

# INTERNATIONALE REVUE DER GESAMTEN HYDROBIOLOGIE

Begründet von R. WOLTERECK

Herausgegeben von Prof. Dr. HUBERT CASPERS,  
Prof. Dr. FRITZ GESSNER, Prof. Dr. ARNO WETZEL

Jährlich 6 Hefte — je Heft 160 Seiten m. Abbildungen — 16,7 × 24 cm —  
je Heft 35,— M; Bestell-Nr. 1071

Im Jahre 1972 erscheint der 57. Band der „Internationalen Revue der gesamten Hydrobiologie“. Als die Zeitschrift 1959 nach 15jähriger Unterbrechung mit Band 44 ihr Erscheinen wieder aufnahm, errang sie in kurzer Zeit ihr internationales Ansehen zurück und konnte ihren Abonnementkreis erheblich erweitern. In ständig wachsendem Maße ist es ihr gelungen, Manuskripte aus allen Teilen der Welt zu erhalten und in der Thematik den vielen Forschungsbereichen der limnischen und marinen Biologie zu entsprechen. Mehr und mehr kommen dabei neben der Grundlagenforschung die angewandten Zweige der Hydrobiologie zur Geltung, vor allem Fragen der Abwasserbelastung der Gewässer. Auch für systematische Analysen aquatischer Organismengruppen bietet die „Revue“ Publikationsmöglichkeiten. Bevorzugt und in steigendem Maße kommen nunmehr — neben deutschen und französischen Arbeiten — englischsprachige Manuskripte zum Abdruck.

Der internationale Stab der Mitarbeiter gewährleistet den internationalen Charakter der Zeitschrift.

Entsprechend ihrer Tradition als der ältesten internationalen Zeitschrift auf hydrobiologischem Gebiet soll die „Revue“ auch weiterhin ein Band zwischen den Hydrobiologen in aller Welt sein.

*Bestellungen durch eine Buchhandlung erbeten*



AKADEMIE-VERLAG · BERLIN

DAW  
Institut für Meereskunde  
Warnemünde  
— Bibliothek —

19. Juni 1972

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 30/31



AKADEMIE-VERLAG · BERLIN

1972

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 30/31

mit 95 Abbildungen und 14 Tabellen



---

AKADEMIE-VERLAG · BERLIN

1972

Theoretische und praktische Arbeiten  
zur Untersuchung der Ausbreitung von Beimengungen im Meer

Теория и методы исследований диффузии примесей в море

Aus der Arbeit der Problemkommission  
„Planetare Geophysikalische Forschungen“  
der Akademien der Wissenschaften sozialistischer Länder (KAPG)

Из работа Комиссии многостороннего сотрудничества  
академий наук социалистических стран по комплексной проблеме  
„Планетарные геофизические исследования“ (КАПГ)

7972.482

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

Copyright 1972 by Akademie-Verlag GmbH

Lizenznummer: 202 · 100/472/72

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

Bestellnummer: 761 676 9 (2105/30-31), ES 18 E 4

Printed in German Democratic Republic

## INHALT

VOIGT, K., Vorwort . . . . .	7
AITSAM, A. M., ASTOK, V. K. und JUCHAT, M. K., Die Berechnungsmethodik statistischer Charakteristiken der Konzentrationspulsationen von Beimengungen im Meer . . . . .	9
ASTOK, V. K., GEZENCVEJ, A. N., OZMIDOV, R. V. und JUCHAT, M. K., Statistische Charakteristiken von Konzentrationspulsationen in einem stationären Beimengungsstrahl im Meer. . . . .	15
ASTOK, V. K. und OZMIDOV, R. V., Statistische Charakteristiken der Pulsationen von Beimengungen einer momentanen Punktquelle (nach Versuchen in der Ostsee)	27
BROSIN, H. J., Untersuchungen zur horizontalen turbulenten Diffusion in den Gewässern um Rügen. . . . .	35
BROSIN, H. J., GEZENCVEJ, A. N., KARABAŠEV, G. S., KREMSEK, U., LE KUANG TOAI, MURAV'EV, S. S., OZMIDOV, R. V. und VOIGT, K., Das mittlere dreidimensionale Bild der Diffusion von Beimengungen aus momentanen Punktquellen im Meer . . . . .	41
OZMIDOV, R. V. und KARABAŠEV, G. S., Methodik zur Untersuchung der Diffusion von Beimengungen im Meer mit Hilfe lumineszenter Indikatoren . . . . .	55
KARABAŠEV, G. S., Ein optisches Schleppgerät für die Messungen der Konzentration von lumineszenten Indikatoren im Meer . . . . .	67
CEGLARSKI, R., ZEIDLER, R. und ZELAZNY, E., Die Anwendung eines Fluorometers bei in-situ-Messungen der Meeresdiffusion . . . . .	81
KARABAŠEV, G. S., Perspektiven der Anwendung von Lumineszenzmethoden zur Untersuchung der Ausbreitungsprozesse von Beimengungen im Meer . . . . .	93

KREMSER, U., Die Wirkung „nichtturbulenter“ Prozesse auf die Konzentration eines Rhodamin-S-Fleckes im Meer unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses von Phytoplankton, suspendierten Sedimenten und Sonnenstrahlung . . . . .	101
HUPFER, P. und LASS, H. U., Temperaturfeld und horizontaler turbulenter Wärmeaustausch in der ufernahen Zone des Meeres . . . . .	127
ZEIDLER, R., Versuch zur Bestimmung der Struktur der turbulenten Bewegung des Meeres in der ufernahen Zone . . . . .	129
ZAC, V. I. und ANDRJUŠENKO, B. F., Einige Ergebnisse von Untersuchungen über die turbulente Diffusion von Farbflecken an der Meeresoberfläche mit Hilfe von Luftbildaufnahmen . . . . .	153
ZAC, V. I. und NEMIROVSKIJ, M. S., Untersuchung der Vermischungs- und Verdünnungsprozesse von Verunreinigungen in Abwassereinleitungsgebieten im Meer mit Hilfe fluoreszierender Indikatoren . . . . .	163
GEZENCVEJ, A. N., MURAV'EV, S. S. und OZMIDOV, R. V., Räumliche statistische Charakteristiken der Konzentrationsschwankungen von Beimengungen nach Versuchen im Schwarzen Meer . . . . .	173
Zusammenfassung der Beiträge in russischer Sprache . . . . .	187

## Vorwort

Im Jahre 1967 beschloß die Problemkommission der Akademien sozialistischer Länder zur multilateralen Bearbeitung von Problemen der planetaren Geophysik für die Jahre 1968—70 die Bildung einer gemeinsamen Arbeitsgruppe für theoretische und experimentelle Untersuchungen über die Ausbreitung künstlicher Beimengungen im Meer.

Mit der Leitung der Arbeitsgruppe wurde der Unterzeichnete auf Vorschlag der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin beauftragt.

Nach einem Symposium im Januar 1968 in Moskau über Diffusions- und Vermischungsprozesse im Meer wurden Pläne für Experimente in der Ostsee abgestimmt, die im August des Jahres mit dem DDR-Forschungsschiff „Professor Albrecht Penck“ durchgeführt wurden. Dabei wurden erstmals auch im strandnahen Flachwasserbereich vor Zingst mit Unterstützung des Maritimen Observatoriums der Karl-Marx-Universität Leipzig Versuche vorgenommen.

Im Sommer 1969 wurden mit 2 Schiffen, dem DDR-Forschungskutter „Professor Otto Krümmel“ und dem polnischen Kutter „Anetka“, die experimentellen Versuche des Jahres 1968 fortgesetzt.

Ein 3tägiges Symposium im August 1970 in Warnemünde brachte die abschließende Beratung der gemeinsam geplanten, durchgeführten und ausgewerteten Untersuchungen, wobei eine Reihe weiterführender und methodischer Einzeluntersuchungen zur Gesamtproblematik in die Diskussion einbezogen wurden.

Das vorliegende Doppelheft enthält die wissenschaftlichen Ergebnisse dieser Zusammenarbeit.

Es ist mir ein Bedürfnis, an dieser Stelle allen Teilnehmern und Autoren aus den beteiligten Staaten für die mehrjährige Mitarbeit zu danken. Dabei möchte ich als die leitenden wissenschaftlichen Mitarbeiter besonders hervorheben: aus der UdSSR die Kollegen Dr. R. V. OZMIDOV und Dr. G. S. KARABAŠEV, aus der VR Polen den Kollegen Dr. R. ZEIDLER, aus der VR Bulgarien den Kollegen Dipl.-Ing. S. BELBEROV und aus der DDR den Kollegen Dr. H. J. BROSIK, der zusammen mit Dr. U. KREMSER auch die umfangreichen Übersetzungsarbeiten und die Vorbereitung zur Drucklegung ausführte.

Mein Dank gilt ferner den Direktoren der Forschungseinrichtungen, die persönlich und durch ihre Mitarbeiter, Meßgeräte, Ausrüstungen und Schiffe die gemeinsame Arbeitsgruppe und ihre Vorhaben unterstützten, wobei ich vor allem den Kollegen Prof. Dr. A. S. MONIN, Dr. A. A. AKSENOV und Dr. K. V. MOROŠKIN vom Institut für Ozeanologie „P. P. Širšov“ der ANSSSR in Moskau bzw. dessen Atlantischer Abteilung in Kaliningrad sowie Mgr. Inz. J. RYBINSKI vom Instytut Gospodarki Wodnej, Zakład Ochrony Wod Gdansk und Prof. Dr. O. HUECKEL vom Instytut Budownictwa Wodnego der PAN in Gdansk sehr verpflichtet bin.

Warnemünde, im April 1971

Dr. KLAUS VOIGT

## Die Berechnungsmethodik statistischer Charakteristiken der Konzentrationspulsationen von Beimengungen im Meer

A. M. AITSAM, V. K. ASTOK und M. K. JUCHAT

Das Konzentrationsfeld von Beimengungen im turbulenten Medium kann im allgemeinen durch ein  $n$ -dimensionales Zufallsfeld beschrieben werden, wobei  $n$  die Anzahl der verschiedenen Stoffe im zu betrachtenden Medium ist.

In der Gegenwart ist die Bestimmung des oben erwähnten Zufallsfeldes in allgemeiner Form unreal, jedoch kann in vielen in der Praxis anzutreffenden Fällen die Konzentration der einzelnen Stoffe als voneinander statistisch unabhängig betrachtet werden, und es können an Stelle des  $n$ -dimensionalen Feldes die skalaren Zufallsfelder der einzelnen Beimengungen betrachtet werden.

Vierdimensionale skalare Zufallsfelder einer Tracerkonzentration besitzen eine Eigenschaft, die sie von anderen Zufallsfeldern unterscheidet. Gewöhnlich verstehen wir unter einem Zufallsfeld ein Feld, das im Ergebnis eines Versuches in dieser oder jener konkreten Form angenommen werden kann und welches im voraus unbekannt ist. Für die Wahrscheinlichkeitsanalyse des zufälligen Feldes ist es notwendig, ein Ensemble von Realisierungen des zu untersuchenden Feldes zu besitzen. Man erhält es durch die Wiederholung der Versuche unter den gleichen Bedingungen.

Die äußeren Bedingungen, die das skalare Konzentrationsfeld in Abhängigkeit von der Zeit bestimmen, verändern sich nur in einer einzigen Richtung. Folglich ist eine Wiederholung des Versuches unter genau den gleichen Bedingungen unmöglich. Praktisch kann man eine und nur eine einzige unendlich lange Realisierung des Zufallsfeldes erhalten. Für die Schaffung eines Ensembles von Realisierungen solcher Felder nimmt man an, daß sich gleiche Versuchsbedingungen nach einer bestimmten Periode wiederholen und folglich die Realisierung des Feldes unabhängig auch von der bestimmten Periode  $T$  wird. Ausgehend von solchen Vorstellungen zerbrechen wir die einzige Realisierung des Feldes in einzelne unabhängige Realisierungen der endlichen Länge  $T$ . Das so erhaltene Ensemble der Realisierungen unterziehen wir einer Bearbeitung nach den allgemeinen Methoden der mathematischen Statistik. Leicht überzeugt man sich davon, daß die beschriebene Methode nur dann angewendet werden kann, wenn die Bedingungen, die das Zufallsfeld beschreiben, nicht periodisch von der Zeit abhängen, d. h. in den Realisierungen des Zufallsfeldes harmonische Komponenten fehlen, deren Periode in die Nähe der Realisierungsperiode  $T$

kommt oder diese übersteigt. Folglich besteht der grundlegende charakteristische Zug zufälliger skalarer Felder von Konzentrationen im Meer in der gleichen Teilbarkeit ihrer Realisierungen bezüglich der Zeit.

Realisierungen vierdimensionaler skalarer Zufallsfelder stellen an bestimmten Punkten des Raumes selbst zufällige Funktionen der Zeit dar.

Räumliche Realisierungen des zufälligen skalaren Feldes in einem bestimmten Raumpunkt sind zufällige skalare Größen. Folglich sind bei der Analyse von Zeitreihen der Konzentrationswerte, die in gleichmäßigen Zeitabständen in den festgelegten Meeresspunkten erhalten wurden, diese Werte als Realisierungen einer zeitlichen Zufallsfunktion (Zufallsprozeß) oder als zufällige skalare Größen (bei der Untersuchung des Konzentrationsfeldes im Raum) zu betrachten, indem dabei vorausgesetzt wird, daß der zu betrachtende Prozeß stationär und ergodisch ist.

Aus der Theorie ist bekannt, daß für ergodische stationäre Zufallsfunktionen eine Realisierung von ziemlich langer Dauer praktisch (im Sinne des Informationsvolumens der Zufallsfunktion) einer Vielzahl von Realisierungen von gewöhnlicher Dauer äquivalent ist und die Charakteristiken der Zufallsfunktion ungefähr als Mittel über die Zeit  $t$  bestimmt werden können.

### Die Berechnung der Verteilungsmomente

Die mathematische Erwartung  $\bar{S}$  kann ungefähr nach der Formel

$$\bar{S} \approx \frac{1}{T} \int_0^T S(t) dt \quad (1)$$

bestimmt werden, wobei  $T$  die Dauer der Realisierung ist.

Wenn man das Integral (1) als Summe der Integrale über die elementaren Abschnitte  $\Delta t$  darstellt und in jedem von ihnen die Funktion  $S(t)$  unter dem Integralzeichen zu einem mittleren Wert wird, der dem Zentrum des Intervalls  $S(t_i)$  entspricht, erhält man einen Ausdruck für die mathematische Erwartung von  $\bar{S}$  in der Form

$$\bar{S} \approx \tilde{S} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S(t_i), \quad (2)$$

wo

$S(t_i)$  der augenblickliche Konzentrationswert ist und  $n$  die Anzahl der Beobachtungen in der Reihe.

Die Größe des Fehlers bei der Bestimmung der mathematischen Erwartung, der auf Grund der endlichen Länge der Reihe entsteht, wird durch das Vertrauensintervall  $I_\beta$  charakterisiert. Für die Bestimmung des Vertrauensintervalls  $I_\beta$ , das der Vertrauenswahrscheinlichkeit  $\beta$  für die mathematische Erwartung  $\bar{S}$  der Größe  $S$  entspricht, wurde der Umstand ausgenutzt, daß die

Größe  $\tilde{S}$  selbst eine Summe von  $n$  unabhängigen, gleichverteilten und zufälligen Werten darstellt und, übereinstimmend mit dem zentralen Grenztheorem, das Verteilungsgesetz bei genügend großem  $n$  nahezu normal ist. Folglich kann man den Ausdruck für das Vertrauensintervall in der Form

$$I_\beta = (\tilde{S} - t_\beta \delta_{\tilde{S}}; \tilde{S} + t_\beta \delta_{\tilde{S}}) \quad (3)$$

schreiben [1], wo

$$t_\beta = \arg \Phi^* \left( \frac{1 + \beta}{2} \right),$$

$$\delta_{\tilde{S}} = \sqrt{\frac{\tilde{D}}{n}}, \quad (4)$$

$\tilde{D}$  — die Dispersion der zu betrachtenden Reihe,

$$\Phi^*(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \quad (5)$$

$\beta$  — die Wahrscheinlichkeit, daß  $\tilde{S}$  im Vertrauensintervall liegt, ist.

Es muß noch hinzugefügt werden, daß durch die obigen Darlegungen nicht die Instabilität der mathematischen Erwartung berücksichtigt wird, die durch die endliche Versuchsdauer bedingt ist und für die die entsprechende Genauigkeit in jedem konkreten Einzelfall bestimmt werden muß. Analog wurden auch die Ausdrücke für die höheren Verteilungsmomente erhalten.

Der Wert für die Dispersion wurde nach der Formel

$$\tilde{D} = \frac{\sum_{i=1}^n (S(t_i) - \tilde{S})^2}{n - 1} \quad (6)$$

bestimmt. Das Vertrauensintervall für die Dispersion wurde annähernd durch den Ausdruck

$$I_\beta = (\tilde{D} - t_\beta \delta_{\tilde{D}}; \tilde{D} + t_\beta \delta_{\tilde{D}}) \quad (7)$$

bestimmt [1], wobei

$$\delta_{\tilde{D}} = \sqrt{\frac{1}{n} \mu_4 - \frac{n-3}{n(n-1)} D^2} \quad (8)$$

und  $\mu_4$  das vierte zentrale Moment der Größe  $S$  ist.

Wenn  $S$  normalverteilt ist, kann ihr viertes zentrales Moment über die Dispersion  $D$  in der Form

$$\mu_4 = 3 D^2 \quad (9)$$

ausgedrückt werden [1], und die Formel (8) kann als

$$\delta_{\tilde{D}} = \sqrt{\frac{2}{n-1}} \tilde{D} \quad (10)$$

geschrieben werden.

Man muß noch bemerken, daß die für die Darstellung des Vertrauensintervalls betrachteten Methoden Näherungen sind. Um den genauen Wert von  $I_{\beta}$  zu finden, muß das Gesetz der Wahrscheinlichkeitsverteilung im voraus bekannt sein.

Der Asymmetriekoeffizient wurde nach der Formel

$$A = \frac{n \sqrt{n-1} \sum_{i=1}^n (S(t_i) - \tilde{S})^3}{(n-2) \left\{ \sum_{i=1}^n (S(t_i) - \tilde{S})^2 \right\}^{3/2}} \quad (11)$$

bestimmt und der Exzeß nach

$$\tilde{E} = \frac{n^2 - 1}{(n-2)(n-3)} \left\{ \frac{n \sum_{i=1}^n (S(t_i) - \tilde{S})^4}{\left[ \sum_{i=1}^n (S(t_i) - \tilde{S})^2 \right]^2} - \frac{3(n-1)}{n} \right\}. \quad (12)$$

Die Bestimmung der Vertrauensintervalle für die Koeffizienten der Asymmetrie und des Exzesses ist mit Schwierigkeiten verbunden, da man hierfür die Momente höherer Ordnung kennen muß, bei deren Berechnung es aber schwierig ist, die geforderte Genauigkeit einzuhalten.

### Korrelationsfunktionen und Spektraldichte

Mit einer genormten Dispersion wird die Autokorrelationsfunktion nach der Formel [2]

$$R_{SSp} = \frac{1}{n-p} \frac{\sum_{i=1}^{n-p} (S_i - \bar{S})(S_{i+p} - \bar{S})}{\sum_{i=1}^n \frac{(S_i - \bar{S})^2}{n}} \quad (13)$$

berechnet, wo

$p = 0, 1, \dots, M$ ;

$n$  — die Zahl der Beobachtungen in der Reihe;

$M$  — die Zahl der Werte der Korrelationsfunktion, mit der gerechnet wurde, ist.

Die Spektraldichte wird über die Korrelationsfunktion nach [2]

$$S_{SSp} = \frac{2 \Delta t}{\pi} \left( \frac{1}{2} R_{SS_0} + \sum_{q=1}^{M-1} R_{SSq} \cos p q \Delta t \Delta \omega + \frac{1}{2} R_{SSM} \cos p M \Delta t \Delta \omega \right) \quad (14)$$

bestimmt, wo

$$\Delta \omega = \frac{K}{64} \frac{\pi}{\Delta t M} \quad (15)$$

und  $K = 1 \dots 64$  ist und das Intervall für die Frequenz bestimmt.

Bei der Berechnung der Spektraldichte wurde die Filtration der Korrelationsfunktion nach der Methode von BARTLETT [3], [4] benutzt

$$R_{SSp} = \left( 1 - \frac{p}{M} \right) R_{SSp}, \quad p = 0, 1, \dots, M. \quad (16)$$

### Die Dichteverteilung der Konzentrationspulsationen

Aus der zeitlichen Beobachtungsreihe wurde die statistische Reihe bestimmt. Die Frequenz  $p_i$  wurde nach der Formel

$$p_i = \frac{m_i}{n} \quad (17)$$

bestimmt, wo

$m_i$  — die Menge der Werte  $S(t_i)$ , die auf das Intervall  $i - \bar{u}$  fallen,  
 $n$  — die allgemeine Zahl der Beobachtungen ist.

Zur Feststellung von Anwendungsmöglichkeiten bekannter Verteilungsgesetze für die Bestimmung der Wahrscheinlichkeitswerte der Beimengungskonzentration wurden bei der Bearbeitung von Meßergebnissen Vergleiche der erhaltenen statistischen Reihe mit einigen oft angetroffenen Gesetzen durchgeführt (Normalverteilung, RAYLEIGH-Verteilung, MAXWELL-Verteilung, logarithmische Normalverteilung, EDGEWORTH-Verteilung, Gammaverteilung und POISSON-Verteilung).

Als Kriterium der Übereinstimmung zwischen der theoretischen und der statistischen Verteilung wurde der  $\chi^2$ -Test von PEARSON verwendet:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(m_i - n p_i')^2}{n p_i'} \quad (18)$$

wo

$k$  — die Anzahl der Intervalle,

$p_i' = H f(x) |_{x=a_i}$ ,

$H$  — die Länge des Intervalls,

$a_i$  — der Mittelpunkt des Intervalls ist.

### Die Überschreitung des Konzentrationsniveaus

Für eine ausführlichere Beschreibung der Prozesse der turbulenten Diffusion und den Erhalt von Ausgangsdaten zur Berechnung der biologischen und mikrobiologischen Prozesse, die im Meer ablaufen, wurden bei der Bearbeitung



von Zeitreihen der Konzentration auch einige grundlegende Merkmale bestimmt, die Überschreitung des Konzentrationsniveaus über einen bestimmten Wert hinaus (der Übertretungen).

Die mittlere Anzahl der Überschreitungen in der Zeiteinheit wurde durch nochmaliges Durchlesen bestimmt. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Überschreitungsdauer und der Vergleich der erhaltenen statistischen Reihe mit einigen bekannten Verteilungsgesetzen wurde nach einer analogen Methodik bearbeitet, wie sie im vorhergehenden Punkt dargelegt wurde.

Auf der Grundlage der oben angeführten Algorithmen wurde ein komplexes Programm für die elektronische Ziffernrechenmaschine „Minsk-22“ aufgestellt. Die Ausführung der Berechnungen nach der oben beschriebenen Methodik erfordert 25 Minuten Maschinenzeit (bei einer Reihlänge von  $n = 2900$ ).

#### Literatur

- [1] VENTSSEL, E. S., Wahrscheinlichkeitstheorie. Verlag „Nauka“, Moskau 1969 (russ.).
- [2] BLACKMAN, Y. B. und TUKEY, I. W., The measurements of power spectra. The Bell System Technical Journal XXXVII (1958) 1–2, New York.
- [3] JENKINS, J. M., General considerations in the analysis of spectra. Technometrics 3, No. 2 (1961).
- [4] HOMAN, C. T. und TIERNEY, I. W., Determination of dynamic characteristics of processes in the presence of random disturbances. Chemical Engineering Science 12, No. 3 (1960).

Anschrift der Verfasser:

Prof. Dr. A. M. AITSAM, Dr. V. K. ASTOK und Dr. M. K. JUCHAT  
 Politechničeskij Institut  
 UdSSR, Tallin, ul. Kalina 101

## Statistische Charakteristiken von Konzentrationspulsationen in einem stationären Beimengungsstrahl im Meer

V. K. ASTOK, A. N. GEZENCVEJ, R. V. OZMIDOV und M. K. JUCHAT

Für die Untersuchung der turbulenten Diffusion in der ufernahen Zone des Meeres, die für die praktischen Aufgaben der Bekämpfung der Verunreinigung des Meeres durch industrielle und andere Abfälle außerordentlich wichtig ist, war die Verwendung des geschleppten Fluorometers nicht möglich. In Verbindung mit diesen Untersuchungen wurde während der gemeinsamen Arbeiten nach dem KAPG-Programm im Jahre 1968 in der Ostsee ein einzigartiges Experiment durchgeführt. Am 27. August wurde in Zingst das Fluorometer im Gebiet des flachen, sandigen Ufers, 80 bis 85 m von der Uferlinie entfernt, auf einem Dreibein befestigt. Die stationäre Indikatorquelle (Rhodamin S), befand sich 90 m vom Ufer und 150 m vom Gerät entfernt, stromaufwärts (Abb. 1). Die Registrierapparatur und die Energiequelle waren in der Meßhütte am Ufer untergebracht (B) und durch Kabel mit dem Meßgerät verbunden.

Die Indikatorkonzentration wurde bei ungünstigen Wetterbedingungen, bei kräftigem böigem Wind mit 6–6,5 m/s, ununterbrochen 3,5 Stunden registriert.

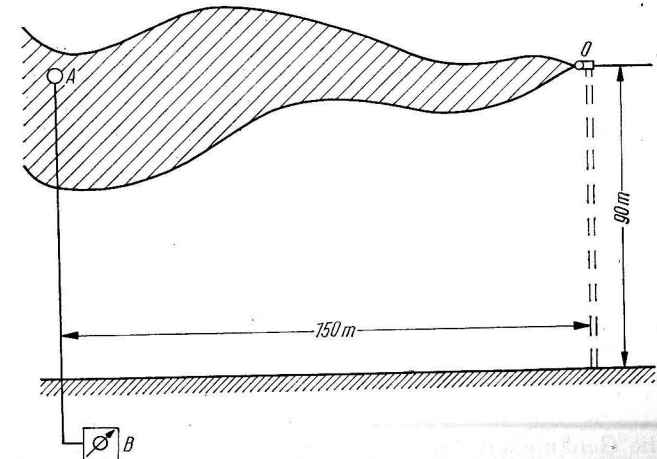


Abb. 1. Versuchsschema mit kontinuierlicher Punktquelle.  
 O – Lage der Quelle, A – Standort des Fluorometers, B – Registrierapparatur

Die Strömungsgeschwindigkeit im Arbeitsgebiet wurde mit Hilfe eines speziellen Schwimmkörpers gemessen und betrug im Mittel 11 cm/s.

Um dabei den Einfluß der Quellenleistung auf den Diffusionsprozeß abschätzen zu können, wurde das Experiment mit zwei verschiedenen Quellenleistungen von 0,12 g/s und 0,54 g/s durchgeführt (eine Erhöhung der Quellenleistung wurde durch eine Konzentrationserhöhung des ausströmenden Indikators erreicht). Die Arbeitsdauer des Gerätes war bei erhöhter Konzentration verhältnismäßig gering (nicht viel mehr als eine halbe Stunde), so daß die erhaltene Meßreihe zehnmal kürzer war als die erste Reihe (bei geringerer Konzentration).

Eine kurze Charakteristik der beobachteten Zeitreihen, die in der vorliegenden Arbeit untersucht werden, wird in Tab. 1 gegeben.

Tabelle 1

Nr. der Reihe	Quellenleistung $Q$ (g/s)	Zeitabstand zwischen den Einzelwerten $\Delta t$ $s$	Anzahl der Werte der Reihe $N$
1	0,12	3	3790
2	0,54	3	361
3	0,12	3	1895
4	0,12	3	1895
5	0,12	6	1895

Infolge ungenügender Kapazität des operativen Speichervolumens der elektronischen Rechenmaschine „Minsk-22“, auf der die Rechnungen durchgeführt wurden, wurden an Stelle der Zeitreihe 1 die Reihen 3, 4 und 5 betrachtet. Dabei entsprechen die Reihen 3 und 4 der ersten bzw. zweiten Hälfte der Reihe 1 und die Reihe 5 wurde durch Verdoppelung des Zeitabstandes zwischen den Einzelwerten der Reihe aus der Reihe 1 gewonnen.

Bei der Bearbeitung der Meßergebnisse wurde vorausgesetzt, daß die erhaltenen Zeitreihen der Beimengungskonzentrationswerte Realisierungen stationärer ergodischer Zufallsprozesse sind (1). Alle statistischen Charakteristiken wurden auf der Grundlage der Methoden bestimmt, die in der Arbeit von AITSAM u. a. [1] angegeben sind.

Die berechneten statistischen Momente sind in Tab. 2 angeführt. Die mathematische Erwartung und die Dispersion befinden sich mit Ausnahme der Werte der kurzen Reihe 2 in ziemlich guter Übereinstimmung mit der speziellen Lösung der dynamischen Dispersionsgleichung nach JUCHAT [3]

$$D(x, 0, 0) = \frac{\bar{S}^2}{2}, \quad (1)$$

wenn man die Genauigkeit von  $\bar{S}$  und  $\hat{D}$  berücksichtigt, d. h., die Dispersion der Beimengungskonzentration ist auf den Achsen der Wolke bei stationärer Quelle gleich der Hälfte des Quadrates des Mittelwertes der Konzentration.

Tabelle 2

Nr. der Reihe	Mathematische Erwartung		Dispersion		Asymmetriekoeffizient $\hat{A}$	Exzeß $\hat{E}$
	Wert $\bar{S}$ $10^{-9}$ g/ml	Zuverlässigkeitsintervall $I_{\beta} \beta = 0,9$ $10^{-9}$ g/ml	Wert $\hat{D}$ $10^{-18}$	Zuverlässigkeitsintervall $I_{\beta} \beta = 0,9$ $g^2/ml^2$		
2	92,73	$92,73 \pm 1,8$	421	$421 \pm 52$	0,15	-0,17
3	36,88	$36,88 \pm 1,0$	695	$695 \pm 22$	0,61	-0,69
4	34,36	$34,36 \pm 1,0$	750	$750 \pm 24$	0,69	-0,34
5	35,55	$35,55 \pm 1,0$	722	$722 \pm 23$	0,64	-0,51

Die berechnete Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung der Beimengungskonzentration wird in den Abbildungen 2 und 3 angegeben. Aus Abb. 2 ist ersichtlich, daß eine Näherung der Dichteverteilung der Beimengungskonzentration im gegebenen Fall durch das Gesetz der Normalverteilung sicherlich nur bei Konzentration  $S > \bar{S}$  zweckmäßig ist. Bei niedrigeren Konzentrationen gibt die Normalverteilung bedeutend kleinere Wahrscheinlichkeitswerte an als das Experiment. Trotzdem fällt die Dichteverteilung, die bei Versuchen mit erhöhter anfänglicher Indikatorkonzentration erhalten wurde (Abb. 3), auch bei kleinen Konzentrationswerten gut mit einer Normalverteilung zusammen. Dies wird auch durch die dritten und vierten Momente bestätigt (siehe Tab. 2), deren Werte gegen Null streben.

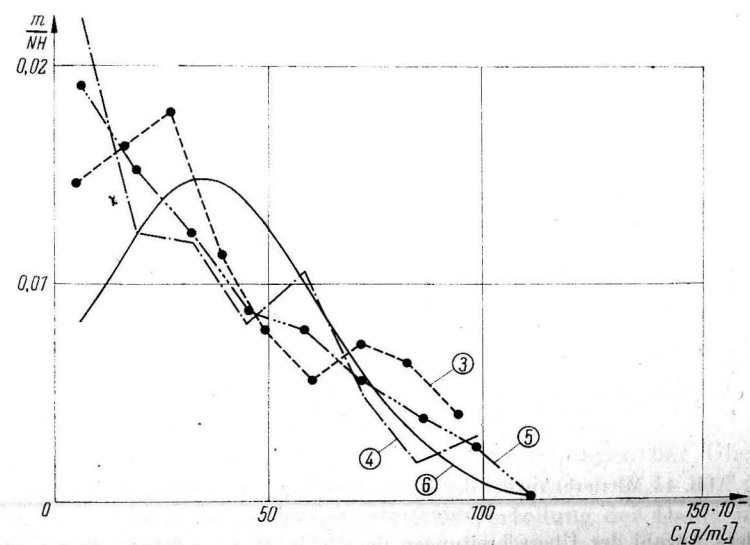


Abb. 2. Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung der Beimengungskonzentration 3 – Dichteverteilung der Reihe 3; 4 – Dichteverteilung der Reihe 4; 5 – Dichteverteilung der Reihe 5; 6 – Dichte der Normalverteilung

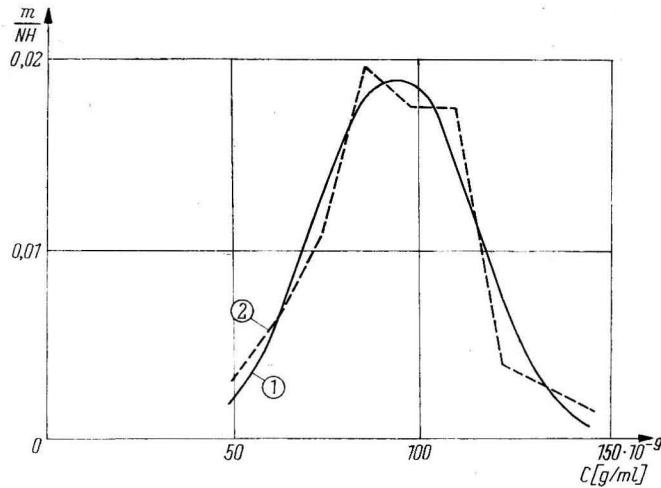


Abb. 3. Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung der Beimengungskonzentration  
1 – Normalverteilungsgesetz; 2 – Dichteverteilung der Reihe 2

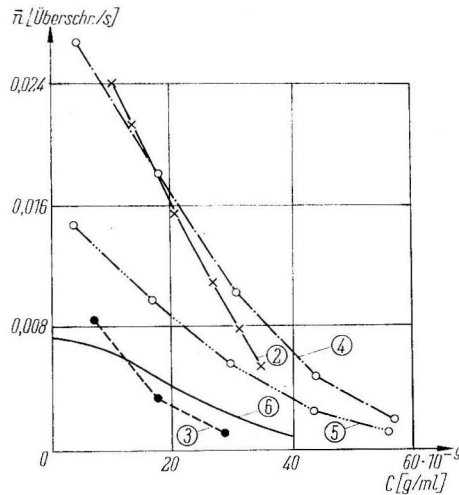


Abb. 4. Mittlere Anzahl der Überschreitungen in Abhängigkeit vom Konzentrationsniveau

2 – mittlere Anzahl der Überschreitungen der Reihe 2; 3 – mittlere Anzahl der Überschreitungen der Reihe 3; 4 – mittlere Anzahl der Überschreitungen der Reihe 4; 5 – mittlere Anzahl der Überschreitungen der Reihe 5; 6 – mittlere Anzahl der Überschreitungen, die nach der Formel (3) für die Reihe 3 bestimmt wurde

Die mittlere Anzahl der Überschreitungen einer willkürlichen Linie gleicher Konzentration in der Zeiteinheit  $\bar{n}$  ist aus Abb. 4 zu ersehen.

Theoretisch kann man  $\bar{n}$  nach der Formel

$$\bar{n}(c) = 2^{-3/2} \pi^{-3/2} D^{-1/2} \left[ \int_0^\infty \omega^2 E_s(\omega) d\omega \right]^{1/2} \exp\left(-\frac{c^2}{2D}\right) \quad (2)$$

bestimmen (JUCHAT [2]), wobei  $E_s(\omega)$  die Spektraldichte der Konzentration,  $\omega$  die Kreisfrequenz und  $c = S - \bar{S}$  ist.

Im Trägheitsintervall ist die mittlere Anzahl der Überschreitungen, die durch turbulente Strömungen mit der Kreisfrequenz  $\omega_1 < \omega < \omega_2$  auf dem Niveau  $c$  entstehen, durch die Formel

$$\bar{n}(c) = \frac{1}{4} \pi^{-3/2} \left[ \frac{\omega_2^{4/3} - \omega_1^{4/3}}{\omega_1^{-2/3} - \omega_2^{-2/3}} \right]^{1/2} \exp\left(-\frac{c^2}{2D}\right) \quad (3)$$

bestimmt. Im gegebenen Fall gilt für die Reihen 2, 3 und 4

$$\omega_2 = \frac{2\pi}{\tau_{\min}} = 2,05 \text{ (s}^{-1}\text{)},$$

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{\tau_{\max}} = \frac{2\pi \bar{u}}{l},$$

wobei

$l$  – der Maßstab der Diffusion ist, zu dessen Berechnung man in erster Näherung die Formel

$$l = \sqrt{g \varepsilon t^3} \quad (4)$$

nach MONIN und JAGLOM [4] nehmen kann mit

$g$  – als universelle Konstante,

$t$  – Laufzeit  $t = x/\bar{u}$ ,

$x$  – Entfernung von der Quelle,

$\bar{u}$  – mittlere Strömungsgeschwindigkeit.

Auf Abb. 4 ist auch die Anzahl der Überschreitungen angegeben, die aus der Abhängigkeit (3) für die Reihe 3 berechnet wurde. Wie man an Hand des Bildes sehen kann, fallen die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen ziemlich gut mit den theoretischen Kurven zusammen.

Abb. 5 und 6 zeigen die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Überschreitungsdauer  $\tau$  in den Niveaus  $C = 55,4 \cdot 10^{-9}$  g/ml und  $C = 42,4 \cdot 10^{-9}$  g/ml für die Zeitreihe 5. Dabei wurde die theoretische Verteilung der Dauer nach der Abhängigkeit

$$f(\tau) = \frac{C^2 R'_2}{4D} \tau \exp\left(-\frac{C^2}{8D} R'_2 \tau^2\right) \quad (5)$$

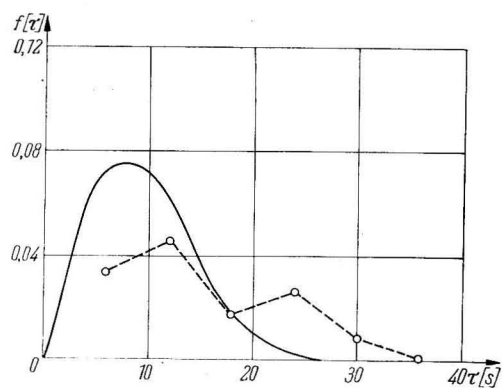


Abb. 5

Abb. 5. Experimentell bestimmte Dichteverteilung der Überschreitungsdauer und die theoretische Abhängigkeit, die nach Formel (5) für das Konzentrationsniveau  $C = 55,4 \cdot 10^{-9}$  g/ml erhalten wurde

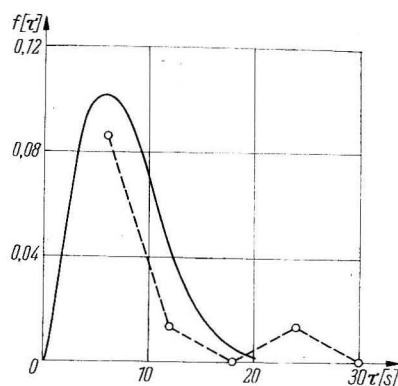


Abb. 6

Abb. 6. Experimentell bestimmte Dichteverteilung der Überschreitungsdauer und die theoretische Abhängigkeit, die nach Formel (5) für das Konzentrationsniveau  $C = 42,4 \cdot 10^{-9}$  g/ml erhalten wurde

bestimmt (JUCHAT [2]), wo

$$R'_2 = \left. \frac{d^2 R(\tau)}{d\tau^2} \right|_{\tau=0} = \frac{1}{2\pi D} \int_0^{\infty} \omega^2 E_s(\omega) d\omega$$

ist, was unter der Einwirkung des „5/3-Potenzgesetzes“ die Form

$$R'_2 = \frac{3}{8\pi D} B_{1s} \bar{\varepsilon}_s \bar{u}^{-1/3} \bar{u}^{-2/3} (\omega_2^{4/3} - \omega_1^{4/3})$$

erhält, mit

$B_{1s}$  — dimensionslose Konstante ( $B_{1s} \approx 0,7$ ),

$\bar{\varepsilon}_s$  — mittlere Dissipationsgeschwindigkeit der kinetischen Energie,

$\bar{u}_s$  — mittlere Geschwindigkeit der „Dissipation“ der Inhomogenitäten des Konzentrationsfeldes.

Da die im Ergebnis der Beobachtungen der Zeitreihen erhaltenen Werte, wie schon oben erwähnt, von uns als Realisierungen eines stationären Zufallsprozesses betrachtet wurden, ergab das die Möglichkeit, die Autokorrelationsfunktionen für die Reihen 2, 3, 4 und 5 zu berechnen.

Die Berechnungen wurden nach den von AITSAM u. a. [1] beschriebenen Formeln und Methoden durchgeführt

$$R_{S S p} = \frac{1}{n-p} \frac{\sum_{k=1}^{n-p} (S_i - \bar{S})(S_{i+p} - \bar{S})}{\sum_{i=1}^n \frac{(S_i - \bar{S})^2}{n}}, \quad (6)$$

wo

$p = 0, 1, \dots, M$ ,

$n$  — Zahl der Beobachtungen in der Reihe,

$M$  — Anzahl der Verschiebungen der Korrelationsfunktionen, 200 für die Reihen 3, 4 und 5 (etwa 10% der Reihenlänge) und 50 für Reihe 2 (14% der Länge).

Die so berechneten Werte sind in Abb. 7 dargestellt. Wie man aus den Bildern ersieht, fällt die Korrelationsfunktion ziemlich langsam mit der Zeit, mit Ausnahme der Reihe 2 (bei erhöhter Quellenleistung). Der Korrelationsradius, der für diese Reihe nach den gewöhnlichen Methoden berechnet wurde, beträgt etwa 100 s (Abb. 7, d). Die Korrelationsfunktion für die Reihe 4 (Abb. 7, c) stellt fast eine gerade Linie dar, die sich überaus langsam der Abszisse nähert, was die ziemlich lang andauernde Autokorrelation der Konzentrationspulsationen von Beimengungen verdeutlicht. Der Korrelationsradius ist aller Wahrscheinlichkeit nach für diese Reihe größer als 10 min. In noch höherem Grade kann das der Reihe 3 zugeschrieben werden (Abb. 7, b). Wie man aus der Korrelationsfunktion der Reihe 5 ersieht (Abb. 7, a), die selbst eine vollständige Beobachtungsreihe darstellt, aber bei einem zeitlichen Abstand der Werte von  $\Delta t = 6$  s, ist der Korrelationsradius bei der gegebenen Quellenleistung von 0,12 g/s wirklich größer als 10 min und ungefähr gleich 13–15 min, d. h. 8- bis 9mal größer als bei einer Quellenleistung von 0,54 g/s. Aus den erhaltenen Korre-

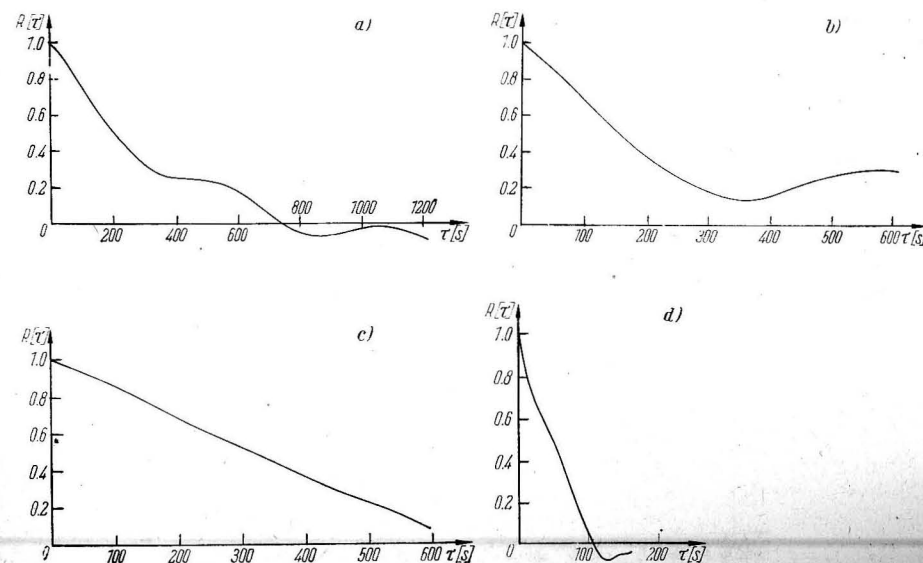


Abb. 7. Die zeitliche Korrelationsfunktion der Rhodaminkonzentration; a — für die Reihe 5; b und c für die Reihen 3 und 4; d für die Reihe 2

lationsfunktionen wurde die Spektraldichte berechnet. Für die Berechnungen wurde die von AITSAM u. a. [1] beschriebene Formel

$$S_{SSp} = \frac{2 \Delta t}{\pi} \left( \frac{1}{2} R_{SS_0} + \sum_{q=1}^{M-1} R_{SS_q} \cos p q \Delta t \Delta \omega + \frac{1}{2} R_{SS_M} \cos p M \Delta t \Delta \omega \right) \quad (7)$$

benutzt, wo

$$\Delta \omega = \frac{K}{64} \cdot \frac{\pi}{\Delta t M}$$

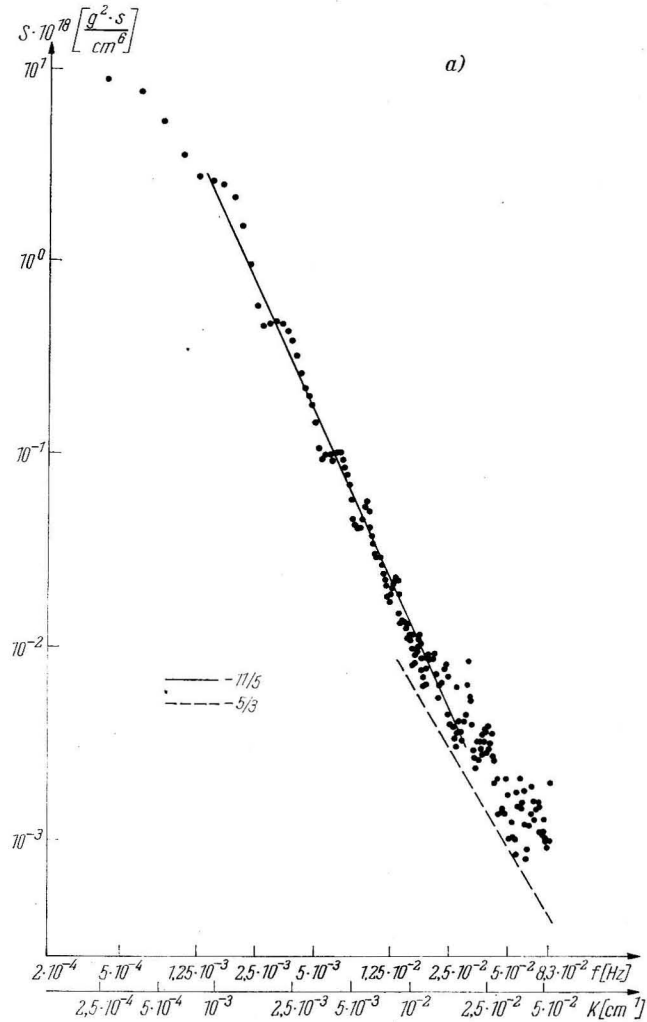


Abb. 8a

und  $K = 1, \dots, 32$  das Frequenzintervall  $\omega$  bestimmt. Vorläufig wurde die Filtration der Korrelationsfunktion nach der Methode von BARTLETT vorgenommen

$$B R_{SSp} = \left( 1 - \frac{p}{M} \right) R_{SSp} \quad (8)$$

mit

$$p = 0, 1, \dots, M.$$

Bei unseren Berechnungen für die Reihen 3, 4 und 5 war  $M = 200$ , die Anzahl der Punkte des Spektrums betrug  $M_s = 400$ ; für die Reihe 2 waren  $M = 50$  und  $M_s = 100$ .

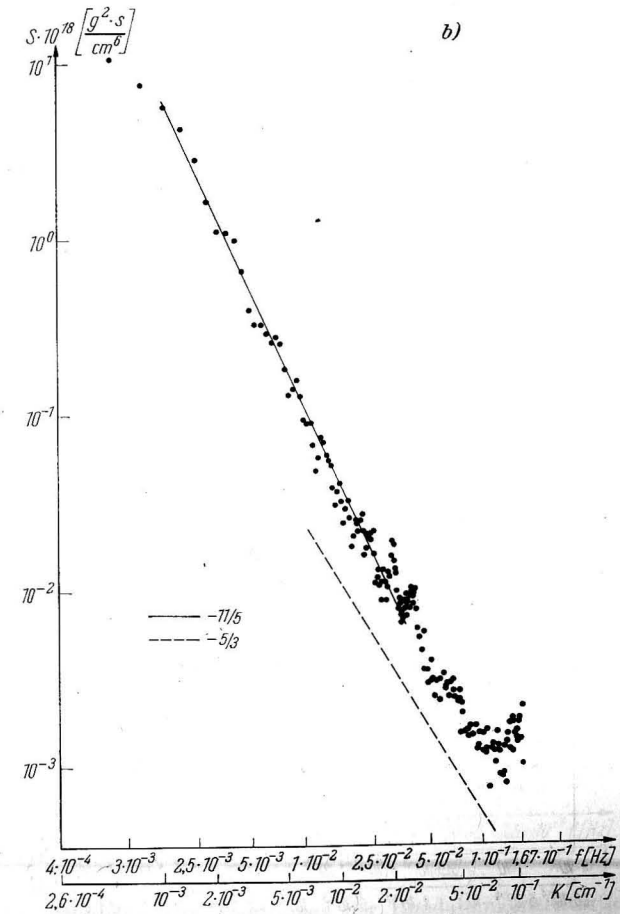


Abb. 8b

Die Funktionswerte  $S_{SSP}$  sind für alle Reihen in logarithmischem Maßstab in Abb. 8 angegeben. Wie man aus den Abbildungen ersieht, wird die Spektraldichte ziemlich gut durch ein Potenzgesetz mit dem Exponenten  $-11/5$  im Frequenzintervall von 0,001 bis 0,03 und mit dem Exponenten  $-5/3$  im Frequenzintervall von 0,03 bis 0,15 Hz approximiert. Die entdeckten Abhängigkeiten der Spektraldichte von Pulsationen passiver Beimengungen im turbulenten Strom von der Wellenzahl können auch aus theoretischen Erwägungen für die lokal-isotrope Turbulenz erhalten werden (MONIN, JAGLOM [4], OZMIDOV [5]). Die Abweichung vom „5/3-Potenzgesetz“ können von einer Verschiebung der Bereiche der Energieversorgung der Meeresturbulenz herrühren.

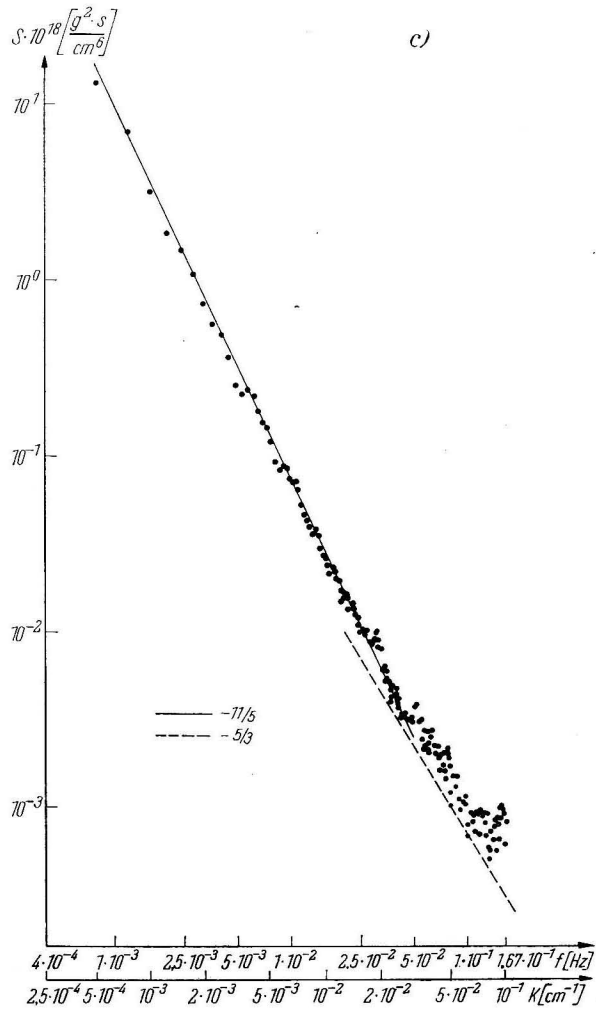


Abb. 8c

Die in wissenschaftlicher und praktischer Hinsicht außerordentlichen Ergebnisse zeigten die Nützlichkeit und die Perspektive solcher Untersuchungsmethoden der turbulenten Diffusion in der ufernahen Zone des Meeres.

Für die Unterstützung bei diesen Versuchen bedanken wir uns bei den Mitarbeitern des Maritimen Observatoriums Zingst der Karl-Marx-Universität Leipzig.

## Literatur

- [1] AITSAM, A. M., ASTOK, V. K. und JUCHAT, M. K., Die Berechnungsmethodik statistischer Charakteristiken der Konzentrationspulsationen von Beimengungen im Meer. Beitr. Meereskunde **30/31** (1972).

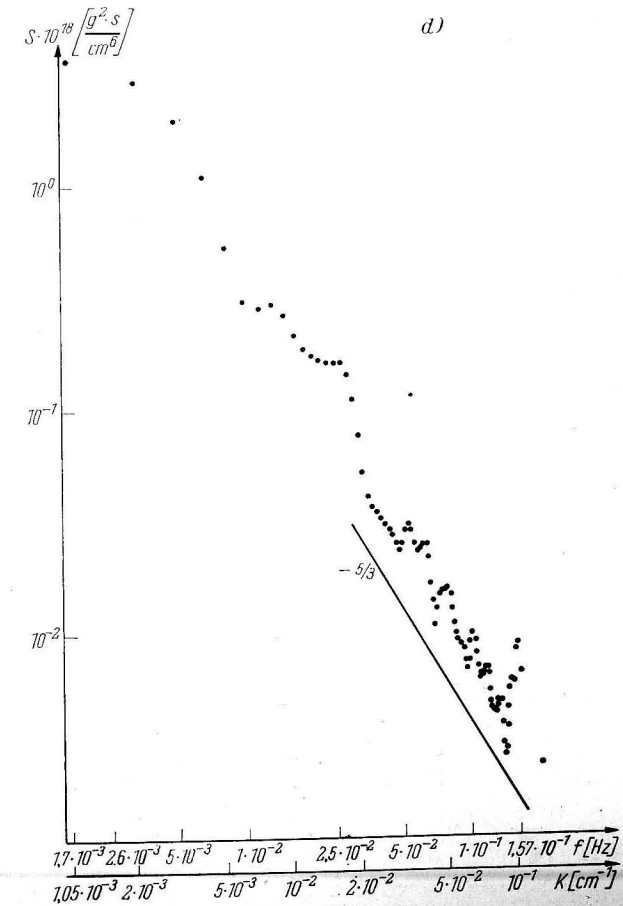


Abb. 8a—d. Spektraldichte der Pulsationen der Rhodaminkonzentration, die aus den entsprechenden Korrelationsfunktionen der Abb. 7 berechnet wurde

- [2] JUCHAT, M. K., Über die Transformation der Wahrscheinlichkeitsmerkmale der Konzentration passiver skalaer Substanzen im Meer (russ.). Dissertation Tallin 1969.
- [3] JUCHAT, M. K., Über die Transformation der Dispersion der Konzentration passiver Beimengungen im turbulenten Strom (russ.). Sbornik statei po sanitarnoi tehnike VI, Tallin 1970.
- [4] MONIN, A. S. und JAGLOM, A. M., Statistische Hydromechanik (russ.). Teil 2, Verlag „Nauka“, Moskau 1967.
- [5] OZMIDOV, R. V., Horizontale Turbulenz und turbulenter Austausch im Ozean (russ.). Verlag „Nauka“, Moskau 1968.

## Anschriften der Verfasser:

Dr. V. K. ASTOK, Dr. M. K. JUCHAT,  
Politechničeskij Institut,  
UdSSR, Tallin, ul. Kalinina 101

Dr. A. N. GEZENCVEJ, Dr. R. V. OZMIDOV,  
Institut Okeanologii „P. P. Širšov“ AN SSSR,  
UdSSR, Moskau Ž 387, Sadovaja 1

## Statistische Charakteristiken der Pulsationen eines Tracers aus momentanen Punktquellen (nach Versuchen in der Ostsee)

V. K. ASTOK und R. V. OZMIDOV

Experimentelle Untersuchungen der turbulenten Diffusion im Meer durch direkte Vermessung der Konzentration einer Beimengung ergeben wertvolles Material nicht nur zur Bestimmung mittlerer Kenngrößen der Diffusion (z. B. der Austauschkoefizienten), sondern auch zum Studium der Pulsationen einer Beimengung. In diesem Artikel werden einige Ergebnisse der statistischen Bearbeitung der Pulsationen eines als momentane Punktquelle eingegebenen Tracers durchgeführt.

Das Ausgangsmaterial lieferte uns die innerhalb des KAPG-Programms unternommene Expedition auf dem Forschungsschiff „Professor Albrecht Penck“ des Instituts für Meereskunde in Warnemünde im August–September 1968 in der südlichen Ostsee. Wir verwendeten die Vermessungen von zwei Rhodaminflecken (21. 8. und 1. 9. 1968).

In Tab. 1 sind die allgemeinen Angaben der durchgeführten Versuche und in Tab. 2 die hydrologischen Bedingungen in den Untersuchungsgebieten angeführt.

Die Registrierung der Konzentration erfolgte mit dem geschleppten Fluorometer PF-66 (KARABAŠEV 1966) von dem durch den Fleck fahrenden Schiff aus. Die so erhaltenen Registrierungen können in erster Linie als „momentane“ Abhängigkeit  $c(l)$  der Konzentration von der Raumkoordinate angesehen werden. Von der erhaltenen kontinuierlichen Aufzeichnung der Konzentration wurden während der Bearbeitung diskrete Werte im Zeitintervall  $\Delta t = 1,875$  s abgelesen, was bei einer Schiffsgeschwindigkeit von 4 kn einer Entfernung von  $\Delta l = 3,75$  m entspricht. Weiter erfolgte eine Mittelung (Glättung der Funktion mit einem gleitenden Kosinus-Filter).

$$K(\theta) = \begin{cases} \frac{1 + \cos K_0 \theta}{L_0}, & -\frac{\pi}{K_0} \leq \theta \leq \frac{\pi}{K_0}, \\ 0, & |\theta| > \frac{\pi}{K_0} \end{cases} \quad (1)$$

wobei

$L_0 =$  Mittelungsintervall,  
 $K_0 = (2\pi/L_0) = L_0$  entsprechende Wellenzahl („Filtergrenze“) bedeuten.

Tabelle 1

Daten über die Vermessungen der Rhodaminflecken

Versuch	Nr.	Zeit (GMT)	Meßhorizont (m)	Kurs (°)	Fleckbreite*) (m)
1	2	3	4	5	6
A 21. 8. 1968 Gebiet der Insel Rügen 08.10 h Ausgabe von 8 kg Rhodamin	1	09.10	1	108	60
	2	09.23	1	24	210
	3	09.30	1	247	101
	4	09.41	1	200	338
	5	09.50	3	110	112
	6	10.00	3	20	364
	7	10.15	5	290	71
	8	10.25	5	207	450
	9	10.40	5	112	150
	10	10.53	7	18	360
	11	11.08	7	270	198
	12	13.10	1	35	480
	13	13.22	1	266	495
	14	13.37	5	170	446
	15	13.46	5	20	386
	16	14.00	8	280	115
	17	14.09	8	110	292
	18	14.23	12	358	0
	19	14.43	12	204	0
	20	14.57	1	24	480
	21	15.12	1	270	1180
	22	15.27	1	90	890
B 1. 9. 1968 Gebiet nördlich von Gdansk 06.37 h Eingabe von 10 kg Rhodamin	1	08.36	1	37	142
	2	08.44	1	270	315
	3	08.55	1	180	131
	4	09.08	1	100	319
	5	09.26	5	350	244
	6	09.36	5	275	604
	7	09.50	5	185	259
	8	10.00	5	93	465
	9	10.16	7,5	360	0
	10	10.24	7,5	280	0
	11	12.52	1	360	375
	12	13.09	1	300	1070
	13	13.33	1	210	315
	14	13.50	5	140	900
	15	14.02	5	300	1040
	16	14.26	5	210	289
17	14.45	7	130	985	
18	15.07	7	30	285	

\*) beim jeweiligen Kurs in dem jeweiligen Horizont

Tabelle 2

Hydrologische Bedingungen im Untersuchungsgebiet

	Tiefe (m)	Temperatur (°C)	Salzgehalt (‰)	O <sub>2</sub> (ml/l)	Strömung	
					Richtung (°)	Geschw. (cm/s)
21. 8. 1968	0,5	15,86	7,89	7,70	6	7,5
Tiefe 44 m	2,5	15,86	7,90	7,68	10	5,8
Wind SSW	5	15,86	7,90	7,36	27	6,5
Wellenhöhe 0,3 m	10	15,32	7,90	6,93	60	4,4
	15	15,94	8,06	6,86	54	5,1
	20	16,42	8,35	7,08	33	4,8
	25	16,30	8,71	6,98	151	4,7
	30	15,48	9,41	6,52	168	6,6
	35	13,43	12,63	5,41	—	—
	40	—	12,83	4,22	87	8,8
	42,5	11,80	14,98	1,81	—	—
01. 09. 1968	0,5	18,59	7,40	7,04	184	21,2
Tiefe 78 m	5	18,50	7,40	6,97	205	16,7
Windstille	10	17,45	7,40	6,48	234	9,1
Dünung Wellenhöhe 0,2 m	15	17,20	7,39	6,17	212	8,8
	20	16,32	7,41	5,71	206	3,2
	25	13,51	7,43	5,57	—	—
	30	10,20	7,49	5,49	—	—
	35	5,51	7,52	6,94	—	—
	40	3,33	7,59	7,59	—	—
	50	2,54	7,66	7,78	—	—
	60	2,40	7,74	7,63	—	—
70	3,19	8,74	4,25	—	—	
75	4,05	9,74	1,75	—	—	

Für  $L_0$  wurden die Werte von 15; 22,5; 45 und 90 m gewählt. Durch Subtraktion der geglätteten Funktion  $\tilde{c}(l)$  von der Ausgangsfunktion ergab sich als Funktion der pulsierenden Komponenten

$$c'(l) = c(l) - \tilde{c}(l) \quad (2)$$

Auf die Funktion  $c'(l)$  ist auch unser Interesse im Rahmen dieses Artikels begrenzt. Einzelheiten der Methodik, wie der kurz beschriebenen Feldarbeiten sowie der Glättung, kann man in der Monographie von OZMIDOV finden [7].

Wir möchten noch bemerken, daß alle Konzentrationswerte im weiteren in der Einheit  $10^{-9}$  g/ml gegeben werden (Empfindlichkeitsgrenze des Gerätes PF-66) und daß unter dem Terminus „Dispersion“ ( $D$ ) in diesem Artikel die Dispersion der Pulsationen zu verstehen ist,

$$D = \overline{c'^2} \quad (3)$$

wobei der Strich eine Mittelung nach  $l$  bedeutet.



Wegen der relativ geringen Anzahl an momentanen Realisierungen wurde das Material nicht nach Horizonten und Meßkursen unterteilt. Als eine gewisse Rechtfertigung für diese Hypothese über die Gleichsinnigkeit der horizontalen Pulsationen innerhalb des Flecks können die unten angeführten Ergebnisse dienen, nach denen es nicht möglich ist, die Abhängigkeit der Pulsationscharakteristiken von der Tiefe oder der Richtung aufzudecken sowie die gleichartigen hydrologischen Bedingungen in der Schicht von 0–10 m (Tab. 2).

Von besonderem Interesse ist ein Vergleich der Dispersion  $D$  als Kennziffer für die Energie der Pulsationen mit anderen Charakteristiken des diffundierenden Flecks.

Abb. 1 zeigt die zeitliche Veränderung der Dispersion sowie der Konzentration  $c_{\max}^2$  im Fleckzentrum. Wie aus der Abbildung ersichtlich ist, verändert sich die Maximalkonzentration proportional zu  $t^{-3}$ , was noch einmal das  $4/3$ -

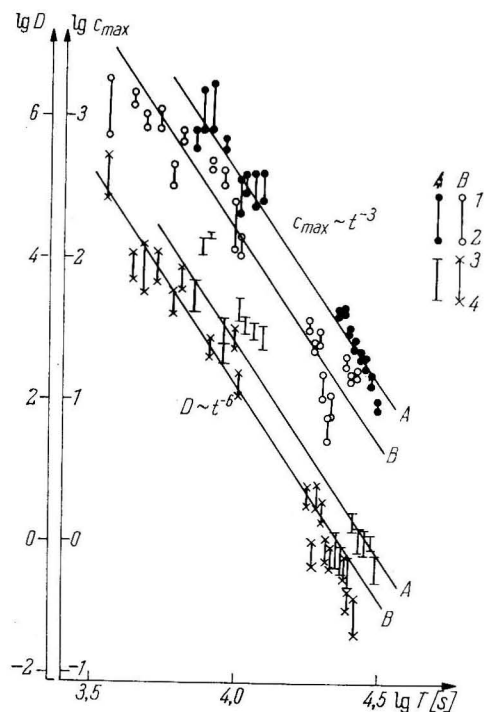


Abb. 1. Zeitliche Veränderung der Konzentration im Fleckzentrum  $C_{\max}$  und der Dispersion  $D$

- A — Versuch am 1. 9., B — Versuch am 21. 8.
- 1 — absolutes Konzentrationsmaximum;
- 2 — Maximum bei  $L_0 = 45$  m;
- 3 — Dispersion bei  $L_0 = 45$  m;
- 4 — Dispersion bei  $L_0 = 22,5$  m

Gesetz für den Diffusionskoeffizienten bestätigt (OZMIDOV [5]). Die Veränderungen der Dispersion liegen nach Abb. 1 gut auf einer Geraden proportional zu  $t^{-6}$ .

Eine derartige Überlegung ist ziemlich glaubwürdig, wenn man von Dimensionsüberlegungen ausgeht, und stimmt qualitativ mit den Ergebnissen überein, die von JUCHAT [2] für die zeitliche Dispersion auf der Achse eines Tracerstrahls erzielt wurden. Wenden wir hierbei unsere Aufmerksamkeit noch einmal darauf, daß sich die von uns erhaltenen Werte der Dispersion auf bestimmte Maßstäbe der Diffusion beziehen. Diese Maßstäbe sind in der Regel eine Größenordnung niedriger als der Maßstab des Flecks. Deshalb haben größere Wirbel, die mit der Vergrößerung der Zeit und dementsprechend auch des Flecks in den Diffusionsvorgang einbezogen werden, auf die Dispersion keinen Einfluß.

Aus Abb. 1 folgt, daß zwischen den Werten von  $c_{\max}^2$  und  $D$  ein linearer Zusammenhang besteht; folglich kann man sich bemühen, den Proportionalitätskoeffizienten  $a$  in der Beziehung

$$D = a \cdot c_{\max}^2 \quad (4)$$

zu beurteilen.

Die Abhängigkeit (4) kann man offensichtlich auch für die gemittelten Werte  $\bar{c}^2$  umschreiben:

$$D = b \cdot \bar{c}^2, \quad (4a)$$

wobei  $\sqrt{b}$  als Pulsationsintensität bezeichnet werden kann.

In Abb. 2 sind die Abhängigkeiten  $D = f(c_{\max})$  und  $D = f(\bar{c})$  bei den Maßstäben 45 und 22,5 m für die Dispersion angeführt. ( $\bar{c}$  erhielten wir durch die Mitteilung über die ganze Länge der Realisierung).

Man erhält für die Koeffizienten  $a$  und  $b$  folgende grobe Abschätzungen:

$$a = 4 \cdot 10^{-3}, \quad b = 6,3 \cdot 10^{-2}.$$

Die Intensität der Pulsationen wird folglich durch einen Wert von 0,25 charakterisiert.

Anhand der Dispersionen, die sich auf verschiedene Maßstäbe (Mittelungslängen) beziehen, kann man eine Vorstellung über die Art der Spektralfunktionen erhalten (OZMIDOV [6]). Derartige Angaben sind in Abb. 3 enthalten. Unter Berücksichtigung, daß in diesem Fall nicht die Absolutwerte des Spektrums interessieren, sondern die Schnelligkeit der Abnahme des Spektrums mit zunehmendem  $k$ , wurde Abb. 3 in einer Weise gestaltet, die sich etwas von der üblichen unterscheidet. Die Funktion  $S(k) = \Delta D / \Delta k$  ist durch den Wert  $S(k)$  bei  $k = 0,186 \text{ m}^{-1}$  normiert (was einem Mittel aus den zwei Mittelungslängen 22,5 und 45 m entspricht). Auf der so gestalteten Abbildung sind die Veränderungen und die Streuung der Größe  $m$  sehr anschaulich dargestellt, wenn die Abhängigkeit in der Form  $S(k) \sim k^{-m}$  zu suchen ist.

Die aus allen Serien berechneten Werte von  $m$  ergaben sich für die Versuche am 21. 8. und entsprechend am 1. 9. zu:

$$\begin{aligned} \text{für } k = 0,093 - 0,186, & \quad m = 2,10 \text{ und } 2,12, \\ k = 0,186 - 0,334, & \quad m = 1,50 \text{ und } 1,30. \end{aligned}$$

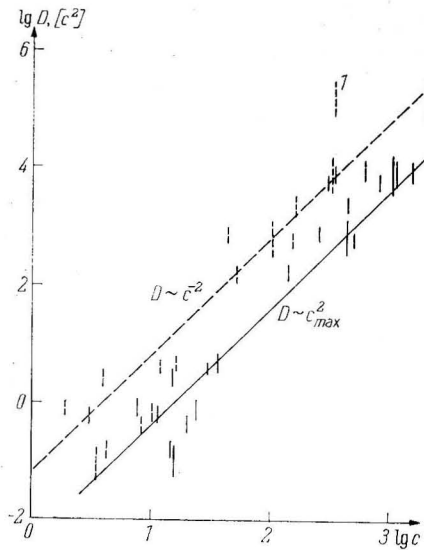


Abb. 2

Abb. 2. Abhängigkeit der Dispersion von der mittleren und maximalen Konzentration (Versuch am 21. 8.)

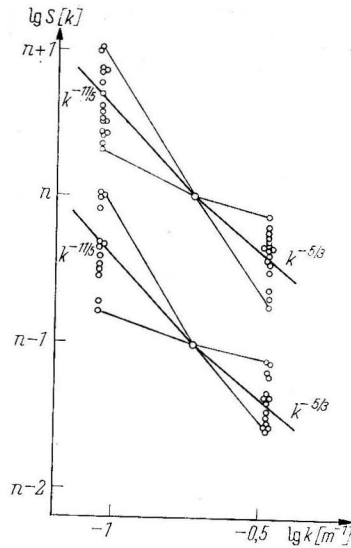


Abb. 3

Abb. 3. Spektralfunktionen der Konzentrationspulsationen, berechnet nach den Dispersionsunterschieden. (Skala  $S(k)$ : Vereinbarte Einheiten  
A – Versuch am 1. 9., B – Versuch am 21. 8.)

Die auf Abb. 3 dargestellten Geraden  $k^{-11/5}$  und  $k^{-5/3}$ , die man aus den theoretischen Erwägungen für die lokal isotrope Turbulenz unter Berücksichtigung der Schichtung (s. z. B. MONIN und JAGLOM [4]) erhalten kann, stimmen in den Grundzügen mit den experimentellen Werten überein.

Die Spektraldichten der Pulsationen wurden von uns auch über die Korrelationsfunktionen  $R(l)$  für die Serien berechnet, bei denen die Breite des Flecks  $L$  mehr als 375 m betrug (d. h. die Anzahl der diskreten Werte  $N = L/\Delta l \geq 100$  war). Die Berechnungsmethodik wurde von AITSAM, ASTOK und JUCHAT [1] beschrieben.

Die normierten Korrelationsfunktionen einer der Serien sind für die verschiedenen Werte von  $L_0$  in Abb. 4 gezeigt, die entsprechenden nicht normierten Spektraldichten sind in Abb. 5 aufgeführt. Auf diesen Abbildungen ist der Einfluß der Mittelung auf die statistischen Charakteristiken der Pulsationen klar deutlich. Gleichzeitig kann Abb. 5 in gewissem Grade die bedeutende Streuung der Größen  $m$  in Abb. 3 erklären. Die Ursache ist darin zu sehen, daß das Spektrum in Abb. 3 auf der Annahme beruht, daß die Wellenzahlen  $\Delta k = 2\pi/L_0(1) - 2\pi/L_0(2)$  (in Abb. 5 schraffiert) den Hauptanteil an der Vergrößerung der Dispersion  $D$  mit zunehmendem Mittelungsmaßstab  $L_0$  haben.

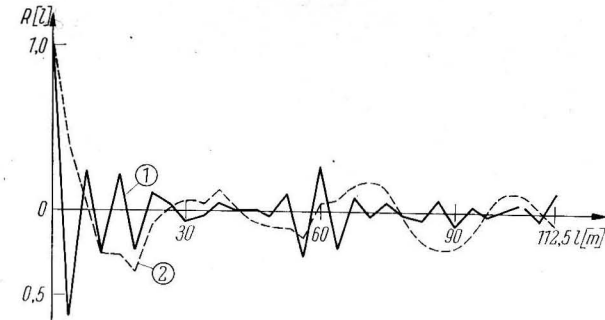


Abb. 4. Räumliche Korrelationsfunktion der Konzentrationspulsationen (Versuch am 21. 8., Serie 13)  
1 bei  $L_0 = 15$  m; 2 bei  $L_0 = 90$  m

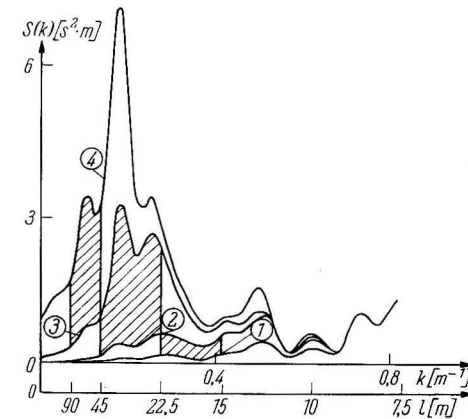


Abb. 5. Spektraldichten der Konzentrationspulsationen bei verschiedenen Werten von  $L_0$  (Versuch am 21. 8., Serie 13).

1  $L_0 = 15$  m; 2 22,5 m;  
3 45 m; 4 90 m

Aus Abb. 5 folgt, daß diese Annahme nur im Falle einer relativ gleichmäßigen Änderung von  $S(k)$  der Wirklichkeit nahe kommt. In Abhängigkeit von der konkreten Form des Spektrums kann das Verhältnis  $\Delta D/\Delta k$  sowohl eine höhere als auch eine niedrigere Abschätzung von  $S(k)$  ergeben.

Ein Vergleich der über  $R(l)$  berechneten Spektraldichten mit den bekannten theoretischen Gesetzen für ein verhältnismäßig kurzes Intervall von  $k$  ist möglich, wie in Abb. 5 und 6 deutlich wird. Bei  $k = 0,2 - 0,65 \text{ m}^{-1}$  liegt die Funktion  $S(k)$  nach Abb. 6 nahe der Beziehung  $S(k) \sim k^{-5/3}$ .

Die für diese Arbeit notwendigen Rechnungen wurden mit dem Elektronenrechner „Minsk 22“ der ERSPO in Tallin ausgeführt.

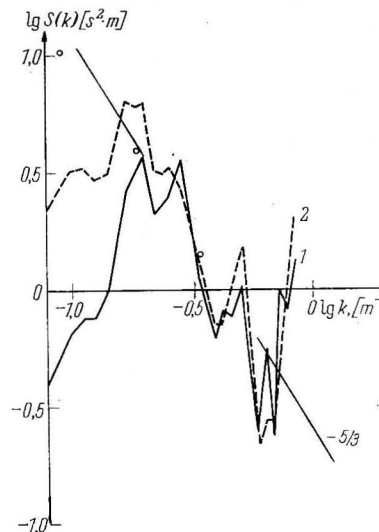


Abb. 6. Spektraldichte der Konzentrationspulsationen in doppeltlogarithmischem Maßstab (Versuch am 21. 8., Serie 13).

1  $L_0 = 45$  m; 2  $L_0 = 90$  m

Kreise — Werte des Spektrums, berechnet aus der Differenz der Dispersionen

#### Literatur

- [1] AITSAM, A. M., ASTOK, V. K. und JUCHAT, M. K., Die Berechnungsmethodik statistischer Charakteristiken der Konzentrationspulsationen von Beimengungen im Meer. Beitr. Meereskunde **30/31** (1972).
- [2] JUCHAT, M. K., Über die Transformation der Wahrscheinlichkeitsmerkmale der Konzentration passiver skalarer Substanzen im Meer (russ.). Dissertation Tallin 1969.
- [3] KARABAŠEV, G. S., Ein neues Gerät zur Untersuchung der Diffusion von Beimengungen im Meer (russ.). Izvestija Akad. Nauk SSSR, ser. fizika atm. i okeana **2**, No. 5 (1966).
- [4] MONIN, A. S. und JAGLOM, A. M., Statistische Hydromechanik (russ.). Teil 2. Verlag „Nauka“, Moskau 1967.
- [5] OZMIDOV, R. V., Über die Berechnung der horizontalen turbulenten Diffusion eines Beimengungsflecks im Meer (russ.). Doklady Akad. Nauk SSSR **120**, No. 4 (1958).
- [6] OZMIDOV, R. V., Einige Daten über die großmaßstäblichen Merkmale des Feldes der horizontalen Geschwindigkeitskomponenten im Ozean (russ.). Izvestija Akad. Nauk SSSR, ser. geofiz. **11** (1964).
- [7] OZMIDOV, R. V., Horizontale Turbulenz und turbulenter Austausch im Ozean (russ.). Verlag „Nauka“, Moskau 1968.

#### Anschriften der Verfasser:

Dr. V. K. ASTOK,  
Politechničeskij Institut, UdSSR, Tallin ul. Kalimina 101

Dr. R. V. OZMIDOV,  
Institut Okeanologii „P. P. Širšov“ AN SSSR, UdSSR, Moskau Ž 387, Sadovaja 1

## Untersuchungen zur horizontalen turbulenten Diffusion in den Gewässern um Rügen

H. J. BROSIN

Im folgenden werden einige Resultate aus Diffusionsversuchen mit Hilfe von Farbstofftracern (Rhodamin S) mitgeteilt, die im Rahmen des KAPG-Programms im August 1968 durchgeführt wurden. Die Versuche erfolgten vom Forschungsschiff „Professor Albrecht Penck“ des Instituts für Meereskunde aus nach der von OZMIDOV und KARABAŠEV [10] beschriebenen Methodik. Als Meßgerät wurde ein in-situ-Fluorometer des Instituts für Ozeanologie eingesetzt (KARABAŠEV, SOLOVJOV [5]).

Eine erste Bearbeitung erfuhren die Meßwerte von zwei Versuchen in den Gewässern westlich und östlich von Rügen. Auf der Position  $54^{\circ}39,8'N$  und  $12^{\circ}58,3' E$  wurden am 23. 8. 1961 11 kg Rhodamin S über einer Wassertiefe von 16 m mit einem Kippbehälter als momentane Punktquelle eingegeben. Am 30. 8. 1968 waren es 9 kg Rhodamin auf der Position  $54^{\circ}25,2'N$  und  $14^{\circ}0,72' E$  bei einer Wassertiefe von 15 m. Eine Diskussion der ozeanologischen Verhältnisse an den Eingabeorten sowie Bemerkungen über die horizontale und vertikale Ausbreitung der Farbstofftracern finden sich in der nachfolgenden Arbeit von BROSIN, GEZENCVEJ u. a. [1]. In dieser Arbeit werden auch die Ergebnisse einer weiteren Bearbeitung der Meßergebnisse mitgeteilt.

Als Maß der zeitlichen Konzentrationsveränderungen wurde die Änderung der Maximalkonzentration in Oberflächennähe als Funktion der Zeit untersucht. Die Werte wurden jeweils den Originalregistrierungen unter Vernachlässigung einzelner isolierter Spitzen entnommen. Nach einer Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate ergab sich für die Vermessungen am 23. 8. 1968 eine Abhängigkeit der Maximalkonzentration proportional zu  $t^{-2,45}$ . Die Bearbeitung der Meßwerte vom 30. 8. 1968 ergab eine zeitliche Veränderung der maximalen Konzentration proportional zu  $t^{-2,61}$  (Abb. 1).

Die ermittelten Exponenten liegen zwischen den Aussagen der Gleichung von JOSEPH und SENDNER [4], die eine Änderung der Maximalkonzentration proportional zu  $t^{-2}$  verlangt und dem „4/3-Gesetz“ der Turbulenztheorie (Proportionalität zu  $t^{-3}$ ). Von HELA und VOIPJO [3] mitgeteilte Versuchsergebnisse aus dem Bottnischen Meerbusen, die Exponenten zwischen 2,2 und 2,6 ergaben, stimmen mit unseren Resultaten überein. Die bei diesen Versuchen angetroffenen Randbedingungen und auch die untersuchten Maßstabbereiche entsprachen

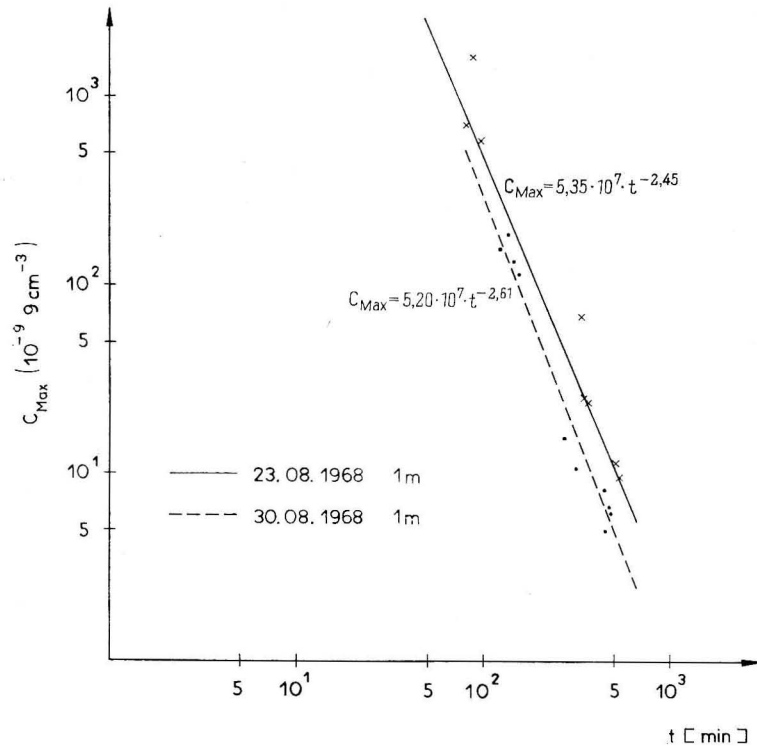


Abb. 1. Zeitliche Veränderung der maximalen Tracerkonzentration bei zwei Versuchen westlich und östlich von Rügen

etwa unseren Verhältnissen. Ähnliche Versuche von NAN'NITI und OKUBO [8] vor der japanischen Küste und von KILEŽENKO [6] in einer Bucht der Barentssee ergaben Exponenten nahe 3. Dagegen liegen von FOXWORTHY [2] mitgeteilte Werte einer großen Anzahl von Farbstoffversuchen vor der kalifornischen Küste zwischen 1,3 und 2,3. Die zeitliche Änderung der maximalen Tracerkonzentration stellt eine Größe dar, die sich nach der gegenwärtigen Versuchsmethodik mit einer einigermaßen befriedigenden Genauigkeit erfassen läßt. Da sie Aussagen über den Gültigkeitsbereich der verschiedenen Lösungsansätze für die Konzentrationsänderungen gestattet, ist es wünschenswert, ein größeres Meßwertkollektiv unter definierten Randbedingungen zu erhalten.

Als Maß der horizontalen Veränderungen wurden die Varianzen  $\sigma^2$  der Längs- und Querachsen der Farbstoffellipse berechnet und ihre zeitliche Veränderung untersucht. Da die Vermessung der Tracerkonzentrationen in den einzelnen Tiefenschichten nacheinander in einem größeren zeitlichen Abstand erfolgte, können für die Vertikalkoordinate keine Varianzen berechnet werden. Bei dem Versuch vom 23. 8. 1968, erfolgte die zeitliche Änderung der Längs-

ausdehnung proportional zu  $t^{3,37}$ , die der Querausdehnung proportional zu  $t^{2,16}$ . Diese Aussagen bestätigen die schon aus dem optischen Bild der Tracerflecken (Verhältnis der Längs- und Querachsen etwa 2,5–3,5:1) ersichtliche ungleichmäßige Ausbreitung der diffundierenden Substanz. Für den Versuch vom 30. 8. 1968 ergab sich für  $\sigma_x^2$  eine Proportionalität zu  $t^{1,84}$  und für  $\sigma_y^2$  zu  $t^{0,85}$  (Abb. 2). Der Wert für  $\sigma_y^2$  erscheint als zweifelhaft.

Nach der von OKUBO [9] angegebenen Gleichung

$$K_a = \frac{d\sigma^2}{2 dt}$$

wurden die horizontalen Diffusionskoeffizienten mit Hilfe der vorstehend abgeleiteten Beziehungen für die zeitlichen Änderungen der Varianzen berechnet. Als Zeitskala wurden für beide Versuche 100 bzw. 500 Minuten angesetzt. Tab. 1 enthält die Ergebnisse. Die im Widerspruch zur Wirklichkeit stehende Abnahme von  $K_y$  beim zweiten Versuch resultiert aus dem fraglichen Exponenten von 0,85 für  $\sigma_y^2$ .

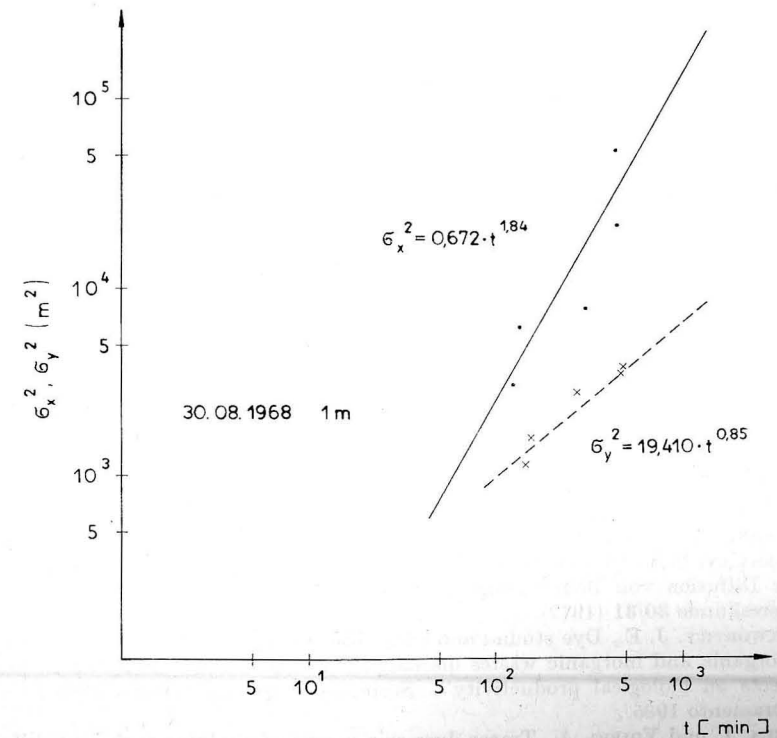


Abb. 2. Zeitliche Veränderung von  $\sigma_x^2$  und  $\sigma_y^2$  am 30. 8. 1968

Tabelle 1  
Horizontale Diffusionskoeffizienten

Datum	Tiefe (m)	Zeit (min)	$K_x$ (cm <sup>2</sup> /s)	$K_y$ (cm <sup>2</sup> /s)
23. 8. 1968	1	100	941	564
		500	38030	3650
30. 8. 1968	1	100	4940	697
		500	19100	548

Als wichtige Größe zur Beurteilung der Diffusionsprozesse tritt in der Theorie von JOSEPH und SENDNER die Diffusionsgeschwindigkeit  $P$  auf. Wegen der von uns angewendeten Vermessungsmethodik des Tracerflecks ist eine direkte Bestimmung der Diffusionsgeschwindigkeit aus der Flächenänderung der von Linien gleicher Konzentration umschlossenen Gebiete nur schwer möglich. Eine näherungsweise Abschätzung erfolgt aus der Lösung der Diffusionsgleichung nach JOSEPH und SENDNER

$$C(r, t) = \frac{M}{2\pi(Pt)^2} e^{-\frac{r}{Pt}};$$

$M$  = eingesetzte Farbstoffmenge.

Als Konzentration wird die bekannte Maximalkonzentration eingesetzt. Die auf diese Weise berechneten Diffusionsgeschwindigkeiten sind wahrscheinlich etwas zu hoch, da es fraglich ist, ob die tatsächliche Maximalkonzentration erfaßt wurde. Unter der nach den Beobachtungen einigermaßen gerechtfertigten Annahme, daß der Farbstoff gleichmäßig auf eine Schicht von 3 m Dicke verteilt ist, ergaben sich für unsere Versuche Werte von 0,49 cm/s (23. 8.) und 0,21 cm/s (30. 8.). Trotz der einschränkenden Annahmen ist die Übereinstimmung mit direkt ermittelten Werten der Diffusionsgeschwindigkeit bei Vorgängen ähnlicher Maßstäbe (z. B. KULLENBERG [7]) überraschend gut.

Bei diesen hier mitgeteilten Werten handelt es sich um die Ergebnisse einer ersten Bearbeitung. Die nachfolgende Arbeit enthält die Resultate einer weiterführenden Auswertung. Dabei werden unsere Aussagen größtenteils bestätigt.

#### Literatur

- [1] BROŠIN, H. J., GEZENCVEJ, A. N., KARABAŠEV, G. S., KREMSER, U., LE KUANG TOAI, MURAV'EV, S. S., OZMIDOV, R. V. und VOIGT, K., Das mittlere dreidimensionale Bild der Diffusion von Beimengungen aus momentanen Punktquellen im Meer. Beitr. Meereskunde **30/31** (1972).
- [2] FOXWORTHY, J. E., Dye studies and eddy diffusion in: "An investigation on the fate of organic and inorganic wastes discharged into the marine environment and their effects on biological productivity". State water Quality Control Board Publ. 29, Sacramento 1965.
- [3] HELA, I. und VOIPIO, A., Tracer dyes as a means of studying turbulent diffusion in the sea. Ann. Acad. Sci. Fennica, **A 6**, 69 (1960).

- [4] JOSEPH, J. und SENDNER, H., Über die horizontale Diffusion im Meer. Deutsch. Hydrogr. Zeitschr. **17**, 2 (1958).
- [5] KARABAŠEV, G. S. und SOLOVJOV, A. N., Ein Schleppgerät zur Konzentrationsmessung lumineszenter Indikatoren im Meer (russ.). Izvest. Akad. Nauk SSSR, ser. fizika atm. i okeana **4**, 12 (1968).
- [6] KILEŽENKO, V. P., Experimentelle Untersuchung der horizontalen turbulenten Diffusion eines Beimengungsflecks im Meer (russ.). Sammelband „Materialy rybochoz. izl. Severnogo basseina“ **4**, Murmansk 1964.
- [7] KULLENBERG, G., Measurements of horizontal and vertical diffusion in coastal waters. Institut for Fysisk Ocean. Københavns Universitet Report **3** (1968).
- [8] NAN'NITI, T. und OKUBO, A., An example of the diffusion of a floating dye patch in the sea. J. Oceanogr. Soc. Japan **13**, 1 (1957).
- [9] OKUBO, A., A new set of oceanic diffusion diagrams. Chesapeake Bay Institute, John Hopkins University Technical Report **38** (1968).
- [10] OZMIDOV, R. V. und KARABAŠEV, G. S., Methodik zur Untersuchung der Diffusion von Beimengungen im Meer mit Hilfe lumineszenter Indikatoren. Beitr. Meereskunde **30/31** (1972).

Anschrift des Verfassers:

Dr. H. J. BROŠIN,  
Institut für Meereskunde der DAW  
DDR - 253 Warnemünde, Seestr. 15

## Das mittlere dreidimensionale Bild der Diffusion von Beimengungen aus momentanen Punktquellen im Meer

H. J. BROŠIN, A. N. GEZENCVEJ, G. S. KARABAŠEV, U. KREMŠER,  
LE KUANG TOAI, S. S. MURAV'EV, R. V. OZMIDOV und K. VOIGT

Versuche mit momentanen Punktquellen von Rhodamin erfolgten im August–September 1968 in der Ostsee während einer internationalen Expedition auf dem Forschungsschiff „Professor Albrecht Penck“ des Instituts für Meereskunde der DAW, Warnemünde. Die Arbeiten erfolgten mit einer am Institut für Ozeanologie „P. P. ŠIRŠOV“ der Akademie der Wissenschaften der UdSSR entwickelten Apparatur und nach der bei OZMIDOV [1] beschriebenen Methodik. Insgesamt erfolgten 4 Farbstoffversuche (Tab. 1).

Bei allen Versuchen erfolgte die Farbstoffeingeabe in unmittelbarer Nähe einer speziell verankerten Boje mit Radarreflektor bzw. in Sichtweite einer Bojestation des Instituts für Meereskunde. Die Lage des Flecks relativ zur Boje wurde beim Passieren des Schiffes durch das Fleckzentrum mit Radar nach Richtung und Abstand bestimmt. Gewöhnlich begann die erste Vermessung des Farbflecks 1–2 Stunden nach Einleitung, wenn die Farbstoffkonzentration im Fleckzentrum etwa  $10^{-5}$  g/cm<sup>3</sup> betrug. Der Fleck hatte dann solche Abmessungen, daß der Einfluß des mit einer konstanten Geschwindigkeit von 4 kn das Gerät schleppenden Schiffes vernachlässigt werden konnte. Das Zentrum des wie gewöhnlich sehr unregelmäßig geformten Fleckes wurde visuell bestimmt. Die Schnitte durch den Fleck wurden auf möglichst rechtwinklig zueinander verlaufenden Kursen so gelegt, daß das Zentrum passiert wurde. Um ein dreidimensionales Bild der Diffusion zu erhalten, erfolgte die Vermessung des

Tabelle 1  
*Daten der einzelnen Versuche*

Nr.	Datum	Zeit der Farbstoffeingeabe (GMT)	Koordinaten	Menge an Rhodamin S (kg)
1	21. 8. 1968	08.10	54° 52,4' N 13° 58,1' E	8
2	23. 8. 1968	07.18	54° 39,8' N 12° 58,3' E	11
3	30. 8. 1968	07.58	54° 25,2' N 14° 02,7' E	9
4	1. 9. 1968	07.37	55° 14,0' N 18° 58,0' E	10

Fleckes nicht nur in Oberflächennähe (in etwa 1 m Tiefe), sondern auch in verschiedenen anderen Horizonten bis zu den Tiefen, wo innerhalb der Empfindlichkeit des Meßgerätes kein Farbstoff mehr festgestellt wurde. Ferner wurde 1–2 Stunden nach Beendigung der ersten Vermessung, d. h. 5–6 Stunden nach Farbstoffeingabe, analog eine zweite Vermessung durchgeführt. Da die Fleckausmaße immer größer wurden, reichte die Tageshelligkeit nicht mehr für eine dritte Untersuchung aus. Nur am 21. und 23. 8. erfolgte auf 3 bzw. 2 Kursen in Oberflächennähe eine dritte Vermessung. Gewöhnlich bestand jede Aufnahme aus 8–10 Kursen, welche die Tiefen von der Oberfläche bis 8–10 m in 3–4 Horizonten erfaßten.

Außer den Arbeiten zur Untersuchung der Diffusion wurden auch die hydro-meteorologischen Parameter zu Beginn der Untersuchungen und z. T. auch während und nach Beendigung der Messungen bestimmt.

In der vorliegenden Arbeit werden nur die Ergebnisse von zwei Versuchen am 23. und 30. 8. 1968 diskutiert. In Abb. 1 und 2 sind die Trajektorien der Bewegung dieser Flecken anhand von 3 bzw. 2 Aufnahmen dargestellt. Am 23. 8. legte die Farbstoffwolke in den 9 Stunden von der Einleitung bis zur Beendigung des letzten Schnittes eine Entfernung von 8 Seemeilen zurück (Abb. 1), d. h. sie verdriftete mit einer mittleren Geschwindigkeit von 46,4 cm/s und der mittleren Bewegungsrichtung von 246°. Nach Strömungsmessungen im Gebiet der Farbstoffeingabe zu Beginn der Arbeiten setzte die Strömung in Oberflächennähe mit 30–35 cm/s nach 246–250°. Strömungsmessungen im Gebiet der letzten Vermessung nach Beendigung der Arbeiten zeigten, daß sich die Strömungsgeschwindigkeit praktisch verdoppelt hatte und 55–65 cm/s betrug.

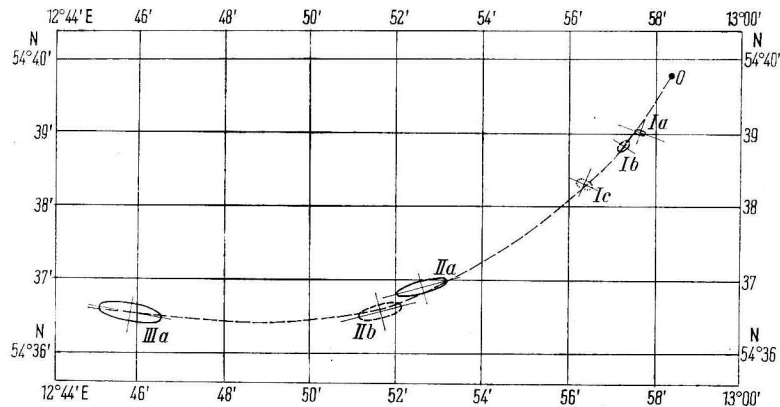


Abb. 1. Trajektorien des Rhodamin-Fleckes in den Horizonten 1 m (a), 4 m (b) und 6 m (c) nach den Meßwerten der Aufnahmen I, II und III am 23. 8. 1968. Der Fleck wird begrenzt durch die Isolinie  $C = 1 \cdot 10^{-9} \text{ g/cm}^3$   
0 = Eingabeort des Rhodamins

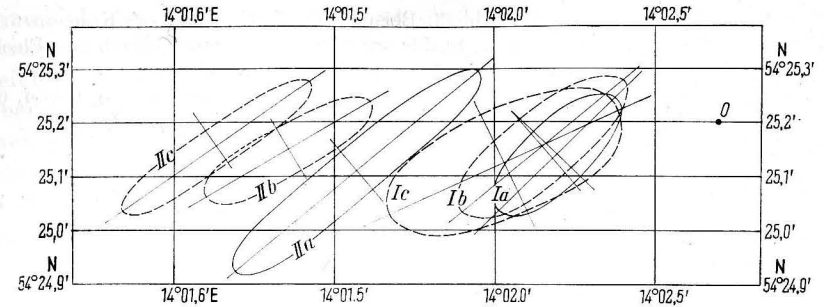


Abb. 2. Trajektorien des Rhodamin-Fleckes in den Horizonten 1 m (a), 5 m (b) und 7 m (c) nach den Meßwerten der Aufnahmen I und II am 30. 8. 1968. Der Fleck wird begrenzt durch die Isolinie  $C = 1 \cdot 10^{-9} \text{ g/cm}^3$   
0 = Eingabeort des Rhodamins

Das bedeutet, daß die mittlere Strömungsrichtung und -geschwindigkeit nach den Beobachtungen der Fleckverdriftung gut mit den instrumentellen Beobachtungen übereinstimmt.

In noch größerem Maße trifft das für den am 30. 8. 1968 ausgebrachten Farbfleck zu. Im Verlauf von 8 h 20 min verdriftete der Fleck nur um 0,9 Seemeilen, d. h. fast 10mal weniger als am 28. 8. (Abb. 2). Dabei betrug die berechnete mittlere Geschwindigkeit 5,6 cm/s mit der mittleren Richtung von 267°. Nach instrumentellen Messungen vor der Farbstoffeingabe betrug die Strömung in der oberflächennahen Schicht 5,8 cm/s mit der Richtung 266°.

Die Farbstoffverteilung wurde als kontinuierliche Kurve auf einem elektronischen Kompensationsschreiber EPP-09 registriert. Aus diesen Registrierungen wurde alle 0,5 cm der angezeigte Wert entnommen und mit Hilfe einer Eichgraphik in Konzentrationsangaben  $C$  ( $\text{g/cm}^3$ ) umgerechnet. Abb. 3 zeigt als Beispiel die Konzentrationsverteilung auf dem ersten Schnitt am 30. 8. (Kurs 60°). Aus der Darstellung ist ersichtlich, daß die Konzentrationsverteilung längs des Meßprofils sehr ungleichmäßig war. Es ist nicht möglich, ein mittleres Bild der Farbstoffkonzentration auf dem Horizontalschnitt durch den Fleck aus diesen Momentanwerten zu erhalten. Daher wurde für jedes Profil eine Glättung der Einzelwerte durchgeführt. Diese Glättung erfolgte mit einem Kosinus-Filter, das gegenwärtig verbreitet bei ozeanologischen Untersuchungen verwendet wird. Die Glättung der Konzentrationswerte geschah nach der Formel

$$\bar{C}^K = \frac{\sum_{i=0}^{K-1} C_i \left(1 + \cos \frac{2\pi}{K} i\right)}{K}, \quad (1)$$

wobei

$K = L/\Delta L =$  Glättungsparameter,

$L =$  Glättungsmaßstab,

$\Delta L =$  diskreter Schritt, bei unseren Versuchen — 3,85 m.

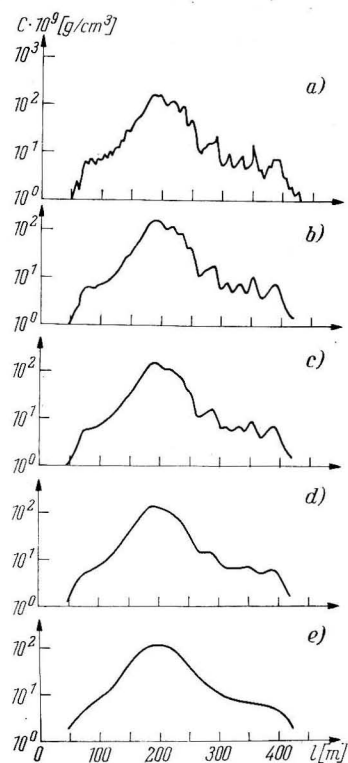


Abb. 3. Beispiel für die Glättung des Konzentrationsprofils auf einem Querschnitt durch den Fleck  
 a) ohne Glättung  
 b, c, d, e) mit einem Glättungsmaßstab  $L = 4, 6, 12, 24 \Delta L$  ( $\Delta L = 3,85 \text{ m}$ )

Der Glättungseffekt ist auf Abb. 3 für ein  $K$  von 4, 6, 12 und 24 dargestellt. Das Bild der Rhodaminverteilung in den Horizonten 1, 4 und 6 m für den 23. 8. und in 1, 5 und 7 m für den 30. 8. wurde anhand der geglätteten Konzentrationswerte  $C^{24}$  gewonnen (Abb. 4 und 5). Bei der Zusammenstellung dieser Darstellungen wurden Kurse verwendet, die sich im Prinzip im visuell bestimmten Fleckzentrum schneiden müssten. Jedoch war in einigen Fällen eine Parallelverschiebung der Kurse notwendig, damit die maximalen Konzentrationen im Schnittpunkt der Kurse zusammenfielen.

Wie aus Abb. 4 a und b ersichtlich ist, haben die Umriss des Fleckes in den Horizonten 1 und 4 m nach den 1,5 und 2 Stunden nach Farbstoffeingabe erfolgten Vermessungen während der ersten Aufnahme am 23. 8. eine sehr unregelmäßige Form. Dagegen ergeben die 5 und 8 Stunden nach Einleitung durch den Fleck gelegten Schnitte der Aufnahmen II und III nicht nur, daß sich der Fleck beträchtlich vergrößert hatte, sondern zugleich auch in allen Horizonten eine elliptische Form mit einem Verhältnis der Achsen von etwa 3,5–4 angenommen hatte. Offensichtlich erweisen sich als Hauptursache dieser starken horizontalen Anisotropie des Diffusionsprozesses die in der Strömung sowohl in horizontaler als auch vertikaler Richtung vorhandenen Geschwindigkeitsgradienten, wie dies ausführlich von OZMIDOV u. a. [2] erörtert wurde (Abb. 6 a, b).

Bezüglich der Ergebnisse während der Aufnahme I kann möglicherweise angenommen werden, daß die seit der Farbstoffeingabe verstrichene Zeit nicht ausreichte, um eine Anpassung des diffundierenden Fleckes an das im vorgegebenen Gebiet vorhandene Strömungsfeld zu ermöglichen.

Nach den Meßwerten der Versuche am 30. 8. hat der Fleck schon als Ergebnis der Aufnahme I, die in einem größeren Zeitabstand von 2,5–3 Stunden nach Einleitung erfolgte, in allen drei Horizonten eine elliptische Form (Abb. 5 a, b, c). Jedoch war das Achsenverhältnis geringer als am 23. 8. und betrug annähernd 2,5, d. h., die horizontale Anisotropie war schwächer ausgebildet. Es kann angenommen werden, daß eine der wichtigsten Ursachen hierfür die wesentlich geringeren vertikalen Geschwindigkeitsgradienten waren, die am 30. 8. beobachtet wurden (Abb. 6 c).

Infolge von starkem Nebel erfolgte am 30. 8. die Aufnahme II verzögert erst 3 Stunden später, d. h. 7,5–8 Stunden nach der Farbstoffeingabe. Die Ergebnisse dieser Vermessung sind ebenfalls in Abb. 5 dargestellt. Wie aus der

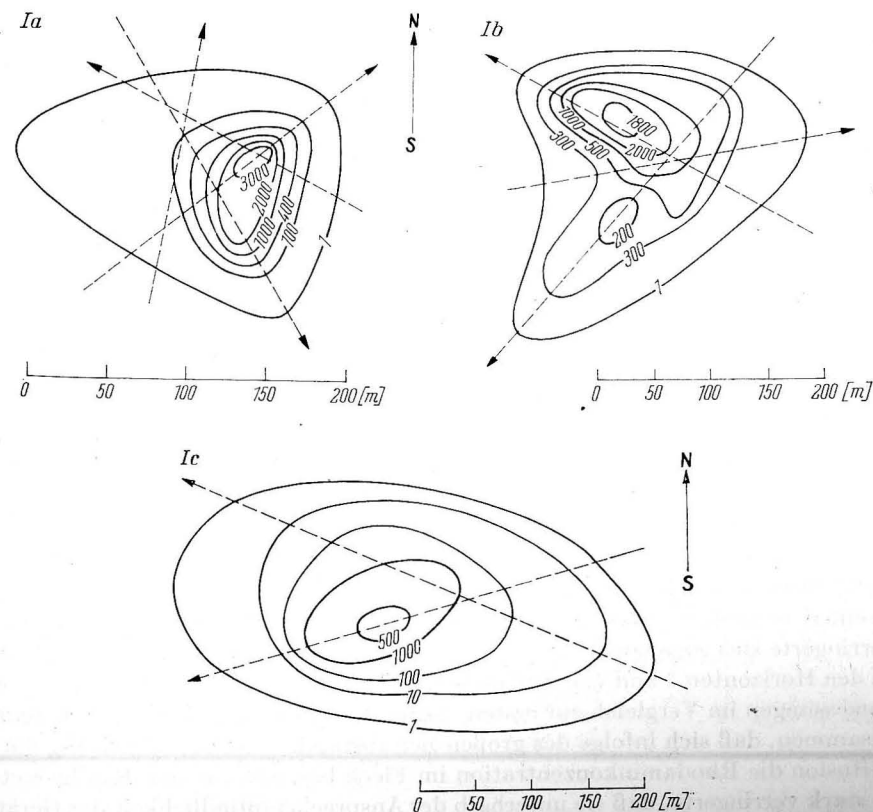


Fig. 4—I a—c



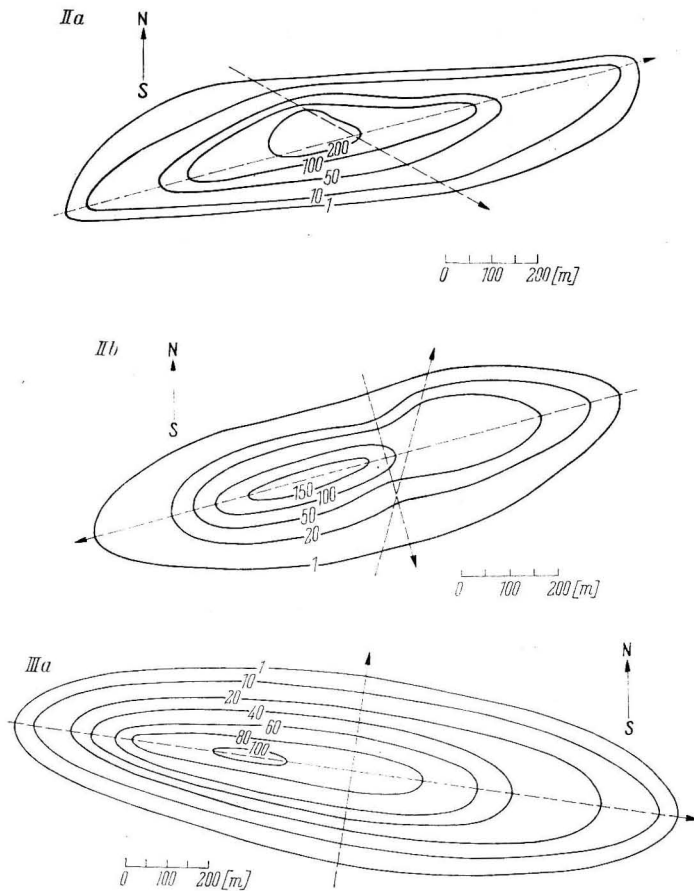


Abb. 4. Verteilung der Rhodaminkonzentration in den Horizonten 1 m (a), 5 m (b) und 6 m (c) nach Meßwerten der Vermessungen I, II und III am 23. 8. 1968. (Zahlen an den Isolinien-Konzentrationen in  $10^{-9} \text{ g/cm}^3$ , gestrichelte Linien — Schiffskurse, Pfeil — N-S-Richtung)

Darstellung ersichtlich ist, war die maximale Länge des Flecks in 1 m Tiefe nur zweimal so groß wie der Maximalwert der Aufnahme I, die Breite des Flecks verringerte sich sogar im Vergleich mit der ersten Vermessung um das 1,3fache. In den Horizonten 5 und 7,5 m erfolgte eine allgemeine Verkleinerung der Fleckabmessungen im Vergleich zur ersten Aufnahme. Das hängt offenkundig damit zusammen, daß sich infolge des großen Zeitabstandes von der Einleitung durch Diffusion die Rhodaminkonzentration im Fleck besonders in den Randgebieten so stark verringerte, daß sie unterhalb der Ansprechempfindlichkeit des Gerätes ( $1 \cdot 10^{-9} \text{ g/cm}^3$ ) lag.

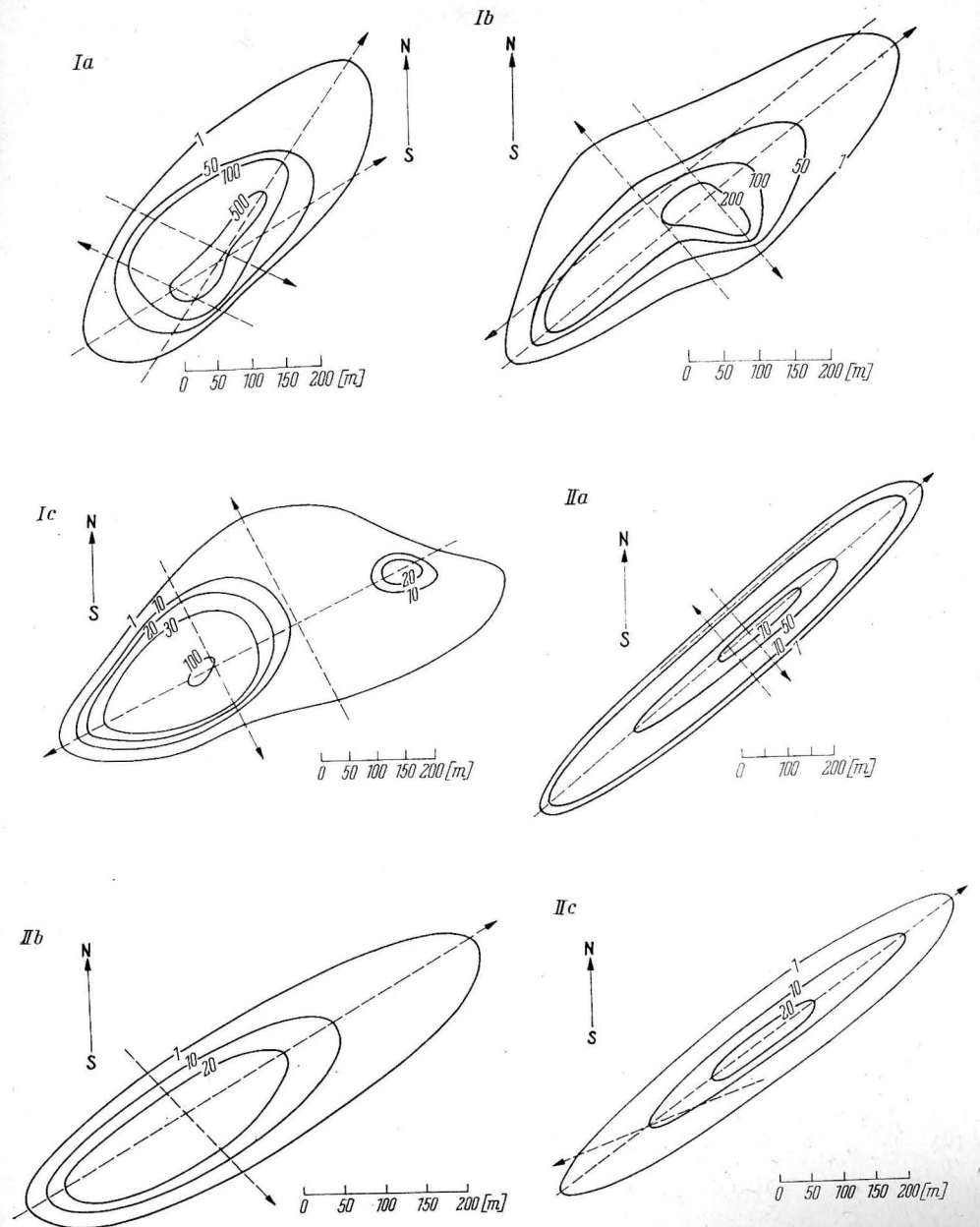


Abb. 5. Verteilung der Rhodaminkonzentration in den Horizonten 1 m (a), 5 m (b) und 7 m (c) nach Meßwerten der Vermessungen I und II am 30. 8. 1968

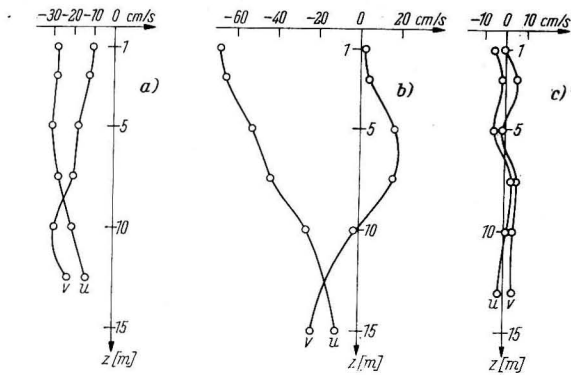


Abb. 6. Vertikales Strömungsprofil nach Messungen am 23. 8. 1968 05 h GMT (a) und 17 h GMT (b) sowie am 30. 8. 1968 07 h GMT (c)

Die Untersuchung der Diffusion in vertikaler Richtung zeigte eine starke Anisotropie des Vorganges, wie das schon vom Maßstab der Erscheinung her zu erwarten war. So konnte am 23. 8. 3 Stunden nach Farbstoffeingabe der Tracer nur bis zu einer Tiefe von 6 m festgestellt werden und am 30. 8. bis 7,5–8 m Tiefe. Eine gewisse Änderung in der Eindringtiefe des Farbstoffes war offensichtlich mit der unterschiedlichen Dichteschichtung im Wasser verbunden. Wie aus Abb. 7 a' ersichtlich ist, war die Schicht bis 5–6 m Tiefe gut durchmisch, während sich darunter eine gut ausgebildete Sprungschicht mit einem

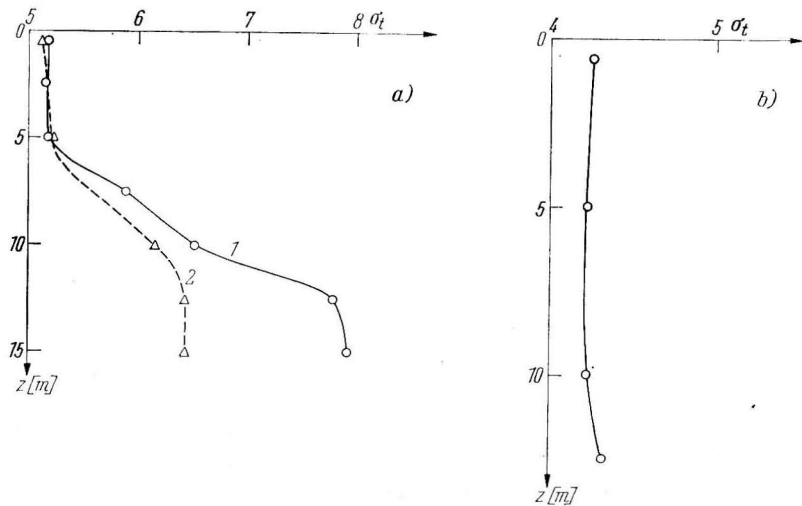


Abb. 7. Vertikale Dichteverteilung im Gebiet der Farbstoffeingabe  
a) am 23. 8. 1968 (1 – vor Beginn der Arbeiten, 2 – nach Beendigung)  
b) am 30. 8. 1968 (vor Beginn der Arbeiten)

Dichtegradienten von  $3 \cdot 10^{-3} \sigma_t$ -Einheiten/cm befand. Aller Wahrscheinlichkeit nach wurde dadurch eine weitere Vertikaldiffusion erschwert. Am 30. 8. besaß praktisch die Schicht bis 10 m Tiefe eine einheitliche Dichte. Nur darunter wurde eine leichte Dichtezunahme mit einem Gradienten von  $0,4 \cdot 10^{-3} \sigma_t$ -Einheiten/cm beobachtet (Abb. 7 b). Dieser geringe Gradient reichte offensichtlich schon aus, um im vorgegebenen Falle ein weiteres Vordringen der diffundierenden Farbstoffwolke in eine größere Tiefe zu verhindern.

Eine wichtige Charakteristik des Diffusionsprozesses von einer momentanen Punktquelle aus ist die Abhängigkeit der maximalen Tracerkonzentration im Fleckzentrum von der Diffusionszeit. In Abb. 8 sind diese Beziehungen für alle Aufnahmen, Horizonte und Schnitte durch den Fleck nach den Ergebnissen der 4 am 21., 23. und 30. 8. sowie am 1. 9. durchgeführten Versuche dargestellt. Die experimentell erhaltenen Punkte werden genügend gut durch eine theoretische Kurve erfaßt, die eine kubische Abhängigkeit der Maximalkonzentration im Fleckzentrum von der Zeit (gerechnet vom Augenblick der Farbstoffeingabe an) ergeben. Die Abweichung einer Reihe von Punkten kann dadurch erklärt werden, daß bei der Vermessung des Flecks mit dem Gerät nicht immer das Zentrum mit den maximalen Konzentrationswerten erfaßt wurde. Eine kubische Abhängigkeit wird auch erhalten, wenn die horizontale Diffusion durch eine Gleichung beschrieben wird, worin der Diffusionskoeffizient nach dem „4/3-Gesetz“ bestimmt wird und der vertikale Austausch unberücksichtigt bleibt. Zum gleichen Resultat kann man jedoch auch beim Vorhandensein einer Vertikaldiffusion kommen, wenn der horizontale Diffusionskoeffizient mit dem Maßstab der Erscheinung durch einen Ausdruck mit einem Exponenten „4/3“ verbunden ist. Beim Vorhandensein einer vertikalen Diffusion mit einem durch das „4/3-Gesetz“ bestimmten Koeffizienten und einer Beschreibung der Horizontaldiffusion durch dasselbe Gesetz muß die zeitliche Konzentrationsabnahme im Fleckzentrum schneller erfolgen, und zwar proportional zu  $t^{-9/2}$  (MONIN [3]). Die Anwendbarkeit der einen oder anderen Diffusionsgleichung mit verschiedenen Koeffizienten ist offensichtlich eng verbunden mit den verschiedenen Maßstäben des untersuchten Vorganges.

In der vorliegenden Arbeit wurde der Versuch unternommen, die dreidimensionale geglättete Konzentrationsverteilung in den diffundierenden Flecken durch Lösungen der halbempirischen Diffusionsgleichungen mit konstanten, aber für die einzelnen Koordinatenachsen unterschiedlichen Koeffizienten zu approximieren. Dabei hat die Diffusionsgleichung folgende Form

$$\frac{\partial c}{\partial t} = K_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2}, \quad (2)$$

wobei

- $c$  = mittlere Konzentration der diffundierenden Substanz,
- $t$  = Zeit, gerechnet vom Beginn der Einleitung,
- $x$  = Richtung der großen Achse des elliptischen Tracerfleckes,
- $z$  = vertikal nach unten gerichtet.

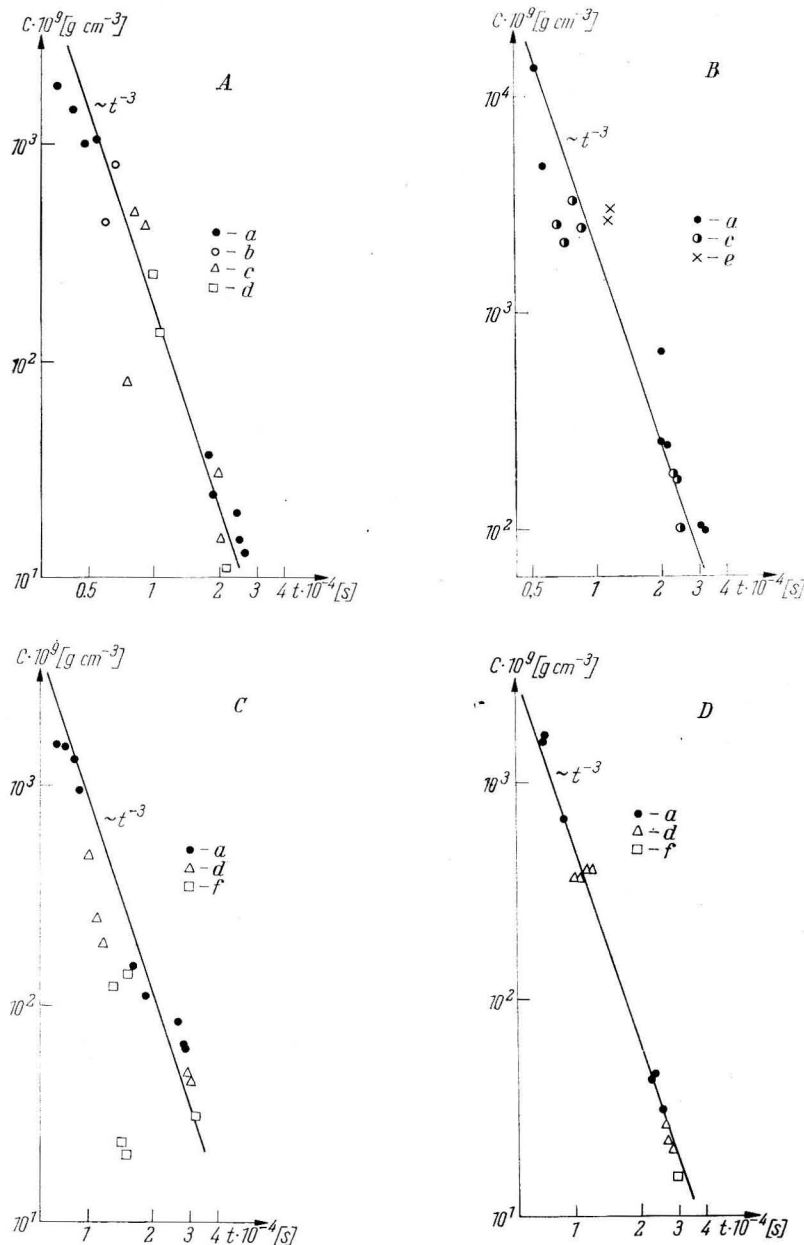


Abb. 8. Veränderung der Maximalkonzentration im Fleck in Abhängigkeit von der Zeit (gerechnet vom Augenblick der Farbstoffeingabe an) anhand der Versuchsdaten vom 21. 8. (A), 23. 8. (B), 30. 8. (C) und 1. 9. (D) in den Horizonten 1 m (a), 3 m (b), 4 m (c), 5 m (d), 6 m (e) und 7 m (f)

Die Lösung dieser Gleichung hat unter der Bedingung einer Spiegelung der Beimengung an der Meeresoberfläche die Form

$$c(x, y, z, t) = \frac{Q}{4 \pi^{3/2} t^{3/2} (K_x K_y K_z)^{1/2}} \exp \left\{ -\frac{1}{4t} \left( \frac{x^2}{K_x} + \frac{y^2}{K_y} + \frac{z^2}{K_z} \right) \right\}, \quad (3)$$

wobei  $Q$  = die Menge der als momentane Punktquelle ins Meer eingegebenen Beimengung in g.

Die Konzentrationsverteilung in der Vertikalen ergibt sich im Fleckzentrum zu

$$c(0, 0, z, t) = c(0, 0, 0, t) \exp \left[ -\frac{z^2}{4 K_z t} \right], \quad (4)$$

woraus folgt

$$K_z = \frac{z^2}{4 t \ln \left[ \frac{c(0, 0, 0, t)}{c(0, 0, z, t)} \right]}. \quad (5)$$

Eine Berechnung von  $K_z$  nach (5) aus den Ergebnissen unserer Versuche ist unzulässig, da gleichzeitige Messungen der maximalen Konzentrationswerte an der Oberfläche und in den einzelnen Horizonten fehlen. Um diese Schwierigkeit zu umgehen, wird angenommen, daß die Zeit  $\Delta t$  zwischen den Aufnahmen bedeutend kleiner ist als die seit der Einleitung des Tracers verstrichene Zeit  $t$ . Dann kann wie folgt geschrieben werden:

$$c(0, 0, z, t + \Delta t) \approx c(0, 0, z, t) + \frac{\partial c(0, 0, z, t)}{\partial t} \Delta t. \quad (6)$$

Durch Differenzieren von (4) nach der Zeit erhält man

$$\frac{\partial c(0, 0, z, t)}{\partial t} = c(0, 0, z, t) \left[ \frac{z^2}{4 K_z t^2} - \frac{3}{2t} \right]. \quad (7)$$

Nach Einsetzen in (6) und Ersetzen von  $c(0, 0, z, t)$  durch  $c(0, 0, z, t + \Delta t)$  ergibt sich Gl. (5) in der Form

$$K_z = \frac{z^2}{4 t} \frac{1}{\ln \left[ \frac{c(0, 0, 0, t)}{c(0, 0, z, t + \Delta t)} \right] + \ln \left[ 1 + \left( \frac{z^2}{4 K_z t} - \frac{3}{2t} \right) \Delta t \right]}. \quad (8)$$

Zur Vereinfachung dieses Ausdrucks verwenden wir erneut die Kleinheit von  $\Delta t$  gegenüber  $t$  und zerlegen den zweiten Logarithmus in eine Reihe, wobei wir uns auf das erste Glied beschränken.

Dann erhält (8) die Form

$$K_z = \frac{z^2}{4 t} \frac{\left( 1 - \frac{\Delta t}{t} \right)}{\left( a - \frac{3}{2} \frac{\Delta t}{t} \right)}, \quad (9)$$

wobei

$$a = \ln \left[ \frac{c(0, 0, 0, t)}{c(0, 0, z, t + \Delta t)} \right].$$

Der maximal mögliche relative Fehler bei der Bestimmung von  $K_z$  nach Formel (9) hängt vom Verhältnis  $\Delta t/t$  ab und ist gleich

$$\frac{dK_z}{K_z} \approx 50 \left( \frac{\Delta t}{t} \right)^2. \quad (10)$$

Bei  $\Delta t/t \leq 10^{-2}$  wird der vertikale Diffusionskoeffizient mit einem relativen Fehler von nicht mehr als 0,5% bestimmt. Die Berechnung nach Gl. (9) ergab folgende Werte des Koeffizienten  $K_z$ : 23. 8. — 5 cm<sup>2</sup>/s, 30. 8. — 4 cm<sup>2</sup>/s, bei einem  $t$  von 390 bzw. 493 min. Bei diesen Werten von  $t$  ist das Verhältnis  $\Delta t/t$  bei unseren Versuchen am kleinsten. Zur Bestimmung der horizontalen Diffusionskoeffizienten  $K_x$  und  $K_y$  schreiben wir Gl. (3) für einen fixierten Wert der Konzentration  $c_{\text{fix}}$  um.

$$c_{\text{fix}}(x, y, z, t) = c(0, 0, z, t) \exp \left\{ -\frac{1}{4t} \left( \frac{x^2}{K_x} + \frac{y^2}{K_y} \right) \right\}. \quad (11)$$

Durch Logarithmieren beider Seiten dieser Gleichung erhalten wir

$$\ln \left[ \frac{c(0, 0, z, t)}{c_{\text{fix}}(x, y, z, t)} \right] = \frac{x^2}{4K_x t} + \frac{y^2}{4K_y t}. \quad (12)$$

Die erhaltene Gleichung ist nichts anderes als die kanonische Gleichung der Ellipse mit den Halbachsen  $a$  und  $b$ , welche die Kurve  $c_{\text{fix}}$  für fixierte  $z$  und  $t$  beschreibt.

Unter Verwendung der aus den Darstellungen der Konzentrationsverteilung entnommenen Abmessungen der Halbachsen der elliptischen Isolinien (für unsere Berechnungen wurde die Isolinie mit einem Konzentrationswert von etwa der halben Maximalkonzentration im jeweiligen Horizont verwendet) kann man  $K_x$  und  $K_y$  nach folgenden Formeln erhalten:

$$K_x = \frac{a^2}{4t \ln \left[ \frac{c(0, 0, z, t)}{c_{\text{fix}}} \right]}, \quad (13)$$

$$K_y = \frac{b^2}{4t \ln \left[ \frac{c(0, 0, z, t)}{c_{\text{fix}}} \right]}. \quad (14)$$

Die Berechnungsergebnisse anhand dieser Formeln sind in Tab. 2 für die Versuche vom 23. und 30. 8. 1968 zusammengestellt:

Tabelle 2  
Horizontale Diffusionskoeffizienten

Datum	Horizont (m)	Zeit der Aufnahme (Min.)	$K_x$ (cm <sup>2</sup> /s)	$K$ (cm <sup>2</sup> /s)
23. 8. 1968	0	92	420	70
	0	340	2630	107
	4	390	6740	382
	0	516	26800	1060
30. 8. 1968	0	142	2330	642
	5	180	5130	733
	5	493	2380	210
	7	523	1950	103

Die Größenordnung der so erhaltenen horizontalen Diffusionskoeffizienten stimmt genügend gut mit den auf andere Weise erhaltenen Größen überein. Aus der Tabelle ist ersichtlich, daß die Diffusionskoeffizienten eng mit den Maßstäben des untersuchten Vorganges verbunden sind.

#### Literatur

- [1] OZMIDOV, R. V., Horizontale Turbulenz und turbulenter Austausch im Ozean (russ.). Verlag „Nauka“. Moskau 1968.
- [2] OZMIDOV, R. V., GEZENCVEJ, A. N. und KARABAŠEV, G. S., Neue Angaben über die Diffusion von Beimengungen im Meer (russ.). *Izvestija Akad. Nauk SSSR, ser. fizika atm. i okeana* 5, No. 11 (1969).
- [3] MONIN, A. S., Über die Wechselwirkung zwischen vertikaler und horizontaler Diffusion von Beimengungen im Meer (russ.). *Okeanologija* 5, 1 (1969).

Anschriften der Verfasser:

Dr. H. J. BROSIN, Dr. U. KREMSER, Dr. K. VOIGT  
Institut für Meereskunde der DAW  
DDR-253 Warnemünde, Seestr. 15

Dr. A. N. GEZENCVEJ, LE KUANG TOAI, S. S. MURAV'EV, Dr. R. V. OZMIDOV,  
Institut Okeanologii „P. P. Širšov“, AN SSSR, UdSSR,  
Moskau Ž 387, Sadovaja 1

Dr. G. S. KARABAŠEV,  
Atlantičeskoje Otdelenije Instituta  
Okeanologii „P. P. Širšov“, AN SSSR, UdSSR, Kaliningrad,  
Prospekt Mira 1

Methodik zur Untersuchung der Diffusion  
von Beimengungen im Meer  
mit Hilfe lumineszenter Indikatoren

R. V. OZMIDOV und G. S. KARABAŠEV

Die Grundaufgabe der Diffusionsexperimente im Meer besteht darin, aus der gemessenen Indikatorverteilung in Raum und Zeit die Parameter und Gesetzmäßigkeiten zu finden, die die Konzentrationswerte der Beimengung im gegebenen Punkt mit den Charakteristiken der kinematischen Struktur des Wasserstroms und den hydrometeorologischen Versuchsbedingungen verbinden. Die Darlegung der Methodik ähnlicher Experimente neben der Beschreibung der Operation und des technischen Empfangs, die die Bestimmung der Indikatorkonzentration erlauben, muß, allgemein gesprochen, die Beschreibung der Meßmethoden der kinematischen Charakteristiken des Wasserstromes und der hydrometeorologischen Größen einschließen. Die Ausarbeitung der Methodik für Versuche zur Diffusion im Meer ist in vollem Umfang nur durch ein Spezialistenkollektiv — Hydrophysiker verschiedenen Profils — möglich. In dieser Mitteilung werden nur Fragen zur Methodik der Bestimmung des Feldes der Indikatorkonzentration im Meer betrachtet.

Eine beliebige Methodik zur Untersuchung der Diffusion von Beimengungen im Meer, die sich auf die natürliche Modellierung des Prozesses mit Hilfe dieser oder jener Indikatoren stützt, muß die Einleitung des Indikators in Übereinstimmung mit den Bedingungen der speziellen Aufgabe (einmalig oder stationär, punktförmig oder ausgedehnt usw.) und die Zuordnung der Ergebnisse der Konzentrationsmessungen des Indikators zu einem Koordinatensystem zum Auffinden der Verteilungsfunktion des Indikators gewährleisten.

Außerdem werden wegen des stochastischen Charakters des Diffusionsprozesses im Meer und der verhältnismäßig kleinen Maßstäbe des Indikatorkörpers die traditionellen Methoden zur Bestimmung physikalischer Feldgrößen im Meer bewußt unbrauchbar zur Abschätzung des Feldes der Indikatorkonzentration, was auch die Notwendigkeit einer Ausarbeitung spezieller Verfahren für natürliche Messungen bedingt. Die vorgelegte Methode für Versuche zur Diffusion im Meer basiert auf der Verwendung eines geschleppten Fluorometers und entstand im Zuge der Expeditionsuntersuchungen bei der Berücksichtigung der aufgezählten Forderungen für die Untersuchung der Diffusion von stationären und einmaligen Punktquellen von Beimengungen, da gerade diese Andersartigkeit der Prozesse von größtem praktischen und theoretischem Interesse ist [1, 2].

Bei ununterbrochenem und gleichmäßigem Ausfluß des Indikators aus einer festen Punktquelle im Wasserstrom wird ein Indikatorkörper von der Form einer „Feder“ gebildet, der sich mit der Strömung ausdehnt und sich infolge der Diffusion (mit der Entfernung von der Quelle) erweitert. Infolge des statistischen stationären Charakters des Prozesses verändert sich der augenblickliche Konzentrationswert des Indikators in einem beliebigen Punkt der „Feder“ in bezug auf den wahrscheinlichsten oder Mittelwert, jedoch muß letzterer nach einer anfänglichen Übergangsperiode konstant werden, wenn die Strömungsgeschwindigkeit und andere Parameter der Umgebung sich nicht mit der Zeit ändern. Unter diesen Bedingungen kann das Konzentrationsfeld des Indikators auf dem Wege der kontinuierlichen Registrierung der Indikatorverteilung im Querschnitt der „Feder“ in bestimmten Entfernungen von der Quelle zu verschiedenen Zeitpunkten ermittelt werden. Dieser Umstand vereinfacht das Experiment außerordentlich. Bei einer genügenden Anzahl von Beispielen kann die mittlere Indikatorverteilung in der gegebenen Entfernung von der Quelle mit einer Genauigkeit gefunden werden, die durch den Fehler der Koordinatenbestimmung und den Fehler bei der Abschätzung der Indikatorkonzentration bestimmt wird. Der große Wert des Arbeitens mit stationärer Quelle besteht auch darin, daß das abschließende Ergebnis — die mittlere Verteilung des Indikators — ohne besondere Schwierigkeiten auch unmittelbar mit den theoretischen Ausdrücken verglichen werden kann, die gerade die Verteilung der Mittelwerte der Konzentration von Beimengungen beschreiben.

Für die Imitation einer stationären Beimengungsquelle wurde ein spezielles Gerät konstruiert und gebaut (Abb. 1). Die hermetischen Behälter 1 und 2 mit dem Fassungsvermögen 100 l sind durch Röhren verbunden, von denen jede zwei Ventile  $W$  hat, die symmetrisch bezüglich des Stützens angeordnet sind, in dem eine Luftleitung und ein Schlauch für den Ausfluß der Lösung

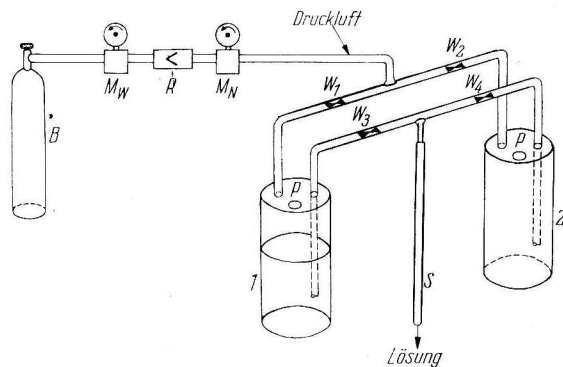


Abb. 1. Aufbauschema für die Imitation einer stationären Indikatorquelle.

$B$  — Druckluftbehälter,  $M_W$  und  $M_N$  — Hoch- und Niederdruckmanometer,  $R$  — Reduzierventil,

$1$  und  $2$  — hermetische Behälter,  $W_{1-4}$  — Ventile,  $S$  — Gummischlauch;  $P$  — Öffnung

angeordnet sind. Die Luftleitung besteht aus einem Ballon  $B$  mit Druckluft, dem Hochdruckmanometer  $M_W$ , dem Reduktor  $R$  und dem Niederdruckmanometer  $M_N$ . Das freie Ende des Schlauches, das mit einer metallischen Düse der Austrittsöffnung 8 mm versehen ist, wird an die Trosse der hydrologischen Winde gehängt und auf die gewünschte Tiefe heruntergelassen. Beide Behälter wurden über die Öffnung  $P$ , die mit einem abnehmbaren hermetischen Schutz versehen war, mit der Ausgangslösung gefüllt. In der Abbildung ist das Gerät in dem Zustand wiedergegeben, bei dem die Luft unter großen Druck über das Ventil  $W_1$  in den Behälter 1 gelangt, dort die Lösung aus ihm über das offene Ventil  $W_3$  in den Schlauch drängt und diese folglich bis zum Horizont des freien Schlauchendes niedergedrückt wird. Dabei sind die Ventile  $W_2$  und  $W_4$  geschlossen.

Sowie der Behälter 1 geleert wird, schließt der Operator die Ventile  $W_1$  und  $W_3$  und öffnet die Ventile  $W_2$  und  $W_4$ , so daß jetzt die Lösung aus dem Behälter 2 herausfließt. Mittlerweile wird die Einrichtung des Behälters 1 klagemacht. Dank der Nacheinanderarbeit der Behälter wird die Arbeitsdauer der Anlage durch den Vorrat der Druckluft im Ballon  $B$  bestimmt. Die Leistung der Quelle kann in Abhängigkeit mit den Erfordernissen des Experiments variiert werden, indem mit Hilfe des Reduktors der Luftdruck in den Behältern geändert wird.

Die beschriebene Anlage ist vollautomatisch, für die Arbeit mit beliebigen Schiffen geeignet und gewährleistet den gleichmäßigen Eintritt des Indikators in das Meer in einem breiten Tiefenbereich. Bei kontinuierlicher Eingabe des Indikators auf die Meeresoberfläche kann der einfachere Aufbau in Form eines Tanks mit einem Schlauch benutzt werden, über den die Lösung in das Wasser fließt. Die Gleichmäßigkeit des Indikatoreintritts wird durch ein konstantes Lösungsniveau im Tank gewährleistet, und die Leistung dieser Quelle ist durch den Durchmesser der Austrittsöffnung gegeben. Ein ähnliches Gerät, das eine stationäre Indikatorquelle imitiert, wurde erfolgreich sowohl im Schwarzen Meer als auch während der gemeinsamen Untersuchungen in der Ostsee benutzt.

Die Bestimmung des Feldes der Indikatorkonzentration, die von einer stationären Quelle herrührt, wird auf folgende Art vorgenommen (Abb. 2). Die Anlage zur Imitation der stationären Quelle befindet sich auf dem Schiff  $C_1$ . Dieses Schiff ist am Ort der Versuchsdurchführung fest verankert. Nach der Montage des Gerätes und der Füllung der beiden Behälter mit der Ausgangslösung des Indikators wird das freie Ende des Schlauches auf den geforderten Horizont gefiert. Mit der Einspeisung des Druckes in einen der Behälter begannen der Ausfluß der Lösung und die Bildung des Indikatorkörpers. Die entsprechenden Messungen begannen ungefähr eine halbe Stunde nach Beginn dieses Prozesses mit Hilfe des Schiffes  $C_2$ , auf dem die Meßapparatur untergebracht war. In verschiedenen Entfernungen  $L_1$  von der Quelle führte das Schiff  $C_2$  von Bord aus 10–12 Messungen für jede Reihe  $L_1$  durch. Die Entfernung von der Quelle bis zum Meßort wurde über die Länge der Linie bestimmt, die das Schiff  $C_1$  mit der Triftboje  $B_1$  verband, die mit einem Stromkreuz ausgerüstet war. Wenn

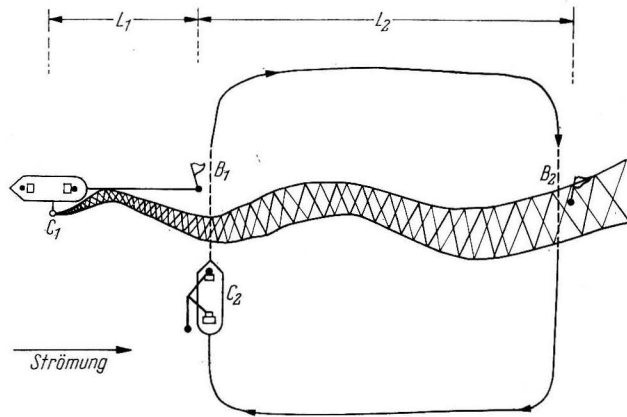


Abb. 2. Versuchsschema zur Untersuchung der Diffusion des Indikators, der aus einer stationären Quelle ausfließt.  $B_1$  und  $B_2$  — triftende beziehungsweise verankerte Boje, mit deren Hilfe die Entfernungen  $L_1$  und  $L_2$  von der Quelle auf dem Schiff  $C_1$  bis zum Ort, an dem das Schiff  $C_2$  mit dem Fluorometer den Strahl schneidet, bestimmt werden

es die Bedingungen des Experiments erlaubten, wurde in der Entfernung  $L_2$  von der Boje  $B_1$  unterhalb dieser in Strömungsrichtung eine Boje  $B_2$  verankert. Dann bewegte sich das Schiff im Kreis, wie das auf Abb. 2 gezeigt wird, indem es bei einem Umlauf zwei Messungen in den Entfernungen  $L_1$  und  $L_1 + L_2$  von der Quelle vornahm. Der Wert  $L_2$  wurde entweder instrumentell vom Schiff  $C_1$  aus bestimmt, oder über die Strömungsgeschwindigkeit und Triftzeit eines Schwimmkörpers von  $B_1$  zu  $B_2$ .

Ein ähnliches Versuchsschema mit stationärer Quelle erlaubt, die Koordinaten der Meßpunkte mit Hilfe zugänglicher und unkomplizierter Methoden vom Schiff aus zu bestimmen, ohne daß man moderne Navigationseinrichtungen gebraucht. Insbesondere wurden die Arbeiten auf dem Schwarzen Meer mit den Expeditionsschiffen „Akademik Širšov“ und „Akademik Obrutšev“ und von einem Kutter mit einer Wasserverdrängung von 78 t aus durchgeführt. Wenn, wie das gewöhnlich bei der theoretischen Analyse gemacht wird, der Koordinatenursprung mit der Indikatorquelle zusammenfällt, dann ist die  $x$ -Achse mit dem Vektor der Strömungsgeschwindigkeit  $v$  gleichgerichtet, die  $z$ -Achse zum Nadir orientiert, und so wurde bei dem gleichartigen Versuchsschema die  $x$ -Koordinate durch die Größen  $L_1$  und  $L_2$  bestimmt, die  $y$ -Achse konnte über die Länge und den Maßstab der Eintragung auf dem Registrierband des Gerätes und die  $z$ -Achse über die Ablesung des Tiefenmessers gefunden werden.

Die Dimension des Indikatorkörpers hängt im Falle einer stationären Quelle sowohl von der Leistung der Quelle (der Menge des Farbstoffes, die in der Zeiteinheit ins Meer fließt) als auch von der kinematischen Struktur des Stromes ab. Die Anlage für die Imitation einer stationären Quelle war in der Lage,

„Federn“ von 1–1,5 km Länge und 40–60 m Breite (in den Grenzen der Empfindlichkeit des Meßgerätes) bei Strömungsgeschwindigkeiten von 10–40 cm/s und einer Quellenleistung von 300–600 g/h herzustellen. Eine Änderung der Quellenleistung wurde durch Regulierung des Behälterdrucks von 0,5 bis 2 atü erreicht, denn die Konzentration der Ausgangslösung war bei allen Versuchen gleich und betrug  $1 \cdot 10^{-3}$  g/ml.

Bedeutend schwieriger ist es, ausreichend genaues experimentelles Material aus Experimenten mit einer augenblicklichen Indikatorquelle zu erhalten. Hier muß man einige identische Versuche durchführen und bei jedem das „augenblickliche“ Fleckbild des Indikators nach einem bestimmten Zeitabstand aufnehmen. Weiterhin müssen die „augenblicklichen“ Fleckbilder über die Aufnahmeserien gemittelt werden, die in der gleichen Periode des Diffusionsprozesses gemacht wurden. Dabei muß das Mittel der hydrometeorologischen Bedingungen als unveränderlich angenommen werden. Die Kompliziertheit ähnlicher Arbeiten ist sogar bei Verwendung zuverlässiger Apparate überaus groß, und deshalb wird die Diffusion von augenblicklichen Quellen aus gewöhnlich durch periodische quasisynchrone Aufnahmen des natürlichen Indikatorfleckes im Verlaufe einiger Stunden bis Tage nach der Eingabe des Indikators untersucht.

Die Anlage, die für die Imitation einer augenblicklichen Beimengungsquelle bestimmt ist, muß außer der Anpassung an die allgemeinen Forderungen (Kompaktheit, Transportmöglichkeit, Zuverlässigkeit usw.) die ziemlich schnelle Abgabe (in der Zeit von ungefähr einer Sekunde) großer Farbstoffmengen (von 1 bis 100 kg) in der gewünschten Tiefe gewährleisten. Soviel uns bekannt ist, wurde solch ein Gerät, welches vollständig diesen Forderungen entspricht, bis jetzt nicht vorgestellt. Die Herstellung dieses Gerätes ist in der Hauptsache deshalb schwierig, weil wegen der verhältnismäßig schwachen Indikatorlösung das Gewicht der Ausgangslösung wenigstens um einige Male das Gewicht des in ihr enthaltenen Indikators übersteigen muß. Insofern hängt das Ausmaß des Fleckes unmittelbar von der Indikatormenge ab, und für die Gewährleistung eines Prozesses von genügender Dauer und entsprechendem Maßstab besteht deshalb bei jedem Versuch der Wunsch, eine möglichst große Indikatormenge in das Meer einzuleiten.

Bei unseren Versuchen mit augenblicklicher Indikatorreingabe auf die Meeresoberfläche wurde ein spezieller metallischer Zweihundertlitertank benutzt. Unter seinen Schwerpunkt wurde eine horizontale Achse geschweißt, an deren Enden ein Rahmen befestigt war, der zur Befestigung des Tanks an der Windtrosse diente. Ein einfacher Festhalter am Rahmen verhindert die Drehung der Achse. Nach der Auffüllung des Fasses mit der Ausgangslösung und seiner Überführung am Lastbaum außenbords wird der Festmacher aus der Befestigung des Tanks gezogen und beim Umschlagen des letzteren fließt die Lösung auf die Meeresoberfläche aus. Für das Einfüllen geringer Farbmengen (1–2 kg) wurde ein spezieller Behälter mit einem Fassungsvermögen von 10 l konstruiert. Der Behälter stellt einen Kunststoffzylinder mit Deckeln an den Stirnseiten dar. Der Behälter, in den das Ausgangsmaterial eingefüllt wird, wird durch Klemmen

an der Windentrosse befestigt und in geschlossener Form (im Unterschied zum Bathometer) auf den geforderten Horizont heruntergelassen. Unter der Wirkung der den Kräften entsprechenden Last setzt sich der Mechanismus in Bewegung, der die Bewegung der Deckel lenkt, außerdem nehmen letztere eine vertikale Stellung ein. Bei nachfolgender Hebung des Behälters bleibt der Inhalt am vorigen Ort, der praktisch durch die Form des Behälters begrenzt wird.

Unserer Meinung nach kann man die augenblickliche Eingabe großer Indikatormengen in einer beliebigen Tiefe mit einem beliebigen Schiff durchführen, wenn man eine Einrichtung für die Imitation einer stationären Beimengungsquelle benutzt. Dabei muß das freie Ende des Schlauches mit einer hohlen elastischen Haut verbunden sein, die in der Wassermasse mit Ausgangslösung aus den Behältern vollgepumpt werden müßte und beim Erreichen der bestimmten Stelle zerstört werden würde.

Die Beobachtung der Diffusion, die von einer diskreten Quelle ausgeht, wird nach der Methode der quasisynchronen Aufnahme auf folgende Weise durchgeführt. Einige Zeit nach der Eingabe des Indikators führt das Schiff mit dem Meßgerät außenbords eine Serie von Messungen des Fleckquerschnitts, möglichst in sehr kurzen Zeitabständen, aus. Nachfolgende Aufnahmen erfolgen nach festgelegten Zeitabständen bis zum vollständigen Verschwinden des Fleckes. In der Regel wurden die Meßrichtungen und die Intervalle zwischen den Aufnahmen im Verlauf des Experiments ausgewählt, da es nicht möglich ist, Form, Orientierung und Bewegungsgeschwindigkeit des Fleckes vorherzusagen.

Da als Ergebnis ähnlicher Versuche ein räumliches Bild der Indikatorverteilung erhalten werden soll, spielt hier die navigationsmäßige Sicherung des Experiments eine besondere Rolle. Wie JOSEPH und Mitautoren bemerkten [3], ist die Genauigkeit, die durch das System der Decca-Navigation gewährleistet worden war, sogar ziemlich ungenügend für Aufnahmen von Flecken der Dimension 3—15 km. Aus diesem Grunde gingen sie bei nachfolgenden Versuchen von der „Navigation bezüglich der Erde“ zur „Navigation bezüglich des Wassers“ über. Letztere basiert auf der Messung von Entfernung und Azimut des Schiffes bezüglich einer Boje mit Reflektor und Stromkreuz über die Anzeige des Schiffsradsars, außerdem wird vorausgesetzt, daß die gegenseitige Orientierung von Bojen und dem Gebiet der Maximalkonzentration im Fleck in der Strömung während der gesamten Meßdauer unverändert bleibt.

Unsere Versuche und die Beobachtungen über das Verhalten des Indikatorfleckes bestätigen, daß eine Unveränderlichkeit der gegenseitigen Lage der Bojen mit Stromkreuz und des Gebietes maximaler Konzentration entweder in verhältnismäßig kurzen Zeitabschnitten oder unter günstigen Versuchsbedingungen vorkommt. Wenn bei unseren Versuchen Treibbojen verwendet wurden, liefen diese in der Regel schon 2—3 Stunden nach Beginn des Prozesses aus den Grenzen des sichtbaren Fleckes heraus, wenn dann die Querausdehnung des Fleckes 100 m überstieg. So genügt die „Navigation bezüglich des Wassers“ nicht den allgemeinen Forderungen, die an die Methodik zur Durchführung von Experi-

menten im Meer gestellt werden, und besonders nicht der der Einsetzbarkeit während des ganzen Jahres hindurch. Die Aktualität der Aufgabe führte inzwischen zu einer wünschenswerten Bearbeitung und Durchdringung effektiverer Methoden, die der Zuordnung der Meßergebnisse zu einem Koordinatensystem dienen, wenn die Ausmaße des Meßobjektes zwischen 0,1—1 Meile liegen. Anscheinend kann die größte Genauigkeit der Vermessung in der ufernahen Zone durch das Einmessen des Schiffes mit Theodoliten vom Ufer aus gewährleistet werden. Dabei wird die Organisation des Experimentes kompliziert, da genügendes Personal für die Anlage der Basis am Ufer und die Sicherung der Sprechfunkverbindung zwischen den Beobachtern und dem Schiff vorhanden sein muß. Während der gemeinsamen Untersuchungen 1969 in der Gdansker Bucht wurden diese Schwierigkeiten von den polnischen Wissenschaftlern erfolgreich überwunden. Außer optischen Hilfsmitteln, die in der ufernahen Zone benötigt werden, wurde die Genauigkeit der Navigation durch gleichzeitige Funknavigation und Funkortung gewährleistet. Eine ähnliche Analyse gleichzeitiger Beobachtungsmethoden in der ufernahen Zone wurde in der Abhandlung von SARGENT gegeben [4].

Im offenen Meer kann die geforderte Genauigkeit der Schiffsnavigation mit Hilfe der Luftbildaufnahmen erreicht werden. Dabei wachsen die organisatorischen Schwierigkeiten und die Arbeitskosten bei der Verwendung traditioneller Methoden der Luftbildaufnahmen mit Hubschraubern oder Flugzeugen bedeutend an. Für diesen Zweck kann man unserer Meinung nach als Träger des Fotoapparates einen angebundenen unbemannten Freiluftballon benutzen, der vom Schiff aus aufgelassen wird und auf dem die Meßapparatur untergebracht ist. Wenn über ein Kommando vom Schiff, das die Messungen ausführt, während jeder Halse ein Bild des Fleckes aufgenommen wird, so kann man, indem man die Größe des Schiffes als Maßstab der Umgebung nimmt und die Bewegungsrichtung des Schiffes für die einzelne Aufnahme kennt, das Bewegungsbild des Schiffes im Verlaufe der entsprechenden Meßserie leicht reproduzieren und dadurch die Einordnung der Meßergebnisse in ein Koordinatensystem gewährleisten, das sich mit dem Indikatorfleck mitbewegt. Außerdem erhält man durch die Luftbildaufnahme des Fleckes zu verschiedenen Zeitpunkten genügenden Einblick in den Prozeß selbst und auch die Möglichkeit, zwei Untersuchungsmethoden der Diffusion von Beimengungen im Meer zu vergleichen.

Die dreidimensionale Verteilung des Indikators kann durch zwei Methoden abgeschätzt werden: durch die vertikale Sondierung des Fleckes oder der „Feder“ mit dem Meßgerät vom triftenden Schiff aus, oder durch das Schleppen des Meßgerätes durch den Indikatorkörper in verschiedenen Tiefen. Die Anwendung der ersten Methode erfordert eine große Anzahl von Triftstationen in den Grenzen des sichtbaren Indikatorkörpers oder beizeiten skizzierter Abschnitte der Meeresoberfläche. Für die Untersuchung der Diffusion von Beimengungen mit diskreter Quelle ist solche Prozedur offenbar undurchführbar, da zu den Schwierigkeiten, die mit der Bestimmung der gegenseitigen Lage von Fleck und Schiff zusammenhängen, die Nichteinhaltung der geforderten „quasi-



synchronen“ Aufnahme wegen des ziemlich großen Zeitaufwandes auf den Schiffsstationen und der Durchführung der Sondierung in der Trift hinzukommen. Der Zeitfaktor spielt keine dementsprechende Rolle bei der Untersuchung einer stationären Indikatorverteilung, die von einer kontinuierlich arbeitenden Quelle ausgeht. Jedoch ist es auch in diesem Falle undurchführbar, das dreidimensionale Bild der Beimengungsverteilung durch die vertikale Sondierung der „Feder“ zu erhalten, weil seine Querausdehnung in der Regel kleiner oder gleich der Ausdehnung des Expeditionsschiffes ist, was eine Bestimmung der Ortslage des Schiffes bezüglich des Indikatorkörpers unmöglich macht. Anscheinend ist die vertikale Sondierung des Fleckes oder der „Feder“ nur in einzelnen Fällen gerechtfertigt, als Hilfsverfahren zur Abschätzung der vertikalen Ausdehnung der Beimengung.

Die Konzentrationsbestimmung des Indikators während der Fahrt des Schiffes ist das wichtigste Ergebnis, und mit einem geschleppten Meßgerät kann die vertikale Verteilung des Indikators ohne besondere Schwierigkeiten gefunden werden, wenn die Tiefeneinstellung des Meßgerätes während der Fahrt des Schiffes geändert werden kann. Infolge der Güte des dritten Fluorometermodells wurde diese Möglichkeit von uns während der Versuche im Schwarzen Meer im Herbst 1966 realisiert [5]. Das Gerät wurde auf folgende Weise geschleppt (Abb. 3). Die Trosse von der linken Trommel der Zugwinde des Expeditionsschiffes „Akademik Obrutšev“ wurde durch den Block des Lastbaums gezogen, und an seinem Ende wurde der hydrodynamische Tiefengeber befestigt — das Gitter *P*. Bei langsamer Fahrt wurde das Gitter über Bord gegeben, an der Trosse wurde das Meßgerät *D* befestigt. Nach dem Eintauchen des Meßgerätes unter die Oberfläche wurde das Kabel *K* in der ganzen Länge ausgegeben, nachdem das Meßgerät mit Hilfe der Winde auf den notwendigen Horizont gefiert wurde und die Messungen beginnen konnten. Beim Meßprozeß kann leicht durch die Winde die Tiefe des eingetauchten Teils verändert werden,

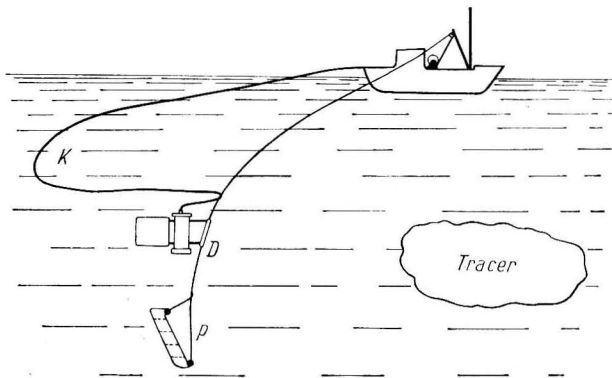


Abb. 3. Die Schlepppart des dritten Fluorometermodells.  
*P* — Gitter; *D* — Meßgerät; *K* — Kabel

indem sie über den Tiefenanzeiger kontrolliert wird. Auf analoge Weise wurden die Messungen während der gemeinsamen Arbeiten 1968—1969 mit den Forschungsschiffen „Professor A. Penck“ und „Professor O. Krümmel“ durchgeführt.

Um ein dreidimensionales Bild der Indikatorverteilung eines von einer stationären Quelle ausgehenden Fleckes zu erhalten, müssen in jeder Entfernung von der Quelle unbedingt einige Meßserien durchgeführt werden, jede in einer entsprechend bestimmten Meßtiefe. Ähnlich kann man auch ein vielschichtiges Bild des Indikatorfleckes bei einer augenblicklichen Quelle erhalten, jedoch kann hier die nichtsynchrone Aufnahme in verschiedenen Horizonten eine Quelle zusätzlicher Fehler sein; um die Zeit zwischen den Aufnahmen in verschiedener Tiefe zu verkürzen, muß man viel kleinere Zeitintervalle zwischen den Serien nehmen. Unter der optimalen Lösung des Problems verstehen wir jedoch die gleichzeitige Benutzung einiger Meßgeräte, die in verschiedenen Tiefen an einer Trosse von einem Schiff aus geschleppt werden.

Während der gemeinsamen Arbeiten 1968 wurde eine prinzipiell neue Beobachtungsmethodik realisiert, die eine zeitliche Änderung der Indikatorkonzentration in einem bestimmten Punkt des Fleckes einer stationären Quelle gestattet (Abb. 4). Mit diesem Ziel wurde im seichten sandigen Uferstreifen auf einem Dreibein, das 80 m von der Uferlinie entfernt war, in einer Tiefe von ungefähr 1 m ein Fluorometer installiert, und 150 m stromaufwärts war in der gleichen Entfernung vom Ufer eine stationäre Quelle mit Rhodamin S angebracht. Die registrierende Apparatur und die Energiequelle waren am Ufer in der Meßhütte angeordnet und mit dem Meßgerät durch Kabel verbunden. Die Aufzeichnungen der Konzentrationsänderungen des Indikators wurden bei mittlerem Wellengang länger als drei Stunden durchgeführt. Mit einigen Fluorometern könnte sich die Methodik der Diffusionsversuche als besonders effektiv für die Lösung praktischer Aufgaben erweisen, zum Beispiel bei der natürlichen Modellierung einer Anlage für die Abgabe industrieller Abwässer ins Meer in jenen Fällen, bei denen sich das Schleppen des Meßgerätes als unmöglich erweist (geringe Tiefe, kompliziertes Bodenrelief, schwere hydrometeorologische Bedingungen usw.).

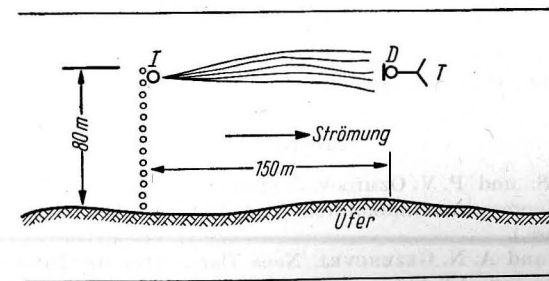


Abb. 4. Versuchsschema in Zingst.  
*I* — stationäre Indikatorquelle; *D* — Fluorometer auf dem Dreibein *T*

Im Verlaufe des letzten Jahrzehnts fanden die Untersuchungsmethoden der Diffusionsprozesse im Meer mit Hilfe lumineszenter Indikatoren überall großen Anklang, und in der Gegenwart bedient man sich ihrer sowohl bei klaren wissenschaftlichen Zielstellungen als auch bei der Lösung besonderer angewandter Aufgaben. Die Unterschiede der Varianten werden in der Hauptsache durch die Spezifik der konkreten Aufgabe bestimmt, durch die Methoden der Meßanordnung zum Koordinatennetz und durch Besonderheiten, die mit den technischen Kennziffern des Meßgerätes verbunden sind. Jedoch wurden die Möglichkeiten der Methode bei weitem nicht vollständig ausgenutzt. Dem Wesen nach wurde die Beobachtung der Diffusion von Beimengungen auf die Meeresoberfläche beschränkt.

Inzwischen ist es für die Praxis besonders wichtig geworden, das Verhalten eines Beimengungsfleckes zu kennen, der sich im Meer unterhalb der Dichtesprungschicht oder in der bodennahen Schicht befindet. Deshalb kann als größte Perspektive der Arbeitsrichtung zur Vervollkommnung der Methodik die Ausarbeitung von Methoden zur Bestimmung der Indikatorkonzentration von versenkten Quellen dieses oder jenen Typs angesehen werden. In diesem Falle kann der Indikatorkörper selbst nicht zur Orientierung beim Manövrieren des Schiffes als Apparaträger dienen, und die Hauptaufgabe der Messung wird darin bestehen, eine ausführliche Flächenaufnahme an dem Ort vorzunehmen, an dem der Indikator vermutet wird. Dabei steigt die Bedeutung der einleitenden Messungen (in der Hauptsache des Vertikalprofils von Strömungsgeschwindigkeit und Dichte) für die Vorhersage der mittleren Verschiebung des Indikatorfleckes stark an. Um bei der ausführlichen Flächenaufnahme die Forderung nach quasisynchroner Messung in den Grenzen einer Serie nicht zu verletzen, ist es notwendig, die Schleppgeschwindigkeit zu erhöhen und eine hohe hydrodynamische Qualität des Meßgerätes zu gewährleisten. So ist eine Erhöhung der Effektivität experimenteller Diffusionsmethoden mit lumineszenten Indikatoren mit einer Verwendung einer ausgereifteren Technik des Schleppens und der Modifikation der Meßmethoden verbunden. Auf andere methodische Fragen (Verbesserung der technischen Daten der Apparatur, Methoden zur Zuordnung der Messungen, Erhöhung der Genauigkeit usw.) wurden schon befriedigende Lösungen gefunden, und es wurden genügend Erfahrungen bei der Arbeit auf See gesammelt. Dieses wurde in nicht geringem Grade durch die gemeinsamen Untersuchungen in den Jahren 1968–1969 in der Ostsee nach dem Programm der KAPG unterstützt.

#### Literatur

- [1] KARABAŠEV, G. S. und P. V. OZMIDOV, Untersuchung der turbulenten Diffusion im Meer mit Hilfe fluoreszenter Indikatoren. *Izv. AN SSSR, Fisika atmosfery i okeana V*, No. II (1965) (russ.).
- [2] OZMIDOV, R. V. und A. N. GEZENCVEJ, Neue Daten über die Diffusion von Beimengungen im Meer. *Izv. AN SSSR, Fisika atmosfery i okeana V*, No. II (russ.) (1969).
- [3] JOSEPH, J., H. SENDNER und H. WEIDEMANN, Untersuchungen über die horizontale Diffusion in der Nordsee. *Deutsche Hydrogr. Zeitschr.* **17**, H. 2, (1964).

- [4] SARGENT, G. E. G., The short-range fix: systems and methods of use. *Hydrospace* **2**, No. 4 (1969).
- [5] KARABAŠEV, G. S. und A. N. SOLOVJOV, Ein geschlepptes Konzentrationsmeßgerät für lumineszente Indikatoren im Meer. *Izv. AN SSSR, Fisika atmosfery i okeana IV*, No. 12 (russ.) (1968).

Anschrift der Verfasser:

Dr. R. V. OZMIDOV,  
Institut Okeanologii „P. P. Širšov“ AN SSSR,  
UdSSR, Moskau Ž 387, Sadovaja 1

Dr. G. S. KARABAŠEV,  
Atlantičeskoje Otdelenije Instituta Okeanologii „P. P. Širšov“ AN SSSR,  
UdSSR, Kaliningrad, Prospekt Mira 1

## Ein optisches Schleppgerät für die Messung der Konzentration von lumineszenten Indikatoren im Meer

G. S. KARABAŠEV

Die Anwendung der lumineszenten Indikatoren Uranin und Rhodamin S für die Untersuchung der Diffusionsprozesse im Meer basiert auf den Methoden der quantitativen Lumineszenzanalyse. Als physikalische Grundlage dieser Methoden dienen die Gesetzmäßigkeiten der Lumineszenz von Lösungen organischer Stoffe. Entsprechend der Definition von VIDEMANN-VAVILOV wird mit Lumineszenz eine Strahlung bezeichnet, die einen Überschuß über die Wärmestrahlung eines Körpers bei gegebener Temperatur darstellt und eine Dauer hat, die die Periode der Lichtwellen bedeutend übersteigt. Notwendige Bedingung des Auftretens einer bleibenden Lumineszenz ist der Einfluß von äußeren Energiequellen auf den strahlenden Körper. Nach der Art der Erregungsenergie unterscheidet man Fotolumineszenz, Elektrolumineszenz, Tribolumineszenz usw. Am meisten erforscht und der Beobachtung am zugänglichsten ist die Fotolumineszenz — die Strahlung, die durch das elektromagnetische Feld im optischen Frequenzbereich hervorgerufen wird. Die Lumineszenz der Farbstoffe, die gegenwärtig als Tracersubstanzen verwendet werden, gehört unter diese Leuchtart. Der Mechanismus der elementaren Lumineszenz des Farbstoffmoleküls beinhaltet die Absorption eines Quants der erregenden Strahlung und als Folge den Übergang des Moleküls auf ein höheres Energieniveau mit folgendem strahlendem oder nichtstrahlendem Übergang auf ein Zwischenniveau und Rückkehr des Moleküls in den energetischen Ausgangszustand (Spontanolumineszenz). Der Strahlungsübergang zwischen zwei Niveaus erzeugt ein Lumineszenzquant von einer bestimmten Frequenz.

Die Absorption der erregenden Strahlung durch eine Farbstofflösung wird durch das BOUGUER-LAMBERT-BEIER-Gesetz beschrieben, wobei als Maß des Absorptionsvermögens der Absorptionsindex dient. Die Gesamtheit der Absorptionsindices für verschiedene Frequenzen oder Wellenlängen bildet das Absorptionsspektrum der Lösung. Auf Abb. 1 werden die Absorptionsspektren von wäßrigen Lösungen von Uranin und Rhodamin S angeführt (ausgezogene Linie). Sie haben je ein Maximum im äußeren ultravioletten und im sichtbaren Bereich des Spektrums. Das Lumineszenzspektrum ist eine Funktion der Verteilung der Strahlungsenergie auf die Frequenz (Wellenlängen). Die Lumineszenzspektren von wäßrigen Lösungen von Uranin und Rhodamin S

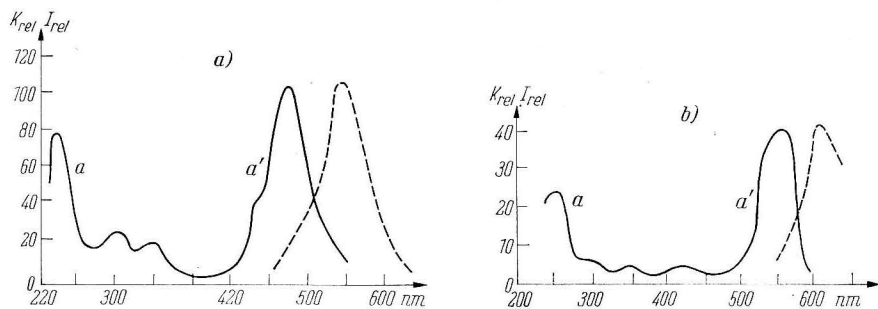


Abb. 1. Absorptions- (—  $K_{rel}$ ) und Lumineszenzspektren (---  $I_{rel}$ ) der wäßrigen Lösungen von Uranin (a) und Rhodamin S (b)

haben das Aussehen eines „ausgehöhlten Streifens“ mit einem einzigen Maximum.

Die Effektivität der Umwandlung von Energie der erregenden Strahlung in lumineszente Strahlungsenergie wird durch den Austritt der Lumineszenzquanten charakterisiert. Der Quantenausritt ist das Verhältnis der Zahl der Lumineszenzquanten zu der Quantenzahl der absorbierten Strahlen und wird sowohl durch den Bau und die Eigenschaften der lumineszierenden Moleküle als auch durch den Einfluß des umgebenden Mediums bestimmt. Bei sonst gleichen Bedingungen hat eine Farbstofflösung mit großem Quantenausritt eine große Lumineszenzintensität. Bei Zimmertemperatur liegt der Quantenausritt der wäßrigen Lösung von Uranin in den Grenzen von 0,71 bis 0,84, und der Quantenausritt von Rhodamin S beträgt 0,25.

Das Erlöschen der Lumineszenz der wäßrigen Lösungen von Uranin und Rhodamin nach dem Abbruch der Erregung geschieht nach einem Exponentialgesetz, wobei als Charakteristik der Trägheit der Strahlung die mittlere Dauer des Erregungszustandes des Moleküls dient ( $1 \cdot 10^{-9}$  s für Rhodamin S und  $5 \cdot 10^{-9}$  s für Uranin). Das Aufleuchten ihrer Lumineszenz in wäßriger Lösung wird auch durch das Exponentialgesetz beschrieben.

Empirisch wurden folgende spektrale Wechselbeziehungen festgestellt, die auch vollständig auf wäßrige Lösungen von Uranin und Rhodamin S anwendbar sind. 1. Die Lumineszenzspektren von Lösungen organischer Farbstoffe hängen nicht von der Frequenz oder der Wellenlänge der erregenden Strahlung ab. 2. Das Spektrum der Lumineszenz von Farbstofflösungen insgesamt und sein Maximum sind im Vergleich mit dem Absorptionsspektrum und seinem Maximum in Richtung größerer Wellenlängen verschoben (Gesetz von STOKES-LOMMEL). Als antistokesscher Bereich wird der Teil des Lumineszenzspektrums bezeichnet, der diesem Gesetz nicht genügt. 3. Der Quantenausritt der Lumineszenz für die Farbstofflösung hängt nicht von der Frequenz der erregenden Strahlung ab und fällt auch schnell in den antistokesschen Bereich. Die Veränderung des Quantenausritts unter dem Einfluß dieser oder jener Faktoren

heißt Erlöschen der Lumineszenz. Das konzentrierte Erlöschen zeigt sich im Abfall des Quantenausritts bei Erhöhung des Reagenzgehaltes in der Lösung bis zu einem gewissen kritischen Niveau. In wäßrigen Lösungen von Uranin und Rhodamin kann sich ein konzentrationsbedingtes Erlöschen bei einem Gehalt dieser Stoffe von  $5 \cdot 10^{-5}$  g/ml und mehr zeigen. Dieser Umstand erlaubt nicht, eine Erhöhung der Konzentration der Ausgangslösung des Indikators bei Diffusionsversuchen im Meer für die Ausdehnung des Umfanges der gemessenen Konzentrationen und folglich die Erhöhung der Dauer oder Ausdehnung des Diffusionsprozesses auszunutzen. Das Löschen der Lumineszenz der Farbstofflösung mit Hilfe von Zusätzen ist eine weitverbreitete Erscheinung. Im Meer stellt das nichtresonante Löschen mit Halogenionen eine reale Gefahr dar. Wenn man die Angaben von SVESNIKOV und PRINGSHEIM über das Löschen wäßriger Lösungen von Uranin und Rhodamin S mit Halogenen und den Gehalt an diesen Elementen in Meerwasser bei  $5^\circ\text{C}$  und einem Chlorgehalt von  $100/100$  (nach BRUEVIČ) vergleicht, kann man schlußfolgern, daß der Einfluß der nichtresonanten im Meerwasser gelösten Löschstoffe auf die Lumineszenz beider Indikatoren entweder geringer wird oder die zulässigen Grenzen nicht überschreitet und vielleicht durch die Herstellung von Eichlösungen mit Meerwasser beseitigt werden kann, das am Ort des Experiments entnommen wurde. Die Temperaturlöschung zeigt sich im Abfall des Quantenausritts einer verdünnten Lösung mit einem Anwachsen der Temperatur und ist für viele Farbstoffe charakteristisch. Für Rhodamin S entspricht nach den Angaben von FEUERSTEIN und SELLECK [2] im Meerwasser im Temperaturbereich von  $0-50^\circ\text{C}$  einer Erhöhung der Temperatur auf  $5^\circ\text{C}$  ein Abfall der Lumineszenzintensität um 15%. Das erfordert bei der Bearbeitung der Daten von Feldbeobachtungen Korrekturen in bezug auf die Temperaturabhängigkeit, wenn die Eichung des Gerätes und die Messung bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt wurden. Im Unterschied zu Rhodamin fehlt praktisch in demselben Temperaturbereich das Löschen der Lumineszenz von Uranin, was Uranin zu einem besonders günstigen Indikator für die Arbeit im Wasser macht, das eine komplizierte thermische Struktur besitzt.

Abgesehen von den Löschprozessen kann die Abhängigkeit des Leuchteffektes von den Untersuchungsbedingungen auch durch andere Faktoren eingegrenzt werden. Zu solchen Faktoren gehört die Wasserstoffionenkonzentration in der Farbstofflösung, die auf das Spektrum und die Helligkeit der Strahlung einwirken kann. Entsprechend den Angaben von ADAMOV und KONTARDŽJAN [1] schwankt der langwellige Anteil des Lumineszenzspektrums von Uranin bei einem pH-Wert zwischen 7,1 und 9,0 um 15–20%. Die angegebenen pH-Werte sind für Meerwasser Grenzwerte. Da sich die Wasserstoffionenkonzentration in jedem konkreten Meeresgebiet nur unbedeutend ändert, kann ihr Einfluß durch Eichlösungen mit Meerwasser beseitigt werden, das am Versuchsort entnommen wurde. Dieselbe Methode ist bei Rhodamin S noch wirkungsvoller, denn seine Lumineszenz hängt noch weniger von den pH-Werten ab, die für Meerwasser charakteristisch sind.

Für die Einschätzung der Brauchbarkeit von Uranin und Rhodamin S ist die Frage der Wechselbeziehung der von den Indikatoren ausgehenden Strahlung und der eigentlichen Lumineszenz des Meerwassers, die den Untergrund oder die Störung bei der fluorometrischen Bestimmung der Indikatorkonzentration bildet, wesentlich. Die Intensität der Meerwasserlumineszenz kann sich im Weltmeer nach der Hypothese von KALLE [4] um zwei Größenordnungen ändern und hängt von dem Gehalt an im Meerwasser gelösten organischen Stoffen ab. Leider bleiben die physikalischen Merkmale der Meerwasserfluoreszenz seit dieser Zeit fast unerforscht. Wie unsere Untersuchungen in der Ostsee und im Schwarzen Meer zeigten, wird das Leuchten des Meerwassers im sichtbaren Bereich sowohl durch ultraviolette als auch blau-violette Strahlung hervorgerufen. Die spektrale Verteilung der Meerwasserlumineszenz hängt stark von der Wellenlänge der erregenden Strahlung ab und kann sich bis zur langwelligen Grenze des sichtbaren Spektrums erstrecken. Jedoch verringert sich mit dem Wachsen der Wellenlänge der Strahlung die Effektivität der Erregung. Darum wird ein optimales Verhältnis des Signals zum „Untergrund“ bei einer Erregung der Lumineszenz des Indikators im langwelligen Bereich der Absorption und der Messung der Lumineszenzintensität im langwelligen Teil seines Lumineszenzbereiches gewährleistet. Diese Methode wurde bei der Entwicklung geschleppter Fluorometer erfolgreich ausgenutzt (KARABAŠEV [6]).

Das Verhalten von im Meerwasser gelöstem Uranin oder Rhodamin S wird durch den Einfluß der archimedischen Kräfte auf die Indikatorlösung und durch das Adsorptionsvermögen der Suspensionen im Meerwasser bestimmt. Der Einfluß archimedischer Kräfte ist nicht gefährlich, da die Dichte der Ausgangslösung leicht an die Dichte des Wassers am Versuchsort anzugleichen ist und da die Geschwindigkeit der Anfangsverdünnung bei beliebigen Methoden der Eingabe sehr hoch ist.

Eine Untersuchung der Adsorptionsfähigkeit von suspendierter Substanz ist eine sehr schwierige Aufgabe, da das suspendierte Material in genetischer Hinsicht sehr verschieden ist und man in jedem Bereich des Ozeans terrigene, biogene oder chemogene Suspensionen antreffen kann und sogar Partikel vulkanischen oder kosmischen Ursprungs. Die Arbeit von FEUERSTEIN und SELLECK [2], die eine Verwendung von Uranin und Rhodamin S als Tracer in Küstengewässern behandelt, ist die einzige Veröffentlichung mit quantitativen Angaben über die Adsorption von Uranin und Rhodamin S an Tonmineralien und Algen.<sup>1)</sup>

Man kann die Ergebnisse ihrer Arbeiten kurz folgendermaßen zusammenfassen: die Adsorption wächst mit abnehmendem Salzgehalt; die Adsorption an Algen ist weniger intensiv als bei mineralischen Suspensionen; Rhodamin S wird leichter adsorbiert als Uranin. Aber sogar für Rhodamin S kann sich die Adsorption an Suspensionen bei den Resultaten der Diffusionsversuche nur in sehr trübem und stark ausgesüßtem Wasser auswirken und ist in den übrigen Fällen nicht gefährlich.

<sup>1)</sup> Weitere Ergebnisse zu dieser Problematik enthält auch die Arbeit von KREMSER im vorliegenden Sammelband. (Anm. des Herausgebers.)

Die Beständigkeit von Uranin und Rhodamin S als Indikator für Bewegungen des Meerwassers hängt hauptsächlich von der Lichtfestigkeit ihrer wäßrigen Lösungen ab. Das Gesetz, nach dem die Umwandlung der Farbstoffe durch Licht erfolgt, gleicht formell dem radioaktiven Zerfallsgesetz und kann wie folgt geschrieben werden:

$$C = C_0 \exp(-\varphi \varepsilon E t),$$

wobei  $C_0$  und  $C$  = Farbstoffkonzentration zu den Zeitpunkten 0 und  $t$ ,

$\varphi$  = Quantenausritt beim Fotozerfall,

$\varepsilon$  = molekularer Adsorptionskoeffizient,

$E$  = auf die Lösung wirkende Strahlungsenergie.

Wie aus dieser Formel folgt, hängt die Charakteristik des Fotozerfalls  $R = \varphi \varepsilon E$  vom Beleuchtungsniveau in der Tiefe ab, wo sich der Tracer befindet. Deshalb entspricht eine verallgemeinerte Abschätzung der Geschwindigkeit des Fotozerfalls der Indikatoren durch Messungen des Leuchtintensitätsabfalls von Lösungen in Gefäßen bei Tageslicht im allgemeinen nicht völlig den Bedingungen, unter denen die Indikatoren im Meer der Einwirkung der Sonnenstrahlung ausgesetzt werden. In Verbindung damit wurden von uns näherungsweise Berechnungen der Geschwindigkeit des Fotozerfalls beider Indikatoren für weniger günstige Durchführungsbedingungen eines Versuches ausgeführt. Als Berechnungsgrundlage wurden die Daten von JERLOV [3] über die spektrale Verteilung der Strahlungsenergie in verschiedenen Tiefen in den durchsichtigsten Ozeanengewässern am Mittag bei wolkenlosem Himmel, hohem Sonnenstand und die größten Werte des Fotozerfalls von Uranin und Rhodamin S angenommen, die von FEUERSTEIN und SELLECK beobachtet wurden. Die Berechnungsergebnisse sind in Form von Graphiken dargestellt, die eine Bestimmung des zulässigen Zeitintervalls zwischen Eingabezeitpunkt und Messung gestatten, in dessen Verlauf der relative Fehler bei der Bestimmung der Indikatorkonzentration einen vorgegebenen Wert nicht übersteigt (Abb. 2). In den Versuchen, die ein langes Verbleiben des Indikators an der Oberflächenschicht des Meeres erfordern, verwenden wir in der Regel nur Rhodamin S, weil die Beständigkeit von Uranin ungenügend ist. Aber in Tiefen von 90–100 m und mehr wird die Anwendung des letzteren wegen des bedeutenden Abfalls der Strahlungsintensität durchaus möglich. Uranin kann auch als Indikator in der Oberflächenschicht des Meeres in Versuchen mit stationären Quellen bei Vorhandensein einer Strömung empfohlen werden, wenn man die Messungen auf Punkte beschränken kann, bis zu denen der Farbstoff von der Quellen aus nicht länger als eine Stunde treibt.

Wenn man von den vorhandenen Angaben über den Charakter des Diffusionsprozesses von Beimengungen im Meer ausgeht und die Gesetzmäßigkeiten des Leuchtens der lumineszenten Farbstoffe und die Spezifik der Versuche im Meer berücksichtigt, kann man die Hauptanforderungen an ein Gerät, das für Konzentrationsmessungen lumineszenter Indikatoren in situ bestimmt ist, auf folgende Art und Weise formulieren:

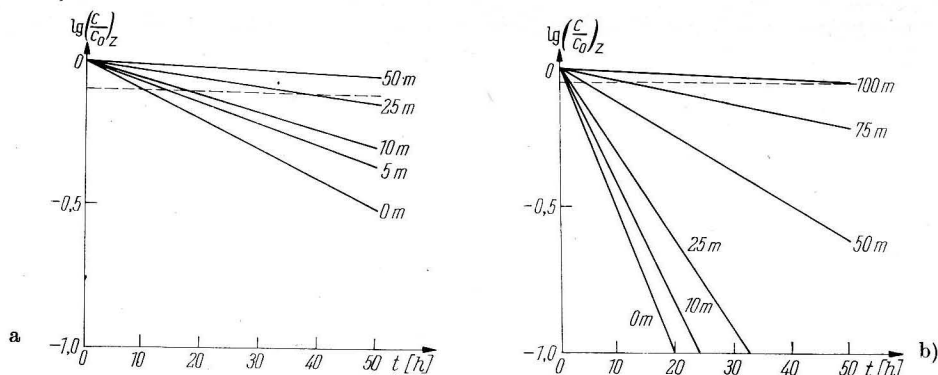


Abb. 2. Zeitliche Änderung der Konzentration  $C$  von Rhodamin (a) und Uranin (b) als Folge des Fotozerfalls in verschiedenen Tiefen bei den klarsten ozeanischen Wassermassen (wolkenloser Tag und maximale Sonnenhöhe). Die punktierte Linie entspricht einem Wert von  $c/c_0 = 0,8$

1. Der dynamische Umfang des Gerätes für die Konzentration muß nicht schlechter als 50—60 db sein. Im umgekehrten Fall erweist sich die Versuchsdauer bei Tracerflecken von einer momentanen Quelle aus infolge des schnellen zeitlichen Abfalls der Maximalkonzentration als zu gering. Der große dynamische Bereich des Gerätes erlaubt eine Untersuchung des Prozesses bei bedeutenden Veränderungen des Maßstabs der Indikatorkörper.
2. Der große dynamische Bereich des Gerätes muß hauptsächlich durch eine Erhöhung der Ansprechempfindlichkeit des Gerätes erfolgen, da die Anzeigen des Gerätes bei hohen Indikatorkonzentrationen infolge des konzentrationsbedingten Löschens mehrdeutig sind.
3. Da der Vorgang wenig untersucht ist und da es nicht möglich ist, das Verhalten der Beimengungsflecken im Meer vorherzusagen, muß der Geräteaufbau eine Kontrolle des Untersuchungsobjektes und des eingetauchten Teiles unmittelbar während des Meßvorganges gewährleisten. Deshalb ist eine Verwendung von Methoden der fotografischen und der visuellen Fotometrie für die Bestimmung der Indikatorkonzentration unzulässig. Die Beurteilung der Leuchtintensität und folglich auch der Konzentration des Indikators im untersuchten Medium muß mit Hilfe fotoelektrischer Schemata verwirklicht werden.
4. Um Informationen über Struktur und Form der Beimengungsflecken oder -fahnen im Meer und über ihre Abhängigkeit vom hydrodynamischen Regime der Wasserbewegungen zu erhalten, müssen die Abmessungen des eingetauchten Geräteteiles, seine Trägheit und das Wasservolumen, dessen Strahlung auf den Fotoempfänger wirkt, so klein wie möglich sein.
5. Der mittlere quadratische Fehler bei der Bestimmung der augenblicklichen Werte der Indikatorkonzentration muß bedeutend niedriger als die mittleren

quadratischen Abweichungen dieser Größe vom Mittelwert sein. Im entgegengesetzten Fall lassen sich bei Beachtung der Bedingungen des vorhergehenden Punktes keine Informationen über Struktur und Form des Indikatorkörpers gewinnen.

Aber wegen des statistischen Charakters des Prozesses und auf Grund von visuellen Beobachtungen der Abweichung vom Mittelwert können die Konzentrationen im Fleck längs einer beliebigen Richtung einen beträchtlichen Wert erreichen. Darum sind die Genauigkeitsanforderungen bei der Bestimmung der momentanen Werte der Indikatorkonzentration nicht übermäßig hoch, wenigstens in der gegenwärtigen Entwicklungsstufe von Versuchsmethoden.

6. Weil die Kontrolle des Verhaltens des Meßobjektes im Verlauf des Versuchs und die Erhaltung von Informationen über die Struktur des Indikatorkörpers sich am besten bei ständiger Registrierung der Konzentrationsverteilung des Indikators längs irgendeiner beliebigen Richtung verwirklichen lassen, muß der eingetauchte Teil des Gerätes für ein Schleppen in verschiedenen Tiefen geeignet sein. Als Registriergerät muß man einen Schreiber verwenden, bei dem der Streifen nicht erst bearbeitet werden muß, um eine Aufzeichnung zu erhalten.
7. Der Geräteaufbau muß die notwendige Stabilität der Anzeige bei einem Dauerbetrieb von mindestens 7—10 Stunden gewährleisten, da die Apparatur bei Beachtung der Forderungen 1 und 2 Dauermessungen gestattet.
8. Der versenkbare Teil des Gerätes muß für den Einsatz bis zu 100 m Tiefe berechnet sein, da die Diffusion in der oberen Meeresschicht von besonderem Interesse ist.
9. Das Meßsystem muß leicht genug, transportabel und ökonomisch sein, damit sein Einsatz auf beliebigen Versuchsschiffen möglich ist.

In Übereinstimmung mit dem Prinzip der Konzentrationsmessung einer Substanz aus der Intensität ihrer Lumineszenz und mit den oben aufgezählten Anforderungen kann man das Blockschema eines Gerätes für die Konzentrationsmessung lumineszierender Indikatoren in situ wie folgt aufstellen (Abb. 3). Eine von einer Erregungslichtquelle ausgehende Strahlung der Intensität  $F$  erzeugt eine Strahlung des Wasservolumens mit der Leuchtdichte  $I$ . Letztere wirkt auf einen Fotoempfänger, dessen Ausgangssignal  $V$  nach Umwandlung in einem elektronischen System über einen Verbindungskanal in den Eingang des Registriergerätes an Bord gelangt. Dessen Skala wurde zuvor in Konzentrations-einheiten geeicht. Aus diesem Schema ist ersichtlich, daß die Anzeige des Gerätes nicht nur von der Konzentration des Indikators abhängen kann, sondern auch von einer Anzahl verschiedenartiger Faktoren.

Die Auswahl des fotometrischen Geräteschemas wurde von uns auf der Grundlage der gezeigten Erfordernisse und unter Berücksichtigung der genannten Faktoren vorgenommen. Auf Grund des Fehlens von in- und ausländischen Erfahrungen in der Realisierung der Untersuchungsmethodik zur Diffusion von

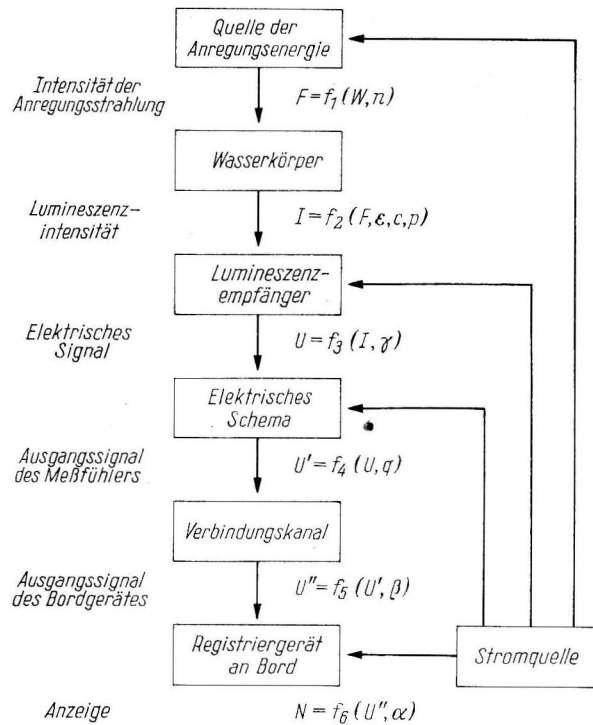


Abb. 3. Schema eines Meßgerätes zur in situ-Messung der Konzentration lumineszenter Indikatoren

$W$  = Intensität der benötigten Anregungslichtquelle;

$n$  = Kennwert für die konstruktiven Besonderheiten der Lichtquelle;

$c$  = Indikatorkonzentration;

$\bar{\epsilon}$  = Extinktionskoeffizient von Meerwasser;

$P$  = Kennwert für den Einfluß des Mediums auf die Kopplung zwischen der Strahlung der Lösung und der darin enthaltenen Indikatorkonzentration;

$\gamma$  = Empfindlichkeit des Fotoempfängers;

$q, \beta$  = Kennwerte für die Umwandlung des elektrischen Signals im elektronischen Schema und im Verbindungskanal;

$\alpha$  = Kennwert des Registriergerätes

Beimengungen im Meer mit Hilfe von lumineszierenden Indikatoren und eines geschleppten Fluorometers wurde die Ausarbeitung des Gerätes in Etappen durchgeführt. Auf der ersten von ihnen wurde ein Prototyp geschaffen (KARABAŠEV [5]), der sich durch Einfachheit und hohe Empfindlichkeit auszeichnet. Dieses ist ein direkt anzeigendes Fotometer mit einem elektronischen Verstärker als Fotoempfänger, der in ein logarithmisches Schema nach SWEET [8] eingeschlossen ist. Als Erregungslichtquelle diente eine Glühlampe mit geringer Voltzahl, deren Speisungsparameter mit hoher Genauigkeit kontrolliert wurde.

Mit Hilfe von Interferenz-Filtern wurde die Lumineszenz des Indikators Uranin von der im Wasser gestreuten Erregungsstrahlung getrennt.

Das Arbeiten mit diesem Modell im Schwarzen Meer in den Jahren 1964 bis 1965 zeigte die Effektivität der Ausnutzung eines schleppfähigen Gebers bei Diffusionsversuchen und bestätigte auch die Perspektiven der Anwendung eines Einstrahl-Fotometers in Meßgeräten für die Konzentration des lumineszierenden Indikators.

Im Zusammenhang damit wurde es notwendig, eine Reihe von Mängeln des Prototyps und in erster Linie seine Unbrauchbarkeit für Messungen in der hellen Tageszeit zu beseitigen. Diese Aufgabe wurde im dritten Modell des Gerätes gelöst (KARABAŠEV, SOLOV'EV [7]). Um die Beziehung des Signals (die Intensität des Tracers) zur Störung (der Intensität des Sonnenlichtes im Meer) zu verbessern, wurden bei seiner Erarbeitung folgende Methoden ausgenutzt.

1. Die die Lumineszenz des Indikators erregende Strahlung wird mit einer Frequenz von einigen hundert Hertz moduliert. Dadurch wird die Indikatorkonzentration anhand der variablen Komponente des Fotostroms beurteilt, an der das Sonnenlicht einen geringeren Anteil im Vergleich mit der konstanten Komponente hat.
2. Die Messung der Strahlungsintensität erfolgt im langwelligen Teil des Lumineszenzgebietes von Uranin und Rhodamin, in dem die Schwächung der Störungen relativ groß ist.
3. Zum Arbeiten in der Oberflächenschicht des Meeres wird ein spezieller Lichtschutz für die Lichtöffnungen des Gebers benutzt.

Das optische Schema des Gerätes ist in Abb. 4 angeführt. Nachdem die Strahlung der Lampe  $L$  durch den Kondensator 1, das Primärfilter 2 und das Umkehrprisma 3 gelangt ist, tritt sie durch die Öffnung 4 in das umgebende Medium ein und erregt die Strahlung des Indikators. Diese gelangt durch die Öffnung 5 und das Sekundärfilter 6 auf die Katode des Fotovervielfachers 7.

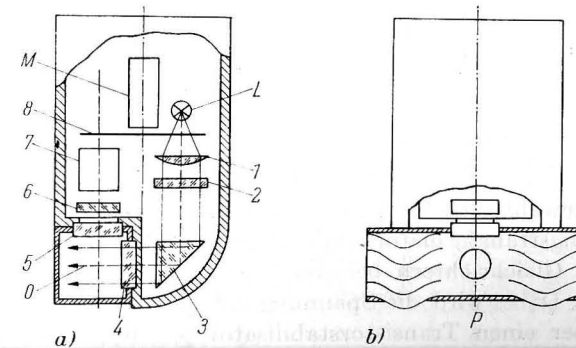


Abb. 4. a) Optisches Schema des dritten Fluorometermodells  
b) Konstruktion des Lichtschutzes  
(Erläuterungen im Text)

Die Anregungsstrahlung wird durch die mit Öffnungen versehene Scheibe 8 moduliert, die durch den Elektromotor  $M$  gedreht wird. Die Öffnungen 4 und 5 werden mit einem Schirm 0 vor direktem Sonnenlicht geschützt. Abb. 4 zeigt einen Längsschnitt dieses Schirmes. Ein Satz gewellter Platten  $P$  an den Stirnseiten des Schirms dient als Lichtfalle. Als Primär- und Sekundärfilter wurden Interferenzfilter mit einer Wellenlänge der maximalen Durchlässigkeit von  $476 \pm 5$  nm und  $595 \pm 5$  nm für Uranin und  $504 \pm 5$  nm und  $629 \pm 5$  nm für Rhodamin ausgesucht. Außerdem wurde im Erregungsstrahl zusätzlich Farbglas CZC-22 mit 5 mm Stärke angebracht. Bei der Messung der Rhodaminkonzentration wird in den Lumineszenzstrahl ein Absorptionsfilter aus Farbglas OS-13 eingeführt. Das Auswechseln der Lichtfilter im Unterwasserteil des Gerätes beim Übergang von einem Indikator zum anderen erfolgt mit der Hand.

Die Registrierung der Indikatorverteilung in einem Fleck durch einen Prototyp zeigte, daß in der Anfangsperiode des Prozesses der Fleck äußerst inhomogen ist, wobei bei Abständen in der Größenordnung von 1 m der Abfall der Konzentration 20–25 db erreicht. Deshalb wurde im letzten Modell ein speziell erarbeitetes Schema eines logarithmischen Fotometers verwendet, das die Intensität des modulierten Fotostroms auf dem Hintergrund einer mäßigen gleichbleibenden Belichtung mißt. Das Signal des Fotovervielfachers wird über einen mit der Röhre 6 N 17 B verbundenen Verstärker und einen Detektor mit Verdoppelung auf das Gitter der Steuerpentode 6 ŽZP gegeben. Letztere wurde in Reihe geschaltet mit der Stromquelle und dem Verstärker des Fotovervielfachers. Deshalb erhöht sich mit steigendem Fotostrom infolge der Lumineszenz der Spannungsabfall an der Pentode. Auf den Stufen des Fotovervielfachers nimmt er jedoch ab, da die veränderliche Komponente am Ausgang des Fotovervielfachers praktisch konstant bleibt und als Maß für die Intensität des Lumineszenzstroms die Stufenspannung des Fotovervielfachers dient. Infolge der exponentiellen Abhängigkeit der Empfindlichkeit des Fotovervielfachers von seiner Stufenspannung ist letztere dem Logarithmus der Lumineszenzintensität proportional.

Der Unterwasserteil wird (um die Autonomie des Gerätes hinsichtlich der Energiezufuhr zu wahren) über einen Transformator von einem an Bord befindlichen Akkumulator aus mit einer Spannung von 24 V gespeist. Die Verbindung zur Bordapparatur erfolgt durch das Kabel KTS-03 mit drei Stahlkupfer-Adern (von 300 kg Bruchlast). Zur Verminderung der Spannungsverluste im Kabel wurde die Ausgangsspannung des Umformers mit 220 V (Frequenz 1,7 kHz) gewählt. Diese Spannung gelangt über das Kabel zum Eingang des Hochspannungstransformators im Unterwasserteil. Dessen Ausgangswicklungen sind mit Gleichrichtern belastet, von denen alle Glieder des Gebers gespeist werden. Dabei wird die Spannung für die Erregungslichtquelle — die Lampe  $L$  — über einen Transistorstabilisator gegeben. Das Zeitrelais (ein Thyatron MTCh-90 und ein elektromagnetisches Relais RSM-1) gibt eine Minute nach Einschalten der Stromzufuhr eine Hochspannung auf das fotometrische System.

Im Unterschied zu den vorhergehenden Modellen besteht im PF-66 die Möglichkeit der Tiefenmessung durch den potentiometrischen Druckgeber EDD-10, der von demselben Gleichrichter gespeist wird wie auch die Fäden der Glühlampe. Das Signal des Tiefengebers wird über die Drosseln  $D_{r1}$  und  $D_{r2}$  auf ein Anzeigergerät an Bord durch dieselbe Ader geführt wie auch die Stromversorgung des eingetauchten Teils. Der Kanal der Tiefenmessung und die Stromversorgung werden galvanisch durch eine Kapazität von 30 und 10 mF geteilt.

Das Signal des fotometrischen Schemas des Gebers ist ungefähr proportional dem Logarithmus der Indikatorkonzentration. Es fließt zum Eingang des Schreibers EPP-09 durch die freie Ader des Kabels. Ein R-C-Filter am Schreiberingang erniedrigt die Überbrückung mit der Frequenz der Speisespannung auf ein zulässiges Maß. Ein Widerstand von 10 k $\Omega$  und zwei Batterien vom Typ FBS dienen zur Nulleinstellung auf der Schreiberskala, wenn der Geber in Wasser ohne Indikator eingetaucht wird. Das hohe Niveau des Ausgangssignals des fotometrischen Schemas und des Tiefenmessers gestattet eine gleichzeitige Registrierung mit Schleifenoszillographen (vom Typ N 105, N 700 u. ä.) ohne vorhergehende Verstärkung. Wie schon früher, wird das Gerät mit Eichlösungen in einer Spezialküvette geeicht. Abb. 6 zeigt eine Eichkurve des Fluorometers,

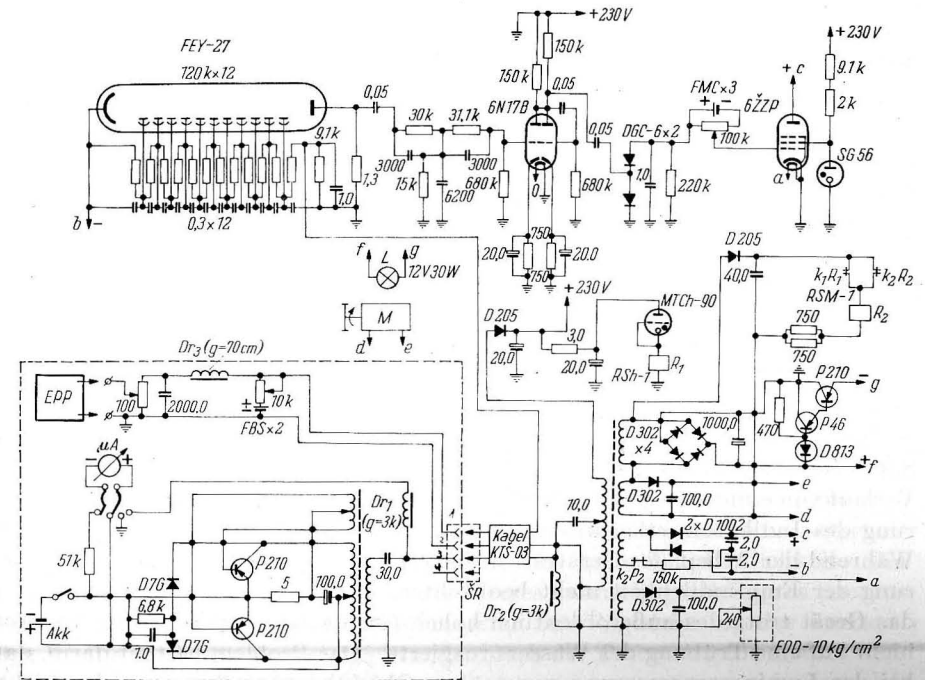


Abb. 5. Prinzipschema des dritten Fluorometermodells. Der Überwasserteil ist gerissen umrandet



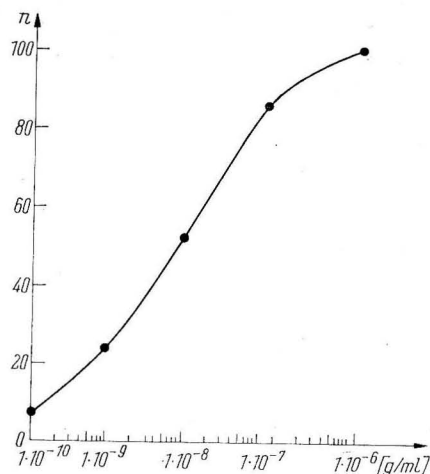


Abb. 6. Eichkurve eines Fluorometers  
 $n$  = Skalenteile des Registrierpapiers;  
 $C$  = Indikatorkonzentration (Uranin)

die die logarithmische Charakteristik seines Arbeitsbereiches zeigt. Labor- und Felderproben des Gerätes zeigten, daß es folgende technische Daten hat: Umfang der gemessenen Konzentration von Uranin =  $5 \cdot 10^{-10}$  bis  $1 \cdot 10^{-6}$  g/ml, von Rhodamin S =  $1 \cdot 10^{-9}$  bis  $5 \cdot 10^{-6}$  g/ml; die Trägheit des fotometrischen Schemas beträgt 0,2 s; die aus den Akkumulatoren entnommene Leistungsaufnahme beträgt 80 Watt, die Arbeitsdauer bei einer Nullabweichung von  $\pm 4\%$  der gesamten Skala beträgt nicht weniger als 7 h; der Umfang der Arbeitstiefe reicht von 0–100 m bei beliebigen Beleuchtungsgraden der Oberfläche des Meeres durch die Sonne.

Die Ausnutzung des Gerätes in der Ostsee bei den gemeinsamen Untersuchungen im KAPG-Programm in den Jahren 1968–1969 diente der guten Kontrolle seiner Betriebseigenschaften unter verschiedenen Bedingungen. Unter diesem Aspekt ist das einmalige Experiment von 1968 in Zingst besonders wertvoll, als der Geber des Gerätes auf einem Dreibein in der Brandungszone des seichten Sandufers aufgestellt worden war. Auch unter Sturmbedingungen wurde im Verlauf von einigen Stunden in einem Festpunkt die ununterbrochene Registrierung des Indikators erlaubt, der aus stationären Quellen in das Meer austrat. Während der Arbeit des Gerätes wurden eine Nullabweichung oder eine Änderung der Empfindlichkeit nicht beobachtet. Als Hauptsache zeigte sich, daß das Gerät trotz des außerordentlich hohen Gehalts an suspendiertem Material nicht auf eine Trübung des Wassers reagierte. Das Problem besteht darin, daß bei der Lumineszenzmessung von trüben Objekten eine Trennung der Lichtstreuungs- und Lumineszenzeffekte gewöhnlich durch die Verwendung von spektral „gekreuzten“ Lichtfiltern in den Erregungs- und Lumineszenzstrahlen

erreicht wird. Jedoch ist es unmöglich, ideal „gekreuzte“ Filter für Stoffe mit teilweise überlappenden Absorptions- und Lumineszenzspektren zu wählen. Deshalb ist praktisch jedes Fluorometer ein Ausgleich zwischen der notwendigen Empfindlichkeit und der Unabhängigkeit der Ablesungen von der Trübung des Objektes. Die Experimente in Zingst und in der Gdansker Bucht zeigten, daß das dritte Modell (Fluorometer PF-66) in Meerwasser von beliebiger Durchsichtigkeit, darunter fallen Uferzonen, Flußmündungen, große Tiefen mit hoher Trübung in der Nähe von Sprungschichten usw., genutzt werden kann.

Für die Präzisierung der Anforderung an Meßapparate sind besonders einige Resultate der Versuche von 1969 in der Gdansker Bucht von Interesse.

Erstmals bei Diffusionsversuchen im Meer gelang es, synchrone Registrierungen des Indikatorgehalts im gleichen Wasservolumen mit zwei verschiedenen Geräten durchzuführen, und zwar mit dem Schlepp-Fluorometer PF-66 und einem Durchflußfluorometer der Firma Aminco. Der Ansaugstutzen des letzteren wurde unmittelbar vor dem Lichtschutz des Gebers des Gerätes PF-66 befestigt. Als Geräteträger diente das Forschungsschiff „Prof. O. Krümmel“, das eine Reihe von Vermessungen quer durch den Indikatorkörper durchführte. Ein visueller Vergleich der auf diese Weise erhaltenen Registrierungen der Indikatorverteilung zeigte folgendes:

1. eine bedeutende Verzögerung in der Registrierung des Durchflußfluorometers im Vergleich mit dem geschleppten Fluorometer;
2. eine Entstellung der Form der Indikatorverteilung beim Durchflußfluorometer bei großen horizontalen Konzentrationsgradienten;
3. das Fehlen der Feinstruktur in der Verteilung bei der Registrierung mit dem Durchflußfluorometer, was erklärt wird durch die räumliche Mittelung des Konzentrationsprofils in einem Durchflußkanal von einigen Metern Länge. Dieser Fehler des Durchflußgerätes tritt besonders im Anfangsstadium des Diffusionsprozesses auf, wenn die Unterschiede im Indikatorfleck besonders groß sind. Ein weiterer Nachteil ist auch der ungeeignete lineare Maßstab der Registrierung.

Jedoch ergaben 3–4 Stunden nach Eingabe des Tracers beide Geräte fast einheitliche Registrierungen. Auf diese Weise zeigte das Experiment anschaulich, daß die genaueste Information über die Diffusion von Beimengungen im Meer bei einer naturgetreuen Modellierung des Vorganges mit lumineszenten Indikatoren durch ein geschlepptes Fluorometer mit einer Registrierung in logarithmischem oder linearem Maßstab erhalten werden kann. Dabei sollte ein lineares Gerät nicht im Anfangsstadium des Prozesses verwendet werden. Eine entscheidende Anforderung an ein solches Gerät ist eine hohe Empfindlichkeit. Bei Versuchen in der Oberflächenschicht des Meeres kann ein geschlepptes lineares Fluorometer durch ein Durchflußfluorometer zur Registrierung der horizontalen Profile des Indikators einige Stunden nach der Tracereingabe ersetzt werden.

Die gesammelten Erfahrungen beim Einsatz des Gerätes PF-66 gestatten es, Wege zu einer Vervollkommnung der Apparatur für die Messung der Konzen-

trationen lumineszenter Indikatoren bei Diffusionsversuchen im Meer zu finden. In erster Linie ist dies die Realisierung einer synchronen Registrierung der Indikatorverteilung in verschiedenen Tiefen mit mehreren Meßfühlern (Fluorometer Typ PF-66). Das verlangt die Lösung einer Reihe technischer Probleme und die Modifizierung der Versuchsmethodik. Prinzipielle Schwierigkeiten treten hier nicht auf. Fernerhin ist erwünscht, bei den Diffusionsversuchen die räumliche Lage des Meßfühlers mit großer Genauigkeit innerhalb der gesamten Arbeitstiefe zu kontrollieren und ein Schleppen des Gerätes sowohl in der Oberflächenschicht als auch in geringen Entfernungen vom Boden zu gewährleisten. Deshalb müssen zugleich mit der Vervollkommnung der Meßapparatur auch spezielle Geräteträger gebaut und angewendet werden, die die erforderliche Genauigkeit in der Tiefe des Meßfühlers beim Manövrieren ergeben. Schließlich kann auch die Schaffung einer Bojenvariante des Fluorometers für die Beurteilung der zeitlichen Veränderung der Tracerkonzentration an einem fixierten Punkt für die Perspektive wichtig sein. Für die Zweckmäßigkeit der Herstellung einer Bojenvariante sprechen die Versuchsergebnisse in Küstennähe.

Die erforderliche Ökonomie einer entsprechenden Apparatur kann durch die Anwendung von Impulslichtquellen für die Anregungsstrahlung gewährleistet werden.

#### Literatur

- [1] ADAMOV, V. S. und KONTARDŽJAN, L. T., Die Lumineszenz der Ionenform von Uranin in flüssigen und festen Lösungen (russ.). *Optika i Spektroskopija* **9**, No. 3 (1961).
- [2] FEUERSTEIN, D. L. und SELLECK, R. E., Fluorescent tracers for dispersion measurements. *Journ. San. Eng. Div. SA* **4** (1963).
- [3] JERLOV, N. G., *Optics of sea water*. University of Kopenhagen, 1965.
- [4] KALLE, K., Über das Verhalten und die Herkunft der in den Gewässern und in der Atmosphäre vorhandenen himmelblauen Fluoreszenz. *Dt. Hydrogr. Zeitschr.* **16**, H. 4 (1963).
- [5] KARABAŠEV, G. S., Ein fotoelektrisches Unterwasserfluorometer (russ.). *Trudy Instituta Okeanologii AN SSSR* **77** (1965).
- [6] KARABAŠEV, G. S., Ein neues Gerät zur Untersuchung der Diffusion von Beimengungen im Meer (russ.). *Izvestija Akad. Nauk SSSR, ser. fizika atm. i okeana* **2**, No. 5 (1966).
- [7] KARABAŠEV, G. S. und SOLOV'EV, A. N., Ein Schleppgerät zur Konzentrationsbestimmung lumineszenter Indikatoren im Meer (russ.). *Izvestija Akad. Nauk SSSR, ser. fizika atm. i okeana* **4**, No. 12 (1968).
- [8] SWEET, M., A logarithmic photometer. *Electronics* **19** (1946).

Anschrift des Verfassers:

Dr. G. S. KARABAŠEV,  
Atlantičeskoje Otdelenije Instituta Okeanologii „P. P. Širšov“ AN SSSR,  
UdSSR, Kaliningrad, Prospekt Mira 1

## Die Anwendung eines Fluorometers bei in-situ-Messungen der Meeresdiffusion

R. CEGLARSKI, R. ZEIDLER und E. ŽELAZNY

### 1. Einleitung

In vielen Beziehungen verhalten sich fluoreszierende Tracer ganz anders (als diskrete, farbige und sogar radioaktive Stoffe oder Salze) und sind für die Untersuchung der turbulenten Bewegung des Meeres brauchbar. Zum Auffinden der Konzentration des fluoreszenten Tracers (besonders von Rhodamin und Uranin) wurde in den sozialistischen Staaten bis jetzt ein geschlepptes Gerät (von KARABAŠEV) verwendet, das in das Wasser eintaucht und die Signale an Deck des Schiffes überträgt. Außer dem unbestreitbaren Wert (eine augenblickliche Registrierung der Konzentration an einem Punkt, von dem die Koordinaten bestimmt werden) sind für dieses Gerät auch einige Mängel charakteristisch, besonders bei der Untersuchung in der ufernahen Zone des Meeres, da man es nicht in geringeren Tiefen als von einigen Metern benutzen darf, weil die Gefahr eines Zusammenstoßes mit dem Meeresboden vorhanden ist, und bei kleinen Dimensionen des diffundierenden Fleckes mit dem Durchgang des Gerätes eine zusätzliche Vermischung verbunden ist.

In Verbindung mit den aufgezählten Gründen wurden Arbeiten zur Verwendung eines Fluorometers zur Messung der Meeresdiffusion durchgeführt. Wie üblich befand sich die gesamte Apparatur an Bord des Forschungsschiffes (das selbst sehr geringen Tiefgang hatte), zu dem das Wasser mit dem Tracer gepumpt wurde. Dadurch läßt sich eine Unbequemlichkeit vermeiden, indem ununterbrochen und praktisch sofort registriert wird. Die Apparatur kann nicht nur in der ufernahen Zone des Meeres benutzt werden, sondern auch bei hydraulischen Modelluntersuchungen und sogar bei technologischen Versuchen der Abwassereinleitung, in Klärwannen, Belüftungstanks usw.

### 2. Allgemeine Beschreibung der Apparatur

Im aufgebauten Zustand (Abb. 1) ist die angewandte Standardeinrichtung des Fluorometers vom Laboratoriumstyp zu sehen. Der Apparat ist zur kontinuierlichen Messung durch einen Ersatz der Meßküvetten (Reagenzgläser) durch ein Abflußsystem geeignet, und solch ein Umbau führte zu einem Abdichten der Deckel der Meßkammer, damit der Ausgang der Abflußleitung des Systems bei gleichzeitiger Erhaltung der optischen Dichtigkeit ermöglicht wurde. Das Wasser

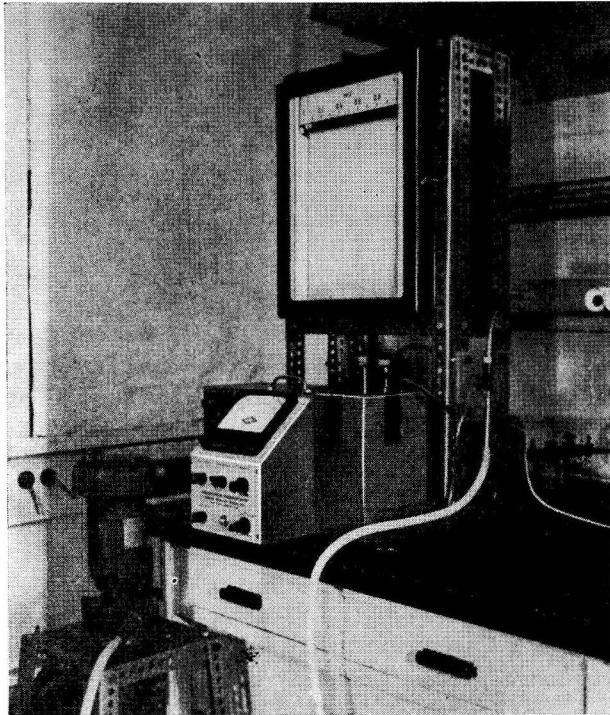


Abb. 1. Gerätezusammenstellung während der Laboratoriumsuntersuchungen

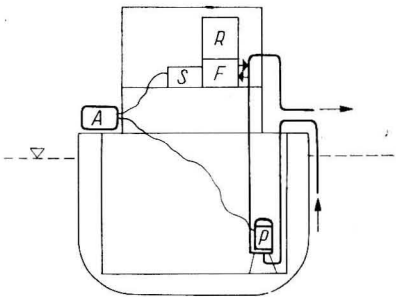


Fig. 2

Abb. 2. Schema der Meßapparatur

A—Stromversorgung; F—Fluorometer; P—Pumpe; R—Registriergerät; S—Stabilisator

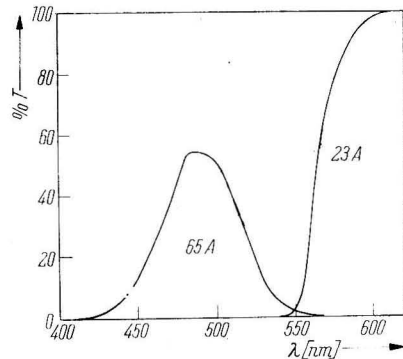


Fig. 3

Abb. 3. Durchlässigkeitskurven der verwendeten Filter

wurde mit einer Pumpe heraufgeholt und in das System über einen entsprechenden hydrologischen Stutzen geleitet, der sich auf der Druckluftpumpe für den Abfluß befand. Die Druckpumpe vom Zentrifugaltyp war unter dem Wasserspiegel angeordnet, um die automatische Füllung des Pumpensystems zu gewährleisten. Die Meßergebnisse wurden durch eine kontinuierliche Registrierung vom Kompensationstyp aufgezeichnet, der mit dem Fluorometer über ein angepaßtes Spannungsteilersystem verbunden ist. Alle Elemente des Meßsystems wurden von einem Gleichstromaggregat gespeist. Die Stromversorgung des Fluorometers und der Registratur wurde durch einen zusätzlichen Stabilisator stabilisiert. Die schematische Anordnung der Teile der Anlage auf dem Schiff und ihre Verbindung wurde auf Abb. 2 dargestellt.

### 3. Elemente der Anlage

#### 3.1. Fluorometer

In der Anlage wurde das standardmäßige Fluoromikrophotometer „Aminco“ (USA), das mit einer Spannung von 220 V und 50 Hz arbeitet, verwendet. Das Gerät wurde zur Messung von Rhodamin B herangezogen (mit einem Absorptionsmaximum bei 550 nm und maximaler Fluoreszenz bei 590 nm), indem die entsprechenden Elemente des optischen Systems ausgewählt wurden. Die Anregungsquelle war eine lumineszierende Lampe des Typs T4 T5, die Licht der Wellenlänge von 520—560 nm emittierte. Als Empfänger wurden Fotovervielfacher des Typs IP2I verwendet. Die Filter wurden auf der Grundlage ihrer Absorptionsspektren ausgewählt. Dementprechend erweisen sich die Filter „Wratten 65 A“ und „Wratten 23 A“ für Rhodamin B als gut: Die Formen ihrer Absorptionskurven sind in Abb. 3 gezeigt.

Das Durchflußgefäß ist in der Form verengt, an den Enden hat die Röhre den äußeren Durchmesser von 10 mm, eine Wanddicke von 1 mm und 10 mm Länge und ist aus optisch ausgezeichnetem polnischem Glas „Sylwit“ (Abb. 5) hergestellt. Für die Verbindung des Durchflußgefäßes mit dem hydrologischen Stutzen diente eine Leitung aus durchsichtigem Polyvinylchlorid mit einem inneren Durchmesser von 4,5 mm, was eine Kontrolle des Durchflusses des indikatorbehafteten Wassers gestattet. Im Laboratorium wurden vergleichende Messungen mit Originalgefäßen in Form von Reagenzgläsern und durchsichtigen Gefäßen durchgeführt. Wie auf Abb. 4 gezeigt wird, sind im wesentlichen zwei Kurven zur Kennzeichnung des Konzentrationsbereiches maßgebend.

Der Meßraum wurde mit Hilfe einer zylindrischen Glocke, die mit schwarzer Farbe angestrichen war, vor Ausstrahlung geschützt, um schädliche Reflexionen zu vermeiden. Die Glocke endete in einem originalen Deckel von 10 mm, was die Unterbringung der Ausgangsleitung in ihm ermöglicht. In die Seitenwand wurde ein Spalt gemacht, durch den die äußere Leitung des Durchflußgefäßes zusammen mit einem Gummischutz hinausging. Die untere Leitung wurde auch durch Gummi vor Ausstrahlung geschützt.

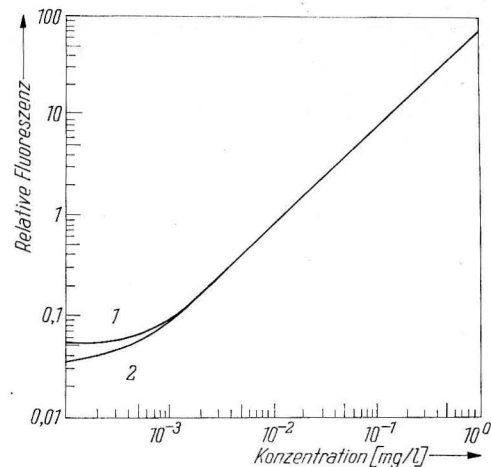


Abb. 4. Eichkurven für zwei Formen von Probegefäßen  
1 Reagenzglas; 2 – Durchflußgefäß –

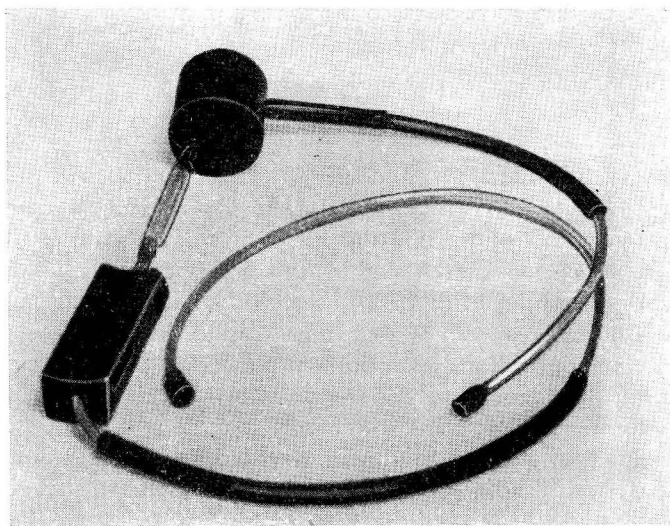
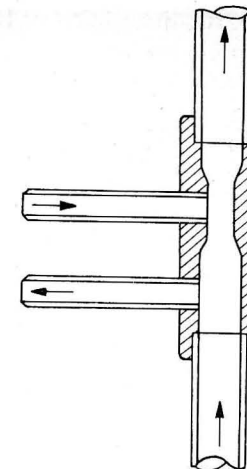


Abb. 5. Durchflußgefäß mit Abdichtung, Zuleitungen und Vorratsgefäß

### 3.2. Der hydrologische Stutzen

Dieses Element wurde aus einem Messingstück durch eine Bohrung entsprechenden Durchmessers hergestellt, in die ein Messingrohr hineinkommt, welches das Stück mit Pumpe und Fluorometer verbindet (Abb. 6). Die Einführung des Stutzens in das Gerät schränkt die Gefahr ein, daß das Fluorometer in das Wasser fällt, wenn das Durchflußgefäß bricht.

Abb. 6. Hydrologischer Stutzen im Schnitt



### 3.3. Registriergerät

Im Gerät ist ein Einkanal-Schreiber KNT/1 vom Meßgerätewerk Magdeburg (DDR) untergebracht, der mit 220 V/50 Hz gespeist wird. Er arbeitet im Meßbereich 0–10 mV mit maximaler Geschwindigkeit des Vorschubs von 3600 mm/h.

### 3.4. Das Eingangssystem

Dieses System dient der Anpassung des registrierenden Fluorometereingangs (50 mV) an den Meßbereich des Registrators. Das System besteht aus einem Spannungsteiler aus einem Widerstandsdraht von 450 Ohm. Der Teiler ist in einem Plastikörper untergebracht.

### 3.5. Spannungsquelle

Als Spannungsquelle könnte ein Generator mit Viertakt-Benzinmotor und mechanischer Umdrehungsstabilisierung dienen. Die Anlage muß Wechselstrom von 220 V und 50 Hz herstellen und eine Leistung von 500 Watt haben.

### 3.6. Spannungsstabilisator

Es wurde ein polnischer Spannungsstabilisator „Eltra“, des Typs SM-20-IA 220 V/50 Hz benutzt.

### 3.7. Pumpe

Für das Hinbringen des Wassers mit dem Tracer zum Fluorometer wurde eine Zentrifugalpumpe „Kama“ (UdSSR) benutzt, die eine Leistung von 1 m<sup>3</sup>/h bei 5000 U/min hatte und mit 220 V/50 Hz versorgt wurde. Die Saugpumpen-

leitung hatte einen inneren Durchmesser von 16 mm und war aus Messing hergestellt und durch Leinen geschützt. Die Druckleitung aus PVC hat einen inneren Durchmesser von 9 mm.

#### 4. Arbeit der Apparatur

Dank der entsprechenden Zusammenstellung aller Elemente wurden eine hohe Empfindlichkeit und Sicherheit erhalten. Die Empfindlichkeit des Apparates kann für die Rhodaminbestimmung auf der Grundlage der Kurven bestimmt werden, die für verschiedene Blenden gefunden werden (eine bis vier Öffnungen in den Platten, die sich im Weg des Lichtstroms befinden). Aus Abb. 7 folgt, daß die Apparatur eine lineare (im doppeltlogarithmischen System) Konzentrationsmessung im Bereich von  $10^0$  bis  $10^{-3}$  mg/l gewährleistet. Die Verwendung der Blenden an den Rändern der Gebiete der zu messenden Konzentration verringert den Fehler der Tracerbestimmung. Auf die Empfindlichkeit der Anlage wirkte außer der Art des verwendeten Detektors stark die Art des Einflusses der verwendeten Filter ein. Die Verwendung von Filtern mit steilem Abfall der Charakteristik (Interferenzfilter) gestattet eine Steigerung der Empfindlichkeit bei gleichzeitiger Verringerung der Einflüsse von Störfaktoren von der Art der Luftbläschen und Beimengungen.

Die Durchflußzeit des Tracers vom Untersuchungspunkt des Diffusionsflecks bis zum Fluorometer erreicht 10 s für die besprochene Garnitur. Auf diese

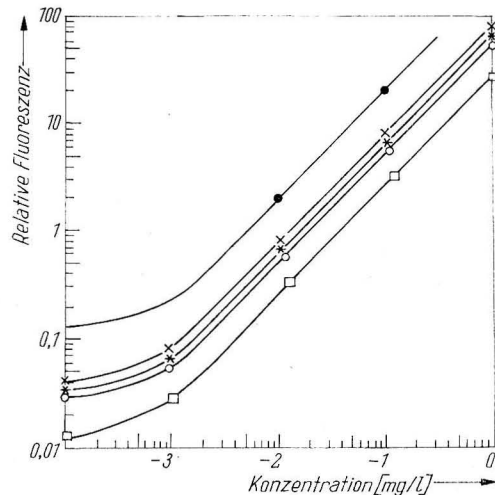


Abb. 7. Eichkurven der Apparatur für verschiedene Blenden

- Blende mit einer Öffnung
- × Blende mit zwei Öffnungen
- \* Blende mit drei Öffnungen
- Blende mit vier Öffnungen

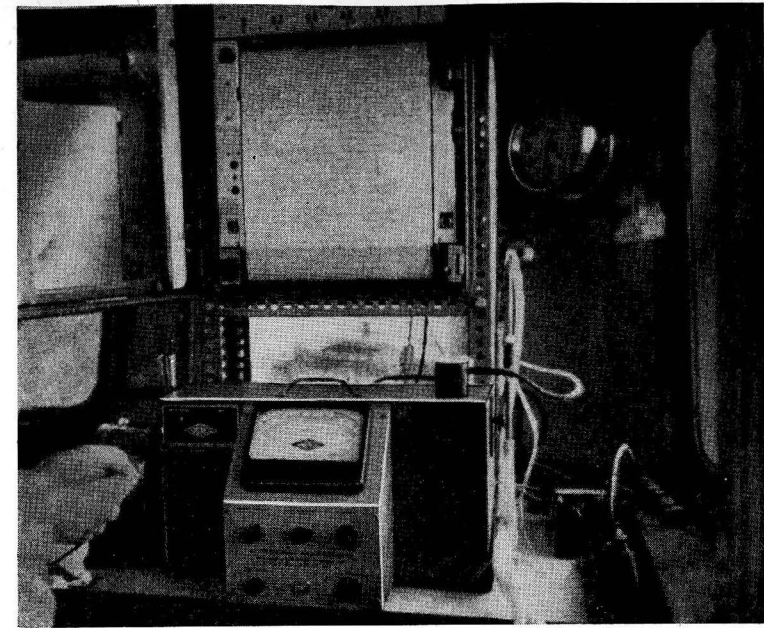


Abb. 8. Fluorometer und Registriergerät im Ruderhaus des Kutters

Größe wirken hauptsächlich sowohl die Leistungsfähigkeit der Pumpe als auch Länge und Querschnitt der Leitungen. Die Verwendung der unmittelbar ins Untersuchungsmedium getauchten Pumpe (richtige Tiefe) gibt die Möglichkeit, diese „Ansprechzeit“ zu verkürzen.

Im Verlaufe natürlicher Untersuchungen wurde die Fluorometerapparatur auf einer entsprechenden Stellage auf dem Deck des Geräteträgers angebracht. Die Anlage nimmt wenig Raum ein (Breite  $\times$  Länge  $\times$  Höhe =  $0,50 \times 0,60 \times 0,70$  + Platz für das Stromversorgungsgerät und die Pumpe), so daß man ein kleines (sogar nur 6 m langes) geschütztes Motorboot mit praktisch vernachlässigbarem Tiefgang erfolgreich benutzen kann. Die Position des Bootes kann bei Messungen in der ufernahen Zone mit geodätischen Methoden bestimmt werden. Der Moment der Peilung wird auf dem Registrierband vermerkt, so daß jede Eintragung einem Punkt auf der horizontalen Fläche entspricht. Während der Untersuchung wurden zwei Varianten für die Registrierung der Ergebnisse benutzt:

- a) Im Falle kleiner Konzentrationsunterschiede wurde die Registrierung ohne Änderung der Empfindlichkeit durchgeführt.
- b) Im Falle großer Konzentrationsunterschiede wurde die Registrierung in zwei (oder mehr) Intervallen durchgeführt. Die Form der so erhaltenen Kurven ist in Abb. 10 dargestellt.

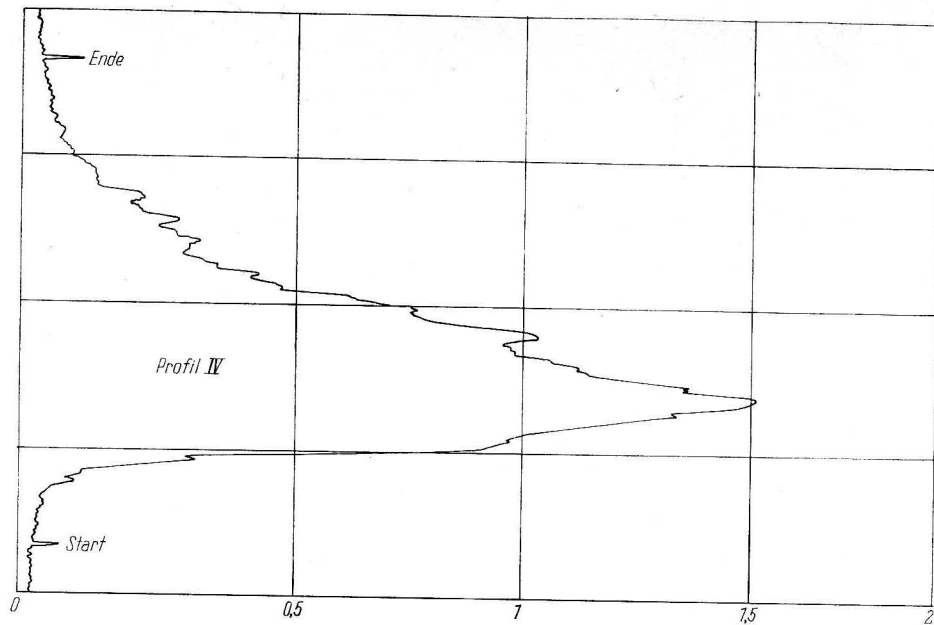


Abb. 9. Registrierbeispiel ohne Änderung der Empfindlichkeit

### 5. Anwendungsbeispiel der Fluorometerapparatur

Eine Anwendungsmöglichkeit für die Fluorometerapparatur bei Konzentrationsmessungen fluoreszierender Tracer (Rhodamin B) in situ ergab sich bei den gemeinsamen Untersuchungen der Arbeitsgruppe der KAPG, die im September 1969 in der Gdansker-Bucht durchgeführt wurden. Außer methodischen Ergänzungen ergaben die ferner beschriebenen Ergebnisse dieser Untersuchung weitere wesentliche Erkenntnisse über die Prozesse der turbulenten Diffusion im Meer.

In der Zeit vom 25. 9. bis zum 30. 9. 1969 wurden drei momentane und zwei stationäre Eingaben von Rhodamin B in Entfernungen zwischen 0,5–2 km vom Ufer durchgeführt, d. h. in einer Zone mit Tiefen von 5–11 m. Einige Bedingungen dieser Untersuchungen wurden in Tabelle 1 zusammengestellt.

Die Meßdaten wurden normalerweise unter Benutzung der dargestellten Eichkurven und der geodätischen Peilungen bearbeitet, wobei die Durchflußzeit des Rhodamins bis zum Fluorometer berücksichtigt wurde. Nach der Zuordnung der Registrierwerte zu den natürlichen Konzentrationswerten  $v$  erhält man eine Reihe von Kurven, die den Schnitten auf den Meßprofilen durch den Rhodaminstrahl entsprechen. Als Beispiel wurden diese Kurven in Abb. 11 für das Profil auf der Höhe der Boje 5 beim Versuch mit stationärer Quelle am

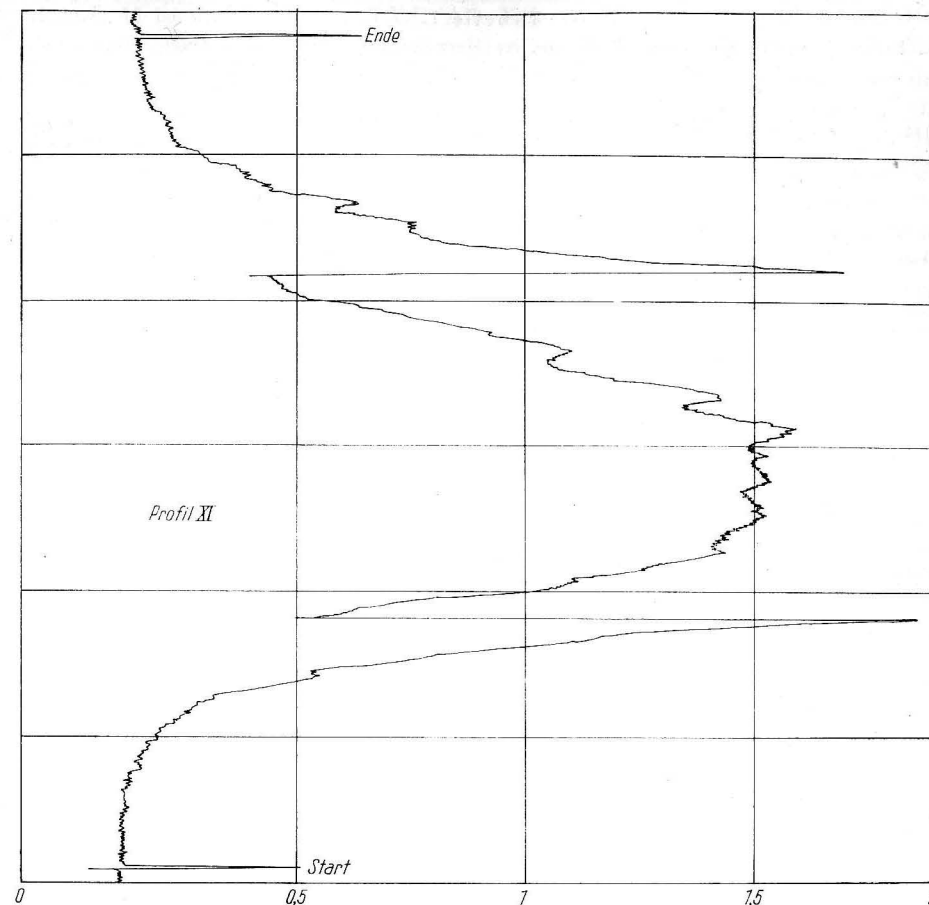


Abb. 10. Registrierbeispiel mit geänderter Empfindlichkeit

29. 9. 1969 miteinander verglichen. Geringe Ungleichmäßigkeiten der Kurven wurden graphisch geglättet. In Verbindung mit dem zufälligen Charakter der untersuchten Erscheinung unterscheiden sich die Kurven stark voneinander. Deshalb muß das Bestreben darauf gerichtet sein, eine größere Kurvenschar zu erhalten. Das ist wegen der Untersuchungstechnik in der ufernahen Zone oft eine schwierige Aufgabe. Bei den beschriebenen Untersuchungen wurde eine große Anzahl von Kurven (bis 11 in einem Profil) bei einer stationären Quelle erhalten, da die Messungen im Falle der einmaligen Farbeingabe auf wenige Durchfahrten des Schiffes längs und quer zum Rhodaminfleck beschränkt blieben. Es scheint, daß für die Berechnung der Längsdiffusion der Substanz in einem stationären Strahl die Kurve mit maximaler Konzentration, die sich in einer bestimmten Entfernung von der Quelle zeigt, am geeignetsten sein muß.

Tabelle 1  
Untersuchung der Diffusion im Meer innerhalb der KAPG 1969

Datum	Art der Tracerquelle	Meßzeit bzw. Abstand des letzten Profils	Tracermenge	mittl. Tiefe (m)	Wind in 10 m Höhe	Strömung in 1 m Tiefe (Oberfläche)	See-gang
25. 9. 1969	momentan	10 <sup>25</sup> –16 <sup>20</sup>	3 kg	7,5–5,0	80°–120° 10 m/s	250°–280° 10 cm/s	3
26. 9. 1969	momentan	9 <sup>40</sup> –14 <sup>25</sup>	6 kg	5,0–7,5	255°–280° 12 m/s	70°–120° 8 cm/s	3
27. 9. 1969	momentan	10 <sup>00</sup> –14 <sup>40</sup>	8 kg	10,0	255°–270° 8 m/s	70°–90° 8 cm/s	3
29. 9. 1969	stationär	2000 m v. d. Quelle	6,6 kg/h	8,5	200°–280° 9 m/s	100°–200° 7 cm/s	3
30. 9. 1969	stationär	1800 m v. d. Quelle	6,5 kg/h	11,0	300° 9 m/s	130° 15 cm/s	3

Bemerkung: Die Uferlinie verläuft in der Richtung 110°–290°

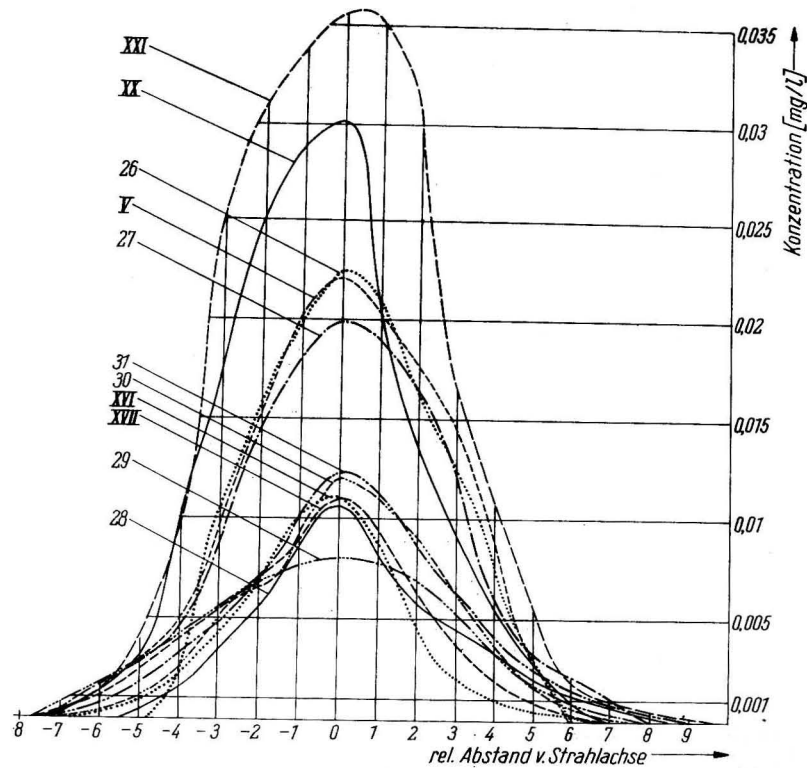


Abb. 11. Rhodaminkonzentration auf den Querschnitten durch den Tracerstrahl im Profil 5 (vorletztes Profil, von der Quelle aus gesehen) am 29. 9. 1969. Die Zahlen bezeichnen die einzelnen Schnitte

In Abb. 11 ist die Kurve XXI. Alle Kurven mit maximalen Konzentrationen in den einzelnen Entfernungen von der Quelle sind in Abb. 12 als Projektion auf die horizontale Fläche dargestellt. Ebenso wurde auch die Verteilung der mittleren Konzentration in den einzelnen Schnitten dargestellt (Abb. 13). Die Möglichkeit des zusätzlichen Vergleichs dieser zwei Verteilungen gibt Abb. 14, auf der alle Maxima der registrierten Kurven gegenübergestellt wurden, die für spezielle Profile erhalten wurden.

Eine vollständige Analyse war wegen der Fehler einer großen Anzahl von Messungen, die in geringen Entfernungen von der Quelle durchgeführt wurden, nicht möglich (Schnitte 2 und 3). In größeren Entfernungen von der Quelle (Schnitte 4, 5 und 6) geht der Potenzabfall der Konzentration  $v$  ziemlich regulär vor sich.

Der Exponent  $\alpha$  in der Beziehung  $v \sim x^{-\alpha}$  ist dabei groß für eine Gerade durch die Maximalkonzentration in den einzelnen Schnitten (1, 27 für  $v_{max}$ ). Für  $v_{mittel}$  beträgt er nur 1,12. Wenn jedoch repräsentative Werte für die Schnitte 2 und 3 vorliegen würden und die Gerade  $\log v \sim \log x$  für alle Schnitte aufgezeichnet wird, so erscheint der Unterschied zwischen den Exponenten  $\alpha$  geringer (0,89 für  $v_{max}$  und 0,82 für  $v_{mittel}$ ).

Ein Beispiel für die Ausbreitung von Rhodamin bei den übrigen Versuchen wurde auf den Abb. 15 dargestellt. Sie zeigt die charakteristischen Quer- und Längsmaße des Rhodaminflecks bei jenen Versuchen. Die Längen und Breiten der vermessenen Konzentration wurden auf Abb. 16 zusammengestellt.

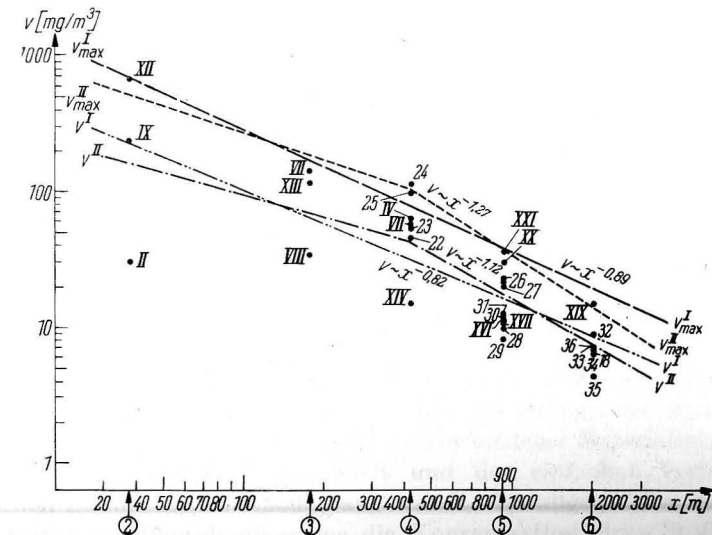


Abb. 14. Längsabfall der Rhodaminkonzentrationen im Strahl am 29. 9. 1969  
②–⑥ Abstand der einzelnen Profile von der Quelle; Kleine Zahlen: Nummern der einzelnen Schnitte

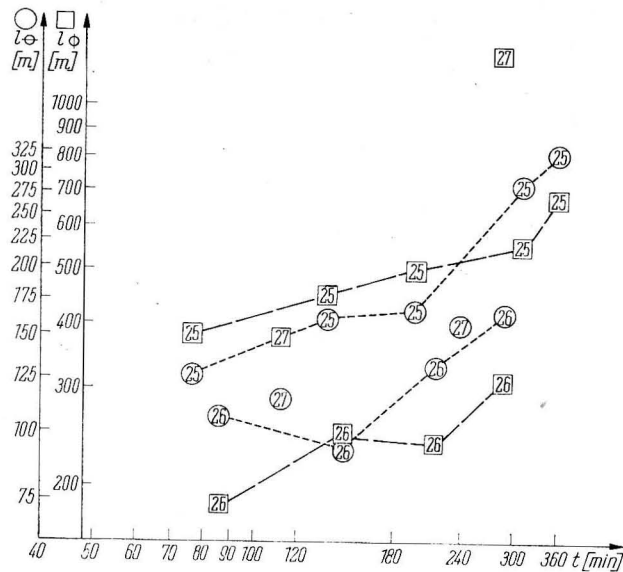


Abb. 16. Veränderung der Längs- und Querausdehnung des Flecks während der einzelnen Versuche. (Die Zahlen entsprechen den einzelnen Versuchstagen.)  
○ Querausdehnung; □ Längsausdehnung

Anschrift der Verfasser:

Mag. ROMAN CEGLARSKI, Mag. EUGENIUSZ ŽELAZNY,  
Instytut Gospodarki Wodnej, Zakład Ochrony Wod,  
VR Polen — Gdansk — Wrzeszcz, ul. Jaškowa Dolina 14

Dr. RYSZARD ZEIDLER,  
Instytut Budownictwa Wodnego PAN,  
VR Polen — Gdansk — Oliwa, ul. Cystersow 11

## Perspektiven der Anwendung von Lumineszenzmethoden zur Untersuchung der Ausbreitungsprozesse von Beimengung im Meer

G. S. KARABAŠEV

Bei einer experimentellen Untersuchung der Dynamik und der Entstehung von Verunreinigungsfeldern im Meer sind in erster Linie die Konzentration der Beimengungen an verschiedenen Raum- und Zeitpunkten zu messen und ihre qualitative Zusammensetzung zu bestimmen.

Auf Grund der großen Vielfalt von Stoffen, die durch die Tätigkeit des Menschen ins Meer gelangen, wie Industrieabwässer, Haushaltsabwässer, Giftstoffe usw. (FØYN [1]), ist es kaum möglich, eine oder einige wenige Methoden für die Lösung derartiger analytischer Aufgaben zu entwickeln, die für alle Verschmutzungsfälle des Meeres gleichermaßen anwendbar wären. Die Existenz allgemeiner Gesetzmäßigkeiten bei der Ausbreitung verschiedener Fremdstoffe im Meer und die Forderungen nach Wirtschaftlichkeit lassen jedoch die Entwicklung und Ausarbeitung möglichst universeller Methoden für die Bestimmung der Verschmutzungskonzentration im Seewasser als zweckmäßig erscheinen. Offensichtlich müssen diese Methoden von den Eigenschaften des Mediums bzw. des Fremdstoffes ausgehen, die sich im Entwicklungsprozeß des Verunreinigungsfeldes auf See verändern und die für eine umfangreiche Klasse von ins Meer abgeleiteten Fremdstoffen charakteristisch sind. Unserer Auffassung nach gehört zu derartigen Eigenschaften die Photolumineszenz. Die Verwendung der physikalischen Kennwerte dieser Eigenschaft als analytischer Parameter gestattet es offensichtlich, eine Methodik zur Bestimmung der Fremdstoffkonzentration im Seewasser zu entwickeln, die sich durch hohe Empfindlichkeit, schnelle Bearbeitungsmöglichkeit und Zugänglichkeit auszeichnet.

Die Lumineszenzerscheinung äußert sich im Aufleuchten einer Substanz unter der Einwirkung einer kurzwelligen optischen Strahlung. Sie wird heute in breitem Maße für die quantitative Analyse verschiedener Materialien wegen der außerordentlich hohen Empfindlichkeit und der einfachen Verfahren von analytischen Lumineszenzmethoden angewandt. Im allgemeinen wird anhand der Intensität der Photolumineszenz die Konzentration eines Stoffes in verschiedenen Objekten beurteilt, während anhand der physikalischen Strahlungsparameter (Spektrum, Kinetik, Abstrahlung) die qualitative Zusammensetzung des Stoffes ermittelt wird. In den letzten Jahren wurde die qualitative Lumines-



zenanalyse mehrfach mit Erfolg für experimentelle Untersuchungen der Gesetzmäßigkeiten der mechanischen Ausbreitung passiver Fremdstoffe im Meer mit Hilfe einer naturgetreuen Modellierung dieses Prozesses angewandt. Dabei fanden wasserlösliche lumineszente Indikatoren Verwendung. Bei den Untersuchungen der turbulenten Diffusion mit Hilfe der naturgetreuen Modellierung, die vom Institut für Ozeanologie der Akademie der Wissenschaften der UdSSR seit dem Jahre 1964 durchgeführt werden, wurde ein von uns entwickeltes Schlepp-Fluorometer benutzt. Es handelt sich hierbei um einen Geber für die Konzentration lumineszenter Indikatoren, wie Uranin und Rhodamin S. Die Betriebserfahrungen mit diesem Gerät erbrachten den Nachweis, daß es für experimentelle Untersuchungen praktisch aller Fälle der mechanischen Zerstreuung von Beimengungen sowohl im Küstenvorfeld als auch auf offener See geeignet ist (KARABAŠEV, SOLOV'EV [5]). Im Prinzip sind für die Untersuchungen mit Hilfe der naturgetreuen Modellierung viele wasserlösliche Stoffe verwendbar. Eine Reihe von Besonderheiten läßt jedoch die lumineszenten Farbstoffe als zweckmäßigste Indikatoren für Forschungen auf See erscheinen (Tab. 1).

Tabelle 1  
Vergleich der praktisch wichtigsten Eigenschaften verschiedener Indikatoren

Eigenschaft	Indikator		
	Farbstoffe	Radioisotope	lumineszente Substanzen
Empfindlichkeit	niedrig	hoch	hoch
Gefährlichkeit für Flora und Fauna	keine Gefahr	hoch	keine Gefahr
Abhängigkeit des Markierungseffekts von den Eigenschaften des Mediums	groß	fehlt	groß
Möglichkeit für visuelle Beobachtung und Photoaufnahme	vorhanden	fehlt	vorhanden
Kosten für die Markierung von 1 t Seewasser	mittlere	große	niedrige

Die modernen Methoden experimenteller Untersuchungen der Diffusion von Fremdstoffen im Meer in ihren Wechselbeziehungen kann man in Form eines Schemas darstellen (Abb. 1). Infolge der großen Absorptionsfähigkeit der lumineszenten Indikatoren kann man ihre Konzentration im Meer nicht nur anhand der Leuchtstärke bestimmen, sondern auch mit Absorptions-, photographischen und visuellen Methoden. Dadurch erhöht sich der Informationsgehalt eines einzigen Versuchs, vergrößert sich die Zuverlässigkeit der Ergebnisse und werden mögliche systematische Messungsfehler vermieden. Wie STOERTZ und HEMPHILL [8] nachwiesen, ist die Ermittlung der Konzentration

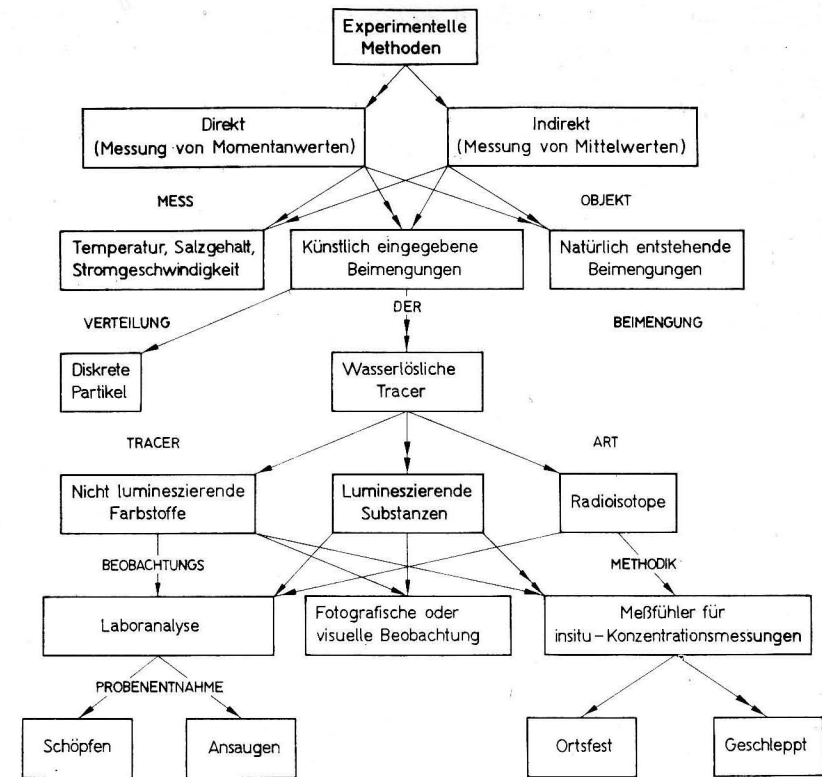


Abb. 1. Klassifizierung der experimentellen Untersuchungsmethoden zur Diffusion von Beimengungen im Meer. Der doppelte Pfeil hebt die „genetische Linie“ der Methode lumineszenter Indikatoren hervor

von lumineszenten Indikatoren von einem Schiff oder einem Flugkörper aus auch kontaktlos möglich. Dabei wird als Geber ein Diskriminator für FRAUNHOFERSCHE Linien verwendet, d. h. ein Zweistrahl-Photometer mit FABRY-PEROT-Filtern, das die durch die Sonnenstrahlung erregte Lumineszenz der Meeresoberfläche registriert. Ungeachtet einer Reihe von wesentlichen Einschränkungen (Wetterabhängigkeit, vertikale Mittelung u. a.) ist diese Methode von praktischem Interesse. Sie hebt im Gegensatz zur Photographie die Lumineszenz von der Hintergrundstrahlung hervor und beschleunigt die Aufnahmemöglichkeit von Flecken großen Ausmaßes durch den Einsatz von Flugzeugen, Hubschraubern und vermutlich auch künstlichen Erdtrabanten erheblich.

Gegenwärtig wurde die Methodik zur Untersuchung der mechanischen Zerstreuung von Fremdstoffen im Meer mit Hilfe lumineszenter Farbstoffe, wie

Uranin und Rhodamin S, bereits zu einer Standardmethode. Die weitere Erhöhung ihrer Wirksamkeit ist von der Lösung rein technischer Probleme abhängig. Zu diesen gehören

- die Erweiterung der Substanzen, die als Indikatoren eingesetzt werden können. Dies kann durch Auswahl oder die Synthese von Reagenzien geschehen, deren Lumineszenz im langwelligen Bereich des sichtbaren Spektrums ausreichend intensiv ist und nicht dem Einfluß physikalisch-chemischer Prozesse und Parameter des Seewassers unterliegt;
- die Entwicklung von Mehrkanal-Registriergeräten für die Konzentration des Indikators in Form von Bojen- oder Schleppvarianten zur synchronen Ermittlung der Konzentration an verschiedenen Punkten des Indikatorkörpers;
- die Entwicklung einer autonomen automatischen Anlage zur ununterbrochenen Indikatoreingabe in einer vorgegebenen Tiefe, die ebenfalls von einer Boje aus eingesetzt werden kann.

Bereits vor Veröffentlichung der ersten Arbeiten über die Verwendung von lumineszenten Indikatoren bei Diffusionsversuchen auf See wurden Versuche unternommen, um die Lumineszenz von natürlichen Gewässern zur Bewertung ihrer Verschmutzung durch verschiedene Arten von Fremdstoffen festzustellen (McLEAN, SPEAS [6], SINEL'NIKOV u. a. [7]). Es stellte sich heraus, daß bei Süßwasserreservoirs und bei Wasserversorgungsquellen die Intensität und die Farbe der Lumineszenz tatsächlich als Nachweis für das Vorhandensein von Fremdstoffen gelten können.

Soweit uns bekannt wurde, wurden ähnliche Untersuchungen für die Gewässer der offenen See bzw. im Küstengebiet nicht durchgeführt, obwohl ihre Zweckmäßigkeit außer Zweifel steht. Dies um so mehr, als ein großer Teil der heute mit Abwässern ins Meer eingeleiteten Stoffe eine Photolumineszenz im Seewasser besitzt. Möglich ist auch ein umgekehrtes Herangehen, und zwar die Ermittlung des Fremdstofffeldes anhand der Veränderung der Photolumineszenz des Seewassers selbst. Diese Möglichkeit besteht, da die Lumineszenz von Lösungen wesentlich von der Konzentration der gelösten Stoffe, vom pH-Wert des Mediums, vom Gehalt an gelöstem Sauerstoff und anderen Faktoren abhängig ist. In beiden Fällen wird der Erfolg bei der Ausnutzung der Lumineszenz zu analytischen Zwecken in großem Maße von den physikalischen Parametern der natürlichen Photolumineszenz des Seewassers sowie ihrer Abhängigkeit von den Beobachtungsbedingungen bestimmt. Allerdings beschränken sich die Angaben über die Lumineszenz des Seewassers nur auf wenige Daten der Strahlungsintensität, die durch Labormessungen von Wasserproben gewonnen wurden (IVANOFF [3], KALLE [4]).

Im Verlaufe der letzten zwei Jahre wurden in der Atlantischen Abteilung des Instituts für Ozeanologie experimentell-methodische Arbeiten zur Untersuchung der physikalischen Eigenschaften der Photolumineszenz des Seewassers durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden ein versenkbarer Intensitätsgeber für den

Tiefenbereich zwischen 0 und 200 m, ein Schiffs-Spektrofluorometer zur Untersuchung der spektralen Kennwerte der Lumineszenz im sichtbaren Bereich und spezielle Bathometer und Küvetten entwickelt, die eine Entnahme von Seewasserproben und die Untersuchung ihrer Lumineszenzeigenschaften gestatten, ohne daß das Wasser während der Probenentnahme und der Messungen mit der Atmosphäre in Berührung kommt. Mit Hilfe dieser Anlagen gelang es uns bei Komplexuntersuchungen in der Ostsee, eine Reihe von Besonderheiten festzustellen und einige Schlußfolgerungen über den Zusammenhang zwischen den physikalischen Eigenschaften der natürlichen Photolumineszenz des Seewassers und den Parametern des Mediums zu ziehen.

Entgegen der weit verbreiteten Meinung wird die natürliche Photolumineszenz des Seewassers nicht nur durch ultraviolette, sondern auch durch sichtbare kurzwellige Strahlung erregt, wobei sich im letzten Fall das Lumineszenzspektrum bis dicht an die rote Grenze des sichtbaren Bereichs erstreckt. Dieser Umstand ist bei der Auswahl der lumineszenten Indikatoren für Diffusionsuntersuchungen zu berücksichtigen, um systematische Meßfehler besonders empfindlicher Anlagen zu vermeiden. Die Höhe und die vertikale Intensitätsverteilung der Eigenphotolumineszenz des Seewassers hängen offensichtlich von der Flußwasserzufuhr ab. Auf Abb. 2 sind vertikale Intensitätsprofile für das Gotland-Becken, die Irben-Straße, den Rigaer Meerbusen und der Daugava-Mündung dargestellt. Mit Annäherung an die Küste verschwindet die Tendenz zu einem Anwachsen der Intensität mit der Wassertiefe und verwandelt sich in das Gegenteil, wobei sich die Intensität der Eigenphotolumineszenz des Seewassers insgesamt erhöht. Im allgemeinen besteht keine merkliche Korrelation zwischen der natürlichen Photolumineszenz des Meerwassers und der Temperatur, dem pH-Wert und anderen Eigenschaften des Mediums. Insgesamt bestätigen und präzisieren unsere Beobachtungen die Hypothese von KALLE [4] über die Bildung von Fluorogenen im Seewasser. Die Passivität der physika-

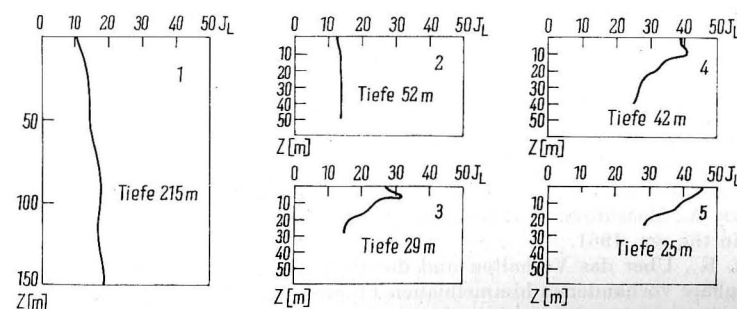


Abb. 2. Vertikale Intensitätsverteilung der Photolumineszenz in folgenden Gebieten: 1 — Gotland-Becken; 2 — Ausgang der Irben-Straße zur Ostsee; 3 — Ausgang der Irben-Straße zum Rigaer Meerbusen; 4 — Mittelteil des Rigaer Meerbusens; 5 — Mündungsgebiet der Daugava; die Wassertiefe ist auf den Darstellungen eingetragen.

Die Intensität der natürlichen Photolumineszenz ist in relativen Einheiten angegeben

lischen Eigenschaften der Eigenphotolumineszenz des Meerwassers gegenüber den physikalisch-chemischen Eigenschaften des Meeres besagt, daß die Erscheinung zur Einschätzung großmaßstäblicher Vermischungsvorgänge besonders in der Nähe großer Flüsse benutzt werden kann. Dabei kann man als charakteristische Eigenschaft neben der Intensität offensichtlich auch die Spektren der Eigenphotolumineszenz des Seewassers benutzen. Die abweichenden spektralen Eigenschaften der Lumineszenz für die Gewässer des Atlantischen Ozeans (FRAGANZA [2] gegenüber unseren Angaben für die Ostsee sprechen zugunsten dieser Annahme.

Aus dem Gesagten geht hervor, daß die Gesamtheit der vorhandenen Angaben über die Photolumineszenz des Meerwassers und die bisher gewonnenen Erfahrungen über die Verwendung lumineszenter Indikatoren bei Untersuchungen im Meer dazu berechtigen, die Verwendung von Lumineszenzmethoden für experimentelle Untersuchungen der Ausbreitung verschiedener Fremdstoffe und der Gesetzmäßigkeiten der Vermischung im Meer für entwicklungsfähig anzusehen. Um diese Methoden in größerem Rahmen einführen zu können, sind in erster Linie die Gesetzmäßigkeiten der Photolumineszenz von „reinem“ Seewasser und ihre Abhängigkeit von den physikalischen und chemischen Eigenschaften des Mediums sowie die Photolumineszenz von Lösungen der Stoffe, die die Ursache für die Verschmutzung der Küstengewässer bilden, zu untersuchen. Die praktische Anwendung konkreter Methoden der Lumineszenzanalyse eines Feldes von Verunreinigungen auf See bringt unserer Meinung nach keine großen Schwierigkeiten mit sich, da die hierfür erforderlichen Anlagen, wie Meßgeräte für die Intensität der Photolumineszenz, zu den unkomplizierten und zugänglichen photometrischen Geräten gehören. Derartige Geräte werden im allgemeinen für die Lumineszenzanalyse sehr verschiedenartiger Stoffe benutzt, da Erregungslichtquellen in einem breiten Bereich benutzt werden. Ferner können mit Hilfe auswechselbarer farbiger Lichtfilter entsprechende Spektralbereiche zur Anregung und Messung der Photolumineszenz ausgewählt werden.

#### Literatur

- [1] FØYN, E., Disposal of waste in the marine environment and the pollution of the sea. *Oceanography and Marine Biology* **3** (1963).
- [2] FRAGANZA, E. D., Fluorescence excitation and emission spectra of dissolved organic matter in the sea water. *Bull. Mar. Sci.* **19**, No. 4 (1969).
- [3] IVANOFF, A., Measurement at sea of water samples. Tenth Pacific Scient. Congr. Ser., *Light in the sea*, 1961.
- [4] KALLÉ, K., Über das Verhalten und die Herkunft der in den Gewässern und in der Atmosphäre vorhandenen himmelblauen Fluoreszenz. *Dt. Hydrogr. Zeitschr.* **16**, H. 4 (1963).
- [5] KARABAŠEV, G. S. und SOLOV'EV, A. N., Ein neues Gerät zur Untersuchung der Diffusion von Beimengungen im Meer (russ.). *Izvestija Akad. Nauk SSSR, ser. fizika atm. i okeana* **4**, No. 12 (1968).
- [6] McLEAU, R. A. und SPEAS, M. L., Fluorescence of drinking waters as evidence of sewage pollution. *Journ. Amer. Water Works Assoc.* **38**, No. 3 (1946).

- [7] SINEL'NIKOV, V. E., GUR'JAU, L. E. und BUCHANEVIČ, G. A., Die Feststellung der Verschmutzung von Flußwasser durch organische Industrieabfallstoffe mit Hilfe der Lumineszenzmethode (russ.). *Vodosnabženije i sanitornaja tehnika* **11** (1966).
- [8] STOERTZ, G. E. und HEMPHILL, W. R., Airborne fluorometer applicable to marine and estuarine studies. *MTS Journ.* **3**, No. 6 (1969).

Anschrift des Verfassers:

Dr. G. S. KARABAŠEV,  
Atlantičeskoje Otdelenije Instituta Okeanologii „P. P. Širšov“ AN SSSR,  
UdSSR, Kaliningrad, Prospekt Mira 1

Die Wirkung „nichtturbulenter“ Prozesse auf die Konzentration  
eines Rhodamin-S-Fleckes im Meer  
unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses  
von Phytoplankton, suspendierten Sedimenten  
und Sonnenstrahlung<sup>1)</sup>

ULRICH KREMSEK

*Zusammenfassung:* Bei Diffusionsversuchen mit Rhodamin als Tracer wurden Differenzen zwischen der ursprünglich ins Meer gegebenen Farbstoffmenge und der durch Integration über Konzentrationsverteilung und Fleckvolumen erhaltenen festgestellt, deren Größe nicht immer durch eine ungenügende Meßgenauigkeit erklärt werden konnte. Auf Grund eines umfangreichen Literaturstudiums und eigener Erfahrungen wurde abgeschätzt, daß die Wirkung von Phytoplankton, suspendierten Sedimenten und Sonnenstrahlung meßbare Konzentrationsänderungen nach sich ziehen könnte. Diese Annahmen erwiesen sich für suspendierte Sedimente und Sonnenstrahlung als richtig. Der Einfluß auf einen Rhodaminfleck wurde qualitativ und quantitativ bestimmt. Außerdem wurden Korrekturfverfahren angegeben.

#### Einleitung

Auf Grund akuten Wassermangels im Binnenland und der zunehmenden Verschmutzung sämtlicher Gewässer bedingen Abwasser- und Verunreinigungsprobleme in der Gegenwart ein erhöhtes Interesse an der Lösung und weiteren Durchdringung von Fragestellungen, die mit der turbulenten Diffusion im Meer zusammenhängen.

Durch Diffusionsversuche und die nachfolgende Auswertung werden neue Erkenntnisse gewonnen. Direkte Methoden werden angewandt, bei denen organische Farbstoffe als Tracer benutzt werden. Der Farbstoff muß u. a. bestimmten technischen und ökonomischen Anforderungen genügen, die beispielsweise von D. W. PRITCHARD und J. H. CARPENTER (1960) sowie J. JOSEPH, H. SENDNER und H. WEIDEMANN (1964) formuliert wurden. Rhodamin erfüllt diese Bedingungen im Mittel gut.

Bei experimentellen Untersuchungen zur Bestimmung der Diffusionsparameter in situ wird eine definierte Menge des Farbstoffes in das Meer eingebracht. Der Tracer breitet sich als Fleck durch das Wirken der turbulenten Diffusion aus, wobei der molekulare Anteil des Austausches vernachlässigt werden kann. Die (horizontale) Konzentrationsverteilung wird bestimmt, wenn der Fleck eine gewisse Größe erreicht hat. Sie ermöglicht die Ermittlung der interessierenden Diffusionsparameter, deren Aussagegehalt von der Genauigkeit der Konzen-

<sup>1)</sup> Die vorliegende Arbeit ist die gekürzte Dissertation gleichlautenden Themas. Das Literaturverzeichnis wurde vollständig übernommen.

trationsmessung abhängt. Die Kenntnis der Diffusionsparameter eines Seegebietes ermöglicht die Lösung praktischer Aufgaben, beispielsweise in Hinblick auf die Einleitung von Abwässern in das Meer. Es ist deshalb ein wichtiges Anliegen, die Genauigkeit der Messung der Konzentrationsverteilung in solcher Weise zu erhöhen, daß nicht nur die Meßfehler klein gehalten werden, sondern auch die Fehler eliminiert werden, die durch das Wirken solcher Prozesse entstehen, die zwar die Konzentration der Rhodaminlösung verändern, aber keinen unmittelbaren Einfluß auf die Turbulenz besitzen.

Eine Erhöhung der Genauigkeit der Konzentrationsmeßwerte des Farbfleckes ist auf Grund unterschiedlicher Fehler nur in gewissen Grenzen möglich. Wir können die Fehler verschiedenen Gruppen zuordnen und unterscheiden:

- a) Fehler, die durch die Versuchsmethode gegeben sind,
- b) Fehler, die durch das Untersuchungsgebiet bedingt sind und
- c) Fehler, die durch die Verwendung eines bestimmten Tracers entstehen.

Zu solchen der ersten Gruppe kann man zählen:

*Fehler, die beim Abwägen der Farbstoffmenge entstehen.* Der relative Fehler kann klein gehalten werden.

*Fehler, die beim Ausbringen des Farbstoffes entstehen.* Eine entsprechend der Theorie geforderte Punktquelle ist nicht realisierbar. Aus dem Farbstoffbehälter wird im allgemeinen nicht die ganze Farbe herausgespült. Die Anfangsposition ist auch nur näherungsweise bestimmbar. Außerdem dauert es eine bestimmte Zeit, bis die Dichte der Farblösung mit der des umgebenden Wassers übereinstimmt, so daß Auftriebskräfte wirksam werden.

*Fehler, die in der Konzentrationsverteilung des Fleckes durch die angewandte Meßtechnik entstehen können.* Bei der Fahrt des Schiffes bzw. Meßgeräteträgers durch den Fleck wird zusätzlich Turbulenz verursacht, die nicht den natürlichen Verhältnissen entspricht.

*Fehler, die ihre Ursache in der Ortsbestimmung auf See haben.* Es ist schwierig, die einzelnen Meßpunkte oder Kurse ihren wirklichen Orten bezüglich des Fleckes zuzuordnen.

*Fehler, die durch das Meßgerät zwangsläufig entstehen.* Dazu gehören Eich-, Ablese- und andere durch das Gerät und die Energiequelle bedingte Fehler.

Mit Ausnahme des Meßgerätefehlers, der mit ausreichender Genauigkeit im Labor ermittelt werden kann, verhalten sich die übrigen relativen Fehler proportional dem Quotienten aus der Größe des Meßgeräteträgers und der Fleckgröße:

$$\text{relativer Fehler} \sim \frac{\text{Größe des Meßgeräteträgers}}{\text{Fleckgröße}}$$

Das heißt, daß diese Fehler kurz nach dem Ausbringen des Fleckes relativ groß sind und dann monoton abnehmen.

Zur Gruppe b) gehören solche Fehler, die nicht durch die Versuchsmethode oder das Meßverfahren bedingt sind. Sie können aber durch die Auswahl des

Versuchsgebietes klein gehalten werden. Slicks und Ölflecke sind solche Erscheinungen, die räumlich begrenzt vorkommen.

Über die Fehler der dritten Gruppe kann folgendes gesagt werden: Die Konzentration eines Rhodaminfleckes im Meer ändert sich nicht allein durch molekulare und turbulente Diffusion. Es gibt eine Reihe von Prozessen, die auf den Tracer einwirken können, ohne die Turbulenz zu beeinflussen. Bei Farbtracern sind damit solche Prozesse gemeint, die den Farbstoff entweder zerstören oder ihn auf andere Weise dem Einfluß des Konzentrationsmeßgerätes entziehen. Dadurch tritt eine Konzentrationserniedrigung ein, die zwar gemessen wird, aber nicht das Resultat des zu messenden natürlichen Austausches darstellt.

Es ist recht schwierig, die unter a) und b) angeführten Fehler absolut abzuschätzen, da sie subjektiven und objektiven Einflüssen unterliegen. Die Fehler der Gruppe c) sind unabhängig von der Methode und deshalb leichter zugänglich. Die dort erwähnten Prozesse finden in der allgemeinen Diffusionsgleichung

$$\frac{dQ}{dt} = F(x, y, z; t; M; B)$$

durch  $B$  ihren Ausdruck ( $x, y, z$  — Ortskoordinaten,  $t$  — Zeit,  $M$  — Ausgangsmenge des Farbstoffes). Für die Funktion  $F$  existieren noch keine expliziten Ausdrücke, so daß es einfacher ist, das Wirken solcher Prozesse an Hand der Lösung der Gleichung

$$\frac{dQ}{dt} = G(x, y, z; t; M)$$

zu berücksichtigen. Es läßt sich eine Konzentrationsbilanzgleichung folgender Form aufstellen:

$$Q = Q_T + Q_B.$$

Hierbei bedeuten:  $Q_T$  — die nach dem Diffusionsgesetz zu erwartende Konzentration,

$Q_B$  — die durch die Umweltparameter bedingte Abweichung von  $Q_T$ .

Das Glied  $Q_B$  kann in verschiedene Komponenten zerlegt werden, indem diese entsprechend ihrer Ursache gegliedert werden.

$$Q_B = Q_{Ph} + Q_{Bi} + Q_{Ch}.$$

Es bedeuten:

$Q_{Ph}$  — die Änderung der Konzentration auf Grund physikalischer Prozesse,

$Q_{Bi}$  — die Änderung der Konzentration auf Grund biologischer Prozesse,

$Q_{Ch}$  — die Änderung der Konzentration auf Grund chemischer Prozesse.

Ursachen physikalischer Art sind:

- die Adsorption des Tracers an suspendierte Sedimente, oberflächenaktive Stoffe, am Meeresgrund und an Eis.

Ursachen biologischer Art sind:

- die Aufnahme des Tracers durch im Meer lebende Pflanzen und Tiere;
- die Einbeziehung des Tracers in den Stoffkreislauf.

Ursachen chemischer Art sind:

- der Zerfall des Farbstoffes durch Strahlung;
- die Entstehung chemischer Verbindungen zwischen dem Tracer und Komponenten des Meerwassers.

Diese Aufzählung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die Einordnung entsprechend der Ursache ist nicht immer eindeutig. Beispielsweise kann der Zerfall des Farbstoffes durch Strahlung unter physikalischem oder chemischem Aspekt behandelt werden.

Alle diese Prozesse, deren Wirken entsprechend den Korrekturgliedern berücksichtigt werden soll, sind mehr oder weniger stark am Zustandekommen des Gliedes  $Q_B$  beteiligt. Man kann sagen, daß eine vorliegende Konzentrationsverteilung das Ergebnis des komplexen Zusammenwirkens aller physikalischen, biologischen und chemischen Prozesse im Meer ist. Beim Versuch,  $Q_B$  quantitativ zu bestimmen, muß man sich deshalb wegen der Mannigfaltigkeit auf das Erfassen derjenigen Komponenten beschränken, die die wesentlichsten Effekte erzeugen.

Gemäß der aufgestellten Konzentrationsbilanzgleichung

$$Q = Q_T + Q_B$$

sind in  $Q_B$  alle auf den Farbstoff wirkenden Prozesse zusammengefaßt, die selbst keinen Einfluß auf die turbulente Diffusion und den Austausch ausüben.

Die Existenz des Gliedes  $Q_B$  konnte bei experimentellen Untersuchungen im Meer schon mehrmals nachgewiesen werden (J. JOSEPH, H. SENDNER und H. WEIDEMANN, 1964).  $Q_B$  kann als Differenz zwischen der anfänglich ins Meer gegebenen Farbstoffmenge  $M_0$  und der durch Integration über die räumliche Konzentrationsverteilung erhaltenen Farbstoffmenge  $M$  ausgedrückt werden:

$$\int_V Q_B dV = M_0 - M.$$

Dabei ist über den gesamten Farbfleck zu integrieren. Als Ursachen für den Verlust des Farbstoffes werden in der Literatur verschiedene Gründe angeführt. Oft werden die Differenzen auf Meßfehler zurückgeführt. Bei einem von J. JOSEPH, H. SENDNER und H. WEIDEMANN (1964) veröffentlichten Versuchsergebnis ist die Differenz jedoch so groß, daß sie schwerlich allein durch Meßfehler erklärt werden kann. Als zusätzliche Fehlerquellen kommen in Frage:

- Zerfall des Rhodamins durch Sonnenstrahlung,  
Angaben darüber finden sich bei D. L. FEUERSTEIN und R. E. SELLECK (1963), J. JOSEPH, H. SENDNER und H. WEIDEMANN (1964) sowie bei L. J. FISHER (1964);
- die Adsorption von Rhodamin an suspendierte Sedimente (D. L. FEUERSTEIN und R. E. SELLECK, 1963; J. W. TALBOT und J. W. HENRY, 1968) und

- die Wechselwirkungen zwischen Algen und Rhodamin, die von H. HÖFLER 1963 sowie D. L. FEUERSTEIN und R. E. SELLECK, 1963, untersucht wurden.

Andere mögliche Effekte, wie beispielsweise der Einfluß des pH-Wertes auf die Konzentration oder das Eingehen chemischer Verbindungen zwischen Rhodamin und Bestandteilen des Meerwassers, sind unter realen Bedingungen vernachlässigbar gering oder konnten nicht nachgewiesen werden.

Deshalb werden die weiteren Untersuchungen auf die Herausarbeitung des Einflusses der Sonnenstrahlung, der suspendierten Sedimente und des Phytoplanktons auf die Konzentration eines Rhodamin-S-Fleckes gerichtet.

### Untersuchungen über den Einfluß des Phytoplanktons

Die Pflanzen und Tiere des Meeres entziehen ihrer Umgebung die zum Leben notwendigen Stoffe. Zusätzlich nehmen sie Substanzen auf, die nicht zur Aufrechterhaltung ihrer Lebensfunktionen benötigt werden. Zu letzteren gehören auch organische Farbstoffe. Von verschiedenen Autoren wurde die Aufnahme organischer Farbstoffe sowohl durch Tiere (G. D. WAUGH, 1967), durch Tier- und Pflanzenzellen (A. S. TROSCHEIN, 1958) als auch durch Plankter (K. HÖFLER, 1963; D. L. FEUERSTEIN und R. E. SELLECK, 1963; D. W. PRITCHARD und J. H. CARPENTER, 1960) beobachtet, wobei die Konzentration der Rhodaminlösung meßbar absank.

Unseren Untersuchungen lagen folgende Überlegungen zugrunde: Die Artenarmut der Ostsee in Hinblick auf Plankter ist nur relativ. Es leben dort einige hundert verschiedene Planktonarten (A. REMANE und C. SCHLIEPER, 1958). In Abhängigkeit von den lokal und zeitlich schwankenden hydrographischen Faktoren treten die einzelnen Formen mit unterschiedlichen absoluten und relativen Häufigkeiten auf. Für die Lösung unseres Problems wären Untersuchungen an solchen Arten zweckmäßig, die absolut in großen Mengen auftreten und dazu die größten relativen Häufigkeiten in einem Seegebiet besitzen. Das wären in der Praxis für die Ostsee Blaualgen und Diatomeen. Entsprechende Untersuchungen können wegen der geforderten Genauigkeit nur unter Laborbedingungen durchgeführt werden. Voraussetzung zur Durchführung der Versuche ist die Kultivierbarkeit der Plankter. Gerade die häufig vorkommenden Algen lassen sich nicht oder nur schlecht kultivieren. Notgedrungen mußten deshalb von uns auch Plankter verwendet werden, die unter natürlichen Bedingungen geringfügig zur Produktion beisteuern. Die mit solchen Algen erzielten Ergebnisse lassen sich nicht verallgemeinern.

Bei den experimentellen Untersuchungen wurden folgende Größen und ihre Änderungen betrachtet:

- Farbstoffkonzentration,
- Seston bzw. Biomasse,
- Planktonformen und Häufigkeiten.

Färbbarkeit der Algen, toxische Wirkungen der Farbstoffe auf das Plankton und die Sorption des Farbstoffes in Hinblick auf die Zellpermeabilität wurden

nicht untersucht. Die Bearbeitung solcher Fragen ginge über den Rahmen der Arbeit hinaus und würde die Mitarbeit eines Biologen erfordern.

Bei den experimentellen Untersuchungen, die den Einfluß der Plankter auf die Konzentration einer Rhodamin-S-Lösung herausstellen sollten, wurden zwei unterschiedliche Methoden angewandt:

- a) Das Plankton wurde angereichert und in einer hohen Konzentration in eine Rhodaminlösung gegeben. Nach kurzer Zeit wurde die Rhodaminkonzentration überprüft und anschließend das Seston bestimmt.
- b) Das Plankton wurde in niedriger Konzentration in die Rhodaminlösung gegeben. Diese war mit Nährstoffen angereichert und bot den Algen gute Entwicklungsmöglichkeiten. Nach mehreren Tagen wurde die Konzentration nachgemessen und anschließend das Seston bestimmt.

Aus den Untersuchungen können folgende Schlußfolgerungen abgeleitet werden:

1. Bei kurzzeitiger Einwirkung von Algen konnte keine Konzentrationsänderung festgestellt werden, obwohl der Planktongehalt die in der Natur vorkommenden Werte um ein Mehrfaches überstieg.
2. Bei längerer Einwirkung der Plankter auf die Rhodaminlösung traten Konzentrationserniedrigungen auf. Diese Abweichungen können jedoch nicht als statistisch gesichert gelten.
3. Der scheinbare Widerspruch zu den Ergebnissen von D. L. FEUERSTEIN und R. E. SEELECK, die eindeutig eine Konzentrationsabnahme feststellen konnten, kann auf folgende Art geklärt werden: Die genannten Autoren verwendeten andere Plankter, nämlich Süßwasserplankter *Chlorella* und *Scenedesmus*. Zum anderen stellten sie eine Konzentrationsabnahme von 2,7% fest. Dieser Wert liegt innerhalb der Fehlergrenze des von uns verwendeten Meßverfahrens bzw. Meßgerätes.

Wegen der Vielzahl und der Schwierigkeiten bei der Kultivierung der Algen trugen diese Untersuchungen stichprobenartigen Charakter. Diese Ergebnisse sind nicht ohne weiteres zu verallgemeinern. Sie beziehen sich auf Versuche mit

Blualgen	<i>Microcystis</i>	<i>Chroococcus</i>
	<i>Nodularia</i>	<i>Lyngbya</i>
Diatomeen	<i>Meliosira</i>	<i>Chaetoceros</i>
Grünalgen	<i>Brachiomonas</i>	<i>Pediastrum</i>

Dabei konnte nur mit *Brachiomonas* in Monokultur gearbeitet werden. Die anderen Plankter lagen mit unterschiedlichen Häufigkeiten gemeinsam vor. Deshalb kann über die Wirkung der einzelnen Arten bzw. Gattungen auf eine Rhodaminlösung nichts ausgesagt werden (außer bei *Brachiomonas*).

Im Hinblick auf die Berücksichtigung des Rhodaminzerfalls durch die Wirkung von Algen unter natürlichen Bedingungen kann festgestellt werden, daß bei den realen Planktonkonzentrationen und Versuchszeiträumen keine Beein-

flussung der Rhodaminkonzentration auftreten kann. Das gilt in dieser Strenge nur für die hier untersuchten Plankter. Es ist möglich, daß sich spezielle Arten anders verhalten.

#### Der Einfluß suspendierter Sedimente auf die Konzentration einer Rhodamin-S-Lösung

Die im Wasser suspendierten Sedimente und Sinkstoffe stellen einen Umweltfaktor dar, der verändernd auf die Konzentration eines Rhodaminflecks im Meer wirken kann. Nach einer Abschätzung der Gesamtmenge der über die Festlandsabflüsse ins Meer gelangenden suspendierten Materialien kommt G. VIETE (1960) auf einen Wert von  $7,4 \cdot 10^9$  Tonnen pro Jahr, während G. DIETRICH (1957)  $5,8 \cdot 10^9$  Tonnen für wahrscheinlich hält. Beide Mengen sind größenordnungsmäßig gleich und weisen auf die Bedeutung der Sedimente in Hinblick auf unser Problem hin. Dabei nimmt A. HOLMES (nach G. DIETRICH, 1957) einen gleich großen Wert für die auf dem Luftwege ins Meer gelangenden Sedimente an.

Brandung, Gezeiten und vertikale Wasserbewegung liefern ebenfalls Beiträge zum Sedimentgehalt im Meerwasser.

Sedimente setzen sich in den meisten Fällen aus mehreren mineralischen Komponenten zusammen. Diese unterscheiden sich oft noch hinsichtlich ihrer Korngrößen. Die feinsten Bestandteile werden von den Tonen gebildet, deren wichtigste Vertreter Kaolinit, Halloyrit und Montmorillonit sind. Quarz, Feldspat und Glimmer liegen häufig als Verwitterungsreste vor. An biogenen Beimengungen können Kalk und verschiedene Humussubstanzen enthalten sein. Im Sediment bilden sich unter gewissen Bedingungen Pyrit und Dolomit. Schließlich können auch amorphe Substanzen vorkommen, wie beispielsweise Kieselsäure (K. JASMUND, 1955).

Alle Sedimente sind in der Lage, mehr oder weniger stark Fremdionen in der Lösung zu adsorbieren. Die Größe der Adsorption ist der Oberfläche des Minerals proportional. Außerdem ist sie vom Mineral selbst und dem Ionenangebot in der Lösung abhängig (R. E. GRIM, 1953 und G. KORTÜM, 1962).

Kristalle besitzen an den Kanten und auch im Gitter Stellen, an denen ungesättigte Valenzen vorkommen. Dort werden die Ionen gebunden. Tonminerale bilden häufig nicht abgesättigte Gitterschichten aus. Diese Ladungsfehlbeträge können durch Fremdionen abgesättigt werden. Im allgemeinen sitzen diese Zentren an den Kristallaußenflächen. Bei Ton und besonders bei Montmorillonit können auch Ionen im Kristallgitter gebunden werden, in der Zwischenschicht zweier Kristallpackungen. Die Zwischenschicht ist in der Lage, sich durch Einlagerung von Wasser oder anderen Ionen beträchtlich auszuweiten, so daß auch große organische Moleküle dazwischen passen (E. GRIM, 1953).

Diese Sonderstellung der Tone in Hinblick auf die Adsorption von Fremdionen wurde schon von G. DIETRICH (1957) und A. G. BETECHTIN (1964) betont.

Bei D. L. FEUERSTEIN und R. E. SELLECK, 1963, findet man Hinweise über die Adsorption von Rhodamin B an suspendierte Sedimente, während J. W. TALBOT und J. L. HENRY, 1968, erstmals den Zusammenhang zwischen der Größe der Adsorption und verschiedenen Kennziffern des Sediments in Form einer Gleichung darstellen. Bei unseren Versuchen wurden Sedimente aus dem Arkona-Becken und aus der Bornholm-Mulde verwendet. Auf Grund der ermittelten relativen Korngrößenverteilung erwies sich ersteres als ein Tonsediment und letzteres als ein Schlick.

Bei den experimentellen Untersuchungen wurden die Art des Sediments, seine Oberfläche, die Sedimentmenge pro Liter, die prozentuale Zusammensetzung der Teilchen verschiedener Korngrößen und die Konzentration der Rhodaminlösung variiert. Eine Änderung des Korngrößendurchschnitts wurde dadurch erreicht, daß das Sediment mit Hilfe des Verfahrens von ATTERBERG fraktioniert wurde.

Bei jeder individuellen Versuchsdurchführung wurde die Konzentrationserniedrigung der Rhodaminlösung gemessen. Daraus und aus der Anfangskonzentration ergab sich der von J. W. TALBOT und J. L. HENRY (1968) definierte Adsorptionskoeffizient  $a$ , der auch der weiteren Auswertung zugrunde gelegt wurde.

$$a = \frac{\Delta Q}{Q}$$

mit  $\Delta Q$  — Konzentrationserniedrigung infolge Adsorption,

$Q$  — mittlere Konzentration während des Versuches.

Die Versuche wurden so durchgeführt, daß die Lösung mit suspendiertem Sediment eine Stunde lang geschüttelt und anschließend zentrifugiert wurde. Zur Vermeidung unerwünschter Effekte wurde nur die Differenz zu einer den gleichen Bedingungen unterworfenen Vergleichslösung ohne Sediment als Adsorptionseffekt gewertet. Zur Konzentrationsbestimmung diente das elektrische Spektralphotometer Spekol vom VEB Carl Zeiss Jena.

Die Rhodaminkonzentration, die ohne Anwesenheit suspendierter Sedimente vorhanden wäre, kann aus der durch Adsorption erniedrigten Konzentration bei Benutzung der Beziehung

$$Q = \{Q_E^{-m} + k P\}^{-1/m} \quad (\text{TALBOT und HENRY})$$

erhalten werden.

Dabei bedeuten:

- $Q$  — Anfangskonzentration,
- $Q_E$  — Endkonzentration,
- $P$  — Sedimentgehalt in mg/l,
- $m, k$  — Konstanten.

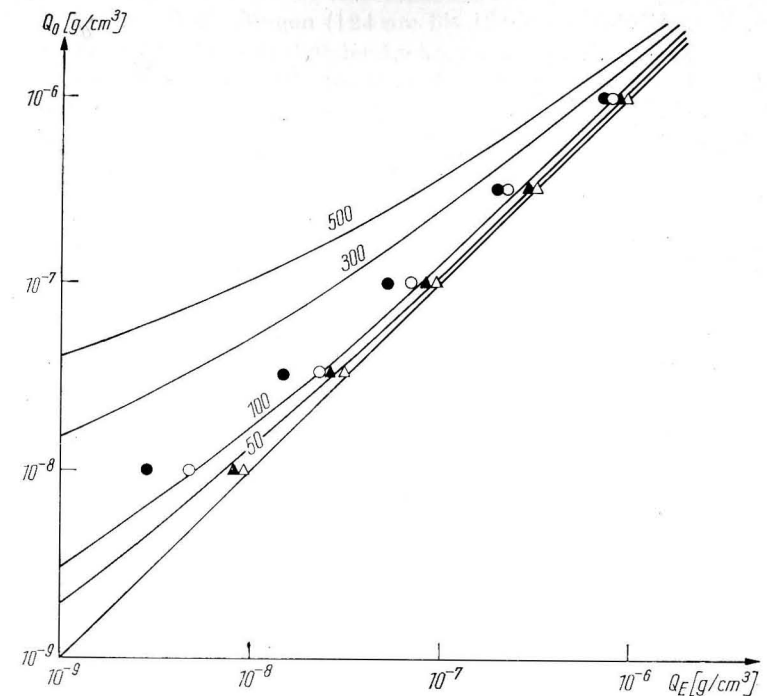


Abb. 1. Vergleich der Versuchsergebnisse mit den nach der Theorie zu erwartenden Werten mit Sediment aus der Bornholm-Mulde

( $\Delta$  50,  $\blacktriangle$  100,  $\circ$  300,  $\bullet$  500 mg/l)

Ebenso kann daraus bei bekannter Ausgangskonzentration  $Q_E$  berechnet werden, wenn  $m$  und  $k$  bekannt sind. Wir haben das mit dem Sediment aus dem Arkona-Becken und aus der Bornholm-Mulde versucht. Abb. 1 zeigt die Ergebnisse für das Sediment aus der Bornholm-Mulde. Man sieht, daß die Differenz zwischen berechneten und gemessenen Werten beträchtlich ist. Qualitativ ist die Übereinstimmung gut. Sie wird auch quantitativ besser, wenn  $m$  und  $k$  aus mindestens zwei Versuchen bei bekannten  $Q$ ,  $Q_E$  und  $P$  berechnet werden. Abb. 2 zeigt diese Übereinstimmung.

Weiter kann über die Versuche gesagt werden:

Bei gleicher Menge eines Sediments hängt die Größe der Adsorption sowohl von der effektiven Oberfläche als auch von der mineralischen Zusammensetzung ab. Beide Effekte lassen sich an Hand unserer Untersuchungen nicht voneinander trennen. Bei einer Vergrößerung der Sedimentoberfläche steigt der Adsorptionskoeffizient nicht im gleichen Verhältnis. Der Adsorptionskoeffizient ist nicht linear. Das ist laut Definition desselben zu erwarten und wird durch Experimente bestätigt.



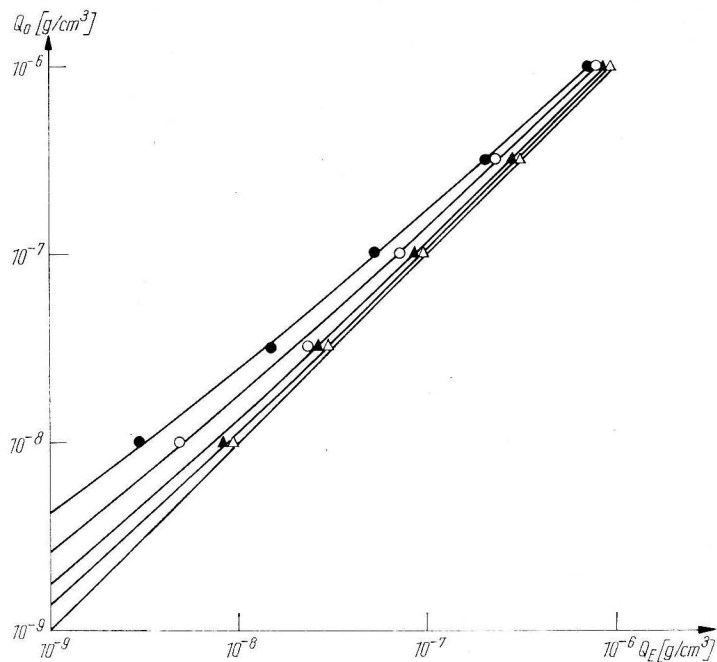


Abb. 2. Die Übereinstimmung der Meß- und Kurvenwerte für Kurven mit empirisch ermittelten  $m$  und  $k$  mit Sediment aus der Bornholm-Mulde ( $\Delta$  50,  $\blacktriangle$  100,  $\circ$  300,  $\bullet$  500 mg/l)

### Der Einfluß der Sonnenstrahlung auf die Konzentration einer Rhodamin-S-Lösung

Viele organische Farbstoffe und Verbindungen zerfallen unter Lichteinwirkung. Es gibt etliche Hinweise in der Literatur, daß auch Rhodamin unter solchen Umständen zerfällt.

J. JOSEPH, H. SENDNER und H. WEIDEMANN (1964) teilten mit, daß in einer Rhodaminlösung der Ausgangskonzentration  $8 \cdot 10^{-8} \text{ g/cm}^3$  diese nach 23tägiger Bestrahlung durch das natürliche Sonnenlicht auf  $1,5 \cdot 10^{-9} \text{ g/cm}^3$  gefallen war. D. L. FEUERSTEIN und R. E. SELLECK (1963) fanden eine Konzentrationsabnahme unabhängig von der Ausgangskonzentration. Sie äußerten die Vermutung, daß auch Oxydationsvorgänge am Zerfall des Rhodamins beteiligt seien.

Diese Angaben sind Hinweise auf die Wirksamkeit des Zerfalls durch Strahlung. Es fehlen jedoch Abschätzungen, die die Größenordnung des Effektes unter natürlichen Bedingungen erkennen lassen. Da Rhodamin unter Sonnenlicht zerfällt, muß die wirksame Komponente darin enthalten sein. Strahlung mit Energien der Magnitude  $10^0$  bis  $10^1$  eV liegt im energetischen Resonanz-

bereich chemischer Bedingungen (124 nm bis 1240 nm Wellenlänge). Moleküle können bei Aufnahme entsprechender Lichtquanten zerfallen. Die Wellenlänge dieser Lichtquanten wird durch die Energie bestimmt, die zur Trennung mindestens zweier Atome im Molekülverband notwendig ist.

Beim Aufbau einer chemischen Verbindung wird entweder Energie frei oder verbraucht. Zur Zerstörung einer Verbindung ist immer Energie nötig. Trennungsenergien und Bindungsenergien sind auch bei der gleichen Verbindung im allgemeinen nicht gleich groß (L. PAULING, 1964).

Eine grobe Abschätzung der Trennungsenergien kann man für ein bekanntes Molekül vornehmen, indem man im Molekül die Bindungsenergien zwischen den einzelnen Atomen untersucht. Unter der Annahme, daß sich Bindungs- und Trennungsenergien nur um geringe Beträge unterscheiden (einige Prozent), kann als ungefähre Wert für die Trennungsenergie diejenige Energie gesetzt werden, die als geringste Bindungsenergie zwischen zwei Atomen des Moleküls bekannt ist. Bei einem Rhodamin-S-Molekül ist die schwächste Bindung zwischen Stickstoff und Kohlenstoff als Einfachbindung vorhanden. Die Energie beträgt knapp 70 kcal/Mol. Daraus folgt unter obiger Annahme, daß Lichtquanten der Wellenlänge  $\lambda = 400 \text{ nm}$  zur Zerschlagung der Bindung notwendig sind.

Zur experimentellen Bestätigung dieser Annahme wurde ein Versuch mit dem Brenner XBO 200 F unternommen, von dem die relative spektrale Energieverteilung bekannt war. Die Xenonhöchstdrucklampe (Herstellerwerk VEB NARVA, Berlin) emittierte ein Spektrum mit Wellenlängen von 250 nm an aufwärts, das weitgehend dem des Tageslichtes entspricht.

Unter die Lampe wurden 5 mit Rhodaminlösung bekannter Konzentration gefüllte Bechergläser gestellt, die je mit einem Filter abgedeckt waren, das nur Licht eines bestimmten Spektralbereiches passieren ließ. Die Proben blieben insgesamt 240 Stunden unter der Lampe. Zwischendurch und am Ende der Versuchszeit wurde die Rhodaminkonzentration jeweils mit dem Spekol bestimmt. Wegen der Wasserverluste durch Verdunstung und der Entnahme von Flüssigkeit zum Zwecke der Konzentrationsbestimmung wurden die Gläser vor und nach jeder Messung gewogen. Um der Verdunstung entgegenzuwirken, wurde ab und zu destilliertes Wasser hinzugegeben.

Wenn

- $b$  — Masse der Probenflüssigkeit im Becherglas,
- $V$  — Masse des verdunsteten Wassers,
- $K^*$  — gemessene Konzentration nach der Bestrahlung,
- $K$  — wirkliche Konzentration bei Berücksichtigung der Verdunstung und
- $K_0$  — Anfangskonzentration der Lösung im Becherglas ist,

dann kann man schreiben

$$K = \frac{b - V}{b} K^*,$$

und es ist

$$K = K_0,$$

wenn kein Zerfall durch Strahlung eingetreten ist. Für die  $n$ -te Messung gilt dann

$$K_n = \frac{b_n - V_n}{b_n} \cdot \frac{b_{n-1} - V_{n-1}}{b_{n-1}} \cdot \frac{b_{n-2} - V_{n-2}}{b_{n-2}} \dots \frac{b_1 - V_1}{b_1} \frac{b - V}{b} \cdot K^*$$

Dabei entsprechen die Differenzen  $K_0 - K_n$  den jeweiligen Konzentrationsabnahmen.

Aus den Versuchsergebnissen ist gut zu sehen, daß der Einfluß des kurzwelligen Lichts wesentlich stärker war als der des langwelligen. Allerdings schien auch Strahlung mit Wellenlängen größer als 400 nm den Zerfall des Farbstoffes zu bewirken.

Das Ergebnis berechtigt zu dem Versuch, UV-Messungen zur Bestimmung der quantitativen Abhängigkeit des Rhodaminzerfalls von der eingestrahlten Energiemenge durchzuführen. Die Rhodaminproben wurden dem Sonnenlicht ausgesetzt. Die eingefallene UV-Energiemenge ließ sich einfach mit dem UV-Dosimeter bestimmen (K. H. GRASNICK und H. KAISER, 1966). Abb. 3 zeigt ein Schema der Versuchsanordnung.

Die Probengläser wurden mit Kalotten aus Uviolglas abgedeckt. Die dadurch bedingte Strahlungsschwächung war gering, ebenfalls die durch den Feuchtigkeitsniederschlag an der Innenwand der Kalotte. Damit die Reflexion an der Flüssigkeitsoberfläche nicht 5% überstieg, wurde nur bis zu einem Einfallswinkel der Sonnenstrahlen von  $53^\circ$  registriert.

Nach bestimmten Strahlungsdosen wurde die Konzentration überprüft. Das Ergebnis kann durch

$$\Delta Q = b E \bar{I}_z$$

beschrieben werden. Dabei ist die Konzentrationsabnahme  $\Delta Q$  in Prozent zu nehmen.  $E$  stellt die in die Lösung eingefallene UV-Energie in  $\text{cal/cm}^2$ ,  $\bar{I}_z$  die mittlere relative Strahlungsintensität in einer Schicht der Mächtigkeit  $z$  dar.

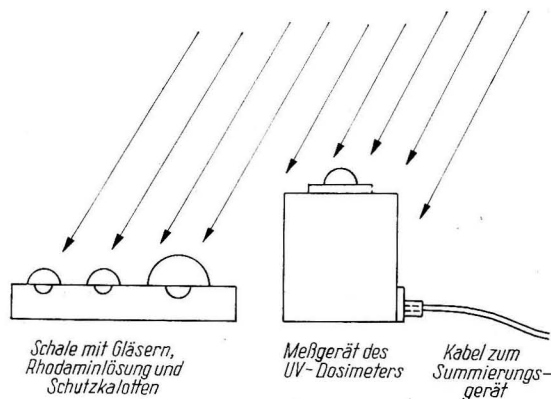


Abb. 3. Versuchsanordnung zur Bestimmung des Zerfalls von Rhodamin S

$b$  ist ein Koeffizient, der bei UV-Strahlungsenergien bis  $200 \text{ cal/cm}^2$  zwischen 0,4 und 0,5 liegt. Der lineare Zusammenhang zwischen der Konzentrationsabnahme und der UV-Energie gilt nur für geringe Konzentrationsänderungen.

*Die Berücksichtigung der gefundenen Ergebnisse bei der Bestimmung der Konzentrationsverteilung eines Rhodamin-S-Fleckes im Meer*

#### Die Berücksichtigung der Adsorption des Farbstoffes an suspendierte Sedimente

In den vorangegangenen Untersuchungen wurden Aussagen über das Wesen und die Größe der Adsorption an suspendierte Sedimente gemacht. Diese Aussagen sollen dazu dienen, den Einfluß der suspendierten Sedimente auf eine Rhodamin-S-Lösung unter natürlichen Bedingungen abzuschätzen. Falls der durch Adsorption bedingte Fehler eine gewisse Grenze übersteigt, müssen die Meßwerte oder Meßergebnisse korrigiert werden.

Es wird folgender Weg vorgeschlagen:

1. Bestimmung des Sedimentgehaltes des Wasserkörpers im Versuchsgebiet;
2. Gewinnung einiger Milligramm des Sediments;
3. Durchführung von Laborbestimmungen der Adsorption;
4. Berechnung der Koeffizienten  $m$  und  $k$  an Hand der Versuchsergebnisse;
5. Zeichnen der Adsorptionskurve für die ermittelten Koeffizienten für den Sedimentgehalt des Versuchsgebietes;
6. Füllen der Entscheidung, ob der Adsorptionseffekt im Versuchsgebiet berücksichtigt werden muß oder nicht.

Der oben angegebene Weg ist realisiert worden. Die Untersuchungen wurden mit einem Sediment aus der Weichselmündung in der genannten Reihenfolge durchgeführt.

Der Sedimentgehalt betrug in dem Gebiet 1 bis  $2 \text{ mg/l}$ . Ein 40-Liter-Kanister wurde mit Wasser des Versuchsgebietes gefüllt und 26 Tage lang im Labor stehen gelassen. In dieser Zeit sank das Sediment bis zu Korngrößen  $0,6 \mu$  zu Boden. Feinere Sedimente waren anscheinend nicht oder nur sehr wenig enthalten, denn das Wasser schien anschließend ungetrüb zu sein.

Mit diesem Sediment wurden Untersuchungen in Hinblick auf die Adsorptionsfähigkeit durchgeführt. Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle zusammengefaßt:

Sedimentgehalt $\text{mg/l}$	Anfangskonzentration $\text{g/cm}^3$	Endkonzentration $\text{g/cm}^3$
100	$10^{-7}$	$8,0 \cdot 10^{-8}$
200	$10^{-7}$	$6,5 \cdot 10^{-8}$
200	$2,0 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-8}$

Die Koeffizienten  $m$  und  $k$  wurden aus den Gleichungen

$$10^{-7} = \{(8,0 \cdot 10^{-8})^{-m} + 100 k\}^{-\frac{1}{m}},$$

$$10^{-7} = \{(6,5 \cdot 10^{-8})^{-m} + 200 k\}^{-\frac{1}{m}},$$

$$2,0 \cdot 10^{-8} = \{(1,2 \cdot 10^{-8})^{-m} + 200 k\}^{-\frac{1}{m}}$$

berechnet, die entsprechend der Formel von TALBOT und HENRY aufgestellt wurden. Als Mittelwerte ergaben sich bei geringer Streuung die Koeffizienten zu

$$m = -0,1,$$

$$k = 5 \cdot 10^{-5}.$$

Die Adsorptionskurven wurden mit diesen Koeffizienten und Sedimentgehalten von 1,5; 100 und 600 mg/l gezeichnet (Abb. 4).

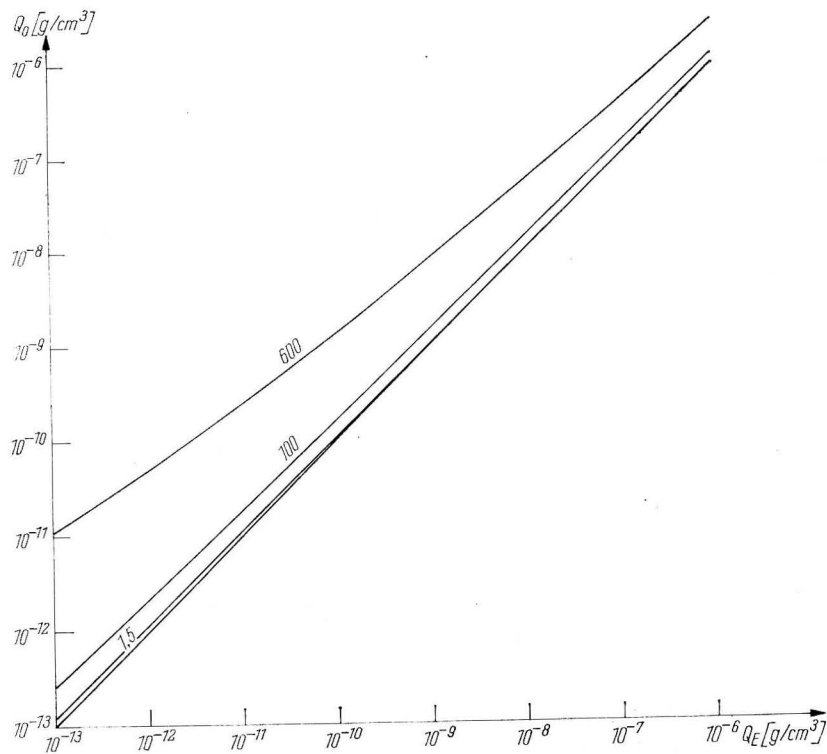


Abb. 4. Adsorptionskurven mit den errechneten Koeffizienten  $m$  und  $k$  für das Sediment aus dem Gebiet der Weichselmündung

Aus Abb. 4 geht hervor, daß die Konzentrationsänderung durch Adsorption bei einem Sedimentgehalt von 1,5 mg/l auch bei niedrigen Konzentrationen bzw. hoher Genauigkeit der Messungen nicht berücksichtigt zu werden braucht. Der dadurch entstehende relative Fehler wird bei einer Rhodamin-Konzentration von  $10^{-13}$  g/cm<sup>3</sup> nicht größer als 1,5% werden. Erst bei einem Sedimentgehalt von 100 mg/l und mehr müßte der Fehler berücksichtigt werden. Der Sedimentgehalt kann jederzeit ohne Schwierigkeiten bestimmt werden. Da sich mineralische und organische Bestandteile des Sediments nicht trennen lassen, führt das zu einer Bestimmung des Sestons.

An Hand der gezeichneten Adsorptionskurve wird entschieden, ob der durch das Sediment entstehende Fehler in der Konzentrationsverteilung eines Rhodamin-S-Fleckes im Meer berücksichtigt werden muß. Das ist der Fall, wenn der Fehler größer als zwei Prozent wird. Entweder müssen die einzelnen Meßwerte korrigiert werden oder die ursprünglich ins Meer gegebene Menge des Rhodamins. Letzterer Weg ist einfacher zu realisieren.

Die Sedimentkonzentrationen sind nur für wenige Seegebiete der Literatur zu entnehmen. Aus den Ablagerungen in der Tiefsee und auf dem Grunde anderer Gewässer wurden die Sedimentationsraten errechnet, die aber nur einen Anhaltspunkt für den Sedimentgehalt liefern können und ihm nicht entsprechen. Gerade in den Ozeanen ist der Sedimentgehalt so gering, daß er keinen Einfluß auf die Konzentration einer Rhodamin-S-Lösung ausüben könnte. In küstennahen Gebieten, Randmeeren, flachen Seegebieten, in der Nähe von Flußmündungen und auch in der Brandungszone variiert der Sedimentgehalt räumlich und zeitlich und erreicht oft Werte, die bei unserem Problem nicht unbeachtet gelassen werden können.

Die Angaben über den Sedimentgehalt von Ost- und Nordsee sind ebenfalls spärlich. Nach H. GÖHREN (1967) sind im Watt der Nordsee Schwebstoffkonzentrationen von durchschnittlich 200 mg/l vorhanden. Die Zusammensetzung des Materials wird in dieser Arbeit nicht angegeben.

Für das Gebiet der südöstlichen und zentralen Ostsee sind in der Veröffentlichung von O. S. PUSTELNIKOV (1969) Angaben über Sedimentkonzentrationen zu finden. In der oberen Schicht zwischen 0 und 1 m beobachtete er Sedimentgehalte von 1 bis 12,4 und zwischen 5 und 10 m von 1,5 bis 4,8 mg/l. Er gibt an, daß sich Abrasionsküsten und Meerengen in der Höhe des Sedimentgehaltes stark bemerkbar machen.

Nach Untersuchungen von W. TIMM (1968) über die Sedimentation und Sedimentverlagerung vor dem Darß und speziell vor der Ortslage Zingst ist dort mit beträchtlichen Sedimentkonzentrationen zu rechnen. Die Werte sind abhängig von der Wetterlage (Wind und Seegang), der Wassertiefe, der Entfernung von der Uferlinie und ändern sich mit dem Durchgang der Welle. Entscheidend für die relative Häufigkeit der einzelnen Korngrößen und die minerale Zusammensetzung der Sedimente sind der Untergrund der Brandungs- und Uferzone und die Strömung entlang der Küste, die eventuell Sedimente aus anderen Gebieten transportieren kann. Wegen der vorherrschenden Westwinde ist die Strömung

im Mittel ostwärts gerichtet. Sie verliert die groben Bestandteile beim Darßer Ort und verfrachtet nur Mittelsande, Feinsande und Schlicke weiter ostwärts. Das äußert sich in schlechten Sichtverhältnissen im Wasser auch bei ruhigem Wetter. Bei östlichen Winden ändert sich die Korngrößenzusammensetzung des Sediments nur geringfügig.

Vor den Küsten Rügen und Usedom kommen Schluffe als Sedimente am Meeresboden vor. Bei hohem Seegang werden sie teilweise abgetragen und transportiert. Östlich Rügen und nordwestlich Usedom werden kleinere Flächen des Seegrundes von Schlick eingenommen (G. NEUMANN und G. BUBLITZ, 1969). Aus mündlichen Mitteilungen von G. NEUMANN und D. LANGE (Institut für Meereskunde der DAW) ging hervor, daß bei Taucherarbeiten vor der Küste Usedom oftmals so trübes Wasser vorgefunden wurde, daß die Sichtweite unter einem Meter lag. Bei Beruhigung des Seeganges sedimentierten die suspendierten Stoffe innerhalb kurzer Zeit aus („schon nach einem Tag“), so daß dann auf den Algen eine dicke „Staubschicht“ zu finden war, die allerdings bei Berührung oder geringer Wasserbewegung wieder aufwirbelte.

Die Adsorptionsfähigkeit der Schluffe und Schlicke übertrifft diejenige der Sande um ein Vielfaches, da in ihnen tonige Mineralien enthalten sind. Deshalb wird bei diesen hohen Sedimentgehalten die Adsorption bei einem Farbversuch mit Rhodamin S die zulässige Fehlergrenze übersteigen.

Je nach der Höhe des Sedimentgehaltes des Wassers, der mineralischen Zusammensetzung desselben und der Rhodamin-S-Konzentration ist mit einem unterschiedlichen Fehler zu rechnen. Da Maximalwerte von 600 mg/l Sedimentgehalt in eng begrenzten Gebieten auftreten, kann die Adsorption entsprechend der Kurve der Abb. 4 erfolgen, wenn wir eine gleiche Adsorptionsfähigkeit der Sedimente voraussetzen. Unter dieser Annahme würde der Fehler bei einer Ausgangskonzentration von  $10^{-9}$  g/cm<sup>3</sup> schon mehr als 90% betragen. Ohne Berücksichtigung der Adsorption könnten deshalb keine brauchbaren Ergebnisse bei Untersuchungen mit Rhodamin S gewonnen werden. Daraus leitet sich die Notwendigkeit ab, vor Beginn eines Farbversuches Sedimentgehalt und Sedimenteigenschaften in der angegebenen Weise zu untersuchen. Nur so können grobe Fehler mit Sicherheit vermieden werden.

Die Berücksichtigung des Rhodaminzerfalls durch die Sonnenstrahlung

Die Konzentrationsänderung  $\Delta Q$  ist eine Funktion von UV-Strahlungsmenge, mittlerer Rhodaminkonzentration des Fleckes und der vertikalen Fleckausdehnung. Sind zwei dieser drei Parameter bei einem Versuch bekannt, kann mit Hilfe der Abb. 5 der Schwellenwert für die dritte Größe angegeben werden. Wird dieser Schwellenwert überschritten, bedeutet das, daß der Fehler 2 Prozent übersteigt und eine Korrektur angebracht werden muß. Es gibt zwei Möglichkeiten, die Differenz zwischen dem unverfälschten und momentanen Meßwert zu erfassen:

a) Korrektur eines jeden Meßwertes um  $\Delta Q$ ,

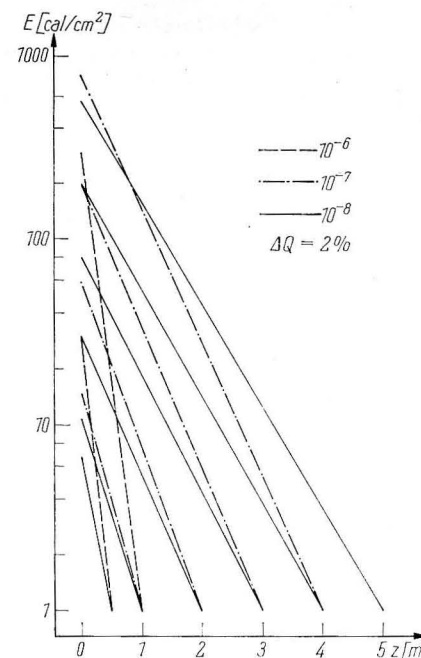


Abb. 5. Kritische Schichtdicke  $z$  in Abhängigkeit von der Konzentration des Farbfleckes und der eingestrahelten Energie des UV-Lichts ( $\Delta Q = 2\%$ )

b) Korrektur der anfänglich eingebrachten Farbstoffmenge um  $\Delta M$ , wobei  $\Delta M$  die Masse des zerstörten Rhodamins sein soll.

Der letzte Weg scheint einfacher zu sein, da nicht für jeden Meßwert eine Korrektur angebracht werden muß.

Sind nach Abschluß eines Versuches UV-Strahlungsenergiesumme, die horizontale und die vertikale Konzentrationsverteilung eines Farbfleckes bekannt, kann der Korrekturwert nach folgendem Schema berechnet werden:

1. Aus der vertikalen Konzentrationsverteilung ergibt sich die Schichtdicke  $z$  des Farbfleckes.
2. Aus der horizontalen Konzentrationsverteilung wird eine mittlere Konzentration  $\bar{Q}$  abgeleitet. Sie soll den zeitlichen Mittelwert der Konzentration über die mittlere Fleckfläche darstellen.
3. Die mittlere Fleckfläche  $\bar{F}$  ist diejenige Fläche, auf die die gemessene Energie gefallen ist.
4. Über  $\Delta Q = b \cdot E \cdot \bar{I}_z$  wird die prozentuale Konzentrationsabnahme berechnet. Der Koeffizient hat bei Energien bis 200 cal/cm<sup>2</sup> den Wert 0,5.  $\bar{I}_z$  ist Tab. 1 zu entnehmen. Ist  $\Delta Q$  größer als vorgegeben (hier 2%), muß die Korrektur angebracht werden.

Tabelle 1

Strahlungsintensitäten  $I$  und mittlere Strahlungsintensitäten  $\bar{I}$  für verschiedene Konzentrationen und Schichtdicken, bestimmt nach  $J = J_0 e^{-\alpha_Q z}$ , wobei die  $\alpha_Q$  gemessen wurden

Schichtdicke	Strahlungsintensität	Konzentration			
		$10^{-5}$	$10^{-6}$	(g/cm <sup>3</sup> ) $10^{-7}$	$10^{-8}$
0,5 m	$I$	0	0,02	0,27	0,37
0,5 m	$\bar{I}$	0	0,14	0,52	0,61
1,0 m	$I$	0	0	0,074	0,135
1,0 m	$\bar{I}$	0	0,014	0,27	0,37
2,0 m	$I$	0	0	0,006	0,018
2,0 m	$\bar{I}$	0	0	0,07	0,134
3,0 m	$I$	0	0	0	0,002
3,0 m	$\bar{I}$	0	0	0,02	0,05
4,0 m	$I$	0	0	0	0
4,0 m	$\bar{I}$	0	0	0,005	0,02
5,0 m	$I$	0	0	0	0
5,0 m	$\bar{I}$	0	0	0	0,007

- Aus dem mittleren Fleckvolumen  $V_F = \bar{F} \cdot z$  wird die Menge des in diesem Volumen befindlichen Farbstoffes nach  $M_z = V_F \bar{Q}$  berechnet.
- Aus  $M_z$  ergibt sich die Menge des zerstörten Rhodamins zu  $M = M_z \cdot \Delta Q/100$ .
- Als neue Ausgangsmenge zur Bestimmung der Rhodaminkonzentration entsprechend der Theorie ist der Wert

$$M' = M_0 - \Delta M$$

einzusetzen.

Dieses Verfahren arbeitet mit Mittelwerten, die nur ungenau bestimmt werden können. Grobe Fehler werden jedoch verhindert.

Die vertikale Begrenzung eines Farbflecks wird im allgemeinen im Meer durch die Sprungschicht bestimmt. Diese befindet sich in der Ostsee, von Ausnahmen abgesehen, unterhalb 10 m Tiefe.

Aus experimentellen Untersuchungen im August/September 1968 in der mittleren Ostsee ist bekannt, daß die Farbstoffkonzentration in 4 bis 5 m Tiefe die Hälfte derjenigen an der Oberfläche ausmachte. In 7 m Tiefe konnte ein Zehntel der Oberflächenkonzentration nachgewiesen werden. Daraus läßt sich der Schluß ziehen, daß in den oberen 5 m eine gute Vermischung wirksam ist.

Bei einer Rhodaminkonzentration von  $10^{-8}$  g/cm<sup>3</sup> in der 5 m starken oberen Schicht des Farbflecks muß eine Strahlungs-dosis von

$$E = \frac{\Delta Q}{b \cdot \bar{I}_z} = \frac{2}{0,5 \cdot 0,007} = 570 \text{ cal/cm}^2$$

in den Fleck eindringen, um den vorgegebenen Fehler von 2% zu ermöglichen ( $\Delta Q = 2\%$ ,  $b = 0,5$ ,  $\bar{I}_z = 0,007$ ).

Eine Abschätzung über die maximal mögliche UV-Strahlungsenergie pro Tag soll einen Anhaltspunkt darüber geben, wieviel Tage der Rhodaminfleck der Sonnenstrahlung ausgesetzt werden muß, damit  $\Delta Q$  in die Nähe von 2% kommt.

Nach Angaben von L. FORTZIK und H. HINZPETER (1958) beträgt der Anteil des UV-Lichtes an der Gesamtenergie der extraterrestrischen Strahlung  $0,14 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ . Beim Durchgang durch die Erdatmosphäre wird der UV-Anteil relativ stark geschwächt, so daß er kaum 7% der terrestrischen Strahlungsenergie ausmacht. Dieser Wert kann deshalb als obere Grenze für den Anteil des UV-Lichtes an der gesamten Strahlungsenergie betrachtet werden. Deshalb ist es möglich, von Globalstrahlungswerten auf maximal erreichbare UV-Energiewerte zu schließen.

Die Globalstrahlung hat im Sommer ihr Maximum. Für das Gebiet der südlichen Ostsee (Fehmarnbelt) fand M. STURM (1970) für die maximale Globalstrahlung abzüglich Albedo der Meeresoberfläche ein Dekadenmittel von  $495 \text{ cal cm}^{-2}$  und Tag (Mittelwert für die 17. Dekade (Juni) der Jahre 1947 bis 1961). Das würde einem maximalen UV-Anteil von  $33 \text{ cal cm}^{-2}$  und Tag entsprechen. Für Einzelwerte kommen Extreme bis zu  $700 \text{ cal cm}^{-2}$  und Tag in Betracht (F. BAUR, 1957), welche etwa  $50 \text{ cal cm}^{-2}$  und Tag an UV-Strahlungsenergie enthalten könnten.

Ergebnisse direkter Messungen der UV-Energie des Sonnenlichts waren auch beim Meteorologischen Dienst der DDR nicht zu erhalten. Als Ersatz wurden deshalb Globalstrahlungswerte aus Heiligendamm verwendet, die am Forschungsinstitut für Bioklimatologie mit dem Solarimeter gemessen wurden.

In der folgenden Zusammenstellung sind die Höchstwerte und Mittelwerte der Globalstrahlungssummen für die Monate April bis August des Jahres 1969 aufgeführt. In einer anderen Spalte stehen die Anteile der UV-Energie an der Globalstrahlung unter der Voraussetzung, daß 7% der Gesamtenergie durch UV-Licht geliefert werden.

Monat	Maximalwert cal/cm <sup>2</sup>	am	UV cal/cm <sup>2</sup>	Monatsmittel cal/cm <sup>2</sup>	UV cal/cm <sup>2</sup>
April	542	29.	38	335	23,4
Mai	696	24.	49	372	26,0
Juni	718	8.	50	514	36,0
Juli	656	14.	46	441	30,9
August	548	9.	38	364	25,5

Unter Zugrundelegung eines Maximalwertes von  $50 \text{ cal cm}^{-2}$  und Tag ergibt sich die Tatsache, daß der Rhodaminfleck länger als 11 Tage einer extremen Bestrahlung ausgesetzt werden muß, damit der durch UV-Licht bedingte Fehler der Rhodaminkonzentration 2% beträgt ( $z = 5 \text{ m}$ ). Das Rechnen mit dem langjährigen Dekadenmittel für die 17. Dekade des Jahres für den Fehmarnbelt führt schon zu einer 17tägigen Lebensdauer des Fleckes als Bedingung

für die Notwendigkeit einer Korrektur. Solche ausgedehnten Farbversuche sind in der Ostsee noch nicht durchgeführt worden. Der Fleckmaßstab hätte unter diesen Bedingungen am Ende des Versuches die gleiche Größenordnung wie die westliche Ostsee.

Dagegen muß der Fehler bei geringer Fleckmächtigkeit schon bei kleinen UV-Strahlungsenergien berücksichtigt werden. Das ist der Fall, wenn die vertikale Ausdehnung des Fleckes durch den Untergrund begrenzt wird, wie das in Bodden oder anderen flachen Gewässern möglich ist.

Für  $\Delta Q = 2\%$ ,  $b = 0,5$ ,  $Q = 10^{-8} \text{ g/cm}^3$  und  $E = 50 \text{ cal cm}^{-2}$  und Tag ist wegen

$$I_z = \frac{\Delta Q}{b \cdot E} = \frac{2}{0,5 \cdot 50} = 0,08$$

eine Korrektur bei einem eintägigen Versuch nur notwendig, wenn das Gewässer nicht tiefer als 2,5 m ist (vgl. Tab. 1).

### Schlußfolgerungen

Während die Anwesenheit von Phytoplankton in einem für den Farbversuch mit Rhodamin-S ausgewählten Seegebiet keinen meßbaren Einfluß auf die Konzentration des Rhodaminfleckes ausübt, müssen die Adsorption an suspendierte Sedimente und der Zerfall des Rhodamins durch die ultraviolette Sonnenstrahlung unter bestimmten Bedingungen berücksichtigt werden, um größere Fehler bei der Auswertung der Meßergebnisse zu vermeiden.

Die Entscheidung, ob die Adsorption oder der Zerfall des Farbstoffes berücksichtigt werden müssen, können erst nach eingehenden Untersuchungen gefällt werden. Schon vor Beginn der Untersuchungen mit Rhodamin S kann eine Reihe von Arbeiten durchgeführt werden, die sich speziell auf die Feststellung des Sedimentgehaltes, der Adsorptionsfähigkeit des Sediments und eventuell seine Zusammensetzung hinsichtlich der Korngrößenhäufigkeit und der mineralischen Bestandteile, die Erfassung der Meerestiefe bzw. der Tiefe der Sprungschicht und die Bestimmung der Sichttiefe in dem entsprechenden Seegebiet beziehen. Durch die Kenntnis von Sedimentgehalt und Adsorptionsfähigkeit kann der Fehler, der durch die suspendierten Sedimente hervorgerufen werden wird, vorhergesagt werden.

Der maximale mittlere Fehler für das Arbeiten mit dem Spekol liegt bei Rhodaminkonzentrationen bis  $10^{-8} \text{ g/cm}^3$  bei 7%. Vergleichsweise sei angeführt, daß beim Turner-Fluorometer erst bei einer Konzentration von  $10^{-11} \text{ g/cm}^3$  ein Fehler von 20% zu erwarten ist, der aber für die auch dem Spekol zugänglichen Meßbereiche zwischen 1 und 2% liegt (D. W. PRITCHARD und J. H. CARPENTER, 1960). Aus diesem Grunde erscheint es sinnvoll, einen zusätzlichen Fehler erst dann zu korrigieren, wenn er den Betrag von 4–5 Prozent erreicht. Unter der Annahme einer gleichen Beteiligung von suspendierten Sedimenten und UV-Strahlung lägen die einzelnen Fehlergrenzen bei 2%.

Daraus ergibt sich, daß die Adsorption des Rhodamin S an suspendierte Sedimente berücksichtigt werden muß, wenn mindestens eine 2prozentige Konzentrationsabnahme zu erwarten ist. Das ist ab  $5 \text{ mg/l}$  Sedimentgehalt möglich.

Aus den Angaben über die geplante Dauer des Versuches, die geographischen Koordinaten und das Datum kann die maximal mögliche UV-Strahlungssumme ermittelt werden, die eventuell von vornherein die Entscheidung zuläßt, ob der Zerfall durch Strahlung außer acht gelassen werden kann oder nicht.

Ist abzusehen, daß der Fehler über die vorgegebene Grenze hinausgehen wird, muß während des Farbversuches die UV-Strahlungsenergie gemessen werden. Als Meßgerät kann das UV-Dosimeter verwendet werden. Wegen der Reflexion der Strahlung an der Meeresoberfläche muß eine Beobachtung des Seeganges erfolgen. Die Kenntnis der vertikalen Konzentrationsverteilung des Farbfleckes ist Voraussetzung für eine Korrektur. Sie muß deshalb auch dann erbracht werden, wenn das Ziel der Untersuchung in der Bestimmung der horizontalen Austauschgrößen besteht.

Bei geringen Sichttiefen empfiehlt es sich, diese mit der Secchischeibe oder einer Fotozelle zu erkunden. Die relativen mittleren Strahlungsintensitäten der Tab. 1 wurden unter der Annahme berechnet, daß die Strahlenschwächung nur eine Folge der Rhodaminlösung sei. In trübem Wasser ist diese Annahme nicht mehr gerechtfertigt, und der Extinktionskoeffizient  $\alpha_Q$  ist durch  $\alpha$  zu ersetzen, wobei der Zusammenhang durch

$$\alpha = \alpha_Q + \alpha_W$$

gegeben ist.  $\alpha_W$  ist der Extinktionskoeffizient, der durch das Wasser des Untersuchungsgebietes hervorgerufen wird. Die mittleren Strahlungsintensitäten müssen mit diesem Koeffizienten für verschiedene Schichtdicken neu berechnet werden. Nach Beendigung des Farbversuches kann bei Verwendung der registrierten UV-Strahlungssumme endgültig über die Berücksichtigung der Sonnenstrahlung entschieden werden. Die zulässige Fehlergrenze liegt wieder bei 2%.

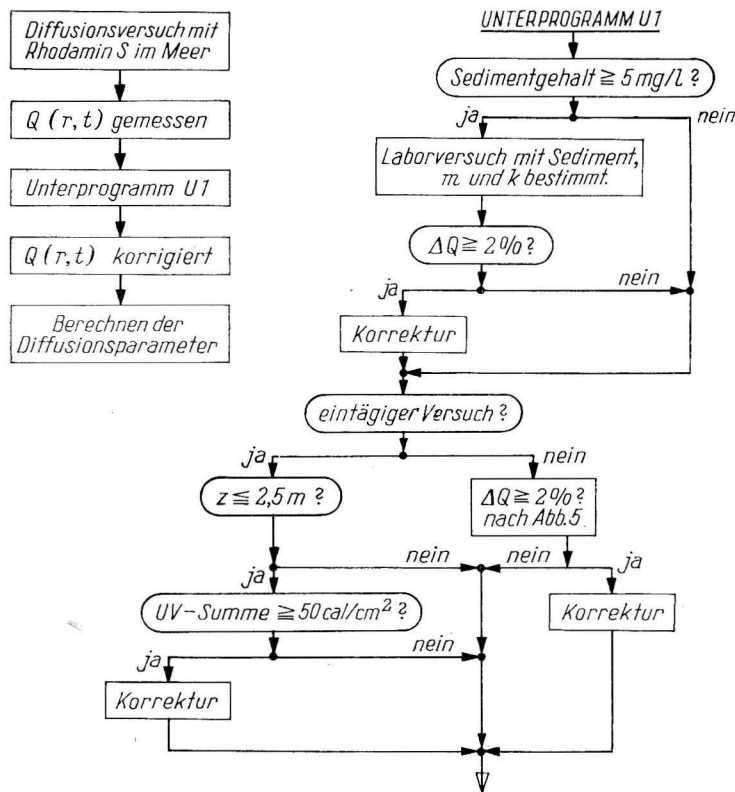
Ergibt sich die Notwendigkeit einer Korrektur durch suspendierte Sedimente oder durch die Sonnenstrahlung, kann auf die angegebenen Verfahren zurückgegriffen werden.

Dabei muß berücksichtigt werden, daß Sedimentgehalt und Strahlung gemeinsam wirken und sich gegenseitig beeinflussen. Ein hoher Sedimentgehalt wird beispielsweise die mittlere Strahlungsintensität im Wasser herabsetzen.

Eine übersichtliche Darstellung des Arbeitsablaufes bei der Durchführung und Auswertung eines Diffusionsversuches mit Rhodamin S im Meer unter besonderer Berücksichtigung einer Korrektur der durch Sonnenstrahlung und suspendierte Sedimente entstandenen Fehler in der Konzentrationsverteilung des Rhodaminfleckes wird durch das nachfolgende Flußdiagramm gegeben.

Das Wesen und die Wirkung der untersuchten Prozesse sowie die Möglichkeit der analytischen Darstellung sollen ebenfalls kurz zusammengestellt werden.

Parameter	Wesen des zur Konzentrationserniedrigung führenden Prozesses	analytische Darstellung der Konzentrationsabnahme $\Delta Q$
Phytoplankton	Sorption (bei unseren Untersuchungen nicht nachgewiesen)	
Sonnenstrahlung	Absorption der UV-Lichtquanten im Rhodaminmolekül und Zerfall desselben	$\Delta Q = b \cdot E \cdot \bar{I}_z$
suspendierte Sedimente	Adsorption des Farbstoffes an suspendierte Sedimente	$\Delta Q = Q_E - Q$ $Q = (Q_E^m + k P)^{-1/m}$



Flußdiagramm

zur übersichtlichen Darstellung des Arbeitsablaufes bei der Durchführung und Auswertung eines Diffusionsversuches mit Rhodamin S im Meer unter besonderer Berücksichtigung einer Korrektur der durch Sonnenstrahlung und suspendierte Sedimente entstandenen Fehler in der Konzentrationsverteilung des Rhodaminflecks

## Literaturverzeichnis

- ARNDT, A., Zwischen Düne und Meeresgrund. Kap. II: Die Ostsee als Lebensraum. S. 35–50, Urania-Verlag, Berlin, Leipzig 1969.
- BAUR, F., Linkes Meteorologisches Taschenbuch. Bd. III, Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig KG, Leipzig 1957.
- BETECHTIN, A. G., Lehrbuch der speziellen Mineralogie. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1964.
- BLOKKER, P. C., Diskussion über spezielle Probleme der Gewässerverölung. Helgoländer wiss. Meeresunters. **16** (1967), S. 351–352.
- BROSIN, H. J., Hydrographie und Wasserhaushalt der Boddenkette südlich des Darß und des Zingst. Veröff. geophys. Inst. Univ. Leipzig, Bd. XVIII, H. 3, (1965), S. 277–388.
- COOPER, L. H. N., Scientific consequences of the wreck of the „Torrey Canyon“. Helgoländer wiss. Meeresunters. **17** (1968), S. 340–355.
- DIETRICH, G., Allgemeine Meereskunde. Gebrüder Borntraeger, West-Berlin-Nikolassee 1957.
- DIETZ, R. S., LAFOND, E. C., Natural slicks on the ocean. J. Mar. Res. **LX**, No 2 (1950), S. 69–76.
- DOERFFEL, K., Beurteilung von Analysenverfahren und -ergebnissen. Z. anal. Chemie, **185** (1962), S. 1–98.
- DYAL, R. S., HENDRICKS, S. B., Total surface of clays in polar liquids as a characteristic index. Science, **69** (1950), S. 421–432.
- EBERT, H., Physikalisches Taschenbuch. Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1962.
- EWING, G., Slicks, surface films and internal waves. J. Mar. Res. **IX**, No 3 (1950), S. 161 bis 187.
- FEUERSTEIN, D. L., SELLECK, R. E., Fluorescent tracers for dispersion measurements. J. San. Eng. Div., SA 4 (1963), S. 1–21.
- FISHER, L. J., Field dye dispersion studies. First U.S. Navy Symposium on Military Oceanography, Washington 1964.
- FOITZIK, L., HINZPETER, H., Sonnenstrahlung und Lufttrübung. Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig KG, Leipzig 1958.
- FRIEDRICH, H., Meeresbiologie. Gebrüder Borntraeger, West-Berlin-Nikolassee 1965.
- GESSNER, F., Meer und Strand. Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1957.
- GATES, D. M., Spectral distribution of solar radiation at the Earth's surface. Science **151**, No 3710 (1966).
- GÖHREN, H., Beobachtungen über Schwebstoffkonzentrationen im Watt. Deutsche Gewässerkundl. Mitteilungen, **11**, H. 1 (1967), S. 12–15.
- GRASNICK, K. H., KAISER, H., Ein UV-Dosimeter für medizinische balneologische und bioklimatische Zwecke. Z. Meteorol. **19**, H. 1–2 (1966), S. 15–21.
- GRIM, R. E., Clay mineralogy. Mc Gr. Hill Comp. LDT, New York, London 1953.
- GUNKEL, W., Diskussion über spezielle Probleme der Gewässerverölung. Helgoländer wiss. Meeresunters. **16** (1967), S. 351–352.
- HAGEN, E., MARTENS, R., SCHMAGER, G., Voruntersuchungen zur Kenntnis der Strahlungsverhältnisse in der Kontaktzone Meer/Strand. Jahresarbeit, Geophysikalisches Institut der Karl-Marx-Univ. Leipzig, 1970 (unveröff.).
- HÖFLER, K., Zellstudien an *Biddulphia titiana* Grunow. Protoplasma **LVI**, Wien 1963.
- HÜBEL, H., Die Primärproduktion des Phytoplanktons der nördlichen Rügensch Bodden-gewässer unter Anwendung der <sup>14</sup>C-Methode. Dissertation an der Ernst-Moritz-Arndt-Univ. Greifswald 1965.
- JASMUND, K., Die silicatischen Tonminerale. Verlag Chemie Bergstr., Weinheim 1955.
- JERLOV, N. G., Optical oceanography. Elsevier Publishing Comp., London 1968.
- JOSEPH, J., SENDNER, H., Über die horizontale Diffusion im Meer. Dt. Hydrograph. Z., **11**, H. 2, (1958), S. 49–77.

- JOSEPH, J., SENDNER, H., WEIDEMANN, H., Untersuchungen über die horizontale Diffusion in der Nordsee. Dt. Hydrogr. Z., **17**, H. 2 (1964), S. 57–74.
- KLEBER, W., Einführung in die Kristallographie. Verlag Technik, Berlin 1959.
- KOLESHNIKOV, A. G., Zur Verwendung von Daten der O<sub>2</sub>-Verteilung zur Bestimmung der Intensität des Vertikalaustausches im Meer. Okeanologija **3**, No 2 (1963), S. 260–270 (russ.).
- KOLP, O., Die Sedimente der westlichen und südlichen Ostsee und ihre Darstellung. Beitr. Meereskunde **17–18** (1966), S. 9–60.
- KORTÜM, G., Einführung in die chemische Thermodynamik. Vandenhoeck & Ruprecht, Weinheim 1963.
- KORTÜM, G., Kalometrie, Photometrie und Spektrometrie. Springer, West-Berlin, Göttingen 1962.
- KÜHL, H., MANN, H., Die Toxizität verschiedener Ölbekämpfungsmittel für die See- und Süßwassertiere. Helgoländer wiss. Meeresunters. **16**, (1967), S. 321–327.
- LEITERER, U., Theoretische und experimentelle Bearbeitung des Problems der Erfüllung des Cosinusgesetzes bei der Messung der natürlichen UV-Strahlung mit Spektralapparaten. Diplomarbeit am Institut für Meteorologie und Geophysik der Humboldt-Univ., Berlin 1967.
- LAUSCHER, F., Sonnen- und Himmelsstrahlung im Meer. In: Handbuch der Geophysik, Bd. VIII, Kap. 12, Gebrüder Borntraeger, West-Berlin-Nikolassee 1955.
- LUDWIG, A., Geologie und Geographie der Ostsee. In: Zwischen Düne und Meeresgrund. Urania Verlag, Berlin, Leipzig 1969.
- MÜLLER, G., (Indirekte) Methoden zur Ermittlung von Austausch und Diffusion im Meer. Diplomarbeit an der Karl-Marx-Univ. Leipzig 1966.
- NEHRING, D., SCHULZ, S., ROHDE, K. H., Untersuchungen über die Produktivität der Ostsee I. Beitr. Meereskunde **23** (1969), S. 5–36.
- NEUMANN, G., PIEBSON, W. J., Principles of physical oceanography. Prentice Hall 1966.
- NEUMANN, H., Bemerkungen zur Trift der Ölschmutzstoffe in der Deutschen Bucht. Dt. Hydrogr. Z., **22**, H. 2 (1969), S. 57–65.
- NEUMANN, H., Die Trift von Verschmutzungen an der Oberfläche der Nordsee. Helgoländer wiss. Meeresunters. **17** (1968), S. 81–93.
- NEUMANN, G., BUBLITZ, G., Seegrunduntersuchungen im westlichen Teil der Oderbucht. Beitr. Meereskunde **24–25** (1969), S. 82–109.
- OKUBO, A., A review of theoretical models for turbulent diffusion in the sea. J. Ocea. Soc. Japan, **20** (1962), S. 286–320.
- OZMIDOV, R. V., Horizontale Turbulenz und turbulenter Austausch im Meer (russ.). Verlag „Nauka“, Moskau 1968.
- OZMIDOV, R. V., Über die Abhängigkeit der turbulenten Austauschkoefizienten im Meer vom Maßstab der Erscheinung. Izvestija Akademii Nauk SSSR, ser. Fizika atmosfery i okeana **IV**, No 11 (1968), S. 1224–1225 (russ.).
- OZMIDOV, R. V., Eine internationale Expedition zur Untersuchung der turbulenten Diffusion im Meer (russ.) Okeanologija, **IX**, H. 6 (1969), S. 1128–1130.
- PAULING, L., Die Natur der chemischen Bindung. Verlag Chemie, Weinheim 1964.
- PANKOW, H., Kleinalgen der Ostsee. In: Zwischen Düne und Meeresgrund. Urania-Verlag, Berlin, Leipzig 1969.
- POLIKARPOV, G. G., Radioecology of aquatic organisms. North Holland Publishing Comp., Amsterdam, New York 1966.
- PRATJE, O., Die Erforschung des Meeresbodens. Geologische Rundschau **39** (1951).
- PRITCHARD, D. W., CARPENTER, J. H., Measurements of turbulent diffusion in estuarine and inshore waters. Bull. Int. Assoc. Sci. Hydrol. **20** (1960), S. 37–50.
- PUSTELNIKOV, O. S., Die quantitative Verteilung suspendierter Materie im zentralen und südlichen Teil der Ostsee. Okeanologija, **IX**, H. 6 (1969), S. 1018–1030, (russ.).
- REMANE, A., SCHLIEPER, C., Die Biologie des Brackwassers. Binnengewässer **XXII** (1958), S. 1–216.

- REUTER, F., Ölbekämpfung und Bergung des Tankers „Anne Mildred Brøving“. Helgoländer wiss. Meeresunters. **16** (1967), S. 358–361.
- REUTER, G., Gelände- und Laborpraktikum der Bodenkunde. Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin 1962 und 1967.
- RICHARDSON, L. F., Atmospheric diffusion shown on a distance neighbour graph. Proc. Royal. Soc. London, Ser. A., **110**, 709 (1926).
- RICHARDSON, L. F., STOMMEL, H., Note on eddy diffusion in the sea. J. Meteorol. **5**, 238 (1948).
- ROLL, H. U., Physics of the Marine Atmosphere. Intern. Geophys. Series **7**, New York, London 1965.
- ROSENTHAL, H., GUNKEL, W., Wirkung von Rohöl- und Emulgatorgemischen auf marine Fischbrut und deren Nährtiere. Helgoländer wiss. Meeresunters. **16** (1967), S. 315–320.
- RUDOLPH, K. H., Sedimentpetrographische Untersuchungen von rezenten Sedimenten der westlichen Ostsee. Dissertation an der Universität Rostock 1965.
- SCHÖBERL, P., Diskussion über spezielle Probleme der Gewässerverölung. Helgoländer wiss. Meeresunters. **16** (1967), S. 351–352.
- SCHNESE, W., Untersuchungen über die Produktivität der Ostsee II. Beitr. Meereskunde **26** (1969), S. 11–20.
- SHAND, J. A., Internal waves in Georgia Strait. Trans., Am. Geoph. Union **34**, No 6 (1953), S. 849–856.
- SIEBENBURTH, J. MCN., CONOVER, J. T., Slicks associated with Trichodesmium Blooms in the Sargasso Sea. Nature **205**, No 4973 (1965), S. 830–831.
- STAAB, H. A., Einführung in die theoretische organische Chemie. Verlag Chemie, Weinheim 1962.
- STURM, M., Eine Untersuchung des Wärmehaushaltes der Ostsee im Bereich der südlichen Beltsee. Dissertation an der Karl-Marx-Univ. Leipzig 1970.
- TALBOT, J. W., HENRY, J. L., The adsorption of rhodamine-B on to materials carried in suspension by inshore waters. J. Cons. **32**, No 1 (1968), S. 7–16.
- TIMM, W., Erkundung periodischer und aperiodischer Veränderungen durch Wasser- und Sedimentbewegungen in der Brandungszone vor der Ortslage Zingst, Bd. I und II, unveröffentlicht, 1968.
- TROSCH, A. S., Das Problem der Zellpermeabilität, Fischer-Verlag, Jena 1958.
- VIETE, G., WAGENBRETH, O., HUNGER, R., REICHERT, H., Geologie Bd. 1, Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1960.
- WAUGH, G. D., KEY, D., Experiments with rhodamine-B on European Flat Oysters. J. Cons. **31**, No 2, (1967).
- WOLKENSTEIN, M. W., Struktur und physikalische Eigenschaften der Moleküle. Leipzig 1960.
- WOODCOCK, A. H., Subsurface pelagic Sargassum. J. Mar. Res., **IX**, No 2 (1950), S. 77–92. Gerätebeschreibung des Spekol vom VEB Carl Zeiss, Jena.

Anschrift des Verfassers:

Dr. ULRICH KREMSER  
 Institut für Meereskunde der DAW  
 DDR – 253 Warnemünde  
 Seestr. 15



## Temperaturfeld und horizontaler turbulenter Wärmeaustausch in der ufernahen Zone des Meeres<sup>1)</sup>

P. HUPFER und H. U. LASS

Seit mehreren Jahren werden am Maritimen Observatorium Zingst der Karl-Marx-Universität Leipzig Untersuchungen zum Studium des Temperaturregimes in der ufernahen Zone der Ostsee bis zu mehreren hundert Metern Uferentfernung durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, daß besonders in der warmen Jahreszeit dort beträchtliche ufernormale Temperaturgradienten existieren. Die wechselnden Einstrahlungs- und Windverhältnisse bestimmen in erster Linie die starke zeitliche Veränderlichkeit des ufernahen Temperaturfeldes. Das Frequenzverhalten der die Vermischungsprozesse charakterisierenden Temperaturfluktuationen zeigt sich in entsprechenden Spektren, die aus Daten des Jahres 1969 berechnet wurden und in Beispielen gezeigt werden.

In Abhängigkeit von den hydro-meteorologischen Verhältnissen kann es jedoch in allen Jahreszeiten zu Störungen im normalen Temperaturverhalten durch Auftrieb von Tiefenwasser und Oberflächenströmungen kommen.

Die Berechnung des mittleren Wärmehaushalts der ufernahen Zone des Meeres zeigt die überragende Bedeutung des horizontalen turbulenten wie auch advektiven Wärmeaustausches für die Herausbildung des Temperaturregimes. Man kann daher die Wassertemperatur in Ufernähe prinzipiell als Tracer auffassen und unter Voraussetzung der Gleichheit des Austauschkoeffizienten für Wärme und Beimengungen versuchen, Rückschlüsse auf die Ausbreitung von Fremdstoffen zu ziehen.

Zu diesem Zweck wurde die in der Meteorologie schon angewendete sogenannte Integralmethode zur Berechnung horizontaler Austauschkoeffizienten auf die Verhältnisse in der ufernahen Zone angewendet. Nach der Diskussion der notwendigen Voraussetzungen und der Methoden zur Gewinnung der Eingangsdaten wird dargelegt, unter welchen Bedingungen diese Methode brauchbare Ergebnisse liefern kann. Beispiele zeigen, daß sich die errechneten Koeffizienten größenordnungsmäßig in guter Übereinstimmung mit denen befinden, die mit Hilfe anderer Methoden gewonnen wurden. Zum Abschluß werden die

<sup>1)</sup> Anmerkung bei der Korrektur: Der vollständige Text erschien unter dem Titel „Zur Bestimmung horizontaler Austauschkoeffizienten in der ufernahen Zone des Meeres“ in der Wissenschaftlichen Zeitschrift der Karl-Marx-Universität Leipzig, Math.-Naturwiss. Reihe 20 (1971) Heft 4/5, S. 671–678.

Probleme genannt, die gelöst werden müssen, um die Methode so zu gestalten, daß sie an hydro-meteorologischen Küstenstationen routinemäßig angewendet werden kann.

Anschrift der Verfasser:

Doz. Dr. habil. P. HUPFER und Dr. H. U. LASS  
Sektion Physik der Karl-Marx-Universität Leipzig, Arbeitsgruppe Ozeanologie  
DDR-701 Leipzig, Talstr. 32

## Versuch zur Bestimmung der Struktur der turbulenten Bewegung des Meeres in der ufernahen Zone

R. ZEIDLER

### 1. Ziel der Arbeit

Die Bewegung des Wassers in der ufernahen Zone des Meeres wird durch große Kompliziertheit im Vergleich zum unbegrenzten Wassermedium charakterisiert. Wegen der allmählichen Tiefenänderung des Wassers zum Ufer hin und der horizontalen Begrenzung des Mediums ändert sich die Struktur der horizontalen und vertikalen Wirbel. Nicht nur die zum Ufer führende Strömung wird durch die sich ändernde Geschwindigkeit in den Richtungen senkrecht zum Ufer beschrieben, und die Existenz eines Geschwindigkeitsgradienten mit dieser Normalen hat für die Diffusion passiver Substanzen große Bedeutung. Das Geschwindigkeitsfeld von EULER, und noch mehr das von LAGRANGE, wurde in der ufernahen Zone sehr wenig untersucht. Da in diese Zone Abwässer einfließen, wurde dort die Ingenieurtätigkeit entwickelt. In Verbindung mit diesem Ziel, dem diese Arbeit dienen soll, sind empirische Untersuchungen der Turbulenzcharakteristiken der ufernahen Diffusion gemacht worden. Diese Untersuchungen wurden auf der Grundlage aktueller theoretischer Resultate ausgeführt, die besonders in der Physik der Atmosphäre erreicht wurden [4].

### 2. Theoretische Einleitung

Die wichtigste, obwohl nicht natürlichste, Aufgabe der Theorie der turbulenten Diffusion ist die Bestimmung der mittleren Konzentration passiver Substanzen  $\overline{v(\mathbf{X}, t)}$  in einem beliebigen Punkt des Raumes  $x(\mathbf{X}, t)$  und zu einem beliebigen Zeitpunkt  $t$  (der Strich über der Größe bedeutet den Mittelwert, die dicke Schrift weist auf eine Vektorgröße hin). Bei homogenen äußeren Bedingungen (die Summe der Substanzströme, die wegen der Advektion, der Absorption usw. fließen, sollen über die Grenzen des Bewegungsraumes verschwinden und nicht von der Zeit abhängen) führt diese Aufgabe zur Bestimmung des Operators  $A$  in der Gleichung:

$$v(\mathbf{X}, t) = A[u_0(\mathbf{X}), t] v_0(\mathbf{X}) \quad (1)$$

und besonders seines Mittelwertes

$$\overline{v(\mathbf{X}, t)} = \overline{A}(t) v_0(\mathbf{X}) = \int p(\mathbf{X}; x, t) v_0(\mathbf{X}) dx \quad (2)$$

Man findet den Operator  $A$  nur in den Fällen der stationären und homogenen Turbulenz leicht. In den anderen Fällen muß man zur halbempirischen Theorie der turbulenten Diffusion übergehen. Die fundamentale Gleichung erhält man aus der Abhängigkeit für die molekulare Diffusion

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial u_\alpha v}{\partial X_\alpha} = \chi \Delta v \quad (3)$$

nach der Vernachlässigung der molekularen Streuung (auf der rechten Seite (3)), der Annahme der Summe mittlerer und pulsierender Größen an Stelle der momentanen Werte, der Mittelung der Gleichung und der Annahme der Proportionalität des turbulenten Stromes passiver Substanzen zum Gradienten ihrer mittleren Konzentration

$$\overline{u' v'} = K^{ij} \frac{\partial \bar{v}}{\partial X_j}, \quad (4)$$

wobei der Strich die Pulsation bedeuten soll.

Sie nimmt die Form an

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{v}}{\partial X_i} = \frac{\partial}{\partial X_i} K^{ij} \frac{\partial \bar{v}}{\partial X_j}. \quad (5)$$

Aus der Form (5) folgt unmittelbar, daß für die Bestimmung der Konzentrationsverteilung  $\bar{v}(\mathbf{X}_i, t)$  die Kenntnis von Geschwindigkeitsfeld  $u(X_i, t)$  und Koeffizienten  $K^{ij}(\mathbf{X}_i)$  notwendig sind. Die physikalische Interpretation dieser „Koeffizienten“ (mit unbeständigen und sich im Raum ändernden Werten) hat im Rahmen der LAGRANGESCHEN Methode die größte Anschaulichkeit. In diesem Schema wurden die statistischen Charakteristiken des Zufallsvektors  $\mathbf{X}(x, t)$  untersucht, der die Situation eines Flüssigkeitselementes, zur Zeit  $t$  beschreibt, welches sich zur Anfangszeit  $t_0$  im Punkte  $x$  befindet. Das universellste Charakteristikum ist ohne Zweifel die Wahrscheinlichkeitsdichte  $p(\mathbf{X}; x, t)$ , die sich im allgemeinen Fall schwer bestimmen läßt. Deshalb wird öfters in den Grenzen der Korrelationstheorie gearbeitet, die statistische Momente bis zum zweiten Grade einschließt. Entsprechende Informationen gibt im Rahmen dieser Theorie der Dispersionstensor

$$D_{ij} = \overline{Y_i(t) Y_j'(t)},$$

wo

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{X}(t_0 + \tau) - x$$

ist. Die halbe Änderungsgeschwindigkeit dieses Tensors im Felde stationärer und homogener Turbulenz entspricht gerade dem oben erwähnten Diffusionskoeffizienten

$$K_{ij} = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} D_{ij}(t).$$

Die Form des Dispersionstensors (6) wurde für den Fall der homogenen Turbulenz schon längst von TAYLOR analytisch genau bestimmt. In anderen Fällen,

wie zum Beispiel für die Strömung mit stetigem Geschwindigkeitsgradienten, für die Bewegung in einer Grenzschicht oder in freien Strömungen, kann man die Formel für diesen Tensor erhalten, indem man auf die Dimensionstheorie verweist und eine Automodellierung annimmt usw.

### 3. Wahl des analytischen Bewegungsmodells im Meer in der ufernahen Zone

#### 3.1. Die uferparallele Strömung

Im Falle der uferparallelen geradlinigen Strömung kann die Homogenität in Richtung des Ufers angenommen werden ( $X$ ) und ebenso die Abhängigkeit der Turbulenzcharakteristiken nur von der Entfernung vom Ufer ( $Y$ ) (Abb. 1). Gl. (5) erhält dann die Form

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u}(y) \frac{\partial \bar{v}}{\partial X} = K_{xx}(Y) \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial X^2} + \frac{\partial}{\partial Y} K_{YX}(Y) \frac{\partial \bar{v}}{\partial Y} + K_{zz}(Y) \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial z^2} \quad (6)$$

mit der Randbedingung für  $Y = 0$

$$K_{YX} \frac{\partial \bar{v}}{\partial Y} = \beta v, \quad (7)$$

wo  $\beta = 0$  bei Reflexion der Substanz vom Ufer und  $\beta = \infty$  bei Absorption ist.

Die Vorstellung der Stetigkeit von  $\bar{u}(Y)$  und  $K_{ij}(Y)$  bringt Resultate, die sich qualitativ deutlich von der natürlichen Situation unterscheiden. Deshalb muß man irgendwelche begründete Annahmen über ihre Veränderung machen. Bis jetzt war es nicht möglich, eine allgemeine Lösung der Gleichung (6) zu erhalten. In Verbindung damit untersuchten wir die Methode von ARIS [1], die auf der Beschränkung auf einige statistische Momente der Form beruht

$$\Theta_{nm}(Y, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} v(X, Y, Z, t) X^n Z^m dx dz. \quad (8)$$

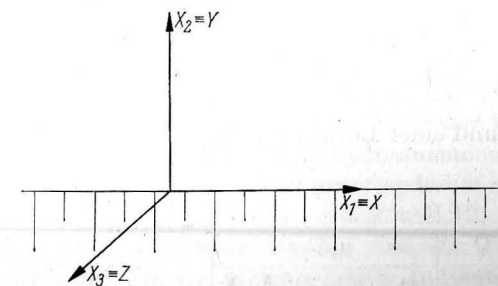


Abb. 1. Koordinatensystem im Modell der uferparallelen Strömung

Aus Gl. (6) folgt dann das unbegrenzte System der Gleichungen

$$\frac{\partial \Theta_{00}}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial Y} \left( K_{Y^2} \frac{\partial \Theta_{00}}{\partial Y} \right) = 0, \quad (9.1)$$

$$\frac{\partial \Theta_{10}}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{Y^2} \frac{\partial \Theta_{10}}{\partial y} \right) = \bar{u}(Y) \Theta_{00}, \quad (9.2)$$

$$\frac{\partial \Theta_{20}}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{Y^2} \frac{\partial \Theta_{20}}{\partial y} \right) = 2 K_{xx}(Y) \Theta_{00} + 2 \bar{u}(Y) \Theta_{10} \quad (9.3)$$

und so weiter.

Mit dem logarithmischen Profil der Geschwindigkeit, das man in Ufernähe annehmen kann, sind große analytische Schwierigkeiten verbunden, während die Annahme exponentieller Abhängigkeit

$$\bar{u}(Y) = u_1 Y^m; \quad K_{xx}(Y) = K_1 Y^k; \quad K_{Y^2}(Y) = K Y^n; \quad K_{zz}(Y) = K_2 Y^l \quad (10)$$

Resultate in der Form folgender Variation des Konzentrationsfeldes nach der augenblicklichen Substanzeingabe gibt.

$$\sigma^2 v_x = \frac{\Theta_{20}}{\Theta_{00}} = b_1 u_1^2 \tau^2 (K \tau)^{\frac{2m}{2-n}} + b_2 K_1 \tau (K \tau)^{\frac{1}{2-n}}, \quad (10.1)$$

$$\sigma^2 v_z = \frac{\Theta_{02}}{\Theta_{00}} = b_3 K_2 \tau (K \tau)^{\frac{1}{2-n}}. \quad (10.2)$$

Die Diffusionsgleichung für die stationäre und besonders lineare Quelle der Substanz kann leicht gelöst werden. Für die lineare Quelle auf der Geraden  $X = \text{const}$ ,  $Y = \text{const}$  erhält man die Gleichung

$$\bar{u}(Y) \frac{\partial v}{\partial X} = \frac{\partial}{\partial Y} \left[ K^{Y^2}(y) \frac{\partial v}{\partial Y} \right]. \quad (11)$$

Im Falle potentieller Abhängigkeit der Geschwindigkeit entsprechen auch die Diffusionskoeffizienten  $K_{Y^2}$  normal zum Ufer

$$\bar{u}(Y) = u_1 Y^m; \quad K^{Y^2}(Y) = K Y^n$$

der Gleichung (11) und einer Lösung folgender Form

$$\bar{v}(X, Y) = \frac{(m-n+2) Q}{u_1 \Gamma \left( \frac{m+1}{m-n+2} \right)} \left[ \frac{u_1}{(m-n+2)^2 K_1 X} \right]^{\frac{m+1}{m-n+2}} \exp \left[ - \frac{u_1 Y^{m-n+2}}{(m-n+2)^2 K_1 Y} \right]. \quad (12)$$

### 3.2. Auf das Ufer laufende Strömung

Bis jetzt gibt es nicht ein bedeutendes theoretisches Modell der Strömung passiver Substanzen in Richtung zur Normalen des Meeresufers. Ein solches Modell muß die Veränderlichkeit der Meerertiefe, der Diffusionskoeffizienten und der Strömungsgeschwindigkeit, die Zweischichtigkeit, aber auch die Absorptions-Reflexionswirkung der Bewegungsgrenze, d. h. des Ufers, berücksichtigen. Auf der anderen Seite ist die Menge der empirischen Daten für den Fall einer zweidimensionalen Strömung, die normal zum Ufer gerichtet ist, sehr gering, was die Aufstellung irgendeines beliebigen Schemas oder eines hydrologischen Modells nicht erlaubt. Bekannte Näherungen von Schemata der auf das Ufer gerichteten Strömung können auf dem Wege der Übernahme aus der Strahltheorie der Flüssigkeiten in begrenzten Gewässern erhalten werden. Den Strahlströmen im unbegrenzten Raum ist eine umfangreiche Fachliteratur gewidmet, während sich mit begrenzten Strahlströmen eine bedeutend kleinere Gruppe von Wissenschaftlern (vor allem wegen der Existenz einer freien Oberfläche der Flüssigkeit) beschäftigte. Folglich kann das Strahlschema von FRANKEL und CUMMING [3] vorläufig übernommen werden, wobei für die theoretisch oder empirisch (für ein genügend weit vom Ufer entferntes Gebiet) erhaltene Veränderlichkeit der Konzentration passiver Substanzen normal zum Ufer eine etwa 25%ige Konzentrationserhöhung am Ufer im Vergleich zum unbegrenzten Raum berücksichtigt werden muß. Die genaue Bestimmung dieser Erhöhung ist eine der wichtigsten Aufgaben, die in Verbindung mit der Notwendigkeit des Projektes einer Einleitung (vom Standpunkt des Gesundheitswesens) ungefährlicher Abwässer in tiefere Schichten des Meeres gelöst werden muß.

## 4. Empirische Untersuchungen

### 4.1. Methodik und Untersuchungsbedingungen

Für die Untersuchung der Struktur der turbulenten Bewegung des Meeres in der ufernahen Zone, vor allem in Verbindung mit den konkreten Plänen der Einleitung von Abwässern in einigen Gebieten, wurden in Polen Untersuchungen durchgeführt, die im Jahre 1965 begannen. Diese richteten sich in der Hauptsache auf die natürlichen Veränderungen nach einem Zyklus hydrographischer Modellversuche. Indem wir auf die obige Zusammenstellung theoretischer Überlegungen verweisen, könnten als Hauptziele das Studium des Geschwindigkeitsfeldes und die Bestimmung der Form der Diffusionskoeffizienten genannt werden (aus der Abhängigkeit hydroanemometrischer Parameter und der räumlichen Veränderlichkeit), was unter anderem zur Abschätzung des Exponenten in den Lösungen führt (10. 1.—10. 2. und 12).

Bei den Untersuchungen im Meer wurden diskrete Tracer in Form von Schwimmern (Abb. 2a und 2b) und kontinuierliche Indikatoren (wie Rhodamin B) benutzt. Der Auftrieb der Schwimmer wurde so gewählt, daß der Einfluß

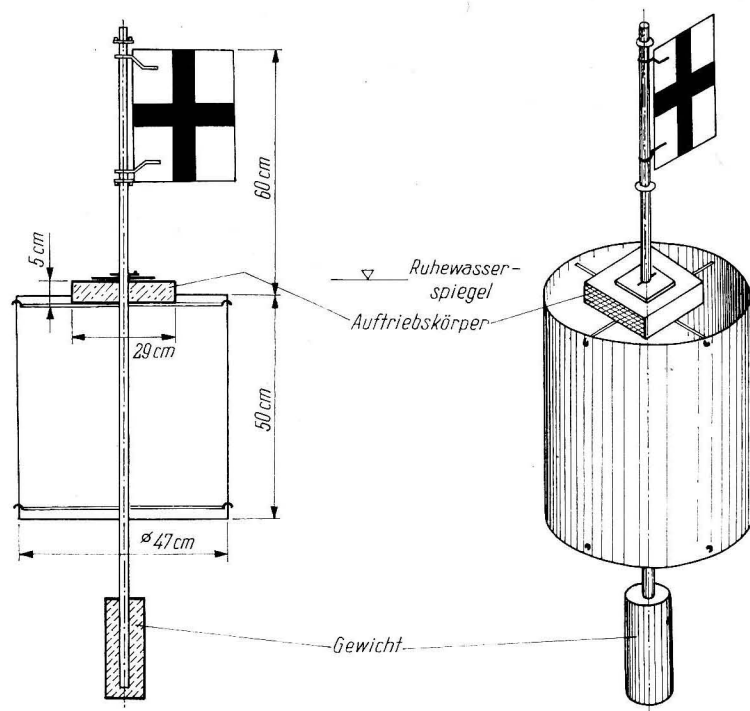


Abb. 2a

des Windes auf die Bewegung des Schwimmers im Vergleich zur dynamischen Wirkung des Wassers vernachlässigbar wurde. Zur Durchführung von Diffusionsversuchen dienten auch biologische und chemische Eigenschaften (biochemischer Sauerstoffverbrauch, Sauerstoffgehalt, verschiedene Salze und die Menge der Kolibakterien) nahe des Ufers, an dem die Einleitung stattfand. Künstliche Tracer wurden sowohl einmalig als auch kontinuierlich ins Meer gegeben. Die Orte der Schwimmer, die sich durch Flaggen auszeichneten, und die Feldpunkte der Rhodaminkonzentration wurden durch geodätische Berechnungen vom Ufer aus bestimmt. Bei vorhergehenden Messungen wurden die Wasserproben (mit verschiedenen Indikatoren) in Flaschen abgefüllt und im Laboratorium am Ufer bearbeitet. Auf Grund der Mühe, der Schwierigkeiten und auch wegen der geringeren Genauigkeit der Methode wurde diese verworfen und danach eine Apparatur für in-situ-Messungen der Konzentration fluoreszierender Farbstoffe gebaut. Zum Bestand des Apparates gehören ein Pumpensystem für den Transport des Wassers mit dem Tracer zum Untersuchungskutter hin, ein AMINCO-Fluorometer mit einem polnischen Stutzen zur kontinuierlichen Registrierung und einem Registriergerät [2]. Außer der Eigenschaft des Tracers wurden gleichzeitig die Parameter Wind, Strömung und Wellengang

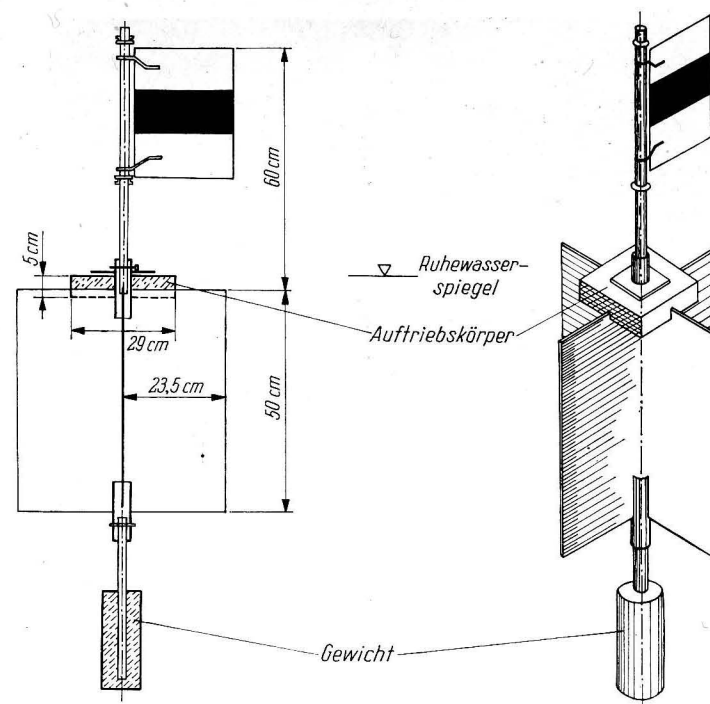


Abb. 2 a—b. Die bei der Untersuchung der Diffusion in Ufernähe benutzten Schwimmer

gemessen, um die turbulente Streuung mit advektiven Faktoren verbinden zu können.

In einem 12 · 20 m großen Becken wurden hydraulische Modellversuche im Maßstab  $1 : \frac{30}{120}$  durchgeführt (Abb. 3). Bei den Untersuchungen wurden zwei Tracer benutzt: Rhodamin B und teilweise mit Wasser gefüllte Kügelchen von 3,5 cm Durchmesser. Die Rhodaminkonzentration wurde mit Hilfe von Wasserproben bestimmt. (Abb. 4), die Bewegung der Kugeln wurde jedoch mit einer Photokamera verfolgt, die an der Saaldecke des Laboratoriums angebracht war und auf einen metrischen Gittergrund photographierte (Abb. 5). Das Rhodamin wurde dank der Genauigkeit des Dosimeters kontinuierlich eingeleitet (Abb. 6); die Kugeln wurden natürlich diskret zugeführt. Das Wasser wurde über ein spezielles System, das aus Zuflußröhren, dem Abflußkanal mit Pumpe und einer richtungsgebenden, glättenden Wand zusammengesetzt war, dem Becken zugeleitet und abgelassen (Abb. 7). Rhythmische Wellen wurden mit einem gewöhnlichen Klappengenerator erzeugt.

Bei den beschriebenen empirischen Untersuchungen wurde das Hauptaugenmerk den gleichnamigen Komponenten des Dispersionstensors  $D_{ii}(\tau)$  gewidmet, was sinnvoll ist, wenn die Richtungen der großen Achsen des Dispersionsellip-

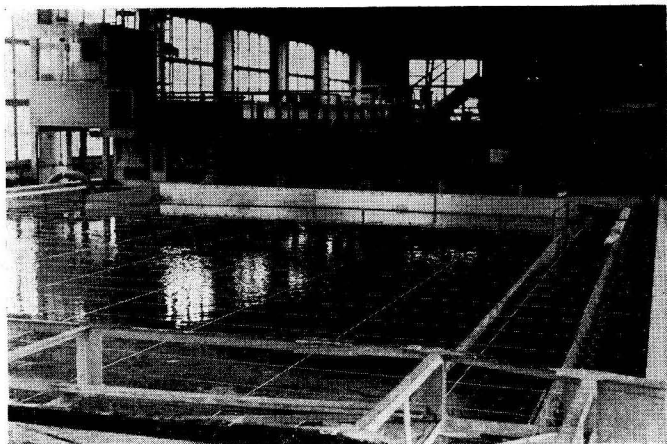


Abb. 3. Allgemeine Ansicht des hydraulischen Beckens

soides und dem der Übertragung (Strömung) zusammenfallen. Wegen der Divergenz jener Richtungen brauchen nur geringe Ungenauigkeiten in den Lösungen der Gleichung der turbulenten Diffusion vorausgesetzt zu werden.

Wir kennzeichnen mit dem Index  $X = X_1$  die Richtung der Übertragung, mit  $Y = X_2$  die Richtung normal zu ihr in der Horizontalen und mit  $Y = X_3$  in der Vertikalen (was mit dem auf der Abbildung angenommenen Koordinatensystem nur im Falle einer uferparallelen Strömung zusammenfällt). Für die natürlichen Messungen wurden die horizontalen Komponenten  $D_{11}(\tau)$  und  $D_{22}(\tau)$  bestimmt, indem man sich auf die Ausbreitung der Schwimmer stützte,  $D_{22}(\tau)$  aber wurde nachträglich auf der Grundlage der Konzentration im Substanzstrahl, der aus einer stationären Quelle gespeist wurde, ermittelt. Es ist ziemlich gewagt,  $D_{11}(\tau)$  und  $D_{22}(\tau)$  aus der Konzentrationsverteilung in der Substanzwolke bei einer einmaligen Farbeingabe zu bestimmen. Der im Wasser gelöste



Abb. 4

Abb. 4. Entnahmemethodik für die Wasserproben mit Rhodamin

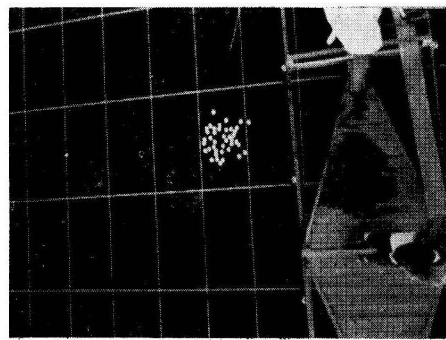


Abb. 5a

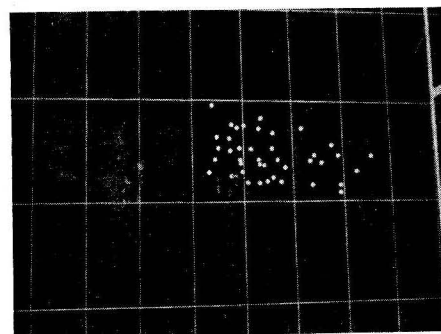


Abb. 5b

Abb. 5. Die Dispersion der Versuche mit Kugeln im hydraulischen Becken

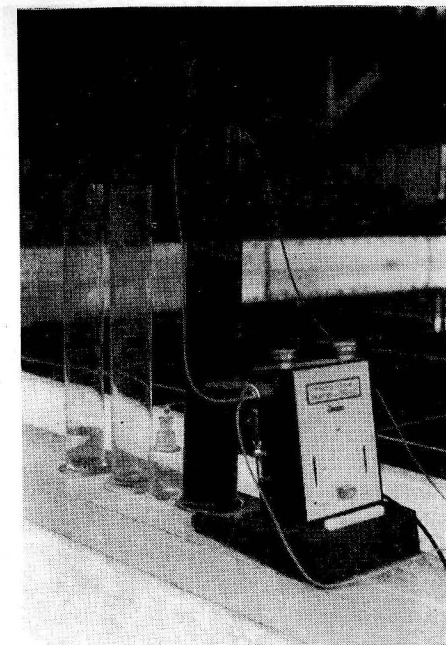


Abb. 6a

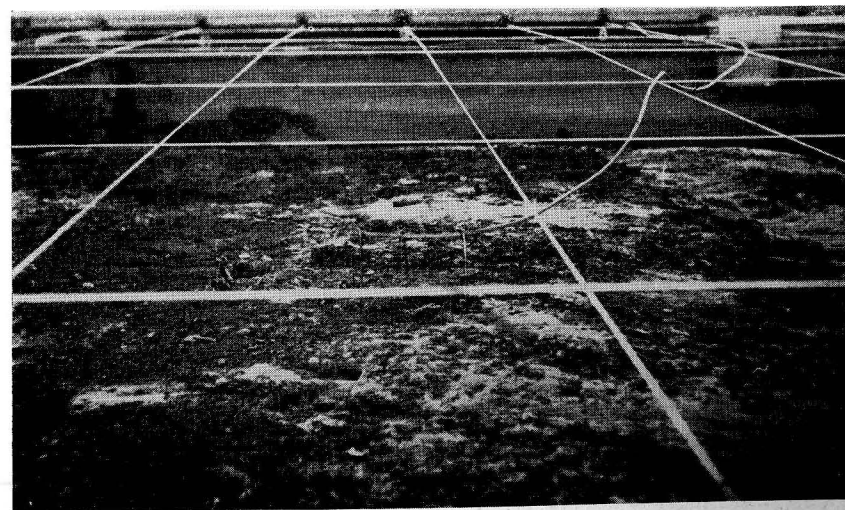


Abb. 6b

Abb. 6. Anlage für die Einleitung der Rhodaminlösung in das hydraulische Becken

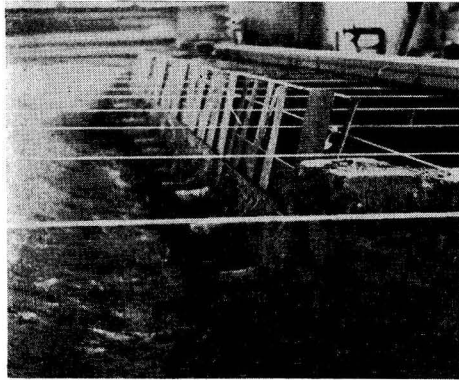


Abb. 7.

Anlage für die Strömung im Becken

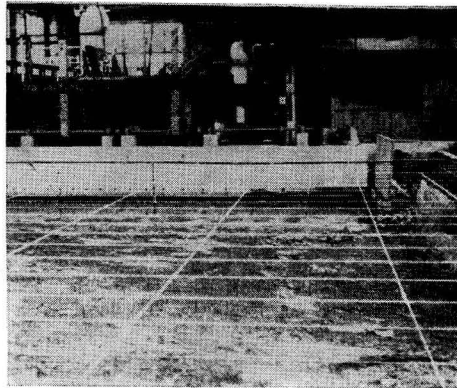


Abb. 8.

Wellenerzeuger im hydraulischen Becken

Tracer breitet sich nicht monoton in der Vertikalen aus, da nahe der Oberfläche nicht immer die gleiche Indikatormenge vorhanden ist. Ein Schnitt durch die Tracerwolke in der Horizontalebene an der Oberfläche des Wassers erbringt dann Ergebnisse, die sich von dem einzig richtigen Schnitt durch den Punkt der maximalen Konzentration unterscheiden. Dagegen gibt die einmalige Farbstoffeingabe die Möglichkeit, die vertikale Diffusion ungefähr abzuschätzen. Verteilt man die gesamte Menge der momentan eingebrachten Farbe auf eine dünne Oberflächenschicht (die durch Planimetrieren des vermessenen oberflächennahen Konzentrationsfeldes bestimmt wird), so erhält man eine mittlere Mächtigkeit der Tracerwolke. Unter natürlichen Bedingungen wurden hauptsächlich bei geringen Intensitäten der Turbulenz etwa 40 Versuche durchgeführt. Die Situation geringer Turbulenz wurde wegen der Gefährlichkeit gewählt, die für die Reinheit des Ufers im Falle einer Einleitung von Abwässern hervorgerufen werden würde (da ein niedriger Turbulenzgrad eine geringe Zerstreuung bedingt). Die mittlere Geschwindigkeit der Oberflächenströmung überstieg nicht 30 cm/s und die mittlere Wellenhöhe war geringer als 30 cm, aber die Periode dieser Wellen war etwas größer als 2 Sekunden. Zu den natürlichen Messungen wurden 20 Modellversuche für die Strömung mit großen Geschwindigkeiten hinzugefügt, und so wurde durch die Menge der Laboratoriumsmessungen die Dispersion unter dem Einfluß verschiedener Wellenzustände bestimmt (20). Der Boden in der untersuchten ufernahen Zone fiel sanft nach unten ab und hat die Charakteristiken großer Teile des Ufers der südlichen Ostsee mit einem Gefälle von weniger als 1%. Die Untersuchungen wurden in einem ufernahen Streifen bis zu 2 km Breite durchgeführt.

4.2. Ergebnisse der Untersuchungen

4.2.1. Zusammenhang von Ausmaß und Übertragung der Diffusion. Die Ergebnisse der Messungen der Komponenten des Dispersionstensors  $D_{11}(\tau) = D_{xx}(\tau)$

und  $D_{22}(\tau) = D_{yy}(\tau)$  sind für die zuverlässigsten Versuche in Abb. 9a und 9b dargestellt. Auf der Abszisse ist die Zeit, die seit Beginn des Versuches verstrichen ist, aufgetragen (Moment der Farbstoffeingabe), und auf der Ordinate sind die Werte  $D_{11}(\tau)$  und  $D_{22}(\tau)$  nach der Berechnung der anfänglichen Streuung (aus technischen Gründen befanden sich die Schwimmer zur Anfangszeit nicht an einem Punkt) aufgetragen. Für beide Richtungen ist die Abhängigkeit exponentiell, dabei kann die mittlere Proportionalität in grober Näherung als  $D_{11} \sim \tau^{1.7}$  und  $D_{22} \sim \tau^{1.6}$  angenommen werden. Jedoch gelang es im Ergebnis einer genaueren Analyse von drei prinzipiellen Faktoren, die auf die Dispersion

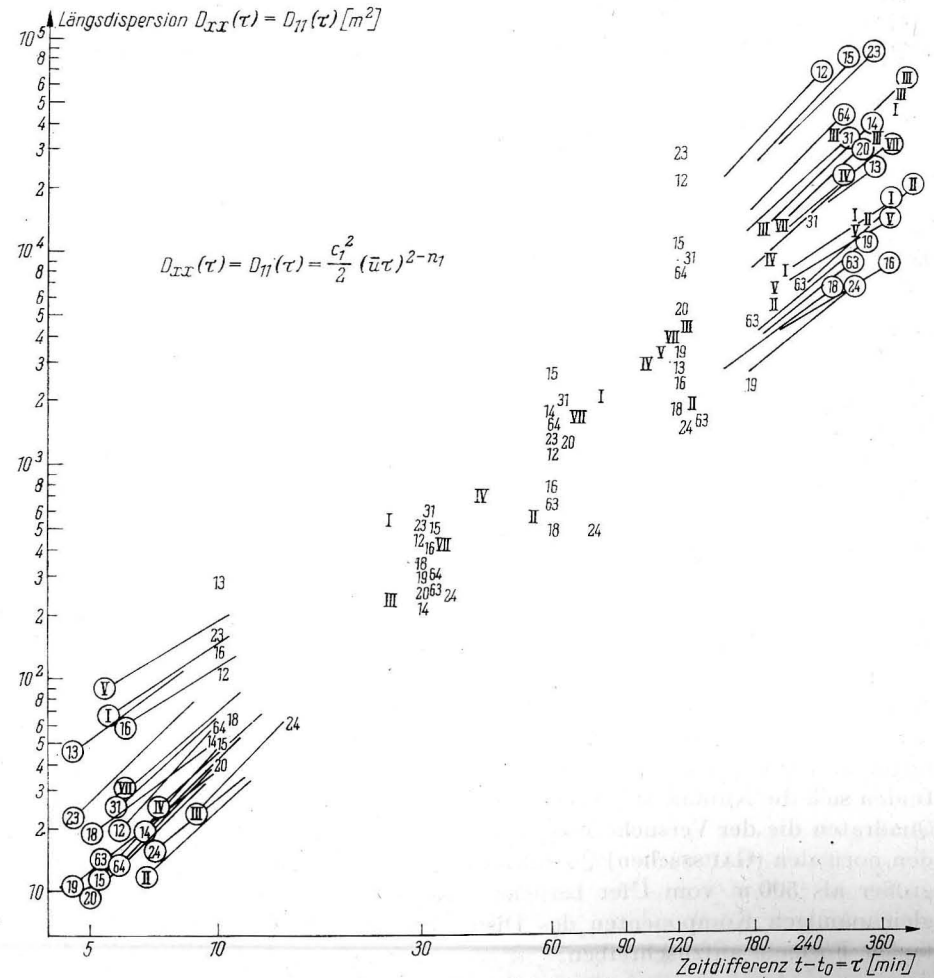


Abb. 9a. Längsdispersion auf der Grundlage der Messungen mit Schwimmern in der Natur. Die Zahlen beziehen sich auf die einzelnen Versuche

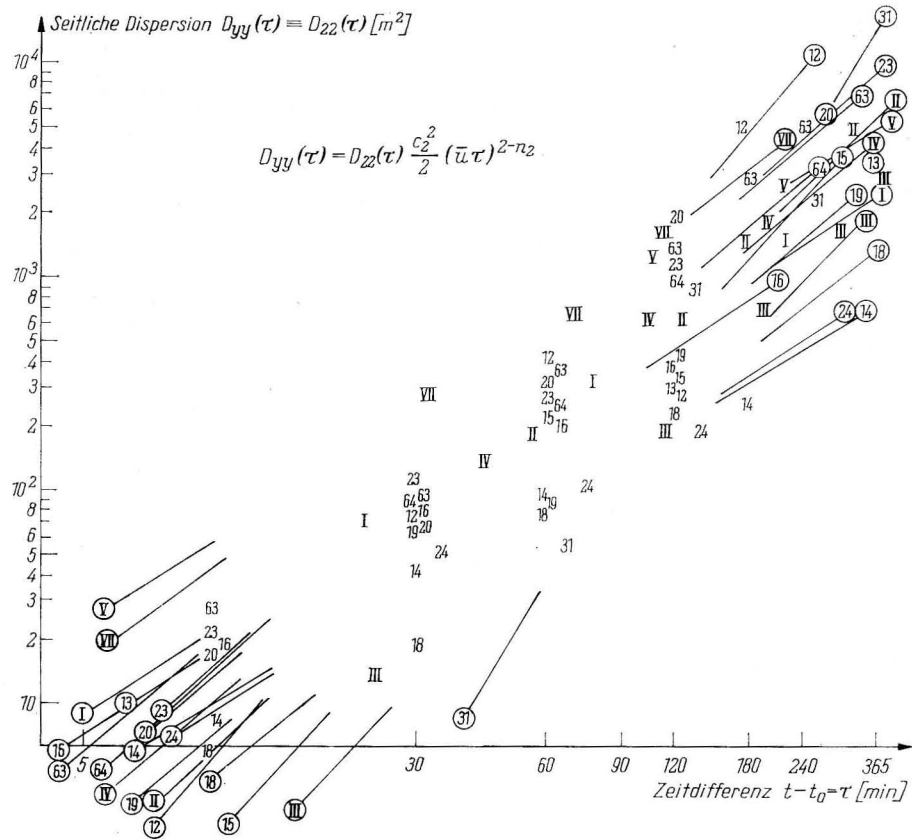


Abb. 9b. Querdispersion auf der Grundlage von Untersuchungen mit Schwimmern in der Natur

einwirken (das sind Wind, Strömung und Wellengang), die Oberflächengeschwindigkeit des Wassers herauszutrennen, die den wesentlichsten Parameter kennzeichnet, von dem der Exponent von  $\tau$  abhängt. Die Abhängigkeit des Exponenten von  $\tau$  von der Wassergeschwindigkeit wird für die Entfernung von ungefähr 700 m vom Ufer in Abb. 10a und 10b gezeigt. In den Kreisen befinden sich die Nummern der Versuche bei uferparalleler Strömung und in den Quadraten die der Versuche mit zum Ufer auflaufender Strömung. Wenn man den normalen (GAUSSSchen) Charakter der Tracerverteilung in der Entfernung größer als 500 m vom Ufer berücksichtigt, hat es einen gewissen Sinn, die gleichnamigen Komponenten des Dispersionstensors  $D_{ii}(\tau)$  in der Form einfacher Formeln aufzuschreiben:

$$D_{ii}(\tau) = \frac{C^2}{2} (\bar{u}\tau)^{2-n_i}, \quad (13)$$

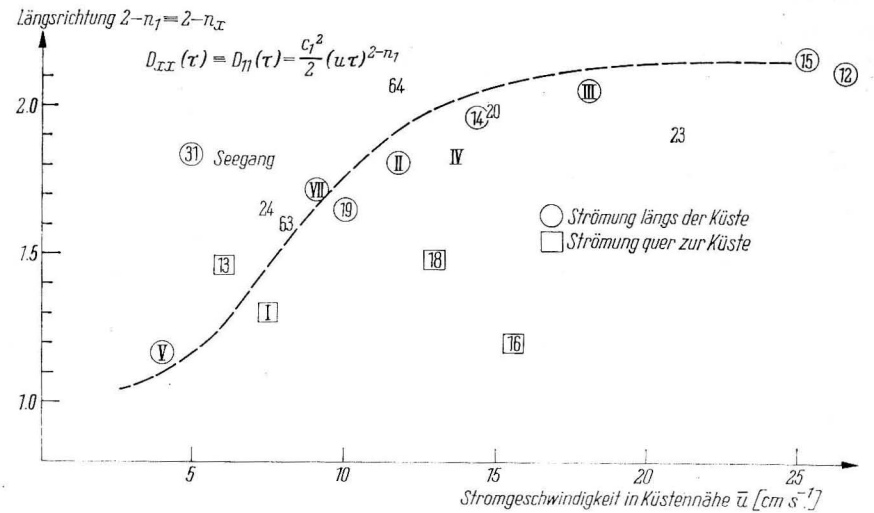


Abb. 10a. Abhängigkeit des Grades der Längsstreuung von der Stromgeschwindigkeit

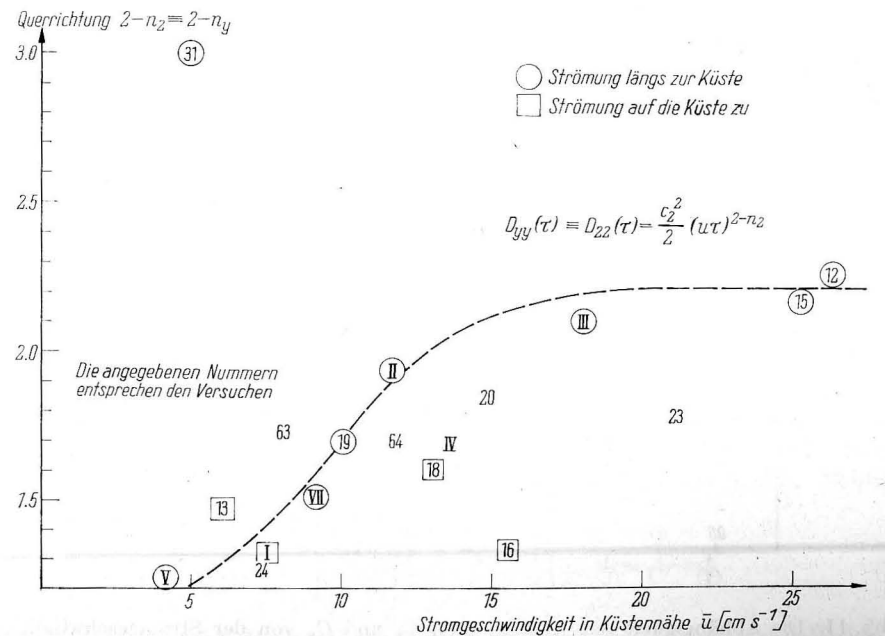


Abb. 10b. Abhängigkeit des Grades der Querstreuung von der Stromgeschwindigkeit



wo die Potenz „ $2 - n_i$ “ (übereinstimmend mit den Abb. 10a und 10b) von der Geschwindigkeit  $u_{700}$  in der Entfernung 700 m vom Ufer abhängt, aber graphisch bis zu beliebigen Entfernungen ermittelt werden kann.

Im speziellen Fall eines Potenzprofils

$$\bar{u} = \bar{u}_1 Y^m$$

$$\frac{\bar{u}}{u_{700}} = \left(\frac{Y}{700}\right)^m \quad (14)$$

erhält man

Bei einfachen Lösungen mit Normalverteilung der Substanz ist vom praktischen Gesichtspunkt aus die Querdiffusion sehr wichtig. Der Koeffizient  $C_Y$  wird für diese Komponenten auf Abb. 11 neben den Werten  $C_X$  gezeigt. Wie man sieht, hängen beide Koeffizienten ziemlich stark von der Geschwindigkeit ab, indem sie bei ihrer Erhöhung im Falle uferparalleler Strömung fallen und sich schwach ändern bei auf das Ufer auflaufender Strömung. Leider erlaubte die geringe Menge des Datenmaterials keine genaue Untersuchung des letzten Falles.

Bei den im hydraulischen Modell untersuchten uferparallelen Strömungen wurde auch bei uferparalleler Strömung ein logarithmisches Geschwindigkeits-

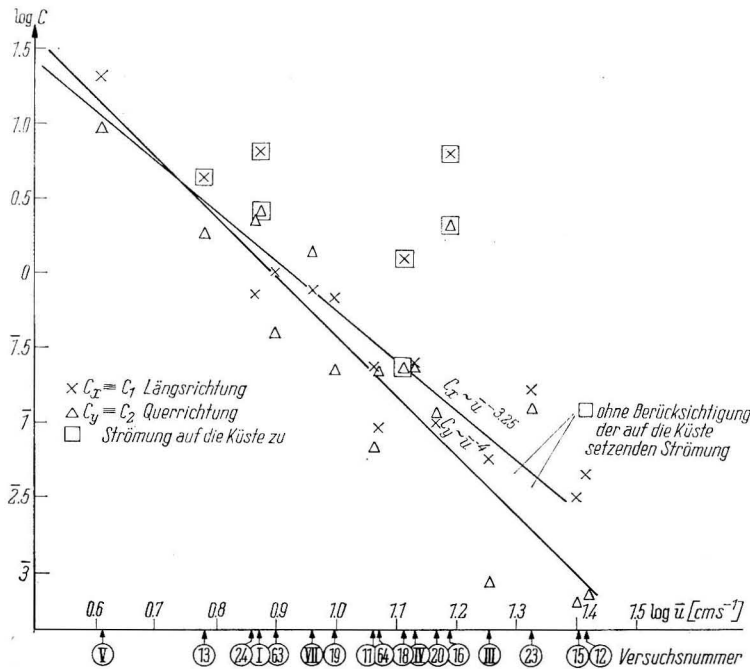


Abb. 11. Die Abhängigkeit der Koeffizienten  $C_x$  und  $C_y$  von der Stromgeschwindigkeit (gemessen in 700 m Entfernung von der Uferlinie) auf der Grundlage von Untersuchungen in der Natur

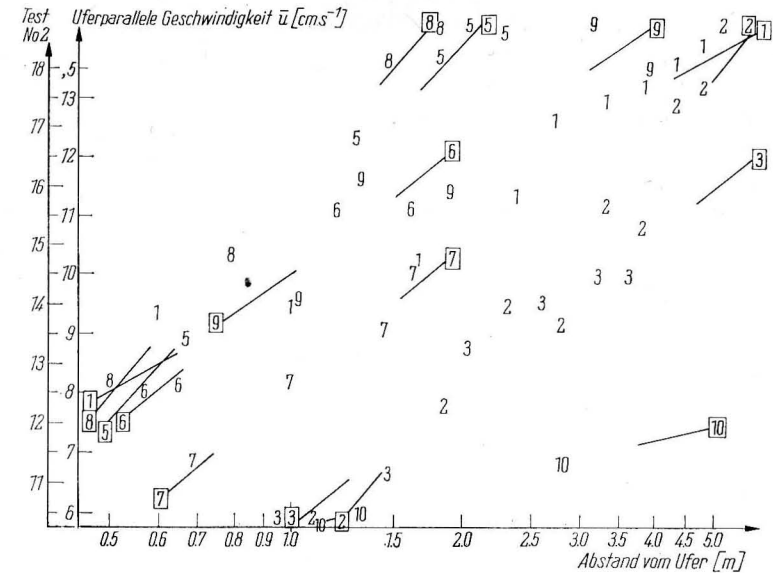


Abb. 12. Das Profil der uferparallelen Geschwindigkeit im hydraulischen Modell

profil aufrechterhalten (Abb. 12). In einem solchen Geschwindigkeitsfeld wurde eine Abhängigkeit des Exponenten „ $2 - n_y$ “ von der in einer konstanten Entfernung (1,35 m) von der Uferlinie gemessenen Geschwindigkeit festgestellt, die der natürlichen Form sehr ähnlich ist (Abb. 13). Der Exponent „ $2 - n_y$ “ wurde bestimmt, indem man eine Konzentrationsverteilung benutzte, die durch eine stationäre Rhodaminquelle gebildet wurde. Es ließ sich leicht prüfen, daß die Konzentration im Falle der vertikalen Linienquelle in den Achsen des Strahles von der Entfernung mit dem Exponenten  $1/2(n_y - 2)$  abhängt. Zusätzlich wird das durch die Veränderlichkeit des Quermaßstabes der Strahlen unterstützt, auf deren Grundlage die Laboratoriumswerte für  $C_y$  gefunden wurden, die auch auf Abb. 13 dargestellt sind. Die Abhängigkeit der Koeffizienten  $C_y$  von der Geschwindigkeit ist exponentiell und folglich ebenso wie in der Natur. Sowohl der geringfügig andere Exponent, als auch die „Kürzung“ der Kurve  $2 - n_y = f(\bar{u})$  in Richtung der Abszisse, entstehen wegen der Modellierung.

Eine grobe Abschätzung der Diffusionskoeffizienten kann man erhalten, indem man sich auf Formel (13) für ein vorgegebenes Feld homogener Turbulenz stützt (die Abhängigkeit  $D_{ii}(\tau)$  ist von anderem als vom ersten Grade). Schließlich hat man dann die Beziehung

$$K_{ii}(\tau) = \frac{1}{2} \frac{\partial D_{ii}(\tau)}{\partial \tau} = \frac{2 - n_i}{4} C_i^2 \bar{u}^{2-n_i} \tau^{1-n_i} \quad (15)$$

Jedoch widerspricht die zeitliche Veränderlichkeit der Diffusionskoeffizienten den statistischen Voraussetzungen der halbempirischen Diffusionstheorie. Der

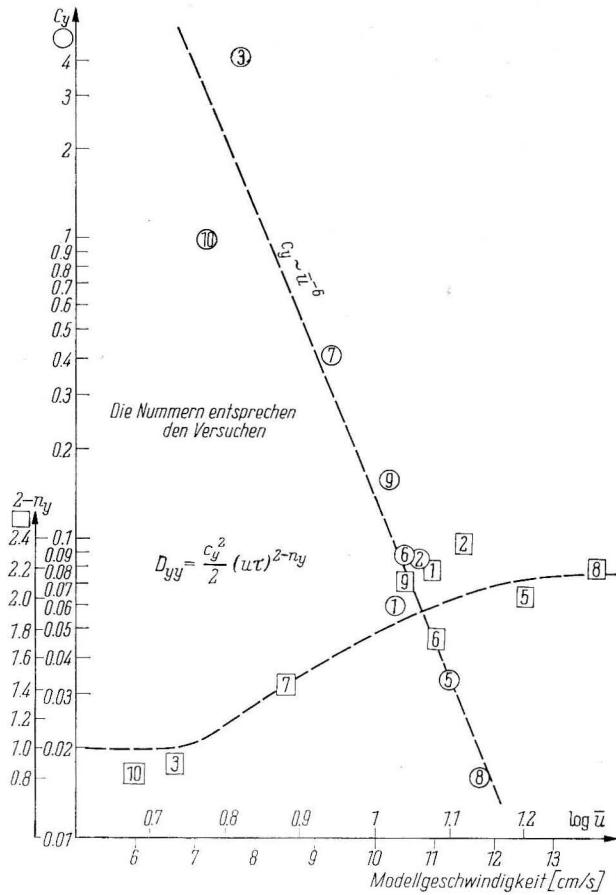


Abb. 13. Die Abhängigkeit des Koeffizienten  $C_y$  und des Exponenten „ $2 - n_y$ “ von der Geschwindigkeit für die Querdispersion im hydraulischen Modell

Diffusionskoeffizient kann nicht davon abhängen, wo sich die Quelle der passiven Substanz befindet; im Falle einiger Quellen wird  $K_{ii}(\tau)$  gemäß (15) vieldeutig. Deshalb kehren wir zu dem im Teil 3 besprochenen Schema mit zeitlich unabhängigen Diffusionskoeffizienten zurück.

4.2.2. Uferparallele Strömung. Bis jetzt erwähnten wir nur die Erscheinung der turbulenten Diffusion, die sowohl in der ufernahen Zone als auch in einigen hundert Meter Entfernung vom Ufer vor sich geht. Auf Grundlage der Formel (13) und der Abb. 11 kann man erwarten, daß die Längskomponente des Dispersionstensors die Form

$$D_{xx} = \frac{C_x^2}{2} (\bar{u}\tau)^{2-n_x} = \frac{(b_x \bar{u}^{-3,35})^2}{2} (\bar{u}\tau)^{2-n_x} = \frac{b_x^2}{2} \bar{u}^{-4,7-n_x} \tau^{2-n_x} \quad (16)$$

hat. Im Falle eines Potenzprofils der Geschwindigkeit ist  $\bar{u} = u_1 Y^m$ , und die Diffusionskoeffizienten der Abhängigkeit (16) muß man mit der Form

$$D_{xx} = \frac{b_x^2}{2} Y^{(-4,7-n_x)m} u_1^{-4,7-n_x} \tau^{2-n_x} \quad (16a)$$

annehmen, wo  $Y$  die Entfernung (vom Ufer) des Meßpunktes der Geschwindigkeit  $\bar{u}$  ist.

Aus dem Vergleich von (12) und (16a) folgt sofort, daß das Schema des Potenzprofils mit der Wirklichkeit zusammenfällt wegen der geringen Werte von  $n_x$ . Der Abfall von  $D_{xx}$  mit dem Wachstum der Geschwindigkeit  $\bar{u}$  ist im Rahmen des Potenzschemas merkwürdig, kann aber durch Unterschiede in den Turbulenzbedingungen bedingt sein.

Die Frage, ob Potenzverteilungen auch unmittelbar in der Nähe des Meeresufers existieren, kann untersucht werden, wenn man sich auf Meßergebnisse im Gebiet tatsächlicher Abwassereinleitung vom Ufer aus bei Gydnia stützt. Als Indikatorkonzentration wurde die Menge der *Koli*-Bakterien benutzt. Berücksichtigt man die größten absoluten Werte und die Veränderlichkeit in weiten Grenzen, erwies sich dieses Kriterium als nützlich, ungeachtet einiger Mängel in Form jahreszeitlicher Veränderungen, der Veränderlichkeit mit der Tiefe und subjektiven Abschätzungen. Die hydromechanisch bedingte Zerstreuung wurde bestimmt, indem man ein biologisches Absterben der *Koli*-Bakterien während der Halbwertszeit von 2 Stunden in Betracht zog (diese Zeit ist das Ergebnis eines gesonderten Untersuchungszyklus). Auf Abb. 14 ist die uferparallele Konzentrationsabnahme für fünf verschiedene Versuche angegeben. Es erwies sich, daß in Längsrichtung die Konzentration mit wachsender Entfernung von der Quelle mit dem Exponenten „ $8/9$ “ fällt. Gleichzeitig fällt die Konzentration normal zum Ufer exponentiell mit wachsender Entfernung vom Ufer; der Exponent im Argument ist in allen sechs Versuchen gleich „ $9/7$ “, wie es in Abb. 15 dargestellt wurde.

Als Ergebnis des Vergleichs dieser Ziffern mit der Lösung (12) erhält man schließlich

$$\frac{m+1}{m-n+2} = \frac{8}{9} \quad \text{und} \quad m-n+2 = \frac{9}{7},$$

was sofort zu den Werten  $m = \frac{1}{7}$  und  $n = \frac{6}{7}$  führt.

Die Annahme einer vertikalen Linienquelle im Falle der *Koli*-Bakterien ist völlig begründet, weil ihr Hauptteil in einer schmalen Schicht an der Meeresoberfläche konzentriert ist.

Die Bestätigung der erhaltenen Werte durch den Vergleich der empirischen Ergebnisse mit den Lösungen (10. 1.)—(10. 2) für eine Punktquelle und eine nachträgliche Bestimmung der Exponenten „ $m$ “ und „ $n$ “ waren dann wegen der geringen Menge der Meßwerte unmöglich. So unterliegen die Exponenten „ $m$ “ und „ $n$ “ wahrscheinlich natürlichen Veränderungen beim Übergang von der Zone des unmittelbaren Küsteneinflusses (die entsprechend den obigen

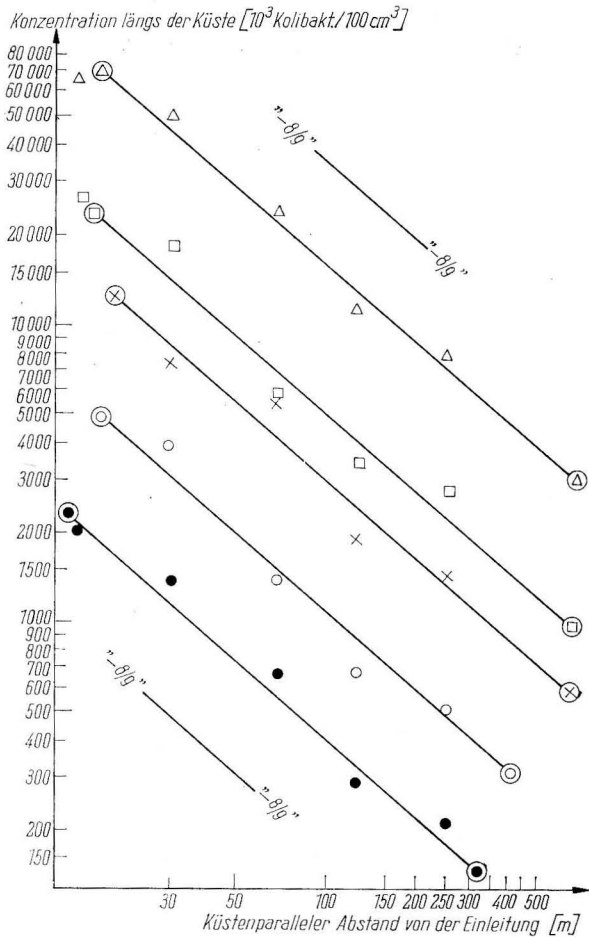


Abb. 14. Der uferparallele hydromechanisch bedingte Konzentrationsabfall der Substanz bei einer Quelle am Ufer

Daten eine Ausdehnung von etwa 400 m erreicht und in der ein stufenförmiges Profil wichtig ist) zum Gebiet außerhalb des Ufers (in der man keine stufenförmigen Profile findet) wenigstens für die untersuchten Intensitäten der Turbulenz.

4.2.3. Wellengang. Bei den natürlichen Untersuchungen wurde niemals eine klare unmittelbare Abhängigkeit der Dispersion vom Wind und der Strömungsrichtung gefunden; die Unterschiede der Meerestiefe in den einzelnen Versuchsgebieten waren für die Erklärung der eindeutigen Tendenz nicht groß genug. Statt dessen wurde herausgefunden, daß beim Wachsen des Wellenganges auch ein Wachstum des Exponenten „2 - n<sub>i</sub>“ auftritt, so daß bei stärkerem Seegang

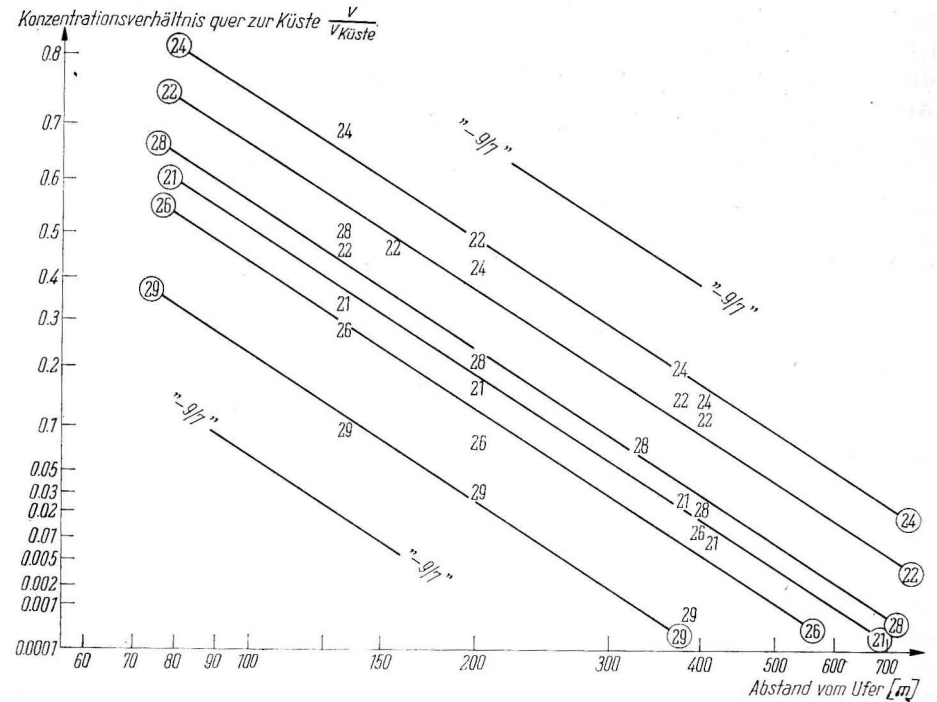


Abb. 15. Der hydromechanisch bedingte Konzentrationsabfall normal zum Ufer bei einer Quelle am Ufer

eine Proportionalität des Diffusionskoeffizienten zu  $\sqrt{D^{4/3}}$  entsteht, die Gebieten lokaler Isotropie entspricht, deren Existenz im offenen Meer empirisch bestätigt wurde.

Die hydraulischen Modellmessungen der Dispersion unter dem Einfluß des Wellenganges zeigten, daß die Tensorcomponenten der Dispersion  $D_{11}(\tau)$  und  $D_{22}(\tau)$  nur eine Proportionalität ersten Grades zur Zeit haben (wie im Falle langer Zeiten im Felde homogener Turbulenz). Die gefundenen Werte der Diffusionskoeffizienten  $K_x$  und  $K_y$  sind in Abb. 16 in Abhängigkeit vom dimensionslosen Wellenverhältnis dargestellt. Ziemlich begründet kann man annehmen, daß die Veränderlichkeit von  $K_1$  und  $K_2$  in Form eines Sprunges mit dem Übergang der laminaren Wellenbewegung zur Turbulenz verbunden ist. Wie eine gesonderte Analyse zeigt [6], entspricht dieser Übergang der kritischen Zahl des REYNOLDSSchen Kriteriums

$$Re = \frac{2 \pi h^2}{\nu T} \frac{1}{\left( \sinh \frac{2 \pi H}{L} \right)^2}$$

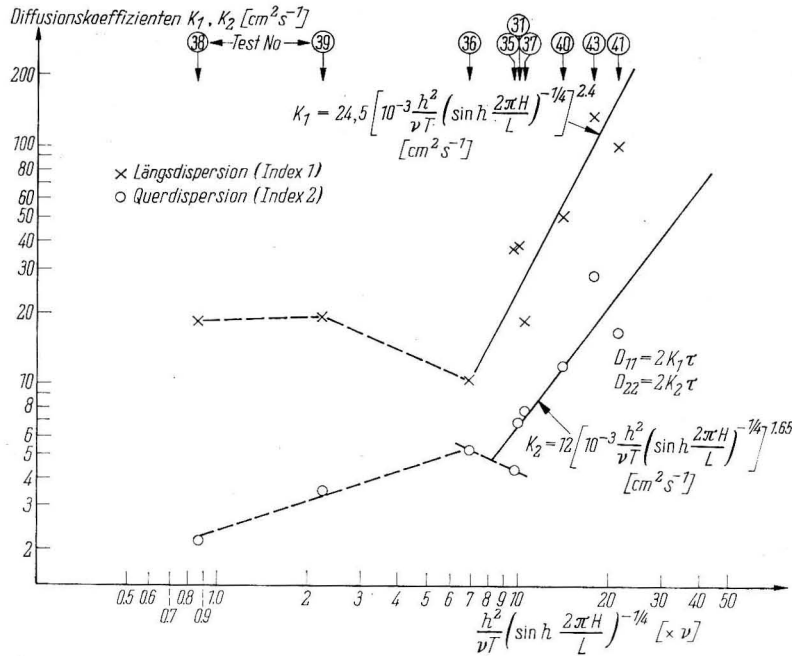


Abb. 16. Die Veränderlichkeit der Diffusionskoeffizienten verbunden mit dem Wellengang im hydraulischen Modell  $t - t_0 = \tau$  Zeitdifferenz;  $h$  = Wellenhöhe;  $T$  = Wellenperiode;  $L$  = Wellenlänge;  $H$  = Wassertiefe;  $v$  = Koeffizient der kinematischen Zähigkeit

von

$$(\delta \text{ Re}^{1,25})_{kr} = 2 \cdot 10^4,$$

wobei  $\delta$  das charakteristische Maß der gegebenen Rauigkeit ist.

Die natürlichen Untersuchungen raten, die stärker als linear ausgeprägte zeitliche Abhängigkeit des Dispersionstensors zu berücksichtigen. Es scheint, daß der entsprechende Faktor zur Intensivierung der Dispersion die Wechselwirkung von Strömung und Wellengang ist. Es ist bekannt, daß die Existenz unbeständiger Geschwindigkeitsgradienten ein Grund für das Anwachsen des Exponenten  $D_{ii}(\tau)$  unterhalb von eins ist, was homogener Turbulenz entspricht. Im besprochenen Fall des komplizierten natürlichen Wellenganges spielt die Wechselwirkung von Strömungsgradienten und Wellengang mit den turbulenten Pulsationen eine große Rolle.

#### 4.2.4 Das Bild der mittleren Verunreinigung der ufernahen Zone

Wie oben bemerkt wurde, ist die zur Beschreibung der Diffusion notwendige Anzahl von Daten beim Auflaufen der Substanz auf das Ufer zu ungenügend. Außerdem ist solch dynamischer Zustand, obwohl vom sanitären Standpunkt

gefährlich, ziemlich selten. Auf der anderen Seite gibt es auch kein Schema der Dispersion. Gleichzeitig gibt es stationäre Strömungen auch nicht oft in der Natur. Deshalb kann das Bild der mittleren Verunreinigung in der Uferzone die zwischen der küstenparallelen und küstennormalen Strömung liegende Strömungsrichtung als Ergebnis einer langzeitlichen gemeinsamen Einwirkung verschiedener hydroanemometrischer Faktoren interessant sein.

In Abb. 17 stützt sich die durch das *Koli*-Kriterium dargestellte Verunreinigungszone auf den mittleren Einfluß einer Quelle am Ufer mit der Leistung von  $2,9 \cdot 10^{11}$  *Koli*-Bakterien/s (Abwasser von Gdynia). Im Gebiet der größten sanitären Verunreinigung, das sich im Mittel vom Ufer aus 80 m nach Osten, 300 m nach Norden und 600 m nach Süden vom Ausgang des Kollektors erstreckte, wurden  $10^7$  *Koli*-Bakterien/100 cm<sup>3</sup> gemessen. Der Verlauf der Isolinien für die anderen Kriterien ist gleich, wenn man das biologische Absterben berücksichtigt. In Abb. 18 ist die Veränderlichkeit der Abwasserkonzentration dargestellt, wobei als Kriterium der Kaliumpermanganatverbrauch diente und auf Abb. 19 die Konzentrationsverteilung anhand des biochemischen Sauerstoffverbrauches BSB<sub>5</sub>. Die Zonen der größten BSB<sub>5</sub>-Werte (oberhalb 20 mg O<sub>2</sub>/l) und das größten Sauerstoffbedarfs (mehr als 10 mg O<sub>2</sub>/l) haben lineare Ausmaße, ungefähr viermal kleiner als für das *Koli*-Kriterium.

Wenn man das oben gesagte berücksichtigt, so stellen die *Koli*-Bakterien das optimale Kriterium kommunaler Abwässer dar. Auf Grundlage der Diffusionsuntersuchungen mit Hilfe der vom Ufer aus eingeleiteten Abwässer (Gdynia) wurde durch das *Bacterium coli* der hydromechanisch-biologisch bedingte Abfall bestätigt, der den empirischen Formeln der Abb. 20 entspricht. Sowohl die Koeffizienten  $A$  und  $B$  als auch der Abstand  $r_0$  der Änderung des Verteilungscharakters (von der Größenordnung 100 m) hängen vom Winkel zwischen der Richtung des größten Konzentrationsabfalles (die annähernd mit der Strömungsrichtung zusammenfällt) und dem (radial von der Quelle ausgehenden) Profil ab, in dem die Verteilungen der Abb. 20 mit entsprechenden Werten  $A$ ,  $B$  und  $r_0$  auftreten. Die Untersuchungen zeigten, daß die Abwässer von Gdynia nur im Gebiet des Kollektorausganges eine Verunreinigung hervorrufen und nicht auf die Sauberkeit der ganzen Bucht von Puck einwirken. Durch vor-

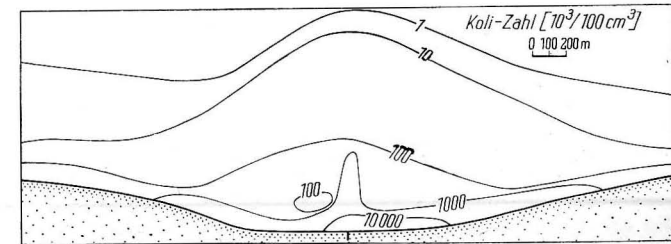


Abb. 17. Mittlere Ausdehnung der städtischen Abwässer von Gdynia in der Uferzone anhand des Kolikriteriums

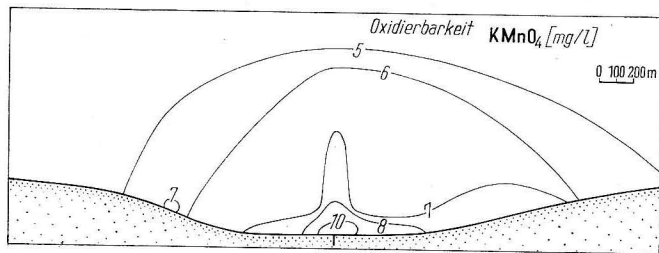


Abb. 18. Mittlere Ausdehnung der städtischen Abwässer von Gdynia in der Uferzone anhand des Kaliumpermanganat-Verbrauchs

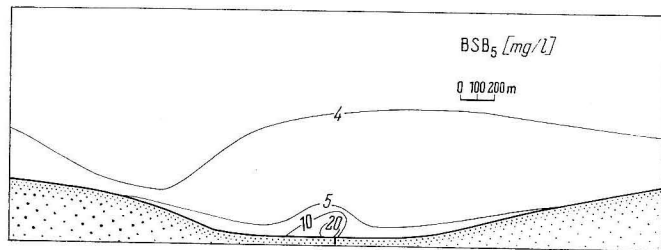


Abb. 19. Mittlere Ausdehnung der städtischen Abwässer von Gdynia anhand des BSB<sub>5</sub>-Kriteriums

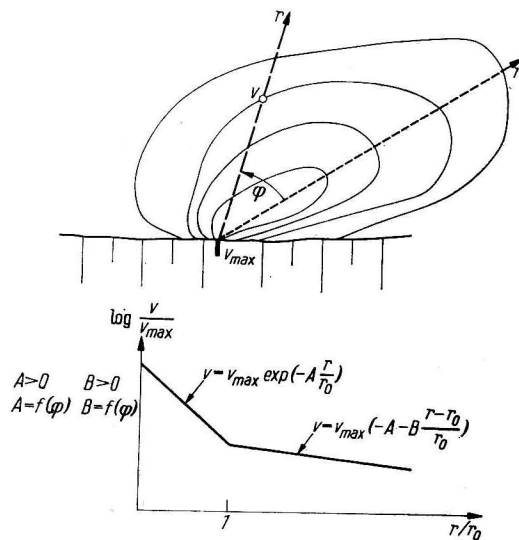


Abb. 20. Veränderlichkeit der Konzentration von Koli-Bakterien in radialen Profilen, ausgehend von einer Quelle am Ufer

läufige Berechnungen kann bestätigt werden, daß sich die Situation in dieser Beziehung auch nicht nach der zukünftig geplanten Einleitung der siebenfachen Abwassermenge außerhalb der Küstenzone ändern wird.

### 5. Abschließende Bemerkungen

Bis jetzt gelang es, die Diffusion in der ufernahen Zone des Meeres bei nicht zu großen Turbulenzintensitäten zu bestimmen. Es wurde die Existenz zweier Bereiche in der ufernahen Zone entdeckt. Im ersten Bereich, mit einer Breite von ungefähr 400 m, ist ein bedeutendes Potenzprofil (10) mit Exponenten  $m = 1/7$  und  $n = 6/7$  vorhanden, im anderen, weiter vom Ufer entfernten Streifen, konnte die Exponentialverteilung nicht gefunden werden. Den Grund für die starke Dispersion (mit großen Exponenten  $K(l) \sim l^2$ ) muß man in der Wechselwirkung zwischen Strömung und Wellengang sehen.

Berücksichtigt man die Notwendigkeit eines Projektes, das die ungefährliche Einleitung von Abwasser ins Meer gestattet, so muß die Untersuchung der Turbulenz in der ufernahen Zone Bestandteil einer Reihe von Aufgaben sein, unter denen die wichtigsten sind:

- Bestimmung des Zusammenhanges zwischen Diffusion und Übertragung in einem weiten Maßstabsbereich;
- Realisierung vieler Versuche bei zum Ufer gerichteter Strömung, um den Einfluß des Ufers auf die Konzentrationsverteilung festzustellen;
- genauere Analyse des Einflusses des Wellenganges auf die Dispersion;
- Abschätzung der vertikalen Diffusion passiver Substanzen;
- Übergang zu stochastischen Modellen dieser Erscheinung auf der Grundlage der Analyse spezieller Situationen und die Optimierung des Projekts der Abwassereinleitung.

### Die wichtigsten Bezeichnungen

$D_{ii}$	Komponente des Dispersionstensors	$u$	EULERSche Wassergeschwindigkeit
$H$	Meerestiefe	$X, Y, Z$	Koordinaten des rechtwinkligen Systems
$h$	Wellenhöhe	$\Gamma$	Gammafunktion
$K_{ij}$	Koeffizient der turbulenten Diffusion	$\chi$	Koeffizient der molekularen Diffusion
$L$	Wellenlänge im Wasser	$v$	Konzentration
$Q$	Quellenleistung	$\nu$	kinematischer Zähigkeitskoeffizient
$r$	Entfernung von der Quelle (im radialen Profil)	$\sigma^2$	Varianz
$T$	Wellenperiode im Wasser	$\tau$	Zeitunterschied
$t$	Zeit		

### Literatur

- [1] ARIS, R., On the dispersion of a solute in a fluid flowing through the tube. Proc. Roy. Soc. A **235** (1956), S. 1200.
- [2] CEGLJARSKI, R., ZEIDLER, R., ŽELAZNY, E., Die Verwendung des Fluorometers bei „in-situ“ Messungen der Meeresdiffusion. Beitr. Meereskunde **30/31** (1972).

- [3] FRANKEL, R. J., CUMMING, J. D., Turbulent mixing phenomena of ocean outfalls. ASCE SA 2 (1965).
- [4] MONIN, A. S., JAGLOM, A. M., Statistische Hydromechanik (russ.). Teil I, Moskau 1965.
- [5] OZMIDOV, R. V., Horizontale turbulente Diffusion im Meer (russ.). Verlag „Nauka“, Moskau 1969.
- [6] ZEIDLER, R., Zagadnienie odmiennosci laminarnego i burzliwego ruchu falowego. Rozpr. Hydrot. 28 (1971).

Anschrift des Verfassers:

Dr. RYSZARD ZEIDLER  
Instytut Budownictwa Wodnego PAN,  
VR Polen — Gdansk — Oliwa,  
ul. Cystersow 11

## Einige Ergebnisse von Untersuchungen über die turbulente Diffusion von Farbflecken an der Meeresoberfläche mit Hilfe von Luftbildaufnahmen

V. I. ZAC und B. F. ANDRJUŠČENKO

Gegenwärtig finden auf unmittelbaren instrumentellen Beobachtungen des Ausbreitungs- und Umwandlungsprozesses von Beimengungsfeldern im Meer beruhende Methoden für die Untersuchung der turbulenten Diffusion immer umfangreichere Anwendung. Eine dieser Methoden ist die naturgetreue Modellierung auf der Grundlage einer Untersuchung von künstlich auf See durch konservative Indikatoren erzeugten Tracerflecken oder -strömen und deren Umwandlung. Die Markierung der oberflächennahen Wasserschichten mit fluoreszierenden Farbstoffen und die nachfolgende Fixierung der Farbfläche durch Luftbilder macht es möglich, einige wichtige Parameter der horizontalen turbulenten Diffusion zu untersuchen. Das Ziel dieser Arbeit besteht in der Erforschung von Gesetzmäßigkeiten der horizontalen turbulenten Diffusion im küstennahen Gebiet mit Hilfe von Luftbildmethoden für Prozesse kleinen und mittleren Maßstabs.

Zur Untersuchung der horizontalen Diffusion werden erst verhältnismäßig kurze Zeit, nämlich seit Anfang der sechziger Jahre, Luftbildmethoden verwendet. Mit dem Luftbild von Farbflecken hat man die Möglichkeit, zu jedem Zeitpunkt ein sofortiges Bild des gesamten Flecks zur Verfügung zu haben. Das hat einen gewissen Vorzug gegenüber der Aufnahmemethode von Farbflecken durch Schiffe, die mit einer entsprechenden Anlage ausgerüstet sind, wie dies von JOSEPH und Mitautoren [5] und anderen Forschern durchgeführt wurde. Eine derartige Aufnahme kann sogar mit schnellaufenden Schiffen für Farbflächen, die eine Länge von etwa 5 bis 10 km und eine Breite von 1 bis 3 km haben, eine Zeitspanne von über ein bis zwei Stunden in Anspruch nehmen. Die Synchronität der Aufnahme, die besonders für nichtstationäre Tracerflecken wichtig ist, wird dabei nicht gewahrt. Darüber hinaus können die Diffusionsprozesse der Farbflächen im Anfangsstadium (sofort nach Ausbringen des Farbstoffes auf die Meeresoberfläche) mit Hilfe eines Schiffes überhaupt nicht untersucht werden, da zu diesem Zeitpunkt die Ausdehnung der Flächen sehr gering ist und bei mehrmaligem Durchfahren durch das Schiff die Struktur und die Form des Farbflecks erheblich gestört werden können.

Während der Luftbildaufnahme wird die Synchronität auf ideale Weise gewahrt. Eine große Anzahl von Luftbildern des Fleckes, die in kurzen Zeit-

räumen aufgenommen werden, ergeben zuverlässige statistische Reihen. Die Verwendung von Luftbildmethoden bei der Untersuchung der Diffusion in der Oberflächenschicht weist jedoch auch einige Mängel und Einschränkungen auf. Wenn man die sichtbaren Konturen der Farbfläche auf den Luftbildern hervorhebt, kann man annehmen, daß es sich dabei um die Isolinie einer bestimmten Konzentration handelt. Zu diesem Zeitpunkt ist es jedoch noch schwierig nachzuweisen, daß bei verschiedenen Stadien der Diffusion des Fleckes von einer momentanen Punktquelle aus (also auch bei verschiedenen Stufen des Kontrastes zwischen dem Farbfleck und dem angrenzenden reinen Seewasser) die Hypothese von einer fixierten Isolinie der Farbstoffkonzentration gerechtfertigt ist. Dies ist erst im weiteren Verlauf bei einem Vergleich der Flächen, die synchron durch Luftaufnahmen und mit einem durch ein Schiff geschleppten Fluorometer gewonnen wurden, möglich, d. h., erst jetzt kann diese Hypothese überprüft und die Zuverlässigkeit der Ergebnisse der Luftbildaufnahme eingeschätzt werden.

Der sichtbare Umriß des Fleckes auf den Luftbildern ist von der Beleuchtung während der Aufnahme, vom Zustand der Meeresoberfläche, von der Ausbreitungstiefe des Farbstoffes in die Wasserschichten und von anderen Faktoren abhängig.

Um die erhaltenen Ergebnisse gegenüberstellen zu können, ist es erforderlich, daß die Versuchsbedingungen bei verschiedenen Versuchen gleichwertig oder zumindest fast gleichwertig sind. Danach strebten auch wir während unserer Untersuchungen. Die weitere Entwicklung und Verbesserung der Methode für die Erforschung der Diffusion von Farbflächen mit Hilfe der Luftbildaufnahme wird auch die genannten Mängel und Einschränkungen beseitigen.

In der meereskundlichen Fachliteratur sind noch verhältnismäßig wenig Arbeiten zu finden, in denen Luftbildmethoden für die Untersuchung der turbulenten Bewegung und Diffusion in der Oberflächenschicht des Meeres behandelt werden. Einige kinematische Kenngrößen von Tracerflecken, wie zum Beispiel die Ausdehnung der Flecken in Längsrichtung, ihre Krümmung (die mit der EKMAN-Spirale in Zusammenhang gebracht wird), die Streifenbildung u. a., werden in den Arbeiten von KATZ und Mitautoren [6], von PRITCHARD und Mitautoren [8] u. a. untersucht. Es wurde der Versuch unternommen, diese Besonderheiten in Abhängigkeit von Wind, Seegang und Strom zu behandeln.

In der Arbeit von NAN'NITI [7] werden Werte des horizontalen Diffusionskoeffizienten anhand von Luftbildern kleiner Flecken (der Größe von 5 bis 20 m) in der Naruto-Straße bei starken Gezeitenströmungen ( $U = 1,5-4,0$  m/s) angeführt.

Die japanischen Forscher FUCUDA, ITO, TANIGAWA, SAKAGISHI u. a. (FUCUDA, ITO, SAKAGISHI [2]; ITO, FUCUDA, TANIGAWA [3]) analysieren die Parameter der turbulenten Diffusion anhand von Luftbildunterlagen, die von Farbflächen angefertigt wurden. Sie verglichen die von den Luftbildern gewonnenen Werte mit einigen theoretischen Modellen der turbulenten Diffusion von kurzzeitigen und von stationären Punktquellen. Die ersten Experimente zur Erforschung

der turbulenten Diffusionsprozesse im Schwarzen Meer mit Hilfe von Luftbildmethoden wurden von uns im Jahre 1968 im Gebiet von Tuapse durchgeführt (ZAC, ANDRJUŠČENKO [9]). Im Jahre 1968 folgte eine neue Serie von Versuchen an der Südküste der Krim (5 bis 6 sm vor Jalta). Die Farbflächen wurden von dem Schiff „ŠS-207“ eingegeben. Die Luftbildaufnahmen wurden von einem Flugzeug des Typs LI-2 auf Spektralzonen- und Farbfilm angefertigt. Bei dem Farbstoff handelte es sich um Uranin und Rhodamin. Der Maßstab für die Aufnahmen wurde abhängig von der Größe der diffundierenden Farbstoffflächen festgelegt. Die Zeitabstände zwischen den aufeinanderfolgenden Luftbildaufnahmen änderten sich von 5 bis 10 Minuten in der ersten Stufe der Diffusion auf 20 bis 30 Minuten am Ende der Aufnahme. Die Gesamtdauer der Luftbildaufnahmen war von den hydrometeorologischen und anderen Verhältnissen abhängig und lag im Bereich von 2,5 bis 7,5 Stunden.

Für das Ausbringen der Farbflecken wurde bei den Versuchen im Jahre 1969 eine leistungsstarke Pumpe mit einer Leistung von  $40 \text{ m}^3/\text{h}$  benutzt, die über ein System von flexiblen Schläuchen verfügte. Die Farblösung aus 17 bis 30 kg (Trockenmasse) Farbstoff wurde in Behältern mit einem Fassungsvermögen von 4 bis  $8 \text{ m}^3$  zubereitet. Die flexiblen Schläuche wurden mit Hilfe von Schwimmern auf der Meeresoberfläche gehalten. Sie wurden auf eine Entfernung von 15 bis 20 m vom Schiff ausgebracht (Abb. 1). Durch die Leistungsstärke der Pumpe konnte die Farblösung etwa innerhalb von 3 bis 5 Minuten auf See ausgebreitet werden. Ein derartiger Farbfleck nahm am Ende des Pumpvorgangs (Anfangszeit) eine Fläche von etwa 50 bis  $200 \text{ m}^2$  ein und verbreitete sich dann im Verlaufe des Diffusionsprozesses auf eine Fläche von  $67000-386000 \text{ m}^2$ . Einen auf diese Weise gebildeten Farbfleck konnte man mit einigen Einschränkungen als Farbfläche bezeichnen, die von einer Punktquelle ihren Ausgang genommen hat. Bei jedem Versuch wurden Luftbildaufnahmen von zwei Flächen angefertigt, und zwar von Uranin und Rhodamin C. Nach der Bearbeitung des Luftbildmaterials erhielten wir Flächen von diffundierenden Flecken,

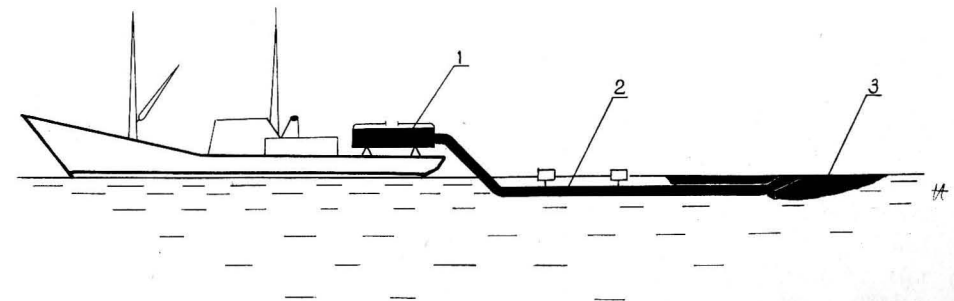


Abb. 1. Schema für das Ausbringen von Farbflecken durch ein Schiff bei den Versuchen im Jahre 1969:

- 1 — Behälter für Farbstofflösung;
- 2 — ausgebrachter Schlauch auf Schwimmern;
- 3 — Farbstoffleck

die zeitlich nacheinander aufgenommen worden waren. Dabei wurde, wie bereits von uns ausgeführt (ZAC, ANDRJUŠČENKO [9]), angenommen, daß die Fläche des Flecks von einer Isolinie mit festgelegter Konzentration (sichtbare Grenze des Farbflecks) eingeschlossen wurde, die durch die Empfindlichkeitsschwelle des Films bestimmt wurde. Nachdem die erhaltenen Flächen der Flecken mit äquivalenten Kreisflächen gleichgesetzt wurden, ermittelten wir die Radien der Flecken nach folgender Gleichung:

$$R = \sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad (1)$$

Dabei ist  $S$  — die Fläche des Farbflecks.

Die Analyse der erhaltenen Werte zeigte, daß die Veränderlichkeit der Flächen der diffundierenden Farbflecken  $S$  in der Zeit  $t$  (ebenso wie auch nach den Materialien der Luftbildaufnahmen vom Jahre 1968) der folgenden Potenzfunktion angenähert ist:

$$S = a t^n \quad (2)$$

Dabei ändert sich  $n$  bei neun Versuchen im Bereich von 0,63 bis 1,29 (im Jahre 1968 lag  $n$  zwischen 1,29 bis 1,92) (Abb. 2). Dies wurde für Flecken ermittelt, deren Radien sich zwischen 20 und 350 m änderten. Die Abhängigkeit der Radien  $R$  von der Diffusionszeit war für die Mehrzahl der Versuche der folgenden linearen Funktion angenähert:

$$R = a t + b \quad (3)$$

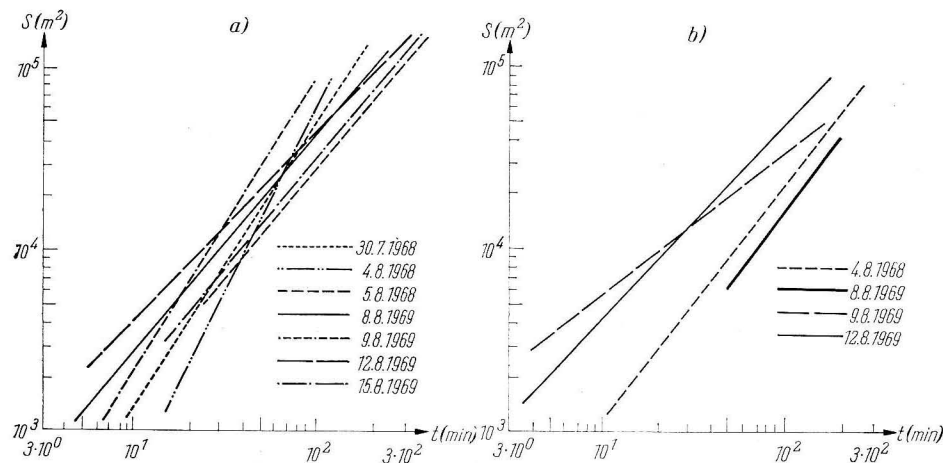


Abb. 2. Graphische Darstellung der Funktion  $S(t)$  anhand der Versuche der Jahre 1968/1969:

- a)  $S(t)$  für Uraninflecken;  
b)  $S(t)$  für Rhodamin-S-Flecken

Da während der Luftbildaufnahmen Farbflecken aus Uranin und Rhodamin C parallel festgehalten wurden, war es möglich, die Unterschiede zwischen den Exponenten  $n$  für diese Farbstofftypen zu ermitteln. Nach den Versuchen im Jahre 1969 ergaben sich folgende Werte: Für 5 Farbflecken aus Uranin  $\bar{n}_u = 1,05$ ; für 4 Farbflecken aus Rhodamin C  $\bar{n}_r = 0,93$ . Im allgemeinen kann gesagt werden, daß die Größenordnung die gleiche ist und sich die Funktion  $S(t)$ , die für alle Versuche als Mittelwert bestimmt wurde, nur wenig von einer linearen Funktion unterscheidet. In unserer Arbeit [9] sind die Werte für den Exponenten  $n$  nach den Angaben von NAN'NITI-OKUBO und ISAEVA-ISAEV angeführt, die im Bereich von 0,45 bis 1,50 lagen. Wir versuchten gleichfalls die Größe  $n$  anhand von Materialien anderer Forscher zu ermitteln.

Die japanischen Autoren (FUCUDA, ITO, SAKAGISHI [2]; ITO, FUCUDA, TANIGAWA [3] u. a.) bringen Werte für  $S$  und  $t$  nach Luftbildaufnahmen von Rhodamin-B-Flecken für das Küstenvorfeld. Die Flecken wurden 350 bis 2000 m vor der Küste und in der Nähe der Flußmündungen des Oj und Okitsu erzeugt. Nachdem die Größen für  $S$  und  $t$  in eine graphische Darstellung mit logarithmischen Skalen eingetragen waren, gelang es, die Werte für  $n$  zu ermitteln:

- a) nach den Versuchen von FUCUDA und Mitautoren [2] ändert sich  $n$  von 1,04 bis 1,96 für Flecken mit dem Radius zwischen 79 und 378 m;  
b) nach den Werten für  $S$  und  $t$ , die in der Arbeit von FUSHIMOTO und TANAKA [1] angeführt werden, lag  $n$  im Bereich von 0,93 und 1,25 für Flecken mit Radien zwischen 40 und 143 m.

Bei einer Untersuchung der Angaben unserer Experimente an der steilabfallenden Schwarzmeerküste (1968–1969), der Werte für  $n$  aus den von japanischen Forschern ermittelten Erfahrungen sowie der Werte  $n$  anderer Autoren, die in unserer Arbeit [9] angeführt sind, kann man feststellen, daß für Flecken mit Radien bis zu 1000 m (wenn man die Radien als charakteristische Maßstäbe der Erscheinung ansieht) der Exponent  $n$  in der Funktion  $S \sim t^n$  sich fast für alle Versuche im Bereich zwischen 0,45 und 2 ändert. Bei der Behandlung der Funktion  $S(t)$  untersuchten wir ihre Form im Ausdehnungsstadium der Fläche vom Beginn ihrer Erzeugung bis zur maximalen Ausdehnung. Diese maximale Fläche (oder Grenzfläche) wurde umschlossen von der Isolinie der Farbkonzentration  $C_n$ , die von der Empfindlichkeit des Films bestimmt wurde (sichtbare Kontur der Fläche). Nachdem  $S$  den Grenzwert erreicht hatte, begann sich die innerhalb der Isolinie  $C_n$  eingeschlossene Fläche aufzulösen (ungeachtet dessen, daß die Gesamtfläche des Flecks bis zum Verschwinden der Gradienten der Farbstoffkonzentration anwächst). Also bezieht sich der Exponent  $n$  auf das Ausdehnungsstadium vom Beginn der Diffusion bis zum Zeitpunkt  $t_{\max}$  für das Erreichen von  $S_{\max}$ . Die Ermittlung der Form für die Funktion  $S(t)$  im Stadium des Verschwindens der Fläche bis zur völligen Auflösung der Isolinie  $C_n$  ist wesentlich komplizierter und erfordert spezielle Untersuchungen.

Mit der Sammlung von experimentellen Daten unter verschiedenen dynamischen Bedingungen der Meeresoberfläche, bei einem unterschiedlichen Grad



der Dichteschichtung des Wassers sowie für Erscheinungsmaßstäbe und Zeitintervalle in einem wesentlich größeren Bereich wird man diese Frage detaillierter untersuchen können und eine ganze Sammlung von Gleichungen für die Funktion  $S(t)$  bei unterschiedlichen Diffusionsstadien erhalten. Wenn man die Parameter kennt, welche die Kinematik der Farbflächen bestimmen, wie  $S$ ,  $R$ ,  $t$ ,  $x$  ( $x$  ist der von der Fläche in der Zeit  $t$  zurückgelegte Weg), kann man versuchen, diese im Rahmen einiger Modelle der turbulenten Diffusion, ausgehend von momentanen Punktquellen, zu interpretieren. Da gegenwärtig noch keine zuverlässigen Angaben vorliegen, die eine Verbindung zwischen den räumlich-zeitlichen Parametern der Farbflächen und den experimentellen Angaben über die Verbreitung der Konzentration in dieser Fläche herstellen, ist es zweckmäßig, auf dieser Etappe die experimentellen Beobachtungen anhand von Luftbildaufnahmen ohne Heranziehung von Angaben über die Verteilung der Farbstoffkonzentration zu interpretieren.

In der Literatur zur turbulenten Diffusion gibt es eine Vielzahl von analytischen Aussagen, die den Diffusionsprozeß von momentanen Punktquellen aus beschreiben. In diesen Darlegungen sind jedoch stets entweder Konzentrationsparameter ( $C$ ) oder Diffusionskoeffizienten ( $K$ ) bzw. die Stoffmenge der Punktquelle ( $Q$ ) enthalten.

In [3] ergab sich durch die Umwandlung der Gleichung für die Verteilung der Konzentration aus einer momentanen Punktquelle folgender Ausdruck:

$$R^2 = 4 C^2 x^2 \ln \left( \frac{x_t}{x} \right), \quad (4)$$

wobei

- $R$  — der Radius der Farbfläche,
- $C$  — eine Konstante,
- $x$  — der Weg, der von der Fläche im Diffusionsprozeß zurückgelegt wurde,
- $x_t$  — der Weg der Fläche von der Ausbringung bis zum „Verschwinden“.

In diesem Ausdruck fehlt die Konzentration, während die Zeit  $t$  und die Stromgeschwindigkeit (Geschwindigkeit der Versetzung)  $U$  auch durch die beiden Konstanten  $C$  und  $x_t$  dargestellt sind. Da wir  $R$  und  $x$  kannten und  $C$  sowie  $x_t$  ermittelten, konnten wir die Funktion  $R/x_t = f(x/x_t)$  graphisch in dimensionsloser Form darstellen (Abb. 3b). Der Wert  $x_t$  wurde ebenso wie in der genannten Arbeit wie folgt ermittelt: Auf dem halblogarithmischen Netz, an dem auf der Ordinatenachse der  $\lg x$  und auf der Abzissenachse  $R^2/x^2$  dargestellt wurden, wurden die Versuchspunkte abgetragen (Abb. 3a). Die Punkte lagen auf dem Abschnitt einer Geraden. Durch Extrapolieren dieses Abschnittes bis zum Schnittpunkt mit der Ordinate  $R^2/x^2 = 0$  erhalten wir  $x = x_t$ . Für verschiedene Flächen verändert sich  $x_t$  von 27 bis 47 km (Abb. 3a). Die Konstante  $C$  wurde mit Hilfe der Formel (4) ermittelt. Nachdem  $C$  und  $x_t$  bekannt waren, wurde die Funktion  $R/x_t = f(x/x_t)$  konstruiert. Zu diesem Zweck wurden auf der graphischen Darstellung die dimensionslosen Parameter  $R/x_t$  und  $x/x_t$  für

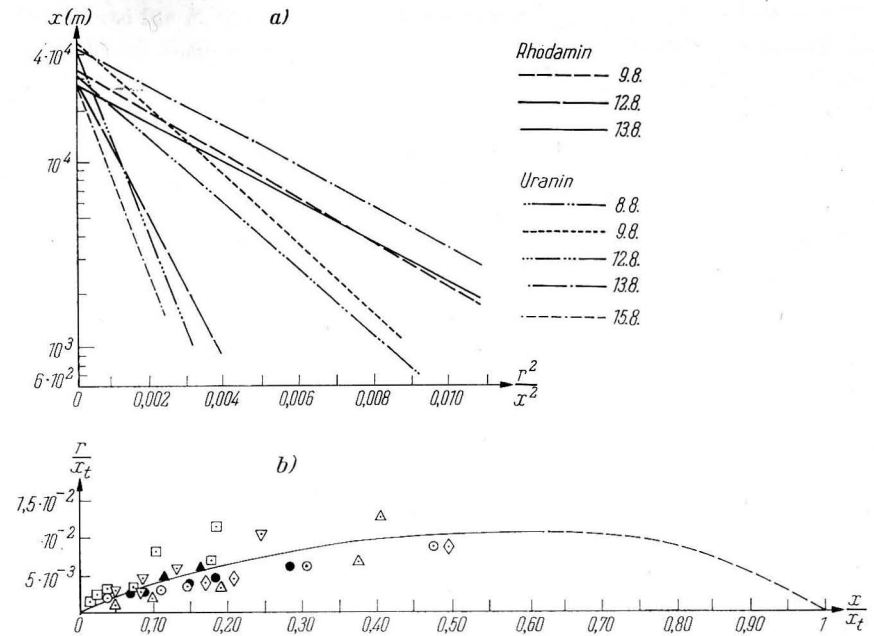


Abb. 3. Abhängigkeit der Farbfleckenradien von der Versetzung in Strömungsrichtung  
a) Graphik für die Ermittlung von  $x_t$  bei den Farbfleckversuchen im Jahre 1969;  
b) Graphik für die Wechselbeziehung zwischen dem Radius  $R$  und der Entfernung  $x$  in dimensionsloser Form

alle Versuche eingetragen (Abb. 3b). Obwohl sich für die Punkte eine gewisse Versetzung ergab, konnte man jedoch für alle Versuche eine dimensionslose Kurve (durchgehende Linie) ziehen. Hier wurde gleichzeitig die nach der Formel (4) ermittelte theoretische Kurve (gestrichelte Linie) eingezeichnet, die sich gut mit der empirischen Kurve deckt. Die Konstante  $C$  erwies sich jedoch nach unseren Angaben um eine Größenordnung niedriger, als dies in [3] angegeben wurde.

Die Werte für  $S$ ,  $R$ ,  $n$ ,  $R_{\max}$  und  $x_t$ , die nach den Versuchen im Jahre 1969 ermittelt wurden, sind aus Tab. 1 ersichtlich. Die dargelegten Erkenntnisse zeigen, daß es möglich ist, die experimentell erzielten Angaben im Rahmen einer theoretischen Gleichung (4) zu interpretieren, wobei jedoch die Konstanten  $C$  und  $x_t$  für jeden Versuch bestimmt werden müssen.

Die Versuche mit Luftbildaufnahmen von Farbflecken lassen die Möglichkeit zu, solche Parameter der turbulenten Diffusion zu ermitteln, wie die Diffusionsgeschwindigkeit nach [4] und die Koeffizienten der horizontalen Diffusion ( $K$ ). Nach der Theorie von JOSEPH und SENDNER kann im Diffusionsprozeß eines Farbflecks von einer momentanen Punktquelle aus die Abhängigkeit zwischen dem maximalen Radius der Isolinie einer bestimmten Konzentration  $R_{\max}$  und

Tabelle 1

Einige Kennwerte für die Diffusion von Farbflecken anhand von Luftbildern im Gebiet von Jalta im August 1969

Datum	Farbstoff	Wert in der Formel $S \sim t^n$	Maximalwert für $S$ anhand von Beobachtung ( $m^2$ )	Maximalwert für $R$ anhand von Beobachtung ( $m^2$ )	$R_{\max}$ nach Formel (6) $R_{\max} = 0,86 c x_t$	$x_t$ (km)	$P$ (cm/s)	$K$ ( $cm^2/s$ ) nach Ansatz von RICHARDSON-STOMMEL bei $\Delta t = 30$ min
08.08.	Uranin	1,19	$143 \cdot 10^3$	214	670	30	0,86	$2,2 \cdot 10^4$
09.08.	Uranin	1,15	$83 \cdot 10^3$	162	315	48	0,65	$2,1 \cdot 10^4$
09.08.	Rhodamin C	0,81	$67 \cdot 10^3$	146	260	32	0,72	$4,6 \cdot 10^4$
12.08.	Uranin	1,05	$90 \cdot 10^3$	170	565	47	0,81	$3,4 \cdot 10^4$
12.08.	Rhodamin C	1,07	$106 \cdot 10^3$	184	400	29	0,87	$3,7 \cdot 10^4$
13.08.	Uranin	0,77	$86 \cdot 10^3$	166	370	43	0,70	$5,4 \cdot 10^4$
13.08.	Rhodamin C	0,63	$33 \cdot 10^3$	102	240	27	0,59	$4,5 \cdot 10^4$
15.08.	Uranin	1,11	$192 \cdot 10^3$	247	360	30	0,64	$2,4 \cdot 10^4$

der Zeit für das Erreichen dieses Maximums  $t_{\max}$  mit folgender Gleichung dargestellt werden:

$$R_{\max} = 2 P t_{\max} \quad (5)$$

Dabei ist  $2P$  — die Verlagerungsgeschwindigkeit des relativen Maximums der Funktion  $R = f(t)$  vom Mittelpunkt des Flecks und  $P$  — die wahrscheinliche Diffusionsgeschwindigkeit, die nach [4] etwa bei 1 cm/s liegt.

Für zwei Farbfleckversuche, die im Jahre 1968 durchgeführt wurden und bei denen es gelang,  $R_{\max}$  und  $t_{\max}$  zu bestimmen, hatte  $P$  den Wert 0,87 bis 0,97 cm/s. Im Jahre 1969 wurden Luftbilder von Farbflecken im Stadium der Ausbreitung von Flecken aufgenommen, die nicht den Wert von  $S_{\max}$  erreichten. Für die Bestimmung von  $R_{\max}$  benutzten wir die Gleichung, die in [3] angeführt ist und die bei der Auflösung der Gleichung für die Diffusion von einer Punktquelle ermittelt wurde:

$$R_{\max} = 0,858 C x_t \quad (6)$$

Dabei haben  $C$  und  $x_t$  die bereits genannten Werte.

Die Werte für  $x_t$  wurden der graphischen Darstellung auf der Abb. 3a entnommen, während  $C$  nach der Formel (4) bestimmt wurde. Nachdem  $R_{\max}$  bekannt war, berechneten wir  $t_{\max}$  nach Formel (3), in der für jeden Versuch die Konstanten  $a$  und  $b$  konkrete Werte haben.

Nach den Unterlagen der Luftbildaufnahmen aus dem Jahre 1969 lagen die Werte für  $P$  in den Grenzen zwischen 0,59 und 0,87 (Tab. 1). Wir ermittelten ebenfalls die Werte für  $P$  anhand der Angaben  $R_{\max}$  und  $t_{\max}$  aus den Versuchen mit Luftbildaufnahmen der japanischen Forscher (ITO, u. a. [3]; FUSHIMOTO, TANAKA [1]), die im Bereich zwischen 0,42 und 0,80 cm/s lagen.

Die Werte für  $P$ , die von uns nach Luftbildaufnahmen in den Jahren 1968/69 ( $P = 0,59$  bis  $0,97$  cm/s) und anhand der Angaben japanischer Forscher ermittelt wurden, liegen in der gleichen Größenordnung, wie sie von uns bei Versuchen mit treibenden Schwimmern im küstennahen Bereich für Prozesse kleinen Maßstabs (1 cm/s) und wie sie ebenfalls von JOSEPH und SENDNER [4] für großmaßstäbliche Prozesse (0,8 bis 1,5 cm/s), von JOSEPH und Mitautoren [5] für Prozesse mittleren Maßstabs (0,2 bis 0,4 cm/s) und anderen Autoren erzielt wurden.

Zur Bestimmung der Koeffizienten für die horizontale Diffusion nach der Veränderung der Fläche eines diffundierenden Flecks kann man die Formel von RICHARDSON-STOMMEL (ZAC, ANDRJUŠČENKO [9]) benutzen. Wenn man annimmt, daß die Größenänderung des Flecks durch die Veränderung seines Durchmessers  $D$  charakterisiert werden kann, und wenn man eine Analogie zwischen  $\Delta l$  (Veränderung des Abstands zwischen den schwimmenden Indikatorpartikeln in der Zeit  $\Delta t$ ) und  $\Delta D$  für Farbflecken zwischen zwei aufeinanderfolgenden Zeitpunkten der Luftbildaufnahme zieht, kann man dies wie folgt darstellen:

$$K_D = \frac{(\Delta D)^2}{2 \Delta t} \quad (7)$$

Die Berechnungsergebnisse für  $K_D$  anhand der Versuche aus dem Jahre 1968 werden in [9] angeführt. Für die Versuche der Jahre 1968/69 liegen die für jeden der Versuche gemittelten Werte für  $K_D$  im Bereich zwischen  $1,4 \cdot 10^3$  und  $4,5 \cdot 10^3$   $cm^2/s$  für eine Mittelwertperiode von  $\Delta t = 15$  min und im Bereich zwischen  $1,6 \cdot 10^4$  und  $5,4 \cdot 10^4$   $cm^2/s$  für  $\Delta t = 30$  min. Dies trifft für Erscheinungsmaßstäbe (Flächendurchmesser) von einigen zehn bis hundert Metern zu. Die Werte für  $K_D$  wurden mit den Werten für  $K_l$  verglichen, die anhand der Drift von frei schwimmenden Spieren in der Driftzone der Flecken ermittelt wurden. Für  $\Delta t = 30$  min wurde eine verhältnismäßig gute Übereinstimmung erzielt, da sich die Werte für  $K_l$  im Bereich von  $2,2 \cdot 10^4$  und  $7,0 \cdot 10^4$   $cm^2/s$  veränderten.

Die Berechnung für  $K$  nach der Formel von JOSEPH und SENDNER

$$K = \frac{P R}{2} \quad (8)$$

(der die Hypothese von der linearen Abhängigkeit des Wertes  $K$  vom Erscheinungsmaßstab, d. h.  $K \sim R$  zugrunde liegt) zeigte, daß sich  $K$  im Bereich von  $10^3$  bis  $10^4$   $cm^2/s$  für die in Tab. 1 angeführten Werte  $P$  und  $R$  ändert.

Es ist von Interesse, den Charakter der Abhängigkeit der horizontalen Diffusionskoeffizienten vom Maßstab der Erscheinung (oder von der Größe des Flecks, die mit  $R$  bzw.  $D$  ausgedrückt werden) zu bestimmen. Ausgehend von der Gleichung

$$K_D = c D^{\frac{2(n-1)}{n}}, \quad (9)$$

die analog zu der in [9] angeführten Beziehung ist, sehen wir, daß der Exponent bei  $D$  für die oben erhaltenen Werte von  $n$  (0,45 bis 2) nicht über 1,0 liegt, d. h. nach den Angaben der Versuche mit Luftbildaufnahmen von Farbflecken trifft das „4/3-Gesetz“ für die obengenannten Erscheinungsmaßstäbe nicht zu.

Die oben unterbreiteten Angaben zeigen, daß die Untersuchungen von Diffusionsprozessen nichtstationärer Flächen mit Hilfe der Luftbildmethoden sehr wichtige Ergebnisse liefern können und eine große Perspektive haben.

Die Autoren möchten ihren Dank an Ing. ROZMAN, der eine sorgfältige Bearbeitung der Luftbildunterlagen vorgenommen hat, und allen Mitarbeitern übermitteln, die an den komplizierten Experimenten zur Anfertigung von Luftbildaufnahmen von Farbflächen auf See teilgenommen haben.

#### Literatur

- [1] FUSHIMOTO, M. und TANAKA, K., Dye Diffusion Experiments in the Ocean by Use of Aerial Photography. *J. Japan Soc. Photogramm.* 7, No. 1 (1968), S. 8–20.
- [2] FUCUDA, M., ITO, N. und SAKAGISHI, S., Diffusion Phenomena in Coastal Areas. *Proc. 2-nd Inter. Conf. on Water Pollution Research* vol. 3, Tokyo (1965), S. 193–204.
- [3] ITO, N., FUCUDA, M. und TANIGAWA, V., Small-scale Horizontal Diffusion near the Coast. *Disposal of Radioactive Wastes into Seas, Oceans and Surface Waters*. Wien 1966, S. 471–482.
- [4] JOSEPH, J. und SENDER, H., Über die horizontale Diffusion im Meere. *Dt. Hydrogr. Zeitschr.* 11, H. 2, (1958), S. 49–77.
- [5] JOSEPH, J., SENDER, H. und WEIDEMANN, H., Untersuchungen über die horizontale Diffusion in der Nordsee. *Dt. Hydrogr. Zeitschr.* 17, H. 2, (1964), S. 57–75.
- [6] KATZ, B., GERARD, R., COSTIN, M., Response of Dye Tracers to Sea Surface Conditions. *J. Geophys. Res.* 70, No. 22 (1965), S. 5505–5513.
- [7] NAN'NITI, T., Some observed Results of Oceanic Turbulence. *Studies on Oceanography*, 1964, S. 211–215.
- [8] PRITCHARD, D. W., OKUBO, A. und CARTER, H., Observation and Theory of Eddy Movement and Diffusion of an Introduced Tracer Material in the Surface Layers of the Sea. *Disposal of Radioactive Wastes into Seas, Oceans and Surface Waters*. Wien 1966, S. 397–424.
- [9] ZAC, W. I. und ANDRJUŠČENKO, B. F., Untersuchung von Prozessen der horizontalen turbulenten Diffusion von Beimengungsflecken auf See mit Hilfe der Luftbildphotographie (russ.). *Materialien des III. Unionssymposiums zu Fragen der Selbstreinigung von Wasserspeichern und der Vermischung von Abwässern*. 1969, S. 56–65.

Anschrift der Verfasser

Dr. B. F. ANDRJUŠČENKO, Dr. V. I. ZAC  
 Institut Biologii Južnych Morei AN USSR  
 UdSSR, Sevastopol, Nachimova 2

## Untersuchung der Vermischungs- und Verdünnungsprozesse von Verunreinigungen in Abwassereinleitungsgebieten im Meer mit Hilfe fluoreszierender Indikatoren

V. I. ZAC und M. S. NEMIROVSKIJ

Zur Untersuchung der Intensität von Ausbreitung, Vermischung und Verdünnung von Fremdstoffen im Meer (Abwässer oder andere Arten von Fremdstoffen) wird in den letzten Jahren in breitem Maße die Methode der naturgetreuen Modellierung von Diffusionsprozessen im Meer angewandt. Diese Methode besteht im künstlichen Ausbringen von fluoreszierenden Farbstoffen, wie Uranin, Rhodamin u. a., ins Meer und in der nachfolgenden Untersuchung der räumlichen und zeitlichen Veränderung der Farbstoffkonzentration in nichtstationären diffundierenden Flecken oder in stationären Strahlen. Aus den Angaben einer Vielzahl von Forschern (KARABAŠEV, OZMIDOV [3]; KARABAŠEV [2]; PRITCHARD, CARPENTER [4]; JOSEPH, SENDNER, WEIDEMANN [1] u. a.) geht hervor, daß fluoreszierende Farbstoffe durchaus geeignete Indikatoren für die genannten Zwecke sind. Sie sind in ausreichendem Maße passiv und konservativ unter den Bedingungen des Meeres. Die Diffusionsversuche mit künstlich im Meer ausgebrachten Farbflecken oder -strahlen imitieren sehr anschaulich die Diffusionsprozesse von Fremdstoffen im Meer. Zur Untersuchung der Konzentrationsverteilung der Farbstoffe benutzen ausländische Forscher Fluorometer vom Typ TURNER (PRITCHARD, CARPENTER [4]; JOSEPH, SENDNER, WEIDEMANN [1] u. a.). Im Institut für Ozeanologie der Akademie der Wissenschaften der UdSSR wurde von G. S. KARABAŠEV [2] für diese Untersuchungen ein Schleppfluorometer entwickelt, mit dem die Farbstoffkonzentration in situ ermittelt werden kann, was im Vergleich zum TURNER-Fluorometer einen Fortschritt darstellt.

Neben Versuchen zur naturgetreuen Modellierung der Diffusion von Farbstoffen aus verschiedenen Quellen bietet die Methode der fluoreszierenden Indikatoren die Möglichkeit, die Prozesse der Anfangs- und der horizontalen Verdünnung (und einer Reihe anderer Charakteristika von Turbulenzerscheinungen) in Gebieten der Abwassereinleitung ins Meer mit Hilfe bestehender, unter Wasser liegender Abflußleitungen zu untersuchen. Unter der Anfangsverdünnung versteht man im allgemeinen die Verdünnung vom Austrittspunkt der Abwässer bis zur Spitze der „Fackel“, d. h. auf dem Wege des vertikalen Aufstiegs des Abwasserstrahls. In einer bestimmten Tiefenschicht (oder an der Meeresoberfläche) werden die Abwässer durch die Strömung erfaßt und in Form

eines horizontalen Strahls auseinandergezogen bzw. versetzt. Die Verdünnung längs des Strahls wird als horizontale oder auch als Hauptverdünnung bezeichnet. Die Kenntnis des Verdünnungsgrades des Abwasserfeldes in der Einleitungszone und in Strömungsrichtung ist ein wichtiges Charakteristikum für den Betrieb der jeweiligen Abwassereinleitung. Durch diese Kenntnis ist es möglich, die Frage der durch hydromechanische Faktoren bedingten Selbstreinigung des Meeres zu beurteilen. Durch die Analyse der Wirksamkeit von Einleitungsstellen für Abwässer sowie auf der Grundlage von Versuchen mit einer naturgetreuen Modellierung des Strahls mittels fluoreszierender Indikatoren (für von vornherein festliegende Verhältnisse) können optimale Wege zur Beseitigung der Abwässer im Meer gefunden werden, was durch einen maximalen Vermischungs- und Verdünnungsgrad erreicht werden soll.

Derartige Versuche zur Ermittlung des Verdünnungsgrades im Bereich der Abwassereinleitung wurden von uns an einem Punkt an der Südküste der Krim mit Hilfe fluoreszierender Indikatoren in den Jahren 1969–1970 durchgeführt.

In der vorliegenden Arbeit werden einige Ergebnisse dieser Untersuchungen angeführt, die mit halbempirischen Berechnungsmethoden des Verdünnungsgrades verglichen werden.

Um die Konzentration der fluoreszierenden Farbstoffe in situ zu messen, wurde von einem der Verfasser (M. S. NEMIROVSKIJ) auf der Grundlage eines von G. S. KARABAŠEV [2] gebauten Geräts ein Schlepp-Fluorometer entwickelt. Die Optik des Gerätes wurde auf das Uraninspektrum abgestimmt. Die fluoreszierenden Farbstoffe Uranin und Rhodamin C verfügen über eine große Lumineszenzstrahlung im sichtbaren Bereich des Spektrums. Das Maximum der Absorptionskurve für Fluoreszein liegt bei 490 nm und für Rhodamin S bei 555 nm.

Die Meßvorrichtung des Fluorometers besteht aus einem unter Wasser geschleppten Teil, in dem sich ein Erreger und ein Empfänger für die Lumineszenzstrahlung befinden. Diese sind nach dem klassischen Vorbild eines Photometers aufgebaut. Weiterhin setzt sich die Meßvorrichtung aus dem an Bord des Schiffes befindlichen Teil zusammen, und zwar handelt es sich hierbei um das Netz-, Steuer- und Registriergerät.

Für die Arbeit in den oberen Meeresschichten am Tage wurde ein besonderes Lichtfilter verwendet, das den Einfall von Tageslicht in den Photovervielfacher verhinderte. Das Tiefertauchen des Gerätes während der Fahrt des Schiffes wird durch hydrodynamische Leitflossen erreicht. Die Tauchtiefe des Gerätes kann an einem elektrischen Druckgeber (Rheostat) kontrolliert werden. Die Intensität der Lumineszenzstrahlung, die in bestimmten Bereichen direkt von der Farbstoffkonzentration abhängt, wird mit einem elektronischen Potentiometer EPP-09 registriert. Die reale Empfindlichkeit des verwendeten Fluorometers beträgt  $1 \cdot 10^{-10}$  g/ml, der dynamische Bereich etwa 80 Dezibel. Vor Beginn der Messungen im Seegebiet wird das Gerät geeicht. Dies geschieht mit Hilfe von Kontrollfarblösungen, die mit dem Seewasser des vorgesehenen Arbeitsortes angesetzt werden. Dabei werden im wesentlichen Maße Fehler aus-

geschlossen, die durch das Zusammenwirken der chemischen Komponenten sowie der Suspensionen im Meerwasser mit dem Farbstoff hervorgerufen werden können.

Die Untersuchungen wurden im Bereich einer Abflußstelle für Abwässer durchgeführt, die in einer Tiefe von 16 m und 500 m von der Küste entfernt lag.

Die Uraninlösung wurde in das Kanalisationsrohr unmittelbar am Uferstreifen über einen Schlauch mit einer konstanten Menge und mit konstanter Konzentration eingeführt. Der Abwasserdurchlauf stand während des Versuchs unter Kontrolle. Da die Menge der Farbstofflösung und ihre Konzentration bei der Zuführung in die Kanalisation sowie der Abwasserdurchlauf bekannt waren, konnte die Konzentration des Farbstoffs  $C$  im Abwasser ermittelt werden. Die Mittelwerte des Abwasserdurchlaufs und die Konzentrationswerte der Uraninlösung während der Versuche gehen aus Tab. 1 hervor. Der Austritt des mit Uranin versetzten Abwassers, der Aufstieg der „Fackel“ an die Meeresoberfläche und die Schnittprofile quer zum Abwasserstrahl sind aus Abb. 1 ersichtlich.

Mit Hilfe des Fluorometers wurden die Farbstoffkonzentration im Bereich der „Fackelspitze“, d. h. bei Erreichen der Meeresoberfläche durch das Abwasser sowie die Konzentrationen in verschiedenen Tiefen und auf verschiedene Entfernungen längs zum Strahl gemessen.

Durch die Kenntnis der Uraninkonzentration  $C$  (g/ml) im Abwasser der Rohrleitung und der Farbstoffkonzentration an der Meeresoberfläche und der „Fackelspitze“ (Tab. 1) konnte der anfängliche Verdünnungsgrad  $N$  ermittelt

Tabelle 1

Werte der Uraninkonzentration und Verdünnungswerte an der Abwasserableitung während der Versuche 1969/1970 und anhand von Berechnungen

Nr. des Versuchs	Werte anhand der Versuche					Werte anhand von Berechnungen	
	$C$ Uraninlösung (g/ml)	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	$C$ (g/ml)		$N_H$	$N_H$	
			in der Rohrleitung unmittelbar vor dem Austritt	an der Spitze der „Fackel“		nach RAHM und CEDERWALL [5]	nach RAWN und Mitautoren [6]
1969							
1.	$1,0 \cdot 10^{-2}$	0,0434	$1,25 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-8}$	$9,6 \cdot 10^2$	43	44
1970							
2.	$1,2 \cdot 10^{-2}$	0,0107	$6,49 \cdot 10^{-5}$	$4,0 \cdot 10^{-8}$	$16,2 \cdot 10^2$	104	70
3.	$8 \cdot 10^{-3}$	0,0106	$6,17 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{-8}$	$25,4 \cdot 10^2$	104	70

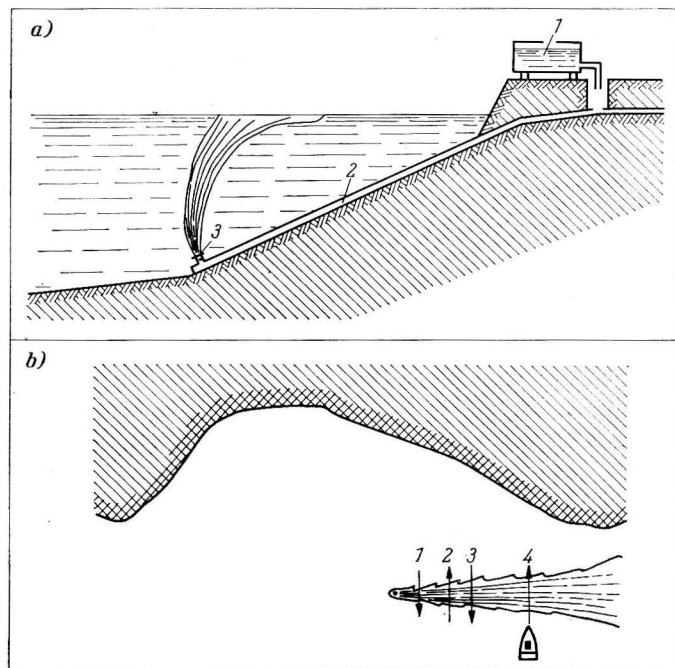


Abb. 1. Schema des Farbstoffaustritts und der Überläufe quer zum gefärbten Abwasserstrahl:

a) Austritt des Farbstoffs aus der unter Wasser liegenden Rohrleitung

1 — Behälter mit Uraninlösung;

2 — Unterwasser-Rohrleitung;

3 — Aufstieg der „Abwasserfackel“ aus einer senkrechten Düse

b) Gefärbter Abwasserstrahl in der Draufsicht

1, 2, 3, 4 sind die Nummern der Querschnitte, auf denen mehrfache Messungen der Farbstoffkonzentration im Strahl erfolgten

werden, der bestimmt wurde 1. durch den Vermischungsprozeß auf dem Aufstiegsweg des Abwasserstrahls im Meer bis zur „Fackelspitze“ und 2. durch die Vermischungsprozesse der Abwässer in der Rohrleitung selbst, die teilweise mit Seewasser gefüllt war<sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> Da der für die Zeit der Versuche vorhandene tatsächliche Abwasserdurchlauf bei dieser Abflußleitung um einiges geringer war als die projektierte Durchlaßfähigkeit der Rohrleitung (sie ist für die Perspektive berechnet), führte die nicht vollständige Auslastung der Leitung zu ihrer teilweisen Füllung mit Seewasser. In diesem Fall wird das Abwasser bereits in der Rohrleitung mit Seewasser gemischt. Bei einer Annäherung des tatsächlichen Abwasserdurchlaufs an die ausgelegte Durchlaßfähigkeit der Rohrleitung wird ein derartiger Vermischungsprozeß fortfallen.

Dieser Wert wird durch folgende Gleichung charakterisiert:

$$N_H = \frac{C_1}{C_2}, \quad (1)$$

wobei

$C_1$  — die Uraninkonzentration im Abwasser der Rohrleitung (an der Zugabestelle des Farbstoffs) in g/ml,

$C_2$  — die Uraninkonzentration an der Meeresoberfläche in dem Bereich, wo die „Fackel“ auftaucht.

Nach den Versuchen im Jahre 1969 beträgt  $N_H = 9,6 \cdot 10^2$  und nach den Versuchen im April 1970 wurde für  $N_H = 16,2 \cdot 10^2$  bzw.  $25,7 \cdot 10^2$  (Tab. 1) ermittelt.

Die vertikale Verteilung der Farbstoffkonzentration (Maximalkonzentration)  $C$  während der Versuche 1970 ist aus Abb. 2 ersichtlich. Derartige graphische Darstellungen geben die Möglichkeit,  $N$  an der Spitze der „Fackel“ und in jeder beliebigen Tiefenschichtung zu ermitteln.

Bei den Versuchen 1969 wurden längs des Strahls Signalbojen in einem Abstand von 100 und 200 m von der Stelle angebracht, an der die „Fackel“ die Meeresoberfläche erreichte. Der Strahl wanderte fast normal zur Küste aus und drehte anschließend längs zur Küstenlinie. Der Versuch wurde in einer homogenen Wasserschicht und bei Windstille durchgeführt. Während des Versuchs wurde die „Fackel“ (der Strahlbeginn) mehrere Male quer durchlaufen. Das gleiche geschah auch in einer Entfernung von 100 und 200 m. Die Farbstoffkonzentration wurde mit Hilfe des Schlepp-Fluorometers in situ in einer dünnen Oberflächenschicht von 0,1 bis 0,2 m und in einer Tiefe von 5 m gemessen. Das

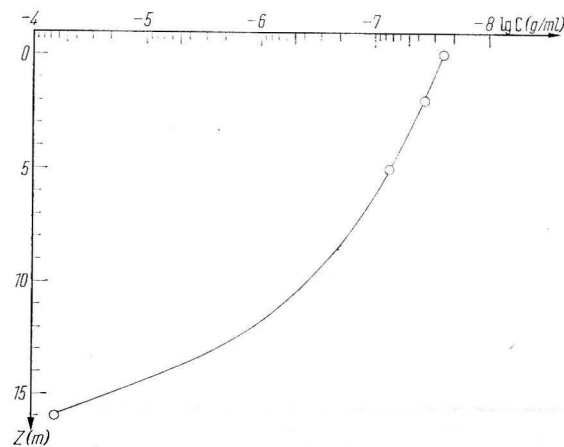


Abb. 2. Vertikale Verteilung der Farbstoffkonzentration in der „Abwasserfackel“ (von der Austrittsstelle bis zur Meeresoberfläche) bei Versuchen im Jahre 1970

Meßgerät wurde von einem Schiff mit einer Geschwindigkeit von 3,1 m/s (etwa 6 Knoten) geschleppt. Das Gerät befand sich dabei in einem Abstand von 2,5 m von der Bordwand des Schiffes, wodurch die Konzentration in einer nicht verwirbelten Schicht gemessen werden konnte. Während der Versuche im April 1970 wurden mehrere Messungen an der Spitze der „Fackel“ vorgenommen und eine Reihe Überläufe in einem Abstand von 50, 100, 150 und 266 m von der „Fackel“ gefahren. Der Abwasserstrom lag längs zur Küste. Die Wasserschicht war in bezug auf die Dichte homogen.

Die mittleren Profile für die Verteilung der Farbstoffkonzentration auf den Querschnitten des Strahls sind für 15 Überläufe auf Abb. 3 dargestellt. Die Breite des Strahls wird beim Überlauf durch die Empfindlichkeitsschwelle des Geräts von  $1 \cdot 10^{-10}$  g/ml begrenzt. Die mittleren Profile der Konzentration bestätigen die durch die Theorie vorausgesagte Verteilung auf den Strahlquerschnitten nach einer GAUSS-Verteilung. Die Schwankungen der  $C_{\max}$ -Werte für die verschiedenen Strahlquerschnitte überschreiten bei den einzelnen Überläufen eine Größenordnung nicht. Für den Fall einer konstanten Versetzung des Strahls längs zur Küste (April 1970) lagen die Abweichungen wesentlich niedriger als für die Versetzung auf einer Normalen zur Küste (August 1969). Für einzelne

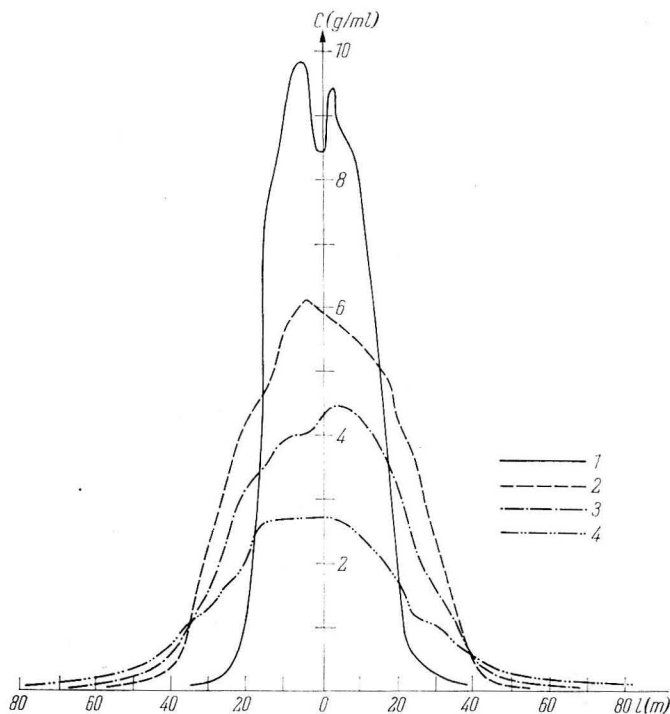


Abb. 3. Mittlere Profile der Verteilung der Farbstoffkonzentration  $C$  (g/ml) nach mehrmaligen Messungen auf den Querschnitten 1, 2, 3, 4 bei den Versuchen im Jahre 1970

Überläufe erreichte der horizontale Konzentrationsgradient in unmittelbarer Nähe der „Fackel“ 30 bis 40 Dezibel pro Meter, während die horizontalen Gradienten in einer Entfernung von 100 m und erst recht bei 200 m selten 10 db/m überstiegen.

Von Interesse ist es, die durch die Versuche erhaltenen Ergebnisse mit einigen halbempirischen Berechnungsmethoden für die Anfangsverdünnung zu vergleichen, obwohl ein derartiger Vergleich etwas willkürlich ist.

Anfangen von der fundamentalen Arbeit von RAWN und PALMER [7] wurde bis zum heutigen Tage eine Reihe theoretischer und halbempirischer Berechnungsmethoden für die Verdünnung von Beimengungsstrahlen, die in eine unbewegliche Flüssigkeit eindringen, entwickelt. Unser größtes Interesse fanden die Arbeiten von RAWN, BOWERMAN und BROOKS [6] und von RAHM und CEDERWALL [5], in denen Berechnungsmethoden für die Anfangsverdünnung eines auftauchenden Strahls beim Austritt aus einer unter Wasser gelegenen Rohrleitung vorgeschlagen werden. Diese Methoden sind am geeignetsten für die Abwasserableitung im Gebiet der Krim. Für die Berechnung des anfänglichen Verdünnungsgrades  $N_H$  untersuchten wir nachfolgend die von RAHM und CEDERWALL [5] angeführten Formel:

$$N_H = 0,54 \text{ Fr} \left( \frac{0,38 H}{d_0 \text{ Fr}} + 0,66 \right), \quad (2)$$

$$H/d_0 \geq 0,89 \text{ Fr},$$

wobei

Fr — die FROUDSche Zahl, die den Effekt des auftauchenden Strahls berücksichtigt,

H — Aufstiegshöhe der „Fackel“ des Abwassers. Für unseren Versuch ist es die Tiefe an der Abflußleitung,

$d_0$  — Durchmesser der Diffusoröffnung,

Q — Abwasserdurchlauf und

$\rho_s, \rho_{abw}$  — Dichte des Seewassers und der Abwassers.

$$\text{Fr} = \frac{4 Q}{\pi d_0^2 \sqrt{\frac{\rho_s - \rho_{abw}}{\rho_{abw}} g d_0}}. \quad (3)$$

Die Ausgangswerte für die Berechnung der FROUDSchen Zahl Fr und von  $N_H$  waren für den Versuch im August 1969 folgende:

$$Q = 0,0434 \text{ m}^3/\text{s}; d_0 = 0,3 \text{ m}; H = 16 \text{ m}; \rho_s = 1,011; \rho_{abw} = 1,000.$$

Obwohl bekannt war, daß die untersuchte Abwasserableitung zur Zerstreuung des Abwassers aus fünf Diffusoren (senkrechten Düsen) bestand, die sich am Endstück der Rohrleitung befanden, wurde während der Versuche eine „Hauptfackel“ sichtbar, die sich aus der ersten Düse entwickelte, und eine sehr schwache „Fackel“ aus der zweiten Düse. Aus den letzten drei Düsen traten nach Beobachtungen von Tauchern keine Abwässer aus. Dies läßt sich dadurch erklären,

daß gegenwärtig der Abwässerdurchlauf wesentlich geringer ist als die ausgelegte Durchlaßfähigkeit der Rohrleitung, wodurch bereits ein bis zwei Düsen für den Abwasseraustritt ausreichend sind. Bei Erreichen der ausgelegten Durchlaßfähigkeit werden die Abwässer aus allen fünf Düsen austreten. Taucher stellten bei den Beobachtungen fest, daß sich die „Hauptfackel“ aus der ersten Düse mit der schwachen „Fackel“ der zweiten Düse zu einer senkrechten „Fackel“ in einer Entfernung von einigen Metern von der Austrittsstelle vereinigt.

Ausgehend von diesen Erwägungen betrachteten wir die Austrittsstelle der Abwässer als eine ununterbrochen wirkende Punktquelle, natürlich mit einer gewissen Toleranz. Aus diesem Grunde wurden die Werte für  $N$  nach den bereits genannten Methoden berechnet.

Der nach den obengenannten Angaben ermittelte Wert  $Fr$  beträgt  $Fr = 3,41$ . Somit ist nach der Formel (2)  $N_H = 43$ . Anhand des Wertes für  $Fr$  und der Größe  $H/d_0$  kann  $N_H$  nach der Graphik 7 in [6] bestimmt werden. Dabei wurde für  $N_H$  der Wert 44 ermittelt. Der anfängliche Verdünnungsgrad, der nach den Angaben verschiedener Autoren für die Versuche von 1969 berechnet wurde, zeigte keine großen Abweichungen und beträgt 43–44 (Tab. 1).

Bei den Versuchen vom April 1970 erhielten wir folgende Ausgangswerte:  $Q = 0,0106 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $q_s = 1,014$ . Alle anderen Parameter entsprachen den bereits genannten Größen. Für  $N_H$  wurde nach Formel (2)  $N_H = 104$  ermittelt, während nach der Graphik aus [6]  $N_H \approx 70$  betrug.

Ausgehend davon lag der theoretische Grad der Anfangsverdünnung bei einer Punktquelle für die Versuche von 1969/1970 wesentlich niedriger, als dies bei den Versuchen mit der Konzentrationsverteilung eines fluoreszierenden Farbstoffs festgestellt wurde ( $N_{\text{theor.}} \ll N_{\text{Vers.}}$ ), und zwar

- a) für die Versuche 1969 fast 20mal niedriger;
- b) für die Versuche 1970 fast 16- bis 25mal niedriger (Tab. 1).

Ein derartiger Vergleich ist in bestimmten Maße nur mit Vorbehalt möglich, da man eine Reihe von Umständen anführen kann, die offenkundig Abweichungen zwischen den theoretischen und den experimentellen Werten zulassen:

1. Bei der theoretischen Berechnung des Grades der Anfangsverdünnung (auf der Grundlage bestehender Methoden) wurde angenommen, daß die Abwässer in einem unbeweglichen Medium aufsteigen und sie in unmittelbarer Nähe der Ableitungsstelle an die Oberfläche treten. Es war jedoch so, daß durch die vorhandene Strömung (die eine seitliche Versetzung zur Folge hatte) der Abwasserstrahl den Weg von der Einleitungsstelle bis zur Oberfläche (oder bis zu einem anderen Tiefenhorizont abhängig vom Grad der Dichteschichtung des Wassers) auf einer gekrümmten „Flugbahn“ (Kurve) zurücklegt, wodurch sich die effektive Länge des Vermischungsweges erheblich verlängern kann. Das kann im Endergebnis zu einer größeren Verdünnung führen. So kommt es zum Beispiel bei einer Vergrößerung der effektiven Tiefe von 16 auf 20 m (wenn alle anderen Bedingungen gleich bleiben) zu einem Anwachsen des Grades der Anfangsverdünnung um fast 40%.

2. Die theoretische Berechnung der Anfangsverdünnung ergibt eine Abnahme der Konzentration auf der Achse der Abwasserfackel. Beim Schleppen des Fluorometers durch die „Fackel“ ist es nicht immer möglich, genau die Achse der „Fackel“ zu erfassen. Die Konzentration des Indikators an der Peripherie oder an den Rändern der „Fackel“ liegt jedoch bedeutend niedriger als auf der Achse. Diese Abweichung kann bis zu einem Minimum verringert werden, wenn die Zahl der einzelnen Überläufe entsprechend erhöht und die Werte anschließend gemittelt werden.
3. Bei der Ermittlung des Verdünnungsgrades  $N$  mit theoretischen Methoden, d. h. auf der Grundlage von Berechnungen, wird angenommen, daß die in die Berechnung einbezogenen Ausgangswerte feststehende konstante Größen sind. Aber die Werte, wie  $Q$ ,  $q_s$ ,  $q_{\text{abw}}$ , veränderten sich jedoch sogar während der Versuche in bestimmten Grenzen. Weiterhin änderte sich die Strömung (die Stromgeschwindigkeit, die zeitlichen Pulsationen u. a.), die den Turbulenzgrad und damit auch die Intensität der vertikalen Versetzung des aufsteigenden Strahls beeinflußt.

Dies zeigt, daß die beobachteten Abweichungen zwischen den Verdünnungsgraden, die auf experimentellem und auf rechnerischem Wege ermittelt wurden, durchaus erklärbar sind und eine exakte Organisation der Versuche erfordern. Um den eventuellen Einfluß der Vermischung der Abwässer in der Rohrleitung selbst (wenn diese teilweise mit Seewasser gefüllt ist) einschätzen zu können, wurde das Fluorometer von Tauchern unmittelbar an der Austrittsöffnung der Diffusordüse angebracht. Es stellte sich heraus, daß die Uraninkonzentration am Düsenaustritt die gleiche Größenordnung aufwies wie in der Rohrleitung an der Zugabestelle des Farbstoffs.

Daher kann festgestellt werden, daß die während der Versuche ermittelte Anfangsverdünnung der Abwässer  $N_H$  auf dem Wege vom Austritt aus der Diffusordüse bis zur „Fackelspitze“ der Abwässer vor sich geht und daß  $N_{\text{Vers.}} \gg N_{\text{theor.}}$ . Die Größe  $N_{\text{theor.}}$  ist die minimale Anfangsverdünnung (auf der Achse der „Fackel“ in einem unbeweglichen Medium). Die tatsächliche Verdünnung unter realen Meeresbedingungen liegt jedoch wesentlich über der theoretischen, und zwar mindestens um eine Größenordnung.

Abschließend sei darauf hingewiesen, daß die Möglichkeit der Untersuchung von Prozessen der Anfangsverdünnung mit Hilfe von fluoreszierenden Indikatoren durch Einsatz eines Schlepp-Fluorometers eine große Bedeutung hat. Es ist so, daß bei tiefliegenden Austrittsstellen von Abwässern der Verdünnungsgrad beim vertikalen Aufstieg der „Fackel“ um das Zehn- bis Hundertfache höher liegt als der horizontale Verdünnungsgrad (auf eine Entfernung von etwa einem und von mehreren Kilometern von der Quelle).

Die Untersuchung der Verdünnungsprozesse an vorhandenen Ableitungsstellen für Abwasser, verbunden mit Versuchen anhand naturgetreuer Modelle (für beliebige vorgegebene Bedingungen), ermöglicht es, optimale Wege und Verfahren festzulegen, die für eine rationelle Ableitung der Abwässer erforderlich

sind. Dies erweist sich als notwendig, um die maximal mögliche und erforderliche Vermischung und Selbstreinigung zu erzielen, die auf der Wirkung der hydro-mechanischen Faktoren beruht (vertikaler Aufstieg durch das archimedische Prinzip, Strom, Prozesse der turbulenten Vermischung u.a.).

Die Autoren rechnen es sich als eine angenehme Pflicht an, R. V. OZMIDOV und G. S. KARABAŠEV ihren Dank für die erwiesene Aufmerksamkeit und die Unterstützung bei der Ausführung der genannten Untersuchungen aussprechen zu dürfen.

#### Literatur

- [1] JOSEPH, J., SENDNER, H. und WEIDEMANN, H., Untersuchungen über die horizontale Diffusion in der Nordsee. Dt. Hydrographische Zeitschr. **17**, Nr. 2 (1964) S. 57–75.
- [2] KARABAŠEV, G. S., Das photoelektrische Unterwasser-Fluorometer (russ.). Trudy Institut Okeanologii AN SSSR **77** (1965), S. 110–150.
- [3] KARABAŠEV, G. S. und OZMIDOV, R. V., Untersuchung der turbulenten Diffusion von Fremdstoffen im Meer mit Hilfe fluoreszierender Indikatoren (russ.). Izvestija Akad. Nauk SSSR, Ser. fizika atm. i okeana **I**, No. 11 (1965), S. 1178–1189.
- [4] PRITCHARD, D. W. and CARPENTER, J. H., Measurements of Turbulent Diffusion in Estuarine and Inshore Waters. Bull. Inter. Assoc. Sci. Hydrol. **20** (1960), S. 37–50.
- [5] RAHM, S. L. und CEDERWALL, K., Submarine Disposal of Sewage. Inter. Congress Inter. Assoc. Hydraul. Res., 2.17, Leningrad 1965, S. 1–7.
- [6] RAWN, A. M., BOWERMAN, A. M. und BROOKS, N. H., Diffusers for Disposal of Sewage in Sea Water. J. Sanit. Eng. Div., Proc. ASCE **86**, SA (1960), S. 65–105.
- [7] RAWN, A. M. und PALMER, H. K., Predetermining the Extent of Sewage Field in Sea Water. Transactions ASCE **94** (1930), S. 1036–1060.

Anschrift der Verfasser:

Dr. V. I. ZAC und Dr. M. S. NEMIROVSKIJ  
Institut Biologii Južnych Morei AN USSR  
UdSSR, Sevastopol, Nachimova 2

## Räumliche statistische Charakteristiken der Konzentrationsschwankungen von Beimengungen nach Versuchen im Schwarzen Meer

A. N. GEZENCVEJ, S. S. MURAV'EV und R. V. OZMIDOV

Eine große Serie von Diffusionsversuchen mit kontinuierlichen punktförmigen Farbstoffquellen (Fluorescein) wurde im Schwarzen Meer vom Institut für Ozeanologie „P. P. Širšov“ der Akademie der Wissenschaften der UdSSR in den Jahren 1966 und 1968 durchgeführt. Die Arbeiten erfolgten von zwei kleinen Schiffen aus mit den von OZMIDOV [1] beschriebenen Methoden und Geräten. Schnitte durch den diffundierenden Farbstoffstrahl erfolgten 1966 in Abständen von 100, 250 und 300 m von der Quelle und im Jahre 1968 in 100, 200 und 400 m Abstand. Im Komplex mit den Messungen wurden hydrometeorologische Beobachtungen über die den Prozeß charakterisierenden Bedingungen ausgeführt. Insbesondere wurden 1968 im Versuchsgebiet zwei Bojenstationen mit mehreren Strömungsmessern BPV-2 in der oberflächennahen Schicht eingerichtet. Die Zahl der Schnitte durch den Tracerstrahl betrug für die oben angeführten Abstände 1966 19, 6 und 11 und 1968 9, 8 und 8.

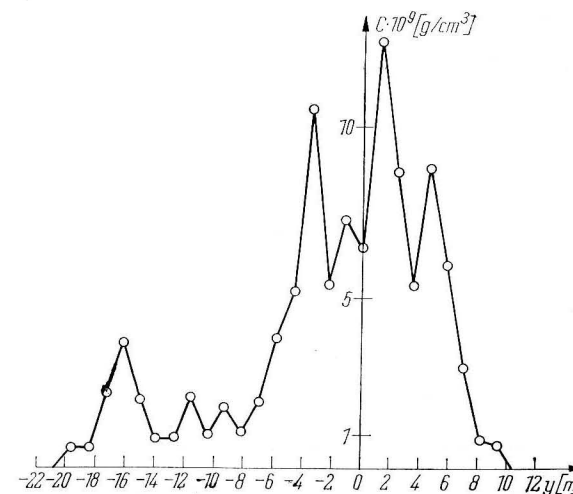


Abb. 1. Beispiel für die Verteilung der Farbstoffkonzentration auf einem Querschnitt durch den diffundierenden Strahl



Das Versuchsmaterial wurde nach folgendem Schema bearbeitet und analysiert. Aus den kontinuierlich registrierten Farbstoffkonzentration wurden diskrete Werte im Abstand  $\Delta y$  entnommen ( $\Delta y$  entsprach bei den Versuchen von 1966 einer Entfernung von 51 und 1968 von 116 cm). Anhand der Eichkurven des Gerätes wurden die tatsächlichen Konzentrationswerte  $c_i(y)$  ermittelt. Abb. 1 zeigt ein Beispiel für die so erhaltene Tracerverteilung in einem Querschnitt durch den Strahl. Wie auch zu erwarten, hat eine solche „momentane“ Verteilung der Konzentration ein ziemlich ungeordnetes Aussehen. Um die mittlere Farbstoffverteilung zu finden, benutzten wir die Mittelung über die Gesamtheit aller  $n$  Kurven, die auf einem Querschnitt durch den Strahl in einer gegebenen Entfernung von der Quelle erhalten wurden. Hierbei fielen die Kurven in den Punkten zusammen, die ihren Schwerpunkten entsprechen. Der Schwerpunkt wurde durch Integration (Summierung) der Flächen unter der Kurve  $c(y)$  von beiden Peripheriezonen aus ermittelt. Die so gemittelten Kurven  $c(y)$  (gebrochene Linien) sind in Abb. 2 (Versuche 1966) und Ab. 3 (Versuche

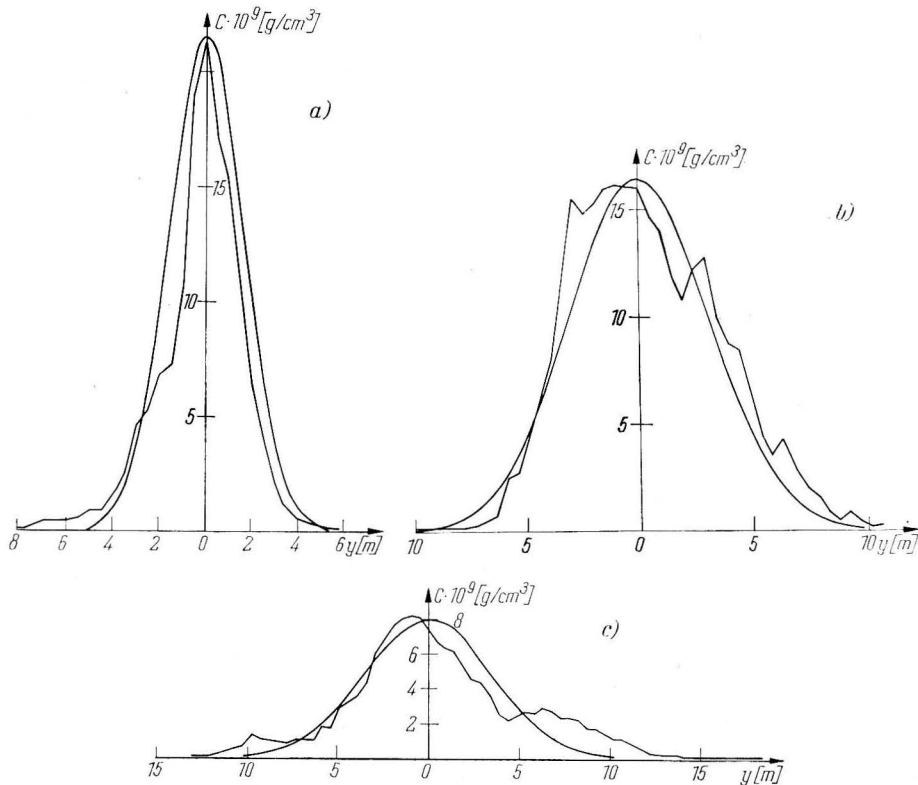


Abb. 2. Gemittelte Verteilung der Farbstoffkonzentration auf den einzelnen Querschnitten durch den Strahl nach den Versuchsergebnisse von 1966.  
a)  $x = 100$  m; b)  $x = 25$  m; c)  $x = 300$  m  
Eingezeichnet sind ferner die theoretischen Verteilungskurven

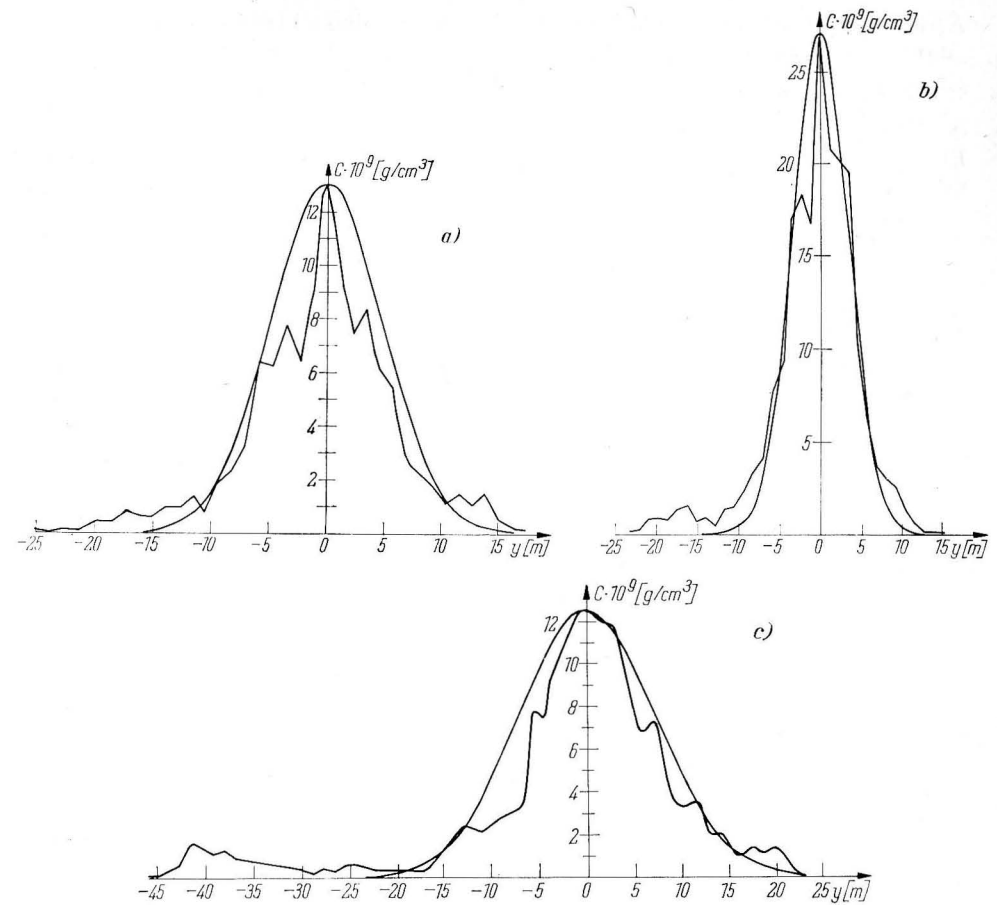


Abb. 3. Gemittelte Verteilung der Farbstoffkonzentration auf den einzelnen Querschnitten durch den Strahl nach den Versuchsergebnisse von 1968.  
a)  $x = 100$  m; b)  $x = 200$  m; c)  $x = 400$  m  
Eingezeichnet sind ferner die theoretischen Verteilungskurven

1968) dargestellt. Auf den gleichen Abbildungen sind die theoretischen Kurven für die Verteilung der Farbstoffkonzentration eingetragen, die wir aus der Lösung der halbempirischen Diffusionsgleichung erhalten haben:

$$\bar{u} \cdot \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} = K_y \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial z^2} \quad (1)$$

Hierbei bedeuten:

- $\bar{u}$  — mittlere Strömungsgeschwindigkeit längs der Strahlachse  $x$ ,
- $z$  — senkrechte Koordinate, in Richtung von der Meeresoberfläche nach unten,

$K_y$  und  $K_z$  — konstante Koeffizienten für die turbulente Diffusion in den entsprechenden Koordinatenachsen.

Die Lösung der Gl. (1) für die kontinuierliche Punktquelle der Leistung  $q$  ( $\text{g s}^{-1}$ ) unter den Bedingungen einer „Widerspiegelung“ der Beimengung an der Ebene  $z = 0$  und eines Grenzwertes der Funktion  $\bar{c}(x, y, z)$  bei  $x \rightarrow \infty$  sieht wie folgt aus:

$$\bar{c}(x, y, z) = \frac{2q}{4\pi x \sqrt{K_y \cdot K_z}} \exp \left[ -\frac{\bar{u} \cdot y^2}{4 \cdot K_y \cdot x} - \frac{\bar{u} \cdot z^2}{4 \cdot K_z \cdot x} \right]. \quad (2)$$

Die Approximation der experimentell bestimmten Verteilungskurven für die Konzentration durch den Ausdruck (2) macht es bei bekannten Werten für  $q, \bar{u}, x$  möglich, die Diffusionskoeffizienten  $K_y$  und  $K_z$  zu ermitteln. Die Genauigkeit der Approximation erhöht sich natürlich bei der Erhöhung der Anzahl der zu mitteln Realisierungen  $n$ . Zur Untersuchung des Einflusses von  $n$  auf die Genauigkeit der Näherung anhand der 1968 durchgeführten Versuche wurde die Größe

$$\delta(n) = \frac{1}{\bar{c}(x, 0, 0) \cdot (N - 1)} \sum_{i=1}^N (\Delta c_{n,i})^2 \quad (3)$$

berechnet. Dabei sind

$\Delta c_{n,i}$  — Differenz zwischen den theoretischen und den nach  $n$  Realisierungen gemittelten Konzentrationswerten im Punkt  $i$ ,

$N$  — Anzahl der Punkte der maximalen diskreten Realisierung im gegebenen Schnitt,

$\bar{c}(x, 0, 0)$  — Wert der gemittelten Konzentration auf der Strahlachse.

Die als Ergebnis der Berechnung erzielten Werte von  $\delta(n)$  sind in Abb. 4 angeführt. Wie aus der Abbildung ersichtlich ist, bleibt der Approximationsfehler nur bei  $n > 10$  relativ klein.

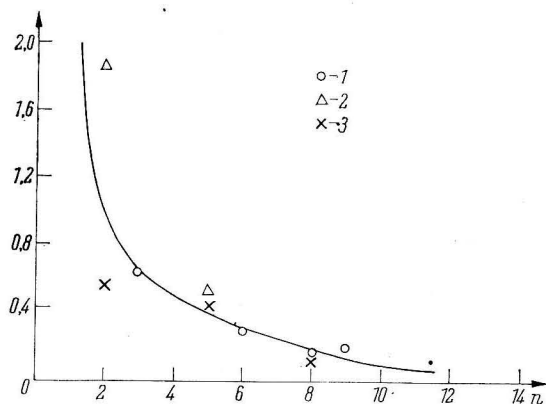


Abb. 4. Abweichung der gemittelten empirischen Farbstoffkonzentration von der theoretischen Kurve bei verschiedenen zur Mittelung verwendeten Realisierungen

Die Werte für die turbulenten Diffusionskoeffizienten  $K_z$  und  $K_y$ , die im Ergebnis der Approximation der experimentellen Profile  $\bar{c}(y)$  durch die theoretischen Kurven (2) ermittelt wurden, sind in Tab. 1 angeführt. Obwohl die

Tabelle 1

Jahr	Abstand von der Quelle (m)	$K_z$ ( $\text{cm}^2/\text{s}^{-1}$ )	$K_y$ ( $\text{cm}^2/\text{s}^{-1}$ )
1966	100	155	42
1966	250	32	64
1966	300	79	67
1968	100	61	88
1968	200	19	29
1968	400	7	71
Mittelwert		59	60

Streuung der Werte für die einzelnen Profile relativ groß ist, kann man trotzdem anhand der erhaltenen Angaben eine interessante Schlußfolgerung über die angenäherte Übereinstimmung der horizontalen und vertikalen Diffusionskoeffizienten ziehen. Ein derartiges, für die Ozeanographie anscheinend paradoxes Resultat steht jedoch in voller Übereinstimmung mit dem von OZMIDOV [1] vorgeschlagenen Schema über die Änderung der turbulenten Austauschkoefizienten mit dem Erscheinungsmaßstab. Danach müssen in den schwach geschichteten Ozeanschichten die Koeffizienten  $K_z$  und  $K_y$  bis zu Erscheinungsmaßstäben in der Größenordnung von einigen zehn Metern die gleiche Größe haben. Nur mit der Zunahme des Maßstabs wird eine Anisotropie des Diffusionsprozesses beobachtet werden, wenn  $K_z < K_y$  wird.

In unserem Falle ist es natürlich, als Erscheinungsmaßstab  $L$  eine Kenngröße für die Breite des diffundierenden Farbstoffstrahls zu nehmen, z. B. den Abstand zwischen den Wendepunkten der Profile  $\bar{c}(y)$ , d. h. den Wert  $L = 2l$ , wobei  $l = \sqrt{(2K_y \cdot x)/\bar{u}}$ . Für  $l$  ergaben sich nach den Versuchswerten von 1966, 168, 326 und 366 cm für  $x = 100, 250$  und  $300$  m, und für 1968 erhielten wir  $l = 490, 340$  und  $720$  cm für die Entfernungen  $x = 100, 200$  und  $400$  m. Mit den so bestimmten Maßstäben  $L$  kann man leicht die Werte der Diffusionskoeffizienten abschätzen, wobei man das bekannte „4/3-Gesetz“ verwendet:  $K = k \cdot L^{4/3}$ , wobei  $k$  einen Wert nahe  $0,01 \text{ cm}^{2/3} \text{ s}^{-1}$  hat (OZMIDOV [1]). Auf diesem Wege erhält man leicht, daß die Diffusionskoeffizienten unter den Bedingungen der 1966 durchgeführten Versuche gleich 23, 56 und  $66 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$  und für die Versuchsbedingungen im Jahre 1968 gleich 97, 60 und  $162 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$  für jeden der Schnitte sein müssen. Wie wir sehen, wird eine volle Übereinstimmung der so errechneten Koeffizienten mit den experimentell bestimmten Werten nicht beobachtet, jedoch fallen die Größenordnungen der Diffusionskoeffizienten zusammen. Eine gute Übereinstimmung der experimentell bestimmten Koeffizienten erhält man

auch mit der verallgemeinerten Beziehung über die Abhängigkeit der Austauschkoefizienten von  $L$ , die unlängst von OKUBO und OZMIDOV [2] angegeben wurde.

Neben der Einschätzung der Diffusionskoeffizienten wurden die Werte der Diffusionsversuche im Schwarzen Meer zur Berechnung einiger statistischer Kenngrößen für die Konzentrationspulsation von Beimengungen benutzt, die nach der Formel

$$c'(y) = c(y) - \bar{c}(y)$$

zu ermitteln sind. Dabei bedeuten  $c(y)$  die Konzentration im gegebenen Schnittpunkt bei der einzelnen Messung und  $\bar{c}(y)$  die gemittelte Konzentration im gleichen Punkt. Die Größe  $c'(y)$  kann als eine gewisse Zufallsfunktion der Raumkoordinate  $y$  aufgefaßt werden. Die mathematische Erwartung dieser zufälligen Funktion ist gleich Null, da sie in bezug auf die gemittelte Funktion  $\bar{c}(y)$  zentriert ist. Die Dispersion der Funktion  $c'(y)$  kann auf zweierlei Art errechnet werden. Im ersten Fall wird die Dispersion  $\sigma_i^2$  für fixierte Werte von  $y$  über das Ensemble der Realisierungen  $c'(y)$  ermittelt, d. h.:

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n [c'_{i,j}]^2, \quad (4)$$

wobei  $i$  — die Nummer des Punktes längs der  $y$ -Achse in der  $j$ -ten Realisierung,  $n$  — die Anzahl der Realisierungen

bedeuten.

Im zweiten Fall wird die Dispersion  $\sigma_j^2$  für fixierte Realisierungen  $j$  errechnet, und die Mittelung erfolgt über eine Reihe von Punkten  $y$ , d. h.

$$\sigma_j^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^N [c'_{i,j}]^2, \quad (5)$$

wo  $N$  — die Anzahl der Punkte in der gegebenen Realisierung ist.

Die Ergebnisse der Berechnung von  $\sigma_i$  sind für alle drei Profile nach den Versuchswerten von 1968 in Abb. 5 dargestellt. Wie aus der Abbildung ersichtlich ist, verändern sich die mittleren quadratischen Abweichungen  $\sigma_i$  wesentlich entlang der  $y$ -Achse, wobei hauptsächlich der Veränderung von  $\bar{c}(y)$  gefolgt wird. Die Größe  $\sigma_j$  (Abb. 6) weist ebenfalls eine wesentliche Streuung von der einen Realisierung zur anderen auf, aber die Streuung trägt in diesem Fall keinen gesetzmäßigen Charakter. Die bei der Ermittlung von  $\sigma$  entstehenden Fehler sind hauptsächlich durch die Endlichkeit der für die Berechnung benutzten Reihen bedingt. Ein zuverlässiges Intervall zur Ermittlung der Dispersion  $J$  kann nach

$$J = \sigma^2 \pm t \sigma_1 \quad (6)$$

beurteilt werden. Dabei bedeuten  $t$  — das Argument der Funktion des Wahrscheinlichkeitsintegrals und  $\sigma_1$  — die mittlere quadratische Abweichung der ab-

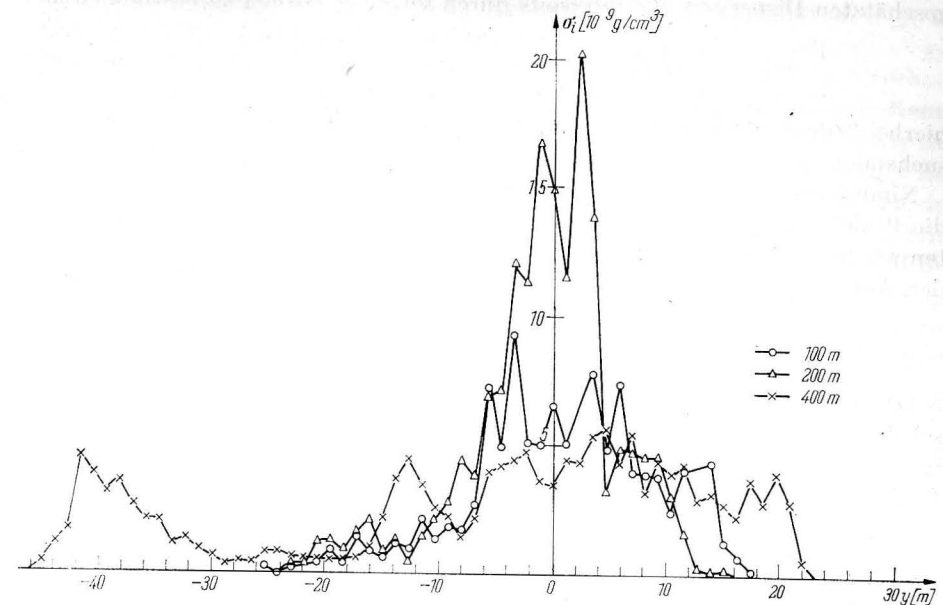


Abb. 5. Mittlere quadratische Abweichung  $\sigma_i$  nach Versuchsergebnissen von 1968

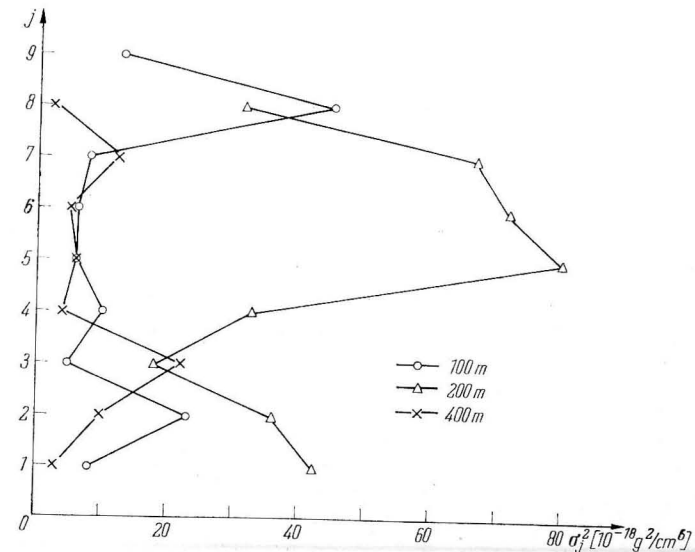


Abb. 6. Dispersion  $\sigma_j^2$  für verschiedene Realisierungen des Prozesses nach Versuchsdaten von 1968

geschätzten Dispersion, die ihrerseits durch folgende Formel zu bestimmen ist:

$$\sigma_1^2 = \frac{\mu_4}{N} - \frac{N-3}{N \cdot (N-1)} \cdot \sigma^4; \quad (7)$$

hierbei bedeutet  $\mu_4$  das vierte Zentralmoment für die Verteilung der zu untersuchenden Reihe.

Nimmt man an, daß das vierte Moment mit der gesuchten Dispersion durch die Beziehung der Normalverteilung zusammenhängt, d. h.  $\mu_4 = 3 \sigma^4$ , so erhalten wir für die Abschätzung der mittleren quadratischen Abweichung  $\sigma_1$  folgenden Ausdruck:

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{2}{N-1}} \cdot \sigma^2. \quad (8)$$

Setzt man in (8) für  $\sigma^2$  seine Abschätzung ein und nimmt den Wert des Wahrscheinlichkeitsintegrals zu 0,99, dann erhalten wir für die Versuche von 1968 bei der Ermittlung von  $\sigma_j^2$  im jeweiligen Schnitt für die über die Länge mittlere Realisierung folgende Abschätzung des Zuverlässigkeitsintervalls:

Tabelle 2

$x, m$	100	200	400
$J$	$\sigma_j^2 \pm 0,60 \cdot \sigma_j^2$	$\sigma_j^2 \pm 0,63 \cdot \sigma_j^2$	$\sigma_j^2 \pm 0,50 \cdot \sigma_j^2$

Wie aus Tab. 2 ersichtlich ist, erfolgt die Abschätzung der Dispersion für die einzelnen Realisierungen des Prozesses mit geringer Genauigkeit, weshalb die Streuung der Werte  $\sigma_j^2$  in Abb. 6 offensichtlich tatsächlich für zufällig angesehen werden kann.

Berechnet man die Dispersion jedoch für die gesamte Vielzahl der Werte  $c'(y)$  für den gegebenen Schnitt und betrachtet dabei die einzelnen Realisierungen als unabhängig, so kann die Dispersion dieser Vielzahl nach folgender Formel berechnet werden:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n^2} \cdot \sum_{j=1}^n \sigma_j^2. \quad (9)$$

Die nach dieser Formel mit den Versuchsdaten von 1968 durchgeführten Rechnungen ergaben die in Tab. 3 mit ihren Zuverlässigkeitsintervallen aufgeführten Werte von  $\sigma^2$ . Der Fehler bei der Bestimmung der Dispersion wird bei der Benutzung aller Messungen relativ gering.

Tabelle 3

$x, m$	$n$	$\sigma^2 \cdot 10^{18} \text{ g}^2 \text{ cm}^{-6}$	
100	9	1,5	$\sigma^2 \pm 0,20 \cdot \sigma^2$
200	8	5,9	$\sigma^2 \pm 0,21 \cdot \sigma^2$
400	8	1,0	$\sigma^2 \pm 0,16 \cdot \sigma^2$

Als eine umfassendere statistische Kenngröße der Zufallsfunktion  $c'(y)$  ist bekanntlich das mehrdimensionale Verteilungsgesetz  $f(c'_1, c'_2 \dots c'_N / y_1, y_2 \dots y_N)$  anzusehen. Jedoch ist die Aufstellung eines solchen Gesetzes mit dem vorhandenen experimentellen Material schwierig. Deshalb wurden als einfachere Kenngrößen eindimensionale Verteilungsgesetze  $f(c')$  ermittelt, wobei alle Werte der Funktion  $c'(y)$  auf einem gegebenen Schnitt als Gesamtheit unabhängiger Zufallsgrößen betrachtet wurden. Als Einheit wurde bei der Konstruktion der Histogramme aus den Konzentrationspulsationen auf der Abszisse ein Schritt von  $2 \cdot 10^{-3} \text{ g cm}^{-3}$  gewählt. Ferner wurden Histogramme für das Modul der Konzentrationspulsationen konstruiert, wobei in diesem Fall ein Schritt von 0 bis  $2 \cdot 10^{-9} \text{ g cm}^{-3}$  im Intervall der Konzentrationswerte häufiger vorkommt. Die Histogramme für die Größe  $|c'|$  wurden durch Normalverteilungen, durch PEARSON-Kurven und auch durch EDGEWORTH-Verteilungen approximiert. Das Histogramm für die Größe  $|c'|$  wurde mit der RAYLEIGH-Verteilung verglichen. In Abb. 7 und 8 werden Beispiele für die erhaltenen Histogramme und die Approximationskurven für den Schnitt in 400 m als den repräsentativsten Schnitt der Versuche von 1968 gegeben (die Gesamtzahl der Werte für  $c'$  betrug 472).

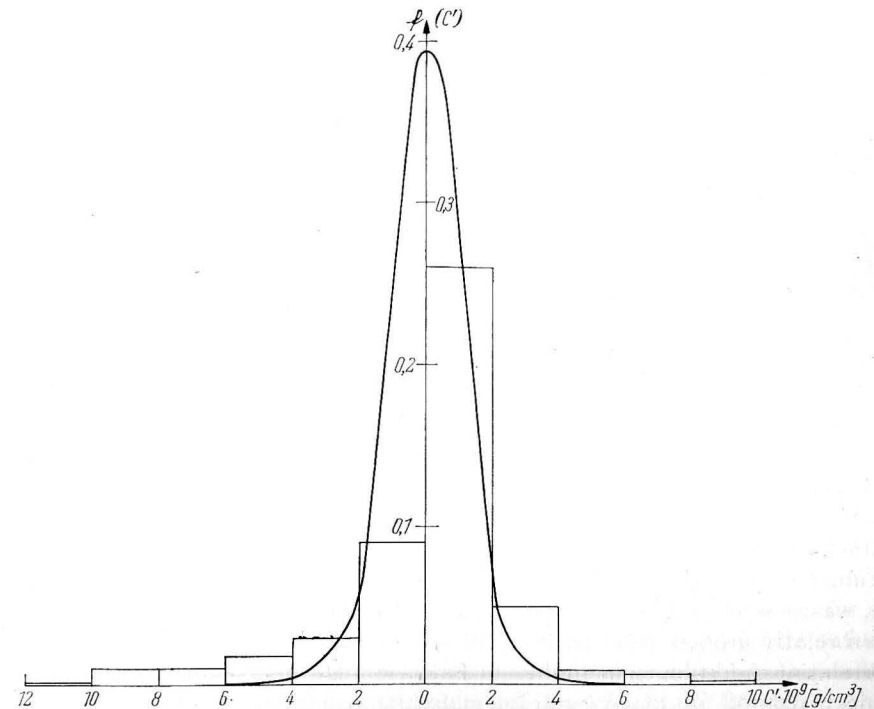


Abb. 7. Histogramm der Konzentrationsschwankungen des Farbtacers nach Versuchsdaten von 1968 ( $x = 400 \text{ m}$ ) und Kurve der Normalverteilung

Die Überprüfung der Übereinstimmung zwischen den Histogrammen und den theoretischen Verteilungskurven erfolgte nach dem  $\chi^2$ -Kriterium. Eine derartige Prüfung zeigte, daß die Annahmen über die Art der Verteilungen in allen Fällen nur eine geringe Wahrscheinlichkeit aufweisen. Die Ursache hierfür liegt offensichtlich in der geringen Anzahl der für die Analyse verwendeten experimentellen Werte.

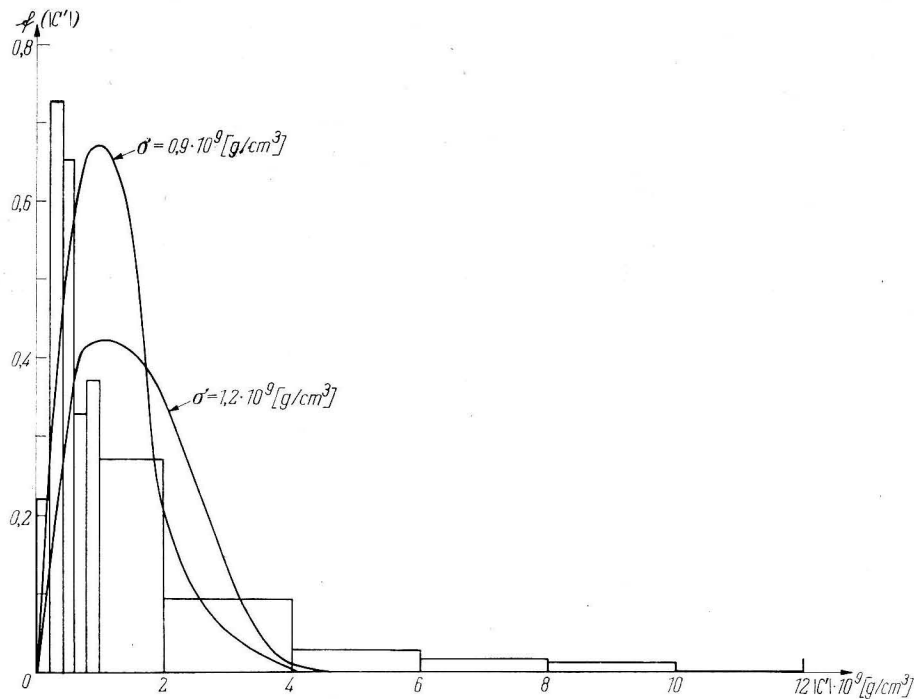


Abb. 8. Histogramm des Moduls der Konzentrationsschwankungen nach Versuchsdaten von 1968 ( $x = 400$  m) und Kurven der RAYLEIGH-Verteilung mit verschiedenen Werten für den Parameter  $\sigma$

Bei der Berechnung der Dispersion  $\sigma_j^2$  wurde festgestellt, daß die Streuung der Werte  $\sigma_j^2$  für die einzelnen Realisierungen im gegebenen Schnitt als zufällig betrachtet werden kann. Eine derartige Schlußfolgerung erlaubt, jede Realisierung als ein „Stück“ eines in weitem Sinne stationären Prozesses zu betrachten, was es seinerseits ermöglicht, die Korrelationsfunktion dieses Prozesses für einen relativ großen Wert zu bestimmen. Die Formel für die Berechnung der Korrelationsfunktion sieht in diesem Fall wie folgt aus:

$$R(p) = \frac{1}{M-p} \cdot \sum_{i=0}^{M-p} c'_i \cdot c'_{i+p}; \quad p = 0, 1, \dots, m; \quad (10)$$

hierbei bedeuten:

- $M$  — Gesamtzahl der Glieder der Reihe für die Werte  $c'$  für den gegebenen Schnitt,  
 $m$  — Anzahl der Translationen der Korrelationsfunktion, für die Versuche von 1966 und 1968 gleich 20 (10–15% der Länge der kürzesten Reihen).

Der Diskontinuitätsschritt  $\Delta y$  betrug, wie schon gesagt, bei den Versuchen 1966 51 cm und bei den Versuchen 1968 116 cm. Hierbei muß man jedoch berücksichtigen, daß die Schnitte durch die Strahlquerschnitte mit endlicher Geschwindigkeit erfolgten, weshalb die Konzentrationswerte in den benachbarten Punkten des Schnittes im Zeitabstand von 0,33 s bzw. 0,75 s für die 1966 und 1968 durchgeführten Versuche fixiert wurden. Im Zusammenhang damit trägt die Korrelationsfunktion (10) streng genommen raumzeitlichen Charakter. Berücksichtigt man jedoch, daß die charakteristische Bewegungsgeschwindigkeit des Wassers während der Versuche insgesamt 10 cm/s betrug, so kann man unter Benutzung der Hypothese von der „eingefrorenen Turbulenz“ zu der Schlußfolgerung kommen, daß das räumliche Argument für die Korrelationsfunktion überwiegen muß. Deshalb werden wir  $R(p)$  als räumliche Charakteristik des Feldes der diffundierenden Beimengung im Meer betrachten.

In Abb. 9 und 10 werden die für alle 6 Schnitte der Versuche von 1966 und 1968 konstruierten Funktionen  $R(p)$  dargestellt. Bei der Berechnung von  $R(p)$  wurden die Werte der Konzentrationsschwankungen für jede Realisierung nach den entsprechenden Werten der mittleren quadratischen Abweichungen  $\sigma_j$  normiert. Wie aus den Abbildungen ersichtlich ist, nehmen die Werte der Korrelationsfunktionen mit der Erhöhung des Argumentes schnell ab. Bei einer Steigung bis zu 15–20 Einheiten übersteigen die Absolutwerte von  $R(p)$  nicht 0,05–0,07. Der Korrelationsradius, der durch Integration der Flächen unter den Kurven  $R(p)$  von der Ordinatenachse bis zum Wert  $R(p)$  0,05 abgeschätzt wird, lag für alle Fälle nahe 14 m.

Auf Grund der erhaltenen Korrelationsfunktionen wurde auch eine Abschätzung der Spektraldichte des Prozesses durchgeführt. Hierfür benutzten wir die Formel

$$S(K) = \frac{\delta_p \cdot \Delta y}{m} \cdot \sum_{p=0}^m R(p) \cdot \cos \frac{\lambda_p \pi}{m}; \quad \lambda = 0, 1, \dots, m, \quad (11)$$

wo  $K = \frac{\lambda}{2m \cdot \Delta y}$  — die angeführte Wellenzahl,

$\delta_p = 0,5$  bei  $p = 0, m$  und  $\delta_p = 1$  bei  $0 < p < m$  sind.

Die nach der Dispersion normierten Werte der Funktion  $S(k)$  werden für alle Schnitte der Versuche 1966 und 1968 im logarithmischen Maßstab auf den Abb. 11 und 12 angeführt. Obgleich die Punkte auf den graphischen Darstellungen bedeutend streuen, kann man trotzdem auf ihnen leicht die Bereich ersehen, wo die Spektraldichte durch Exponentialgesetze approximiert werden kann. Der Exponent kann hierbei ungefähr von  $-1$  bis  $-5/3$  variieren. Folglich

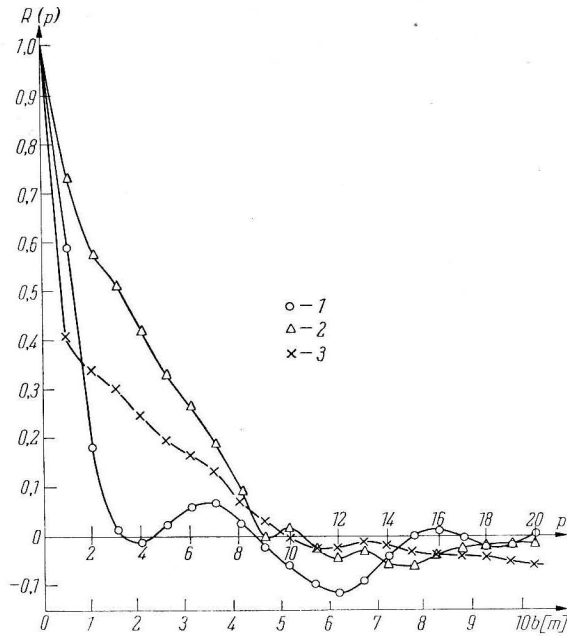


Abb. 9. Korrelationsfunktion der Konzentrationspulsationen von Farbstofftracern nach Versuchsdaten von 1966.  
1 -  $x = 100$  m; 2 -  $x = 250$  m; 3 -  $x = 300$  m

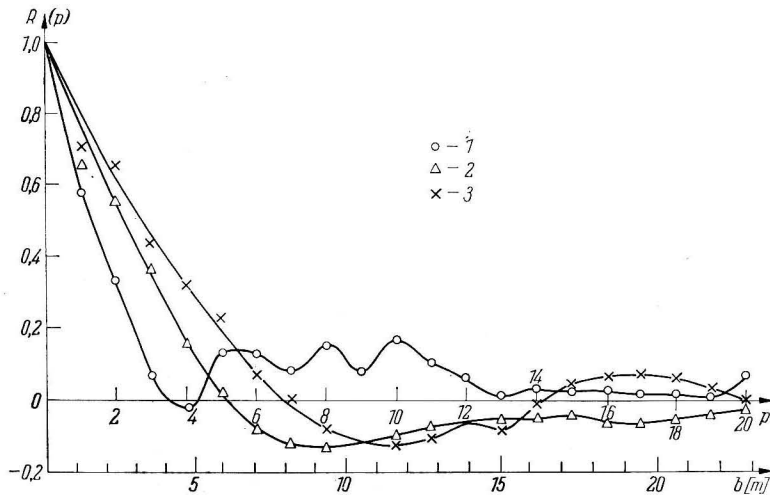


Abb. 10. Korrelationsfunktion der Konzentrationspulsationen von Farbstofftracern nach Versuchsdaten von 1968.  
1 -  $x = 100$  m; 2 -  $x = 200$  m; 3 -  $x = 400$  m

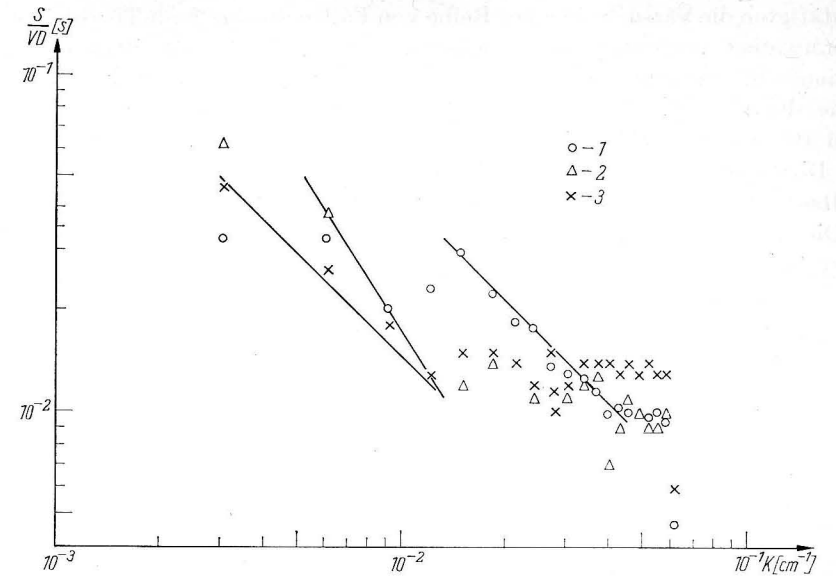


Abb. 11. Spektraldichten der Konzentrationsschwankungen nach Versuchsdaten von 1966.  
1 -  $x = 100$  m; 2 -  $x = 250$  m; 3 -  $x = 300$  m

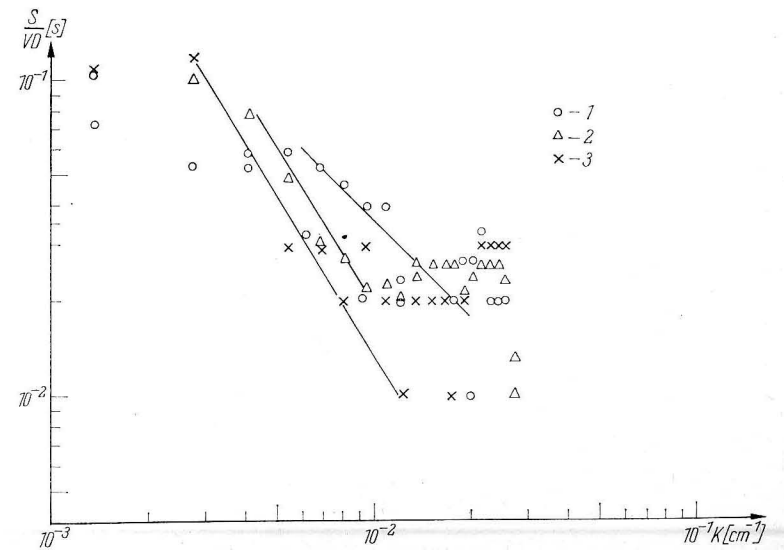


Abb. 12. Spektraldichten der Konzentrationsschwankungen nach Versuchsdaten von 1968.  
1 -  $x = 100$  m; 2 -  $x = 200$  m; 3 -  $x = 400$  m

bestätigten die Versuche in einer Reihe von Fällen die durch die Theorie von A. N. KOLMOGOROV vorgesezte Abhängigkeit der Spektraldichte der Beimengungspulationen in einem turbulenten Strom von der Wellenzahl nach dem „5/3-Gesetz“. Eine derartige Abhängigkeit wird im Intervall von  $K$  zwischen  $3 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$  und  $10^{-2} \text{ cm}^{-1}$  festgestellt, wo nach dem existierenden Verteilungsschema für die Dichte der kinetischen Energie im Meer (OZMIDOV [1]) tatsächlich der Inertialbereich der Turbulenz beobachtet werden kann.

Die auf einigen Schnitten festgestellten Abweichungen vom „5/3-Gesetz“ können (außer den Fehlern in der Bestimmung von  $S(k)$ ) durch eine Verschiebung im Energieversorgungsgebiet der Meeresturbulenz bedingt sein. Als Energieversorgungsmechanismus für Bewegungen mit den oben angeführten Abmessungen wirken aller Wahrscheinlichkeit nach die durch den Wind erzeugten Oberflächenwellen. Ihr charakteristischer Maßstab kann sowohl örtlich als auch zeitlich sogar bei annähernd gleichen mittleren Versuchsbedingungen ziemlich weit variieren. Dabei kann sich der Bereich für die Anwendbarkeit der Gesetze über die örtlich isotrope Turbulenz wesentlich verschieben oder durch die zu analysierenden Diffusionsversuche überhaupt nicht erfaßt werden. Um bessere Aussagen zu dieser Frage zu erhalten, muß offensichtlich umfangreicheres Material analysiert werden, das unter verschiedenen Versuchsbedingungen gesammelt wurde.

#### Literatur

- [1] OZMIDOV, R. V., Horizontale Turbulenz und turbulenter Austausch im Ozean (russ.). Verlag „Nauka“, Moskau 1968.  
 [2] OKUBO, A. und OZMIDOV, R. V., Die empirische Abhängigkeit des horizontalen Scheindiffusionskoeffizienten im Ozean vom Erscheinungsmaßstab (russ.). Izvestija Akad. Nauk SSSR, ser. fizika atm. i okeana 6, No. 6 (1970).

Anschriften der Verfasser:

Dr. A. N. GEZENCVEJ, S. S. MURAV'EV, Dr. R. V. OZMIDOV  
 Institut Okeanologii „P. P. Širšov“ AN SSSR  
 UdSSR, Moskau Ž 387, Sadovaja 1

Комиссия многостороннего сотрудничества академий наук социалистических стран по комплексной проблеме „планетарные геофизические исследования“ (КАПГ)

## РЕЗЮМЕ

научного симпозиума

„Теория и методы исследований диффузии примесей в море“

Август 1970 г.

г. Росток-Варнемюнде, ГДР

А. М. Айтсам, В. К. Асток, М. К. Юхат

### Методика расчета статистических характеристик пульсаций концентрации примесей в море

При обработке результатов экспериментов КАПГ 1968 г. полученные в фиксированной точке моря временные ряды значений концентрации примеси рассматривались как реализации случайных эргодических процессов. Разработана методика и алгоритмы для определения статистических оценок на ЭВМ следующих вероятностных характеристик таких рядов:

1. моментов распределений (математическое ожидание, дисперсия, коэффициент асимметрии, эксцесс),
2. корреляционных функций и спектральных плотностей,
3. превышений уровней концентрации над заданными значениями (среднее число превышений в единицу времени и плотность распределения продолжительности выбросов),
4. плотностей распределения пульсаций концентрации. По критерию  $\chi^2$ -квадрат осуществляется также сравнение эмпирических распределений с некоторыми теоретическими законами.

В. К. Асток, А. Н. Гезенцевей, Р. В. Озмидов, М. К. Юхат

### Статистические характеристики пульсаций концентрации в стационарной струе примеси в море

Для подсчета временных статистических характеристик пульсаций концентрации примеси в море использованы данные опыта с непрерывным стационарным точечным источником в прибрежной зоне Балтийского моря (пос. Цингст, ГДР). Полученные регистрирующим прибором записи обрабатывались как реализации стационарного случайного процесса. Подсчитаны функции плотностей распределений пульсаций концентрации, 4-х первых момента распределений, характеристики продолжительности выбросов определенной концентрации, а также корреляционные и спектральные функции. Спектральные временные функции имеют в логарифмическом масштабе наклон, близкий к  $-11/5$  в интервале частот от 0,001 до 0,03 герц и наклон  $-5/3$  в интервале от 0,03 до 0,15 герц.



В. К. Асток, Р. В. Озмидов

### Статистические характеристики пульсаций примеси от мгновенных точечных источников (по опытам в Балтийском море)

По данным опытов КАПГ 1968 г. рассчитаны корреляционные функции и спектральные плотности пульсаций концентрации примеси от мгновенных точечных источников. Пульсационные составляющие определены при разном масштабе сглаживания профилей концентрации косинус-фильтром. Зависимость дисперсии пульсаций от масштаба сглаживания  $L$  близка к закону  $L^{5/3}$ . Закон „степени-5/3“ прослеживается и в спектрах, рассчитанных через корреляционные функции. На фоне турбулентного спектра наблюдаются некоторые пики, связанные, по-видимому, с гидрометеорологическими условиями района наблюдений. Приводятся также результаты статистической обработки данных о концентрации пульсаций примеси  $c'$ , нормированных на средние значения  $c$ .

Г. Ю. Брозин

### Исследование турбулентной диффузии в Балтийском море вблизи о. Рюгена

В рамках совместных работ по программе КАПГ было осуществлено 2 диффузионных опыта с использованием Родамина  $C$  в качестве индикатора в мелководных районах (глубина 15—16 м) к западу и востоку от о. Рюгена.

По результатам опытов рассчитана зависимость максимальной концентрации индикатора в пятнах от времени диффузии, а также определены дисперсии распределений красителя вдоль горизонтальных осей  $\sigma_x^2$  и  $\sigma_y^2$ . Кроме того определены значения коэффициентов диффузии  $K_x$  и  $K_y$  и скорости диффузии  $P$ . Для зависимости  $c_{\text{Max}} = f(t)$  получены степенные выражения с показателями степени, лежащими в пределах от  $-2,45$  до  $-2,61$ . Дисперсии распределений оказались различными для продольной и поперечной осей координат. Значения коэффициентов диффузии для временных масштабов 100—500 мин. оказались следующими:  $K_x$   $9,4 \cdot 10^2$  до  $3,8 \cdot 10^4$   $\text{см}^2/\text{с}$  и  $K_y$   $5,5 \cdot 10^2$  до  $3,7 \cdot 10^3$   $\text{см}^2/\text{с}$ . Для скорости диффузии  $P$  получены значения  $0,49$   $\text{см}/\text{с}$  и  $0,21$   $\text{см}/\text{с}$ .

Г. Ю. Брозин, А. Н. Гезенцевей, С. Г. Карабашев, У. Кремзер, Ле Куанг Тоай, С. С. Муравьев, Р. В. Озмидов, К. Фогт

### Осредненные трехмерные картины диффузии от мгновенных точечных источников примеси в море

Проанализированы результаты опытов КАПГ 1968 г. с диффузией примеси от мгновенных точечных источников в Балтийском море. Профили распределения концентрации примеси на отдельных разрезах через диффундирующие пятна сглаживались с помощью косинус-фильтра. Сглаженные профили сов-

мещались в плоскости промера по навигационным данным, а также по максимальным значениям концентрации на отдельных промерах. Сглаженные трехмерные распределения концентрации примеси в диффундирующих пятнах аппроксимировались решениями полуэмпирических уравнений диффузии с постоянными, но разными вдоль каждой из осей координат коэффициентами. Такая аппроксимация позволила определить значения коэффициентов диффузии в разные периоды процесса. При этом обнаруживается резкая анизотропия диффузии пятна в море. Исследована также зависимость максимальной концентрации примеси в пятнах от времени диффузии.

Р. В. Озмидов, Г. С. Карабашев

### Методика исследования диффузии примеси в море с помощью люминесцентных индикаторов

Основные требования к методике определения поля концентрации индикатора в море от мгновенного и стационарного источников. Оборудование для имитации стационарного и мгновенного источников примеси и работа с ним в море. Способы определения пространственно-временного распределения концентрации индикатора в море. Навигационное обеспечение экспериментов по исследованию турбулентной диффузии в море методом люминесцентных индикаторов. Особенности методики изучения закономерностей диффузии примесей во время опытов 1968—69 гг на Балтийском море по программе КАПГ. Перспективы повышения эффективности методики исследования диффузии примесей в море с помощью люминесцентных индикаторов.

Г. С. Карабашев

### Буксируемый оптический прибор для измерения концентрации люминесцентных индикаторов в море

Физические основы измерения концентрации люминесцирующих веществ. Основные физико-технические требования к морскому погружаемому флюориметру. Выбор фотометрической схемы прибора с учетом специфики морских натурных измерений. Оптическая схема прототипной модели флюориметра. Устройство и характеристики буксируемого флюориметра ПФ-66. Опыт эксплуатации прибора в экспедиционных исследованиях по программе КАПГ. Возможности совершенствования аппаратуры для изучения турбулентной диффузии методом люминесцирующих индикаторов.

Р. Цегларский, Р. Зейдлер, Э. Желязный

### Применение флюорометра в „in situ“-измерениях морской диффузии

При совместных исследованиях по программе КАПГ в 1969 г., а также впоследствии польскими учеными был использован новый прибор для измерений диффузии флюоресцирующих индикаторов „in situ“ в море. В состав

прибора входит флюоро-микрофотометр АМИНКО с эмпирически подобранными фильтрами, боковой штуцер с трубопроводами, центробежный нанос производительностью 1 м<sup>3</sup>/ч при 5000 об./мин, входной электрический элемент, регистратор 220 в, 50 гц, 0—10 мв, стабилизатор напряжения и генератор мощностью 500 ватт. Аппаратура размещается на судне с малой осадкой и дает возможность измерять флюоресценцию на разных пределах чувствительности прибора. Тарировка дает сравнительно простые кривые для обработки данных.

Главное преимущество такой аппаратура над прибором Карабашева состоит в возможности вести измерения на разных глубинах, особенно в придонном слое моря, без опасности повреждения датчика. Сравнение результатов исследований по программе КАПГ в 1969 г. показало совпадение результатов указанными двумя методами.

Г. С. Карабашев

### Перспективы применения люминесцентных методов для изучения диффузии примесей в море

Особенности и преимущества люминесцентных методов количественного определения примесей в морской воде. Классификация современных методов изучения динамики поля примесей в море по измерениям наведенной флюоресценции морской воды. Аппаратура и методика ИОАН для изучения турбулентной диффузии примеси в море методом люминесцентных индикаторов и пути их совершенствования. Происхождения и физические характеристики собственной флюоресценции морской воды (СФМВ). Некоторые результаты изучения собственной флюоресценции вод Балтийского моря, полученные в Атлантическом отделении ИОАН. Возможности исследования закономерностей диффузии различных примесей в океане по данным измерений физических характеристик СФМВ (собственной флюоресценции морской воды).

У. Кремзер

### Влияние „нетурбулентных“ процессов на концентрацию Родамина С в море

Экспериментальное определение параметров диффузии в море с помощью индикаторов необходимо по многим причинам. Органический краситель Родамин С может быть использован в качестве индикатора благодаря низкой стоимости, неядовитости и доступности измерения его концентрации флюориметрическим методом.

Во время опытов было обнаружено изменение содержания красителя в морской воде под действием различных факторов. К их числу можно отнести адсорбцию на минеральной взвеси и фитопланктон, а также разложение красителя солнечной радиацией. Для устранения систематических погрешностей в результаты диффузионных опытов требуется вводить поправки, учитывающие возможные искажения данных за счет перечисленных факторов.

Как показали лабораторные опыты, фитопланктон не влияет на распределение индикатора, однако адсорбция на минеральной взвеси и фотораспад способны дать заметную суммарную ошибку при особо неблагоприятных условиях морских диффузионных экспериментов. Влияние этих факторов можно учесть аналитическими методами. В отдельных районах моря ошибки из-за влияния солнечной радиации и адсорбции могут достигать больших величин и тогда их необходимо принимать во внимание. Это можно осуществить с помощью предложенных методов введения поправок. При работах на глубинах, больших 2,5 м, и при продолжительности опытов до 1 суток введение поправок не требуется.

П. Гупфер, Г. У. Ласс

### Поле температуры и горизонтальный турбулентный теплообмен в прибрежной зоне моря

В течение нескольких лет в обсерватории Цингст университета им. Карла Маркса в Лейпциге выполнялись исследования по изучению температурного режима в прибрежной зоне Балтийского моря на расстояниях до нескольких сотен метров от берега. Результаты исследований показывают, что особенно в теплое время года в прибрежной зоне существуют значительные градиенты температуры направленные к берегу. Сильную временную изменчивость прибрежного поля температуры определяют в первую очередь меняющиеся условия солнечной радиации и ветра. Приводятся спектры такой изменчивости. В зависимости от гидро-метеорологических условий в разные сезоны года могут наблюдаться нарушения обычного поведения температуры, обусловленные подъемом глубинных вод и поверхностными течениями. Подсчет среднего теплового баланса прибрежной зоны моря показал преобладающее влияние горизонтального турбулентного и адвективного теплообмена в формировании температурного режима. Температуру воды предлагается рассматривать в качестве индикатора процесса перемешивания. При предположении равенства коэффициентов обмена для тепла и примесей возможно получить некоторые выводы о закономерностях распространения примесей. С этой целью применяемой в метеорологии интегральный метод вычисления горизонтальных коэффициентов обмена был использован для условий прибрежной зоны моря. Примеры расчетов показывают, что получаемые значения коэффициентов удовлетворительно совпадают с данными, полученными с помощью других методов. Перечисляются также проблемы, которые надо решить для практического применения метода в условиях гидро-метеорологических прибрежных станций.

Р. Зейдлер

### Турбулентная диффузия в прибрежной зоне моря

Особенности движения морских вод в прибрежной зоне моря известны в настоящее время только в общих чертах, несмотря на то, что в этой зоне осуществляется значительная часть инженерной деятельности человека. Важ-

нейшей характеристикой движения вод в прибрежной зоне является тензор турбулентной диффузии. Значение этого тензора дает возможности прогнозировать распределение пассивных физических субстанций, таких как тепло, энергия, количество движения, примесь (например сточные воды), впаиваемых в море мгновенными или стационарными источниками. Исследования, выполненные в 1967—1970 годах у польского побережья Балтийского моря, дали возможность определить некоторые компоненты тензора дисперсии. Оказалось, что временная изменчивость этого тензора сильнее всего связана со скоростью течения воды. При вдольбереговых течениях показатель зависимости компонент тензора от скорости воды обусловлен видом изменчивости коэффициента диффузии в направлении перпендикулярном линии берега. Этот коэффициент не зависит (или зависит очень слабо) от расстояния до берега вне зоны его влияния (порядка нескольких сотен метров), в то время как вблизи берега он растет с показателем степени 6/7.

Ветер действует (кроме генерации течений) как фактор отклонения направления главной оси эллипса дисперсии от направления адвекции. Волнение обуславливает рост показателей временной зависимости тензора дисперсии.

Исследования, выполненные вблизи действующего коллектора сточных вод, позволили сравнить поведение консервативного и распадающегося трассеров. Анализ полученных данных с точки зрения создания проекта безопасного сброса сточных вод, показывает необходимость дальнейших исследований диффузии (придонной, вертикальной и т.д.).

В. И. Зац, Б. Ф. Андрущенко

### Некоторые результаты исследований процессов турбулентной диффузии пятен красителей на поверхности моря при помощи аэрометодов

В 1968—1969 г.г. в Черном море проведены экспериментальные работы по изучению турбулентной диффузии пятен красителей на поверхности моря при помощи аэрофотосъемки.

Во время каждого пуска мгновенный начальный источник состоял из раствора красителя, содержащего 17—20 кг родамина С или 20—30 кг уранина. В результате обработки фотоснимков получены площади диффундирующих пятен в последовательные моменты времени.

Изменчивость площадей пятен  $S$  во времени  $t$  описывается степенной функцией вида  $S \sim t^n$ , где показатель степени  $n$  по опытам 1968—1969 г.г. изменяется в пределах от 0,63 до 1,92. Анализ материалов аэрофотосъемки других авторов показывает, что величина  $n$  изменяется в пределах от 0,45 до 2. Зависимость радиусов пятен  $R$  от времени диффузии аппроксимируется линейной функцией. Параметры  $R$ ,  $S$ ,  $t$ ,  $x$  по данным аэрофотосъемки сопоставляются в рамках теоретической модели диффузии от точечного источника, предложенной Ито с соавторами (1966).

По данным аэрофотосъемки определены скорости диффузии  $P$  в смысле Иозефа-Зенднера, которые оказались в пределах 0,59—0,97 см/сек, т.е. они имеют порядок величины, приведенный другими исследователями. Показана схема расчёта  $P$  на стадии диффузии пятен до  $S_{\max}$ . Приводятся резуль-

таты расчётов коэффициентов горизонтальной диффузии разными методами и обсуждается характер их зависимости от масштабов явления. По данным этих опытов известный „закон 4/3“ не выполняется.

В. И. Зац, М. С. Немировский

### Исследование процессов перемешивания и разбавления загрязняющих примесей в зонах сброса сточных вод в море методом флюоресцирующих индикаторов

Метод флюоресцирующих индикаторов с буксируемым флюориметром, разработанный Р. В. Озмидовым и Г. С. Карабашевым, позволяет изучать процессы диффузии в рамках натурального моделирования, а также исследовать интенсивность смешения и разбавления в зонах существующих выпусков сточных вод в море для оценки эффективности их работы. В этом плане проведено исследование процессов начального разбавления у одного из выпусков сточных вод в районе Южного Крыма. Выпуск расположен на глубине 16 м и в 500 м от берега.

В поток сточных вод, расход которых известен, вводился краситель уранин заданной концентрации. В зоне выхода сточных вод на поверхность и вдоль струи в 1969—1970 г.г. определялась концентрация уранина с помощью буксируемого флюориметра Г. С. Карабашева.

Определены степень начального разбавления  $N$  в зоне сброса сточных вод по данным распределения концентрации красителя от выпуска из трубопровода до вершины „факела“. Величина  $N$  по данным экспериментов сравнивается и обсуждается с некоторыми полуэмпирическими методами расчёта  $N$ . Фактическое разбавление в реальных условиях моря значительно больше расчётного по крайней мере на порядок величины.

А. Н. Гезенцевей, С. С. Муравьев, Р. В. Озмидов

### Пространственные статистические характеристики пульсаций концентрации примесей по опытам в Черном море

Для подсчета статистических характеристик пульсаций концентрации примесей использованы данные опытов с непрерывными точечными источниками в Черном море (1966, 1968 гг.). Пульсации концентрации определялись вычитанием из отдельных распределений примеси осредненных по ансамблю опытов кривых распределений. По полученным таким образом данным подсчитывались дисперсии пульсаций концентрации и законы их распределений. Определены также корреляционные и спектральные функции для пульсаций концентрации в поперечных сечениях струи примеси на различных расстояниях от источника. По корреляционным функциям оценены радиусы корреляции поля примеси. Функции спектральной плотности пульсаций концентрации на логарифмическом графике имеют наклон, близкий к  $-5/3$  в интервале волновых чисел  $K$  от  $3 \cdot 10^{-3}$  до  $10^{-2}$  см $^{-1}$ , и наклон  $-1$  в интервале  $K$  от  $10^{-2}$  до  $5 \cdot 10^{-2}$  см $^{-1}$ .

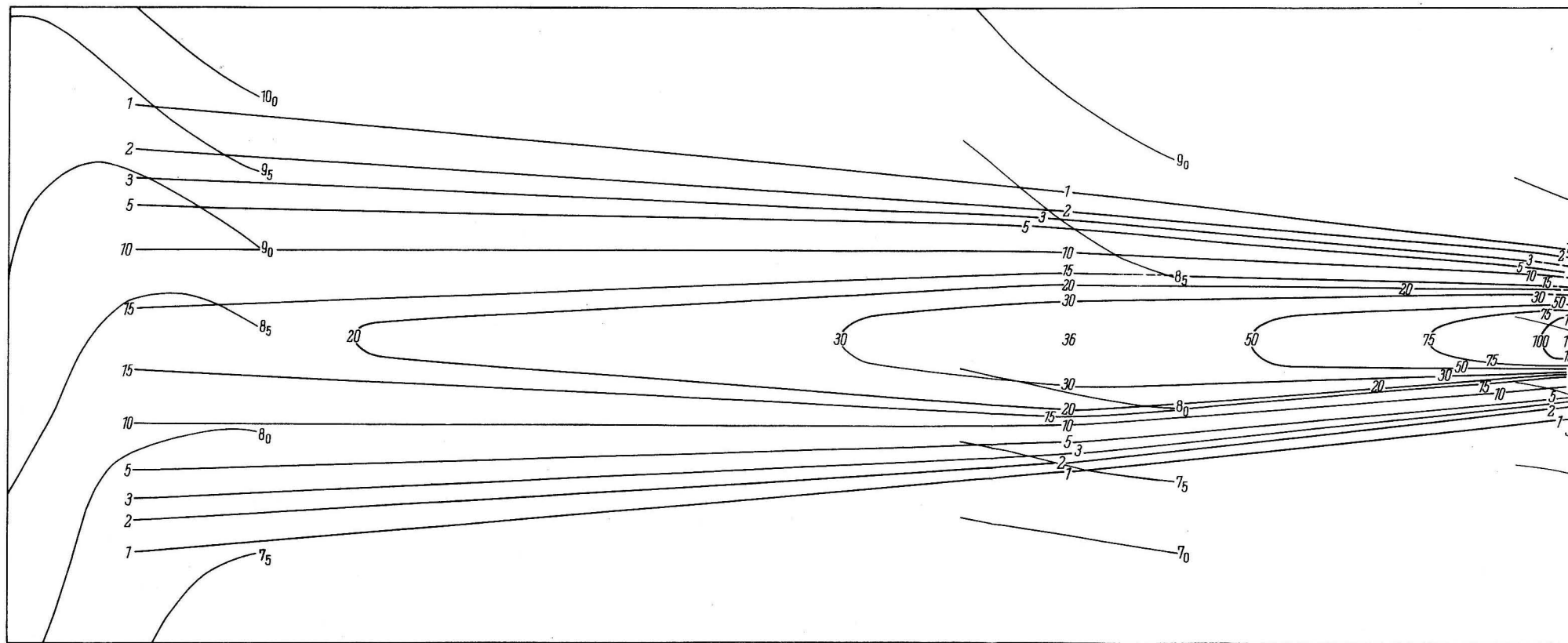


Abb. 12. Maximale Konzentrationen auf den einzelnen Profilen am 29. 9. 1969  
 (Die Isobathen sind mit einer Genauigkeit von 0,5 m dargestellt)  
 Tracerkonzentration in mg/m<sup>3</sup>

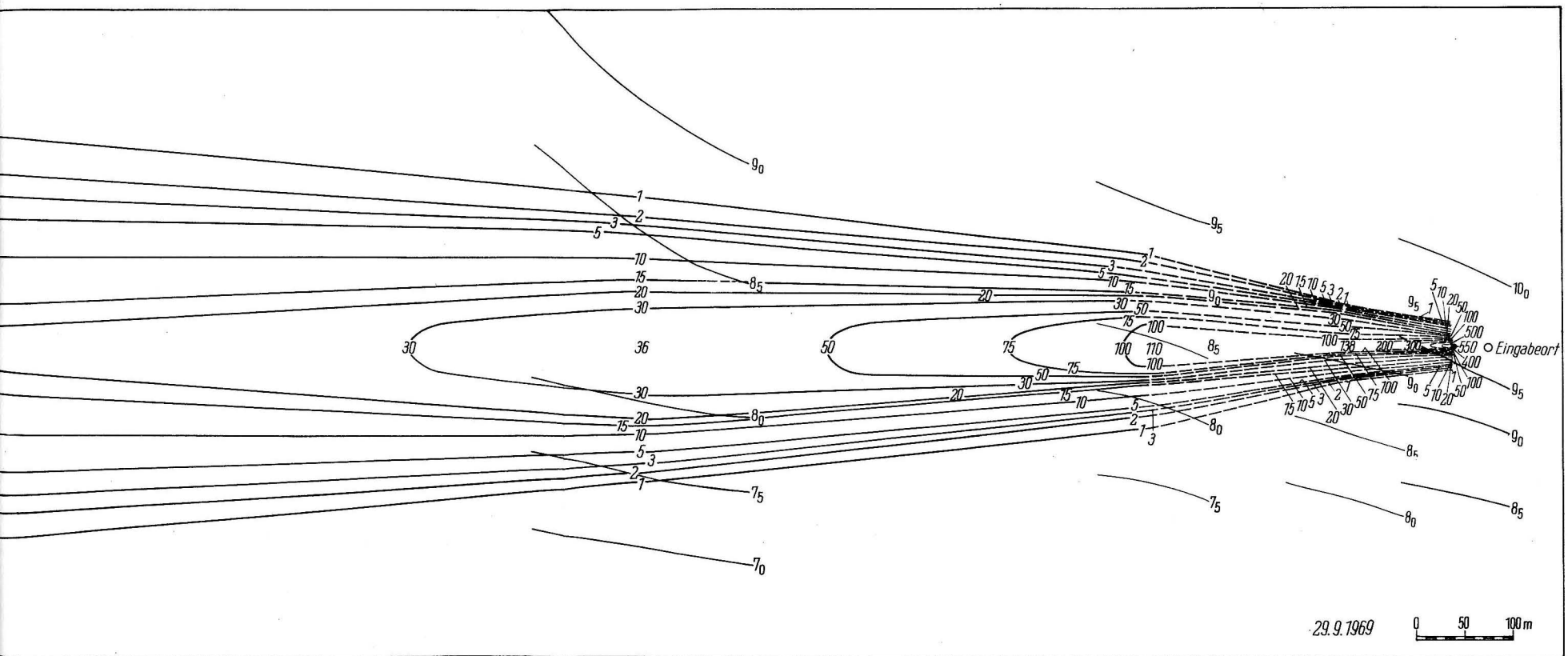
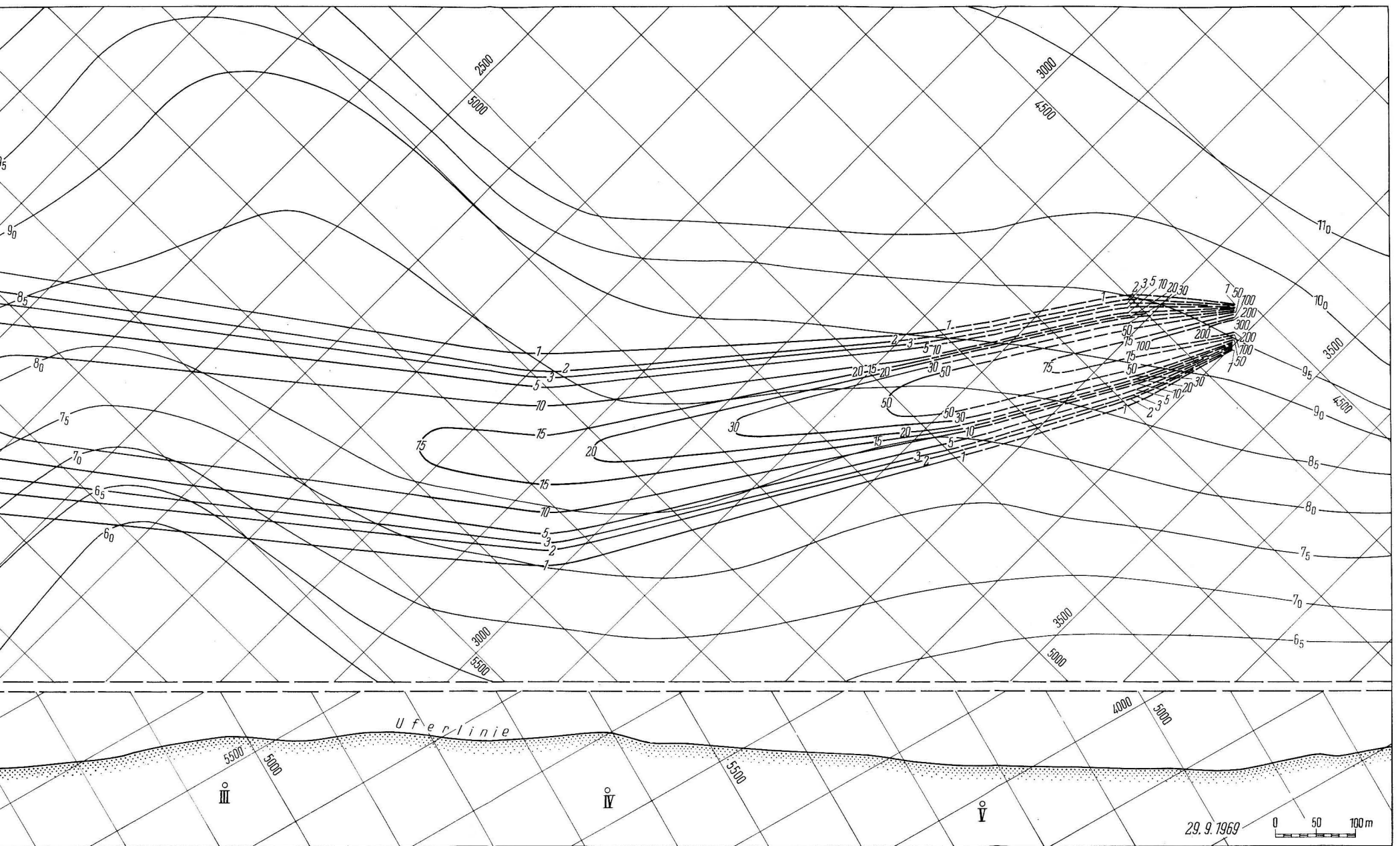


Abb. 12. Maximale Konzentrationen auf den einzelnen Profilen am 29. 9. 1969  
 (Die Isobathen sind mit einer Genauigkeit von 0,5 m dargestellt)  
 Tracerkonzentration in  $\text{mg/m}^3$



**Abb. 13. Mittlere Konzentrationen auf den einzelnen Profilen am 29. 9. 1969**  
 (Die Isobathen sind mit einer Genauigkeit von 0,5 m dargestellt. Ferner wurde ein Ent-  
 fernungsnetz eingetragen).  
 Tracerkonzentrationen in  $\text{mg}/\text{m}^3$   
 II - V Standorte der Vermessungsgruppen an Land

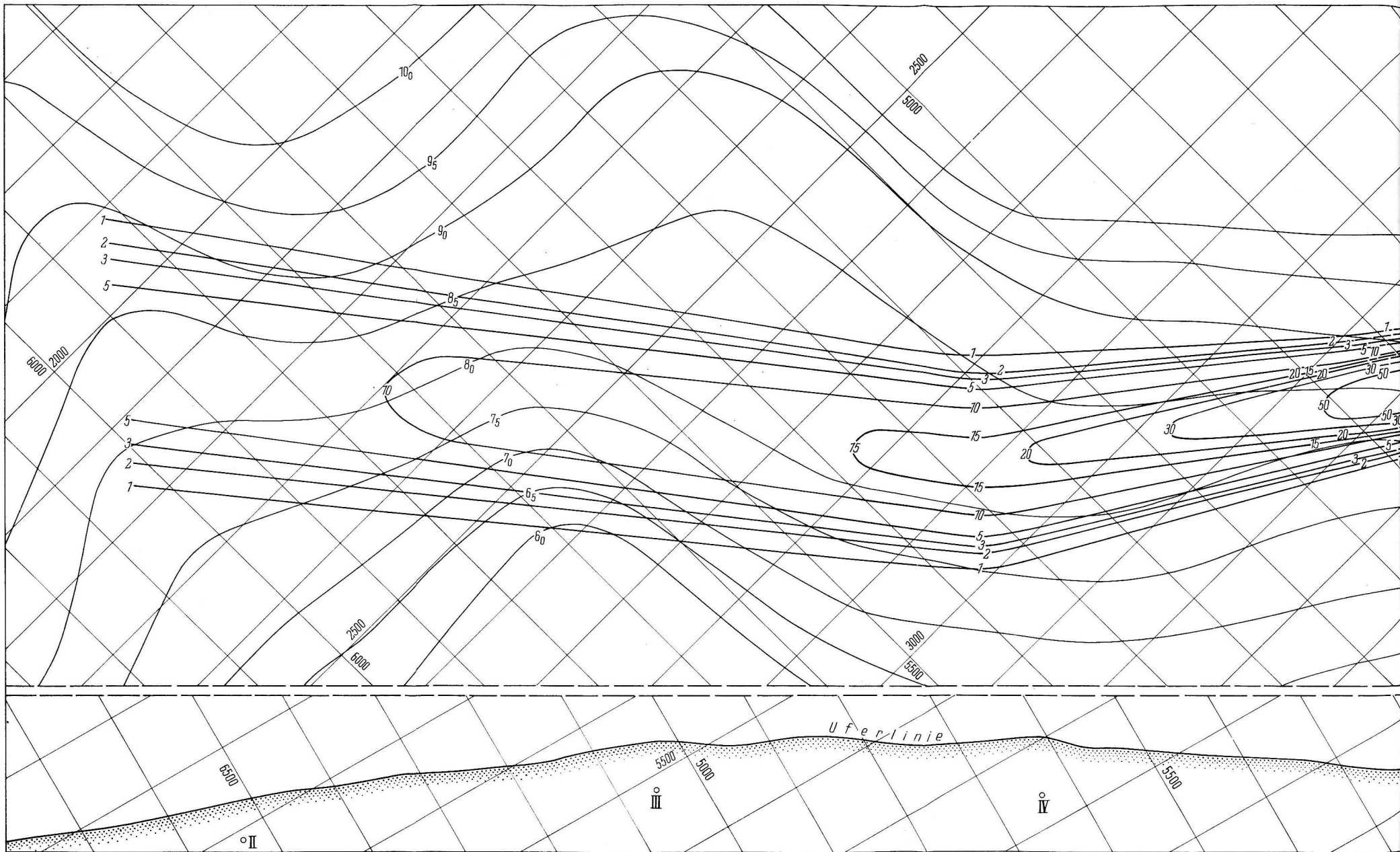


Abb. 13. Mittlere Konzentrationen auf den einzelnen Profilen am 29. 9. 1969  
 (Die Isobathen sind mit einer Genauigkeit von 0,5 m dargestellt. Ferner wurde ein Ent-  
 fernungsnetz eingetragen).

Tracerkonzentrationen in  $\text{mg}/\text{m}^3$

II - V Standorte der Vermessungsgruppen an Land

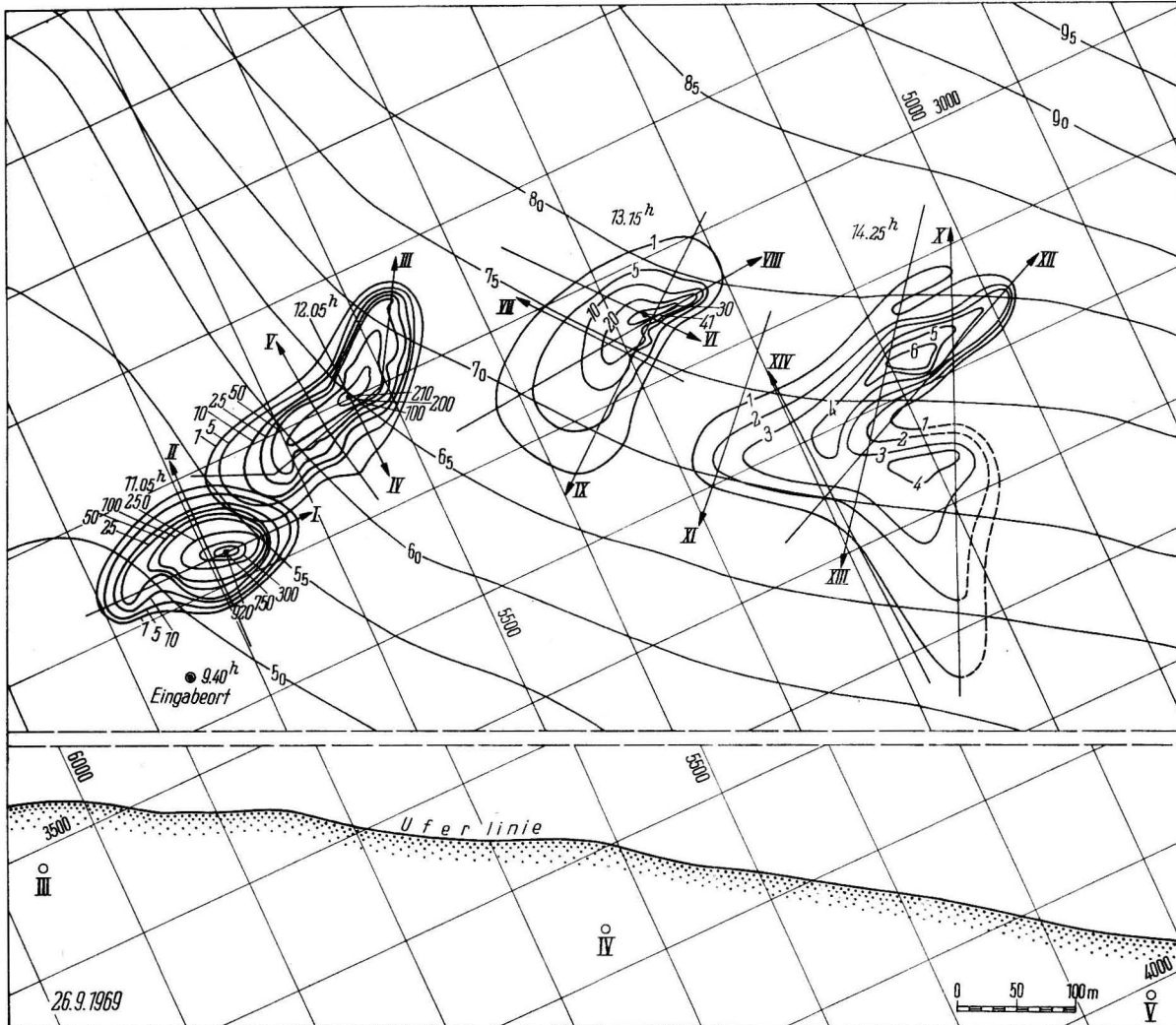


Abb. 15. Rhodaminverteilung am 26. 9. 1969 (momentane Quelle).  
 Eingezeichnet sind Küstenlinie, Isobathen, Entfernungnetz und Standorte der Vermessungsgruppen sowie die Schiffskurse. Die Farbstoffkonzentrationen sind in  $\text{mg/m}^3$  angegeben