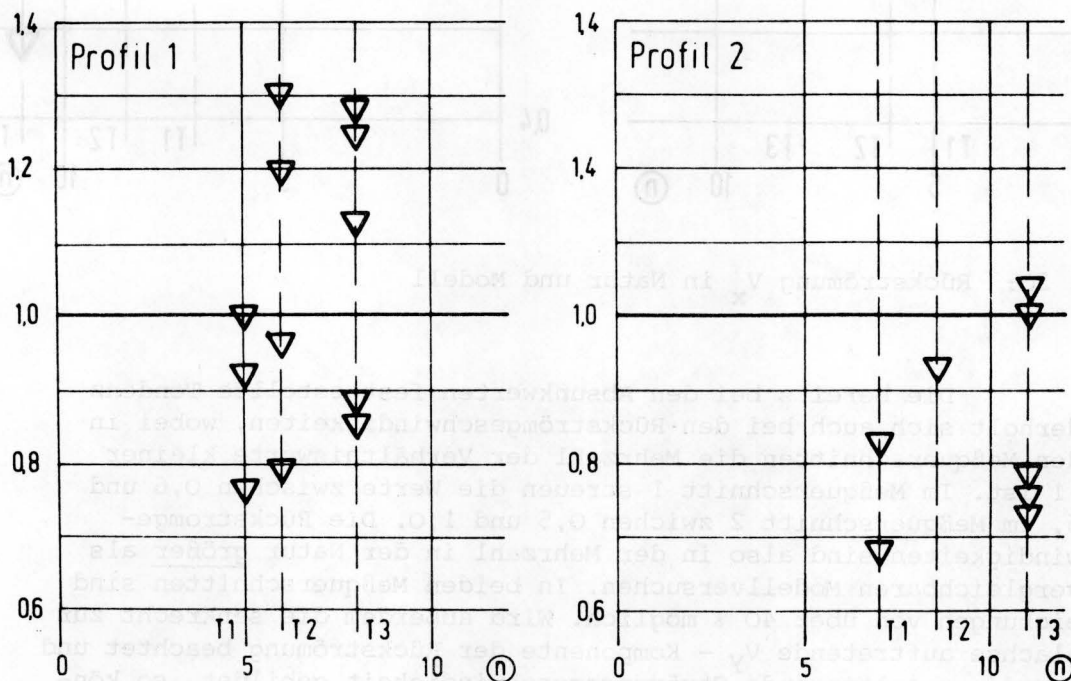


Abb. 19: Absunkwerte z in Natur und Modell

Rückströmung

Für die in der Böschungsmittle (NN - 5 m) ermittelten und gemessenen Rückströmungen V_x parallel zur Kanalachse wird das Verhältnis α_v wie folgt definiert und in der Abb. 20 für beide Meßquerschnitte dargestellt:

$$\alpha_v = \frac{V_x \text{ (Modell)}}{V_x \text{ (Messung)}}$$

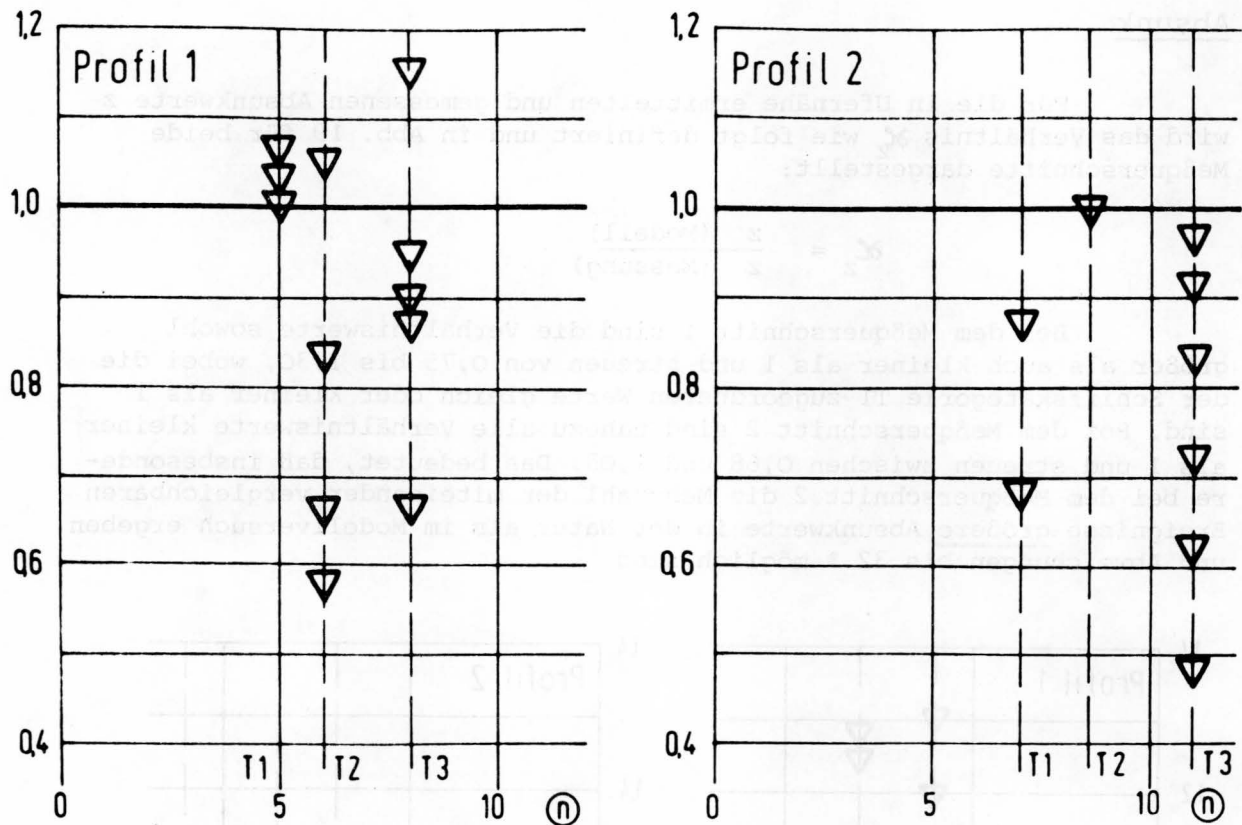


Abb. 20: Rückströmung V_x in Natur und Modell

Die bereits bei den Absinkwerten festgestellte Tendenz wiederholt sich auch bei den Rückströmgeschwindigkeiten, wobei in beiden Meßquerschnitten die Mehrzahl der Verhältniswerte kleiner als 1 ist. Im Meßquerschnitt 1 streuen die Werte zwischen 0,6 und 1,15, im Meßquerschnitt 2 zwischen 0,5 und 1,0. Die Rückstromgeschwindigkeiten sind also in der Mehrzahl in der Natur größer als in vergleichbaren Modellversuchen. In beiden Meßquerschnitten sind Abweichungen von über 40 % möglich. Wird außerdem die senkrecht zur Kanalachse auftretende V_y - Komponente der Rückströmung beachtet und daraus die resultierende Strömungsgeschwindigkeit gebildet, so können in beiden Meßquerschnitten die sich aus den Modellversuchen ergebenden Strömungsgeschwindigkeiten bis zu 60 % überschritten werden.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß sowohl die in Ufernähe gemessenen Absinkwerte als auch die in Böschungsnähe gemessenen Rückströmungsgeschwindigkeiten in beiden Meßquerschnitten zwar durchaus mit den Ergebnissen der Modellversuche in ihrer Größenordnung übereinstimmen, jedoch in Einzelfällen ganz erheblich die der Modellversuche überschreiten können.

Die Ursache dieser Abweichungen dürfte sowohl in der Überschreitung der zulässigen Fahrgeschwindigkeiten als auch in außer-mittiger Fahrweise zu suchen sein, deren Auswirkungen aus den Naturmessungen nicht isoliert werden können.

5.2.3 Schädlicher Schiffsverkehr

Aus den vorstehenden Darlegungen wird deutlich, daß die für die Kanalböschungen maßgebende Schädlichkeit des Schiffsverkehrs nicht allein aus dem Querschnittsverhältnis und der zulässigen Schiffsgeschwindigkeit eingestuft werden kann.

Nach den Modellversuchen ist es durchaus richtig zu folgern, daß die Kanalböschungen mit zunehmender Kanalbreite und zunehmendem Abstand vom planmäßig fahrenden Schiff geringer belastet werden. Die tatsächliche Belastung zeigt jedoch, daß die Verbreiterung des Kanalquerschnitts allem Anschein nach große Abweichungen von der planmäßig zu erwartenden Belastung ermöglicht, die die durch Verbreiterung angestrebte Belastungsminderung wieder aufzehrt.

5.2.4 Abbau der Belastung

Zum Vergleich mit den Naturmessungen wird der Abbau der Belastung durch böschungsnaher Rückströmung unter der Annahme bestimmt, daß die für das jeweilige Kanalprofil mögliche Grenzgeschwindigkeit /6/ (SCHIJF) von den Schiffskategorien T1, T2 und T3 bis zu 75 % ausgenutzt wird.

	Profil 1/C _α			Profil 2/C _β			Abbau (4) : (7)	Lage auf der Böschung		
	V _{gr} km/h	V _w km/h	V _x m/s	V _{gr} km/h	V _w km/h	V _x m/s				
	1	2	3	4	5	6			7	
Modellversuche	T1	16,16	12,12	1,28 1,38	18,33	13,75	0,80 0,80	1,60 1,73	Mitte Fußpunkt	
	T2	17,18	12,89	1,10 1,20	19,17	14,38	0,70 0,71	1,57 1,69	Mitte Fußpunkt	
	T3	19,05	14,29	1,10 1,24	21,34	16,01	0,60 0,60	1,83 2,07	Mitte Fußpunkt	
	im Mittel							1,67 1,83	Mitte Fußpunkt	
	Naturmessungen								1,11-1,84 1,11-2,09	Mitte Fußpunkt
	s. Ziff. 4.2 und Abb. 14									

Tab. 4: Abbau der Belastung durch Rückströmung,
 V_{gr} nach /6/, $V_w = 0,75 \cdot V_{gr}$

Aus der Tab. 4 ergibt sich unter den zuvor getroffenen Annahmen eine gute Übereinstimmung des Belastungsabbaues von altem zu neuem Kanalprofil, sofern die Belastungen mit geringer Ereignishäufigkeit verglichen werden.

5.3 Theoretische Ansätze

Die bei Schiffspassage entstehenden Rückströmungs- und Wellenverhältnisse werden für beide Meßquerschnitte nach theoretischen Ansätzen ermittelt. Hierbei werden sowohl mittige als auch außermittige Fahrten als mögliche Grenzfälle berechnet und mit den Ergebnissen der Naturmessungen verglichen.

5.3.1 Rückströmung

Die Rückströmung wird mit den sie kennzeichnenden Werten wie Absenk und Rückströmungsgeschwindigkeit V_x (parallel zur Kanalachse) nach /1/ für mittige Fahrt und nach /3/ näherungsweise für außermittige Fahrt ermittelt, wobei theoretische und gemessene Werte miteinander verglichen und die sich daraus ergebenden Größtwerte aufgestellt werden.

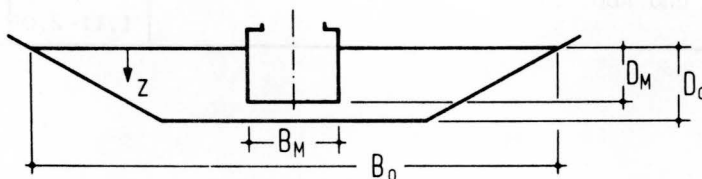
5.3.1.1 Mittige Fahrt

Für mittige Fahrt der Schiffe werden Absenk z und Rückströmungsgeschwindigkeit V_x nach den Beziehungen von /1/ ermittelt, die eine Verbesserung der Beziehungen von SCHIJF /6/ darstellen.

Für die Berechnung gelten die in Tab. 5 angegebenen Parameter und Gleichungen.

$$\left(\frac{V_s}{C_0}\right)^2 = \frac{2\left(\frac{z}{D_h}\right)\left(1 - \frac{1}{n}\right) - \left(\frac{z}{D_h}\right)^2\left(1 - \frac{B_M}{B_0}\right) + \frac{2}{3}\left(\frac{z}{D_h}\right)^3\left(\frac{nD_h}{B_0}\right)}{\left(\frac{D_M}{D_h}\right)^2\left(\frac{1}{n} + \frac{z}{D_h}\frac{B_M}{B_0}\right) + 2\left(\frac{1}{1 - \left(\frac{z}{D_h}\right) + \left(\frac{nD_h}{B_0}\right)\left(\frac{z}{D_h}\right)^2 - \frac{1}{n}} - 1\right)} \quad (A)$$

$$\frac{V_x}{C_0} = \left(\frac{\frac{z}{D_h} - \left(\frac{nD_h}{B_0}\right)\left(\frac{z}{D_h}\right)^2 + \frac{1}{n}}{1 - \frac{z}{D_h} + \left(\frac{nD_h}{B_0}\right)\left(\frac{z}{D_h}\right)^2 - \frac{1}{n}}\right) \cdot \frac{V_s}{C_0} \quad (B)$$



Tab. 5: Parameter und Gleichungen nach /1/

Für die in der 2. Meßreihe erfaßten Einzelereignisse werden nach den Gl. (A) (B) die Rückströmungsgeschwindigkeiten V_x errechnet. Das Verhältnis aus errechneten zu gemessenen Geschwindigkeiten V_x wird in Abhängigkeit vom zugehörigen Querschnittsverhältnis n gebildet und in der Abb. 21 für beide Meßquerschnitte angegeben. Ähnlich wie bei Ziff. 5.2.2.2 sind auch hierbei die gemessenen Werte durchweg größer als die berechneten Werte, wobei die Abweichungen zwischen 1,0 und 0,5 liegen.

$$\alpha = \frac{V_x \text{ (Rechnung)}}{V_x \text{ (Messung)}}$$

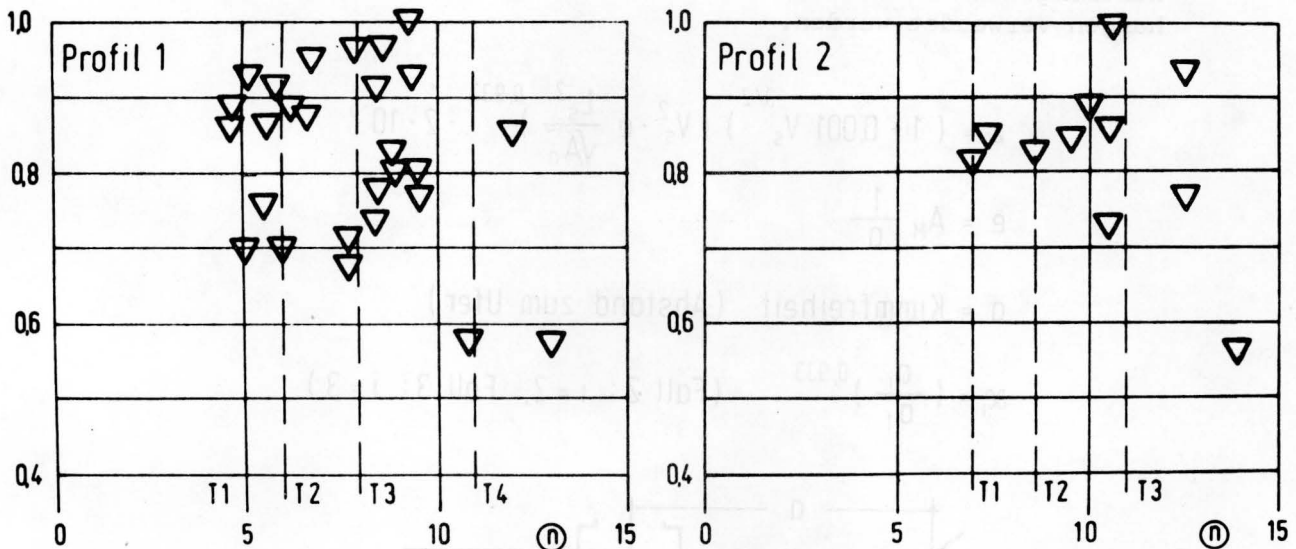


Abb. 21: Rückströmungsgeschwindigkeiten V_x

Für die Schiffskategorien T1 bis T4, deren Abmessungen in der Tab. 2 angegeben sind, ergeben sich bei Schiffsgeschwindigkeiten von $V_s = V_{gr} \cdot 0,75$ zwischen den Belastungen des alten und neuen Kanalprofils folgende Abbauwerte:

Schiff	Profil 1		Profil 2		$\frac{V_x(1)}{V_x(2)}$	$\frac{z(1)}{z(2)}$
	V_x m/s	z m	V_x m/s	z m		
T1	1,38	0,84	0,96	0,61	1,44	1,38
T2	1,09	0,64	0,81	0,48	1,35	1,33
T3	0,91	0,51	0,74	0,46	1,23	1,11
T4	0,49	0,36	0,37	0,31	1,32	1,16

Tab. 6: Abbau der Belastungen bei $V_s = V_{gr} \cdot 0,75$

Im Vergleich zu den in der Tab. 4 angegebenen Abbauwerten, die aus den Modellversuchen und Naturmessungen ermittelt wurden, fällt auf, daß die theoretischen Abbauwerte geringer sind.

5.3.1.2 Außer mittige Fahrt

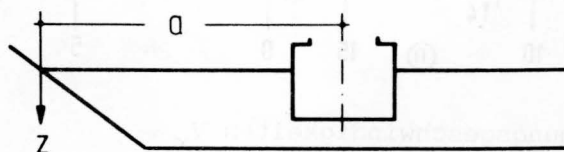
Bei außer mittiger Fahrt eines Schiffes entsteht ein unsymmetrisches Strömungsbild, wobei die dem Schiff näher gelegene Böschung stärker als bei mittiger Fahrt belastet wird. Zur Erfassung des Einflusses der Außer mittigkeit auf das Strömungsbild gibt es bislang nur Näherungen als Ansätze, von denen hier die in /3/ angegebenen Beziehungen verwendet wurden.

$$z = (1 + 0,001 V_s^{3/2}) (V_s^2 \cdot e \frac{L_s^2}{\sqrt{A_0}})^{0,933} \cdot 2 \cdot 10^{-6}$$

$$e = A_M \frac{1}{a}$$

a = Kimmfreiheit (Abstand zum Ufer)

$$\alpha_i = \left(\frac{a_i}{a_1} \right)^{0,933} \quad (\text{Fall 2: } i=2, \text{ Fall 3: } i=3)$$



Tab. 7: Parameter und Gleichungen nach /3/

Die in der Tab. 7 angegebenen Gleichungen beruhen auf Naturmessungen am St. Lawrence - Kanal in Kanada. Aus den empirischen Gleichungen kann der Einfluß der Außer mittigkeit auf die Größe des ufernahen Absunks z ermittelt werden. Hierbei werden folgende drei Fälle für die Schiffskategorien T1 bis T4 berechnet:

- Fall 1: mittige Fahrt
- Fall 2: Fahrt mit geringster Kimmfreiheit
(= Abstand zwischen Schiffskimm und Böschung)
- Fall 3: Fahrt mit geringster Kimmfreiheit am gegenüberliegenden Ufer

Für die Fälle 2 und 3 wurde zwischen Böschung und Schiffsrumpf ein Abstand von 1 m angesetzt. Daraus ergeben sich die in der Abb. 22 angegebenen Grenzabstände.

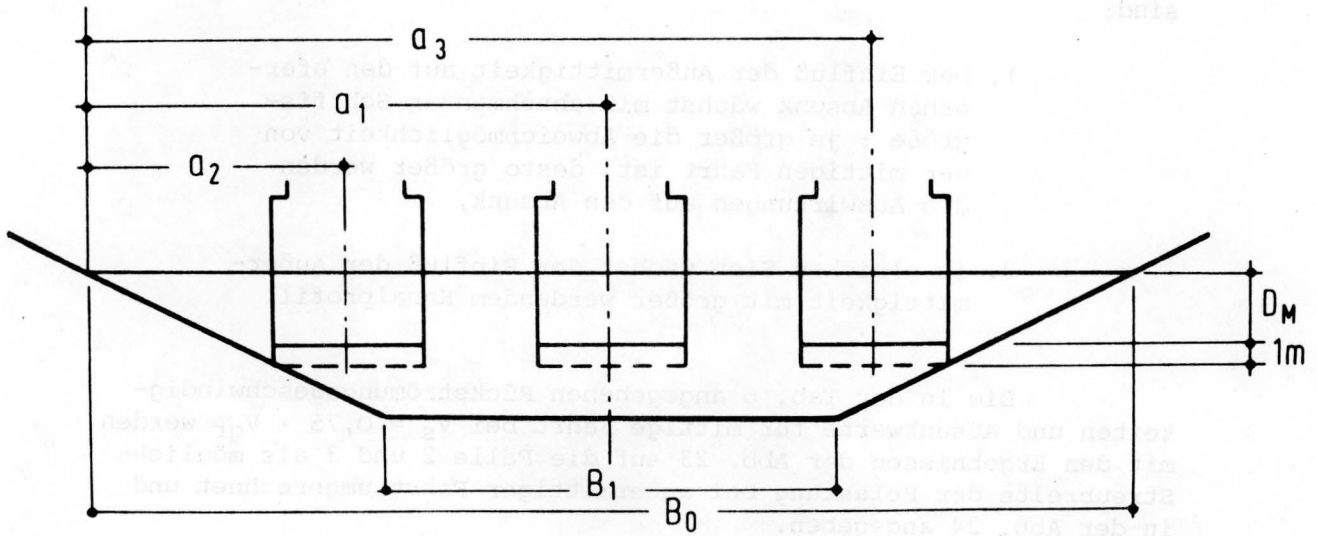


Abb. 22: Abstände vom Ufer

Die auf den bei mittiger Fahrt entstehenden Absenk z_1 bezogene Vergrößerung bzw. Verminderung der Absenkwerte z_2 bzw. z_3 sind in der Abb. 23 für beide Meßprofile dargestellt.

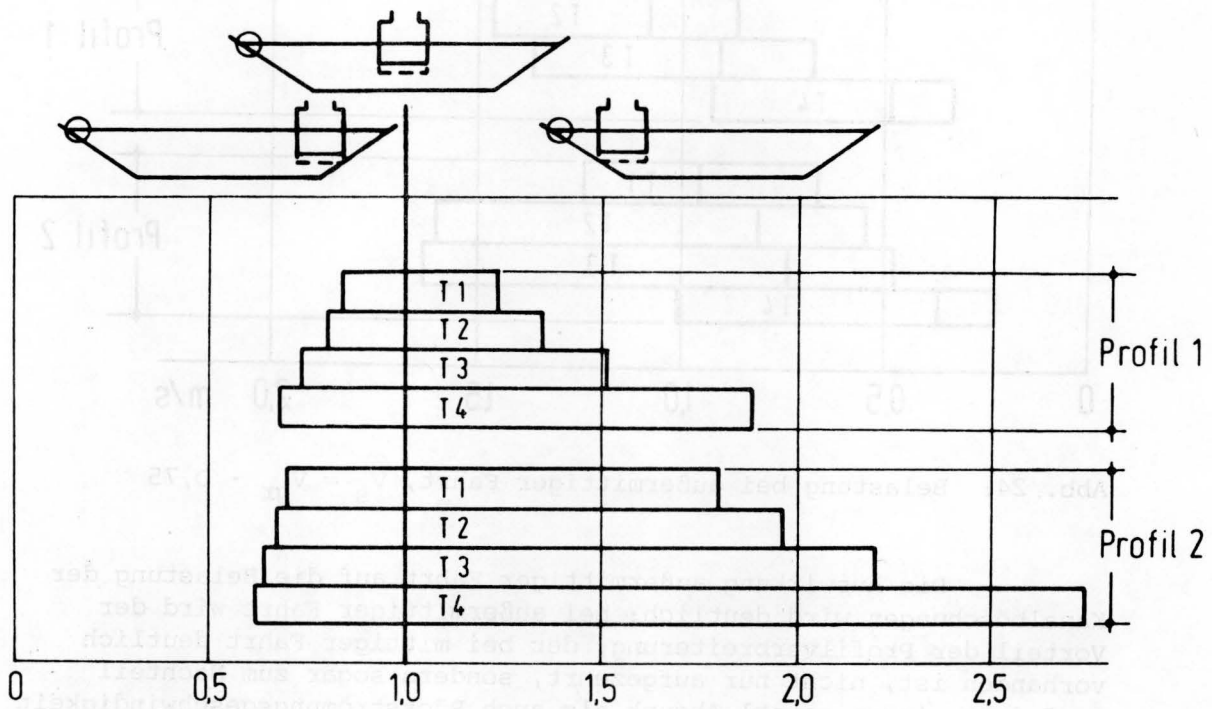


Abb. 23: Absenk bei außermittiger Fahrt

Aus der Abb. 23 werden eine Reihe von markanten Tendenzen deutlich, die für die Belastung der Kanalböschung wichtig sind:

1. Der Einfluß der Außermittigkeit auf den ufernahen Absink wächst mit abnehmender Schiffsgröße : je größer die Abweichmöglichkeit von der mittigen Fahrt ist, desto größer werden die Auswirkungen auf den Absink,
2. im gleichen Sinn wächst der Einfluß der Außermittigkeit mit größer werdendem Kanalprofil.

Die in der Tab. 6 angegebenen Rückströmungsgeschwindigkeiten und Absinkwerte für mittige Fahrt bei $V_s = 0,75 \cdot V_{gr}$ werden mit den Ergebnissen der Abb. 23 auf die Fälle 2 und 3 als mögliche Streubreite der Belastung bei außermittiger Fahrt umgerechnet und in der Abb. 24 angegeben.

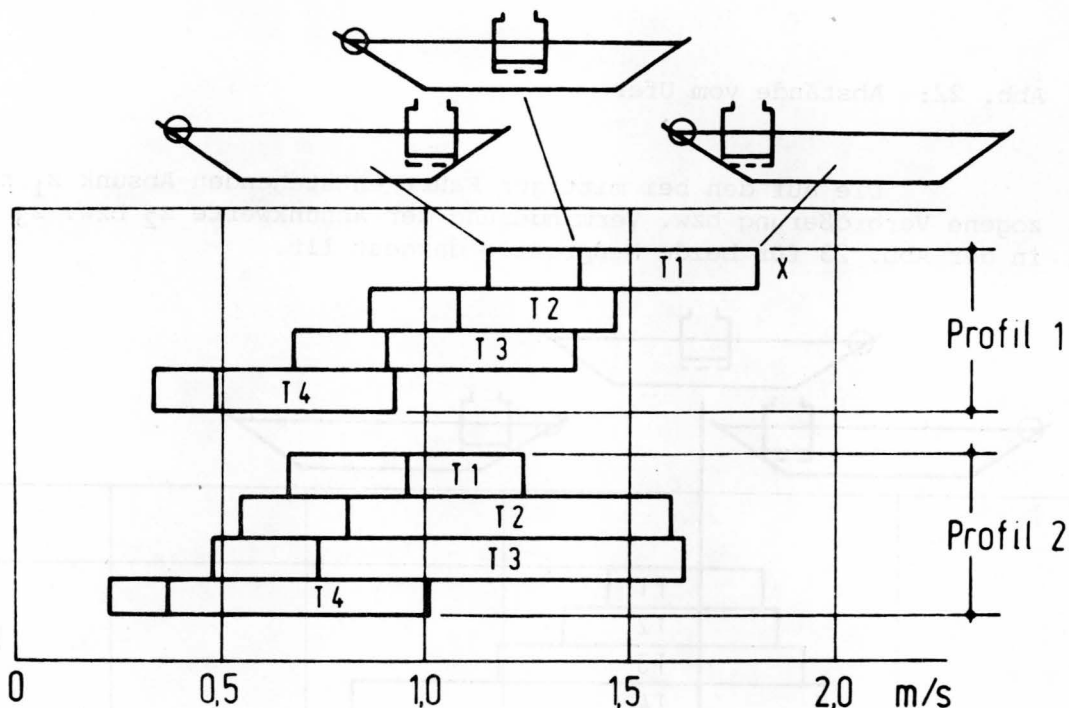


Abb. 24: Belastung bei außermittiger Fahrt, $V_s = V_{gr} \cdot 0,75$

Die Auswirkung außermittiger Fahrt auf die Belastung der Kanalböschungen wird deutlich: bei außermittiger Fahrt wird der Vorteil der Profilverbretterung, der bei mittiger Fahrt deutlich vorhanden ist, nicht nur aufgezehrt, sondern sogar zum Nachteil verändert, indem sowohl Absink als auch Rückströmungsgeschwindigkeit im neuen Profil die entsprechenden Werte des alten Profils erreichen können. Es wird ferner deutlich, daß die kleineren Schiffskategorien (T_3 , T_4) bei außermittiger Fahrt die gleichen Belastungen wie die der größeren Schiffskategorien (T_1 , T_2) bei mittiger Fahrt verursachen können.

5.3.1.3 Größtwerte

Die nach den vorangegangenen Darlegungen für die Belastung der Kanlböschung anzusetzenden Größtwerte wurden unter folgenden Annahmen ermittelt:

1. außermittige Fahrt (Fall 2)
2. Schiffsgeschwindigkeit
 $V_s = 0,75 \cdot V_{gr}$
3. $V_{res} = 1,19 \cdot V_x$ (s. Ziffer 4.2)

Schiff	Profil 1			Profil 2		
	V_x m/s	V_{res} m/s	z m	V_x m/s	V_{res} m/s	z m
T1	1,71	2,03	1,04	1,73	2,06	1,10
T2	1,47	1,75	0,86	1,60	1,90	0,95
T3	1,37	1,63	0,77	1,63	1,94	1,01
T4	0,93	1,11	0,68	1,01	1,20	0,85

Tab. 8: Größtwerte der theoretischen Belastung

Der Vergleich mit den aus den Naturmessungen erhaltenen Größtwerten mit einer Ereignishäufigkeit von 99,9 % ergibt ein nicht einheitliches Bild:

1. Die Rückströmungsgeschwindigkeit V_{res} ist im Profil 1 größer, im Profil 2 etwas geringer als die theoretisch ermittelte.
2. Der Absenk z ist im Profil 1 geringer, im Profil 2 größer als der theoretisch ermittelte.
3. Die Abweichungen betragen zwischen 10 und 23 % vom jeweiligen Größtwert.

Die theoretisch ermittelten Größtwerte der Belastung stimmen damit unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen und der bei derartigen Spitzenbelastungen unumgänglichen Zufälligkeit brauchbar mit denen der Naturmessungen überein.

5.3.2 Wellen

Die von Schiffen verursachten Bug- und Heckwellen werden nach /4/ für die Schiffskategorien T₁ bis T₄ mit einer zusätzlichen Kategorie T₅ für beide Meßquerschnitte für mittige Fahrt berechnet. Für den Einfluß der Außermittigkeit wird ein Näherungsverfahren angewendet.

5.3.2.1 Mittige Fahrt

Die in /4/ angegebenen Gleichungen sind durch eine Reihe von Naturmessungen belegt und können daher für den vorliegenden Vergleich verwendet werden.

$$H = \mathcal{L} \cdot \frac{V_s^2}{2g} \quad (\text{Wellenhöhe am Schiff})$$

$$H' = H \cdot \beta \quad (\text{Wellenhöhe am Ufer})$$

$$\mathcal{L} = 2,5 \left(1 - \left(1 - \frac{1}{4,2+n} \right) \left(\frac{n-1}{n} \right)^2 \right)$$

$$\beta = \frac{2 + \sqrt{B_0 / L_s}}{1 + \sqrt{B_0 / L_s}}$$

Tab. 9: Parameter und Gleichungen nach /5/

Unter Annahme einer wellenbildenden Schiffsgeschwindigkeit von 8 km/h werden die ufernahen Wellenhöhen H' für beide Meßprofile mit einer Schiffsgeschwindigkeit von $V_s = 0,75 \cdot V_{gr}$, die als oberste Grenze der Wirtschaftlichkeit angesehen wird, berechnet und in der Tab. 10 angegeben.

Schiff	Profil 1 H' (m)	Profil 2 H' (m)	
T 1	0,15	0,23	$V_s = 0,75 \cdot V_{gr}$
T 2	0,20	0,27	
T 3	0,26	0,35	
T 4	0,37	0,41	
T 5	0,35	0,44	

Tab. 10: Wellenhöhen H' in Ufernähe

5.3.2.2 Außer mittige Fahrt

Der Einfluß der außer mittigen Fahrt auf die Höhe der Bug- und Heckwellen in Ufernähe ist für Wasserstraßen mit eindeutig begrenztem Querschnitt systematisch bisher nur grob untersucht worden.

Die komplexen Beziehungen zwischen Form, Geschwindigkeit und Außer mittigkeit des Schiffs einerseits und den Abmessungen des Kanalprofils andererseits wirken sich bei außer mittiger Fahrt und damit unsymmetrischen Strömungsverhältnissen noch unübersichtlicher als bei mittiger Fahrt aus. Als Trend ist jedoch deutlich, daß die Wellenhöhe sowohl unmittelbar am Schiff als auch in Ufernähe bei Fahrt eines Schiffes in einem trapezförmigen Kanalprofil mit abnehmendem Abstand vom Ufer und damit abnehmender Wassertiefe anwächst. Die Zunahme der Wellenhöhe entspricht dabei der gleichzeitigen Zunahme des Strömungswiderstandes und des Absunks. Zur Abschätzung des Einflusses der Außer mittigkeit auf die Vergrößerung der Wellenhöhe H' wird nach /9, 10, 11/ das Verhältnis der Tiefenzahlen F_h gebildet und als Vergrößerungsfaktoren angesetzt:

$$F_h = \text{Tiefenzahl} = \frac{v_s}{\sqrt{g \cdot D_h}}$$

$$F_{h1} = \text{Tiefenzahl des bei mittiger Fahrt vorhandenen Regelprofils (Fall 1)}$$

$$F_{h2} = \text{Tiefenzahl des bei außer mittiger Fahrt angenommenen, fiktiven eingeschränkten Profils (Fall 2)}$$

$$\delta_{e_H} = \left(\frac{F_{h2}}{F_{h1}} \right)^2 = \frac{D_{h1}}{D_{h2}}$$

$$H'_2 = H'_1 \cdot \delta_{e_H}$$

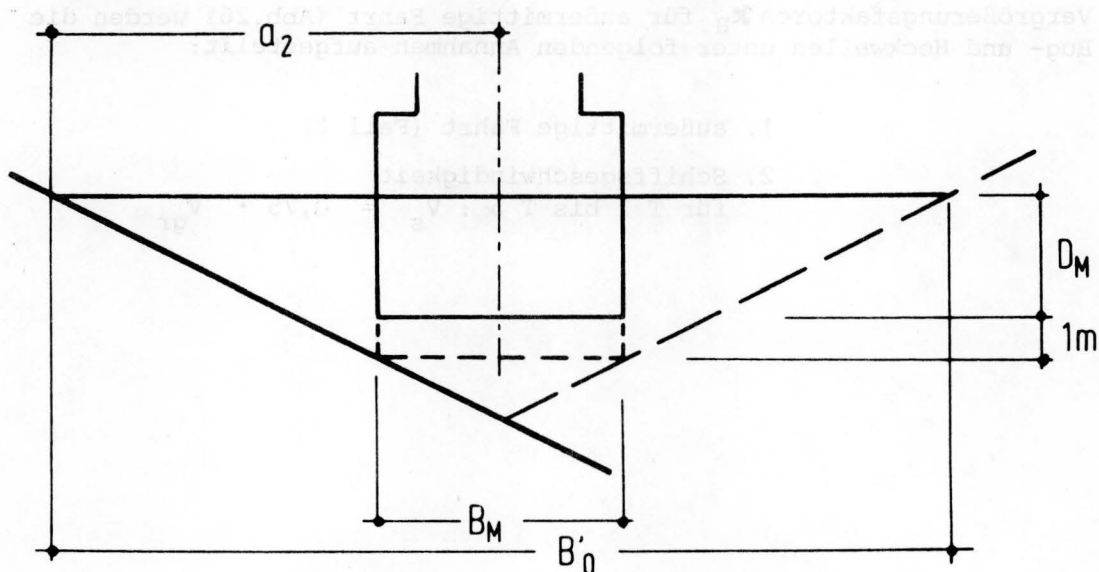


Abb. 25: Eingeschränktes Profil bei außer mittiger Fahrt

In der Abb. 26 sind die Vergrößerungsfaktoren α_H für beide Meßprofile angegeben, die in ihrer Größe und Tendenz denen der Absunkwerte in Abb. 23 entsprechen. Im Gegensatz zu den Vergrößerungswerten für Absunk und Rückströmung in Abb. 23 + 24 sind die Unterschiede zwischen beiden Profilen jedoch weniger ausgeprägt.

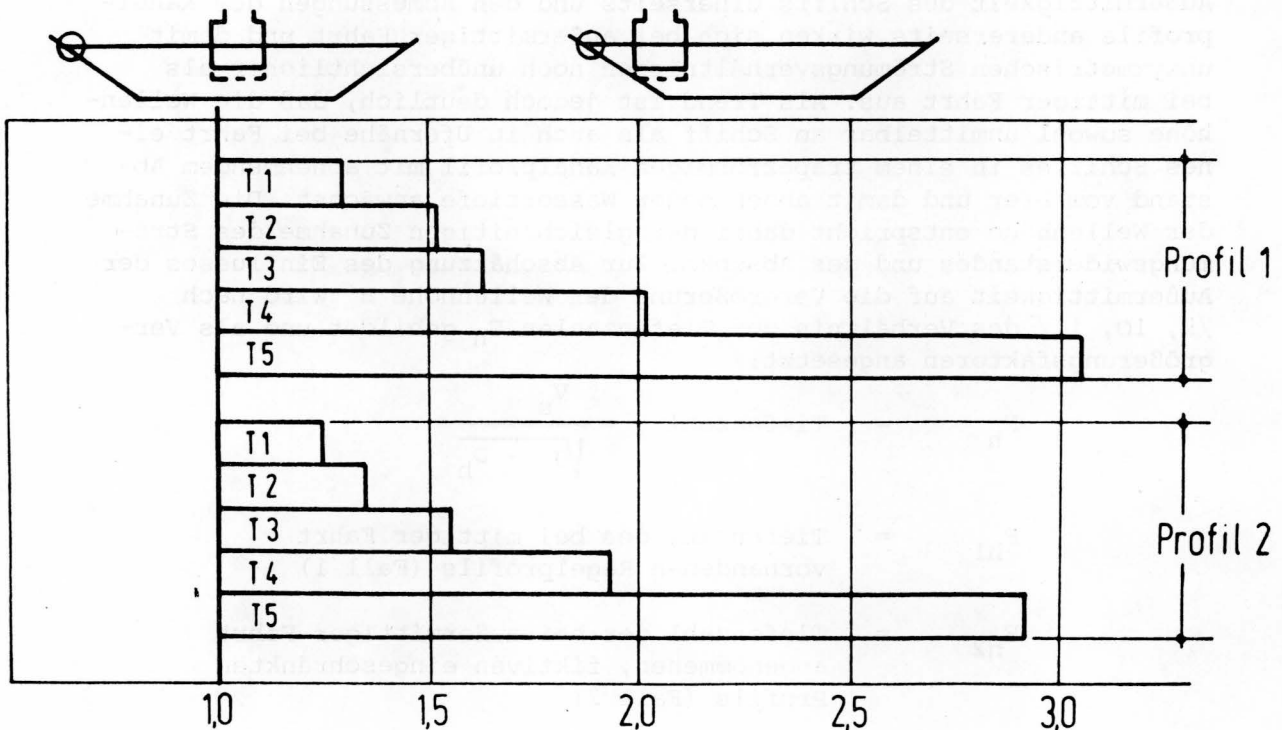


Abb. 26: Vergrößerungsfaktoren α_H für Wellenhöhen H'

5.3.2.3 Größtwerte

Aus den Wellenhöhen für mittige Fahrt (Tab. 10) und den Vergrößerungsfaktoren α_H für außermittige Fahrt (Abb.26) werden die Bug- und Heckwellen unter folgenden Annahmen aufgestellt:

1. außermittige Fahrt (Fall 2)
2. Schiffsgeschwindigkeit
für T 1 bis T 5 : $V_s = 0,75 \cdot V_{gr}$

Schiff	Profil 1 H' (m)	Profil 2 H' (m)
T 1	0,20	0,29
T 2	0,30	0,36
T 3	0,42	0,54
T 4	0,74	0,79
T 5	1,06	1,28

Tab. 11: Wellenhöhen in Ufernähe bei außermittiger Fahrt

Diese Wellenhöhen stimmen in ihrer Größenordnung gut mit den Ergebnissen der Naturmessungen überein.

6. Folgerungen

Aus den Naturmessungen der 1. und 2. Meßreihe sind Ergebnisse gewonnen worden, die bei mittleren Belastungen durchweg mit den Modellversuchen und den theoretischen Ansätzen übereinstimmen. Es ergeben sich jedoch für die Beanspruchung des Kanalquerschnitts maßgebliche Unterschiede, wenn die in den Naturmessungen erfaßten Spitzenbelastungen mit geringer Ereignishäufigkeit berücksichtigt werden. Die Spitzenbelastungen beinhalten den üblichen Schiffsverkehr mit allen darin zwangsläufig enthaltenen Zufälligkeiten wie Form, Größe, Geschwindigkeit und Uferabstand der Schiffe. Daraus ergeben sich Folgerungen für die Unterwasserböschungen und insbesondere für die Ufersicherungen.

6.1 Unterwasserböschungen

Die Unterwasserböschungen werden bei mittiger Fahrt der Schiffe und bei Einhaltung der zulässigen Geschwindigkeiten im ausgebauten Profil deutlich geringer als im alten Profil durch Rückströmung belastet. Diese planmäßige Belastungsminderung wird jedoch durch die im ausgebauten Profil größere Variationsbreite des Verkehrsablaufs zu einem erheblichen Teil aufgezehrt, so daß sowohl im alten als auch im neuen Profil 20 % aller verkehrenden Schiffe eine Rückstromgeschwindigkeit von 0,50 m/s und mehr verursachen.

Es ist weiterhin bemerkenswert, daß die Rückströmung im Bereich der Böschungen eine erhebliche Pulsation aufweist und darin wesentlich große Beschleunigungen auftreten. Eine quantitative Beurteilung des sich daraus ergebenden Böschungsabtrags sowie der langfristig anzusetzenden Böschungstabilität ist jedoch quantitativ nicht analog zu dem in den Modellversuchen gewählten Verfahren möglich. Hierzu sind weitere Naturbeobachtungen in den ausgebauten Profilen notwendig.

6.2 Ufersicherungen

Die Ufersicherung erstreckt sich wegen der großen Tiefenlage der Kanalsohle auf den obersten Bereich der Böschung. Sie reicht bis 2 m unter den Wasserspiegel und sichert damit den durch Bug- und Heckwellen unmittelbar gefährdeten Bereich.

6.2.1 Vorhandene Ausbildung

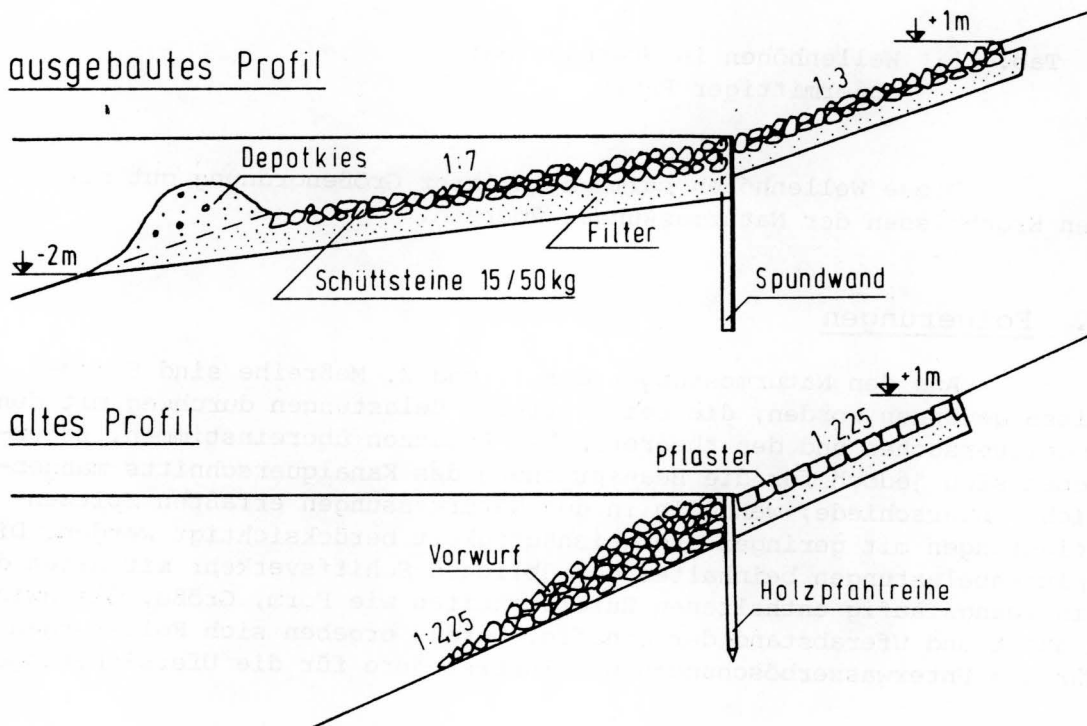


Abb. 27: Ufersicherungen

Die Ufersicherung besteht im alten Profil planmäßig aus Pflasterung oberhalb des Wasserspiegels, die sich gegen eine Holzpfahlreihe abstützt. Unterhalb der Pfahlreihe befindet sich eine Steinschüttung. Die Neigung soll 1 : 2,25 betragen.

Im neuen Profil besteht die Ufersicherung aus einer Steinschüttung, die unterhalb des Wasserspiegels 1 : 7, oberhalb des Wasserspiegels 1 : 3 geneigt ist.

Ungeachtet der Ausbildung der Filterschicht sowie der Standsicherheit des Deckwerksfußes wurde untersucht, inwieweit die Deckschichten aus losen Schüttsteinen den Belastungen aus Rückströmung und Wellen standhalten können, wobei für beide Ufersicherungen die planmäßige Ausbildung zugrunde gelegt wurde.

Für die Steinschüttungen wurden Schüttsteine mit 15 bis 50 kg Einzelgewicht und einer Trockenrohdichte von $2,65 \text{ kg/dm}^3$ angesetzt. Nach /7/ ergibt sich daraus eine für die Steinschüttung repräsentative Steingröße von $D_r = 38 \text{ cm}$, die zur Beurteilung der Widerstandsfähigkeit gegen Überströmung und Wellen verwendet wurde. Nach den Bemessungsdiagrammen für lose Steinschüttungen und den aus den Naturmessungen gewonnenen Belastungen ergeben sich für die Ufersicherungen in den beiden Meßprofilen die in der Tab. 12 angegebenen Sicherheiten.

Ereignishäufigkeit $\Sigma\%$	Profil 1		Profil 2	
	Strömung 1 : 2,25	Wellen 1 : 2,25	Strömung 1 : 7	Wellen 1 : 3
80	6,91	6,33	19,00	6,33
90	2,92	2,92	10,86	3,30
98	1,36	1,41	5,85	1,41
99,5	0,84	1,09	3,17	1,00
99,9	0,58	0,81	2,24	0,74
Sicherheit = $\frac{D_{r, \text{vorhanden}}}{D_{r, \text{erforderlich}}}$				

Tab. 12: Sicherheit der Steinschüttungen gegen Überströmung und Wellen

Es wird deutlich, daß die Steinschüttungen in beiden Profilen im planmäßigen Zustand durch Bug- und Heckwellen nahezu in gleichem Maß beansprucht werden und Spitzenbelastungen nicht gewachsen sind. Dieses wird durch Beobachtungen bestätigt, bei denen auch im neuen Profil einzelne Schüttsteine oberhalb der eigentlichen Steinschüttungen aufgefunden wurden.

Die Steinschüttung im neuen Deckwerk besitzt jedoch gegen Überströmung auch bei Spitzenbelastung ausreichende Sicherheit, während die des alten Profils den Spitzenbelastungen nicht gewachsen ist. Das Verhältnis verschlechtert sich weiter ganz erheblich, wenn die tatsächlich vorhandenen steileren Böschungsneigungen im alten Profil angesetzt werden.

Aus diesen Standsicherheitsberechnungen ergibt sich, daß die Ausbildung der Ufersicherung auch im neuen Profil nur eine begrenzte Widerstandsfähigkeit besitzt, die zur Aufnahme der möglichen und nachgewiesenen Spitzenbelastungen nicht ausreicht. Dieses gilt insbesondere für den Bereich des Wellenangriffs, der mit mindestens 50 cm ober- und unterhalb des Wasserspiegels anzusetzen ist.

6.2.2 Verbesserte Ausbildung

Abgesehen von dem für den Bestand eines durchlässigen Deckwerks wichtigen filtergerechten Aufbau, bei dem die Filterschicht auf Boden und Deckschicht abzustimmen ist, kann die Widerstandsfähigkeit von Deckwerken aus Steinschüttungen in der in der Abb. 27 angegebenen Form durch Verklammerung mit Asphaltmastix oder durch Verwendung von Schüttsteinen mit größerer Rohdichte verbessert werden, wie es in einigen Bereichen bereits ausgeführt worden ist. Derartige Deckwerksbauweisen sind jedoch grundsätzlich in ihrem Bestand gefährdet, wenn der Deckwerksfuß erodiert und die Böschungsneigung im Deckwerksbereich steiler wird. In Anbetracht von Größe und Verlauf der Rückströmung und der am Deckwerksfuß infolge des un stetigen Übergangs entstehenden Turbulenz sind alle derartigen Deckwerke gefährdet und bedürfen einer ständigen Kontrolle und Unterhaltung.

Nach neueren Erfahrungen können Deckwerke in zugfester und flexibler Ausbildung in hängender Bauweise mit Lastabtragung zu einer am oberen Rand des Deckwerks befindlichen Verankerung den vom Schiffsverkehr ausgehenden Belastungen besser widerstehen, da sie bei entsprechender Bemessung und Ausbildung sowohl Spitzenbelastungen mit lokaler Angriffsfläche aufnehmen als auch sich möglichen Veränderungen der unbefestigten Böschung schadlos anpassen können.

		Ereigniswahrscheinlichkeit $\Sigma\%$				
		80	90	98	99,5	99,9
Rückströmung	V_x m/s	0,30	0,50	0,80	1,20	1,45
	V_y m/s	0,20	0,32	0,50	0,78	0,95
	1) V_{res} m/s	0,40	0,60	1,10	1,45	1,80
Absunk	z m	0,15	0,28	0,50	0,68	0,85
	2) dz/dt m/s	-	-	-	-	0,15
Wellenhöhe	H' m	0,15	0,30	0,67	0,94	1,20
		1) resultierende Strömungsgeschwindigkeit in einem Winkel von 45° böschungsbwärts gerichtet				
		2) größte Absunkgeschwindigkeit				

Tab. 13: Belastungsansätze für Uferdeckwerke im ausgebauten Profil des NOK

Für die Bemessung von Deckwerken zur Ufersicherung des neuen Kanalprofils ergeben sich aus den erläuterten Untersuchungen die in der Tab. 13 angegebenen Belastungsansätze, deren Größe sich nach der Ereigniswahrscheinlichkeit richtet.

7. Begriffe / Bezeichnungen

1. Kanalquerschnitt

A_O	(m ²)	Querschnittsfläche
B_O	(m)	Breite im Wasserspiegel
B_1	(m)	Breite an der Sohle
U_O	(m)	benetzter Umfang
D_h	(m)	hydraulischer Radius $D_h = A_O/B_O$
m	(-)	Neigung der Uferböschungen
C_O	(m/s)	Stauwellengeschwindigkeit $C_O = \sqrt{g \cdot D_h}$
n	(-)	Querschnittsverhältnis $n = A_O/A_M$

2. Schiff

A_M	(m ²)	Querschnittsfläche des eingetauchten Hauptspants
B_M	(m)	Breite des eingetauchten Hauptspants
D_S	(m)	Tiefgang
L_S	(m)	Länge
V_S	(m)	Geschwindigkeit über Grund
a	(m)	Abstand vom Ufer (Kimmfreiheit)
V_{gr}	(m/s)	Grenzgeschwindigkeit nach SCHIJF
V_w	(m/s)	größte wirtschaftliche Geschwindigkeit

3. Rückströmung

z	(m)	Absunk in Ufernähe
V_x	(m/s)	Rückstromgeschwindigkeit parallel zur Kanalachse
V_y	(m/s)	Rückstromgeschwindigkeit senkrecht zur Kanalachse
V_{res}	(m/s)	resultierende Rückstromgeschwindigkeit aus V_x und V_y
b	(m/s ²)	Beschleunigung der Rückströmung

4. Wellen

H	(m)	Wellenhöhe in Schiffsnähe
H'	(m)	Wellenhöhe in Ufernähe
V_{so}	(m/s)	Wellenbildende Schiffsgeschwindigkeit (Mindestgeschwindigkeit)

5. Schüttsteine

D_r	(cm)	repräsentative Steinlänge (Hauptdiagonale)
-------	-------	--

8. Literatur

- /1/ BOUWMEESTER, J.,
KAA, E.J. van de,
NUHOFF, H.A.,
ORDEN, R.G.J. von : Int. Schiffahrtskongreß Leningrad
1977, Section I, Subject 3
- /2/ FLÜGEL, H. : Das Programm zur Sicherung des
Nord-Ostsee-Kanals
1. Teil: Seine technischen Grund-
lagen
Der Bauingenieur, 6/1972
2. Teil: Ausführung und Stand der
Arbeiten
Der Bauingenieur, 8/1972
- /3/ GELENCSEK, G.J. : Drawdown surge and slope protection,
experimental results.
Int. Schiffahrtskongreß Leningrad
1977, Section I, Subject 3
- /4/ GLAZIK, G. : Theoretische und modellmäßige Unter-
suchungen über die Wechselbeziehungen
zwischen Seeschiff und Seekanal.
Mitteilungen der Forschungsanstalt für
Schiffahrt, Wasser- und Grundbau,
Berlin, Schriftenreihe Wasser- und
Grundbau, Heft 2/1962
- /5/ HAY, D.: : Ship Waves in Navigable Waterways,
Proceedings of Eleventh Conference on
Coastal Engineering, London,
September 1968, vol. II - part IV
- /6/ JANSEN, P.Ph.,
SCHIJF, J.B. : Int. Schiffahrtskongreß Rom 1953,
Section I, Communication 1
- /7/ KNISS, H.G. : Bemessung von Schüttstein-Deckwerken
im Verkehrswasserbau, Teil 1: Lose
Steinschüttungen, Mitteilungsblatt
der Bundesanstalt für Wasserbau,
Nr. 42/1977

- /8/ KUNZ, H. : Schiffsschwall und Sunk im seitlich einer Wasserstraße angeordneten Becken. Mitteilungen des Franzius-Institutes der TU Hannover, Heft 46/1977
- /9/ MARCHAL, J.,
SPRONCK, R. : Comportement des bateaux convois poussees, lors du passage, du depassement (trematage) ou du croisement dans un canal rectiligne. Int. Schiffahrtskongreß Leningrad 1977, Section I, Subject 3
- /10/ SCHMIDT-STIEBITZ, H. : Die Wellenbildung am Verdrängungsfahrzeug, Schiff und Hafen, Nr. 12, 1962
- /11/ SCHUSTER, S. : Untersuchungen über Strömungs- und Widerstandsverhältnisse bei der Fahrt von Schiffen in beschränktem Wasser, Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft 1952
- /12/ ' Wasser- und Schiffahrts-
direktion Kiel, Unter-
suchungsstelle Nord-
Ostsee-Kanal : Rahmenentwurf Sicherung des Nord-Ostsee-Kanals, Bemessung des Kanalquerschnitts 15.12.1966, unveröffentlicht

der bisher erschienenen Hefte des Mitteilungsblattes der Bundesanstalt für Wasserbau

Nr./Jahr	Verfasser	T i t e l
1/53	Jambor Burghart Türk Zweck Canisius Liebs Schleiermacher Boos	Erhöhung d.festen Wehrschwelle bei gleicher hydraul. Leistung Die Verteilung der Abflußmenge über den Querschnitt Untersuch. üb.d. Geschiebepbeweg. in Flüssen u. Stauanl.D.cl.-akust.Verf. Flach- und Pfahlgründungen in weichem tonigem Schluff Aus der Arbeit der Bundesanstalt Ausbau der Unteren Hunte Sicherung d.Schiffahrtsrinne in d.Donau im Bereich d.Innmündung... Vom wasserbaulichen Versuchswesen in England
2/53	Canisius Pichl Burghart/Gehrig Davidenkoff Sagawe Zweck	Technische Entwicklung im Wasserbau Der Ortungstachygraph und seine Anwendung Beitrag zur Frage d.Geschwindigkeitsverteilung in offenen Gerinnen Grundwasserzufluss zu Brunnen und Gräben Der Dehnungsmeßstreifen als Meßelement b.erd-u.wasserbaul.Modellversuchen Zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Pfählen (I)
3/54	Canisius Wehrkamp Liebs Schleiermacher Zweck Meenen	Die Bodenmechanik im Dienste des Wasserbaues Ein neues Flußprofilmeßgerät Abzweigung einer verhältnismäßigen Teilwassermenge an einem Meßwehr Gestaltung schräg angeströmter Brückenpfeiler Zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Pfählen (II) Reiseeindrücke von einem Einsatz der Bundesanstalt in Venezuela
4/54	Jambor Herr Wehrkamp Davidenkoff Zweck	Die Gestaltung v.Kanalabzweig.unter bes.Berücks.v.Schwingungen im Kanal Spülvermögen b.Verschlamm.u.Geschiebeablager.in einem Wehrfeld mit höckerartig erhöhter Wehrschwelle Das Flußprofilzeichengerät von Dr. Fahrentholz Gefährdung der Stauwerke bei Unterströmung Zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Pfählen (III)
5/55	Canisius Niebuhr Schleiermacher Gehrig Poggensee Zweck/Davidenkoff	Die Bundesanst.f.Wasserbau. Ein Rückblick auf ihre Entwickl.1948-1955 Kritische Betrachtungen zur Frage der Modellrauigkeit (I) Wasserspiegel-aufnahmen in Flußkrümmungen u.Wasserspiegelquergefälle Überprüfung hydrographischer Angaben durch den Modellversuch Die Grundformel zur Bestimmung der Schleusenleistung Die versuchstechn.Verf.z.Berechn.d.Netzes ein.Grundwasserströmung
6/56	Schleiermacher Gehrig Wigand Zweck/Davidenkoff Poggensee	Geschwindigk-Verlager.i.Querschn.mittels Buhnen oder Leitwerken Messung und Berechnung von Kräften an Schiffen im Modell Verhinder.v.Geschiebeablager.vor d.unt.Schleusenvorhöfen v.Staustufen Über die Zusammensetzung von Filtern Anwendung und Kritik von Rammformeln
7/56	Gehrig Zweck/Davidenkoff Schleiermacher Niebuhr Davidenkoff Liebs Jambor	Strömungsmessung mit einem Kreiszyylinder Untersuch.v.Sicherungsmaßnahmen an Flußdeichen durch Modellversuche Einfache Darstell.d.zeitl.Ablaufes v.Anschwellungen in Wasserläufen/Tidegeb. Beitr.z.Erfass.d.Räumkraft ein.ungl.förm.Ström.unter bes.Berücks.d.Verhält.i. Angenäh.Ermittl.d.Grundw.Zufl. zu ein.in ein.durchl.Boden ausgehob.Grube Abflußbeiwerte μ für grasbewachsene Deiche Formgebung des Trennpfeilers in Flußkraftwerken
8/57	Yalin Davidenkoff	Die theoretische Analyse der Mechanik der Geschiebepbewegung Durchsickerung durch Deiche und Erddämme (I)
9/57	Zweck/Davidenkoff Davidenkoff Schleiermacher Yalin	Auftrieb unter Wehren auf durchlässigem Untergrund Wirkung der Sickerströmung auf d.Standsicherheit eines Erddammes (II) Vers.ein.morphol.Begründ.v.Rauhigk-beiwert.f.d.Berechn.d.Wassersp-gefälles Ermittlung des Querschnittes mit maximalem Geschiebetransportvermögen
10/58	Magens	Unters.d.Ursachen und des Vorganges d.Verschlickung der Schleusenvor- höfen zu Brunsbüttelkoog
11/58	Rubbert Gruhle Gehrig Davidenkoff	Die Vertiefung der Tideflüsse und ihre Problematik Verformungsmessungen an den Spundwänden der Schleuse Friedrichsfeld Der Verbau von Übertiefen und die Erhaltung des Fahrwassers Durchsickerung durch Deiche und Erddämme (Schluss aus 8 und 9)
12/59	Zweck/Dietrich Zweck Rubbert	Zur Ermittlung der Verteilung des Coulomb'schen Erddruckes Versuchsergebnisse über die Zusammensetzung von Filtern Die Tiderechnung als Problem der Numerischen Analysis
13/59	Zweck/Dietrich Felkel Steinfeld	Die Berechnung verankerter Spundwände in nicht bindigen Böden nach ROWE Der Schwellbetrieb der Flußkraftwerke Über den Erddruck an Schacht- und Brunnenwandungen
14/60	Felkel Davidenkoff Gehrig/Herr	Walzenbucht u.Ringgraben als Mittel z.Verminder.d.Schwebst- ^{höfen} ablager.in Fluß- Neue Forschungsarb.ü.d.Konsolidierung wassergesättigter bindiger Böden Beitrag zur Ermittlung des Wasserdruckes auf gekrümmte Flächen
15/60	Jambor Felkel Felkel	Lage und Gestaltung der Schleusen und ihrer Zufahrten Wasserspiegelmessungen an einer festen Wehrschwelle Gemessene Abflüsse in Gerinnen mit Weidenbewuchs
16/61	Felkel Davidenkoff Dietrich	Die Modelluntersuchungen für zehn Moselstaustufen Sickerverluste bei Durch- und Unterströmung von Deichen Schnittgröß.u.Randspann.i.d.Sohlfuge ein.Kai-od.Stützmauer v.rechteck.Quer- schnitt
17/62	Kleinschmidt/Schröder	Sonderheft Korrosionsversuche
18/62	Felkel Vollmer Felkel Davidenkoff	Der Einsatz frei fahrender Modellschiffe beim flußbaulichen Versuch Erfahr. an ein.Tidemodell m.bewegl.Sohle u.Vergl.zw.Modell-u.Naturmessungen Ein einf.Rundbecken z.Mischen v.Wasser u.Koagulieren v.Schmutzstoffen Über die Berechnung der Sickerverluste aus Kanälen
19/63	Zweck/Dietrich Jansen Felkel Jänke	Modellvers.m.steifen Dalben in bind.Böden bei plötzl.Belastung Die Neukonstruktion v.Fahrstühlen f.Kraftmessungen an Modellschiffen Die Neckartalplanung im Raume Heilbronn Überprüfung der Brauchbarkeit von Pfahlformeln anhand von Probelastungen und Messungen an Stahlpfählen
20/64	Franke	Die Strömungsvorgänge bei unvollkommenen Brunnen

Nr./Jahr	Verfasser	T i t e l
21/64	Naujoks Dietrich Liebs Franke	Untersuchungen zum Nachweis eines spezifischen Sättigungsgrades Zur Berechnung der Tragfähigkeit starrer Dalben in homogenen Böden Die Abschirmung von Seehäfen gegen Seegang D., Einfl. d. Neig. winkels d. wasserführ. Schicht u. einer partiell. Auskleid. des durchläss. Brunnenschachtes auf d. Zuflußmenge zu einem artes. Brunnen
22/65	Rubbert Jambor Davidenkoff/Franke	Tidewellenberechn. nach d. Universalprogr. d. BAW "... Oberelbe" Schutz der Sohle in Flüssen Unters. d. räuml. Sickerström. in eine umpund. Baugrube in offen. Gewässern
23/66	Dietrich Ruck Dietz Felkel/Canisius	Modellvers. m. biegsamen langen Dalben unt. wiederh. Belast. im Sand Untersuchung d. Sandwanderungsverhältnisse im Küstenber. zw. Stohl u. Brauner ^{Berg} Einfl. d. Saugschl. beaufschlag. b. Kaplansturbin. auf d. Schiff.-verhältnisse... Elektronische Berechnung von Wasserspiegellagen
24/66	Völpel/Samu Schnoor Zweck Davidenkoff/Franke	Reliefänderungen i. d. Tidestromrinne des Wangerooger Fahrwassers... Ü. neue Verfahr. z. Berechn. d. Reflexionsdr. v. Wasserwellen auf senkr. Wände Baugrunduntersuch. m. Sonden gem. DIN 4094 m. Auswertungsmöglichkeiten Räumliche Sickerströmung in eine umpundete Baugrube im Grundwasser
25/67	Schnoor Davidenkoff Franke Schulz/Ruck Lambert	Üb. versch. Verfahr. z. Berechn. d. Wellenangr. Kräfte auf senkr. Pfähle u. Wände Dimensionierung von Brunnenfiltern Die Wirkungen d. Wassers auf d. Standsicherheit von Böschungen Die Sandwanderungsverhältnisse an d. Nordküste d. Insel Fehmarn.... Die Erscheinung der Gezeiten und ihre Erklärung
26/68	Schnoor Samu Ruck	Üb. versch. Verfahr. z. Berechn. d. Wellenangr. Kr. auf senkr. Pfähle und Wände Ergebnisse der Sandwanderungsuntersuchungen in d. südlichen Nordsee Auswirk. d. geol. Verhältn. im Küstengeb. auf Baumaßn. im Wasserbau
27/68	Schäle/Kuhn/ Schröder/Hofmann	Kanal- und Schifffahrtsversuche Bamberg 1967
28/69	Jänke Felkel	Untersuch. d. Zusammendrückbark. u. Scherfestigk. v. Sanden u. Kiesen... Der Weg zum vollständigen mathematischen Flußmodell
29/69	Dietz Dietz	Kolksicherung durch Befestigungsstrecken für das Eidersiel Kolksicherung am Elbewehr Geesthacht
30/70	Franke/Manzke Franke Felkel Jurisch Sindern/Rohde Harten Dietz	Zwei interessante Beisp. von den Erdbauaufgaben am Elbe-Seitenkanal Einige Beispiele zur Strömungsdruckwirkung des Grundwassers Idee studie üb. d. Möglichk. d. Verhüt. v. Sohlenerosion. durch Geschiebezufuhr... Beitrag zur Verwendung von Durchflußgleichungen b. Dreieck-Überfällen. Zur Vorgeschichte der Abdämmung der Eider... Abdämmung der Eider; Modellversuche im Tidemodell Abdämmung der Eider; Modellversuche für das Sielbauwerk
31/72	Giese/Teichert/ Vollmers Dorer Dietz Dietz	Das Tideregime der Elbe - Hydraulisches Modell mit beweglicher Sohle Berechn. d. nichtstationären Abfl. in nicht-prismat. offenen Gerinnen Ausbildung von langen Pfeilern bei Schräganströmung... Systematische Modellversuche über die Pfeilerkolkbildung
32/72	Niebuhr Ache Franke/Ache Franke/Garbrecht/ Kiebusch Franke/Bernhard Felkel Giese	Einfluß d. Seitenwände bei hydraul. Versuchen in ein. rechteck. Glasrinne Ergebnisse v. Sondierungen neben einem eingespülten Gründungskörper... Ein Verfahren z. Berechn. eingespannter gedrungener Gründungskörper Meßfehler infolge unvollk. Volumenkonstanz v. Porenwasserdruckgebern beim Scherversuch Erddruckansatz b. trogförm. Bauwerken u. Wechselwirk. zw. Erd- u. Sohlendruck... Das Sohlenkorn des Rheins zwischen Straßburg und Bingen Fahrwasserumbildungen in der Unter- und Außenelbe
33/72	Rohde/Meyn Ruck Dietz Hein	Untersuch. üb. d. hydrodyn. Verhalt. oberfl. markiert. Sandes u. ü. d. Einbringemeth. Erfahrungen beim Präparieren von Sand für Leitstoffuntersuchungen Kolksicherung am Störsperrwerk Verhalten von Rost unter nicht absolut dichten Beschichtungen bei Anlegen von kathodischem Schutz im Stahlwasserbau
34/73	Hovers	Der Einfluß von Strombauwerken auf die morphologische Entwicklung der Stromrinnen im Mündungsgebiet eines Tideflusses, untersucht am Beispiel der Außenweser
35/73	Davidenkoff Tödten Hein Jurisch Pulina Dietz List	Anwendung von Bodenfiltern im Wasserbau Beitrag zur Energiedissipation von Tosbecken im Modellversuch Sulfatangriff des Meerwassers auf Beton? Messung der Momentangeschwindigkeiten mit Hilfe der Laser-Doppler-Anemometrie Geschwindigkeitsmessungen an einer Bootsgasse Modelluntersuchung der Schleusenvorhöfen an der Rheininstaustufe Iffezheim Untersuchung von instationär belasteten Kunststoff-Filtern für den Wasserbau
36/74	Dietz Felkel Dietz/Pulina	Hydraulische Probleme bei der Planung von Staustufen Modellversuche mit Grundswellen und Schifffahrt Wahl der Wehrverschlüsse beim Ausbau der Saar zur Schifffahrtsstraße
37/75	Tödten Schuppener Harten/Knieß Dietz	Untersuchung der Strömungsvorgänge an Bühnen Erddruckmessungen am Schiffshebewerk Lüneburg Eiderdamm - Natur- und Modellmessungen Wellenmessungen im Hafen Travemünde - Vergleich zwischen Natur und Modell
38/75	Schuppener Felkel Samu	Der Erddruck einer rolligen Hinterfüllung auf eine unverschiebliche Stützwand infolge der Verdichtung Untersuchungen der Veränderungen der Höhenlage der Sohle des Oberrheins Beitrag zur morphologischen Entwicklung der Außenjade
39/76	Dietz/Pulina	Modelluntersuchungen zur Gestaltung der Hauptbauwerke an der Rheininstaustufe Iffezheim
40/76	Dietz/Pulina Knieß Annauß/Dehm/ Hein/Schröder Dietz/Pulina Dietz	Zur Wahl des Zugsegmentes als Wehrverschluß beim Ausbau der Saar Eiderdamm - Wiederauffüllung von Baggerlöchern im Watt Korrosion an Spundwänden - Wand-Dickenmessungen mit Ultraschall " " " Zur Problematik der Querströmungen in Vorhafenzufahrten und ihre Untersuchung im Modell Zur Frage der Nachbildung von Kolkvorgängen im Modell

Nr./Jahr	Verfasser	T i t e l
41/77	Armbruster	Vergleich berechneter und gemessener Grundwasserstände am Beispiel Kehl
	Döscher	Die Suspensionswand
	Feddersen	Querbelastete Verankerungen
	Franke/Garbrecht	Drei Serien von Probelastungen an Großbohrpfählen in Sand - Ziel - Methode -.....
	Franke/Schuppener	Besonderheiten b.Gründungsgutachten f.ein flachgegründetes off-shore-Bauwerk
	Hauß	Beispiele für die Anwendung statistischer Methoden in der Bodenmechanik
	Kiekbusch	Elektrisches Messen von Volumenänderungen beim Triaxialversuch
	Ruck	Sondierungen zur Erkundung unterh.d.Gewässersohle von schwimmd.Arbeitsplattform
	Sagawe	Kraft- und Spannungsmessungen an der Containerkaje in Bremerhaven
	Schulz	Überlegungen zur Führung des Nachweises der Standsicherheit in der tiefen Gleitfuge
42/77	Hein	Untersuchung über den Korrosionsablauf an wetterfesten Stählen in Abhängigkeit von der Entfernung zum Meer
	Knieß	Bemessung von Schüttstein-Deckwerken im Verkehrswasserbau; Teil I: Lose Steinschüttungen
	Hein	Zum Korrosionsverhalten von Zink in salzhaltigen Wässern

