

Berichte
aus dem
Institut für Meereskunde
an der
Christian-Albrechts-Universität, Kiel

Nr. 129

Messungen zum Widerstandsbeiwert von Verankerungskomponenten
Measurements of mooring component drag coefficients

von
Michael Finke

DOI 10.3283/IFM-BE2-129

Kopien dieser Arbeit können bezogen werden von:

Institut für Meereskunde
Abt. Meeresphysik
2300 Kiel 1
Düsternbrooker Weg 20

ISSN 0341-8561
1984

Diese Arbeit wurde 1984 als Diplomarbeit bei der
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Christian-Albrechts-Universität eingereicht.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
2.	Theoretische Grundlagen	6
	2.1 Hydrodynamik des Widerstandes	6
	2.2 Reynoldssche Zahl - Reynoldssches Ähnlichkeitsgesetz	8
	2.3 Grenzschichten	10
	2.4 Grenzschichtablösung	11
	2.5 Widerstandsgesetz	12
	2.6 Versuchsbezogene Aspekte	15
3.	Experimentelle Grundlagen	21
	3.1 Meßmethoden	21
	3.2 Einfluß der Halterung	22
	3.3 Kanaleffekt	23
4.	Messungen und Ergebnisse	25
	4.1 Versuchsaufbau	25
	4.2 Schleppkanal	25
	4.3 Kraftmessung	25
	4.4 Befestigung der Meßkörper	31
	4.5 Messungen und Auswertung	33
	4.5.1 Fehlerrechnung	34
	4.5.2 Eichungen	36
	4.5.3 Durchführung der Messungen	38
	4.5.4 Auswertung der Messungen	38
5.	Geschwindigkeitsabhängige Einzelmessungen	41
	5.1 Auftriebskörpermodelle K 450 und K 320	41
	5.2 Thermistorgerät und Aanderaa - Strommesser	48
	5.3 Benthos - Auftriebskörper	54
	5.3.1 Benthos (2)	55
	5.3.2 Benthos (2) - oberer Auftrieb	58
6.	Winkelabhängige Einzelmessungen	62
	6.1 Winkelabhängigkeit der Widerstandsbeiwerte am Thermistorgerät	64
	6.2 Winkelabhängigkeit der Widerstandsbeiwerte beim K 450 Auftriebskörper	67
7.	Vergleichsmessung	69
8.	Diskussion der Ergebnisse	71
9.	Tabellenanhang	74
10.	Verzeichnis der Abbildungen	89
11.	Verzeichnis der verwendeten Symbole	91
12.	Literaturverzeichnis	93

Contents

1.	Introduction	1
2.	Theoretical Principles	6
	2.1 Hydrodynamic Resistance	6
	2.2 Reynolds Number, Reynolds Similarity Law	8
	2.3 Boundary Layers	10
	2.4 Boundary Layer Flow Separation	11
	2.5 Resistance Law	12
	2.6 Experimental Aspects	15
3.	Experimental Principles	21
	3.1 Measuring Methods	21
	3.2 Influence of the Support System	22
	3.3 Correction for Wall Influence	23
4.	Measurements and Results	25
	4.1 Experimental Frame	25
	4.2 Tow Tank	25
	4.3 Balance System	25
	4.4 Support System	31
	4.5 Analysing of the Measurements	33
	4.5.1 Error Correction	34
	4.5.2 Calibration	36
	4.5.3 Measurement	38
	4.5.4 Analysis	38
5.	Velocity-Dependent Measurements	41
	5.1 Buoyancy Element Models K 450 and K 320	41
	5.2 Aanderaa Current Meter and Thermistor String Recorder	48
	5.3 Benthos Buoyancy Elements	54
	5.3.1 Benthos (2)	55
	5.3.2 Benthos (2) - Main Buoyancy Element	58
6.	Angular Measurements	62
	6.1 Dependence of Drag Coefficients on Angle Relative to Flow: Thermistor String Recorder	64
	6.2 Dependence of Drag Coefficients on Angle Relative to Flow: K 450 Buoyancy Element	67
7.	Comparison Measurements	69
8.	Discussion of Results	71
9.	Tables	74
10.	Register of Illustrations	89
11.	List of Used Symbols	91
12.	References	93

Zusammenfassung

Als Teil forschungsbezogener Verankerungsrechnungen und der Untersuchung von Verankerungsbewegungen der Abteilung Meeresphysik am Institut für Meereskunde Kiel wurden in dieser Arbeit experimentelle Messungen der an speziellen Verankerungskomponenten bei stationärer Anströmung auftretenden Widerstandskräfte unternommen. Die Messungen wurden mit Unterstützung der Universität Hamburg im dortigen Schleppkanal ausgeführt.

Die wesentlichen Auftriebskörper bzw. Auftriebselemente typischer Einpunktverankerungen und in diesen eingesetzte Meßgeräte zur Registrierung der ozeanographischen Parameter stellen die Meßkörper der vorliegenden Versuchsreihe dar. Aus dem hydrodynamischen Widerstandsgesetz wurden die Widerstandsbeiwerte dieser Komponenten errechnet.

Die Messungen basieren auf der im Schleppkanal üblichen Wägungsmethode, wonach die Versuchskörper mit konstanter Geschwindigkeit durch den Kanal geschleppt werden und die auftretenden hydrodynamischen Kräfte mittels einer Balance-Einrichtung registriert werden.

Die Widerstandsbeiwerte angeströmter Körper sind von der Reynoldszahl abhängig. Die Einzelmessungen an den Verankerungskomponenten sind über einen Bereich ausgelegt, der typischen Verhältnissen beim realen Einsatz im Ozean entspricht. Die im einzelnen abgeleiteten Widerstandsbeiwerte können mit einer relativen Genauigkeit von etwa 3 % angegeben werden.

Eine Schematisierung der geometrischen Form der Verankerungskomponenten auf vereinfachte Kugel- bzw. Zylinderformen und die Berechnung der Widerstandskräfte dieser Komponenten mit entsprechenden Kugel- bzw. Zylinderwiderstandsbeiwerten erweist sich als unzulässig. Die an den Verankerungskomponenten tatsächlich gemessenen Widerstandskräfte sind im Einzelfall bis zu 50 % größer.

Summary

Oceanographic moorings are assembled from various components, such as cables, instruments and buoyancy elements. The drag force distribution along the mooring line induced by ocean currents is needed for a prediction of mooring motion. For this computation the knowledge of appropriate drag coefficients is required. While cylindrical shapes can be assumed for cables with corresponding known drag coefficients, specific experiments are needed for determining the drag coefficients of the instruments and the buoyancy elements. Lacking such determinations, idealized spherical and cylindrical shapes were earlier assumed for selecting the drag coefficients for these components.

In this report tow tank experiments are described for a determination of the drag coefficients of the following mooring components, as used by the Institut für Meereskunde at Kiel University: Aanderaa Current Meter and Aanderaa Thermistor String Recorder, Benthos Glass Ball Hardcaps in various combinations and Divinicell buoyancy elements of elliptical shape. The experiments were carried out in the tow tank of the Institut für Schiffbau at Hamburg University. Towing speeds were selected to result in Reynolds Numbers corresponding to typical oceanic conditions, using the Reynolds Similarity Law. The drag forces were measured with a balance system. The derived drag coefficients are accurate within approximately 3 %.

Considerable deviations were found between drag coefficients determined from these experiments and those obtained from the assumption of idealized shape. Particular large deviations exceeding 50 % occur in the case of Benthos Glass Ball Hardcaps.

1. Einleitung

Fest verankerte Meßsysteme sind ein wesentliches Hilfsmittel für die wissenschaftliche Datengewinnung in der Ozeanographie. Geeignete Meßgeräte und Sensoren für Temperatur, Salzgehalt und Strömung mit automatischer Registrierung erlauben langfristig ortsfesten Einsatz und eine entsprechend langfristige Aufzeichnung der ozeanographischen Parameter. Die spätere Laborauswertung dieser Messungen ergibt neue Einblicke in zur Zeit in vielen Meeresgebieten und im tiefen Ozean noch unzureichend bekannte Strömungs- und Transportmechanismen. Nach Auslegung der Meßgeräte erfolgt die Datengewinnung unabhängig vom Schiff und ist zudem wesentlich kostengünstiger als beim Einsatz von Schiffen mit dem Ziel längerfristiger Datengewinnung.

Der erfolgreiche Einsatz von Verankerungssystemen ist jedoch maßgeblich von der Sicherheit und Beständigkeit dieser Systeme über lange Zeiträume sowie ihrer sicheren Auslegung und Wiederaufnahme abhängig. Die in der Anfangsphase der Verankerungstechnik noch hohen Verlustraten konnten durch kontinuierliche Weiterentwicklung sowohl des eingesetzten Materials als auch der Gerätebestückung und der Auslegungs- und Wiederaufnahmetechnik wesentlich gesenkt werden. Diese anfänglich hohen Verlustraten waren vornehmlich auf ungeeignete Materialien und unzureichende Kenntnis der auftretenden mechanischen Beanspruchungen zurückzuführen; es kam zu Materialermüdungen und Seilbruch infolge hoher Zugbelastungen und durch Korrosion. Umfangreiche Materialuntersuchungen und eine verbesserte Verankerungskonzeption haben diese Risiken weitgehend eingeschränkt. Heute ist der sichere Einsatz von Verankerungen über viele Monate bei Verlustraten von wenigen Prozent möglich geworden. Die wesentlichen Gesichtspunkte der heutigen Verankerungstechnik, wie sie vom IFM/Kiel seit Jahren erfolgreich angewandt wird, werden im folgenden zusammenfassend dargestellt.

Grundsätzlich gibt es zwei Gruppen von Verankerungstypen, nämlich Oberflächenverankerungen und Unterwasserverankerungen. Die letzteren können sowohl als Einpunkt- als auch als Mehrpunktverankerungen ausgelegt sein. Bei den Oberflächenverankerungen liegt der obere Auftriebskörper über Wasser, es treten hohe mechanische Beanspruchungen des Systems infolge des Einflusses der seegangsbewegten oberen Wasserschicht auf, zudem besteht ein erhöhtes Verlustrisiko durch Schifffahrt und Fischerei. Dagegen befindet sich der obere Auftriebskörper bei Unterwasserverankerungen unterhalb der seegangsbewegten Wasserschicht, so daß die dynamischen seegangsbedingten Einwirkungen nicht bestehen und das Verlustrisiko durch Schifffahrt und Fischerei geringer ist. Ein solches System befindet sich insgesamt in einer beruhigteren Situation, auch die Messungen sind ungestört von seegangsbedingten hydrodynamischen Einflüssen.

Das Verlustrisiko während der kritischen Phasen der Auslegung und Wiederaufnahme wird durch eine besondere Auslegung und Wiederaufnahmetechnik entscheidend eingeschränkt. Beim Auslegen wird mit dem oberen Teil des Verankerungssystems begonnen, der Anker wird zuletzt geslippt. Beim Fallen des Ankers treten nur für kurze Zeit Spitzenbelastungen im Seil auf (Berteaux, Walden 1969).

Durch Verwendung eines Fallschirms kann die Sinkgeschwindigkeit des Ankers herabgesetzt werden, Kinkenbildung während des Fallens wird durch Verwendung dreharmer Seile vermieden. Die Wiederaufnahme des Systems erfolgt nach Trennung der Verankerung vom Ankergewicht durch Betätigung eines akustischen Auslösers, die Verankerung schwimmt auf und kann, beginnend mit dem oberen Auftriebsselement, an Bord genommen werden. Der Einsatz eines akustischen Auslösers ermöglicht jederzeit die Ortung der Verankerung über ein akustisches Pingersystem.

Eine Unterwasserverankerung unterliegt den auf sie wirkenden Kräften, den Auftriebs- und Gewichtskräften ihrer Komponenten und den hydrodynamischen Kräften als Folge von Strömungen. Im stromlosen Fall kommt unter der Wirkung der Auftriebs- und Gewichtskräfte der Komponenten eine senkrechte Lage der Anordnung zustande, solange am oberen Auftriebskörper genügend Restauftrieb vorhanden ist. Bei Strömung wird ein Gleichgewicht der veränderten Kraftanordnung als Folge der Mitwirkung der hydrodynamischen Kräfte durch eine Auslenkung von der ursprünglich senkrechten Lage erreicht. Damit verbunden ist eine horizontale Auslenkung der Komponenten und ein vertikales Abtauchen in größere Tiefen. Auf die langsam veränderlichen Strömungen, etwa mit Gezeitenperioden, reagiert eine Unterwasserverankerung quasistatisch (Siedler, Gerlach 1976).

Die sich einstellende Schräglage der Verankerung hat eine Erhöhung der Zugspannung im Seil zur Folge.

Mit Hilfe numerischer Berechnungsmethoden des statischen Verhaltens eines Verankerungssystems bei Annahme vereinfachter Stromprofile können wichtige Fragen, wie die Zahl und Verteilung der Auftriebskörper, geklärt werden. Eine Verteilung des notwendigen Gesamtauftriebs über mehrere Tiefen bedeutet einen weiteren Sicherheitsaspekt, der bei Seilbruch die Rückgewinnung des verbliebenen Teils der Verankerung sichert. Mit diesen Fragen beschäftigen sich Siedler/Graßhoff (1970), die das Problem auf die Kräfteanordnung an einem starren Pendel reduzieren und die auf das System einwirkenden Kräfte auf den Endpunkt der Verankerungseillänge konzentrieren. Eine Reihe zur gleichen Zeit entstandener amerikanischer Arbeiten haben Casarella und Parsons (1969) zusammengefasst beschrieben. Schröder (1982) errechnet iterativ die Gleichgewichtsbedingungen für die in Segmentabschnitte wählbarer Länge aufgegliederte Verankerung, wiederum mit vereinfachten Stromprofilen.

Durch Annäherung der veränderten Seilkonfiguration erreicht er eine Beschreibung der sich einstellenden Seilkurve und behandelt detailliert Fragen des Abtauchverhaltens der Verankerung und der Zugkraft im Seil. Solche Berechnungen ergeben wichtige Aspekte über die Verteilung der Auftriebskörper und Geräte, die Dimensionierung der Seile und die Höhe des nötigen Ankergewichts. Mit Hilfe solcher Rechenprogramme kann die Gesamtkonzeption einer Verankerung geplant und verbessert werden. Schröder untersucht gleichzeitig die Stabilität der vom IFM/Kiel bereits eingesetzten Verankerungssysteme und vergleicht die Ergebnisse der Simulation bei Vorgabe aktueller gemittelter Stromdaten mit gemessenen Druckregistrierungen, um die Tiefenlage der Instrumente zu rekonstruieren. Abweichungen können zum Teil auf bisher nicht abgesicherte Berechnungsgrundlagen zurückgeführt werden. Dies betrifft folgende Faktoren:

- a) Die Strömungswiderstände bzw. die damit zusammenhängenden Widerstandsbeiwerte der Komponenten sind nicht genau bekannt.
- b) Unsicherheiten in der Auftriebs- und Gewichtsberechnung, die genauen Naßgewichte der verwendeten Auftriebskörper und Instrumente sind ungewiß.
- c) Es fehlen genaue Belastungskurven der verwendeten Seile, was die Reckberechnung beeinflusst.
- d) Zulässigkeit der vereinfachten theoretischen Annahmen, wie Zerlegung in starre Segmente, d. h. Vernachlässigung der Seilkrümmung und weitgehend zweidimensionale Modellrechnungen.

Maßgebend für alle Berechnungen der sich einstellenden Kräftebalance ist die genaue Kenntnis der Widerstandskräfte, die als Folge der Anströmung an den Verankerungskomponenten bestehen. Meßgeräte und Auftriebskörper nehmen ca. 20 % der gesamten Angriffsfläche für die vorhandenen Strömungen ein. Die bisher gemachte Schematisierung dieser Komponenten auf Kugel- und Zylinderformen und die Bestimmung der Widerstandskräfte für diese vereinfachten Körperformen läßt Abweichungen erwarten.

Aus diesem Grund wurden in dieser Arbeit experimentelle Untersuchungen durchgeführt, mit dem Ziel, die an den Auftriebskörpern und Meßgeräten bei stationärer Anströmung auftretenden Widerstandskräfte zu messen und die Widerstandsbeiwerte dieser Komponenten zu bestimmen. Abb. 1 zeigt eine typische Einpunktverankerung. Eingesetzte Komponenten sind selbstregistrierende Meßgeräte mit Sensoren für Strömung, Temperatur, elektrische Leitfähigkeit und Druck, akustischer Auslöser am Boden und Auftriebskörper.

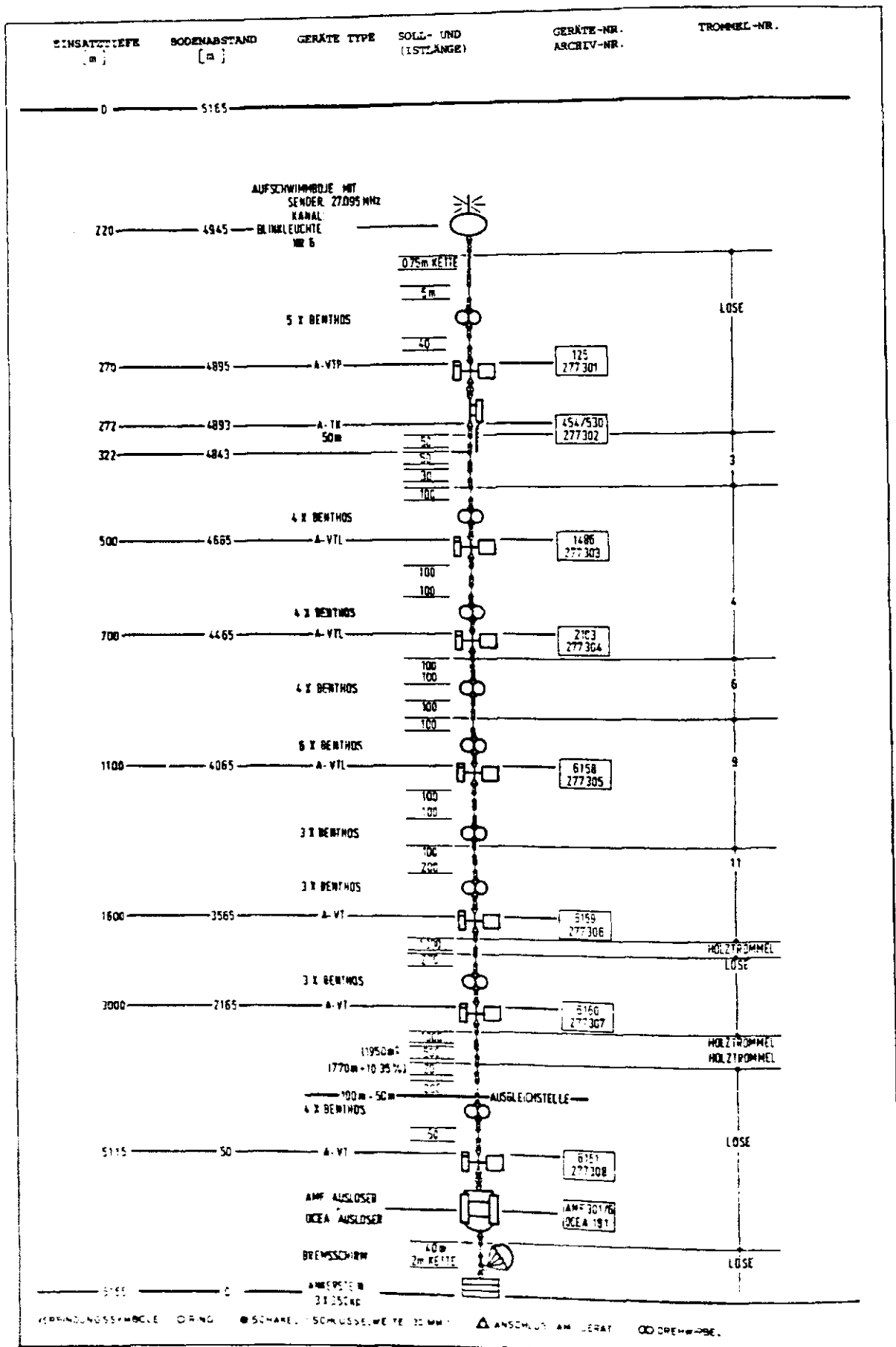


Abb. 1 : Einpunkt - Unterwasserverankerung (276/3)

- 1) Käse 450 Kp (K 450) : Aus Hartkunststoffplatten hergestellter Auftriebskörper mit 450 Kp effektivem Auftrieb, der, ausgerüstet mit Blinkleuchte und Peilsender, als oberstes Auftriebselement eingesetzt wird und für Einsatz Tiefen bis 200 m geeignet ist.
- 2) Käse 320 Kp (K 320) : Entsprechend kleinerer Auftriebskörper mit 320 Kp Auftrieb.
- 3) Benthos - Auftriebskörper : Die Auftriebskörper der Firma Benthos liefern als Einzelkörper einen Auftrieb von 45 Kp bei Einsatz Tiefen bis 6000 m. Sie werden häufig zu größeren Auftriebspaketen zusammengefaßt und sind in Zweierkonfigurationen und entsprechender Halterung auch für den Einsatz als oberstes Auftriebselement in der Verankerung geeignet.
- 4) Aanderaa - Strommesser : Selbstregistrierender Strömungsmesser, der mit Rotor und Stromfahne zur Messung von Betrag und Richtung der Strömung ausgerüstet ist. Von einer Quarzuhr gesteuert, erfolgt die Registrierung in zeitlichen Intervallen.
- 5) Thermistor - Registriergerät : hochauflösende Temperaturregistrierungen in Verbindung mit Thermistorketten.
- 6) Auslöser : häufig akustisch, löst nach Empfang eines kodierten Signals die Verbindung zum Ankerstein.

Anm. : Die Komponenten 4) und 5) sind häufig zusätzlich mit Meßfühlern für elektrische Leitfähigkeit und Druck ausgerüstet.

Die Stömungen im Ozean nehmen im allg. mit wachsender Tiefe stark ab. Vor allem im oberen Teil der Verankerung treten insbesondere beim Durchgang von Fronten hohe Anströmungen auf. Die Bedeutung der hydrodynamischen Kräfte auf die weiter unten liegenden Verankerungskomponenten tritt zurück, insbesondere, was den nahe am Ankerstein befindlichen Auslöser angeht. Nach Fofonoff (1965) wird der Hauptanteil des horizontalen Strömungswiderstandes durch die oberen 10 - 20 % der Verankerung aufgebracht. In erster Linie interessieren daher die Widerstandskräfte der mit 1 - 5 bezeichneten Komponenten, diese stellen die Meßkörper der vorliegenden experimentellen Arbeit dar. Seile wurden nicht in die Untersuchung einbezogen, die Messung der Widerstandskräfte an Seilen erfordert einen wesentlich anderen Versuchsaufbau. Eine Reihe von Meßergebnissen, die Widerstandsbeiwerte von Seilen betreffend, findet sich in der Literatur veröffentlicht [Föppl (1910), Neunaß (1967), Berteaux (1967)].

2. Theoretische Grundlagen

Die Auslegung und Planung der durchgeführten Versuche erfordert die Berücksichtigung einer Reihe hydrodynamischer Gesichtspunkte. Im folgenden werden zunächst die Grundlagen der Entstehung des hydrodynamischen Widerstandes bei stationärer Anströmung beschrieben und als wesentliche Kennzahl zur Charakterisierung der Strömung um Widerstandskörper die Reynoldssche Zahl abgeleitet. Nach der Angabe des Widerstandsgesetzes werden die wesentlichen Aspekte für die Durchführung der Versuche herausgestellt.

2.1 Hydrodynamik des Widerstandes

Die Grundlage der Hydrodynamik bildet die Theorie der idealen, d. h. reibungsfreien Flüssigkeiten. Die Annahme der Reibungsfreiheit vereinfacht die hydrodynamischen Bewegungsgleichungen und erlaubt explizite theoretische Lösungen für eine Vielzahl von Strömungsvorgängen. Jedoch versagt die Theorie bei der physikalischen Deutung des Flüssigkeitswiderstandes, den ein gleichförmig in einer Flüssigkeit bewegter Körper oder der einer stationären Anströmung ausgesetzte Körper erfährt.

Für reibungsfreie, inkompressible und stationäre Strömungen ergibt sich als Integral der Bewegungsgleichungen entlang einer Stromlinie die Bernoulligleichung:

$$\frac{p}{\rho} + g z + \frac{v^2}{2} = \text{const} \quad (1)$$

Sie bringt den Satz von der Erhaltung der Energie zum Ausdruck. In der Form

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{const} = p_0 \quad (2)$$

stellt die Konstante den Druck dar, der in der ruhenden Flüssigkeit herrschen würde, d. h. den über der Flüssigkeit lastenden Atmosphärendruck plus dem hydrostatischen Druck $\rho g z$. Die Summe des statischen Drucks p und des Staudrucks $\frac{1}{2} \rho v^2$ hat danach überall in der Flüssigkeit in der gleichen Tiefe den gleichen Wert.

Den reibungsfreien Verlauf einer stationären Strömung um eine Kugel zeigt Abb. 2. Das Stromlinienbild ist vor und hinter dem Körper völlig symmetrisch, nach der Bernoulli-gleichung sind sowohl P als auch P' Staupunkte gleichen Drucks, so daß die Kugel der Strömung keinerlei Widerstand entgegen bringt. Dies äußert sich auch darin, daß keine Störung in der Flüssigkeit zurückbleibt und die Stromrichtung umkehrbar ist. Dieses Ergebnis ist im übrigen unabhängig von der Gestalt des Körpers.

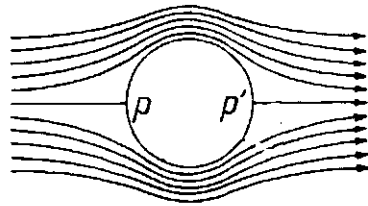


Abb. 2 : Reibungsfreie Umströmung einer Kugel

Reale Flüssigkeiten verhalten sich dagegen anders. Prandtl (1904) gelangte zu einer anschaulichen physikalischen Beschreibung des Widerstandsproblems. Die zähigkeitsbedingte Reibung zwischen der Flüssigkeit und der Oberfläche des Körpers führt zur Ausbildung einer dünnen Grenzschicht entlang der Oberfläche des Körpers. Wenn auch der unmittelbare Einfluß der Reibungskräfte auf die Grenzschicht beschränkt bleibt, so ändert sich doch maßgeblich das Stromlinienbild und die Symmetrie der Druckverteilung zwischen Vorder- und Rückseite des Körpers geht als Folge von Wirbelbildung verloren. Ursächlich für die Ausbildung der Grenzschicht ist die Viskosität der Flüssigkeit. Die Viskosität äußert sich im Auftreten von Tangentialspannungen bei Verschiebung aneinandergrenzender Flüssigkeitsschichten. Um diese gegeneinander zu verschieben, ist eine Kraft erforderlich, die proportional dem Geschwindigkeitsgefälle und der Viskosität der Flüssigkeit ist. Nach dem Newton'schen Reibungsgesetz gilt :

$$\tau = \mu \frac{du}{dz} \quad (3)$$

τ heißt Schubspannung, μ dynamische Viskosität.
Dimensionen :

$$[\tau] = \text{N}$$

$$[\mu] = \text{Pa} \cdot \text{s}$$

Die dynamische Viskosität μ charakterisiert die innere Reibung und ist für jede Flüssigkeit eine spezifische Größe.

Der Quotient $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ heißt kinematische Viskosität mit der Dimension $[\nu] = \text{m}^2 \text{s}^{-1}$

Als Folge der Zähigkeit bzw. der Schubspannungen wirken an einem Flüssigkeitsvolumen Reibungskräfte, die gleich der Differenz der Schubspannungen sind.

2.2 Reynoldssche Zahl - Reynoldssches Ähnlichkeitsgesetz

Eine charakteristische Kennzahl, die den Strömungszustand im Inneren einer Flüssigkeit wiedergibt, erhält man aus dem Prinzip der Dimensionsanalyse. Danach müssen sich die physikalischen Größen, die die Strömung charakterisieren, in einer Form darstellen lassen, die unabhängig vom gewählten Maßsystem ist.

Die maßgebenden Größen sind :

Stromgeschwindigkeit	V	(m s^{-1})
charakteristische Länge	d	(m)
Dichte	ρ	(kg m^{-3})
Zähigkeit	μ	$(\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1})$

Im Falle der Umströmung eines Körpers ist V die Anströmgeschwindigkeit und d eine charakteristische Körperlänge, üblicherweise die längste Erstreckung des Körpers in Stromrichtung.

Einem Ansatz von Schlichting (1964) folgend werden F , L , Z als Symbole für Kraft, Länge und Zeit gesetzt. Es gibt eine dimensionslose Kombination dieser Größen, wenn

$$V^\alpha d^\beta \rho^\gamma \mu^\delta = F^0 L^0 Z^0$$

ist, mit ganzzahligen Koeffizienten $\alpha, \beta, \gamma, \delta$.

$\alpha = 1$ ergibt :

$$V d^\beta \rho^\gamma \mu^\delta = \frac{L}{Z} L^\beta \left(\frac{FZ^2}{L^4} \right)^\gamma \left(\frac{FZ}{L^2} \right)^\delta = F^0 L^0 Z^0$$

Aus dem Exponentenvergleich folgen :

$$F : \quad \gamma + \delta = 0$$

$$L : \quad 1 + \beta - 4\gamma - 2\delta = 0$$

$$Z : \quad -1 + 2\gamma + \delta = 0$$

Die einzige sich ergebende Kombination ist $\beta = 1$, $\gamma = 1$, $\delta = -1$, so daß

$$\frac{\rho V d}{\mu} = Re \quad (4)$$

Diese Zahl heißt "Reynoldssche Zahl" mit der Schreibweise Re . Bei Berücksichtigung der kinematischen Viskosität ν erhält man:

$$Re = \frac{V d}{\nu} \quad (5)$$

Ursprünglich leitete sich die Re - Zahl aus der Überlegung ab, wann, geometrisch ähnliche äußere Bedingungen vorausgesetzt (z. B. geometrisch ähnliche Körper in der Flüssigkeit), die Bewegung der Flüssigkeit ähnlich verlaufen wird, d. h. wann geometrische Ähnlichkeit mechanische bzw. dynamische Ähnlichkeit nach sich zieht. Diese Frage ist vor allem für das strömungstechnische Versuchswesen von Bedeutung, wenn z. B. statt der Großausführung Modelle getestet werden oder eine andere Flüssigkeit gewählt wird (statt Luft Wasser oder umgekehrt). Nach dieser Überlegung ist die Ähnlichkeit dann gegeben, wenn in den zu vergleichenden Fällen das Verhältnis der drei Kräfte Druckkraft, Reibungskraft und Trägheitskraft, von denen die Bewegung der Flüssigkeit bestimmt ist, das Gleiche ist. Wegen der zwischen den drei Kräften bestehenden Gleichgewichtsbedingung braucht nur das Verhältnis zwischen zwei Kräften übereinzustimmen. Die Trägheitskräfte verhalten sich wie $\rho \frac{V^2}{d}$, die Reibungskräfte wie $\mu \frac{V}{d^2}$

Als Verhältnis ergibt sich wiederum die Re - Zahl.

$$\frac{\text{Trägheitskräfte}}{\text{Reibungskräfte}} = Re = \frac{\rho V d}{\mu}$$

Zwei Strömungen, z. B. um geometrisch ähnliche Körper, verhalten sich nach dem Reynoldsschen Ähnlichkeitsprinzip nur dann dynamisch ähnlich, wenn die Re - Zahlen in beiden Fällen gleich sind. Die außerordentliche Bedeutung dieses Prinzips liegt in seiner physikalischen und praktischen Aussage.

Physikalisch charakterisiert die Re - Zahl den Stömungszustand einer reibenden Flüssigkeit. Bei kleinen Re - Zahlen wird die Strömung überwiegend von den Reibungskräften beeinflusst, bei größeren Re - Zahlen überwiegt der Einfluß der Trägheitskräfte, die Reibungskräfte treten zurück. Die praktische Bedeutung liegt in der Übertragbarkeit von Meßergebnissen zwischen Modellen und der Großausführung bzw. zwischen zwei Flüssigkeiten.

Die beiden letzten Gesichtspunkte sind für die vorliegende Arbeit von besonderer Wichtigkeit. Zum einen wurden die Versuche in Süßwasser durchgeführt und sollten Gültigkeit für die Verhältnisse im Ozean besitzen, zum anderen mußten von den großen Auftriebskörpern K 450 und K 320 zur Bewältigung des hohen Auftriebs verkleinerte Modelle angefertigt werden. Diese Modelle wurden im Verhältnis 1 : 3,3 nachgebildet. In beiden Fällen sichert das Reynoldssche Ähnlichkeitsgesetz die Übertragbarkeit der gewonnenen Meßergebnisse.

2.3 Grenzschichten

Die Reibungskräfte dürfen in der Nähe eines in der Flüssigkeit bewegten festen Körpers auch bei hohen Re - Zahlen nicht vernachlässigt werden, da hier die Bedingung des Haftens an der Wand auch bei kleiner Viskosität immer zu einem Geschwindigkeitsgefälle führt. Gleiches gilt für den von der Flüssigkeit angeströmten ruhenden Körper. Unmittelbar an der Oberfläche des eingetauchten Körpers entwickelt sich eine Grenzschicht, in der sich die Geschwindigkeit der unbeeinflussten Flüssigkeit an die Geschwindigkeit des Körpers anpasst. Die Dicke δ dieser Reibungsschicht oder auch laminaren Grenzschicht ist dabei um so geringer, je kleiner die Viskosität der Flüssigkeit ist, allerdings wird dann das Geschwindigkeitsgefälle größer, so daß sich an der Bedeutung der Reibungskräfte innerhalb der Reibungsschicht nichts ändert.

Bleibe nun die Potentialströmung der idealen Flüssigkeit außerhalb dieser Grenzschicht erhalten, so wäre der Flüssigkeitswiderstand nur vom Reibungsverlust innerhalb der Grenzschicht bestimmt. Der aus dem Reibungsverlust resultierende Widerstand heißt Reibungswiderstand. Die Strömung in der Grenzschicht kann bei einer kritischen Re - Zahl abhängig vom bestehenden Turbulenzgrad der Außenströmung und der Oberflächenbeschaffenheit des Körpers selbst turbulent werden. Dabei ist der Geschwindigkeitsanstieg in der turbulenten Grenzschicht wesentlich größer. Infolge des erhöhten Impulsaustauschs ist der Reibungswiderstand bei turbulenter Grenzschicht größer als bei den laminaren Grenzschichten. Die Grenzschichten wachsen entlang der Körperoberfläche mit der Länge des Strömungswegs rasch an, die turbulente Grenzschicht wächst wesentlich schneller als die laminare.

Als Folge des von Prandtl beschriebenen Ablösungsvorgangs schieben sich Teile der Grenzschichten als Trennungsschichten in die freie Flüssigkeit hinaus.

Entlang solcher Trennungsschichten wechselt die Geschwindigkeit sprunghaft. Sie sind daher hochgradig instabil und zerfallen rasch in eine große Zahl meist unregelmäßiger Wirbel. Die dabei entstehenden Druckdifferenzen zwischen Vorder- und Rückseite des Körpers bewirken seinen Druckwiderstand. Die diesem Widerstand entsprechende Energie findet ihr Äquivalent in der kinetischen Energie der gebildeten Wirbel.

2.4 Grenzschichtablösung

Voraussetzung für die Ablösung der Strömung von der Wand ist, daß die freie Flüssigkeit außerhalb der Grenzschicht verzögert strömt. Da die Ursachen, die die Verzögerung der freien Flüssigkeit bewirken (Druckdifferenzen), auch auf die Flüssigkeitsteilchen in der Grenzschicht einwirken, die durch Reibungswirkung entlang der Wand bereits einen Teil ihrer Geschwindigkeit eingebüßt haben, kommt es leicht zu einer Bewegungsumkehr. Der so entstehende Rückstrom verbreitet sich rasch, da immer neue Flüssigkeitsteilchen in der gleichen Weise beeinflusst werden. Dieser Rückstrom hebt nun die Vorwärtsströmung von der Wand ab. Ein Teil des Grenzschichtmaterials wird dabei von der äußeren Strömung als spiralförmig sich aufwickelnde Trennungsschicht mitgeführt, und, von der Grenzschicht ausgehend, wird so das ganze Strömungsbild umgewandelt. In Abb. 3 ist der Vorgang dargestellt.

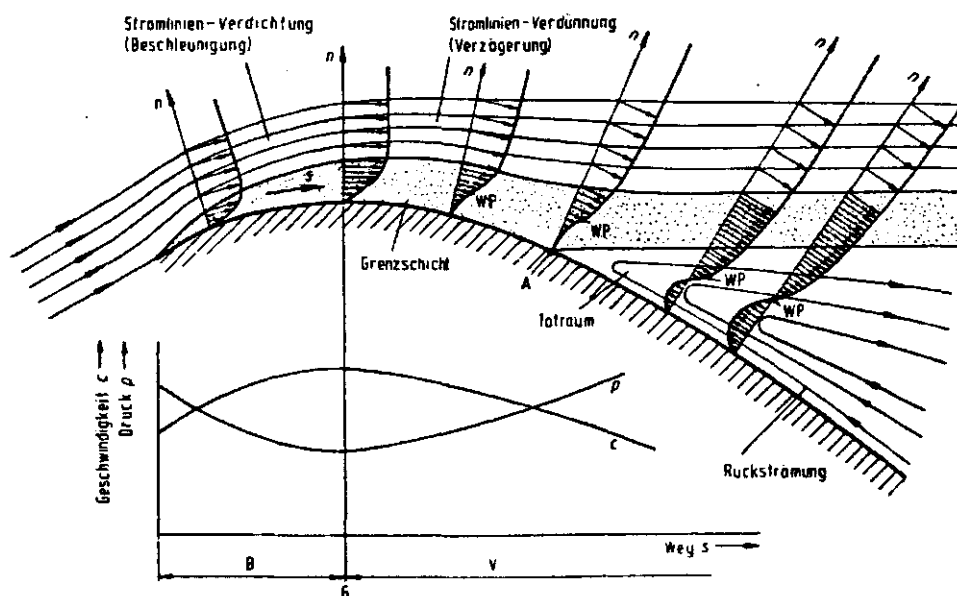


Abb. 3 : Geschwindigkeitsprofile bei Druckabfall (B) und Druckanstieg (V). Ablösungspunkt der Grenzschicht (A). Aus Sigloch (1982)

Im Bereich B wird die Flüssigkeit infolge Druckabfalls beschleunigt. Die Beschleunigung wirkt dabei der Verzögerung entgegen, welche die Flüssigkeitsteilchen als Folge der Wandreibung erfahren. In diesem Bereich findet niemals Ablösung statt, deshalb bleibt in der Nähe des vorderen Staupunktes an einem Körper der drehungsfreie Charakter der Strömung erhalten. Im Bereich V wird die Strömung verzögert und der Druck steigt wieder an. Zunächst kann die infolge der Wandreibung stärker abgebremste Flüssigkeit noch von der äußeren Strömung mitgeschleppt werden. Sie verliert jedoch ständig an kinetischer Energie. Die Grenzschichtdicke nimmt deshalb zu. Bei dem weiter steigenden Druck kommen die Flüssigkeitsteilchen in Wandnähe zur Ruhe und werden sogar zur Umkehrung gezwungen. Die rückläufige Strömung hebt dabei die Außenströmung ab. Zwischen beiden Strömungen findet sich die bereits erwähnte instabile Trennungsschicht, hinter dem Körper bleibt ein mit Wirbeln durchsetzter Bereich zurück, der sogenannte Wirbel- oder Totraum.

An der Hinterkante umströmter länglicher Körper kommt unter bestimmten Umständen auch eine regelmäßig pendelnde Bewegung zustande, bei der abwechselnd links- und rechtsdrehende Wirbel erzeugt werden. Man bezeichnet diese Erscheinung als Karman'sche Wirbelstraße.

Erreicht die Re - Zahl einen kritischen Wert, wird die Strömung in der Grenzschicht turbulent. Infolge ihrer in der turbulenten Grenzschicht höheren kinetischen Energie können die Flüssigkeitsteilchen länger gegen den steigenden Druck anlaufen. Die Ablösestelle wandert weiter nach hinten, das Wirbelgebiet hinter dem Körper wird wesentlich kleiner. Wenn auch der Reibungswiderstand bei turbulenter Grenzschicht größer ist, so wird doch der Gesamtwiderstand wegen des wesentlich geringeren Druckwiderstands geringer.

Die Wirbelbildung wird bei genügend starker Geschwindigkeitsabnahme in Strömungsrichtung sicher eintreten, sie kann bei schwächerer Abnahme aber auch ausbleiben. Die Grenzschicht wird neben der Verzögerung an der Wand von der äußeren Strömung auch angetrieben. Bei nur allmählicher Verzögerung kann dieser Antrieb genügen, um Rückströmung und damit Ablösung zu vermeiden. Daher sind Stromlinienformen mit schlank auslaufendem Hinterteil besonders günstig für das Erreichen eines kleinen Widerstands.

2.5 Widerstandsgesetz

Der Druckwiderstand eines umströmten Körpers ist die resultierende aller Druckkräfte entlang der Oberfläche des Körpers, der Reibungswiderstand die resultierende der Reibungskräfte. Der Gesamtwiderstand enthält beide Anteile. In den meisten Fällen überwiegt der Druckwiderstand.

Bei geometrisch und mechanisch ähnlichen Fällen, wenn also die Re - Zahl denselben Wert hat, wirken Druck- und Reibungskräfte in demselben Verhältnis zusammen. Die Reibungsspannungen ändern sich also in den zu vergleichenden Fällen proportional zu den Druckdifferenzen, die ihrerseits proportional dem Staudruck $\frac{1}{2} \rho V^2$ und einer charakteristischen Körperfläche A gesetzt werden können. Daraus folgt das quadratische Widerstandsgesetz.

$$F = \frac{1}{2} C_D \rho A V^2 \quad (6)$$

mit

$$\begin{aligned} [F] &= \text{N} \\ [\rho] &= \text{kg m}^{-3} \\ [A] &= \text{m}^2 \\ [V] &= \text{m s}^{-1} \end{aligned}$$

C_D heißt Widerstandsbeiwert und ist eine dimensionslose Zahl.

Der Widerstandsbeiwert ist natürlich nur solange unveränderlich, wie die Re - Zahl konstant ist. Es ist die für den Widerstand eines Körpers charakteristische Zahl, und diese ist außer von der Körperform bei sonst geometrisch ähnlichen Verhältnissen auch von der Stellung des Körpers relativ zur Strömung abhängig. Es gilt also im allgemeinen :

$$C_D = \frac{2F}{\rho A V^2} = f(\text{Re}, \alpha) \quad (7)$$

wobei α der Winkel der Anströmrichtung ist. Die Bestimmung des Widerstandsbeiwertes erfolgt experimentell.

Zur Abhängigkeit des Widerstandsbeiwertes von der Körperform lassen sich einige grundsätzliche Bemerkungen machen :

- Bei scharfkantigen Körpern liegen die Ansatzstellen der Trennungsschichten, d. h. die Stellen, an denen sich die Strömung ablöst, eindeutig fest. Man findet im Versuch über einen weiten Bereich Reynoldsscher Zahlen konstante Widerstandsbeiwerte.
- Bei abgerundeten Körperformen existieren Gebiete kritischer Re - Zahlen, in denen der Widerstandsbeiwert als Folge des Turbulentwerdens der Grenzschicht von höheren Werten im unterkritischen Bereich zu niedrigeren im überkritischen Bereich abfällt. Ein solches Verhalten findet man bei Kugel und Zylinder (Abb. 4).

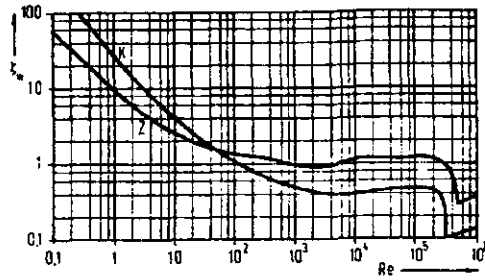


Abb. 4 Widerstandsbeiwerte für Kugel und Zylinder nach Messungen von Wieselsberger [aus Sigloch (1982)]

Die kritische Re - Zahl liegt dabei bei $Re_K \approx 3 \cdot 10^5$

Im Fall der Kugel gilt :

$$Re \leq Re_K \quad C_D \approx 0,45$$

$$Re > Re_K \quad C_D \approx 0,1$$

Für den Zylinder mit $l/d = \infty$:

$$Re \leq Re_K \quad C_D \approx 1,2$$

$$Re > Re_K \quad C_D \approx 0,35$$

Variationen im allgemeinen Verlauf der Kurven im unterkritischen Bereich sind auf ungleichmäßigen Anstieg von Druck- und Reibungswiderstand zurückzuführen.

Zylindrische Körper mit begrenztem Längen / Seitenverhältnis weisen kleinere unterkritische Widerstandsbeiwerte auf. Die überkritisch gemessenen Werte entsprechen denen des unendlich langen Zylinders (Abb. 5).

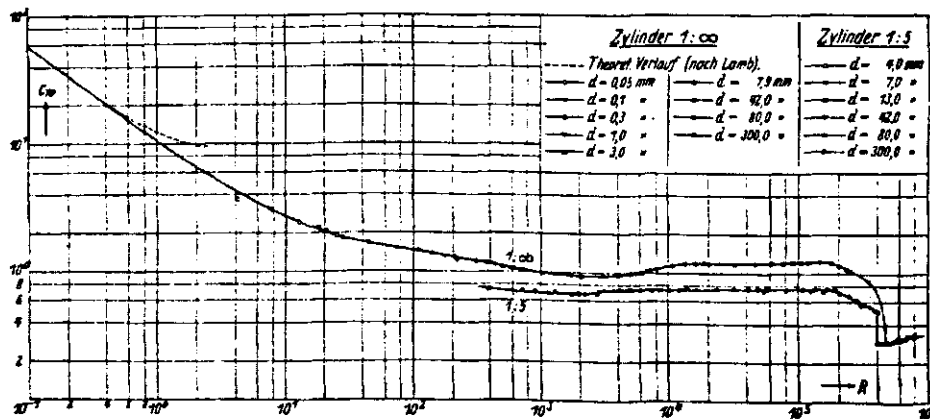


Abb.5 : Verlauf der Widerstandsbeiwerte eines unendlich und eines endlich langen Kreiszyllinders nach Messungen von Wieselsberger [aus Muttray (1931)]

Die kritische Re - Zahl variiert mit dem Turbulenzgrad der Außenströmung und der Oberflächenbeschaffenheit des Körpers. Je stärker die Vorturbulenz ist, um so früher erfolgt der Umschlag. Für die Umströmung von Körpern kann nach Sigloch(1982) für die kritische Re - Zahl das folgende Intervall angegeben werden :

$$Re = 3 \cdot 10^5 \dots 5 \cdot 10^5 \quad (\dots 3 \cdot 10^6)$$

Bei besonders störungsfreier Außenströmung und glatter Körperoberfläche kann der turbulente Umschlag bis auf

$Re = 3 \cdot 10^6$ hinausgeschoben werden.

Für den Bereich kleiner Re - Zahlen, etwa $Re \leq 1$, existieren theoretische Lösungen. Für die Kugel gilt die von Stokes errechnete Formel :

$$C_D = \frac{24}{Re}$$

Der Bereich $Re \leq 1$ ist aber wegen der kleinen Viskosität des Seewassers und den großen Körperabmessungen der Verankerungskomponenten in der Verankerungsrechnung ohne Bedeutung.

2.6 Versuchsbezogene Aspekte

Es ergeben sich bereits einige wesentliche Aspekte für die Versuchsplanung. Die Schematisierung der Auftriebskörper und Meßgeräte auf Kugel- und Zylinderform widerspricht der Voraussetzung der geometrischen Ähnlichkeit.

Die Auftriebskörper weichen erheblich von der angenommenen Kugelform ab :

- K 450 und K 320 entsprechen der äußeren Form nach eher einem Ellipsoid
- Für den Einsatz in der Verankerung sind die Auftriebskörper mit Aufsätzen und Beschlägen für die Verbindung mit Seilen zwischen den Verankerungskomponenten und für die Aufnahme von Blinkleuchte und Funksender versehen.
- Die Benthos - Auftriebskörper sind mit Hartkunststoff - Kalotten verkleidet, der äußeren Form nach kann keine Zuordnung zu einfachen geometrischen Formen erfolgen. Mit Kettengliedern werden jeweils zwei Auftriebskörper zu einem Auftriebspaket Benthos(2) verbunden, häufig werden in der Verankerung mehrere solcher Auftriebspakete senkrecht übereinander zu größeren Verbänden zusammengestellt.

Für den Einsatz als oberstes Auftriebselement werden zwei solcher Auftriebskörper in ein besonderes Gestell eingefügt, das auch für die Aufnahme von Blinkleuchte und Funksender geeignet ist.

Die Abweichungen der Meßgeräte (Thermistorgerät und Aanderaa - Strommesser) von der vereinfachten Zylinderform beruhen auf den Sensorteilen der Geräte und den hervorstehenden Vorrichtungen für die Verbindung in der Verankerung.

Ein weiterer kritischer Punkt, der bei der Berechnung der Widerstandskräfte der Verankerungskomponenten mit Widerstandsbeiwerten von Kugel- bzw. Zylinderformen entsprechend gleicher Größe auftritt, liegt darin, daß wegen der genannten Abweichungen von den vereinfachten Körperformen auch die genaue Berechnung der charakteristischen Anströmfläche schwierig ist. Diese Anströmfläche, die üblicherweise die Stirnfläche des Körpers, d. h. der größte zur Stromrichtung senkrechte Körperquerschnitt ist, kann für die Verankerungskomponenten nur angenähert berechnet werden. Bei der Berechnung der Widerstandskräfte nach (6) resultieren dann Abweichungen aufgrund des eingesetzten Widerstandsbeiwertes und der gewählten charakteristischen Anströmfläche. Sind dagegen die Widerstandskräfte im Experiment bestimmt, so basiert der berechnete Widerstandsbeiwert auf einer geeignet gewählten und bekannten Körperfläche. Die Berechnung der Widerstandskräfte nach (6) ist dann exakt möglich.

Für die Auftriebskörper K 450 und K 320 wurden wegen ihres hohen Auftriebs Modelle angefertigt. Die Verkleinerung der Auftriebskörper im Verhältnis 1 : 3,3 vermindert den effektiven Auftrieb etwa im Verhältnis 1 : 27. Um geometrische Ähnlichkeit zu erreichen, mußten auch sämtliche Aufsätze und Beschlüge im gleichen Verhältnis verkleinert werden. Gleiche Re - Zahlen zwischen Original und Modell wurden erreicht, indem die Modelle bei etwa dreimal so großen Geschwindigkeiten, wie am Original erwartet, gemessen wurden.

Die Meßkörper (K 450, K 320, Thermistorgerät, Aanderaa - Strommesser) entsprechen gerundeten Körperformen, so daß der Widerstandsbeiwert von der Re - Zahl abhängig ist. Bei den Benthos - Auftriebskörpern sind wegen ihrer Verkleidung kantige Ablösestellen vorgegeben, eine weitgehende Konstanz der Widerstandsbeiwerte über einen großen Bereich von Re war daher zu erwarten. Da sich diese Ablösestellen im vorderen Bereich der Meßkörper befinden, mußten relativ hohe Widerstandsbeiwerte erwartet werden.

Die Einzelmessungen müssen in Abhängigkeit von der Re - Zahl ausgeführt werden. Dazu waren geschwindigkeitsabhängige Messungen erforderlich. Bei Berücksichtigung der Viskosität ν und einer charakteristischen Körperlänge d konnten den Meßkörpern die den Geschwindigkeiten entsprechenden Re - Zahlen zugeordnet werden.

Der Meßbereich im Versuch mußte auf die Re - Zahlen angepaßt werden, die beim Einsatz im Ozean für die Verankerungskomponenten erwartet werden können. Die Viskosität ν von Wasser hängt von der Temperatur T und dem Druck p ab, bei Seewasser besteht zudem eine Abhängigkeit vom spezifischen Salzgehalt. Die kinematische Viskosität ν nimmt mit steigender Temperatur stark ab, mit wachsendem Salzgehalt und zunehmenden Druck schwach zu. Um den interessierenden Bereich Reynoldsscher Zahlen abzuschätzen, genügt die Berücksichtigung des Temperatureffekts. In Abb. 6 ist für reines Wasser und Seewasser mit mittlerem Salzgehalt von 35 ‰ die Viskosität ν in Abhängigkeit von der Temperatur T gezeichnet. Seewasser hat einen um etwa 4,6 ‰ höheren kinematischen Viskositätskoeffizienten.

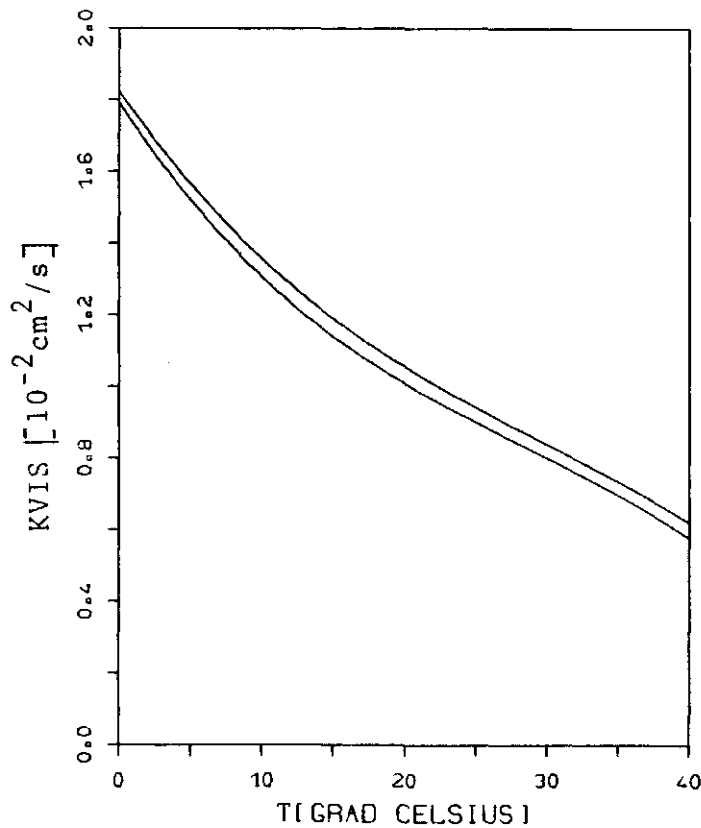


Abb 6 : Kinematische Viskosität ν für reines Wasser und Seewasser. (obere Kurve S = 35 ‰)

Der Temperaturbereich im Ozean liegt etwa zwischen -2°C und 38°C . Die kinematische Viskosität variiert in diesem Bereich zwischen $1,8 \cdot 10^{-2}$ und $0,6 \cdot 10^{-2}$ $[\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}]$. Die nachfolgende Übersicht enthält die wichtigsten Abmessungen der Meßkörper und die zur Bestimmung der Re - Zahl wichtigen Körperlängen d. Es bedeuten :

- d : Länge in Strömungsrichtung (cm)
- b : Breite senkrecht zur Strömungsrichtung (cm)
- h : Höhe (cm)
- A : Spantfläche (m^2)

	d	b	h	A
Käse 450 kp	120	120	60	0,556
Modell K 450	36	36	18	0,051
Käse 320 kp	103,2	103,2	66	0,518
Modell K 320	28	28	18	0,040
Benthos (2)	44,2	90	48	0,45
Benthos (2)*	48	90	44,2	0,35
TR - Thermistor- gerät	12,8	12,8	67,5	0,0426
Aanderaa - Strommesser	12,8	12,8	67,5	0,0426

* bei Einsatz als oberer Auftriebskörper in einer Verankerung

Legt man Geschwindigkeiten von 1 bis 100 (cm s^{-1}) zugrunde, so ergeben sich folgende Re - Zahlenbereiche :

Für die großen Auftriebskörper K 450 und K 320 etwa

$$6 \cdot 10^3 \dots 1,5 \cdot 10^6$$

Für die Benthos - Auftriebskörper

$$2,5 \cdot 10^3 \dots 6 \cdot 10^5$$

Für die Meßgeräte mit ihren kleinen Abmessungen

$$7 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^5$$

Die nachstehende Tabelle zeigt die im Schlepptank bei einer durchschnittlichen Wassertemperatur von 20°C erreichten Re - Zahlen.

K 450	$2,8 \cdot 10^4$	bis	$8,3 \cdot 10^5$
K320	$2,8 \cdot 10^4$	bis	$5,1 \cdot 10^5$
Benthos (2)	$5,0 \cdot 10^4$	bis	$3,2 \cdot 10^5$
Thermistorgerät	$8,2 \cdot 10^3$	bis	$2,6 \cdot 10^5$
A - Strommesser	$1,1 \cdot 10^4$	bis	$2,6 \cdot 10^5$

Die über einen weiten Temperaturbereich und für hohe Geschwindigkeiten für die Verhältnisse im Ozean berechneten Re - Zahlen werden also im Versuch weitgehend realisiert.

Die Widerstandsbeiwerte der Komponenten sind eine Funktion des Anströmwinkels α . Als Folge der Anströmung wird unter Mitwirkung der hydrodynamischen Kräfte bei einer Auslenkung der Verankerung aus der ursprünglich senkrechten Lage Gleichgewicht zwischen den beteiligten Kräften erreicht. Dabei werden auch die in der Verankerung befindlichen Komponenten winkelabhängig angeströmt. Für Seilelemente wählbarer Länge werden die Gleichgewichtsbedingungen erstellt und iterativ gelöst. Nach diesem Konzept werden die Widerstandskräfte am Seilelement in ihre Komponenten normal und tangential zum Seil zerlegt (Abb. 7).

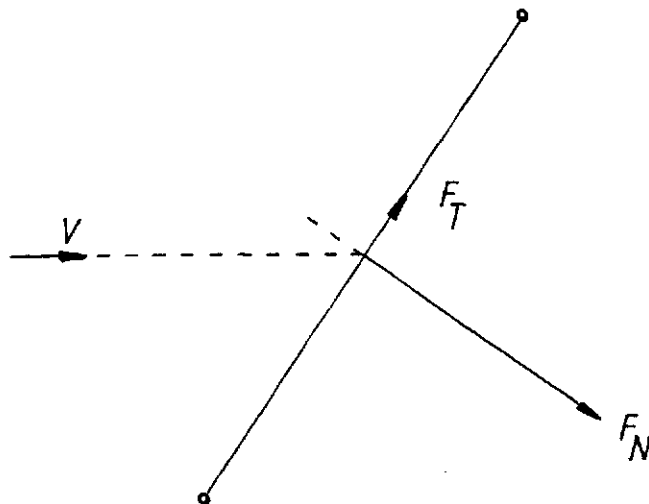


Abb. 7 : Normal- und Tangentialkomponentenzerlegung am Seilelement

Nach zahlreichen experimentellen Ergebnissen wirkt die Kraft in erster Linie in Normalrichtung, die Tangentialkraft ist um eine Größenordnung kleiner und im wesentlichen nur Reibungskraft [vergl. Casarella, Parsons (1970)]. Den beiden Komponenten werden konstante, winkelunabhängige Widerstandsbeiwerte zugeordnet.

Die Zerlegung in die beiden Widerstandsanteile ergibt :

$$\begin{aligned} F_N (\alpha) &= \frac{1}{2} C_N (\alpha) \rho A_N V^2 \\ &= \frac{1}{2} C_{DN} (Re_N) \rho A_N V_N^2 \end{aligned}$$

mit $C_N (\alpha) = C_{DN} \cos^2 \alpha$ (8)

und $Re_N = \frac{V_N d}{\nu}$

$$\begin{aligned} F_T (\alpha) &= \frac{1}{2} C_T (\alpha) \rho A_N V^2 \\ &= \frac{1}{2} C_{DT} (Re_T) \rho A_N V_T^2 \end{aligned}$$

mit $C_T (\alpha) = C_{DT} \sin^2 \alpha$ (9)

und $Re_T = \frac{V_T l}{\nu}$

Diese zweidimensionale Behandlung des Problems setzt voraus, daß sich Normalkraft und Tangentialkraft unabhängig voneinander entwickeln. Eine Übertragbarkeit auf die Verankerungskomponenten endlicher Ausdehnung, wie Auftriebskörper und Meßgeräte, erscheint wegen des hier vorliegenden dreidimensionalen Strömungsproblems nicht gerechtfertigt. Eine Umströmung dieser Körper erfolgt auch über Ober- und Unterseite, so daß auch in tangentialer Richtung Druckwiderstand besteht. Aus diesem Grund wurden winkelabhängige Messungen an den Verankerungskomponenten in einem Bereich von 0 bis 30° eingeplant.

3. Experimentelle Grundlagen

Bei der Messung der Widerstandskraft bei den zu untersuchenden Meßkörpern ging es um die Bestimmung des Gesamtwiderstandes und die nachfolgende Berechnung der Widerstandsbeiwerte nach (7). Eine experimentelle Trennung von Druck- und Reibungswiderstand erfolgte nicht.

3.1 Meßmethoden

Bei der Messung der Gesamtkraft auf einen Widerstandskörper sind zwei Möglichkeiten zu unterscheiden. Die hier angewandte Methode beruht darauf, den Körper im Wasserkanal zu schleppen und die dabei auftretende Widerstandskraft zu messen. Bei der in Windkanälen verwandten Methode wird das Modell festgehalten und einem stationären Luftstrom ausgesetzt.

Vorteile der Schleppmethode liegen darin, daß keine ungleichmäßige Druck- und Geschwindigkeitsverteilung über dem Querschnitt und längs der Achse des Kanals auftritt, so daß entsprechende Korrekturen der später gemessenen Kräfte entfallen [Muttray (1931)]. Zum andern ist die Strömung sehr gleichförmig und ohne aufgeprägte Turbulenz. Nachteile ergeben sich jedoch aus der geringen zur Verfügung stehenden Meßzeit, die von der Schleppgeschwindigkeit und der Länge des Kanals abhängig ist. Daneben sind bei höheren Schleppgeschwindigkeiten die Beschleunigungen hoch, ein Gesichtspunkt, der bei der Konstruktion und Stabilität des Versuchsaufbaus besonders zu berücksichtigen ist.

Die Widerstandskräfte werden unmittelbar am Versuchskörper selbst durch Wägung (Wägungsmethode) gemessen. Eine weitere indirekte Methode besteht darin, die Druck- und Geschwindigkeitsverteilung in der Umgebung des Meßkörpers zu messen und den Strömungswiderstand des Körpers aus dem Impulsverlust der Strömung zu bestimmen. Für die Wägungsmethode ist eine Balanceeinrichtung erforderlich, die die am Meßkörper auftretenden Kräfte aufnimmt und zur Anzeige bringt, ohne daß dabei die Stellung des Körpers in der Strömung verändert wird. Eine hierfür geeignete Waage wurde vom IFS/Hmb zur Verfügung gestellt und wird im experimentellen Teil beschrieben.

Spezielle Aufhängungsorgane bzw. Halterungen, die die auf die Meßkörper wirkenden Kräfte auf die Waage übertragen, mußten geplant werden. Eine solche Halterung muß starr ausgelegt sein und ausreichend dimensioniert, um nicht zu verbiegen. Die Messung der Widerstandskräfte im Schleppkanal wird vor allem durch zwei Faktoren beeinflusst :

- 1) Auch die Halterung erfährt einen Widerstand, und die unmittelbare Nähe zum Meßkörper verfälscht die Widerstandsmessung.
- 2) Der Schleppkanal ist in seinen Abmessungen beschränkt. Die Ausdehnung der Stromlinien um den Meßkörper wird durch den Einfluß der festen Wände begrenzt, was eine Erhöhung des gemessenen Widerstands zur Folge hat.

3.2 Einfluß der Halterung

Die Konzeption geeigneter Halterungen stellt ein wesentliches Problem der Versuchsplanung dar. Die eingeplanten Versuchskörper sind in ihrer Form, Größe und nach ihrem Gewicht sehr unterschiedlich. Um den Meßaufwand zu reduzieren, wurde dennoch eine für alle Versuchskörper geeignete Halterung angestrebt.

Der gemessene Gesamtwiderstand an einem Meßkörper einschließlich der Halterung kann in folgende Anteile zerlegt werden :

$$F_G = F + (F_H + \Delta F + \Delta F_H)$$

Dabei bedeuteten F die Widerstandskraft am Meßkörper und F_H die Widerstandskraft der Halterung. ΔF und ΔF_H sind Interferenzterme, die infolge der Nähe von Halterung und Meßkörper durch gegenseitige Beeinflussung entstehen. Diese Zusatzterme können betragsmäßig sowohl positiv als auch negativ sein [Popow (1958)]. Die Widerstandsmessung muß um die in der Klammer zusammengefassten Terme korrigiert werden, um die Widerstandskraft am Meßkörper zu erhalten. Eine Bestimmung erfolgt im allg. experimentell. Es muß darauf geachtet werden, daß der Widerstand der Halterung möglichst klein bleibt, damit durch die Differenzbildung die Meßgenauigkeit nicht zu stark beeinflußt wird.

Der Widerstand F_H kann durch eine unabhängige Messung der Halterung gewonnen werden, die experimentelle Bestimmung der Interferenzterme gelingt jedoch nur, wenn neben der eigentlichen Messung des Gesamtwiderstands sowohl die Halterung zugleich mit dem Vorhandensein des von der Waage entkoppelten Meßkörpers, als auch der Meßkörper in Gegenwart der von der Waage abgekoppelten Halterung gemessen werden kann. Hierzu ist eine zweite, unabhängig einsetzbare Halterung erforderlich. Durch eine Reihe von Einzelmessungen können die entsprechenden Korrekturglieder gewonnen werden, der Meßaufwand erhöht sich dabei beträchtlich [vergl. Pope, Harper (1966)].

Der Einfluß der Halterung ist besonders groß, wenn die Befestigung der Meßkörper direkt an der Außenfläche der Körper erfolgen muß. Dies ist z. B. bei der Widerstandsmessung einer glatten Kugel der Fall. Die Verankerungskomponenten besitzen dagegen aufgesetzte, bzw. angeschweißte Augösen, mit denen sie bei Einsatz in der Verankerung untereinander verbunden werden. Diese sind auch als Ansatzstellen für die Meßhalterung geeignet. Die Umströmung der Meßkörper wird dadurch wenig beeinflußt, so daß die Interferenzterme als klein angenommen werden können. Eine starre Stange mit entsprechenden Aufsätzen zur Befestigung der Körper an den vorgegebenen Ansatzstellen stellt eine gemeinsame, für alle betrachteten Verankerungskomponenten geeignete Halterungskonzeption dar.

Wenn die Meßstange über eine möglichst große Länge stromlinienförmig verkleidet wird, verringert sich ihr Eigenwiderstand beträchtlich. Wird die Stromlinienverkleidung zudem so entworfen, daß sie selbst nicht mit der Waage verbunden ist (mit innenliegender Aushöhlung und darin frei beweglicher Meßstange), ist nur noch ein geringer Teil der Meßstange unmittelbar der Strömung ausgesetzt. Zudem wird auch der Wellenwiderstand, den die Halterung an der freien Wasseroberfläche aufwirft, wirksam von der Balanceeinrichtung ferngehalten.

Der noch verbleibende Widerstandsanteil des Halterwiderstands kann durch eine separate Messung der Halterung ohne eingesetzten Meßkörper erfolgen und von der Gesamtwiderstandsmessung des Meßkörpers subtrahiert werden. Eine Vergleichsmessung mit einem bekannten Meßkörper zeigt, wie genau das gewählte Meßverfahren ist. Zu diesem Zweck wurde ein Standardzylinder mit einem Längen - Seitenverhältnis von 1 : 5 bereitgehalten und mit demselben Verfahren gemessen. Die gewonnenen Meßwerte wurden mit den von Muttray angegebenen Werten verglichen (vergl. Seite 14).

3.3 Kanaleffekt

Die festen Wände des begrenzten Schlepkanals haben zur Folge, daß die Stromlinien in der Umgebung des Meßkörpers zusammengedrängt werden (Abb. 8). Entscheidend ist hierbei das Verhältnis der größten Spantfläche des Meßkörpers, senkrecht zur Anströmrichtung, zum Kanalquerschnitt.

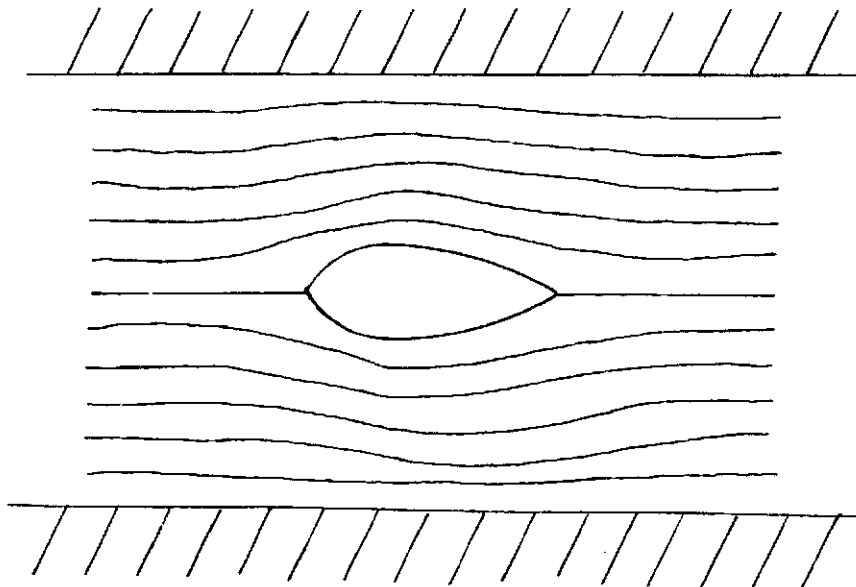


Abb 8 : Verengung der Stromlinien durch feste Wände

Der Kanaleffekt vergrößert die für den Widerstand maßgebende Stromgeschwindigkeit, so daß dieser zu groß gemessen wird. In jedem beliebigen Punkt der Körperoberfläche kann eine Zusatzgeschwindigkeit u angenommen werden, so daß der Widerstand, den der Körper in der begrenzten Flüssigkeit erfährt, um den Faktor $n = \left(\frac{V+u}{V}\right)^2$ größer ist als in unbegrenzter Flüssigkeit.

Die Meßergebnisse können in der Weise korrigiert werden, daß die Geschwindigkeit V_∞ bestimmt wird, die der gemessenen Widerstandskraft bei unbegrenzter Umströmung entsprechen würde. Bedeutet V die Anströmgeschwindigkeit im Versuch, so muß ein Korrekturfaktor $\epsilon_k(V)$ gefunden werden, mit dem

$$V_\infty = V \cdot \epsilon_k(V) \quad (10)$$

wird.

Das hier angewendete Verfahren geht auf eine von Kreitner entwickelte rein hydraulische Betrachtung zurück [vergl. Schuster (1955)]. Der von ihm abgeleitete Korrekturfaktor lautet :

$$\epsilon_k(V) = \frac{1-F_h^2}{1-F_h^2 - m} \quad (11)$$

wobei $F_h = \frac{V}{\sqrt{gh}}$ und $m = \frac{A}{f}$ ist.

h : Wassertiefe im Kanal

A : größte Spantfläche des Körpers

f : Kanalquerschnitt

4. Messungen und Ergebnisse

4.1 Versuchsaufbau

Die durchgeführten Messungen basieren auf der in Kap. 3.1 beschriebenen Wägungsmethode im Schleppkanal. Erforderlich ist eine adaequate Balanceeinrichtung zur Registrierung der Kräfte sowie eine für alle Meßkörper geeignete starre Halterung. Abb. 9 zeigt schematisch die Einzelteile des Versuchsaufbaus, wie sie nachfolgend beschrieben werden.

Schleppversuche / Schleppkanal

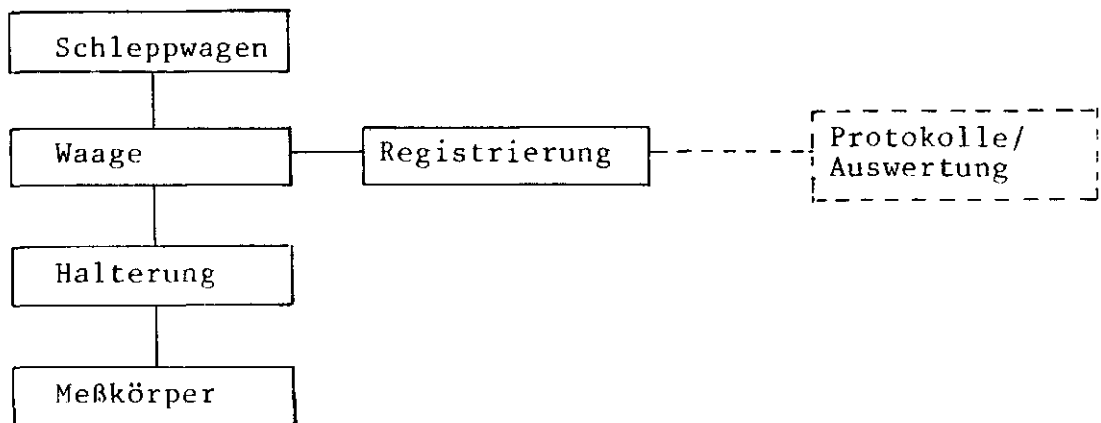


Abb 9 : Komponenten des Versuchsaufbaus

4.2 Schleppkanal

Die am IFS/Hmb vorhandene Schlepprinne ist 2,10 m breit, 1,10 m tief und 35 m lang. Die Wassertiefe während der Messungen betrug etwa 1,00 m, was einen effektiven Tankquerschnitt von 2,10 m² ergibt. Über der Schlepprinne befindet sich der über Transformatoren regelbare Schleppwagen, der mit Geschwindigkeiten von ca. 0,05 bis 2,7 ms⁻¹ gefahren werden kann. Eine 10 m lange Meßstrecke wird vom Schleppwagen nach Beschleunigung auf der Anfahrstrecke mit konstanter Geschwindigkeit durchfahren. Beim Eintritt in die Meßstrecke wird über Lichtschranken eine Quarzuhr ausgelöst, der Stop der Uhr erfolgt nach Passieren der Meßstrecke. Über die gemessene Fahrzeit und die Länge der Meßstrecke kann die genaue Schleppgeschwindigkeit in der Meßstrecke berechnet werden. Mit einem Flüssigkeitsthermometer wird die während der Messungen bestehende Wassertemperatur bestimmt.

4.3 Kraftmessung

Zur Registrierung der Kräfte wurde vom IFS/Hmb eine 3-Komponentenwaage zur Verfügung gestellt. Die Waage wird fest im Schleppwagen montiert und in Fahrtrichtung ausgerichtet. Nach der Ausrichtung im Schleppkanal legen die drei Komponenten der Waage ein beckenparalleles Achsensystem fest, dessen Achsen mit x,y,z bezeichnet werden. Die Lage des Koordinatensystems ist aus Abb. 10 ersichtlich.

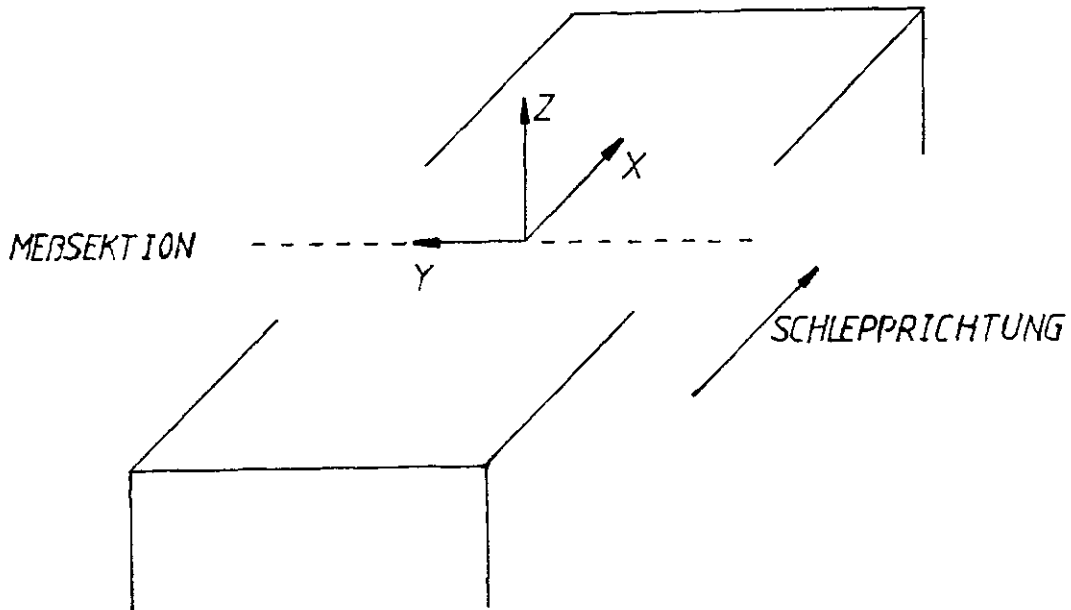


Abb. 10 : Festlegung der Koordinaten in der MeBsektion

Mit der 3 - Komponentenwaage ist die unabhängige Registrierung zweier orthogonaler Kräfte in x- bzw. y-Richtung sowie eines Drehmomentes in z-Richtung möglich. Die Aufnahme der für die Messungen wesentlichen Widerstandskräfte erfolgt in der x- Komponente. Der geschleppte Meßkörper erfährt eine Widerstandskraft entgegen der Schlepprichtung, als negative x Anzeige wird die entsprechende Kraft F_x ablesbar.

Eine Registrierung F_y hat die Bedeutung einer Querkraft senkrecht zur Anströmrichtung. Die Möglichkeit des Auftretens von Querkraften ist auf die Fälle beschränkt, in denen die Umströmung des Meßkörpers unsymmetrisch erfolgt. Dies ist an einem schräg angeströmten zylindrischen Körper nach Abb. 11 der Fall.

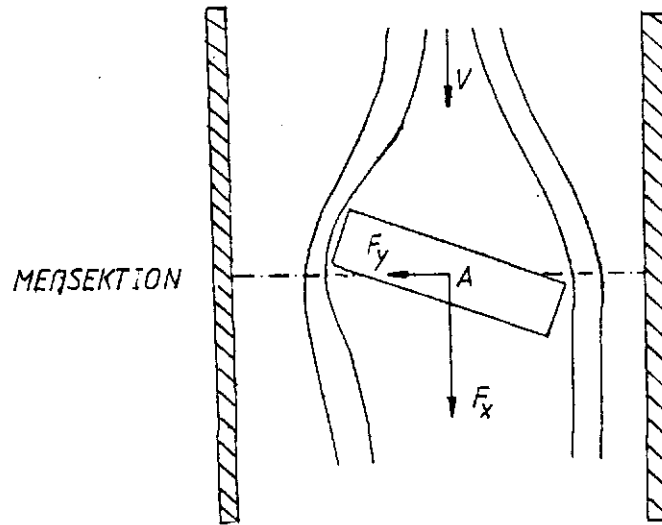


Abb. 11 : Querkraft F_y an schräg angeströmten zylindrischen Körper.

Zur Messung der Winkelabhängigkeit der Widerstandsbeiwerte wurde das Thermistorgerät in der abgebildeten Weise in die Meßsektion eingebaut und um den Punkt der Aufhängung A winkelabhängig gedreht. Die als Folge unsymmetrischer Druckverteilung auftretende Querkraft wird in der y- Anzeige abgelesen.

Bei nicht zentraler Aufhängung des Meßkörpers wird die Kraftverteilung relativ zum Angriffspunkt der Halterung unsymmetrisch (Abb. 12). Relativ zum Aufhängepunkt resultiert ein Drehmoment M_z und eine entsprechende Ablesung in der z- Komponente.

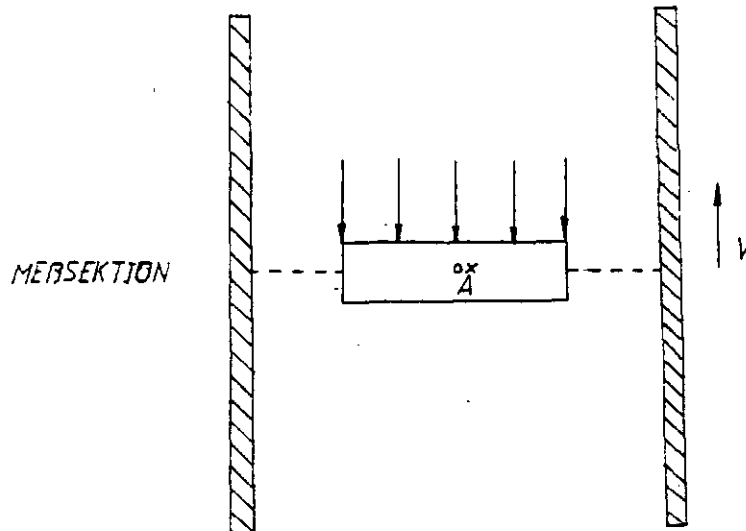


Abb. 12 : Nicht zentrale Aufhängung eines zylindrischen Meßkörpers

Ablesungen in der z- Komponente erwiesen sich als unbedeutend, da in allen Fällen der natürliche Angriffspunkt der Verankerungskomponenten für deren Befestigung in der Verankerung als Angriffspunkt der Halterung bei den Messungen genutzt wurde. 1)

Der mechanische Aufbau der Waage ist in den Abb. 13 und 14 vereinfacht dargestellt.

Mit Hilfe der Plattform (1) wird die gesamte Waage fest am Schleppwagen montiert. Teil B der Waage ist starr mit (1) verbunden, Teil A befindet sich in einer pendelartigen Aufhängung und ist gegenüber B verschiebbar. Die drei Freiheitsgrade der Bewegung (bzw. Verschiebung) entsprechen den drei registrierbaren Komponenten der Kraftmessung. Die Kraftaufnahme erfolgt über induktive Wegaufnehmer. Infolge des Einwirkens einer mechanischen Kraft wird A gegenüber B verschoben, was seinerseits eine Verschiebung eines beweglichen Eisenkerns in der Spulenwicklung der induktiven Wegaufnehmer zur Folge hat. Die induktiven Wegaufnehmer liefern

1) Anmerkung: Das Thermistorgerät wurde nach der in Abb. 10 dargestellten Weise eingebaut. Durch Verschieben von A konnte aber erreicht werden, daß z- Registrierungen minimal blieben.

proportional zur einwirkenden mechanischen Kraft ein Spannungssignal, welches über Trägerfrequenz-Meßverstärker der Fa. Hottinger - Baldwin (KWS - Meßverstärker) proportional verstärkt wird und auf einem Zeigerinstrument als Zeigeraus-
schlag ablesbar wird. Jede Komponente ist mit jeweils einem dieser Meßverstärker gekoppelt, so daß eine unabhängige Registrierung gewährleistet ist.

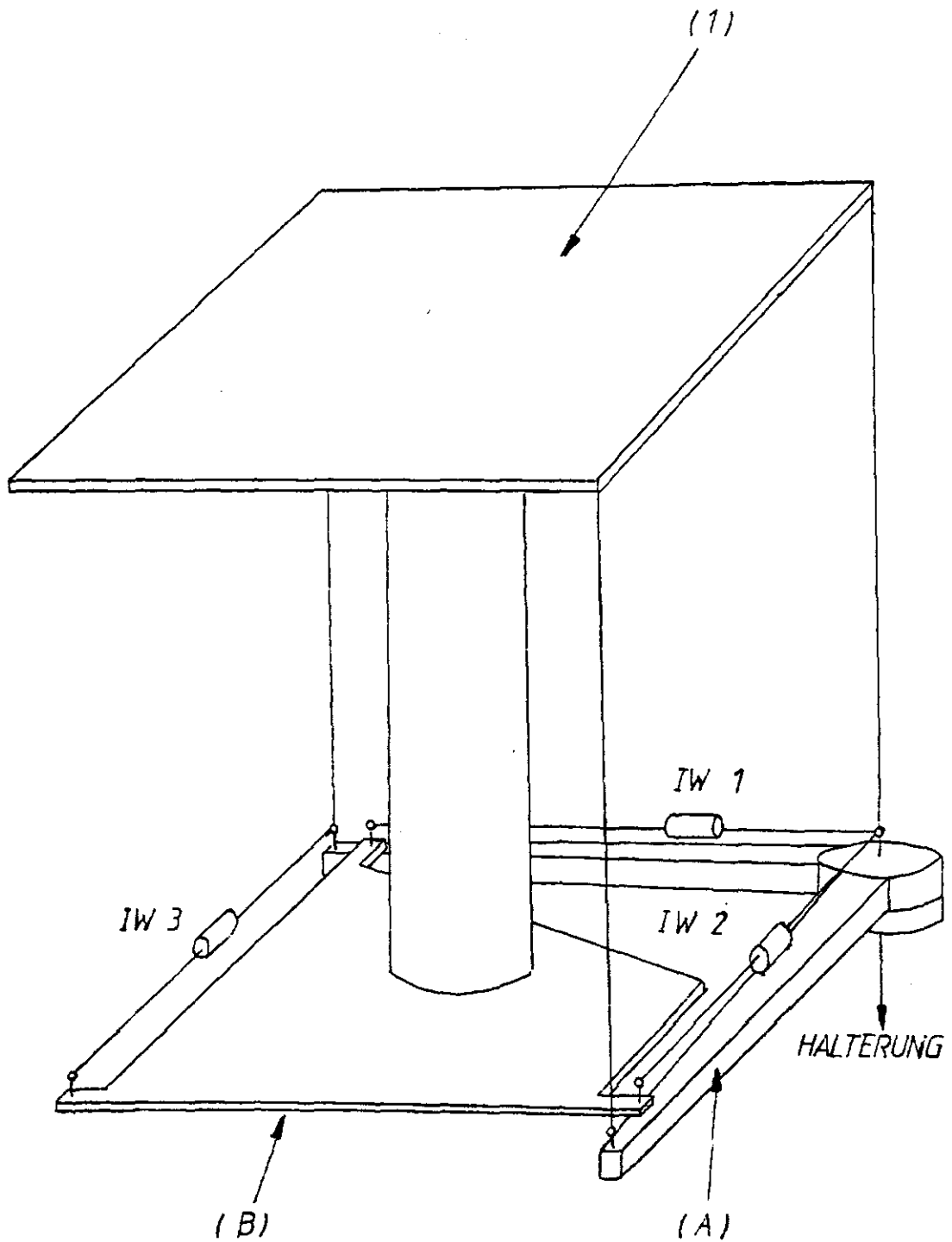


Abb. 133 : 33 - Komponenten - Waage

Nach Abb. 14 erfolgt die Registrierung von F_x über IW1, F_y über IW2 und M_z über IW3. Die induktiven Wegaufnehmer (IW) haben einen max. linearen Meßweg von + 1mm, was einer Maximalbelastung von 30 kp entspricht.

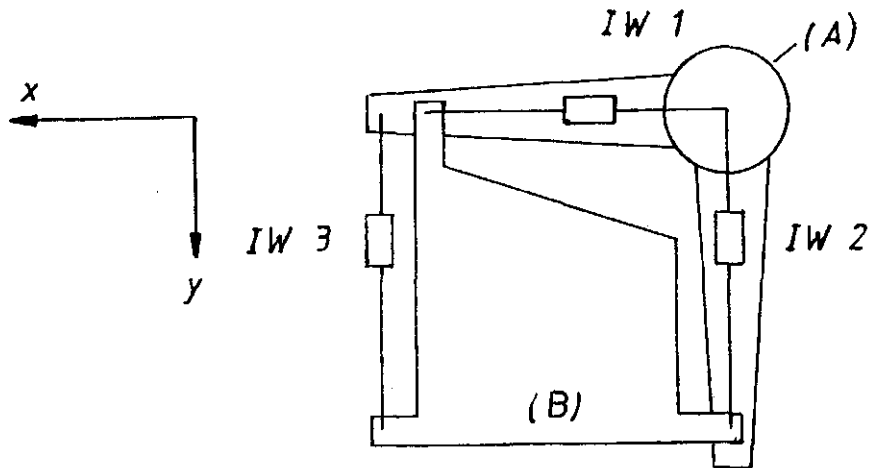


Abb. 14 : Schematische Draufsicht

4.4 Befestigung der Meßkörper

In Abb. 15 ist die profilartige Verkleidung mit der innenliegenden frei beweglichen Meßstange dargestellt.

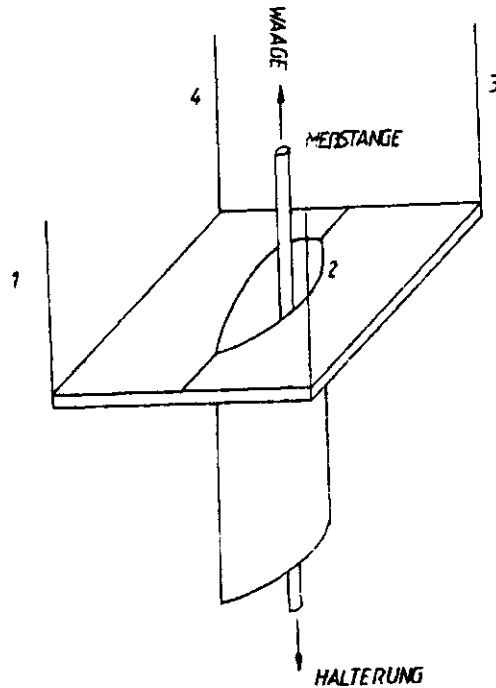


Abb. 15 : Hauptteil der Halterung und Stromlinienverkleidung

Am Gestänge 1-4 ist das Profil direkt mit dem Schleppwagen verbunden, so daß nach der in Kap 3.2 beschriebenen Art ein großer Teil der Meßstange von der Strömung abgeschirmt ist. Die Meßstange wird mit ihrem oberen Teil in einen verschraubbaren Konus von Teil A der Waage eingeführt und befestigt. Bei der Schleppmethode werden die Meßkörper unter Wasser durch den Kanal geschleppt. Notwendigerweise ergeben sich große Stangenlängen für die Verbindung zu der unter dem Schleppwagen montierten Waage. Um eine ausreichende Stabilität auch bei hohen Anfahrbeschleunigungen zu gewährleisten und eine Verfälschung der Kraftmessung durch Verschiebungen und Verformungen im System der Aufhängung zu vermeiden, wurde die Meßstange aus Rundstahl mit 24 mm Durchmesser angefertigt. Am unteren Ende der Meßstange wurden geeignete Aufsätze für die Befestigung der Einzelkörper aufgeschweißt. Für jeden Meßkörper wurde eine solche Meßstange mit entsprechendem für den jeweiligen Meßkörper geeigneten Aufsatz angefertigt. Die Länge der Meßstangen ergab sich aus der Größe der Meßkörper unter dem Gesichtspunkt, die Meßkörper so in der Meßsektion zu fixieren, daß ihre Mittellinie etwa mit der halben Wassertiefe zusammenfiel.

4.5 Messungen und Auswertung

Die Messungen wurden in zwei Meßphasen in der Zeit vom 14.6. - 4.7.83 und 7.11. - 12.11.83 durchgeführt.

1. Meßphase : Widerstandsmessungen an den beiden Auftriebskörpermodellen und den Meßgeräten - Thermistorgerät und Aanderaa - Strommesser. Untersuchungen der Winkelabhängigkeit der Widerstandsbeiwerte am Thermistorgerät und am K 450 Auftriebskörpermodell.

2. Meßphase : Widerstandsmessungen an den Benthos - Auftriebskörpern und Vergleichsmessung mit dem Standardzylinder

Die aus Gründen der Terminplanung notwendig gewordene Aufteilung bot die Möglichkeit, anhand erster Ergebnisse den Versuchsaufbau zu überprüfen und Änderungen oder Nachfolgemessungen zu berücksichtigen. Eine solche Notwendigkeit ergab sich allerdings nicht, da sich das Versuchskonzept für die Durchführung der geplanten Messungen als geeignet erwies.

Der experimentelle Teil der Arbeit erstreckt sich neben dem Einbau und Ausrichten der Versuchsaappatur im wesentlichen auf die folgenden Gesichtspunkte :

- a) Eichungen
- b) Messung der Kräfte bei verschiedenen Geschwindigkeiten (geschwindigkeitsabhängige Einzelmessungen)
- c) Messung der Kräfte in Abhängigkeit des Anströmwinkels (winkelabhängige Einzelmessungen)
- d) b) und c) für die einzelnen Verankerungskomponenten
- e) geschwindigkeitsabhängige Vergleichsmessung mit Standardzylinder

Die Auswertung enthält die Bestimmung der Eichrelationen sowie die Berechnung der Widerstandsbeiwerte der Verankerungskomponenten aus den Einzelmessungen unter Berücksichtigung der auftretenden Meßfehler.

4.5.1 Fehlerrechnung

Fehlerquellen der Messungen können neben zufälligen Meßfehlern und Ablesefehlern auch durch systematische Beeinflussung der Meßergebnisse infolge ungenauen Ausrichtens der Waage im Schlepptank, der Nähe des Stromlinienprofils zum Meßkörper und den allgemeinen Versuchsbedingungen im Schlepptank gegeben sein. Eine Fehlerrechnung nach dem Gausschen Prinzip der Minimierung der Fehlerquadratsumme berücksichtigt zufällige Meßfehler und Ablesefehler, mögliche systematische Fehler können durch die Vergleichsmessung mit dem Standardzylinder aufgedeckt werden. Die Formeln für die Berücksichtigung von Meßfehlern nach dem Gausschen Verfahren bei Mittelwertbildung und Ausgleichsrechnung sind nachfolgend aufgeführt :

Liegen n unabhängige Einzelmessungen einer Größe x vor, die mit verschiedener Genauigkeit gemessen wurden, so errechnet sich der Mittelwert nach

$$\bar{x} = \frac{[px]}{[p]} \quad (F1)$$

mit Gewichtungsfaktoren p_i ; entsprechend der Genauigkeit der

Einzelmessungen. Dabei bedeutet $[px] = \sum_{i=1}^n p_i x_i$

(Gaussche Schreibweise).

Die mittleren quadratischen Fehler der Einzelmessungen ergeben sich aus

$$\Delta x_i = \sqrt{\frac{[pvv]}{p_i(n-1)}} \quad (F2)$$

mit den Abweichungen

$$v_i = x_i - \bar{x} \quad (F3)$$

Die Standardabweichung des Mittelwertes ist

$$\Delta \bar{x} = \sqrt{\frac{[pvv]}{[p](n-1)}} \quad (F4)$$

Kann zwischen n-mal mit unterschiedlicher Genauigkeit gemessenen Meßpaare x, y ein funktionaler, linearer Zusammenhang angenommen werden derart, daß

$$y_i = ax_i + b \quad (F5)$$

ist, wird nach Einführung der Transformation

$$\tilde{x}_i = x_i - \frac{[px]}{[p]} = x_i - x_0 \quad (F6)$$

$$\tilde{y}_i = y_i - \frac{[py]}{[p]} = y_i - y_0 \quad (F7)$$

erreicht, daß die ausgleichende Gerade durch den Schwerpunkt $S_0: (x_0, y_0)$ des gemessenen Punktsystems verläuft.

Damit wird dann

$$a = \frac{[p\tilde{x}\tilde{y}]}{[p\tilde{x}\tilde{x}]} \quad (F8)$$

und der Abschnitt auf der y-Achse $b_0 = 0$.

Die mittleren quadratischen Fehler $\Delta a, \Delta b$ und Δb_0 errechnen sich nach den folgenden Formeln :

$$\Delta a = \frac{m_0}{\sqrt{[p\tilde{x}\tilde{x}]}} \quad (F9)$$

$$\Delta b^2 = m_0^2 \left(\frac{1}{[p]} + \frac{x_0^2}{[p\tilde{x}\tilde{x}]} \right) \quad (F10)$$

$$\Delta b_0 = \frac{m_0}{\sqrt{[p]}} \quad (F11)$$

mit

$$m_0^2 = \frac{[p\tilde{v}\tilde{v}]}{n-2} \quad (F12)$$

und

$$[p\tilde{v}\tilde{v}] = \frac{[p\tilde{x}\tilde{x}][p\tilde{y}\tilde{y}] - [p\tilde{x}\tilde{y}]^2}{[p\tilde{x}\tilde{x}]} \quad (F13)$$

Für eine Größe z , für die eine funktionale Abhängigkeit

$$z = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$$

besteht und die Größen x_k ($k = 1, \dots, k$) einzeln meßbar sind, gilt für den mittleren quadratischen Fehler Δz von z

$$\Delta z = \pm \sqrt{\sum_{k=1}^k \left(\frac{\partial f}{\partial x_k} \cdot \Delta x_k \right)^2} \quad (F14)$$

(F 14) heißt Fehlerfortpflanzungsgesetz.

Die bei den Eichungen bestimmten Eichrelationen können, den Formeln (F4) - (F13) folgend, in der allg. Form

$$X = a F_x + b \quad \text{bzw.} \quad F_x = \frac{1}{a} (X-b) \quad (\text{F15})$$

mit $b = 0$ angegeben werden.

Dann wird mit Fehlergrößen Δa , Δb_0 und ΔX nach (F14)

$$\Delta F_x = \frac{1}{a} \sqrt{X^2 \cdot \left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2 + \Delta X^2 + \Delta b_0^2} \quad (\text{F16})$$

für die Standardabweichung der aus den Skalenablesungen X der Messungen zu bestimmenden Kraft F_x .

Für die Berechnung der Widerstandsbeiwerte entsprechend Formel (7) muß nach (F14) bei Fehlergrößen ΔF_x , $\Delta \xi$ und ΔV mit

$$\frac{\Delta C_D}{C_D} = \sqrt{\left(\frac{F_x}{F_x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \xi}{\xi}\right)^2 + 2\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^2} \quad (\text{F17})$$

gerechnet werden. Wegen der Genauigkeit der Geschwindigkeitsbestimmung von $\Delta V = + 0,01 \text{ cm s}^{-1}$ für eine Fahrt und wegen $\Delta T = + 0,1^\circ \text{C}$ sind $\Delta \xi / \xi$ und $\Delta V / V$ um ein bis zwei Größenordnungen kleiner als $\Delta F_x / F_x$, so daß ΔC_D mit

$$\Delta C_D = C_D \frac{\Delta F_x}{F_x} \quad (\text{F18})$$

berechnet werden kann.

4.5.2. Eichungen

Die Eichung der Kraftmesseinrichtung war erforderlich, um die in Skalenteilen [SKT] erfolgte Ablesung der Meßgröße in Einheiten der Kraft [kp] umrechnen zu können. Zugleich wurden Linearität der Anzeige, Ansprechvermögen und Driftverhalten geprüft.

Jede Komponente wurde nach Nullabgleich am Meßverstärker bis zur Maximallast (= max. erwartete Belastung) mit kalibrierten Eichgewichten belastet und die Meßgröße in [SKT] am Meßverstärker abgelesen. Die Orthogonalität der Komponenten untereinander war gegeben, da bei Belastung einer Komponente die Anzeige der anderen null blieb.

Die Genauigkeit der Eichungen ist durch den Nullabgleich, die Genauigkeit der Ablesungen und die Qualität der Eichgewichte bestimmt. Die Eichrelationen sind mittels linearer Regression, den Formeln (F5) - (F13) aus Kap. 4.6 entsprechend, berechnet. Die berechneten Eichkurven für die einzelnen Komponenten und die Bereiche am Meßverstärker sind für beide Meßphasen in der nachfolgenden Übersicht angegeben.

Eichrelationen (1. Meßphase)

x- Komponente

MV 100	$X = (-0,151 \pm 0,002)$	F_{x+}^{\pm}	0,05
MV 200	$X = (-0,152 \pm 0,002)$	F_{x-}^{\pm}	0,3
MV 500	$X = (-0,152 \pm 0,002)$	F_{x+}^{\pm}	0,5
MV 1000	$X = (-0,153 \pm 0,002)$	F_{x-}^{\pm}	0,8
MV 2000	$X = (-0,152 \pm 0,002)$	F_{x+}^{\pm}	1,5

y- Komponente

MV 100	$Y = (-0,055 \pm 0,002)$	F_{y+}^{\pm}	0,03
MV 200	$Y = (-0,055 \pm 0,002)$	F_{y-}^{\pm}	0,3

Eichrelationen (2. Meßphase)

x-Komponente

MV 100	$X = (-0,154 \pm 0,002)$	F_{x+}^{\pm}	0,06
MV 200	$X = (-0,155 \pm 0,002)$	F_{x-}^{\pm}	0,3
MV 500	$X = (-0,155 \pm 0,002)$	F_{x+}^{\pm}	0,5
MV 1000	$X = (-0,155 \pm 0,002)$	F_{x-}^{\pm}	0,8
MV 2000	$X = (-0,154 \pm 0,002)$	F_{x+}^{\pm}	1,5
MV 5000	$X = (-0,155 \pm 0,002)$	F_{x-}^{\pm}	3,5

y- Komponente

MV 100	$Y = (-0,054 \pm 0,002)$	F_{y+}^{\pm}	0,04
MV 200	$Y = (-0,054 \pm 0,002)$	F_{y-}^{\pm}	0,3

X [SKT]: Skalenablesung am Meßverstärker im Meßbereich MV

$F_x/10^{-3} \text{kp}$: Komponente der Kraft in x- Richtung

$F_y/10^{-3} \text{kp}$: Komponente der Kraft in y- Richtung

Die Linearitätsabweichung liegt bei etwa 1 %. Die Auflösungsgrenze bei größter Verstärkung im Meßbereich MV 100 liegt bei $\pm 3 \cdot 10^{-4}$ kp.

Die Eichungen wurden jeweils nach Ablauf der Messungen wiederholt, um die Stabilität der Eichrelationen zu überprüfen. Die Konstanz der Anzeige innerhalb der ausgewiesenen Fehlergrenzen wurde dabei nachgewiesen.

4.5.3 Durchführung der Messungen

Bei ersten Probemessungen zeigten sich in der Anzeige an den Skaleninstrumenten der Meßverstärker Schwingungen, die auf unruhigen Lauf des Schleppwagens zurückzuführen waren. Es bestand die Schwierigkeit, den Mittelwert der Anzeige optisch genau zu bestimmen und kleine Abweichungen zu erkennen. Aus diesem Grunde wurden die Meßgrößen der x- und y-Komponente neben der optischen Ablesung an den Zeigerinstrumenten zusätzlich mit einem XYT - Schreiber aufgezeichnet. Mittels einer internen Kalibriereinrichtung an den Meßverstärkern konnten die Schreiberaufzeichnungen auch auf Teile des jeweils eingestellten Bereichs am Meßverstärker geeicht werden und so die Genauigkeit der Ablesung erhöht werden. Die Mittelung der überlagerten Schwankungen wurde mit Hilfe der Schreiberregistrierungen erleichtert. Zu Beginn der Messungen wurde für jeden Meßkörper eine Reihe von Geschwindigkeiten festgelegt, um bei der durchschnittlichen Wassertemperatur von 20°C im Schleppkanal die in Kap. 2.6 angesprochenen Bereiche Reynoldsscher Zahlen weitgehend zu realisieren. Um im Sinne der Gausschen Methode eine Fehlerrechnung durchführen zu können, wurde die Messung bei jeder Geschwindigkeit viermal wiederholt. Es wurden bei jedem Meßkörper ca. 15 Geschwindigkeiten gefahren, so daß für jede Meßreihe etwa 60 Fahrten erforderlich waren.

4.5.4 Auswertung der Messungen

Die Einstellung der Fahrtgeschwindigkeit muß vor jeder Fahrt erneut erfolgen, so daß bei der Wiederholung einer Fahrt die Geschwindigkeit nicht genau der vorhergehenden Messung entspricht. Es ergaben sich bei viermaliger Wiederholung einer Messung vier Meßwerte, die sich bei aufeinanderfolgenden Geschwindigkeiten in ansteigender Reihe anordnen lassen.

Entsprechend dem nachstehenden Beispiel wird die Meßgröße aus aus der für jede Fahrt vorliegenden Schreiberaufzeichnung durch abschnittsweise Mittelung der Schwankungsamplituden und anschließende Mittelung über die Gesamtlänge der Schreiberaufzeichnung in K - Einheiten (Δmm) auf dem Schreiberpapier gewonnen. Eine Standardabweichung des so bestimmten Mittelwerts errechnet sich nach (F4) aus der Streuung der abschnittsweise gewonnenen Mittelwerte unter Berücksichtigung von Gewichtsfaktoren, die sich aus den Teillängen der Einzelmittelwerte über die Gesamtlänge der Schreiberaufzeichnung ergeben.

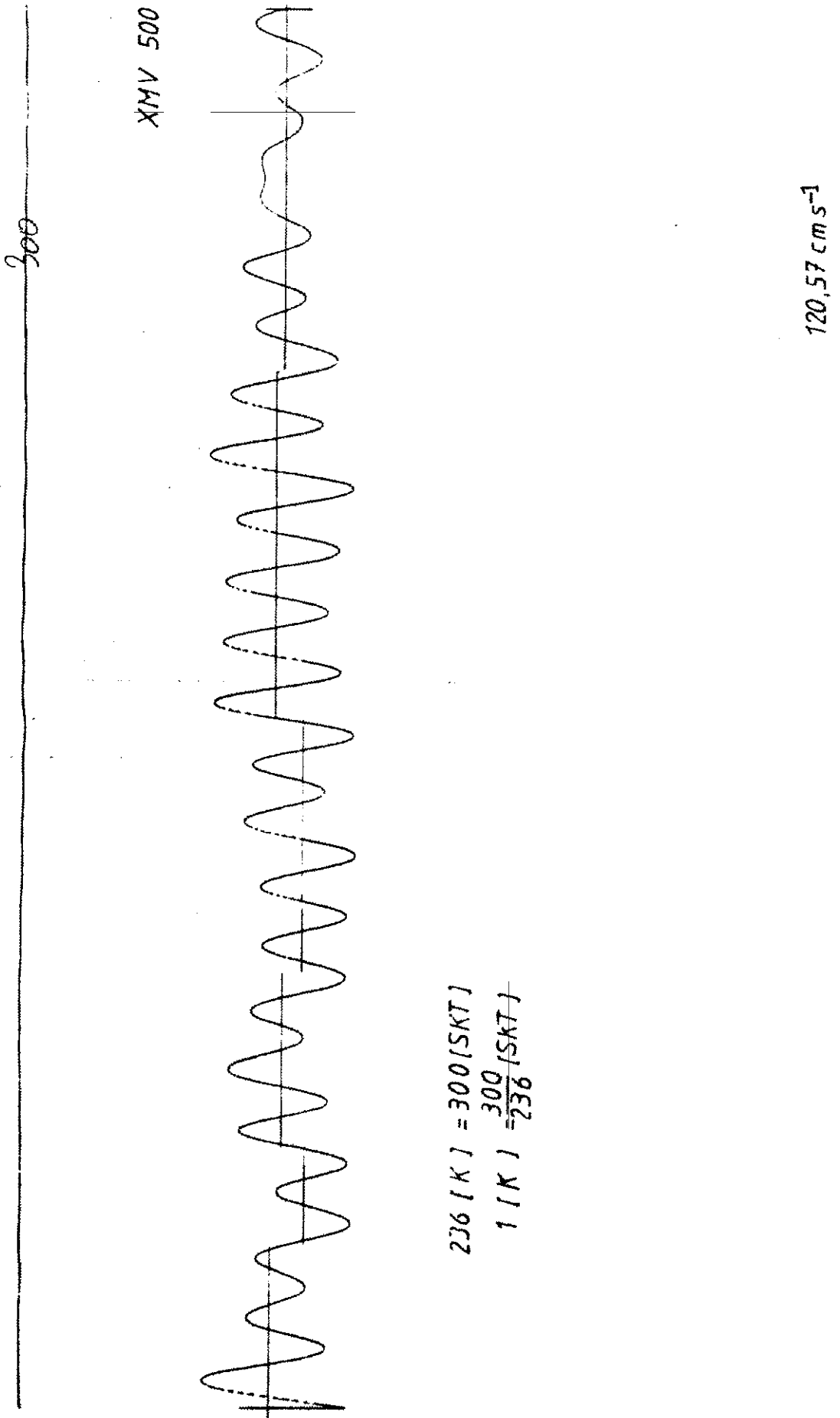


Abb. 16 : Beispiel einer Schreiberaufzeichnung für den v ...
Meßkörper bei 120 cm s⁻¹

Der weitere Gang der Auswertung mag an einem Beispiel erläutert werden :

Als Ergebnis der vier Schreiberaufzeichnungen bei der Geschwindigkeitstufe von 120 cm s^{-1} ergaben sich beim K 450 - Auftriebskörpermodell folgende vier Meßwerte :

$V_i / [\text{cm s}^{-1}]$	$X_i / [\text{K}]$
120,05	166 ± 2
120,31	168 ± 2
120,57	169 ± 2
120,60	171 ± 2

Als Mittelwert wird der gewichtete Schwerpunkt einer durch die vier Meßwerte gelegten Geraden nach (F6) und (F7) berechnet. Die Standardabweichung ergibt sich aus (F11). Im K - System der vorliegenden Schreiberaufzeichnungen ergibt sich :

$\bar{V} / [\text{cm s}^{-1}]$	$\bar{X} / [\text{K}]$
120,38	$168,6 \pm 0,45$

Die Umrechnung entsprechend des Eichfaktors der Schreiberaufzeichnungen mit $X/[\text{K}] = \frac{300}{236} [\text{SKT}]$ im vorliegenden Fall ergibt die Meßgröße in [SKT] mit :

$$\bar{X} = 214,3 \pm 0,6 [\text{SKT}]$$

Die Genauigkeit der Einstellung der Eichgrenzen für die Schreiberaufzeichnung ist von der Ablesegenauigkeit der Skala im eingestellten Meßbereich am Meßverstärker abhängig. Die Genauigkeit der Ablesung am Meßverstärker beträgt $+ 0,5 \%$ des Vollausschlags, im vorliegenden Fall im Meßbereich MV 500 entsprechend $+ 2,5 [\text{SKT}]$. Der auf die Gesamtbreite der Schreiberaufzeichnung zwischen oberer und unterer Eichgrenze bezogene Eichfehler wird prozentual auf die in [K]- Einheiten vorliegende Meßgröße umgerechnet und mit $\Delta X'$ angegeben.

$\bar{V} / [\text{cm s}^{-1}]$	$\bar{X} \pm X/[\text{SKT}]$	$\Delta X'$
120,38	$214,3 \pm 0,6$	$\pm 2,3$

Die Umrechnung in Einheiten der Kraft geschieht mit Hilfe der Eichrelationen aus Kap. 4.7, die Berechnung des Widerstandsbeiwertes erfolgt nach Formel 7. Der zu berücksichtigende Meßfehler ergibt sich aus dem Fehlerfortpflanzungsgesetz nach Formel (F16) und (F18).

Die nach dem vorliegenden Meßverfahren gewonnenen Widerstandsbeiwerte können mit einer Genauigkeit von etwa 3 % angegeben werden. Durch die im einzelnen zu berücksichtigenden Korrekturen für den Halterwiderstand und den Kanaleffekt wird der Meßfehler geringfügig größer.

5.0 Geschwindigkeitsabhängige Einzelmessungen

Im folgenden werden die Versuchsergebnisse der Widerstandsmessungen und die nach dem in Kap. 4.9 angesprochenen Verfahren abgeleiteten Widerstandsbeiwerte für die einzelnen Verankerungskomponenten der Versuchsreihe angegeben.

5.1 Auftriebskörpermodelle K 450 und K 320

Die Meßkörper K 450 und K 320 stellen verkleinerte Modelle der Käse-Auftriebskörper mit 450 und 320 kp Auftrieb dar. Die Meßstange konnte problemlos an den nachgebildeten aufgeschweißten Augösen an der Unerseite der Meßkörper erfolgen. Durch diese Art der Befestigung ist die Unterseite der Modelle nach oben gerichtet, was an der Art der Umströmung nichts ändert. Relativ zur Balanceeinrichtung war aber eine zentrale Aufhängung gegeben, so daß eine symmetrische Umströmung der Versuchskörper gewährleistet war und keine ungleichmäßige Kraftverteilung relativ zum Aufhängepunkt bestand. Aus diesem Grund ergaben sich nur Registrierungen in der x-Komponente, der Größe der auftretenden Widerstandskräfte entsprechend. Abb. 17 zeigt schematisch den eingebauten Meßkörper in der Meßsektion.

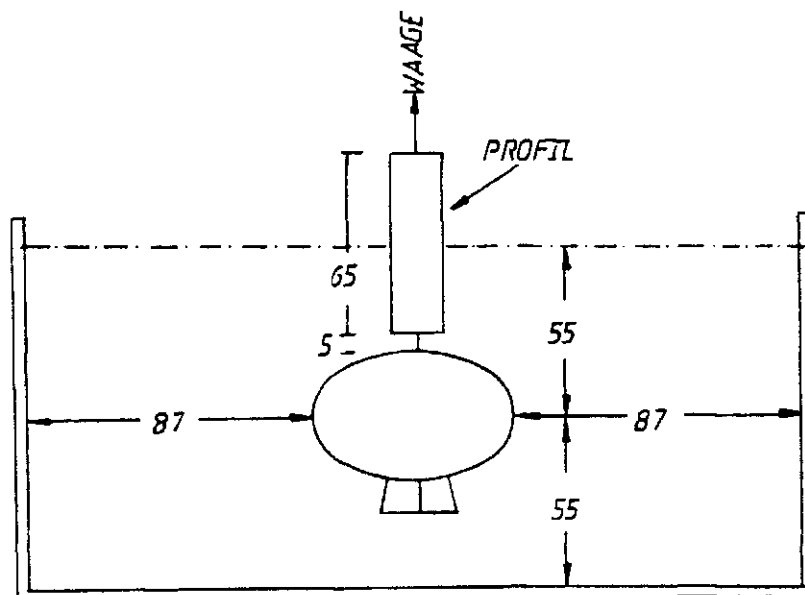


Abb. 17 : Meßkörper K 450 im Tank, Abmessungen [cm]

Der Abstand des Stromlinienprofils zum Meßkörper betrug 5 cm. Damit waren 5 cm der Meßstange der Strömung frei ausgesetzt. Eine dem Eigenwiderstand des freiliegenden Teils der Meßstange entsprechende Kraft ist den Meßergebnissen als Halterwiderstand überlagert, der bei ausgebautem Meßkörper selbst geschwindigkeitsabhängig gemessen wurde. Ein geringerer Profilabstand vermindert zwar die Größe der am freiliegenden Teil der Meßstange auftretenden Kraft, jedoch war bei geringerem Abstand zum Meßkörper eine zunehmende Beeinflussung der Umströmung des Meßkörpers im Sinne der unter 3.3 beschriebenen Interferenzanteile der Widerstandsmessung zu erwarten. Eine Optimierung des Profilabstandes zwischen kleinstmöglichem Halterwiderstand und geringstem Interferenzeinfluß durch systematische Variation des Abstandes erwies sich als nicht durchführbar, die Änderungen in der Registrierung der x-Komponente waren zu klein, um innerhalb der Meßfehler auflösbar zu sein.

Die Ergebnisse der Kraftmessung der beiden Auftriebskörpermodelle, sowie die Größe des Halterwiderstandes nach Tab. 1 (Tabellenanhang) sind in Abb. 18 wiedergegeben. Bei Geschwindigkeiten unter 40 cm s^{-1} blieben die an der Meßstange auftretenden Kräfte innerhalb der Fehlergrenzen. Der Halterwiderstand bleibt klein und macht ca. 5 % der Meßgröße aus.

Eine Korrektur der Gesamtmessung um den Anteil des Halterwiderstandes erfolgt durch Differenzbildung. Bedeutet F_G die bei der Gesamtmessung bestimmte Kraft und F_H die für die Meßstange allein gemessene Kraft, so gilt bei gleicher Geschwindigkeit V ,

$$F_K = F_G - F_H$$
$$\Delta F_K = \sqrt{\Delta F_G^2 + \Delta F_H^2}$$

wenn ΔF_G und ΔF_H die entsprechenden Meßfehler für die Gesamtmessung und die Messung des Halterwiderstands bedeuten. In Abb. 19 und 20 sind die Widerstandsbeiwerte in Abhängigkeit der Re-Zahl für die beiden Auftriebskörpermodelle gezeichnet.1)

Anm. 1): vergl. Tabellen 2 und 3 (Tabellenanhang)

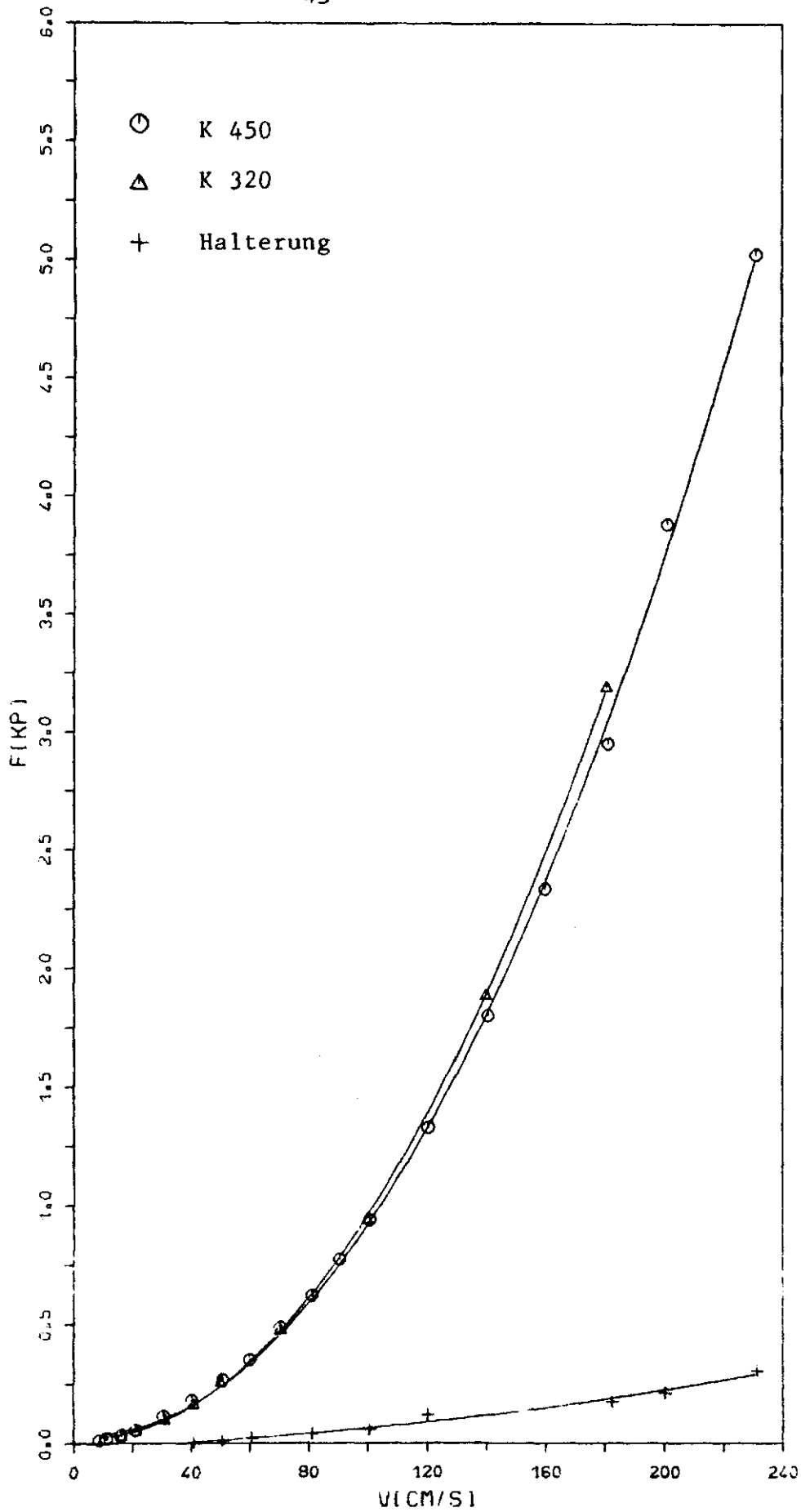


Abb. 18: Widerstandskräfte der Auftriebskörpermodelle K 450, K 320 und der Halterwiderstand

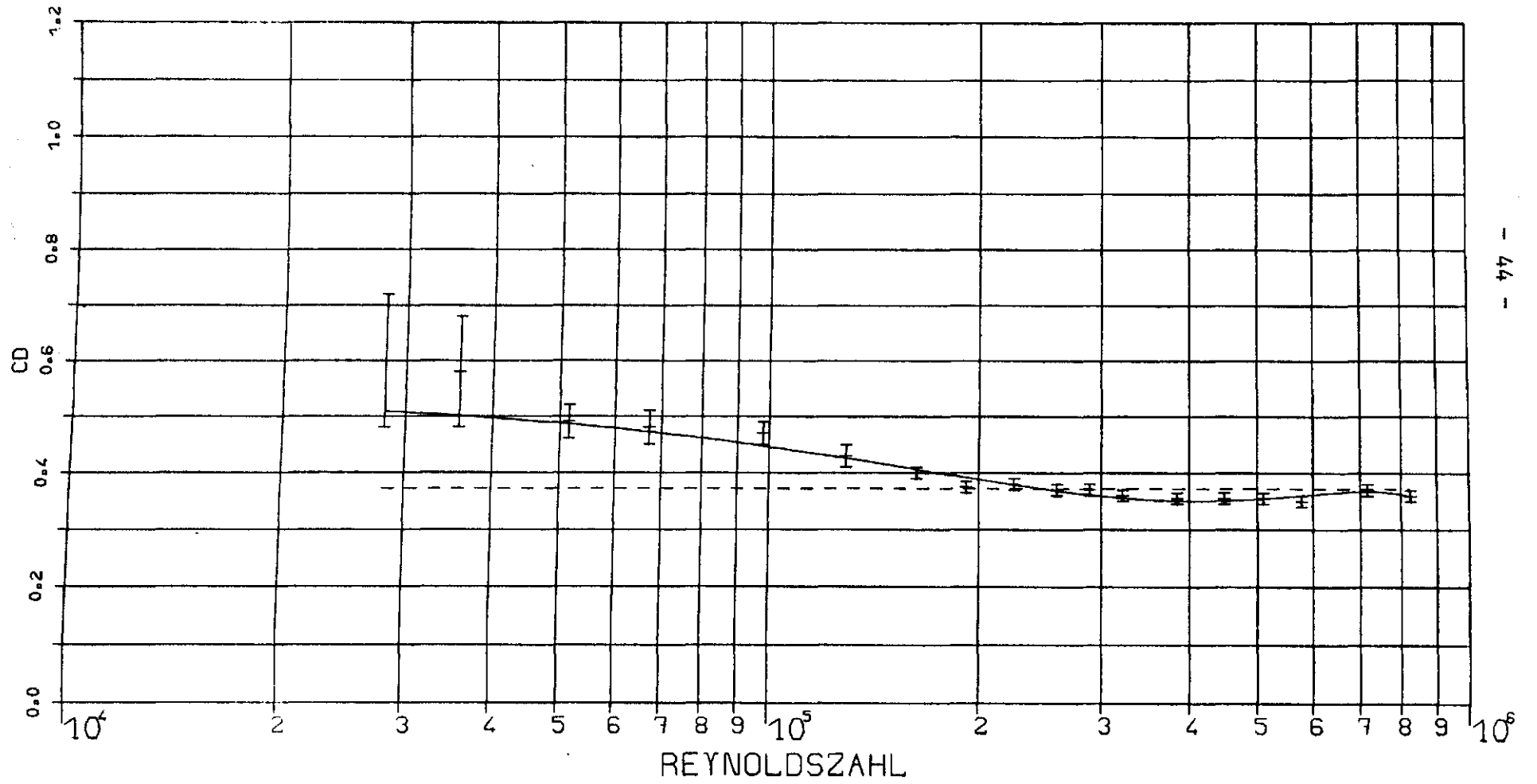


Abb. 19: Darstellung C_D (Re) für K 450 Auftriebskörper

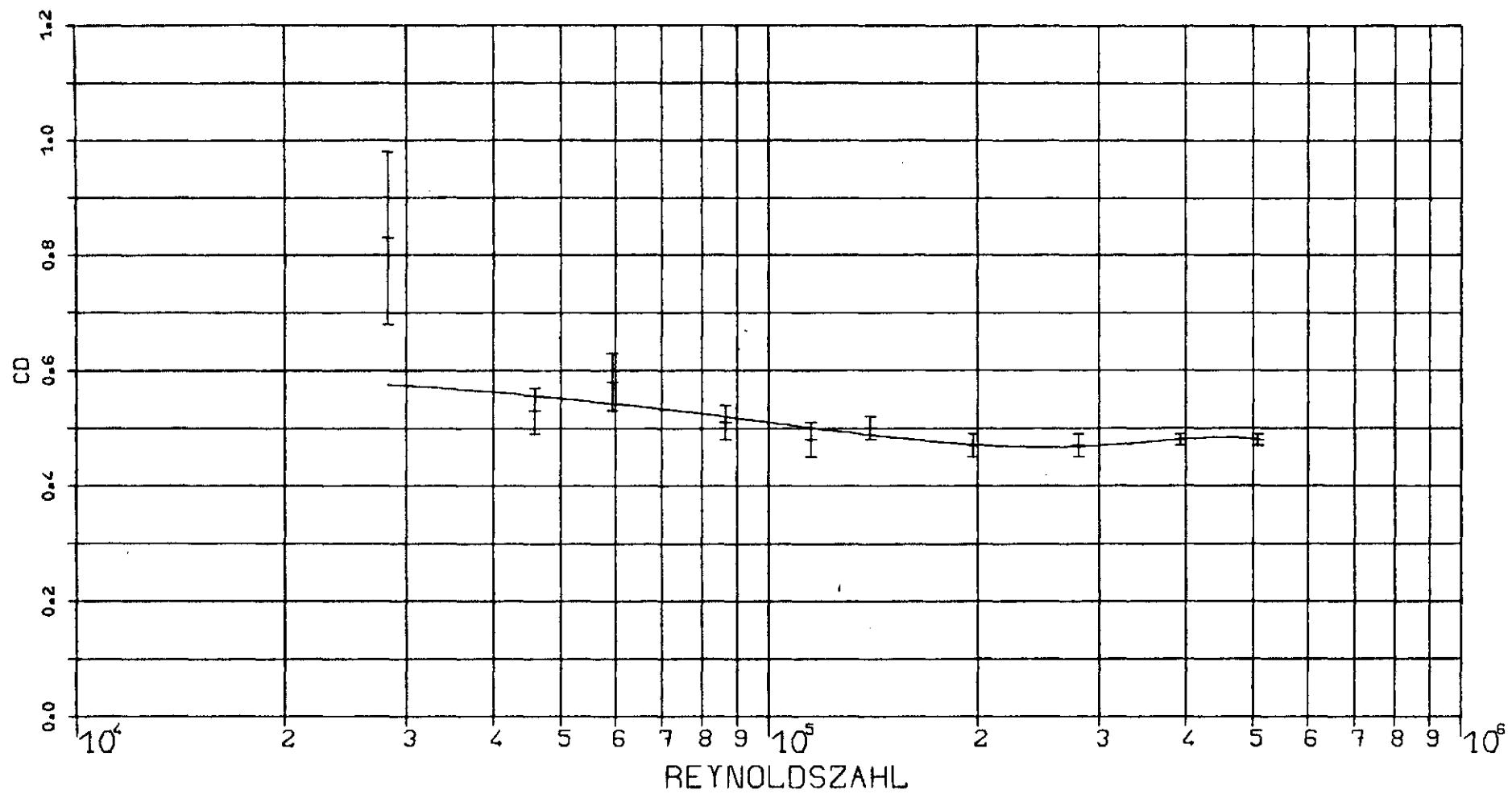


Abb. 20: Darstellung C_D (Re) für K 320 Auftriebskörper

Den gemessenen Geschwindigkeiten entsprechen Re - Zahlen nach Formel 5. Bei gleichen Re - Zahlen sind die Meßergebnisse zwischen Modell und Original übertragbar. Bei einem Verkleinerungsmaßstab von 1 : 3,3 werden am Original gleiche Re - Zahlen erreicht, wenn die Geschwindigkeit etwa einem Drittel der am Modell gemessenen Geschwindigkeit entspricht. Damit gelten die für den K 450 Meßkörper bis 230 cm s^{-1} bei 20°C ausgeführten Messungen für Geschwindigkeiten bis ca. 70 cm s^{-1} am originalen Auftriebskörper.

Abb.21 zeigt die für verschiedene Geschwindigkeiten am originalen Auftriebskörper Käse 450 kp bei Temperaturen zwischen 0 und 40°C erreichbaren Re - Zahlen.

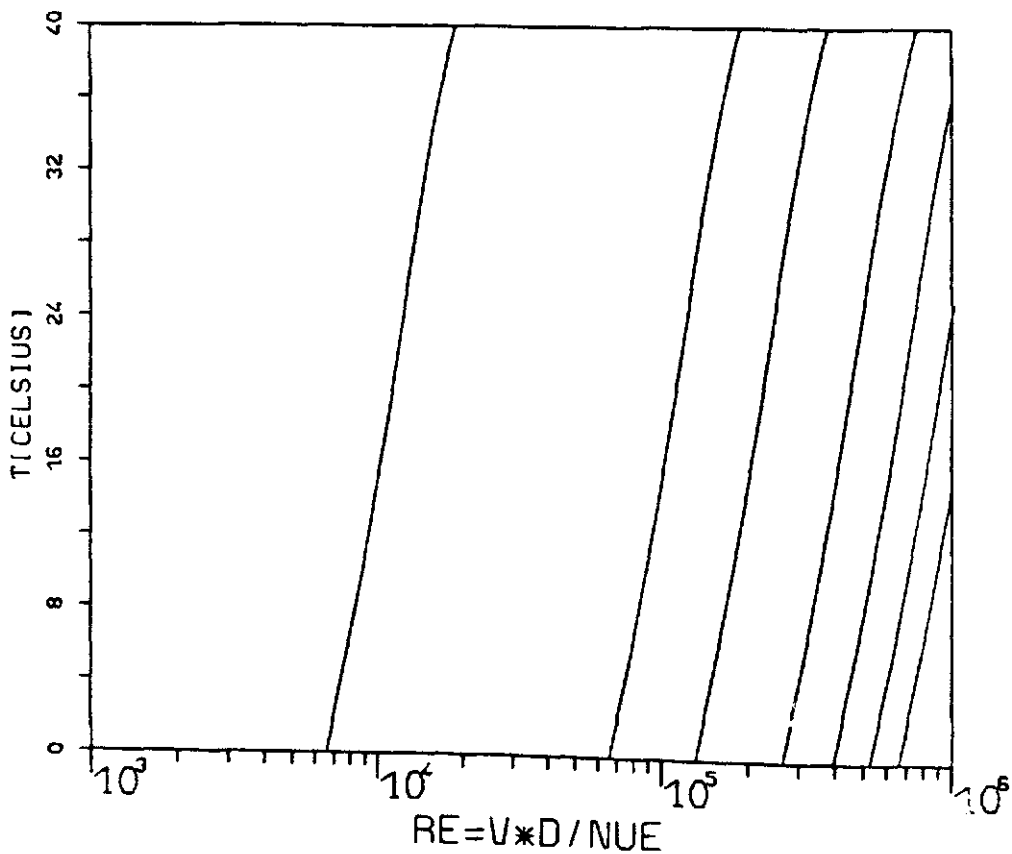


Abb. 21: Re - Zahlen für Geschwindigkeiten von 1, 10, 20, 40, 60, 80 und 100 cm s^{-1} (von links nach rechts) für $D = 120 \text{ cm}$.

In den Darstellungen in Abb. 19 und 20 ist im Bereich bis $Re = 10^5$ ein leichtes Abfallen der Widerstandsbeiwerte zu beobachten, während für $Re > 2 \cdot 10^5$ die Tendenz zu konstanten Widerstandszahlen besteht. Aus Bild 1 ist bereits ersichtlich, daß für beide Auftriebskörpermodelle die gemessenen Kräfte von gleicher Größenordnung sind, obwohl die Anströmfläche für den K 320 Meßkörper kleiner ist. Das bedeutet höhere Widerstandsbeiwerte für den kleineren Meßkörper, wie aus Abb. 20 zu ersehen ist.

Ein turbulenter Abfall der Widerstandsbeiwerte im Bereich $Re > 10^5$ entsprechend den in Kap. 2.5 bei der Kugel beschriebenen Verhältnissen tritt nicht auf. Um dies zu überprüfen, wurden die Messungen beim K 450 Meßkörper bis zu Geschwindigkeiten von 230 cm s^{-1} entsprechend $Re \approx 8 \cdot 10^5$ ausgeführt. Wegen der großen Oberflächenrauigkeit der Auftriebskörpermodelle und der zumindest bei hohen Geschwindigkeiten nicht mehr gleichförmigen Zustromverhältnisse war eine kritische Re - Zahl im unteren Bereich des in Kap. 2,5 angegebenen Intervalls zu erwarten.

Aus den Meßergebnissen kann daher vermutet werden, daß ein Abfallen der Widerstandsbeiwerte im Bereich $Re > 3 \cdot 10^5$ ausbleibt, die Auftriebskörpermodelle also nur im unterkritischen Bereich gemessen wurden. Ein möglicher Grund liegt darin, daß infolge der großen Oberflächenrauigkeit der Meßkörper auch bei turbulenter Grenzschicht keine wesentliche Rückverlagerung der Ablösestelle auftritt. Es ist aber auch denkbar, daß aufgrund der an den Auftriebskörpermodellen befindlichen aufgesetzten Vorrichtungen (Halterung für Blinkleuchte, Sender, Standfuß) die für gerundete Körperformen übliche $C_D(Re)$ - Charakteristik gestört wird, d. h., daß an den Aufsätzen in stärkerem Maße Wirbel erzeugt werden, als durch Rückverlagerung der Ablösestelle an der Körperoberfläche das eigentliche Totwassergebiet hinter dem Körper geringer wird. Eine abschließende Klärung kann nicht erfolgen, da der genaue Strömungsverlauf um die Meßkörper nicht Gegenstand der Untersuchungen war.

Die Meßwerte können innerhalb des Meßbereichs durch Polynome approximiert werden. Es gilt für den K 450 Auftriebskörper :

$$C_D = 0,54 - 0,11 \cdot 10^{-5} Re + 0,22 \cdot 10^{-11} Re^2 - 0,13 \cdot 10^{-17} Re^3$$

$$\text{für } 2,8 \cdot 10^4 \leq Re \leq 8,3 \cdot 10^5$$

Für den K 320 Auftriebskörper :

$$C_D = 0,61 - 0,14 \cdot 10^{-5} Re + 0,44 \cdot 10^{-11} Re^2 - 0,42 \cdot 10^{-17} Re^3$$

$$\text{für } 2,8 \cdot 10^4 \leq Re \leq 5,1 \cdot 10^5$$

Die Möglichkeit, einen konstanten Widerstandsbeiwert anzunähern, erscheint nur für die höheren Re - Zahlen gegeben. Für den K 450 - Meßkörper wurde nach (F1) der Mittelwert der Einzelmessungen gebildet und in Abb. 19 dargestellt.

Für $Re > 2 \cdot 10^5$ liegt die Anpassung innerhalb der Meßfehler, für kleinere Re - Zahlen ergeben sich nach (F2) Abweichungen bis 100 %.

Korrekturen für den Kanaleffekt wurden für die beiden Auftriebskörpermodelle wie auch für die nachfolgend beschriebenen Meßgeräte wegen der kleinen Abmessungen dieser Körper nicht berücksichtigt.

5.2 Thermistorgerät und Aanderaa - Strommesser

Anders als bei den Messungen der anderen Komponenten wurde das Thermistorgerät in horizontaler Stellung in die Meßsektion eingebracht. Dies geschah, um auch bei winkelabhängiger Anströmung messen zu können. Die Befestigung der Halterung erfolgte daher unmittelbar an der Körperoberfläche mittels um den Instrumentenkörper gelegter Schlauchschellen entsprechend Abb. 22 .

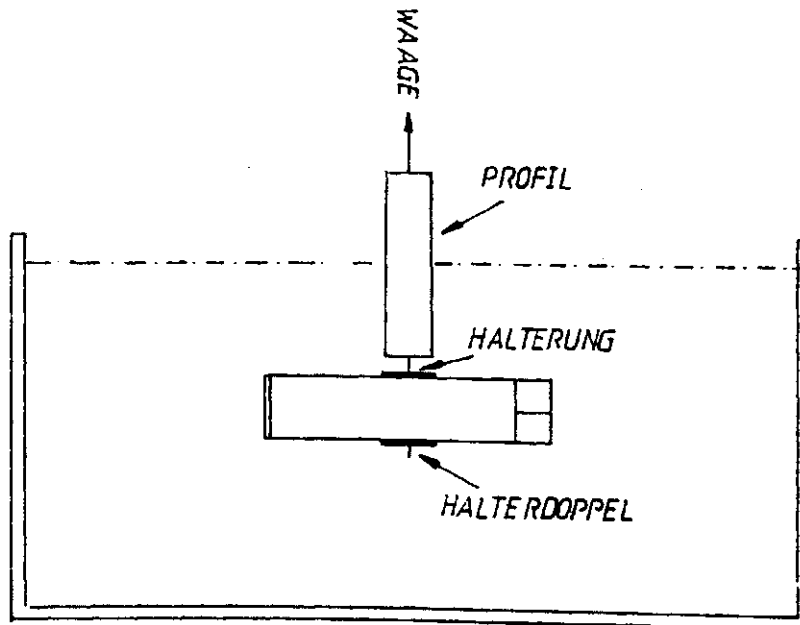


Abb. 22 : Thermistorgerät in der Meßsektion, Ansicht von vorn.

In diesem Fall kann eine Korrekturmessung des Halterwiderstandes nicht durch eine Messung der Halterung allein gewonnen werden, da eine Beeinflussung von Halterung und Meßkörper mit Sicherheit besteht. Daher wurde für die Korrekturmessung ein dem oberen, unterhalb des Profils freiliegenden Teils der Halterung entsprechendes Halterungsdoppel angefertigt, welches bei der Korrekturmessung an der Unterseite des Meßkörpers in gleicher Weise, wie die eigentliche Halterung, zusätzlich befestigt wurde. Die Messung mit dem nachgebildeten Halterungsdoppel wurde wie die eigentliche Widerstandsmessung durchgeführt.

Durch den Vergleich beider Messungen ergibt sich eine Korrekturgröße für den Halterwiderstand unter der Annahme, daß keine gegenseitige Beeinflussung zwischen der eigentlichen Halterung und dem Halterungsdoppel auftritt. Die Ergebnisse beider Meßreihen finden sich in den Tabellen 4a und b (Tabellenanhang).

Die Differenzbildung zwischen eigentlicher Widerstandsmessung und Korrekturmessung muß bei einander entsprechenden Geschwindigkeiten erfolgen. Aufgrund der genannten Einstellungsungenauigkeit differieren die Geschwindigkeiten beider Meßreihen. Eine Korrektur kann in folgender Weise erfolgen :

F_1 : gemessene Widerstandskraft bei V_1 für Thermistorgerät

F_2 : gemessene Widerstandskraft bei V_2 für Thermistorgerät und angebauten Halterungsdoppel

Die bei V_2 gemessene Kraft F_2 der Korrekturmessung muß auf die Geschwindigkeit V_1 umgerechnet werden. Dabei wird die der Geschwindigkeitsdifferenz $\Delta V = |V_2 - V_1|$ entsprechende Kraftdifferenz berücksichtigt.

Man erhält für V_1 die Korrekturgröße F'_1 nach

$$C'_D = \frac{2F_2}{\rho A V_2^2}$$

und

$$F'_1 = \frac{1}{2} C'_D \rho A V_1^2$$

unter der Annahme von $C'_D = \text{const}$ über ΔV .

Bei zweimaliger Differenzbildung kann die eigentliche Widerstandsmessung korrigiert werden.

$$|F_1 - F'_1| = \Delta F_1$$

$$F_1 - \Delta F_1 = F_{1K}$$

Der zu berücksichtigende Fehler ist :

$$\Delta \Delta F_1 = \sqrt{\Delta F_1^2 + \Delta F_1'^2}$$

und

$$\Delta F_{1K} = \sqrt{\Delta F_1^2 + \Delta F_1'^2}$$

wobei für

$$\Delta F_1' = F_1' \frac{\Delta F_2}{F_2}$$

genommen wird.

Die Ergebnisse der korrigierten Kraftmessung und die berechneten Widerstandsbeiwerte enthält Tabelle 4c (Tabellenanhang).

In Abb.23 sind die Widerstandsbeiwerte in Abhängigkeit von Re aufgetragen. Während bei den Auftriebskörpermodellen der Widerstandsabfall für $Re > 10^5$ ausbleibt, ist er im Fall des Thermistorgeräts offenbar erkennbar. Nach einer näherungsweise Konstanz von $C_D \approx 1,05$ für $10^4 \leq Re \leq 10^5$ erfolgt bei $Re = 2 \cdot 10^5$ ein Abfallen auf $C_D \approx 0,6$. Dieser letzte Widerstandsbeiwert ist seiner Größe nach jedoch unsicher, da die bei $Re = 2 \cdot 10^5$ gewonnene Korrekturkraft F_1 relativ groß erscheint.

Es besteht daher die Möglichkeit, daß die Korrekturmessung mit angebautem Halterungsdoppel noch im unterkritischen Bereich bzw. im Übergangsbereich zwischen den höheren Werten des unterkritischen und den niedrigeren des überkritischen Bereichs erfolgte und daher die eigentliche Messung mit einer zu hohen Kraft korrigiert wurde. Ein Abfallen der Widerstandsbeiwerte scheint aber gesichert, da auch bei den noch unkorrigierten Werten nach Tabelle 4a der C_D -Wert für $Re = 2,6 \cdot 10^5$ niedriger liegt,

Eine Polynomannäherung im Bereich $8 \cdot 10^3 \leq Re \leq 2 \cdot 10^5$ ergab:

$$C_D = 1,16 - 0,40 \cdot 10^{-5} Re + 0,36 \cdot 10^{-10} Re^2 - 0,11 \cdot 10^{-15} Re^3$$

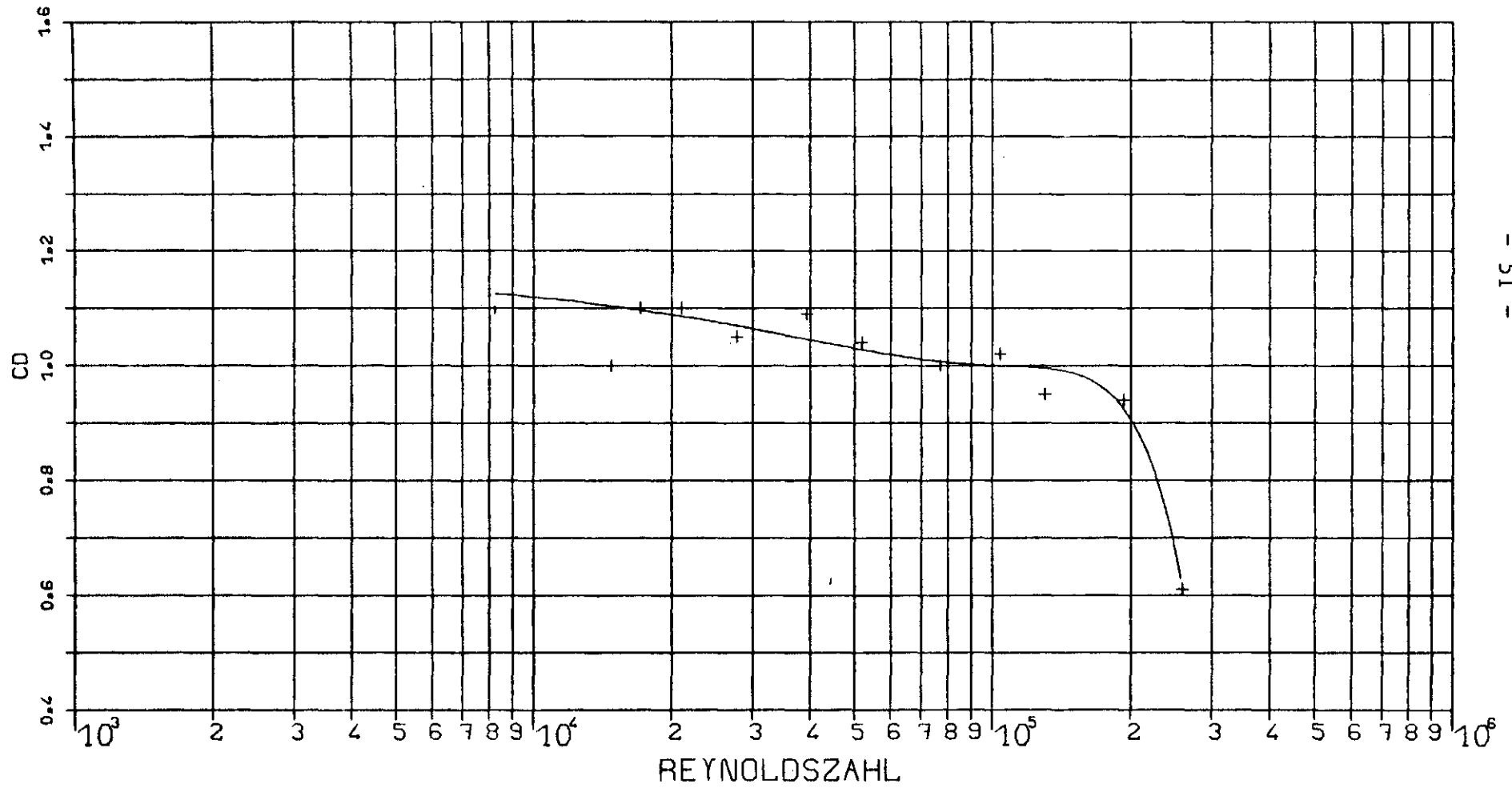


Abb. 23: Darstellung C_D (Re) für Thermistorgerät

In Abb. 24 ist die Aufhängung des Aanderaa - Strommessers in der Meßsektion gezeichnet. Das Stromlinienprofil ist bis nahe an die Augöse (1) der kardanischen Eigenaufhängung des Meßgeräts herangeführt, so daß kein Halterwiderstand besteht.

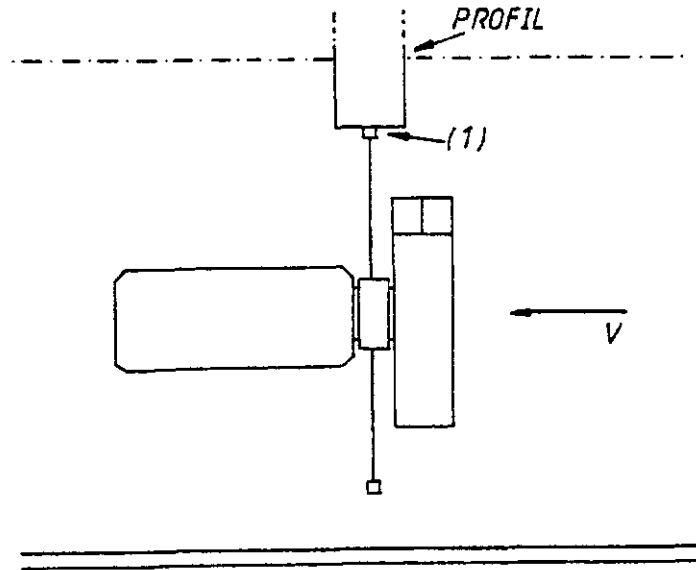


Abb. 24 : Aanderaa Strommesser, Seitenansicht im Schlepptank

Die Meßergebnisse enthält Tabelle 5 (Tabellenanhang). Wegen des gleichen Durchmessers der Instrumentenkörper wird der gleiche Re - Zahlenbereich wie beim Thermistorgerät erreicht.

Die Darstellung in Abb.25 zeigt ein gelindes Abfallen der Widerstandsbeiwerte bis Re etwa gleich $6 \cdot 10^4$, dann einen konstanten Bereich bis Re ca. $2 \cdot 10^5$. Insgesamt liegen die Werte höher als beim Thermistorgerät. Bei $Re > 2 \cdot 10^5$ ist ein Abfall der Werte um 20 % auf $C_D \approx 1,0$ zu erkennen. Über den Bereich von $1,1 \cdot 10^4$ bis $2,6 \cdot 10^5$ findet sich

$$C_D = 1,42 - 0,61 \cdot 10^{-5} Re + 0,53 \cdot 10^{-10} Re^2 - 0,14 \cdot 10^{-15} Re^3$$

Damit ist auch bei der Messung des Aanderaa - Strommessers der Übergangsbereich zu überkritischen kleineren Widerstandsbeiwerten angedeutet.

Abb.26 zeigt, daß bei realen Verhältnissen im Ozean dieser Bereich sowohl beim Thermistorgerät, wie auch beim Aanderaa-Strommesser kaum erreicht wird, so daß in beiden Fällen mit unterkritischen Werten gerechnet werden muß.

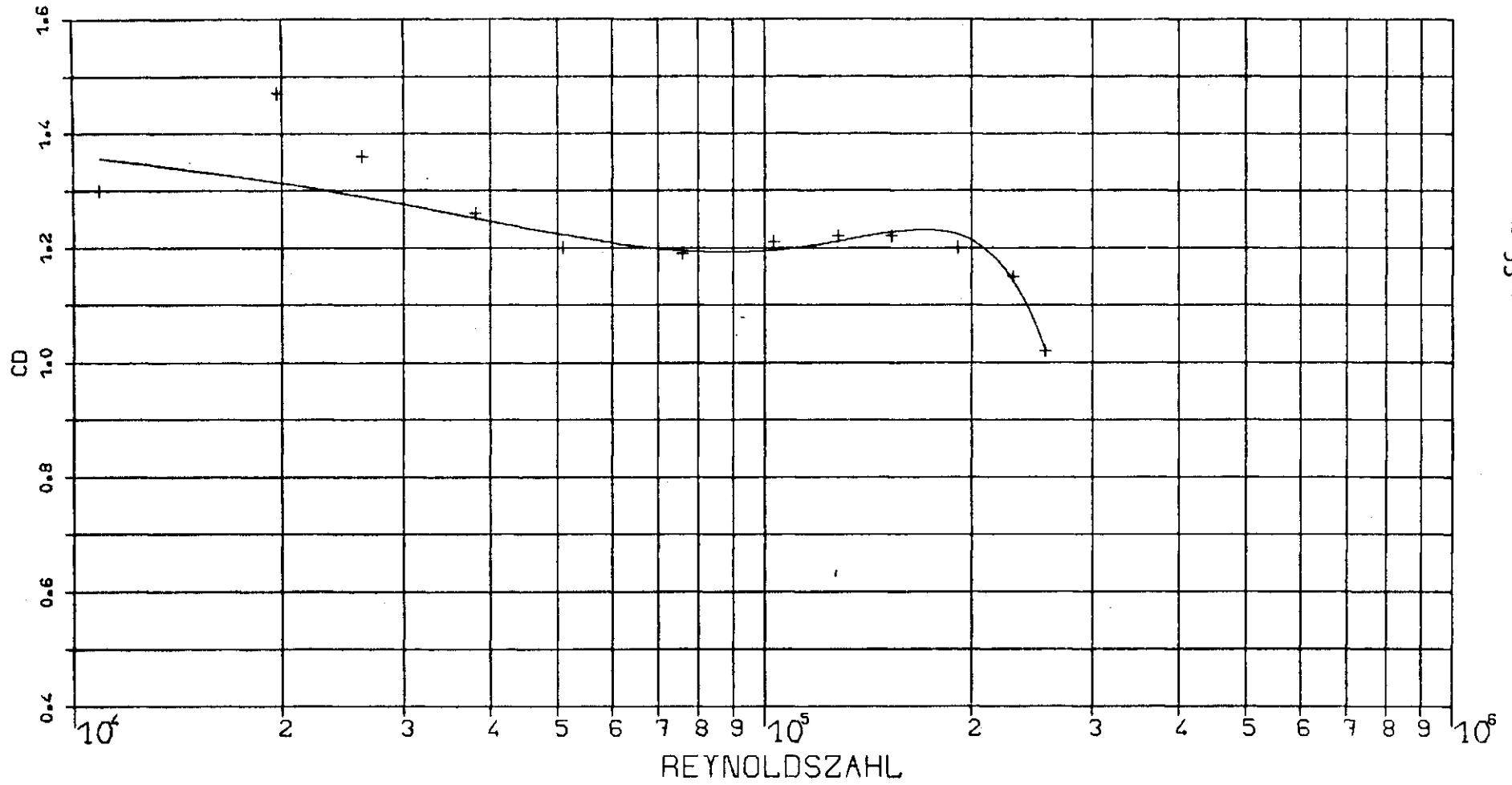


Abb. 25: Darstellung C_D (Re) für Aanderaa Strommesser

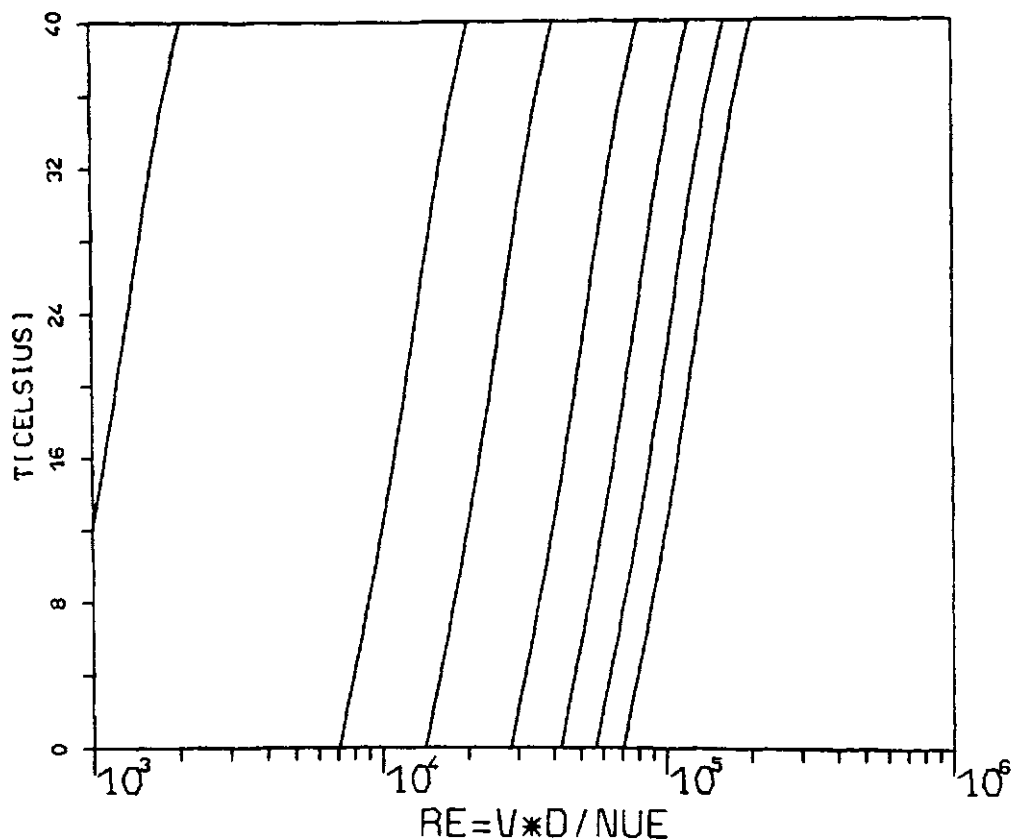


Abb. 26: Re - Zahlen für Geschwindigkeiten von 1, 10, 20, 40, 60, 80 und 100 cm s⁻¹ (von links nach rechts) für D = 12,8 cm

5.3 Benthos - Auftriebskörper

Zwei Einsatzmöglichkeiten sind zu unterscheiden. Verbunden mit Kettengliedern werden mehrere Benthos - Auftriebskörper innerhalb der Verankerung bis 6000 m Wassertiefe eingesetzt. Sowohl die Kombination zweier Benthos - Auftriebskörper als auch größere Verbände sind denkbar. Zwei Benthos - Auftriebskörper, die in ein speziell für diesen Zweck angefertigtes Gestell eingefügt sind, können in gleicher Weise als oberstes Auftriebselement eingesetzt werden wie die Käse-Auftriebskörper.

Für die durchgeführten Messungen ist bedeutsam, daß beide Fälle unterschiedliche Formationen darstellen und unterschiedliche Widerstandsbeiwerte erwarten lassen. In beiden Fällen sind die Anströmflächen besonders groß, so daß während der Messungen ein großer Teil des Tankquerschnitts verengt ist und Korrekturen nach Kap. 3.3 durchgeführt werden müssen. Die nachstehende Übersicht zeigt den berechneten Verengungsgrad.

Verhältnis Körperquerschnitt zu Kanalquerschnitt

Benthos (2) - Auftriebskörperpaket	$0,21 \pm 0,03$
Benthos (2) - oberes Auftriebselement	$0,17 \pm 0,03$

Die Zahlenwerte beziehen sich auf Zweierformationen der Benthos - Auftriebskörper in den beiden angesprochenen Einsatzmöglichkeiten.

5.3.1 Benthos (2) - Auftriebskörper

Zum Zwecke der Messungen wurden die innenliegenden, Auftrieb liefernden Kugeln entfernt. Die äußeren Hartkunststoffkalotten der Verkleidung sind während der Messungen mit Wasser gefüllt. Um eine starre Kraftübertragung zu gewährleisten, wurden die Kettenglieder der Kette miteinander verschweißt.

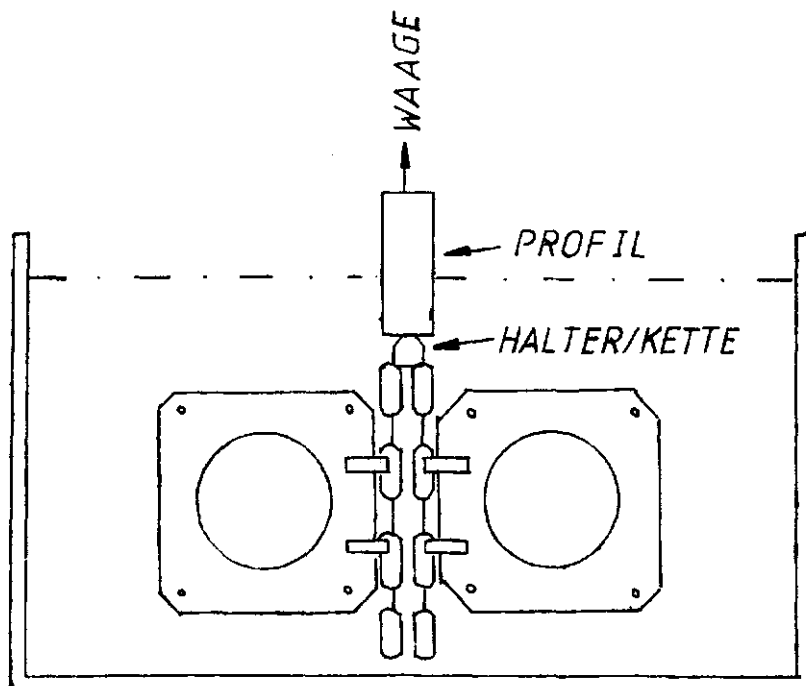


Abb. 27 : Benthos (2) - Auftriebskörper, Lage im Tank aus der Schlepprichtung gesehen.

Nach Abschnitt 3.3 müssen die im begrenzten Becken gemessenen Kräfte auf die Geschwindigkeiten korrigiert werden, bei denen im unbegrenzten Medium gleichgroße Kräfte meßbar würden. Wegen der Schwierigkeit, im Fall der Benthos - Auftriebskörper die Querschnittsfläche exakt zu berechnen, ist bei der Bestimmung des Verengungsgrads m entsprechend der vorstehenden Übersicht eine Ungenauigkeit Δm berücksichtigt, die die Genauigkeit des Korrekturfaktors ϵ_k beeinflusst. Nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz ist :

$$\Delta \varepsilon_{\kappa} = \frac{1 - F_h^2}{(1 - m - F_h^2)^2} \cdot \Delta m$$

Daraus folgt wegen

$$V_{\infty} = V \cdot \varepsilon_{\kappa}$$

$$\left(\frac{\Delta C_D}{C_D}\right)^2 = \left(\frac{\Delta F}{F}\right)^2 + 2\left(\frac{\Delta \varepsilon_{\kappa}}{\varepsilon_{\kappa}}\right)^2$$

Aufgrund von $\Delta \varepsilon_{\kappa}$ ist die Gesamtgenauigkeit der Messungen an den Auftriebskörpern Benthos (2) geringer als bei den vorhergehenden Messungen und liegt bei etwa 6 %. Nach Formel 12 ist der Korrekturfaktor selbst geschwindigkeitsabhängig, die Änderung ist jedoch sehr viel kleiner als $\Delta \varepsilon_{\kappa}$. Der Korrekturfaktor ε_{κ} kann mit einer relativen Genauigkeit von 4 % angegeben werden und beträgt für die gemessenen Geschwindigkeiten 1,27. Das bedeutet eine Erhöhung der für die Berechnung der Widerstandsbeiwerte maßgeblichen korrigierten Geschwindigkeiten um 27 % aufgrund des abgeschätzten Kanaleffekts.

Die maximale Geschwindigkeit, bei der gemessen wurde, beträgt 60 cm s^{-1} . Wenn auch die statischen Kräfte bei dieser Geschwindigkeit nur wenig größer als 10 kp sind, liegen aber wegen der mit Wasser gefüllten Kalotten die Trägheitskräfte bei der Anfahrbeschleunigung bereits nahe der Maximalbelastung der induktiven Wegaufnehmer.

Die Ergebnisse der Messungen unter Berücksichtigung des Kanaleffekts enthält Tabelle 6 (Tabellenanhang). Abb. 28 zeigt die graphische Darstellung der Widerstandsbeiwerte über Re . Neben leicht höheren Werten im linken Bereich der Kurve, besteht eine weitgehende Konstanz der Abhängigkeit $C_D(Re)$ mit $C_D \approx 0,93$ bei einer relativen Abweichung der Einzelmessungen nach (F2) von + 0,05. Eine Polynomannpassung im Bereich $6,8 \cdot 10^4 \leq Re \leq 3,7 \cdot 10^5$ ist:

$$C_D = 1,05 - 0,93 \cdot 10^{-6} Re + 0,14 \cdot 10^{-11} Re^2$$

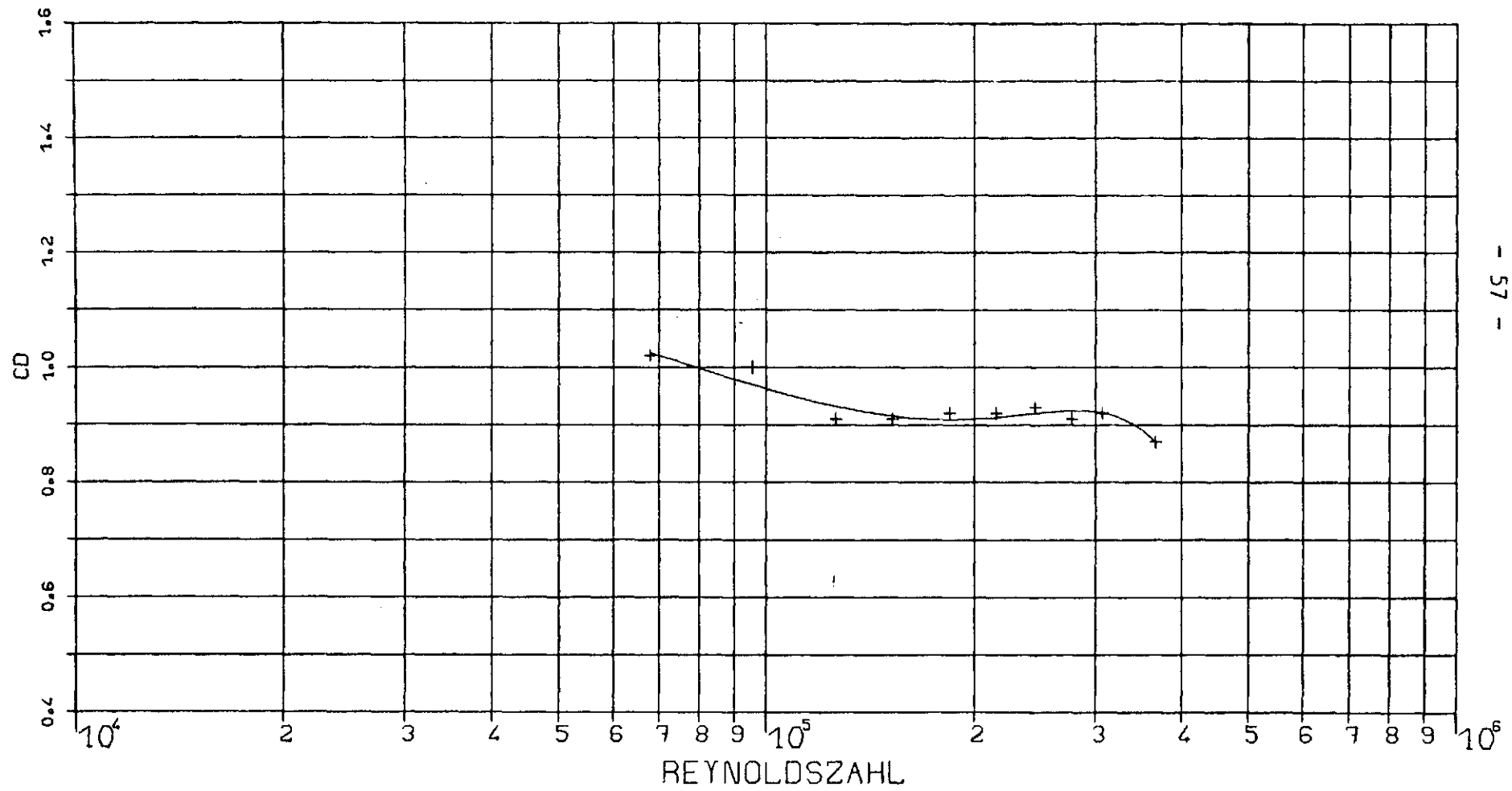


Abb. 28: Darstellung C_D (Re) für Benthos (2) - Auftriebselement

5.3.2 Benthos (2) - oberer Auftrieb

Die in ihrer speziellen Halterung für den Einsatz als oberes Auftriebselement einer Verankerung zusammengefassten beiden Einzelkörper stellen relativ zum zentrierten Aufhängepunkt ein hantelförmiges Gebilde dar, das nur bei Anströmung in Längs- oder Querrichtung symmetrisch umströmt wird.

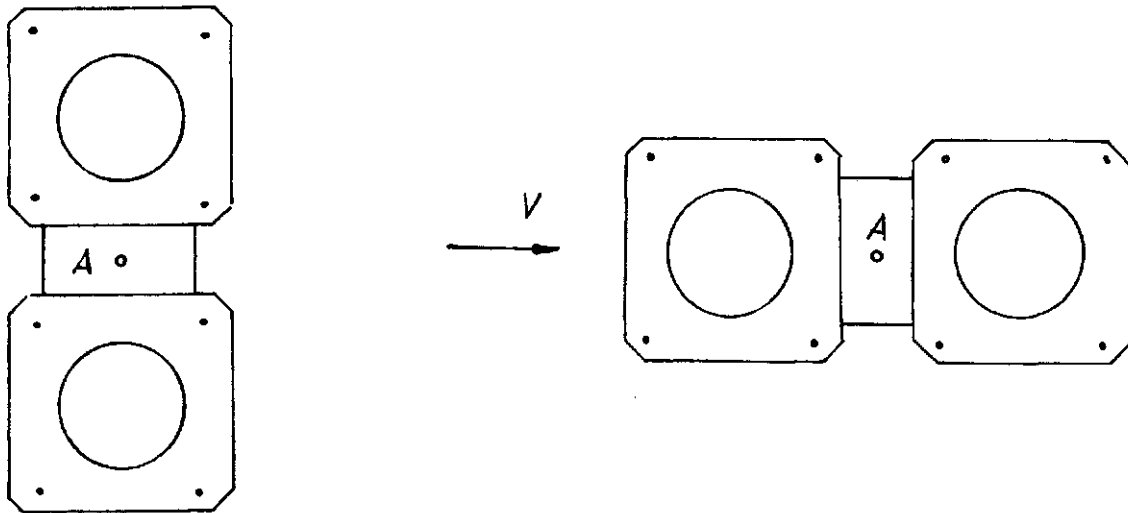


Abb. 29 : Benthos (2) - oberes Auftriebselement Stellung 1 quer, Stellung 2 längs zur Anströmrichtung

Um zu entscheiden, welche Stellung bei Anströmung eingenommen wird, wurde der Meßkörper in der Horizontalebene von Stellung 1 ausgehend um den Punkt A der Aufhängung um $\pm 45^\circ$ gedreht. (Abb. 30)

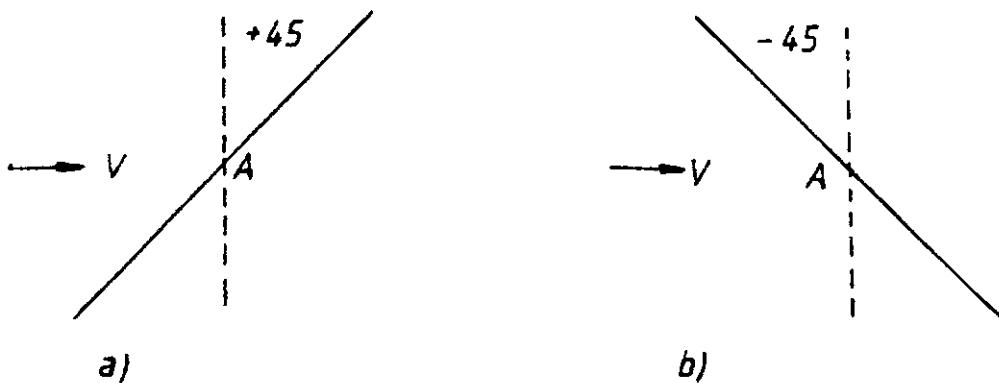


Abb. 30 : Drehung in der Horizontalebene a) $+45^\circ$, b) -45°

In Stellung a) und b) wird die Kraftverteilung am Meßkörper relativ zu A unsymmetrisch, erkennbar am Auftreten von Registrierung in der z-Komponente, entsprechend der Bedeutung eines Drehmomentes. Da der Punkt A auch der natürlichen Aufhängung des Meßkörpers in der Verankerung entspricht, kann nach den Anzeigen der z-Komponente unmittelbar auf eine rückstellende Kraft geschlossen werden. Das Vorzeichen der z-Registrierung bestimmt die Richtung der rückstellenden Kraft. Zwischen Stellung a) und b) findet ein Vorzeichenwechsel in der z-Anzeige statt, in beiden Fällen ergibt sich eine rücktreibende Kraft zu Stellung 1.

Die Messung der Widerstandskräfte erfolgte daher in Stellung 1 des Meßkörpers. Die Auswertung folgt der im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Auswertung unter Berücksichtigung des Kanaleffekts. Der Korrekturfaktor fällt entsprechend dem kleineren Verengungsgrad geringer aus als beim Benthos (2) - Meßkörper für den Einsatz innerhalb der Verankerung und liegt bei 1,20. Die Meßergebnisse sind in Tabelle 7 (Tabellenanhang) wiedergegeben, eine graphische Darstellung über Re zeigt Abb. 31 mit

$$C_D = 0,84 - 0,17 \cdot 10^{-5} Re + 0,38 \cdot 10^{-11} Re^2$$

für $4,9 \cdot 10^4 \leq Re \leq 3,2 \cdot 10^5$.

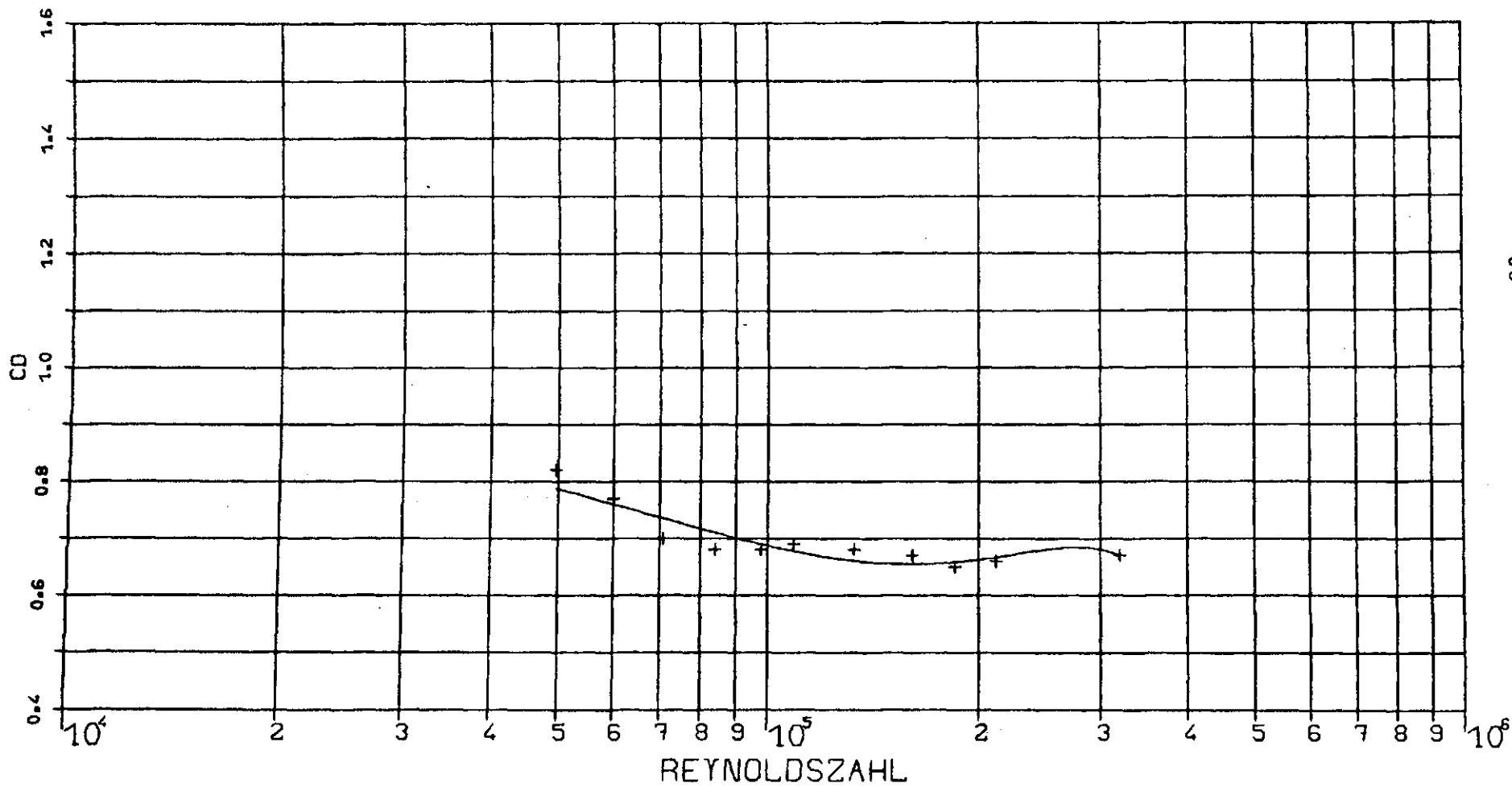


Abb. 31: Darstellung C_D (Re) für Benthos (2) / Oberer Auftrieb

Abb. 32 gibt zur Erleichterung der Einordnung die für die Benthos (2) - Kombinationen erreichbaren Re - Zahlen wieder.

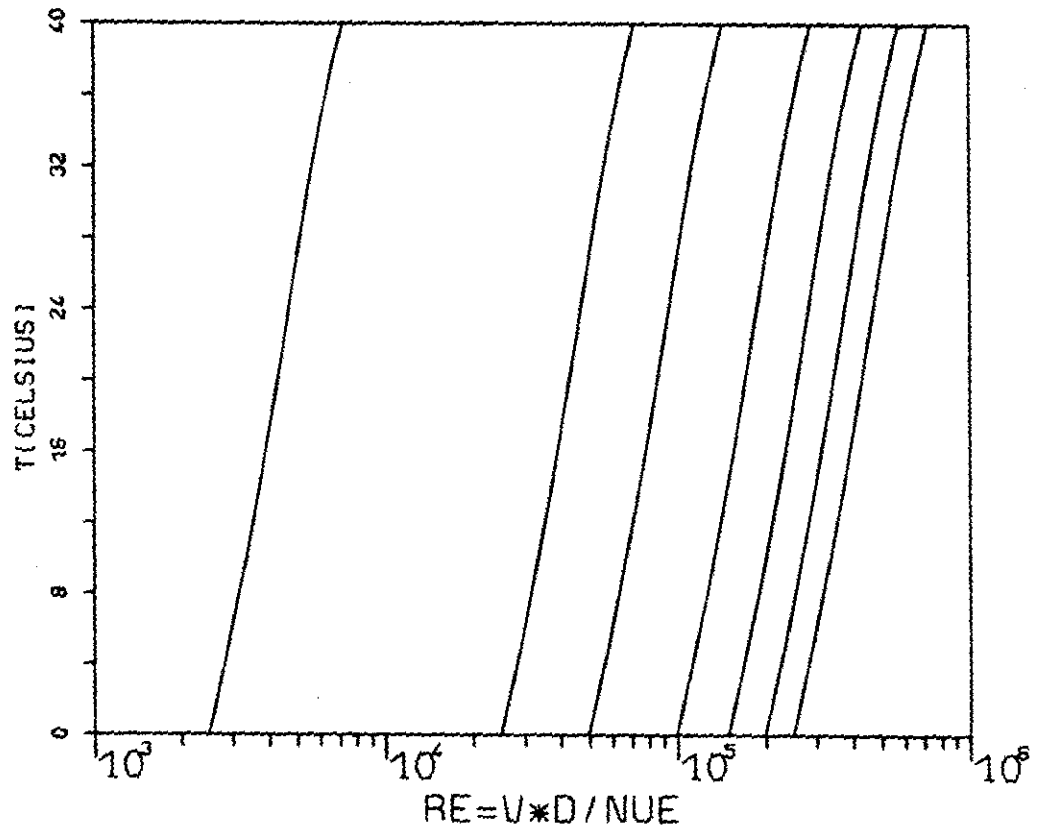


Abb. 32 : Re - Zahlen für Geschwindigkeiten von 1, 10, 20, 60, 80 und 100 cm s⁻¹ (von links nach rechts) für D = 45 cm

6. Winkelabhängige Einzelmessungen

Winkelabhängige Messungen der Widerstandsbeiwerte wurden am Thermistorgerät und am Auftriebskörpermodell K 450 durchgeführt. Das Thermistorgerät war aufgrund der speziellen Aufhängung in der Meßsektion besonders gut für winkelabhängige Messungen geeignet, da es horizontal entsprechend Abb 11 1) frei um A drehbar ist. Auf diese Weise horizontal eingestellte Winkel bedeuten vertikale Anströmwinkel nach Abb. 33.

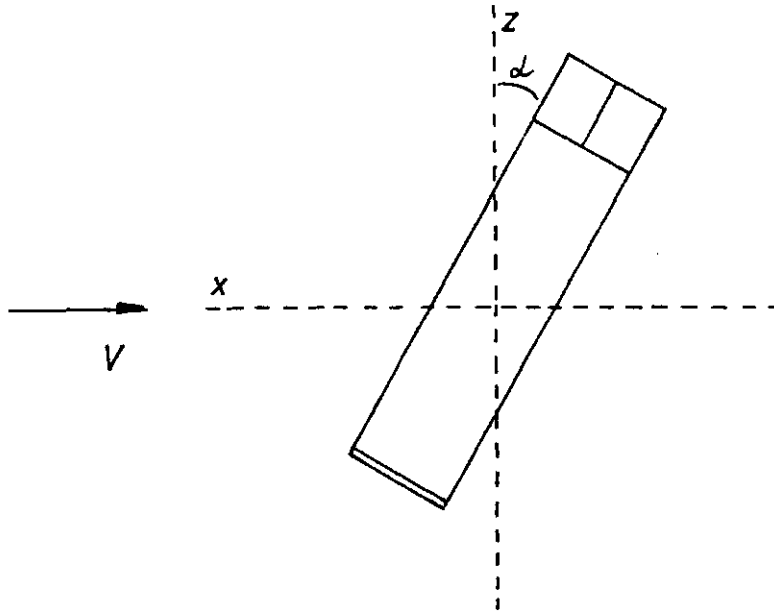


Abb 33 : Vertikale Anströmwinkel am Thermistorgerät

Es sollte überprüft werden, ob eine Übertragbarkeit des Konzepts der winkelabhängigen Anströmung am Seilelement nach Kap. 3.6 möglich ist.

Der K 450 Meßkörper wurde relativ zur Stromrichtung im Winkelbereich $0 - 30^\circ$ gekippt. (Abb. 34)

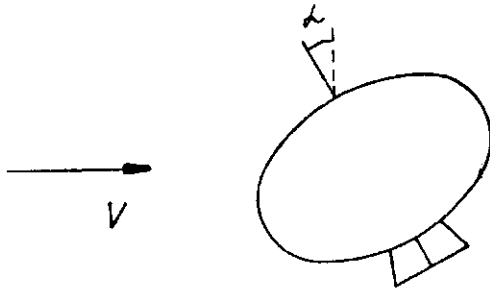


Abb. 3/4 : Vertikalwinkel am Auftriebskörpermodell K 450

Beim Aanderaa - Strommesser ist eine winkelabhängige Anströmung des Instrumentenkörpers wegen der kardanischen Eigenaufhängung nicht zu erwarten.

Winkelabhängige Messungen an den Benthos - Auftriebskörpern konnten vor allem aus den folgenden Gründen nicht durchgeführt werden :

- a) : Aufgrund ihrer Größe liegen die Benthos - Auftriebskörper in der Meßsektion nahe der Wasseroberfläche, so daß bei vertikalem Kippen Teile der Meßkörper durch die Wasseroberfläche treten.
- b) : Der veränderliche Grad der Querschnittsverengung ist nur schwer abschätzbar, so daß entsprechende Kanalkorrekturen ungenau ausfallen.
- c) : Stabilitätsprobleme einer kippbaren, starren Aufhängung der Meßkörper.

Andererseits entsprechen die für die beiden Einsatzmöglichkeiten durchgeführten Messungen zwei um 90° gegeneinander versetzten Stellungen der Benthos (2) - Auftriebskörper, aus denen sich qualitative Aussagen über die Winkelabhängigkeit des horizontalen Strömungswiderstands ableiten lassen.

6.1 Winkelabhängigkeit der Widerstandsbeiwerte am Thermistorgerät

Die Auswertung und Korrektur um den Halterwiderstand entspricht dem in Kap. 5.2 angesprochenen Verfahren. Nach Kap. 4.3 tritt bei winkelabhängiger Anströmung am Thermistorgerät eine Querkraft in y- Richtung auf, die in der weiteren Auswertung berücksichtigt werden mußte. Die Tabellen 8 und 9 enthalten die bei 40 cm s^{-1} gewonnenen Meßergebnisse für die x- bzw. y- Komponente. Tabelle 10 enthält die um den Anteil des Halterwiderstands korrigierten Kräfte in der x- bzw. y- Richtung (s. Tabellenanhang).

Die beiden Kraftkomponenten F_x und F_y werden zur Gesamtkraft F_R zusammengefasst, die ihrerseits in ihre Komponenten tangential und normal zum Meßkörper zerlegt wird

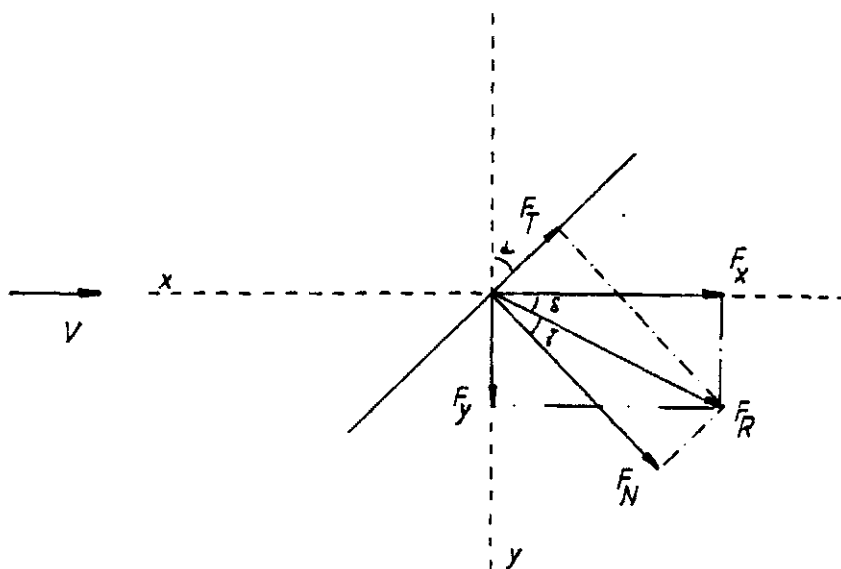


Abb. 35 : Normal- und Tangentialkomponentenzerlegung

Es gelten die Beziehungen:

$$F_R = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

$$F_N = F_R \cos(\alpha - \delta)$$

$$F_T = F_R \sin(\alpha - \delta)$$

$$\phi = \alpha - \delta$$

$$\delta = \arctg \frac{F_y}{F_x}$$

mit fehlerbehafteten Größen $\Delta F_x, \Delta F_y$.

Nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz können $\Delta F_R, \Delta \delta$, sowie ΔF_N und ΔF_T berechnet werden.

Die Ergebnisse der Zerlegung in Normal- und Tangentialkomponenten sind in Tabelle 11 enthalten.

Berechnet wurden

$$C_N(\alpha) = \frac{2 F_N}{\xi AV^2}$$

$$C_T(\alpha) = \frac{2 F_T}{\xi AV^2}$$

Für die so gebildeten winkelabhängigen Widerstandsbeiwerte wurden näherungsweise die folgenden Beziehungen gefunden :

$$C_N(\alpha) = (1,10 \pm 0,04) \cos \alpha$$

$$C_T(\alpha) = (0,43 \pm 0,03) \sin \alpha$$

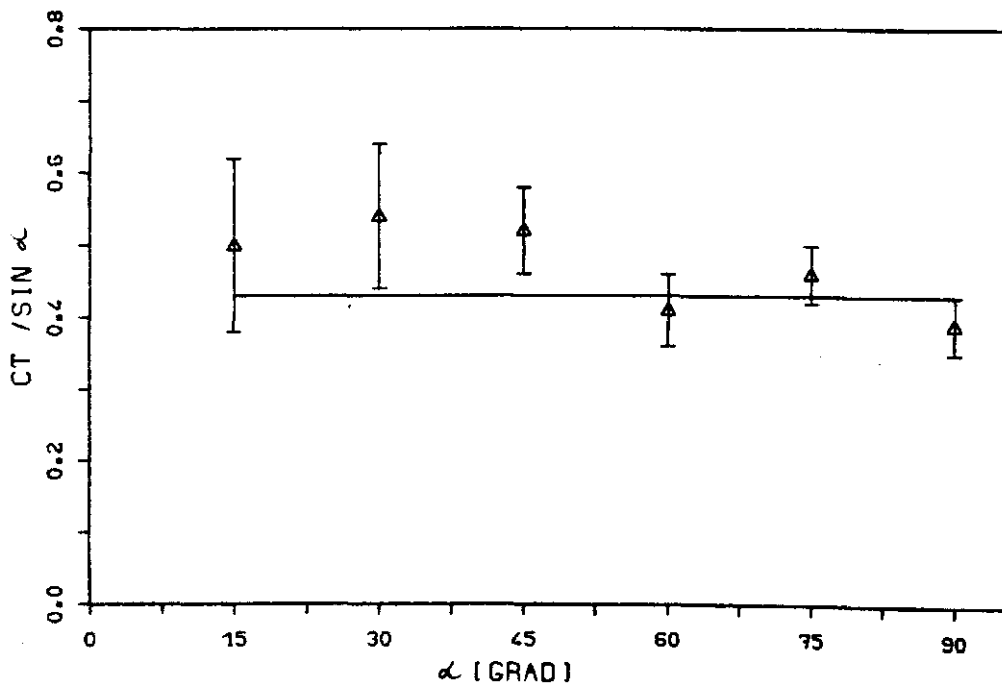
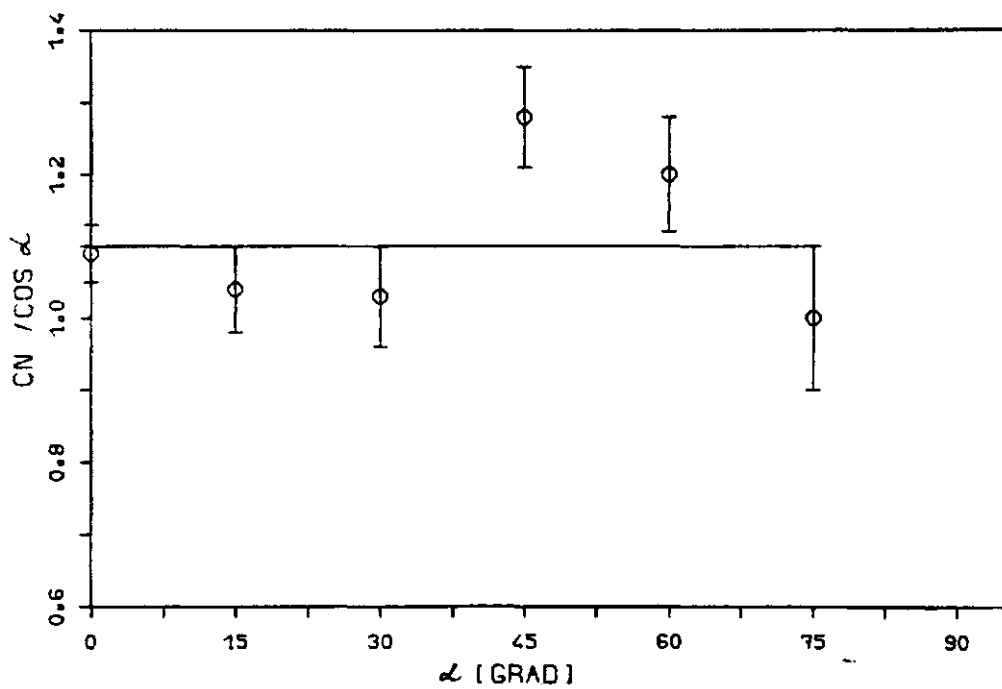


Abb. 36 : Normaler und tangentialer Widerstandsbeiwert als Funktion des Anströmwinkels α .

6.2 Winkelabhängigkeit der Widerstandsbeiwerte beim K 450

Auftriebskörpermodell

Durch vertikales Kippen des Meßkörpers kann die Winkelabhängigkeit des horizontalen Strömungswiderstands untersucht werden. Dabei gerät der Meßkörper in zunehmende Nähe des Stromlinienprofils. Korrekturen für den für jede Winkelstellung verschiedenen Interferenzeinfluß der Halterung sind nicht abschätzbar. Aus diesem Grund wurde auch auf eine Korrektur um den nach Kap. 5.1 ohnehin kleinen und konstanten Halterwiderstand verzichtet. Querkräfte, wie in Kap. 6.1 sind bei der Art der Aufhängung des K 450 Versuchskörpers nicht meßbar.

Die Winkeleinstellung wurde in Intervallen von je 10° bei drei Geschwindigkeitsstufen von 30, 60 und 120 cm s^{-1} vorgenommen. Die Meßergebnisse enthält Tabelle 12 und 13 (Tabellenanhang). Durch lineare Regression wurden Beziehungen für $C_D(\alpha)$ aufgestellt, die nach Abb. 37 gut den Meßwerten angepasst sind. Die abgeleiteten Beziehungen sind :

$$\begin{array}{ll} \text{Re} = 1,08 \cdot 10^5 & C_D(\alpha) = 0,45 + 0,47 \sin \alpha \\ \text{Re} = 2,14 \cdot 10^5 & C_D(\alpha) = 0,40 + 0,22 \sin \alpha \\ \text{Re} = 3,57 \cdot 10^5 & C_D(\alpha) = 0,37 + 0,23 \sin \alpha \end{array}$$

In allen Fällen besteht eine annähernd lineare Zunahme des horizontalen Strömungswiderstands, die bei kleineren Re - Zahlen höher ausfällt als bei den höheren Re - Zahlen. Allgemein kann für $\text{Re} \gtrsim 2 \cdot 10^5$ eine Beziehung

$$C_D(\alpha) = C_D(0) + 0,25 \sin \alpha$$

im Winkelbereich bis 30° Vertikalneigung vermutet werden.

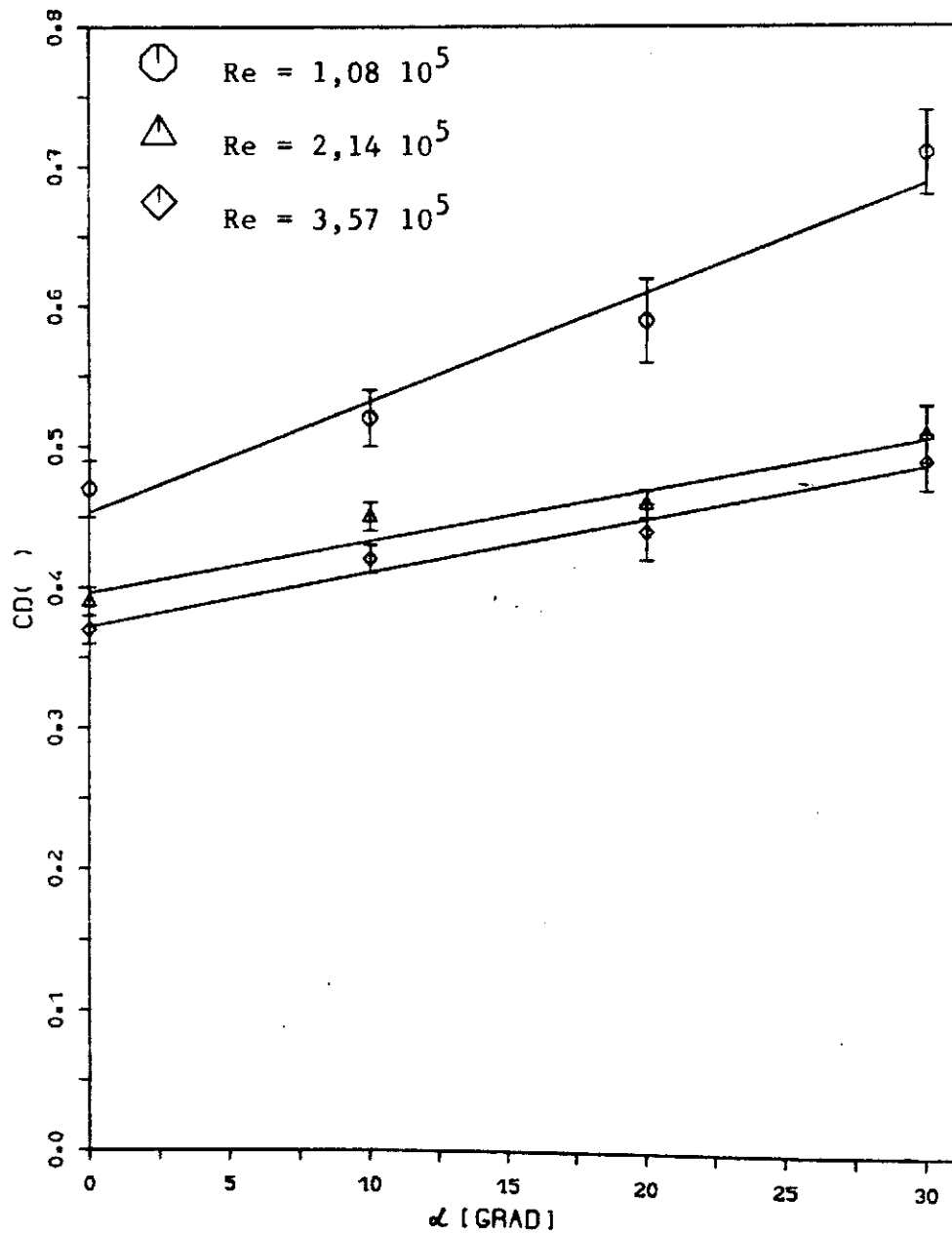


Abb. 37 : Winkelabhängigkeit des horizontalen Strömungswiderstandes beim Käse 450 kp Auftriebskörper

7. Vergleichsmessung

Für die Vergleichsmessung wurde ein Aluminiumzylinder von 50 cm Länge mit einem Längen- Seitenverhältnis von 1 : 5 verwendet, für den Vergleichswerte nach Muttray 1) bestehen. Die Oberfläche wurde poliert, die Seitenflächen wurden glatt geschnitten.

Die Messung der Widerstandskräfte am Standardzylinder erfolgte in der gleichen Weise, wie die Messung am Thermistorgerät. Korrekturwerte für den Halterwiderstand ergaben sich aus einer zweiten Meßreihe mit angebautem Halterungsdoppel, entsprechend Abschnitt 5.2. Die Meßergebnisse enthält Tabelle 14 (Tabellenanhang). Abb. 38 zeigt die graphische Darstellung der abgeleiteten Widerstandsbeiwerte über Re . Über den Bereich Reynoldsscher Zahlen ist eine weitgehende Konstanz der Widerstandsbeiwerte zu bemerken.

Der nach (F_l) über alle Meßwerte gebildete Mittelwert beträgt $0,78 \pm 0,01$ und stimmt gut mit den bei Muttray zitierten Werten überein.

Anm. 1) : vergl. Abb. 5, Seite 14

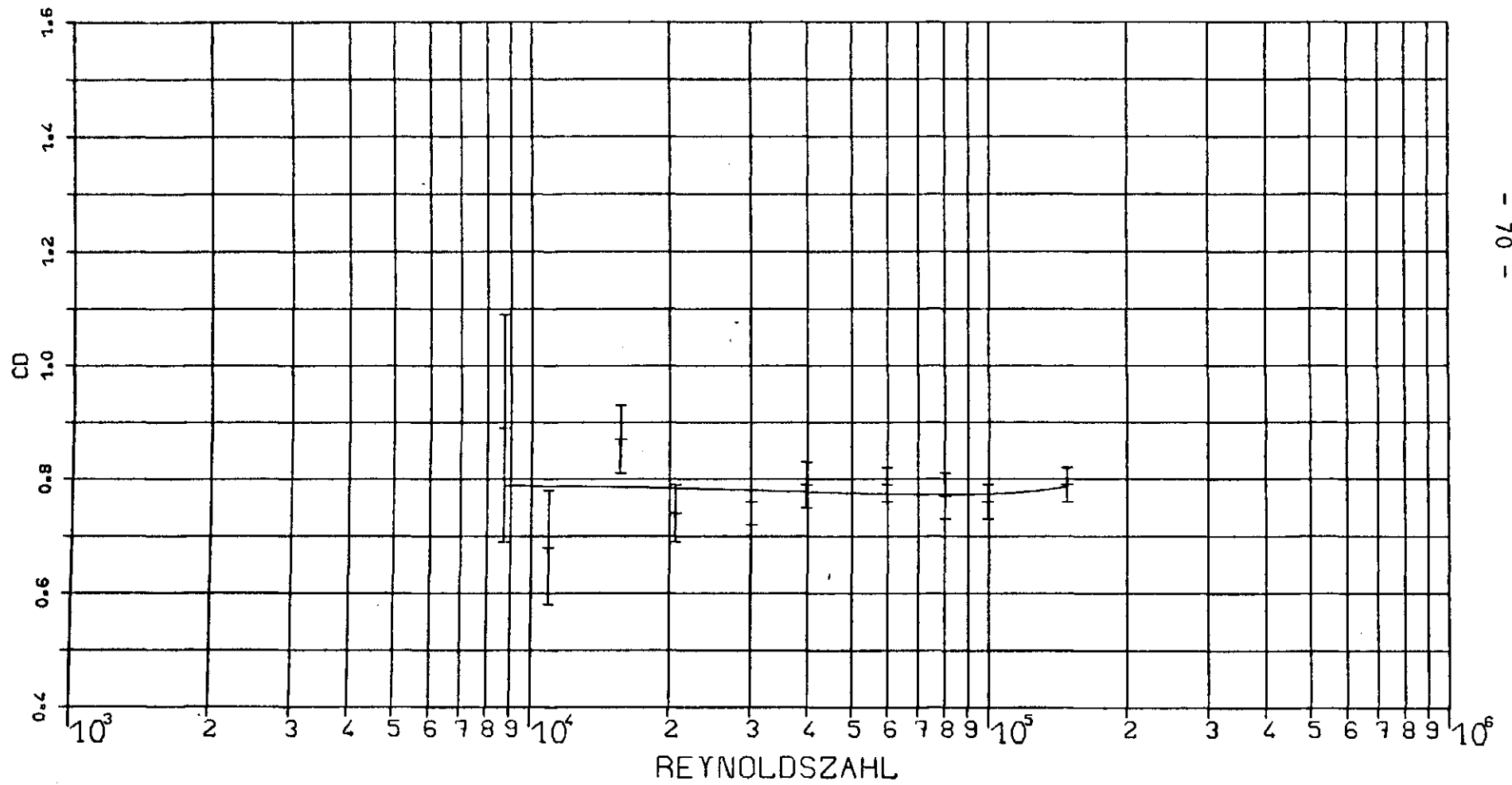


Abb. 38: Darstellung C_D (Re) für Standardzylinder

8. Diskussion der Ergebnisse

In dieser Arbeit wurden die bei stationärer Anströmung auftretenden Widerstandskräfte der wichtigsten Komponenten einer Unterwasserverankerung experimentell gemessen und deren Widerstandsbeiwerte bestimmt. Die Vergleichsmessung mit dem Standardzylinder zeigte gute Übereinstimmung mit verfügbaren Literaturwerten.

Mit Hilfe der angegebenen Werte können in numerischen Rechenprogrammen für das statische Verhalten von Einpunktverankerungen die an den Verankerungskomponenten bei Anströmung auftretenden Strömungskräfte simuliert werden. Die bislang übliche Schematisierung der Verankerungskomponenten auf einfache geometrische Formen und die Berechnung der Strömungskräfte aus den Widerstandsbeiwerten für Kugel und Zylinder ergibt erhebliche Abweichungen zu den tatsächlich auftretenden Widerstandskräften.

In der folgenden Übersicht ist das Verhältnis der an den Verankerungskomponenten auftretenden Widerstandskräfte zu den an Kugeln und Zylindern jeweils entsprechend großer Anströmfläche auftretenden Kräfte in % angegeben.

	Vergleich	Abweichung	Tendenz
Käse 450 kp	Kugel	22 %	zu groß
Käse 320 kp	Kugel	6 %	zu klein
Thermistorgerät	Zylinder (1:5)	14 %	zu klein
Aanderaa-Strommesser	Zylinder (1:5)	35 %	zu klein
Benthos (2)-Auftriebskörper	Kugel	52 %	zu klein
Benthos (2)-oberer Auftrieb	Kugel	14 %	zu klein

Die Abweichungen sind für die Auftriebskörper Käse 450 kp und die Benthos (2)- Auftriebskörper in beiden Einsatzweisen besonders groß, wobei im ersten Fall die Kräfte zu groß berechnet werden, in den beiden letzteren Fällen dagegen zu klein.

Abb. 39 gibt Aufschluß über die relative Bedeutsamkeit der Komponenten untereinander hinsichtlich ihrer Strömungswiderstände. Eingezeichnet sind die bei der durchschnittlichen Wassertemperatur von 20°C im Versuch gemessenen Kräfte für Geschwindigkeiten bis 120cm s⁻¹, wobei die an den nachgebildeten Auftriebskörpermodellen K 450 und K 320 gemessenen Kräfte auf die originalen Auftriebskörper umgerechnet wurden.

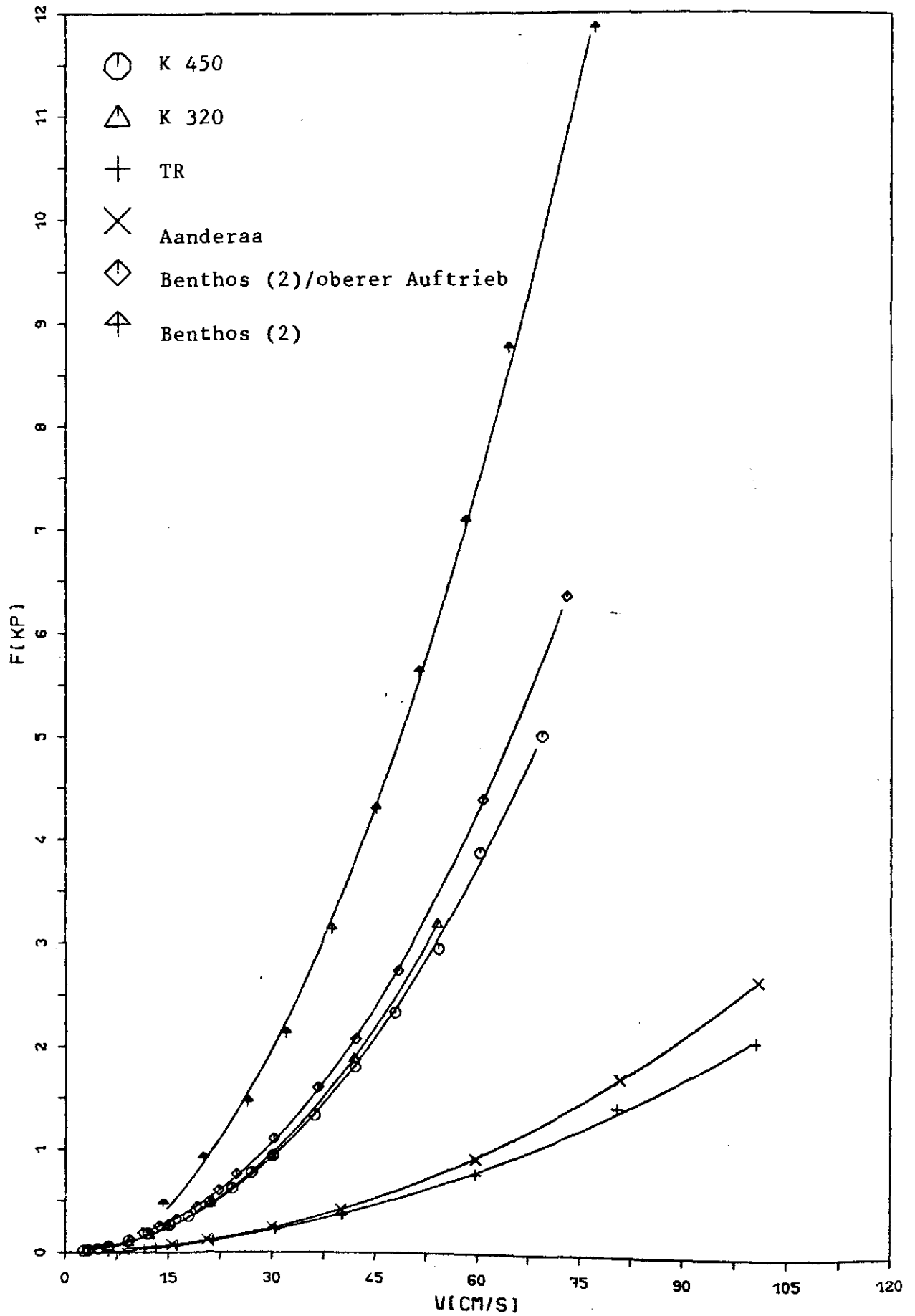


Abb. 39: Widerstandskräfte der einzelnen Verankerungskomponenten

Die größten Widerstandskräfte wurden an den Benthos (2) - Auftriebskörpern für ihre Einsatzweise innerhalb der Verankerung gemessen. Diese Körper werden in einer Verankerung bei Anströmung hohe Strömungswiderstände erfahren, besonders, wenn man berücksichtigt, daß häufig größere Verbände dieser Auftriebskörper senkrecht übereinander geschäkelt werden.

Trotz höherer Anströmflächen¹⁾ fallen die Strömungswiderstände an den Auftriebskörpern Käse 450 kp und 320 kp geringer aus auch gegenüber der Kombination zweier Benthos - Auftriebskörper für den Einsatz als oberer Auftrieb. Die größeren Kräfte bei den Benthos - Auftriebskörpern sind auf frühe Ablösung der Strömung von der Körperoberfläche infolge der durch die Verkleidung mit den scharfkantigen Hartkunststoffkalotten vorgegebenen Ablösestellen zurückzuführen. Da häufig im oberen Teil einer Verankerung hohe Anströmgeschwindigkeiten auftreten, erscheint, was die Größe des Strömungswiderstands angeht, der Einsatz des Käse 450 kp - bzw. Käse 320 kp - Auftriebskörpers geeigneter gegenüber der entsprechenden Benthos - Kombination. Die Einsatzmöglichkeiten der Käse - Auftriebskörper sind allerdings wegen der geringeren zulässigen Wassertiefe von 200 m eingeschränkt.

Die an den Meßgeräten auftretenden Kräfte sind vergleichsmäßig von untergeordneter Bedeutung.

Bei zunehmender winkelabhängiger Anströmung muß bei den Käse - Auftriebskörpern mit höheren Strömungswiderständen gerechnet werden. Gleiches ist bei der Benthos - Kombination beim Einsatz als oberer Auftrieb zu vermuten. Bei Einsatz innerhalb der Verankerung können kleinere Werte angenommen werden.

Für die Auftriebskörper war der Meßbereich im Versuch zu höheren Re - Zahlen hin begrenzt. Bei hohen Anströmungen und hohen Temperaturen werden im Einzelfall u. U. an den Auftriebskörpern im Ozean höhere Re - Zahlen erreicht. Die Extrapolation der gefundenen Widerstandsbeiwerte in den Bereich höherer Re - Zahlen als im Versuch gemessen, erscheint für die Käse - Auftriebskörper, wie diskutiert wurde, gerechtfertigt. Gleiches gilt wegen der scharfkantigen Ablösestellen auch für die Benthos - Auftriebskörper.

Anm 1) : vergl. Übersicht auf Seite 18

9. Tabellenanhang

Tab. 1 : Meßergebnisse für den Halterwiderstand bei
ausgebautem Meßkörper

MV	$v[\text{cms}^{-1}]$	$x[\text{SKT}]$	$x'[\text{SKT}]$	$\underline{x}/10^{-3}\text{kp}$
100	40,94	-0,8 \pm 0,2	\pm 0,02	5,3 \pm 1,5
	50,66	-1,6 \pm 0,3	0,05	10,6 \pm 2,4
	60,67	-3,0 \pm 0,3	0,07	19,8 \pm 2,5
	81,06	-6,0 \pm 0,1	0,2	39,6 \pm 2,1
	100,64	-8,3 \pm 0,1	0,2	54,8 \pm 2,2
	120,14	-11,8 \pm 0,1	0,3	77,9 \pm 2,7
	149,92	-17,8 \pm 0,2	0,4	117,6 \pm 4,0
	182,36	-26,2 \pm 0,2	0,3	173,1 \pm 3,4
	200,23	-31,5 \pm 0,3	0,4	208,1 \pm 5,4
	231,16	-46,0 \pm 0,5	0,5	305,1 \pm 7,8

Tab 2 : Mælingerresultater K 450 (Auftriebskôrpermodell)

MV	$V \text{ (cms}^{-1}\text{)}$	Re	X/SKT	$\Delta X'$	$F_x (10^{-3} \text{kp})$	$F_{xk} (10^{-3} \text{kp})$	$C_D = \frac{2F_{xk}}{AV^2}$
100	8,75	$2,80 \cdot 10^4$	$-1,8 \pm 0,3$	$\pm 0,05$	$12,0 \pm 2,4$	$12,0 \pm 2,4$	$0,60 \pm 0,12$
	11,18	$3,58 \cdot 10^4$	$-2,8 \pm 0,3$	$\pm 0,05$	$18,7 \pm 2,4$	$18,7 \pm 2,4$	$0,58 \pm 0,10$
	16,10	$5,15 \cdot 10^4$	$-5,0 \pm 0,2$	$\pm 0,1$	$33,0 \pm 2,1$	$33,0 \pm 2,1$	$0,49 \pm 0,03$
	21,00	$6,72 \cdot 10^4$	$-8,2 \pm 0,2$	$\pm 0,2$	$54,4 \pm 2,8$	$54,4 \pm 2,8$	$0,48 \pm 0,03$
	30,46	$9,75 \cdot 10^4$	$-17,0 \pm 0,2$	$\pm 0,4$	$112,6 \pm 4,3$	$112,6 \pm 4,3$	$0,47 \pm 0,02$
	40,16	$1,29 \cdot 10^5$	$-28,0 \pm 0,2$	$\pm 0,4$	$185,4 \pm 4,7$	$179,8 \pm 5,0$	$0,43 \pm 0,02$
	50,61	$1,62 \cdot 10^5$	$-41,7 \pm 0,1$	$\pm 0,4$	$276,2 \pm 5,0$	$265,6 \pm 5,6$	$0,40 \pm 0,01$
200	60,00	$1,92 \cdot 10^5$	$-55,6 \pm 0,1$	$\pm 0,5$	$368,2 \pm 6,3$	$348,8 \pm 6,8$	$0,37 \pm 0,01$
	70,29	$2,25 \cdot 10^5$	$-77,6 \pm 0,2$	$\pm 0,9$	511 ± 11	485 ± 12	$0,38 \pm 0,01$
500	81,02	$2,59 \cdot 10^5$	$-100,3 \pm 0,4$	$\pm 0,8$	660 ± 12	620 ± 13	$0,36 \pm 0,01$
	90,37	$2,80 \cdot 10^5$	$-124,0 \pm 0,3$	$\pm 1,8$	816 ± 18	773 ± 19	$0,37 \pm 0,01$
	100,73	$3,22 \cdot 10^5$	$-151,1 \pm 0,3$	$\pm 2,2$	994 ± 22	939 ± 23	$0,36 \pm 0,01$
	120,39	$3,85 \cdot 10^5$	$-214,3 \pm 0,6$	$\pm 2,3$	1410 ± 27	1332 ± 28	$0,35 \pm 0,01$
1000	140,28	$4,49 \cdot 10^5$	$-290,0 \pm 1,5$	$\pm 2,5$	1908 ± 37	1806 ± 38	$0,35 \pm 0,01$
	159,63	$5,11 \cdot 10^5$	$-378,2 \pm 1,0$	$\pm 3,5$	2472 ± 47	2340 ± 48	$0,35 \pm 0,01$
	180,89	$5,79 \cdot 10^5$	$-478,0 \pm 1,5$	$\pm 4,5$	3124 ± 57	2954 ± 58	$0,35 \pm 0,01$
	201,05	$7,18 \cdot 10^5$	$-622,0 \pm 3,2$	$\pm 4,5$	4092 ± 74	3882 ± 75	$0,37 \pm 0,01$
	231,27	$8,26 \cdot 10^5$	$-810,0 \pm 2,4$	$\pm 5,5$	5320 ± 90	5025 ± 92	$0,36 \pm 0,01$

Tab. 3 : Meßergebnisse K 320 (Auftriebskörpermodell)

MV	V (cms ⁻¹)	Re	X (SKT)	$\Delta X'$	F _x (10 ⁻³ kp)	F _{xk} (10 ⁻³ kp)	$C_D = \frac{2F_{xk}g}{AV^2}$
100	10,03	2,82 10 ⁴	-2,6 _{±0,4}	_{±0,05}	17,0 _{± 2,7}	17,0 _{± 2,7}	0,83 _{±0,15}
	16,32	4,59 10 ⁴	-4,3 _{±0,2}	_{±0,1}	25,5 _{± 1,5}	28,5 _{± 1,5}	0,53 _{±0,04}
200	21,11	5,94 10 ⁴	-8,0 _{±0,2}	_{±0,3}	52,6 _{± 4,0}	52,6 _{± 4,0}	0,58 _{±0,05}
	30,76	8,66 10 ⁴	-15,5 _{±0,3}	_{±0,5}	102,0 _{± 5,8}	98,0 _{± 6,0}	0,51 _{±0,03}
	40,79	1,15 10 ⁵	-25,6 _{±0,1}	_{±0,8}	168,4 _{± 7,0}	163,1 _{± 7,2}	0,48 _{±0,03}
	49,87	1,40 10 ⁵	-40,2 _{±0,4}	_{±0,9}	264,5 _{± 9,5}	254,2 _{± 9,8}	0,50 _{±0,02}
	70,18	1,97 10 ⁵	-76,5 _{±0,1}	_{±1,0}	503 _{±11}	475 _{±12}	0,47 _{±0,02}
500	99,67	2,80 10 ⁵	-151,5 _{±0,2}	_{±2,5}	997 _{±23}	943 _{±24}	0,47 _{±0,02}
	139,59	3,93 10 ⁵	-303,4 _{±1,4}	_{±3,0}	1996 _{±40}	1892 _{±41}	0,48 _{±0,01}
	180,44	5,08 10 ⁵	-511,3 _{±0,6}	_{±5,0}	3364 _{±58}	3194 _{±59}	0,48 _{±0,01}

MV	V (cms ⁻¹)	Re	X (SKT)	$\Delta X'$	Fx(10 ⁻³ kp)	$C_D = \frac{2F \times g}{AV^2}$
100	6,33	8,23 10 ³	-1,4+0,2	+0,03	9,3± 1,6	1,10+0,20
	11,48	1,48 10 ⁴	-4,5+0,3	+0,1	29,8± 2,7	1,04+0,10
	13,16	1,71 10 ⁴	-6,3+0,3	+0,3	41,7± 4,1	1,11+0,11
	16,25	2,10 10 ⁴	-10,9+0,4	+0,3	72,2± 4,8	1,26+0,09
	21,45	2,77 10 ⁴	-18,0+0,3	+0,4	119,2± 5,0	1,20+0,06
200	25,63	3,33 10 ⁴	-24,5+0,5	+0,4	162,3± 6,4	1,14+0,05
	30,45	3,93 10 ⁴	-36,7+0,3	+0,5	243,3± 6,3	1,21+0,04
	40,25	5,19 10 ⁴	-62,8+0,9	+0,9	413 ±13	1,18+0,04
	59,69	7,70 10 ⁴	-136,9+0,8	+1,8	901 ±22	1,17+0,03
	80,47	1,04 10 ⁵	-252,1+3,2	+2,4	1659 ±43	1,18+0,03
2000	100,54	1,30 10 ⁵	-381,9+2,5	+3,5	2513 ±52	1,15+0,03
	149,82	1,93 10 ⁵	-850,9+1,8	+6,5	5598 ±92	1,15+0,02
	200,59	2,59 10 ⁵	-1297,9+6,8	+12,0	8539 ±167	0,97+0,02

Tab 4a: Widerstandmessung am Thermistorgerät (TR) - ohne Korrektur für den Halterwiderstand

Tab 4b : Widerstandsmessung am Thermistorgerät (TR)
bei eingebautem Halterungsdoppel

MV	$V(\text{cms}^{-1})$	X (SKT)	$\Delta X'$	$F_x (10^{-3} \text{kp})$
100	15,84	-11,5 \pm 0,2	\pm 0,3	76,2 \pm 3,5
	20,20	-17,9 \pm 0,5	\pm 0,4	118,5 \pm 6,2
	30,45	-40,3 \pm 0,3	\pm 0,4	266,9 \pm 5,9
	40,86	-73,0 \pm 0,6	\pm 0,5	483,4 \pm 9,7
200	60,73	-162,3 \pm 0,3	\pm 0,9	1068 \pm 17
500	80,94	-289,2 \pm 0,4	\pm 2,7	1903 \pm 33
	101,01	-450,2 \pm 1,5	\pm 4,2	2962 \pm 55
2000	149,73	-1001,9 \pm 3,0	\pm 6,0	6591 \pm 106
	200,85	-1791,3 \pm 7,0	\pm 17,0	11785 \pm 222

Tab 4c : Korrigierte Meßergebnisse für Thermistorgerät (TR)

$V \text{ cms}^{-1}$	Re	$F_1 (10^{-3} \text{kp})$	$F_k (10^{-3} \text{kp})$	$C_{Dk} = \frac{2F_k g}{AV^2}$
16,25	$2,10 \cdot 10^4$	80,0 \pm 3,7	64,4 \pm 7,8	1,12 \pm 0,15
21,45	$2,77 \cdot 10^4$	133,6 \pm 7,0	105 \pm 10	1,05 \pm 0,10
30,45	$3,93 \cdot 10^4$	266,9 \pm 5,9	219 \pm 11	1,09 \pm 0,06
40,25	$5,19 \cdot 10^4$	460,5 \pm 9,3	366 \pm 21	1,04 \pm 0,06
59,69	$7,70 \cdot 10^4$	1031 \pm 17	771 \pm 36	1,00 \pm 0,04
80,47	$1,04 \cdot 10^5$	1881 \pm 33	1437 \pm 70	1,02 \pm 0,04
100,54	$1,30 \cdot 10^5$	2934 \pm 55	2092 \pm 92	0,95 \pm 0,04
149,82	$1,93 \cdot 10^5$	6599 \pm 107	4597 \pm 170	0,94 \pm 0,04
200,59	$2,59 \cdot 10^5$	11755 \pm 222	5323 \pm 324	0,61 \pm 0,04

Tab. 5 : Aanderaa - Strommesser

MV	$V (\text{cms}^{-1})$	Re	X(SKT)	$\Delta X'$	$F_x (10^{-3} \text{kp})$	$C_D = \frac{2F_x g}{AV^2}$
100	8,55	$1,09 \cdot 10^4$	$-3,2 \pm 0,5$	$\pm 0,07$	$21,2 \pm 3,8$	$1,33 \pm 0,25$
	15,52	$1,97 \cdot 10^4$	$-11,6 \pm 0,6$	$\pm 0,3$	$76,8 \pm 6,2$	$1,47 \pm 0,12$
	20,55	$2,61 \cdot 10^4$	$-18,8 \pm 0,3$	$\pm 0,4$	$124,5 \pm 5,0$	$1,36 \pm 0,06$
	29,99	$3,81 \cdot 10^4$	$-37,2 \pm 0,4$	$\pm 0,5$	$246,4 \pm 6,9$	$1,26 \pm 0,05$
	40,09	$5,09 \cdot 10^4$	$-63,2 \pm 0,1$	$\pm 0,6$	$418,5 \pm 7,3$	$1,20 \pm 0,03$
200	59,80	$7,59 \cdot 10^4$	$-139,8 \pm 0,4$	$\pm 1,3$	920 ± 21	$1,19 \pm 0,04$
500	80,90	$1,03 \cdot 10^5$	$-261,6 \pm 0,5$	$\pm 3,3$	1721 ± 41	$1,21 \pm 0,03$
	100,77	$1,28 \cdot 10^5$	$-407,0 \pm 0,5$	$\pm 3,8$	2678 ± 57	$1,22 \pm 0,03$
1000	120,57	$1,53 \cdot 10^5$	$-583,0 \pm 1,9$	$\pm 5,4$	3836 ± 87	$1,22 \pm 0,04$
2000	150,65	$1,91 \cdot 10^5$	$-894,1 \pm 0,5$	$\pm 9,7$	5882 ± 130	$1,20 \pm 0,04$
	181,15	$2,30 \cdot 10^5$	$-1242,8 \pm 2,5$	$\pm 11,0$	8176 ± 140	$1,15 \pm 0,04$
	201,81	$2,56 \cdot 10^5$	$-1364,6 \pm 3,6$	$\pm 20,0$	8978 ± 192	$1,02 \pm 0,04$

$V \text{ (cms}^{-1}\text{)}$	F/h	ϵ_k	$V_w \text{ (cms}^{-1}\text{)}$	Re	$F_x \text{ (10}^{-3}\text{kp)}$	$C_D = \frac{2F_x}{AV^2}$
11,23	0,036	1,27±0,05	14,26	6,79 10 ⁴	474± 18	1,02±0,06
15,80	0,050	1,27±0,05	20,07	9,56 10 ⁴	919± 27	1,00±0,07
20,88	0,066	1,27±0,05	26,52	1,26 10 ⁵	1468± 36	0,91±0,06
25,19	0,080	1,27±0,05	31,99	1,52 10 ⁵	2139± 72	0,91±0,06
30,44	0,097	1,27±0,05	38,67	1,84 10 ⁵	3137±170	0,92±0,08
35,53	0,113	1,27±0,05	45,12	2,15 10 ⁵	4304±113	0,92±0,06
40,48	0,129	1,27±0,05	51,41	2,45 10 ⁵	5641±145	0,93±0,06
45,48	0,145	1,28±0,05	58,21	2,77 10 ⁵	7097±195	0,91±0,06
50,40	0,160	1,28±0,05	64,51	3,07 10 ⁵	8778±162	0,92±0,06
60,26	0,191	1,28±0,05	77,13	3,67 10 ⁵	11858±285	0,87±0,06

Tab. 6 : Meßergebnisse Benthos (2) - Auftriebskörperpaket unter Berücksichtigung der Kanalkorrektur

V (cms ⁻¹)	Fh	ϵ_k	V_∞ (cms ⁻¹)	Re	F_x (10 ⁻³ kp)	$C_D = \frac{2F_x R}{AV^2}$
9,43	0,030	1,20±0,05	11,32	4,96 10 ⁴	186,5± 8,4	0,82±0,07
11,38	0,036	1,20±0,05	13,66	5,99 10 ⁴	256,1± 6,5	0,77±0,05
13,46	0,043	1,20±0,05	16,15	7,08 10 ⁴	323 ± 17	0,70±0,06
15,99	0,051	1,20±0,05	19,19	8,41 10 ⁴	443 ± 20	0,68±0,06
18,60	0,059	1,20±0,05	22,32	9,79 10 ⁴	601 ± 23	0,68±0,05
20,76	0,066	1,20±0,05	24,91	1,09 10 ⁵	759 ± 21	0,69±0,05
25,24	0,080	1,20±0,05	30,29	1,33 10 ⁵	1106 ± 24	0,68±0,05
30,54	0,097	1,20±0,05	36,65	1,61 10 ⁵	1604 ± 27	0,67±0,05
35,20	0,112	1,20±0,05	42,24	1,85 10 ⁵	2080 ± 38	0,65±0,04
40,32	0,128	1,20±0,05	48,38	2,12 10 ⁵	2741 ± 56	0,66±0,05
50,69	0,161	1,20±0,05	60,83	2,67 10 ⁵	4400 ± 74	0,67±0,05
60,84	0,193	1,20±0,05	73,01	3,20 10 ⁵	6368 ±138	0,67±0,05

Tab. 7 : Meßergebnisse Benthos (2) - oberes Auftriebselement
unter Berücksichtigung der Kanalkorrektur

Tab 8a : Winkelabhängige Widerstandsmessung am Thermistor (TR) - x - Komponente

MV	α	$V (\text{cms}^{-1})$	$X (\text{SKT})$	$\Delta X'$	$F_x (10^{-3} \text{kp})$
200	0	40,52	-65,3±0,2	+1,0	430,5±8,1
	15	40,22	-60,0±0,7	+0,8	395,5±9,9
	30	40,51	-58,8±0,6	+0,8	374,4±9,3
	45	40,71	-52,3±0,1	+0,7	344,8±5,4
	60	39,77	-35,1±0,4	+0,8	231,4±8,0
	75	40,55	-26,0±0,3	+0,6	171,4±6,0
	90	40,42	-20,4±0,3	+0,5	134,5±5,3

Tab 8b : Meßergebnisse mit Halterungsdoppel x- Komponente

MV	α	$V (\text{cms}^{-1})$	$X (\text{SKT})$	$\Delta X'$	$F_x (10^{-3} \text{kp})$
100	0	40,86	-72,8±0,3	+0,6	482,2±8,5
	15	39,78	-65,0±0,5	+0,6	429,3±7,3
	30	39,81	-62,4±0,2	+0,6	412,2±5,4
	45	39,78	-52,4±0,6	+0,5	346,1±7,3
	60	39,77	-39,3±0,4	+0,3	259,6±4,7
	75	39,74	-23,6±0,3	+0,2	155,9±3,4
	90	39,72	-18,3±0,4	+0,2	120,9±4,0

Tab. 9a : Winkelabhängige Widerstandsmessung am Thermistorgerät (TR) - y - Komponente

MV	α	V (cms ⁻¹)	Y (SKT)	$\Delta Y'$	F _y (10 ⁻³ kp)
100	0	40,14	0,5 \pm 0,2	\pm 0,05	9,0 \pm 4,5
	15	40,22	4,2 \pm 0,3	\pm 0,05	76,4 \pm 6,2
	30	40,30	5,3 \pm 0,3	\pm 0,08	96,4 \pm 7,0
	45	40,56	8,1 \pm 0,2	\pm 0,12	147,3 \pm 5,9
	60	40,43	9,4 \pm 0,2	\pm 0,14	170,9 \pm 6,3
	75	40,55	3,6 \pm 0,1	\pm 0,05	65,5 \pm 2,8
	90	40,43	0,7 \pm 0,1	\pm 0,01	12,7 \pm 1,6

Tab. 9b : Meßergebnisse mit Halterungsdoppel y- Komponente

MV	α	V (cms ⁻¹)	Y (SKT)	$\Delta Y'$	F _y (10 ⁻³ kp)
100	0	40,21	0,6 \pm 0,2	\pm 0,05	11,0 \pm 4,6
	15	40,68	6,0 \pm 0,3	\pm 0,05	109,1 \pm 6,4
	30	30,77	6,3 \pm 0,3	\pm 0,10	114,5 \pm 7,3
	45	39,80	8,3 \pm 0,2	\pm 0,10	150,9 \pm 5,9
	60	39,79	11,5 \pm 0,3	\pm 0,15	209,1 \pm 8,3
	75	39,74	5,0 \pm 0,1	\pm 0,06	90,9 \pm 3,0
	90	39,69	0,6 \pm 0,1	\pm 0,01	10,9 \pm 1,8

Tab. 10a : Korrektur um den Halterwiderstand bei 40,00 $\frac{\text{cm}}{\text{s}}$

x- Komponente

α	$F_{x1} (10^{-3} \text{kp})$	$F_{x1} (10^{-3} \text{kp})$	$F_{xk} (10^{-3} \text{kp})$
0	419,5 \pm 7,9	462,1 \pm 8,2	377 \pm 14
15	391,2 \pm 9,8	434,1 \pm 7,4	348 \pm 16
30	365,0 \pm 9,1	416,1 \pm 5,5	314 \pm 14
45	332,9 \pm 5,0	350,0 \pm 7,4	316 \pm 11
60	234,1 \pm 8,1	262,6 \pm 4,8	206 \pm 13
75	166,8 \pm 5,9	157,9 \pm 3,5	167 \pm 6
90	131,7 \pm 5,2	122,6 \pm 4,1	132 \pm 9

Tab. 10b : y- Komponente

α	$F_{y1} (10^{-3} \text{kp})$	$F_{y1} (10^{-3} \text{kp})$	$F_{yk} (10^{-3} \text{kp})$
0	11,0 \pm 4,6	9,0 \pm 4,5	9,0 \pm 4,5
15	75,6 \pm 6,2	105,5 \pm 6,2	46 \pm 11
30	95,0 \pm 6,9	115,8 \pm 7,4	74 \pm 13
45	143,3 \pm 5,8	152,4 \pm 5,5	134 \pm 10
60	167,3 \pm 6,2	211,3 \pm 8,4	123 \pm 13
75	63,7 \pm 2,8	92,1 \pm 3,1	35 \pm 6
90	12,4 \pm 1,6	11,1 \pm 1,9	12 \pm 3

α	$F_R(10^{-3}\text{kp})$	δ	β	$F_N(10^{-3}\text{kp})$	$F_T(10^{-3}\text{kp})$	$C_N(\alpha)$	$C_T(\alpha)$	$C_N/\cos\alpha$	$C_T/\sin\alpha$
0	377+14	2+2	0	377+14	0	1,09+0,04	0	1,09+0,04	
15	351+16	8+2	7+2	345+16	46+8	1,00+0,05	0,13+0,03	1,04+0,06	0,50+0,12
30	323+14	13+3	17+3	309+17	94+17	0,89+0,05	0,27+0,05	1,03+0,06	0,54+0,10
45	343+11	23+2	22+2	318+15	128+11	0,91+0,05	0,37+0,04	1,28+0,07	0,52+0,06
60	240+13	31+3	29+3	209+14	120+14	0,60+0,04	0,35+0,04	1,20+0,08	0,41+0,05
75	171+6	12+3	63+3	91+9	152+8	0,26+0,03	0,44+0,03	1,00+0,10	0,46+0,04
90	133+9	5+2	35+2	12+6	133+9	0,04+0,02	0,39+0,03		0,39+0,03

Tab. 11 : Normal- und Tangentialkomponentenzerlegung am schräg angeströmten Thermistorgerät

$\alpha = 0^\circ$

MV	$V(\text{cms}^{-1})$	$X(\text{SKT})$	$\Delta X'(\text{SKT})$	$F_x(10^{-3}\text{kp})$
100	30,46	-17,0 \pm 0,2	\pm 0,4	112,3 \pm 4,0
	60,00	-55,6 \pm 0,1	\pm 0,5	367,2 \pm 4,0
500	120,39	-214,3 \pm 0,2	\pm 2,3	1411,7 \pm 16,6

$\alpha = 10^\circ$

MV	$V(\text{cms}^{-1})$	$X(\text{SKT})$	$\Delta X'(\text{SKT})$	$F_x(10^{-3}\text{kp})$
100	30,54	-19,2 \pm 0,3	\pm 0,4	126,8 \pm 4,4
	60,03	-63,2 \pm 0,3	\pm 0,6	417,4 \pm 5,7
500	119,61	-236,6 \pm 1,0	\pm 1,7	1558,6 \pm 17,9

$\alpha = 20^\circ$

MV	$V(\text{cms}^{-1})$	$X(\text{SKT})$	$\Delta X'(\text{SKT})$	$F_x(10^{-3}\text{kp})$
100	30,09	-21,0 \pm 0,2	\pm 0,5	138,8 \pm 4,4
	59,43	-64,1 \pm 0,4	\pm 0,6	423,4 \pm 6,4
500	119,62	-246,2 \pm 5,4	\pm 1,7	1621,9 \pm 46,9

$\alpha = 30^\circ$

MV	$V(\text{cms}^{-1})$	$X(\text{SKT})$	$\Delta X'(\text{SKT})$	$F_x(10^{-3}\text{kp})$
100	30,14	-25,4 \pm 0,6	\pm 0,4	167,7 \pm 6,7
	60,01	-72,3 \pm 1,3	\pm 0,7	477,5 \pm 13,3
500	120,02	-279,4 \pm 4,6	\pm 1,7	1840,6 \pm 41,7

Tab 12a : Winkelabhängigkeit des horizontalen Strömungswiderstandes beim K 450 Auftriebsmodell

Re	α	$F_x(10^{-3} \text{kp})$	$C_D(\alpha)$
$1,08 \cdot 10^5$	0	111,1 \pm 4,0	0,47 \pm 0,02
	10	124,8 \pm 4,4	0,52 \pm 0,02
	20	140,7 \pm 6,5	0,59 \pm 0,03
	30	169,5 \pm 6,8	0,71 \pm 0,03

Re	α	$F_x(10^{-3} \text{kp})$	$C_D(\alpha)$
$2,14 \cdot 10^5$	0	367,2 \pm 4,0	0,39 \pm 0,01
	10	417,0 \pm 5,7	0,45 \pm 0,01
	20	431,6 \pm 6,6	0,46 \pm 0,01
	30	477,3 \pm 13,3	0,51 \pm 0,02

Re	α	$F_x(10^{-3} \text{kp})$	$C_D(\alpha)$
$3,57 \cdot 10^5$	0	1402,6 \pm 16,5	0,37 \pm 0,01
	10	1568,8 \pm 18,0	0,42 \pm 0,01
	20	1632,2 \pm 47,2	0,44 \pm 0,02
	30	1840,0 \pm 41,7	0,49 \pm 0,02

Tab. 12b : Winkelabhängige Widerstandsbeiwerte für K 450
Auftriebsmodell

Tab 14 : Meßergebnisse der Vergleichsmessung am Standardzylinder

v (cms ⁻¹)	Re	F_{xk} (10 ⁻³ kp)	$C_D = \frac{2F_{xk}g}{AV^2}$
8,77	8,70 10 ³	17,5 _± 3,6	0,89 _± 0,20
10,98	1,09 10 ⁴	20,8 _± 3,3	0,68 _± 0,10
15,68	1,56 10 ⁴	54,5 _± 3,1	0,87 _± 0,06
20,73	2,06 10 ⁴	80,7 _± 5,5	0,74 _± 0,05
30,35	3,01 10 ⁴	178,2 _± 9,4	0,76 _± 0,04
40,13	3,98 10 ⁴	327 _± 17	0,79 _± 0,04
60,30	5,98 10 ⁴	735 _± 28	0,79 _± 0,03
80,79	8,01 10 ⁴	1272 _± 40	0,77 _± 0,04
100,16	9,94 10 ⁴	1949 _± 77	0,76 _± 0,03
148,99	1,48 10 ⁵	4463 _± 170	0,79 _± 0,03

10. Verzeichnis der Abbildungen

	Seite
<u>Abb. 1</u> : Einpunkt - Unterwasserverankerung 276/3	4
<u>Abb. 2</u> : Reibungsfreie Umströmung einer Kugel	7
<u>Abb. 3</u> : Grenzschichtablösung	11
<u>Abb. 4</u> : Widerstandsbeiwerte für Kugel und Zylinder nach Messungen von Wieselsberger	14
<u>Abb. 5</u> : Widerstandsbeiwerte eines unendlich und eines endlich langen Zylinders nach Messungen von Wieselsberger	14
<u>Abb. 6</u> : Kinematische Viskosität für reines Wasser und Seewasser in Abhängigkeit von der Temperatur	17
<u>Abb. 7</u> : Normal- und Tangentialkomponentenzerlegung am Seilelement	19
<u>Abb. 8</u> : Stromlinienverengung durch Kanaleffekt	23
<u>Abb. 9</u> : Versuchsaufbau (schematische Darstellung)	25
<u>Abb. 10</u> : Koordinatenfestlegung in der Meßsektion	26
<u>Abb. 11</u> : Auftreten von Querkräften an schräg angeströmten zylindrischen Körper	27
<u>Abb. 12</u> : Nicht-zentrale Aufhängung eines zylindrischen Körpers	28
<u>Abb. 13</u> : 3 - Komponentenwaage des IFS/Hmb	30
<u>Abb. 14</u> : dto, schematische Draufsicht	31
<u>Abb. 15</u> : Hauptteil der Halterung und Stromlinienverkleidung	32
<u>Abb. 16</u> : Beispiel einer Meßwertaufzeichnung mit XYT - Schreiber	39
<u>Abb. 17</u> : Eingebauter K 450 - Meßkörper im Schleppkanal	41
<u>Abb. 18</u> : Widerstandskräfte der Auftriebskörpermodelle K 450 , K 320 und Halterwiderstand	43
<u>Abb. 19</u> : Widerstandsbeiwerte in Abhängigkeit der Re - Zahl für K 450 Auftriebskörper (C_D (Re)-Diagramm)	44
<u>Abb. 20</u> : dto. , für K 320 Auftriebskörper	45

<u>Abb. 21</u>	: Re - Zahlenbereich für K 450 Auftriebskörper für verschiedene Temperaturen und Geschwindigkeiten	46
<u>Abb. 22</u>	: Thermistorgerät im Schleppkanal	48
<u>Abb. 23</u>	: $C_D(Re)$ - Diagramm für Thermistorgerät	51
<u>Abb. 24</u>	: Aanderaa Strommesser im Schleppkanal	52
<u>Abb. 25</u>	: $C_D(Re)$ - Diagramm für Aanderaa Strommesser	53
<u>Abb. 26</u>	: Re - Zahlenbereich für die Meßgeräte mit $d = 12.8$ cm für verschiedene Temperaturen und Geschwindigkeiten	54
<u>Abb. 27</u>	: Benthos (2) - Auftriebskörper im Schleppkanal	55
<u>Abb. 28</u>	: $C_D(Re)$ - Diagramm für Benthos (2) - Auftriebskörper	57
<u>Abb. 29</u>	: Oberes Auftriebselement Benthos (2) in zwei Stellungen quer und längs zur Anströmrichtung	58
<u>Abb. 30</u>	: dto. , Stellungen um $\pm 45^0$ gedreht	58
<u>Abb. 31</u>	: $C_D(Re)$ - Diagramm für Benthos (2) - Kombination als oberer Auftrieb	60
<u>Abb. 32</u>	: Re - Zahlenbereich für Benthos (2) - Auftriebskörperkombinationen für verschiedene Temperaturen und Geschwindigkeiten	61
<u>Abb. 33</u>	: Vertikale Anströmwinkel am Thermistorgerät	62
<u>Abb. 34</u>	: dto. , für K 450 Auftriebskörpermodell	63
<u>Abb. 35</u>	: Normal- und Tangentialkomponentenzerlegung	64
<u>Abb. 36</u>	: Darstellung von normalem und tangentialem Widerstandsbeiwert als Funktion des Anströmwinkels α für Thermistorgerät	66
<u>Abb. 37</u>	: Winkelabhängigkeit des horizontalen Strömungswiderstands für K 450 Auftriebskörper	68
<u>Abb. 38</u>	: $C_D(Re)$ - Diagramm für Vergleichsmessung mit Standardzylinder	70
<u>Abb. 39</u>	: Widerstandskräfte der einzelnen Verankerungskomponenten	72

11. Verzeichnis der verwendeten Symbole

Symbol :		Dimension :
A	charakteristische Anströmfläche	(m ²)
b	Körperlänge senkrecht zur Stromrichtung	(cm)
C _D	Widerstandsbeiwert	
C _N (α)	" , normaler	
C _T (α)	" , tangentialer	
C _{DN}	" in Normalrichtung, winkelunabhängig	
C _{DT}	" in Tangentialrichtung, "	
d	Körperlänge in Stromrichtung	(cm)
f	Kanalquerschnitt	(m ²)
F	Widerstandskraft	(N)
F _x	" , gemessen in x-Richtung	(10 ⁻³ kp)
F _y	" , gemessen in z-Richtung	(")
F _K	" , korrigierte	(")
F _N	" , in Normalrichtung	(")
F _T	" , in Tangentialrichtung	(")
F _R	" , aus F _N und F _T resultierend	(")
F _h	Froudesche Tiefenzahl für begrenzte Wassertiefe	
g	Gravitationskonstante	(m s ⁻²)
h	Höhe	(cm)
IW	Induktiver Wegaufnehmer	
K	Einheit der XYT-Schreiberdiagramme	(mm)
L	Symbol für Länge	
l/d	Längen-Seitenverhältnis eines endlich langen Kreiszyllinders	
m	Verengungsgrad	
MV	Bereich am Meßverstärker	(SKT)
M _z	Skalenablesung in der z-Komponente	(")

p	Druck	(dbar)
Re	Reynoldszahl	
Re _K	" , kritische	
S	Salzgehalt	(‰)
T	Temperatur	(°C)
V	Anströmgeschwindigkeit	(cms ⁻¹)
V _N	" in Normalrichtung	(")
V _T	" in Tangentialrichtung	(")
V _∞	" für unbegrenztes Medium	(")
x	Komponente in Stromrichtung	
y	Komponente senkrecht zur Stromrichtung	
z	Vertikalkomponente	
X	Skalenablesung in x-Richtung	(SKT)
Y	" in y-Richtung	(")
Δ X'	Ablesefehler, x-Komponente	(")
Δ Y'	" , y-Komponente	(")
Z	Symbol für Zeit	

griechische Symbole :

α	Vertikalwinkel	(Grad)
β	Winkel zwischen F _R und F _N	(")
δ	Abweichungswinkel von F _R zur Horizontalen	(")
ε _K	Korrekturfaktor für Kanaleffekt	
μ	dynamische Viskosität	(Pa s)
ν	kinematische Viskosität	(m ² s ⁻¹)
ρ	Dichte	(kg m ⁻³)
τ	Schubspannung	(N)

12. Literaturverzeichnis

- 1) Batchelor, G.K. (1967):
An Introduction to Fluid Dynamics
Cambridge University Press
- 2) Berteaux, H.O. (1967):
Buoy Engineering
Wiley Interscience Publication
J. Wiley & Sons, New York
- 3) Berteaux, H.O. ; Walden, R.G. (1967):
Analysis & Experimental Evaluation of
Single Point Moored Buoy Systems
W.H.O.I. Technical Report
Ref. No. 69-36
- 4) Bradshaw, P. (1970):
Experimental Fluid Mechanics
Pergamon Press, Oxford, Vol 2
- 5) Bretschneider, C.I. (1969):
Topics in Ocean Engineering
Gulf Publishing Company Houston, Texas
- 6) Casarella, M.J. ; Parsons, M. (1970):
Cable Systems Under Hydrodynamic Loading
Mar. Techn. Soc. Journ. 4, pp. 27-44
- 7) Choo, Y.I. ; Casarella, M.J. (1971):
Hydrodynamic Resistance of Towed Cables
Journal of Hydronautics
Vol 6, No. 4, pp.126-131
- 8) Eck, B. (1961):
Technische Strömungslehre
Springer Verlag, Berlin, 6.Auflage
- 9) Engelmann, H. (1972):
Untersuchungen an Komponenten für
Tiefwasserverankerungssysteme
Kieler Meeresforschung XXVIII/2, pp. 119-129
- 10) Fofonoff, N.P. (1969):
Buoy-system Motions
in: Handbook of Ocean and Underwater Engineering
Mc Craw Hill Book Comp. , New York
- 11) Föppl, O. (1910):
Widerstand an Drähten und Seilen
Z. Flugtechnik I
- 12) Gerlach, E. (1980):
Zur Berechnung dynamischer Vorgänge in
Trossensystemen bei Einsätzen auf See
Inst. f. Schiffbau der Univ. Hamburg
Ber. No. 400

- 13) Goldstein, S. (1965):
Modern Developments in Fluid Dynamics
Vol I, II, Dover Publications Inc., New York
- 14) Hart, H. (1978):
Einführung in die Meßtechnik
VEB Verlag Technik, Berlin
- 15) Hänsel, H. (1965):
Grundzüge der Fehlerrechnung
VEB Verlag Technik, Berlin
- 16) Hoerner, S.F. (1965):
Fluid Dynamic Drag
publ. by the Author, New Jersey
- 17) Krist, T.K. (1960):
Werkstatt Tabellen
Technik-Tabellen Verlag, Darmstadt, 5. Auflage
- 18) Muttray, H. (1931):
Die experimentellen Tatsachen des Widerstands
ohne Auftrieb
im: Handbuch der Experimentalphysik IV
Teil 2, pp. 233 ff
- 19) Neunaß, E. (1967):
VEB Verlag Technik, Berlin
- 20) Newman, J.N. (1978):
Marine Hydrodynamics
The MIT Press, Cambridge, Vol 2
- 21) Pode, L. (1950) :
An Experimental Investigation of the
Hydrodynamic Forces on Stranded Cables
David Taylor Model Basin Rep. 687
- 22) Pope, A. ; Harper, J.J. (1966):
Low Speed Wind Tunnel Testing
John Wiley & Sons, New York
- 23) Popow, S.G. (1958):
Strömungstechnisches Meßwesen
VEB Verlag Technik, Berlin
- 24) Pankhurst, R.C. ; Holder, D.W. (1952)
Wind Tunnel Technique
London
- 25) Prandtl, L. (1965):
Führer durch die Strömungslehre
Vieweg & Sohn, Braunschweig, 6. Auflage
- 26) Sass, F. ; Bouche', Ch. (1956):
Dubbels Taschenbuch für Maschinenbau
Springer Verlag, Berlin, 11. Auflage

- 27) Schlichting, H. (1964):
Grenzschicht - Theorie
Verlag G. Braun, Karlsruhe, 5. Auflage
- 28) Schuster, S. (1955):
Beitrag zur Frage der Kanalkorrektur von
Modellversuchen
Schiffstechnik Bd. 3, pp. 93-96
- 29) Schröder, M. (1982):
Das statische Verhalten von Einpunkt-
verankerungen bei Anströmung
Ber. aus dem Inst. f. Meereskunde Kiel
No. 108
- 30) Siedler, G. ; Gerlach, E. (1976):
Verankerte Meßsysteme für die Tiefsee
Interocean 76 IO 76-355
NOWEA, Düsseldorf
- 31) Siedler, G. ; Graßhoff, G. (1970):
Tiefwasser - Verankerungssysteme des Inst.
f. Meereskunde Kiel (Technischer Bericht)
Kieler Meeresforschung XXVI/1, pp. 21-42
- 32) Sigloch, H. (1982):
Technische Fluidmechanik
VDI - Verlag Düsseldorf
- 33) Snyder, R.M. (1969):
Buoys and Buoy Systems
in: Handbook of Ocean and Underwater Engineering
Mc Craw Hill Book Comp. , New York
- 34) Snyder, R.M. (1965):
A Practical Approach to Hydrodynamic Drag
Geo-Marine Techn. 1(4), pp. 33 ff
- 35) Squires, G.L. (1971):
Meßergebnisse und ihre Auswertung
De Gryter Lehrbuch, Berlin
- 36) Tchernia, P. (1980):
Descriptive Regional Oceanography
Pergamon Marine Series, Oxford, Vol 3
- 37) Weinblum, G. (1934):
Einfluß der endlichen Querschnittsabmessungen einer
Schlepprinne auf den Modellwiderstand
Z. Schiffbau, pp. 83-85
- 38) Wolf, H. (1975):
Ausgleichsrechnung, Formeln zur praktischen
Anwendung
Dümmler 7835, Bonn

- 39) Wuest, W. (1961):
Verdrängungskorrekturen für rechteckige
Windkanäle bei verschiedenen Strahl-
begrenzungen und bei exzentrischer Lage des
Modells
Z. Flugwiss. 9, H. 1, pp. 15-19 und H. 11, p 362
- 40) Wuest, W. (1969):
Strömungsmeßtechnik
Vieweg Verlag, Braunschweig