

### Thema 3

#### **Das Verhalten von Binnenschiffen und Seeschiffen beim Durchfahren, Überholen und Begegnen in Kanälen und Fahrwassern beschränkter Breite und Tiefe, unter Berücksichtigung größerer Geschwindigkeit und Abmessungen**

##### — Ausmaß der Beschädigung von Uferböschungen und Fahrwassersohlen

##### — Bekämpfungs- und Abhilfemaßnahmen

Berichtersteller: Dr. Carl-Wilhelm Ballin, Regierungsdirektor, Wasser- und Schiffahrtsdirektion Nord, Kiel; Dipl.-Ing. G. Brandenburg, Baudirektor, Wasserbauamt Kiel-Holtenau; Dr.-Ing. Karl Felkel, Regierungsbaumeister, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe; Dr.-Ing. Martin Hager, Bundesverkehrsministerium, Bonn; Kapitän Masson, Ministerialrat, Bundesverkehrsministerium, Hamburg; Dr.-Ing. E. Müller, Versuchsanstalt für Binnenschiffbau e. V., Duisburg; Dipl.-Ing. Öbius, Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Berlin; Dr.-Ing. Erich Schüle, Versuchsanstalt für Binnenschiffbau e. V., Duisburg; Dipl.-Ing. Volkhard Wetzel, Bauberrat, Wasser- und Schiffahrtsamt Wilhelmshaven

#### **Zusammenfassung**

Über das Verhalten von Binnenschiffen im begrenzten Gewässer und über die Wechselwirkung zwischen Schiff und Wasserstraße sind in den vergangenen Jahren durch systematische Untersuchungen wesentliche Erkenntnisse gewonnen worden. Dabei sind, soweit möglich, Modellversuche angewendet worden. Wo kleinmaßstäbliche Modelle nicht ausreichten, wurde zum naturgroßen Modell, also zum Naturversuch, übergegangen. Besonders herausgegriffen werden die umfangreichen Versuche mit Binnenschiffen im Main-Donau-Kanal, am Rhein, Main und der Donau sowie Meßergebnisse mit Seeschiffen im Nord-Ostsee-Kanal und in den Küstengewässern. Die Versuche mit Binnenschiffen erstreckten sich auf das Fahrverhalten der Schiffe in Abhängigkeit von der Verbandsform und ihrer Antriebe, in Wasserstraßen unterschiedlicher Abmessungen und Abladetiefe sowie der Wellen- und Strömungsbilder, der Wasserspiegelabsenkung, der Schiffsabsenkung und der Auswirkungen auf Sohle und Böschungen des Gewässerbettes. Das Fahrverhalten in Krümmungen und bei Begegnung wurde für verschiedene Schiffstypen und Verbandsformationen mit Hilfe von Radarphasenbildern ermittelt. Die Ergebnisse haben in Berechnungsverfahren für die Fahrwasserbreiten und entsprechende Festlegungen für Ausbaubereiche der Wasserstraßen ihren Niederschlag gefunden. Die Wasserspiegelverformung wurde durch stereografische Aufnahmen bestimmt und in Höhenschichtlinienplänen und in Längs- und Querschnitten dargestellt, wobei sich ungünstigere Werte bei den herkömmlichen Motorgüterschiffen gegenüber den Schubverbänden mit Schubleichtern ergeben haben. Strömungsmessungen, besonders in Sohlennähe, liefern ein klares Bild über die hydrodynamischen Verhältnisse in der Umgebung des Schiffes und die daraus zu ziehenden Folgerungen für die Beanspruchungen der Sohlen und Böschungen. Die Schiffsabsenkmessungen ergaben Kriterien für die Fahrgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Wassertiefen und Tiefen, Tiefgangsverhältnissen für die verschiedenen Schiffs- und Verbandsarten. Über die durch Schiffe verursachten Deformationen beweglicher Gewässersohlen geben Versuche am Oberrhein Aufschluß. Dabei sind die Verformungen der Sohle abhängig vom Abstand des Schiffsantriebes von der Sohle und der Dauer der Einwirkung an der gleichen Stelle. Anhand von Natur- und Modellbeobachtungen werden die einzelnen Beanspruchungen behandelt, wobei

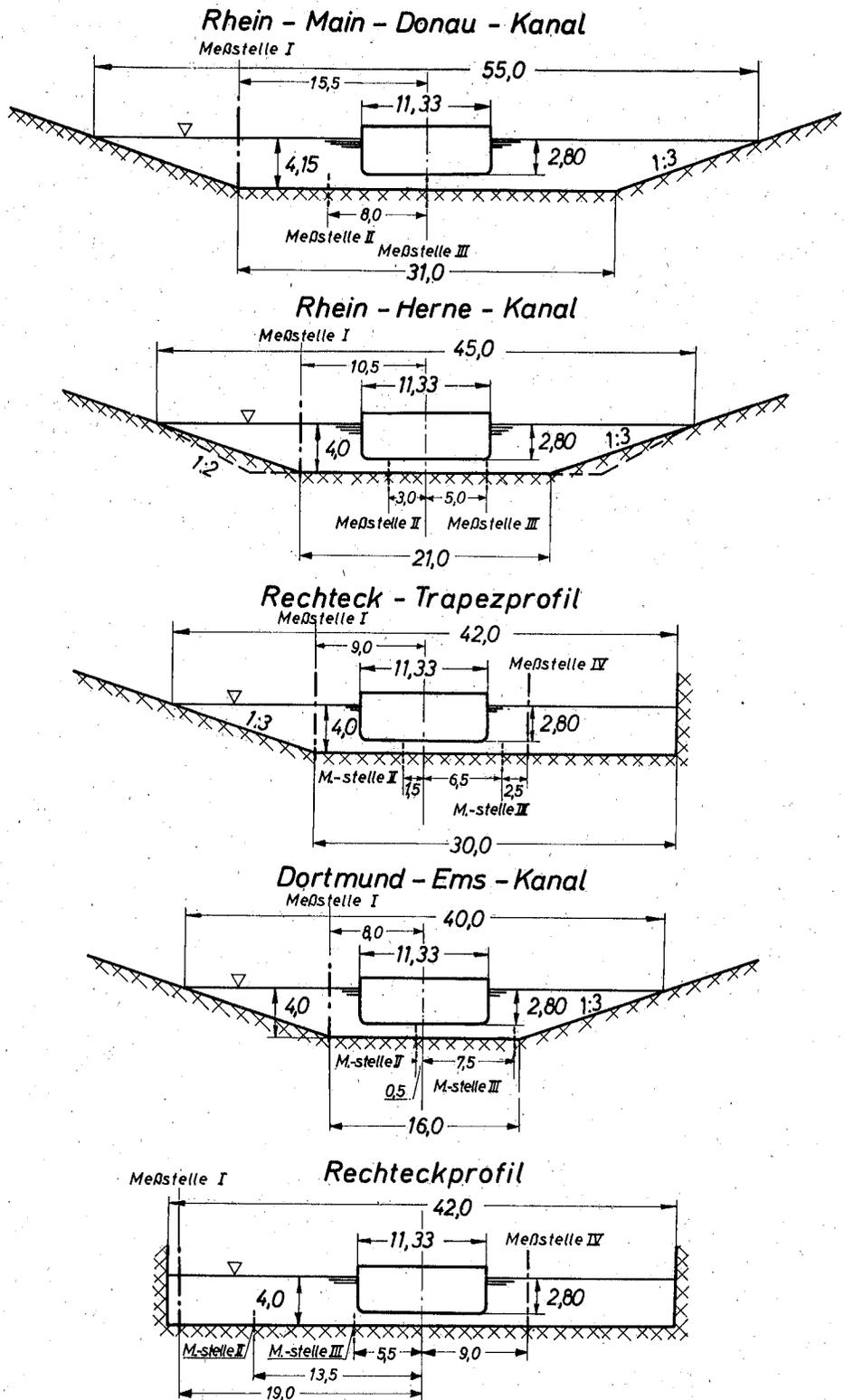


Abb. 1: Untersuchte Kanalprofile

besonders auf die Wirkung von Schubbooten mit hoher Antriebsleistung eingegangen ist. Das Verhalten von Seeschiffen und die Wechselwirkung zu Böschungen und Sohle sowie die Einflüsse von Querrinnen, Fahrwasserbreiterungen und Hafenbecken sind in Modelluntersuchungen für den Nord-Ostsee-Kanal behandelt. Beobachtungen über das Fahrverhalten führten zu Bemessungsregeln für das Verkehrlenkungssystem am Nord-Ostsee-Kanal. Zum Fahrverhalten von Seeschiffen in den Ästuarien sind Hinweise insbesondere bei der Bewegung großer Seeschiffe im beengten Fahrwasser gegeben. Die Frage der notwendigen Fahrinnenabmessungen für Großtanker sind durch Messungen in der Natur im Jadefahrwasser ermittelt worden.

Über das Problem der Sicherung von hohen Böschungen liegen besondere Erfahrungen am Nord-Ostsee-Kanal vor. Ufersicherungen sind besonders im Bereich der Wirkung von Schiffswellen erforderlich. Erprobungen neuer Deckwerksformen sind im Gange.

## 1. Allgemeines

Systematische Untersuchungen über das Verhalten von Schiffen und die Wechselwirkung zwischen Schiff und Wasserstraße sind die Voraussetzung für eine sinnvolle Gestaltung des Fahrwassers und die konstruktive Ausbildung des Gewässerbettes. Zahlreiche Fragen konnten mit Hilfe geeigneter Modelle geklärt werden, die in besonderem Maße gestatten, den jeweiligen Modellfall beliebig häufig zu reproduzieren und Fragen der wiederholten Beanspruchung zu klären. Den hierbei gewinnbaren Erkenntnissen sind jedoch besonders wegen der Problematik der vollen Modellähnlichkeit Grenzen gesetzt, so daß zwangsläufig der Weg zu Großversuchen in der Natur im Maßstab 1 : 1 gesucht werden mußte. So sind in den letzten Jahren in der Bundesrepublik Deutschland zahlreiche Modell- und Naturuntersuchungen für den Verkehr mit modernen Schiffs- und Schubverbänden verschiedener Zusammensetzung systematisch und zur Klärung von Einzelfragen durchgeführt worden. Über einige interessante Gesichtspunkte, Untersuchungsmethoden und Ergebnisse, die aus den Versuchen und Untersuchungen im Binnen- und Küstenbereich an künstlichen und natürlichen Wasserstraßen gewonnen wurden, soll nachfolgend berichtet werden.

## 2. Verhalten von Binnenschiffen

### 2.1 Alleinfahrt

Durch Modellversuche wurden die optimalen Geschwindigkeiten von ein- und mehrgliedrigen sowie ein- bis dreireihigen Schubverbandsformationen bei unterschiedlicher Abladetiefe in trapezförmig geböschten und rechteckigen Kanalprofilen ermittelt (Abb. 1). Ihre Festlegung erfolgte unter Beachtung hydromechanischer Kriterien, wie Wasserspiegelabsenkung, Rückstromgeschwindigkeit, Sohlen- und Böschungsdruck sowie Trimm und Parallelabsenkung der Schiffe. Charakteristisch für den Verlauf der Leistungswerte ist deren sehr steiler Anstieg bei Erreichen einer bestimmten Geschwindigkeit (Abb. 2). Damit verbunden ist immer ein starkes Anwachsen der Parallelabsenkung sowie ein Wechsel des relativ geringen kopflastigen Trimm in einen größer werdenden steuerlastigen Trimm. Es bildet sich am hinteren Bereich des Verbandes eine Wasserwalze, die sich, abhängig von Geschwindigkeit und Fahrwasserquerschnitt, über die gesamte Kanalbreite ausdehnt. Die hecklastige Vertrimmung wird stärker, die Gefahr der Grundberührung nimmt zu.

Je geringer der Querschnitt des Kanals ist, um so geringer ist auch die mögliche maximale Fahrgeschwindigkeit und um so größer sind die anderen Meßwerte.

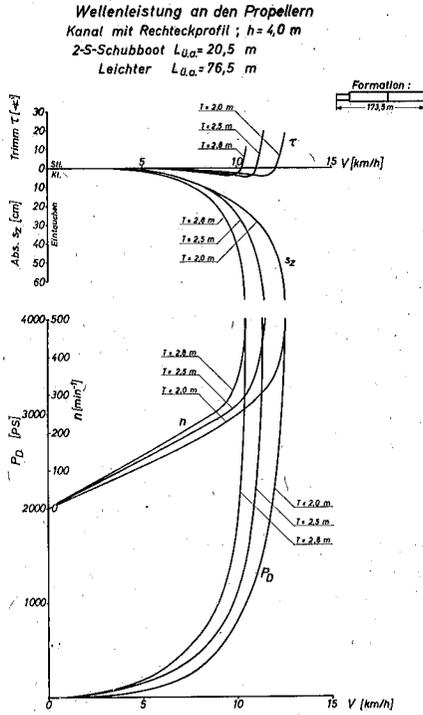
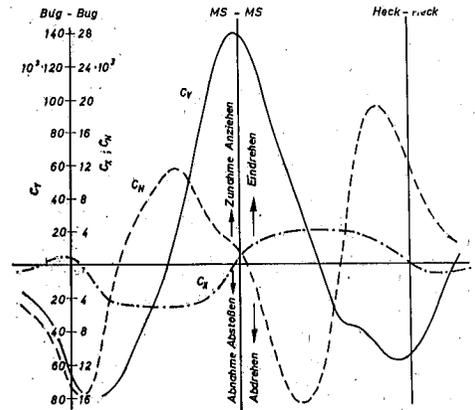


Abb. 2: Wellenleistung an den Propellern



$$C_x = \frac{X}{\rho/2 \cdot V_0^2 \cdot S} \quad C_y = \frac{Y}{\rho/2 \cdot V_0^2 \cdot L \cdot T} \quad C_N = \frac{N}{\rho/2 \cdot V_0^2 \cdot L^2 \cdot T}$$

Abb. 4: Begegnen von Schiffen

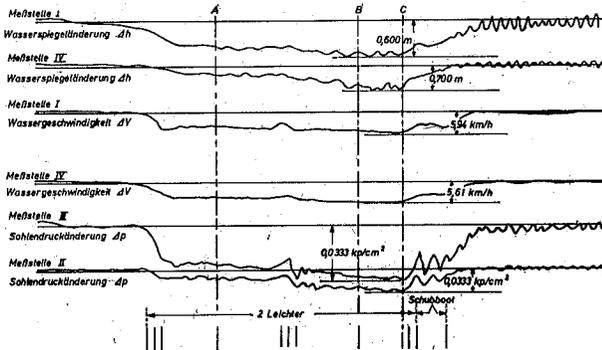


Abb. 3: Hydromechanische Veränderungen im Kanal mit Rechteckprofil

Bei allen Formationen treten die größten Wasserspiegelabsenkungen, Rückstromgeschwindigkeiten und Sohlendrücker im Bereich der hinteren Schulter des letzten Leichters oder an der vorderen Schulter des Schubbootes auf (Abb. 3). Der längere Verband (2 Leichter) erbrachte in den größeren Kanälen günstigere Zahlen als der kurze Verband (1 Leichter). Als hydrodynamisch günstiges Kanalprofil erwies sich der Rechteckquerschnitt.

## 2.2 *Begegnen und Überholen*

Beim Passieren zweier Schiffe kommt es zu einer gegenseitigen Überlagerung und Beeinflussung der beiden Strömungspotentialfelder. Der vorhandene Gleichgewichtszustand der Umströmung jedes einzelnen Schiffskörpers wird gestört. Die erzeugten Druckänderungen wirken sich unmittelbar als Änderung der Normaldrücke auf den Schiffskörper und mittelbar als Verformungsänderung der Wasseroberfläche aus. In ihrer Gesamtwirkung ergeben die Druckänderungen die am Schiffskörper angreifenden Kräfte und Momente (Abb. 4 und 5).

Beim Begegnen ist infolge der relativ kurzen Passierzeit und der großen Massenträgheit der Schiffe der erste Impuls, den die Schiffe aufeinander ausüben, für eine Kursabweichung der Bestimmende und nur diese Abweichung muß durch Ruderlegen korrigiert werden. Eine merkliche gegenseitige Beeinflussung der Geschwindigkeiten tritt beim Begegnen nicht auf, da die Begegnungsperioden kurz sind. Das Überholen ist vom Blickpunkt der Kollisionsgefahr gesehen weit risikoreicher. Durch die längere Überholzeit wirken die anziehenden und abstoßenden Kräfte länger auf die sich überdeckenden Teile der Schiffe ein, so daß die Massenträgheit eher überwunden werden kann und Schlängelbewegungen beider Schiffe möglich sind, sofern nicht mit dem Ruder gegengesteuert wird. Bei größerem seitlichen Abstand gilt jedoch auch hier, daß die anfänglich wirkende Kraft dem Schiff die Kursänderung aufzwingt (Abb. 6).

Beim Überholen in einem Kanal kann sehr leicht der Fall eintreten, daß ein kleines, schnelleres Schiff im starken Rückstrom eines langsameren Verbandes an die Grenze seiner Maschinleistung kommt und nicht in der Lage ist, den Überholvorgang zu beenden. In diesem Fall kommt es zur Kollision.

Um Risiken, vor allem bei hoher Fahrgeschwindigkeit (je nach Querschnitts- und Wassertiefen-Tiefgangsverhältnis 8 bis 15 km/h), zu mindern, sollten Überholungen nur in Ausnahmefällen stattfinden. Begegnungen sind in „zweischiffigen“ Kanälen jedoch zwangsläufig und ständig notwendig. Infolgedessen gehören sie zum normalen Verkehrsablauf und bereiten in der Praxis bei Beherrschung der Fahrdynamik eines Schiffes oder Schubverbandes in der Regel keine nautischen Schwierigkeiten.

Selbst in Krümmungen erlaubt die geschickte Nutzung der physikalischen und hydromechanischen Kräfte dann eine gefahrlose Begegnung, wenn eine bestimmte Mindestbreite zur Verfügung steht.

## 2.3 *Begegnung in Krümmungen*

Schon bei Alleinfahrt ist die Fahrbahn natürlich breiter als auf gerader Strecke. Das verursachen nicht nur die rein geometrischen Verhältnisse, sondern vor allem der Gleichgewichtszustand der Kräfte. Dieser ist in Abb. 7 dargestellt und mathematisch erläutert.

Die Vielzahl der mitwirkenden Komponenten, die Abhängigkeit voneinander, aber auch die nicht exakte quantitative Vorausbestimmung des jeweiligen Betrages, lassen die Anwendung von Gleichungen dieser Art für die Praxis ungeeignet erscheinen.

Auch bei noch so sorgfältiger Berechnung stimmt die ermittelte Fahrbahn trotzdem nicht mit der Wirklichkeit überein, weil — abgesehen von Strömungs- und Windeinflüssen — das manuell gesteuerte Schiff, d. h. letztlich der Schiffsführer, nicht in der Lage ist, aus seinem Blickfeld heraus den Grad der Krümmung zu erfassen; er vermag ihn nur zu schätzen.

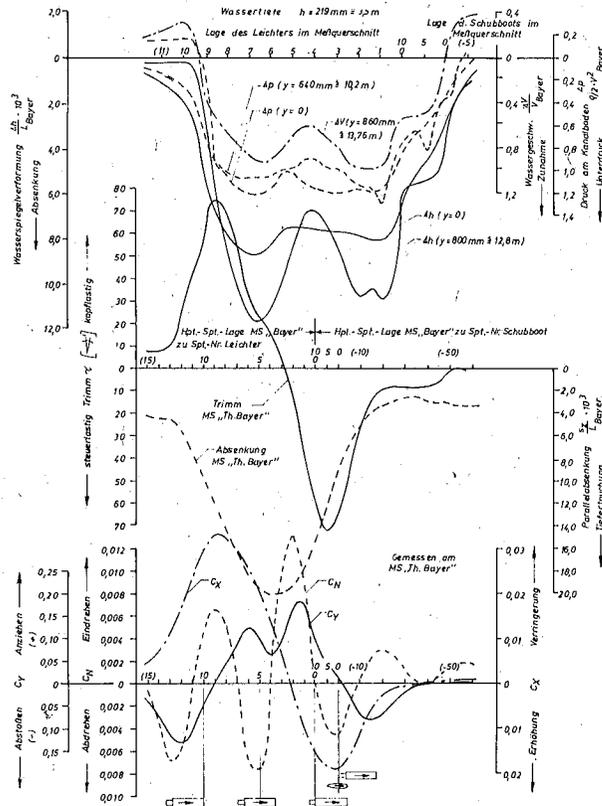


Abb. 5: Begegnen im Dortmund-Ems-Kanal

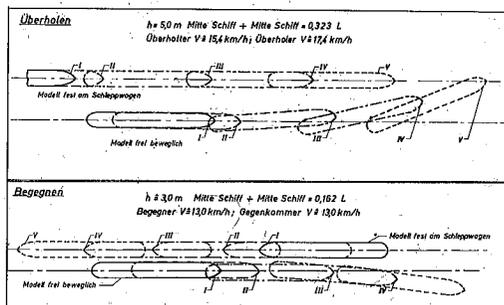


Abb. 6: Kursveränderungen beim Überholen und Begegnen

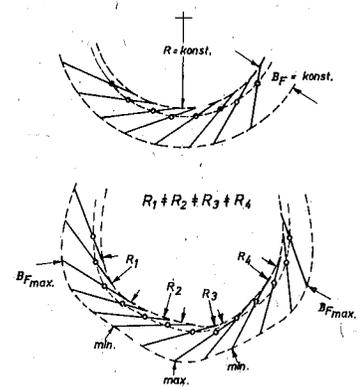


Abb. 8: Tendenz des Fahrverhaltens nach Auswertung zahlreicher Radarbilder

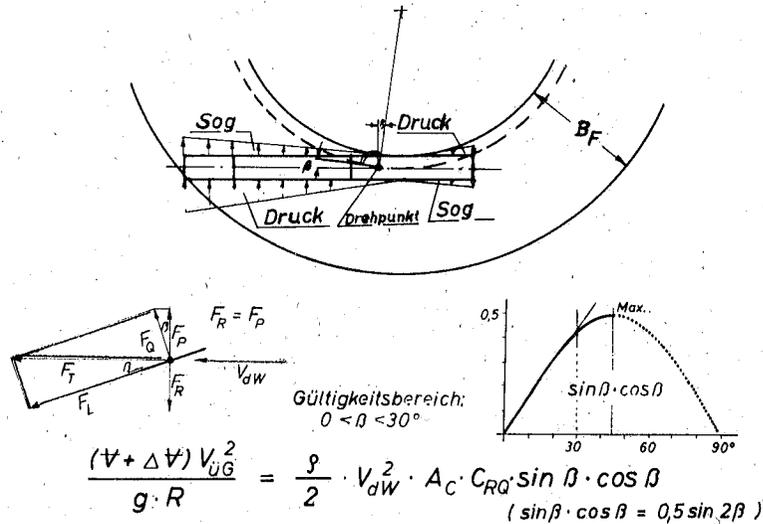


Abb. 7: Kurvenverbreiterung

Das Schiff kann also nicht stetig durch die Krümmung geführt werden, sondern folgt gewissermaßen einem Polygonzug mit ständig wechselnden Teilradien (siehe Abb. 8).

Dieses Problem ist in zahlreichen Naturversuchen der Versuchsanstalt für Binnenschiffbau e. V. mit Hilfe von zeitsynchronen Radarphasenbildern aufgenommen worden. In zeitkonstanten Intervallen wird das bordeigene Radarbild fotografiert, später durch Vergrößerung mittels Dia-Projektor deckungsgleich in die entsprechende Wasserstraßenkarte projiziert und der Antennenmittelpunkt sowie die Kurslinie zeichnerisch übertragen. In Abb. 9 oben ist der einfachere Fall mit kleinem Zentriwinkel und in der unteren Darstellung eine Kurve mit großem Zentriwinkel behandelt, wobei die hier auftretende wiederholte Schwankung des Driftwinkels als Funktion der Fahrstrecke dargestellt ist.

Diesem psychologisch-optischen Effekt ist auf Grund jahrzehntelanger Erfahrungen noch ein sehr praktischer Überlagerer, der darin zum Ausdruck kommt, daß auch beim seitengeregelten zweiseitigen Verkehr in Krümmungen mit dem Vorschiff stets der Innenbogen so „hart als möglich“ angehalten wird. In einem Linksbogen überschreitet das Vorschiff also weit die Mittelachse zur Gegenfahrbahn hin. Die phasenartige Darstellung solchen Verhaltens zeigt Abb. 10. Sie ist eine maßstabgerechte Reproduktion zeitsynchroner Radarbilder.

Diese Fahrmethode soll primär Ruder und Propeller so weit als möglich vom Ufer fernhalten, außerdem aber auch die Radialkraft herabsetzen, so daß der Derivationswinkel und damit die beanspruchte Fahrbahnbreite kleiner werden.

Das im ersten Moment vermutete Risiko bei plötzlich notwendig werdenden Begegnungsmänuvern wird vorwiegend ebenfalls durch Nutzung der Radialkraft abgebaut. Ein kurzes Stützen durch Rudernullage genügt, auch den Derivationswinkel gegen Null tendieren zu lassen. Dabei wird die hydrodynamische Gegenkraft aufgehoben und das Schiff zum Außenbogen hin, also in seinen eigentlichen Fahrstreifen getrieben.

Ein solcher Begegnungsfall ist in Abb. 11 und 12 ebenfalls phasenartig dargestellt worden, wobei Abb. 11 die Ansteuerung des Partners und Abb. 12 die unmittelbare Begegnung mit der anschließenden Trennung zeigen. Ein besonderes eindrucksvolles Bild gibt auch die Abb. 13 über Versuchsfahrten auf der Donau in der Schlögener Schlinge.



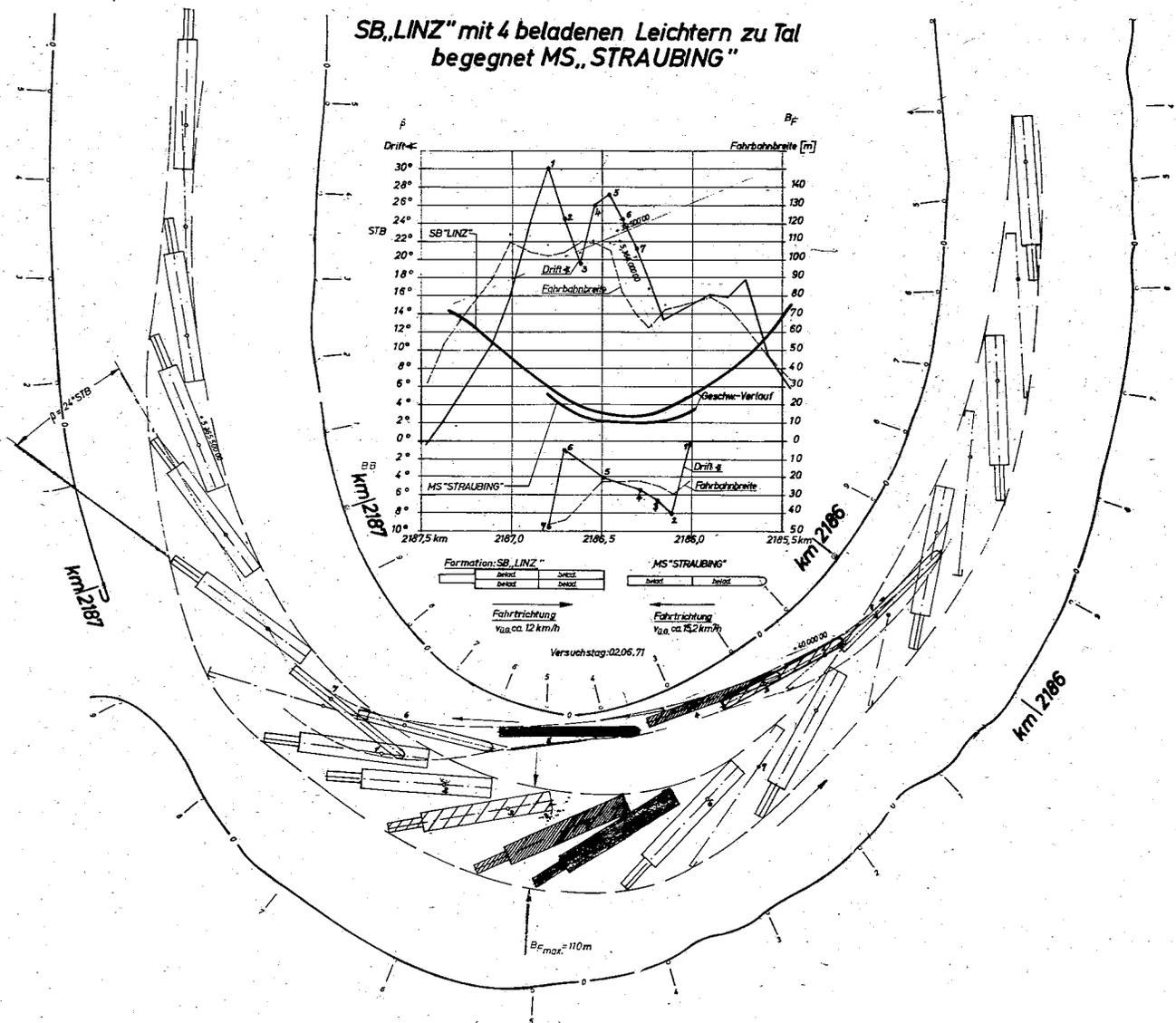


Abb. 13: SB „Linz“ mit 4 beladenen Leichtern zu Tal begegnet MS „Straubing“

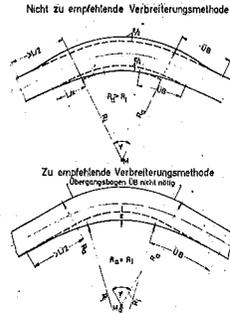
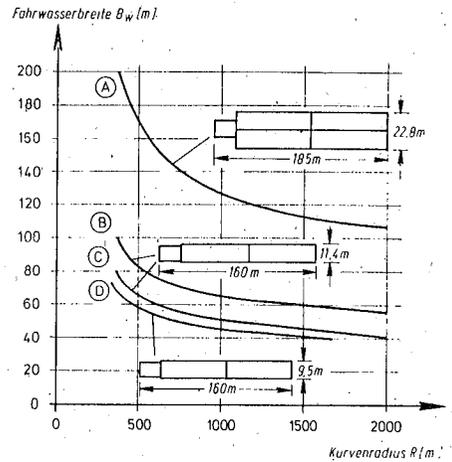


Abb. 14: Schematische Kurvenverbreiterung



Ⓐ	Donau	(staugeregelt)	REGENSBURG - VILSHOFEN
Ⓑ	Donau	(staugeregelt)	KELHEIM - REGENSBURG
Ⓒ	Main	(staugeregelt)	ASCHAFFENBURG - BAMBERG
Ⓓ	Altmühl	(staugeregelt)	DIETFURT - KELHEIM
Ⓓ	Main-Donau-Kanal		BAMBERG - DIETFURT

Abb. 15: Fahrwasserbreiten  $B_w$  in den Kurven des Europakanals Rhein-Main-Donau

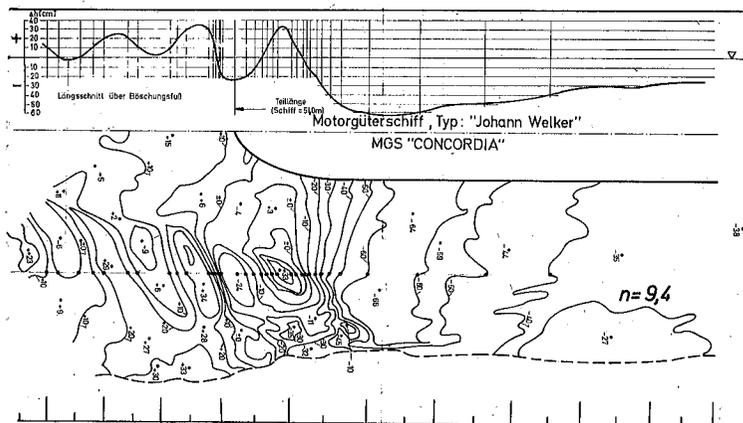


Abb. 16: Wasserspiegelverformung

Naturngesetz und Praxis lassen aus diesen Zusammenhängen folgendes erkennen:

- Der Kurs eines Schiffes folgt bei Krümmungsdurchfahrt in der Praxis nicht den theoretischen Überlegungen.
- Die Fahrbahn wird freizügig gewählt und überschneidet in Krümmungen die des Partners.
- Bei Begegnungen ist die beanspruchte Fahrbahnbreite kleiner als die der geometrischen Konstruktion.

Um diesen fahrdynamischen Besonderheiten auch bautechnisch entgegenzukommen, ist es empfehlenswert, Querschnittsverbreiterungen in Krümmungen nicht achssymmetrisch auszuführen, sondern nur den Innenbogen zu schneiden. Diesen Vorschlag zeigt die Abb. 14, wobei  $\phi <$

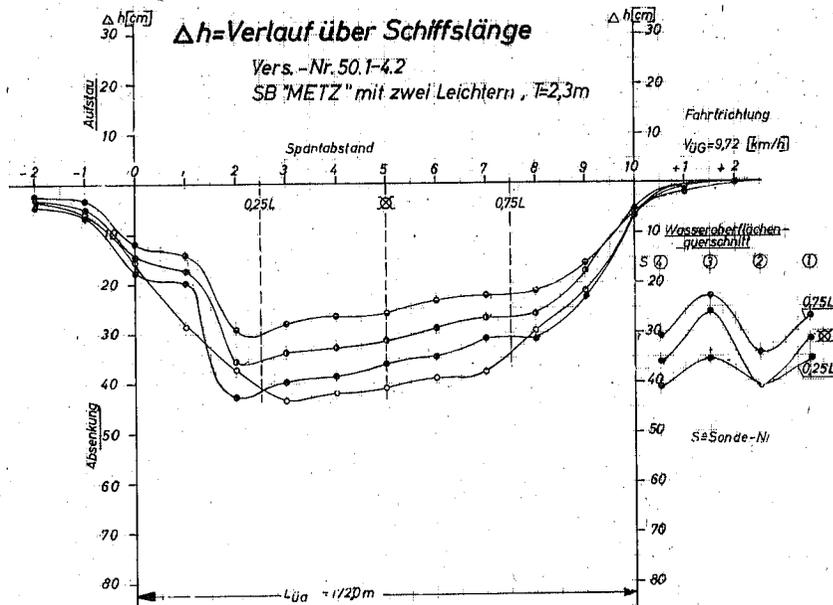


Abb. 17: Verlauf der Wasserspiegelabsenkung am Motorgüterschiff

60°; dabei ist  $R_a = R_i$ . Wird  $\varphi > 60^\circ$ , sind die Anfangsbögen analog für  $\varphi = 30^\circ$  auszulegen und  $R_{\text{Mitte}}$  äquidistant zu  $R_a$  um  $M_a$  anzuschließen.

Die Auswertung zahlreicher Radarphasenaufnahmen von Versuchen auf Rhein, Mosel, Main, Main-Donau-Kanal und Donau hat zu den in Abb. 15 dargestellten Fahrwasserbreiten in Abhängigkeit vom Kurvenradius geführt.

#### 2.4 Wellen- und Strömungsbilder, Wasserspiegelverformung und Absenkung bei der Schiffsahrt im begrenzten Gewässer

Die Erscheinungen am fahrenden Schiff im begrenzten Gewässer sind seit 1967 in systematischen Untersuchungs- und Forschungsprogrammen im wesentlichen am Main-Donau-Kanal sowie durch Fahrversuche im Rhein, Main und der Donau untersucht worden. Ihre Ergebnisse sind veröffentlicht und bei Neuentwicklungen und der Gestaltung der Wasserstraßen berücksichtigt worden. Neben der Untersuchung fahrdynamischer Eigenschaften war das Ziel vor allem auch auf die Frage der Beanspruchungen von Sohle und Böschungen der Wasserstraße begrenzter Abmessungen ausgerichtet. Die Untersuchungen wurden von der Versuchsanstalt für Binnenschiffbau in Duisburg zusammen mit der Bundesanstalt für Wasserbau in Karlsruhe ausgeführt.

Aus vielen Stereoaufnahmen der Wasserspiegeloberfläche ist als Beispiel in Abb. 16 der Heckwellenbereich eines Motorgüterschiffes des Regelschiffstyps Johann Welker mit den Maßen 85 x 9,5 x 2,5 m bei 880 PS Leistung dargestellt, welcher den großen Energieinhalt im Heckwellenbereich erkennen läßt. Die Höhenschichtlinien zeigen Absenkmaße gegenüber dem Normalwasserspiegel bis zu 66 cm und Heckwellenscheitel bis 33 cm Höhe. Die Heckwelle schlägt über, sobald der sog. überkritische Bereich überschritten wird, d. h. die Wellengeschwindigkeit der Flachwasserwelle in Abhängigkeit der jeweiligen Wassertiefe überschritten wird. Den Gesamtverlauf der Verformung der Wasseroberfläche zeigt für den gleichen Schiffstyp Abb. 17, wobei interessant ist, daß in den verschiedenen Meßlängsschnitten neben dem Schiff lediglich am Heck eine Wasserspiegelerhöhung erkennbar ist.

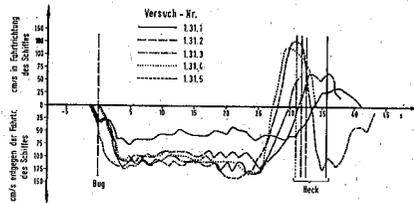


Abb. 18: Ganglinien der sohlennahen Strömung unter dem Motorgüterschiff, Wassertiefe: 3,10 m

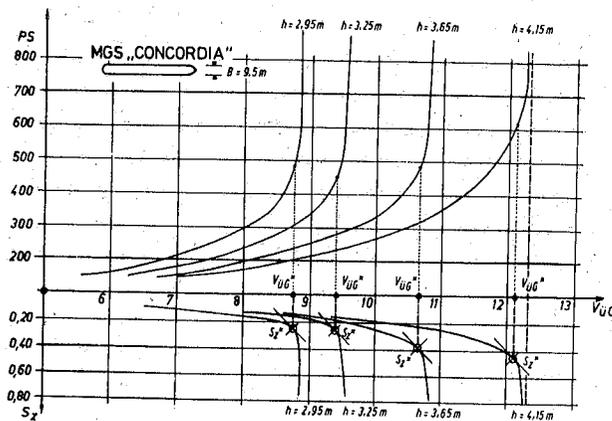


Abb. 19: Schiffsabsenkung

Die sohlennahen Strömungen wurden mit Meßflügeln gemessen. Vor Eintreffen des Schiffsbugs zeigte sich je nach Wassertiefe eine zunächst in Fahrtrichtung des Schiffes verlaufende Strömung, die sich dann unter dem Bug umkehrt und zum Heck nahezu gleichmäßig verläuft. Hinter dem Schiff bildet sich die allgemein zu beobachtende Nachlaufströmung aus (Abb. 18).

Die Absenkung eines Schiffes ist eine Funktion der Schiffsförm und Größe, der Eintauchtiefe  $T$ , der Schiffsgeschwindigkeit über Grund  $V_{UG}$ , der Fahrwasserbreite  $B_F$  und der Fahrwassertiefe  $h$ . Bei den Versuchen wurde allgemein festgestellt, daß die Absenkwerte mit größer werdender Schiffsgeschwindigkeit zunächst nur langsam wachsen, bis sie in einem bestimmten Bereich sehr rasch zunehmen. Hier läßt sich ein Grenzwert der Absenkung  $s_z^*$  angeben, worauf unter dem Thema 1, Abteilung I näher eingegangen ist. Aus Abb. 19 ist zu ersehen, daß die Antriebsleistungen  $P_D$  als Funktionen der Schiffsgeschwindigkeit  $V_{UG}$  einen ähnlichen Verlauf wie die Absenkung  $s_z^*$  zeigen. In den folgenden Abbildungen 20 — 22 sind weitere Versuchsergebnisse für 3 Verbandsformen dargestellt, da sich im Vergleich der verschiedenen Versuchseinheiten gezeigt hat, daß Motorgüterschiffe eine etwas geringere Absenkung als Schubverbände aufweisen. Hieraus gezogene Folgerungen sind unter dem Thema 1, Abteilung I behandelt.

### 3. Veränderungen der Gewässersohle, hervorgerufen durch Schiffe mit normalen und durch solche mit außergewöhnlich hohen Antriebsleistungen

Eine extreme Verformung erfährt die bewegliche Stromsohle dann, wenn sich der Schiffsboden dicht über ihr befindet und der Propellerstrahl stark und lange auf sie einwirkt. Dieser Zustand kann in der Praxis zum Beispiel auftreten, wenn das Schiff Grundberührung hat und aus eigener Kraft wieder frei kommen will, wobei der Strahl der stark rotierenden Propeller längere Zeit an Ort und Stelle verharrt.

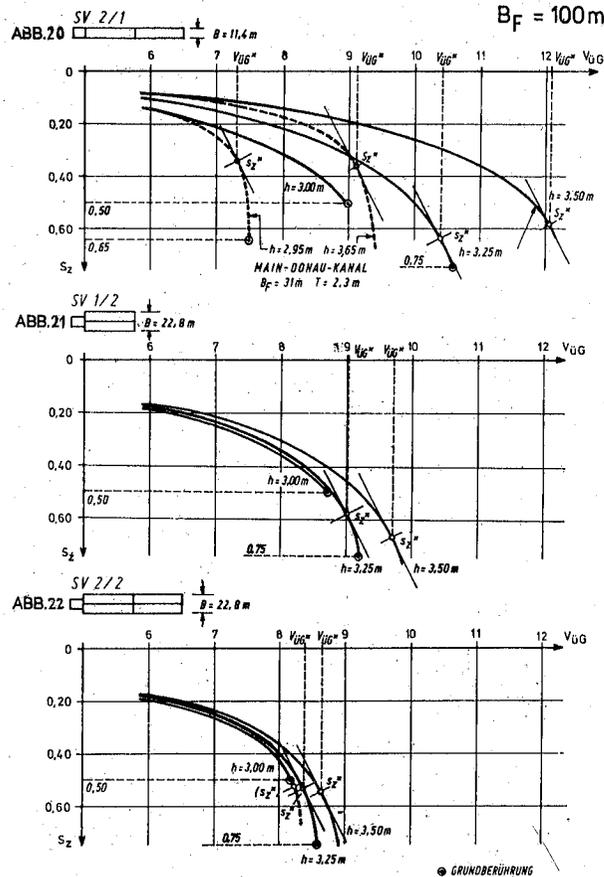


Abb. 20–22: Schiffsabsenkung

Einer sich davon in der Art und im Ausmaß unterscheidenden Beanspruchung ist die Stromsohle durch das normal fahrende Schiff ausgesetzt.

Einen Übergang von der einen Beanspruchungsart zur anderen bildet das stark beschleunigte Anfahren aus dem Stand.

Die Bundesanstalt für Wasserbau in Karlsruhe (BAW) hat zu jeder dieser Beanspruchungsarten Natur- und Modellversuche durchgeführt, und zwar sowohl mit Regelselbstfahrern der Typen „Gustav Koenigs“ und „Johann Welker“, als auch mit Schubverbänden. Bei den Modellversuchen waren sowohl die Schiffe und ihre Propeller als auch das Sohlenkorn im Verhältnis 1 : 16 verkleinert.

Spezielle Experimente sollten ferner die Frage beantworten nach dem Ausmaß der Sohlenveränderungen, die dann zu erwarten sind, wenn Schubboote mit wesentlich höheren Antriebsleistungen, als sie die bislang in Dienst gestellten aufweisen, auf die Stromsohle einwirken.

Zur Zeit dieser Versuche waren die beiden übereinstimmend ausgebildeten Schubboote „Pierre Brousse“ und „Hippolyte Bloch“ der Straßburger Reederei CFNR mit 3530 kW maximaler, auf 3 Propeller verteilter Antriebsleistung die stärksten den Rhein befahrenden Schubboote.

Im Modell des erstgenannten Schubbootes wurde die Vergrößerung der Antriebsleistung über 3530 kW hinaus durch Erhöhung der Umdrehungszahlen der vorhandenen Schiffspropeller erreicht. Dabei mußte die Möglichkeit vorgesehen werden, im Modell neben der Drehzahl jedes Propellers und seinem Schub auch sein Drehmoment laufend zu messen.

Für diese Meßaufgabe entwickelte und baute die BAW eigene Meßvorrichtungen (Bild 24).

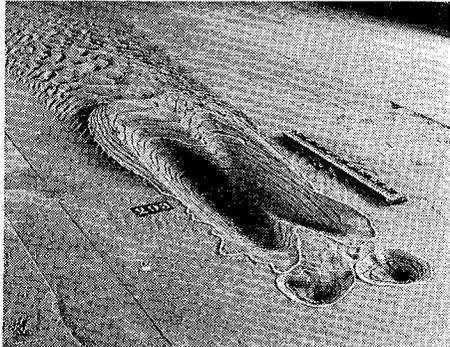


Abb. 23: Sohlenverformung im Material I unter dem an Ort und Stelle verharrenden Schubboot „Marseille“

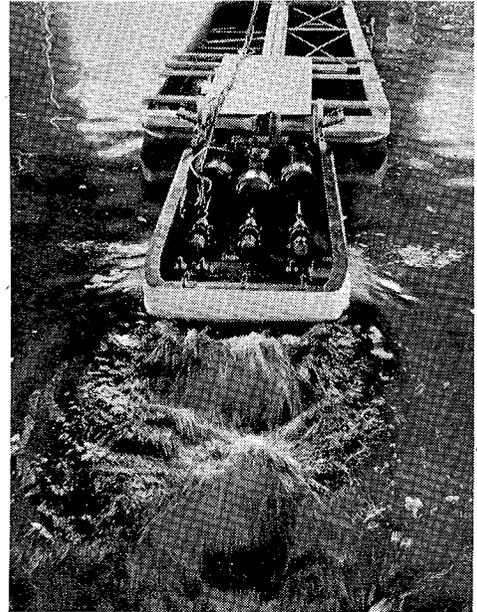


Abb. 24: Lichtbild des Verbandes mit dem Schubboot „Pierre Brousse“ beim Anfahren aus dem Stand

### 3.1 Sohlenangriffe durch den Schraubenstrahl eines sich nicht fortbewegenden Schiffes

Über die Ergebnisse entsprechender Natur- und Modellversuche der BAW mit Regelsebstfahrern liegen die Berichte vor. Hinter mit rotierendem Propeller an Ort und Stelle verharrenden Schiffen wurden in der aus Grobkies bestehenden Sohle des Oberrheins Kolke beobachtet, deren Tiefe nach einer Einwirkungsdauer des Propellerstrahls von 5 Minuten bis zu 1,20 m und nach 30 Minuten bis zu 1,60 m betrug. Hinter dem Kolk wurden dabei bis zu 1,30 m hohe Hügel aufgeworfen.

Auch in einer Sandsohle werden durch längere Zeit auf sie einwirkende Propellerstrahlen Kolke ähnlicher Größenordnungen erzeugt, wobei die dahinter aufgeworfenen Hügel allerdings flacher sind, da die einzelnen aufgewirbelten Körner weiter transportiert werden. Bild 23 zeigt die Sohlenverformung, die sich hinter dem mit zwei Propellern ausgestattetem Modell des Schubbootes „Marseille“ in einer vorher ebenen Sohle aus Feinsand ausbildete. Diese zeigt nach dem Versuch eine ausgeprägte Riffelung, die deutlich die Ausbreitung der Propellerstrahlen wiedergibt.

Mit dem Modell des Schubbootes „Pierre Brousse“ mit 3 Propellern wurde im Sand nach 10 Minuten (Natur) Versuchsdauer bei einem Flottwasser (Abstand zwischen Gerinnesohle und Schiffsboden) von 2,00 m mit einer Antriebsleistung von 3200 kW eine maximale Kolkentiefe von 1,10 m und eine Bankhöhe von 0,30 m erzeugt. Die entsprechenden Werte für 5500 kW betragen 1,50 m (Kolk) und 0,45 m (Bank). Die Kolk- und Bankvolumina nahmen als Folge der Leistungssteigerung stärker zu. Die Ergebnisse von Versuchen mit grobkörniger Sohle wichen davon nicht grundlegend ab.

### 3.2 Anfahren eines Schubverbandes aus dem Stand

Bei den in den Bildern 24 bis 29 wiedergegebenen Versuchen fuhr das Modell eines aus dem Schubboot „Pierre Brousse“ und 4 Europaleichtern zusammengesetzten Schubverbandes mit verschiedenen, während einer Fahrt konstant gehaltenen Antriebsleistungen jeweils aus dem Stand an (Bild 24). Diese Versuche wurden über Sand- und über Kiessohlen durchgeführt, deren Korndurchmesser, in die Natur übertragen,  $d_{50}$ -Werte von 5,6 mm (Material I) und von 48,8 mm (Material II) aufwiesen. In diesem Bereich liegen etwa die mittleren Korndurchmesser des Rheins zwischen Emmerich und Basel.

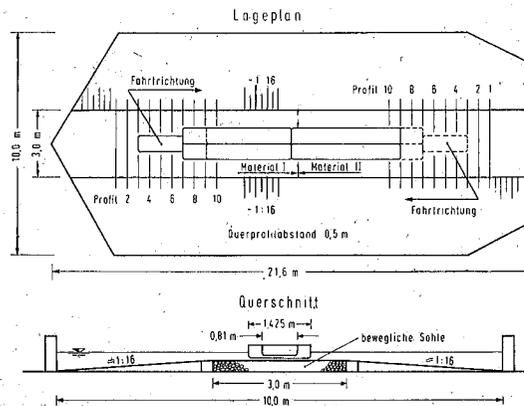


Abb. 25: Grundriß und Querschnitt des Versuchsbeckens

Bild 25 enthält einen Lageplan und einen Querschnitt des Versuchsplatzes. Im ersteren ist die Lage der Querprofile mit der gleichen Bezeichnung wie in Bild 26 und 27 eingetragen. Der Profilverabstand beträgt 50 cm im Modell = 8 m in der Natur. Das Heck des Schubbootes steht über dem Querprofil 3.

In Bild 26 sind für die ersten fünf Querprofile die Sohlenveränderungen eingetragen, die bei Anfahrversuchen mit fünf verschiedenen, konstanten Propellerumdrehungen je Minute, entsprechend Antriebsleistungen zwischen 3700 und rd. 6600 kW, an der feinkörnigen Sohle eingetreten sind. Die größte Kolkentiefe wurde unter dem Heck des Schubbootes beobachtet. Sie erreichte rd. 70 cm der Natur bei der größten Antriebsleistung; der dabei aufgeschüttete Hügel war etwa 20 cm hoch. Ähnliche Sohlenformen, jedoch mit geringeren Abmessungen bildeten sich auch im Grobkies aus.

Bild 27 enthält die entsprechenden Längsschnitte der beiden Rillen und des Mittelwulstes. Ihre Tiefen bzw. Höhen vermindern sich nach einer kurzen Anfahrstrecke, um dann meist unter 10 cm (Natur) zu bleiben, wie sie auch bei normaler Streckenfahrt auftreten. Das Bild 28 zeigt die beim Anfahren entstandene Sohlenverformung in einem Lichtbild.

In Bild 29 schließlich sind für alle mit einem gleichen Flottwasser von 60 cm unter den 2,20 m abgeladenen Leichtern und von 1,20 m unter dem Schubboot, durchgeführten Anfahrversuche die maximalen Kolkiefen und Bankhöhen für die beiden unterschiedlichen Sohlenmaterialien aufgetragen. Die Bänke überschreiten dabei in keinem Fall eine Höhe von 30 cm. Auch die Kolkentiefe hat im allgemeinen eine ähnliche Größenordnung. Erst beim Anfahren des Viererverbandes mit Leistungen von mehr als 4500 kW, die bis heute im Rheingebiet weder vorhanden noch geplant sind, vergrößert sich in der Sandsohle die Kolkentiefe auf das zwei- bis dreifache.

Eine verstärkte Einwirkung auf die Sohle ist ferner festzustellen, wenn das Flottwasser des Schubbootes stark vermindert wird.

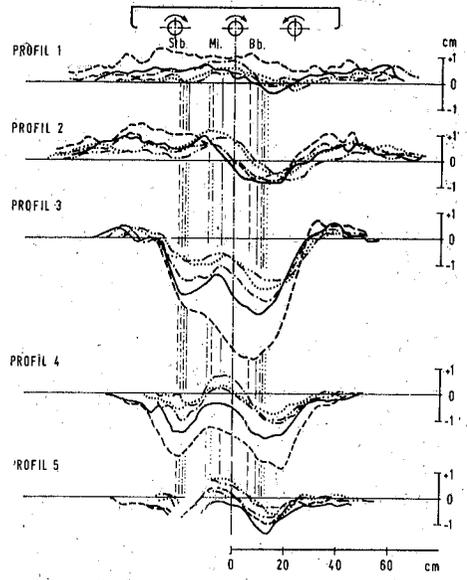


Abb. 26: Querprofile der vorher mit dem Material I eingeebneten Sohle nach dem Anfahren des Verbandes mit dem Schubboot „Pierre Brousse“ mit Leistungen zwischen 3700 und 6600 kW. Wassertiefe: 2,80 m

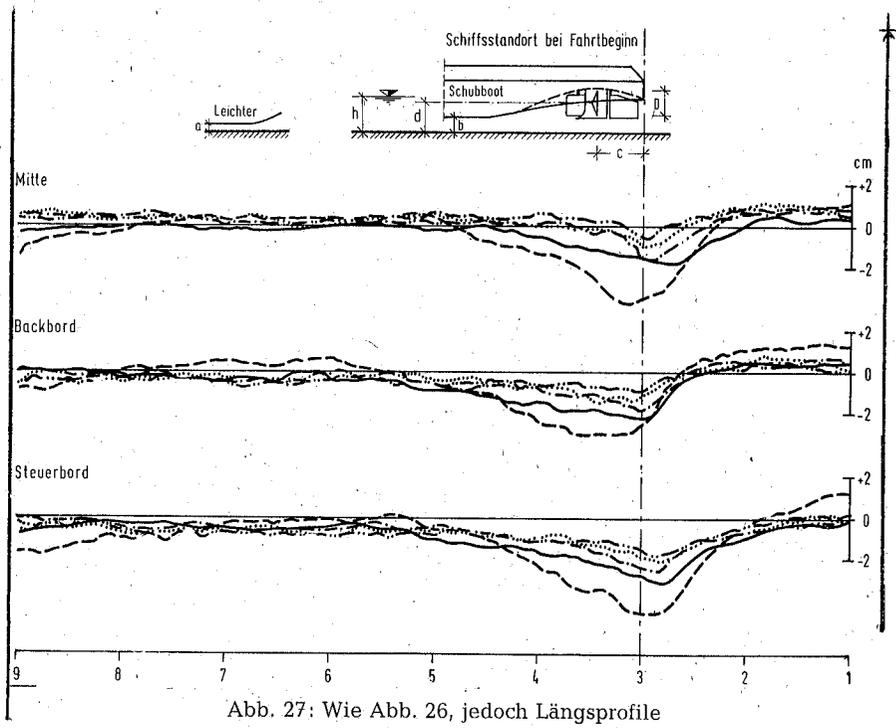


Abb. 27: Wie Abb. 26, jedoch Längsprofile

Faßt man alle bisher angestellten Natur- und Modellbeobachtungen zusammen, so ergibt sich folgendes Bild:

Unter dem normal fahrenden Schiff wird bei geringem Flottwasser das Sohlenkorn verlagert, und zwar der überwiegende Anteil im Stillwasser in Fahrtrichtung, im Strom hingegen in Fließrichtung. Im oder unter dem Propellerstrahl erfolgt auch ein stärkerer Transport nach den Seiten, wobei sich beim Einschrauber als Ergebnis eine 1 bis 2 m breite, flache Rille ausbildet, die seitlich in aufgeworfene Wülste übergeht. Die Rillentiefe oder die Wulsthöhe nach einer einzelnen Fahrt überschreiten kaum die Größenordnungen von 1 bis 2 dm. Auch eine Steigerung der Antriebsleistung auf mehr als 1500 kW je Propeller ändert daran nicht viel.

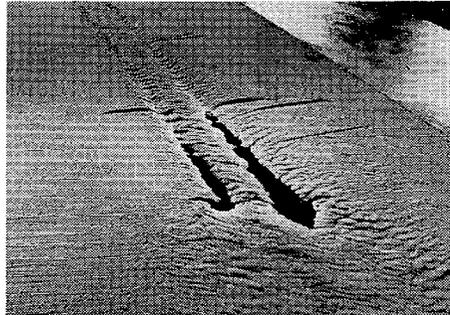


Abb. 28: Ansicht der vorher mit dem Material I eingeebneten Sohle nach ihrer Verformung durch das Anfahren des Verbandes mit dem Schubboot „Pierre Brousse“

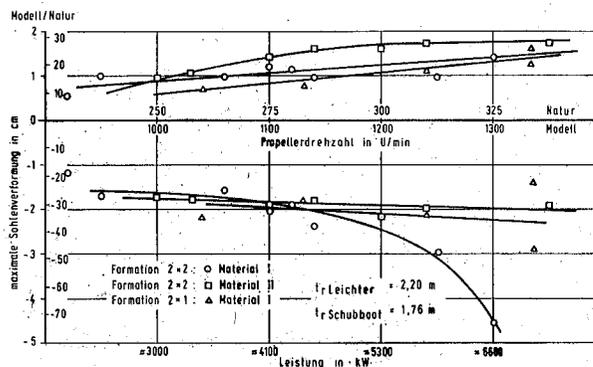


Abb. 29: Zusammenstellung der maximalen Kolk-tiefen (-) und Bankhöhen (+) für die mit einer Wassertiefe von 2,80 m ausgeführten Anfahrvor-suche

Demgegenüber treten ganz erhebliche Kolke und dahinter aufgeworfene Bänke auf, wenn der Schraubenstrahl eines sich nicht fortbewegenden Schiffes längere Zeit auf die Sohle einwirkt. In Breisach wurden im Grobkies Kolk-tiefen von 1,60 m und Bankhöhen von 1,30 m hergestellt und gemessen. Es ist anzunehmen, daß auch die Uferböschungen durch einen längere Zeit auf sie einwirkenden Propellerstrahl gefährdet werden.

Es sollte daher grundsätzlich vermieden werden, daß starke Propellerstrahlen während längerer Zeit auf die gleiche Stelle einwirken oder daß mit äußerster Kraft aus dem Stand angefahren wird.

#### 4. Verhalten von Seeschiffen

##### 4.1 Untersuchungen für einen Seekanal

Beim Durchfahren eines Seekanals mit Seeschiffen stellt das Schiff wegen des meist ungünstigen Verhältnisses von Hauptspantquerschnitt zu Kanalquerschnitt  $F_{HS}/F_K$  einen besonders ungünstigen Widerstand dar, der vom verdrängten Wasser überwunden werden muß. Das für den Fließvorgang erforderliche Gefälle entlang des Hindernisses „Schiffskörper“ wird durch einen Aufstau vor dem Bug erzeugt, wobei der Aufstau eine Funktion des Verhältnisses  $F_{HS}/F_K$  ist und um so größer wird, je mehr sich der Quotient dem Wert 1 nähert (Abb. 30). Die

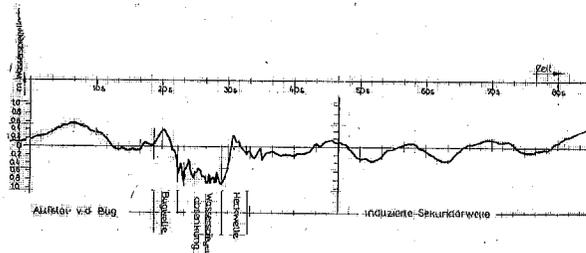


Abb. 30: Druckverteilung beim Schiffsdurchgang

Stömungsrichtung ist in dem Gefällebereich der Fahrtrichtung des Schiffes entgegengesetzt. Bei symmetrischem Querschnitt, homogener Anströmung und Mittenlage des Störkörpers ist auch der Abfluß symmetrisch, das Integral des Widerstandes über die Kanalbreite ist null. Bereits geringe einseitige Störungen führen jedoch zu einer Verzerrung des Strömungsbildes und dadurch zu asymmetrischen Querkräften auf das Kanalbett, worauf das Schiff mit Gieren und Kursversatz, die Sohle und die Böschungen bei Überschreiten einer für das autochtone Material kritischen Grenze mit Erosionen und Beschädigungen reagieren. Die Richtung der Querkräfte hängt dabei von der resultierenden Richtung des Druckgradienten ab, deren korrekte analytische Erfassung Schwierigkeiten bereitet, besonders wenn sich mehrere Einflüsse überlagern. Solche treten auf, wenn z. B. an plötzlichen großräumigen Querschnittsveränderungen Begegnungen oder Überholvorgänge von Fahrzeugen mit im Verhältnis zum Kanalquerschnitt großen Hauptspantquerschnitten möglich sind. In gekrümmten Strecken ergeben sich noch ungünstigere Verhältnisse. In Modelluntersuchungen der Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau Berlin wurden u. a. geeignete Rudermanöver untersucht. Dabei zeigte es sich, daß es in Kurvenstrecken mit konstantem Kanalquerschnitt, bei Begegnungen oder bei Querschnittsänderungen oft günstiger ist, auf Kursänderungen des Schiffes nicht in jedem Falle durch Gegenrudern zu reagieren, da das Schiff von dem nachfolgenden Reaktionskraftfeld aufgefangen wird, das den Kurs auf dem des Kräftegleichgewichts am Schiffskörper und des geringsten Widerstandes stabilisiert. Die Untersuchung der durch die Schiffe erzeugten Strömungsfelder gibt Aufschluß über 2 andere Erscheinungen, und zwar die Vertiefung an den Rändern und Aufhöhung der Kanalsohle in der Mitte in zweiseitig befahrenen Kanalabschnitten mit Trapez- oder Muldenprofil sowie die starken Sedimentbewegungen in quer zur Kanalachse verlaufenden Rinnen, wie sie über Unterführungsbauwerken anzutreffen sind. Im ersten Falle wird infolge des sich von der Oberfläche zur Sohle hin verjüngenden Kanalquerschnitts die Verdrängungsströmung entlang der Böschung seitlich unter den Schiffsrumpf gedrückt (Bild 31). Sie bewirkt den Sedimenttransport zur Kanalmitte. Ein solcher Effekt tritt beim Rechteckquerschnitt oder bei Kanalabschnitten mit einschiffigem Verkehr kaum auf. Im zweiten Falle erzeugt die Verdrängungsströmung in der Querrinne ein stehendes Sekundärwellensystem mit längs der Querrinne laufender Schwingungsrichtung, dessen Form und Energiegehalt von dem Ort der

Entstehung und dem Gradienten des Aufstaus vor dem Schiff abhängt. Dieses System ist in sich stabil und interferiert mit dem Primärwellenbild des Schiffes, wobei sich die Amplituden beträchtlich über die Ausgangswerte beider Wellen aufschaukeln können.

Ähnliche Verhältnisse entstehen auch bei großräumigen seitlichen Querschnittserweiterungen, wie Stich- und Wendebecken oder Kanalhäfen, die wie Querrinnen aufzufassen sind. In den Modellversuchen wurde festgestellt, daß ein funktioneller Zusammenhang zwischen Größe der Querschnittserweiterung, dem Längen-Breiten-Verhältnis des Beckens zur Kanalachse, der Wassertiefe, der Beckeneintrittsöffnung und dem vom Schiff bewirkten Druckgefälle existiert. Es zeigte sich, daß bei gleichem Druckgradienten und gleicher Wassertiefe normal zur Kanalachse angelegte, langgestreckte Stichbecken mit größeren Wasserstandsänderungen reagieren als parallel liegende. Der Einfluß der Beckenlänge ist von der Länge der Primärwelle abhängig und erzeugt dann die größten Sekundärampplituden, wenn sie das Vielfache der erregenden Schiffslänge beträgt. Die Breite des Beckens bzw. der Eintrittsöffnung ist dann mit den größten Wasserspiegelschwankungen verbunden, wenn sie der Länge des erzeugenden Druckgefälles, also etwa  $\frac{1}{2}$  Schiffslänge, entspricht und wenn die Beckenbreite etwa gleich der Breite der Eintrittsöffnung ist. Da die Reaktionen auch hier vom erzeugten Druckgradienten abhängen, der seinerseits eine Funktion der Hydrodynamik des Schiffes und des Blockageeffekts ist, ist eine verallgemeinernde mathematische Darstellung nicht möglich.

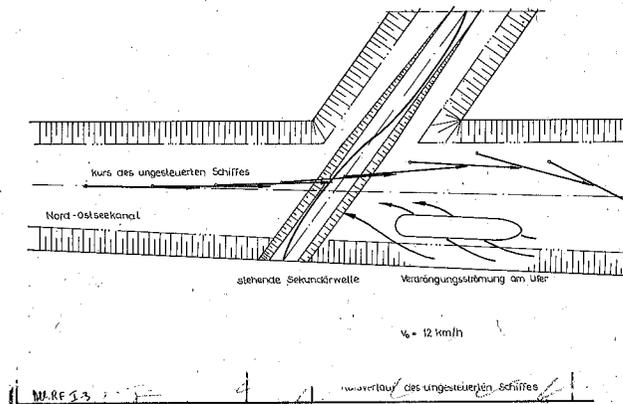


Abb. 31: Kursverlauf des ungesteuerten Schiffes

#### 4.2 Begegnen in Seekanälen

Die Grundlage des Systems der Verkehrslenkung auf dem Nord-Ostsee-Kanal, die jedes Schiff individuell erfaßt, ist die Beantwortung der Frage, bis zu welcher Größe Fahrzeuge einander auf der Strecke außerhalb der Weichen begegnen können.

Unter Berücksichtigung der von den Schiffen notwendigerweise einzuhaltenden Abstände von den Böschungen und des zu wahrenen Verhältnisses zwischen Kanalquerschnitt und eingetauchtem Schiffsquerschnitt steht der Schifffahrt nur ein begrenztes Fahrwasser zur Verfügung. Die Summe der Verkehrsbreiten der sich begegnenden Fahrzeuge zuzüglich eines sicheren Passierabstandes darf die Breite dieses Fahrwassers nicht überschreiten. Um dies zu gewährleisten, sind die Verkehrsbreiten der den Kanal durchfahrenden Schiffe zu ermitteln. Dabei ist auch hier von der Tatsache auszugehen, daß sich die Verkehrsbreite eines Schiffes in der Kurve aus geometrischen Gründen und dem in der Kurvenfahrt notwendigen Derivationswinkel gegenüber der Fahrzeugbreite vergrößert.

Mit dem Derivationswinkel  $\beta$  und der Annahme, daß der Drehpunkt des Schiffes am Ende des ersten Drittels der Schiffslänge liegt, ergibt sich die Verkehrsbreite (VB) eines Schiffes angenähert zu

$$VB = B + Lx \sin\beta + r - \sqrt{\left(r + \frac{2L}{3}\right) \cdot \left(r - \frac{2L}{3}\right)}$$

und der Zuschlag zur Schiffsbreite zu

$$Z = Lx \sin\beta + r - \sqrt{\left(r + \frac{2L}{3}\right) \cdot \left(r - \frac{2L}{3}\right)}$$

Darin sind L und B Länge und Breite des Schiffes, r Radius der durchfahrenen Kurve.

Nach vorstehender Formel lassen sich die von der Länge und Breite der Schiffe sowie vom Radius der zu durchfahrenen Kurven eines Kanals abhängigen Verkehrsbreiten oder Zuschläge zur Verkehrsbreite errechnen. Äußere Einflüsse, wie insbesondere Wind, bleiben bei dieser Rechnung allerdings in gleicher Weise unberücksichtigt, wie besondere Manövriereigenschaften der Schiffe. Diese in der Regel für die Verkehrsbreite von Seeschiffen weniger bedeutsamen Faktoren sind wegen ihres Wechsels und ihrer Verschiedenartigkeit kaum unter einem Gesamtaspekt im Hinblick auf das Verkehrsgeschehen auf einem viel befahrenen Seekanal rechnerisch zu erfassen. Ihnen wird man zweckmäßigerweise durch einen entsprechenden Sicherheitszuschlag bei der Verkehrsbreite sowie durch verkehrslenkende Maßnahmen in extremen Fällen Rechnung tragen, wie dies beim Nord-Ostsee-Kanal geschieht.

Die errechneten Zuschläge zur Schiffsbreite lassen sich in einem Diagramm darstellen.

Im Nord-Ostsee-Kanal werden die Zuschläge zur Schiffsbreite auf der Basis eines mittleren Derivationswinkels von  $5^\circ$  und der engsten zu durchfahrenen Kurve mit einem Radius von 2500 m errechnet und in einem Diagramm dargestellt (Abb. 32). Die z. T. größeren Derivationswinkel bei Binnenschiffen werden nicht besonders berücksichtigt, weil Binnenschiffe wegen ihres geringen Tiefgangs über den von Seeschiffen befahrbaren Fahrstreifen hinaus auf den hinreichend breiten Böschungsbereich ausweichen können.

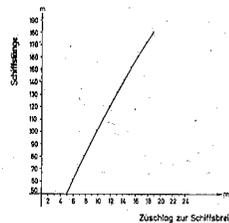


Abb. 32: Fahrbahnverbreiterung im Nord-Ostsee-Kanal

Mit Hilfe dieses Diagramms läßt sich unter Berücksichtigung des Kanalprofils, des Fahrbereiches (F) mit 62 m Breite und der Tiefgänge (Tg) der Fahrzeuge ermitteln, bis zu welcher Größe Schiffe oder Kategorien von Schiffen einander auf der Kanalstrecke außerhalb der sog. „Weichen“ begegnen können:

Beispiel

Fahrzeug A:  $L = 170 \text{ m}$ ;  $B = 21 \text{ m}$ ;  $Tg = 9,5 \text{ m}$ ;  $VB_A = 38,41$

Fahrzeug B:  $L = 75 \text{ m}$ ;  $B = 11 \text{ m}$ ;  $Tg = 3,7 \text{ m}$ ;  $VB_B = 18,06$

---

Passierabstand =  $62 \text{ m} - (VB_A + VB_B) = 62 \text{ m} - 56,47 \text{ m} = 5,53$

---

Diese Kenntnis ist die Basis des Verkehrslenkungssystems auf dem Nord-Ostsee-Kanal.

#### 4.3 Verhalten von Seeschiffen im Küstengewässer

Beim Fahren von Seeschiffen in begrenztem Fahrwasser werden Einflüsse wirksam, die mehr oder weniger nachteilige Auswirkungen auf die Manövrierfähigkeit haben, insbesondere

- die Herabsetzung der Steuerfähigkeit der Schiffe bis zum „Aus-dem-Ruder laufen“, wobei die äußeren Kräfte die Ruderkraft übersteigen können;
- die Gefahr der Grundberührung durch Absenken des Wasserspiegels und Tiefertauchen des fahrenden Schiffes, dem sog. „squat“;
- die Vergrößerung des Tiefgangs und Verringerung der Manövrierfähigkeit durch Seegang und Dünung in Hafen- und Fahrwassereinfahrten, die sich im allgemeinen besonders auf beladene Schiffe auswirkt.

In der südlichen Nordsee und in der Ostsee machen sich bereits Flachwassererscheinungen für schnelle und/oder tiefgehende Schiffe bemerkbar.

Die Forschungen auf dem Gebiet des Verhaltens von Seeschiffen beim Fahren in begrenztem Fahrwasser können zwar noch nicht als abgeschlossen betrachtet werden, doch konnten durch praktische Erfahrungen, wissenschaftliche Versuche und theoretische Überlegungen wertvolle Erkenntnisse gewonnen werden.

Kollisionen infolge von „Hecksog“ beim Überholen mit zu geringem Abstand, wie am 27. November 1974 auf der Elbe, oder durch den Einfluß des geringeren Kanalquerschnitts bei Parallelkurs vom Übergang aus einer Weiche mit breiter Wasserfläche in ein enges Kanalstück, wie am 31. 12. 1974 im Kiel-Kanal, ereignen sich relativ selten. Dagegen wirft der zunehmende Schiffsverkehr mit immer größeren und schnelleren Schiffen das Problem auf, welcher höchstzulässige Tiefgang zur Vermeidung einer Grundberührung und welche noch vertretbare Geschwindigkeit zur Vermeidung von Beschädigungen an Ufern, festgemachten oder fahrenden Fahrzeugen möglich ist.

Bei der Testfahrt eines vollbeladenen 48 000-tdw-Tankers auf der Elbe wurde eine Tiefertauchung allein durch „squat“ von 0,50 m ermittelt. Die Festsetzung des Höchsttiefganges, der sowohl der Sicherheit als auch der wirtschaftlichen Ausnutzung am besten gerecht wird, ist abhängig von den örtlichen Verhältnissen (der Breite und Tiefe des Fahrwassers, der Strömung, der Wetterlage etc), so daß es schwierig ist, allgemein gültige Regeln für alle Häfen und Fahrwasser aufzustellen.

Unter Berücksichtigung der örtlichen Verhältnisse wird in der Bundesrepublik Deutschland der zulässige Tiefgang im Einvernehmen mit den Lotsen von der Wasser- und Schiffahrtsverwaltung festgelegt, wobei in den Nordseehäfen eine keelclearance von 10 — 12 %, in besonderen Fällen (hoher Seegang und Dünung) von 15 % zugrundegelegt wird. Erforderlichenfalls werden etwa 2 % Tiefertauchung beim Übergang von Seewasser in Süßwasser berücksichtigt. Für außergewöhnlich große Schiffe, z. B. bei der Überführung von der Bauwerft oder dem Reparaturdock oder für schnelle Containerschiffe, sind spezielle Regelungen erforderlich.

Als besonders zu lösendes Problem war in den vergangenen Jahren das Durchfahren der Vegesacker Kurve an der Weser von den auf einer Bremer Werft gebauten Supertankern. Während die Überführungen wesenabwärts der im Jahre 1969 begonnenen Serie von 250 000-tdw-Tankern noch ohne große Schwierigkeiten durchgeführt werden konnten, waren für die Fahrt des ersten im Jahre 1975 fertiggestellten „Europa Tankers“, der „Johannis Colocotronis“, umfangreiche Untersuchungen erforderlich. Dieses Schiff mit 391 000 tdw bei 370 m Länge und 64 m Breite ist das größte bisher wesenabwärts gebrachte Fahrzeug. Im kritischen Bereich der Vegesacker Kurve ist eine Kursänderung von 78° über eine Distanz von 1 sm bei einer Fahrwasserbreite von 120 — 190 m erforderlich. Messungen an den 250 000-tdw-Tankern und Modellversuche in der Hamburgischen Schiffbauversuchsanstalt haben ergeben, daß diese

Schiffe nicht mehr mit eigener Kraft diese Kurve durchfahren können, ohne daß die Sohllinie des Fahrwassers durch das Achterschiff überfahren wird. Das Schiff mußte daher mit Hilfe von 6 Schleppern durch diesen Kurvenbereich bugsiert werden.

#### 4.4 Messungen über das Verhalten von Großtankern während der Revierfahrt im Jadedefahrwasser

##### 4.4.1 Vorbemerkung

Das Jadedefahrwasser wurde von einer ehemaligen Tiefe von 10 — 12 m u. MSpTnw (SKN) auf eine Tiefe von 19 — 20 m unter SKN ausgebaut, die es vollabgeladenen 250 000-tdw-Tankern mit einem Tiefgang von 20 m erlaubt, in enger Anlehnung an die Tide die Umschlaganlagen bei Wilhelmshaven zu erreichen (Abb. 33).

Die Ausbaubreite des Fahrwassers wurde auf der Grundlage der bisher vorliegenden Erfahrungen einheitlich auf 300 m festgelegt.

Messungen über das tatsächliche Verhalten der VLCCs während der Revierfahrt sollen insbesondere im Bereich der Kurswechsellpunkte Aufschluß über eine evtl. erforderliche Erweiterung des Fahrwassers geben.

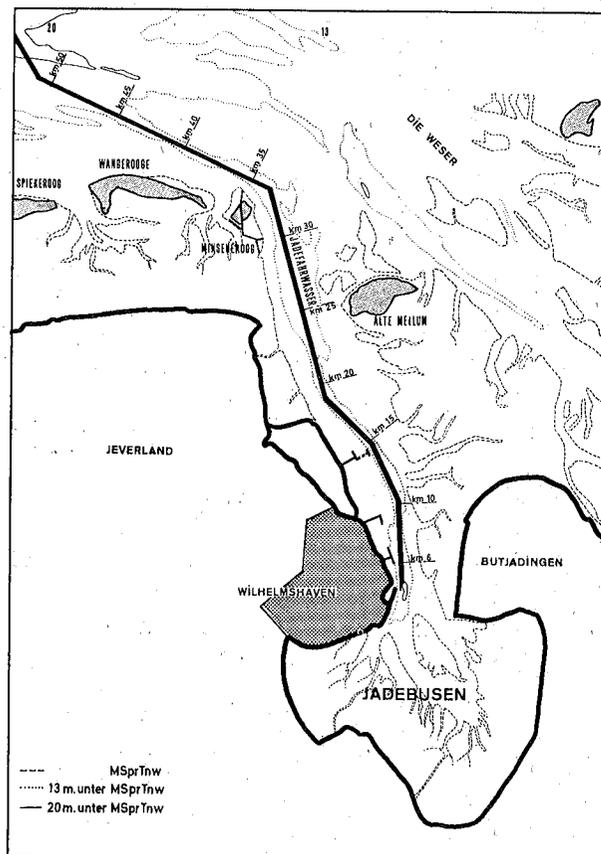


Abb. 33: Die Jade

4.4.2 Morphologische und hydrologische Verhältnisse

Das Fahrwasser liegt in einem vorwiegend sandigen Ästuar. Die sich nach der Vertiefung einstellenden Unterwasserböschungen haben überwiegend die Steilheit von 1:50 und dürften damit die Rückstromverhältnisse für das fahrende Schiff nicht maßgeblich beeinflussen (Abb. 34).

Die Fahrwassersohle ist im äußeren Bereich weitgehend eben und geht erst ab ca. Fahrwasser-km 42 in eine Riffelsohle über. Besonders im Teilbereich II, siehe Abb. 33, beim Übergang von der Außenjade zur Innenjade erreichen die Riffel Höhen von 5 m, im Einzelfall bis 7 m. Im inneren Fahrwasserbereich nehmen die Riffel wieder an Mächtigkeit ab und liegen bei ca. 2 — 3 m Höhe. Die Strömungsgeschwindigkeiten in der Jade erreichen Werte bis über 2 m/sec. Während der eng an den Tidehochwasserscheitel angelegten Revierfahrt läuft jedoch nur noch ein Strom von im allgemeinen weniger als 1 m/sec. Die Richtungen der Strömungen divergieren 3 bis max. 24° von der Fahrwasserrichtung, wobei Sohlströmung und Oberflächenströmung weitgehend parallel sind. Die Sohlströmungen liegen gegenüber den hier angegebenen Oberflächenwerten um ca. 10 % niedriger (s. Abb. 35).

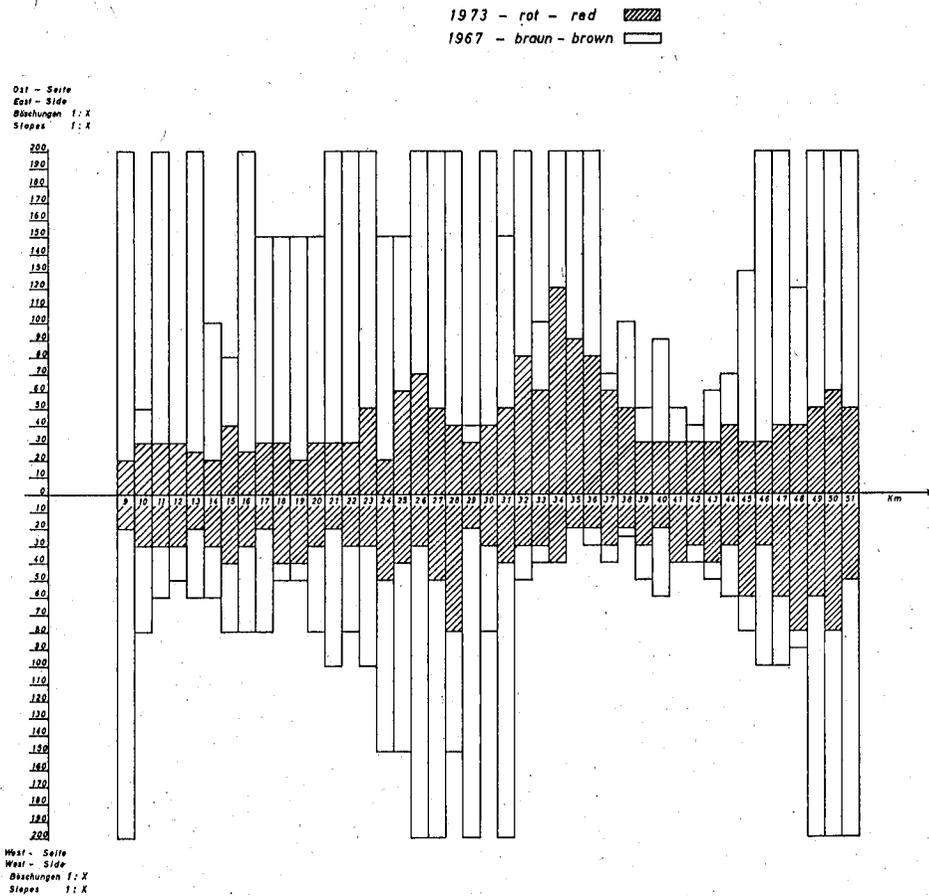


Abb. 34: Querprofile im Jedefahrwasser

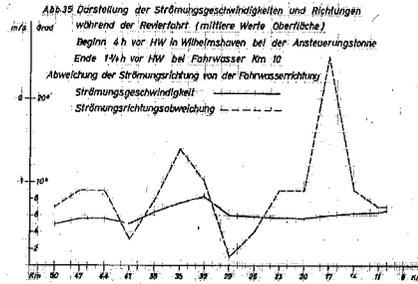


Abb. 35: Darstellung der Strömungsgeschwindigkeiten und Richtungen während der Revierfahrt

#### 4.4.3 Verlauf des Fahrwassers

Das Fahrwasser wird von der See her über einen Kurswechsel von rd.  $16^\circ$  bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten und im Bereich der flachsten Unterwasserböschungen angesteuert. Nach ca. 12 km folgt der erste Kurswechsellpunkt mit  $12^\circ$  nach Backbord, dem sich im Abstand von rd. 1300 m ein weiterer Kurswechsel um  $24^\circ$  nach Steuerbord und nach rd. 2900 m ein Kurswechsel um  $36^\circ$  wieder nach Steuerbord anschließt. Der engste Kurvenradius in dieser Kurswechselreihe beträgt rd. 1500 m. Nach weiteren rd. 24 km folgt ein Kurswechsel um  $30^\circ$  in einen Fahrwasserbereich, in dem die Abweichung zwischen Strömungsrichtung und Fahrwasserichtung mehr als  $20^\circ$  erreicht. Es folgen zwei weitere Kurswechsel mit  $20^\circ$  und  $24^\circ$ .

#### 4.4.4 Reviernavigationshilfen

Das Fahrwasser ist durch Torbetonung im Abstand von ca. 2000 m bezeichnet. Der Außenbereich bis Fahrwasser-km 37 wird bei Nacht zusätzlich durch ein scharfgebündeltes Leitfeuer und ab km 33,5 durch Richtfeuerlinien gekennzeichnet. Eine Funkortungskette mit Radarüberwachung ist erst im Aufbau.

#### 4.4.5 Meßmethode zur Untersuchung des Kursverhaltens

Um das genaue Kursverhalten der Tanker, den Ablauf der einzelnen Kurswechselmanöver sowie die Steuer- und Maschinenkommandos erfassen zu können, wurde zunächst während fünf Revierfahrten eine Meßmannschaft mit einem Hi-Fix-Empfänger an Bord der Tanker gebracht. Über die Aufzeichnung der Hi-Fix-Koordinaten im Abstand von jeweils 30 Sek., im Kurswechselbereich und 1 Minute auf gerader Strecke und der jeweils anliegenden Kürve wurde die Lage des Tankers mit einer Ortungsgenauigkeit von etwa  $\pm 10$  m aufgenommen.

#### Abmessungen der untersuchten Tanker

Fahrt	Länge m	Breite m	Tiefgang m	tdw
A	326	49	20	240 000
B	326	49	20	240 000
C	343	52	19	280 000
D	337	55	14	275 000
E	284	43	17	140 000

(Teilladung)

#### Metereologische Verhältnisse während der Fahrten

Die Windstärken während der Untersuchungen betragen im Mittel zwischen Bft 3 — 4 max. 5. Eine Vermessung wurde bei Sichtweiten bis unter 300 m, eine weitere bei Nacht und klarer Sicht vorgenommen, die drei übrigen Vermessungen fanden bei Tag bei mittleren Sichtverhältnissen statt.

Ergebnisse der Untersuchungen

In den Abb. 36 — 39 sind zusammenfassende Darstellungen der Meßergebnisse wiedergegeben.

Für die Frage nach der erforderlichen Breite des Fahrwassers wurde besonders die Abweichung der Fahrwasserrichtung von der tatsächlichen jeweiligen Tankerrichtung dargestellt und der während der verschiedenen Tankerfahrten überstrichene Fahrwasserbereich in den wichtigsten Kurswechsellpunkten wiedergegeben. Es zeigt sich hierbei, daß die Abweichung der Richtungen allgemein unter 6° bleibt. Nur in dem Kurswechsellpunkt bei km 19 beim Eindrehen in einen Fahrwasserbereich mit verhältnismäßig hoher Divergenz zwischen Strömungsrichtung und Fahrwasserrichtung (s. Abb. 35) traten höhere Richtungsabweichungen bis zu 21° auf. In der Darstellung der überstrichenen Fahrwasserbereiche zeigt sich jedoch (s. Abb. 39), daß auch hier alle Tanker innerhalb des Fahrwassers bleiben. Bemerkenswert ist dabei, daß die beiden größeren Tanker A und B die Kurve mit den geringsten Kursabweichungen fuhren und sich am mittigsten im Fahrwasser verhielten. Ähnlich mittigen Kurs, jedoch mit größerem Breitenbedarf fuhr Tanker C, während der teilabgeladene Tanker D und der kleinere Tanker E die größten Abweichungen von Fahrwasserrichtung und Tankerrichtung zeigten, wahrscheinlich aufgrund des leichteren Drehverhaltens.

Deutlich wurde darüber hinaus, daß im Teilbereich II der relativ enge Radius minimal 1500 m nur schwer eingehalten werden kann und hier eine Ausweitung der Trasse zum Bogenäußeren hin geraten zu sein scheint sowie eine Abflachung der Kurve im Innenbereich bei km 33,5 mit einer anschließenden Erweiterung bei km 33 zum Bogenäußeren hin (s. Abb. 38).

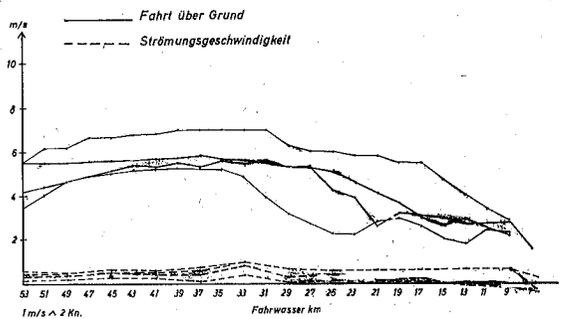


Abb. 36: Bandbreite der Fahrgeschwindigkeit über Grund und der Strömungsgeschwindigkeiten während der vermessenen Revierfahrten

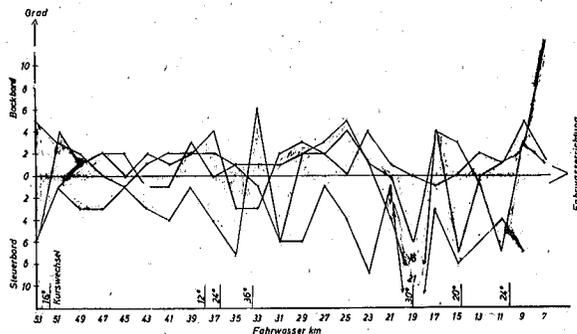


Abb. 37: Bandbreite der Abweichung der Fahrwasserrichtung und der Tankerrichtung während der vermessenen Revierfahrten

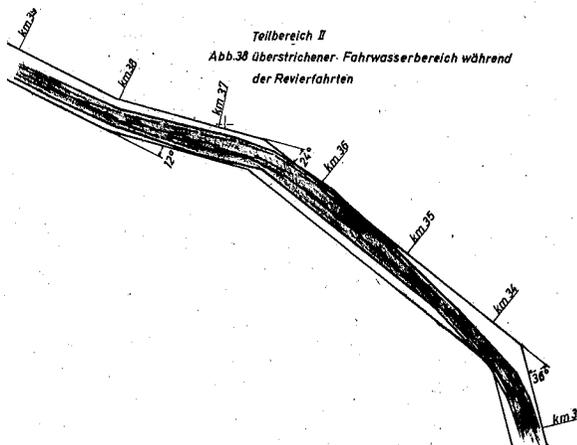


Abb. 38: Überstrichener Fahrwasserbereich  
während der Revierfahrten

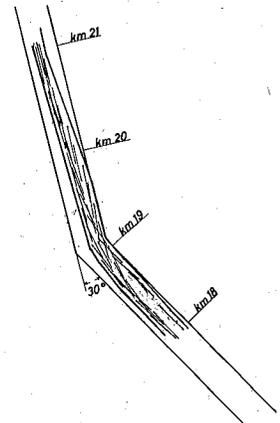


Abb. 39: Überstrichener  
Fahrwasserbereich  
während der Revierfahrten

Ein deutlicher Einfluß der Unterwasserböschungen auf das Fahrtverhalten der Tanker auch bei unterschiedlichen Neigungen ließ sich aus den bisher vermessenen Fahrten nicht ablesen. Desgleichen zeigten die unterschiedlichen Sohlformen bei den bisher durchgeführten hydronautischen Untersuchungen keinen Einfluß. Dies kann aber u. U. auch darauf zurückzuführen sein, daß die UKC in den extremen Riffelstrecken allgemein über 10 % des Schiffstiefganges liegt und somit keine zu starken Druckunterschiede unter dem Schiffsboden und in dem Schraubenanstrom auftraten.

Obwohl die bisher durchgeführten Messungen noch kein abschließendes Urteil erlauben, scheint sich abzuzeichnen, daß durch genaue Ortungsmöglichkeit während der Navigation sich Kurse in den Kurswechselbereichen steuern lassen, die keine oder nur eine sehr geringe Erweiterung der Trasse verlangen.

Das hier im einzelnen nicht wiedergegebene Verhalten des VLCCs auf gerader Strecke zeigt, daß hier bei einer Trassenbreite von 300 m auch ein sicheres Begegnen zweier VLCCs möglich ist, wobei im Regelfall allerdings eins der Schiffe nach Leichterung in Wilhelmshaven nicht mehr streng trassengebunden ist.

Nach Betriebsaufnahme der im Aufbau befindlichen Funkortungsanlagen mit Radarüberwachung ist zudem mit besseren Navigationshilfen zu rechnen, so daß ideale Kurslinien noch genauer eingehalten werden können.

#### 4.5 Maßnahmen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit

Der Schiffsverkehr auf der Elbe liegt seit 1964 bei etwa 100 000 Durchfahrten/Jahr (ein- und ausgehender Verkehr); die Schiffe sind im Durchschnitt seit der Zeit größer und schneller geworden. Seit Inbetriebnahme der Landradarstationen im Jahre 1965 wird auch bei Nebel die Fahrt fortgesetzt, Verkehrszusammenballungen konnten vermieden werden.

Die Sicherheit des Schiffsverkehrs auf der Elbe konnte — obwohl die Schifffahrt heute bei Nebel weiterläuft — wesentlich verbessert werden.

Zur Herabsetzung der Unfälle von 78 (34 Kollisionen, 44 Grundberührungen) im Jahre 1964 auf 55 (22 Kollisionen, 33 Grundberührungen) im Jahr 1975 trugen folgende Maßnahmen bei:

1. Inbetriebnahme der Landradarstationen und Beratung der Schifffahrt durch Lotsen bei unsichtigem Wetter oder auf Anforderung

2. Alle 2 Stunden Ausstrahlung wichtiger nautischer Nachrichten
3. Verbesserung der sicheren Ansteuerung der Elbe durch zusätzliche Betonung und Befeuerung, Auseinanderziehen der Positionen des Feuerschiffes „Elbe 1“ und der Lotsenvernetzstation.
4. Einrichtung eines Verkehrstrennungsgebietes in der Ansteuerung zum Feuerschiff „Elbe 1“
5. Verbesserung der Fahrwasserbezeichnung auf der Elbe insgesamt

Im NO-Kanal (Kiel-Kanal) ist zwar die Anzahl der Schiffe von 86 834 Durchfahrten (1964) auf 71 738 Durchfahrten (1975) zurückgegangen; aber auch hier hat die Zunahme größerer Schiffe das Unfallrisiko erhöht.

Trotzdem ist die Unfallhäufigkeit von 376 Unfällen im Jahre 1964 auf 178 im Jahre 1975 zurückgegangen. Diese für die Verkehrssicherheit positive Tendenz ist wesentlich auf folgende Maßnahmen zurückzuführen:

1. Im Laufe der letzten Jahre wurden auf einer Strecke von 40,6 km Länge die bis dahin notwendigen Aufstoppungen von Schiffen durch den Ausbau der Wasserspiegel- und Sohlenbreite vermieden.
2. Der Revierfunkdienst auf dem NOK ist verbessert worden; für Schiffe ohne UKW stehen tragbare Geräte zur Verfügung. Wichtige Mitteilungen werden zur Unterrichtung der Schifffahrt ausgestrahlt.
3. Wichtige Informationen zwischen Verkehrslenkungsstellen, Lotsenstationen und Schleusen werden per Fernschreiber ausgetauscht.
4. Alle Verkehrssignale sind auf Lichttagessignale umgestellt und einer bestehenden Verkehrssystematik angepaßt worden.
5. Natriumdampfleuchten, die sich insbesondere bei unsichtigem Wetter bewährt haben, finden bei Schleusen, Fähren und wichtigen Kanalstrecken Verwendung.

Die statistischen Angaben zeigen, daß durch die getroffenen Maßnahmen die Kollisionen und Grundberührungen erheblich verringert werden konnten; die Sicherheit des Schiffsverkehrs wurde so wesentlich verbessert.

## 5. **Beschädigung von Uferböschungen und Fahrwassersohle am Nord-Ostsee-Kanal und Abhilfemaßnahmen**

### 5.1 *Allgemeine Angaben über den NOK*

Der Ende des vorigen Jahrhunderts in Betrieb genommene rd. 100 km lange Nord-Ostsee-Kanal ist die meistbefahrene künstliche Seeschiffahrtsstraße. Im Rekordjahr 1974 durchfuhren fast 70 000 Schiffe — das sind etwa 200 Schiffe pro Tag — mit 90 Mio BRT den NOK in beiden Richtungen bei Tag und Nacht.

Nach seiner ersten Erweiterung 1914 bietet er sich der internationalen Schifffahrt bei einer Wassertiefe von 11 m für Tiefgänge bis 9,5 m an. Die Sohlenbreite beträgt 44 m und bei 1 : 2,25 bis 1 : 3 geneigten Unterwasserböschungen ergibt sich eine Wasserspiegelbreite von 102,5 m.

Seit 1965 wird der NOK mit seinen stark erodierten und nicht mehr standfesten Unterwasserböschungen auf ein Profil von 90 m Sohlen- und 162 m Wasserspiegelbreite ausgebaut. Die Wassertiefe bleibt unverändert.

### 5.2 *Geologie und Baugrund*

Der Nord-Ostsee-Kanal verbindet die Elbe bei Brunsbüttel mit der Kieler Förde. Er durchquert die bis zu 3 m tieferliegende Marsch und durchschneidet dann den bis zu 25 m hohen

Geestrücken. Bis Rendsburg folgt der NOK der Eiderniederung und erreicht schließlich in seinem östlichen Teil das holsteinische Hügelland.

Als Baugrund bietet sich daher eine breite Skala von der flüssigbreiigen Gytta der Niederungsstrecke über die Torfe unterschiedlichster Wassergehalte, Feinst- bis Grobsande, Beckentone bis zu den schweren Geschiebemergeln der Oststrecke an.

### 5.3 *Ausbau und Unterhaltungszustand*

Das NOK-Trapezprofil ist gegenüber Angriffen aller auftretenden Kräfte wie Wellen, Strömung, Schiffsstoß, Eisgang und Ankerwurf lediglich im Bereich der Wasserlinie etwa von + 1 m bis - 2 m geschützt.

In erster Linie sind Kostengründe ausschlaggebend, weshalb die 33 m (1:3) bis 44 m (1:4) langen Unterwasserböschungen keinen zusätzlichen Schutz erhalten haben. Allerdings würden tiefreichende schwere Steinschüttungen auch zu einer kaum zu vertretenden Gefährdung dünnwandiger Seeschiffkörper führen, während leichtere Schutzschichten bei den täglich, ja fast stündlich eintretenden Böschungsberührungen durch Schiffseinheiten bis zu 30 000 BRT keine Gewähr für einen Dauerschutz bieten.

In weitgehender Abhängigkeit vom anstehenden Baugrund sind daher von den Wasserbauämtern Deckwerksformen entwickelt worden, die eine Optimierung des Unterhaltungsaufwandes zur Folge haben.

Unterhalb der geschützten Böschungszone haben im Laufe der Jahrzehnte, besonders verstärkt nach dem 2. Weltkrieg, unter Einfluß ständig wachsender Verkehrszahlen und Schiffsgrößen die Erosionsraten zunächst unbemerkt, ab 1965 aber durch systematische Peilungen belegt, ein erschreckendes Ausmaß angenommen:

- Aufsteilen der Unterwasserböschungen bis zum labilen Gleichgewicht
- Vertikale Böschungsabbrüche im Unterwasserbereich bis zu 6 m Höhe
- Unterspülen der Uferdeiche bis zu mehreren Metern (schwimmende Deiche) mit akuter Überflutungsfahr für die bewohnten Niederungsgebiete
- Eintreiben des Erosions- und Rutschungsbodens aus den Böschungen in die Sohle mit der Folge von Tiefgangbeschränkungen für die durchgehende Schifffahrt

Der desolate Zustand des Unterwasserbettes hatte unmittelbare Auswirkungen auf den Uferschutz. Selbst mit intensivsten Unterhaltungsmaßnahmen sind die Schutzwerke nicht mehr zu halten. Tief ins Land reichende Ausspülungen der Ufer sowie Rutschungen im Oberwasserbereich und Grundbrüche sind die Folge.

### 5.4 *Fahrverhalten*

Der NOK steht der Schifffahrt Tag und Nacht offen. Von einer bestimmten Schiffsgröße an besteht Lotsenannahmepflicht. Kanalsteuerer werden vorgehalten.

Bis zu festgelegten Abmessungen ist der Kanal zweischiffig passierbar. Größere Einheiten begegnen sich in sogenannten Weichen, seeartigen Aufweitungen, die als Wartestellen mit Dalbenreihen ausgerüstet sind.

Einheiten bis zur Begegnungsgröße benutzen grundsätzlich die rechte Fahrwasserhälfte bzw. befahren je nach Tiefgang den Böschungsbereich.

In der Kurvenfahrt (Radius 1800 bis 6000 m) wird von den größeren Einheiten notwendigerweise der Außenbogen bevorzugt.

Der Schiffsverkehr wird durch Leitstellen überwacht und gelenkt. Die Geschwindigkeit ist festgesetzt auf 12 km/h für Schiffe von  $\geq 14\ 000$  BRT bzw. 8,5 m Tiefgang; für alle übrigen gelten 15 km/h, Überholmanöver sind nur in den Weichen zugelassen.

#### 5.4.1 Schiffsstoß

Böschungsbearbeitungen gehören am NOK zum Alltagsgeschehen. Sie sind bei den vielfältigen Einflüssen auf das den Kanal durchfahrende Schiff — Wind, Nebel, Eisgang, Strömung, einseitige Querschnittserweiterung, Maschinenschaden, Ruderversager u. a. — auch nicht vermeidbar.

Die Intensität des Schiffsstoßes reicht dabei vom „leichten Absetzen“ bis zum stevenrechten Festfahren in der Böschung, aus dem es nur noch ein Befreien mit Schlepperhilfe gibt. Beteiligt sind alle Verkehrsgruppen vom Sportboot bis zum Luxusliner oder Tanker der noch zugelassenen Abmessungen.

#### 5.4.2 Strömungswirkungen

##### 5.4.2.1 Grundwasser und kurzfristige Wasserstandsschwankungen

Bis auf wenige Ausnahmen besteht auf den rd. 100 km Kanallänge eine zum Teil erhebliche Differenz zwischen Kanalwasser- und anschließendem Grundwasserspiegel. In den Einschnittsstrecken gewährleisten die durchlässigen Deckwerke einen gefahrlosen Wasserstandsausgleich, während in der Niederungstrecke eine sehr rasch eintretende Selbstdichtung den besonderen Einbau von Dichtungsschichten überflüssig macht.

Durch den Einbau leistungsfähiger Filterschichten werden auch die kurzfristig auftretenden Absenkungen infolge Schiffsvorbeifahrt beherrscht. Hierbei kommt dem unteren Abschluß des Deckwerks eine besondere Bedeutung zu. Stützende Fußpfahlreihen in der Wasserspiegellinie — durchweg mit einem Gürtel aus Vorwurfsteinen gesichert — waren über Jahrzehnte hinweg die bewährte Standardausführung.

##### 5.4.2.2 Rückströmung

Die bei der Schiffsdurchfahrt entstehende Rückströmung verteilt sich in Abhängigkeit von dem jeweiligen Verhältnis  $n$  fast gleichmäßig über den gesamten Querschnitt. Sie nimmt am NOK Werte (gemessen) bis zu 2,5 m/sec an und führt auf Sohle und Böschungen (ungeschützt) durch Beschleunigungs- und Turbulenzerscheinungen zu beachtlichem Bodentransport, der in seiner Tendenz zur Sohle gerichtet ist.

##### 5.4.2.3 Schraubenstrom

Der Schiffsschraubenstrahl wirkt örtlich begrenzt aber konzentriert auf Böschungen und Sohle. In Verbindung mit der Rückströmung führt er zu einer gefährdenden Verteilung des Erosionsbodens auf der Sohle. Im NOK-Bereich wird folgendes Bild durch die Routinepeilungen ständig bestätigt:

- In geraden Kanalstrecken bauen sich etwa in den Drittelpunkten der Sohle 2 Längsrücken auf,
- zwischen diesen Längsrücken, besonders aber im Brechpunkt Sohle/Böschung kommt es zu Austiefungen (Längsgräben), die die Standsicherheit der Böschungen gefährden, zumindest aber die Böschungserosion beschleunigen.
- In Kurvenstrecken entsteht nur ein Längsrücken, und zwar auf der Innenseite des Fahrwassers, während die Austiefung auf der Kurvenaußenseite noch gravierender ausfällt (3 m gegenüber Solltiefe gemessen!).

##### 5.4.2.4 Schiffswellen

Aus der Schiffsfahrt entstehende Wellen führen am NOK zur stärksten dynamischen Belastung der Uferschutzwerke. Sie sind ausschlaggebend für die Breite der geschützten Zone, die Einzelgewichte der verwendeten Baustoffe oder die Qualität einer möglichen Verklammerung

(Pflasterung, Setzpack, Fugenverguß, Aufhängung). Aufgrund jahrelanger Beobachtungen ist für den Einfluß aus Schiffswellen am NOK eine Grenztiefe von etwa 2 m anzusetzen. In größerer Wassertiefe überwiegen die Einflüsse aus der Rückströmung, die nur bei einem Vollschutz des Profils neutralisiert werden könnten.

#### 5.4.3 Ankerwurf

Generell wird es sich auf der freien NOK-Strecke nur um Notankerungen bei besonderen Gefahrensituationen handeln. Sie zu unterbinden, könnte nur größere Gefahren heraufbeschwören (Kollisionen/Havarien).

Spezielle Versuche wurden am NOK bisher nicht durchgeführt. Bei grasenden Ankern wird eine Eindringtiefe bis zu 3 m (je nach Bodenart) unterstellt und z. B. bei der Verlegung von Düchern berücksichtigt. Aussagen aus der Ankerbergung bestätigen diese Annahmen.

#### 5.4.4 Eisgang

Der Einfluß von Eisgang auf die Uferdeckwerke ist möglicherweise früher am NOK etwas überschätzt worden.

Pflasterungen (glatte Oberfläche) wurden jedenfalls sehr stark mit der abweisenden Wirkung gegenüber Eisangriff begründet. Die zwischenzeitlich völlig eingestellten Pflasterungen haben jedoch nicht zu höheren Schadensquoten geführt.

Der Beweis ist allerdings nicht schlüssig, da die winterlichen Wassertemperaturen durch Kühlwassereinleitungen generell gestiegen sind.

#### 5.5. Abhilfemaßnahmen

Der in den Nachkriegsjahren zunehmende Verfall des Kanalbettes signalisierte vor dem Hintergrund ständig steigender Schiffgrößen und -zahlen ein wachsendes Mißverhältnis zwischen Kanalquerschnitt und eingetauchtem Schiffsquerschnitt. Nach 1965 bei der Sogréah in Grenoble und der BAW in Karlsruhe durchgeführten Modellversuchen ergab sich bei Vorgabe einer vertretbaren jährlichen Erosionsrate von  $1 \text{ m}^3/\text{lfdm}$  für das NOK-Regelschiff von 14 000 tdw auch das an Binnenschiffahrtsstraßen seit Jahren gebräuchliche Bemessungsverhältnis von  $n = 7$ . Die vertretbare Erosionsrate war zuvor an der für Wasserbauten angemessenen Lebensdauer von 50 Jahren entwickelt worden.

Bei der Gestaltung des Kanalbettes sind grundsätzlich 3 Lösungen möglich:

- Senkrechte Seiteneinfassung vom Wasserspiegel bis zur Sohle
- Geböschte Seitenausbildung
- Kombinationen aus beiden vorhergehenden Lösungen

Alle Lösungen gehen am NOK von der Ausbildung einer ebenen Sohle aus.

Lösung 1 —vorwiegend als Spundwandausbildung zu sehen — erfordert den höchsten Investitionsaufwand, ist gegenüber den Kräften aus Strömung, Wellen, Wind und Eisgang am widerstandsfähigsten und daher sicherlich unterhaltungsarm. Bei beengten Platzverhältnissen kommt ihr besondere Bedeutung zu.

Lösung 2 —ist mit der Neigung der Unterwasserböschungen weitgehend abhängig von den Bodenverhältnissen. Dabei treten neben der Standfestigkeit der angeschnittenen ungeschützten Unterwasserböschung Stabilitätsprobleme beim Bauverfahren selbst auf, die die am NOK im allgemeinen ausreichende Neigung von 1 : 3 auf 1 : 4 zurückführen läßt. Zum Fließen oder zum Kollaps n igende Sande im Bereich alter Bodenablagerungen verdienen dabei besondere Beachtung.

Lösung 3 —oben senkrecht, unten Böschung — ist der Versuch, Hauptkräfteangriff und unterhaltungsarme Bauweisen wirtschaftlich optimal aufeinander abzustellen.

Bei gesamtwirtschaftlicher Betrachtungsweise wird eine Beschränkung des Profilschutzes auf den unmittelbaren Uferbereich nicht zu umgehen sein, wie dies auch bereits seit Bau des NOK geschehen ist. Seit der Kanalerweiterung 1914 hatte sich eine spezielle Deckwerksbauweise entwickelt:

- Natursteindeckwerk, gepflastert, oberhalb des Ruhewasserspiegels
- Holzpfeilerreihe dicht an dicht in der Wasserlinie als Fußstützung des Deckwerks
- Natursteinschüttung als wasserseitige Sicherung der Fußpfeilerreihe
- Naturgrundunterlage als Filter oberhalb des Ruhewasserspiegels

Dieser Uferschutz bewährte sich über Jahrzehnte, solange es gelang, die Sicherung und Stützung durch laufende Unterhaltung zu gewährleisten.

Die Vernachlässigung der Unterhaltung während des 2. Weltkrieges sowie die durch den gestiegenen Schiffsverkehr verstärkte Erosion unterhalb der Deckwerke ließen diese trotz intensiver Aufwendungen zum Einsturz kommen.

Aus den speziellen Beobachtungen und Gegebenheiten am NOK ergeben sich folgende Forderungen:

- Ungeschützte Unterwasserböschungen erodieren infolge Rückströmung auch bei Querschnittsverhältnissen  $n \geq 7$ . Der dabei zur Sohle gerichtete Bodentransport erfaßt die ungeschützte Fläche fast gleichmäßig. Er ist unschädlich, solange genügend Boden von oberhalb nachgeführt wird. Bleibt dieser infolge Befestigung aus, bilden sich am Übergang Auskolkungen. Sie werden verstärkt durch Turbulenzen infolge unterschiedlicher Rauigkeiten.

Uferschutzwerke sollten daher langfristig Erosionsreserven — Unterwasserberme — enthalten, die eine Bauwerksgefährdung ausschließen.

- Die weitaus stärksten Kraftangriffe resultieren am NOK aus den Schiffswellen. Beobachtungen zeigen, daß die Wirkungen in einer Tiefe von rd. 2 m auslaufen (Grenztiefe).

Senkrechte Uferschutzwerke mit einem Wasserpolster entsprechender Tiefe sind daher derartigen Beanspruchungen nicht ausgesetzt.

Vor rd. 10 Jahren am NOK nach diesen Überlegungen erbaute Deckwerke (Rader Lösung) haben seitdem weder Unterhaltungsarbeiten erfordert noch irgendwelche Schäden erkennen lassen.

Neuerdings werden auch mattenartige Deckwerkskonstruktionen erprobt, bei denen das Problem der Stützkonstruktion dadurch gelöst wird, daß sie zugfest ausgebildet und an ihrem oberen Ende im Bereich einer Überwasserberme verankert werden.