

# Experimentelle Ermittlung der Zunahme des Zähigkeitsbedingten Widerstands auf flachem Wasser durch Nachstromanalyse

Delft

Dipl.-Ing. G. Luthra

166. Mitteilung der Versuchsanstalt für Binnenschiffbau e.V., Duisburg  
Institut an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen\*)

## 1. Einleitung

Die Ermittlung des Schiffswiderstands und dessen Abhängigkeit von Form und anderen Parametern aus Modellmessungen setzen notwendigerweise eine Unterteilung des Gesamtwiderstands voraus, weil bei jeder Übertragungsmethode zumindest die zwei Hauptursachen des Widerstands — Zähigkeit des Wassers und Wellenbildung — ausreichend zu berücksichtigen sind. Eine genaue Betrachtung des Problems zeigt jedoch, daß sich die beiden Widerstandsanteile, da sie sich auch gegenseitig beeinflussen, nicht einfach trennen lassen. Zur Umrechnung der Modellergebnisse auf die Großausführung geht man bisher von einer Unterteilung des Widerstands aus, die vorwiegend auf halbempirischen Verfahren beruht. Die Abschätzung des Zähigkeitsbedingten Anteils wird allgemein mit Hilfe der in Anlehnung an eine Plattenreibungsfomel entwickelte ITTC-Korrelationslinie, die den Beiwert des Reibungswiderstands unabhängig von der Fahrwassertiefe über der Reynolds-Zahl fixiert, vollzogen.

Bei Flachwasserversuchen kann dieses Verfahren keine exakte Lösung liefern, weil die sich infolge der Änderung der Umströmungsverhältnisse am Schiff ergebende Erhöhung des Zähigkeitswiderstandes mit flacher werdendem Wasser hierbei unberücksichtigt bleibt. Die Übertragungsdiskrepanzen fallen um so größer aus je kleiner das Modell und je flacher das Wasser ist. Besonders bemerkbar macht sich diese Erscheinung dann, wenn der Zähigkeitsanteil am Gesamtwiderstand groß ist.

Darüber hinaus haben die in [1 und 2] ausgewerteten Versuche erkennen lassen, daß gerade in dem in der Binnenschiffahrt häufig vorkommenden Wasserhöhenverhältnis-Bereich die Zunahme des Zähigkeitsbedingten Widerstands unregelmäßig verläuft und außerdem unerwartet hoch ausfällt. Die Ergebnisse stützen sich auf Geosim-Messungen an einer Schlepper- und einer Flußfahrgastschiffsform. In beiden Fällen kommt die Änderung der Umströmung in Abhängigkeit von der Wassertiefe und damit die Beeinflussung der Grenzschicht bzw. der Ablösung am Heck vermutlich stärker zum Tragen. Inwiefern eine ähnliche Unregelmäßigkeit auch bei konventionellen Formen festzustellen ist, bedarf weiterer Bestätigung. Wegen der Bedeutung einer zuverlässigen Übertragbarkeit von Modellmessungen wird in der vorliegenden Arbeit der Zweck verfolgt, den Zunahmeverlauf an einem Schiffsmodell der Göteborg-Serie, dessen Eigenschaften auf tiefem Wasser weitgehend bekannt sind, zu prüfen. Zugleich ist zur experi-

mentellen Ermittlung des Zähigkeitswiderstands das aus Tiefwasserversuchen bekannte Impulsmeßverfahren benutzt worden, um so praktisch eindeutige Unterlagen zur späteren analytischen Untersuchung zu erhalten.

Die Untersuchung umfaßt Druck- und Geschwindigkeitsmessungen in einer netzartig geteilten Kontrollebene im viskosen Nachstrom des Modells auf 4 Wassertiefen bei je 4 Geschwindigkeiten. Anschließend sind diese jeweils durch Integration über die ganze Kontrollfläche ausgewertet worden, um den Nachlaufwiderstand zu bestimmen. Zusätzlich ist ein weiteres Verfahren, das auf Geosimversuchen beruht, herangezogen worden und die Ergebnisse unter den Einzelaspekten der Nachstrom- und Geosim-Analyse erörtert worden.

## 2. Versuchsübersicht

Tank	9,8 m breiter und 190 m langer Versuchstank der VBD				
Versuche	a) Geosim-Versuche M 612, M 770 und M 728 Widerstandsmessungen b) Nachlaufmessungen M 612				
Tankquerschnittsverhältnis $A_{\text{Tank}}/A_{\text{Tank-AM}}$					
Wasserhöhenverhältnis	h/T	h/h-T	M 612	M 770	M 728
	3,53	1,395	1,0197	1,0140	1,0098
	3,00	1,50	1,0233	1,0165	1,0115
	2,50	1,665	1,0280	1,0199	1,0139
	2,00	2,00	1,0354	1,0250	1,0174
Modelle	M 612	Maßstab	$\lambda = 25$	Abb. 1	
	M 770	Maßstab	$\lambda = 35$		
	M 728	Maßstab	$\lambda = 50$		
	(s. Datentabelle)				
Anhänge	Profilruder, Ruderhacke				
Turbulenz-erzeuger	10—15 mm breite Sandstreifen bei Spt. 17 und 19 (20-Spt.-Teilung)				

a) Widerstandsmessungen elektrisch mittels Ringdynamometer mit mechanischem Dämpfungsglied.  
Trimm und Absenkung mechanisch.

b) Messung des statischen und Gesamtdrucks der Strömung in einer transversalen Kontrollebene 0,5  $L_{pp}$  hinter AP bei  $Fn = 0,16; 0,175; 0,19$  und 0,205 mittels Nachstromharke über Drucklosen und Meßverstärker.

\*) Die Mittel zur Durchführung dieser Untersuchung stellte dankenswerterweise das Ministerium für Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen zur Verfügung.

20 bis 25 Mio. t Güter werden jetzt jährlich umgeschlagen, 4000 bis 5000 Schiffe laufen Montreal an, davon ca. 60 % seegehende Einheiten.

Über fünf Getreideelevatoren verfügt der Hafen; für verderbliche Güter sind ca. 3 Mio. cu ft. Kühlageräume vorhanden. Montreals Hafen dient auch als Drehscheide für Kreuzfahrtschiffe, für kanadische ebenso wie für amerikanische Passagiere.

Montreal ist Mittelpunkt eines hochindustrialisierten Landes mit mehr als 5000 Unternehmen, die jährlich Güter im Wert von etwa 7 Mrd. \$ zu Versand bringen. Hier ist auch die größte Zentrierung Kanadas von Olanlagen einschließlich sechs Raffinerien.

Montreal wird als Verkehrsknotenpunkt für Schienen-, Straßen-, Luft- und Wasserstraßentransport bezeichnet; 26 Luftlinien fliegen regelmäßig die beiden zur Stadt gehörigen Flughäfen an. Außerdem ist die Stadt Kreuzungspunkt vieler Highways, die mit allen Teilen Nordamerikas verbinden, sowie Zentrale der beiden größten kanadischen Eisenbahngesellschaften.

1000 Meilen vom Atlantischen Ozean entfernt ist Montreal als Zufahrt zu den großen produzierenden und verbrauchenden Arealen Zentral- und Westkanada einer der wichtigsten Inlandhäfen der Welt, von dem aus 60 Mio. Menschen direkt versorgt werden.

Die große Flotte der Feeder-Schiffe, die Montreal mit den Häfen der Großen Seen verbindet, schließt Massengutschiffe bis 26 000 tdw ein, ebensolche für Flüssiglading und Stückgutfrachter mit 10 000 tdw und mehr. 52 Schuppen mit einer Fläche von 3,5 Mio. sq.ft., Fahrgastterminals, eine Vielzahl von Kranen bis zu einem Schwimmkran mit 275 ts Hebefähigkeit, ein Reparaturdock und Schleppfazilitäten gehören weiter zur Ausstattung für diesen Hafen, der etwa 10 000 Menschen beschäftigt und jährlich mit über 250 Mio. \$ zum Einkommen der Stadt beiträgt.

Die Verwaltung des Hafens obliegt unter dem National Harbours Port einem Chairman und einem Port Manager.

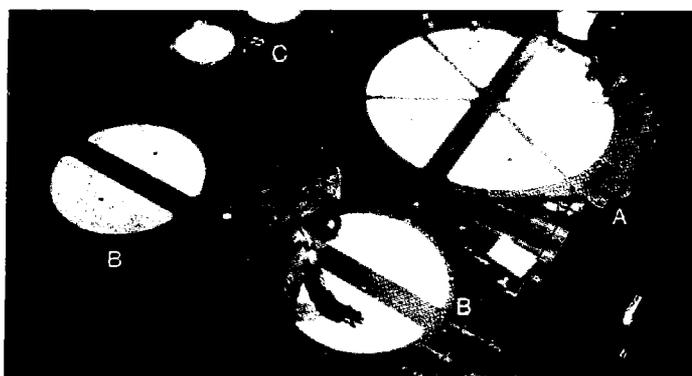
## Querverschub der neuen Rheinbrücke in Düsseldorf mit GHH-Gleitlagern

Ein Vorhaben, das Fachkenner als einmalige technische Leistung bezeichnen, wurde Anfang April 1976 abgeschlossen. Dabei handelte es sich um den Querverschub der 590 m langen, 95 m breiten und 12 700 t schweren neuen Oberkasseler Brücke in Düsseldorf 47,5 m stromabwärts. Bei diesem Vorgang glitt die Brücke mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/sec. von ihren provisorischen auf die endgültigen Pfeiler und Widerlager auf Verschiebgleitlagern der GHH Sterkrade, die u. a. auch für die Planung mit verantwortlich zeichnete.

wurden. Auf dem größten Lager steht der 100 m hohe Pylon.

Die interessante technologische Entwicklung des Gleitlagers nach dem klassischen Rollenlager schuf die Voraussetzungen, den Verschiebungsvorgang dieser Größenordnung durchzuführen. Die Hauptgleitbahn besteht aus 18 mm dicken, zweimal 1 m breiten und 10 m langen Einzelblechen, die zu einer nahtlosen Gleitbahn von 64,5 m Länge und 18 t Gesamtgewicht zusammengeschweißt wurden. Insgesamt glitt die Brücke auf

Brücke, das durch Teflonschichten, die sich in den Gleitlagern befinden, ermöglicht wurde. Der gesamte Verschiebungsvorgang ist von den Ingenieuren und Technikern viele Male durchgespielt und in Großversuchen erprobt worden, bevor die Brückenverschiebung überhaupt begann. Das Einmalige liegt nicht im gelösten Prinzip, sondern in der Dimension des Bauwerks. In jüngster Vergangenheit gab es schon mehrere Längs- und Querverschiebe von Brücken, an deren Planung und Durchführung die GHH Sterkrade ebenfalls beteiligt war, wie



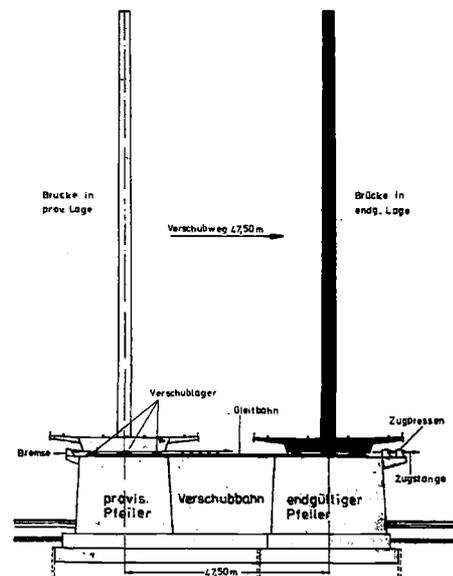
### Einpassen der PTFE-Segmente

- A Verschiebelement für 10 000 Mp, Pylonfußlager, Achse 6
- B Verschiebelemente für 2500 Mp, Pylonaußenlager, Achse 6
- C Verschiebelemente für 400 Mp, Achse 8

Der Abschlußvorgang dauerte allein mehr als 13 Stunden. Die Abteilung Brückenlager der GHH Sterkrade lieferte für den Neubau der Brücke nicht nur die neuen Verschiebgleitlager und die Hauptgleitbahn im Pylonbereich, sondern auch 8 Neotopf- und Neotopfgleitlager für Auflasten von 300 bis 11 000 t, auf denen die Brücke seit Jahren steht und sich bewegt, und die von der provisorischen zur endgültigen Trasse mitgenommen

wier Verschiebbahnen. Die weiteren drei befanden sich auf der Oberkasseler und der Düsseldorfer Uferseite; sie wurden von 0,7 mm dicken Edelstahl-Gleitblechen überspannt, deren Oberflächenrauigkeit kleiner als 3/1000 mm ist.

Wesentlich für den reibungslosen und störungsfreien Ablauf — außer normalen Witterungs- und Windverhältnissen — war das gleichmäßige Gleiten der



1961 — 1963 in Düsseldorf, 1965 in Neustadt/Rems, 1967 in Basel und 1972 bis 1974 erneut in Düsseldorf. Alle diese Brücken stehen und bewegen sich auf GHH-Auflagern.

## 2.1 Modelldaten

Modell Maßstab			Großaus- führung	M 612 25	M 770 35	M 728 50
Länge zwischen den Loten	$L_{pp}$	[m]	120,0	4,800	3,429	2,400
Breite auf Spant	$B_{a.Spt.}$	[m]	17,0	0,680	0,486	0,340
Tiefgang	T	[m]	7,083	0,283	0,202	0,142
Länge in der WL	$L_{WL}$	[m]	123,0	4,920	3,514	2,460
Verdrängung a. Spt.	$V_{a.Spt.}$	[m <sup>3</sup> ]	9698,42	0,621	0,226	0,078
Benetzte Oberfläche	S	[m <sup>2</sup> ]	2795,43	4,473	2,282	1,118
Völligkeitsgrad	$\delta_{pp}$	—	0,672			
Verdrängungsschwerpunkt	LCB	% v. L. vor Spt. 0	49,3			
Verhältniswerte	$B/T; L/V^{1/3}$	—	2,40; 5,627			
Verhältniswerte	$L/B; B$	—	7,06; 0,984			
Tankbreite/Modelllänge	$b/L_{WL}$	—	—	1,992	2,789	3,984
Ruder			—	R 301	R 400	R 381
Fläche	$A_R$	[m <sup>2</sup> ]	14,069	0,0225	0,0115	0,0056
Seitenverhältnis	$c/h$	—	0,557			
Streckung	$h^2/A_R$	—	1,80			
Dickenverhältnis	$t/c$	—	0,179			

## 3. Versuchsdurchführung

### 3.1 Geosim-Messungen

Ausgehend von dem in der VBD im Maßstab 1:25 vorhandenen Modell 612 der Völligkeit  $\sigma = 0,675$  [6 und 7] wurden zwei weitere, geometrisch ähnliche Modelle mit  $\lambda = 35$  bzw. 50 hergestellt. Die Widerstandsversuche wurden mit den drei Modellen bei Konstruktionstiefgang jeweils auf vier korrespondierenden Wassertiefen durchgeführt. Gemessen wurden Widerstand, Trimm und die parallele Absenkung der drei Modelle in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit. Die letztgenannten Werte dienen zur Ermittlung der Zunahme des Reibungswiderstands infolge beschränkter Wassertiefe nach dem Verfahren von F. Horn [8]. Die Versuchsdaten sind unter 2. aufgelistet und dort zu entnehmen.

### 3.2 Nachstrommessungen

Sämtliche Nachstrommessungen wurden an dem größten der drei Modelle — M 612 — vorgenommen. Mit der Modelllänge  $L = 4,92$  m ergeben sich für den untersuchten Geschwindigkeitsbereich von  $Fn = 0,16$  bis  $0,205$  Reynolds-Zahlen, die zwischen  $Rn = 4,75$  und  $6,5 \times 10^6$  und damit über dem als kritisch anzusehenden Wert liegen.

Bei den Nachstrommessungen ging es im wesentlichen um die Messung des statischen und des Gesamtdrucks der Strömung in einem großen Bereich der transversalen Kontrollebene  $1/2 \cdot L_{pp}$  hinter dem hinteren Lot AP am Modell. Die eigens hierfür benutzte Meßeinrichtung wurde in der VBD im Rahmen eines anderen Vorhabens [9] entwickelt und wird auch dort ausführlich beschrieben. Sie besteht aus einer vertikalen Nachstromharke mit 6 übereinander, jeweils im Abstand von 30 mm angeordneten Prandtl-Rohren, deren Außendurchmesser wegen der Störung beim Messen so gering wie möglich gehalten worden ist. Er beträgt 3 mm. Die Harke wird über eine

Traverse elektro-pneumatisch seitwärts versetzt, so daß in einer Meßfahrt mehrere Stellungen eines horizontalen Streifens des Meßfeldes gemessen werden können. Nach Durchmessen eines durch das oberste und unterste Rohr begrenzten Streifens (150 mm) des Meßfeldes über seine Gesamtbreite wird die Harke tiefer versenkt, um den nächsten angrenzenden Streifen zu messen, bis das ganze Meßfeld durchgemessen ist.

Bei der vorliegenden Untersuchung war das 1200 mm breite (= 1,76 B) und 510 mm tiefe (1,80 T) Meßfeld netzartig so unterteilt, daß die Meßstellen in den Schnittpunkten eines quadratischen Gitters von 30 mm Abstand symmetrisch um die Modellmittellachse verteilt waren. Die obersten Meßstellen lagen bei einer Tauchtiefe von 10 mm. Damit wurde erreicht, daß die Extrapolation der gemessenen Drücke bis zur Wasseroberfläche, die eine Fehlerquelle darstellt, gering war.

Die Verformung der Wasseroberfläche in der Meßebene wurde mittels einer Wellenonde gemessen. Es zeigte sich jedoch, daß bei den untersuchten Geschwindigkeiten die Verformung im Durchschnitt  $\pm 1$  mm (max. 4 mm) betrug, während die örtlichen Schwankungen der Meßwerte ebenfalls so hoch waren. Die Extrapolation der gemessenen Drücke wurde deshalb bis zur Ruhewasserlinie vorgenommen.

Die jeweiligen statischen und Gesamtdrücke wurden über 12 Druckdosen und Meßverstärker getrennt, wo sie als Differenzen gegen den von einem Pitot-Rohr in der ungestörten Strömung weit vor dem Modell angezapften Bezugsdruck angezeigt wurden, gemessen. Die Erfassung der Meßwerte erfolgte über die EDE-Anlage der VBD.

## 4. Versuchsergebnisse

### 4.1 Geosim-Messungen

Die Ergebnisse der Widerstandsmessungen an allen 3 Geosim-Modellen sind in den Abb. 2 und 3, jeweils getrennt nach der

korrespondierenden Wassertiefe, wiedergegeben. Zur Ermittlung des Schrägenverhältnisses der jeweiligen Isofroudelinien und im Interesse eines Vergleichs mit der zweidimensionalen Plattenreibungslinie sind die Gesamtwiderstandsbeiwerte in Abhängigkeit vom Logarithmus der Reynolds-Zahl in der Form  $(\log Rn - 2)^{-2}$  aufgetragen. Die Gesamtwiderstandsbeiwerte sind vorgestreckt, jedoch für Tankbreiteneinfluß nicht korrigiert. Sie liefern auf der jeweiligen Isofroudelinie 3 Stützpunkte, deren Verbindungsgerade unterhalb der Froude-Tiefenzahl  $Fn_h$  von etwa 0,50 nahezu parallel verlaufen und gestatten, die mittleren Gradienten  $p$  dieser Linien zu ermitteln. Für die gewählten Wassertiefen ergeben sich folgende Gradienten und entsprechende Korrekturfaktoren, bezogen auf den ITTC-Wert von  $p = 0,075$ :

Wassertiefenverhältnis		Gradient	Erhöhungsfaktor gegenüber ITTC
$h/h-T$	$h/T$	$p$	ITTC
1,395	3,53	0,0847	1,129
1,50	3,00	0,0868	1,157
1,665	2,50	0,0870	1,160
2,00	2,00	0,0934	1,245

Mit den so erhaltenen konstanten Formfaktoren, wodurch der mittlere Maßstabeffekt abgesondert wird, ist eine Übereinstimmung der Restwiderstandsbeiwerte im Geosimvergleich gegeben. Dies gilt besonders für den praktisch bedeutsamen Geschwindigkeitsbereich von  $0,15 \leq Fn_L \leq 0,20$ . Die geringen Abweichungen für das kleinste Modell unterhalb  $Fn_L = 0,15$  kommen durch laminare Strömungseffekte zustande, während die Diskrepanz beim großen Modell im Bereich  $Fn_h > 0,5$  vorwiegend auf den Tankbreiteneinfluß zurückzuführen ist.

Aus den Messungen der Absenkung in Abb. 4, die bis  $Fn_h < 0,5$  quadratisch mit der Froude-Zahl zunimmt, lassen sich nach F. Horn [8] aus der Bernoulli-Gleichung die mittleren Übergeschwindigkeiten und damit für die jeweilige Wassertiefe der Reibungsformfaktor ermitteln. Auf den untersuchten Wassertiefen ergeben sich im Mittel folgende Werte:

Wassertiefenverhältnis		Übergeschwindigkeit	Reibungsformfaktor
$h/h-T$	$h/T$		
1,395	3,53	1,055	1,11
1,50	3,00	1,063	1,12
1,665	2,50	1,071	1,135
2,00	2,00	1,091	1,175

Der Reibungsformfaktor ist hierbei auf eine Plattenreibungslinie zu beziehen, wie z. B. die Funktion

$$C_{F_0} = 0,067 (\log Rn - 2)^{-2}$$

oder die turbulente Plattenreibungslinie nach Hughes [10]

$$C_{F_0} = 1,328 Rn^{-5} + 0,014 Rn^{-0,114}$$

Die beiden unterscheiden sich im untersuchten Bereich der Reynolds-Zahlen um etwa 1,0%.

Da die jeweils auf ITTC-Korrelationslinie bezogene Erhöhung des Formfaktors gemäß Geosimauswertung wesentlich größer ist als die aus der Absenkung ermittelten Werte, kann man auf einen hohen Zähigkeitsbedingten Druckwiderstand schließen und außerdem annehmen, daß er mit flacher werdendem Wasser relativ stark zunimmt, weil die beiden Resultate mit abnehmender Wassertiefe noch weiter divergieren. Ähnliche Tendenz ist aus einer Analyse der nachfolgend beschriebenen Nachlaufmessungen festzustellen.

#### 4.2 Nachstrommessungen

Die Ergebnisse der Druckmessungen im Nachstrom hinter dem Modell sind in der Ausfalltafel in Tabellenform angegeben. Als typisches Beispiel wird in Abb. 5 der Gesamtdruckverlust im

Nachstrom für eine Wassertiefe, entsprechend dem  $h/T$ -Verhältnis von 2,5 und drei Geschwindigkeiten, in grafischer Darstellungsweise gezeigt. Es werden hier sowie in Tabellen die Meßwerte ohne jegliche Korrektur wiedergegeben. Die Auftragung zeigt die infolge der Reibung verlustbehaftete Strömung, die nach außen und mit der Tauchtiefe abklingt. Eine Erklärung für die örtlichen Schwankungen der Meßwerte läßt sich nicht finden; es ist jedoch anzunehmen, daß diese für das Endergebnis, das durch zweifache Integration über das ganze Meßfeld ermittelt wird, keine erhebliche Fehlerquelle darstellen. Auch die Ursache dafür, daß das Druckverlustfeld außermittig verlagert ist und eine Asymmetrie des Nachstroms aufweist, ist nicht bekannt. Ähnliche asymmetrische Ergebnisse sind bei früheren Untersuchungen auf tiefem Wasser aus bisher ungeklärten Gründen ebenfalls festgestellt worden, wie z. B. in [4, 5 und 11].

Die Auswertung der Drücke wurde nach dem bekannten Verfahren von Betz bzw. dessen Ableitung, wie sie in [5] angegeben ist, vorgenommen. Dementsprechend ist der Nachlaufwiderstand  $D_V$  wie folgt ermittelt worden:

$$D_V = \rho g \int_B \int_N [(H_0 - H) - 1/2g (V_E - V)^2] dy dz \quad (1)$$

Hierin ist

$$V_E = \sqrt{c \left( \frac{H_E - p_E}{\rho/2} \right)} \quad \text{die Geschwindigkeit am Rande der Kontrollfläche}$$

$$V = \sqrt{c \left( \frac{H - p}{\rho/2} \right)} \quad \text{die örtliche Geschwindigkeit an den Meßstellen}$$

und  $c =$  Eichkonstante des jeweiligen Prandtl-Rohrs

Die Abb. 6 und 7 zeigen die Auftragung der durch Staudruck  $(H_0 - p_0)$  dimensionslos gemachten Integranden in verschiedenen Längsschnitten des Meßfeldes parallel zur Mittellängsebene für alle 4 Wassertiefen jeweils bei  $Fn = 0,16$ . Symbolisch wird also hier der Term  $M$  der Gleichung

$$D_V = \rho g \int_B \int_N M dy dz$$

dargestellt. Die Längsschnitte im Abstand jeweils von 30 mm wurden übersichtshalber nur über die praktisch bedeutsame Breite des Meßfeldes von  $Y = \pm 180 \text{ mm} = 0,53 B$  eingetragen. Tiefenmäßig erstreckt sich die Auftragung jedoch über den gesamten Nachstromquerschnitt. Zur Ermittlung der Werte zwischen Ruhewasserlinie und Tauchtiefe der ersten Meßwerte bei  $Z = -10 \text{ mm}$  wurde eine Extrapolation gemäß Parabel der kleinsten Quadrate vorgenommen.

Die Diagramme sind recht anschaulich, insofern, daß das von den Kurven eingeschlossene Volumen dem Beiwert des Nachlaufwiderstands  $2 D_V / \rho \cdot V^2$  gleicht. Sie verdeutlichen die Veränderungen mit abnehmender Wassertiefe der Impulsverteilung im Strömungsquerschnitt. So ist z. B. der zunehmende Reibungsverlust im Bereich des Modellbodens zu flacherem Wasser hin deutlich zu erkennen. Auch die Veränderungen der Umströmung an den Seiten des Modells sind trotz der Asymmetrie gut zu erkennen. Besonders ersichtlich ist dies an den Längsschnitten um die Mitte jeweils der Modellhalbbreite bei Tauchtiefen bis zu etwa 65% des Tiefgangs.

Die Auswirkung der Umströmungsänderungen infolge der abnehmenden Wassertiefe wird in Abb. 8 noch anhand der Zwischenintegrale, d. h. Ergebnisse der zunächst einfachen Integration des Terms  $M$  über die Breite bzw. Tiefe des Nachstromquerschnitts auf allen 4 Wassertiefen gezeigt. Der Verlauf und die gegenseitige Zuordnung der jeweils auf Staudruck bezogenen und damit auf eine vergleichbare Größenordnung gebrachten Zwischenintegrale ähneln sich bei allen untersuchten Geschwindigkeiten. Als typisches Beispiel werden sie deshalb hier nur für eine Geschwindigkeit entsprechend der Froude-Zahl von  $Fn = 0,175$  wiedergegeben. Die in der Abbildung links aufgetragenen Kurven zeigen, daß die

Zwischenintegrale im unteren Nachstromquerschnitt unterhalb  $Z = -180$  mm mit abnehmender Wassertiefe ständig höhere Werte annehmen, während im oberen Nachstromfeld die Zunahme geringer ist und außerdem unregelmäßig verläuft. Das Herausfallen der Kurve für  $h/T = 2,5$  bei Tauchtiefen zwischen  $Z = -100$  und  $-180$  mm läßt sich nicht erklären. Dagegen scheint die Unregelmäßigkeit bei Zuordnung der Kurven zu Wassertiefen im Bereich oberhalb  $Z = -100$  mm zu bestätigen, daß die wassertiefenbedingte Änderung der Modellumströmung und damit der Verdrängungsdicke der Grenzschicht eine Verschiebung der am Heck auftretenden Ablösung bewirkt.

Verantwortlich für die Ablösung sind vermutlich die relativ großen Auslaufwinkel der oberen Wasserlinien. Um diesen Vorgang zu verdeutlichen, wird Abb. 9, die schematisch den Verlauf des Gesamtdruckverlusts im Nachstromquerschnitt bei drei Tauchtiefen der Meßsonde wiedergibt, angeführt. Für die Meßebene bei  $Z = -10$  mm sind neben der mittleren Druckverlustspitze zwei zusätzliche Gebiete höheren Druckverlusts festzustellen. Diese, durch zweifache Schraffierung gekennzeichneten sekundären Druckverlustspitzen sowie das bei Versuchsdurchführung visuell beobachtete Strömungsbild, lassen auf eine formbedingte Ablösung am Heck schließen, die sich zu tiefer gelegenen Wasserlinien abbaut und bei  $Z = -100$  mm praktisch gänzlich verschwindet.

Eine nochmalige Ablösung um die Wellenhose ist wegen der mittleren Lage sowohl des Stevenrohres als auch der Druckverlustspitze in einem solchen Schaubild nicht zu erkennen aber auch nicht auszuschließen. Möglicherweise stellt diese eine Teilerklärung für das Herausfallen der Werte für  $h/T = 2,5$  in Abb. 8 dar.

Ein Vergleich, bei dem die auf verschiedenen Wassertiefen gemessenen Druckverluste jeweils über zwei Teilfelder des Nachstromquerschnitts — erhalten durch Unterteilung der tiefenmäßigen Ausdehnung des Nachstromquerschnitts mit  $Z = 0$  bis  $-100$  mm und  $Z = -100$  bis  $-520$  mm — integriert wurden, zeigt, daß das Integral des unteren Teilfeldes mit flacher werdendem Wasser stetig zunehmende Werte aufweist. Das Integral des oberen Teilfeldes dagegen steigt zunächst an, um bei einem Wasserhöhenverhältnis  $h/h-T$  von etwa 1,6 den Höchstwert zu erreichen. Zu noch flacherem Wasser hin ist dann tendenzmäßig eine geringere Verminderung feststellbar. Diese ist z. T. durch die stärkere kopplastige Vertrimmung des Modells mit abnehmender Wassertiefe und damit die relative Austauschung des Hecks, wodurch die Ablösungsverluste geringer werden, zu erklären. In Diagrammform werden diese Ergebnisse in Abb. 11 dargelegt, wobei statt des Integrals der jeweils daraus durch Teilung mit  $\rho/2 \cdot V^2 \cdot S$  ermittelte und auf  $C_{FITTC}$  bezogene Widerstandsbeiwert in Abhängigkeit vom Wasserhöhenverhältnis gezeigt wird.

Abb. 10 zeigt schließlich das vollständige Endergebnis der Nachstromanalyse auf allen 4 Wassertiefen im Vergleich zum jeweiligen Schleppwiderstand. Die Versuchsergebnisse wurden als dimensionslos gemachte Widerstandsbeiwerte eingetragen und zugleich den nach der ITTC-Korrelationslinie berechneten Beiwerten  $C_F$  gegenübergestellt. Die Auftragung läßt den anteilig hohen Nachlaufwiderstand erkennen. Für das  $h/T$ -Verhältnis 3,53 beträgt er z. B. 90 Prozent des Gesamtwiderstands bei  $F_n = 0,16$ . Das Widerstandsverhältnis  $C_V/C_T$ , das mit zunehmender Geschwindigkeit naturgemäß geringer wird, zeigt jeweils bei gleicher Geschwindigkeit eine steigende Tendenz zu flacherem Wasser hin. Diese Tendenz ist im Einklang mit der Erscheinung, daß bei niedrigen Geschwindigkeiten die flachwasserbedingte Zunahme des Gesamtwiderstands praktisch aus der Zunahme des Zähigkeitsanteils besteht. Im vorliegenden Fall nehmen die verbleibenden Restwiderstandsbeiwerte mit Wassertiefenbeschränkung geringfügig ab.

Die aus Geosim- und Nachstromanalyse, auf der Basis bisher üblicher ITTC-Funktion  $C_F = f([\log R_n - 2]^{-2})$  abgeleiteten mittleren Korrelationslinien für die untersuchten Wassertiefen, werden in Abb. 12 (oben) wiedergegeben.

Für die größte Wassertiefe mit  $h/T = 3,53$  ist die Übereinstimmung zwischen den beiden Kurven recht gut. Hieraus läßt sich ein mittlerer Formfaktor als angenäherte Korrektur der Reibungslinie, die die Zunahme des Zähigkeitsbedingten Widerstands berücksichtigt, bestimmen. Für die übrigen Wassertiefen jedoch ist durch das abweichende Verhalten der  $C_V$ -Kurven nach Nachstromanalyse und Geosim-Messungen keine eindeutige Aussage über den Formfaktor möglich.

Man kann aber feststellen, daß die Zunahme des Zähigkeitsbedingten Widerstands auf flachem Wasser recht hoch ist. Auch die in [1 und 2] festgestellte Erscheinung, hinsichtlich der Unregelmäßigkeit im Zunahmeverlauf, hat sich im vorliegenden Fall bestätigt. Die aus Messungen abgeleitete Zunahme gegenüber den ITTC-Werten ist in Abb. 12 (unten) in Abhängigkeit vom Wassertiefenverhältnis dargestellt.

## 5. Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht behandelt die Ergebnisse von Modellversuchen zur Bestimmung des Zähigkeitsbedingten Widerstands und seiner Zunahme auf flachem Wasser. Im einzelnen sind an einem Modell der bekannten Göteborg-Serie Druck- und Geschwindigkeitsmessungen in einer genügend großen transversalen Kontrollebene im Nachstromquerschnitt auf 4 Wassertiefen bei je 4 Modellgeschwindigkeiten durchgeführt worden, um daraus den jeweiligen Nachlaufwiderstand zu bestimmen.

In einer zweiten Versuchsreihe ist ein weiteres Verfahren, das auf Geosim-Messungen beruht, herangezogen worden, um das Schrägenverhältnis der jeweiligen Isofroudelinien zu ermitteln und damit den Zunahmeverlauf des Zähigkeitswiderstands auf flachem Wasser abzuschätzen.

Anschließend sind die Ergebnisse analysiert und untereinander vergleichend bewertet worden. Sie führen bei der größten Wassertiefe zu einer sehr guten Übereinstimmung, während auf geringeren Wassertiefen der Zähigkeitsbedingte Widerstand aus Nachstromanalyse höhere Werte aufweist als der aus Geosim-Messungen ermittelte. Seine Zunahme auf flachem Wasser ist beträchtlich. In beiden Fällen wird auch die in [1 und 2] festgestellte Erscheinung hinsichtlich der Unregelmäßigkeit im Zunahmeverlauf über der Wassertiefe erneut bestätigt.

## 6. Literaturverzeichnis

- [1] Luthra, G.: Ermittlung des Maßstabeffektes im Schiffsleistungsanstieg bei zunehmender Geschwindigkeit auf flachem Wasser. Zeitschrift für Binnenschiffahrt, Heft 10/1971
- [2] Luthra, G.: Modellfamilien-Untersuchungen auf flachem Wasser. Schiff und Hafen, Heft 11/1970
- [3] Tulin, M. P.: The Separation of Viscous Drag and Wave Drag by means of Wake Survey. DTMB Report 772, Washington, D. C.
- [4] Sharma, S. D.: Zur Problematik der Aufteilung des Schiffswiderstands in Zähigkeits- und wellenbedingte Anteile. STG-Jahrb. 1965
- [5] Landweber, L., Tzan, K. T. S.: Determination of the Viscous Drag of a Ship Model. J. S. R. (SNAME) June 1968
- [6] Freimanis, E., Lindgren, H.: Systematic Tests with Ship Models with  $\delta = 0,60 - 0,75$ . 44. Mitteilung der SSPA, Göteborg
- [7] Schmidt-Stiebitz, H., Luthra, G.: Widerstands-Untersuchung einer Seeschiffsmodellserie auf flachem Wasser. Schiff und Hafen, Heft 8/1969
- [8] Horn, F.: Diskussionsbeitrag zu G. Kempf: Neuere Erfahrungen im Schiffbauversuchswesen. STG-Jahrb. 1927
- [9] Müller, E.: Analyse des Strömungsfeldes und des Schiffswiderstands eines auf endlicher Wassertiefe fahrenden Schiffes. VBD-Bericht (noch nicht veröffentlicht)
- [10] Hughes, G.: Frictional and Form Resistance in Turbulent Flow and a Proposed Formulation for use in Model and Ship Correlation. Trans. RINA 1954
- [11] Townsin, R. L.: Viscous Drag from a Wake Survey Measurements in the Wake of "Lucy Ashton" Model. Trans. RINA 1968
- [12] Taniguchi, K., Baba, E.: A New Component of Viscous Resistance Measured by Wake Survey, 12th ITTC-Rome, 1969

# Rationeller Boottransport mit Travelift in Jachthäfen und Werften

Dipl.-Ing. Hellmut Droscha, Frankfurt

Mit der zahlenmäßigen Zunahme von Segelbooten, Motorbooten und Jachten sind auch die Probleme ihres Transports beim Verbringen aus dem Wasser zu den Service-, Reparatur- oder Winterliegeplätzen und wieder zurück vor allem zum Ende oder zu Beginn der Saison in den Boots- und Jachthäfen, aber auch in den Werften akuter geworden. Als wertvolle Hilfe zur schnellen, risiko- und reibungslosen Ausführung dieser Förderaufgaben hat sich ein ganz auf die dabei gestellten speziellen Anforderungen angepaßtes Hub- und Transportgerät nach vielfältiger Bewährung in den USA, in skandinavischen Ländern und an Mittelmeerküsten jetzt auch in der Bundesrepublik Deutschland eingeführt. Es ist ein auf 4 Rädern mit Flugzeugreifen, also gleislos selbstfahrender Doppelportalkran, genannt „Marine“-Travelift (Abb. 1), mit einem Benzinmotor und stufenlos regulierbaren, stoßabsorbierenden Hydraulikantrieben sowohl der Räder als auch der insgesamt 4 Hubwerke. Diese sind mit Seilflanschen und Gurten versehen, in die der zu transportierende Boots- oder Jachtkörper eingehängt wird.

Das Prinzip des kombinierten Hub- und Transportgeräts Travelift stammt aus der Schwerindustrie mit weiträumigen Umschlagplätzen, auf denen damit große Lasten — wie Stahlkorkillen, Großrohre,

Drahtbunde oder auch Fertigbauteile — freizügig und unter Einsparung besonderer Förderanlagen, somit also investitions-kosten sparend gefördert werden. Der Einsatz des Travelift für den Boottransport verlangte einige Modifikationen der Konstruktion. Vor allem hat man den Querträger eines der beiden Portale aufklappbar gestaltet und bei der neuesten Ausführung überhaupt weggelassen (Abb. 2), so daß es sich dort nicht mehr eigentlich um ein „Portal“ handelt und das Ganze dann auch kein wirklicher Doppelportalkran mehr ist. Die neu gewonnene Öffnung aber ermöglicht die Aufnahme auch von Booten mit höheren Brückenaufbauten sowie von mit langen Masten ausgerüsteten Segelbooten, die ungehindert unter einen solchen Travelift einfahren können.



Abb. 1: „Marine“-Travelift als Doppelportalkran mit aufklappbarem Querträger eines der beiden Portale

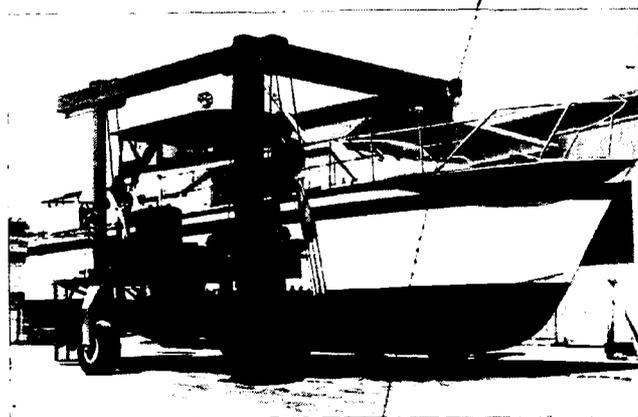


Abb. 2: „Marine“-Travelift mit Öffnung durch Wegfall eines Querträgers zur Aufnahme von Booten mit hohen Brücken oder langen Masten

Die Querträger der beiden Portale sind als drehelastische Breitflanschprofilträger ausgebildet, desgleichen die sie verbindenden Längsträger, während die vertikalen Stützen von geschweißten Kastenprofilen gebildet werden. Dieses Tragwerk oder Stahlgerüst ist somit ein allseitig elastisches System, das beim Fahren beträchtliche Bodenunebenheiten auszugleichen vermag, so daß auf eine die Konstruktion komplizierende federnde Radaufhängung verzichtet werden konnte. Daher stellen unbefestigte Fahrbahnen, Schwellen oder Gleise kein Hindernis für dieses ungewöhnliche Fördermittel dar, dessen Räder immer ihre Bodenhaftung behalten.

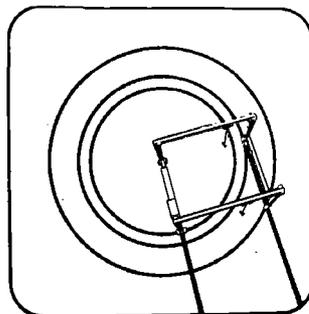


Abb. 3: Extreme Manövrierbewegung des Travelift: Wenden am Ort um eins der beiden nicht lenkbaren und nicht angetriebenen Vorderräder

Von den 4 Rädern des Travelift sind die beiden unter den vorderen Portalstützen weder angetrieben noch lenkbar. Alle Manövrierbewegungen werden durch den auf Vorwärts- und Rückwärtsfahrt steuerbaren Antrieb und die Lenkung der beiden Hinterräder ausgeführt, die bis um 90° schwenkbar sind. Extremer Manöviervorgang (Abb. 3) ist das Wenden an Ort jeweils um eins der beiden Vorderräder, das dabei also auf einem Punkt verbleibt, während das ihm diagonal gegenüber befindliche Hinterrad um 45° und das andere Hinterrad um 90° ausgeschwenkt ist. Die Kinematik der Lenkung gewährleistet, daß die angetriebenen Räder bei Kurvenfahrt immer auf konzentrischen Kreisbahnen laufen. Dank der großen Beweglichkeit des Travelift können die jeweils verfügbaren Hafen-, Liegeplatz- oder auch Werftgelände optimal genutzt werden.

Der als Energiequelle für alle Antriebe (Abb. 4) dienende Benzinmotor treibt über ein Verteilergetriebe 2 Axialkolben-

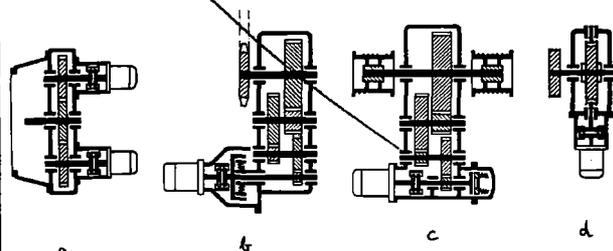


Abb. 4: Die Antriebsaggregate des Travelift (schematisch):

- a) Verteilergetriebe am Benzinmotor mit Flanschglocke und zwei Axialkolbenpumpen
- b) Als Fahrwerksantrieb Axialkolbenmotor, Stirnradgetriebe und Kettenrad
- c) Als Hubwerksantrieb Axialkolbenmotor, Stirnradgetriebe und zwei Seiltrommeln
- d) Als Katzantrieb Axialkolbenmotor, selbsthemmendes Schneckengetriebe und Seiltrommel

$\sigma_{pp} = 0,675 \frac{M512}{\lambda = 25} (M720 ; M770)$

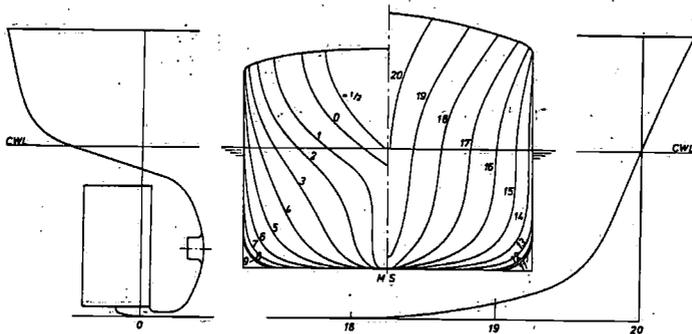


Abb. 1: Vor- und Hinterschiffslinien

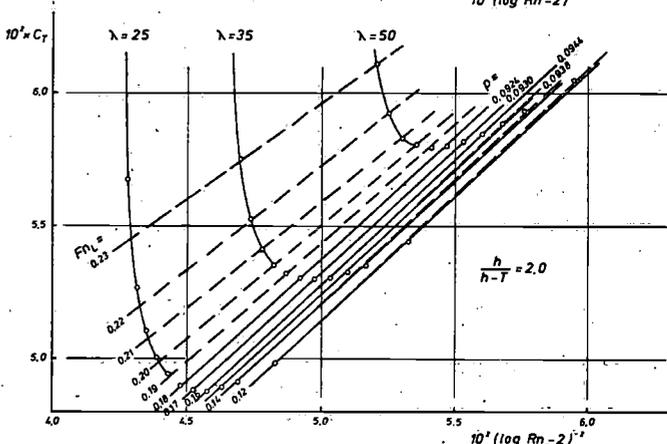
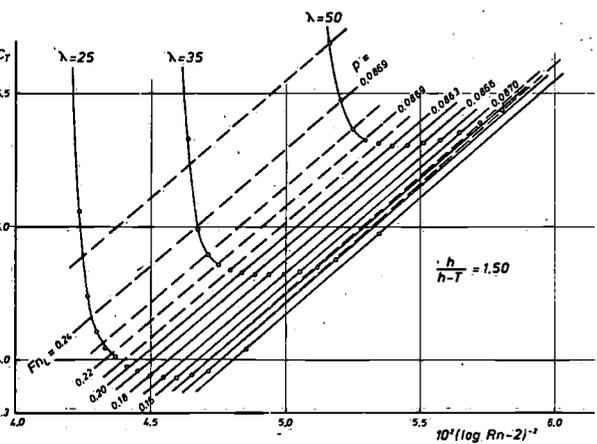
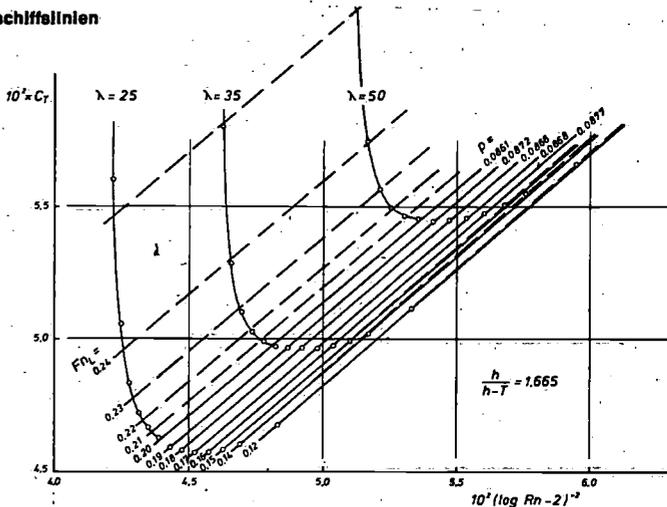
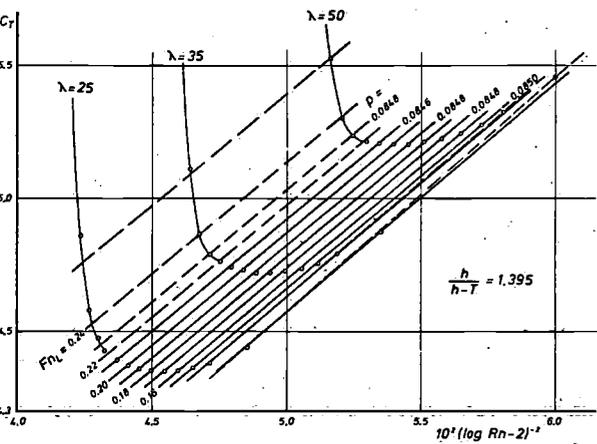


Abb. 2: Gesamtwiderstandsbeiwerte

Abb. 3: Gesamtwiderstandsbeiwerte

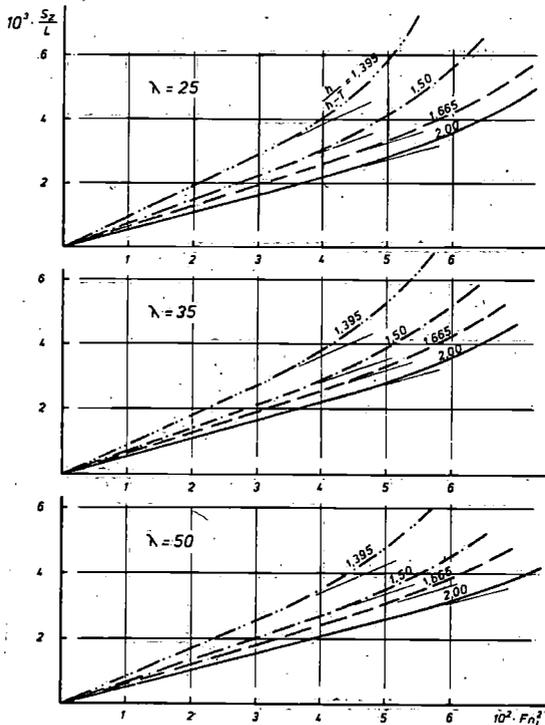


Abb. 4: Auf Schiffslänge bezogene Absenkung als Maß für Übergeschwindigkeiten der Verdrängungsströmung

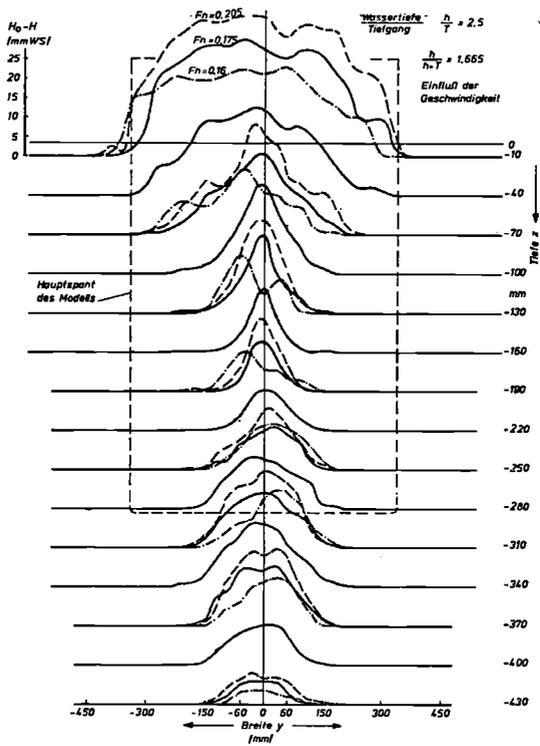


Abb. 5: Gesamtdruckverlust im Nachstrom

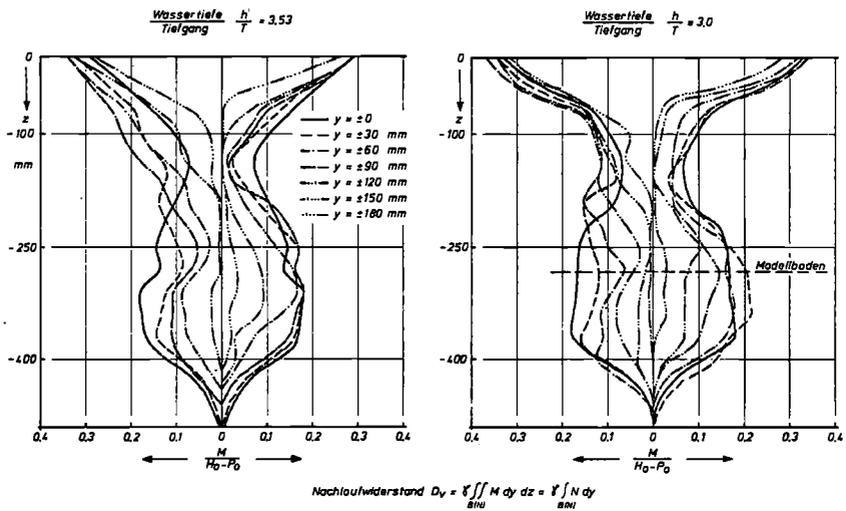


Abb. 6: Impulsverteilung im Nachstromfeld, Geschwindigkeit  $F_n = 0,16$

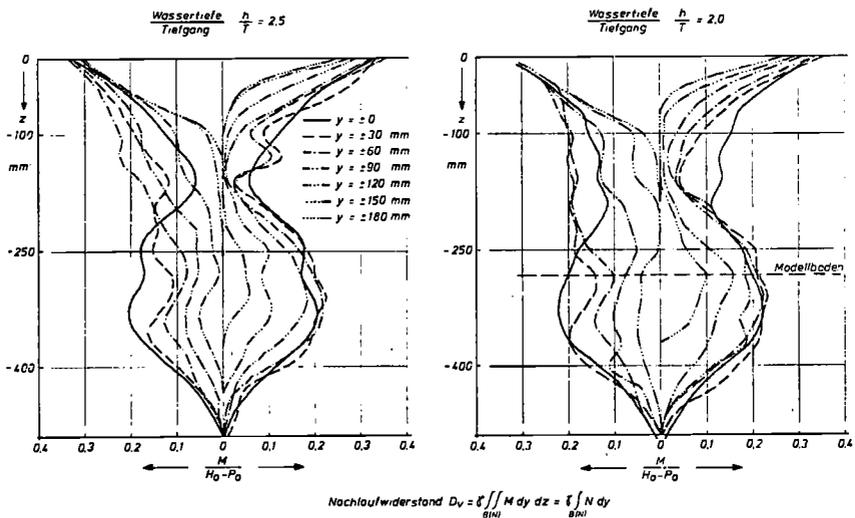


Abb. 7: Impulsverteilung im Nachstromfeld, Geschwindigkeit  $F_n = 0,16$

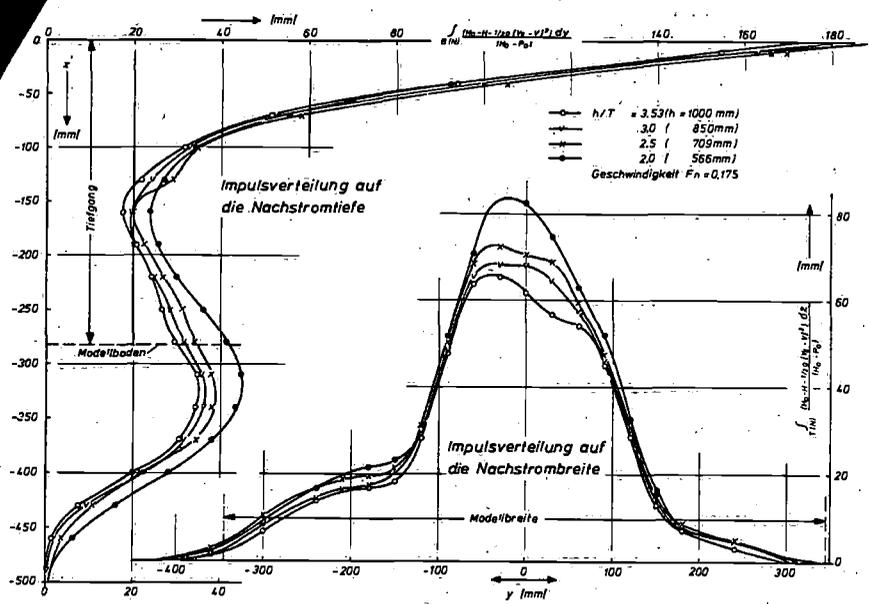


Abb. 8

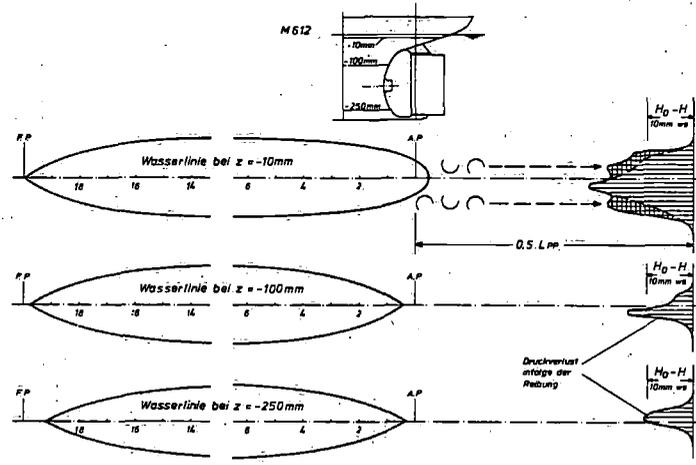


Abb. 9: Gesamtdruckverlust im Nachstrom, Geschwindigkeit  $F_n = 0,16$

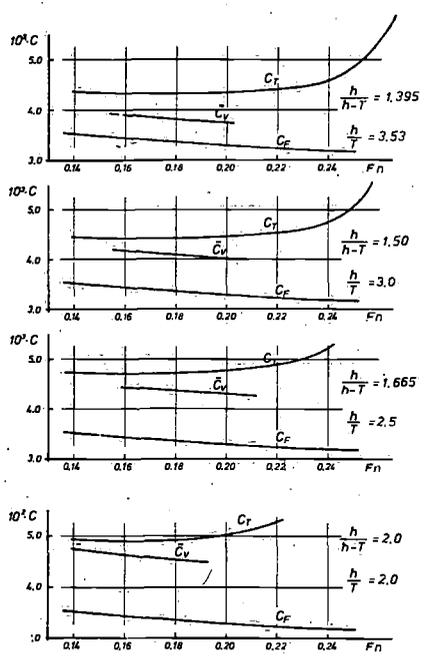


Abb. 10: Vergleich der Widerstandsbeiwerte

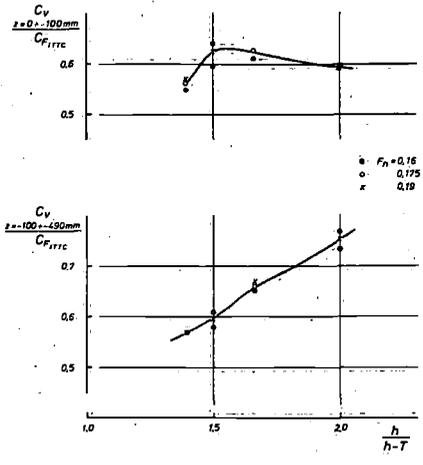
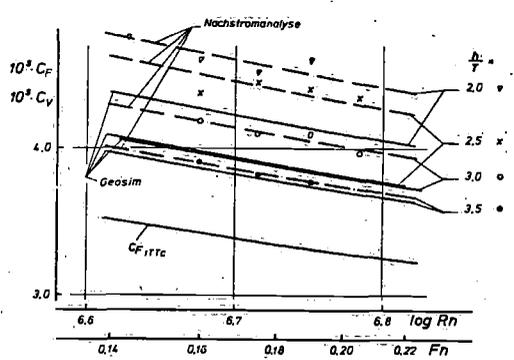


Abb. 11: Teilwiderstandsbeiwerte nach Trennung des Nachstromquerschnitts in zwei Teilfeldern

Vergleich der Widerstandsbeiwerte



Zunahme des zähigkeitsbedingten Widerstandes auf flachem Wasser

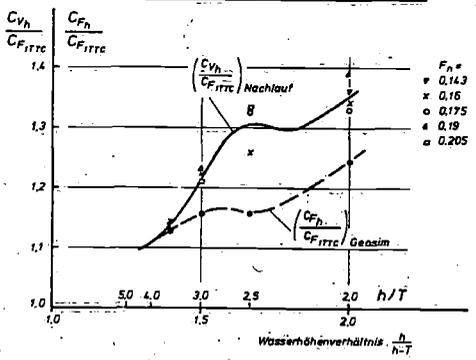


Abb. 12: Vergleich der Widerstandsbeiwerte

Protokoll I

GESAMTDROCKVERLUST IN NACHSTROM H<sub>0</sub>-H in mm WS

Wassertiefe .... h = 1000 mm ; Wassertiefe/Tiefgang .... h/T = 3,5

Table with columns Y (mm) from 360 to -390 and X (mm) from -2 to 460. Contains velocity and pressure loss data for V = 1,10 m/s and Pn = 0,16.

Table with columns Y (mm) from 360 to -420 and X (mm) from -2 to 460. Contains velocity and pressure loss data for V = 1,306 m/s and Pn = 0,19.

Protokoll II

GESAMTDROCKVERLUST IN NACHSTROM H<sub>0</sub>-H in mm WS

Wassertiefe .... h = 850 mm ; Wassertiefe/Tiefgang .... h/T = 3,0

Table with columns Y (mm) from 360 to -390 and X (mm) from -2 to 460. Contains velocity and pressure loss data for V = 1,10 m/s and Pn = 0,16.

Table with columns Y (mm) from 360 to -390 and X (mm) from -2 to 460. Contains velocity and pressure loss data for V = 1,306 m/s and Pn = 0,19.

Protokoll III

GESAMTDROCKVERLUST IN NACHSTROM H<sub>0</sub>-H in mm WS

Wassertiefe .... h = 709 mm ; Wassertiefe/Tiefgang .... h/T = 2,5

Table with columns Y (mm) from 360 to -390 and X (mm) from -2 to 460. Contains velocity and pressure loss data for V = 1,10 m/s and Pn = 0,16.

Table with columns Y (mm) from 360 to -420 and X (mm) from -2 to 460. Contains velocity and pressure loss data for V = 1,306 m/s and Pn = 0,19.

Protokoll IV

GESAMTDROCKVERLUST IN NACHSTROM H<sub>0</sub>-H in mm WS

Wassertiefe .... h = 566 mm ; Wassertiefe/Tiefgang .... h/T = 2,0

Table with columns Y (mm) from 360 to -390 and X (mm) from -2 to 460. Contains velocity and pressure loss data for V = 1,10 m/s and Pn = 0,16.

Table with columns Y (mm) from 360 to -390 and X (mm) from -2 to 460. Contains velocity and pressure loss data for V = 1,306 m/s and Pn = 0,19.