

## Zweiter Teil: Seeschifffahrt

19

### Über die Querschnittsausbildung und den Uferschutz von Seewasserstraßen in Abhängigkeit vom Schiffahrts- betrieb.

Von Otto Wöltinger, Oberregierungsbaurat in Brunsbüttelkoog.

Von den künstlichen und natürlichen Seewasserstraßen Deutschlands werden im wesentlichen der Nord-Ostsee-Kanal und die Unterelbe herangezogen.

#### I. Der Querschnitt des Nord-Ostsee-Kanals und seine Veränderungen.

Der Nord-Ostsee-Kanal wurde 1895 für eine Wassertiefe von 9 m mit einem Trapezquerschnitt von 22 m Sohlenbreite, 67 m Wasserspiegelbreite und 425 m<sup>2</sup> Querschnittsfläche fertiggestellt.

Die Erweiterung in den Jahren 1909 bis 1914 ist einseitig durchgeführt worden, teils links — teils rechtsseitig, unter Beibehaltung des Trapezquerschnitts. Der Kanal erhielt dabei eine Wassertiefe von 11 m, eine Sohlenbreite von 44 m und einen Querschnitt von 828 m<sup>2</sup>.

Für die verschiedenen Wasserstände ergeben sich im Normalprofil folgende Werte:

Wasserstand über KN*)	Wassertiefe	Querschnitts- fläche	Spiegelbreite
+ 19,8 m KN	11 m	828,2 m <sup>2</sup>	102,5 m
+ 20,1 m KN	11,3 m	859,2 m <sup>2</sup>	103,6 m
+ 20,4 m KN	11,6 m	890,5 m <sup>2</sup>	105,2 m

Es wird nach Möglichkeit ein Wasserstand zwischen +19,8 und +20,0 gehalten. Nur bei starkem Zufluß aus dem 1400 qkm großen Einzugsgebiet und behinderter Entwässerung zur Ostsee oder zur Elbe treten zeitweise höhere Wasserstände ein. Eine nennenswerte Strömung ist im Kanal nicht vorhanden.

Der Kanal darf mit Schiffen bis 9,5 m Tiefgang, 40 m Breite und 315 m Länge befahren werden. Schiffe von mehr als 6,1 m Tiefgang (Weichenschiffe) dürfen nur mit Schiffen bis 3,7 m Tiefgang begegnen oder Schiffe bis 3,1 m Tiefgang überholen. Die Fahrgeschwindigkeit darf 15 km/h nicht übersteigen.

Das Kanalprofil ist in Abb. 1 dargestellt. Es hat unter Wasser auf der einen Seite die Böschung von 1895, auf der anderen Seite die Böschung der Erweiterung.

\*) KN = Kanal Null liegt 20 m unter NN.

Der Querschnitt ist von 2 m unter dem Wasserspiegel von +20,1 m KN bis 1 m darüber befestigt.

Im Profil von 1895 stützt sich die Uferbefestigung auf eine 2 m breite Berme, im Profil von 1914 ist die Befestigung in die Böschung mittels Auskoffering eingelassen.

In der unbefestigten Querschnittsbegrenzung haben sich bis zum Jahre 1936 folgende Veränderungen ergeben:

a) Die 2 m breite Berme von 1895 ist überall nahezu gänzlich verschwunden.

b) Die darunter anschließende Böschung 1 : 2 von 1895 und die Böschung 1 : 2<sup>1</sup>/<sub>4</sub> von 1914 ist an vielen Stellen ausgehöhlt. Der ausgespülte Boden liegt auf der darunter folgenden Böschung 1 : 3 oder ist in die Sohle eingetrieben.

c) Der Knick zwischen Sohle und Böschung ist um 1—3 m aufgelandet.

d) Die Sohle ist durchschnittlich um 0,6 m aufgehöhlt.

Im Jahre 1937, also nach etwas über 20jährigem Kanalbetrieb, wurde die Sollsohle durch Baggerung in voller Breite wiederhergestellt und dabei im Durchschnitt je lfdm Kanal 26 m<sup>3</sup> Boden gebaggert und 33,5 RM aufgewendet.

Das befestigte Ufer hat in seinen unter Wasser liegenden Teilen dagegen keinerlei Veränderungen erfahren.

Auch in den Weichen, welche teils 134 m teils 164 m Sohlenbreite und 157 m bis 175 m Wasserspiegelbreite haben, sind geringfügige Aufhöhungen der Sohle eingetreten.

Weder im Kanalprofil noch in den Weichen sind irgendwelche Auskolkungen auf der Sohle wahrzunehmen.

## II. Einwirkung auf die Querschnittsbegrenzung.

Auf die gesamte Querschnittsbegrenzung wirkt der Rückstrom des Wassers, welches vom fahrenden Schiff verdrängt wird und seitlich sowie unter dem Schiffsboden entgegengesetzt zur Fahrtrichtung des Schiffes sich bewegt (vgl. unter III).

In der Wasserwechselzone greifen außerdem Schiffswellen und Eis an (vgl. unter IV).

Nur örtliche Bedeutung haben direkte Angriffe des Schraubenstromes auf die Unterwasserböschung und Schiffsberührungen, die durch schlecht steuernde Schiffe hervorgerufen werden oder beim Festmachen wegen Nebels oder aus anderen Gründen entstehen, ferner Quellen, welche auf der oberen Grenze undurchlässiger Bodenschichten in den Kanal fließen.

## III. Berechnung und Beobachtungen des Rückstromes.

Der Rückstrom ist seiner Größe nach abhängig von der Schiffsgeschwindigkeit und der Querschnittsverengung des Kanals durch den größten Schiffsquerschnitt. Infolge der Beschleunigung des zurückströmenden Wassers tritt eine Spiegelabsenkung ein, welche mit dem fahrenden Schiff in gleicher Geschwindigkeit fortschreitet.

1. Bedeutet F den Kanalquerschnitt,

$\Delta h$  die mittlere Größe der Spiegelsenkung

$\Delta F$  die Änderung von F infolge der Spiegelsenkung

f den Hauptspantquerschnitt des Schiffes

$V_r$  die Rückstromgeschwindigkeit

$V_s$  die Schiffsgeschwindigkeit

g die Erdbeschleunigung,

so gelten für den Beharrungszustand folgende Beziehungen:\*)

$$I. V_r = V_s \frac{f + \Delta F}{F - (f + \Delta F)}$$

$$II. \Delta h = \frac{(V_s + V_r)^2}{2g} - \frac{V_s^2}{2g} = \frac{1}{g} \left( V_s \cdot V_r + \frac{V_r^2}{2} \right)$$

Die Gleichung I kann dahin erläutert werden, daß bei stillstehendem Schiff, aber Fortbewegung des Kanals und seiner Ufer mit der Geschwindigkeit  $V_s$  die Wassermenge  $F \cdot V_s$  durch den verminderten Querschnitt  $F - (f + \Delta F)$  mit der Geschwindigkeit  $(V_s + V_r)$  strömen muß.

In der Gleichung II ist die Druckhöhe ermittelt, die zur Erzeugung der Wasserbeschleunigung im verminderten Querschnitt notwendig ist.

2. Am Nord-Ostsee-Kanal sind verschiedentlich Messungen der Absenkung vorgenommen worden. Einige Ergebnisse sind in nachstehender Tabelle 1, geordnet nach Schiffsgeschwindigkeit  $V_s$ , zusammengestellt. Der Schiffsquerschnitt ist aus Breite und Tiefgang vermindert um 5 v. H. ermittelt. (Bei vielen Schiffen beträgt der Völligkeitsgrad des Hauptspantes bis zu 0,98.)

Tabelle 1.

Lfd. Nr.	Name des Schiffes	$F_{\text{Kanal}}$ m <sup>2</sup>	$f_{\text{Schiff}}$ m <sup>2</sup>	$F/f$	$t_{\text{Schiff}}$ m	$b_{\text{Schiff}}$ m	$V_s$ km/st.	Schiff m/sec.	Ab- senkung ges. messen	$V_r$ Rück- strom errechnet
1	Amerika Porto	884	142	6,2	8,0	17,78	12,8	3,56	51 cm	1,2 m/sec.
2	Allegro	884	138	6,4	7,4	18,67	13,1	3,65	58 „	1,4 „
3	K. Fisser	884	131	6,7	7,7	17,13	13,6	3,80	62 „	1,4 „
4	Afrika	884	136	6,4	8,3	16,45	14,4	4,00	42 „	0,9 „
5	Oceana	871	126	6,9	7,4	17,06	15,6	4,33	58 „	1,2 „
6	Hödur	860	125	6,8	7,5	16,69	16,4	4,56	50 „	0,9 „
7	Wida	864	133	6,5	7,4	17,98	17,1	4,75	67 „	1,2 „

Die Absenkung ist an einem Lattenpegel gemessen, welcher 6 m Abstand von der Uferlinie hatte. Die Geschwindigkeit des Rückstromes ist alsdann nach Gleichung II berechnet. Die Messungen wurden nur auf einer Kanal-seite ausgeführt, so daß außermittiges Fahren der Schiffe größere oder kleinere Absenkungen ergibt, als aus der Gleichung I in Verbindung mit II errechnet werden müßte.

Die Größe des Rückstromes beträgt 0,9 bis 1,4 m/sec. und überschreitet schon bei diesen Schiffen, welche zahlreich und häufig den Kanal benutzen, zum Teil die zulässige Grenze von etwa 1,0 m/sec. für sandigen Untergrund.

Dagegen sind bei der Durchfahrt eines Schiffes von 36 m Breite und 8,5 m Tiefgang, mit einem Hauptspantquerschnitt von  $f \sim 306$  m<sup>2</sup>, unzulässig hohe Rückstromgeschwindigkeiten von 2,2 bis 2,4 m/sec. aus der Absenkung errechnet und auch beobachtet worden.

Bei dem Schiff wurde außerdem die Schiffseinsenkung gemessen, d. i. das tiefere Eintauchen des Schiffes während der Fahrt. Das Schiff fuhr nur mit halber Kraft. Es wurde von 2 Schleppern gezogen, 2 weitere waren am Heck festgemacht, um das Schiff kanalrecht zu halten.

\*) Vgl. G. Krey, Fahrt der Schiffe auf beschränktem Wasser,  
Verlag Karl Marfels A. G., Berlin

Zur Messung der Schiffseinsenkung wurde am Vor- und Achterschiff je eine Latte mit der Teilung angebracht, deren Höhenlage zum unbeeinflussten Wasserspiegel vor Antritt der Fahrt und während der Vorbeifahrt eingemessen wurde.

Die Beobachtungen sind nachstehend zusammengestellt:

**Tabelle 2.**

Rückstromgeschwindigkeit und Einsenkung eines übergroßen Schiffes.

Beobachtet bei Kanal km	F Kanal m <sup>2</sup>	F/f	V <sub>s</sub> Schiff		Ab- senkung gemessen	V <sub>r</sub> Rück- strom er- rechn.m./sec.	Ein- senkung gemessen
			km/st.	m/sec.			
a) 14,0	958,5	3,13	9,6	2,67	68 cm	1,9	—
b) 14,0	975	3,18	10,8	2,85	100 „	2,4	87 cm
c) 42,7	875	2,86	9,23	2,57	75/73 „	2,0	—
d) 42,7	898	2,93	10,55	2,94	93/84 „	2,2	95 cm

Der Verlauf der Absenkung des Wasserspiegels ist in Abb. 3 für einige besonders große Schiffe dargestellt. Nr. 5 ist die in Tabelle 2 an 4. Stelle angegebene Durchfahrt. Die letztere Auftragung zeigt die Wasserspiegel-senkung auf beiden Seiten des Kanals, während bei den anderen Schiffen nur einseitig gemessen wurde.

Die Auftragungen lassen erkennen, in welcher Weise sich der Wasser-spiegel infolge der Durchfahrt eines Schiffes ändert.

Das Schiff schiebt eine Stauwelle vor sich her, deren Höhe bei den Schiffen der Tab. 1 zu 6—8 cm am Ufer gemessen wurde. Die Wirkung dieser Welle machte sich schon auf mehrere hundert Meter vor dem Schiff bemerkbar. Die mit ihr verbundene Strömung ist aber gering.

Etwa mit der Vorbeifahrt des Bugs an der Meßstelle setzt die Ab-senkungswelle am Ufer ein. Sie wird während ihres Verlaufs von der Bug-welle beeinflusst.

Hinter dem Heck tritt wieder eine Erhöhung des Wasserspiegels über den unbeeinflussten Stand hinaus ein, bei manchen Schiffen erst nach einiger Zeit, je nach Stärke des Schraubenstromes.

In Abb. 3 Nr. 3—5 ist der Einfluß der vorausfahrenden Seeschlepper auf die Stauwelle erkennbar.

3. Für das jetzige Normalprofil des Nord-Ostsee-Kanals sind auf Ver-anlassung der Kanalverwaltung Modellversuche im Maßstab 1:36 durch die Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt durchgeführt worden, welche darüber Aufschluß geben sollten, ob die Betriebsleistung des Kanals verbessert werden könne durch Erhöhung der zugelassenen Höchstgeschwindigkeit oder durch Erweiterung der Grenzen für Begegnen und Überholen. Diese Ver-suche sind beachtlich für die Beantwortung der Frage, ob ein Kanalquerschnitt zwecks Steigerung der Betriebsleistung vergrößert oder statt dessen die ganze Querschnittsbegrenzung befestigt werden sollte.

Die Versuche wurden mit verschiedenen Modellschiffen durchgeführt, deren größtes mit nachstehend genannten Abmessungen (natürl. Größe) dem häufigen großen Kanalschiff (Weichendampfer) entspricht (vgl. auch Tabelle 1). Darunter sind die Abmessungen eines Libertyschiffes angegeben.

**Tabelle 3.**  
Schiffsabmessungen

	Länge m	Breite m	Tiefgang m	Schiffs- verdrän- gung t	BRT
Kanalschiff	143,0	18,4	6,1 b. 9,0	13—19 000	8960
Libertyschiff	126,7	17,35	8,46	14 245	7200

Die Modellschiffe hatten einen Völligkeitsgrad (Schärfegrad der Wasserlinie) von 0,80. Sie wurden als Einschrauber (links- und rechtsdrehend) und als Zweischauber gefahren.

Gemessen wurden die auf das Schiff bei verschiedenen Lagen zur Kanalmitte einwirkenden Seitenkräfte und die Schiffseinsenkungen (Parallele Tiefentauchung von Mitte Schiff) sowie für extreme Fälle die Absenkung des Wasserspiegels am Ufer.

In Abb. 4 sind die Einsenkungen des Schiffes bei verschiedenen Lagen außer Kanalmitte und für verschiedene Tiefgänge und Fahrgeschwindigkeiten dargestellt. Die Schiffseinsenkung nimmt proportional mit dem Tiefgang zu und vergrößert sich mit steigender Geschwindigkeit. Bei Tiefgang von 8 m an und Geschwindigkeit von über 15 km/h entsteht eine merkliche Steuerlastigkeit.

Die Wasserspiegelabsenkung am Ufer betrug bei 15 km/h Schiffsgeschwindigkeit

50 cm	für 6,1 m Tiefgang, Fahrt in Kanalmitte
100 cm	„ 7,5 m „ „ „ „
120 cm	„ 7,5 m „ „ 15,6 m außerhalb Kanalmitte.

Diese Absenkungen sind zwar größer, als nach den Messungen in Tab. 1 zu erwarten sind, sie lassen aber die Wirkung der Schifffahrt außerhalb Kanalmitte klar erkennen.

Bei der Fahrt außerhalb Kanalmitte wird das Schiff zum näheren Kanalufer hin angezogen, weil die Wasserspiegelabsenkung infolge der größeren Rückstromgeschwindigkeit in dem engeren Querschnitt größer ist als auf der anderen Seite des Schiffes. Wie die Versuche zeigten, ist aber die auf das Vorschiff wirkende Seitenkraft infolge des Einflusses der Bugwelle geringer als die auf das Hinterschiff wirkende. Es tritt daher ein Drehmoment ein, welches das Vorschiff vom näheren Ufer abdreht. Bei höherer Geschwindigkeit wird die abdrängende Seitenkraft am Vorschiff größer als die ansaugende am Hinterschiff, es tritt daher ein Wechsel in der Richtung der Gesamtseitenkraft ein, während das absetzende Drehmoment noch verstärkt wird. Eine weitere Steigerung der Geschwindigkeit bewirkt dann das Auslösen eines Stauwirbels am Hinterschiff. Hierdurch wird dieses nun auch von der Böschung abgedrängt, und das Drehmoment vermindert sich.

Bis zu einer Geschwindigkeit von 15 km/h zeigten die Modellversuche für alle Tiefgänge von 6,1 bis 9,0 m keine wesentlichen Steigerungen der Seitenkräfte und Drehmomente (vgl. Abb. 5).

Bei 16,5 km/h für den Tiefgang von 9,0 und bei 17 km/h für den Tiefgang von 8,0 m ändert sich die Richtung der Seitenkräfte. Das Schiff wird mit vielfacher Stärke der bis dahin gemessenen Kräfte von dem näheren Kanalufer abgedrängt.

Diese Seiten- und Drehbewegung des Schiffes wird durch die Art des Antriebes beeinflusst.

Für den rechts- und linksdrehenden Einschrauber und für den Doppelschrauber treten bezüglich der Stärke und Richtung der Seitenkräfte keine wesentlichen Unterschiede auf. Das Schiff mit rechtsdrehender Schraube wird aber am stärksten angesaugt und hat den spätesten Umkehrpunkt der Seitenkraft.

Wesentlich sind jedoch die Unterschiede im Drehmoment. Im Vergleich zu dem Modellschiff ohne Schraube beginnt für den Zweischrauber und den rechtsdrehenden Einschrauber eine merkliche Vergrößerung des den Bug abdrängenden Drehmoments bei einer Schiffsgeschwindigkeit von 13 km/h, bei dem linksdrehenden Einschrauber noch etwas früher. Bei diesem wird ein erheblich höheres Drehmoment erzeugt als bei den beiden anderen.

Bei etwa 17 km/h bildet sich am Hinterschiff ein Stau, der das zurückströmende Wasser nicht abströmen läßt und so das Hinterschiff von dem näheren Ufer abdrückt. Der Drehsinn des Moments kehrt sich sehr plötzlich und hart um und nimmt eine erhebliche Größe an.

Aus den Versuchen ist zu folgern, daß ein Schiff von 7,5 m Tiefgang mit rechtsdrehender Schraube bis 15 km/h noch gerade in einer Lage 12,6 m aus Mitte Kanal nach Steuerbord gefahren werden kann, während das Schiff mit linksdrehender Schraube in dieser Lage nicht zu halten ist.

Insgesamt haben die Versuche ergeben, daß unter gewissen Voraussetzungen die Grenzen für die Schiffsgeschwindigkeit und auch die Grenzen für die Tiefgänge bei Begegnen und Überholen um ein geringes Maß erweitert werden können. Praktische Folgerungen konnten jedoch daraus nicht gezogen werden, weil die Voraussetzungen nicht immer mit genügender Sicherheit erfüllt werden können.

Wesentlich anders verhalten sich die Schiffe bei Begegnungen und Überholen innerhalb des Weichengebietes. Nach dem Ergebnis von Modellversuchen können in einer Weiche von 156 m Wasserspiegelbreite und 88 m Sohlenbreite Weichendampfer mit den in Tab. 3 genannten Abmessungen ohne jede Gefahr begegnen und überholen. Im Vergleich zur Fahrt durch die Weiche treten bei der Vorbeifahrt innerhalb des Normalprofils 5- bis 10mal so große Seitenkräfte und Drehmomente auf, welche durch Ruderlegen in keiner Weise beherrscht werden können.

4. Weitere Modellversuche der Verwaltung bei der gleichen Versuchsanstalt betrafen eine Vergrößerung des Querschnitts und ihren Einfluß auf die Schiffseinsenkung, die Wasserspiegelabsenkung und die Rückstromgeschwindigkeit.

Die 3 untersuchten Profile sind in Abb. 6 mit den Maßen für die 25fache Vergrößerung der Modellabmessungen dargestellt; das jetzige Normalprofil des Kanals ist zum Vergleich eingetragen.

Die wesentlichen Merkmale der verschiedenen Profile und die Verhältnisse zum Kanalschiff (s. Tabelle 3) sind folgende:

Tabelle 4.

Profil	Breite B m	Tiefe T m	B : T	Querschnitt F m <sup>2</sup>	F : U	B : b	T : t	F : f
Normalprofil	103,6	11,3	9,2	859	8,1	5,6	1,26	5,46
Profil I	147	12,4	11,9	1258	8,7	8,0	1,38	8,0
„ II	156	12,6	12,4	1400	9,1	8,4	1,40	8,93
„ III	162	12,8	12,7	1514	9,2	8,8	1,42	9,65

Die Vergrößerung der Querschnittsfläche ist demnach durch Verbreiterung geschehen, ohne allerdings auf die Grenze des Wasserbreiteneinflusses bei  $F : f = 13^*)$  zu kommen.

Demgegenüber ist die Vertiefung nur gering und bleibt weiterhin erheblich unterhalb der Grenze des Wassertiefeneinflusses von praktisch  $T : t = 3^{**})$ . Obwohl der Querschnitt Muldenform hat, kann der Einfluß der Querschnittsform daher nicht nachgewiesen werden.

Die beiden Modellschiffe wurden mit 2 verschiedenen Geschwindigkeiten und 2 verschiedenen Tiefgängen gefahren und dabei die Tiefertauchung der Modelle während der Fahrt in den 3 verschiedenen Querschnitten gemessen!

Die Abmessungen der beiden Schiffe und ihre Fahrgeschwindigkeit, übertragen auf 25fache Vergrößerung, sind nachstehend in Tabelle 5 angegeben:

Tabelle 5.

Schiffsabmessungen und Geschwindigkeiten.

Schiff	Schiffsabmessungen			Geschwindigkeit
	t m	b m	f m <sup>2</sup>	
A	10,47	35	366	3,125 m/s = 11,25 km/h
B	9,21	35	322	2,60 m/s = 9,36 km/h

Die Einsenkung des Schiffes, die Absenkung des Wasserspiegels in verschiedenen Abständen von der Kanalachse und die Rückstromgeschwindigkeiten, ebenfalls für den 25fach vergrößerten Querschnitt, sind, getrennt für die große und kleine Geschwindigkeit, in der folgenden Tabelle 6 zusammengestellt, die Zahlen für die kleine Geschwindigkeit erscheinen in Klammern ( ).

Tabelle 6.

Einsenkung, Absenkung und Rückstromgeschwindigkeit.

$$V_s \text{ groß} = 3,125 \text{ m/sec.} \quad \cdot \quad V_s \text{ klein} = 2,60 \text{ m/sec.}$$

$$11,25 \text{ km/h} \quad \quad \quad 9,36 \text{ km/h}$$

Profil	Tiefgang m	Einsenkung d. Schiffes cm	Absenkung in . . . m Abstand von der Kanalachse in cm				Rückstrom- geschwindigkeit in m/sec.		
			20,75 m cm	38,6 m cm	53,75 m cm	Ufer cm	Kanal- mitte	bei 20,75 m v. d. Achse	
			I	9,21	63 (41)	86 (53)	81 (49)	77 (44)	—
II	9,21	48 (27)	67 (37)	60 (33)	56 (30)	—	2,03 (1,38)	1,19 (0,86)	
	10,47	54 (33)	72 (41)	66 (37)	61 (35)	—	2,15 (1,74)	1,78 (1,09)	
III	9,21	40 (27)	51 (36)	46 (31)	43 (29)	40 (26)	1,12 (0,83)	0,94 (0,65)	
	10,47	47 (28)	62 (38)	53 (33)	49 (30)	47 (28)	1,31 (1,07)	1,06 (0,77)	

Die Einsenkungen des Schiffes sind in Abb. 7 für die verschiedenen Querschnittsverhältnisse  $F : f$  aufgetragen und durch Kurven verbunden.

Bei jeder der beiden Fahrgeschwindigkeiten ist in jedem Querschnittsverhältnis die Einsenkung für den großen Tiefgang etwas geringer als für den kleinen Tiefgang.

\*) Vgl. K. Helm, Einfluß von Kanalstrecken auf die Wirtschaftlichkeit im Seeverkehr, Schiff u. Werft 1943 Heft 9/10.

\*\*\*) Untersuchung der H amb. Schiffbauversuchsanstalt.

Für das vorliegende Schiff würde eine weitere Vergrößerung des Querschnitts über Profil III hinaus keinen Vorteil mehr bringen. Je nach der zuzulassenden Schiffsgeschwindigkeit würde der ausreichende Querschnitt zwischen den Profilen III und II liegen, er würde also mindestens eine Wasserspiegelbreite zu erhalten haben, wie sie unter 3. am Schluß für die untersuchte kleine Weiche angegeben ist.

Die Wasserspiegelabsenkung in der Hauptspantebene ist für die einzelnen Abstände von der Kanalachse verschieden groß. In Abb. 8 sind die Zahlen der Tabelle 6 anschaulich gemacht.

Die Rückstromgeschwindigkeiten wurden im Modellquerschnitt durch Staurohre auf der Sohle gemessen.

5. Um die 4 Profile der Tabelle 4 hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit vergleichen zu können, sind in der Abb. 9 a—d für die Schiffsquerschnitte von 200, 322 und 366 m<sup>2</sup> die Werte  $f + \Delta F$  in v. H. von  $F$  für die Wasserspiegelabsenkungen von je 0,2 m in das Kurvenblatt von Krey (s. a. a. O) eingetragen. Außerdem ist noch im Normalprofil der Querschnitt 166 m<sup>2</sup> des Kanalschiffes angegeben.

Für das Schiff von 366 m<sup>2</sup> Querschnitt ist z. B. im Profil III mit  $B = 162$  m,  $F = 1515$  m<sup>2</sup> und Böschung 1 : 3

$$\text{bei } h = 0,2 \text{ m : } f + \Delta F = 366 + 162 \cdot 0,2 - 3 \cdot 0,2^2 = 398,3 \text{ m}^2 \text{ und} \\ (f + \Delta F) : F = 0,263$$

$$\text{bei } h = 0,4 \text{ m ist entsprechend } (f + \Delta F) : F = 0,285 \text{ usw.}$$

$$\text{bei } h = 0 \text{ ist } F = 0 \text{ und } f : F = 0,242.$$

Die einzelnen Punkte liegen auf einer nahezu geraden Linie, weil im Verhältnis zur großen Wasserspiegelbreite die Verminderung von  $B \cdot h$  durch den Wert  $3 \Delta h^2$  bzw.  $2,25 \Delta h^2$  wenig Bedeutung hat. Es können nun für jeden Schiffsquerschnitt für Schiffsgeschwindigkeiten bis 20 km/h die mittleren Absenkungen des Wasserspiegels abgelesen werden.

Jedes der beiden Versuchsschiffe der Tab. 5 ist auf diesen Linien in den Profilen I—III durch Punkt 1—4 je nach der Schiffsgeschwindigkeit kenntlich gemacht. Es bedeutet

Punkt 1: großer Tiefgang und große Geschwindigkeit

Punkt 2: großer Tiefgang und kleine Geschwindigkeit

Punkt 3 und 4 entsprechend für den kleinen Tiefgang

Nach Abb. 9 d) soll das Schiff von 10,47 m Tiefgang, also 366 m<sup>2</sup> Querschnitt, im Profil III bei 11,25 km/h Geschwindigkeit (Punkt 1) rechnermäßig eine mittlere Wasserspiegelabsenkung von 48 cm haben. Nach Tab. 6 ist das Schiff um 47 cm weggesackt; die Wasserspiegelabsenkungen betragen an den verschiedenen Stellen des Querschnitts 62 cm, 53 cm und 49 cm, am Ufer ebenfalls 47 cm. Für die Punkte 2—4 im Profil III ergibt sich, daß die rechnermäßige mittlere Absenkung annähernd der Einsenkung des Schiffes und der Wasserspiegelabsenkung am Ufer entspricht. Die Zahlen sind:

2. berechnet 29, gemessene Einsenkung 28, Absenkung am Ufer 28

3. „ 38, „ „ 40, „ „ „ 40

4. „ 23, „ „ 27, „ „ „ 26

Auch für die Profile I und II ergibt sich eine ähnliche Übereinstimmung mit der Einsenkung des Schiffes.

Um auch die mittlere Rückstromgeschwindigkeit aus dem Kurvenblatt Abb. 9 a—d ablesen zu können, muß der Wert  $f + \Delta F$  auf den Rückstromquerschnitt  $F - (f + \Delta F)$  bezogen werden.

Nach Gleichung I ist  $V_r = V_s \frac{f + \Delta F}{F - (f + \Delta F)}$

$$V_r \cdot F - V_r \cdot (f + \Delta F) = V_s (f + \Delta F)$$

$$V_r (1 - \frac{f + \Delta F}{F}) = V_s \frac{f + \Delta F}{F}$$

Hiernach sind in den Kurvenblättern gestrichelte Linien gezogen, welche es ermöglichen, für jedes Schiff für jede berechnete Absenkung die mittlere Rückstromgeschwindigkeit in v. H. der Schiffsgeschwindigkeit abzulesen.

(Das Diagramm im Jochow-Förster, Hilfsbuch für den Schiffbau, Verlag Jul. Springer, 1920 S. 330, ist auf den Rückstromquerschnitt bezogen und gestattet, bis zur Schiffsgeschwindigkeit von 3,40 m/sec. die  $V_r : V_s$  unmittelbar abzulesen.)

Für die Punkte 1—4 im Profil III ergibt sich folgende Rückstromgeschwindigkeit in m/s.

Punkt	Ablesung aus Abb. 9 d	nach Tabelle 6	i. Mittel n. Tab. 6
1	41,3% v. 3,125 = 1,29	1,31; 1,06	1,18
2	37,3% v. 2,60 = 0,97	1,07; 0,77	0,92
3	34 % v. 3,125 = 1,06	1,12; 0,94	1,03
4	31,4% v. 2,60 = 0,82	0,83; 0,65	0,74

Im Profil II betragen die Rückstromgeschwindigkeiten

Punkt	Ablesung aus Abb. 9 c	nach Tabelle 6	i. Mittel
1	48,0% v. 3,125 = 1,50	2,15; 1,78	1,96
2	42,7% v. 2,60 = 1,11	1,74; 1,09	1,44
3	39,0% v. 3,125 = 1,22	2,03; 1,19	1,61
4	35,3% v. 2,60 = 0,92	1,38; 0,86	1,12

Desgl. im Profil I

Punkt	Ablesung aus Abb. 9 b	nach Tabelle 6	i. Mittel
3	47 % v. 3,125 = 1,46	2,15; 1,47	1,81
4	41,8% v. 2,60 = 1,08	1,62; 1,02	1,32

Für das Querschnittsverhältnis  $F : f \sim 5$  liegen demnach die gerechneten mittleren Rückstromgeschwindigkeiten um ein geringes unter den gemessenen, während die gemessenen maximalen  $V_r$  nur wenig höher liegen.

Bei den kleineren Querschnittsverhältnissen liegen dagegen sowohl die gemessenen als auch die maximalen Rückstromgeschwindigkeiten erheblich höher als die gerechneten.

In Abb. 9 a, Normalprofil des Nord-Ostsee-Kanals, sind die Beobachtungen der Tabelle 2 für das übergroße Schiff auf der — — Linie für ein mittleres  $F = 920 \text{ m}^2$  und dazugehörige Wasserspiegellbreite  $B = 107 \text{ m}$  eingetragen.

Der Vergleich zwischen Rechnung und Messung ergibt:

Beobachtung	berechnete mittl. Absenkung des Wasserspiegels	beobachtete Einsenkung des Schiffes	gemessene Absenkung 6 m vom Ufer
a	0,65 m	—	0,68 m
b	1,03	0,87 m	1,00
c	0,68	—	0,75
d	0,93	0,95	0,93/0,84

Hier entsprechen die gerechneten mittleren Absenkungen des Wasserspiegels annähernd den beobachteten, während die Einsenkung des Schiffes etwas darunter und darüber liegen.

In allen 4 Profilen ist ferner ein Schiff mit  $f = 200 \text{ m}^2$  dargestellt, wie es einem modernen Tanker mit einer Breite von 20—22 m und einem Tiefgang von 9,0—9,5 m entspricht. Dazu ist in Abb. 9 a strichpunktiert ein Kanalquerschnitt eingetragen, der durch Vertiefung des Normalprofils um 3 m hergestellt werden könnte, vgl. Abb. 10.

Dieser Querschnitt hätte folgende Merkmale (vgl. Tab. 4), ebenfalls auf das Kanalschiff der Tabelle 3 bezogen.

Tabelle 7.

Merkmale des vertieften Normalprofils N. O. Kanal

	Breite B m	Tiefe T m	B : T	Querschnitt F m <sup>2</sup>	F : U	B : b	T : t	F : f
Normalprofil N. O. Kanal vertieft	103,6	14,3	7,25	859 + 87 = 946	8,8	5,6	1,59	5,7

Das Schiff von  $200 \text{ m}^2$  Hauptspantfläche würde in den 5 Profilen bei den Geschwindigkeiten von 14, 15 und 16 km/h folgende Absenkungen  $\Delta h$  u. Rückstromgeschwindigkeiten  $V_r$  rechnermäßig aufweisen:

Geschwindigkeit	$V_s = 14 \text{ km/h}$ (3,88 m/s)		$V_s = 15 \text{ km/h}$ (4,16 m/s)		$V_s = 16 \text{ km/h}$ (4,44 m/s)	
	$\Delta h$ m	$V_r$ %/m/s	$\Delta h$ cm	$V_r$ %/m/s	$\Delta h$ cm	$V_r$ %/m/s
NO normal	1,13	57,8 = 3,10	—	—	—	—
NO vertieft	0,74	41,3 = 1,61	100	46,9 = 1,95	—	—
I	0,47	27,4 = 1,06	59	29,8 = 1,24	77	33 = 1,47
II	0,39	22,7 = 0,88	47	23,8 = 0,99	59	26,4 = 1,17
III	0,34	20,0 = 0,78	41	21,0 = 0,87	51	22,8 = 1,03

Das Normalprofil könnte von diesem Schiff mit 14 km/h nicht mehr befahren werden. Noch bei 11 km/h würde ein Rückstrom von 40 v. H. der Schiffsgeschwindigkeit = 1,22 m/s entstehen.

Im vertieften Kanalprofil würde bei 14 km/h die zulässige Rückstromgeschwindigkeit von 1,0 m/s um 61 v. H. überschritten werden. Bei  $V_s = 15 \text{ km/h}$  würde  $V_r$  1,95 m/s betragen, während im Profil II bei dieser Fahrgeschwindigkeit der mittlere Rückstrom nur rund 1,0 m/s ausmachen würde.

Im Profil III würde noch bei 16 m/h die Rückstromgeschwindigkeit in den zulässigen Grenzen bleiben.

Ein wirtschaftlicher Vergleich zwischen einem festen Schutz der Querschnittsbegrenzung und einer Vergrößerung des Querschnitts würde in wasser-technischer Hinsicht zwischen dem Profil NO-Kanal vertieft und dem Profil II zu ziehen sein.

In maschinentechnischer Hinsicht wäre zu prüfen, ob eine solche Änderung einen nicht vertretbaren Mehraufwand an Energie während der Kanalfahrt zur Folge hätte. Nach Jochow-Förster, 4. Auflage, S. 333 ist der

$$\text{Reibungswiderstand } W_r = \gamma \cdot F (V_s + V_r)^{1,825} \lambda_s$$

$$\text{der Gefällewiderstand } W_g = \gamma \cdot 1000 (Q_f + Q_s) \cdot J;$$

darin bedeuten:  $\gamma$  das spezifische Gewicht des Kanalwassers

F die benetzte Oberfläche des Schiffes in  $m^2$

$\lambda_s$  den Reibungswiderstand des Schiffes je  $m^2$  bei  $V_s = 1$  m/s

$Q_f$  das Produkt aus Schiffsquerschnitt und Schiffslänge

$Q_s$  das Produkt aus Absenkungsquerschnitt und Schiffslänge

J das Oberflächengefälle infolge der Wasserspiegelabsenkung je lfdm Schiff.

Der Reibungswiderstand vermehrt sich im Faktor  $(V_s + V_r)$  von  $(4,16 + 0,99)^{1,825}$  auf  $(4,16 + 1,95)^{1,825}$ , also im Verhältnis 19,9 zu 27,2 oder um rund 37 v. H.

Der Gefällewiderstand vermehrt sich entsprechend der Änderung des Absenkungsquerschnitts und des Gefälles J aus  $V_r = c \sqrt{R J}$ .

Im Profil II ist  $Q_s = 156 \cdot 0,47$  und

$$J = \frac{0,99^3}{c^2 (F : U)} = \frac{0,99^2}{c^2 \cdot 9,1}$$

Im vertieften N.-O.-Kanal ist  $Q_s = 103,6 \cdot 1,00$  und

$$J = \frac{1,95^2}{c^2 (F : U)} = \frac{1,95^2}{c^2 \cdot 8,8}$$

Setzt man für den Überschlag den Koeffizienten  $c$  in beiden Profilen als gleichbleibend an, so ändert sich  $(Q_f + Q_s)$  unter Weglassung der Schiffslänge L von  $(200 + 156 \cdot 0,47) - \frac{0,99^2}{9,1}$  auf  $(200 + 103,6 \cdot 1,0) - \frac{1,95^2}{8,8}$  oder von 19,8 auf 130, also um das 4,6fache.

Für eine Schiffslänge von 150 m errechnen sich der Schiffswiderstand und die aufzuwendenden Leistungen in PS zu:

$$W_r = 12\,150 \text{ kg (Profil II)} - 16\,600 \text{ kg (Profil N.-O.-Kanal)}$$

$$\text{Leistung} \quad 835 \text{ PS} - 1350 \text{ PS für } (V_s + V_r) = \begin{cases} 5,15 \text{ m/s} \\ 6,11 \text{ m/s} \end{cases}$$

$$W_g = 1\,220 \text{ kg} - 5\,400 \text{ kg}$$

$$\text{Leistung} \quad 16,1 \text{ PS} \quad 140 \text{ PS}$$

$$\text{Zus. Leistung} \quad 851 \text{ PS u. 1490 PS}$$

Das fragliche Schiff würde etwa 5000 PS Maschinenleistung haben, davon würden im Profil II 17 v. H., im Profil N.-O.-Kanal vertieft rund 30 v. H. in Anspruch genommen werden. Eine solche Vermehrung ist noch nicht zu beanstanden.

Die Änderung des Formwiderstandes ist unerheblich, weil dieser bei Seeschiffen erst Unterschiede ergibt für höhere Fahrgeschwindigkeiten, als auf Seekanälen zulässig sind.

In betrieblicher Hinsicht darf jedoch nicht übersehen werden, daß im Profil II ein zweischiffiger Betrieb möglich sein wird, so daß Dampfer von der Größe des „Kanalschiffes“ einander begegnen können, wie die Versuche mit

dem Schiffahrtsbetrieb in der Weiche von 156 m Wasserspiegelbreite gezeigt haben (vgl. unter III 3). Dagegen bleibt der Betrieb im vertieften Normalprofil weiterhin einschiffig, aber mit Zulässigkeit größerer Fahrgeschwindigkeit.

Der wirtschaftliche Vergleich ist im letzten Abschnitt durchgeführt.

#### IV. Sog und Druck aus Rückstrom und Schiffswellen.

Obwohl der Rückstrom keine Welle ist sondern eine Strömung, erscheint er am Ufer in der Gestalt einer Welle, der Absenkungswelle, welche mit der Schiffsgeschwindigkeit fortschreitet. Die Wirkung der Absenkungswelle ist der Sog. Er stellt die stärkste der angreifenden Kräfte dar. Infolge des Sogs (negativer Druck) fließt das Wasser aus der Böschung und ihrer Befestigung heraus und reißt dabei die feinen Teile der Befestigung und des Untergrundes mit, wenn sie nicht durch umgekehrt filterförmigen Aufbau der Deckung oder durch andere geeignete Bauart zurückgehalten werden. Die Absenkungswelle und der Rückstrom rütteln an den Steinen und reißen lose Steine heraus. Die Absenkungswelle wird bei Abnahme der Wassertiefe am Ufer auf rauher Böschung zum Brecher.

Die Zone des Sogs reicht im wesentlichen von 50 cm über bis 70 cm unter dem Wasserspiegel, weiter nach unten hin in der Stärke abnehmend.

Quellen verstärken die Wirkung des Sogs.

Die Bug- und Heckwellen der Dampfer wirken als Druck und Sog. Der Einfluß der Windwellen ist gering. Besonders kräftige Wellen liefern kleine Schiffe mit starker Maschinenkraft, wie Schnellboote, Schleppdampfer u. ä., deren Schraube nahe der Wasseroberfläche liegt.

Der Angriff des Wellenstoßes ist am stärksten in der Linie des Wasserspiegels. Die Wirkung erstreckt sich nach oben um so höher, in der Stärke aber abnehmend, je glatter die Böschung ist (auflaufende Wellen). Unterhalb der Wasserspiegellinie nimmt die Wirkung des Wellenschlages schnell ab. Die Zone des Wellenschlages kann ungefähr von  $-50$  cm bis  $+50$  cm der Wasserspiegellinie angesetzt werden.

Je flacher und rauher die Böschung, desto stärker ist die Neigung der Welle, zu branden. Je flacher und glatter die Böschung, desto höher läuft die Welle auf und gefährdet den oberen Teil der Böschung durch Hinteraspülung. Je steiler und glatter die Böschung, desto geringer der Wellenangriff.

Von der Oberflächenbeschaffenheit hängt die Schluckfähigkeit der Deckung ab, also die Fähigkeit der Deckung, die Welle durch Aufsaugen zu vernichten. Basaltplaster und Steinpackung haben eine große Schluckfähigkeit, Granitplaster je nach Ausführungsart eine weniger große bis sehr geringe, Klinkerplaster oder Bitumendecken haben überhaupt keine Schluckfähigkeit.

Eis wirkt am stärksten in der Wasserspiegellinie. Die Einwirkung kann von zweierlei Art sein: Die Eisschollen werden durch den Rückstrom am Ufer entlang geschoben und wirken höbelnd; oder aber die Eisschollen sind am Ufer festgefroren, die Scholle wird dann infolge der Wasserspiegeländerung durch die Absenkungs-, Bug- und Heckwellen aus dem Ufer herausgeboren. Die Zone der Eiswirkung reicht etwa von  $-30$  cm bis  $+30$  cm der Wasserspiegellinie.

Die verschiedenen Arten der Angriffe und die Zonen ihrer Wirksamkeit sind in Abb. 11 versuchsweise dargestellt. Da der Wasserspiegel um etwa  $\pm 20$  cm um die mittlere Lage schwankt, sind die Zonen von den Grenzen der Schwankungsbreite ab aufgetragen. Wenngleich es nicht möglich ist, die angreifenden Kräfte nach Stärke und Häufigkeit ihrer Einwirkung maß-

stäblich darzustellen, so gibt die Übersicht doch einen ungefähren Anhalt. Dem Verständnis für die Anforderung an das Deckwerk ist es förderlich, wie in der Übersicht geschehen, 3 Zonen zu unterscheiden:

Die Überwasserzone, die Wasserwechselzone und die Unterwasserzone.

### V. Uferbefestigungen.

1. Die Ufer des Nord-Ostsee-Kanals sind vorwiegend durch Steinpackungen (25 cm dick) auf Unterbettung von Grand (15–25 cm dick) befestigt. Das Deckwerk ist in Abb. 12 dargestellt. Es hat eine Böschungsneigung von  $1:2\frac{1}{4}$  und ist in den Untergrund eingelassen. Die Packsteine haben eine Kantenlänge von 10 bis 25 cm und bestehen hauptsächlich aus Granit. Der Grand hat eine Korngröße von 6 bis 8 mm.

Etwa 20 v. H. der Uferbefestigung bestehen aus Pflaster und zwar Basalt-, Granit- und Klinkerpflaster auf einer Unterbettung aus Grand. Die Unterwasserzone der Pflasterstrecken ist vielfach aus Beton hergestellt. Das Pflaster hat eine Böschungsneigung von  $1:1,5$  und stützt sich auf eine etwa 2 m breite Berme.

Beide Arten von Uferbefestigung sind in trockener Baugrube hergestellt worden und konnten daher sorgfältig ausgeführt werden. Nur an wenigen Strecken war eine Schüttung unter Wasser herzustellen.

Mit den genannten Uferbefestigungen sind in den 30 bzw. 50 Jahren ihres Bestehens folgende Erfahrungen gemacht worden.

a) In der Unterwasserzone hat sich die Befestigung durchweg gut gehalten.

Die zweckmäßigste Tiefe der Befestigung ist theoretisch nicht bestimmbar. Die gewählte Tiefe von 2 m unter dem mittleren Wasserstand hat sich als richtig erwiesen.

b) In der Wasserwechselzone ist die Haltbarkeit der Steinpackungen sehr verschieden. Während sich gut gepackte Decken 10 Jahre und länger ohne jede Nachbesserung gehalten haben, sind Decken mit schlechtgepackten oder zu kleinen Steinen schon nach wenigen Jahren beschädigt oder zerstört worden. Die Böschungsneigung von  $1:2\frac{1}{4}$  ist zu steil, die Packung hat im Durchschnitt mehr die Eigenschaften einer Schüttung als die eines Pflasters, für Schüttung ist aber eine Neigung von  $1:3$  notwendig.

Die Zerstörung beginnt mit einer Versackung der Steine in Höhe des mittleren Wasserspiegels. Die darüber liegenden Böschungsteile werden alsdann steiler, verlieren ihren Halt und stürzen nach. Die herabgerollten Steine verstärken zwar die Unterwasserböschung, sind aber für die Unterhaltung zum großen Teil verloren. Sie liegen bis zu 5 m Wassertiefe.

Die Pflasterstrecken erfahren in der Wasserwechselzone zwar auch Veränderungen im Gefüge der Steine, diese bleiben aber im Verband und bieten weiterhin vollen Schutz.

Trotz der besseren Haltbarkeit der Pflasterung wird doch vielfach der Steinpackung der Vorzug gegeben. Dafür sprechen folgende Umstände: Die Belastung des Untergrundes ist geringer, daher ist die Deckung auch für weniger tragfähigen Untergrund brauchbar; die Anforderungen an das Steinmaterial sind weniger hoch, daher kann der große Bedarf eines Neubaus leichter aus frachtgünstig gelegenen Brüchen gedeckt werden; schließlich können mehr ungelernete und angelernte Leute verwendet werden. Stein-schüttungen werden vielfach bevorzugt, weil sie leichter zu unterhalten seien, es sei nur Nachschütten erforderlich. Leider unterbleibt dieses dann allzuhäufig, weil die Geldmittel für andere Unterhaltungsarbeiten benötigt werden.

Nach den Beschaffungs- und Einbaukosten allein betrachtet, ist jedoch das Pflaster nur um einen geringen Betrag teurer, weil je lfdm Uferdeckwerk nur 5,4 m<sup>2</sup> anstatt 9,5 m<sup>2</sup> abzudecken sind.

2. Der Böschungsfuß muß um so stärker gesichert werden, je steiler die Uferbefestigung ist. Es hat den Druck der Befestigung aufzunehmen und diese gegen Abrutschen oder Lockerung des Verbandes zu schützen. Gebräuchlich sind folgende Arten der Fußsicherung:

a) Auskofferung, d. i. so tiefe Einlassung der Befestigung in den Untergrund, daß Oberkante der Befestigung mit der anschließenden unbefestigten Böschung bündig liegt. Eine gute Ausführung der Auskofferung ist nur in trockener Baugrube möglich. Die Haltbarkeit dieses Fußes hängt ab von der Härte des Untergrundes und der Tiefe unter Wasserspiegel. Am Nord-Ostsee-Kanal hat sich diese Art der Sicherung des Böschungsfußes bewährt.

b) Pfahlwand aus kiefernen Pfählen von 10—15 cm  $\phi$  und 1,5 bis 2 m Länge gibt den stärksten Fuß einer Befestigung und ist notwendig bei Pflaster.

Am Nord-Ostsee-Kanal wird die Pfahlwand vielfach nachträglich in Höhe des unteren Wasserspiegels in die vorhandene Uferdeckung aus Steinpackung eingebaut, um darüber ein Pflaster aus Basalt oder Granitsteinen herzustellen. Das Pflaster lehnt sich entweder unmittelbar gegen die Pfähle oder gegen einen hinter der Pfahlwand aufgestellten, etwa 50 cm hohen Böschungskantstein aus Beton.

An der Este und Lühe, Nebenflüssen der Unterelbe, sind sogar Pfähle von 4 bis 6 m Länge mit und ohne Verankerung als Böschungsfuß verwendet worden, weil der weiche Untergrund kürzere Pfahllängen nicht zuließ. Folgerichtig hätte dann aber Pflaster hergestellt werden sollen, weil die steile Böschung 1:2 mit Steinschüttung trotz des vorzüglichen Fußes nicht zu halten ist.

c) Buschmatten aus Laub- oder Tannenbusch, welche in zusammengereißtem Zustand 30 cm oder mehr dick sind. Der Busch wird in eine obere und untere Lage kreuzweise in etwa 1 m Abstand liegender Faschinenwürste verpackt, welche an den Kreuzungspunkten durch senkrecht von unten nach oben gezogenen Draht verschnürt werden. Die Matten werden an Land auf Ablaufbahnen hergestellt, zu Wasser gebracht und an Ort und Stelle durch Steinwurf versenkt.

Am Nord-Ostsee-Kanal wird die Buschmatte vielfach zur Instandsetzung schwerer Schäden mit Erfolg verwendet. Die Buschmatte paßt sich den Unebenheiten der Böschung gut an, benötigt nur etwa 200 kg Steine je m<sup>2</sup> und gibt einen unverschieblichen Fuß für die über Wasser hinausgehende Schüttung.

An der Seeschiffahrtstraße Stettin-Swinemünde wurde die ganze 1:3 geneigte Unterwasserböschung von MW ab (fast bis 7 m Wassertiefe) mit Sinkstücken von 0,90 m Dicke abgedeckt. Die Sinkstücke hatten eine Länge von 20 m und eine Breite von 22 m. Sie waren notwendig, um den feinen anstehenden Sand gegen den starken Stromangriff zu schützen.

3. Versuche mit anderen Uferdeckungen hatten folgendes Ergebnis:

a) Basaltschotter in 50 cm dicker Lage mit Neigung 1:4. Die Deckung hat eine große Rauigkeit und verhältnismäßig gute Schluckfähigkeit. Sie ist leicht einzubauen und erfordert sehr wenig Unterhaltung.

b) Bitumendecke, ausgeführt als 8 cm dicke Tränkdecke auf einer Unterlage aus 10 cm gestampftem Grobschotter, Neigung 1:2. Auf die Unterlage wird heißes Bitumen oder Kaltasphalt (Emulsion) gespritzt, dann

Schotter 40/60 mm aufgebracht und festgestampft, schließlich Splitt 5/10 mm und endlich Splitt 3/8 mm gleichmäßig verteilt, mit Bitumen überspritzt und festgestampft.

Die Decke hat eine feste glatte Oberfläche und keinerlei Schluckfähigkeit, die Wellen laufen demnach hoch auf. Sie ist leicht an Gewicht und nachgiebig.

Die Bitumendecke kann aber nur oberhalb der Wasserwechselzone verwendet werden, weil sie bei ständiger Wasserbenetzung frostempfindlich ist.

c) Biologischer Uferschutz. Angestrebt wird ein dichter Pflanzengürtel von mindestens 1 m Breite aus Gräsern, welche im Brakwasser gedeihen.

Am N.-O.-Kanal sind zahlreiche Strecken der Steinpackungen mit Reth (*phragmites communis*) bestanden, ohne daß es zu einem geschlossenen Bestand der gewünschten Breite gekommen ist. Größtenteils hat sich das Reth ohne Zutun entwickelt, an einzelnen Stellen haben eingelegte Wurzelstücke oder Rethsoden im Schutz einer Buschabdeckung Fuß gefaßt. Das Reth wächst in den Zwischenräumen der Steindeckung und bietet dem Ufer einen zusätzlichen Schutz.

Am Gieselaukanal, welcher den N.-O.-Kanal mit der Eider verbindet, wurden während der Erbauung (1936) Soden mit Reth und Rohr (*Typha*) auf die 1:4 geneigte Böschung aufgebracht. Sowohl der moorige Untergrund als auch die weniger brakige Beschaffenheit des Wassers begünstigten die Entstehung eines genügend breiten Pflanzengürtels, der einen selbständigen Uferschutz bildet.

Auch beim Elbe-Lübeck-Kanal wurde während der Bauzeit (1900) eine Rethanpflanzung vorgenommen und zwar im Schutze eines Flechtzaunes aus Busch auf einer 1:5 geneigten Böschung. Es ist hier ein geschlossener Rethgürtel von etwa 60 cm Breite entstanden, der dem Ufer guten Schutz bietet, obwohl die Wassertiefe vor ihm bis zu 50 cm beträgt.

4. An der Unterelbe, deren Breite i. M. 2 km beträgt, werden Längswerke aus Pflasterdecken ausgeführt, wenn das Ufer hauptsächlich unter Wellenangriff (Windwellen) zu leiden hat, dagegen Buhnen, wenn das Ufer hauptsächlich den Angriffen der Strömung ausgesetzt ist. Die Buhnen werden rechtwinklig zum Ufer mit mindestens 100 m Länge und einem gegenseitigen Abstand der eineinhalbfachen Länge angelegt. Sie eignen sich gleichzeitig dazu, durch Gewinnung von Vorland dem Ufer Schutz zu geben. Ferner sind auf zusammen rund 15 km Uferlänge Anschüttungen aus Baggersand ausgeführt worden\*), dessen Böschung sich in der Wasserwechselzone auf 1:5 einstellte. Zur Befestigung der Anschüttungen werden in der Hauptsache Weiden gepflanzt. Anfänglich wurde auch Spartinagrass (*Scirpus maritimus* und *Sc. tabernaemontani*) zur Befestigung des Sandes verwendet, später ist davon jedoch abgesehen worden wegen seines stark wuchernden und alle übrigen Gräser unterdrückenden Wachstums.

## VI. Wirtschaftlicher Vergleich.

zwischen einem festen Schutz der Querschnittsbegrenzung (Uferböschungen und Sohle) und einer Vergrößerung des Querschnitts.

Der Vergleich wird durchgeführt nach den Preisen von 1939.

1. Das Normalprofil des N.-O.-Kanals wird um 3 m vertieft, die Unterwasserböschungen werden von der Unterkante der vorhandenen Uferdeckwerke ab durch Sinkstücke von 0,3 m Dicke, gemessen im zusammengedrückten

\*) Vgl. Meisel, Uferabbruch u. Uferschutz an der Unterelbe. Bautechnik 1935 Heft 29 S. 398.

Zustand des Buschwerks, abgedeckt. Die Matten werden am Ufer auf Abrollbahnen hergestellt, im schwimmenden Zustand zur Einbaustelle gebracht und durch Bewurf von 200 kg Schüttsteinen je m<sup>2</sup> abgesenkt.

Der Einheitspreis für die Buschmatte errechnet sich zu:

0,6 m <sup>3</sup> Laubfaschinen, je m <sup>3</sup> 4,—	2,40 RM
0,08 m <sup>3</sup> „ für Faschinen-Würste	0,32 RM
0,15 kg Draht	0,06 RM
Arbeitslohn für Herstellung der Matte	3,00 RM
Transport und Versenken der Matte	2,00 RM
200 kg Steine beschaffen und einbringen	2,50 RM
zur Abrundung	0,22 RM
	<hr/>
für 1 m <sup>2</sup> Matte	10,50 RM

Die Länge der Unterwasserböschungen beträgt  $2 \times 27 = 54$  m.

Die neue Sohle würde 45,2 anstatt bisher 44 m Umfang haben. Ihre Abdeckung kann aber nicht empfohlen werden. Es würde sich dadurch der Ankergrund in unerwünschter Weise verschlechtern, auch wären Nachbaggerungen aus Anlaß von Bodeneintreibungen (z. B. auch bei Rutschungen) erschwert.

Die Umbaukosten betragen je lfdm Kanal:

a) Vertiefung der Sohle, Baggerung von 87 m <sup>3</sup> + 20 v. H. = 105 m <sup>3</sup> Boden (Sand bis Geschiebemergel), gleichzeitig Wiederherstellung der planmäßigen Unterwasserböschung, mittels Naßbaggers, Transport des Baggergutes zum Spüler und Aufspülung auf Land		
	für 1 m <sup>3</sup> 1,80 RM	189,— RM
b) Abdeckung von 54 lfdm Unterwasserböschung mit Buschmatten und Beschüttung mit Steinen		
	für 1 m <sup>2</sup> 10,50 RM	567,— RM
c) Für Bauleitung, Unvorhergesehenes und zur Abrundung		
10 v. H. von a + b		74,— RM
		<hr/>
Zusammen für 1 lfdm		830,— RM

Wird auch die Sohle befestigt, so erhöht sich vorstehender Betrag um  $45,2 \text{ m} \cdot 10,50 \text{ RM} + \text{rd. } 10 \text{ v. H.} = 520 \text{ RM}$  auf 1350 RM.

## 2. Vergrößerung des Normalquerschnitts auf Profil II.

Die Vergrößerung geschieht einseitig, der 1 : 3 geneigte Teil der Unterwasserböschung alt und neu fallen auf der einen Seite zusammen.

Unter Wasser beträgt der Flächenunterschied der beiden Profile  $1400 \text{ m}^2 - 859 \text{ m}^2 = 541 \text{ m}^2$ .

Die Wasserspiegelbreite vergrößert sich um  $156 \text{ m} - 103,5 \text{ m} = 52,4 \text{ m}$ .

Über Wasserspiegel wird eine mittlere Geländehöhe von 10 m angenommen, so daß über Wasser 524 m<sup>3</sup> Boden zu beseitigen sind.

Anlegestellen, Fährlandebrücken, Straßen, Wege, Gräben und mehrere Brücken müssen verlegt und erneuert werden. Die Kosten hierfür sind überschläglich ermittelt und auf 1 lfdm Kanal bezogen.

Die Vergrößerung des Querschnitts kostet je lfdm Kanal:

a) Grunderwerb für rund 53 m <sup>2</sup> , je m <sup>2</sup> 0,7 RM =	37,— RM
b) Abräumen des Uferdeckwerks, je lfdm	30,— „
c) 541 m <sup>3</sup> + 10 v. H. = 595 m <sup>3</sup> Boden durch Naßbaggern zu fördern und auf Land zu spülen je m <sup>3</sup> 1,80 RM	1071,— „
d) 524 m <sup>3</sup> Boden über Wasser mittels Trockenbaggers zu entfernen und mit Lorenbetrieb auf Kippen zu fördern je m <sup>3</sup> 2,50 RM	1310,— „
e) 1 lfdm Uferbefestigung und Begrünung der Überwasserböschungen unter Ergänzung der fehlenden Baustoffe herzustellen	70,— „
f) Für Verlegung von Anlegestellen, Fährlandebrücken, Straßen, Wegen, Gräben für 1 lfdm Kanal	120,— „
g) Desgleichen für 2 Hochbrücken und 1 Straßendrehbrücke	120,— „
h) Für Bauleitung, Unvorhergesehenes und zur Abrundung rund 9 v. H. von a—g	242,— „
Zusammen für 1 lfdm	<u>3000,— RM</u>

### VII. Zusammenfassung.

1. Die unbefestigte Unterwasserböschung des N.-O.-Kanals ist in 22- bzw. 40jährigem Betrieb in ihren 1:2 und 1:2<sup>1/4</sup> geneigtem Teil überall und stellenweise stark ausgehöhlt, der Knick zwischen Unterwasserböschung und Sohle ist bis zu 3 m, die Sohle um durchschnittlich 0,6 m aufgehöhht.

2. Der Rückstrom, die Ursache dieser Veränderungen, wird aus Beobachtungen, Modellversuchen und durch Berechnung nach mittleren und maximalen Werten bestimmt. Das Verhalten eines Schiffes bei außermittiger Fahrt wird durch Modellversuche festgestellt, dabei der Einfluß der Antriebsart ermittelt.

3. Querschnitte verschiedener Größen werden an Hand von Ergebnissen aus Modellversuchen rechnerisch verglichen, gleichzeitig ein Vergleich mit einem der Muldenform sich nähernden, aus dem Normalprofil des N.-O.-Kanals entwickelten Querschnitt gezogen. Für einen wirtschaftlichen Vergleich dieses, aber mit einem festen Schutz der Unterwasserböschung zu versehenen Profils und einem unbefestigt zu lassenden vergrößerten Querschnitt werden die wassertechnischen, maschinentechnischen und betrieblichen Umstände erörtert.

4. Die Wirkung des Rückstromes, der Schiffswellen und anderen angreifenden Kräfte auf die Querschnittsbegrenzung, insbesondere die Uferzone, werden nach den Erfahrungen am N.-O.-Kanal beschrieben.

5. Die Arten der Uferbefestigung, die mit ihnen gemachten Erfahrungen und die Ergebnisse von Versuchen mit anderen Bauweisen werden dargestellt. Es empfiehlt sich, Steinschüttungen mit Böschungsneigung von 1:3 auszuführen, ihren Fuß gut zu sichern, oder schweres Pflaster mit Neigung 1:1,5 mit einem Fuß aus einer Pfahlwand zu wählen.

6. Der wirtschaftliche Vergleich zwischen einer Befestigung der Querschnittsbegrenzung und einer Vergrößerung des Querschnitts fällt zwar rechnerisch zu Gunsten der ersteren aus, die Einwände aus Gründen eines anzustrebenden zweiseifigen Verkehrs oder wenigstens einer Lockerung der Einschränkungen bezüglich Begegnen und Überholen sprechen aber für eine Vergrößerung des Querschnitts, wobei aber eine weitere Vergrößerung des Tiefenverhältnisses T:t anzustreben wäre, als im Vergleichsprofil angegeben ist.

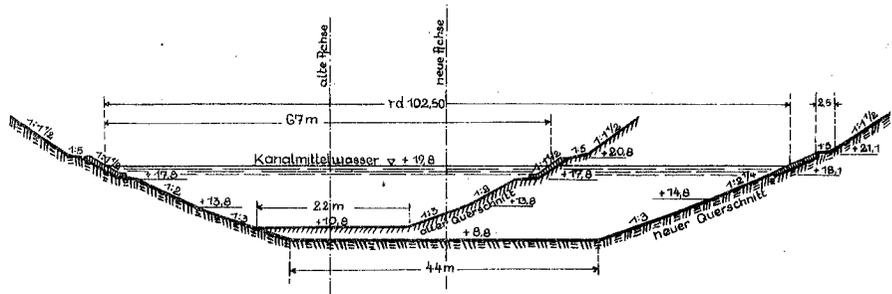


Abb.1 N.O.-Kanal, alter und neuer Kanalquerschnitt.

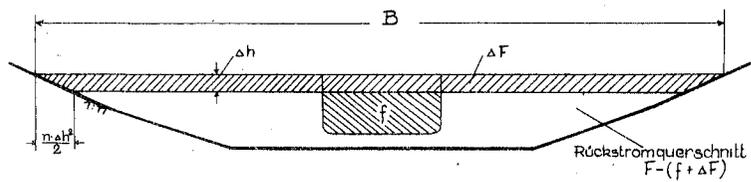


Abb. 2 Absenkung des Wasserspiegels im Kanal.

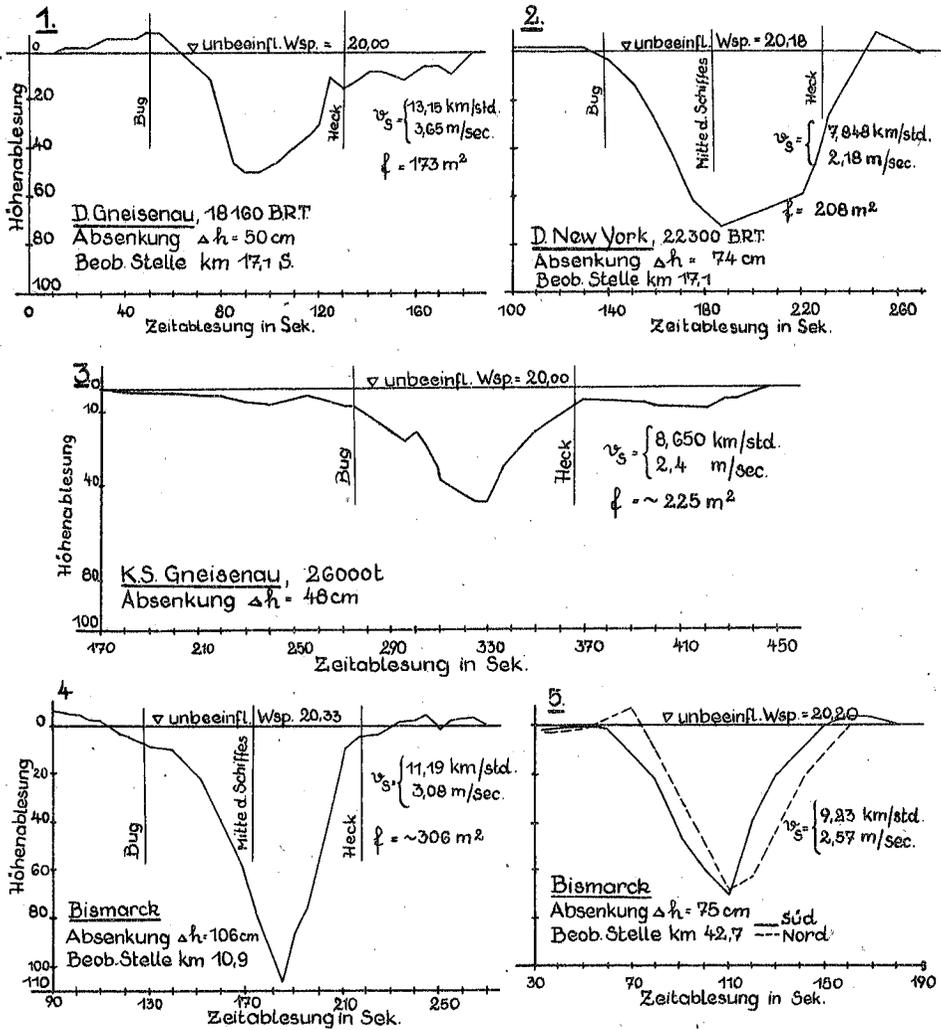


Abb. 3 Absenkung des Wasserspiegels bei der Kanalfahrt großer Schiffe.

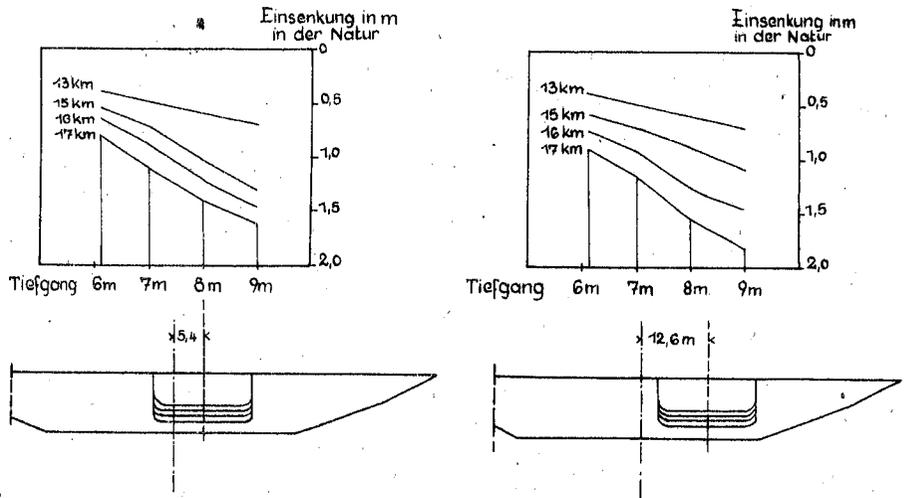


Abb. 4 Modellversuche über die Einsenkung eines Schiffes im N.O.-Kanal bei außermittiger Fahrt

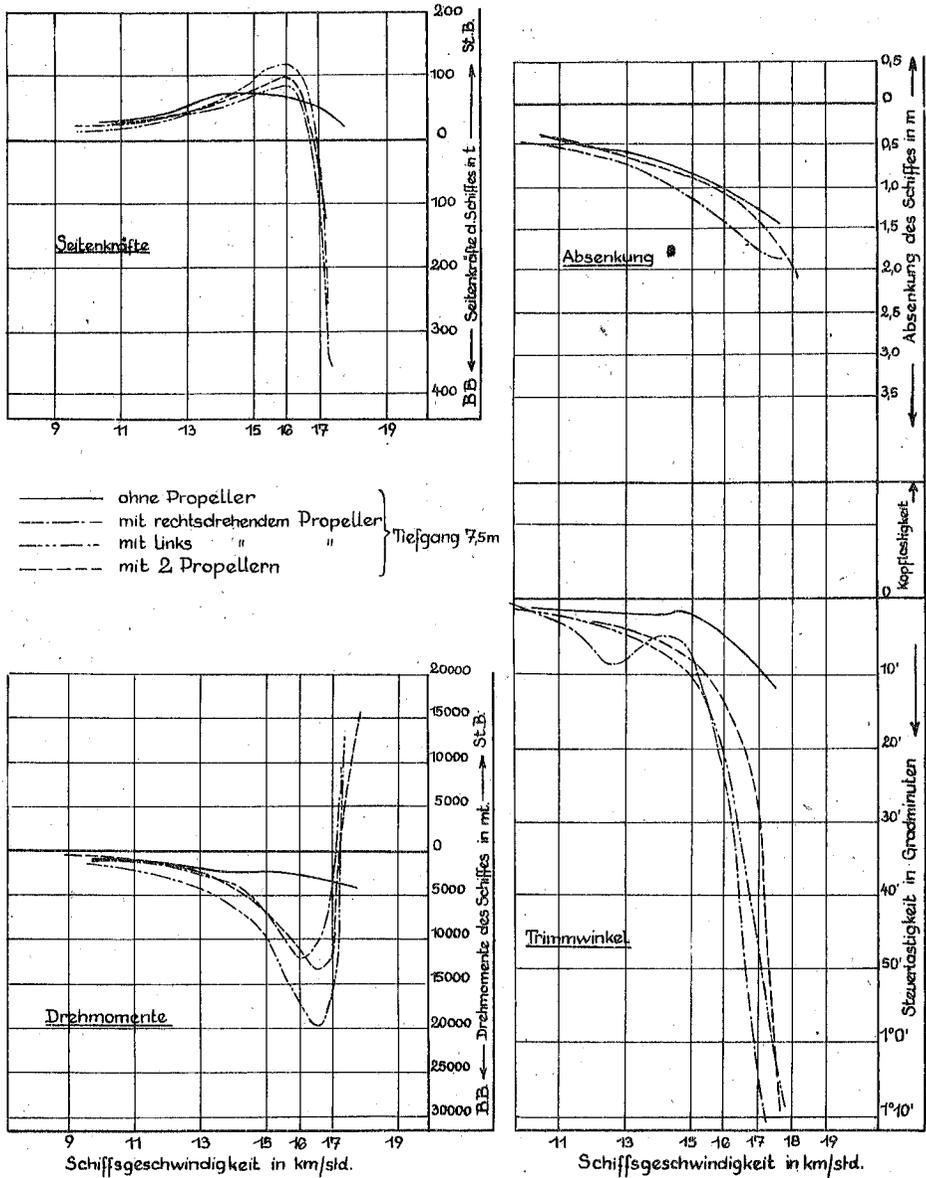


Abb. 5. Modellversuch mit Kanalschiff im Normalprofil d. NO-Kanals  
 bei Schiffslage 12,6 m. außer Kanalmitte

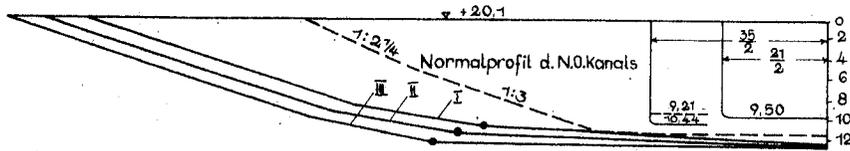


Abb. 6 Vergleich von 3 Modell-Kanalprofilen mit dem Normalprofil des N.O.-Kanals

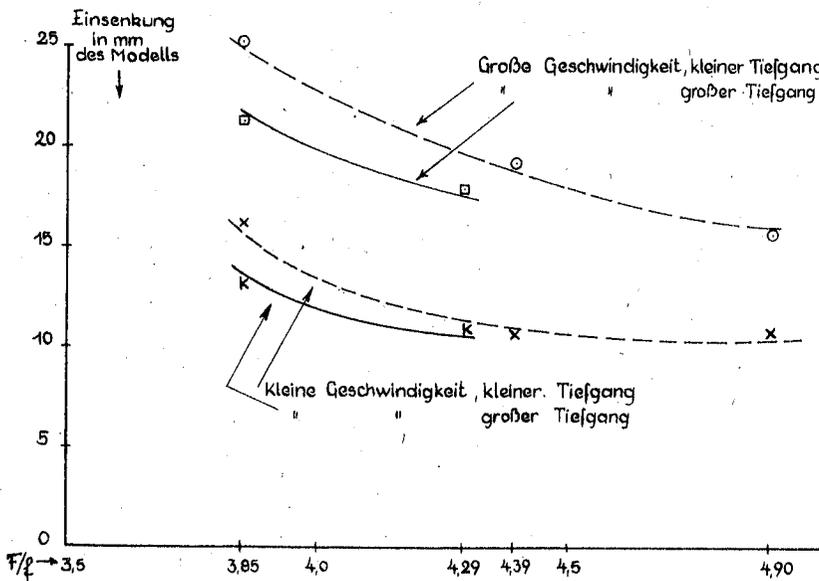


Abb. 7 Modellversuche über parallele Einsenkung eines Schiffes in Abhängigkeit vom Querschnittsverhältnis  $F:\phi$

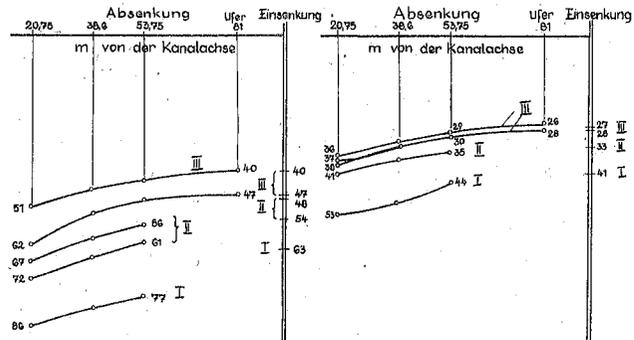


Abb. 8 Modellversuche über Wasserspiegelabsenkung und Schiffseinsenkung in verschiedenen großen Profilen

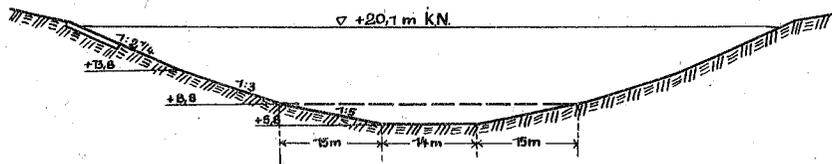


Abb. 10. Vertieftes Normalprofil N.O. Kanal

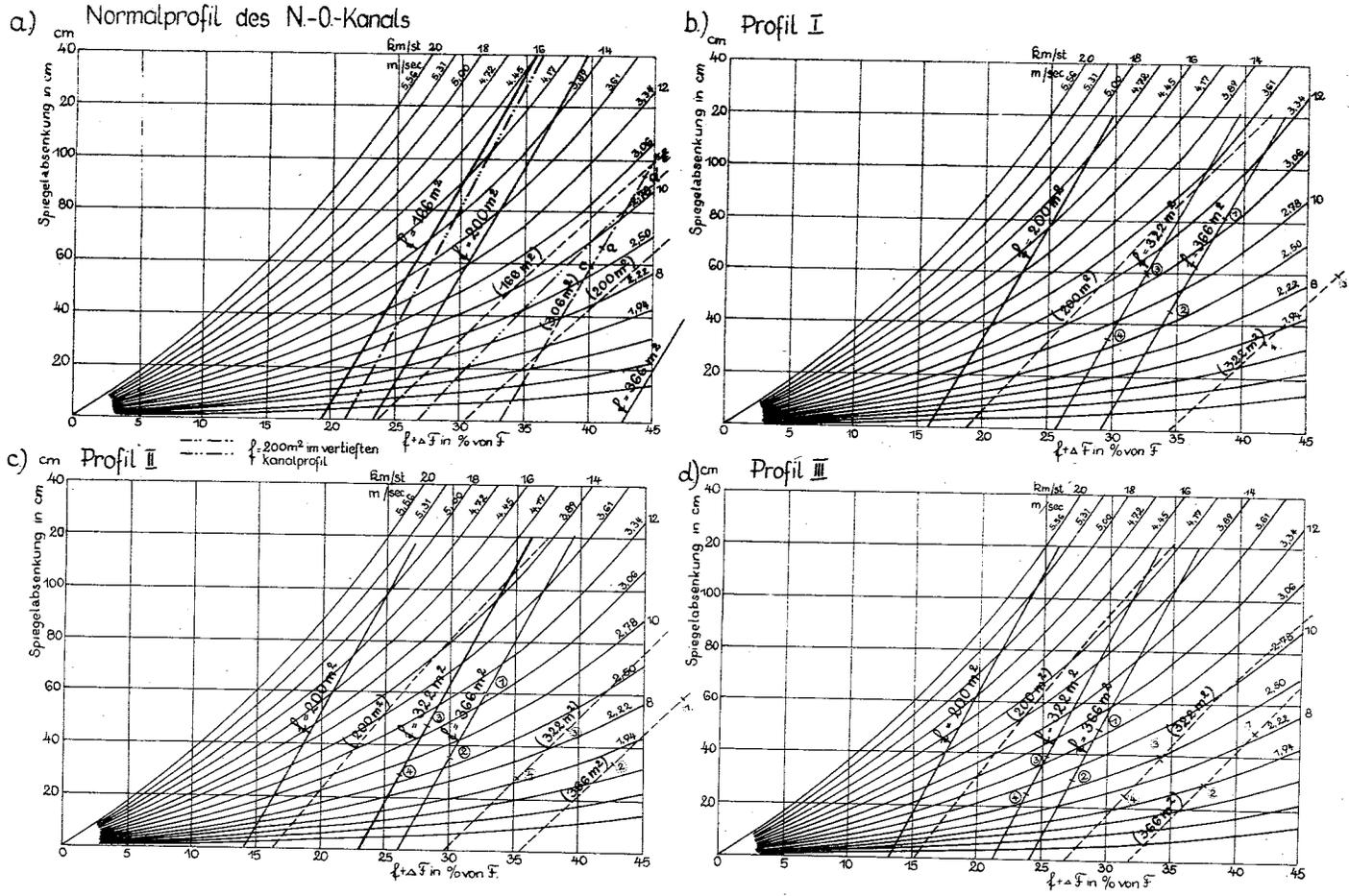


Abb. 9 Wasserspiegelabsenkung in cm u. Rückstromgeschwindigkeit in % der Schiffsgeschwindigkeit

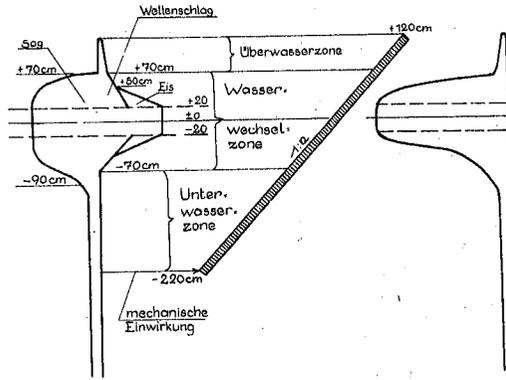


Abb. 11 Darstellung der angreifenden Kräfte

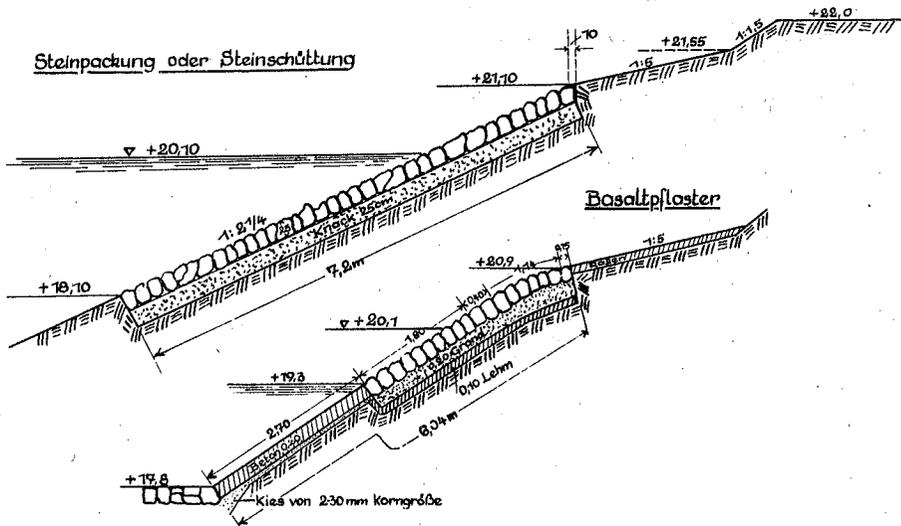


Abb. 12 Uferbefestigungen am N.O. Kanal