

Copyright ©

Es gilt deutsches Urheberrecht.

Die Schrift darf zum eigenen Gebrauch kostenfrei heruntergeladen, konsumiert, gespeichert oder ausgedruckt, aber nicht im Internet bereitgestellt oder an Außenstehende weitergegeben werden ohne die schriftliche Einwilligung des Urheberrechtlichsinhabers. Es ist nicht gestattet, Kopien oder gedruckte Fassungen der freien Onlineversion zu veräußern.

German copyright law applies.

The work or content may be downloaded, consumed, stored or printed for your own use but it may not be distributed via the internet or passed on to external parties without the formal permission of the copyright holders. It is prohibited to take money for copies or printed versions of the free online version.

Eine physikalische Analyse kleinräumiger Änderungen chemischer Parameter in den tiefen Wasserschichten der Gotlandsee

VON ECKARD HOLLAN

Zusammenfassung: Auf einer Ankerstation des F. K. „Alkor“ vom 6.—12. 9. 1967 in der mittleren Ostsee im Gotland-Tief wurden signifikante chemische Parameter (gelöster Sauerstoff, Nitrat, Nitrit, gelöstes anorganisches Phosphat, Ammoniak, Silikat, pH-Wert, Alkalinität) in schneller Folge aus 12 Tiefenhorizonten entnommen und automatisch analysiert. Außerdem wurde Schwefelwasserstoff zwischen 170 m und 200 m Tiefe angetroffen und in den Tiefen 175 m und 200 m fortlaufend gemessen. Parallel zu diesen Messungen registrierten 5 Richardson-Strommesser, die in einer Meßkette in 500 m Entfernung von der Ankerstation verankert waren, in 5 verschiedenen Tiefen die Strömung mit einer Meßwertfolge von 2 bzw. 5 min. Das Ziel der Untersuchung war, die Veränderlichkeit chemischer Größen im Gotland-Becken stichprobenartig aufzunehmen. Die Strömungsmessungen dienten dem Zweck, die physikalisch gegebene Veränderlichkeit zu erfassen und in Zusammenhang mit Änderungen der chemischen Parameter zu bringen.

Anhand des gewonnenen Beobachtungsmaterials läßt sich für einige charakteristische chemische Größen die Verteilung im Raum bestimmen, die auf Grund von Bahnintegrationen in den Meßtiefen der Strömung ausschnittsweise ermittelt wird. Die Integration führt nur für die Wasserschichten unterhalb von 90 m Tiefe zu ausreichend gesicherten Ortsangaben, da dort die horizontale Ver-zerzung der Wasserteilchen erheblich geringer als in Oberflächennähe ist, wo die an einer Meßstelle erhaltene Information über die großräumige Verteilung der Strömung nicht ausreicht.

Es zeigt sich, daß in den unteren Wasserschichten charakteristische Größen wie z. B. anorganisches Phosphat, Nitrat, Sauerstoff und Schwefelwasserstoff zeitliche Änderungen in einem Horizont erfahren, während hingegen Salzgehalt und Temperatur von diesen Änderungen nicht betroffen sind. Die räumliche Variabilität der ausgewählten chemischen Größen äußert sich in wolken- oder flecken-artig zusammenhängenden Felder erhöhter oder verminderter Konzentration, die verhältnismäßig scharf abgesetzt nebeneinander in den einzelnen Tiefenhorizonten auftreten. Mittlere großräumige Änderungen erhalten dadurch eine sehr unruhige Feinstruktur.

Aus den vorliegenden Beobachtungen ergeben sich für die fleckhaft verteilten Schwankungen im Bereich des Gotland-Tiefs Horizontalerstreckungen von wenigen 100 Metern bis zu wenigen Kilometern. Die Meßergebnisse reichen nicht aus, um die vorgefundene kleinräumige Veränderlichkeit eindeutig biologischer Aktivität zuzuschreiben.

A physical analysis on observed small-scale variations of chemical parameters in the Central Baltic Deep Layers (Summary): During September 1967 — on a cruise in the Central Baltic — F. K. „Alkor“ had been mooring for 6 days (6—12/9/1967) near the Gotland Deep (fig. 1). On this position ($\varphi = 57^{\circ}20'N$, $\lambda = 20^{\circ}3'E$, depth: 234 m) special measurements were carried out with respect to the chemical and physical variability. Whilst several investigations had been made before already by K. KALLE and S. H. FONSELIUS concerning long-time variations of chemical parameters and periods of stagnation in the Gotland Basin no information was available so far about their small-scale structure.

By automatic analysis of samples taken in 12 different depths at an interval of 3 hours the following chemical parameters were determined: nitrate, nitrite, ammonia, dissolved inorganic phosphate and oxygen and silicate. In regions between 170 m and 200 m depth hydrogen sulphide was recorded every 3 hours in 2 different depths. In addition, the vertical distribution of oxygen has been observed continuously by means of an oxygen-temperature probe developed by K. GRASSHOFF (1969a).

In order to get a picture of the physical variability hydrographical observations have been realized in full details. As an important part of the program 5 Richardson current meters were used to record the current in a separate mooring system in 5 different depths with intervals of 5 and

2 minutes respectively. Due to these measurements the horizontal small-scale distribution of several chemical quantities near the anchorage position could be determined in addition to the vertical and time-dependent variations as described by J. GIESKES and K. GRASSHOFF (1969). By means of integration of the observed current, trajectories were computed describing the drift of water particles passing the position of observation. Under suitable conditions given only for the 3 current records beneath 90 m depth corresponding chemical series can be combined with the trajectories thus identifying single water particles by the content of chemical quantities referred to (Fig. 4—8). As necessary assumption permitting this treatment it is shown that the chemical properties can be considered as conservative quantities during the time of observation and that the trajectories in the deep layers do not exceed a distance of 10 km off the anchorage station. For an area of this horizontal scale one position of observation is sufficient for purposes of integration deduced from the results of a special analysis of these current measurements published separately (E. HOLLAN, 1969).

The predominant feature revealed by this method is a strong variability in the small-scale distribution of several selected parameters (dissolved inorganic phosphate, nitrate, ammonia, hydrogen sulphide and oxygen, Fig. 4—8). Patches of high and low concentration exist side by side and contribute to a gradual change in the mean distribution of each quantity considered. The horizontal extent of the patches varies between several 100 meters and a few kilometers. Although the observations were limited only to a small area it appears that great parts of the deep layers have a similarly variable distribution of nutrients and other biologically influenced chemical parameters since the frequency and horizontal dimensions of the patches suggest a more common feature than isolated disturbances near the anchorage station. It is important to note that comparable variations in the salinity and temperature distribution do not occur. However, to settle the problem of biological activity involved in the development of patches the data obtained did not suffice. Principally physical and biological variations can be distinguished by comparing different chemical parameters produced by different biological processes. There is some information available in the observations obtained that on the one hand physically influenced variability prevails (Fig. 5, 6, 7, 8) and on the other hand changes caused by biological activity are apparent which is not distributed homogeneously. This is recognized by deviations from the rule of constant ratio between the compared parameters in the case of inorganic dissolved phosphate and hydrogen sulphide in fig. 7 and 8 and in the case of ammonia and inorganic phosphate in fig. 4.

Auf einer Forschungsfahrt des F.K. „Alkor“ des Instituts für Meereskunde in Kiel im September 1967 wurden in der zentralen Ostsee erhebliche kurzzeitige Schwankungen chemischer Größen in der gesamten Wassersäule beobachtet, die sowohl auf ein stark veränderliches Strömungsfeld zurückzuführen sind als auch auf eine räumlich inhomogene Verteilung der gemessenen Parameter hindeuten. Zur Untersuchung waren schnell registrierende ozeanographische und chemische Meßverfahren kombiniert worden, um die Veränderlichkeit chemischer Komponenten in ihrem Zusammenhang mit den Schwankungen der Strömungsverteilung und Wasserschichtung zu erfassen.

Hinweise auf kurz- und langfristige Änderungen der hydrographischen Faktoren waren von B. KULLENBERG und I. HELA (1942), T. GUSTAFSEN und B. KULLENBERG (1933) und G. SIEDLER (1961) gegeben. Die Veränderungen in der Verteilung chemischer Komponenten waren nur für großräumige Umschichtungsvorgänge und Stagnationserscheinungen durch die Untersuchungen von K. KALLE (1943) und S. H. FONSELIUS (1962, 1967, 1969) bekannt. Über kurzfristige Schwankungen fehlte es bisher an Beobachtungen. Die Entwicklung von automatischen Geräten zur Analyse chemischer Parameter im Institut für Meereskunde in Kiel (K. GRASSHOFF, 1969a, b) gab für die Untersuchungen mit F.K. „Alkor“ Möglichkeiten an die Hand, Messungen in räumlich und zeitlich engem Abstand durchzuführen und somit Kenntnis über kleinräumige und kurzzeitige Änderungen zu gewinnen.

Legende zu der nebenstehenden Abbildung (Tafel 1)

Abb. 1: Lage der Ankerstation A im Gotland-Tief (Tiefe in m).

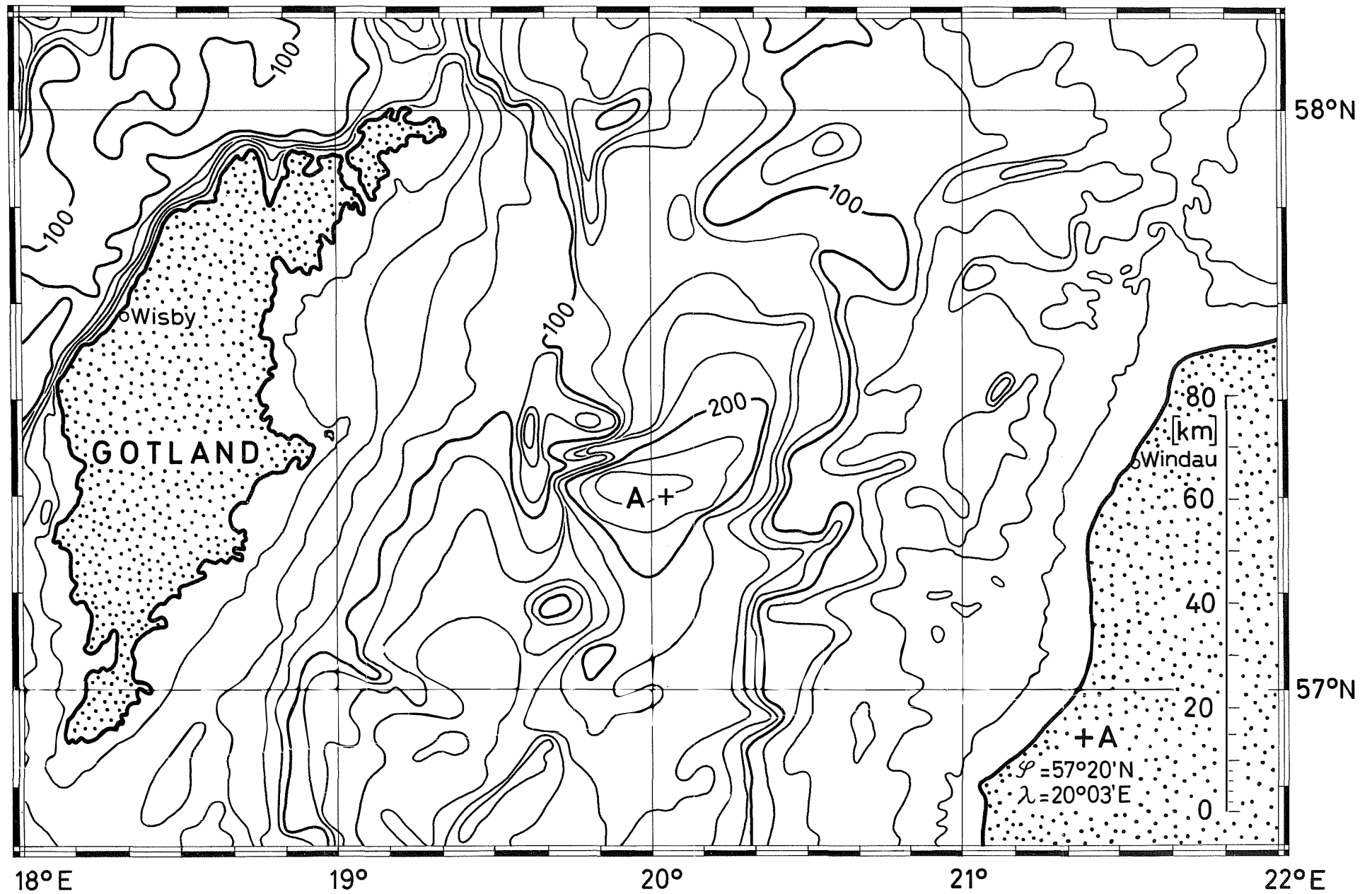
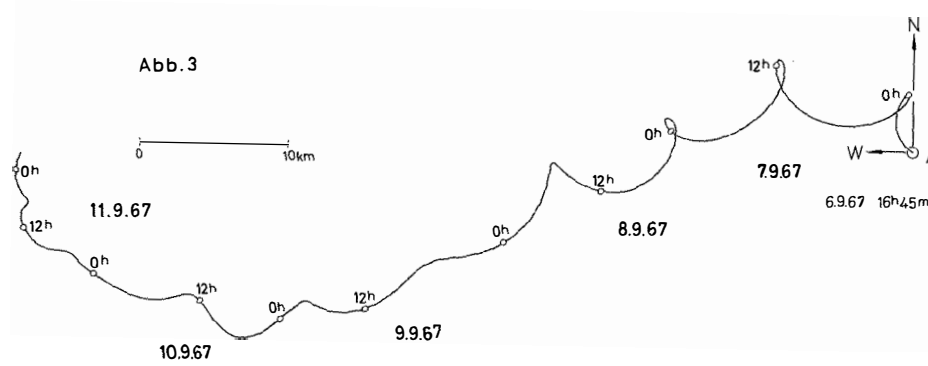
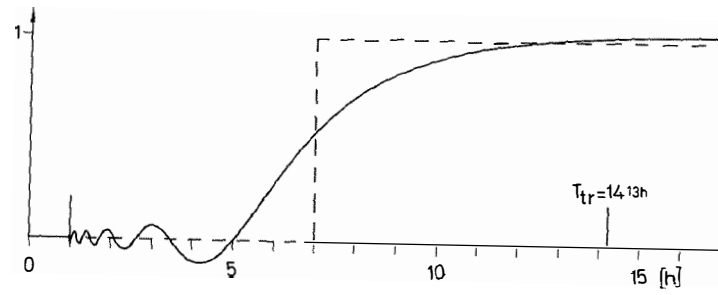


Abb. 1

Abb. 2



Tafel 2 (zu E. Hollan)

Als repräsentative Meßstelle wurde eine Ankerstation $\varphi = 57^{\circ}20'N$, $\lambda = 20^{\circ}3'E$, Wassertiefe 234 m (s. Abb. 1) im Zentrum des östlichen Gotland-Beckens im Bereich des Gotland-Tiefs für eine Dauer von 6 Tagen vom 6.—12. 9. 1967 angelaufen. In diesem Zeitraum wurden neben kontinuierlichen Sondenregistrierungen der vertikalen Sauerstoff-, Salzgehalts- und Temperaturverteilung alle 3 Stunden hydrographische und chemische Serienmessungen in 12 verschiedenen Tiefenhorizonten ausgeführt. Parallel zu diesem Meßprogramm wurde die vertikale Strömungsverteilung registriert, durch die notwendige Information über die Veränderlichkeit des Strömungsfeldes am Beobachtungsort beschafft werden sollten. Hierfür wurden 5 Richardson-Strommesser in verschiedenen Tiefenhorizonten in einem vom Schiff unabhängigen Verankerungssystem ausgelegt. Um neben langperiodischen Schwankungen auch sehr kurzfristige Veränderungen erfassen zu können, waren 3 Geräte auf eine Meßwertfolge von 2 min und 2 Geräte auf eine solche von 5 min geschaltet worden.

Die Meßergebnisse erlauben weiterreichende Schlüsse über die Ausdehnung der an der beobachteten Strömungsverteilung vorwiegend beteiligten Schwankungen, als ursprünglich erwartet worden war. Die im einzelnen in einer ausführlichen Analyse von E. HOLLAN (1969) gewonnenen Kenntnisse über die Veränderungen im Strömungsfeld lassen es zu, in den unteren Wasserschichten in drei Tiefenhorizonten Aussagen über die Teilchenbahnen während der 6 Beobachtungstage zu machen. Damit eröffnet sich die Möglichkeit für eine Zuordnung der in zeitlicher Abfolge auf der Schiffsposition gemessenen chemischen Daten im Raum, wodurch räumliche, vor allem horizontale Änderungen chemischer Größen in diesen Tiefen in beschränktem Umfang erfaßbar werden.

Eine Darstellung der auf der Ankerstation gewonnenen chemischen Meßreihen und Diskussion der enthaltenen zeitlichen und vertikalen Veränderlichkeit haben J. GIESKES und K. GRASSHOFF (1969) im Zusammenhang mit Ergebnissen aus einer zweiten Meßperiode im Mai 1968 gegeben. Unregelmäßige Schwankungen im Schwefelwasserstoff- und Phosphatgehalt in 175 m und 200 m Tiefe deuten auf eine räumlich stark inhomogene Verteilung hin, die bei fortschreitender Stagnation in freiem Wasser im September 1967 ausgebildet war. Die Änderungen anderer chemischer Größen lassen ebenfalls räumliche Inhomogenität vermuten und sind der Anlaß, im folgenden die räumlichen Unterschiede eingehender zu untersuchen und Vorstellungen über ihre Ausmaße zu gewinnen.

In dem geschilderten Verfahren wird im wesentlichen die physikalisch bedingte Veränderlichkeit eliminiert, die die chemischen Meßwerte beeinflußt hat. Zu den einzelnen chemischen Proben wird durch die Kombination mit den Teilchenbahnen die räumliche Zuordnung in situ ermittelt. Diese Verteilung enthält jedoch noch die Veränderungen infolge biologischer Abbauprozesse und nicht berücksichtigte Austauschvorgänge, über deren Einfluß auf eine einmal gegebene inhomogene räumliche Verteilung einer Größe wenig bekannt ist. Die Zeitskala, in der diese Vorgänge erhebliche Änderungen verursachen können, läßt sich jedoch größenordnungsmäßig festlegen und mit derjenigen der Veränderungen durch Advektion vergleichen. Damit werden die Wirkungen der verschiedenen Ursachen in grober Näherung abschätzbar, so daß

Legende zu den nebenstehenden Abbildungen (Tafel 2)

Abb. 2: Ideales und approximiertes Spektralfilter (gerissene und durchgezogene Linie) für die Vorbehandlung der Strömungsmeßreihen.

Abb. 3: Geometrischer Ort der die Meßstation A im Laufe der Beobachtungszeit passierenden Wasserteilchen in 18 m Tiefe (aufgrund der Bahnintegration der Strömungsmessungen bei A in 18 m Tiefe).

die erhaltenen Angaben über die räumlichen Änderungen mit Fehlergrenzen versehen werden können.

Die zur Verfügung stehenden Strömungsmessungen stammen aus 18 m, 43 m, 94,5 m, 144,5 m und 205 m Tiefe und sind in der gesonderten Untersuchung von E. HOLLAN (1969) graphisch dargestellt worden. Die Registrierungen zeigen, daß in allen Meßtiefen Schwingungen mit der Periode zwischen 13 und 14 Stunden unterhalb der örtlich gegebenen Trägheitsperiode $T_t = 14 \text{ h } 13 \text{ min}$ vorherrschen. Dieser langperiodischen Veränderlichkeit sind sehr kurzperiodische Schwankungen überlagert, deren Perioden im Bereich zwischen 4 min und 1 Stunde liegen. Die kurzfristigen Veränderungen erfolgen mit stark wechselnder Intensität. Sie bestehen zum größten Teil aus geordneten periodischen Vorgängen und stellen die kurzperiodische innere Unruhe des untersuchten Seegebietes dar.

Die weitere Analyse und Deutung der Meßergebnisse hat ergeben, daß die Ursachen der kurzen Schwankungen in kleinräumig verteilten Kraftfeldern zu suchen sind, wie z. B. in Inhomogenitäten im mittleren Strömungsfeld oder der Böigkeit des Windes in Oberflächennähe. Die langperiodischen Schwankungen lassen sich dagegen auf großräumig wirkende Anregungskräfte zurückführen, die durch Starkwindfelder über dem gesamten betrachteten Seegebiet hervorgerufen werden. Als Größenordnung für die horizontale Ausdehnung dieser Störungen in der zentralen Ostsee ergeben sich 100 km und mehr, im Ozean etwa 100—1000 km und darüber. Dies bedeutet, daß auf wenige Kilometer Horizontalerstreckung keine größeren räumlichen Änderungen des zugehörigen Strömungsfeldes in einem Tiefenhorizont entstehen können. Wie sich ebenfalls in den Strömungsmessungen von F. WEBSTER (1968, 1969) zeigt, ist diese auf kleinen Raum kohärente Bewegung in der Vertikalen auf verhältnismäßig dünne Schichten beschränkt. Die Beobachtungen aus dem Gotland-Tief weisen z. B. zwischen 144,5 m und 205 m Tiefe, also auf 60 m Tiefenunterschied, eine Phasendifferenz von etwa 180° auf. Diese Eigenschaft der langperiodischen Schwankungen muß bei der vorzunehmenden Bahnintegration besonders berücksichtigt werden. Es dürfen nur chemische und Strömungsmeßreihen aus dem gleichen Horizont miteinander in Beziehung gesetzt werden.

Die Bewegungsteile der inneren Unruhe sind auf wesentlich kürzerer horizontaler Distanz veränderlich. Periodische Schwankungen im Periodenbereich zwischen 6 min und 2 h haben horizontale Wellenlängen von 100 m bis zu mehreren Kilometern. Da die verfügbaren Strömungsmessungen nur von einem Ort stammen, fehlt in den Beobachtungen jede Information über den horizontalen Zusammenhang der Störungen. Eine Aussonderung dieser Vorgänge aus den Beobachtungsdaten ist vor einer Berechnung von Teilchenbahnen unumgänglich.

Zieht man jedoch die vorhandenen theoretischen Kenntnisse über das Verhalten der dominierenden Schwingungen heran, so ist das Strömungsfeld für eine Bahnintegration in einer passenden Umgebung der Meßstelle mit ausreichender Genauigkeit als bekannt anzusehen. Für die horizontale Ausdehnung des Integrationsbereiches liegt es nahe, einen Wert von etwa 10 km anzunehmen, da die räumlichen Änderungen der langperiodischen Schwankungen sowie der sehr langsam veränderlichen Bewegungsanteile auf dieser Distanz noch unbedeutend klein bleiben. Die in den Messungen enthaltenen Anteile dieser Bewegungsformen sind für einen solchen Integrationsbereich repräsentativ und können nach der Zeit integriert werden, solange die sich ergebende Bahnkurve nicht über die gesetzten Grenzen hinausführt.

Eine gesonderte Behandlung erfordern die kurzperiodischen Bewegungsanteile, deren unbekannte kleinräumige Veränderlichkeit bei diesem Vorgehen zu berücksichtigen ist. Die Periodenanalyse hat ergeben, daß vorwiegend periodische Vorgänge die kleinräumigen Schwankungen bestimmen und daß die zugehörigen Amplituden häufig kleinere

Werte als die der langperiodischen Schwingungen annehmen. Außerdem wechseln sich nach mehreren Stunden verstärkt und abgeschwächt ausgebildete innere Unruhe stets ab. Die genannten Eigenschaften deuten darauf hin, daß kurzfristig veränderliche Bewegungsvorgänge nur geringen Einfluß auf die Verfrachtung der Wasserteilchen haben. Es ist daher gerechtfertigt, die untergeordnete Wirkung der inneren Unruhe für den vorgesehenen Zweck mit der Elimination aller kurzperiodischen Bewegungsanteile aus den Messungen zu beheben.

Hierzu ist ein Spektralfilter, ein Rechteckfilter, geeignet, das alle Schwingungen mit der Periode unterhalb von etwa 7h unterdrückt und die langperiodischen Anteile oberhalb von 7h ungehindert durchläßt. Das gewünschte Rechteckfilter ist in Abb. 2 mit gestrichelter Linie dargestellt. Die Sprungstellen liegen bei 7h und 10000h. Mit durchgezogener Linie ist in Abb. 2 das wirklich verwendete Filter gezeichnet, wie es auf Grund der nach dem 10. Kosinusglieder abgebrochenen Fourierreihenentwicklung des Rechteckfilters gegeben ist. Die Approximation erschien in dieser Form geraten, da durch die Hinzunahme weiterer Reihenglieder ein schwerwiegender Nachteil entstanden wäre, der sich auf die Länge der Bahnkurve und damit auf die Anzahl der zuordnungsfähigen Werte einer chemischen Meßreihe reduzierend ausgewirkt hätte; denn mit der Anzahl q der Kosinusglieder in der Reihe ist bei der Filterung der Strömungsreihe ein Fortfall von q Meßwerten am Reihenanfang und -ende verbunden. Bei der gewählten Filterapproximation sind $q = 10$ Kosinusglieder berücksichtigt, was eine gegenüber der gesamten Meßdauer von 6 Tagen verträgliche Kürzung um 5 Stunden am Anfang und Ende bedeutet, ohne die Filterwirkung im Periodenbereich unterhalb von 6h wesentlich zu verschlechtern. Für Perioden zwischen 6h und 10h wird eine Reduzierung der Amplituden um den Faktor 0,3 bis 0,9 in Kauf genommen. Im Periodenbereich oberhalb von 10h, insbesondere bei der in den Messungen dominierenden Periode bei etwa 13h, bleibt das Spektrum, wie gewünscht, nahezu unverfälscht.

Vor der Anwendung des gezeichneten Filters auf die Meßreihen aus 18 m, 94,5 m Tiefe mit einem Meßwertabstand von $\Delta t = 2$ min und aus 144,5 m und 205 m Tiefe mit einem Meßwertabstand von $\Delta t = 5$ min wurden die Reihen über 15 bzw. 6 Werte gemittelt, um auf die benötigte einheitliche Meßwertdistanz von 30 min zu gelangen. Die Filterung der ungemittelten Reihen wäre mit erheblich besserer Approximation des Rechteckfilters bei gleicher Verkürzung der Teilchenbahnen möglich gewesen, wurde aber wegen der längeren Rechenzeit¹⁾ gegenüber dem schnelleren, oben genannten Verfahren unterlassen. Zudem liegt in der Wahl der Filtergrenze bei 7h ein großes Maß an Willkür, da die Trennung von kurz- und langperiodischen Bewegungen im Bereich zwischen 5h und 10h nicht mit einer sprunghaften Änderung des Spektrums verbunden werden kann, sondern einen künstlichen Einschnitt in die mit abnehmender Periode allmählich abfallende Verteilung der Amplitudendichte darstellt. Als einziges Maß kann für die Wahl die kleinste zu berücksichtigende horizontale Wellenlänge dienen, durch die die horizontale Ausdehnung des Integrationsbereiches festgelegt wird, für den die gefilterten Strömungsmessungen näherungsweise noch als konstant angesehen werden können. Bei der Grenzperiode $\tau = 7$ h ergibt sich für die zugehörige Wellenlänge gemäß der Formel (W. KRAUSS, 1966):

$$L_n = \frac{2H}{n} \sqrt{\frac{g\Gamma_0 - \omega^2}{\omega^2 - f^2}}$$

¹⁾ Die Filterung und Integration der Meßreihen wurde im Rechenzentrum der Universität Kiel auf der elektronischen Rechanlage ELX 8 ausgeführt.

mit $H = 234$ m Wassertiefe, $g =$ Erdbeschleunigung, $\omega = \frac{2\pi}{\tau}$ Kreisfrequenz, $f = 2\Omega \sin \varphi$ Coriolisparameter, $\Gamma_0 = 5 \cdot 10^{-5} \text{m}^{-1}$, $n =$ Ordnung der internen Welle, ein Wert von $L_1 = 48$ km. Auf 12 km Länge ändert sich bei Beachtung des Filterfaktors von 0,5 bei 7 h das Strömungsfeld noch um die Hälfte der zugehörigen maximalen Abweichung aus der Mittellage. Die Amplitudendichte im Bereich von $\tau = 7$ h beträgt jedoch höchstens $\frac{1}{10}$ des Wertes der Schwingung bei etwa 13,5 h Periode (E. HOLLAN, 1969, Abb. 6) und kann daher auf 12 km Distanz von der Meßstelle nur einen Fehler von 5% bei der Bahnintegration verursachen.

Dabei sind allerdings Wellenlängenverkürzungen durch Advektion infolge stärkerer langperiodischer Strömungsanteile nicht berücksichtigt. Bei 4 cm/sec mittlerer Strömung ergibt sich z. B. in 7 h die gegen $L_1 = 48$ km vernachlässigbare Verkürzung der Wellenlänge um 1 km. Die Bahnberechnung nach dem vorgenommenen einfachen Verfahren wird demnach nur bis zu einer Entfernung von etwa 10 km von der Ankerstation ausreichend genaue Ergebnisse liefern, wenn auch langperiodische oder mittlere Bewegungen einen Wert von etwa 5 cm/sec nicht überschreiten.

Die Integration der gefilterten Meßreihen geschieht durch Multiplikation der Meßwertpaare: u-Ostkomponente und v-Nordkomponente, die in Einheiten cm/sec gegeben sind, mit dem Faktor 1800 sec, der das Zeitintervall zwischen zwei aufeinander folgenden Meßwertpaaren darstellt. Das zu einem Stromvektor gesuchte geradlinige Bahnstück ergibt sich aus den beiden ermittelten Bahnelementen durch vektorielle Addition. Die erhaltenen Ergebnisse sind in Abb. 3—8 wiedergegeben und graphisch mit chemischen Meßwerten verbunden worden, soweit die Bahnintegration nicht über die gesetzte Grenze von 10 km hinausführte.

Die gezeichneten Kurven sind als Ort aller Wasserteilchen zu verstehen, die infolge der Strömung im Laufe der Meßdauer vom 6.—12. 9. 1967 zur Meßstelle gelangten. Denkt man sich die Meßstation in den eingezeichneten Koordinatenursprungspunkt gelegt, so geben die Uhrzeiten an der Kurve an, wann die zugehörigen, besonders markierten Teilchen durch die Meßposition A gehen.

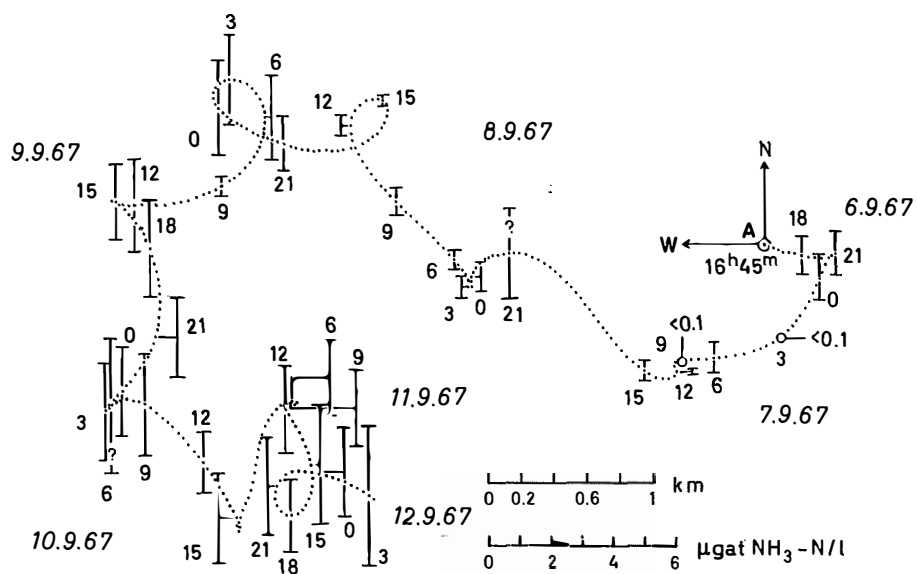
Durch die hohe Strömungsgeschwindigkeit in Oberflächennähe entsteht in 18 m Tiefe eine Ortskurve von etwa 60 km Länge (Abb. 3). Diese Ausdehnung überschreitet den erlaubten Integrationsbereich erheblich. Die Kombination mit chemischen Meßreihen aus gleicher Tiefe ist nur auf hinreichend kleinen Kurvenstücken zulässig und führt nicht zu dem notwendig zusammenhängenden Bild, das Einsicht in die räumliche Verteilung chemischer Größen gibt. Eine Zuordnung chemischer Meßwerte zu einzelnen Wasserpartikeln wurde deshalb nicht vorgenommen. Die Abbildung veranschaulicht jedoch einerseits im Vergleich mit den Ortskurven aus den größeren Tiefen die unterschiedlichen Größenordnungen der horizontalen Wasserverfrachtungen (Abb. 5—8) und macht andererseits auch die zur Unterschicht gegensätzliche Richtung der Verfrachtung in der Oberschicht deutlich sichtbar.

So entnimmt man in 18 m Tiefe eine während der gesamten Meßperiode vorherrschende Verschiebung der Wassermassen nach Osten, was in Einklang mit der ange-troffenen Wetterlage steht, die sich durch anfangs stürmische, allmählich abflauende Winde aus westlicher und südwestlicher Richtung auszeichnete. In mittleren Tiefen ist gemäß Abb. 4 (94,5 m Tiefe) nur eine gesamte Horizontalversetzung von 5 km gegeben.

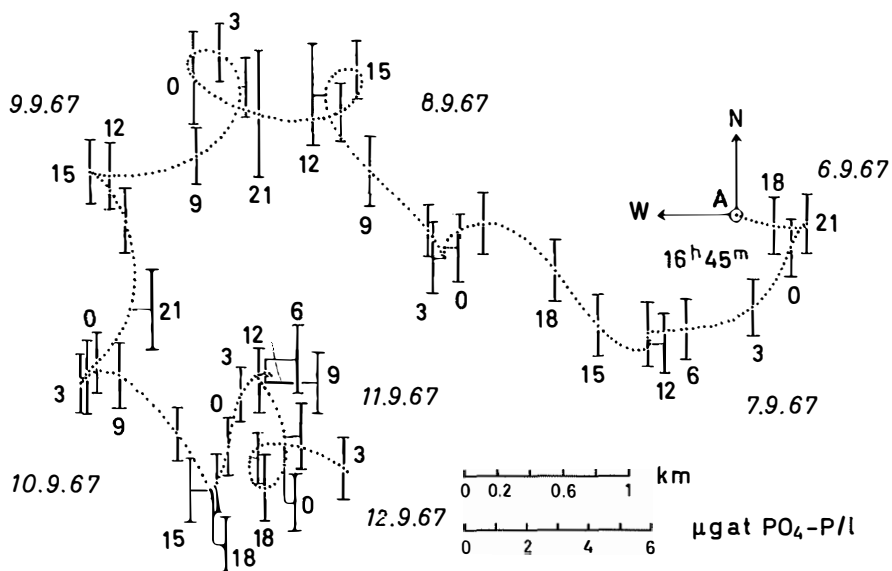
Legende zu der nebenstehenden Abbildung (Tafel 3)

Abb. 4: Geometrischer Ort der durch Ammoniak- und Phosphatmessungen identifizierten Wasserteilchen in 94,5 m Tiefe.

Abb. 4

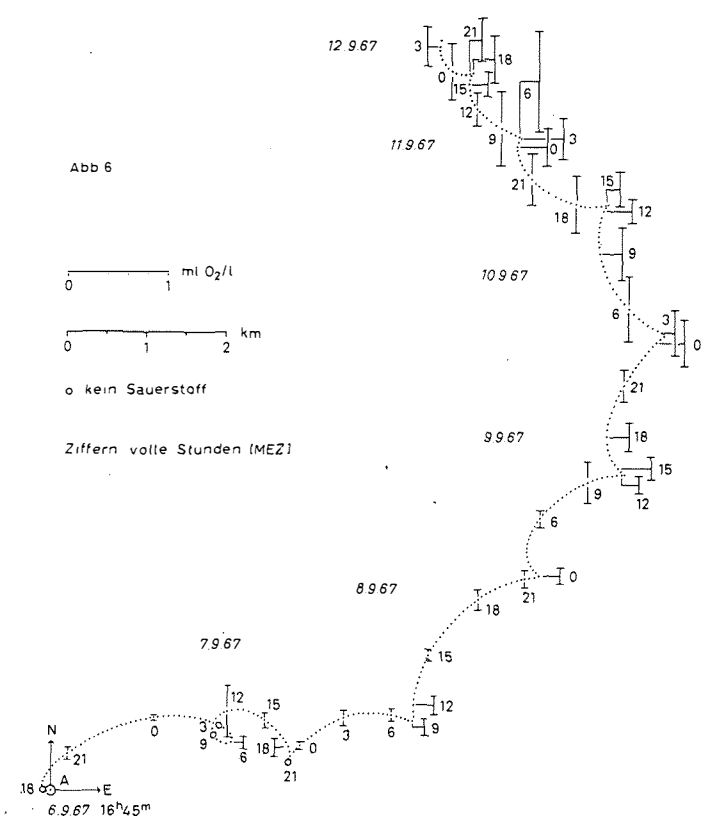
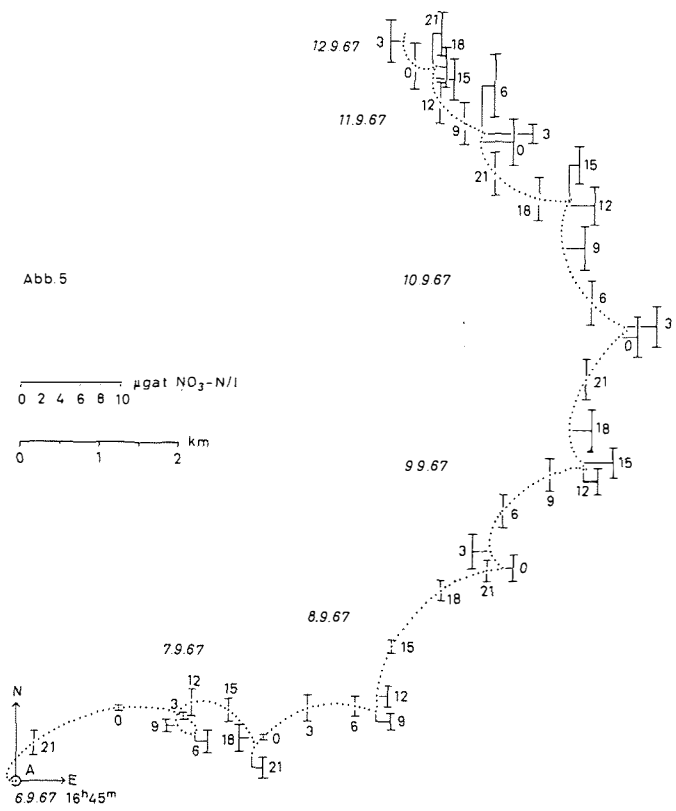


Ziffern: volle Stunden [MEZ]



Tafel 3 (zu E. Hollan)

Tafel 4 (zu E. Hollan)



Insbesondere wechselt die mittlere Richtung von Ost auf Nord und schließlich auf West. In den unteren Schichten nimmt die Versetzung wieder zu. Sie beläuft sich für die Zeit vom 6.—12. 9. 1967 auf 11 km in 144,5 m und 205 m Tiefe (Abb. 5—8) und hält sich damit gerade innerhalb der zulässigen Integrationsgrenzen, so daß chemische Meßreihen von der Ankerstation in gesamter Länge mit den Ortskurven kombiniert werden können. Mit Annäherung an den Boden beherrscht zunehmend eine Südwestströmung die Verfrachtung der Wassermassen. Die geringen Versetzungen und umlaufenden mittleren Richtungen in 94,5 m Tiefe lassen sich als Merkmal einer Übergangszone zwischen gegensätzlichen Strömungen in Oberflächen- und Bodennähe verstehen, und zwar zwischen starker Ostströmung in der Deckschicht und schwächerer südlicher bis westlicher Strömung in der Unterschicht¹⁾.

Den mittleren Versetzungen sind in allen Meßhorizonten spiralförmig schwankende Verschiebungen überlagert, die eine Folge der beobachteten dominierenden Schwingungen im Periodenbereich zwischen 13h und 14h sind. In Oberflächennähe (Abb. 3) macht sich ein allmähliches Abklingen der Schwingung bemerkbar, was in Zusammenhang mit der bereits erwähnten Wettersituation vor und während der Messungen und den Hinweis für die Interpretation dieser Bewegungsform als Folge eines großräumigen Sturmfeldes über der Ostsee gab (E. HOLLAN, 1969). Nach den Ergebnissen aus dieser Untersuchung ist die Veränderlichkeit der zur Schwingung gehörenden Strömungsverteilung in horizontaler Richtung vernachlässigbar klein im betrachteten Integrationsbereich. Die Bewegung kann nahezu als gleichphasig im gesamten Seegebiet um das Gotland-Tief angenommen werden. In Bodennähe (Abb. 7) ist ebenfalls mit Einsetzen der Messungen ein Abklingen der Schwingung erfaßt, was den Zusammenhang mit den oberflächennahen Bewegungsvorgängen nahelegt. Die gegensätzliche Strömung in der Tiefe kann als Kompensationsbewegung zu dem in Windrichtung an der Oberfläche entstandenen Wasserstau verstanden werden. Die in allen Tiefen beteiligte großräumige Schwingung bewirkt dabei die Anpassung der durch den Sturm in Bewegung geratenen Wassermassen an ein neues, ungestörtes inneres Kräftegleichgewicht. Mit diesem Anpassungsmechanismus nähert sich das Strömungsfeld allmählich einer mittleren stationären Verteilung an, was sich in dem beobachteten Abklingungsvorgang zu erkennen gibt. Gegen Ende der Meßperiode setzt eine erneute Störung des Strömungsfeldes ein, die verstärkte Anpassungsbewegungen zur Folge hat, wie es besonders in Abb. 3, 5 und 7 an einer Amplitudenvergrößerung und späteren Änderung der mittleren Richtung vom 9. auf den 10. 9. 1967 und am 11. 9. 1967 deutlich wird.

Die äußere Ursache ist mit großer Sicherheit in einer Änderung der Windrichtung von Südost auf Nord mit allmählicher Zunahme der Windstärke auf 5—6 Bf. gegen Ende der Beobachtungszeit zu suchen. Eine zunehmende Wanderung der Ortskurve in Abb. 3 am 11. 9. nach Norden deutet auf diesen Zusammenhang hin, der auch theoretisch am Beispiel der zu Anfang beobachteten abklingenden Schwingungen nachgewiesen ist (E. HOLLAN, 1969). Die angestellte Betrachtung der beobachteten Bewegungsformen vermittelt eine eingehende Vorstellung über die physikalischen Vorgänge und

¹⁾ Die aus 43 m Tiefe stammende Stromregistrierung ist in diese und die weitere Betrachtung nicht mit einbezogen worden, da die Meßwerte der Richtung mehrfach Fehlanzeigen in Form von Sprüngen um 180° aufweisen, die nicht immer mit genügender Sicherheit korrigiert werden konnten.

Legende zu den nebenstehenden Abbildungen (Tafel 4)

Abb. 5: Geometrischer Ort der durch Nitratmessungen identifizierten Wasserteilchen in 144,5 m Tiefe.

Abb. 6: Identifizierung der in Abb. 5 lokalisierten Wasserteilchen durch ihren Sauerstoffgehalt.

ist unter geeigneten Bedingungen in engen Zusammenhang mit den gemessenen chemischen Veränderungen auf der Ankerstation zu bringen.

Wenn den einzelnen Wasserteilchen verschiedene, in der Beobachtungszeit konservativ beibehaltene Beträge einer chemischen Größe zugeordnet werden können, ist der einfache Fall gegeben, daß aus dem Strömungsfeld und den zeitlichen Änderungen einer chemischen Komponente an einigen Beobachtungspunkten weitgehende Rückschlüsse auf die räumliche Verteilung der betreffenden Größe gezogen werden können. Im vorliegenden Falle stehen nur drei vertikal übereinander liegende Beobachtungspunkte zur Verfügung, die mit den Orten der zur Bahnintegration verwertbaren Strömungsmessungen gegeben sind.

Die räumliche Struktur skalarer chemischer Felder kann auf diesem Wege höchstens ausschnittsweise erfaßt werden. Somit wird das andeutungsweise erhaltene Bild nur den Schluß auf Größenordnungen der horizontalen Veränderlichkeit zulassen.

Die chemischen Meßreihen bringen für diese Betrachtung aus mehreren Gründen Unsicherheiten mit sich. Eine Fehlerquelle besteht darin, daß der Ort der Probenahme vom verankerten Schiff aus horizontal um etwa 500 m gegen die Position der Strommesser verschoben ist. Auch in vertikaler Richtung bestehen geringfügige Tiefenabweichungen, da die den Strommessern in 94,5 m, 144,5 m und 205 m Tiefe nächstgelegenen Probenentnahmestellen sich in 100 m, 150 m und 200 m Tiefe befunden haben. Diese Unterschiede betragen maximal etwa 6 m und können infolge der in vertikaler Richtung erheblich variierenden mittleren Verteilungen zu systematischen konstanten Abweichungen beitragen, wenn zwischen dem Ort der Strommessung und der Probenentnahme nicht mehr unterschieden wird. Von größerer Bedeutung bei der Feststellung räumlicher Veränderlichkeit ist die Vernachlässigung der Distanz zwischen Schiffs- und Strommesserposition. Hierdurch entsteht eine Ungenauigkeit von ± 500 m in den Längenangaben horizontaler Änderungen.

Da die chemischen Meßreihen wegen der großen Meßwertfolge von $\Delta t = 3$ h nicht gefiltert werden können wie die Strommessung, sind kurzperiodischen Störungsanteile nicht zu eliminieren. Schätzt man die Obergrenze dieses Periodenbereichs mit $2 \Delta t = 6$ h ab und nimmt bei dieser Periode eine Amplitude von 5 cm/sec für die horizontalen Stromkomponenten an, so ergibt sich für die in Schwingung befindlichen Wasserteilchen eine in die horizontale Ebene projizierte Kreisbahn mit dem Radius $r = 170$ m. Die durch kurze interne Wellen verursachten horizontalen Verschiebungen fallen somit kleiner aus als die Ungenauigkeit infolge des Lageunterschieds zwischen Anker- und Strommesserposition und erfordern keine gesonderte Fehlerbetrachtung. Besondere Beachtung verdienen jedoch die zugehörigen vertikalen Verschiebungen, die sich in den chemischen Meßreihen in Form erheblicher Schwankungen einzelner aufeinander folgender Meßwerte wiederfinden können, wenn die mittlere Verteilung der betreffenden chemischen Größe in der Meßtiefe Gradienten mit vorwiegend vertikaler Komponente aufweist. Dies ist in allen drei ausgewählten Meßtiefen bei jeder verwendeten chemischen Komponente der Fall. In einer einzelnen Meßreihe werden durch die Wirkung der inneren Unruhe jedoch nur wenige Meßwerte aus dem allgemeinen Verlauf herausfallen, da die Intensität dieser Schwankungen innerhalb des gesamten Beobachtungszeitraums häufig gewechselt hat und in den wenige Stunden dauernden Zeitabschnitten erhöhter Aktivität daher nur gelegentlich eine Messung davon beeinflusst war. Die bei der gesamten Berechnung der Teilchenortskurven vernachlässigte Vertikalkomponente der Strömung ist dagegen auch bei langperiodischen Bewegungen in den chemischen Meßreihen enthalten. So müssen insbesondere bei der dominierenden Schwingung mit der Periode zwischen 13 h und 14 h Schwankungen der Meßwerte infolge zugehöriger Vertikalauslenkungen in Rechnung gestellt werden. Diese Abweichungen können jedoch

daran erkannt werden, daß sie im Takt mit der Schwingung eintreten, wenn die mittlere Verteilung horizontal geschichtet ist. Andernfalls wären in Unregelmäßigkeiten bereits Anzeichen für horizontale Änderungen des mittleren Feldes oder stärkere Störungen durch die innere Unruhe zu sehen. Dabei muß vorausgesetzt werden, daß die Schwankungsbeträge den jeweiligen Meßfehler übertreffen. Diese notwendige Bedingung ist im folgenden stets erfüllt, wie sich aus Tabelle 1 ergibt, in der die Messungenauigkeiten und beobachteten mittleren und maximalen Abweichungen der Meßwerte vom Mittelwert vergleichsweise zusammengestellt sind.

Tabelle 1
Meßfehler sowie mittlere und maximale Abweichungen vom
Mittelwert für die ausgewählten chemischen Parameter

Meßgröße	NO ₃ -N	NH ₃ -N	PO ₄ -P	H ₂ S-S	O ₂
Einheit	µgat/l	µgat/l	µgat/l	µgat/l	ml/l
Fehler	± 0,1	± 0,5	± 0,1	± 0,1	± 0,05
Mittlere Abweichung . .	1,1	1,0	0,3 0,3	7,7	0,18
Maximale Abweichung .	3,2	2,4	2,0 0,8	12,7	0,72
Mittelwert	3,2	2,1	2,0 5,1	9,3	0,30
Tiefe in m	150	100	100 200	200	150

Veränderungen chemischer Meßwerte werden auch durch biologische Aktivität hervorgerufen. Anhaltspunkte für einen charakteristischen Zeitbedarf dieser Vorgänge lassen sich aus den Untersuchungen von S. H. FONSELIUS über die Stagnation in den tiefen Schichten der Gotlandsee entnehmen. So beschreibt FONSELIUS (1969) eine kurze Stagnationsperiode vom Sommer 1965 bis Frühjahr 1967, während der im Herbst 1966 im freien Wasser — durch sauerstoffhaltiges Wasser von der bodennahen Wasserschicht getrennt — in 175 m Tiefe Schwefelwasserstoff vorkommt, wie in der im September 1967 angetroffenen Situation. Die Zunahme des H₂S-Gehalts in dieser Zwischenschicht ergibt sich nach den Beobachtungen von S. H. FONSELIUS am 25. 8. 1966 und 21. 11. 1966 zu etwa 0,4 µgat H₂S-S/l und zwischen dem 21. 11. 1966 und 2. 2. 1967 zu 2,5 µgat H₂S-S/l. Wählt man den größeren Änderungsbetrag, so ergibt sich bezogen auf einen Tag die Zuwachsrates von $3,4 \cdot 10^{-2}$ µgat H₂S-S/l. Für den Beobachtungszeitraum vom 6.—12. 9. 1967 ergibt sich somit eine biologisch bedingte Zunahme von weniger als 1% des maximal beobachteten H₂S-Gehaltes. Selbst wenn die biologische Leistung unter den Bedingungen im September 1967 zehnfachen Wert angenommen hätte, wäre sie innerhalb der 6 Beobachtungstage gegen die gemessenen Veränderungen vernachlässigbar. Für den Phosphat- und Sauerstoffgehalt können aus der Arbeit von S. H. FONSELIUS ähnliche Schlüsse gezogen werden, so daß die Annahme, daß im folgenden neben diesen Größen auch die restlichen verwendeten keinen spürbaren biologischen Änderungen im Beobachtungszeitraum unterlegen haben, gerechtfertigt scheint.

Aus dieser Betrachtung ist auch ersichtlich, daß der Austausch zwischen benachbarten Schichten unterschiedlicher Konzentration von untergeordneter Bedeutung ist gegenüber advektiven Vorgängen. In der von S. H. FONSELIUS erwähnten Stagnationsperiode 1965 bis 1967 könnte z. B. die allmählich über mehrere Monate sich entwickelnde 10—30 m mächtige Schicht schwefelwasserstoffhaltigen Wassers in etwa 175 m Tiefe, umgeben von schwefelwasserstofffreien Wasserschichten, nicht fortbestehen, wenn Austauschvorgänge in stärkerem Maße die seitlichen Einschübe und biologisch produzierten Mengen in die Nachbarschichten überführten. Für die Beobachtungszeit vom 6.—12. 9. 1967 können

daher die chemischen Meßwerte in erster Näherung als konservative Größen angesehen werden, mit denen die angestrebte Identifizierung von Wasserteilchen auf speziellen durch die Strommessungen ermittelten Bahnkurven möglich ist.

Diese Zuordnung ist für die drei unteren Meßtiefen der Strömung und jeweils zwei verschiedene chemische Meßreihen aus den gleichen Tiefenhorizonten ausgeführt und in Abb. 4—8 zur Darstellung gebracht worden.

Auf jeder punktierten Ortskurve für die Wasserteilchen, die während des Beobachtungszeitraumes durch die Meßposition A gegangen sind, erscheinen diejenigen, aus denen bei A eine Probeentnahme erfolgte, mit dem jeweiligen chemischen Meßwert graphisch besonders markiert. Die beige-schriebenen Zeitdaten geben an, wann das betreffende Teilchen den Meßort A passiert. Das entstehende Bild vermittelt die horizontale Verteilung der eingetragenen Meßgröße entlang der Ortskurve, wie es bei Meßbeginn von der Ankerstation A aus zu sehen ist. Das unbekannte Feld kommt jeweils ausschnittsweise zum Vorschein, so daß in diesen Bereichen die horizontalen Änderungen im Rahmen der festgestellten Fehlergrenzen ermittelt werden können.

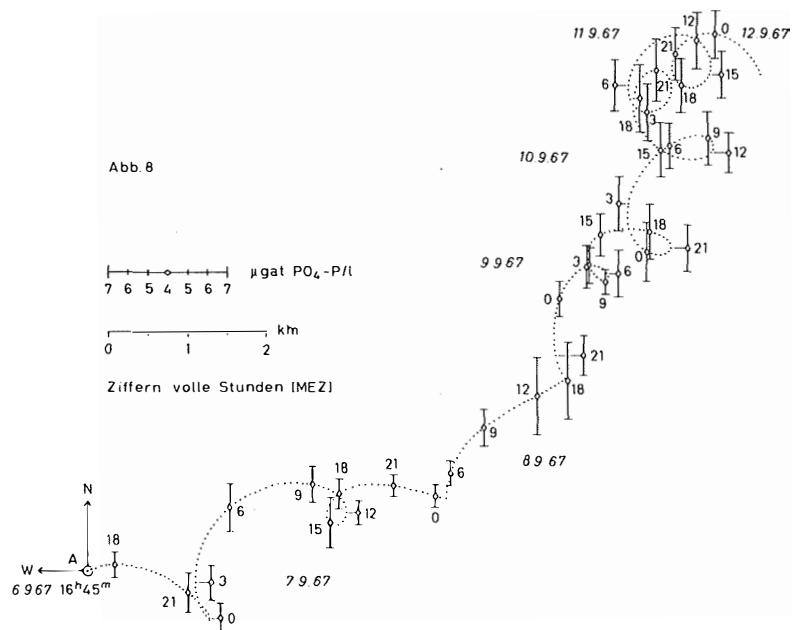
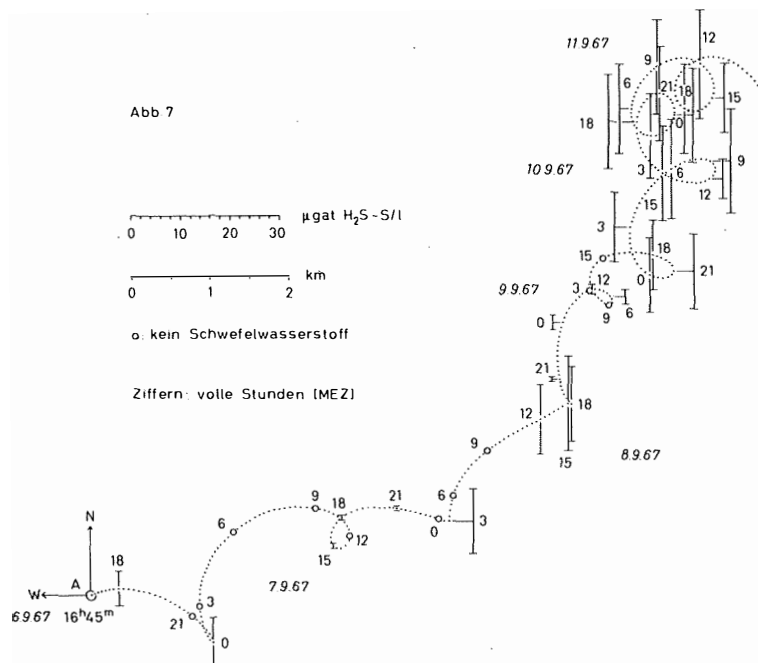
In Abb. 4 sind die Messungen des Ammoniak- und des gelösten anorganischen Phosphatgehaltes in 100 m Tiefe der Ortskurve in 94,5 m Tiefe zugeordnet. Während in der Ammoniakverteilung zum Zeitpunkt des Meßbeginns südlich und westlich bis zu 3 km Entfernung von der Ankerstation nur geringe Werte anzutreffen sind und gegen einen größeren Bereich höherer Konzentration im Westen deutlich unterschieden werden können, kommt das Phosphat im gleichen Raum ausgeglichen verteilt vor. Einen spürbaren Anstieg der Werte bemerkt man nur im 3 km nordwestlich der Ankerstation gelegenen, weniger als 1 km umfassenden Bereich, der, wie aus der oberen Abbildung ersichtlich ist, im Übergangsbereich zwischen niedriger und hoher Ammoniakkonzentration liegt. Dieser Zusammenhang ist jedoch nicht genügend gesichert, da zur Beobachtungszeit dieser Meßwerte erhöhte innere Unruhe von dem Strommesser in dieser Tiefe registriert wurde.

In Abb. 5 und 6 sind auf die Ortskurve für 144,5 m Tiefe die in 150 m Tiefe gemessenen Sauerstoff- und Nitratgehalte aufgesetzt. In beiden Darstellungen kommt eine nach Nordosten gerichtete ständige Zunahme der Konzentrationen zum Vorschein. Auf 10 km ändert sich die Nitratkonzentration von 1 auf 4,5 $\mu\text{gat NO}_3\text{-N/l}$ und der Sauerstoffgehalt von 0,05 auf 0,5 ml/l. Diese Variation deutet eine großräumige Veränderlichkeit an, die in Zusammenhang mit den Nitrat- und Sauerstoffverteilungen vor allem in den darüber liegenden Schichten gebracht werden kann. Die betrachteten Nitratwerte aus 150 m Tiefe befinden sich in einer Schicht starker vertikaler Nitratgehaltänderung (s. J. GIESKES (1969), Abb. 5). Der Anstieg ist entweder durch weiträumig gegebene Unterschiede in der Mächtigkeit der zwischen 70 m und 160 m Tiefe liegenden nitratreichen Schicht bedingt oder als Folge eines allmählichen Absinkens dieser Schicht zu verstehen. Die gleichen Verhältnisse spiegeln sich in der mittleren Änderung des Sauerstoffgehaltes wieder. Auf die tieferen sauerstoffarmen und sauerstofffreien Schichten greift durch seitliche Verschiebung von oben her eine geringe Auffrischung über. Die horizontale Veränderung erfolgt in beiden Fällen nicht allmählich und stetig sondern schrittweise, worin Anzeichen für eine kleinräumig variable Struktur beider Felder zu sehen sind. So bleiben in Abb. 5 von der Ankerstation aus bis in etwa 6 km Entfernung

Legende zu den nebenstehenden Abbildungen (Tafel 5)

Abb. 7: Geometrischer Ort der durch Schwefelwasserstoffmessungen identifizierten Wasserteilchen in 205 m Tiefe.

Abb. 8: Identifizierung der in Abb. 7 lokalisierten Wasserteilchen durch ihren Phosphatgehalt.



Tafel 5 (zu E. Hollan)

nach Osten zu bei der Marke 21h, 8. 9. 67, alle Nitratangaben im Wertebereich um 1 und 2 $\mu\text{gat NO}_3\text{-N/l}$ und gehen von dort ab unvermittelt in den Bereich um 3 und 4 $\mu\text{gat NO}_3\text{-N/l}$ über, der sich nach Norden zu entlang der Kurve anschließt. In diesem Raum findet man auf kleineren Erstreckungen von 1—2 km abwechselnd höhere Gehalte von 4,5 und niedrigere von 4,0 und 3,8 $\mu\text{gat NO}_3\text{-N/l}$. Die hohe Konzentration von 6,4 bei 6h, 11. 9. 67, trifft mit dem isolierten größten Maximum der Sauerstoffwerte in der gleichen Tiefe in Abb. 6 zusammen und stellt mit großer Wahrscheinlichkeit keine Fehlmessung dar. Infolge der aus den chemischen Parametern nicht elimierbaren inneren Unruhe kann jedoch eine solche starke Variation auf sehr kleinem Raum nicht eindeutig als räumliche Inhomogenität identifiziert werden.

In Abb. 7 und 8 tritt neben der großräumigen die faßbare kleinräumige Veränderlichkeit in 205 m Tiefe in ähnlicher, noch auffälligerer Form in Erscheinung, besonders in der erfaßten Schwefelwasserstoffverteilung in Abb. 7. Hier ist bis auf drei isolierte Ausnahmen bis in 6 km Entfernung von der Ankerstation nach Osten zu kein oder verschwindend wenig Schwefelwasserstoff anzutreffen. Bei den Marken 12h—18h, 8. 9. 1967, treten plötzlich hohe Werte von 14—19 $\mu\text{gat H}_2\text{S-S/l}$ auf einer Erstreckung von weniger als 1 km auf. Dann setzt sich etwa 2 km weit nach Nordosten die unterbrochene Verteilung verschwindend kleiner Werte fort, bis bei der Marke 0h, 10. 9. 1967, abrupt hohe Konzentration einsetzt, die in gleicher Richtung noch 3 km weit auf 2 km Breite verfolgt werden kann.

Wenn man die zweite verfügbare H_2S -Meßreihe aus 175 m Tiefe zur Betrachtung heranzieht, stellt man parallel laufend eine ähnlich unregelmäßige Abnahme von der hohen Konzentration von 13 auf 4 $\mu\text{gat H}_2\text{S-S/l}$ gegen Ende der Beobachtungszeit fest. Damit zeigt sich, daß die anfangs zwischen 170 m und 200 m gegebene schwefelwasserstoffhaltige Schicht in wenigen Tagen sich absenkt um etwa 10—20 m. Dieser Vorgang scheint über mehr als 50 m Tiefendifferenz gleichmäßig zu verlaufen, da in 144,5 m Tiefe entsprechende Verlagerungen sauerstoff- und nitratreicher Schichten nach unten gefunden wurden. Die Absenkung wird in größerem regionalen Zusammenhang verständlich, wenn man die langzeitigen Sauerstoff- und Schwefelwasserstoffänderungen aus dem Gotland-Tief betrachtet, wie sie von S. H. FONSELUS (1969) in Form einer IsoPLETHEN-DARSTELLUNG für die Zeit von 1964—1968 ermittelt worden sind. In Abb. 10 dieser Arbeit ist eine bodennahe Wassererneuerung vom Frühjahr bis Ende 1967 wiedergegeben, durch die eine vorher von 170 m Tiefe bis zum Boden reichende schwefelwasserstoffhaltige Schicht unterhalb von 200 m Tiefe verdrängt wird und durch sauerstoffhaltiges Wasser ersetzt wird, das von Süden her eingeströmt ist. Während der Beobachtungszeit vom 6.—12. 9. 1967 herrschte in Bodennähe eine Rückverschiebung der Wassermassen nach Südwesten vor, wobei ursprünglich weiter nach Nordosten vorgedrungene Teile des frischen Bodenwassers an der Meßposition vorbeigeführt wurden. Die beobachtete Abnahme der Schichtdicke bringt zum Ausdruck, daß die äußeren Teile des Einschubs, die infolge längeren Kontaktes mit dem abgehobenen und noch überlagerten schwefelwasserstoffhaltigen Wasser stärkere Vermischung ausgesetzt sind, zum Boden hin abgeflacht sind.

Die bei Schwefelwasserstoff auf kleinem Raum beobachtete starke Veränderlichkeit ist auch in der Phosphatverteilung (Abb. 8) in gleicher Tiefe zu erkennen. Mit der unterhalb von 140 m vorherrschenden Denitrifikation ist neben der H_2S -Entwicklung auch die Zunahme des Phosphatgehaltes verbunden. Deshalb läuft die räumliche Änderung der Phosphatverteilung größtenteils parallel mit derjenigen des Schwefelwasserstoffs. Wie man aus Abb. 8 entnimmt, geht diese Beziehung soweit, daß auch stärkere kleinräumige Veränderlichkeit in Deckung liegt. Dies ist z. B. besonders deutlich in dem bereits erwähnten kleinen Gebiet um die Marken 12h und 18h, 8. 9. 1967, sowie

auch in dem beim Schwefelwasserstoff scharf, beim Phosphat schwächer ausgebildeten Übergang bei 0h, 10. 9. 1967, sichtbar.

Der vermittelte Einblick in die Horizontalverteilungen einiger chemischer Parameter im Bereich des Gotland-Tiefs führt zu der Erkenntnis, daß erhebliche Veränderungen auf kleinem Raum nicht selten vorkommen. Die beobachteten großräumigen Umlagebewegungen, die sich im Mittel als allmählich eintretende, häufig monoton verlaufende Änderungen zu erkennen geben, erhalten dadurch eine unregelmäßige, stark variable Feinstruktur. Die Beobachtungen zeigen, daß die zum Teil um 50—100% vom Mittel abweichenden fleckenhaft zusammenhängenden Erhöhungen oder Verminderungen der Konzentration auf Horizontalerstreckungen von wenigen Kilometern anzutreffen sind. Die Längenskala erreicht in mehreren Fällen nur die Größenordnung von 1 km, den maximal möglichen Fehler bei der Bestimmung von Horizontalabständen, und gibt daher Anlaß zu der Vermutung, daß bei der Feinstruktur bereits mit Ausdehnungen der Größenordnung von 100 m zu rechnen ist. In den unteren Schichten der Gotlandsee besteht somit während der Stagnation eine starke räumliche Veränderlichkeit der chemischen Parameter fort.

Im Zusammenspiel mit den verhältnismäßig hohen mittleren Strömungen hat es den Anschein, daß in den tiefen Schichten die Entwicklung der Stagnation mit der kleinräumig inhomogenen Verteilung der reagierenden Stoffe ursächlich zusammenhängt und ein Bild der langsam ablaufenden Austauschvorgänge zwischen unterschiedlich stark oxydierten Schichten abgibt. In den wolkenartig auftretenden Konzentrationserhöhungen und -verminderungen wären demnach die makroskopischen Austauschelemente zu sehen, durch deren gegenseitige Verlagerung die virtuelle Vermischung in Gang gesetzt und durch die Abspaltung zunehmend kleiner werdender Teile ausgeführt wird. Diese Ansicht kann jedoch nicht ohne weiteres aufrechterhalten werden, wenn man eine räumlich variable biologische Produktion annimmt, die in vergleichbarem Zeitmaßstab abläuft. Dann geht der Aufbau der verschiedenen chemischen Feldverteilungen bereits inhomogen vor sich, und die Vermischung bewirkt sekundär eine allmähliche Zusammenfassung kleinerer Entstehungsherde zu größeren, bis schließlich weite Gebiete ausgeglichen überdeckt sind. Eine Entscheidung, ob die Vorstellung von der erhöhten Beeinflussung der Verteilung durch biologische Aktivität richtig ist, hängt von der Frage ab, wie die Bildung eines betrachteten chemischen Bestandteils regional und zeitlich zustandekommt. Hierüber lassen sich aus dem verwendeten Beobachtungsmaterial kaum Schlüsse ziehen, da die gewonnenen chemischen Daten sich über einen zu kurzen Zeitraum erstrecken und vor allem wegen der verhältnismäßig großen Meßwertfolge von 3 h und der Kombination mit den wenigen Strömungsmessungen die notwendige Auflösung auf kleinem Raum nicht zu erreichen ist. Grundlegende Betrachtungen über die Veränderlichkeit chemischer Parameter in großen Meeresgebieten haben C. D. KEELING und B. BOLIN (1967, 1968) angestellt und dabei die verschiedenen Umwandlungsprozesse bei nichtkonservativen Größen quantitativ erfaßt. Die im großen anwendbaren Ergebnisse lassen sich auf die gegebenen kleinräumigen Verhältnisse in vereinfachter Form übertragen, wenn die chemische Markierung eines Wasserteilchens konservativ beibehalten wird, wie es für die vorangegangene Betrachtung angenommen worden ist. Eine erhebliche Verlängerung der Meßdauer hätte zur Berücksichtigung verschiedener biologischer Abbauprozesse sowie der Austauschvorgänge — und damit zur Betrachtung nichtkonservativer Größen — gezwungen, wobei wegen der auf kleinem Raum benötigten Information hierüber die Anwendung des Modells von C. D. KEELING und B. BOLIN wahrscheinlich Modifikationen erfordert hätte, die auf die Erfassung von Feinstrukturen und komplizierten einzelnen Umwandlungen ausgerichtet sind.

Physikalische und biologische Vorgänge lassen sich prinzipiell durch Messung verschiedener Parameter in dem jeweiligen Tiefenhorizont voneinander trennen, wenn verschiedene Stoffumwandlungen zu den einzelnen chemischen Bestandteilen führen. In den dargestellten Verteilungen kommen enge chemische und physikalische Beziehungen neben gegenläufigen Abweichungen zweier Parameter in einem Tiefenhorizont gleichzeitig vor. Unterschiede in den kleinräumigen Änderungen ergeben sich z. B. andeutungsweise in der Phosphat- und Ammoniakverteilung in 94,5 m Tiefe (Abb. 4) sowie in der Schwefelwasserstoff- und Phosphatverteilung in 205 m Tiefe (Abb. 7 und 8), wo jedoch in Bereichen stärkerer Anreicherung die funktionelle Abhängigkeit zwischen Phosphat und Schwefelwasserstoff zum Tragen kommt und parallel laufende Änderungen verursacht (J. GIESKES, 1969). In 144,5 m Tiefe überwiegt die gleichsinnig verlaufende räumliche Änderung des Nitrat- und Sauerstoffgehaltes. Beide Größen wurden in Übergangszonen zwischen höheren und zur Tiefe hin verschwindenden Werten gemessen, wodurch physikalisch bedingte Änderungen vorrangig zur Auswirkung gelangt sind.

Unabhängig von den Fragen nach den Ursachen ist mit den dargestellten Ergebnissen ein Erscheinungsbild aufgedeckt worden, das die großräumigen schichtweisen Verteilungen einiger Nährstoffe in ihrer feineren Struktur zeigt. Wolkenartig unregelmäßige Anreicherungen und Verdünnungen, ausgedehnt über Entfernungen bis zu wenigen Kilometern, prägen das Bild kleinerer Ausschnitte der einzelnen Verteilungen. Obwohl die Messungen nur stichprobenartig im Bereich des Gotland-Tiefs angestellt wurden, ist wegen der in allen herangezogenen Meßreihen mehrmals lokalisierten kleinräumigen Veränderlichkeit mit großer Wahrscheinlichkeit eine charakteristische Eigenschaft zum Vorschein gekommen.

Literaturverzeichnis

- FONSELIUS, S. H. (1962): Hydrography of the Baltic Deep Basins I. Fishery Board of Sweden, ser. hydr. No. 13. — FONSELIUS, S. H. (1967): Hydrography of the Baltic Deep Basins II. Fishery Board of Sweden, ser. hydr. No. 20. — FONSELIUS, S. H. (1969): Hydrography of the Baltic Deep Basins III. Fishery Board of Sweden, ser. hydr. No. 23. — GRASSHOFF, K. (1969a): Untersuchungen über die Sauerstoffbestimmung im Meerwasser. IV. Über eine Sonde zur digitalen und analogen Registrierung von Sauerstoffpartialdruck, Temperatur und Druck im Meerwasser. Kieler Meeresforschung, 25. — GRASSHOFF, K. (1969b): Über ein Gerät zur gleichzeitigen Bestimmung von sechs chemischen Komponenten aus dem Meerwasser mit analoger und digitaler Ausgabe. Kieler Meeresforschung, 25. — GIESKES, J. und GRASSHOFF, K. (1969): A study on the variability in the hydrochemical factors in the Baltic Sea on the basis of two anchor stations in September 1967 and May 1968. Kieler Meeresforschungen, 25. — GUSTAFSEN, T. und KULLENBERG, B. (1933): Trägheitsströmungen in der Ostsee. Göteborgs Kungl. Vetenskaps- och Vitterhets-Samhälles Handlingar. Ser. B., 3. — HOLLAN, E. (1969): Die Veränderlichkeit der Strömungsverteilung im Gotland-Becken am Beispiel von Strömungsmessungen im Gotland-Tief. Kieler Meeresforschung, 25. — KALLE, K. (1943): Die große Wasserumschichtung im Gotland-Tief vom Jahre 1933/34. Ann. d. Hydr. u. Mar. Meteor. 71. — KEELING, C. D. und BOLIN, B. (1967): The simultaneous use of chemical tracers in oceanic studies. I. General theory of reservoir models. Tellus, 19, no. 4. — KEELING, C. D. und BOLIN, B. (1968): The simultaneous use of chemical tracers in oceanic studies. II. A three-reservoir model of the North and South Pacific Oceans. Tellus, 20, no. 1. — KRAUSS, W. (1966): Methoden und Ergebnisse der Theoretischen Ozeanographie. Bd. II. Verlag Gebrüder Borntraeger, Berlin. — KULLENBERG, B. und HELA, I. (1942): Om trögheitsvängningar i östersjön. Svenska Hydr.-Biol. Komm. Skrifter. Ny Serie: Hydrografi 17. — SIEDLER, G. (1961): Über die kurzfristige Veränderlichkeit von Temperatur- und Salzgehaltsschichtung in der östlichen und mittleren Ostsee im Sommer 1960. Kieler Meeresforschung, 17. — WEBSTER, F. (1968): Observations of Inertial-period Motions in the Deep Sea. Reviews of Geophysics, 6, No. 4. — WEBSTER, F., (1969): On the Representativeness of Direct Deep-Sea Current Measurements. Progr. Oceanogr., 5, Ed. M. Sears, Pergamon Press 1969.