

DEUTSCHE AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN ZU BERLIN
INSTITUT FÜR MEERESKUNDE

BEITRÄGE ZUR MEERESKUNDE

HERAUSGEGEBEN

VON

ERICH BRUNS

UNTER MITWIRKUNG VON

OTTO KOLP, GÜNTHER SAGER, KLAUS VOIGT

HEFT 26



AKADEMIE-VERLAG · BERLIN

1969

1969. 1008
Institut für Ostseeforschung
Seestraße 15
Bibliothek
O-2530 Warnemünde

INHALT

	Seite
ULRICH KREMSEK, HANS-JÜRGEN BROSIK, Untersuchungen über vertikale Austauschkoeffizienten und RICHARDSONsche Zahlen in der mittleren Ostsee	5
WERNER SCHNESE, Untersuchungen über die Produktivität der Ostsee II	11
SIGURD SCHULZ, Das Makrobenthos der südlichen Beltsee	21
HANS BERGE, LUTZ BRÜGMANN, Möglichkeiten zur polarographischen Bestimmung einiger Hauptkomponenten im Meerwasser	47
WOLFGANG MATTHÄUS, Der Durchflußkoeffizient bei Rohrpegelanlagen	59

Erschienen im Akademie-Verlag GmbH, 108 Berlin, Leipziger Straße 3 - 4

Copyright 1969 by Akademie-Verlag GmbH

Lizenznummer: 202 · 100/502/69

Kartengenehmigung: Nr. 276/69

Gesamtherstellung: VEB Druckerei „Thomas Müntzer“, 582 Bad Langensalza

Bestellnummer: 2105/26 · ES 18 E 4

28,—

Untersuchungen über vertikale Austauschkoeffizienten und RICHARDSONSche Zahlen in der mittleren Ostsee

ULRICH KREMSER und HANS-JÜRGEN BROSN

Zusammenfassung: Anhand von Messungen in der Stolper Rinne während der internationalen synoptischen Aufnahme in der Ostsee 1964 wurden vertikale Scheinreibungs- und Scheindiffusionskoeffizienten sowie RICHARDSONSche Zahlen berechnet. Die Mittelwerte für den vertikalen Scheinreibungskoeffizienten lagen zwischen $0,92$ und $7,4 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$, für die mittleren vertikalen Scheindiffusionskoeffizienten ergaben sich Werte zwischen $0,26$ und $8,2 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$. Bei den RICHARDSONSchen Zahlen wurde die von der Theorie geforderte

Ungleichung $Ri < \frac{K_u}{K_s}$ erst unterhalb von 40 m Tiefe erfüllt.

In den letzten Jahren wurden bei der Untersuchung über den turbulenten Austausch im Meer große Fortschritte gemacht. Sie finden ihren Ausdruck in theoretischen Ansätzen und neuen Methoden (statistische Turbulenztheorien, Diffusionsuntersuchungen mit Farbindikatoren), die eine bessere Berechnung der Austauschgrößen gestatten. Die Anwendung neuer Methoden setzt aber entsprechend „dichtes“ Meßwertmaterial voraus, was bei herkömmlichen Untersuchungen nicht gegeben ist. Deshalb haben Berechnungen unter Anwendung der klassischen halbempirischen Ansätze noch Bedeutung, zumal speziell aus der Ostsee bisher kaum Resultate von Versuchen mit moderner Methodik bekannt sind (HELA und VOIPIO 1960). Die nachfolgenden Ausführungen beruhen daher auf Berechnungen, die von KREMSER 1967 anhand von Messungen des polnischen Forschungsschiffes „Baltyk“ während der internationalen synoptischen Aufnahme in der Ostsee im August 1964 ausgeführt wurden.

Die „Baltyk“ war vom 31. 7. bis 13. 8. 1964 über einer Wassertiefe von 60 m auf der Position $55^\circ 16' \text{ N}$ und $16^\circ 32' \text{ E}$ in der Stolper Rinne verankert. Messungen der Temperatur, des Salzgehalts, der Strömung und einer Reihe weiterer Faktoren erfolgten alle 2 Stunden. Bis zu einer Tiefe von 30 m lagen die einzelnen Meßhorizonte jeweils 5 m auseinander, darunter 10 m .

Die Verhältnisse am Untersuchungsort wurden durch eine kräftige Temperatursprungschicht zwischen 20 und 30 m gekennzeichnet (Temperaturabnahme von 15° C auf rund 4° C), deren Gradient in der zweiten Hälfte des Untersuchungszeitraums etwas abnahm, wobei sich auch die Tiefenlage änderte ($25-40 \text{ m}$). Der Salzgehalt lag bis zu einer Wassertiefe von etwa 40 m fast

unverändert bei $7,6\text{‰}$ und nahm darunter rasch bis auf etwa 14‰ zu. In der vertikalen Dichteverteilung zeichnete sich ein stärkerer Gradient im Niveau der Temperatursprungschicht ab (σ_t -Zunahme von 5,2 auf 6,0), während der starke Dichtegradient in Bodennähe (unterhalb von 50 m σ_t -Zunahme von 6,1–6,3 auf Werte von über 11) durch den Salzgehalt bedingt wurde. Die Strömungsverhältnisse an der Ankerstation wurden durch eine große Veränderlichkeit charakterisiert.

Das vorliegende Beobachtungsmaterial diente als Grundlage für die Berechnung der vertikalen Scheinreibungs- und Scheindiffusionskoeffizienten K_u und K_s . Alle Rechnungen erfolgten mit Mittelwerten über 12 Stunden. Es muß bemerkt werden, daß die Wahl des Mittelungsintervalls bei den Berechnungen sehr problematisch ist, da die Mittelwerte vom Mittelungsintervall selbst abhängen. In diesem Zusammenhang sei auch beispielsweise auf die Berechnungen horizontaler Scheinreibungskoeffizienten in Abhängigkeit vom Mittelungsintervall durch KOWALIK und TARANOWSKA (1967) hingewiesen.

Der vertikale Scheinreibungskoeffizient K_u wurde nach einem Ansatz von JACOBSEN (1913) berechnet.

$$K_u \left[\left(\frac{d^2 \rho}{dz^2} \right)_{z_2} - \left(\frac{d^2 \rho}{dz^2} \right)_{z_1} \right] = g \int_{z_1}^{z_2} \frac{d\rho}{dx} dz \quad (1)$$

mit u = Stromgeschwindigkeit

z = Wassertiefe

ρ = Dichte

x = Horizontalkoordinate in Strömungsrichtung.

Der Scheinreibungskoeffizient K_u wird dabei für die Schicht zwischen den Tiefen z_1 und z_2 als konstant angenommen. Für diese Berechnungen wird der horizontale Dichtegradient benötigt. Aus den Beobachtungen sind aber nur die einzelnen Größen in Abhängigkeit von der Zeit und ihre vertikalen Gradienten bekannt. Näherungsweise gilt

$$\frac{d\rho}{dx} \approx \frac{\Delta\rho}{\Delta x} = \frac{\rho(x_1) - \rho(x_2)}{x_1 - x_2} \quad (2)$$

Mit $x_1 = u_1 t_1$ und $x_2 = u_1 t_2$ ergibt sich für (2) der Ausdruck

$$\frac{d\rho}{dx} \approx \frac{\Delta\rho}{u \Delta t} \quad (3)$$

Die nach (1) berechneten gemittelten vertikalen Scheinreibungskoeffizienten für den Untersuchungszeitraum enthält Tab. 1. Die Vertikalverteilung der gemittelten K_u hatte in den obersten 30 m eine große Ähnlichkeit mit den mittleren vertikalen Dichtegradienten (Abb. 1). Mit einem Wert von $5,1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ erreichte der Scheinreibungskoeffizient ein erstes Maximum an der Obergrenze der Temperatursprungschicht. Ein zweites Maximum mit $7,4 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ zeichnete sich in der Schicht zwischen 30–40 m Tiefe ab. Die jeweils aus den 12stündig gemittelten Meßdaten berechneten Einzelwerte des vertikalen Scheinreibungskoeffizien-

TABELLE 1
Vertikale Scheinreibungs- und Scheindiffusionskoeffizienten

Tiefe (m)	K_u ($\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$)	K_s
5–10	0,92	8,2
10–15	1,6	4,6
15–20	3,7	3,6
20–25	5,1	3,5
25–30	3,1	4,0
30–40	7,4	4,0
40–50	5,0	0,26

ten schwankten zwischen $0,14$ und $570 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$, wobei die kleinsten Werte in den oberflächennahen Schichten bis 15 m Tiefe auftraten. Die beiden Maxima an der Obergrenze bzw. unterhalb der Temperatursprungschicht waren nahezu während des gesamten Untersuchungszeitraums in den Einzelwerten erkennbar, allerdings mit unterschiedlicher Größe von K_u .

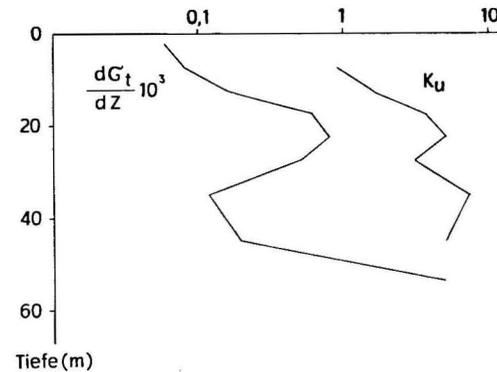


Abb. 1. Vertikaler Scheinreibungskoeffizient und Dichtegradient in Abhängigkeit von der Wassertiefe

Die Größenordnung der berechneten Werte stimmt mit früheren Untersuchungen von JACOBSEN (1913) für das Feuerschiff „Schultz's Grund“ im südlichen Kattegat überein. Unter Zugrundelegung des auch von uns verwendeten Ansatzes (1) kam er zu einem $K_u = 3,0 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ für den Tiefenbereich von 3,25 bis 11,25 m. Berechnungen mit anderen Ansätzen, die aber auf der gleichen Voraussetzung wie (1) aufbauten, führten ihn zu Werten zwischen $1,9$ und $27 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$, wobei sich die Maxima für Tiefen unter 15 m ergaben. Alle Rechnungen erfolgten mit Mittelwerten über längere Zeiträume (ein Jahr oder länger).

Die Berechnung der vertikalen Scheindiffusionskoeffizienten K_s wurde anhand der Salzgehaltsbestimmungen mit einem Ansatz von PROUDMAN (1953) durchgeführt, der wiederholt Anwendung bei der Untersuchung von Austausch-koeffizienten fand

$$K_s = u \frac{\frac{ds}{dx}}{\frac{d^2s}{dz^2}} \quad (4)$$

Der horizontale Salzgehaltsgradient wurde wiederum nach (3) bestimmt. Die gemittelten Werte für die Untersuchungsperiode sind ebenfalls in Tab. 1 enthalten. Bis zu einer Wassertiefe von 40 m, also bis unterhalb der Temperatursprungschicht, lag der vertikale Scheindiffusionskoeffizient K_s nach einer leichten Abnahme in Oberflächennähe nahezu konstant um $4 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ und nahm darunter schnell ab. In der Schicht zwischen der Oberfläche und etwa 40 m Tiefe war das Wasser im Hinblick auf den Salzgehalt gut durchmischt. Der Salzgehalt blieb nahezu konstant. Erst darunter nahm er rasch zu, so daß auch die Werte von d^2s/dz^2 groß waren und sich damit trotz der zeitweise relativ hohen Stromgeschwindigkeiten in Bodennähe (bis zu 30 cm s^{-1}) kleine vertikale Scheindiffusionskoeffizienten ergaben. Die Einzelwerte schwankten zwischen $0,038$ und $73 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$.

Die so ermittelten Werte stimmen angenähert mit den von JACOBSEN (1913) für das südliche Kattegat, MODEL (1944) für eine zweitägige Ankerstation in der Ostsee, PROUDMAN (1953) für das Kattegat und HELA (1966) für die finnischen Gewässer nach unterschiedlichen Ansätzen berechneten vertikalen Scheindiffusionskoeffizienten überein.

Außer den Austauschkoeffizienten wurden zur Charakterisierung der Turbulenzverhältnisse ferner mit dem vorhandenen Material RICHARDSONSche Zahlen berechnet. Für die Beziehung zwischen der vertikalen Dichteschichtung und dem vertikalen Geschwindigkeitsgefälle gilt folgender Ausdruck (s. z. B. DEFANT 1961):

$$\text{Ri} = \frac{g}{\rho} \frac{\frac{d\rho}{dz}}{\left(\frac{du}{dz}\right)^2} < \frac{K_u}{K_s} \quad (5)$$

Die Berechnung der Stabilität erfolgte näherungsweise mit $d\sigma_t/dz$, da die so entstandenen Fehler bei den betrachteten Wassertiefen praktisch bedeutungslos sind. Mit $\rho = 1$ ergibt sich für die RICHARDSONSchen Zahlen

$$\text{Ri} = g \frac{\frac{d\sigma_t}{dz} \cdot 10^{-3}}{\left(\frac{du}{dz}\right)^2} \quad (6)$$

In jeder Schicht wurde für einen Mittelungszeitraum von 12 Stunden eine RICHARDSONSche Zahl berechnet, die dann für jede Schicht insgesamt gemittelt

wurden. Da die Einzelwerte nicht normal verteilt waren, sondern eine logarithmische Häufigkeitsverteilung zeigten, wurden sie in Gruppen eingeteilt und diese dann unterschiedlich gewichtet.

Die gemittelten RICHARDSONSchen Zahlen sind in Tab. 2 enthalten. Sie zeigt, daß die obersten gut durchmischten Wasserschichten durch kleine Ri-Werte charakterisiert wurden. In der Sprungschicht erfolgte ein beträchtlicher Anstieg der Zahlen bis zu einem Maximum von 9,1 in der Schicht von 20–25 m. Ein erneuter Anstieg erfolgte in Bodennähe bis zu einem Ri von 16. Hier wirkte sich die starke Salzgehaltszunahme aus, wodurch die Turbulenz abgeschwächt wurde.

TABELLE 2
RICHARDSONSche Zahlen

Tiefe (m)	Ri	$\frac{K_u}{K_s}$
0–5	0,35	—
5–10	0,23	0,11
10–15	0,64	0,34
15–20	6,1	1,0
20–25	9,1	1,5
25–30	2,8	0,78
30–40	5,3	1,8
40–50	9,1	19
50–58	16	—

Bei einem Vergleich der berechneten RICHARDSONSchen Zahlen mit dem Verhältnis K_u/K_s zeigte es sich, daß die von der Theorie geforderte Ungleichung (5) erst unterhalb von 40 m Tiefe erfüllt wurde. Die Gründe hierfür können in der angewandten Methodik liegen. Die Wahl des Mittelungsintervalls erfolgte willkürlich, wodurch die zur Berechnung notwendigen Größen beeinflusst wurden. Ferner spielte bei der vorhandenen Schichtung neben dem Salzgehalt auch die Wassertemperatur eine Rolle, die auf Grund des Ansatzes (4) bei den Rechnungen praktisch nicht einging.

Damit zeigt sich die Problematik der Untersuchung von Austauschprozessen auf der Grundlage konventioneller Methoden. Die Lösung des Problems erfordert die Einbeziehung neuer Vorstellungen und besserer Untersuchungsmethoden.

Literatur

- DEFANT, A., Physical Oceanography. Vol. I Oxford 1961, S. 391–393.
 HELA, I., Vertical eddy diffusivity of waters in the Baltic Sea. Geophysica 9 (1966), S. 219 bis 234.
 HELA, I. und VOIPPIO, A., Tracer dyes as a means of studying turbulent diffusion in the sea. Ann. Acad. Sci. Fennicae A VI, 69 (1960), 9 S.
 JACOBSEN, J. P., Beitrag zur Hydrographie der dänischen Gewässer. Meddelelser Komm. Havundersorgelser, Ser. Hydrografi, II, Nr. 2 (1913), S. 76–79.

KOWALIK, Z. und TARANOWSKA, S., Horizontal large-scale turbulence in the Baltic Sea. *Cah. Oceanogr.* 19 (1967), S. 295—309.

KREMSEK, U., Betrachtungen über Richardson'sche Zahlen und vertikale Austauschkoeffizienten auf Grund internationaler Dauerbeobachtungen im August 1964 in der Ostsee. Diplomarbeit Inst. Meteorologie u. Geophysik Humboldt-Univ. Berlin 1967, 64 S.

MODEL, F., Turbulenz — ein Beispiel aus der Meereskunde. *Ann. Hydr. mar. Met.* 72 (1944), S. 97—106.

PROUDMAN, J., *Dynamical Oceanography*. London 1953, S. 111—112.

Anschriften der Verfasser:

H. Kremser, Dr. H.-J. Brosin, Institut für Meereskunde, 253 Warnemünde, Seestr. 15

Untersuchungen über die Produktivität der Ostsee. II

Das Phytoplankton in der mittleren Ostsee und in der Bottensee im April/Mai 1967

WERNER SCHNESE

Zusammenfassung: Es wurden Zellzahl, Verdrängungsvolumen und Plasmavolumen der wichtigsten Phytoplanktonformen auf 5 Stationen in der mittleren Ostsee und in der Bottensee bestimmt und zum Stand der Frühjahrsentwicklung in Beziehung gesetzt. An einem Beispiel wurde aus der Zunahme des Plasmavolumens die Primärproduktion berechnet, die überraschend gut mit Werten übereinstimmte, die sich aus dem Nitratverbrauch ergeben hatten.

1. Einleitung

Vom 21. April bis zum 23. Mai 1967 unternahm das Forschungsschiff „Prof. Albrecht Penck“ eine Reise in die mittlere Ostsee und in die Bottensee, um hydrographische, chemische und biologische Untersuchungen durchzuführen. Über die Ergebnisse dieser Messungen wurde bereits von NEHRING, SCHULZ und ROHDE (1969) ausführlich berichtet. Zur Ergänzung der biologischen Untersuchungen wurden auf den vier Dauerstationen (25, 5c, 16a, 4c) sowie auf Station 17 Vollplanktonproben entnommen und ausgezählt (vgl. Tab. 1). Über die Ergebnisse dieser Untersuchungen wird im folgenden berichtet.

TABELLE I.

Koordinaten und Tiefen der Stationen

Station Nr.	Koordinaten	Tiefe in m	Datum der Probenentnahme
25	54°55,4' N 13°30,4' E	46	22. 4. und 24. 4. 1967
5 c	57°02,0' N 17°40,0' E	108	26. 4. und 27. 4. 1967
17	63°18,1' N 20°01,6' E	62	3. 5. 1967
16 a	62°57,0' N 19°59,2' E	91	8. 5., 10. 5. und 12. 5. 1967
4 c	55°52,0' N 18°38,4' E	104	15. 5. 1967

Die Entnahmetiefe betrug auf allen Stationen 0 m, 10 m, 20 m, 30 m und 40 m. Entnommen wurden die Proben mit einem 3,5-l-Hydrobios-Universal-Wasserschöpfer. Der größte Teil des entnommenen Wassers diente der Bestimmung des Seston- und Chlorophyllgehaltes, während für die quantitative Phytoplanktonbestimmung 100 ml abgefüllt und mit Jod-Jodkaliumlösung fixiert wurden (UTERMÖHL 1958). Das Auszählen erfolgte mit Hilfe eines umgekehrten Mikroskopes. Je nach Planktondichte fanden dabei Kammern mit 5 bis 50 ml Inhalt Verwendung. Da das Schiff auf den Dauerstationen jeweils längere Zeit vor Anker lag, konnte der größte Teil der Proben unmittelbar nach der Entnahme an Bord durchgezählt werden. Die Erschütterungen der Nebenmaschinen ließen sich mit Schaumgummimatten soweit abfangen, daß das Mikroskopieren auch mit stärkeren Vergrößerungen möglich war.

Um den Planktongehalt der Proben untereinander sowie mit den Ergebnissen von anderen Autoren vergleichbar zu machen, wurde neben der Zellzahl auch das Verdrängungsvolumen der wichtigsten Planktonformen bestimmt. Einfache geometrische Körper wurden berechnet, kompliziertere in Plastiline maßstabgerecht nachgeformt und, nach entsprechender Umrechnung, die Volumen ermittelt (LOHMANN 1908). Die dabei auftretenden Ungenauigkeiten sind vertretbar und resultieren im wesentlichen aus der wechselnden Größe der Einzelindividuen innerhalb einer Art oder Gattung. Die Plastilinmodelle wurden nach durchschnittlich großen Individuen geformt, bei starken Größenunterschieden, wie z. B. bei der Gattung *Coscinodiscus*, machte sich eine Einteilung in Größenklassen nötig.

Aus dem Verdrängungsvolumen ließen sich unter Verwendung der von HAGMEIER (1960) angegebenen Umrechnungsfaktoren ohne Schwierigkeiten die Volumen der lebenden organischen Substanz („Rechenvolumen“ nach LOHMANN 1908) bestimmen. Die „Rechenvolumen“ werden hier, in Anlehnung an HICKEL (1967), als „Plasmavolumen“ bezeichnet. Für die wichtigsten Phytoplanktonformen wurden folgende Plasmavolumen ermittelt:

	Verdrängungsvolumen (μ^3)	Plasmavolumen (μ^3)
<i>Chaetoceros</i> (mittlere)	800	300
<i>Achnanthes taeniata</i>	650	250
<i>Skeletonema costatum</i>	400	150
<i>Coscinodiscus</i> (größere)	400000	150000
<i>Coscinodiscus</i> (mittlere)	150000	60000
<i>Melosira</i> (mittlere)	3500	1300
<i>Asterionella formosa</i>	800	300
<i>Peridinium</i> (mittlere)	22000	22000
<i>Peridinium</i> (kleinere)	6000	5000
<i>Gonyaulax catenata</i>	25000	22000
<i>Dinophysis</i> (mittlere)	22000	20000
<i>Flagellaten</i> (kleinere)	250	200
<i>Nodularia spumigena</i>	6500	5000
<i>Aphanizomenon</i>	200	150
μ -Algen	10	8

Da im Zusammenhang mit den übrigen Untersuchungen vor allem die Quantität des Phytoplanktons interessierte, wurde auf die Identifizierung der meisten Arten ebenso verzichtet, wie auf die quantitative Erfassung seltener, produktionsbiologisch bedeutungsloser Formen.

2. Die Ergebnisse der Untersuchungen

Station 25: Salzgehalt¹⁾ 7,3⁰/₀₀, Temperatur¹⁾ 4,5–5 °C. Wie erwartet, hatte die Frühjahrsentwicklung des Phytoplanktons im Arkonabecken ihren Höhepunkt bereits überschritten. Im Oberflächenwasser waren die Nährstoffe praktisch aufgebraucht und die Dynamik der Populationsentwicklung rückläufig. Nach der Abundanz und nach dem Verdrängungsvolumen dominierten die Diatomeen, vor allem *Chaetoceros*-Arten und *Skeletonema costatum* (GREV), dem Plasmavolumen nach jedoch die Peridineen (Tab. 2 und 3, Abb. 1).

TABELLE 2

Die Abundanzen der wichtigsten Phytoplanktonformen (Mittelwerte aus 0–40 m Tiefe, Angaben in 1000 Zellen/l)

	Stat. 25	Stat. 5c	Stat. 17	Stat. 16a	Stat. 4c
<i>Chaetoceros</i>	460,0	520,0	680,0	1640,0	24,0
<i>Achnanthes</i>	0	0	680,0	1650,0	0
<i>Skeletonema</i>	2900,0	1250,0	170,0	1160,0	240,0
<i>Coscinodiscus</i>	2,2	1,2	1,2	2,2	0,2
<i>Melosira</i>	0	0	2,2	4,1	0
<i>Asterionella</i>	2,0	0	0	0	0
<i>Peridinium</i>	100,0	288,0	50,0	145,0	18,0
<i>Gonyaulax</i>	3,8	6,0	6,0	25,0	4,2
<i>Dinophysis</i>	0,1	0,1	0,1	0,1	1,4
<i>Flagellaten</i>	30,0	35,0	30,0	25,0	10,0
<i>Nodularia</i>	0	0	0	0	1,0
<i>Aphanizomenon</i>	0	0	0	0	3,2
μ -Algen	7800,0	2500,0	2500,0	14900,0	18300,0

Innerhalb von 48 h nahm das Gesamtvolumen von 0,331 mm³/l auf 0,298 mm³ pro l ab²⁾. Diese Abnahme geht insbesondere auf Kosten der Diatomeenpopulationen.

Station 5c: Salzgehalt 7,1–7,2⁰/₀₀, Temperatur 3–3,5 °C. Auch im Gotlandbecken hatte die Frühjahrsentwicklung des Phytoplanktons ihren Höhepunkt überschritten und war rückläufig. Das Gesamtvolumen innerhalb der oberen 40 m nahm in 24 h von 0,670 mm³/l auf 0,617 mm³/l ab. Diese Abnahme betrifft auch hier vor allem die Diatomeenvolumen, während die Peridineenvolumen in der gleichen Zeit größer wurde (Tab. 3). Das Verhältnis der Diatomeenvolu-

¹⁾ Es handelt sich ebenso wie auf den folgenden Stationen um Oberflächenwerte während der Dauer der Beobachtungen.

²⁾ Sowohl auf Station 25 als auch auf den später untersuchten Stationen 5c und 16a könnte auch die inhomogene Verteilung des Phytoplanktons im Wasserkörper und dessen Verlagerung die Ursache für die beobachtete Veränderung des Plasmavolumens sein.

TABELLE 3

Plasmavolumen des Phytoplanktons (Angaben in $10^6 \cdot \mu^3/l$, + = Werte unter $1 \cdot 10^6 \cdot \mu^3/l$)

Tiefe	0 m	10 m	20 m	30 m	40 m	0-40 m	% der Gesamtmenge
<i>Stat. 25 (22. 4.)</i>							
Diatomeen	410	128	103	28	33	140	42
Peridineen	404	82	76	111	124	159	48
Chlorophyceen	9	67	8	3	+	17	5
μ -Algen	21	15	12	11	16	15	5
Insgesamt	844	292	199	153	173	331	
<i>Stat. 25 (24. 4.)</i>							
Diatomeen	251	176	122	32	13	119	40
Peridineen	240	163	152	114	41	142	48
Chlorophyceen	10	6	6	+	+	4	1
μ -Algen	62	20	61	10	10	33	11
Insgesamt	563	365	341	156	64	298	
<i>Stat. 5c (26. 4.)</i>							
Diatomeen	165	330	178	264	102	208	31
Peridineen	810	580	404	248	129	434	65
Chlorophyceen	3	11	10	3	6	7	1
μ -Algen	15	22	8	44	16	21	3
Insgesamt	993	933	600	559	253	670	
<i>Stat. 5c (27. 4.)</i>							
Diatomeen	71	67	144	194	117	119	19
Peridineen	1090	375	500	94	194	541	73
Chlorophyceen	140	13	6	3	15	35	6
μ -Algen	13	20	4	15	10	12	2
Insgesamt	1314	475	654	296	336	617	
<i>Stat. 17 (3. 5.)</i>							
Diatomeen	238	172	42	27	16	93	48
Peridineen	34	272	67	5	22	80	42
Chlorophyceen	10	8	8	+	2	6	3
μ -Algen	16	20	20	6	5	13	7
Insgesamt	288	472	137	38	45	192	
<i>Stat. 16a (8. 5.)</i>							
Diatomeen	765	742	186	28	4	345	56
Peridineen	346	494	230	127	52	250	40,7
Chlorophyceen	3	6	+	+	2	2	0,3
μ -Algen	38	25	17	14	9	21	3
Insgesamt	1152	1267	433	169	67	618	
<i>Stat. 16a (10. 5.)</i>							
Diatomeen	308	900	276	19	17	304	49
Peridineen	713	520	28	94	39	279	44
Chlorophyceen	+	14	1	7	+	5	1
μ -Algen	118	39	7	19	9	38	6
Insgesamt	1139	1473	312	139	65	626	

TABELLE 3 (Fortsetzung)

Tiefe	0 m	10 m	20 m	30 m	40 m	0-40 m	% der Gesamtmenge
<i>Stat. 16a (12. 5.)</i>							
Diatomeen	660	1145	421	42	15	457	62
Peridineen	666	444	7	39	20	235	32
Chlorophyceen	13	62	2	3	1	16	2
μ -Algen	51	54	18	11	+	27	4
Insgesamt	1380	1705	448	95	36	735	
<i>Stat. 4c (15. 5.)</i>							
Diatomeen	12	71	33	20	16	30	17
Peridineen	115	81	111	154	81	108	59
Chlorophyceen	+	3	12	2	3	4	2
μ -Algen	19	145	2	5	4	35	19
Cyanophyceen	8	5	9	3	2	5	3
Insgesamt	154	295	167	184	106	182	

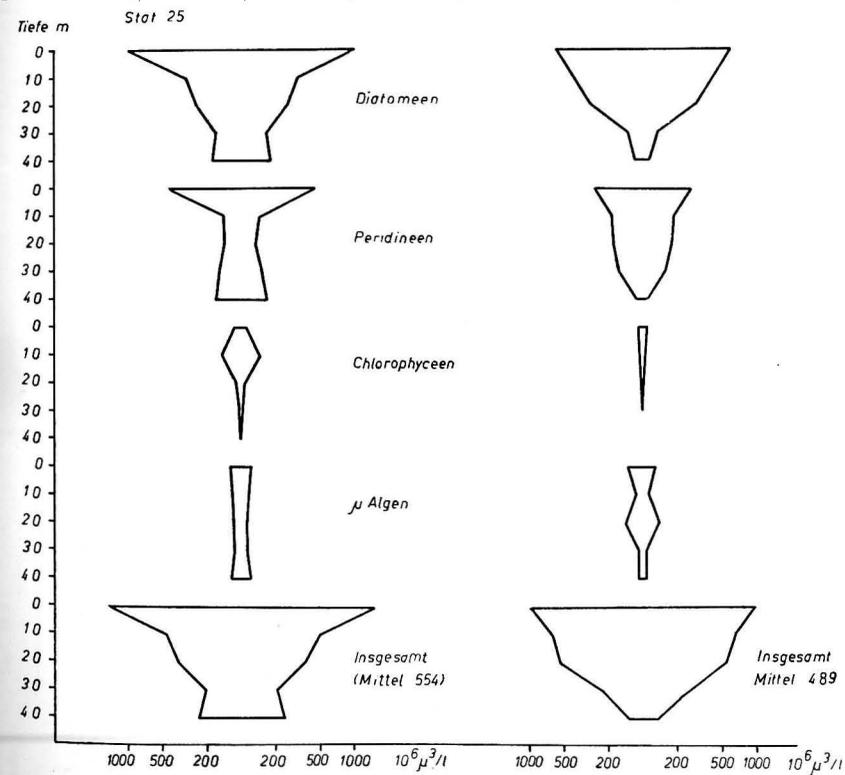
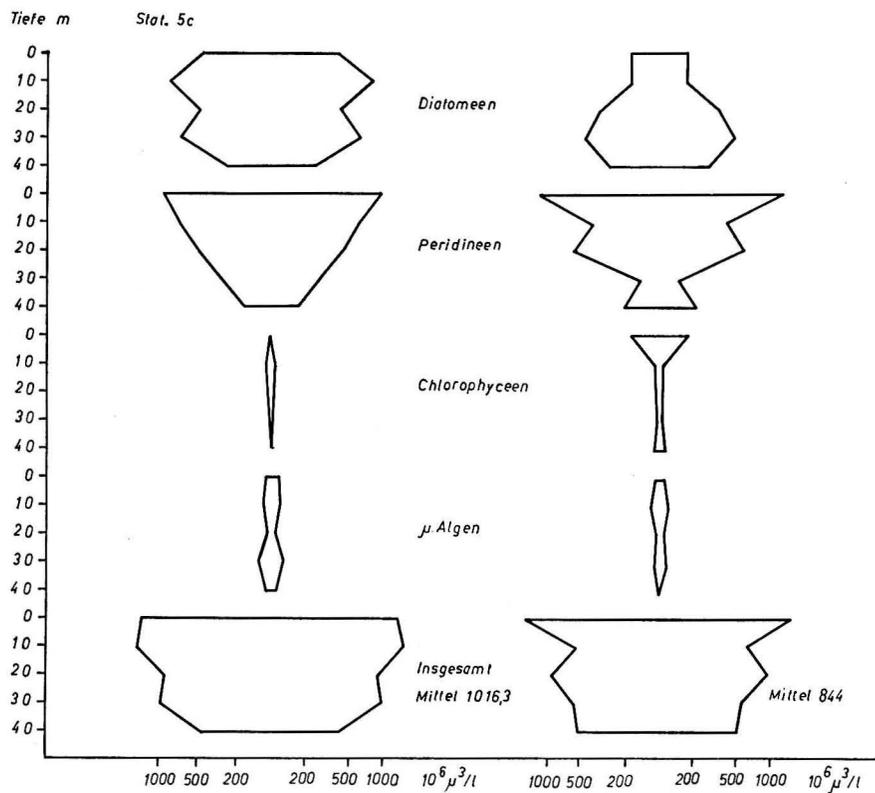
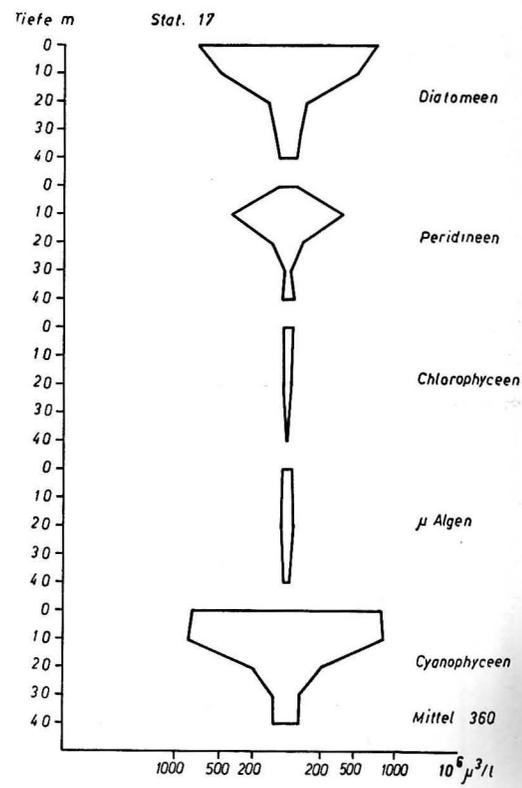


Abb. 1. Verteilung des Verdrängungsvolumens des Phytoplanktons

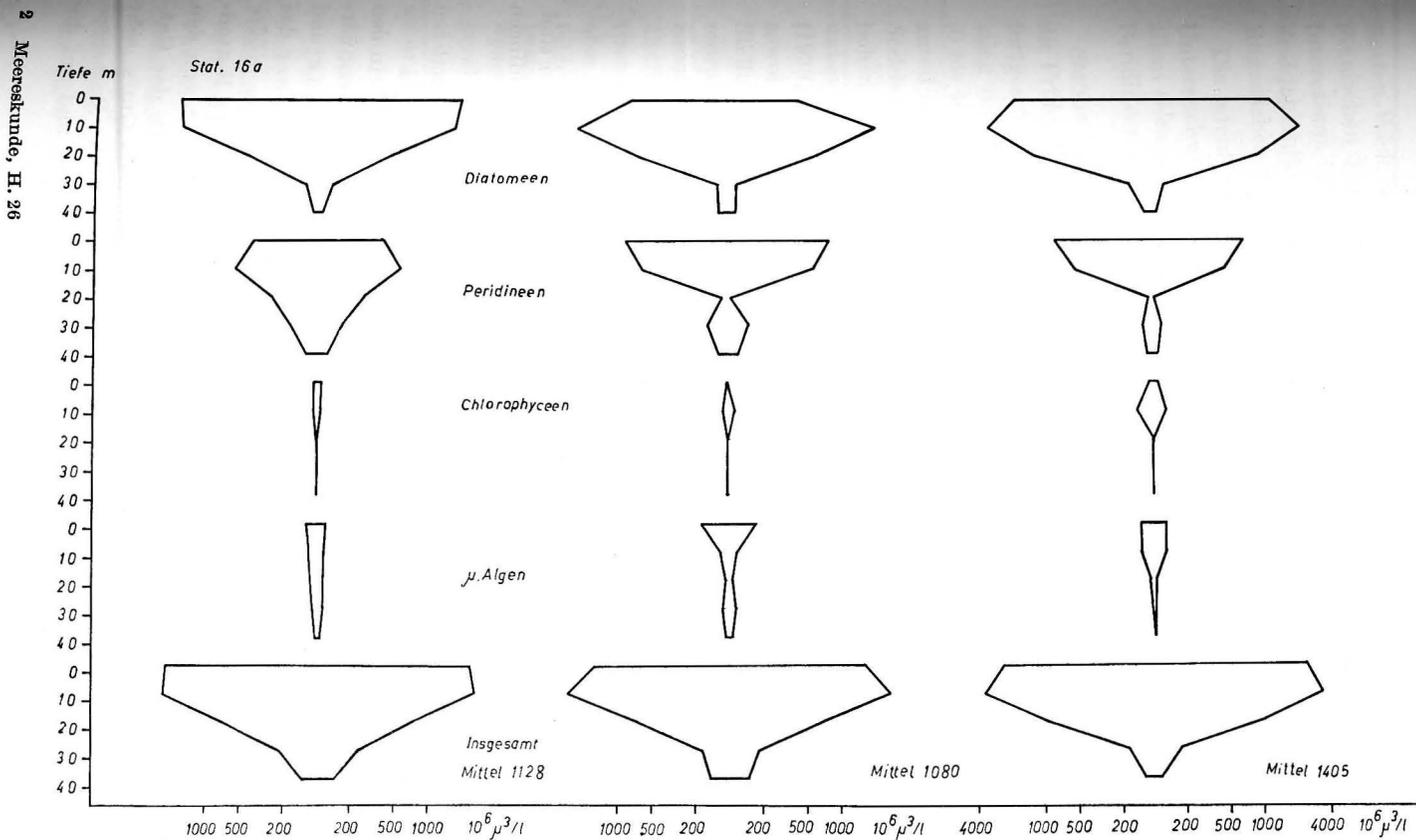
1a: Station 25, am 22. 4. und 24. 4. 1967



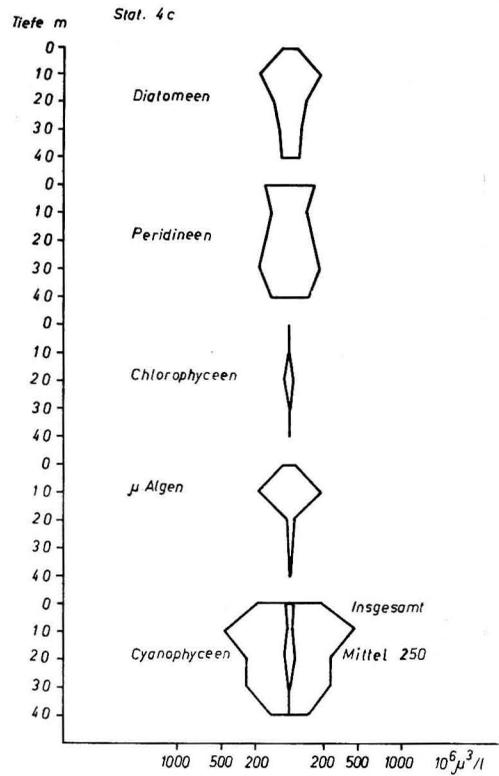
1b: Station 5c, am 26. 4. und 27. 4. 1967



1c: Station 17, am 3. 5. 1967



1d: Station 16a, am 8. 5., 10. 5. und 12. 5. 1967



1e: Station 4c, am 15. 5. 1967

men zu den Peridineenvolumen beträgt im Mittel 1 : 3,8. Produktionsträger sind, wie in der Arkona-See, *Skeletonema* und *Chaetoceros* und unter den Peridineen *Gymnodinien*, *Gonyaulax* und *Peridinium pellucidum* (BERG).

Station 17: Salzgehalt 4,7‰, Temperatur 0,7 °C. Während in der mittleren Ostsee nur noch die abklingende Frühjahrsblüte angetroffen wurde, steckte sie hier in der nördlichen Bottensee, unweit der derzeitigen Eisgrenze, noch in den Anfängen. Der während des Winters akkumulierte Vorrat an Nährstoffen, vornehmlich an Nitrat, war nicht wesentlich dezimiert (NEHRING, SCHULZ und ROHDE 1969). Mit durchschnittlich 0,192 mm³/l in den oberen 40 m war das Plasmavolumen noch wenig entwickelt. Wir dürfen annehmen, daß der größte Teil jener Substanz nach dem Eisaufbruch gebildet wurde. Wie in der Bottensee allgemein zu dieser Zeit überwogen die Diatomeen (48%), gefolgt von den Peridineen (42% des gesamten Plasmavolumens). Neben Vertretern der Gattung *Chaetoceros* und *Skeletonema costatum* war *Anchanthes taeniata* GRUN. sehr häufig. Diese an der Frühjahrsentfaltung des Phytoplanktons in der Bottensee maßgeblich beteiligte Form ist im wesentlichen auf die Bottensee und auf die

Botten-Wiek beschränkt, in der übrigen Ostsee wird sie nur bei Gotland und im Finnischen Meerbusen mit kleinen Populationen angetroffen (MÖLDER 1962). Interessant ist, daß sie in neuerer Zeit im Greifswalder Bodden während der Frühjahrsblüte in Massen auftritt (Salzgehalt 7,2‰), während sie in den übrigen Rügenschens Bodden fehlt.

Die wichtigsten Peridineenformen in der Bottensee waren zur Zeit unserer Untersuchungen neben *Gonyaulax catenata*, *Peridinium pellucidum* und vor allem *Glenodinium gymnodinium* PÉNARD, die zusammen mit anderen kleinen Peridineen gezählt wurde.

Station 16a: Salzgehalt 4,5–5‰, Temperatur 0,9–2 °C. Wie erwartet, war die Frühjahrsentfaltung des Phytoplanktons auf dieser Station bedeutend weiter fortgeschritten als auf Station 17. Während der Beobachtungszeit von 4 Tagen stieg das Plasmavolumen von durchschnittlich 0,618 mm³/l auf 0,735 mm³/l (0 bis 40 m) bzw. von 1,267 mm³/l auf 1,705 mm³/l (0 bis 10 m) an. Den Hauptanteil an dieser Steigerung trugen die Diatomeen (*Achnanthes*, *Chaetoceros* und *Skeletonema*). Auffallend sind die, im Verhältnis zu den übrigen Stationen, hohen Individuenanzahlen der μ -Algen. Diese runden, blaugrün bis grünen und unbeweglichen Zellen von 2–5 μ Durchmesser, hier in Anlehnung an GAARDER (1933), RHODE (1955), LUND (1961) und OVERBECK (1962) μ -Algen genannt, sind sowohl im Meer als auch im Süßwasser weit verbreitet. Über ihre systematische Stellung ist noch wenig bekannt, da sie — ihrer Kleinheit und ihrer geringen morphologischen Differenzierungen wegen — nur schwer einer systematischen Einordnung zugänglich sind. Obwohl sie untereinander morphologisch sehr ähnlich sind, handelt es sich wahrscheinlich um Vertreter verschiedener systematischer Gruppierungen. Vor allem dürften Cyanophyceen und Chlorophyceen, aber auch Bakterien aus der Gruppe der *Chlorobakteriales* das μ -Algen Plankton bilden. Von BUTCHER (1952/53) und DROOP (1955) kultiviertes Nannoplankton bestand aus Vertretern der Gattung *Chlorella*, *Nannochloris*, *Stichococcus* und *Synechococcus*. Während auf Station 16a rund $14,9 \cdot 10^6$ Zellen pro Liter Wasser gezählt wurden, waren auf den Stationen 5c und 17 etwa $2,5 \cdot 10^6$ und auf Station 4c maximal $18,3 \cdot 10^6$ μ -Algen im Liter vorhanden. OVERBECK (1953) gibt für die Rügenschens Bodden Individuendichten zwischen 100 und $1000 \cdot 10^6/l$ an, RYTHER (1954) für die Moriches Bay und Great South Bay bei New York $10000 \cdot 10^6/l$.

Das während der Untersuchungen zeitweilig stagnierende Wasser auf Dauerstation 16a veranlaßten NEHRING, SCHULZ und ROHDE (1969), aus der Nitrat- abnahme die Menge der in der gleichen Zeit gebildeten organischen Substanz zu berechnen. Davon ausgehend, daß 7,3% der organischen Trockensubstanz aus Stickstoff besteht (HAGMEIER 1961), kamen sie zu dem Ergebnis, daß an der Oberfläche täglich mindestens 21,2 μ g organischer Trockensubstanz im Liter Wasser gebildet wurden, in der gesamten Wassersäule zwischen 0 und 50 m dagegen durchschnittlich 8,8–10,6 μ g/l. In der gleichen Zeit, d. h. vom 8. 5. bis 12. 5., vermehrte sich das Plasmavolumen in den oberen 10 m um durch-

schnittlich 228 $\mu\text{g/l}$ bzw. um 59 $\mu\text{g/l/d}$, in der gesamten Wassersäule zwischen 0 und 40 m dagegen um durchschnittlich 117 $\mu\text{g/l}$ oder 29,5 $\mu\text{g/l/d}$. Nach HAGMEIER (1961) ergibt die Multiplikation des Plasmagewichtes mit dem Faktor 0,26 das Trockengewicht der organischen Substanz, die sich damit um 20,5 $\mu\text{g/l/d}$ an der Oberfläche und um 7,7 $\mu\text{g/l/d}$ in der gesamten euphotischen Schicht vermehrte. Dies sind Werte, die überraschend gut mit den von den genannten Autoren anhand des Stickstoffverbrauches ermittelten übereinstimmen.

Station 4c: Salzgehalt 7,5⁰/₀₀, Temperatur 5,5–6,3 °C. Diese in der Gotlandsee gelegene Station wurde auf der Heimreise angelaufen. Die Frühjahrspopulationen der Diatomeen waren endgültig zusammengebrochen. Mit durchschnittlich 0,182 mm³ im Liter wurde hier das geringste Plasmavolumen der gesamten Reise ermittelt. Beherrschendes Element sind die Peridineen, vor allem *Gymnodinien* und *Peridinium pellucidum*, neben einer kleinen Restpopulation von *Skeletonema*. Dagegen beginnt in dieser Zeit im Bereich der Gotlandsee die Entwicklung der Cyanophyceen (*Alphanizomenon* und *Nodularia spumigena* MERT.).

Literatur

- BUTCHER, R. W., Contribution to our knowledge of the smaller marine algae. J. Mar. Biol. Ass. U. K. **31** (1952/53), 175–191.
- DROOP, M. R., Some new supra-litoral Protista. J. Mar. Biol. Ass. U. K. **34** (1955), 233–245.
- HAGMEIER, E., Plankton-Äquivalente. Auswertung von chemischen und mikroskopischen Analysen. Kieler Meeresforsch. **17** (1961), 32–47.
- HICKEL, W., Untersuchungen über die Phytoplanktonblüte in der westlichen Ostsee. Helgoland wiss. Meeresunters. **16** (1967), 3–66.
- LOHMANN, H., Untersuchungen zur Feststellung des vollständigen Gehaltes des Meeres an Plankton. Wiss. Meeresunters. Kiel **10** (1908).
- MÖLDER, K., Über die Diatomeenflora des Bottnischen Meerbusens und der Ostsee. Merentut. Jülk. **203** (1962), 1–58.
- NEHRING, D., SCHULZ, S. und ROHDE, K.-H., Untersuchungen über die Produktivität der Ostsee. I. Chemisch-biologische Untersuchungen in der mittleren Ostsee und in der Bottnensee im April/Mai 1967. Beitr. Meeresk. **23** (1969), 5–36.
- OVERBECK, J., Das Nannoplankton der Rügensch Brackwässer als Hauptproduzent in Abhängigkeit vom Salzgehalt. Kieler Meeresforsch. **18** (1962), 157–171.
- RYTHER, J. H., The ecology of phytoplankton blooms in Moriches Bay and Great South Bay, Long Island, New York. Biol. Bull. **106** (1954), 198–209.
- UTERMÖHL, H., Zur Vervollkommnung der quantitativen Phytoplanktonmethodik. Intern. Ver. theor. u. angew. Limnologie **9**. Mitteil., 1–34 (1958).

Anschrift des Verfassers:

Dr. habil. W. SCHNESE, Sektion Biologie der Universität Rostock,
Fachbereich Meeresbiologie, 25 Rostock, Freiligrath-Str.

Das Makrobenthos der südlichen Beltsee

(Mecklenburger Bucht und angrenzende Seegebiete)

SIGURD SCHULZ

Das Benthos der Beltsee wurde seit Ende des vorigen Jahrhunderts von vielen skandinavischen und deutschen Forschern untersucht (BRAUN [2], ELIASON [6], LENZ [19], MEYER und MÖBIUS [21], MÖBIUS [22], REMANE [23], PETERSEN [25], PETERSEN und JENSEN [26], THORSON [31]). Die Untersuchungen konzentrierten sich jedoch je nach der Lage der Institute auf bestimmte Regionen der Beltsee, z. B. die von Kiel ausgehenden Arbeiten vorrangig auf die Kieler Bucht, die skandinavischen mehr auf die Belte und den Sund. So blieb der südliche Teil der Beltsee, von einigen Stichproben abgesehen, HAGMEIER [10, 11] praktisch unbearbeitet. Selbst die neueren Untersuchungen von KÜHLMORGEN-HILLE [18] und LÖWE [20] berühren das Seegebiet nur.

So soll es Aufgabe dieser Arbeit sein, das Makrobenthos dieses Aquatoriums zu beschreiben und Angaben über die Abundanz und die ökologischen Anforderungen der Arten zu machen. Im Verlaufe der Untersuchungen hat es sich gezeigt, daß viele Arten im Vergleich zu früheren Untersuchungsergebnissen stärker fluktuieren oder die Bestände im Rückgang begriffen sind. Die Ursachen für diese Tatsache sind sehr komplex miteinander verwebt, so daß eine gesicherte Aussage vielfach noch nicht möglich ist. Grundlage zur Klärung dieses Problems muß aber eine Gesamtaufnahme der Organismen sein, der ständige Kontrollen folgen sollten.

Grundlage dieser Studie sind Untersuchungsergebnisse, die seit 1962 im Institut für Meereskunde der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Warnemünde, gewonnen wurden. Die Arbeiten auf See wurden im wesentlichen mit dem FK. „Prof. O. Krümmel“ durchgeführt. Von jeder der 238 Stationen im Seegebiet wurden in den vergangenen Jahren mindestens zweimal 3 Greiferproben entnommen. Die gewonnenen Sedimentproben passierten Siebe von 2 und 1 mm Durchmesser, was also lediglich die Untersuchung des Makrobenthos zuläßt. Die Tiere auf den Sieben wurden in einem Formaldehyd-Seewassergemisch, das durch Borax neutralisiert war, konserviert und später im Labor bestimmt und ausgezählt.

Als Bodengreifer kam ein nach VAN-VEEN modifizierter Typ zum Einsatz. Die Ergebnisse, die mit diesem Greifer auf unterschiedlichen Sedimenten erzielt wurden, waren bis auf grobkiesigen Grund sehr gut. Seine Greiffläche betrug 0,1 m². Auf diese Einheit sind auf alle im Text erscheinenden Abundanzen der

Benthostiere bezogen. Neben den biologischen Untersuchungen galt besonders den Milieufaktoren Sediment, Salzgehalt, Sauerstoffgehalt und Temperatur die Aufmerksamkeit. Von jeder Station wurde eine Sedimentprobe im Labor auf ihre Korngrößenzusammensetzung, Feuchte, Kalk- und organischen Kohlenstoffgehalt untersucht. Salz- und Sauerstoffgehalt wurden titrimetrisch nach der MOHR-KNUDSEN-Methode bzw. nach der WINKLER-Methode bestimmt. Die Temperatur wurde von Kippthermometern abgelesen.

Seit 1965 konnte der Verfasser mit Hilfe der leichten Taucherei Biotopbeobachtungen und autökologische Studien vornehmen.

Das Untersuchungsgebiet umfaßt die Mecklenburger Bucht, die Lübecker Bucht und den Fehmarnbelt. Als Tiefenbegrenzung ist die 10 m-Isobathe anzusehen. Vor der Küste der Bundesrepublik und Dänemarks stellten die Hoheitsgewässer die Begrenzung dar. Damit wurde das Phytal im wesentlichen von den Untersuchungen ausgeschlossen (Abb. 1).

Der hydrographische Charakter des Seegebietes wird vom Wasseraustausch zwischen der Nordsee und der Ostsee im eigentlichen Sinne geprägt. Er verleiht ihm ein sehr wechselhaftes, fast ästuarines Milieu. Es sei an dieser Stelle nur die einschlägige Literatur zitiert (DIETRICH [4], DIETRICH und WEIDEMANN [5], HELM [5], SCHULZ [27]). Neben den periodisch von der Jahreszeit und den herrschenden Großwetterlagen abhängenden Veränderungen, was den Salzgehalt, die Temperatur und die Schichtungsverhältnisse angeht, entspringen offensichtlich aus letzteren Probleme, die sich in starker Sauerstoffzehrung in Grundnähe und plötzlichem Absterben der Fauna in diesen Gebieten äußern (SCHULZ [28]). Für die Beurteilung des Benthos ist außer den hydrographischen Faktoren die Beziehung zum Sediment von entscheidender Bedeutung. Nach einer detaillierten Aufnahme der Mecklenburger Bucht durch KOLP [16] wurde von SCHULZ [29] diese Beziehung untersucht. Dort wird neben der Verteilung der Sedimente im Seegebiet auch eine genaue Definition der im Text erscheinenden Sedimentbezeichnungen gegeben, so daß hier darauf verzichtet werden kann.

Das tierische Makrobenthos im Untersuchungsgebiet setzt sich aus Gastropoden, Bivalven, Polychaeten, Priapuliden, Crustaceen, Echinodermen und Tunicaten zusammen.

Bei den im Text zitierten Verfassern ohne Zahlenangabe handelt es sich um folgende Arbeiten:

REMANE [23], JAECKEL [13], KÜHLMORGEN-HILLE [18], LÖWE [20], THORSON [31], JÖRGENSEN [14] und ELIASON [6].

Mollusca

Prosobranchia

Fam. Buccinidae

Buccinum undatum L.

Die Art ist im Untersuchungsgebiet nie zahlreich, aber bis in die Kadetrinne verbreitet. Es wurden immer nur einzelne, bis 80 mm große Exemplare gefunden. *B.* lebt auf allen schllickigen Sedimenten.

Neptunea antiqua L.

Die Spindelschnecke trat besonders im westlichen Teil des Untersuchungsgebietes und in der Kadetrinne auf Schlick vereinzelt auf. Sie ist Allesfresser.

Fam. Nassidae

Nassa reticulata L.

Zwei Tiere dieser Art wurden in der Kadetrinne auf Schlick gefangen. Im übrigen konnten sie nicht nachgewiesen werden.

Fam. Rissoidae

Onoba striata J. ADAMS

Die kleine Schnecke lebt im Gebiet auf sandigem Schlick bis Schlick. Wenige Exemplare wurden vor dem Hannibal und vor der Sagasbank angetroffen. Auch im Schlick trat sie nur vereinzelt auf. Sie nährt sich von diatomeenreichen Schlickklümpchen (JAECKEL).

Rissoa inconspicua ALDER

Die Art wurde sehr selten auf flachen Sanden zusammen mit Hydrobien gefunden. Sie ist ein Phytalbewohner. *R.* weidet Sandkörner ab, nährt sich aber auch von zarten Rotalgen (JAECKEL).

Fam. Littorinidae

Littorina littorea L.

Dieses Flachwassertier wurde lediglich auf der Sagasbank, vor dem Hannibal und auf den Stationen vor der Mecklenburgischen Küste in den Proben angetroffen. Es lebt im Phytal auf Grob- bis Mittelsand und wurde nie in größeren Tiefen als 11 m gefunden. Die gemeine Strandschnecke ist ein Weidegänger. Sie nährt sich von Großalgen oder von Diatomeen und Peridineen. Sie soll gelegentlich auch Balaniden verzehren (JAECKEL). *L.* reproduziert sich über eine pelagische Larve.

L. obtusata L.

Die stumpfe Strandschnecke wurde mit *L. littorea* vergesellschaftet angetroffen, nur war sie wesentlich seltener. In der Ernährungsweise ähneln sich beide Arten. *L. obtusata* ist ebenfalls Weidegänger. Das Tier vermehrt sich aber im Gegensatz zu *L. littorea* über eine nichtpelagische Larve.

Fam. Lacunidae

Lacuna divaricata FABRICIUS

Die kleine Schnecke lebt wie *Littorina*, *Hydrobia* und *Rissoa* im Phytal. Da auf dem Gebiet, das dem Hannibal vorgelagert ist und in dem sie vornehmlich gefunden wurde, lockerer Bewuchs, d. h. nur fleckhafter Seegrasbesatz zu finden war, lebt sie auf Grob- bis Mittelsand. Sie ist ebenfalls Weidegänger, nährt sich von Diatomeen, benagt aber auch oberflächlich Rotalgen und Seegras (JAECKEL).

Hydrobia ulvae PENNANT

Die Watt-Schnecke kommt auf Grob- bis Mittelsand vor dem Hannibal und in der Lübecker Bucht bis 11 m Tiefe, stellenweise massenhaft, vor. Die Tiere scheinen dort regelrecht zusammengespült worden zu sein. Ein Großteil der Gehäuse ist dann leer. Gefunden wurde das Tier auf Sand bis 16 m Tiefe. Die Tiere nagen den Diatomeenaufwuchs an Sandkörnern und Algen ab.

H. stagnorum GMELIN (*H. ventrosa* MONTAGU)

Die Art wurde im Untersuchungsgebiet im gleichen Biotop wie *H. ulvae* gefunden. Sie nährt sich auf die gleiche Weise wie *H. ulvae*.

Opisthobranchia*Retusa obtusata* MONTAGU

Das Tier wurde sehr selten auf sandigem Schlick gefunden (7 Exemplare). Das Vorkommen lag vor der Mecklenburgischen Küste und dem, dem Hannibal vorgelagerten Gebiet. *Retusa* nimmt als Nahrung abgestorbenes Tier- und Pflanzenmaterial und ditomeenreichen Schlamm auf (JAECKEL).

Bivalvia

Fam. Nuculidae

Nucula nucleus L.

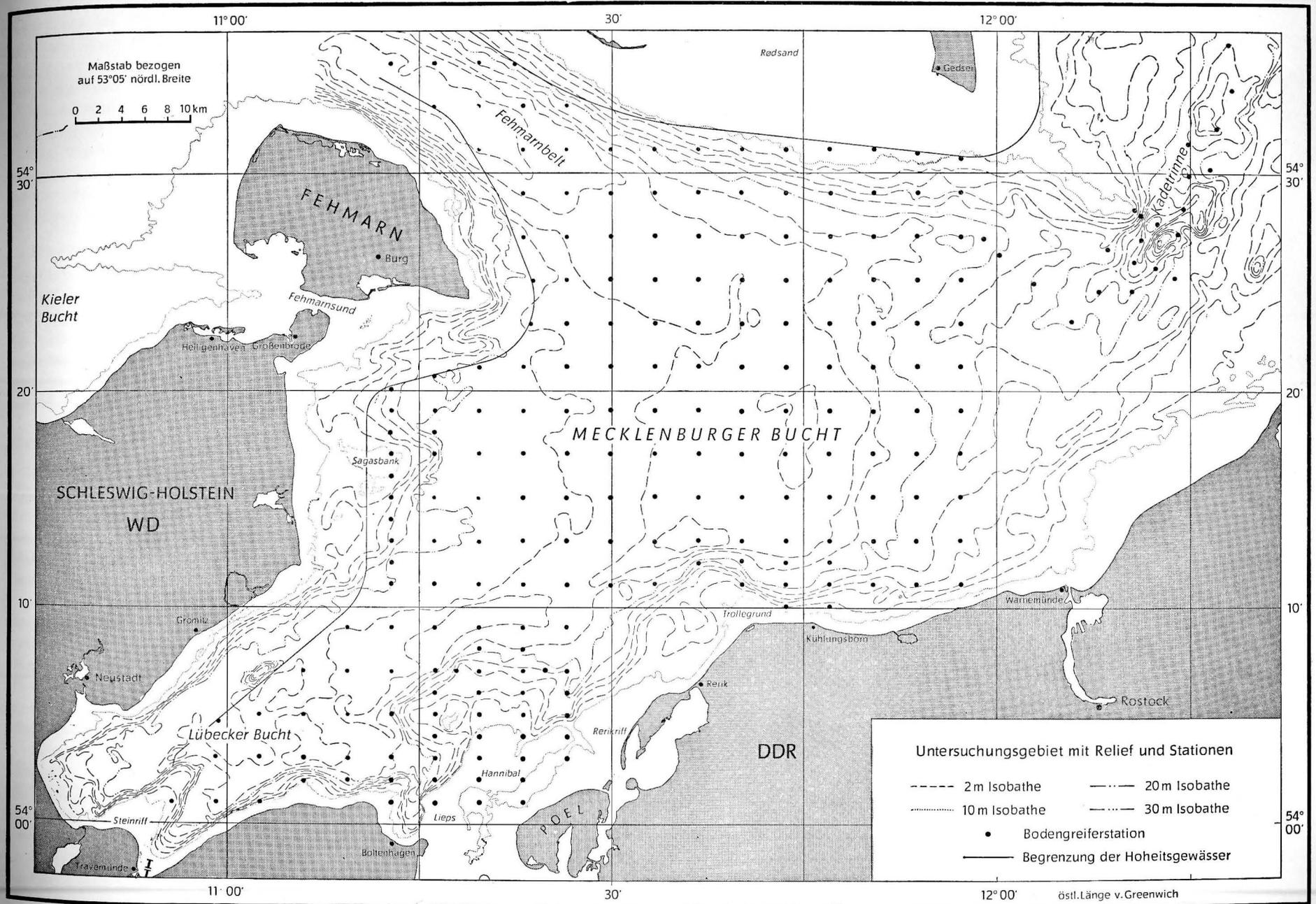
Die Nußmuschel wurde 1962 vereinzelt im Fehmarnbelt gefunden. In den folgenden Jahren war sie nicht nachzuweisen. JAECKEL, REMANE und KÜHLMORGEN-HILLE geben sie für die Kieler Bucht an. Im Fehmarnbelt lebte sie auf sandigem Schlick und schlickigem Sand. Der Bestand unterliegt offenbar großen Fluktuationen. Im Fehmarnbelt ist wahrscheinlich die östliche Verbreitungsgrenze zu finden. Die Muschel gräbt mit Hilfe des schwellbaren Fußes im Sediment. Die Nahrung wird mit den Mundlappen an der Bodenoberfläche gesucht. Mit dem Atemwasser herankommende Nahrungspartikel werden mittels der Mundlappen verklebt und zum Mund geführt. Das Tier hat keine Siphonen.

Nach JÖRGENSEN laicht es im Öresund vom Frühjahr bis zum Spätsommer. JAECKEL erwähnt ein kurzes pelagisches Larvenstadium. Der Bestand im Fehmarnbelt geht auf Larveninvasion zurück.

Fam. Mytilidae

Mytilus edulis L.

Die Muschel heftet sich mit Hilfe ihrer Byssusfäden an festen Gegenständen, Steinen, Schlacken, anderen Muscheln oder ihresgleichen an. Sie kann sich auch im Seegebiet auf Sand, in dem Steine oder ähnliches fehlen, zu festverquiekten Kolonien zusammenschließen. Hier kommt es zu einer ausgesprochenen fleckhaften Verbreitung, die besonders bei einmaliger Probenentnahme bei quantitativen Aussagen zu großen Fehlern führen kann. Die Muschel muß man als einen typischen Vertreter der Epifauna betrachten. Sie ernährt sich als Strudler.



Im Gebiet ist sie bis auf die Schlickgebiete zahlreich verbreitet und erreicht besonders im Phytal erhebliche Zahlen. Diese gehen zum größten Teil auf juvenile Tiere zurück, die sich an feinen Rotalgen (*Ceramium*, *Polysiphonia*) angesetzt haben und ein wesentlicher Bestandteil der Platt- und Jungfischnahrung sind.

Steine sind mit einem dichten Pelz von Mytiliden überzogen, der oft mehrschichtig ist.

Von den klastischen Sedimenten wurden Grobsand und Kiese bei der Besiedlung bevorzugt. Die Tiere verspinnen mit ihren Byssusfäden Kiesel, *Mya arenaria*, *Macoma baltica*, *Cardium* und eigene Vertreter zu einem festen flächenförmigen Verband.

Musculus discors L.

Ähnlich wie *Mytilus* benötigt die Muschel eine feste Unterlage zum Siedeln. Sie heftet sich mit Byssusfäden an. Nach JÖRGENSEN und JAECKEL laicht sie im Mai bis Juni. Im Gebiet wurden nur wenige Exemplare gefunden, diese waren 10–12 mm groß und beschränkten sich im wesentlichen auf den Fehmarnbelt und die Schlickgebiete vor der ostholsteinischen Küste. Sie siedelte auf Schlackenstücken. Dabei scheint sie im Untersuchungsgebiet nur tiefer als 20 m zu siedeln.

Fam. Astartidae

Astarte borealis CHEMNITZ

Die Muschel liegt auf dem Grund und strudelt Nahrung ein. Die Art ist arktisch-boreal und lebt seit der Yoldiazeit in der Ostsee. DEMEL und MULICKI [3], die sie noch in der Stolper-Rinne als östlichste Verbreitung fanden, bestimmten den Salzgehalt dort mit 7,5‰. In den nördlichen Meeren ist sie zirkumpolar verbreitet.

Als typisch arktische Art (THORSON) gibt es bei ihr, wie auch bei den anderen beiden im Gebiet vorkommenden Spezies, keine pelagischen Larven. MEYER und MÖBIUS [21] geben als Laichzeit den Februar an, dies bestätigt JAECKEL. Nach THORSON erreichen sie ein Alter von 6–10 Jahren, was ebenfalls typisch für diese Kaltwasserarten ist. THORSON rechnet die drei Arten als Charaktervertreter der arktischen *Macoma-calcareo*-Community. Sie bevorzugen nach dem gleichen Autor gemischte Böden im tieferen Sublitoral.

KÜHLMORGEN-HILLE findet sie in der Kieler Bucht auf Sandboden mit größter Dichte. Schlick wird gänzlich gemieden. LÖWE gibt nach seiner Definition für Schlick die höchsten Werte an. Es dürfte sich dabei ebenfalls um Mischböden handeln. Er vermerkt weiter eine deutliche Zunahme der Art von Osten nach Westen, was auf den steigenden Salzgehalt zurückzuführen sein sollte.

Eine zahlenmäßige Zunahme von Ost nach West läßt sich im Untersuchungsgebiet nicht nachweisen. Die Salzgehaltswerte unterschreiten im benachbarten Seegebiet nie 10‰. Die Muschel bewohnt Areale mit Mischböden, aber auch reine Sande. Allerdings werden Grobsandflächen nicht besiedelt. Dagegen

scheinen grobsandige bis kiesige Schlicke, z. B. vor der Sagasbank oder auch die Aufragung vor dem Eingang zur Lübecker Bucht bevorzugt zu werden. Sandiger Schlick und schlickiger Sand zeigen die Hauptbesiedlung. Im Untersuchungsgebiet scheint die Muschel nicht tiefer als 22 m zu siedeln. Eine Ausnahme bildet nur das Vorkommen im Fehmarnbelt. Große Flächen, z. B. das sandige Schlickgebiet vor dem Fehmarnbelt, das sich vom Sediment her sehr gut zur Besiedlung eignen müßte, bleibt genauso frei wie der zentrale Schlickteil und natürlich die Lübecker Bucht.

Astarte elliptica BROWN

Die Lebensweise gleicht der von *A. borealis*. Sie ist ebenfalls arktisch-zirkumpolar. Nach MEYER und MÖBIUS [21] ist für die Beltsee *A. sulcata* angegeben.

JAECKEL, KÜHLMORGEN-HILLE finden *A. sulcata* nicht im Gebiet. Im Untersuchungsgebiet wurden ebenfalls nur *A. elliptica* bestimmt. Nach KÜHLMORGEN-HILLE liegt eine Verwechslung nahe. Das Vorkommen gleicht dem der anderen beiden *Astarte*-Arten, nur erscheint *A. elliptica* immer in wesentlich geringeren Individuenzahlen. Bevorzugt werden Mischsedimente. Die meisten Tiere wurden ebenfalls auf der Aufragung vor der Lübecker Bucht gefunden.

Astarte montagui DILLWYN

Die Muschel ist im Gebiet etwa mit gleichen Individuenzahlen vertreten wie *A. borealis*. Sie kommt fast immer vergesellschaftet vor und zeigt keine anderen Sedimentansprüche oder Anforderungen an das Milieu, wie die beiden anderen *Astarte*-Arten.

In reinem Schlick wurde sie auch nicht gefunden. 20 m wurden nicht überschritten, bevorzugt sind schlickiger Sand und sandiger Schlick.

Fam. Cyprinidae

Cyprina islandica L.

Die Islandmuschel liegt im Sediment und strudelt Plankton und Detritus ein. Nach JÖRGENSEN liegt die Laichzeit im Juli. Pelagische Larven sind bekannt. Die Art ist nach GAJEVSKAJA [9] eine boreal-atlantische Form und deshalb in den nördlichen Meeren weit verbreitet. Sie ist eine Muschel der *Macoma-calcareo*-Gemeinschaft. In der Kieler Bucht traf sie KÜHLMORGEN-HILLE auf allen Sedimenten an, bevorzugt auf schlickigen Sanden. Im Untersuchungsgebiet wurden ebenfalls Mischsedimente bevorzugt, aber auch im Schlick und auf reinem Sand wird das Tier angetroffen. Die Muschel ist im gesamten Gebiet mehr oder weniger zahlreich verbreitet. Nach KÜHLMORGEN-HILLE flukturiert der Bestand in der Kieler Bucht erheblich, besonders in tiefen Mulden mit Sauerstoffmangel. Das kann für die Mecklenburger Bucht bestätigt werden. Im Zentralteil wurden nur wenige große Tiere (6–10 cm \varnothing) und keine jungen Tiere angetroffen. Weiter östlich, bei Tiefen um 18 m waren auch junge Tiere vorhanden, hier aber deutlich in der Überzahl gegenüber den alten. Das deutet darauf hin, daß zeitweilig auftretender Sauerstoffmangel durch die erwachsenen Tiere ertragen wird, während

jüngere eingehen. Erwachsene Tiere können offenbar Milieuschlechterungen überstehen. Ohne *Cyprina* wurde lediglich das obere Sublitoral angetroffen. Sehr vereinzelt (1 Tier auf 2–3 m²) wurde *Cyprina* bei Tauchgängen in der Lübecker Bucht beobachtet. Es handelt sich durchweg um große Tiere (8 bis 10 cm), die in einem Trichter der oberflächlichen, lockeren Sedimentschicht lebten.

Fam. Montacutidae

Montacuta bidentata MONTAGU

Die kleine, im Untersuchungsgebiet bis 4 mm lang werdende, Muschel ist ein Planktonstrudler.

Nach JÖRGENSEN laicht die Art im Öresund von Juni bis November. JAECKEL beschreibt, daß man im Juni–Juli Embryonen im Mantelraum des Muttertieres findet, die später auch pelagisch im Wasser anzutreffen sind.

MEYER und MÖBIUS [21] fanden sie auf Schlamm, nach JAECKEL ist sie typisch für Schlick und sandigen Schlick, KÜHLMORGEN-HILLE fand die größten Zahlen auf Sand, ständige Vorkommen aber auch im Schlick.

Im Untersuchungsgebiet umrahmt das Verbreitungsareal den Zentralteil der Mecklenburger Bucht. Die Individuenzahlen bleiben bis auf das Vorkommen auf dem Hannibal (3–9) auf den übrigen Stationen sehr gering (1–2). Die Muschel kommt nur im Fehmarnbelt auf reinem Schlick vor.

Als bevorzugtes Sediment muß schlickiger Sand bis Feinsand angegeben werden. Auf einer Sandstation vor dem Hannibal wurde mit 15 Tieren die größte Individuendichte festgestellt. *Montacuta bidentata* scheint mit der Linie Warnemünde–Gedser ihre östlichste Verbreitung zu finden. In der Kadettrinne kommt sie nicht mehr vor, auch LÖWE erwähnt die Muschel nicht.

Fam. Cardiidae

Cardium fasciatum MONTAGU

Die Muschel lebt im Sediment eingegraben. Sie gehört nach den Ernährungstypen (REMANE) zu den Strudlern. Sie nimmt aus dem Wasser Planktonorganismen auf. Als Laichzeit ist für den Öresund (JÖRGENSEN) Juni–September angegeben. Sie soll bis 2 Jahre alt werden.

Im Untersuchungsgebiet ließen sich 4 voneinander getrennte Verbreitungsgebiete nachweisen, im Küstengebiet Bukspitze–Warnemünde, auf dem Hannibal, auf der Sagasbank und im Fehmarnbelt. In der mengenmäßigen Verteilung hebt sich das Areal auf dem Hannibal von den 3 übrigen ab, 4–5 gegenüber 1–2 vor Kühlungsborn, 2–4 vor der Sagasbank und Einzelfunden im Fehmarnbelt.

Als Siedlungsgrund gibt KÜHLMORGEN-HILLE tiefer gelegene Sandböden an.

GAJEVSKAJA [9] gibt *C. fasciatum* als Bewohner des unteren und mittleren Sublitorals an. JAECKEL fand die Muschel ebenfalls im tieferen Sandboden bis in den Schlick hinein. Im Untersuchungsgebiet kommt *Cardium fasciatum* auf

Sand bis sandigem Schlick vor. Sie scheint nicht sedimenttypisch zu sein, aber schlickige Mischböden zu bevorzugen, wenn man die auf den Stationen höheren Individuenzahlen als Beweis dafür heranzieht. Sie geht nicht flacher als 10 m und nicht tiefer als 20 m. Nur im Fehmarnbelt erscheint sie in größeren Tiefen.

Es handelt sich bei *C. fasciatum* anscheinend um eine ausgesprochene Küstenform, denn neben der unbesiedelten Lübecker Bucht und dem Zentralteil der Mecklenburger Bucht bleibt auch das Areal östlich davon frei, obwohl vom Sediment her eine Besiedlung anzunehmen wäre.

Cardium edule L.

Die Herzmuschel bewohnt etwa das gleiche Biotop wie *C. fasciatum*. Sie lebt ebenfalls eingegraben im Sediment und nährt sich als Strudler von Planktonorganismen.

Die Verbreitungsareale im Untersuchungsgebiet sind auf drei gegenüber vier bei *C. fasciatum* zurückgegangen. Hauptausbreitungsgebiet ist auch hier wieder der Hannibal. Allerdings liegen die Individuenzahlen unter denen von *C. fasciatum*. *Cardium edule* ist nach JAECKEL eine typische Form des Eulitorals und der Grob-, Mittel- und Feinsandflächen des oberen Sublitorals. Da auch diese Art offensichtlich der Submergenz unterliegt, ist ihr Auftreten unterhalb 10 m nicht verwunderlich. Ihr Hauptbiotop liegt aber auch im Gebiet oberhalb der 10-m-Isobathe. Auf dem Hannibal werden besonders die Grob- und Mittelsandflächen besiedelt. Die Individuenzahlen schwanken zwischen 3 bis 6. *C. lamarki* konnte in den Proben nicht bestimmt werden.

Fam. Semelidae

Scrobicularia plana COSTA

In Bodengreiferfängen konnte die Muschel nicht erbeutet werden. Lediglich durch Dredgenzüge mit einer scharfgehenden Dreiecksdredge konnte sie nachgewiesen werden. Sie ist nach ZIEGELMEIER [32] in der Nordsee und auch nach KÜHLMORGEN-HILLE eine Flachwasserform. Inwieweit auch sie eine Submergenz durchmacht, konnte nicht eindeutig bestimmt werden. Es wurden aber Tiere bis 16 m Tiefe gefunden.

Abra alba WOOD

Die kleine Pfeffermuschel liegt im Sediment und nimmt wie *Macoma baltica* ihre Nahrung mittels des langen Ingestionssiphos durch Pipettieren auf. Als Nahrung kommen Detritus und kleine Bodenorganismen zur Aufnahme. JAECKEL gibt die Laichzeit für die westliche Ostsee mit Juni—Juli an.

KÄNDLER fand im November—Dezember bei Helgoland die planktischen Larven. Die Muschel wurde im Untersuchungsgebiet vor allem auf sandigem Schlick gefunden. Bei drei Stationen kam sie auf schlickigem Sand und zweimal auf reinem Sand vor.

KÜHLMORGEN-HILLE fand *Abra* ebenfalls auf Sand, doch in entsprechend geringen Zahlen. Das läßt sich auch für das Untersuchungsgebiet bestätigen. Im Zentralteil der Mecklenburger Bucht wird die 24-m-Linie nur im Falle von

2 Stationen unterschritten. Hier, wie in der Verbindung zur Lübecker Bucht und Kadetrinne, fehlt sie vollkommen. Anscheinend bildet der zeitweilige Sauerstoffmangel die Schranke der Ausbreitung. Im Fehmarnbelt erscheint sie bis zu diesen Tiefen, nur ist der Sandanteil im Schlick höher und die Durchlüftungsvorgänge am Boden, sind bedingt durch den energischen Durchstrom, weitaus günstiger. Daß die Tiere das Gebiet bei entsprechenden Umweltbedingungen, also bessere Zersetzung des Bodens, durchaus besiedeln könnten, zeigt ihr nochmaliges Auftreten in dem sandigen Schlick, der sich östlich an den Zentralteil anschließt. Zwar liegen hier die Individuenzahlen unter 5, wobei man bemerken muß, daß auch weiter westlich bei gleichem Sediment nicht über 20 Tiere angetroffen wurden.

Neben dem eben genannten Areal bildet der Hannibal ein abgeschlossenes Verbreitungsgebiet. Als größte Individuenzahl wurden auf einer Station mit schlickigem Sand 8 gezählt. Der Durchschnitt lag bei 2 bis 3.

Das Hauptverbreitungsgebiet erstreckt sich von der ostholsteinischen Küste um Fehmarn herum in den Fehmarnbelt hinein. Dabei nehmen die Individuenzahlen zum Fehmarnbelt hin deutlich zu (in der Höhe Dahmeshöved 4—6 und im Fehmarnbelt 12—20). Allerdings fluktuiert die Art von Jahr zu Jahr beträchtlich.

Fam. Tellinidae

Macoma baltica L.

Die Baltische Tellmuschel ist im Untersuchungsgebiet weit verbreitet. Sie überschreitet aber nur in einigen Fällen die 20-m-Linie, kommt dann im Gegensatz zu den übrigen Stationen in großen Individuenzahlen vor. Damit ist schon gesagt, daß reiner Schlick gemieden wird. Die Lübecker Bucht, der Zentralteil der Mecklenburger Bucht, der untersuchte Teil des Fehmarnbelts und die Kadetrinne blieben praktisch unbewohnt. Dicht besiedelt sind die schlickigen Sandflächen und die Gebiete mit sandigem Schlick. Die größten Individuenzahlen finden sich auf dem Hannibal, in den Küstengebieten Bukspitze—Warnemünde und Dahmeshöved-Fehmarn.

Die Muschel liegt im Boden und pipettiert mit ihrem Ingestionssiphos die Nahrung ab. Als Nahrung dienen Detritus und Diatomeen. Das Tier ist nach REMANE stark eurytop und läßt sich deshalb schlecht zur Charakterisierung einer Biozönose heranziehen. LÖWE stellt sie trotzdem als Charakterart für das von ihm untersuchte Gebiet (Arkonabecken und Anschlußgebiete) dar. Bemerkenswert ist, daß im Untersuchungsgebiet und auch in der Beltsee *Macoma* in ihrer Verbreitung auf Sandflächen bis zum sandigen Schlick beschränkt bleibt, während schon in der Kadetrinne, aber in noch stärkerem Maße im östlichen Anschlußgebiet und überhaupt in der gesamten Ostsee (DEMEL, MULICKI und SEGERSTRALE), *Macoma baltica* auch die extremen Weichböden in den tiefen Mulden besiedelt. *Macoma* macht eindeutig eine Submergenz durch. Die Art reproduziert sich über die planktische Larve, die von Mai bis Juli im Wasser anzutreffen ist.

Macoma calcarea CHEMNITZ

Die kalkige Tellmuschel liegt im Sediment und tastet mit dem Ingestionssiphon, ähnlich wie *Macoma baltica* den Boden ab. Nach JÖRGENSEN sind keine pelagischen Larven vorhanden. Der Bestand erhält sich also bei gleichbleibend guten Lebensbedingungen selbst. Die Muschel ist arktisch-zirkumpolar, nach GAJEVSKAJA [9] arktisch-boreal, mit weiter Verbreitung in den nördlichen Meeren. Sie kommt in der Ostsee bis ins Bornholmbecken in den tiefen Mulden vor, wo der Bestand nach DEMEL und MULICKI [3] und LÖWE nach dem Krieg durch Munitionsversenkungen allerdings stark zurückgegangen sein soll.

Macoma calcarea ist eine Kaltwasserform mit höheren Salzgehaltsansprüchen als *M. baltica* und bevorzugt als Sediment Schlick. Ihre Sauerstoffanforderungen sind gering, was ihr die Besiedlung der oftmals schlecht durchlüfteten Mulden ermöglicht. KÜHLMORGEN-HILLE weist *M. calcarea* in der Kieler Bucht und noch am Eingang des Fehmarnbelt nach. Er fand sie vor allem in größeren Tiefen, gibt aber auch regelmäßige Funde in flachem Wasser (10 m) an.

LÖWE weist *M. calcarea* in dem von ihm untersuchten Gebiet nur auf einer Station, nordwestlich von Bornholm, nach. Das Arkonabecken und die Kadettrinne sind nicht besiedelt. LÖWE fand an einer Station nur Schalen. Nach LÖWE soll die Art mit *Macoma baltica* vikariieren (HAGMEIER [11], DEMEL und MULICKI [3]). Sie stellt den Bathytypus von beiden Arten dar. Trotzdem ist es nicht ausgeschlossen, daß beide Arten nebeneinander auftreten. Dies läßt sich für das Untersuchungsgebiet auch feststellen. Das Areal, das von *M. calcarea* im Untersuchungsgebiet besiedelt wird, umgibt den Zentralteil der Mecklenburger Bucht im Osten, Süden und Westen. Im Norden fehlt sie genauso wie im Zentralteil und in der Lübecker Bucht. Die größte Abundanz wurde vor der Sagasbank mit 2–6 Tieren gefunden. Im übrigen Verbreitungsgebiet traten höchstens 3 Muscheln im Greifer auf. Als Sediment wurden schlickige Sande, auch schlickiger Kies (östlich Dahmeshöved) und Schlick bevorzugt. Bemerkenswert ist das Vorkommen von *M. calcarea* dicht unter Poel. Sie besiedelt hier die mit schwarzem, nährstoffreichem Schlick gefüllte Fahrtrinne nach Wismar.

Als geringste Tiefe ihres Vorkommens fand ich 12 m, als größte 24 m. Das Fehlen der Muschel in der Lübecker Bucht, in der eigentlichen Mecklenburger Bucht und auch das einmalige Auftreten im Fehmarnbelt ist schwer zu erklären. Einmal unterliegt die Muschel im Gebiet starken Fluktuationen, über deren Ursachen gesichert wenig auszusagen ist. Von Wichtigkeit könnte der zeitweilige Sauerstoffschwund in den Schlickgebieten sein. Wegen der nichtpelagischen Larven wäre dann die Neubesiedlung eines einmal entsiedelten Areals entsprechend langwierig. Andererseits könnten natürlich der Salzgehalt, die Temperatur oder biotische Faktoren die auslösenden Ursachen sein.

Fam. Solenidae

Phaxas pellucidus PENNANT

Die kleine Messermuschel ist im Untersuchungsgebiet sehr selten, sie wurde nur in einzelnen Exemplaren vor dem Hannibal gefunden. Das bevorzugte Sedi-

ment ist schlickiger Sand. Die Muschel lebt in einer Röhre im Boden. Sie ist in der Lage, sich in ihrem Bau mit Hilfe des Fußes auf und ab zu bewegen. Nach JAECKEL laicht sie im Gebiet von August bis Oktober. Eine pelagische Larve ist bekannt. Die Muschel soll nach JAECKEL mehr als zwei Jahre alt werden.

Fam. Saxicavidae

Saxicava arctica L.

Die Muschel lebt in einem selbstgebauten Gang oder unter Muschelschalen verdeckt. Im Untersuchungsgebiet laicht sie nach JAECKEL von Mai bis September. Pelagische Larven sind bekannt. Die Art wurde nur auf dem Hannibal auf Grobsand gefunden. Es konnten nur vereinzelte Vorkommen vermerkt werden.

Fam. Aloididae

Aloides gibba OLIVI

Die Körbchenmuschel lebt dicht unter der Sedimentoberfläche. Mit dem Wasserkörper steht sie durch kurze Siphonen in Verbindung. Sie kriecht im Boden herum und verspinnt das Sediment mit Byssusfäden. Damit trägt sie, wenn auch in geringem Maße, zur Befestigung der Sedimente im Biotop bei. Die Muschel laicht in den Monaten September und Oktober (JAECKEL). Die Fortpflanzung erfolgt über pelagische Larven. Die Muschel ist ein bedeutendes Plattfischnährtier.

Im Untersuchungsgebiet kommt sie in Küstennähe vor. Sie bevorzugt Sand und Sand-Schlick-Gemisch als Sediment. Allerdings kommt die Muschel im Zentralteil der Mecklenburger Bucht auch im Schlick vor. Ihr Vorkommen ist allerdings nur sporadisch. Die meisten Tiere wurden vor dem Hannibal (2–3) und im Fehmarnbelt gefunden. KÜHLMORGEN-HILLE gibt für die Kieler Bucht ebenfalls Sand als bevorzugtes Sediment an. Die Individuenzahl liegt mit 33/m² wie im Untersuchungsgebiet. Der gleiche Autor erwähnt auch Vorkommen der Muschel auf Weichböden. *Aloides* fehlt in der Lübecker Bucht, im östlichen Teil des Zentralbeckens und in der Kadettrinne. Anscheinend erreicht sie im Untersuchungsgebiet ihre östliche Verbreitungsgrenze, denn LÖWE erwähnt sie nicht mehr.

Fam. Myidae

Mya arenaria L.

Die Sandklaffmuschel lebt bis zu 30 cm im Sediment eingegraben und steht nur mit ihrem langen Siphon mit dem Wasserkörper in Verbindung. Mit dem Bodengreifer wurden aus diesem Grunde nur juvenile Exemplare oder selten abgekniifene Siphonen erbeutet. Sie ist im Untersuchungsgebiet besonders auf klastischen Sedimenten stets anzutreffen und geht nur selten in tieferes Wasser. Nach KÜHLMORGEN-HILLE ist sie auf tieferen Böden nie größer als 12–14 mm.

Die Muschel ist vereinzelt auch im Schlick anzutreffen. Die Besiedlung von Mischsedimenten ist zahlenmäßig ebenfalls geringer als von Sand. Häufig

wurden junge Muscheln, mit *Macoma* und *Cardium* durch Byssusfäden mit *Mytilus* verwebt, auf Grobsand angetroffen. Die stärkste Ausbreitung von *Mya* wurde vor und auf dem Hannibal bis zu einer Tiefe von 15 m gefunden (2—4). Der Zentralteil der Mecklenburger Bucht, der Übergang zur Kadetrinne und diese selbst sind frei von *Mya*.

Im Fehmarnbelt wurden immer einzelne kleine Tiere gefunden. Die Muschel laicht von Juni bis September und verbreitet sich über eine pelagische Larve. *Mya* ist erst in jüngster Zeit in die Ostsee eingewandert und bis in den nördlichsten Teil verbreitet. Sie gibt dem heutigen Stadium der Ostsee seinen Namen.

Mya truncata L.

In ihren Lebensgewohnheiten ähnelt die Muschel vollkommen *Mya arenaria*. Sie lebt ebenfalls tief eingegraben im Sediment, bewohnt aber im Gegensatz zu ihr größere Tiefen. Sie bevorzugt die Mischsedimente und kommt aber auch im Schlick vor. Die Verbreitung im Untersuchungsgebiet beschränkt sich auf vereinzelte Funde im Fehmarnbelt, im westlichen Zentralteil der Mecklenburger Bucht und auf das Gebiet vor dem Hannibal. Die Muschel laicht nach JAECKEL von Oktober bis Januar. Die Verbreitung erfolgt über pelagische Larven.

Polychaeta

Errantia

Fam. Polynoidae

Harmothoe imbricata L.

Die Art ist die häufigere der beiden aus dem Untersuchungsgebiet determinierten. Beide ähneln sich in ihrer Lebensweise und kommen auch nebeneinander vor. Sie sind gute Schwimmer und leben auf dem Sediment. Ihre flache Form ermöglicht es ihnen, auch auf extremen Weichböden, z. B. der Lübecker Bucht, zu leben. *Harmothoe* ernährt sich räuberisch von anderen kleinen Bodentieren. Im Gebiet kommt sie vor allem auf Mischsedimenten und reinem Schlick vor, auf reinem Sand wurde das Tier selten gefunden. Die Art ist über das gesamte Untersuchungsgebiet verbreitet.

Harmothoe sarsi KINBERG

Harmothoe sarsi wurde seltener gefunden, ist aber ebenfalls bis in die östliche Ostsee gemein (FRIEDRICH [8]). Das Tier bevorzugt das gleiche Sediment wie die verwandte Art. Von beiden Spezies sind planktische Larven bekannt. Eine Reihe von Tieren wurde durch das Spülen beim Sieben des Sediments beschädigt und ließ sich nicht mehr eindeutig bestimmen.

Fam. Phyllodocidae

Anaitides mucosa BERGSTRÖM

Die Bestimmung der Phyllodociden bereitet einige Schwierigkeiten, da die sehr langen, zarten Tiere beim Sieben meist zerrissen, zum anderen die Bestimmungs-

merkmale schwer zu erkennen und außerdem sehr umstritten sind. Die zu besprechende Art wurde vereinzelt im gesamten Gebiet bis auf die Lübecker Bucht und den Zentralteil der Mecklenburger Bucht gefunden. Die Bevorzugung eines Sediments konnte nicht vermerkt werden. *Anaitides* lebt auf Grobsand wie auf Mischsediment und auf reinem Schlick. Das Tier ernährt sich räuberisch.

Eteone longa FABRICIUS

Der Polychaet lebt vor allem auf Sand, kommt aber auch auf Weichboden (Kadetrinne, Mecklenburger Bucht) vor. Er ist im Gebiet wie *Anaitides* zwar verbreitet, kommt aber nur auf einzelnen Stationen und dann in geringer Zahl (1—2 Tiere) vor. Die dichteste Besiedlung wurde auf und vor dem Hannibal angetroffen.

KÜHLMORGEN-HILLE fand *Eteone* ebenfalls vor allem auf Sandboden, während ELIASON ihn aus dem Öresund auch für Mischsedimente und Schlamm angibt. Das Tier lebt dort in Tiefen von 11 bis 40 m. Die Laichzeit wird mit März angegeben. Eine planktische Larve ist bekannt.

Fam. Hesionidae

Castilia punctata MÜLLER

Die Art ist im Untersuchungsgebiet nur auf wenigen Stationen vor der ost-schleswig-holsteinischen Küste gefunden worden. Sie lebt auf Schlick. KÜHLMORGEN-HILLE beschreibt ein sporadisches Auftreten von *Castilia* in der Kieler Bucht. Dort hält sie sich vor allem im Einflußgebiet des Großen Belts auf.

Fam. Nephthydidae

Nephtys ciliata MÜLLER

Die beiden im Gebiet gefundenen Arten gleichen sich in ihrer Lebensweise. Sie wühlen im Sediment, dabei kommt ihnen ihr kräftiger, mit Papillen besetzter Rüssel zustatten. Als Nahrung dienen ihnen vor allem andere Tiere. Sie sind gute Schwimmer. *N. ciliata* ist im Untersuchungsgebiet weit verbreitet. Er gehört neben *Scoloplos armiger* zu den gemeinsten Polychaeten des Seegebietes. Außer auf Grobsand ist er im Gebiet auf allen Sedimenten vertreten. Bevorzugt werden aber die Mischsedimente, schlickiger Sand und sandiger Schlick (6—9). In diesen Sedimenten finden die Räuber das beste Nahrungsangebot. Südöstlich von Fehmarn findet man die Art auch im reinen Schlick, genauso wie auf einigen Stationen in der Kadetrinne. Sonst bleibt der Schlickteil der Mecklenburger und Lübecker Bucht unbesiedelt. Die größten Tiere wurden mit 85 mm vermessen. KÜHLMORGEN-HILLE gibt für 140 mm lange Tiere ein Alter von 7—8 Jahren an. Die Art ist auch in der Kieler Bucht die häufigste und größte Nephthydidae. Die Hauptlaichzeit liegt nach THORSON im Dezember bis Januar. BANSE [1] fand die Larven von März bis September, LÖWE beschreibt das Tier aus dem östlichen Anschlußgebiet. Auch hier ist *N.* häufig, scheint nach Osten aber der Submergenz zu unterliegen, denn der Autor führt aus, daß im Arkonabecken erst Tiefen ab 40 m bewohnt werden. In der Beltsee tritt der

Polychaet schon bei Tiefen von 11 m abwärts auf. *N. ciliata* ist bis Bornholm nachgewiesen. Im Öresund findet ELIASON *N.* ebenfalls als den häufigsten Vertreter der Nephthydidae.

Nephtys caeca FABRICIUS

Die zweite, im Gebiet nachgewiesene Art ist *N. caeca*. Der Polychaet ist allerdings nicht so häufig wie *N. ciliata*. Das Verbreitungsgebiet ist kleiner, und auch die Individuenzahlen sind geringer. *N. caeca* bewohnt mehr sandige Böden als *N. ciliata*, der Schlick wird fast ganz gemieden. KÜHLMORGEN-HILLE bezeichnet das Tier als Sandform und fand es im Sand und in Mischsedimenten. *N. caeca* laicht im Öresund (THORSON) das ganze Jahr über. LÖWE erwähnt die Art nicht aus der Arkonasee, wahrscheinlich geht sie nicht über die Darßer Schwelle. Zwischen *N. ciliata* und *N. caeca* scheint es auch eine Reihe von Varietäten zu geben. Es wurden häufig Tiere gefunden, deren Zuordnung zu einer der beiden Arten Schwierigkeiten bereitet. Von den übrigen für die Beltsee angegebenen Arten *N. hombergi* und *N. longosetosa* konnte keine nachgewiesen werden.

Sedentaria

Fam. Orbiniidae

Scoloplos armiger MÜLLER

Der Polychaet ist die häufigste Art im Untersuchungsgebiet. Er ist auf kein Sediment spezialisiert, bevorzugt aber Sedimente mit Sandbeimischungen. Lediglich im Schlick der Lübecker Bucht und im Zentralteil der Mecklenburger Bucht wurde das Tier nicht gefunden. *Scoloplos* ist Substratfresser (REMANE). Er wühlt im Sediment und nimmt dabei die Nahrung auf. THORSON gibt als Laichzeit den Juni an. Larven wurden nach BANSE [1] in der Kieler Bucht von September bis Dezember gefunden. Allerdings gibt THORSON keine pelagischen Larven für *Scoloplos* an. Nach dem Schlüpfen aus den Eiern entwickelt sich eine Bodenlarve, um die es sich bei der Angabe von BANSE [1] handeln dürfte. Die höchsten Zahlen wurden auf den Mischsedimenten vermerkt (40 Tiere). Es ist bekannt (DEMEL, MULICKI [3]), daß *Scoloplos* gegenüber Sauerstoffmangel widerstandsfähig ist. Er wird als „Letztsiedler“ in der Danziger Bucht und im Bornholmbecken in großen Tiefen angegeben. Für die sauerstoffarmen Tiefen der Beltsee trifft das nicht zu, offenbar hängt die größere Verträglichkeit gegen Sauerstoffarmut im Osten mit der Submergenz, die dieses Tier durchmacht, zusammen.

Fa. Spionidae

Spio filicornis OERSTEDT

Im Untersuchungsgebiet ist der Polychaet auf Grobsand bis Feinsand und im schlickigen Sand in geringen Individuenzahlen verbreitet. Die dichteste Ausbreitung wurde auf und vor dem Hannibal angetroffen. Die Individuenzahlen lagen zwischen 2—4. Die Art scheint nicht tiefer als 18 m zu gehen. Die schlickigen Sandflächen im Fehmarnbelt blieben von ihr unbesiedelt. KÜHL-

MORGEN-HILLE beschreibt keinen bevorzugten Sediment-Typ. Er findet die Tiere, wenn auch in geringen Zahlen, über die ganze Kieler Bucht verbreitet. Der Polychaet lebt in Röhren im Sand. Er sucht die Bodenoberfläche mittels der Tentakeln nach Nahrung ab (REMANE). Nach THORSON laicht die Art von Mai bis Juni. *Sp. filicornis* kann sich je nach den herrschenden Faktoren über eine pelagische oder nichtpelagische Larve reproduzieren. In unserem Gebiet trifft man aber nur pelagische Larven an.

Polydora ciliata JOHNSON

Polydora wurde im Untersuchungsgebiet nur auf wenigen Stationen gefunden. Als Sediment lag immer Mittelsand vor. Das Vorkommen beschränkte sich auf die Kadetrinne und den Hannibal. KÜHLMORGEN-HILLE erwähnt ein sehr sporadisches Vorkommen der Art. Als bevorzugtes Sediment wird ebenfalls Sand beschrieben. Sie ist aber in der Kieler Bucht keineswegs selten. Nach REMANE tastet sie mit ihren Tentakeln den Boden nach Nahrung ab und soll auch ganze Sandkörner verzehren. ELIASON fand sie in gebohrten Löchern in Schalen von *Littorina* und *Neptunea*. Die Laichzeit liegt nach THORSON von Mai bis September. Pelagische Larven traf BANSE von März bis November an.

Pygospio elegans CLAPARÉDE

Der sehr zarte Polychaet (5—12 mm lang) baut aus Sandkörnern feine Röhren. Nach REMANE tastet er das Sediment nach Nahrung ab. *P.* wurde hauptsächlich vor und auf dem Hannibal festgestellt. Das bevorzugte Sediment ist Sand, allerdings findet man das Tier auch gelegentlich in Mischsedimenten. Nach Osten erstreckt sich das Vorkommen entlang der Mecklenburgischen Küste, aber stets nur in geringen Zahlen (1—4). Bis auf 3 Stationen in der Kadetrinne konnte die Art im Seegebiet nirgends nachgewiesen werden. *P.* ist ein euryhales Tier, das besonders in ruhigen Brackgewässern große Individuenzahlen erreicht und als Fischnahrung von großer Bedeutung ist. Im Öresund laicht *P.* von Februar bis April (THORSON). *P.* ist wie *Spio filicornis* in der Lage, sich je nach den Milieubedingungen über eine pelagische Larve oder nichtpelagische fortzupflanzen.

Fam. Disomidae

Disoma multisetosum ÖRSTEDT

Disoma wurde einmal im Südteil der Kadetrinne, dann nördlich vor der Halbinsel Wustrow und vor der ostholsteinischen Küste und im Fehmarnbelt gefunden. Im Fehmarnbelt ist das Vorkommen am dichtesten und zeigt die größten Individuenzahlen (18). Besiedelt wurde sandiger Schlick und Schlick. Die beschriebenen Areale stehen nicht miteinander in Verbindung. Das Vorkommen im Fehmarnbelt gewinnt allerdings Anschluß an die von KÜHLMORGEN-HILLE beschriebenen Fundorte. ELIASON erwähnt *D.* für den Öresund auf tonigen Böden. Dort laicht sie von Juni bis September. Die Art hat eine langpelagische, planktotrophe Larve (THORSON). In dem Gebiet östlich der Darßer Schwelle scheint *D.* zu fehlen, denn LÖWE gibt das Tier in seiner Artenliste nicht an.

Fam. Paraonidae

Aricidea suecica ELIASON

Sie ist im Untersuchungsgebiet auf wenigen Stationen in der Kadettrinne, vor dem Küstengebiet Bukspitze-Warnemünde, auf dem Hannibal, vor dem Küstengebiet Dahmeshöved-Fehmarn und im Fehmarnbelt verbreitet. Das Tier bevorzugt deutlich das tiefere Sublitoral. Die 20-m-Linie wurde nur selten überschritten. Das Tier lebt bevorzugt auf Sand, schlickigem Sand und sandigem Schlick, wobei besonders die Stationen südöstlich der Sagasbank mit grobsandigem, kiesigem Schlick hohe Individuenzahlen aufweisen (6–10). KÜHLMORGEN-HILLE fand *A.* in der Kieler Bucht auf Feinsand und Schlick. Die Individuenzahlen blieben allerdings hinter denen im Untersuchungsgebiet zurück. Die Größen der gefundenen Tiere entsprechen einander etwa (5–20 mm). Unbesiedelt bleiben der gesamte Zentralteil der Mecklenburger Bucht, die Lübecker Bucht und der Übergang zur Kadettrinne. Wahrscheinlich ist das Tier gegen Sauerstoffmangel empfindlich.

Paraonis gracilis TAUBER

Im Untersuchungsgebiet bevorzugt *P. gracilis* als Sediment schlickigen Sand und sandigen Schlick. Reiner Schlick wird nur in wenigen Ausnahmen besiedelt. ELIASON beschreibt, daß die Art anscheinend Tonboden bevorzugt (Öresund). KÜHLMORGEN-HILLE fand vereinzelt Exemplare auf sandigem Schlick. Das Vorkommen im Untersuchungsgebiet erstreckt sich aus dem Fehmarnbelt vor allem entlang der ostholsteinischen Küste. Vor dem Hannibal war nur eine Station besiedelt. Die Mixsande zwischen dem Zentralteil und der Kadettrinne und diese selbst sind schwach besiedelt. Die Art scheint nicht flacher als 14 m vorzukommen. Über die Larvalentwicklung ist keine Aussage zu machen.

Fam. Opheliidae

Travisia forbesi JOHNSON

Der Polychaet ist stets von einer schleimigen Hülle, die mit Sandkörnern besetzt ist, umgeben. KÜHLMORGEN-HILLE weist das Tier für die Kieler Bucht nach, und auch LÖWE erwähnt es aus dem östlichen Anschlußgebiet. Im Untersuchungsgebiet wurde lediglich ein separates Vorkommen auf dem Hannibal gefunden. Die Tiere lebten ausschließlich auf Grobsand. Sie kamen nie in größeren Tiefen als 11 m vor. Ähnliche Böden auf der Sagasbank und bei Kühlungsborn wurden ohne *Travisia* angetroffen. Es ist aber anzunehmen, daß der Polychaet auch dort vorkommt, nur liegen die Individuenzahlen zu niedrig (1–2), außerdem sind sporadisches Auftreten und Nestbildung möglich. KÜHLMORGEN-HILLE nimmt Larveninvasion in das Gebiet der Beltsee an.

Ophelia limacina RATHKE

Nach ELIASON eine arktisch-boreale Art mit weiter Verbreitung, die von ihm im Öresund auf festen Böden in 10 bis 14 m Tiefe gefunden wurde. Die Art wird von LÖWE im östlichen Anschlußgebiet beschrieben. KÜHLMORGEN-HILLE findet

sie in geringer Zahl auf zwei Stationen in der Kieler Bucht. Im Untersuchungsgebiet lebt *O.* auf Grob- und Mittelsand in 8 bis 12 m Tiefe. Das Hauptvorkommen entlang der Küste Mecklenburgs bis zum Hannibal umfaßt einige Stationen am Rand der Kadettrinne und ein Vorkommen auf der Sagasbank. *O.* ist nach REMANE ein Substratfresser. Sie laicht nach THORSON von April bis Dezember. Die Larvalentwicklung ist unbekannt.

Fam. Chloroemidae

Stylarioides plumosus MÜLLER

St. plumosus wurde nur südlich und östlich vor der Sagasbank angetroffen. Die Tiere lebten in etwa 18 m Tiefe auf Schlick mit kleinen Steinen. Der Polychaet baut aus Schlick dickwandige Röhren und ist nach FRIEDRICH [8] Detritusfresser. Nach REMANE tastet er mit seinen Tentakeln den Boden nach Nahrung ab. In der Kieler Bucht ist er nach KÜHLMORGEN-HILLE im ganzen Gebiet, außer auf Sand, wenn auch nur vereinzelt, anzutreffen. LÖWE erwähnt das Tier auch für ein Gebiet. ELIASON beschreibt die Art für den Öresund, erwähnt aber ebenso sporadisches Vorkommen im südlichen, durch die eigentliche Ostsee beeinflussten Teil. Die Art laicht im Juli (THORSON). Pelagische Larvenstadien sind nicht bekannt.

Fam. Scalibregmidae

Scalibregma inflatum RATHKE

Sc. kam vereinzelt in der Kadettrinne, vor dem Hannibal und vor der Sagasbank vor. Die Tiere wurden auf Schlick und auf kiesigem Schlick gefunden. Der Polychaet ist Substratfresser (REMANE). KÜHLMORGEN-HILLE stellt die Art auf ähnlichem Sediment auch in der Kieler Bucht fest. Dort ist *Sc.* ebenfalls selten. Nach THORSON laicht sie im Öresund von Oktober bis Dezember. Pelagische Larvenstadien sind bekannt.

Fam. Arenicolidae

Arenicola marina L.

Diese ausgesprochene Flachwasserform lebt in einer bis zu 30 cm langen U-förmigen Röhre im Sediment eingegraben. Sie kommt bis zu einer Tiefe von 16 m vor. Mit dem Bodengreifer wurde der Polychaet nie erbeutet. Lediglich mit einer scharfgehenden Dreiecksdredge gelang dies. *A.* hat erhebliche Bedeutung für die Umarbeitung der Sedimente in ihrem Biotop.

Fam. Capitellidae

Capitella capitata FABRICIUS

Die Art ist im Untersuchungsgebiet weit verbreitet. Sie fehlt lediglich in der Lübecker Bucht und mit wenigen Ausnahmen auf reinen Sandflächen. Sie bevorzugt Weichboden, also Schlick und sandigen Schlick, ist aber auch noch in schlickigem Sand anwesend. Die größten Individuenzahlen wurden im reinen Schlick vermerkt. *C.* scheint zu ausgesprochener Nestbildung zu neigen, denn von Greifer zu Greifer variieren die Individuenzahlen oftmals sehr stark. *C.* ist

ein Substratfresser (REMANE). Sie gräbt sich im Sediment tiefe Gänge, die in einem kleinen Schornstein enden. Nach THORSON laicht sie von Dezember bis Januar. Die Art reproduziert sich über eine planktotrophe Larve. In der Kieler Bucht scheint *C.* weniger zahlreich zu sein als im Untersuchungsgebiet. KÜHLMORGEN-HILLE fand sie nur auf drei Stationen. LÖWE gibt die Art in seiner Liste aus dem östlichen Anschlußgebiet an. Im Öresund kommt sie auf Weichboden immer vor (ELIASON).

Fam. Amphictenidae

Pectinaria koreni MALMGREN

Der Köcherwurm ist ein sedentärer Polychaet. Er baut aus gleichgroßen Quarzkörnern eine kegelförmige Röhre. *P.* gräbt im Sediment und nährt sich von Detritus. Dabei wirken die starken Borsten am Vorderende, die Paleen, als Grabschaufeln (REMANE). Außerdem bilden sie eine Schutzeinrichtung zum Verschluss der Röhre. Von der mitgeschleppten Röhre ragt nur das spitze Ende aus dem Sediment heraus. *P.* ist auf sandigen Böden im Untersuchungsgebiet verbreitet, allerdings ist sie auf reinem Sand genau so selten wie im Schlick (1). Treten zum Schlick aber 5–10% Sandanteile hinzu, ist der Polychaet sofort zahlreicher (6–10). Hauptsiedelgrund sind die sandigen Schlick- und schlickigen Sandgebiete, also der Fehmarnbelt und der Teil nördlich und östlich des Schlickgebietes der Mecklenburger Bucht. KÜHLMORGEN-HILLE beschreibt für die Kieler Bucht die zahlenmäßig größten Vorkommen auf reinem Sand, aber auch die Verbreitung auf Mischsedimenten. Die Art tritt dort noch bei 10 bis 11 m auf, während sie im Untersuchungsgebiet erst ab 16 m abwärts lebte. Sie scheint also nach Osten einer Submergenz zu unterliegen. *P.* laicht nach THORSON und ELIASON von Juni bis Juli. BANSE traf Larven von Juni bis November an. Die Larven ernähren sich planktotroph. LÖWE gibt *P.* für die Arkonasee an, sie hat aber produktionsbiologisch keine Bedeutung. ELIASON beschreibt die Art für den Öresund, sie tritt dort aber hinter *P. belgica* zurück. Diese Art wurde im Untersuchungsgebiet nicht gefunden. Der Salzgehalt ist für sie zu niedrig. KÜHLMORGEN-HILLE wies sie einmal in der Kieler Bucht beim FS „Flensburg“ nach.

Fam. Ampharetidae

Ampharete grubei MALMGREN

Die Art erscheint im Untersuchungsgebiet nur in einem Areal, das vom Durchstrom salzreichen Tiefenwassers erfaßt wird. *A.* tritt auch hier nur vereinzelt auf, ist aber über einen größeren Raum gleichmäßig verbreitet. Sie fehlt im gesamten südlichen Teil des Untersuchungsgebietes, etwa südlich der Linie Fehmarnsund–Warnemünde. Sie scheint kein Sediment besonders zu bevorzugen, denn sowohl auf Sand als auch in reinem Schlick war sie zu finden. KÜHLMORGEN-HILLE gibt die Form für die Kieler Bucht als selten, aber östlich der Linie F. S. Kiel–Flensburger Förde stets vorhanden an. LÖWE erwähnt das Tier aus dem östlichen Anschlußgebiet. ELIASON beschreibt *A.* aus dem Öre-

sund. Sie laicht dort im März. Eine pelagische Larve ist nicht bekannt. Der Polychaet tastet nach REMANE das Sediment nach Nahrung ab.

Amphiteis gunneri SARS

Der Polychaet ist sehr selten und wurde nur auf 6 Stationen festgestellt, davon liegen drei in der Kadetrinne. Als Sediment wurde an diesen Stellen immer Schlick vermerkt. KÜHLMORGEN-HILLE fand die Art zweimal in der Kieler Bucht auf Weichboden. ELIASON weist sie für tonige Böden im Öresund nach. Sie laicht im Juni. Über die Larvalentwicklung liegen keine Angaben vor.

Fam. Cirratulidae

Chaetozone setodsa MALMGREN

Die Art wurde nur auf drei Stationen mit je einem Exemplar gefunden. Die Fundorte lagen vor der Sagasbank und im Eingang zum Fehmarnbelt. Die Tiere lebten auf Schlick. KÜHLMORGEN-HILLE stellte *Ch.* einmal auf dem Winds Grav in der Kieler Bucht fest. Östlich des Untersuchungsgebietes scheint sie nicht mehr verbreitet zu sein. Von ELIASON wird sie für den nördlichen Teil des Öresund angegeben.

Fam. Terebellidae

Terebellides strömi SARS

Der Polychaet baut dicke Schlickröhren im Sediment. Er tastet die Grundoberfläche nach Nahrung ab. Nach THORSON laicht die Art im Mai. Pelagische Larvenstadien sind nicht bekannt. *T.* ist in den nördlichen Meeren weit verbreitet und eine arktisch-boreale Form. Im Untersuchungsgebiet tritt der Polychaet, besonders auf der Sagasbank, um Fehmarn und im Fehmarnbelt, massenhaft auf. Maximal wurden 59 Tiere gezählt. Weiterhin ist es südlich und östlich des Zentralteils der Mecklenburger Bucht verbreitet. Bemerkenswert ist das Vorkommen auf Weichboden in der Fahrinne vor der Insel Poel. Bevorzugt werden im Untersuchungsgebiet schlickiger Sand und sandiger Schlick. Auf reinem Sand kommt die Art selten vor, genauso ist ihre Verbreitung im reinen Schlick nur gering. Unbesiedelt bleiben die Lübecker Bucht und der Zentralteil der Mecklenburger Bucht. KÜHLMORGEN-HILLE betont zwar, daß *T.* wahrscheinlich Sauerstoffmangel kurzzeitig ertragen kann, weil er ihn auch auf Faulschlamm fand, doch scheint das Fehlen z. B. in der Lübecker Bucht und in der Mecklenburger Bucht dem entgegenzusprechen. Während in der Lübecker Bucht das makroskopische Benthos fast ganz fehlt, treten im Zentralteil der Mecklenburger Bucht noch einige Bodentiere auf. Wenigstens zeitweilig scheint hier am Boden absoluter Sauerstoffmangel und damit in Verbindung H_2S über dem Sediment aufzutreten. Dieser Zustand wird aber augenscheinlich von *T.* nicht ertragen. Dazu kommt, daß durch das Fehlen pelagischer Larven ein einmal ausgerotteter Bestand sich nur ganz allmählich und über einen langen Zeitraum wieder aufbauen kann. Dagegen erhalten sich abgeschlossene Populationen, wie z. B. vor der Insel Poel, sehr gut, obwohl sie isoliert sind.

Artacama proboscidea MALMGREN

Im Untersuchungsgebiet wurde *Artacama proboscidea* nur südlich von Fehmarn vor dem Fehmarnsund und auf schwarzem Schlick angetroffen. KÜHLMORGEN-HILLE beschreibt sie für die Kieler Bucht als ausgesprochenen Weichbodenbewohner, der auf Sand vollkommen fehlt. Allerdings stellte er die größte Besiedlungsdichte im Faulschlamm fest. Der Zentralteil der Mecklenburger Bucht, der dem Verbreitungsgebiet entspricht, bleibt unbesiedelt. Wahrscheinlich bildet der Salzgehalt für die Tiere hier die Schranke der Verbreitung. ELIASON beschreibt aus dem Öresund *A.* nach *Terebellides* als die häufigste Art. Sie lebt dort fest an Ton gebunden. Die Art laicht nach dem gleichen Verfasser von April bis Juni. Das Tier hat ein pelagisches Larvenstadium, das sich leithotroph ernährt.

Neoamphitrite figulus DALYELL

Die Art wurde nur auf zwei Stationen im Fehmarnbelt angetroffen. Sie lebt auf sandigem Schlick und baut U-förmige Röhren im Sediment. Sie ist Substratfresser. Über die Vermehrung der Art ist nichts bekannt.

Fam. Sabellidae

Euchone papillosa SARS

Euchone ist ein typischer Weichboden-Bewohner. Sie wurde zwar auch im sandigen Schlick angetroffen, doch nie im reinen Sand. Der Polychaet baut lange, dünne Röhren aus Schlick, die weit aus dem Sediment herausragen und es dem Wurm ermöglichen, bei Sauerstoffmangel in der grundnahen Wasserschicht über dieser Wasser zu entnehmen. Hauptausbreitungsgebiet ist der Fehmarnbelt und das Küstengebiet Fehmarn-Dahmeshöved. Wenige Tiere fanden sich vor dem Hannibal und vor Kühlungsborn. Die Individuenzahlen liegen überall niedrig (1–3). Die Dichte des Vorkommens ist nur im Westen größer. Nach mündlicher Mitteilung fand Herr Prof. ARNDT, Rostock, 1961 bei Heiligendamm Rasen von *Euchone*. Anschließend sind die Bestände aber sehr zurückgegangen. Wahrscheinlich handelt es sich bei dieser starken Population um die Folge eines starken Salzwassereintruchs mit entsprechendem Larvenghalt. KÜHLMORGEN-HILLE gibt sie für die Kieler Bucht von West nach Ost abnehmend an. LÖWE erwähnt *Euchone* für das östliche Anschlußgebiet in seiner Artenliste, leider ohne Angabe der Fundortes. Wahrscheinlich handelt es sich um Formen, die sich von Larven aus dem Öresund entwickelt haben. *Euchone* ist dort nach ELIASON sehr verbreitet.

Priapulida

Priapulus caudatus LAMARCK

Der Rutenwurm ist im Untersuchungsgebiet allgemein verbreitet. Lediglich die Lübecker Bucht und der Zentralteil der Mecklenburger Bucht waren unbesiedelt. Das stärkste Vorkommen wurde südöstlich der Sagasbank gefunden. Auf kie-

sigem, grobsandigem Schlick siedelten 16 bis 23 Tiere. Ebenfalls gut bewohnt erscheint das Areal vor dem Hannibal. Hier leben die Tiere besonders im schlackigen Sand, aber auch im reinen Sand. *Priapulus* lebt im Sediment vergraben und nährt sich von Substrat (REMANE).

KÜHLMORGEN-HILLE fand *P.* sehr selten in der Kieler Bucht. Östlich des Untersuchungsgebietes stellt LÖWE das Tier ebenfalls selten fest. Bemerkenswert erscheint, daß LÖWE *Priapulus* erst ab 19 m angibt. Das Tier unterliegt also offensichtlich der Submergenz.

Halicryptus spinulosus v. SIEBOLD

Der zweite, im Gebiet vorkommende Priapulide zeigt nicht die starke Verbreitung wie *Priapulus*. Er kommt nur sporadisch und auch niemals mit so hohen Individuenzahlen wie *P.* vor, ist aber offensichtlich über das ganze Gebiet verbreitet und selbst in der Lübecker Bucht zu finden. Im Zentralteil der Mecklenburger Bucht wurden einige Tiere gefunden. Ein bevorzugtes Sediment konnte nicht festgestellt werden. *Halicryptus* lebt im reinen Sand wie auch im Schlick. LÖWE beschreibt östlich des Untersuchungsgebietes eine weit höhere Häufigkeit (4 bis 6 Tiere im Durchschnitt). *H.* ist eine euryhaline Art, die seit der Yoldiazeit (EKMANN) die Ostsee besiedelt. Nach PURASJOKI ist die Art eurybiotisch. Sie verträgt brackiges Wasser bis 3,7‰ und Maximaltemperaturen bis 11 °C.

Crustacea

Cirripedia

Balanus crenatus BRUG

B. crenatus ist im Gebiet im Sublitoral zahlreich und gemein. Er besiedelt Steine und vor allem Schalen von *Mytilus*. KRÜGER [17] gibt als östliche Verbreitungsgrenze die Linie Fehmarn-Trelleborg an. Nach meinen Untersuchungen muß man diese auf die Linie Darßer-Ort-Trelleborg erweitern. *B. crenatus* ist dabei im gesamten Gebiet allein vertreten, denn *B. improvisus* ist auf das Eulitoral und die Häfen beschränkt. Er wurde lediglich an Buhnen, Kais, Tonnen u. ä. festgestellt, dort wiederum ohne Konkurrenz durch *B. crenatus*. Wie REMANE für die Kieler Bucht nachweist, unterliegt *B. crenatus*, der in der nördlichen Beltsee auch im Eulitoral und im Schiffsbewuchs vorkommt, schon dort einer deutlichen Submergenz. Diese Erscheinung läßt sich damit auch für das Untersuchungsgebiet nachweisen. *B. improvisus* bevorzugt dagegen das mehr brackige Oberflächen- und Hafengewasser als Lebensraum. Beide Arten sind Filtrierer. Sie pflanzen sich über pelagische Larven fort. Dabei ist es durchaus möglich, daß die Population von *B. crenatus* nur durch den Larvenzustrom aus den Belten erhalten wird, da sich die Arten in dem Grenzgebiet ihrer Verbreitung meist nicht mehr fortpflanzen können.

Cumacea

Diastylis rathkei KRÖYER

Dieser einzige Vertreter der Cumaceen ist im Gebiet allgemein verbreitet. Er kommt vom Feinsand abwärts vor. Grober Sand bleibt unbesiedelt. Im Zentral-

teil der Mecklenburger Bucht und in der Lübecker Bucht wurden nur vereinzelt Tiere angetroffen. Die größte Abundanz ließ sich im Fehmarnbelt, vor der schleswig-holsteinischen Küste und im östlichen Teil der Mecklenburger Bucht mit 20—45 Tieren feststellen. KÜHLMORGEN-HILLE bezeichnet *D.* als den häufigsten der am Grund lebenden Krebse in der Kieler Bucht, was auch für das Untersuchungsgebiet zutrifft. *D.* lebt halb im Sediment vergraben (REMANE) und nährt sich je nach der Sedimentart, bei sandigem Grund durch Abnagen der Diatomeen oder im Schlick als Filtrierer. Die Eier kommen im Marsupium des Weibchens zur Entwicklung. Im April und Mai wurden die Tiere mit wohlentwickelten, kurz vor dem Schlüpfen befindlichen Jungen angetroffen. Bedingt durch ihr z. T. massenhaftes Auftreten, erlangt die Art Bedeutung als Fischnahrung.

Amphipoda

Bathyporeia pilosa LINDSTRÖM

Die Art wurde im Untersuchungsgebiet vor allem auf Feinsand festgestellt, kam aber auch auf Grob- und Mittelsand vor. *B.* lebte nie tiefer als 16 m. Die meisten Tiere wurden auf dem Hannibal und auf der Sagasbank gefangen. Der Amphipode liegt auf dem Sediment und weidet die Diatomeen von den Sandkörnern. Er wurde nie mit größerer Abundanz als 10 Tiere gefunden.

Pontoporeia femorata KRÖYER

Das Tier wurde nur auf zwei Stationen vor dem Hannibal gefunden. Sie lebten auf Feinsand. KÜHLMORGEN-HILLE gibt *P.* für Schlick und Faulschlamm an. Im Untersuchungsgebiet wurde sie nie auf derartigen Sedimenten angetroffen.

Phoxocephalus holbölli KRÖYER

Dieser kleine, augenlose Amphipode wurde fast stets mit *Bathyporeia* vergesellschaftet in dem gleichen Biotop gefunden, also auf dem Hannibal und auf der Sagasbank. Er war aber immer weniger zahlreich vertreten. Er liegt im Sediment und leckt ebenfalls wie *B.* Sandkörner ab.

Microdeutopus gryllotalpa COSTA

M. wurde nur auf einer Station (2 Exemplare) vor dem Hannibal in 17 m Tiefe gefunden. Das Sediment war schlickiger Sand. KÜHLMORGEN-HILLE gibt *M.* für die Kieler Bucht auf tieferen Schlick- und Feinsandgründen an. Nach STRESEMANN soll es sich um eine Phytalform handeln, die bis zur Darßer Schwelle gemein ist.

Corophium volutator PALLAS

C. lebt im Untersuchungsgebiet auf Mittel- und Feinsand sowie schlickigem Sand. Der Amphipode ist im Küstengebiet allgemein verbreitet und stellenweise zahlreich (mehr als 20 Tiere). Er geht anscheinend nicht tiefer als 17 m hinab. Das Tier lebt im Sediment und baut U-förmige Röhren. *C.* ist nach REMANE Substratfresser, indem er Sediment mit Hilfe seiner Antennen in die Röhre zieht, soll sich aber auch durch Filtrieren ernähren können.

Isopoda

Idothea baltica PALLAS

Die Assel wurde auf 4 Stationen gefunden. Sie ist ein Phytalbewohner und wahrscheinlich mit losgerissenen Algen verfrachtet worden.

Jaera albifrons LEACH

Wie *Idothea* wurde sie in Küstennähe an losgerissenen oder flottierenden Algen angetroffen.

Mysidacea

Gastrosaccus spinifer GOES

Die Art lebt im Untersuchungsgebiet auf allen Sedimenten. *G.* ist sehr beweglich und macht neben dem Leben am Grund Wanderungen ins Pelagial. Er ist mit dem Bodengreifer nicht quantitativ zu erfassen. Der Krebs ernährt sich von Plankton, das aus dem Wasser abfiltriert wird.

Praunus flexuosus O. F. MÜLLER

Diese Phytalform wurde auf den flachsten Stationen, auf denen nur geringer Bewuchs festgestellt werden konnte, gefunden. *P.* ernährt sich ausschließlich von Pflanzen.

Crangonidae

Crangon crangon L.

Die Nordseegarnele wurde nur einmal auf den flacheren Sandstationen in Küstennähe vereinzelt angetroffen. Dort lebt sie am Tage in den Sand eingegraben. In der Dämmerung jagt sie Amphipoden, Polychaeten und Mollusken. Die Tiere sind, wie bei Räufern nicht anders zu erwarten, sehr beweglich und wie *Gastrosaccus* mit dem Bodengreifer nur zufällig zu fangen.

Paguridae

Eupagurus bernhardus L.

Während der Untersuchungen wurde nur einmal auf einer Station im Fehmarnbelt ein Einsiedlerkrebs erbeutet. Das Tier steckte in einem Gehäuse von *Buccinum undatum*.

Portunidae

Carcinus maenas L.

Dieses, im Eulitoral oder im flachen Sublitoral beheimatete, Tier wurde vereinzelt in Küstennähe gefangen. Im Gebiet ist die Strandkrabbe allgemein und häufig.

Echinodermata

Ophiura albida FORBES

Der Schlangensterne lebt gewöhnlich im Sediment vergraben, so daß nur noch die Enden der Arme zu sehen sind. Die Art ist Substratfresser, doch ist es nicht ausgeschlossen, daß sie sich auch räuberisch ernährt (REMANE).

Ophiura ist in der Lage, sich mit Hilfe der Arme lebhaft auf dem Grund fortzubewegen. Das Tier wurde nur auf Schlick und im Fehmarnbelt auf schlickigem Sand und sandigem Schlick gefunden. *O.* ist nicht über das ganze Gebiet verbreitet, sondern nur im Fehmarnbelt, im Eingang zum Fehmarnbelt und vor der schleswig-holsteinischen Küste. Dieses Verbreitungsgebiet geht auf Untersuchungen im April 1962 zurück. Die Art erleidet anscheinend große Fluktuationen. Nach mündlichen Mitteilungen von Herrn Prof. Dr. ARNDT, Rostock, wurde *O.* 1961 massenhaft auch vor der mecklenburgischen Küste festgestellt. 1962, 1963 und auch 1964 wurde hier kein Exemplar mehr gefunden. Genauso wurde 1963 und 1964 bei Nachuntersuchungen in dem auf der Karte ersichtlichen Verbreitungsareal lediglich am Ausgang des Fehmarnbelt zur Kieler Bucht *O.* vereinzelt vermerkt. Dazu muß gesagt werden, daß die Dichte der Tiere, die auf dem Grund lebten, sehr groß war (bis 60), denn bei einem kurzen Dredgenzug war der Netzsack mit *O. albida* gefüllt. Wahrscheinlich geht die starke Besiedlung der Jahre vor 1962 und die geringe der folgenden Jahre darauf zurück, daß *O. albida* nicht mehr, wie z. B. *Asterias rubens*, in der Lage ist, sich im Gebiet selbständig fortzupflanzen. Zur Bestanderhaltung ist eine ständige Larvenzufuhr aus Gebieten mit höherem Salzgehalt nötig. Bleibt diese zu dem Zeitpunkt aus, wo die Larven sich im Wasser befinden, oder erreichen die Larven das Siedelgebiet, wenn dort ungünstige Milieubedingungen herrschen, so wird die Besiedlung ausbleiben. Die Art laicht von Juli bis Oktober, die pelagischen, planktotrophen Larven sind als *Ophiopluteus* bekannt. 1965, 1966 und 1967 war dann auch *Ophiura* wieder östlich des Zentralteils der Mecklenburger Bucht zahlreich (4–8) vertreten. 1968 war der Bestand erneut verschwunden. Tiere wurden erst im Übergangsteil Fehmarnbelt–Mecklenburger Bucht gefunden.

Asteria rubens L.

Der gemeine Seestern ist im Untersuchungsgebiet bis auf die Lübecker Bucht sowie reine Sandflächen im Eu- und flacheren Sublitoral verbreitet. Er ist an Muschelvorkommen, vor allem an *Mytilus edulis*, gebunden. Er nährt sich von Muscheln und Schnecken. Im Gegensatz zu *Ophiura* ist das Tier durchaus in der Lage, sich im Untersuchungsgebiet fortzupflanzen. Die Tiere variieren stark in Form und Färbung. Je nach der Tiefe und der Höhe des Salzgehaltes sind sie dicker oder schlanker.

Tunicata

Ascidacea

Dendrodoa grossularia v. BENEDEN

Die Art wurde in großer Zahl, besonders im Westen des Untersuchungsgebietes, an Steinen und auf Fucus festgeheftet, angetroffen. Die Tiere waren intensiv rot gefärbt. Als typisches Epifaunenelement sollen sie hier nur erwähnt werden.

Literatur

- [1] BANSE, K., Über das Verhalten von meroplanktischen Larven in geschichtetem Wasser. Kiel. Meeresforsch. 11 (1955).
- [2] BRAUN, M., Faunistische Untersuchungen in der Bucht von Wismar. Arch. Ver. d. Freund. f. Naturgesch. Mecklbg. 42 (1888).
- [3] DEMEL, K. und MULICKI, Z. Quantitative investigation on the biological bottom productivity of the south Baltic Rep. sea. Fish. Inst. Gdynia 7 (1954) 75–126 (polnisch).
- [4] DIETRICH, G., Die natürlichen Regionen von Nord- und Ostsee auf hydrographischer Grundlage. Kiel. Meeresforsch. 7 (1950) 35–69.
- [5] DIETRICH, G. und WEIDEMANN, Strömungsverhältnisse in der Lübecker Bucht. Die Küste, Arch. f. Forsch. u. Technik an Nord- u. Ostsee 1/2 (1952).
- [6] ELIASON, A., Polychaeta. Biologisch-faunistische Untersuchungen aus dem Öresund. Lunds Univ. Arsskr. Ard. 2 (1920).
- [7] FORSMAN, B., Notes of the invertebrate fauna of the Baltic Ark. Zool. n. S. 9 (1956); 389–417.
- [8] FRIEDRICH, H., Polychaeta. In GRIMPE-WAGLER TNO 6b (1932); 1–200.
- [9] GAJEVSKAJA, N. S., Bestimmungsbuch der Fauna und Flora der nördlichen Meere der UdSSR (in russisch). Moskau 1948.
- [10] HAGMEIER, A., Die Arbeiten mit dem Petersen-Bodengreifer auf der Ostseefahrt April 1925. Ber. Dtsch. wiss. Komm. Meeresforsch. NF 2, 92–95.
- [11] HAGMEIER, A., Die Bodenfauna der Ostsee im April 1929. Ber. Dtsch. wiss. Komm. Meeresforsch. 5 (1929).
- [12] HELM, R., Zum Problem der Strömungen im Fehmarnbelt. Beitr. Meereskunde 22 (1968), 25–40.
- [13] JAECKEL, S., Zur Ökologie der Molluskenfauna in der westlichen Ostsee. Schr. naturw. Ver. Schlesw.-Holst. 26 (1952); 18–50.
- [14] JÖRGENSEN, C. B., Lamellibranchia. Medd. Komm. Danm. Fisk-og. Havunders, Vol. 4, Plankton pp. (1946); 277–311.
- [15] KÄNDLER, R., Hydrographische Untersuchungen zum Abwasserproblem in den Buchten und Förden der Ostküste Schleswig-Holsteins. Kiel. Meeresforsch. 9 (1953); 176–200.
- [16] KOLP, O., Die Sedimente der westlichen und südlichen Ostsee und ihre Darstellung. Beitr. Meereskunde 17–18 (1966).
- [17] KRÜGER, P., Cirripedia. In GRIMPE-WAGLER TNO Xd (1941); 1–40.
- [18] KÜHLMORGEN-HILLE, G., Die jahreszeitlichen Veränderungen in der Bodenfauna der Kieler Bucht. Diss. Kiel 1963.
- [19] LENZ, H., Die wirbellosen Tiere der Travemünder Bucht. Ber. Komm. z. wiss. Unters. dtsch. Meere (1884).
- [20] LÖWE, F.-K., Quantitative Benthosuntersuchungen in der Arkonasee. Mitt. zool. Mus. Berlin 39 (1963); 247–349.
- [21] MEYER, H. A. und MÖBIUS, K., Die Fauna der Kieler Bucht. Bd. I u. II Leipzig 1865 u. 1871.
- [22] MÖBIUS, K., Die wirbellosen Tiere der Ostsee. Jhr. Ber. Komm. wiss. Unters. dtsch. Meere Kiel 1873.
- [23] REMANE, A., Einführung in die zoologische Ökologie der Nord- und Ostsee. In GRIMPE-WAGLER TNO 1a (1940); 1–238.
- [24] REMANE, A., Die Brackwassersubmergenz und die Umkomposition der Zönosen in Belt- und Ostsee. Kiel. Meeresforsch. 7 (1965); 59–73.
- [25] PETERSEN, C. G. J., Valuation of the sea II. The animal communities of the sea bottom and their importance for marine zoogeography. Rep. Danish Biol. Stat. 21 (1913).
- [26] PETERSEN, C. G. J. and BOYSEN JENSEN, P., Valuation of the sea I. Animal life on sea bottom, its food and quantity. Rep. Danish Biol. Stat. 25 (1911).

- [27] SCHULZ, B., Einführung in die Hydrographie der Nord- und Ostsee. In GRIMPE-WAGLER TNO 1d (1922); 45–88.
- [28] SCHULZ, S., Rückgang des Benthos in der Lübecker Bucht. Monatsberichte der DAdW zu Berlin 1968 (im Druck).
- [29] SCHULZ, S., Benthos und Sediment in der Mecklenburger Bucht. Beitr. Meereskunde 24/25 (1969) (im Druck).
- [30] SEGERSTRALE, S., Baltic Sea. Geol. Soc. Amerika 67 (1957); 751–800.
- [31] THORSON, G., Reproduction and larval development of Danish marine bottom invertebrates. Medd. Danm. Fiskeri Ser. Plankton 4 (1946); 1–523.
- [32] ZIEGELMEYER, E., Die Muscheln (Bivalvia) der deutschen Meeresgebiete. Helgol. wiss. Meeresunters. 6 (1957); 1–51.

Anschrift des Verfassers:

Dr. Sigurd Schulz Institut für Meereskunde, DDR 253 Warnemünde, Seestr. 15

Möglichkeiten zur polarographischen Bestimmung einiger Hauptkomponenten im Meerwasser

HANS BERGE und LUTZ BRÜGMANN

Zusammenfassung: Es wurden Methoden zur polarographischen Bestimmung von Natrium, Kalium, Magnesium und Calcium im Meerwasser entwickelt. Gute Ergebnisse konnten bei der direkten und indirekten Analyse des Natriums erzielt werden. Zur Indikation der Natriumkonzentration diente die Auswertung der ersten Uranstufe, die aus einem Natrium-Magnesium-Uranylacetatniederschlag nach dem Auflösen in Salzsäure gewonnen wurde. Magnesium- und Calciumstörungen ließen sich mit Äthylendiamintetraessigsäure (ÄDTE) ausschalten. Die direkte Kaliumbestimmung war weitgehend von einer quantitativen Ausfällung des Natriumüberschusses abhängig. Für eine schnelle Simultananalyse der beiden Erdalkalien erwiesen sich Verdrängungsreaktionen günstig. Die aus dem Cadmium-Äthylendiamintetraacetat-Komplex freigesetzte Cadmiummenge wurde in 1 m und 5 m Ammoniak polarographiert und ermöglichte so eine differenzierte Calcium- und Magnesiumbestimmung. Calcium konnte daneben auch direkt quantitativ erfaßt werden, wobei durch geringe Konzentration des Depolarisators, Zugabe von Alkohol und Benutzen der Rapidpolarographie eine fast völlige Eliminierung des üblichen Calciummaximums zu verzeichnen war. Es wird ein systematischer Analysengang zur polarographischen Bestimmung der vier Kationen vorgeschlagen.

1. Einleitung

Wie kaum ein anderes modernes elektrochemisches Analysenverfahren hat die Polarographie im Verlaufe der letzten Jahre Eingang in viele der Chemie verwandte Gebiete gefunden. Den Vorzügen einer schnellen und genauen Analysendurchführung, der Gewinnung von leicht zu übermittelnden und zu speichernden elektrischen Größen und der damit verbundenen Möglichkeit des Einsatzes zu automatischen Messungen verdankt sie es, auch für die chemische Erkundung des Meerwassers Bedeutung erlangt zu haben. Während zur Sauerstoffanalytik [1, 2, 3] und zur Spurenelementbestimmung (direkt [4, 5, 6, 7, 8] bzw. nach vorheriger Anreicherung durch nicht elektrochemische Verfahren [9, 10, 11, 12, 13, 14]) im Ozeanwasser bereits elektrochemische Methoden Anwendung fanden, sind Verfahren zur quantitativen Analyse von Hauptkomponenten auf der Grundlage der Polarographie bisher kaum in der Literatur publiziert worden. So weist lediglich O. A. OHLWELLER [15] auf eine Möglichkeit zur indirekten Sulfatbestimmung im Meerwasser hin. Dieses Verfahren setzte sich aber eben-

sowenig durch wie ein Versuch von A. A. RESNIKOW [16] zur Ermittlung des Natriumgehalts auf polarographischem Wege.

Meerwasser hat einen mittleren Salzgehalt (S) von 35‰ (g/kg). Zu den Hauptkomponenten zählt man alle Bestandteile, deren Konzentration größer als 1 mg pro kg Meerwasser ist. Für sie gilt die Regel von der Konstanz der Zusammensetzung des Meersalzes. Danach ist der Anteil jeder Hauptkomponente am Gesamtsalzgehalt unabhängig vom Ort der Probeentnahme nahezu konstant.

Die Zusammensetzung des Meerwassers veranschaulicht folgende Tabelle (SILLEN [17]):

TABELLE 1

Hauptkomponenten in mol/kg (mol/0,975 l) Meerwasser bei 35‰ S

Na ⁺	0,4680	Cl ⁻	0,5459
Mg ²⁺	0,0532	SO ₄ ²⁻	0,0282
Ca ²⁺	0,0103	HCO ₃ ⁻	0,0023
K ⁺	0,0099	Br ⁻	0,0008
Sr ²⁺	0,0001	F ⁻	0,0001

Bei der Durchführung von polarographischen Bestimmungen im Meerwasser entstehen schon allgemein auf Grund der Komplexizität der Zusammensetzung des Meersalzes Schwierigkeiten, die noch dadurch vergrößert werden, daß die direkte polarographische Bestimmung von Natrium, Kalium, Magnesium und Calcium problematisch ist. Die Halbstufenpotentiale dieser Elemente liegen bei sehr negativen Werten und außerdem noch dicht beieinander. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit, geeignete Leitelektrolyten zu finden und möglichst eine vorherige Abtrennung einzelner Ionen zu erreichen. Normalpolarographisch ist auch die direkte Kaliumanalyse neben einem etwa 50fachen Natriumüberschuß nicht möglich. Eine direkte Magnesiumbestimmung im wäßrigen Milieu ist schwierig, da das gebildete Magnesiumamalgam Wasser unter Wasserstoffentwicklung zersetzt. Man registriert unregelmäßige katalytische Wasserstoffstufen, die unspezifisch und nicht reproduzierbar sind. Eine Calciumstufe läßt sich bei Abwesenheit von Magnesium erhalten, jedoch mit einem ausgeprägten Maximum 1. Art, das durch übliche oberflächenaktive Stoffe nicht zu unterdrücken ist [18]. Über indirekte polarographische Methoden zur Bestimmung der vier genannten Ionen wird häufig in der Literatur berichtet, allerdings finden sich keine Angaben über ihre Anwendung auf Meerwasser. Die indirekte Natriumbestimmung wurde meist durch Ausfällung des Natriums in Form von Natrium-Zink-Uranylacetat und die nachfolgende Auswertung der Zink- oder Uranstufen durchgeführt [19]. Für Kalium hat sich unter anderem das Dipikrylaminatverfahren [20] durchgesetzt. Bekannt ist auch die indirekte Magnesiumbestimmung über die Oxinstufe [21].

Zur Calciumanalyse haben sich Verfahren bewährt, die mit Pikrolonsäure oder Chloranilsäure [22] als Fällungsreagenzien arbeiten. Außerdem wurden auch geeignete Komplexverdrängungsreaktionen verwendet, um diese schwer

bestimmbaren Erdalkalitionen einer polarographischen Analyse zugänglich zu machen [23, 24].

Die vorliegenden Untersuchungen verfolgen den Zweck, Möglichkeiten der Normalpolarographie für die Bestimmung der Hauptkomponenten Natrium, Kalium, Magnesium und Calcium im Meerwasser zu erkunden und damit die Aufmerksamkeit auf diesen bisher wenig bearbeiteten Anwendungsbereich der Polarographie zu lenken.

2. Experimenteller Teil

2.1 Meßanordnung und verwendete Lösungen

Die erforderlichen Voruntersuchungen wurden an einem Polarographen vom Typ PTS4 (Institut für Gerätebau der DAW, Berlin) durchgeführt. Zur Durchführung der Meßreihen diente später der ungarische Polarograph OH-102, der bessere Voraussetzungen zur Aufnahme von Rapidpolarogrammen besitzt. Durch Verwendung des Tropfzeitgebers TZG1 (Institut für Gerätebau der DAW, Berlin) konnte eine vom Potential unabhängige Tropfzeit eingehalten werden, wobei Tropfzeiten von $t = 0,2$ s eine Rapidpolarographie ermöglichten.

Neben der zum TZG1 gehörenden Doppelzelle (Bezugselektrode: Bodenquecksilber) kam eine modifizierte Kalousekzelle zur Anwendung (Bezugselektrode: Gesättigte Kalomelektrode, G.K.E.), die über eine Schleuse von 4 ml Inhalt zwischen Bezugs- und Arbeitselektrode verfügt. Entlüftet wurde durch Elektrolytwasserstoff, der vorher zur Entfernung von Sauerstoffspuren durch eine Röhre mit erhitztem Platinasbest-Kupferoxid geleitet wurde. Als Leitelektrolyten für die direkte Kalium- und Calcium-Bestimmung fanden Tetramethyl- und Tetraäthylammoniumhydroxid (TMAOH bzw. TÄAOH) Anwendung, zu deren Darstellung und Reinigung die Vorschrift von L. PERACCHIO [25] benutzt wurde.

Eine ammoniakalische 0,1 m Cadmium-ÄDTA-Stammlösung ließ sich durch Zusammengeben äquivalenter Mengen Cadmiumsalz und Komplexon II darstellen (vgl. [24]). Als Fällungsreagenz für Natrium diente eine äthanolhaltige Magnesium-Uranylacetatlösung nach E. KAHANE [26]. Zum Ansetzen der Stammlösungen für Natrium, Kalium, Magnesium und Calcium fanden ausschließlich Chemikalien des Reinheitsgrades „zur Analyse“ Anwendung. Eine Standardisierung der Erdalkalilösungen wurde durch Titration mit Komplexon III vorgenommen. In allen Fällen kam doppeltdestilliertes kohlendioxidfreies Wasser zur Anwendung. Um hohe Erdalkalibindwerte zu vermeiden, wurde zur Darstellung der konzentrierten Ammoniaklösung NH₃ aus Stahlflaschen in Wasser eingeleitet. Zur Bereitung von künstlichem Meerwasser diente die Vorschrift nach LYMAN und FLEMING [27]. Als natürliche Meerwasserprobe fand Südatlantikwasser mit einem Chloridgehalt nach MOHR-KNUDSEN [28] von Cl = 19,95‰ Verwendung. Alle Stammlösungen und Reagenzien wurden in Polyäthylenflaschen aufbewahrt.

2.2 Alkalisumme

Zur direkten Bestimmung der Alkalisumme wurden die den Grenzstrom beeinträchtigenden Erdalkalitionen durch Zugabe von ÄDTE maskiert. Als Leitelektrolyt diente 0,1 m Tetraäthylammoniumjodid. Das Polarogramm wurde von $-1,6$ bis -2 V registriert (alle Werte ohne nähere Bezugsangaben wurden gegen Bodenquecksilber gemessen).

Die Alkalireduktionsstufe war gut ausgebildet und erschien mit störungsfreiem Diffusionsstrom. Als Probelösungen dienten Standardlösungen sowie künstliches und natürliches Meerwasser. Im Bereich von $9 \cdot 10^{-4}$ – $8 \cdot 10^{-3}$ m wurde in jedem Falle eine lineare Abhängigkeit der Stufenhöhe von der Alkalikonzentration festgestellt. Der Anstieg der Eichgeraden unter Verwendung von Natrium- und Kaliumstandardlösungen in destilliertem Wasser verlief jedoch steiler als der einer Eichgeraden für Meerwasser.

2.3 Kalium und Calcium

Zur polarographischen Direktbestimmung von Kalium und Calcium im Meerwasser war es notwendig, den großen Natriumüberschuß vorher zu entfernen, um den Kaliumwert getrennt zu erhalten und zu vermeiden, daß die Calciumstufe im Diffusionsstrom der Alkalireduktion untergeht. Natrium wurde dazu als Natrium-Magnesium-Uranylacetat ($\text{NaCH}_3\text{COO} \cdot \text{Mg}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 3 \text{UO}_2 - (\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$) gefällt. Da außerdem die Halbstufenpotentiale des Kaliums und Calciums eng zusammenliegen ($E_{1/2\text{Ca}} = -2,26$ V, $E_{1/2\text{K}} = -2,17$ V, vgl. [29]), wurde eine Differenzbestimmung durchgeführt, d. h. einmal die Kalium-Calcium-Summe und nach ÄDTE-Zugabe der Kaliumwerte einzeln

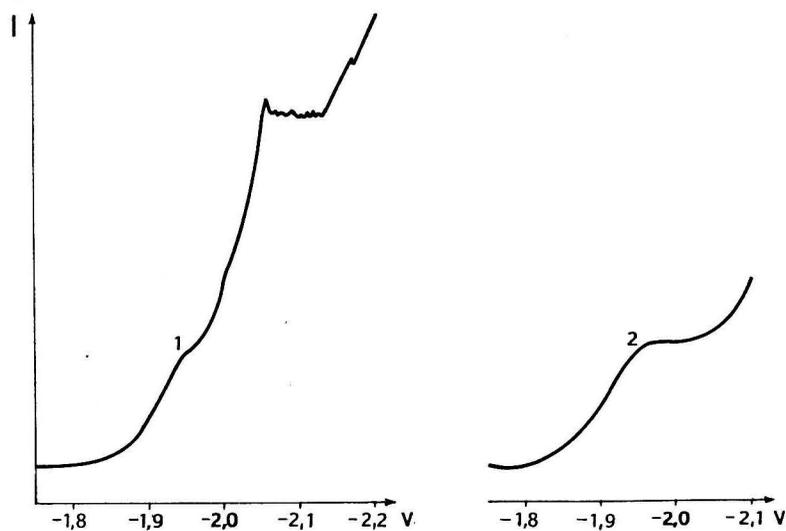


Abb. 1. Direkte Kalium-Calciumbestimmung ohne (1) und mit (2) ÄDTE

unter Berücksichtigung des Volumenfehlers ermittelt. Durch Zugabe von TMAOH zum Filtrat der Natriumfällung konnten $(\text{UO}_2)^{2+}$ als Diuranat und Mg^{2+} als Magnesiumhydroxid gefällt werden. Gleichzeitig war damit das Problem eines Leitelektrolyten im stark negativen Bereich gelöst. Durch das ÄDTE wurde die Doppelstufe der Kalium-Calcium-Reduktion auf eine Kaliumstufe mit gut auswertbarem Grenzstrom reduziert (Abb. 1). Durch den Alkohol aus dem Fällungsreagenz ergab sich im verwendeten Calciumkonzentrationsbereich ($\sim 1 \cdot 10^{-4}$ m) bei der Aufzeichnung von Rapidpolarogrammen eine fast völlige Eliminierung des Calciummaximums.

2.4 Natrium

Das bei der direkten Kalium-Calcium-Analyse ausgefällte Natrium-Magnesium-Uranylacetat wurde zur indirekten Natriumbestimmung ausgenutzt. Nach dem Auflösen des Niederschlags in 0,1 m Salzsäure ergaben sich bei der Aufnahme des Polarogramms zwei Uranstufen, deren Halbstufenpotentiale bei $-0,46$ und $-1,12$ V lagen. Die erste Stufe wurde auf Grund ihrer gut auswertbaren Form zur indirekten Natriumbestimmung herangezogen. Die Eichreihen lagen im Natriumkonzentrationsbereich von $4 \cdot 10^{-4}$ bis $2 \cdot 10^{-3}$ m. Bei genauer Einhaltung der Fällungsbedingungen ist eine gute Linearität zwischen Stufenhöhe und Konzentration vorhanden. Bei höheren Natriumwerten verflachte der Anstieg der Geraden, wobei die Abweichung von der Linearität bei Verwendung von Natriumstandardlösungen geringer war als bei Meerwasser (Abb. 2).

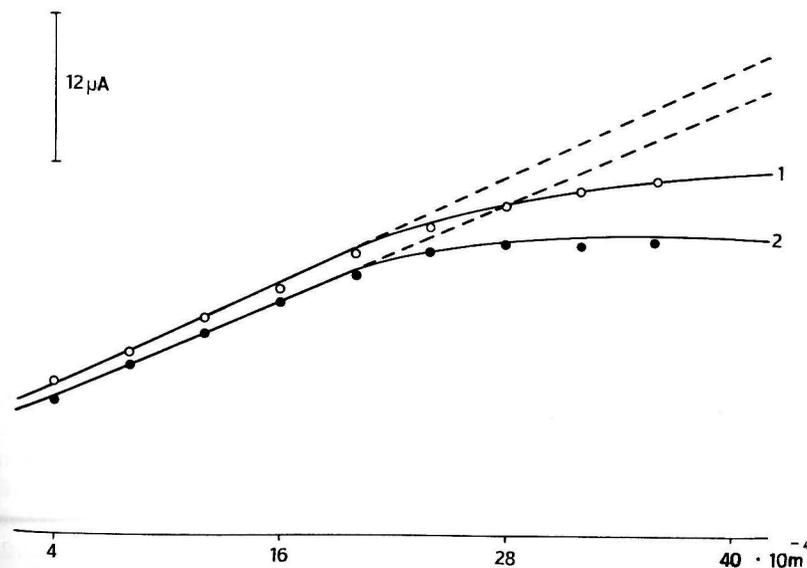
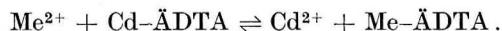


Abb. 2. Eichgeraden der indirekten Natriumanalyse unter Verwendung von Natriumstandardlösungen (1) und Meerwasser (2)

2.5 *Magnesium und Calcium*

Die indirekte Bestimmung verschiedener Metallionen unter Verwendung von Komplexverdrängungsreaktionen beruht auf folgendem Austausch:



Die Instabilitätskonstanten der Komplexe von Erdalkalien mit ÄDTA sind jedoch verhältnismäßig groß, so daß sich auf dem obigen Wege keine unmittelbaren Verdrängungsreaktionen durchführen lassen. Wenn man jedoch mit einem Hilfskomplexbildner, in diesem Falle Ammoniak, arbeitet, mit dem das zu verdrängende Cd^{2+} ebenfalls eine Komplexverbindung eingeht, $[\text{Cd}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$, läßt sich ein Austausch erzwingen. Bedingung für eine polarographische Ausnutzung dieser Reaktion ist natürlich, daß das Cadmium im Aminkomplex im Gegensatz zum Cadmium im ÄDTA-Komplex unter üblichen Potentialverhältnissen eine polarographische Reduktionsstufe zeigt. Durch Variation der Ammoniakkonzentration gelang ein stufenweiser Austausch der beiden Erdalkalien. Calcium wurde in 1 m Ammoniak bestimmt, während in 5 m NH_3 die Summe der Erdalkalien zu erhalten war. Als Probenlösungen dienten $1 \cdot 10^{-4}$ bis $8 \cdot 10^{-4}$ m Magnesium- bzw. $4 \cdot 10^{-5}$ – $2 \cdot 10^{-4}$ m Calciumstandardlösungen sowie Meerwasser. Der Cadmium-ÄDTA-Komplex lag in den Meßlösungen jeweils $2 \cdot 10^{-2}$ m vor. Es konnte eine gute Konzentrationsabhängigkeit der Stufenhöhen festgestellt werden.

2.6 *Systematische Analyse der vier Kationen (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} und Ca^{2+})*

Der folgende Analysenweg erwies sich als günstige Variante zur systematischen Bestimmung der vier Kationen im Meerwasser:

Verwendete Lösungen:

0,9 m TMAOH (vgl. [25])

Magnesium-Uranylacetatreagenz nach E. KAHANE [26]

$3 \cdot 10^{-3}$ m ÄDTE in $1 \cdot 10^{-2}$ m TMAOH

0,1 m Cadmium-ÄDTA-Lösung

2 m KNO_3

0,1 m HCl

konz. Ammoniak ($\sim 14,76$ m)

Äthanol (95%ig)

Mg *Versuchsdurchführung:* 10 ml Meerwasser (28 bis 38% S) werden auf ca. 25 ml verdünnt und mit 1 ml TMAOH versetzt. Nach 10 Minuten filtriert man das ausgefallene Magnesiumhydroxid ab. Der Niederschlag wird mit wenig H_2O gewaschen und in 10 ml Salzsäure gelöst. Nach Zugabe von 25 ml Cadmium-ÄDTA-Lösung, 32,5 ml NH_3 und 25 ml KNO_3 wird auf 100 ml aufgefüllt und zur Bestimmung des Magnesiums die Strom-Spannungskurve im Bereich von $-0,6$ bis $-1,1$ V registriert.

- Na** Das Filtrat der Magnesiumhydroxidfällung wird zu 50 ml verdünnt. Davon nimmt man 2 ml ab und versetzt mit 20 ml Magnesium-Uranylacetatlösung. Es wird eine Minute intensiv gerührt und der Niederschlag nach einer Stunde über eine Fritte abgesaugt. Das Nachwaschen geschieht mit 1 ml Fällungsreagenz und mit zwei Portionen von je 1 ml Alkohol. Der Niederschlag wird in 10 ml HCl gelöst und die Fritte zweimal mit je 5 ml Salzsäure durchgespült. Man füllt mit HCl zu 25 ml auf und verdünnt anschließend weiter mit Salzsäure im Verhältnis 1:5. Zur Bestimmung des Natriums wird nach dem Entlüften der Probe das Polarogramm im Potentialbereich von $-0,25$ bis $-0,7$ V aufgenommen.
- K+Ca** Das Filtrat der Natriumfällung wird mit 25 ml TMAOH versetzt und auf 50 ml aufgefüllt. Nach kräftigem Schütteln saugt man den Magnesiumhydroxid- und den Diuranatniederschlag ab. Ein Teil der Lösung wird direkt in die Zelle gebracht und zur Bestimmung der Summe des Kaliums und Calciums nach der notwendigen Entlüftungszeit im Bereich von $-1,75$ bis $-2,25$ V polarographiert.
- K** 20 ml der von Magnesium und Uran befreiten Lösung werden mit 5 ml ÄDTE-Lösung versetzt und im gleichen Potentialbereich wie oben wird die Kaliumreduktionsstufe registriert.

3. Versuchsergebnisse und Diskussion

Eine Übersicht über jeweils vier durch Einzelverfahren erzielte Ergebnisse einer Meerwasseranalyse enthält Tab. 2. Für Natrium wurden dabei Werte aus dem indirekten Verfahren über die Uranstufe herangezogen. Die Kaliumresultate entstammen der direkten Analyse und die Calcium- und Magnesiumangaben der indirekten Bestimmung unter Verwendung von Verdrängungsreaktionen. Vergleichswerte für Magnesium und Calcium konnten durch Titration der Meerwasserprobe mit ÄDTA nach PATE und ROBINSON [30] gewonnen werden.

Aus Tab. 2 ist ersichtlich, daß bei den polarographischen Methoden größere Abweichungen als bei der komplexometrischen Bestimmung auftreten. Man muß dazu allerdings in Betracht ziehen, daß normalpolarographische quantitative Analysen schon rein apparativ und methodisch bedingt mit einem Fehler in der Größenordnung von $\pm 0,5$ bis $\pm 1,0\%$ belastet sind.

Der Vorteil der polarographischen Analyse für Calcium und Magnesium liegt im geringen Zeitbedarf, der besonders bei Serienanalysen ins Gewicht fällt. Wenn man auf eine Entlüftung verzichtet und durch Anwendung der Rapidpolarographie das Polarogramm schnell registriert, dauert eine Einzelmessung ca. 3 min. Hierin sind bereits Einfüll- und Ablaufzeit sowie eine kurze Stabilisierungsperiode des Abklopfsystems und des polarographischen Verstärkerkreises enthalten.

Gute Ergebnisse lieferte die Bestimmung der Alkalisumme, die unkompliziert und schnell durchführbar ist. Die Resultate wichen höchstens um $\pm 1\%$ vom

TABELLE 2

Übersicht der Analysenwerte für Na, K, Mg und Ca aus Einzelanalysen

	Aus dem Salzgehalt berechnete Menge (mol/l)	polarographisch bestimmte Werte		volumetrisch bestimmte Werte	
		gefunden (mol/l)	rel. Fehler (%)	gefunden (mol/l)	rel. Fehler (%)
Na	$4,84 \cdot 10^{-1}$	$4,88 \cdot 10^{-1}$	+0,8		
		$4,83 \cdot 10^{-1}$	-0,2		
		$4,90 \cdot 10^{-1}$	+1,2		
		$4,85 \cdot 10^{-1}$	+0,2		
K	$1,056 \cdot 10^{-2}$	$1,032 \cdot 10^{-2}$	-2,3		
		$1,028 \cdot 10^{-2}$	-2,7		
		$1,044 \cdot 10^{-2}$	-1,1		
		$1,030 \cdot 10^{-2}$	-2,5		
Mg	$5,633 \cdot 10^{-2}$	$5,705 \cdot 10^{-2}$	+1,3	$5,626 \cdot 10^{-2}$	-0,1
		$5,711 \cdot 10^{-2}$	+1,4	$5,619 \cdot 10^{-2}$	-0,2
		$5,664 \cdot 10^{-2}$	+0,6	$5,622 \cdot 10^{-2}$	-0,2
		$5,700 \cdot 10^{-2}$	+1,2	$5,630 \cdot 10^{-2}$	-0,1
Ca	$1,098 \cdot 10^{-2}$	$1,098 \cdot 10^{-2}$	± 0	$1,088 \cdot 10^{-2}$	-0,9
		$1,094 \cdot 10^{-2}$	-0,4	$1,086 \cdot 10^{-2}$	-1,1
		$1,087 \cdot 10^{-2}$	-1,1	$1,093 \cdot 10^{-2}$	-0,5
		$1,102 \cdot 10^{-2}$	+0,4	$1,093 \cdot 10^{-2}$	-0,5

berechneten Wert ab. Bei einer Einschätzung der Alkalibestimmung muß man jedoch auch davon ausgehen, daß die Meereschemie weniger an Aussagen über die Gesamtalkalimenge als über das Verhältnis der Alkalien untereinander interessiert ist.

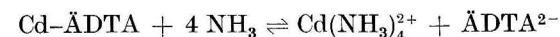
Die relativen Fehler der indirekten Natriumanalyse lagen etwa in der Größenordnung gravimetrischer Bestimmungen und hielten sich bei mehr als 6 Messungen im Bereich von $\pm 1,5\%$. In diesem Falle könnte die Polarographie neben der Flammenphotometrie in der Meerwasserchemie an Bedeutung gewinnen.

Die direkte Kalium- und Calciumbestimmung sowie die Magnesiumanalyse unter vorheriger Ausfällung des Magnesiumhydroxids haben im Rahmen des systematischen Analysenganges vor allem methodische Bedeutung. Der Kaliumgehalt läßt sich nur unter Einhaltung einer genau reproduzierbaren Natriumausfällung mit befriedigender Genauigkeit bestimmen. Der Calciumwert wird in ähnlicher Weise beeinflusst. Um eine Calciumcarbonat-Mitfällung bei der Abtrennung des Magnesiumhydroxids zu vermeiden, müssen unter Ausschluß von Kohlendioxid dargestellte quartäre Ammoniumbasen verwendet werden. Ausfällung durch käufliches Ätznatron (Reinheitsgrad „zur Analyse“) rief trotz genauer pH-Einhaltung starke Magnesium- und Calciumschwankungen hervor. Nach Einarbeitung und unter Berücksichtigung der wichtigsten Fehlerquellen betrug der relative Fehler in 8 Meßreihen bei den Kalium- und Calciumwerten

maximal $\pm 2,5\%$, während die Abweichungen der Magnesiumwerte in den Grenzen von $\pm 2\%$ lagen.

In allen Fällen erwies es sich als notwendig, Eichkurven mit Meerwasser aufzustellen, da bei gleicher Konzentration des zu bestimmenden Elementes im Meerwasser und in Standardlösungen ein unterschiedlicher Anstieg der Eichgeraden festzustellen war (Salzeffekt). Eichzusatzverfahren, bei denen die Probe zuerst allein und anschließend zusammen mit einer in die Probelösung gegebenen bekannten Stoffmenge polarographiert wird, sind aus diesem Grunde nicht zu empfehlen.

Eine genaue Blindwertermittlung ist ebenfalls wichtig, da leicht ein Verfälschen der Analysenwerte auftreten kann. Besonders problematisch ist dies bei der indirekten Magnesium- und Calciumbestimmung, wo unter bestimmten Bedingungen beträchtliche Blindwerte zu beobachten sind. Der Gesamtblindwert setzt sich bei diesem Verfahren aus zwei Anteilen zusammen. Der eine Anteil entsteht durch Verunreinigungen der Reagenzien und durch Ionen, die aus dem Glas der Meßgefäße herausgelöst werden. Während dieser Wert in gewissen Grenzen einflußbar ist, läßt sich der zweite Anteil unter den gegebenen Konzentrationsverhältnissen nicht unterdrücken. Dieser Blindwert ist allein auf das Austauschgleichgewicht



zurückzuführen. Unter Berücksichtigung der Komplexbildungskonstanten für den Cadmium-ÄDTA- und den Cadmiumaminkomplex sowie der Cadmium-ÄDTA- und der Ammoniakkonzentration läßt sich für die Calciumbestimmung in 1 m NH_3 ein Blindwert von 7% der Gesamtstufenhöhe berechnen, wenn $4 \cdot 10^{-5}$ m Calcium vorgelegt wurden. Bei der Magnesiumbestimmung in 5 m Ammoniak wurde sogar ein Blindwertanteil von 43%, bezogen auf den Gesamtmeßwert, beobachtet, wenn eine 10^{-4} m Magnesiumlösung verwendet wurde.

Abschließend sei besonders hervorgehoben, daß bei der Rapidpolarographie keine Stromoszillationen auftreten, wodurch die Auswertung der polarographischen Stufen in allen Fällen erleichtert wurde. Außerdem konnte ein Verfälschen der Polarogramme durch dämpfungsfreies Arbeiten vermieden und die Analysenzeit beträchtlich verkürzt werden.

4. Literaturverzeichnis

- [1] Соловьев, Л. Г., Прибор для определения содержания кислорода в морской воде. Океанология 4 (1964) S. 149—155.
- [2] GRASSHOFF, K., Untersuchungen über die Sauerstoffbestimmung im Meerwasser, III. Teil. Kieler Meeresf. 19 (1963), S. 8—15.
- [3] MEYLING, A. H. und FRANK, G. H., A portable polarograph for the rapid determination of dissolved oxygen. Analyst 87 (1962), S. 684—686.
- [4] CHOW, D. T. W. und ROBINSON, R. J., Polarographic determination of nitrate in seawater. J. Marine Res. 12 (1953) S. 1—12.
- [5] WHITNACK, G. C., Applications of cathode-ray polarography in the field of oceanography. J. Electroanal. Chem. 2 (1961) S. 110—115.

- [6] Брайна, Х. З., Сопожникова, Э. Я., Концентрирование веществ в полярографическом анализе. Сообщение 9. Определение ионов иода. Ж. анал. хим. **21** (1966) С. 1342—1347.
- [7] МАССН, G., The determination of zinc in sea-water by anodic stripping voltammetry using ordinary capillary electrodes. J. Electroanal. Chem. **9** (1965) S. 290—298.
- [8] АРТЕЛ, M. und EISNER, U., Trace analysis by anodic stripping voltammetry. I. Trace metals in dead sea brine. I. Zinc and cadmium. J. Electroanal. Chem. **5** (1963) S. 362 bis 374.
- [9] MILNER, G. W. C., WILSON, J. D., BARNETT, G. A. und SMALES, A. A., The determination of uranium in sea water by pulse polarography. J. Electroanal. Chem. **2** (1961) S. 25—38.
- [10] Тихонов, М. К., Жаворонкина, В. К., Полярографический метод определения меди в морской воде. Труд. Морск. Гидрофиз. Инст., АН СССР **19** (1960) С. 31—37.
- [11] Тихонов, М. К., Шалимов, Г. А., К методике определения никеля и марганца в океанской воде полярографическим методом. Гидрофиз. и Гидрохим. Исслед., АН СССР (1965) С. 133—138.
- [12] ISHIBASHI, M., FUJINAGA, T., IZUTSU, K., YAMAMOTO, T. und TAMURA, H., Determination of uranium in sea-water using a polarographic method. Records Oceanogr. Works Japan **6** (1961) S. 106—111.
- [13] НЕЧТ, F., KORKISCH, J., PATZAK, R. und THIARD, A., Zur Bestimmung kleinster Uranmengen in Gesteinen und natürlichen Wässern. Mikrochim. Acta (1956) S. 1283 bis 1309.
- [14] KORKISCH, J., THIARD, A. und НЕЧТ, F., Schnellbestimmung des Urans in Meer- und Flußwässern. Mikrochim. Acta (1956) S. 1422—1430.
- [15] OHLWEILER, O. A., Determination polarographique indirecte de sulfate. Anal. Chim. Acta **9** (1953) S. 476—488. Determination polarographique indirecte des sulfates. II Application a l'analyse des eaux. Anal. Chim. Acta **11** (1954) S. 590—593.
- [16] Резников, А. А., Старик-Смагина, А. С., Труды Всесоюзной конференции по аналитической химии, т. II, изд. АН СССР, 1943, стр. 559.
- [17] SILLEN, G. S., How have sea water and air got their present composition? Chem. in Brit. **3** (1967) S. 291—297.
- [18] ZLOTOWSKI, I. und KOLTHOFF, I. M., Polarographic behavior of alkaline earth metals. II. The polarigraphic determination of calcium alone and in the presence of other alkaline earth metals. J. phys. Chem. **49** (1945) S. 386—405.
- [19] АВРЕШ, К., Eine neue elektroanalytische Methode der Alkalibestimmung. Angew. Chem. **48** (1935) S. 683—685.
- [20] MONNIER, D. und BESSO, Z., Dosage polarographique indirect de l'ion potassium. Anal. Chim. Acta **7** (1952) S. 380—384.
- [21] STONE, K. G. und FURMANN, N. H., zit. n. KOLTHOFF, I. M. und LINGANE, J. J., Polarography, Interscience Publishers, New York—London, 1952, Vol. II, S. 431.
- [22] BREYER, B. und MCPHILLIPS, J., The indirect polarographic determination of calcium by chloranilic acid. Analyst **78** (1953) S. 666—669.
- [23] BERGE, H. und DRESCHER, A., Indirekte inversvoltametrische Bestimmung von Elementen unter Anwendung von Verdrängungsreaktionen. Z. anal. Chem. **231** (1967) S. 11—17.
- [24] HAGIWARA, K., Square-wave polarographic determination of traces of metals by using chelate-substitution reaction. I. Determination of calcium in the presence of other alkaline earth elements. Rev. of Polarog. (Japan) **13** (1966) S. 78—83. II. Determination of magnesium in the presence of calcium and strontium. ebenda, S. 84—89. III. Determination of strontium in the presence of calcium and magnesium. ebenda, S. 127—131.
- [25] FERACCHIO, E. S. und MELOCHE, V. W., Effects of solvents on polarographic wave heights. J. Am. Chem. Soc. **60** (1938) S. 1770—1775.

- [26] КАНАНЕ, E., Recherche du sodium sous forme d'acetate triple d'uranyle, de magnesium et de sodium. Bl. (4) **53** (1933) S. 555—563.
- [27] LYMAN, J. und FLEMING, R. H., zit. n. RILEY, J. P. und SKIRROW, G., Chemical Oceanography, Academic Press, London—New York, 1965, Vol. I. S. 648.
- [28] KNUDSEN, M., FORCH, C. und SÖRENSEN, S. P. L., Bericht über die chemische und physikalische Untersuchung des Seewassers und die Aufstellung der neuen Hydrographischen Tafeln. Wiss. Meeresunters. Kiel. N.F. **6** (1902) S. 1—62.
- [29] HEYROVSKY, J. und ZUMAN, P., Einführung in die praktische Polarographie, Berlin, 1959, S. 178.
- [30] ПАТЭ, J. B. und ROBINSON, R. J., The (ethylenedinitrilo)-tetraacetate titration of calcium and magnesium in ocean waters. I. Determination of calcium. J. Marine Res. **17** (1958) S. 390—402. II. Determination of magnesium. J. Marine Res. **19** (1961) S. 12—20.

Abschluß der Arbeit: 14. 11. 1968

Anschriften der Verfasser:

Prof. Dr. H. BERGE, Sektion Chemie der Universität Rostock; Dipl.-Chem. L. BRÜGMANN, Institut für Meereskunde der DAW, Rostock-Warnemünde, Seestr. 15

Der Durchflußkoeffizient bei Rohrpegelanlagen¹⁾

WOLFGANG MATTHÄUS

Zusammenfassung: In der vorliegenden Arbeit werden die Ergebnisse experimenteller Untersuchungen der Durchflußkoeffizienten von Rohrpegelanlagen mitgeteilt. Die bisher kaum untersuchten Durchflußkoeffizienten werden an Hand eines Rohrpegelmodells ermittelt, bei dessen Konstruktion besonderer Wert auf eine weitgehende Nachbildung der in der Praxis gebräuchlichen Anlagen gelegt wurde. Es besteht aus dem eigentlichen Pegelrohr, den Durchflußrohren und dem Ausflußbehälter. Der Ausflußbehälter ist so ausgelegt, daß für das Modell ein konstanter Außenwasserstand simuliert werden kann. Mit Hilfe von insgesamt 30 verschiedenen Durchflußtuben und 3 Pegelrohreinbauten in Trichterform mit Öffnungswinkeln von 60° , 90° und 120° wird der Durchflußkoeffizient μ in Abhängigkeit von der Tubuslänge l_t , dem Tubusdurchmesser d_t , dem Wasserstand z im Pegelrohr gegenüber konstantem Außenniveau, der Bodenneigung α im Pegelrohr und einer Strahlführung α_t direkt am Durchflußtubus untersucht.

Die Einflüsse der Temperatur und der Fertigungstoleranzen werden an Beispielen behandelt und eine Abschätzung der aus konstruktiven Gründen zu erwartenden Fehler vorgenommen. Die aus insgesamt etwa 12000 Einzelmessungen resultierenden Ergebnisse der Untersuchungen werden in Diagrammform mitgeteilt, wobei die Kurvenscharen durch Polynome höheren Grades, oder wo diese Methode versagte, visuell ausgeglichen worden sind.

Die Zusammenhänge zwischen Tubuslänge, Tubusdurchmesser und Durchflußkoeffizient werden betrachtet und eine Formel angegeben, mit der die Durchflußkoeffizienten für Tubuslängen zwischen 2 und 30 cm und Tubusdurchmesser zwischen 0,3 und 2,7 cm bei einer Bodenneigung $\alpha = 90^\circ$ und Wasserstandsunterschieden von 10 bis 90 cm zwischen Pegelrohr und Außenniveau für das untersuchte Rohrpegelmodell abgeschätzt werden können. Die Abhängigkeit des Durchflußkoeffizienten von der Bodenneigung α im Pegelrohr und einer Strahlführung α_t am Tubus wird an Hand von sieben verschiedenen Anordnungen für je drei Tubusdurchmesser bestimmt.

Es werden die Extrema der Durchflußgeschwindigkeit und der REYNOLDS-Zahl für das Pegelrohr und verschiedene Durchflußtuben aus dem Durchflußkoeffizienten, der kinematischen Viskosität und den Dimensionen von Tubus und Pegelrohr berechnet und mit der kritischen REYNOLDS-Zahl verglichen. Abschließend wird die Wechselbeziehung zwischen Durchflußkoeffizient und Dämpfungsverhältnis erläutert, und aus den Untersuchungen werden Schlußfolgerungen für die Errichtung von Rohrpegelanlagen gezogen.

¹⁾ Gekürzte Fassung einer Dissertationsarbeit zur Erlangung des Grades eines Doktors der Naturwissenschaften an der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald.

1. Symbole, Bezeichnungen und Einheiten

a_0, a_1, a_2, a_3	Koeffizienten eines Polynoms
d_s	Durchmesser des Pegelrohres [cm]
d_t	Durchmesser des Verbindungsrohres Gewässer-Pegelrohr (Durchflußtubus) [cm]
f	Querschnitt des Durchflußtubus [cm ²]
F	Querschnitt des Pegelrohres [cm ²]
F_1, F_2, F_3	Gefäßquerschnitte [cm ²]
g	Erdbeschleunigung [cm s ⁻²]
$k = \mu \lambda \sqrt{2g}$	Dämpfungskoeffizient [cm ^{1/2} s ⁻¹]
l_t	Länge des Durchflußtubus [cm]
l_α	Länge des angeschrägten Tubusteiles [cm]
M	Lage der unteren Tubusöffnung unter konstantem Außenwasserspiegel [cm]
Q	Ausflußmenge [cm ³ s ⁻¹]
r	Korrelationskoeffizient [1]
Re_{krit}	kritische REYNOLDS-Zahl, bis zu der der laminare Strömungszustand stabil ist
Re_s	REYNOLDS-Zahl im Pegelrohr
Re_t	REYNOLDS-Zahl im Durchflußtubus
t	Zeit [s]
t_{real}	wirkliche Durchflußzeit [s]
v	Strömungsgeschwindigkeit des Wassers im Durchflußtubus [cm s ⁻¹]
zw	Strömungsgeschwindigkeit des Wassers im Pegelrohr [cm s ⁻¹] Wasserhöhe im Pegelrohr über ungestörtem Außenwasserstand [cm]
z_1, z_2	Wasserstandsunterschiede zwischen den Gefäßen mit den Querschnitten F_1 und F_3 bzw. zwischen Pegelrohr und Gewässer [cm]
z^*	Wasserhöhe im Pegelrohr über ungestörtem Außenwasserstand bei Re_{krit} [cm]
α	Neigung des Pegelrohrbodens gegen die Vertikale [°]
α_t	Strahlführung am Tubus, gegeben durch den Winkel gegen die Vertikale [°]
ϑ	Temperatur [°C]
ϑ_w	Wassertemperatur [°C]
$\lambda = f/F$	Dämpfungsverhältnis [1]
λ^*	Dämpfungsverhältnis bei Re_{krit} [1]
μ	Durchflußkoeffizient [1]
μ^*	Durchflußkoeffizient bei Re_{krit} [1]
μ_1	Geschwindigkeitskoeffizient [1]
μ_2	Kontraktionskoeffizient [1]

μ_z	Durchflußkoeffizient bei einer Wasserstandsunterschied z zwischen Pegelrohr und Gewässer [1]
ν	kinematische Viskosität des Wassers [cm ² s ⁻¹]
ρ_w	Dichte des Wassers [g cm ⁻³]
τ	Zeit bis zur völligen Ausspiegelung bei konstantem Außenwasserstand [s]

2. Einführung

Die Beobachtung und Registrierung des Wasserstandes ist eine Grundforderung für die Errichtung von Bauwerken aller Art in unmittelbarer Nähe von Binnengewässern, an Meeresküsten und im offenen Meer. Sie liefert die Grundlage für alle wasserwirtschaftlichen Maßnahmen und ist auch auf solche Gebiete auszudehnen, die in gewässerkundlicher, wasserwirtschaftlicher und ozeanographischer Hinsicht zunächst nicht von Interesse zu sein scheinen.

Für die Registriergeräte werden verschiedene Wasserstandsgeber verwendet. Seit der Erfindung des Registrierpegels im Jahre 1831 durch den britischen Ingenieur PALMER [30] stellt jedoch der Schwimmer den weitaus am häufigsten verwendeten Indikator für den Wasserstand dar. Selbst zahlreiche moderne Fernpegelsysteme arbeiten mit einem Schwimmer. Um eine Beeinträchtigung der Registrierungen durch Wind, Strömung und Treibzeug sowie durch kurzperiodische Wellen zu vermeiden, ist der Schwimmer in einem Pegelschacht untergebracht, der durch ein Verbindungsrohr, den sogenannten Durchflußtubus, mit dem freien Gewässer kommuniziert.

Mit der Arbeitsweise und den Eigenschaften von Registrierpegelanlagen sowie mit dem Einfluß von Wasserstandsstörungen auf Registrierpegel hat sich eine Reihe von Autoren beschäftigt. DOBKROKLOSKI [10] untersuchte in Theorie und Experiment die Registrierung periodischer Wasserstandsstörungen durch einen Pegel. SAGER [38] bezog in seine theoretischen Untersuchungen auch nicht-periodische Störungen ein und führte umfangreiche numerische Berechnungen zur Bestimmung des Einflusses periodischer Wasserstandsstörungen auf Registrierpegel unter Anwendung der RUNGE-KUTTA-Methode durch [40]. Später wandte SHIPLEY [45] dieses Verfahren zur Interpretation von Aufzeichnungen langer Wellen mit Pegeln an. Mit der Errichtung von Pegelanlagen, darunter auch Registrierpegel verschiedener Bauart, beschäftigte sich MODEL [28] in einer ausführlichen Arbeit. Im Institut für Wasserbau der Polnischen Akademie der Wissenschaften in Gdansk untersuchten BOCZAR-KARAKIEWICZ, KARWOWSKI und KWIDZIŃSKA-BENDYKOWSKA [7, 20] im Modell den Einfluß der Verbindungsöffnung Pegelschacht — Gewässer. Eingehend befaßte sich auch BONDARENKO [8, 9] mit der Frage der Registrierung von Wasserstandsschwankungen. HIKOSAKA [16] zeigte an Hand von Registrierstreifen die Bedeutung der Eigenperiode der Pegelanlage für die Registrierungen. Schließlich griffen SAGER und Mitarbeiter [41, 42] das Problem abermals auf und führten die 1961 begonnenen Untersuchungen wesentlich weiter.

Zur Interpretation des Durchflußverhaltens kann der Durchflußkoeffizient μ des Verbindungsrohres zwischen Pegelschacht und freiem Gewässer herangezogen werden. Der Bewegungsablauf im System Schacht — Tubus — Gewässer unterliegt hydraulischen Gesetzen, wobei der Durchflußkoeffizient die hydraulischen Verluste beim Strömen des Wassers durch den Tubus erfassen soll. Form, Durchmesser, Länge und Rauigkeit des Tubus, aber auch Temperatur und Dichte des Wassers beeinflussen seine Größe, die zwischen 1 bei idealen Durchflußbedingungen und 0 bei geschlossenem Tubus liegt.

Zur Dimensionierung von Pegelanlagen nahm BALAY [6] einen Wert von $\mu = 0,6$ an. WOLFZUN [50] rechnete bei Binnenpegeln mit einem Wert von $\mu = 0,5$ und gab als extreme Beispiele für eine Länge des Verbindungsrohres von 3 m und 5 cm Durchmesser $\mu = 0,47$ und für 1 m Länge und 20 cm Durchmesser $\mu = 0,76$ an. Heute verwendet man bei Untersuchungen zum Einfluß von Wasserstandsstörungen auf Registrierpegel einen Wert von $\mu = 0,6$ [7, 20, 40, 41, 42]. Diese Werte beruhen aber nur auf Einzelmessungen oder gehen auf die zahlreichen Experimente bei Ausfluß von Wasser in Luft durch dünnwandige Öffnungen zurück.

Das Ausflußproblem, einer der Ausgangspunkte der Hydrodynamik, bildet die Grundlage für die Untersuchungen des Durchflußkoeffizienten. Schon die Schüler GALILEIS, CASTELI und TORRICELLI, haben sich mit Versuchen zum Ausfluß des Wassers aus Gefäßen beschäftigt. Letzterer stellte in seiner Schrift „Del moto dei gravi“ (Firenze 1644) fest, daß die Geschwindigkeit des aus einer Bodenöffnung ausfließenden Wassers proportional der Quadratwurzel der entsprechenden Wasserhöhe ist. Die unter dem Namen TORRICELLISCHES Theorem bekannte Gleichung

$$v = \sqrt{2gz} \quad (1)$$

geht aber auf JOHANN BERNOULLI und dessen Sohn DANIEL zurück. Der Theorie freier Flüssigkeitsstrahlen hat sich erstmalig HELMHOLTZ [15] gewidmet, der in seiner Arbeit den speziellen Fall des Ausflusses aus einer kreisförmigen Öffnung in einer ebenen Wand behandelt. Später haben KIRCHHOFF [18] und PLANCK [31] die Ideen von HELMHOLTZ weitergeführt und neue Beispiele und Methoden zur Berechnung von Flüssigkeitsstrahlen mitgeteilt. Mit Hilfe dieser Methoden gelang es, den Kontraktionskoeffizienten μ_2 , definiert als Verhältnis von Strahlquerschnitt zu Öffnungsquerschnitt, für freie Flüssigkeitsstrahlen durch scharfrandige Öffnungen in ebenen Wänden zu

$$\frac{\pi}{2 + \pi} = 0,611$$

zu bestimmen.

Grundlegende Experimente zum Ausfluß von Wasser in Luft durch Bodenöffnungen in dünnen Wänden verdanken wir WEISBACH [46, 47, 48]. Der Untersuchung der Ausfluß- oder Durchflußkoeffizienten bei Ausfluß von Wasser unter Wasser, insbesondere in Hinblick auf die Funktion von Registrierpegelanlagen, ist bisher aber nur wenig Aufmerksamkeit gewidmet worden. Während

auf dem Gebiet der Registriervorrichtungen für den Wasserstand in den letzten 30 Jahren, nicht zuletzt durch die Entwicklung der Fernpegelsysteme, große Fortschritte erzielt wurden, ist man in bezug auf die Bemessung von Pegelschacht und Durchflußtubus bisher keine neuen Wege gegangen. In den neueren Anweisungen zur Errichtung von Pegelstationen [1, 2, 4] werden nur ganz allgemeine Dimensionierungsvorschriften für die Verbindungsöffnung mitgeteilt, wobei die spezifische Lage jeder Station durch Experimente berücksichtigt werden muß. SAGER [38] regte deshalb bereits im Jahre 1956 eingehendere Messungen des Durchflußkoeffizienten bei Pegelanlagen an und ermittelte in eigenen provisorischen Versuchen mit Glastuben Werte zwischen $\mu = 0,47$ und $\mu = 0,61$ [39]. In Übereinstimmung mit einer Empfehlung der IV. Konferenz der Ozeanographen der Ostsee im Jahre 1964 über die Weiterentwicklung der Schreibpegelkonstruktionen, insbesondere in bezug auf die kontrollierbare Dämpfung [3], wurden daher umfangreiche experimentelle Untersuchungen der Durchflußkoeffizienten bei Rohrpegelanlagen vorgenommen.

3. Physikalische Grundlagen

Beim Ausfluß gilt für ideale Flüssigkeiten das TORRICELLI-Theorem

$$v = \sqrt{2gz} \quad (1)$$

oder die daraus folgende Gleichung für die pro Sekunde ausfließende Flüssigkeitsmenge

$$Q = f\sqrt{2gz}. \quad (2)$$

Da man es bei Wasser aber mit einer realen Flüssigkeit zu tun hat, müssen die durch Wandreibung, Zähigkeit, Form und Dimensionen der Ausflußöffnung bedingten Effekte durch Koeffizienten in Rechnung gestellt werden. Gewöhnlich berücksichtigt man den Einfluß des Reibungswiderstandes und der Zähigkeit durch einen Geschwindigkeitskoeffizienten μ_1 . Die durch die Form der Ausflußöffnung hervorgerufene Kontraktion des Ausflußstrahles wird durch einen Kontraktionskoeffizienten μ_2 in die Rechnung einbezogen. Das Produkt beider bezeichnet man als Ausfluß- oder Durchflußkoeffizient μ :

$$\mu = \mu_1 \cdot \mu_2. \quad (3)$$

Beim Ausfluß von Wasser unter Wasser durch eine Bodenöffnung unter veränderlichem Druck — Porosität des Gefäßes und Verdunstung seien ausgeschlossen — muß das ausfließende Volumen gleich dem einfließenden sein (Abb. 1):

$$F_1 x = (F_3 - F_1) y.$$

Setzt man $F_3 - F_1 = F_2$, so findet man für y

$$y = \frac{F_1}{F_2} x. \quad (4)$$

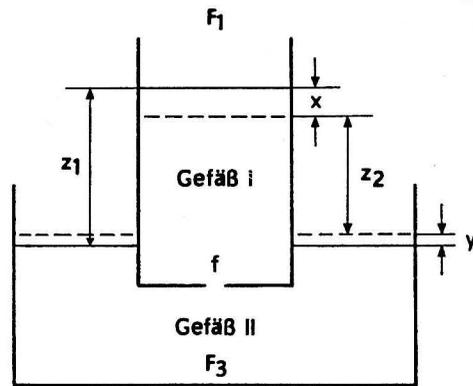


Abb. 1. Schema zum Ausfluß von Wasser aus Gefäßen

Mit $z_1 = x + y + z_2$ geht (4) über in

$$x = \frac{F_2}{F_1 + F_2} (z_1 - z_2). \quad (5)$$

Die während der Zeit dt vom Gefäß I in das Gefäß II fließende Wassermenge ist

$$\mu f \sqrt{2gz} dt = -F_1 dx.$$

Daraus folgt mit (5)

$$\mu f \sqrt{2gz} dz = -\frac{F_1 F_2}{F_1 + F_2} dz. \quad (6)$$

Unter der Voraussetzung, daß μ keine Funktion von z ist, kann man hieraus die Zeit berechnen, in der der Niveauabstand z_1 zwischen den Wasserspiegeln in z_2 übergeht:

$$t = -\frac{F_1 F_2}{(F_1 + F_2) \mu f \sqrt{2g}} \int_{z_1}^{z_2} \frac{dz}{\sqrt{z}}.$$

Für die Ausflußzeit ergibt sich

$$t_{\text{real}} = \frac{2 F_1 F_2}{(F_1 + F_2) \mu f \sqrt{2g}} (\sqrt{z_1} - \sqrt{z_2}). \quad (7)$$

Wird $z_2 = 0$, so erhält man aus (7) die Zeit bis zum Angleich der Wasserstände in den Gefäßen zu

$$\tau = \frac{2 F_1 F_2 \sqrt{z_1}}{(F_1 + F_2) \mu f \sqrt{2g}}. \quad (8)$$

Aus (7) bekommt man durch Umformung auch eine Bestimmungsgleichung für den Durchflußkoeffizienten μ bei Ausfluß von Wasser unter Wasser bei veränderlichem Druck, wenn man die Ausflußzeiten t_{real} mißt:

$$\mu = \frac{1}{t_{\text{real}}} \frac{2 F_1 F_2}{(F_1 + F_2) f \sqrt{2g}} (\sqrt{z_1} - \sqrt{z_2}). \quad (9)$$

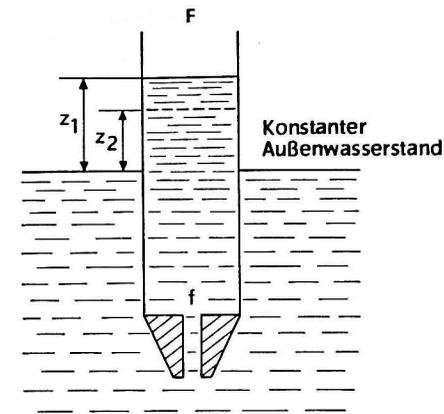


Abb. 2. Schema eines Rohrpegels

Die Anwendung dieser Gleichungen auf die Verhältnisse bei Rohrpegeln führt zu Vereinfachungen. Pegel stehen im freien Gewässer, so daß die Rückwirkung des Innenwasserstandes vernachlässigt werden kann ($F_2 \gg F_1$). Unter Versuchsbedingungen kann der Wasserstand im äußeren Gefäß sogar konstant gehalten werden. Damit gehen die Gl. (7), (8) und (9) über in

$$t_{\text{real}} = \frac{2 F_1}{\mu f \sqrt{2g}} (\sqrt{z_1} - \sqrt{z_2}), \quad (7a)$$

$$\tau = \frac{2 F_1 \sqrt{z_1}}{\mu f \sqrt{2g}} \quad (8a)$$

und

$$\mu = \frac{1}{t_{\text{real}}} \frac{2 F_1}{f \sqrt{2g}} (\sqrt{z_1} - \sqrt{z_2}). \quad (9a)$$

Setzt man

$$F_1 = F = \frac{\pi d_s^2}{4} \quad \text{und} \quad f = \frac{\pi d_t^2}{4}$$

(vgl. Abb. 2), dann wird

$$\mu = \frac{1}{t_{\text{real}}} \frac{d_s^2}{d_t^2} \sqrt{\frac{2}{g}} (\sqrt{z_1} - \sqrt{z_2}). \quad (10)$$

Aus (8a) folgt die von SAGER [38] berechnete Angleichzeit bei konstantem Außenwasserstand als

$$\tau = \frac{2 \sqrt{z_1}}{k}. \quad (8b)$$

4. Das Rohrpegelmodell

Um exakte Aussagen über die Größe des Durchflußkoeffizienten bei Rohrpegeln in Abhängigkeit von Tubusdurchmesser, Tubuslänge und Bodenneigung machen zu können, wurde das in Abb. 3 im Prinzip gezeigte Modell entwickelt. Bei der Konstruktion wurde besonderer Wert auf eine weitgehende Nachbildung der in der Praxis gebräuchlichen Anlagen gelegt.

Das Modell besteht aus zwei Hauptteilen, dem eigentlichen Pegelrohr und dem Ausflußbehälter mit dem Überlaufgefäß. Das Pegelrohr ist ein handelsübliches PVC-Rohr mit einer Länge von 1,5 m, einem Innendurchmesser von 27,0 cm und einer Wandstärke von 0,4 cm, wie es häufig für Rohrpegel Anwendung findet. An vier gegeneinander versetzten und einander überlappenden Sichtfenstern aus Piacryl von je 36 cm Länge kann der Wasserstand im Pegelrohr

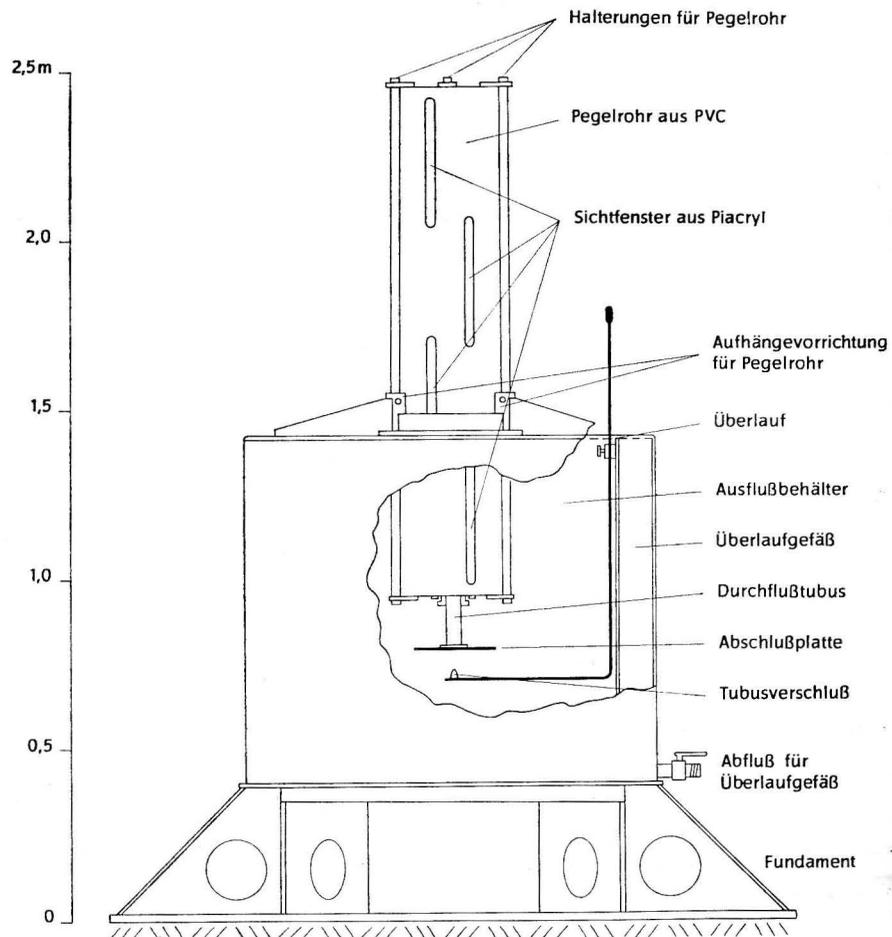


Abb. 3. Aufbau des Rohrpegelmodells

verfolgt werden. Zwei Deckplatten, die in das Pegelrohr eingepaßt sind, sorgen für eine stabile Form des PVC-Rohres. Die Deckplatten sind durch zwei Stangen und ein Stahlrohr miteinander verbunden, die wiederum die Deckplatten an dem PVC-Rohr befestigen und gleichzeitig als Halterungen dienen (vgl. auch

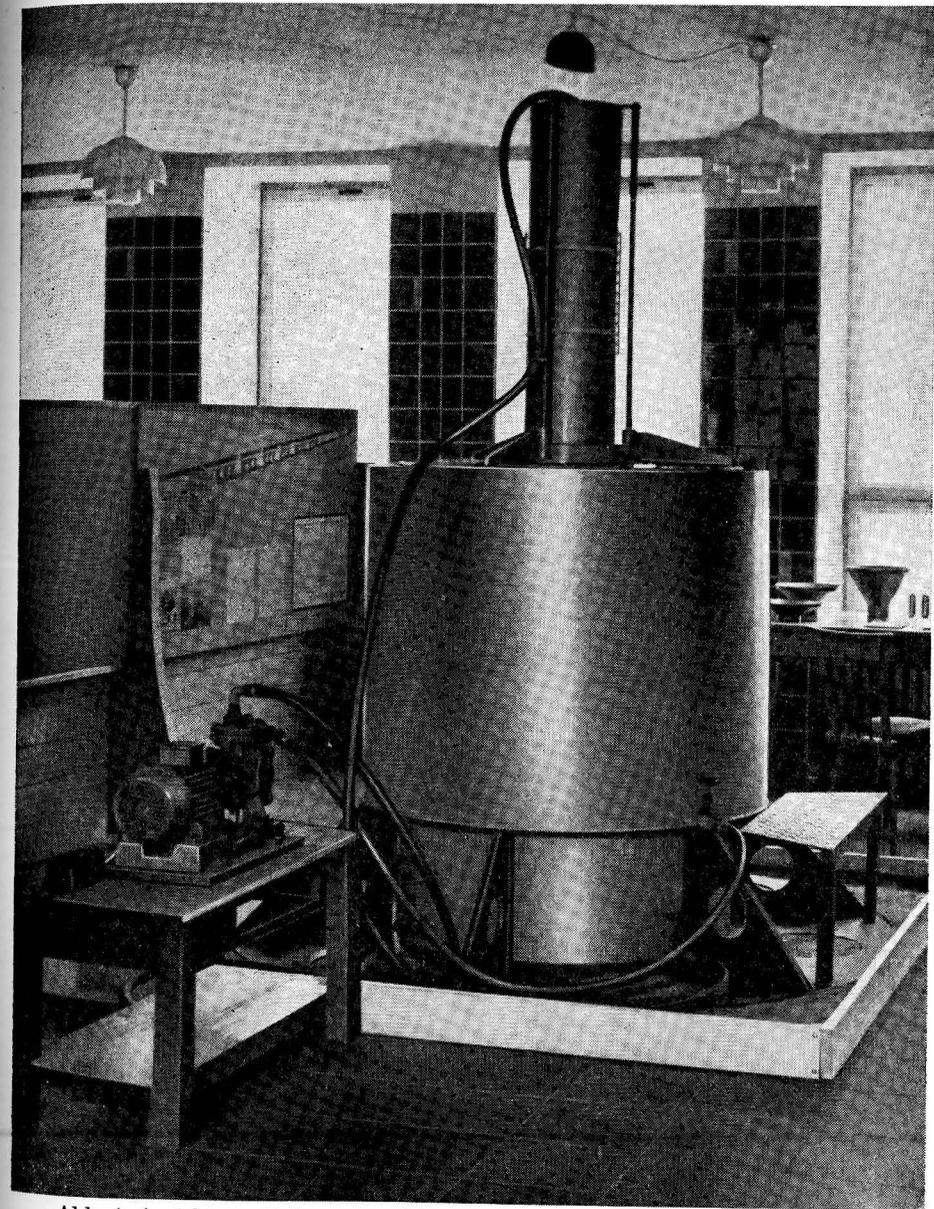


Abb. 4. Ansicht des Rohrpegelmodells (Fertigung: PGH „Stahl“, Warnemünde)

Abb. 4). Die Aufhängevorrichtung, die an den Stangen und dem Stahlrohr angeht, gestattet eine vertikale Verschiebung des Pegelrohres um 1,4 m. Das Stahlrohr ist darüber hinaus in Abständen von 5 cm mit Bohrungen versehen, die eine sichere Arretierung des Pegelrohres ermöglichen.

Der Ausflußbehälter mit einer lichten Weite von 1 m und einer Tiefe von 1,4 m steht auf einem stabilen Stahlfundament. Um einen konstanten Außenwasserstand zu erreichen, ist der Behälter mit einem Überlauf versehen, der das ausfließende Wasser in das Überlaufgefäß leitet, welches als Mantel um den Ausflußbehälter ausgebildet ist. Auf dem Ausflußbehälter sind gleichzeitig die Aufhängevorrichtung für das Pegelrohr und eine Arbeitsplattform montiert. In das Pegelrohr können entsprechend Abb. 5 Trichter mit einem Öffnungswinkel von 60° , 90° und 120° eingesetzt werden, die eine Untersuchung des Durchflußkoeffizienten in Abhängigkeit von der Bodenneigung gegen die Vertikale ermöglichen. Um Wasserbewegungen sowohl zwischen Pegelrohrwandung und Trich-

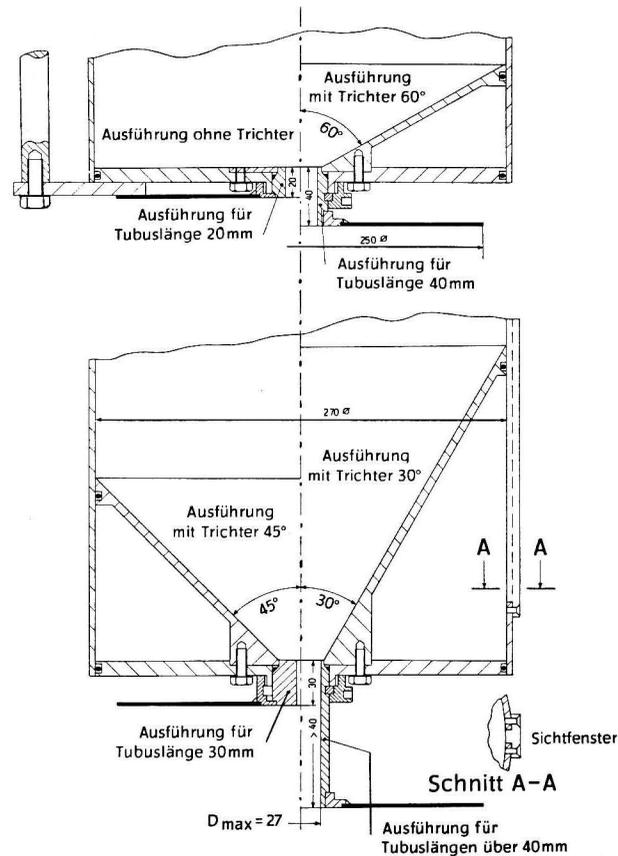


Abb. 5. Konstruktion der Durchflußöffnung mit den verschiedenen Trichtern und Durchflußtuben

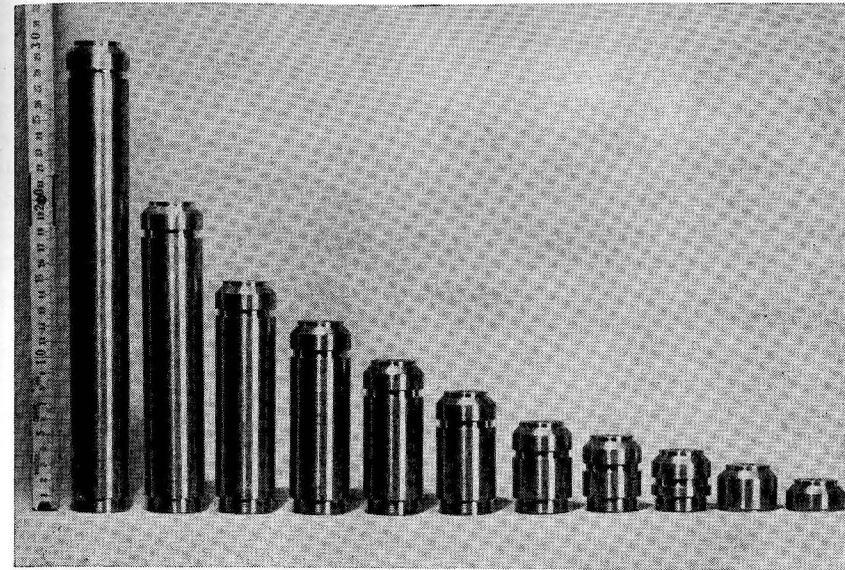


Abb. 6. Der Satz Durchflußtuben variabler Länge ($d_t = 0,85$ cm)

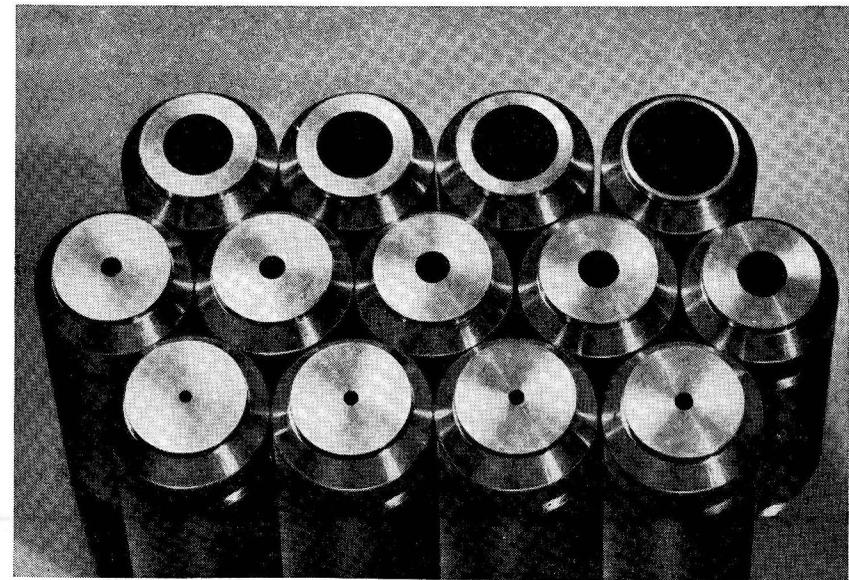


Abb. 7. Der Satz Durchflußtuben variablen Durchmessers ($l_t = 10$ cm)

ter hindurch als auch entlang der Tubusaußenwand zu vermeiden, wurden diese Stellen mit Rundringen abgedichtet.

Der Fertigung der Durchflußtuben wurde besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Die gesamte Konstruktion ist auf die Untersuchung von Tuben bis 2,7 cm Durchmesser und von 2 cm bis etwa 50 cm Länge ausgelegt. Da durch die Werkzeuge ein bestimmtes Verhältnis von Länge zu Durchmesser vorgegeben ist, mußte auf große Tubuslängen verzichtet werden. Die Durchflußtuben wurden aus gezogenem Rundmessing (Ms 58 F 44) gefertigt, wobei die Durchführungen zunächst gebohrt und anschließend mit Reibahlen aufgerieben worden sind. An den Durchflußöffnungen wurde lediglich der Grat entfernt, um alle Untersuchungen auf scharfkantige Öffnungen beziehen zu können.

Für die Messungen mit variabler Tubuslänge wurde ein Dämpfungsverhältnis λ von etwa 1:1000 angestrebt. Bei dem verwendeten Pegelrohr ist dieser Wert nahezu bei einem Tubusdurchmesser von 0,85 cm erreicht. Als Tubuslängen wurden 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12,5, 15, 20 und 30 cm gewählt, wobei die beiden ersten Längen aus fertigungstechnischen Gründen in der Konstruktion geringfügig von den übrigen abweichen (vgl. Abb. 5 und 6). Abb. 7 zeigt den Satz Durchflußtuben variablen Durchmessers. Als konstante Länge wurde $l_t = 10$ cm gewählt.

In den Tab. 1a und 1b sind die Abmessungen der Durchflußtuben angegeben. Die Längen wurden mit einer Schieblehre gemessen; für die Bestimmung der Durchmesser $d_t \geq 0,5$ cm diente eine Mikrometerschraube, deren zulässige Abweichung bei $5 \cdot 10^{-4}$ cm lag. Der mittlere Öffnungsdurchmesser wurde aus jeweils fünf Messungen an jedem Ende des Tubus errechnet, wobei sich d_t als Mittel der Werte von jedem Ende ergab.

TABELLE 1a

Abmessungen der Durchflußtuben variabler Länge

l_t [cm]	2,00	2,99	4,00	5,00	5,96	8,00	9,99	12,50	15,00	20,00	30,00
d_t [cm]	0,851	0,851	0,852	0,852	0,852	0,853	0,851	0,853	0,853	0,851	0,852

TABELLE 1b

Abmessungen der Durchflußtuben variablen Durchmessers

l_t [cm]	10,00	10,00	9,99	9,99	10,00	9,99	9,99	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
d_t [cm]	2,701	2,200	1,928	1,755	1,230	1,002	0,851	0,605	0,501	0,441*	0,391*	0,351*

*) Bei diesen Durchmessern wurde ein mittlerer Wert aus unterer und oberer Toleranzgrenze der Reibahlen zum Reibmaß addiert.

Die Bestimmung der Abmessungen erfolgte bei Zimmertemperatur ($\vartheta = 22^\circ \text{C}$). Der lineare Wärmeausdehnungskoeffizient von Messing beträgt zwischen 0° und 100°C etwa $19 \cdot 10^{-6} [\text{grad}^{-1}]$, so daß man im Bereich der Zimmertemperatur kaum Änderungen der in den Tab. 1a und 1b mitgeteilten Werte zu erwarten hat.

Mit den Werten der Tab. 1a und 1b findet man die in Tab. 2 zusammengestellten Dämpfungsverhältnisse λ . Den graphischen Zusammenhang zwischen Tubusdurchmesser und Dämpfungsverhältnis zeigt Abb. 8.

TABELLE 2

Tubusdurchmesser d_t und Dämpfungsverhältnis λ bei Pegelrohrdurchmesser $d_s = 27,0$ cm

d_t [cm]	2,701	2,200	1,928	1,755	1,230	1,002
λ	1:100	1:151	1:196	1:237	1:482	1:726
d_t [cm]	0,853	0,852	0,851	0,605	0,501	0,441
λ	1:1002	1:1004	1:1007	1:1992	1:2904	1:3748
d_t [cm]	0,391	0,351	0,301			
λ	1:4768	1:5917	1:8046			

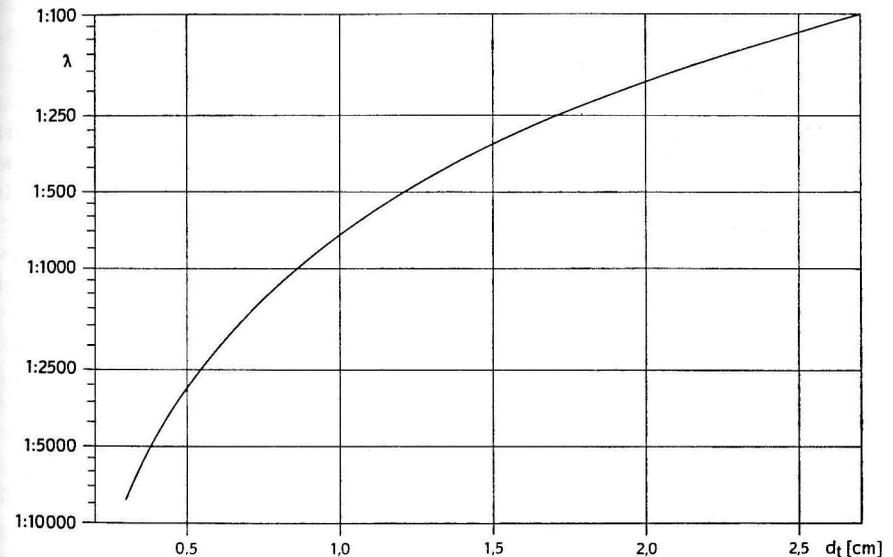


Abb. 8. Abhängigkeit des Dämpfungsverhältnisses λ vom Tubusdurchmesser d_t bei konstantem Pegelrohrdurchmesser $d_s = 27,0$ cm (dem Ordinatenmaßstab ist die Dezimalschreibweise der Dämpfungsverhältnisse zugrunde gelegt)

Die untere Tubusöffnung liegt unabhängig von der Tubuslänge in einer Ebene mit einer Abschlußplatte von 25 cm Durchmesser, um definierte Strömungsverhältnisse an der Austrittsöffnung zu erhalten. Da die Abschlußplatte nur durch eine Schraubverbindung am Tubus befestigt ist, können auch Untersuchungen bei Ausfluß direkt aus dem Tubus ohne Abschlußplatte vorgenommen werden.

Das obige Modell ermöglicht bei Ausfluß von Wasser unter Wasser bei veränderlichem Druck folgende Untersuchungen:

- Durchflußkoeffizient in Abhängigkeit vom Wasserstand z im Pegelrohr gegenüber konstantem Außenwasserstand,
- Durchflußkoeffizient in Abhängigkeit von der Tubuslänge l_t ,
- Durchflußkoeffizient in Abhängigkeit vom Tubusdurchmesser d_t ,
- Durchflußkoeffizient in Abhängigkeit von der Neigung α des Pegelrohrbodens gegen die Vertikale,
- Durchflußkoeffizient in Abhängigkeit von der Lage der unteren Tubusöffnung unter konstantem Außenwasserspiegel.

Darüber hinaus können mit der Anlage die Bewegungsgesetze des Wasserstandes im Pegelrohr bei konstantem Außenwasserstand untersucht werden.

5. Die Bestimmung des Durchflußkoeffizienten

5.1 Der Meßvorgang

Die Experimente wurden mit dem Wasser des Stadtnetzes ausgeführt. Da die Wassertemperatur die Messungen beeinflusst, mußte das Wasser temperiert werden. Dies erfolgte im allgemeinen über die Raumtemperatur, weil eine Wassermenge von 1250 bis 1400 Litern auf Grund ihrer großen Wärmekapazität kurzzeitigen Raumtemperaturschwankungen nicht folgen kann. Für die Untersuchungen wurde eine Temperatur von 18 °C gewählt, wobei eine Schwankungsbreite von $\pm 0,5$ °C zugelassen wurde. Diese Schwankungsbreite beeinträchtigt die mit der Anlage erreichbare Genauigkeit der Messungen nicht.

Vor Beginn einer Meßreihe war es erforderlich, die Wassermenge im Ausflußbehälter zu durchmischen, um eine sich möglicherweise ausbildende Schichtung zu unterbinden und mit einer innerhalb der obigen Grenzen konstanten Temperatur zu arbeiten.

Im Gegensatz zu Untersuchungen von SCHNEIDER [43, 44] über Ausflußkoeffizienten von PONCELET-Öffnungen in Luft, bei denen auf die ausfließende Wassermenge zur Berechnung des Ausflußkoeffizienten zurückgegriffen werden konnte, muß bei Ausfluß unter Wasser die Durchflußzeit als Grundlage zur Berechnung von μ dienen.

Der Durchflußkoeffizient wurde nach der Gleichung

$$\mu = \frac{1}{t_{\text{real}}} \frac{d_s^2}{d_t^2} \sqrt{\frac{2}{g}} (\sqrt{z_1} - \sqrt{z_2}) \quad (10)$$

ermittelt. Diese Gleichung gilt nur, wenn μ unabhängig von z ist. Da das im allgemeinen nicht der Fall ist, muß $z_1 - z_2$ so gewählt werden, daß μ in diesen Grenzen praktisch unabhängig von z wird. Für die Erdbeschleunigung wurde mit einem Wert von $g = 981,44$ [cm s⁻²] gerechnet, der für Rostock angegeben ist [19]. Da der Durchmesser des Pegelrohres mit 27,0 cm konstant bleibt,

folgt aus Gl. (10)

$$\mu = 32,909 \frac{\sqrt{z_1} - \sqrt{z_2}}{t_{\text{real}} d_t^2} \quad (10a)$$

d_t [cm] wird durch die Wahl des Durchflußtubus festgelegt. Die Durchflußzeit t_{real} [s] wird zwischen den Niveaus z_1 [cm] und z_2 [cm] über konstantem Außenwasserspiegel bestimmt. Das mittlere Niveau z , dem der Durchflußkoeffizient zugeordnet wird, kann aus der Strömungsgeschwindigkeit v im Tubus bestimmt werden:

$$v = \sqrt{2gz} = \frac{1}{z_1 - z_2} \int_{z_2}^{z_1} \sqrt{2gz} dz.$$

Es folgt für z

$$z = \frac{4}{9(z_1 - z_2)^2} (z_1 \sqrt{z_1} - z_2 \sqrt{z_2})^2 \quad (11)$$

Ein Vergleich von (11) für die beim Rohrpegelmodell in Frage kommenden Werte z mit dem arithmetischen Mittel aus z_1 und z_2 und einer von WEISBACH angegebenen Gleichung für die mittlere Druckhöhe

$$z = \frac{1}{4} (\sqrt{z_1} + \sqrt{z_2})^2$$

zeigt, daß die nach letzterer Formel berechneten mittleren Niveaus z etwas niedriger liegen, als die nach Gl. (11) berechneten. Die Abweichung beider Ergebnisse vom arithmetischen Mittel aus den verwendeten Meßniveaus z_1 und z_2 bleibt jedoch für die Belange dieser Untersuchungen vernachlässigbar klein.

Für alle Beobachtungen wurde die gleiche Stoppuhr verwendet, damit Umrechnungen durch Gangunterschiede vermieden werden. Die Durchflußzeiten wurden stets mit voll aufgezogener Uhr gemessen.

Unter der Voraussetzung, daß sich die Wassermasse im Ausflußbehälter in Ruhe befand, wurde zunächst Wasser aus dem Überlaufgefäß mit Hilfe einer Kreiselpumpe in das Pegelrohr befördert. Es wurde so viel Wasser über die obere Marke aufgefüllt, daß man innerhalb des Meßbereiches mit einer quasi-stationären Strömung rechnen konnte. Nach mehreren Minuten, in denen sich die Wassermasse im Pegelrohr beruhigen und die durch das Umpumpen hereinbrachten Luftbläschen aufsteigen konnten, wurde die Tubusöffnung freigegeben und die Durchflußzeit zwischen den eingemessenen Marken z_1 und z_2 gestoppt. Das ausfließende Wasser geht im Meßzyklus nicht verloren, sondern befördert eine äquivalente Menge in das Überlaufgefäß, und der Meßvorgang kann von neuem beginnen.

Für jeden Meßpunkt waren 12 Einzelmessungen vorgesehen, von denen die beiden mit der größten Streuung behafteten Werte ausgeschieden wurden. Aus den verbleibenden 10 Werten wurde der mittlere Durchflußkoeffizient des betreffenden Niveaus z über konstantem Außenwasserstand berechnet.

Neben der Durchflußzeit wurde die Temperatur des Raumes und des Wassers sowie mit Hilfe eines Aräometers die Dichte des Wassers beobachtet. Letztere lag bei allen Messungen im Bereich von etwa $0,997 \leq \rho_w \leq 1,000$ [g cm⁻³].

Von Zeit zu Zeit wurde das Wasser auf Organismen hin untersucht. Der Bewuchs war vernachlässigbar klein, zumal die Anlage in einem relativ dunklen Raum aufgestellt war. Häufiges Auswechseln des Wassers während des Beobachtungszeitraumes und einige Erneuerungen des Farbanstrichs der Apparatur wirkten einer Verschmutzung entgegen.

5.2 Der Temperatureinfluß

Über die Zähigkeit des Wassers nimmt die Temperatur Einfluß auf die Messung des Durchflußkoeffizienten. Aus Untersuchungen von SCHNEIDER [44] findet man bei Ausfluß von Wasser in Luft bei kreisförmigen Öffnungen in ebenen dünnen Wänden eine Temperaturabhängigkeit von $d\mu/d\vartheta_w \approx 0,0001$ [grad⁻¹] im Bereich zwischen 15 °C und 40 °C.

Für Ausfluß unter Wasser muß mit einem um eine Größenordnung höheren Temperatureinfluß gerechnet werden. Für $M = 50$ cm und $z = 60$ cm bei einem Tubusdurchmesser von $d_t = 0,85$ cm und einer Länge $l_t = 10,0$ cm wurde die Temperaturabhängigkeit im Bereich von $8\text{ °C} \leq \vartheta_w \leq 32\text{ °C}$ untersucht. Aus der Kurve in Abb. 9, der insgesamt 46 Meßpunkte zugrunde liegen, folgt für den Bereich zwischen 15 und 30 °C in erster Näherung eine lineare Abhängigkeit von Durchflußkoeffizient und Temperatur mit $d\mu/d\vartheta_w = 0,001$ [grad⁻¹].

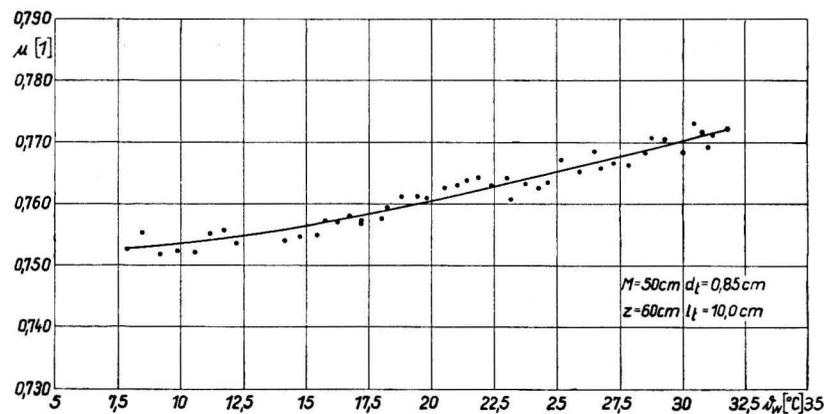


Abb. 9. Temperaturabhängigkeit der Messungen am Beispiel $\lambda \approx 1:1000$, $z = 60$ cm und $l_t = 10,0$ cm

Die Wärmeausdehnung des Tubus kann unberücksichtigt bleiben, denn nach

$$d_t(\vartheta) = d_t(\vartheta_0) [1 + \gamma (\vartheta - \vartheta_0)] \quad (12)$$

erhält man mit einem linearen Ausdehnungskoeffizienten für Messing von $\gamma = 19 \cdot 10^{-6}$ [grad⁻¹] im gemessenen Bereich eine Änderung des Durchmessers um weniger als $5 \cdot 10^{-4}$ cm.

Die durch Temperaturdifferenzen zu erwartenden Abweichungen machen also bei $\vartheta_w = 18 \pm 0,5$ °C maximal 0,2% aus und liegen damit innerhalb der Meßgenauigkeit der Apparatur.

Untersuchungen des Durchflußkoeffizienten in Abhängigkeit von M , d. h. vom hydrostatischen Druck an der Durchflußöffnung, haben für $d_t = 0,85$ cm ergeben, daß μ zwischen $M = 25,5$ cm und $M = 120$ cm nur innerhalb der Meßgenauigkeit variiert. Das untere Tubusende wurde daher für alle Messungen einheitlich auf $M = 50$ cm unter konstantem Außenwasserstand angeordnet.

5.3 Der Einfluß der Fertigungstoleranzen

Die Durchflußtuben sind mit Fertigungstoleranzen behaftet, die durch die Qualität der Werkzeuge und durch die Bearbeitung hervorgerufen werden. Da schon die geringste Strahlführung durch wenig abgerundete Kanten zu Änderungen in der Größe des Durchflußkoeffizienten führen kann, wurde der Einfluß der Fertigungstoleranzen an einem Beispiel untersucht. Zu diesem Zwecke sind drei Durchflußtuben mit einem Durchmesser von $d_t \approx 0,85$ cm gefertigt worden, deren Abmaße in Tab. 3 zusammengestellt sind. Die Tuben Nr. 2 und Nr. 3 sind

TABELLE 3

Tubus Nr.	d_t [cm]	l_t [cm]	λ
1	0,851	9,99	1:1007
2	0,854	10,00	1:1000
3	0,853	10,00	1:1002

unmittelbar nacheinander mit denselben Werkzeugen (Bohrer, Reibahlen) gefertigt. Tubus Nr. 1 wurde mehrere Monate früher und mit anderen Werkzeugen hergestellt. Dadurch konnten neben Aussagen über den Einfluß bei denselben Werkzeugen auch Anhaltspunkte über die Fertigungstoleranzen bei unterschiedlichen Werkzeugen gewonnen werden.

Die Messungen zeigten, daß die mit Tubus Nr. 2 und 3 gemessenen Durchflußkoeffizienten mit Abweichungen von $|\Delta\mu| = 0,003$ bis 0,007 relativ gut beieinander lagen. Die mit Tubus Nr. 1 gemessenen Koeffizienten waren um etwa 0,012 größer als die mit Nr. 2 ermittelten. Man wird also auf Grund der Fertigung mit Abweichungen in der Größenordnung von 1 bis 1,5% des gemessenen Durchflußkoeffizienten rechnen können.

5.4 Fehlerabschätzung

Nachdem thermische Fehlerursachen durch eine konstante Meßtemperatur ausgeschaltet wurden und die durch Fertigungstoleranzen der Verbindungsöffnungen verursachten Störungen abgegrenzt sind, wird im folgenden eine Abschätzung des auf Grund des Aufbaus der Anlage zu erwartenden Fehlers vorgenommen. Die berechnete Größe ist der Durchflußkoeffizient μ ; beobachtet

werden die Durchflußzeit t_{real} , die Wasserstände z_1 und z_2 im Pegelrohr über konstantem Außenwasserstand, der Tubusdurchmesser d_t und der Durchmesser des Pegelrohres d_s .

Als Ausgangspunkt für die Abschätzung dient die Gleichung

$$\mu = \frac{1}{t_{\text{real}}} \frac{d_s^2}{d_t^2} \sqrt{\frac{2}{g}} (\sqrt{z_1} - \sqrt{z_2}), \quad (10)$$

auf die das quadratische Fehlerfortpflanzungsgesetz

$$\Delta\mu = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial\mu}{\partial t}\right)^2 \Delta t^2 + \left(\frac{\partial\mu}{\partial d_t}\right)^2 \Delta d_t^2 + \left(\frac{\partial\mu}{\partial z_1}\right)^2 \Delta z_1^2 + \left(\frac{\partial\mu}{\partial z_2}\right)^2 \Delta z_2^2} \quad (13)$$

angewendet wird. Die Ausdrücke $\sqrt{2/g}$ und d_s^2 können als konstant bzw. als mit einem konstanten Fehler behaftet angesehen werden, so daß

$$\mu = f(t_{\text{real}}, d_t, z_1, z_2)$$

wird. Werden z. B. bei $d_t = 0,85$ cm die Ausgangswerte t_{real} , d_t , z_1 und z_2 mit Genauigkeiten von

$$\Delta t = \pm 0,1 \text{ s}$$

$$\Delta d_t = \pm 0,001 \text{ cm}$$

$$\Delta z_1 = \Delta z_2 = \pm 0,05 \text{ cm}$$

gemessen, so beträgt der zu erwartende Fehler des einzelnen Wertes μ bei $z_1 = 92$ cm und $z_2 = 88$ cm etwa 2%, bei $z_1 = 11$ cm und $z_2 = 9$ cm rund 3,5%. Durch die Mittelbildung aus 10 Werten wird die Genauigkeit noch erhöht.

6. Meßergebnisse und Diskussion

Mit dem Rohrpegelmodell wurde der Durchflußkoeffizient in Abhängigkeit vom Tubusdurchmesser d_t , von der Tubuslänge l_t , von der Bodenneigung α (gemessen gegen die Vertikale) und von einer Strahlführung am Tubuseingang — gegeben durch den halben Öffnungswinkel α_x und die Länge der Strahlführung l_x — gemessen. Alle Angaben sind auf $M = 50$ cm bezogen. Um den Einfluß der Zähigkeit des Wassers als Funktion der Temperatur ϑ_w und der Dichte ρ_w vernachlässigbar klein zu halten, wurden ϑ_w und ρ_w Grenzen vorgegeben. Insgesamt wurden etwa 12000 Einzelmessungen vorgenommen.

Wenn man die REYNOLDS-Zahl im Tubus nach der Beziehung

$$\text{Re}_t = \frac{v d_t}{\nu} \quad (14)$$

mit

$$v = \mu \sqrt{2 g z}$$

berechnet, so liegen alle Werte oberhalb der kritischen REYNOLDS-Zahl $\text{Re}_{\text{krit}} = 2320$. Damit können für alle Durchflußtuben turbulente Strömungsverhältnisse angenommen werden, da man Störungen in der Rohrwandung praktisch nicht restlos ausschalten kann.

6.1 Der Durchflußkoeffizient als Funktion des Tubusdurchmessers

Für die in Tab. 1 b verzeichneten 13 Durchflußtuben mit Durchmessern zwischen 0,3 und 2,7 cm bei einer Tubuslänge von rund 10 cm wurde im Rohrpegelmodell der Durchflußkoeffizient in Abhängigkeit vom Wasserstand z im Pegelrohr über konstantem Außenwasserstand bestimmt. Durch die Abmessungen des Modells waren nur Beobachtungen zwischen $10 \leq z \leq 90$ cm möglich. Untersuchungen bei $z \rightarrow 0$, die für die Funktion eines Rohrpegels von Interesse sein dürften, waren einmal aus konstruktiven Gründen nicht möglich, zum anderen werden die Durchflußzeiten bei kleinem z sehr groß, so daß die dadurch unvermeidlichen Fehler in der Zeitmessung die Brauchbarkeit der Meßwerte weitgehend in Frage stellen.

Abb. 10 zeigt die durch etwa 250 Meßpunkte mit insgesamt 3000 Messungen belegte Kurvenschar von μ über z . Das Dämpfungsverhältnis $\lambda = f/F$ liegt

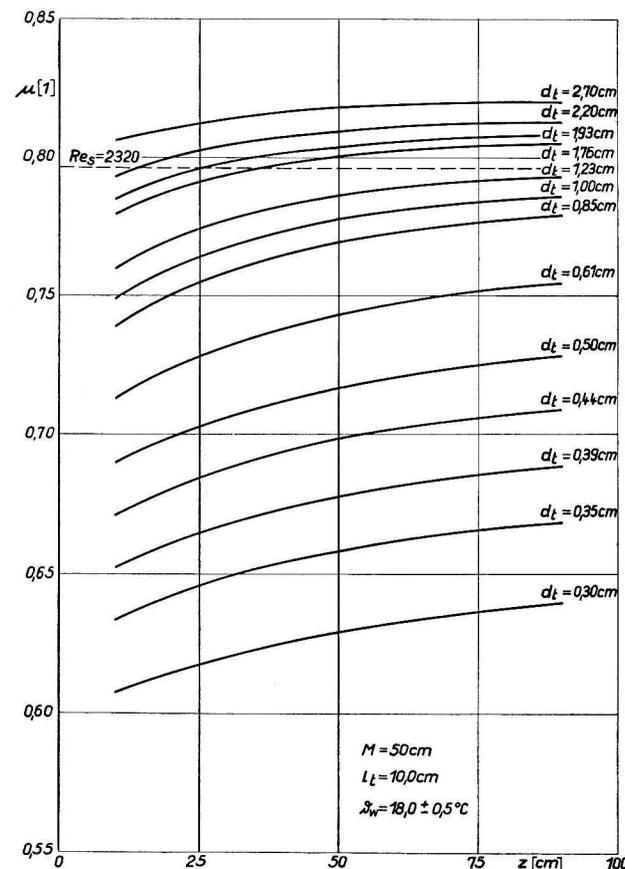


Abb. 10. Durchflußkoeffizient μ in Abhängigkeit von der Wasserstands-differenz z zwischen Pegel und Gewässer mit dem Tubusdurchmesser d_t als Parameter

zwischen 1:100 bei $d_t = 2,7$ cm und 1:8046 bei $d_t = 0,3$ cm (vgl. auch Abb. 8). Der Durchflußkoeffizient variiert zwischen $0,61 < \mu < 0,82$ und wird mit größerem Tubusdurchmesser und größerem z ebenfalls größer. Die Meßergebnisse deuten an, daß sich die Kurven zu größeren Durchmessern hin scharen, und damit wird μ weniger abhängig vom Tubusdurchmesser. In Richtung auf kleinere Durchmesser, d. h. kleinere Dämpfungsverhältnisse, fächert die Kurvenschar immer mehr auf.

Diese Tatsache kann man aus den Vorgängen an Rohrverengungen deuten. Bei Rohrverengungen treten radial nach innen gerichtete Geschwindigkeitskomponenten der Strömung auf. Die im weiten Rohr (in unserem Falle also das Pegelrohr) in der Nähe der Wandung fließenden Teilchen gelangen daher senkrecht zur Ausflußrichtung an die Mündung des engeren Rohres (Durchflußtubus). Dadurch erfolgt im Durchflußtubus zunächst eine Einschnürung des Ausflußstrahles, in der die Geschwindigkeit größer als im übrigen Durchflußtubus wird. Die Verzögerung der Strömungsgeschwindigkeit bis auf die dem Querschnitt des Tubus entsprechende führt zu Verlusten, die nach PREISSLER [33] in der Form

$$h_v = \frac{w^2}{2g} \left(\frac{F}{f} - \frac{F}{\mu_2 f} \right)^2 \quad (15)$$

geschrieben werden können. Bei größeren Tubusdurchmessern dürfte die Kontraktion durch den geringeren Einfluß des seitlich zuströmenden Wassers auch kleiner werden, womit die Durchflußkoeffizienten größere Werte erreichen.

Ähnlich könnte auch bei konstant gehaltenem Tubusdurchmesser die Abhängigkeit des Durchflußkoeffizienten von z erklärt werden. Die größten Änderungen von μ zwischen $10 \leq z \leq 90$ cm liegen bei Tubusdurchmessern zwischen 0,5 und 0,85 cm. Sowohl nach kleineren als auch nach größeren d_t hin wird die Abhängigkeit geringer, wobei für $d_t = 2,7$ cm der Durchflußkoeffizient bei $z > 60$ cm praktisch konstant wird. Eine größere Wasserstandsdifferenz z bewirkt größere Strömungsgeschwindigkeiten im Tubus und im Pegelrohr. Das führt im Gegensatz zu Messungen bei Ausfluß von Wasser in Luft aus PONCELET-Öffnungen [43, 44] zu einem gleichsinnigen Anwachsen von μ und z .

Gegenüber den Strömungsverhältnissen im Tubus tritt bei den vorgegebenen Dämpfungsverhältnissen im Pegelrohr sowohl laminare als auch turbulente Strömung auf. Aus der Beziehung

$$Re_s = \frac{w d_s}{\nu} \quad (16)$$

bekommt man mit

$$v \cdot f = w \cdot F$$

und

$$v = \mu \sqrt{2gz}$$

für die REYNOLDS-Zahl Re_s im Pegelrohr

$$Re_s = \frac{\lambda \sqrt{2gz} d_s}{\nu} \mu \sqrt{z} \quad (17)$$

Tab. 4 gibt einen Überblick über die bei den Messungen auftretenden extremen Strömungsgeschwindigkeiten und REYNOLDS-Zahlen.

TABELLE 4

Die Extrema der Strömungsgeschwindigkeit und der REYNOLDS-Zahl im Durchflußtubus und im Pegelrohr bei $l_t = 10,0$ cm

	$d_t = 0,3$ cm; $z = 10$ cm; $\mu = 0,607$	$d_t = 2,7$ cm; $z = 90$ cm $\mu = 0,820$
Durchflußtubus	$v = 85,0$ cm/s; $Re_t = 2410$	$v = 344,6$ cm/s; $Re_t = 88000$
Pegelrohr	$w = 0,01$ cm/s; $Re_s = 28$	$w = 3,4$ cm/s; $Re_s = 8800$

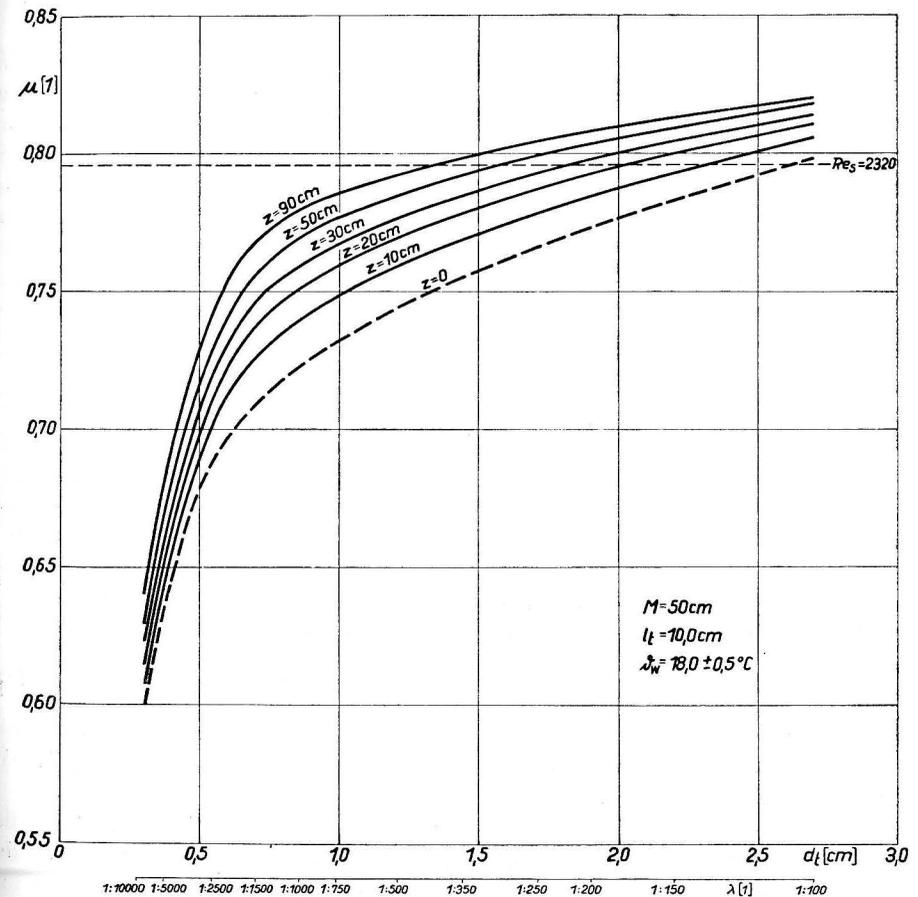


Abb. 11. Durchflußkoeffizient μ in Abhängigkeit von Tubusdurchmesser d_t bzw. dem Dämpfungsverhältnis λ mit z als Parameter

Bei Rohrströmungen kann man im allgemeinen mit einer kritischen REYNOLDS-Zahl von $Re_{krit} = 2320$ rechnen. Gibt man Re_{krit} vor, so liefert Gl. (17) den Umschlagbereich zwischen laminar und turbulent in Abhängigkeit von d_t bzw. λ , μ und z . Mit $\rho_w = 0,999$ [g cm⁻³] und einer dynamischen Zähigkeit von 0,01056 [cP] für Wasser von 18 °C ergibt sich aus (17)

$$\lambda^* = \frac{0,02032}{\mu^* \sqrt{z^*}} \quad (18)$$

Beziehung (18) ist für unser Modell bei $\mu = 0,796$ erfüllt (vgl auch Abb. 10 und 11). Oberhalb dieser Grenze ist im Pegelrohr mit turbulenter Strömung zu rechnen.

Für die meisten der untersuchten Dämpfungsverhältnisse vollzieht sich also bei der Messung des Durchflußkoeffizienten der Übergang von laminaren Verhältnissen im Pegelrohr zu turbulenten im Durchflußtubus.

Da aus meßtechnischen Gründen Untersuchungen bei $z \rightarrow 0$ nicht möglich sind, ist in Abb. 11 versucht worden, den Durchflußkoeffizienten für $z = 0$ zu extrapolieren. Zu diesem Zweck wurde μ über dem Durchmesser d_t mit z als Parameter dargestellt. Eine Ausgleichung der Kurven mit Hilfe einfacher und kubischer Parabeln sowie mit Hyperbeln führte zu keiner befriedigenden Lösung, so daß der Kurvenverlauf visuell ausgeglichen wurde. Die Extrapolation kann natürlich nur grobe Richtwerte liefern, die bei $0,3 \leq d_t \leq 2,7$ cm zwischen $0,6 \leq \mu < 0,8$ liegen. Auch diese Kurven scharen sich für große z , so daß für große Wasserstands-differenzen die Abhängigkeit des Durchflußkoeffizienten von z verschwinden wird.

6.2 Der Durchflußkoeffizient als Funktion der Tubuslänge

Analog zu den Tuben mit verschiedenem Durchmesser wurde für die in Tab. 1a aufgeführten 11 Tuben mit Längen zwischen 2 und 30 cm bei einem Dämpfungsverhältnis von $\lambda \approx 1:1000$ der Durchflußkoeffizient in Abhängigkeit von z gemessen. Den Kurven in Abb. 12 liegen rund 200 Meßpunkte zugrunde, die sich aus 2400 Einzelmessungen rekrutieren.

Die Kurvenschar wurde durch ein Polynom 3. Grades

$$\mu_z = a_0 + a_1 l_t + a_2 l_t^2 + a_3 l_t^3 \quad (19)$$

ausgeglichen, dessen Koeffizienten in Abhängigkeit von z in Tab. 5 mitgeteilt werden. Darüber hinaus ist in der Tabelle der Korrelationskoeffizient r für die Kurven angegeben.

Das Polynom (19) kann zur Berechnung der Durchflußkoeffizienten aller Tubuslängen zwischen 2 und 30 cm bei $\lambda \approx 1:1000$ und $\vartheta_w \approx 18$ °C angewendet werden. Durch Interpolation der Koeffizienten in Tab. 5 in Verbindung mit Gl. (19) können auch Durchflußkoeffizienten für andere Werte z ermittelt werden, zumal der Korrelationskoeffizient nur wenig von 1 verschieden ist.

TABELLE 5

z [cm]	a_0 [1]	a_1 [cm ⁻¹]	a_2 [cm ⁻²]	a_3 [cm ⁻³]	r [1]
10	0,8351	-0,01382	0,000362	-0,00000532	0,998
20	0,8367	-0,01254	0,000316	-0,00000462	0,998
30	0,8356	-0,01073	0,000218	-0,00000288	0,998
40	0,8351	-0,00954	0,000156	-0,00000185	0,997
50	0,8345	-0,00857	0,000108	-0,00000108	0,998
60	0,8338	-0,00775	0,000065	-0,00000037	0,997
70	0,8331	-0,00718	0,000036	0,00000010	0,998
80	0,8319	-0,00646	-0,000010	0,00000094	0,998
90	0,8316	-0,00605	-0,000034	0,00000137	0,998

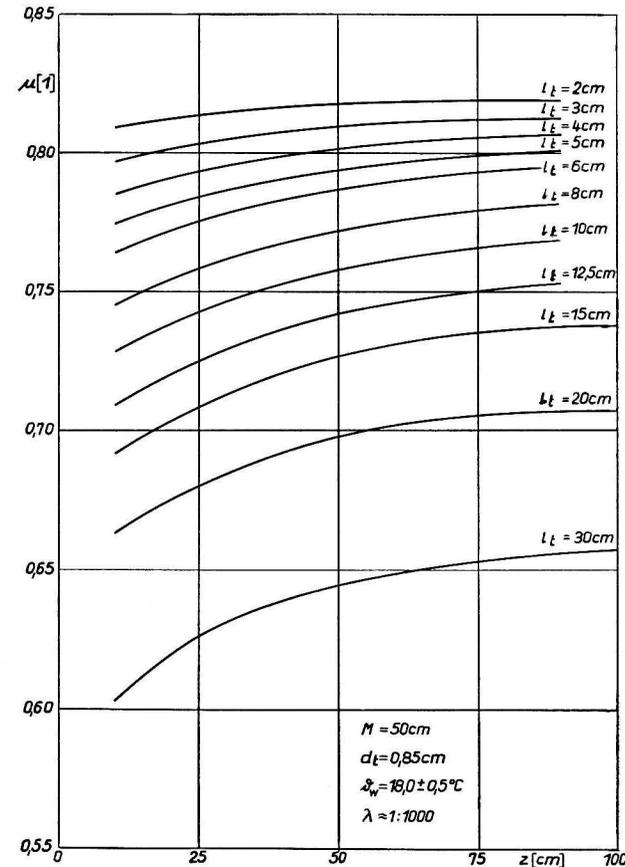


Abb. 12. Durchflußkoeffizient μ in Abhängigkeit von der Wasserstands-differenz z zwischen Pegel und Gewässer mit der Tubuslänge l_t als Parameter bei $\lambda \approx 1:1000$

Für die verwendeten Längen ergibt sich wieder ein μ zwischen 0,6 und 0,82. Durchflußkoeffizient und Tubuslänge variieren gegensinnig, während μ und z gleichsinnig wachsen. Allerdings nimmt der Einfluß von z mit kürzerem Tubus ab.

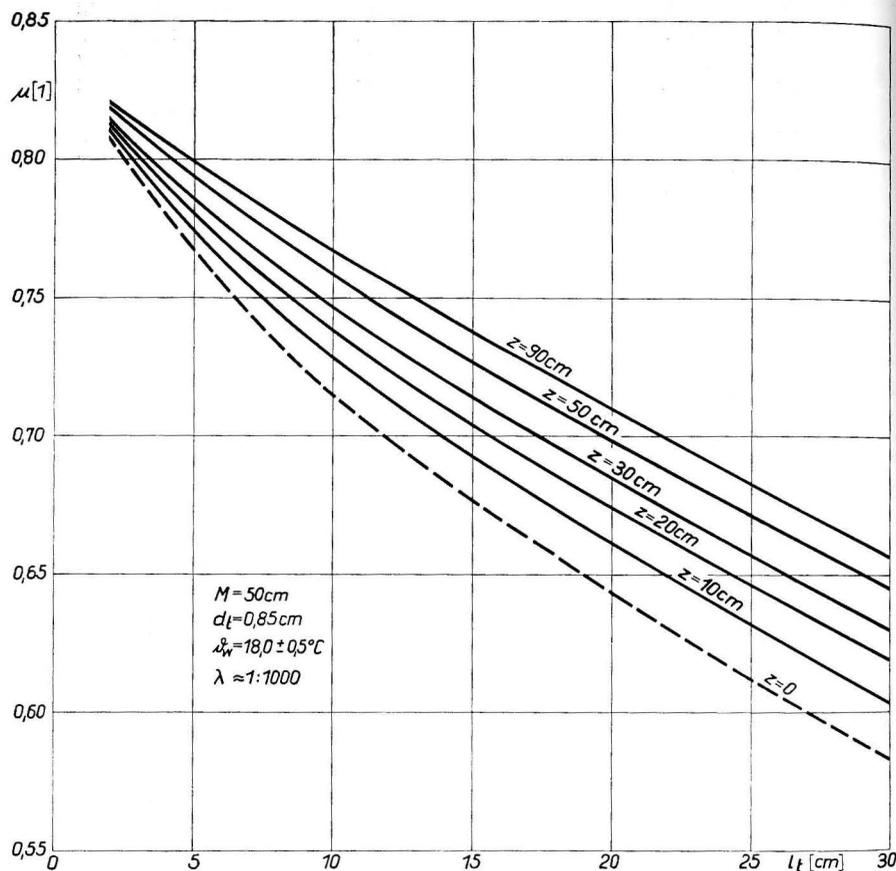


Abb. 13. Durchflußkoeffizient μ in Abhängigkeit von der Tubuslänge l_t mit z als Parameter bei $\lambda \approx 1:1000$

Die REYNOLDS-Zahlen im Tubus liegen weit über, diejenigen im Pegelrohr beträchtlich unter der kritischen REYNOLDS-Zahl (vgl. Tab. 6), so daß man im Pegelrohr mit laminaren, im Durchflußtubus aber mit turbulenten Strömungsverhältnissen rechnen muß.

Die bei kurzen Tuben noch relativ hoch liegenden Durchflußkoeffizienten resultieren aus der Tatsache, daß auch beispielsweise bei $l_t = 2,0$ cm der eingeschnürte Ausflußstrahl noch innerhalb des Tubus den ihm zur Verfügung stehenden Querschnitt wieder einnimmt und somit die Ausflußmenge vergrößert.

TABELLE 6

Die Extrema der Strömungsgeschwindigkeit und der REYNOLDS-Zahl im Durchflußtubus und im Pegelrohr bei $d_t = 0,85$ cm bzw. $\lambda \approx 1:1000$

	$l_t = 30,0$ cm; $z = 10$ cm $\mu = 0,603$	$l_t = 2,0$ cm; $z = 90$ cm $\mu = 0,819$
Durchflußtubus	$v = 84,5$ cm/s; $Re_t = 6800$	$v = 344,2$ cm/s; $Re_t = 27700$
Pegelrohr	$w = 0,08$ cm/s; $Re_s = 215$	$w = 0,34$ cm/s; $Re_s = 870$

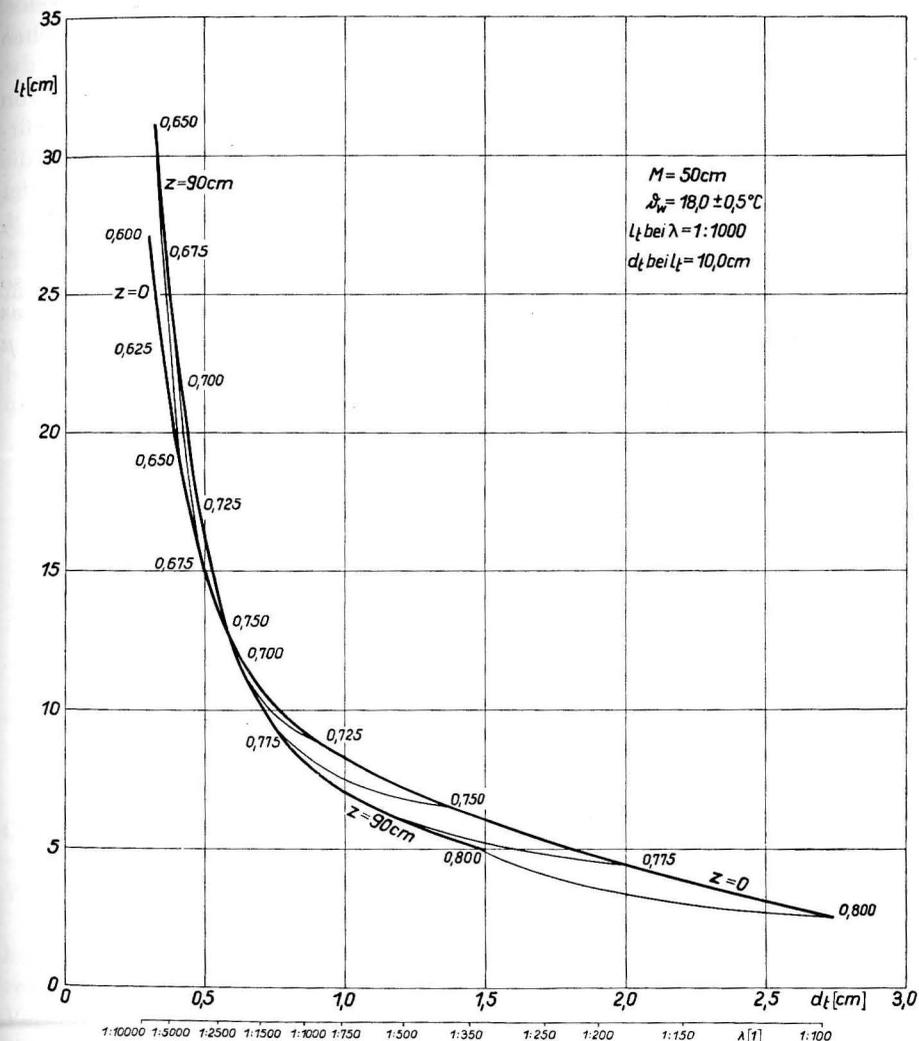


Abb. 14. Zuordnung von Tubuslänge l_t beim Dämpfungsverhältnis 1:1000 und Tubusdurchmesser d_t bei einer Tubuslänge von 10 cm in Abhängigkeit von μ und z

Die Aussagen aus den Messungen gelten nur innerhalb der vorgegebenen Tubuslängen $2 \leq l_t \leq 30$ cm. Kontrollmessungen bei Tubuslängen $l_t < 2$ cm haben ergeben, daß die Durchflußkoeffizienten wieder kleiner werden, wie es aus zahlreichen Untersuchungen über den Ausfluß von Wasser in Luft aus dünnwandigen Öffnungen in horizontalen Wänden auch bekannt ist.

Um Anhaltspunkte über die Größe des Durchflußkoeffizienten bei $z = 0$ zu erhalten, wurde μ als Funktion der Tubuslänge mit z als Parameter aufgetragen. Die Extrapolation in Abb. 13 ergab, daß der Durchflußkoeffizient bei $2 \leq l_t \leq 30$ cm zwischen 0,81 und 0,58 liegt. Auch bei diesen Kurven tritt eine Schärung auf, so daß für große Wasserstandsdifferenzen die Abhängigkeit zwischen μ und z geringer wird.

Die Darstellungen in Abb. 11 und 13 gestatteten eine direkte Zuordnung von Tubuslänge und Tubusdurchmesser in Abhängigkeit von μ und z , wobei natürlich die Einschränkung gilt, daß die Tubuslängen nur auf $d_t = 0,85$ cm und die Tubusdurchmesser auf $l_t = 10,0$ cm bezogen sind. Für ein konstantes μ findet man aus Abb. 11 für verschiedene z die dazugehörigen Tubusdurchmesser d_t und aus Abb. 13 für die gleichen z bestimmte Tubuslängen l_t . Trägt man diese über dem Durchmesser bzw. dem dazugehörigen Dämpfungsverhältnis auf, so ergibt sich das in Abb. 14 dargestellte Diagramm. Mit Hilfe dieses Diagramms findet man äquivalente Paare l_t ($d_t = 0,85$ cm), d_t ($l_t = 10,0$ cm) bei festem μ

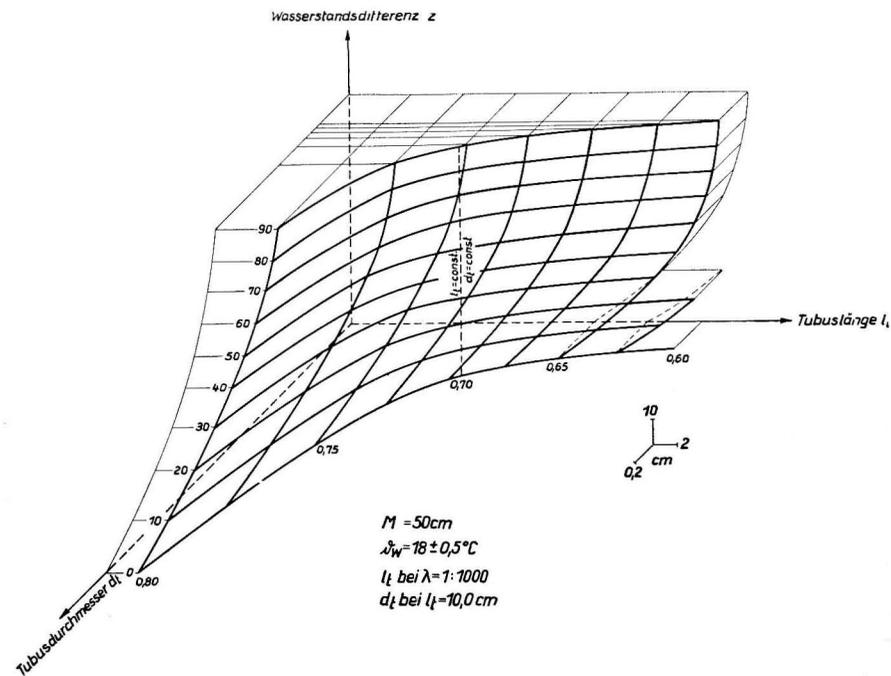


Abb. 15. μ -Fläche zwischen $z = 0$ und $z = 90$ cm, wobei die Tubuslänge auf $\lambda = 1:1000$ und der Tubusdurchmesser auf eine Tubuslänge von 10 cm bezogen ist

und z . Zu jedem Tubus zwischen 3 und 30 cm Länge und einem Durchmesser von 0,85 cm kann ein Tubus zwischen 0,3 und 2,7 cm Durchmesser und 10 cm Länge gefunden werden, der den gleichen Durchflußkoeffizienten besitzt. Große Durchflußkoeffizienten können einmal durch eine entsprechende Wahl des Tubusdurchmessers zwischen 1 und 2,5 cm bei $l_t = 10,0$ cm, zum anderen durch Tubuslängen zwischen 2,5 und 8 cm bei $\lambda = 1:1000$ erzielt werden. Die räumliche Darstellung des Diagramms, d. h. die Fläche, die der Durchflußkoeffizient zwischen $z = 0$ und $z = 90$ cm aufspannt, ist in Abb. 15 gezeigt. Daraus erhellt auch, daß eine Achse zwischen $0 \leq z \leq 90$ cm existiert, auf der für jedes z innerhalb dieser Grenzen $l_t \approx 12,5$ cm = const und $d_t \approx 0,59$ cm = const. wird.

6.3 Der Durchflußkoeffizient als Funktion des Quotienten aus Tubuslänge und Tubusdurchmesser

Bildet man für alle Durchflußtuben den Quotienten aus Tubuslänge und Tubusdurchmesser und trägt μ als Funktion von l_t/d_t auf, so ergibt sich das in Abb. 16 dargestellte Diagramm. Mit z als Parameter ordnen sich die Meßwerte in einer Kurvenschar an, die durch das Polynom

$$\mu_z = a_0 + a_1(l_t/d_t) + a_2(l_t/d_t)^2 + a_3(l_t/d_t)^3 \quad (20)$$

beschrieben werden kann. In Tab. 7 sind die Koeffizienten dieses Polynoms und der Korrelationskoeffizient r in Abhängigkeit von z zusammengestellt.

TABELLE 7

z [cm]	a_0 [1]	a_1 [1]	a_2 [1]	a_3 [1]	r [1]
10	0,8343	-0,01076	0,000219	-0,00000294	0,997
20	0,8327	-0,00855	0,000099	-0,00000097	0,996
30	0,8308	-0,00675	0,000003	0,00000058	0,996
40	0,8291	-0,00537	-0,000068	0,00000167	0,996
50	0,8289	-0,00464	-0,000100	0,00000208	0,995
60	0,8274	-0,00380	-0,000139	0,00000266	0,995
70	0,8270	-0,00335	-0,000159	0,00000294	0,995
80	0,8257	-0,00275	-0,000189	0,00000341	0,995
90	0,8245	-0,00234	-0,000206	0,00000363	0,996

Mit Hilfe des Polynoms (20) kann für Bodenreibungen von $\alpha = 90^\circ$ und Quotienten von l_t/d_t zwischen 2,5 und 30 der Durchflußkoeffizient abgeschätzt werden. Durch Interpolation der Koeffizienten des Polynoms können für alle Werte z zwischen 10 und 90 cm die Durchflußkoeffizienten berechnet werden.

Wie bei den Darstellungen $\mu = f(d_t)$ und $\mu = f(l_t)$, liegen die Durchflußkoeffizienten bei einem Durchmesser des Pegelrohres von $d_s = 27,0$ cm in einem relativ schmalen Band. Für größere Quotienten l_t/d_t , also große Längen im Verhältnis zum Durchmesser, wird μ kleiner. Die Wandreibung dürfte dann einen mehr und mehr dominierenden Einfluß auf den Durchflußkoeffizienten ausüben.

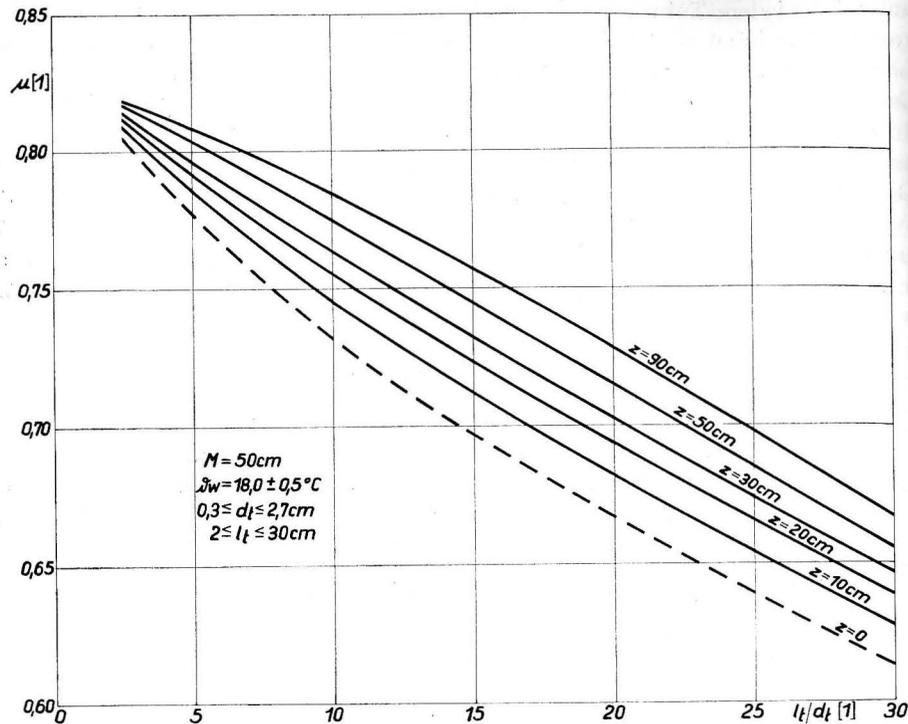


Abb. 16. Durchflußkoeffizient μ in Abhängigkeit vom Quotienten l_t/d_t mit z als Parameter

6.4 Der Durchflußkoeffizient als Funktion der Boden­neigung α bzw. der Strahl­führung α_t am Tubus

Durch die sprunghafte Änderung der Querschnitte in der Umgebung der Durchflußöffnung bei horizontalem Abschluß des Pegelrohres, d. h. Boden­neigung gegen die Vertikale gemessen gleich 90° , treten hydraulische Verluste beim Eintritt des Wassers in den Tubus auf. Diese Verluste gehen hauptsächlich in den Kontraktionskoeffizienten μ_2 ein. Führt man die Wasserteilchen kontinuierlich vom Querschnitt des Pegelrohres auf den Tubusquerschnitt, dann geht $\mu_2 \rightarrow 1$ und der Durchflußkoeffizient wird größer. Mit Hilfe von Trichtern oder Strahl­führungen direkt am Tubus kann eine Bündelung der Stromfäden erreicht und ein größeres μ realisiert werden.

Zur Bestimmung der Abhängigkeit des Durchflußkoeffizienten von der Nei­gung des Pegelrohrbodens und von einer Strahl­führung am Tubus sind die in Abb. 17 skizzierten Experimente für drei verschiedene Tubusdurchmesser ($d_t = 0,50 \text{ cm}$; $d_t = 0,85 \text{ cm}$; $d_t = 2,20 \text{ cm}$) durchgeführt worden. In Abb. 17 bedeuten α_t den gegen die Vertikale gemessenen Winkel der Strahl­führung, l_t die Länge des zylindrischen und l_α die Länge des angeschrägten Teiles des Durch­

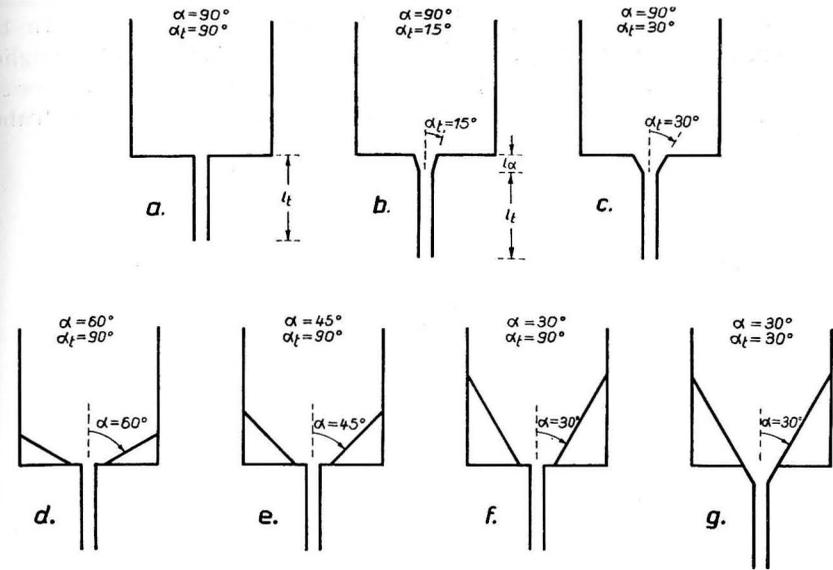


Abb. 17. Durchgeführte Experimente zur Untersuchung des Einflusses von Trichtern und Strahl­führungen auf den Durchflußkoeffizienten

flußtubus. Die Dimensionen der Tuben für die Versuche a, d, e und f können der Tabelle 1 b entnommen werden. Die entsprechenden Angaben für die in b, c und g skizzierten Tubusformen sind der Tabelle 8 zu entnehmen.

TABELLE 8
Durchflußtuben mit Strahl­führung

$\alpha_t = 15^\circ$				$\alpha_t = 30^\circ$			
d_t [cm]	l_t [cm]	l_α [cm]	λ	d_t [cm]	l_t [cm]	l_α [cm]	λ
0,501	10,00	4,66	1:2904	0,501	10,00	2,16	1:2904
0,851	10,01	4,01	1:1007	0,852	9,97	1,82	1:1004
2,202	9,99	1,49	1:150	2,203	9,99	0,69	1:150

Aus den insgesamt 3800 Messungen für rund 320 Meßpunkte resultieren die Darstellungen in Abb. 18, 19 und 20. Es fällt sofort ins Auge, daß der Einfluß der Trichter gering bleibt, solange nicht der Tubus selbst eine Strahl­führung besitzt bzw. die Trichter kontinuierlich in den Tubusquerschnitt übergehen. Letzteres ist für $\alpha = \alpha_t = 30^\circ$ untersucht worden und verursacht im Mittel eine Vergrößerung des Durchflußkoeffizienten gegenüber $\alpha = \alpha_t = 90^\circ$ von rund 8% bei $d_t = 0,50 \text{ cm}$, 11% bei $d_t = 0,85 \text{ cm}$ und etwa 15% bei $d_t = 2,20 \text{ cm}$.

Überraschend ist die Tatsache, daß Vergrößerungen von μ in derselben Grö­ßenordnung nur durch eine Strahl­führung am Tubus, aber ohne Trichter erreicht werden können. Bei einer Strahl­führung von $\alpha_t = 15^\circ$ und $\alpha = 90^\circ$ wurden

gegenüber $\alpha = \alpha_t = 90^\circ$ sogar um 12% größere Durchflußkoeffizienten bei $d_t = 0,50$ cm und um rund 17% größere bei $d_t = 0,85$ cm beobachtet. Lediglich für $d_t = 2,20$ cm wurden nur um 12% größere Durchflußkoeffizienten gemessen, wobei allerdings die Meßwerte auf Grund des schnellen Durchflusses im Tubus stark streuten.

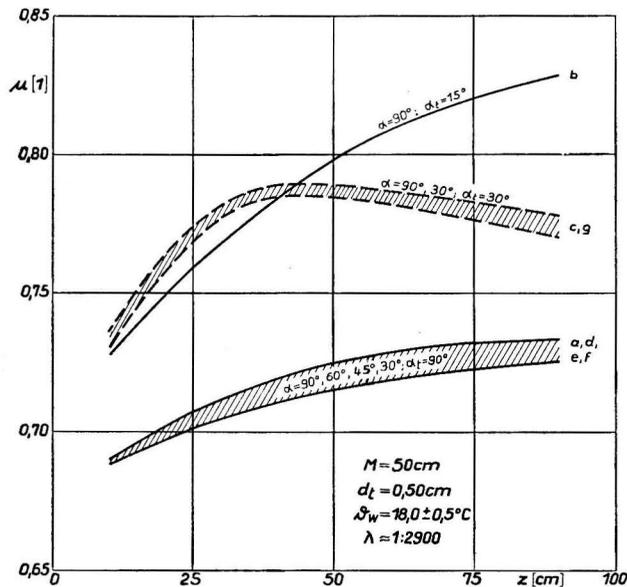


Abb. 18. Durchflußkoeffizient μ in Abhängigkeit von z bei $\lambda \approx 1:2900$ für ausgewählte Bodenneigungen α und Strahlführungen α_t

Die untersuchten Durchflußtuben setzen sich aus dem 10 cm langen zylindrischen Teil und dem in Abhängigkeit vom Tubusdurchmesser verschieden langen angeschrägten Teil zusammen. Es ist zu beobachten, daß trotz des bei $d_t = 0,50$ cm und $\alpha_t = 15^\circ$ beispielsweise um 4,66 cm längeren Tubus eine Vergrößerung des Durchflußkoeffizienten zu verzeichnen ist. Der Einfluß der Wandreibung auf μ ist weitaus geringer als die Vergrößerung durch die Strahlführung ausmacht.

Trichter besitzen also nur sehr geringe Bedeutung für die Verbesserung des Durchflußverhaltens von Rohrpegelanlagen. Inwieweit sie bei vertikaler Durchflußrichtung der Verschmutzung entgegenwirken, war nicht Gegenstand der Untersuchungen.

Für $d_t = 0,50$ cm, weniger für $d_t = 0,85$ cm, zeigte sich sowohl bei $\alpha = 90^\circ$ und $\alpha_t = 30^\circ$ als auch bei $\alpha = \alpha_t = 30^\circ$ ein Maximum zwischen $z = 40$ cm und $z = 50$ cm (für $d_t = 0,85$ cm nur bei $\alpha = 90^\circ, \alpha_t = 30^\circ$), für das die Beobachtungen mit einem Durchflußtubus von 2,20 cm Durchmesser keine Anhaltspunkte lieferten.

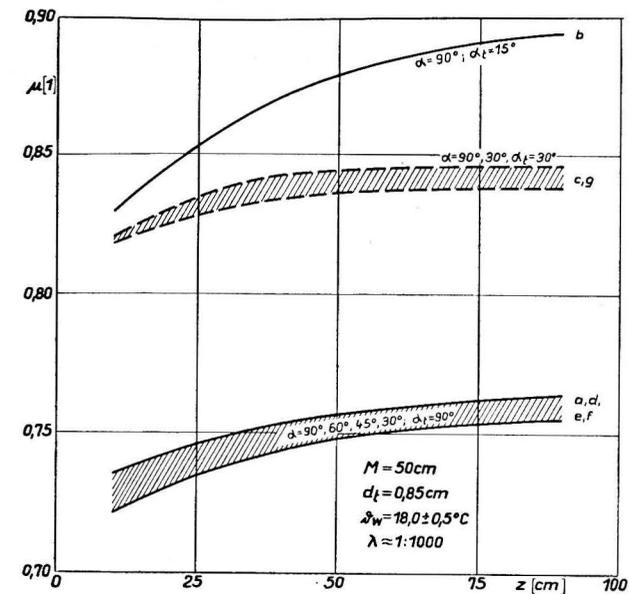


Abb. 19. Durchflußkoeffizient μ in Abhängigkeit von z bei $\lambda \approx 1:1000$ für ausgewählte Bodenneigungen α und Strahlführungen α_t

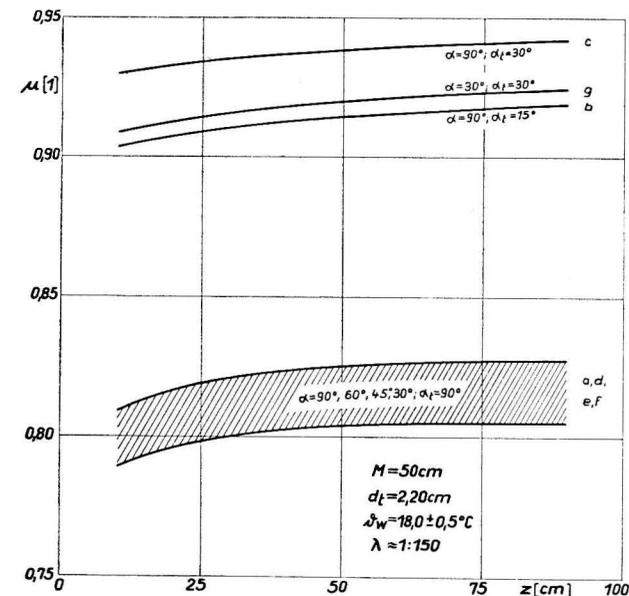


Abb. 20. Durchflußkoeffizient μ in Abhängigkeit von z bei $\lambda \approx 1:150$ für ausgewählte Bodenneigungen α und Strahlführungen α_t

Die nach Gl. (14) berechneten REYNOLDS-Zahlen im Tubus liegen wiederum weit über Re_{krit} (vgl. Tab. 9). Im Pegelrohr liegt die niedrigste REYNOLDS-Zahl bei 85, die gefundene maximale bei 6700.

TABELLE 9

Die Extrema der Strömungsgeschwindigkeit und der REYNOLDS-Zahl im Durchflußtubus und im Pegelrohr

	$l_t = 10,0 \text{ cm}; z = 10 \text{ cm};$ $d_t = 0,50 \text{ cm}; \alpha = \alpha_t = 90^\circ;$ $\lambda \approx 1:2900; \mu = 0,689$	$l_t + l_\alpha = 10,68 \text{ cm}; z = 90 \text{ cm};$ $d_t = 2,20 \text{ cm}; \alpha = 90^\circ; \alpha_t = 30^\circ;$ $\lambda \approx 1:150; \mu = 0,942$
Durchflußtubus	$v = 96,5 \text{ cm/s}; Re_t = 4560$	$v = 395,9 \text{ cm/s}; Re_t = 82000$
Pegelrohr	$w = 0,03 \text{ cm/s}; Re_s = 85$	$w = 2,6 \text{ cm/s}; Re_s = 6700$

Die obigen Untersuchungen zeigen, daß mit einfachen Mitteln nur durch Strahlführungen am Tubus die Durchflußkoeffizienten des Verbindungsrohres um etwa 10 bis 20% vergrößert werden können, ohne daß sich das Dämpfungsverhältnis ändert.

7. Schlußfolgerungen für den Bau von Rohrpegelanlagen

Neben den schon früher untersuchten Einflüssen der Reibung der Registrieranordnung [26] und der Dichteviationen im Pegelschacht [22] werden die Registrierpegel immer häufiger kritischen Prüfungen unterzogen [14, 23]. Auch der Einfluß von äußeren Strömungen in der Umgebung der Durchflußöffnung auf den Wasserstand im Pegelrohr wurde in jüngster Zeit in größerem Umfang untersucht [36].

Grundlegende Bedeutung für den Bau von Rohrpegeln haben auch die Modelluntersuchungen im Institut für Wasserbau in Gdańsk [7, 20]. Sie zeigen, daß man einerseits mit einem großen Dämpfungsverhältnis arbeiten muß, wenn zeitlicher Verlauf und Amplitude der äußeren Wellenbewegung richtig im Pegelrohr abgebildet werden sollen. Andererseits werden aber bei großem Dämpfungsverhältnis die kurzperiodischen Windwellen ebenfalls wiedergegeben. Letzteren Effekt kann man durch möglichst tiefes Anbringen der Durchflußöffnung unter dem Meeresspiegel teilweise eliminieren. Bei im Verhältnis zur Wellenlänge kleinen Pegelrohrdurchmessern hat die Lage der Durchflußöffnung in bezug auf die Richtung der Wellen praktisch keinen Einfluß. Auch die Anzahl der Durchflußöffnungen ist, wie die Untersuchungen ergaben, von untergeordneter Bedeutung; entscheidend ist der gesamte Öffnungsquerschnitt.

Für die Berechnungen verwendeten BOCZAR-KARAKIEWICZ, KARWOWSKI und KWIDZIŃSKA-BENDYKOWSKA [7, 20] einen Durchflußkoeffizienten von $\mu = 0,6$. Die Modelluntersuchungen wurden zum Teil mit Durchflußöffnungen von 0,4 cm Länge und Durchmessern zwischen 0,3 und 0,8 cm vorgenommen. Sicher hat bei diesen Experimenten auch der Durchflußkoeffizient eine Rolle gespielt.

Die Unterdrückung der kurzperiodischen Windwellen und der durch Wasserfahrzeuge aller Art ausgelösten Wellenbewegungen, die grundsätzlich bei Wasserstandsregistrierungen unerwünscht sind, kann durch kleine Dämpfungsverhältnisse erreicht werden. Darüber hinaus wird die Wirkung kurzperiodischer Störungen auch durch eine tiefer unter der Wasseroberfläche liegende Durchflußöffnung gedämpft, da die Störungsamplitude mit der Tiefe abnimmt. Ein kleines Dämpfungsverhältnis führt aber zu größeren Phasenverschiebungen der Wellenbewegung im Pegelrohr gegenüber derjenigen im freien Gewässer. Diesem Effekt kann durch ein größeres μ entgegengewirkt werden. Damit kommt man der theoretisch möglichen Durchflußgeschwindigkeit

$$v = \sqrt{2gz} \quad (1)$$

näher und erzielt ein schnelleres Angleichen des Innenwasserstandes an die äußere Störung auch bei kleineren Dämpfungsverhältnissen. Das bedeutet aber, daß der durch ein kleineres λ bewirkte Dämpfungseffekt durch ein größeres μ in entgegengesetztem Sinne beeinflusst wird.

Für die Arbeitsweise von Schacht- und Rohrpegelanlagen müssen daher Dämpfungsverhältnis und Durchflußkoeffizient stets im Zusammenhang betrachtet werden. Beide sind durch die Gleichung

$$k = \mu \lambda \sqrt{2g} \quad (21)$$

miteinander verknüpft. Aus Abb. 21 kann man ablesen, in welchen Grenzen sich λ und μ bewegen können, ohne daß sich k ändert, d. h. ohne daß die Dämpfungseigenschaften einer Pegelanlage beeinflusst werden. Für Werte $0,05 \geq k \geq 0,003 \text{ [cm}^{1/2} \text{ s}^{-1}]$ sind die Dämpfungseigenschaften von Pegelanlagen in Abhängigkeit von der Störungsperiode bei SAGER und Mitarbeitern [42] ausführlich behandelt. Dazu ist aber sowohl die Kenntnis von λ als auch von μ erforderlich. Während jedoch λ durch das Verhältnis der Querschnitte von Tubus und Pegelrohr sofort gegeben ist, kann der Durchflußkoeffizient μ nur auf experimentellem Wege genau ermittelt werden.

Die Untersuchungen am Rohrpegelmodell zeigen, daß bei allen untersuchten Tuben der Durchflußkoeffizient oberhalb $\mu = 0,6$ liegt. Ein Wert von $\mu = 0,6$ dürfte daher in der Praxis bei kurzen Durchflußtuben und $l_t > 2d_t$ weniger häufig sein, als im allgemeinen angenommen wird. Bei großen Dämpfungsverhältnissen zwischen $\lambda = 1:100$ und $\lambda = 1:150$ bzw. kurzen Längen zwischen 2 und 5 cm werden unter der Voraussetzung, daß $l_t > 2d_t$ ist, Werte von μ um 0,8 erreicht.

Weiterhin muß beachtet werden, daß der Durchflußkoeffizient μ von der Wasserstands Differenz z zwischen Pegelrohr und Gewässer abhängt. Die mehrfach angewandte Berechnung des Einflusses von Wasserstandsstörungen auf Rohrpegel unter Benutzung eines von z unabhängigen Durchflußkoeffizienten kann daher die Wasserstandsverhältnisse im Pegelrohr nur in erster Näherung beschreiben.

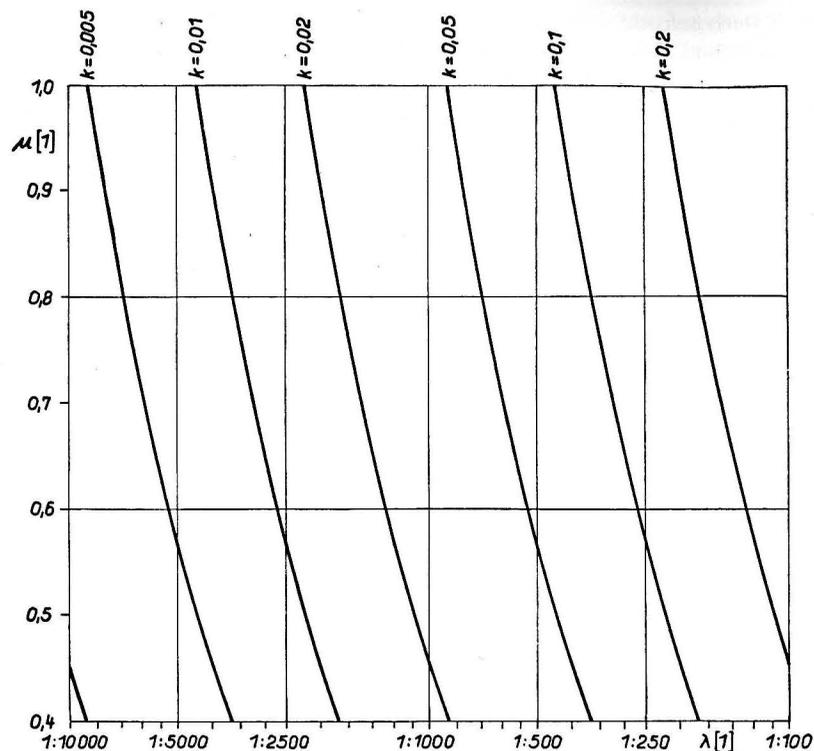


Abb. 21. Zusammenhang zwischen Dämpfungsverhältnis λ , Durchflußkoeffizient μ und Dämpfungskoeffizient k (dem Abszissenmaßstab ist die Dezimalschreibweise der Dämpfungsverhältnisse zugrunde gelegt)

Bei der Errichtung von Rohrpegeln ist auf Grund der durchgeführten Untersuchungen folgendes zu beachten:

1. Eine direkte Bohrung in der relativ dünnen Wandung des Pegelrohres hat zumal bei größeren Dämpfungsverhältnissen kleinere Durchflußkoeffizienten zur Folge.
2. Lange Durchflußtuben verringern ebenfalls den Durchflußkoeffizienten durch größere Reibung im Tubus.
3. Die Durchflußkoeffizienten werden mit wachsendem Tubusdurchmesser, also größerem Dämpfungsverhältnis, ebenfalls größer. Unter Berücksichtigung der Umweltbedingungen am Aufstellungsort kann man durch Wahl des günstigsten Dämpfungsverhältnisses mit entsprechender Tubuslänge einen optimalen Durchflußkoeffizienten erzielen.
4. Das aus ökonomischen Erwägungen nur für eine Tubuslänge bei variablem Durchmesser und ein Dämpfungsverhältnis bei variabler Länge aufgestellte Diagramm (Abb. 14) zeigt, daß für jeden Tubus bestimmter Länge, festen

Durchmessers sowie vorgegebener Wasserstands-differenz z ein in bezug auf μ äquivalenter Tubus anderer Länge und anderen Durchmessers gefunden werden kann. Das bedeutet z. B., daß man einen Tubus von $l_t = 10$ cm, $d_t = 2,7$ cm (d. h. $\lambda = 1:100$) durch einen Tubus mit $l_t = 2,7$ cm, $d_t = 0,85$ cm (also $\lambda = 1:1000$) bei gleichem $\mu \approx 0,8$ und $z = 0$ ersetzen kann (vgl. Abb. 14).

5. Noch deutlicher zeigt sich das in der Darstellung $\mu = f(l_t/d_t)$ (Abb. 16), die es gestattet, bei konstantem Durchflußkoeffizienten μ , fester Wasserstands-differenz z und Pegelrohrdurchmesser $d_t = 27,0$ cm jeder Länge l_t einen entsprechenden Durchmesser d_t zuzuordnen. Da das Diagramm aus Messungen mit Durchmessern $0,3 \leq d_t \leq 2,7$ cm und Längen $2 \leq l_t \leq 30$ cm resultiert, ist eine Verallgemeinerung über eine der angegebenen Grenzen hinaus nicht statthaft.
6. Die Verwendung von Trichtern im Pegelrohr, durch die die Wasserteilchen direkt auf die Durchflußöffnung gelenkt werden, ist nur dann von Nutzen, wenn sie sich bis zum Tubusdurchmesser hin kontinuierlich verjüngen. Sobald Störungen auftreten, die die Wasserteilchen in horizontale Richtungen umlenken, ist praktisch keine Vergrößerung des Durchflußkoeffizienten zu verzeichnen.
7. Strahlführungen nur durch Trichter direkt am Durchflußtubus, wobei der überwiegende Teil des Pegelrohrbodens horizontal bleibt, bringen Vergrößerungen des Durchflußkoeffizienten um 10 bis 20 Prozent. Zusätzlich verwendete Trichter, die den Pegelrohrdurchmesser kontinuierlich auf den Tubusdurchmesser verkleinern, verursachen praktisch kein größeres μ mehr. Lediglich aus Gründen langsamerer Verstopfung der Anlagen könnte es angebracht sein, diese zusätzlichen Trichter bei vertikaler Durchflußrichtung zu verwenden.

Dem Direktor des Instituts für Meereskunde, Herrn Dr. K. VORGT, danke ich für die Möglichkeit, die Untersuchungen im Rahmen der Institutsaufgaben durchführen zu können. Die Anregung zur Bearbeitung der Thematik gab Herr Dr. habil. G. SAGER, dem mein besonderer Dank für viele Diskussionen, Ratschläge und Hinweise zum Fortgang der Arbeiten gilt. Die Herren Prof. Dr. H. WULFHEKEL und Prof. Dr. H. REINHARD hatten die Freundlichkeit, die Gutachten für die Dissertationsarbeit zu übernehmen.

Herrn Ingenieur W. SCHMIDT, Warnemünde, danke ich für die konstruktive Gestaltung des Rohrpegelmodells. Die Fertigung der Durchflußtuben oblag Herrn Mechanikermeister K. LEHMANN, der sie mit Sorgfalt und Umsicht ausführte. Für technische Hilfsarbeiten sei dem Mathematisch-technischen Assistenten Herrn R. SAMMLER und der Rechentechnikerin Frl. H. DAEBELER Dank gesagt.

Literatur

- [1] Anonym, Richtlinien für die Errichtung hydrologischer Stationen, Pegelstationen. Veröff. d. MHD d. DDR, Berlin, H. 13 (1953), 48 S.
- [2] Anonym, Richtlinien für den Bau von Pegeln 1958. Bearbeitet vom Pegelausschuß der deutschen gewässerkundlichen Dienststellen. MHD d. DDR, Potsdam 1958, 51 S.
- [3] Anonym, Empfehlungen der IV. Konferenz der Ozeanographen der Ostsee in Warnemünde vom 22.—24. 4. 1964. Warnemünde 1964. Empfehlung 1964—9, S. 3.
- [4] Anonym, Manual of tide observations. U.S. Coast & Geodetic Survey, Publ. 30—1, Washington 1965, 72 S.
- [5] ALBRING, W., Angewandte Strömungslehre. Dresden und Leipzig 1961.
- [6] BALAY, M. A., Differential tide-gauge for recording seiches. Int. Hydrogr. Rev., Monaco, 28 (1951), No. 2, S. 92—95.
- [7] BOCZAR-KARAKIEWICZ, B., KARWOWSKI, J., KWIDZIŃSKA-BENDYKOWSKA, G., Zagadnienia wybrane dotyczące zasady działania i pracy mareografu. Rozprawy Hydrotechniczne, Warszawa-Poznań, H. 13 (1963), S. 3—55.
- [8] Бондаренко, А. Л., К вопросу о регистрации мареографом периодических и непериодических колебаний уровня моря. Труды Морск. Гидрофиз. Инст., АН УССР, Киев, т. 28 (1963), стр. 59—64.
- [9] Бондаренко, А. Л., К вопросу о регистрации колебаний уровня моря приборами с нелинейными фильтрующими системами. Метеорология и Гидрология, Москва, № 5 (1968), стр. 58—65.
- [10] Доброклонский, С. В., К теории записи мареографом периодических колебаний уровня моря. Журн. Геофиз., Москва-Ленинград, 6 (1936), № 2/3, стр. 230—248.
- [11] ЕСК, В., Technische Strömungslehre. 6. Aufl., Berlin-Göttingen-Heidelberg 1961.
- [12] FÖPPL, A., Vorlesungen über technische Mechanik. Bd. 1: Einführung in die Mechanik. München und Berlin 1943.
- [13] FORCHHEIMER, P., Hydraulik. Leipzig und Berlin 1914 und 1930.
- [14] GOUGENHEIM, A. et VAN DE CASTEELE, C., Au sujet du contrôle du fonctionnement des marégraphes enregistreurs. Cah. Océanogr., Paris, 20 (1968), No. 1, S. 19—24.
- [15] HELMHOLTZ, H., Über diskontinuierliche Flüssigkeitsbewegungen. Monatsber. Königl. Akad. Wiss., Berlin 1868. Abgedruckt in Ostwald's Klassiker der exakten Wiss., Leipzig, Nr. 79 (1896), S. 38—48.
- [16] HIKOSAKA, S., Note on the dimensions of the tide well and pipe of the tide house. Hydrogr. Bull., Tokyo, No. 78 (1964), S. 50—52.
- [17] HÜTTE, des Ingenieurs Taschenbuch. Bd. 1: Theoretische Grundlagen. 28. Aufl., Berlin 1955.
- [18] KIRCHHOFF, G., Zur Theorie freier Flüssigkeitsstrahlen. J. f. reine u. angew. Mathematik, Berlin, 70 (1869), H. 4, S. 289—298.
- [19] KOHLRAUSCH, F., Praktische Physik, Bd. 2. 21. Aufl., Stuttgart 1962.
- [20] KWIDZIŃSKA-BENDYKOWSKA, G., BOCZAR-KARAKIEWICZ, B., Wpływ zaburzonego działania fali i wymiarów mareografu na jego notowania. Rozprawy Hydrotechniczne, Warszawa-Poznań, H. 15 (1964), S. 165—180.
- [21] LAMB, H., Lehrbuch der Hydrodynamik. Berlin und Leipzig 1931.
- [22] LENNON, G. W., The behaviour of a stilling-well in the presence of periodic density variations. Tidal Inst. & Observatory, Birkenhead, Internal Rep., No. 7 (1966).
- [23] LENNON, G. W., A critical examination of the conventional tide gauge. Proc. Symp. Tides, Monaco 1967. Int. Hydrogr. Rev., Suppl., Monaco (im Druck).
- [24] MATTHÄUS, W., Bedeutung, Entwicklung und Dimensionierung von Registrierpegelanlagen. Dissertation, Greifswald 1969 (unveröffentlicht).
- [25] MATTHÄUS, W., Die Messung von Durchflußkoeffizienten an Rohrpegelmodellen. Monatsber. Dt. Akad. Wiss., Berlin, 11 (1969), S. 315—321.

- [26] MIEHLKE, O., Was registriert ein Schreibpegel wirklich? Ann. f. Hydrographie, Stralsund, H. 5/6 (1956), S. 112—118.
- [27] v. MISES, R., Elemente der technischen Hydromechanik, 1. Teil. Leipzig und Berlin 1914.
- [28] MODEL, F., Pegelstationen des Kriegsmarine-Pegelnetzes der Ostsee. Aus d. Archiv d. Dt. Seewarte u. d. Marineobs., Hamburg, 61 (1941), H. 2, 54 S.
- [29] MOSTKOW, M. A., Handbuch der Hydraulik. Berlin 1956.
- [30] PALMER, H. R., Description of a graphical register of tides and winds. Phil. Trans. Roy. Soc., London, 121 (1831), S. 209—213.
- [31] PLANCK, M., Zur Theorie der Flüssigkeitsstrahlen. Ann. Phys. Chem., N. F., Leipzig, 21 (1884), S. 499—509.
- [32] PRANDTL, L., Strömungslehre. 4. Aufl., Braunschweig 1956.
- [33] PREISLER, G., Der plastische Stoß als Grundlage einer einheitlichen Theorie der hydraulischen Verluste. Habilitationsschrift, Dresden 1967.
- [34] PRESS, H. und SCHRÖDER, R., Hydromechanik im Wasserbau. Berlin-München 1966.
- [35] RICHTER, H., Rohrhydraulik. 4. Aufl., Berlin-Göttingen-Heidelberg 1962.
- [36] ROSSITER, J. R., Tidal Institute and Observatory Birkenhead, Annual Report 1967. Liverpool 1968. Siehe: HALLIWELL, A. R., and PERRY, T. G., Errors in tide gauges. The Dock & Harbour Authority, London, 48 (1968), No. 568, S. 305—308.
- [37] RÜHLMANN, M., Hydromechanik. 2. Aufl., Hannover 1880.
- [38] SAGER, G., Einfluß von Wasserstandsstörungen auf Registrierpegel. Ann. f. Hydrographie, Stralsund, H. 4 (1956), S. 79—105.
- [39] SAGER, G., Grundlagen zur Berechnung von Registrierpegeln. Wasserwirtschaft-Wassertechnik, Berlin, 8 (1958), S. 455—459.
- [40] SAGER, G., Die numerische Bestimmung des Einflusses periodischer Wasserstandsstörungen auf Registrierpegel. Beitr. Meereskunde, Berlin, H. 4 (1961), S. 9—53.
- [41] SAGER, G. und MATTHÄUS, W., Die Abbildung periodischer Wasserstandsstörungen in Rohrpegeln. Monatsber. Dt. Akad. Wiss., Berlin, 9 (1967), S. 809—816.
- [42] SAGER, G., MATTHÄUS, W. und SAMMLER, R., Die Berechnung von Einschwingvorgängen bei Rohrpegeln. Beitr. Meereskunde, Berlin, H. 22 (1968), S. 61—101.
- [43] SCHNEIDER, A., Die versuchsmäßige Bestimmung der Ausflußzahlen von Poncelet-öffnungen für Wasser und Kochsalzlösungen und Erörterung des inneren Zusammenhanges dieser Zahlen. Z. d. VDI, Berlin, 61 (1917), S. 532—537.
- [44] SCHNEIDER, A., Ausflußkoeffizienten von Poncelet-Öffnungen. Forschungsarb. Geb. Ingenieurwesens, Berlin, H. 213 (1919), 66 S.
- [45] SHIPLEY, A. M., On measuring long waves with a tide gauge. Dt. Hydrogr. Z., Hamburg, 16 (1963), S. 136—140.
- [46] WEISBACH, J., Untersuchungen in dem Gebiete der Mechanik und Hydraulik. 2. Teil: Versuche über die unvollkommene Kontraktion des Wassers beim Ausfluß desselben aus Röhren und Gefäßen. Leipzig 1843.
- [47] WEISBACH, J., Lehrbuch der Ingenieur- und Maschinenmechanik. 1. Teil: Theoretische Mechanik. Braunschweig 1855.
- [48] WEISBACH, J., Experimentalhydraulik. Freiberg 1855.
- [49] WIEGHARDT, K., Theoretische Strömungslehre. Stuttgart 1965.
- [50] Вольфцун, И. Б., Расчет площади сечения трубы, соединяющей верхний бьеф водослива с колодезем самописца. Метеорология и Гидрология, Ленинград, № 1 (1955), стр. 41—42.

Abschluß der Arbeit: 1. 12. 1968

Anschrift des Verfassers: Dr. W. MATTHÄUS, Institut für Meereskunde,
253 Warnemünde, Seestr. 15