

3. Durchstiche in stark geschiebeführenden Wasserläufen sollen nur bei zwingender Notwendigkeit und in möglichst geringer Zahl angelegt werden. Zur Abflachung starker Krümmungen empfiehlt es sich, anstatt der Verwendung von Durchstichen im Rahmen der Stromregulierung die Uferlinie des einbuchtenden Ufers vorzuverlegen, gegebenenfalls unter Uferabgrabungen am gegenüberliegenden ausbuchtenden Ufer.

Abt. I Mitteilungen

Mitteilung 1

Untersuchung der Beziehungen zwischen einerseits der Querschnittsgestalt, der Bodenbeschaffenheit, der Art der Auskleidung und der Verteilung der Strömungsgeschwindigkeiten in einem Wasserlauf, und andererseits dem Fahrwiderstand, dem Wirkungsgrad der Schrauben und den zulässigen Geschwindigkeiten der Schiffe in bezug auf die Unterhaltungskosten des Wasserlaufes.

Von Kurt Helm, Obering. bei der Hamburgischen Schiffbauversuchsanstalt und Otto Wöltinger, Oberregierungsrat in Kiel.

Zusammenfassung. I. Nach den Erfahrungen bei stark befahrenen Kanälen soll im Interesse der Sicherheit der Schifffahrt die nutzbare Breite möglichst $3,5 \times$ Schiffsbreite sein. Bei Überholung und Begegnung ist dann ein Passierabstand von 6 m vorhanden und eine Annäherung an die Böschung nur bis zu 3,5 m notwendig.

Das Querschnittsverhältnis Kanal zu Schiff sollte möglichst bei 6 liegen, damit der Schiffswiderstand gering und die Fahrgeschwindigkeit groß ist.

Je nach Größe und Form des Querschnitts sowie der Form der Schiffe verändert sich die Stärke des Angriffs auf die Böschungen und die Sohle. Die Erfahrungen zeigen, daß die Neigung des befestigten Ufers mindestens 1:3 sein und die Befestigung bis zur Sohle herabgeführt werden sollte. Ein Kriterium für die zu erwartenden Angriffe auf die Sohle bietet die Rückstromgeschwindigkeit. Je nach Bodenbeschaffenheit muß sie durch Festlegung der höchsten Fahrgeschwindigkeit begrenzt werden. Für die vorliegende Untersuchung wird eine Rückstromgeschwindigkeit von 1 m/s festgelegt.

II. Mit 7 nach Größe, Tiefe und Form verschiedenen Kanalprofilen wurden Modellversuche angestellt. Die Profile teilen sich in 2 Gruppen: ein Trapezprofil wurde durch Vertiefung in 3 Stufen zum Muldenprofil umgewandelt. Mit dessen Querschnitt wurde alsdann ein Trapez-, Rechteck- und ein Rechteck/Trapezprofil untersucht. Die Ergebnisse sind folgende:

1. Der Schiffswiderstand und damit der Leistungsbedarf ist um so geringer, je kleiner die Wasserspiegelbreite des Kanals ist.

Bei gleichem Leistungsbedarf (100 EPS) ist bei gleichem Wasserquerschnitt das Muldenprofil dem Trapezprofil um 1,5% in der erreichbaren Fahrgeschwindigkeit überlegen. Im gleich großen Rechteckprofil wird eine um 6,5% höhere Geschwindigkeit als im Trapezprofil und eine um 5% höhere als im Muldenprofil erreicht.

Die Schiffsgeschwindigkeit in einem Kanal ist abhängig von der Stauwellengeschwindigkeit $v_{Kr} = \sqrt{g \cdot F_e/U}$ (worin der Einfluß der Kanalform durch den hydraulischen Radius F_e/U erfaßt wird) und vom Querschnittsverhältnis $n = F_k/F_s$.

Dieser letztere Einfluß wird bedeutungslos, wenn $n > 6,5$ ist.

2. Trimm und Absenkung des Schiffes ergeben für die untersuchten Profile bei Fahrt in Kanalmitte selbst bei voller Ausnutzung der Antriebsleistung keine Gefahr der Grundberührung.

3. Hinsichtlich der Steuereigenschaften der Schiffe ist das Rechteckprofil am günstigsten.

4. Die Rückstromgeschwindigkeit an der Kanalsohle wird maßgebend durch den Propellerstrahl beeinflusst, auf den etwa 40% entfallen.

Eine Rückstromgeschwindigkeit wie im (ungünstigsten) Trapezprofil wird im Rechteckprofil erst bei 3,5% und im Muldenprofil bei 7,5% höherer Schiffsgeschwindigkeit erreicht.

5. Die Wasserspiegelabsenkung am Ufer und am Schiff ist beim Rechteckprofil am wenigsten unterschiedlich, beim Trapezprofil am stärksten ausgeprägt. Die mittlere Spiegelabsenkung läßt sich durch Rechnung zutreffend erfassen.

6. Die Stärke des Böschungsangriffs vermindert sich bei Schrägufern durch Vergrößerung der Wasserspiegelbreite. Bei Steilufern sind die Angriffe nahezu wirkungslos.

Die Steinschüttungen bis 1 m unter Wasserspiegel reichen nur für die Fahrt in Kanalmitte aus. Eine Verbreiterung möglichst bis auf 3 m Wassertiefe ist notwendig.

Für die einzelnen Profile ergibt sich folgendes:

Das Rechteckprofil wird sowohl der Schifffahrt als auch der Forderung nach möglichst geringen Unterhaltungskosten am besten gerecht. Es muß aber mit Kolkungen in der Sohle gerechnet werden.

Das Rechteck-Trapezprofil ist nahezu gleichwertig.

Im Muldenprofil ist der Rückstrom an der Kanalsohle am geringsten, der Böschungsangriff jedoch am stärksten. Beträgt der Wasserquerschnitt 107% des Rechteckprofils, so wird mit Ausnahme der nicht ganz so guten Steuereigenschaften der Schiffe und des Böschungsangriffs dieses Profil für die Schifffahrt dem Rechteckprofil gleichwertig.

Das Trapezprofil erfährt größere Rückstromgeschwindigkeiten an der Kanalsohle, während der Böschungsangriff geringer ist als im Muldenprofil. Beträgt der Wasserquerschnitt 108% des Rechteckprofils, so wird mit vorstehend genannter Ausnahme das Trapezprofil für die Schifffahrt dem Rechteckprofil gleichwertig.

III. Die Schrägufer sind bezüglich der Baukosten erheblich billiger als die Steilufer, auch wenn die Schrägufer breiter und stärker befestigt werden als üblich. Bei den Unterhaltungskosten ist es aber umgekehrt.

Im Endergebnis, d. h. bei Zusammenstellung aller Kosten für Grunderwerb, Bodenaushub, Uferschutz und dessen Unterhaltung sind jedoch die Mulde, das Trapez und das Rechteck-Trapez in wirtschaftlicher Hinsicht praktisch gleichwertig. Letzteres bietet aber gegenüber den beiden und dem Rechteck noch den Vorteil der größten nutzbaren Breite und des größten hydraulischen Radius.

I. Anforderungen an den Schifffahrtsquerschnitt.

Binnenschiffskanäle erhalten ihre Abmessungen nach den für sie bestimmten Regelschiffen.

Die deutschen Großschifffahrts-Kanäle sind für 1000-t-Schiffe bemessen mit den Abmessungen für Länge/Breite/Tiefgang

67 m/8,2 m/2,5 m oder

80 m/9,0 m/2,0 m.

Diese Kanäle werden zweischiffig befahren. Begegnungen von Schleppzügen sind unbeschränkt zulässig, die Überholung eines Schleppzuges durch einen Selbstfahrer unterliegt gewissen Beschränkungen hinsichtlich der Größe des Selbstfahrers und der Überholungsgeschwindigkeit.

Die Schifffahrt verlangt:

ausreichende Sicherheit beim Begegnen und Überholen, somit genügende nutzbare Breite,

möglichst geringen Schiffswiderstand bei möglichst großer Fahrgeschwindigkeit, somit ausreichende Größe des Kanalquerschnitts.

Die Unterhaltungskosten eines Kanals sind abhängig von der Stärke der Angriffe auf die Uferböschungen und die Sohle, demnach abhängig von den Schiffswellen und der Rückstromgeschwindigkeit, verursacht durch die Fahrt des Schiffes, somit abhängig außer von der Schiffsform von der Größe und Form des Kanalquerschnitts.

Allgemein ist zu den Anforderungen der Schifffahrt und der Unterhaltung folgendes zu bemerken:

a) Die Anforderungen der Schifffahrt haben schrittweise zu dem Regelquerschnitt [1] vom 3. Dezember 1941 mit einem Querschnitt $F_k \sim 117 \text{ m}^2$ geführt (vgl. Abb. 1).

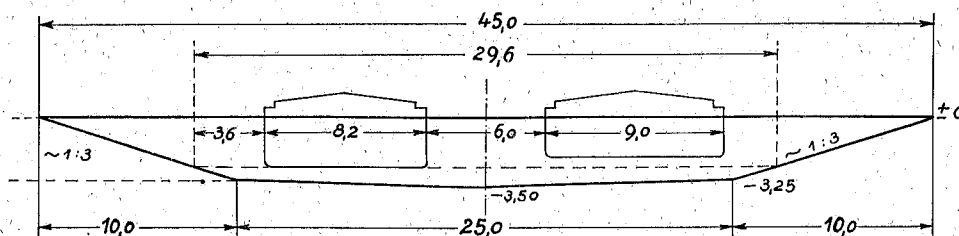


Abb. 1. Regelquerschnitt vom 3. 1. 1941 für das 1000 t-Schiff.

Die nutzbare Breite beträgt 29,6 m für den $8,2 \times 2,5 \text{ m}$ großen Schiffsquerschnitt, d. s. $3,6 \times$ Schiffsbreite, davon entfallen auf den Passierabstand 6 m und auf die Abstände zur Böschung je 3,6 m. Das Verhältnis n von Kanalquerschnitt F_k zu Schiffsquerschnitt F ist $\sim 5,7$. Bei Begegnungen dieser Kähne ist $n \sim 2,86$.

Für den Schiffsquerschnitt $9,0 \times 2,0 \text{ m}$ beträgt die nutzbare Breite rd. 32 m, d. s. nahezu $3,6 \times$ Schiffsbreite, davon entfallen ebenfalls 6 m auf den Passierabstand und auf die Abstände zur Böschung je 4 m. Das Querschnittsverhältnis n ist $\sim 6,5$.

Das $8,2 \times 2,5 \text{ m}$ Schiff stellt an den Querschnitt die höheren Anforderungen.

Begegnen diese Schiffe bei 4 km/h Fahrgeschwindigkeit, so sacken sie rechnermäßig um etwa 10 cm ab, die Seitenabstände zur Böschung betragen alsdann noch 3,3 m. Das einzeln in Kanalmitte fahrende Schiff hat bei doppelter Geschwindigkeit, also bei 8 km/h eine Absenkung von knapp 20 cm.

Die mittlere Rückstromgeschwindigkeit beträgt auf diesen Fahrstufen rechnermäßig, vgl. Krey [2],

bei der Begegnung 0,7 m/s,

bei Einzelfahrt ebenfalls 0,7 m/s.

b) Überholungen und Begegnungen sind abhängig von der nutzbaren Breite, der Größe des Kanalquerschnitts, den Steuereigenschaften der Schiffe und der Größe ihrer Antriebskräfte.

Bei der Überholung besteht die Gefahr, daß die Schiffe auf die Böschung gedrückt werden oder daß sie kollidieren.

Untersuchungen der Hamburgischen Schiffbauversuchsanstalt haben im Modell und in der Natur ergeben, daß beim Überholungsvorgang zwei kritische Abschnitte eintreten [3]:

Im ersten Gefahrenabschnitt, d. i., wenn der Bug des Selbstfahrers das Heck des Schleppkahnes überholt hat, treten auf beiden Schiffen zum Ufer gerichtete

Seitenkräfte und rechtsdrehende Momente auf. Die Seitenkräfte vergrößern den Abstand zwischen den Schiffen. Die Drehung kann dadurch abgemindert werden, daß bereits vorher auf beiden Schiffen das Ruder leicht nach BB gelegt wird.

Im zweiten Gefahrenabschnitt, d. i., wenn der Bug des Selbstfahrers den Bug des Schleppkahns überholt hat, entstehen auf beiden Schiffen nach BB gerichtete Seitenkräfte und links drehende Momente. Dieser Zustand ist gefährlicher und kann nur durch Herabsetzung der Fahrgeschwindigkeit auf das Maß vermindert werden, welches durch Ruderlegen beherrscht werden kann.

Der untersuchte Kanal hatte die nutzbare Breite von rd. $3,0 \times$ Schiffsbreite für das 8×2 m Schiff und ein $n \sim 5,1$. Für sicheres Überholen darf hier die zulässige Geschwindigkeit des Schleppzuges nicht größer sein als 3,5 km/h, die des Selbstfahrers nicht größer als 5 km/h. Der Tiefgang des letzteren soll nicht mehr als 1,5 m betragen.

Begegnungen sind schon insofern einfacher, weil die Zeitdauer des Vorganges kürzer ist als bei Überholungen. Zu Beginn der Begegnung werden die Vorschiffe durch die Bugwellen auseinander gedrückt. Am Ende der Begegnung nähern sich die Achterschiffe infolge der Sogwirkung.

Der unter Ia genannte Regelquerschnitt mit 29,6 bzw. 32 m nutzbarer Breite und 6 m Passierabstand bietet erheblich mehr an Sicherheit für die Schifffahrt als die vorstehend genannten Profile der Modell- und Naturversuche, bei denen nur eine nutzbare Breite von 24 m und nur 2 m Passierabstand vorhanden waren.

c) Die Anforderungen bezüglich der Unterhaltung eines Kanalquerschnittes liegen im wesentlichen beim Schutz des Ufers und der unbefestigten Teile des Querschnittes, wie Unterwasserböschung und Sohle.

Die zulässige Geschwindigkeit der Schiffe ist so festzulegen, daß die Uferbefestigung den Bug- und Heckwellen standhält und der Rückstrom keine gefährlichen Kolkungen hervorruft.

Die Uferbefestigung besteht bei den deutschen Großschiffahrtskanälen aus Steinschüttung auf Splittunterlage in der Böschungsneigung 1:3. Die Schüttung erstreckt sich gewöhnlich von 1 m über Wasser bis 1 m unter Wasser und ist in Höhe des Wasserspiegels vielfach mit Gräsern, wie *Glyceria spectabilis*, *Phragmites communis* u. a. bepflanzt.

Bei stark befahrenen Kanälen, wie dem Dortmund-Ems-Kanal, hat die Erfahrung gezeigt [4], daß die Unterwasserböschung bis zur Sohle hin befestigt und möglichst eine Neigung von 1:4 haben sollte, weil »sonst der lose Sand unter der Wirkung der Schiffsschraube in Bewegung kommt« und die Steine der Böschung 1:3 »durch den Sog der Bug- und Heckwellen allmählich in die Tiefe gezogen werden«.

Die Sohle ist bei den Einschnittsstrecken ohne Schutz. Die verschiedenen Bodenarten lassen, ohne auszukolken, verschieden starke Rückstromgeschwindigkeiten zu, bei leichtem Sand bis 0,7 m/s und bei grobem Kies und Mergel bis etwa 1,5 m/s. Die zulässige Grenze der Fahrgeschwindigkeit soll in nachfolgenden Erörterungen so liegen, daß eine Rückstromgeschwindigkeit von 1 m/s auf der Sohle nicht überschritten wird.

II. Modellversuche in sieben verschiedenen Kanalprofilen.

Im Auftrage des Bundesverkehrsministeriums sind kürzlich durch die Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt (HSVA) Modellversuche unternommen worden, bei denen festzustellen war, welche Vorteile durch eine Vertiefung des

Nord-Ostsee-Kanals im Bereich der Kanalsole in bezug auf die zulässige Kanalgeschwindigkeit (Leistungsbedarf und Absenkung der Schiffe), die Steuereigenschaften der Schiffe und die Beeinflussung des Kanals durch die Schifffahrt (Wasserspiegelabsenkung, Bodengeschwindigkeit und Böschungsangriff) erreichbar sind.

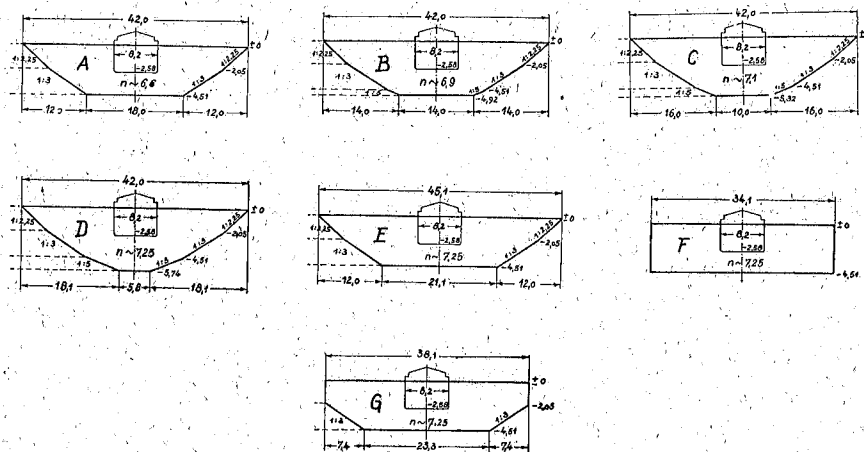


Abb. 2. Untersuchte Kanalprofile.

Einfluß der Profilform auf den Modellwiderstand.
(Modellmaßstab 1 : 22,5.)

Als Ausgangsprofil diente das jetzige Trapezprofil des Nord-Ostsee-Kanals mit einem Wasserquerschnitt von $828,25 \text{ m}^2$, einer größten Wassertiefe von 11 m und einer Sohlenbreite von 44 m (Profil A). Durch Vertiefung dieses Profils im Bereich der Sohle entstanden bei 12 m Wassertiefe das Profil B, bei 13 m das Profil C und schließlich bei 14 m das Muldenprofil D mit einem Wasserquerschnitt von $915,25 \text{ m}^2$ und einer Sohlenbreite von nur 14 m. Um eine Wassertiefenvergrößerung von etwa 27 % zu erreichen, braucht der Kanalquerschnitt also nur um etwa 10 % erhöht zu werden.

Als Schiffstyp wurde ein großer Tanker gewählt; das Schiff ist 158 m lang, 20 m breit, es wurde auf den Tiefgängen 9,5 m und 6,3 m untersucht; in Profil C zusätzlich auch auf dem Tiefgang von 10,0 m.

Zur Beantwortung der für die vorliegende Arbeit gestellten Fragen ist dann noch der Einfluß der Profilform in drei weiteren Profilen mit 11 m Wassertiefe und dem Wasserquerschnitt des Profils D untersucht worden, und zwar: ein Trapezprofil (Profil E), ein Rechteckprofil (Profil F) und ein Rechteck-Trapezprofil (Profil G). Bezogen auf den Nord-Ostsee-Kanal wurden die Versuche im Maßstab 1 : 55 durchgeführt; rechnet man diese Ergebnisse auf einen Maßstab von 1 : 22,5 m um, so ergeben sich Verhältnisse, die denen auf den heutigen Binnenschiffkanälen gleichkommen.

Wenn auch der im Hinblick auf die Untersuchungen im Nord-Ostsee-Kanal gewählte Tanker in seinen Abmessungen, seiner Völligkeit und seiner Schiffsform (vor allem im Hinterschiff) nicht ganz mit den üblichen Binnenschiffen übereinstimmt, so sind doch die Abweichungen nicht so groß, daß die durch diese

Versuche erreichten grundsätzlichen Erkenntnisse nicht ohne weiteres auf die Fahrtverhältnisse in Binnenschiffahrtskanälen übertragbar wären. Die korrespondierenden Abmessungen für das Binnenschiff sind:

Länge über alles	65,0 m	
Breite	8,2 m	
Tiefgänge	3,9 m	2,58 m
Verdrängungen	1470 m ³	968 m ³

Die korrespondierenden Abmessungen der untersuchten Kanalprofile sind aus Abb. 2 zu entnehmen.

Nach dem Regelquerschnitt für das 1000-t-Schiff vom 3. Dezember 1941 (vgl. Abb. 1) ergibt sich für das in Teil I erwähnte 1000-t-Schiff von 67 m Länge und 2,5 m Tiefgang ein Wassertiefentiefgangsverhältnis (Hw/Tg) von 1,4; für das 1000-t-Schiff von 80 m Länge und 2,0 m Tiefgang beträgt dieser Wert 1,75. Bei den jetzigen Versuchen ergibt sich für die Profile A, E, F und G mit einer Wassertiefe von 4,51 m für den untersuchten großen Schiffstiefgang von 3,9 m ein Hw/Tg von 1,155 und bei dem kleinen Tiefgang von 2,58 m ein Hw/Tg von 1,75. Der untersuchte Hw/Tg-Bereich schließt also den in der Binnenschiffahrt üblichen Bereich von 1,4 bis 1,75 in sich ein.

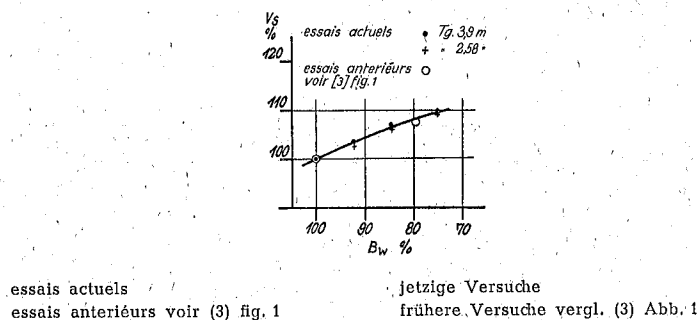


Abb. 3. Einfluß der Wasserspiegelbreite (B_w) auf die Geschwindigkeit. (Kanalquerschnitt konstant.)

a) Leistungsbedarf und Absenkung des Schiffes.

Die Ergebnisse der Widerstandsversuche für die Profile mit gleicher Querschnittsgröße haben mit Ausnahme des Geschwindigkeitsbereiches unterhalb des starken Widerstandsanstieges ergeben, daß die Geschwindigkeit bei gleichem Widerstand mit abnehmender Wasserspiegelbreite zunimmt, d. h. also, daß der rechteckige Querschnitt am günstigsten und der trapezförmige Querschnitt am ungünstigsten ist. Dieses Resultat findet seine Bestätigung in früheren Versuchen (vgl. Abb. 3), wobei sogar festgestellt wurde, daß ein umgekehrtes Trapezprofil noch günstiger sein würde (vgl. [3] Abb. 1). Im Bereich unterhalb des Widerstandsanstieges wurden in Profil D die geringsten Widerstände gemessen; hier wirkt sich also die größere Wassertiefe in der Kanalmitte des Muldenprofils stärker aus als die kleinere Wasserspiegelbreite der Profile G und F. Auch dies Ergebnis ist bereits bei früheren Modelluntersuchungen festgestellt worden.

Die aus den gemessenen Modellwiderständen errechneten effektiven Schleppleistungen (EPS) des untersuchten Schiffes in den verschiedenen Profilen sind in Abb. 4 für die Profile A, B, C und D und auf Abb. 5 für die Profile D, E, F und G

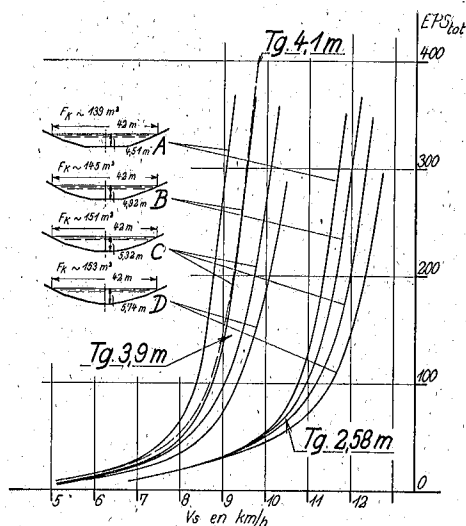


Abb. 4. Einfluß der Kanaltiefe und Querschnittsgröße auf den Schleppleistungsbedarf abhängig von der Schiffsgeschwindigkeit.

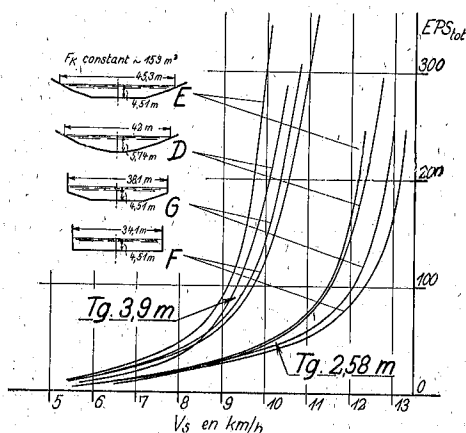


Abb. 5. Einfluß der Profilform auf den Schleppleistungsbedarf abhängig von der Schiffsgeschwindigkeit.

Einfluß von Kanaltiefe und Querschnittsgröße auf den Schleppleistungsbedarf abhängig von der Stauwellengeschwindigkeit.

Einfluß der Profilform auf den Schleppleistungsbedarf abhängig von der Stauwellengeschwindigkeit.

für alle untersuchten Tiefgänge dargestellt. Aus dem Charakter dieser Leistungskurven läßt sich entnehmen, daß es vom Standpunkt der Schifffahrt aus selbst bei den untersuchten, verhältnismäßig günstigen Kanalquerschnitten wirtschaftlich kaum lohnend ist, mit Geschwindigkeiten zu fahren, die wesentlich mehr als 100 EPS Schleppleistung erfordern. Das bedeutet eine Antriebsleistung von etwa

200 PSe. Für Kanalfahrt kann also nur etwa die Hälfte der für Flußfahrt notwendigen Leistung von etwa 400 bis 500 PSe ausgenutzt werden. Bei den heute noch z. T. vorhandenen Kanalstrecken mit geringeren Kanalquerschnitten ist die mögliche Leistungsausnutzung noch wesentlich geringer, so daß hierbei die Antriebsmotoren häufig bei Drehzahlen arbeiten müssen, die einen außerordentlichen Verschleiß bedingen. Um diesen Verschleiß zu verringern, hilft sich die Schifffahrt heute so, daß die Selbstfahrer von Zeit zu Zeit — meist kurz hinter den Schleusen — anhalten, um die langsamen Schleppzüge an sich vorbeizulassen und später die freien Kanalstrecken mit möglichst hohen Geschwindigkeiten und entsprechend höheren Motordrehzahlen durchfahren.

Als Beispiel für die Unergiebigkeit einer Erhöhung der Schleppleistung über 100 EPS hinaus, z. B. 200 EPS, diene das Versuchsergebnis in Profil A (Abb. 4). Bei einem Schifftiefgang von 3,9 m erhöht sich die Geschwindigkeit von 8,4 km/h auf 8,75 km/h (4%) und bei 2,58 m Tiefgang von 10,75 km/h auf 11,35 km/h (5,5%). In der Praxis wird dieser Gewinn allerdings noch geringer sein, weil sich der Propellerwirkungsgrad einmal durch die höhere Schraubenbelastung und weiter durch die stärkere Vertrimmung des Schiffes infolge des Schraubensogs gegenüber dem Fahrtzustand bei 100 EPS verschlechtert und dadurch mehr als 400 PSe zur Erreichung dieser höheren Geschwindigkeiten erforderlich werden. Dieses Resultat zeigt, daß eine Verdoppelung des Brennstoffbedarfes im Mittel nur eine Geschwindigkeitssteigerung von weniger als 5% bringt. Selbst wenn es also in nautischer Hinsicht und in bezug auf die Kanalunterhaltung möglich wäre, diese Geschwindigkeiten zuzulassen (eine Frage, die weiter unten noch behandelt wird), ist diese Maßnahme zur Steigerung der Kanalgeschwindigkeit zu unwirtschaftlich.

Wenn es auch von der Schifffahrt her gesehen erwünscht wäre, die vorhandene Antriebsleistung möglichst weitgehend auszunutzen, so ist dies in den heutigen Binnenschiffahrtskanälen wirtschaftlich doch nur durch zusätzliches Schleppen von Kähnen zu erreichen.

Aus dem Vergleich der in den einzelnen untersuchten Kanalprofilen erreichbaren Geschwindigkeiten erhält man ein Bild von den zweckdienlichen Maßnahmen, die von seiten des Kanalbaues zur Erhöhung der Geschwindigkeit ergriffen werden können.

Bei gleicher Wassertiefe von 4,51 m wird durch Vergrößerung des Wasserquerschnittes um etwa 10% (vgl. Abb. 4, Profil A mit Abb. 5, Profil E) bei einer Schleppleistung von 100 EPS die Geschwindigkeit bei Tiefgang 3,9 m von 8,4 km/h auf 9,15 km/h (um 9%) und bei Tiefgang 2,58 m von 10,75 km/h auf 11,45 km/h (um 6,5%), im Mittel also um 7,75% erhöht.

Durch Veränderung der Profilform bei Einhaltung des Wasserquerschnittes und der Wassertiefe (vgl. Abb. 5, Trapezprofil E und Rechteckprofil F) kann man maximal bei 3,9 m Tiefgang statt 9,15 km/h 9,70 km/h (6%) und bei Tiefgang 2,58 m statt 11,45 km/h 12,3 km/h (7%), im Mittel eine um 6,5% höhere Geschwindigkeit erreichen.

Das Rechteck-Trapezprofil G (vgl. Abb. 5, Profile E und G) bringt bei 3,9 m Tiefgang eine Geschwindigkeitssteigerung von 9,15 km/h auf 9,55 km/h (4%) und bei Tiefgang 2,58 m von 11,45 km/h auf 12,1 km/h (6%), im Mittel also 5%.

Wird mit der Vergrößerung des Wasserquerschnittes um 10% gleichzeitig auch die Wassertiefe von 4,51 m auf 5,74 m, also um gut 27% erhöht (Abb. 4, Profile A und D) so steigt die Geschwindigkeit bei Tiefgang 3,9 m von 8,4 km/h auf 9,35 km/h (11%) und bei Tiefgang 2,58 m von 10,75 km/h auf 11,55 km/h (7,5%), das bedeutet im Mittel einen Geschwindigkeitsgewinn von 9,25%.

Aus diesen Ergebnissen lassen sich bei konstantem Leistungsaufwand für das Schiff bei 100 EPS folgende Schlüsse ziehen: die Wertigkeit in bezug auf die erreichbare Kanalgeschwindigkeit ist

bei gleichem Wasserquerschnitt der Kanalprofile:

Trapezprofil	100 %	
Muldenprofil	101,5%	100 %
Rechteck-Trapezprofil	105 %	103,5%
Rechteckprofil	106,5%	105 %

bei unterschiedlichem Wasserquerschnitt der Kanalprofile:

Wasserquerschnitt 100%, Geschwindigkeit	100 %
Wasserquerschnitt 110%, Geschwindigkeit	107,75%

bei gleicher Schiffsgeschwindigkeit sind folgende Wasserquerschnitte gleichwertig:

Rechteckprofil	100%
Rechteck-Trapezprofil	103%
Muldenprofil	107%
Trapezprofil	109%

Für alle Zahlenangaben in dieser Arbeit muß betont werden, daß das Querschnittsverhältnis zwischen Kanal und Schiff F_k/F_s nicht wesentlich von dem untersuchten Bereich (n zwischen 4,35 und 7,21, vgl. auch Tabelle 1) abweichen darf. Bei kleineren Querschnittsverhältnissen können diese Gewinne noch größer sein, während bei größeren mit kleineren bis eventuell nicht mehr merklichen Gewinnen gerechnet werden muß.

Weiter zeigt sich, daß durch verhältnismäßig geringfügige Querschnittsvergrößerungen des Kanals schon Geschwindigkeitssteigerungen erreicht werden können, die anders nur durch Verdoppelung der Antriebsleistung, also dauernd weit höherem Brennstoffverbrauch und zugleich mit weit höherer Beanspruchung des Kanalbettes erkauft werden müssen.

Bei den auf die Schleppleistung abgestellten Vergleichen ist außerdem noch zu berücksichtigen, daß bei Geschwindigkeitssteigerung durch Leistungserhöhung, wie schon oben erwähnt, zusätzlich mit der Verschlechterung der Propulsionsbedingungen gerechnet werden muß (also mit geringerem Geschwindigkeitsgewinn, als nach dem Schleppleistungsvergleich zu erwarten wäre), während bei der Geschwindigkeitssteigerung durch Wasserquerschnittsvergrößerung sich zusätzlich auch die Zustromverhältnisse zur Schraube verbessern (also größerer Geschwindigkeitsgewinn, als aus dem Schleppleistungsvergleich zu erwarten).

Die Fahrgeschwindigkeit in einem beschränkten Wasserquerschnitt wird durch die Stauwellengeschwindigkeit beeinflusst. Bei Fahrt in einem in der Tiefe beschränkten und in der Breite unbeschränkten Fahrwasser (z. B. auf einem großen Strom) errechnet sich diese Geschwindigkeit nach der Beziehung $V_{kr} = \sqrt{g \cdot H_w}$ (g = Erdbeschleunigung, H_w = mittlere Wassertiefe in der Fahrrinne). Bei Kanalfahrt wird durch die Breitenbeschränkung und darüber hinaus durch die Wasserquerschnittsverminderung durch das Schiff diese Formel zu der Beziehung $V_{kr} = \sqrt{g \cdot F_e/U}$ (F_e/U = hydraulischer Radius, $F_e = F_k - F_s - \Delta h \cdot b_m$ = effektiver Kanalquerschnitt bei Erreichung der Stauwellen-

geschwindigkeit, d. h. ursprünglicher Wasserquerschnitt des Kanals (F_k) minus Schiffsquerschnitt (F_s) minus Wasserspiegelabsenkung (Δh) mal mittlere Kanalbreite (b_m) für diese Wasserspiegelabsenkung; U = verbleibender benetzter Kanalumfang).

In dem Geschwindigkeitsbereich unterhalb der Stauwellengeschwindigkeit läßt sich die mittlere Wasserspiegelabsenkung (Δh) ausreichend genau aus der Kontinuitätsbedingung und nach der Bernoullischen Gleichung bestimmen, wobei man zugleich auch die eindeutig zugeordnete mittlere Rückstromgeschwindigkeit erhält. (Nähere Angaben mit einem zweckmäßigen Arbeitsdiagramm findet man z. B. [5]).

Die in Abhängigkeit von der so errechneten Stauwellengeschwindigkeit dargestellten Schleppleistungen zeigen, daß alle Ergebnisse der Profile E, G und F für den großen wie für den kleinen Tiefgang annähernd auf eine Kurve zusammenfallen, woraus folgt, daß bei gleichem Wasserquerschnitt und gleichem Querschnittsverhältnis n ($= F_k/F_s$) die Schleppleistung also nur noch von der Stauwellengeschwindigkeit abhängig ist, wobei der Unterschied in den Kanalprofilen durch den hydraulischen Radius F_e/U erfaßt wird. Die Abweichungen im oberen Geschwindigkeitsbereich der Ergebnisse für den großen Tiefgang ist dadurch zu erklären, daß hier die Grenze für den Geltungsbereich der oben angeführten Beziehung zur Erreichung der Wasserspiegelabsenkung bereits überschritten ist.

Es läßt sich die Erkenntnis ableiten, daß leistungsmäßig die Kanalform die günstigste ist, die den größten hydraulischen Radius hat. Ist für einen gegebenen Kanal das Querschnittsverhältnis und die Leistungskurve für ein Schiff bekannt, so kann man auf Grund der angegebenen Beziehungen für jede beliebige Kanalform von gleichem Wasserquerschnitt und gleicher Kanaltiefe den erforderlichen Leistungsbedarf errechnen.

Der Einfluß des Querschnittsverhältnisses auf den Leistungsbedarf geht deutlich aus den Ergebnissen der Profile A, B, C und D hervor. Er ist am ausgeprägtesten beim großen Tiefgang (kleine n -Werte!) und am geringsten beim kleinen Tiefgang (große n -Werte!), woraus folgt, daß dieser Einfluß mit zunehmendem Querschnittsverhältnis abnimmt.

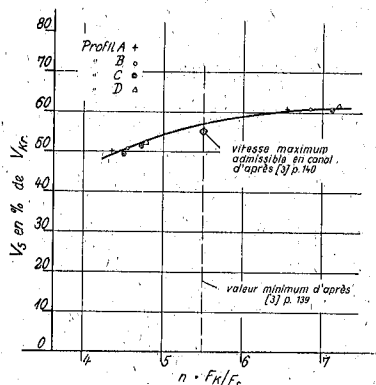
Zusammenfassend ergibt sich, daß der Leistungsbedarf eines in einem Kanal fahrenden Schiffes hauptsächlich von der Stauwellengeschwindigkeit und von seinem Querschnittsverhältnis zu dem durchfahrenen Kanal abhängig ist. Bei Querschnittsverhältnissen $n > 6,5$ kommt praktisch nur noch der Einfluß der Stauwellengeschwindigkeit zur Auswirkung. Bei gegebenem Kanalquerschnitt ist die Kanalform mit dem größten hydraulischen Radius am günstigsten.

Die für die Schifffahrt wirtschaftlichste Schleppleistung für die untersuchten Kanäle liegt bei etwa 100 EPS. Für diese Leistung sind die erreichbaren Geschwindigkeiten, ausgedrückt in % der Stauwellengeschwindigkeit (V_{kr}) abhängig vom Querschnittsverhältnis n auf Abb. 6 dargestellt.

Der erstgenannte Verfasser kam auf Grund früherer Versuche in seiner schon mehrfach zitierten Arbeit [3] zu dem Ergebnis, daß vom Gesichtspunkt der Schifffahrt der Mindestwert für n 5,5 betragen muß, und daß die höchstzulässige Geschwindigkeit hierfür bei etwa 55% der Stauwellengeschwindigkeit liegt (siehe Vergleichspunkt auf Abb. 6). Dies wird durch die vorliegende Arbeit bestätigt.

Um den Einfluß der Schraube bei der Absenkung des Schiffes zu berücksichtigen, wurden die Messungen mit selbstfahrendem

Schiffsmodell unternommen. Das Modell war also durch eine eigene Schraube mit einer solchen Belastung angetrieben, daß die jeweils gewünschte Geschwindigkeit gerade erreicht wurde. Gemessen wurden hierbei der Trimmwinkel und die parallele Absenkung. Diese Messungen zeigten allgemein folgendes: Bei kleinen Geschwindigkeiten ergab sich eine geringe Kopflastigkeit des Modells. Nach Überschreitung einer Geschwindigkeit von etwa $0,5 \cdot V_{kr}$ beim großen Tiefgang und von etwa $0,6 \cdot V_{kr}$ beim kleinen Tiefgang (diese Geschwindigkeiten entsprechen etwa einem Leistungsaufwand von 100 EPS) beginnt das Schiff stärker steuerlastig zu vertrimmen, und zwar beim kleinen wesentlich mehr als beim großen Tiefgang.



vitesse maximum admissible en canal
d'après (3) p. 140

valeur minimum d'après (3) p. 139

höchstzulässige Kanalgeschwindigkeit
nach (3) S. 140

Mindestwert nach (3) S. 139

Abb. 6. Wirtschaftliche Kanalgeschwindigkeit entsprechend einer Schleppleistung von 100 EPS dargestellt in Prozent der Stauwellengeschwindigkeit (V_{kr}) abhängig vom Querschnittsverhältnis (n).

Größte Absenkung des Schiffes,
(Kanalquerschnitt veränderlich.)

Da es bei diesen Messungen darauf ankam, die jeweils ungünstigste Lage des Modells zur Kanalsohle zu ermitteln (also bei kleinen Geschwindigkeiten die Lage am Bug und bei höheren Geschwindigkeiten die Lage am Heck des Schiffes), wurden die Ergebnisse so ausgewertet, daß nur die jeweils größte Absenkung aufgetragen wurde (Abb. 7). Die Tendenz dieser Ergebnisse ist die gleiche wie bei den Widerstandsmessungen. Bei gleicher Kanalgeschwindigkeit vermindert sich das Maß der größten Absenkung mit zunehmender Wassertiefe bzw. mit zunehmendem Wasserquerschnitt, und bei gleichem Wasserquerschnitt vermindert sich die Absenkung mit der Wasserspiegelbreite des Kanals.

Weiter zeigt sich, daß im ungünstigsten Fall (Profil A, großer Tiefgang von 3,9 m) bei einer Geschwindigkeit entsprechend einer Schleppleistung von 100 EPS unter dem Kiel noch etwa 0,365 m und bei einer Geschwindigkeit entsprechend 200 EPS noch etwa 0,33 m Wasser an der am tiefsten liegenden Stelle (in diesem Fall am Heck) vorhanden ist. Hieraus folgt, daß in den hier untersuchten Kanalprofilen mit der bei Selbstfahrern zur Verfügung stehenden Leistung und den geprüften Tiefgängen beim Fahren in Kanalmitte eine Grundberührung nicht eintreten kann, so daß von diesem Standpunkt aus die Maschinenleistungen voll ausgenutzt werden könnten.

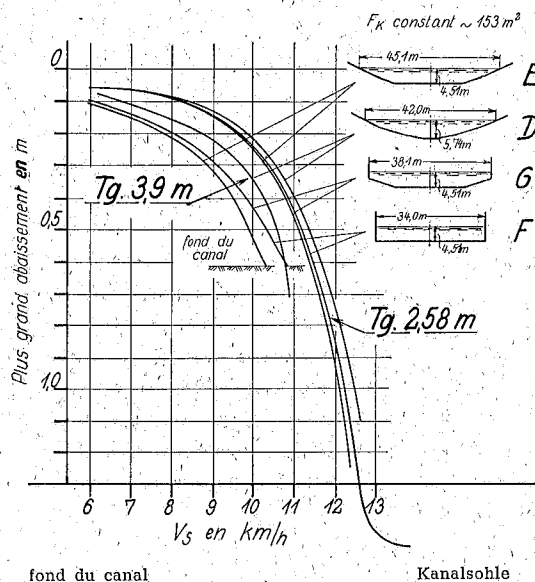


Abb. 7. Größte Absenkung des Schiffes.
(Kanalquerschnitt konstant.)

b) Steuerfähigkeit der Schiffe.

Die Frage nach der zweckmäßigen Gestaltung der Kanalbauwerke hinsichtlich der Sicherheit des Schiffsverkehrs führt auch die Steuerfähigkeit der Schiffe in begrenztem Fahrwasser in den Bereich der wasserbaulichen und nautischen Betrachtungen. Deshalb wurden im Rahmen des hier behandelten Versuchsprogramms auch Steuerversuche durchgeführt mit dem Ziel, festzustellen, welcher Aufwand erforderlich ist, um das Schiff auf möglichst geradem Kurs durch die verschiedenen Profile zu steuern. Es war also nicht die Manövrierfähigkeit zu untersuchen sondern die Möglichkeit, das Schiff auf geradem Kurs fahren zu lassen. Bekanntlich kann das Steuerverhalten der Schiffe infolge der im Strömungsfeld vorkommenden Druckunterschiede außerordentlich ungünstig beeinflusst werden. Es kann sogar vorkommen, wie es in der Praxis und im Modellversuch wiederholt beobachtet wurde, daß das Schiff gegen das Ruder reagiert. In solchen Fällen kann das Schiff, ohne die Maschine zu stoppen, nicht wieder in die Gewalt des Rudergängers gebracht werden. Da aber der Charakter des Strömungsfeldes unter gleichen Antriebsbedingungen entscheidend von der Profilform des Kanals bestimmt wird, wie das auch die in den Abschnitten II a und c dieses Berichtes geschilderten Absenkungs- und Rückstrommessungen zeigen, ist die Profilform und -größe für das Steuerverhalten der Schiffe von großer Bedeutung.

Bei den Steuerversuchen fuhr das selbstangetriebene Modell völlig frei vor dem Versuchswagen durch den Kanal. Es konnte also nur durch das Ruder in die gewünschte Lage gebracht und so gehalten werden. Der Antriebsmotor und die Rudermaschine wurden mittels einer Kabelleitung vom Versuchswagen aus mit Strom versorgt. Auf dem Versuchswagen befanden sich auch die Schaltungen für den Antriebs- und Rudermotor. Das Modell wurde also vom Versuchswagen aus gesteuert. Das Steuern übernahm Kapt. Möckel, der nautische Mitarbeiter der HSVA. Dabei wurde vor allem angestrebt, das Modell mit möglichst kleinen

Ruderwinkeln auf geradem Kurs zu halten, um das »Wildwerden«, d. h. das Aufkommen von Gierigkeit zu vermeiden. Die Versuchsanordnung ist auf Abb. 8 wiedergegeben.

Die Ruderlagen wurden während der Meßfahrt laufend an dem am Heck des Modells angebrachten Ruderlageanzeiger, der auch in Abb. 8 zu sehen ist, abgelesen und registriert. Ferner sind in dem Bild zwei quer über dem Modell angebrachte Meßlatten zu sehen, mit deren Hilfe die Abweichungen vom Kurs festgestellt wurden. Die Ablesungen der Ruderwinkel und der Kursabweichungen wurden später gleichmäßig über die Zeit verteilt in Diagrammen aufgetragen. Eine solche Auftragung ist z. B. in Abb. 9 für Profil A enthalten.

Da das Modell bei solchen Versuchen freihändig gesteuert wird und daher auch subjektive Einflüsse wirksam sind, können zur Bewertung der Steuereigenschaften nicht nur die Meßwerte herangezogen werden, sondern es müssen vor allem auch die Tendenzen ihres Verlaufes ebenso Berücksichtigung finden wie der Aufwand an Mühe und Aufmerksamkeit des Modellsteuerers.

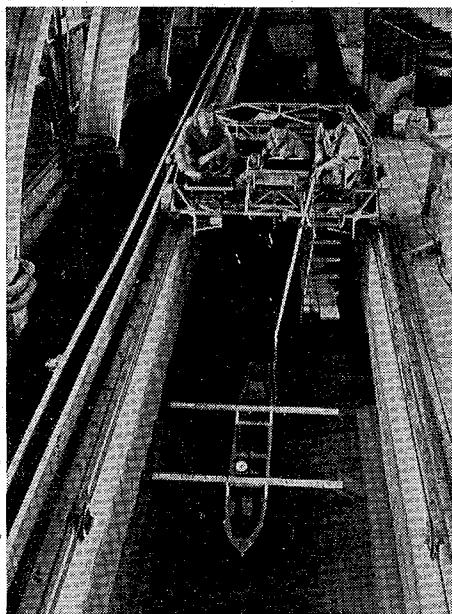


Abb. 8. Versuchsanordnung für Steuerversuche.

Außer dem mittleren Ruderwinkel und dem Ruderweg, d. h. dem Gradbogen zwischen den mittleren Ruderlagen in StB und BB ist als eine weitere Maßzahl für das Steuerverhalten die dimensionslose Gierzahl d eingeführt worden. Die Gierzahl ist das Verhältnis der Summe von zwei aufeinanderfolgenden Gieramplituden zu dem zwischen den beiden Amplituden zurückgelegten Weg. Die Gierzahl wird also zu Null, wenn das Schiff auf geradem Kurs fährt. Sie wird mit zunehmenden Gierbewegungen größer.

Für die Beurteilung der Steuereigenschaften ist es ohne Bedeutung, ob das Modell genau in der Kanalmitte oder etwas parallel dazu versetzt fuhr, weil der

Rudergänger die Lage der Kanalmitte doch nur einschätzen kann. Ausschlaggebend ist vielmehr die Feststellung, ob es ohne große Gierbewegungen mit normalen Ruderlagen sicher durch den Kanal gesteuert werden kann.

Da bei diesen Versuchen festzustellen war, ob und wie das Schiff im begrenzten Fahrwasser des Kanals dem Ruder gehorcht, wurden während der Meßfahrten keine Maschinenmanöver vorgenommen, so daß das beobachtete Steuerverhalten auch nur die Reaktion des Schiffes auf das Ruder wiedergibt.

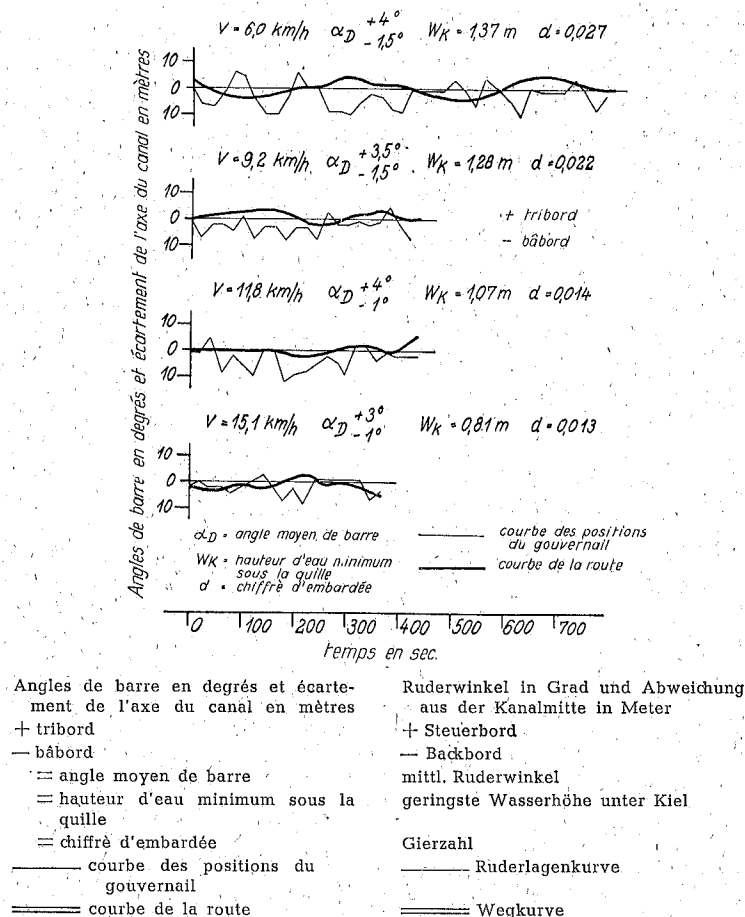


Abb. 9. Ruderlagen- und Wegkurven bei 3,9 m Tiefgang auf 4,51 m Wassertiefe im Profil A.

Betrachtet man die Meßergebnisse der einzelnen Versuchsfahrten und die Tendenz ihres Verlaufes als Funktion der einzelnen Einflußfaktoren, dann ergibt sich das folgende zusammengefaßte Versuchsergebnis:

Einfluß der Querschnittsgröße (Profile A bis D) auf das Steuerverhalten.

Bei gegebenem Tiefgang steuert das Schiff um so besser, je größer der Kanalquerschnitt, also auch die Wassertiefe ist. In Abb. 10 ist der Verlauf der Ruderweg- und Gierzahlkurven bei einer Schiffsgeschwindigkeit von 8 bis 9 km/h über dem Tiefenverhältnis H_w/T_g (Wassertiefe in Kanalmitte zum Schiffstiefgang) auf-

getragen. Danach zeigt sich, daß die Steuerfähigkeit rasch abnimmt, wenn H_w/T_g kleiner als etwa 1,3 wird. Oberhalb dieses Grenzwertes ist jedoch nur eine langsam zunehmende Verbesserung der Steuereigenschaften wahrnehmbar. Die Zunahme der Verbesserung kann auch nur gering sein, weil der Ruderweg bei den großen H_w/T_g -Werten mit etwa 4° an sich schon klein ist und auch bei unendlich großem Wasserquerschnitt noch Gierbewegungen vorhanden sind, die mit Ruderlagen von etwa dieser Größe kompensiert werden müssen. Das Steuerverhalten, soweit es sich auf die Kursstetigkeit bezieht und nicht auf das Manövrieren, kann durch eine Vertiefung des Kanalquerschnittes über den Stand des Profils D hinaus nur noch geringfügig verbessert werden. Diese Feststellung wird auch durch die eindeutige Beobachtung des Modellsteuerers gestützt, nach der das Modell, wenn es in dem kleinen Profil A stark gierte und dem Ruder kaum noch gehorchte, nach der Einfahrt in die anschließenden größeren und tieferen Querschnitte B, C oder D mit dem Ruder wieder aufgefangen und auf geraden Kurs eingesteuert werden konnte.

Einen Hinweis auf die Unterlegenheit des kleinen Profils gegenüber dem großen bietet auch die Beobachtung, daß das Modell bereits in dem größeren und tieferen Profil C, etwa ein bis eineinhalb Schiffslängen vor der Einfahrt in das kleinere Profil A unruhig zu werden begann. Wenn es dem Steuerer nicht gelang, diese Unruhe zu meistern und das Modell kursstetig in das Profil A einzusteuern, dann bedurfte es oft großer Mühe, die sich nun aufschaukelnden Gierbewegungen einzuschränken und das Modell vor dem Auflaufen zu bewahren. Mitunter konnte

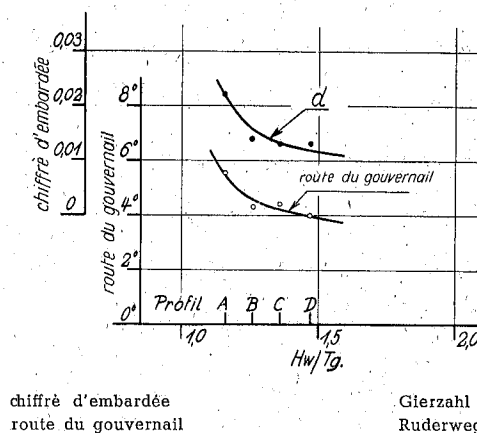


Abb. 10. Einfluß des Verhältnisses der Wassertiefe zum Tiefgang auf die Steuereigenschaften des Schiffes bei $V = 8-9$ km/h und einem Tiefgang von 3,9 m.

die Grundberührung trotz aller Aufmerksamkeit nicht mehr vermieden werden. In der gleichen Situation befindet sich jedes Schiff, wenn es plötzliche und größere Profiländerungen passiert. Die schwierige Handhabung des Modells in dieser Lage weist auf die große Bedeutung einer sorgfältigen Gestaltung der Profilübergänge hin.

Einfluß des Tiefganges im gleichen Kanalprofil auf die Steuerfähigkeit.

Es ist bekannt, daß die Steuerfähigkeit der Schiffe in hohem Maße von der Abladung, d. h. der Größe des Tiefganges, beeinflusst wird. Erfahrungsgemäß

steuern leicht beladene, auf ebenem Kiel liegende Schiffe besser als voll abgeladene. Völlig unabhängig voneinander durchgeführte Modellversuche bei verschiedenen Beladungen auf ebenem Kiel haben eindeutig ergeben, daß das Schiff bei kleinem Tiefgang, also großem Querschnittsverhältnis sehr gut steuert. Es kann mit kleinen mittleren Ruderwinkeln α_D von etwa $\pm 2^\circ$ kursstetig gehalten werden, wie aus den in Abb. 11 über F_K/F_S aufgetragenen Modellergebnissen ersichtlich ist. Mit zunehmendem Tiefgang, d. h. abnehmendem Querschnittsverhältnis wird die Steuerfähigkeit jedoch kleiner und ist bei F_K/F_S von etwa 5,7 mit $\pm 8^\circ$ mittlerem Ruderwinkel am schlechtesten. Die Gierzahl erhöht sich dabei von 0,01 auf 0,032. Das Schaubild zeigt also deutlich, daß die Gierigkeit des Schiffes mit zunehmender Beladung sehr groß wird und große Ruderwinkel erforderlich sind, um das Auflaufen zu vermeiden. Bei weiterer Erhöhung des Tiefganges beginnt der Sog am Heck wirksam zu werden, wodurch eine kursstabilisierende Wirkung eintritt, die um so größer ist, je weiter das Schiff achterlastig vertrimmt. Im Grenzfall saugt sich das Schiff mit dem Heck am Kanalboden fest. Bei starker Sogwirkung mit häufigen Grundberührungen des Hinterschiffes steuert es sehr gut.

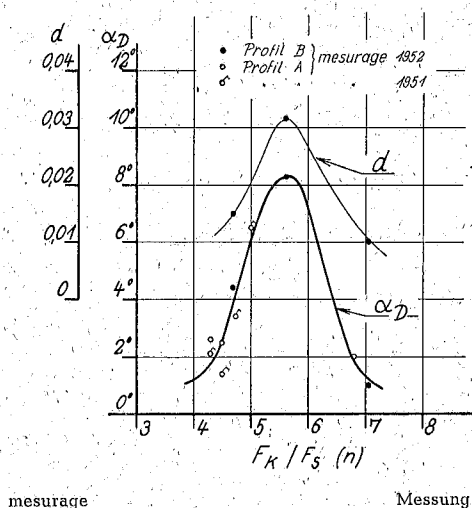


Abb. 11. Die Steuerfähigkeit des Schiffes abhängig von dem Querschnittsverhältnis (n).

Anordnung der Staudüsen zur Messung der Rückstromgeschwindigkeit am Kanalboden.

Einfluß flächengleicher Profilformen (Profile D, F und G) auf die Steuereigenschaften von Schiffen.

In den flächengleichen Profilen D, F und G sind Steuerversuche nur bei einem korrespondierenden Tiefgang von 2,58 m, d. h. einem Querschnittsverhältnis von 7,21 unternommen worden. Nach den Feststellungen des Modellsteuerers steuert das Schiff in dem Rechteckprofil F am besten. Im Rechteck-Trapezprofil G ist die Steuerfähigkeit etwas geringer und am kleinsten ist sie im Muldenprofil D. Wenn nun auch, wie aus der folgenden Zahlenzusammenstellung ersichtlich ist, eine gewisse Überlegenheit des Rechteck- und des Rechteck-Trapezprofils gegenüber dem Muldenprofil besteht, so sind die gemessenen Unterschiede doch so gering-

fällig, daß mit Rücksicht auf die Steuersicherheit nicht unbedingt das Rechteckprofil gefordert werden kann, obgleich besonders das Rechteckprofil den Vorteil hat, daß Grundberührungen ausgeschaltet sind.

	Rechteck- Profil F	Rechteck- Trapezprofil G	Mulden- profil D
mittlerer Ruderwinkel	$\pm 2,5^\circ$	$\pm 3,0^\circ$	$\pm 3,5^\circ$
Gierzahl	0,011	0,016	0,018

Die in der Tabelle angegebenen Werte gelten für eine Schiffsgeschwindigkeit von 6 bis 10 km/h.

Die gute Kursstetigkeit des Modells in Profil F und die bekannte Beeinflussung des Schiffes beim Fahren in der Nähe einer senkrechten Steilwand durch die Stauwelle führte auch zur Untersuchung des Verhaltens des Schiffes, wenn dieses in spitzem Winkel zur Steilwand fährt. Dabei zeigte sich, daß das Vorschiff, wenn es sich der Steilwand bis auf etwa 5 m genähert hatte, durch den uferseitigen Überdruck der Stauwelle zur anderen Seite des Kanals abgelenkt wurde. An der gegenüberliegenden Seite wiederholte sich der gleiche Vorgang. Auf diese Weise fuhr das Schiff bei mittschiffs liegendem Ruder im Zickzack durch den ganzen Kanal. Wenn dabei die Schiffsgeschwindigkeit nicht größer war als etwa 6 km/h, berührte das Schiff weder mit dem Bug noch mit dem Heck das senkrechte Ufer. Bei größeren Geschwindigkeiten vollzog sich dieser Vorgang zwar in der gleichen Weise, jedoch mit dem Unterschied, daß dabei das Heck infolge der größeren Absenkung des Wasserspiegels am Hinterschiff jedesmal an die Steilwand kam.

Im Profil G wurde das Schiff beim ersten Ansteuern der Böschung zwar ebenfalls zur anderen Seite abgelenkt, aber dort berührte es mit dem Vorsteven die schräge Unterwasserböschung, ehe der Einfluß der Stauwelle voll wirksam werden konnte. Der gleiche Vorgang trat im Muldenprofil D noch deutlicher in Erscheinung, weil sich die Bugwelle auf der schrägen Böschung weitgehend verläuft und sich daher nicht so stauen kann wie an der senkrechten Wand des Rechteckprofils. Das Schiff wird zwar auch in diesem Profil beim ersten Ansteuern der Uferböschung zunächst langsam, dann aber so rasch zur anderen Kanalseite abgelenkt, daß es dort regelmäßig auf Grund gerät. Dieses auch in Seekanälen von den Lotsen beobachtete Verhalten des Schiffes ist darauf zurückzuführen, daß im Muldenprofil die Absenkung am Heck in Böschungsnähe größer ist als im Rechteckprofil. Dadurch wird das Hinterschiff stärker zur Böschung gezogen und der Bug gegen das andere Ufer gerichtet. Wenn dann die Maschine nicht sofort gestoppt wird, fährt das Schiff selbst gegen das Ruder in die gegenüberliegende Böschung. Diese Bewegung wird noch durch den verminderten Bugstau infolge der flachen Böschung gefördert.

c) Beeinflussung des Kanals durch die Schifffahrt.

Im Vorhergehenden ist der Einfluß der Kanalgröße und -form auf die Schifffahrt untersucht worden, im Folgenden soll nun festgestellt werden, welche Auswirkungen sich durch die Schifffahrt an den verschiedenen Kanalprofilen ergeben. Zur Klärung dieser Frage sind zunächst die Rückstromgeschwindigkeiten in der Nähe der Kanalsohle während der Durchfahrt des Schiffes durch die verschiedenen Profile gemessen worden. Zu diesem Zweck dienten in jedem Profil 11 über den ganzen Querschnitt verteilte, am Boden des Profils festeinge-

baute Staudüsen. Um eine möglichst verzögerungsfreie Übertragung der Meßwerte auf die Manometer zu gewährleisten, wurden für die Staurohre rechtwinklig gebogene Kupferrohre von 8 mm ϕ benutzt, die an ihren Öffnungen elliptisch verformt waren, um möglichst nahe an den Kanalboden heranzukommen. Der größere (horizontale) Innendurchmesser betrug 9 mm, der kleinste (vertikale) Innendurchmesser 6 mm, die Düsen Seite lag etwa 4 mm über dem Kanalboden, so daß bei dem gewählten Modellmaßstab von 22,5 die Rückstromgeschwindigkeiten etwa 100 mm über dem Kanalboden gemessen worden sind. Das statische Rohr stand senkrecht hinter dem Staurohr.

Alle Meßdüsen standen durch Druckschlauchleitungen mit einem Manometerbrett in Verbindung, so daß alle Druckanzeigen fortlaufend durch Filmen registriert werden konnten. Für jede Messung sind etwa 100 Filmbilder aufgenommen worden.

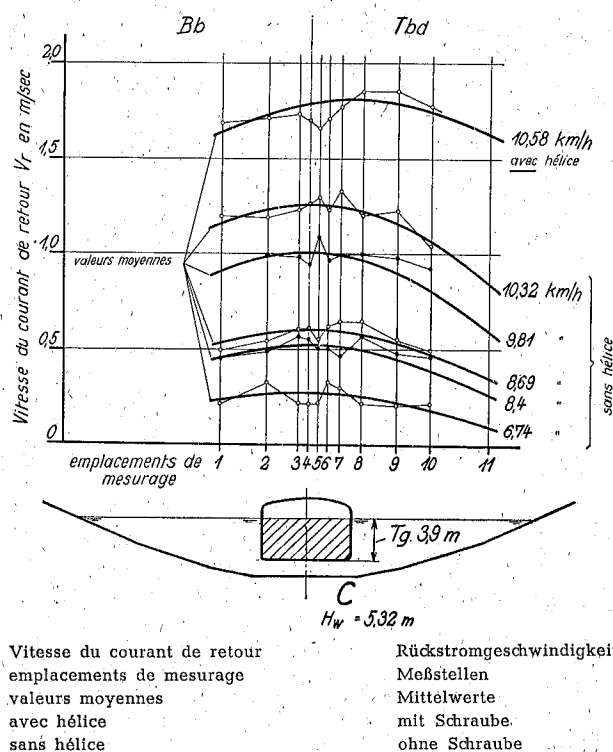


Abb. 12. Gemessene Rückstromgeschwindigkeiten für Profil C.

Bei der Auswertung der Filmbilder zeigt sich, daß die größten Druckdifferenzen, also die höchsten Rückstromgeschwindigkeiten über etwa 20 Filmbilder nahezu konstant blieben. Um Auswertungsfehler weitgehend auszuschalten, wurden innerhalb dieses Bereiches je Messung und Staurohr 7 Ablesungen durchgeführt und hieraus ein Mittelwert gebildet.

Ein Teilergebnis dieser Messungen für Profil C zeigt Abb. 12. Die an den einzelnen Meßstellen gemessenen Werte sind als Kreise eingetragen. Um den Einfluß der Schraube auf die Rückstromgeschwindigkeit festzustellen, sind für

dieses Profil Messungen mit und ohne Schraube durchgeführt worden. Abgesehen von Streuungen in den Meßwerten, die zur Hauptsache wohl auf Ablösungswirbel zurückzuführen sind, ergaben die Messungen für den Zustand ohne Schraube (d. h. Modell wird geschleppt) erwartungsgemäß ein seitensymmetrisches Bild, wobei die größte Rückstromgeschwindigkeit in Kanalmitte liegt (siehe die dick ausgezogenen Mittelwertkurven). Die Streuungen der Einzelmessungen um die Mittelwertkurven liegen im Bereich der interessierenden Rückstromgeschwindigkeit von etwa 1 m/s maximal bei $\pm 10\%$.

Beim Versuchszustand mit Schraubenantrieb wird, wie auch aus Abb. 12 ersichtlich, die Rückstromgeschwindigkeit größer und das Maximum der Mittelwertkurve nach der Stb-Kanalalseite verlagert, was offensichtlich auf die Einwirkung des Schraubendralls zurückzuführen ist. Wenn auch der überwiegende Teil der Erhöhung der Rückstromgeschwindigkeit durch die Strahlgeschwindigkeit des Propellers bedingt ist, so muß doch außerdem berücksichtigt werden, daß durch den Schraubensog die Druckverteilung am Schiff sich ändert und dadurch Absenkung und Vertrimmung des Schiffes zunehmen, so daß ein Teil der höheren Rückstromgeschwindigkeit auf diesen Einfluß zurückgeht.

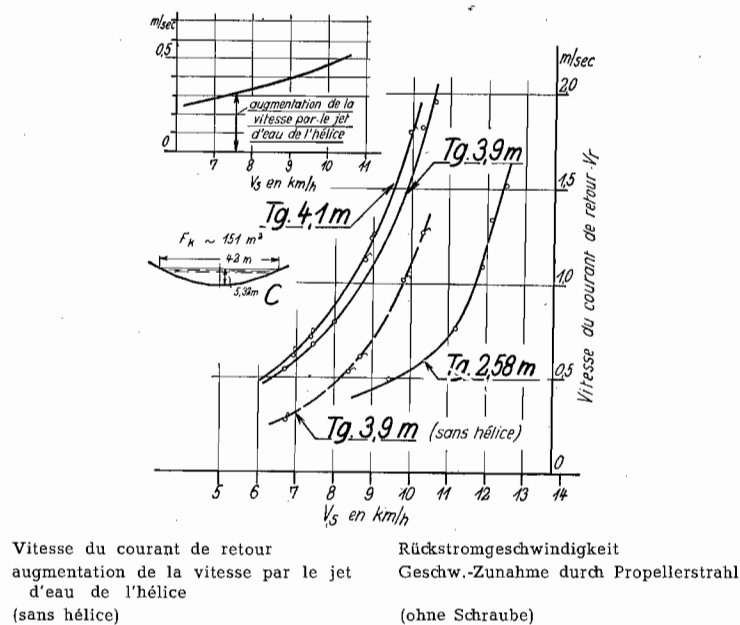


Abb. 13. Maximale Rückstromgeschwindigkeiten im Profil C.

Die Maximalwerte der Mittelwertkurven für die Rückstromgeschwindigkeiten in Profil C sind für die verschiedenen Versuchszustände abhängig von der Schiffsgeschwindigkeit in Abb. 13 dargestellt, und zwar Messungen für die Tiefgänge 4,1 m, 3,9 m und 2,58 m mit Schraubenantrieb und für den Tiefgang von 3,9 m auch ohne Schraubenantrieb.

Im Abschnitt Ic ist die zulässige Rückstromgeschwindigkeit mit 1 m/s festgelegt worden. Bei dieser Rückstromgeschwindigkeit könnte im Profil C für die Kanalfahrt zugelassen werden: bei einem Tiefgang von 4,1 m und $n = 4,50$ eine

Geschwindigkeit von 8,45 km/h, bei einem Tiefgang von 3,9 m und $n = 4,72$ eine Geschwindigkeit von 8,8 km/h, bei einem Tiefgang von 2,58 m und $n = 7,12$ eine Geschwindigkeit von 11,72 km/h.

Diesen Geschwindigkeiten entsprechen Schleppleistungen von 78 EPS bei Tiefgang 4,1 m, von 81 EPS bei Tiefgang 3,9 m und von 152 EPS bei Tiefgang 2,58 m. Durch Interpolation ergibt sich für ein Querschnittsverhältnis von $n = 5,72$ entsprechend dem Regelquerschnitt für das 1000-t-Schiff (vgl. Abb. 1) für einen Kanalquerschnitt nach Profil C bei der angenommenen Rückstromgeschwindigkeit von 1 m/s eine Kanalgeschwindigkeit von etwa 10 km/h. Hierfür würde eine Schleppleistung von etwa 100 EPS benötigt, also ein Wert, der vom Standpunkt der Schifffahrt aus ungefähr dem wirtschaftlichsten Zustand entsprechen würde, wie dies weiter oben bereits ausgeführt wurde.

Aus Abb. 13 ist weiter zu entnehmen, daß bei einer Rückstromgeschwindigkeit von 1,0 m/s fast 40% auf den Einfluß der nicht eingetunnelten Schraube zurückzuführen ist. Im Rahmen eines umfangreichen Versuchsprogramms der HSVA über die Fahrtverhältnisse im Mittellandkanal wurde schon früher festgestellt, daß die Rückstromgeschwindigkeit bzw. der Angriff der Kanalsohle durch den Schraubenstrahl abhängig ist von der Flächenbelastung der Schrauben, also von ihrem Durchmesser; kleine, schnell-drehende Schrauben haben eine höhere Rückstromgeschwindigkeit als große, langsamlaufende Schrauben. In weit stärkerem Maße wirkt sich jedoch die Austrittsrichtung des Propellerstrahles auf die Rückstromgeschwindigkeit an der Kanalsohle aus. Da Binnenschiffe mit Rücksicht auf die Fahrtverhältnisse bei leerem Schiff durchweg eingetunnelte Schrauben haben, deren Tunnel häufig hinter der Schraube heruntergezogen werden müssen, tritt bei diesen der Propellerstrahl in Richtung zur Kanalsohle aus, wodurch eine erhöhte Rückstromgeschwindigkeit hervorgerufen wird, wenn die Tunnelbleche nicht im letzten Teil leicht nach oben gekrümmt werden [3, 6, 7]. Die HSVA hat seinerzeit verschiedene Maßnahmen geprüft bzw. entwickelt, durch die der Sohlenangriff auf ein Mindestmaß reduziert werden konnte. Eine davon ist das oben angegebene Abkrümmen des Tunnels im letzten Teil. Alle Maßnahmen hatten das gemeinsame Ziel, die Austrittsrichtung des Propellerstrahls zur Wasseroberfläche hin abzulenken.

Durch Veränderung der Form des Kanalprofils bei Einhaltung des Wasserquerschnittes und der Wassertiefe läßt sich die Rückstromgeschwindigkeit nur in engen Grenzen beeinflussen, wie Abb. 14 zeigt.

Eine Vertiefung des Kanalprofils bei gleichbleibendem Wasserquerschnitt vermindert die Rückstromgeschwindigkeit weitaus wirksamer. Bei 1,0 m/s Rückstromgeschwindigkeit steigt die zulässige Kanalgeschwindigkeit bei 3,9 m Tiefgang von 8,75 km/h bei Profil E auf 9,35 km/h bei Profil D (7%) und bei 2,58 m Tiefgang von 11,35 km/h bei Profil E auf 12,3 km/h bei Profil D (8%), im Mittel also um etwa 7,5%.

Nahezu der gleiche Gewinn wird erzielt, wenn bei gleicher Kanaltiefe der Wasserquerschnitt um ca. 10% vergrößert wird. Bei 1,0 m/s Rückstromgeschwindigkeit steigt die zulässige Kanalgeschwindigkeit bei 3,9 m Tiefgang von 8,25 km/h auf 8,75 km/h (6%) und bei 2,58 m Tiefgang von 10,75 km/h auf 11,35 km/h (5,5%), im Mittel um 5,25%.

Durch gleichzeitige Vergrößerung des Wasserquerschnittes und Vertiefung des Kanals ergeben sich die größten Vorteile (vgl. Abb. 14, Profil A und D). Bei 1,0 m/s Rückstromgeschwindigkeit

steigt die Kanalgeschwindigkeit bei 3,9 m Tiefgang von 8,25 km/h in Profil A auf 9,35 km/h in Profil D (13,5%) und bei 2,58 m Tiefgang von 10,76 km/h in Profil A auf 12,3 km/h in Profil D (14%), im Mittel also um 13,75%.

Man kann aus diesen Ergebnissen eindeutig feststellen, daß in bezug auf die Rückstromgeschwindigkeit die Kanaltiefe den entscheidendsten Einfluß auf die zulässige Kanalgeschwindigkeit ausübt. Bei Ausfahren der Leistung bis zur angenommenen Rückstromgeschwindigkeit von 1,0 m/s bringt eine Vertiefung von 27% in Kanalmitte eine Steigerung der Schiffsgeschwindigkeit von 7,5% gegenüber nur 1,5% erhöhter Geschwindigkeit bei Begrenzung auf die für Selbstfahrer wirtschaftliche Schleppleistung von 100 EPS.

Eine Querschnittsvergrößerung um 10% ergibt bei gleicher Wassertiefe einen Geschwindigkeitsgewinn von 5,5% gegenüber 7,75% beim Vergleich bei gleicher Schleppleistung von 100 EPS.

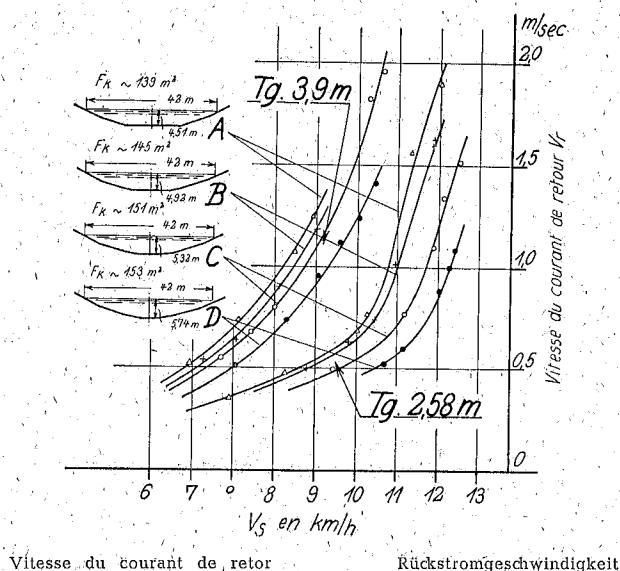


Abb. 14 Einfluß von Kanalquerschnitt und -tiefe auf die maximale Rückstromgeschwindigkeit.

Einfluß der Profilform auf die maximale Rückstromgeschwindigkeit.
(Wasserquerschnitt konstant.)

Durch Veränderung der Profilform bei gleichem Wasserquerschnitt und gleicher Wassertiefe erhöht sich die Geschwindigkeit

im Rechteckprofil gegenüber Fahrt im Trapezprofil um 3,5% bei 1,0 m/s Rückstromgeschwindigkeit und um 6,5% beim Vergleich bei 100 EPS, im Rechteck-Trapezprofil gegenüber Fahrt im Trapezprofil um 1,75% bei 1,0 m Rückstromgeschwindigkeit und um 5% bei Fahrt bei 100 EPS.

Wird der Kanal zugleich in seinem Wasserquerschnitt vergrößert und vertieft, dann erhält man die größte Geschwindigkeitssteigerung um 13,75% gegenüber 9,25% beim Schleppleistungsvergleich.

Während also in bezug auf den Leistungsbedarf das Rechteckprofil F das günstigste ist, bietet hinsichtlich

der Rückstromgeschwindigkeit und damit der zulässigen Kanalgeschwindigkeit das Muldenprofil die größten Vorteile. Bei der angegebenen Rückstromgeschwindigkeit von 1,0 m/s ist die im Muldenprofil erreichbare Geschwindigkeit um etwa 4% höher als im Rechteckprofil, während bei gleichem Leistungsaufwand von 100 EPS im Rechteckprofil eine 5% höhere Geschwindigkeit gefahren werden kann als im Muldenprofil, diese 5% höhere Geschwindigkeit kann aber nur bei einer um 25% zu hohen Rückstromgeschwindigkeit gefahren werden.

Die physikalische Erklärung für die Ergebnisse der Rückstrommessungen ist folgende:

Je größer in einem Kanal die Wasserspiegelbreite ist, um so mehr wird das vom Schiff verdrängte Wasser in Oberflächennähe zurückströmen können. In einem Rechteckprofil wird der Wasserrückstrom infolge der geringeren Wasserspiegelbreite mehr zur Kanalsohle hin verlagert. Bei gleichem Wasserquerschnitt und gleicher Wassertiefe ist also in dieser Hinsicht ein Trapezprofil oder ein Rechteck-Trapezprofil günstiger als ein Rechteckprofil, während bei vergrößerter Wassertiefe (Muldenprofil) sich der Wasserquerschnitt unterhalb des Schiffsbodens zusätzlich vergrößert und deshalb die örtliche Rückstromgeschwindigkeit hier geringer wird. Dieser Einfluß ist sogar wirksamer, als der Vorteil größerer Wasserspiegelbreite, weshalb das Muldenprofil am günstigsten ist.

In den Auftragsstrecken eines Kanals ist der Sohlenangriff von entscheidender Bedeutung, weil beim Durchspülen der Dichtungsschicht der Kanal auslaufen und außerdem großer Flurschaden hervorgerufen werden kann. Für alle Kanalstrecken gemeinsam von besonderer Wichtigkeit ist aber der Zustand der Böschungen, so daß die Beseitigung ihrer Beschädigungen durch die Schifffahrt den überwiegenden Teil der Unterhaltungskosten ausmacht. Wie schon im Abschnitt I erwähnt, werden die Ufer der deutschen Großschiffahrtskanäle durch Steinschüttungen befestigt, die sich bei einer Böschungsneigung von 1:3 von 1 m über bis 1 m unter dem Wasserspiegel erstrecken. Durch Kolkversuche sollte nun festgestellt werden, ob dieser Bereich groß genug ist und wie sich der Böschungsangriff bei Vertiefung des Kanals und gleichzeitiger Vergrößerung des Wasserquerschnitts verändert. Zu diesem Zweck wurde aus den Magerbetonprofilen der Versuche ein Teil der Böschung herausgenommen und mit Grobsand (Korngröße ca. 0,5 bis 3 mm) wieder aufgefüllt. Diese Modellsandböschung ist vor Versuchsbeginn in 3 je 400 mm voneinander entfernten Querebenen durch Meßnadeln mit 50 mm Abstand aufgemessen worden. Anschließend fuhr das selbstangetriebene Modellschiff 50 mal über die Sandstrecke. Danach wurden die eingetretenen Veränderungen in den gleichen Querebenen wie vorher aufgemessen und ein Mittelwert aus den Ergebnissen der 3 Meßebenen gebildet, um Aufmeßfehler möglichst auszugleichen. Jetzt wurden die Auskolkungen wieder aufgefüllt, das Profil glattgestrichen, neu aufgemessen und der Versuch für die nächste Geschwindigkeit wiederholt.

Bei diesen Versuchen ist bewußt auf eine Ähnlichkeit zwischen dem gewählten Grobsand und der Steinschüttung der Großausführung verzichtet worden, da es zunächst darauf ankam, ein Material zu finden, das in relativ kurzer Zeit schon eine klare Veränderung am Profil ergab, andererseits jedoch so widerstandsfähig war, daß es bei der vorliegenden Böschungsneigung genügend Standfestigkeit besaß. Durch diese Vernachlässigung der Maßstabsähnlichkeit wird jedoch der relative Vergleich zwischen den einzelnen Profilen, auf den es hier vor allen Dingen ankommt, nicht berührt.

Da diese Versuche sehr zeitraubend und dementsprechend kostspielig sind, mußten sie auf die Profile A, B, C und D bei Tiefgang 3,9 m und in Profil C außerdem noch für Tiefgang 4,1 m beschränkt werden.

Das Ergebnis eines solchen Versuches zur Ermittlung des Böschungsangriffs durch die Wellenbildung des Schiffes ist für Profil B bei 3,9 m Tiefgang und eine Geschwindigkeit von 10,25 km/h auf Abb. 15 wiedergegeben. In diesem Fall sind

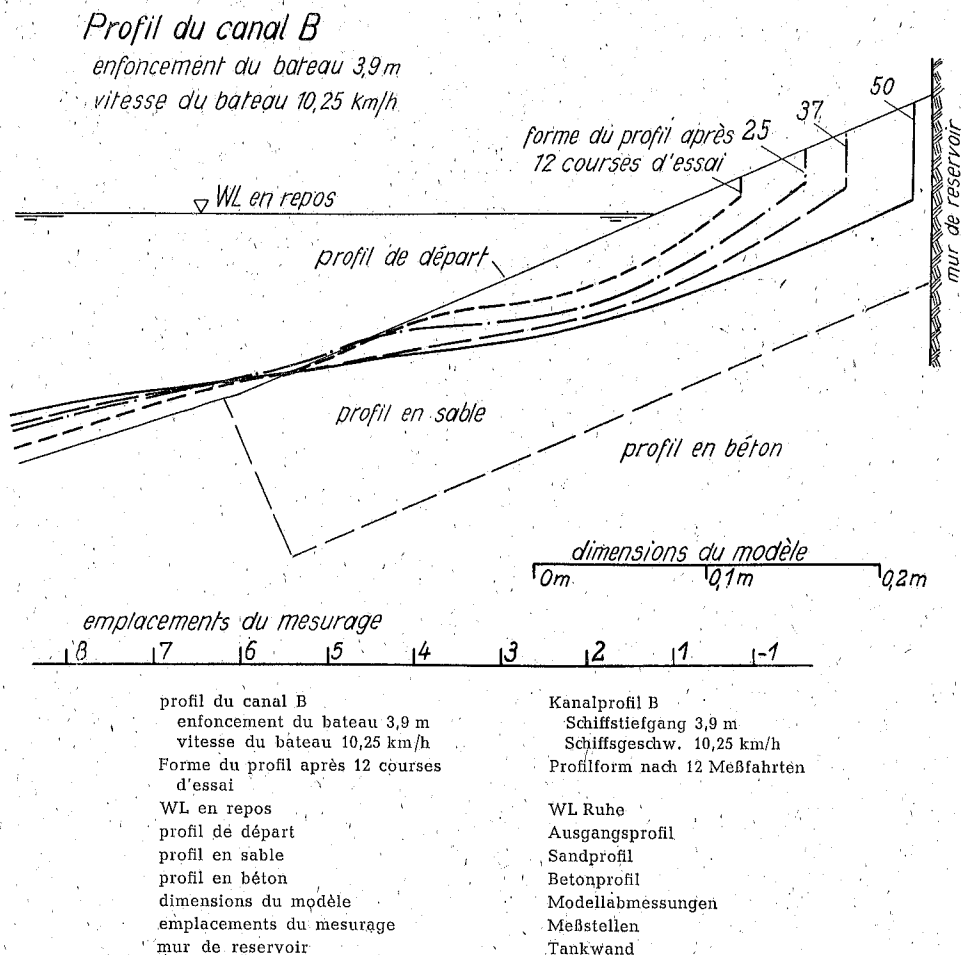


Abb. 15. Böschungsangriff im Kanalprofil B aufgemessen nach 12, 25, 37 und 50 Meßfahrten.

Kolkfläche und Kolktefe abhängig von der Anzahl der Meßfahrten.

Böschungsangriff bei verschiedenen Schiffsgeschwindigkeiten.

die Böschungsveränderungen nach 12, 25, 37 und 50 Meßfahrten aufgenommen worden, bei allen weiteren Versuchen ist jeweils nur eine Aufmessung nach der 50. Fahrt vorgenommen worden.

Es zeigt sich, daß die ausgekolkte Querschnittsfläche direkt proportional mit der Anzahl der unternommenen Meßfahrten zunimmt, sie bietet also ein brauchbares Vergleichsmaß für die Versuche. Weiter zeigt sich, daß auch der Bereich

des Böschungsangriffes mit der Zahl der Meßfahrten größer wird. Bei der sehr hohen Geschwindigkeit von 10,25 km/h auf Abb. 15 erstreckt sich dieser Bereich nach 12 Meßfahrten bis ca. 1,5 m unter dem Wasserspiegel und erweitert sich bei 50 Fahrten bis auf etwa 2 m unter dem Wasserspiegel. Unterhalb dieser Grenze wird das ausgekolkte Material wieder aufgelandet — hier ist also eine Steinschüttung nicht mehr notwendig. Abgesehen davon, daß bei den praktisch erreichbaren kleineren Geschwindigkeiten dieses Gebiet nur bis knapp 0,7 m unter die Oberfläche reichen würde, muß noch die Modellunähnlichkeit des Böschungsmaterials berücksichtigt werden. Die Original-Steinschüttung ist widerstandsfähiger, die obengenannten Werte werden also mit Sicherheit nicht überschritten, so daß für die untersuchten Fälle bei Fahrt in Kanalmitte die vorgesehene Steinbefestigung von ± 1 m, bezogen auf den Wasserspiegel, ausreichend ist.

Im Rahmen eines Ergänzungsprogramms von Kolkversuchen mit aus Mitte Kanal fahrenden Selbstfahrern auf verschiedenen Tiefgängen, wobei das Schiff stets soweit aus Kanalmitte fuhr, daß die Kanalböschung von der außenliegenden Schiffskimm während der Fahrt nahezu berührt wurde, zeigte sich, daß hier der halbbeladene Selbstfahrer (Tg. ca. 1,5 m) am ungünstigsten ist, weil die Auskolkungen im Bereich der Kimm am stärksten sind und dies Gebiet hier eben unterhalb der Steinschüttung liegt, also die Gefahr besteht, daß die Schüttung unterspült wird. Aus diesem Grunde empfiehlt es sich, für die Binnenkanäle die Steinschüttungen möglichst bis 3 m unter den Wasserspiegel auszu-dehnen.

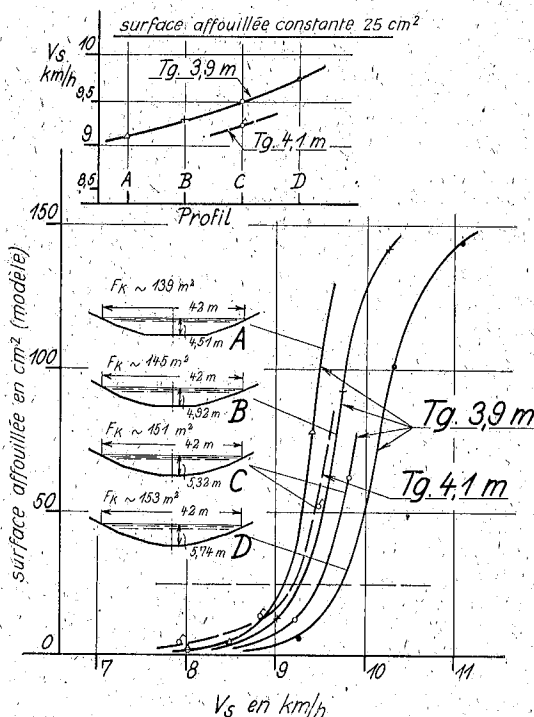
Die Gesamtergebnisse aller Kolkversuche mit 50 Fahrten zeigt Abb. 16. Aus diesen Versuchen ergibt sich folgendes: Bei Zugrundelegung einer Rückstromgeschwindigkeit von 1 m/s an der Kanalsohle kann auf 3,9 m Tiefgang im Profil A eine Geschwindigkeit von 8,25 km/h gefahren werden. Bei gleichem Böschungsangriff würde sich diese Geschwindigkeit im Muldenprofil D (etwa 10% größerer Wasserquerschnitt und 27% größere Wassertiefe in Kanalmitte) auf 8,85 km/h erhöhen. Bei dieser Geschwindigkeit beträgt die Rückstromgeschwindigkeit in Profil D nur 0,86 m/s und die ausnutzbare Schleppleistung von 86 EPS bei Profil A vermindert sich auf 64 EPS in Profil D.

Bei gleichem Böschungsangriff in Profil A und D erhöht sich die Kanalgeschwindigkeit in D also um 7%, wobei sich die Rückstromgeschwindigkeit in Profil D auf 86% und die erforderliche Schleppleistung auf 74,5% der in Profil A erforderlichen Beträge vermindert.

Während also für 3,9 m Tiefgang in Profil D bei Zugrundelegung gleicher Schleppleistung (100 EPS) die Geschwindigkeit gegenüber Profil A um 11% und bei Zugrundelegung gleicher Rückstromgeschwindigkeit sogar um 13,5% ansteigt, erhöht sie sich bei Zugrundelegung des gleichen Böschungsangriffs nur um 7%. Das Oberflächen-Wellensystem des Schiffes ist also am wenigsten durch Veränderungen am Kanal zu beeinflussen. Es bliebe noch zu untersuchen, ob hier möglicherweise eine Kanalverbreiterung (Profil E) vorteilhaft wäre.

Es wäre jetzt noch der Einfluß des Tiefganges auf den Böschungsangriff festzustellen. Hierfür können die in Profil C für die Tiefgänge 3,9 m und 4,1 m unternommenen Versuche herangezogen werden. Bei gleicher Rückstromgeschwindigkeit von 1 m/s vermindert sich die Geschwindigkeit von 8,8 km/h bei Tiefgang 3,9 m auf 8,45 km/h bei 4,1 m Tiefgang, also eine Geschwindigkeitsabnahme von 4%. Bei konstanter Schleppleistung von 100 EPS vermindert sich die Ge-

schwindigkeit von 9,05 km/h auf 8,7 km/h, also ebenfalls um 4 0/0; während bei Zugrundelegung des gleichen Böschungsangriffes die Geschwindigkeit sich von 8,6 km/h auf 7,75 km/h vermindert, d. h. um 10 0/0. Hieraus folgt also, daß der Einfluß durch den Böschungsangriff sehr stark vom Tiefgang abhängig ist, eine Folge davon, daß das Wellenbild um so ausgeprägter wird, je tiefer das Schiff



surface affouillée constante

surface affouillée en cm² (modèle)

Kolkfläche konstant

ausgekolkte Fläche in cm² (Modell)

Abb. 16. Böschungsangriff abhängig von der Schiffsgeschwindigkeit.

Gemessene Wasserspiegelabsenkung an der Böschung bei verschiedenen Kanalquerschnitten und Tiefgängen.

eintaucht. Es ist also mit ziemlicher Sicherheit zu erwarten, daß bei den Tiefgängen, wie sie in Binnenschiffahrtskanälen üblich sind (die hier angeführten Kolkversuche waren ja auf die ungünstigeren Verhältnisse der Seeschiffahrtskanäle abgestellt), der Böschungsangriff selbst bei den hier zulässigen höheren Geschwindigkeiten weniger stark ausgeprägt ist. Offen bleibt noch, wie sich bei kleineren Tiefgängen der Einfluß durch die Kanalform und -größe auf den Böschungsangriff auswirkt. Diese Frage wäre noch zu untersuchen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sind an Hand umfangreichen Versuchsmaterials folgende grundsätzliche Erkenntnisse gewonnen worden:

1. Von der Schiffsseite aus ist in bezug auf eine möglichst ökonomische Leistungsausnutzung und in nautischer Hinsicht (absolut sicheres Manövrieren ohne Gefahr einer Grundberührung) das Rechteckprofil die günstigste Lösung.

2. Vom Standpunkt der Kanalunterhaltung ist hinsichtlich des geringsten Angriffs der Kanalsole (kleinste Rückstromgeschwindigkeit) das Muldenprofil optimal. Im Rechteckprofil ist die Rückstromgeschwindigkeit etwa 25% höher. In bezug auf den Böschungsangriff ist dagegen ein Rechteckprofil die optimale Lösung, da hier wegen der notwendigen massiven Bauart Böschungsangriffe nahezu wirkungslos bleiben.

Zur Abrundung der Ergebnisse sind noch die größten Wasserspiegelabsenkungen an der Kanalböschung (tiefstes Wellental) aus Wellenfotos ausgewertet worden (vgl. Abb. 17). Bei kleinen Geschwindigkeiten befindet sich die größte Spiegelabsenkung etwa bei Mitte Schiff; sie ver-

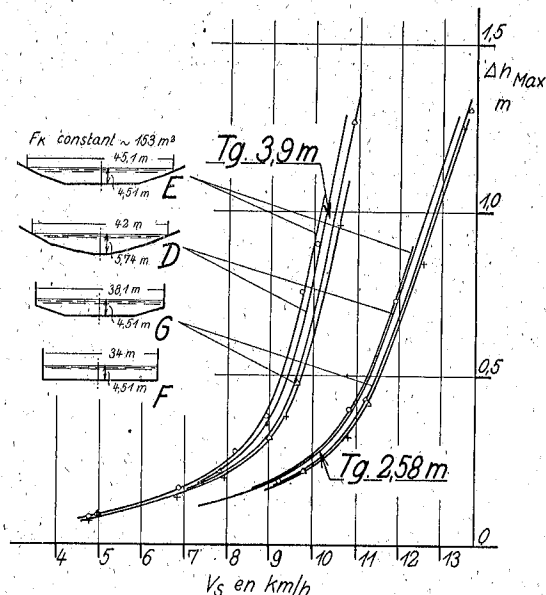


Abb. 17. Gemessene Wasserspiegelabsenkung an der Böschung bei verschiedenen Kanalprofilen von gleichem Wasserquerschnitt.

lagert sich mit steigender Geschwindigkeit immer weiter in Richtung zum Heck. Hier ist das Eigenwellensystem des Schiffes noch nicht besonders stark ausgeprägt. Bei hohen Geschwindigkeiten, also im Bereich des starken Widerstandsanstieges, wo auch das Eigenwellensystem des Schiffes sich stärker auswirkt, bildet sich mit einer sehr starken Absenkung die für Fahrt auf flachem Wasser charakteristische Querwelle am Heck aus.

Sämtliche Versuchs- und Rechnungsergebnisse sind für die wichtigsten Vergleichszustände in Tabelle 1 zusammengestellt.

Die wesentlichen Ergebnisse dieser Tabelle sind bereits eingehend behandelt worden, so daß jetzt nur noch kurz der Vergleich zwischen Meß- und Rechnungsergebnissen angestellt zu werden braucht. Miteinander vergleichbar sind die gerechneten mittleren Wasserspiegelabsenkungen, die mittlere Absenkung des Schiffes und die mittlere Wasserspiegelabsenkung an der Böschung, wobei jedoch folgende Einschränkungen zu machen sind: Gemessen wurde die größte Absenkung des Schiffes, um, wie schon erwähnt, die Lage des jeweils ungünstigsten Punktes des Schiffes zum Kanalboden zu erfassen. Während nun beim großen Tiefgang von 3,9 m im praktisch in Frage kommenden Bereich der Schiffs-

geschwindigkeit die Trimmwinkel so klein sind, daß sie für diesen Vergleich vernachlässigt werden können, sind beim kleinen Tiefgang von 2,58 m die Trimmwinkel schon sehr groß, so daß die in den Tabellen angegebenen Werte sehr stark durch den Trimmwinkel über den Wert der mittleren Absenkung hinaus vergrößert sind. Bei den gemessenen maximalen Wasserspiegelabsenkungen an der Böschung gilt sinngemäß die gleiche Einschränkung. Bei dem für den großen Tiefgang in Frage kommenden Geschwindigkeitsbereich entsprechen die Werte etwa den Wasserspiegelabsenkungen in der Nähe des Mittelschiffs, also für den gleichen Bereich, auf den die Wasserspiegel-Absenkungs-Berechnungen abgestellt sind. Bei den absolut höheren Schiffsgeschwindigkeiten des kleinen Tiefganges dagegen wird die Absenkungswelle durch die stärker ausgeprägte Eigenwelle des Schiffes überlagert; hinzu kommt, daß es technisch nur möglich war, das jeweils tiefste Wellental des Gesamt-Wellensystems bei der Auswertung zu erfassen, so daß auch hier die angegebenen Werte z. T. wesentlich höher sind, als der mittleren Absenkung des Wasserspiegels entspricht.

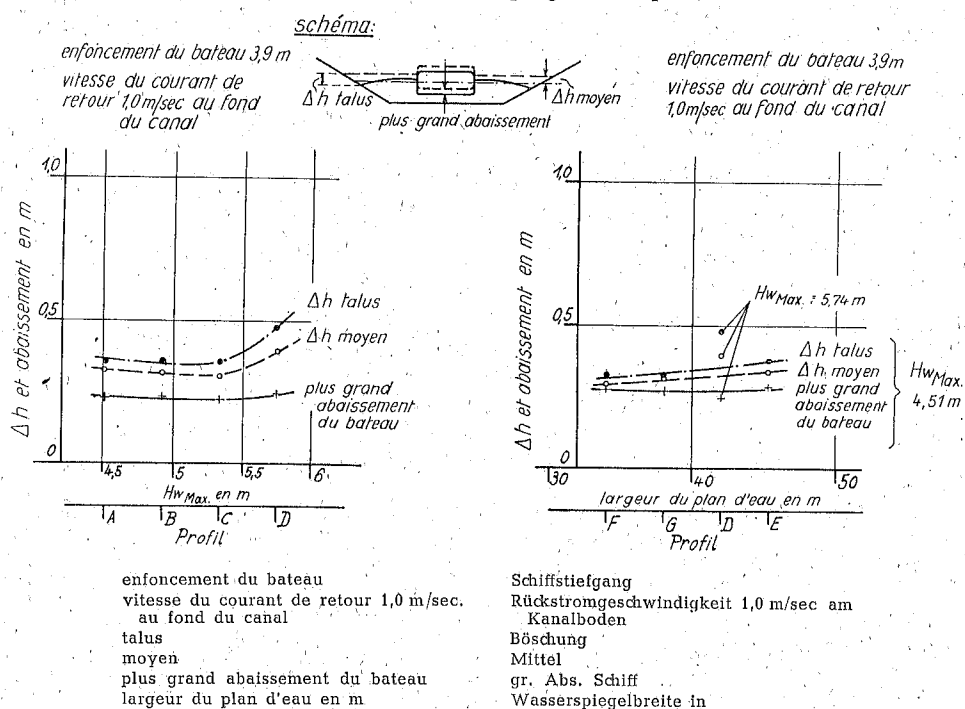


Abb. 18. Wasserspiegel- und Schiffsabsenkung.

Der angestrebte Vergleich zwischen Messung und Rechnung kann also nur für den großen Tiefgang von 3,9 m als einigermaßen zuverlässig angesehen werden (vgl. Abb. 18, Profile A bis D und D bis G). Man erkennt die allgemeine Tendenz, daß die Absenkungen am Schiff am kleinsten und die an der Böschung am größten sind; das Rechnungsergebnis für die mittlere Absenkung liegt sinngemäß zwischen beiden. Es ergibt sich also das auf Abb. 18 oben schematisch gezeichnete Absenkungsbild für Kanalfahrt, woraus zu entnehmen ist, daß die Rückstromgeschwindigkeiten in der Nähe des Schiffes ebenfalls kleiner sind als an den Kanalböschungen, ein Ergebnis, das seine Bestätigung auch in den Rückstrommessungen fand.

Tab. 1 Zusammenstellung der Schiffsgeschwindigkeiten
 a) bei Ausnutzung der Schleppleistung von 100 EPS
 b) bei Ausnutzung der Rückstromgeschwindigkeit $v_r = 1$ m/s

Profil	F_k m ²	T_g m	$n =$ F_k/F_s	H_w m	$R =$ F_e/U m	B_w m	B_N m	a) Schleppleistung 100 EPS				b) Rückstrom $V_r = 1$ m/s				
								V_s km/h	V_s in % von V_{kr}	V_r m/s	V_r' m/s	V_s km/h	V_r m/s	max. Absenk. Schiff cm	Δh mittel/ Böschung cm	Er- forderl. EPS
A	139	2,58	6,55	4,51	3,18	42,0	29,7	10,75	61,5	1,00	1,09	10,76	1,10	47	40/51,2	117
		3,9	4,35					8,4	50	1,04	1,16	8,25	1,10	23	32/36	100
B	146	2,58	6,84	4,92	3,32	42,0	29,7	10,95	60,5	0,97	1,04	11,0	1,06	47,5	39,6/52,1	121
		3,9	4,54					8,75	51	1,08	1,17	8,55	1,08	24	32/35	94
C	151	2,58	7,12	5,32	3,45	42,0	29,7	11,2	60	0,76	0,95	11,7	1,13	66,8	43,2/71,4	177
		3,9	4,72					9,05	51	1,07	1,14	8,8	1,04	22	32/36	94
D	153	2,58	7,21	5,74	3,48	42,0	29,7	11,55	61,5	0,66	1,02	12,3	1,37	87	65/86	228
		3,9	4,78					9,35	53	1,01	1,20	9,35	1,20	25	40/48	119
E	153	2,58	7,21	4,51	3,28	45,3	32,7	11,45	64	1,10	1,19	11,35	1,15	58,5	43,3/53,6	106
		3,9	4,78					9,15	54	1,14	1,20	8,75	1,06	28	34/38	86
F	153	2,58	7,21	4,51	3,55	34,0	34,0	12,30	65,2	1,30	1,00	11,82	0,90	74	34/60	88,5
		3,9	4,78					9,7	53,5	1,22	1,12	8,98	0,95	28	29/32	71
G	153	2,58	7,21	4,51	3,56	38,1	34,9	12,1	65	1,37	1,08	11,58	0,94	63,5	36/53	88,5
		3,9	4,78					9,55	53,5	1,21	1,19	8,88	1,0	27	31/32	72

Erklärung der Symbole der Tab. 1

F_k = Wasserquerschnitt des Kanals in Ruhe
 T_g = Tiefgang des Schiffes
 F_s = eingetauchter Schiffs-Hauptspant
 n = Querschnittsverhältnis
 H_w = Wassertiefe des Kanals in Kanalmitte in Ruhe
 F_e/U = hydraulischer Radius in Ruhe
 $F_e = F_k - F_s$ = effektiver Wasserquerschnitt in Ruhe
 B_w = Wasserspiegelbreite in Ruhe
 B_N = nutzbare Kanalbreite, gemessen in Höhe des Schiffsbodens in Ruhe
 V_s = Schiffsgeschwindigkeit

V_{kr} = Stauwellengeschwindigkeit
 V_r = gemessene Rückstromgeschwindigkeit am Kanalboden
 V_r' = berechnete mittlere Rückstromgeschwindigkeit im Kanalprofil
 max. Abs. = Absenkung des ungünstigsten Punktes am Schiff im Vergleich zur Ruhelage
 Δh mittel = berechnete mittlere Wasserspiegelabsenkung
 Δh Böschg. = gemessene größte Wasserspiegelabsenkung an der Böschung, tiefstes Wellental
 EPS = effektive Schleppleistung des Schiffes

Ein Vergleich zwischen dem Trapez- und dem Rechteckprofil (E und F) bestätigt eindeutig die bei den Rückstrommessungen gemachte Beobachtung, daß die Rückstromgeschwindigkeit im Rechteckprofil gleichmäßiger verteilt ist als im Trapezprofil, wo sich der Bereich größter Rückstromgeschwindigkeit, wie schon früher erwähnt, mehr im Bereich der Oberfläche und hier vor allem in Böschungsnähe befindet. Noch klarer zeigt sich dies Resultat im Muldenprofil D, wo die Absenkung des Schiffes am kleinsten ist (hier befindet sich also der Bereich geringster Rückstromgeschwindigkeit), während die Absenkung in Böschungsnähe die höchsten Werte ergibt (Bereich größter Rückstromgeschwindigkeiten) (vgl. Abb. 18, Ergebnisse der Profile D, E, F und G). Hieraus läßt sich nun auch noch folgern, daß die Böschungsangriffe im Muldenprofil am ausgeprägtesten sein müssen und daß ein Trapezprofil gleicher Querschnittsgröße mit ziemlicher Sicherheit in bezug auf den Böschungsangriff günstiger sein würde.

Auf Abb. 19 sind die aus den gerechneten (V_r') und den gemessenen Rückstromgeschwindigkeiten (V_r) gebildeten Verhältnisswerte V_r/V_r' abhängig von den Kanalprofilen, getrennt für die Profile A bis D und D bis G aufgetragen. Der

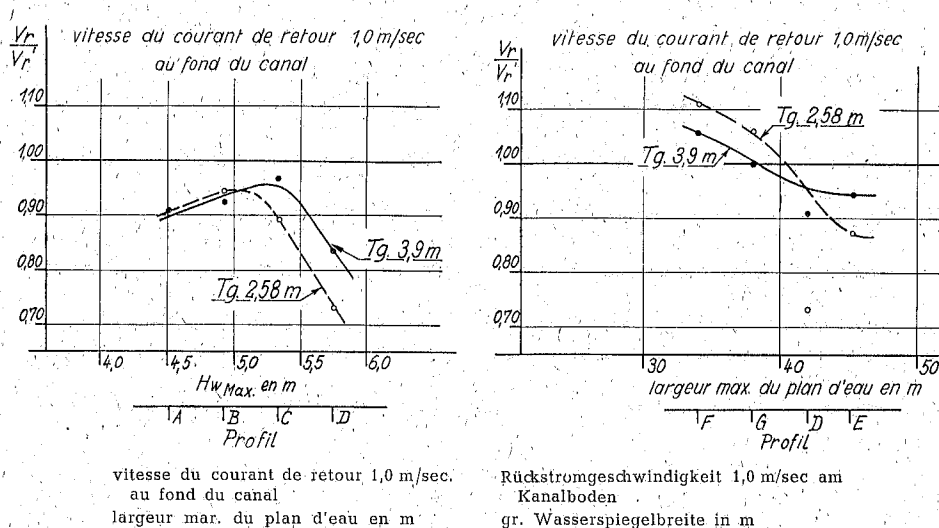


Abb. 19. Vergleich von gemessener maximaler Rückstromgeschwindigkeit am Kanalboden V_r mit gerechneter mittlerer Rückstromgeschwindigkeit am Profil V_r' .

Vergleich der Profile A bis D, bei denen sowohl der Wasserquerschnitt als auch die Wassertiefe ungleich sind, zeigt zunächst, daß allgemein die Rückstromgeschwindigkeiten am Kanalboden unter 1,0 m/s, also kleiner als der errechnete Mittelwert sind. Sehr interessant ist aber der scheinbar von der Regel abweichende Verlauf der Kurven; der Verhältnisswert ist am größten nicht etwa, wie zunächst zu erwarten, in dem Profil mit absolut kleinster Wassertiefe und damit kleinstem Wert für die Wassertiefe unter dem Kiel, sondern das Maximum liegt bei einem größeren Profil und zwar für den kleinen Tiefgang etwa bei B und für den großen Tiefgang sogar erst bei C!

Die Erklärung ist wohl, das vom Schiff verdrängte Wasser kann sowohl an den Schiffseiten als auch unter dem Boden zurückströmen. Je enger nun der Abstand zwischen Schiff und Kanalboden, d. h. je kleiner und flacher der Kanal wird, um so stärker ist der Widerstand, den das zurückströmende Wasser unterhalb des

Bodens findet zumal dann, wenn sich das Schiff außerdem noch steuerlastig vertrimmt. Das Wasser wird dann versuchen, den Weg des geringsten Widerstandes zu nehmen, also an den Seiten des Schiffes vorbei zu fließen.

Die Ergebnisse der Profile D bis G, also über den Einfluß der Kanalform bei gleichem Wasserquerschnitt, zeigen, daß bei gleicher Wassertiefe und gleichem Schiffstiefgang die Rückstromgeschwindigkeit am Boden, bezogen auf den gerechneten Mittelwert, um so größer ist, je geringer die Wasserbreite ist. Diese Tendenz verstärkt sich mit abnehmendem Schiffstiefgang. Durch Vergrößerung der Kanal-Wassertiefe verschiebt sich dies Verhältnis zugunsten der Bodengeschwindigkeit (vgl. Ergebnis Profil D).

III. Einfluß der Querschnittsform auf die Unterhaltungskosten.

Bei den schrägen Ufern des Muldenprofils D und des Trapezprofils E sind die Bau- und Unterhaltungskosten der Böschungsbefestigung gleich groß, bei den Steilufern der Profile F und G sind die Baukosten unterschiedlich, die Unterhaltungskosten aber verschwindend gering.

Die übliche Böschungsbefestigung besteht aus einer unteren Lage von 10 cm Splitt und einer 20 cm dicken Decklage aus Schüttsteinen. Der Preis beträgt etwa 13 DM/m². Wird die Befestigung bis zur Sohle, also bis auf 3 m Wassertiefe, heruntergeführt (vgl. Ic und die Kolkversuche unter II), so sind bei Neigung 1 : 3 im ganzen rd. 13 m Uferbreite zu befestigen.

Die untersuchten Profile haben die Böschung 1 : 2¹/₄. Ihre Befestigung muß stärker sein, sie erhält eine 25 cm dicke Unterbettung aus Grand und eine ebenso starke Deckung aus gepackten Steinen. Bei Kanälen mit starkem Wellenschlag und Sog sind bei dieser Deckung noch Verstärkungen in der Wasserwechselzone notwendig, wie vom zweitgenannten Verfasser [8] dargelegt. Die gepackte Deckung kostet etwa 19 DM/m². Ihre Breite vermindert sich aber auf rd. 10 m. Für 1 m Kanalböschung ist der Preisunterschied daher gering, nämlich 170 zu 190 DM. Es soll mit einem Mittelpreis von 180 DM je m Ufer oder 360 DM je m Kanal gerechnet werden.

Die Unterhaltungskosten betragen jährlich etwa 1 v. H. der Anlagekosten. Sie vermindern sich, wenn ein geschlossener Pflanzengürtel am Ufer vorhanden ist.

Das Steilufer des Rechteckprofils F mit 4,5 m Wassertiefe erfordert den größten Kostenaufwand. Auch wenn die Stahlwand mit 4 : 1 zurückgelehnt und verankert wird, entsteht bei mittleren Bodenwerten ein Preis von 650 DM je m Ufer oder 1300 DM je m Kanal.

Beim Rechteck-Trapezprofil G sind nur 2,1 m Wassertiefe vorhanden. Der Preis der Stahlwand ermäßigt sich auf 280 DM und 560 DM je m Kanal. In beiden Fällen würde die Spundwand 0,5 m über Wasser hinausragen und etwa 3 bzw. 2 m in den Boden einbinden.

Nach den Erfahrungen am Dortmund—Ems-Kanal sind die Unterhaltungskosten der Spundwände sehr gering. Der Anstrich der Wände ist gelegentlich auszubessern. Auch braucht mit Kolkungen an den Wänden nicht gerechnet zu werden. Vielmehr sind Auflandungen an den Wänden beobachtet worden, welche aus dem Angriff der Schiffsschrauben auf die 3,5 m tief liegende Sohle stammen und zum Teil durch niedrige Wasserstände während der letzten Kriegsjahre begünstigt wurden.

Für die Unterhaltung des Querschnitts dürfte es billiger sein, solche Auflandungen dann zu beseitigen, wenn sie stören, als durch Bekiesung der Sohle etwaige Kolkungen verhindern zu wollen. Die Kosten solcher Baggerung brauchen

nicht in v. H. der Anlagekosten für die Spundwand angerechnet zu werden, sondern sie wären nach den Kosten für den Bodenaushub einzusetzen. Mit Ausnahme des Muldenprofils bedürfen aber alle Querschnitte der gelegentlichen Nachbaggerung. Ihr Umfang und ihre Kosten sind kaum im voraus zu schätzen. Wenn sie daher nicht in Rechnung gestellt werden, so geschieht es zu einem geringen Nachteil für das Muldenprofil.

Werden die Baukosten je m Kanal der verschiedenen Profile in Betracht gezogen, so ergibt sich folgende Übersicht, wenn

der Grunderwerb zu 0,5 DM/m² für eine Fläche: Wasserspiegelbreite + 60 m je m Kanal,

der Bodenaushub für ein Gelände von 2 m über Wasserspiegel und beiderseitige Leinpfade mit einem Aushubpreis von 3 DM/m³ berechnet wird:

		D. Mulde	E Trapez	F Rechteck	G Rechteck/Trapez.
Grund- erwerb	m ² DM	102 51	105 52	94 47	98 49
Boden- aushub	m ³ DM	248 744	254 762	232 696	241 723
Uferbefestg.	DM	360	360	1 300	560
Abrundung	DM	5	6	7	8
		1 160	1 180	2 050	1 340

Werden die Unterhaltungskosten für die schrägen Böschungen mit 1 v. H., für die Spundwände mit 0,1 v. H. des Anlagewertes angesetzt und kapitalisiert (d. i. mit 20 multipliziert), so betragen die Baukosten rd.

D 1230 E 1250 F 2075 G 1350 DM/m.

Hieraus ergibt sich, daß die Steilufer des Profils G (Rechteck-Trapez) in wirtschaftlicher Hinsicht nahezu auf der gleichen Stufe stehen mit den üblichen Flachuferrn der Profile D (Mulde) und E (Trapez). Profil G ist den beiden anderen aber dadurch überlegen, daß es eine größere Lebensdauer hat und eine größere Widerstandsfähigkeit gegen Uferangriffe bietet. Denselben Vorteil hat, zwar auch das Rechteckprofil, dieses ist aber in den Anlagekosten erheblich teurer.

Das Profil G hat außerdem die größte nutzbare Breite (B_N) und den größten hydraulischen Radius (F/U). Die Wasserspiegelbreite ist kleiner als bei den Profilen mit Flachuferrn, infolgedessen sind die Brücken, Düker, Durchlässe und andere Bauwerke kürzer und erfordern weniger Bau- und Unterhaltungskosten.

Zu dem gleichen Ergebnis kommt auch Krey [9] auf Grund von Untersuchungen am Teltow-Kanal und Modellversuchen in der Berliner Schiffbauversuchsanstalt.

Schrifttum.

- (1) W. Reinhardt, Die Entwicklung der Querschnitte von Binnenschiffahrtskanälen in Deutschland. Studien zu Bau- und Verkehrsproblemen der Wasserstraßen Nr. 13, herausgegeben vom Bundesverkehrsministerium 1949.
- (2) H. Krey, Fahrt der Schiffe auf beschränktem Wasser. Schiffbau 1913.
- (3) K. Helm, Über den Einfluß von Form und Größe des Wasserquerschnitts usw. Studien zu Bau- und Verkehrsproblemen Nr. 14.
- (4) Hilfer, Alte Gedanken im neuen Kleid, eine zeitgemäße Betrachtung zum Bau von Schiffahrtskanälen. Wasserwirtschaft 1951, Nr. 11, S. 397.

- (5) Schaffran, Modell-Schleppversuche für Lastkähne im Kanalprofil. Schiffbau, 1915.
Vgl. auch Johow-Foerster, Hilfsbuch für den Schiffbau, 5. Aufl. 1928, Bd. I, S. 187 und
Schiffahrtskalender 1939 S. 158.
- (6) Kempf-Helm, Grenzgeschwindigkeit für den Schleppzug im Kanal. Jahrb. Schiffbautechn. Ges., 1938.
- (7) Kempf, Verminderung des Kanalsohlenangriffs durch Güterboote auf dem Fahrbereich des Mittelland-Kanals. Zeitschr. für Binnenschifffahrt 1938, Heft 11/12.
- (8) O. Wöltinger, Über die Querschnittsausbildung und den Uferschutz von Seewasserstraßen in Abhängigkeit vom Schiffahrtsbetrieb. Studien zu Bau- und Verkehrsproblemen Nr. 19.
- (9) H. Krey, Die Querschnittsformen neuer Hauptwasserstraßen. Zentralbl. d. Bauverw. 1923, S. 341.

Abt. I Mitteilung 2

Über Schiffahrtszeichen und Signale auf Binnenwasserstraßen.

Von Dipl.-Ing. G. Wiedemann,
Regierungsbaudirektor im Bundesverkehrsministerium Bonn.

Zusammenfassung: Ein System von Schiffahrtszeichen und Signalen für Binnenwasserstraßen wird zur Zeit in Deutschland erörtert. Die Gesichtspunkte, nach denen es aufgestellt ist, sind:

1. Einheitliches System der Schiffahrtszeichen und Signale,
2. klare und eindeutige Erkennbarkeit.

Hierfür wurden die Aufgaben der Zeichen und Signale unterteilt in:

1. Fahrwasserbezeichnung,
2. Hinweise für die Schifffahrt auf besondere für die Schiffsführung wichtige Punkte oder Strecken im Fahrwasser,
3. Signale und Wahrschaudienst an Betriebsanlagen und Strecken,
4. Kennzeichnung der Fahrzeuge.

Für die technische Ausbildung kommt von den bekannten funktechnischen Hilfen nur Radar in Frage. Diese Entwicklung ist aber noch nicht abgeschlossen.

Ein Ausbau für Tag- und Nachtverkehr durch optische Mittel erscheint zur Zeit die geeignete Lösung. Ein Vorschlag hierfür wird kurz beschrieben. Auf Angleichung an Bezeichnung auf Seewasserstraßen wurde Wert gelegt.

Erwünscht ist die Schaffung eines internationalen Systems der Schiffahrtszeichen und Signale an Binnenwasserstraßen.

Der moderne Verkehr verlangt eine sichere, billige und jederzeit mögliche Verkehrsverbindung zwischen zwei beliebigen Orten. Mit wachsender Verkehrsdichte und Beschleunigung der Verkehrsmittel wachsen auch die Gefahren. Es ist daher Aufgabe jeder Verkehrsverwaltung, Sicherungsmaßnahmen vorzusehen, die die Gefahrenmomente auf ein Mindestmaß herabdrücken. Bei der Lösung dieser Aufgabe sind die Schwierigkeiten, die zu überwinden sind, bei den verschiedenen Verkehrsträgern sehr unterschiedlich. So sind z. B. die Verhältnisse des Seeverkehrs anders gelagert als die des Verkehrs auf den Binnenwasserstraßen. Der Verkehr auf den Binnenwasserstraßen muß im Gegensatz zum Seeverkehr mit ganz anderen Baumaßnahmen rechnen. Geringe Breiten und