

# Die Erneuerung des Tiefenwassers und andere hydrographisch-chemische Veränderungen in der Ostsee im Jahre 1976

DR. DIETWART NEHRING UND EBERHARD FRANCKE  
INSTITUT FÜR MEERESKUNDE ROSTOCK-WARNEMÜNDE  
DER AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN DER DDR

Die ozeanologischen Verhältnisse im Tiefenwasser der Ostsee wurden 1976 durch intensive Einstromlagen, die im Spätsommer 1975 begannen und im Dezember 1975 mit einem Salzwassereinbruch endeten, bestimmt. Die Folgeerscheinungen dieses Prozesses waren etwas schwächer ausgeprägt oder vom gleichen Umfang wie nach den Salzwassereinbrüchen 1968/69 und 1972. Die Erneuerung des Tiefenwassers führte zu einer Verbesserung der Sauerstoffverhältnisse in nahezu allen großen Becken der Ostsee.

Durch das eingeströmte Wasser sowie durch Reaktivierung aus der Tiefe wurden der euphoten Schicht der Ostsee 1976 zusätzlich Mikronährstoffe zugeführt. Die im Zusammenhang mit dem Salzwassereinbruch beobachteten, relativ hohen Ammoniumkonzentrationen in der westlichen Ostsee und im Arkona- und Bornholmbecken zeigten, daß das eingeströmte Wasser mit organischen Stoffen belastet war und diese Belastung noch nicht vollständig überwunden hatte. Zusammen mit der organischen Biomasse, die zusätzlich durch die Nährstoffzufuhr in der euphoten Schicht produziert werden kann, ist dies eine der Ursachen, daß immer häufiger anoxische Bedingungen im Tiefenwasser der Ostsee auftreten.

Ende November Anfang Dezember 1976 herrschten im Südteil des Kattgats günstige ozeanologische Voraussetzungen für einen erneuten Salzwassereinbruch in die Ostsee. Da jedoch zu diesem Zeitpunkt andere Randbedingungen offenbar nicht erfüllt waren, kam es zu keiner extremen Einstromlage.

## 1. Einleitung

Ozeanologische Untersuchungen bilden eine wichtige Voraussetzung für wissenschaftlich fundierte Fischereiprognozen. Neben Angaben über die ozeanologischen Bedingungen auf den wichtigsten Fangplätzen der Ostsee gestatten die seit 1969 vom Institut für Meereskunde der Akademie der Wissenschaften der DDR in Rostock-Warnemünde systematisch durchgeführten komplexen Untersuchungen auch Rückschlüsse auf den Wasseraustausch zwischen den tiefen Becken. Sie sind ferner eine wichtige Grundlage für die Erforschung der langfristigen anthropogenen und natürlichen Veränderungen in diesem Brackwassermeer.

Im Jahre 1976 wurden in der Ostsee auf 5 Meßfahrten mit dem Forschungsschiff „Professor A. Penck“ Terminbeobachtungen durchgeführt. Aus aktuellem Anlaß erfolgten darüber hinaus im Januar 1976 zusätzliche ozeanologische Messungen mit dem Forschungsschiff „A. v. Humboldt“ in den westlichen Teilgebieten dieses intrakontinentalen Brackwassermeeres. Den Untersuchungen lag wiederum das Stationsnetz des Internationalen Ostseejahres 1969/70 (20) zugrunde

(Abb. 1), das in der westlichen Ostsee, im Arkona- und Bornholmbecken, im Gdänsker Tief sowie im Südteil des östlichen Gotlandbeckens durch zusätzliche Stationen ergänzt wurde. Außerdem erfolgten im November 1976 ozeanologische Messungen im Südteil des Kattgats. Die zusätzlich bearbeiteten Meßpunkte sind in Abb. 1 nur berücksichtigt, wenn sie für die Charakterisierung der hydrographisch-chemischen Bedingungen von Bedeutung waren.

Die ozeanologischen Untersuchungen umfaßten die Parameter  $t^{\circ}\text{C}$ ,  $S_{\text{‰}}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2\text{-N}$  und  $\text{NH}_4\text{-N}$ . Im Februar, im März/April, im Mai und im August 1976 wurde darüber hinaus der organisch gebundene Phosphor und Stickstoff in unfiltrierten Meerwasserproben nach UV-Bestrahlung bestimmt, ohne in diesem Bericht auf die daraus resultierenden Ergebnisse eingehen zu können. Bis Mai 1976 wurde die ozeanologische Meßkette BS 63 (17) eingesetzt. Ab August 1976 fand die OM 75, eine Weiterentwicklung der BS 63, Verwendung. Bei dieser ozeanologischen Meßkette erfolgen die Datenerfassung und -bearbeitung „on line“ durch einen Prozeßrechner, der un-

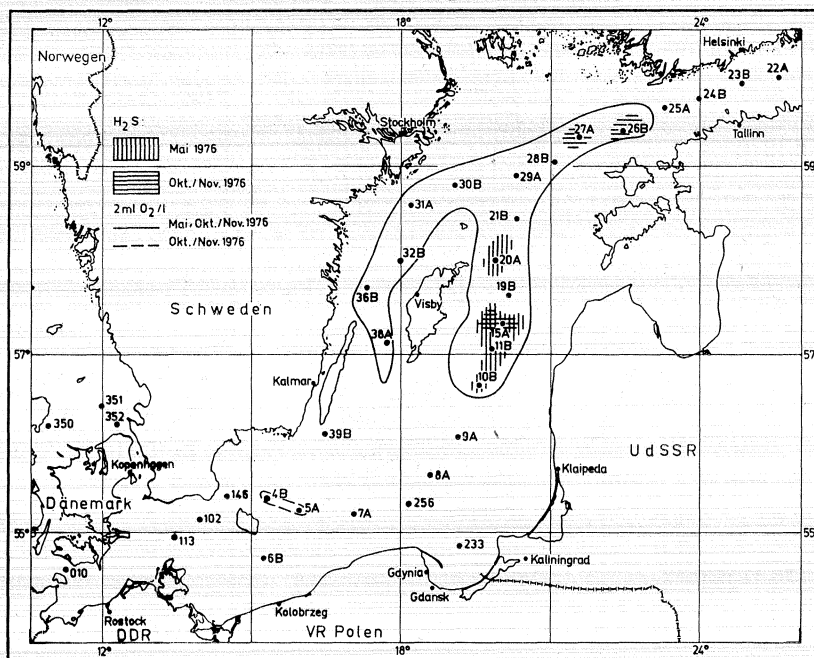


Abbildung 1  
Stationskarte und Gebiete fischereilich ungünstiger Lebensbedingungen im Tiefenwasser der Ostsee

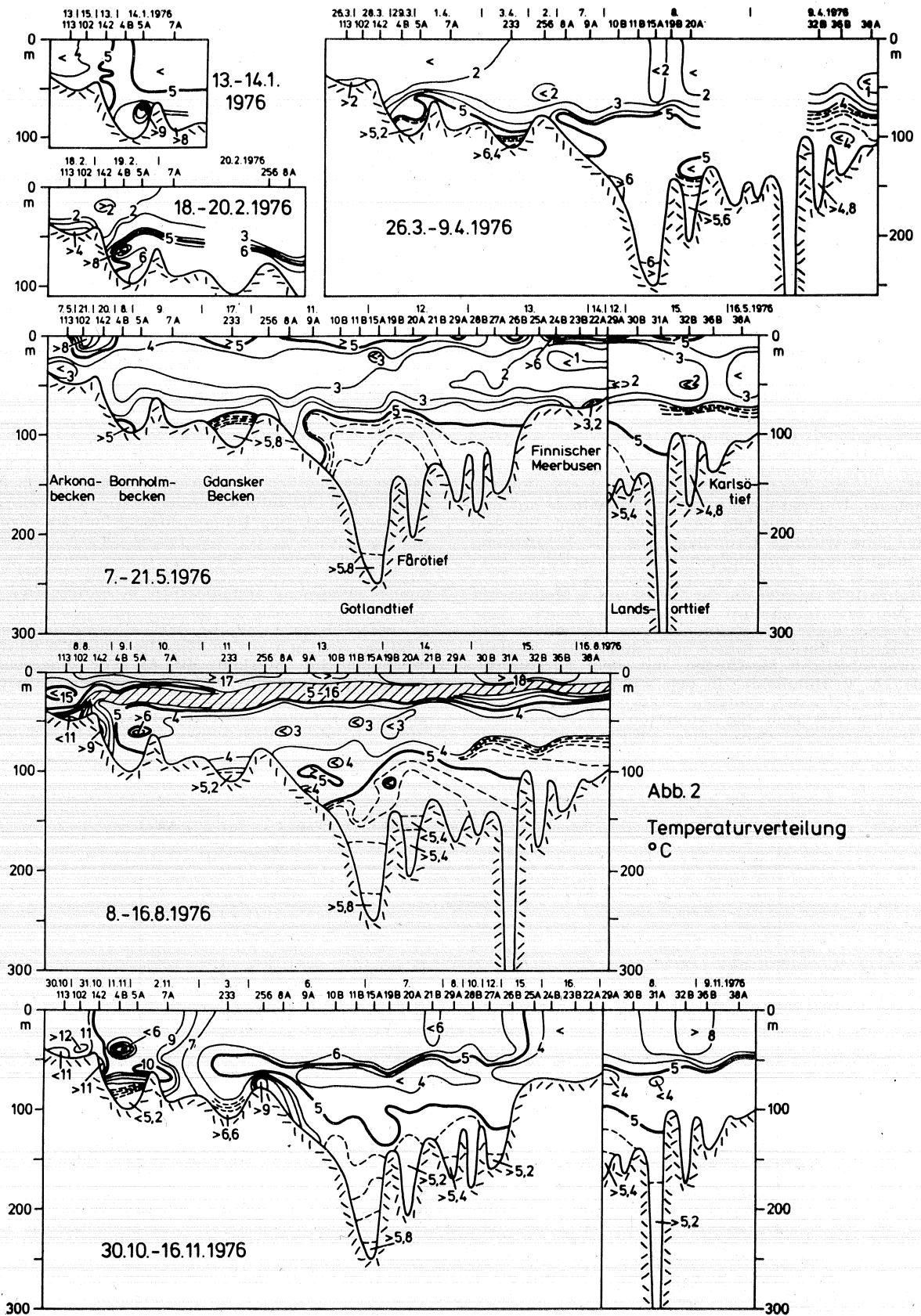


Abb. 2  
Temperaturverteilung  
°C

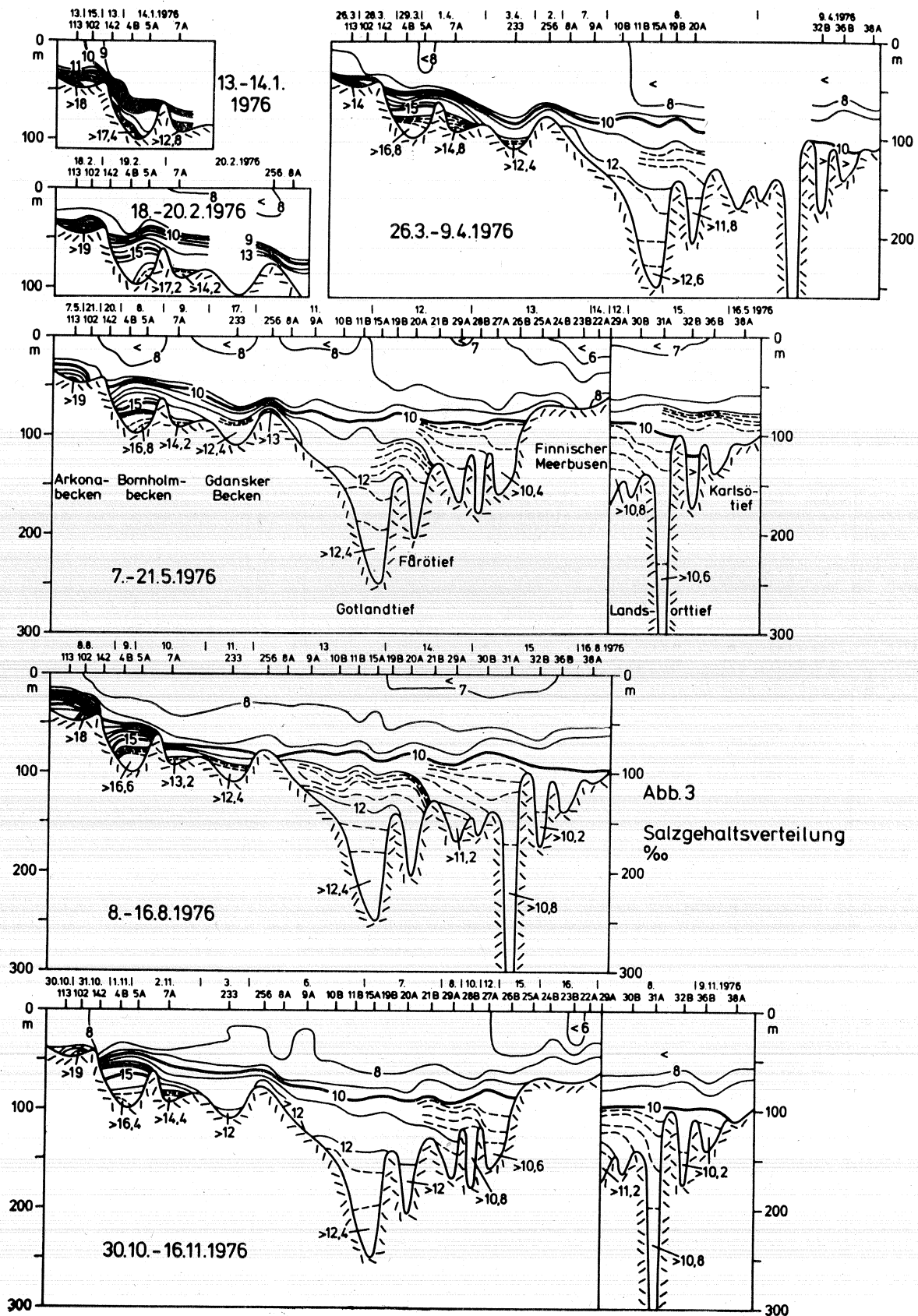
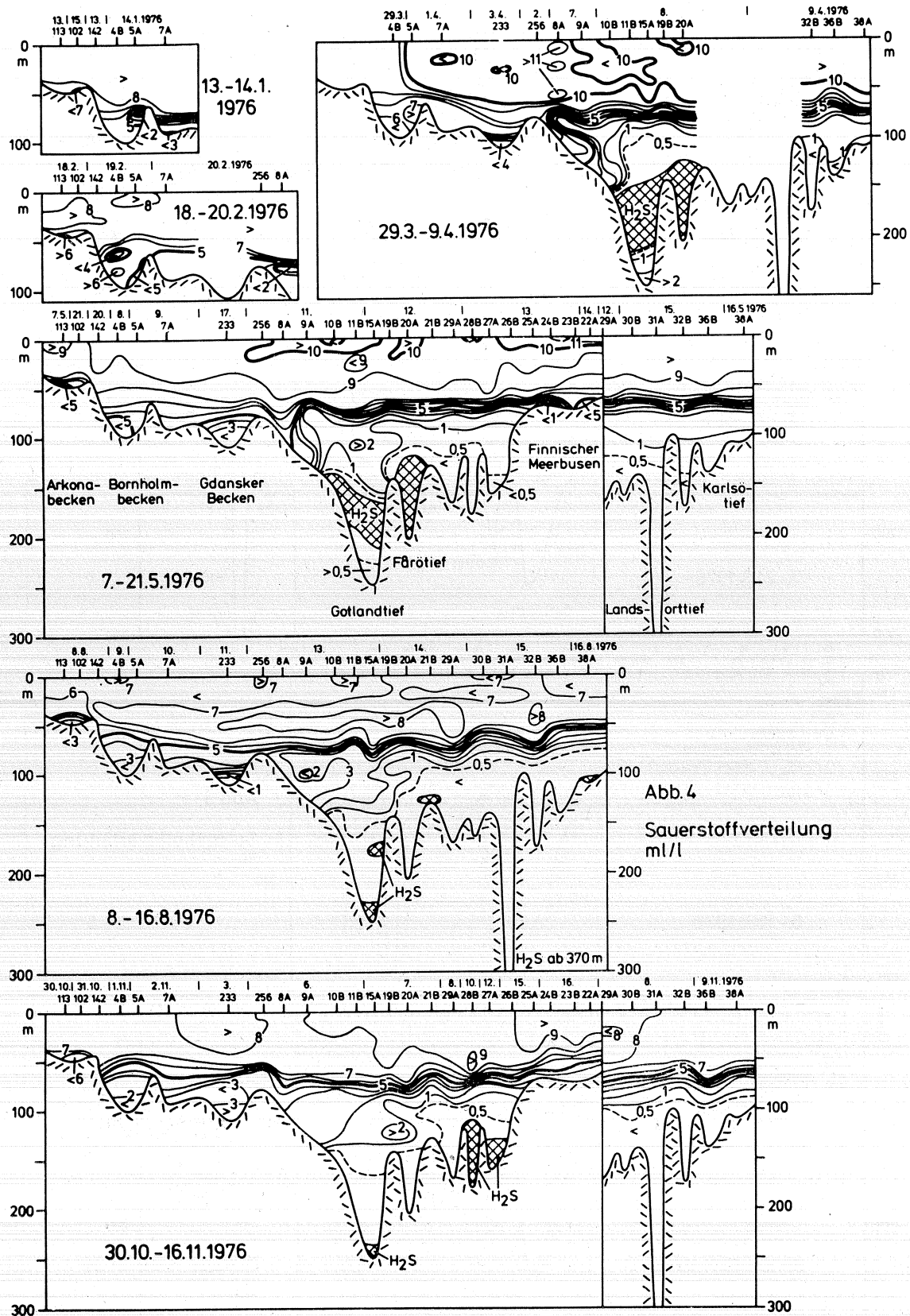


Abb. 3  
Salzgehaltsverteilung  
‰





mittelbar mit der Meßanordnung gekoppelt ist. Das Bauprinzip der Sonde wurde beibehalten und gestattet neben der Bestimmung der Wassertemperatur und anderer ozeanologischer Größen die Entnahme von 12 Wasserproben während einer Serie.

Aus dem Jahre 1976 liegt besonders umfangreiches Meßmaterial vor, da, abgesehen von den zusätzlichen Beobachtungen im Januar, die meisten Meßfahrten vom Wetter begünstigt waren. Nur im Februar mußten die Untersuchungen infolge schlechten Wetters bereits im Südteil des östlichen Gotlandbeckens abgebrochen werden.

Entsprechend den bisherigen guten Erfahrungen wurden auch für 1976 die hydrographisch-chemischen Bedingungen in Form von Längsschnitten durch die tiefen Becken und Mulden der Ostsee dargestellt. Diese Darstellungsform gestattet in einfacher Weise den Vergleich mit den Ergebnissen früherer Jahre (10–15), auch wenn die Messungen auf den einzelnen Stationen aus technischen Gründen nur selten völlig termingleich erfolgten.

## 2. Hydrographisch-chemische Veränderungen

Abbildung 2 enthält Angaben über die Temperaturverhältnisse der Ostsee im Jahre 1976. Danach lagen die Wassertemperaturen in der Oberflächenschicht im Februar und März/April, der Zeit des winterlichen Temperaturminimums (6), zwischen 1,5–2 °C, was etwa den langjährig beobachteten Mittelwerten (5, 6) entspricht. Nur im Südteil des östlichen Gotlandbeckens wurden mit über 2 °C etwas höhere Werte gemessen. Während des sommerlichen Temperaturmaximums im August lagen die Wassertemperaturen an der Oberfläche bei 17–18,5 °C. Sie übertrafen damit die Mitteltemperaturen um etwa 1 °C (5, 6). In der kalten Zwischenwasserschicht, die sich Ende April, Anfang Mai mit der Erwärmung der Deckschicht auszubilden beginnt, wurden in Übereinstimmung mit den mittleren Verhältnissen zunächst Werte von 2,5–3 °C gemessen. In der nördlichen Gotlandsee sowie im Finnischen Meerbusen waren die Temperaturen in dieser Schicht noch niedriger, entsprachen jedoch ebenfalls den mittleren Verhältnissen. Im weiteren Verlauf des Jahres erwärmte sich die kalte Zwischenwasserschicht entsprechend dem Jahresgang um rund 1 °C, in den nördlichen Ostseegebieten sogar um 2–3 °C.

Die Temperaturverhältnisse unterhalb der thermohalinen Sprungschicht wurden durch die Erneuerung des Tiefenwassers bestimmt. Sie setzte in den westlichen Teilgebieten der Ostsee bereits im Spätherbst 1975 ein und erreichte im Dezember 1975 mit einem Salzwassereinbruch ihr Maximum (4, 15). Dadurch sank die Temperatur im Tiefenwasser des Bornholmbeckens von 7,6 °C im Oktober 1975 (15) auf 5,1 °C im Mai 1976 ab. Anders war die Situation im Gotlandtief, wo mit dem Austausch des Tiefenwassers ein vorübergehender Temperaturanstieg um 0,6 °C eintrat (vgl. auch Tab. 2). Im Gdansker Tief und in den weiter nördlich gelegenen Ostseeregionen waren die Temperaturänderungen im Zusammenhang mit der Wassererneuerung schwächer ausgeprägt. Bemerkenswert ist der in der zweiten Jahreshälfte beobachtete Einstrom relativ warmen Tiefenwassers ins Bornholmbecken sowie ins Gdansker Tief und östliche Gotlandbecken.

Die in Abbildung 3 für das Jahr 1976 dargestellte Verteilung des Salzgehalts läßt ebenfalls die advektive Erneuerung des Tiefenwassers erkennen, insbesondere wenn man die Werte des Vorjahres zum Vergleich heranzieht (vgl. auch Tab. 2). Während im Oktober 1975 im grundnahen Bereich des Bornholmbeckens 14,8 ‰, im Gdansker Tief 11,8 ‰ und im Gotlandtief 12,5 ‰ gemessen wurden (15), lagen die zu Beginn des Jahres 1976 auf diesen Stationen ermittelten Salzgehaltswerte bei 17,4 ‰, 12,4 ‰ bzw. 12,6 ‰. Im weiteren Jahresverlauf trat dann infolge Vermischungs- und Austauschvorgängen eine allmähliche Aussüßung ein, die mit einer Salzgehaltsabnahme um rund 1 ‰ besonders im Bornholmbecken augenfällig war.

Infolge des Salzwassereinstromes und der windbedingten Durchmischung waren die westliche Ostsee und das Arkonabecken im Winter und Frühjahr 1976 gut durchlüftet. Aber auch im Sommer und Herbst herrschten

in diesen beiden Seegebieten, mit Ausnahme der Lübecker Bucht, wo nur 0,5–1 ml O<sub>2</sub>/l in unmittelbarer Grundnähe gemessen wurden, relativ günstige Sauerstoffverhältnisse. So sanken die Sauerstoffwerte in der grundnahen Wasserschicht kaum unter 2–3 ml/l ab, im November waren auf nahezu allen Sektionen des Arkonabeckens (Abb. 4) über 5 ml/l vorhanden.

Mit der Erneuerung des Tiefenwassers war auch eine erhebliche Besserung der Sauerstoffverhältnisse in den anderen Teilgebieten der Ostsee verbunden. Die im Herbst 1975 durchgeführten Untersuchungen hatten gezeigt, daß östlich von Bornholm in allen großen Becken unterhalb der Salzgehaltssprungschicht anoxische Bedingungen herrschten (15). Wie jedoch Abbildung 4 erkennen läßt, war im Januar 1976 das schwefelwasserstoffhaltige Tiefenwasser im Bornholmbecken bereits verdrängt und der Sauerstoffgehalt der grundnahen Schicht auf über 5 ml/l angestiegen. Günstige Bedingungen wurden Anfang April auch im Gdansker Becken beobachtet. Darüber hinaus zeichnete sich zu diesem Zeitpunkt bereits der Einstrom sauerstoffreichen Tiefenwassers ins östliche Gotlandbecken ab, wobei ein separater Wasserkörper schon das Gotlandtief erreicht und die ehemals stagnierende, schwefelwasserstoffhaltige Tiefenschicht angehoben hatte. Der Einstrom in dieses Becken dauerte auch im Mai noch an. Die weitere Umschichtung ging jedoch relativ langsam vonstatten, da sich wahrscheinlich ein Teil der eingeflossenen Wassermassen infolge ihrer geringen Dichte in den mittleren Wasserschichten ausbreitete. So war das Fårötief erst im August schwefelwasserstofffrei. Reste des lebensfeindlichen Schwefelwasserstoffgases waren jedoch auch zu diesem Zeitpunkt noch im östlichen Gotlandbecken vorhanden. Das in der zweiten Jahreshälfte im Gotlandtief beobachtete schwefelwasserstoffhaltige Tiefenwasser scheint mit den Beginn einer erneuten Stagnationsperiode im Zusammenhang zu stehen.

Im Frühjahr 1976 wurde im Gegensatz zum Herbst des Vorjahres (15) kein Schwefelwasserstoff im Tiefenwasser des nördlichen und westlichen Gotlandbeckens festgestellt. Diese Besserung der Sauerstoffverhältnisse, die auch in einigen Wintern früherer Jahre beobachtet wurde (10, 12, 15), steht nicht im Zusammenhang mit einer advektiven Wassererneuerung. Die Ursachen hierfür sind wahrscheinlich konvektive Vorgänge und Diffusionsprozesse, die in der kalten Jahreszeit durch die in diesen Gebieten relativ schwach ausgebildete thermohaline Sprungschicht hindurch wirksam werden (vgl. auch 15).

Im Zusammenhang mit der advektiven Erneuerung des Tiefenwassers steht dagegen das Verschwinden des Schwefelwasserstoffs im Karlsötief und wahrscheinlich auch im Landsörtief im November 1976, nachdem im August auf diesen Stationen anoxische Bedingungen geherrscht hatten. Dies wird nicht nur durch die Verbesserung der Sauerstoffverhältnisse, sondern auch durch die Änderung anderer hydrographisch-chemischer Parameter belegt. Infolge ihres geringen Ausmaßes treten diese Veränderungen jedoch in den Schnittdarstellungen nicht in Erscheinung. Das nördliche Gotlandbecken wurde in seinem Ostteil offensichtlich nicht von der Wassererneuerung erfaßt. Hier wurden im November anoxische Bedingungen festgestellt.

Im Bornholmbecken wurde im Verlauf des Jahres 1976 eine Sauerstoffabnahme im Tiefenwasser um etwa 3 ml/l beobachtet. Auch im Gdansker Tief gingen die Sauerstoffwerte zunächst zurück. Im November stiegen sie jedoch im grundnahen Bereich dieser Station erneut an, wobei überraschender Weise gegenüber August höhere Wassertemperaturen und geringere Salzgehalte gemessen wurden, ein Zeichen für weitere Austausch- und Vermischungsprozesse in diesem Becken. Infolge des Salzwassereinstromes wurden in der westlichen Ostsee und im zentralen Arkonabecken relativ hohe Nährstoffkonzentrationen gemessen, die die winterlichen Werte anderer Jahre (0,3–0,6 µg-at. PO<sub>4</sub>-P/l, 3–5 µg-at. NO<sub>3</sub>-N/l und 0,5–1 µg-at. NH<sub>4</sub>-N/l) teilweise erheblich übertrafen. Orientierende Angaben über die Verhältnisse an der Meeresoberfläche im Winter und Frühjahr 1976 können der Tabelle 1 entnommen werden.

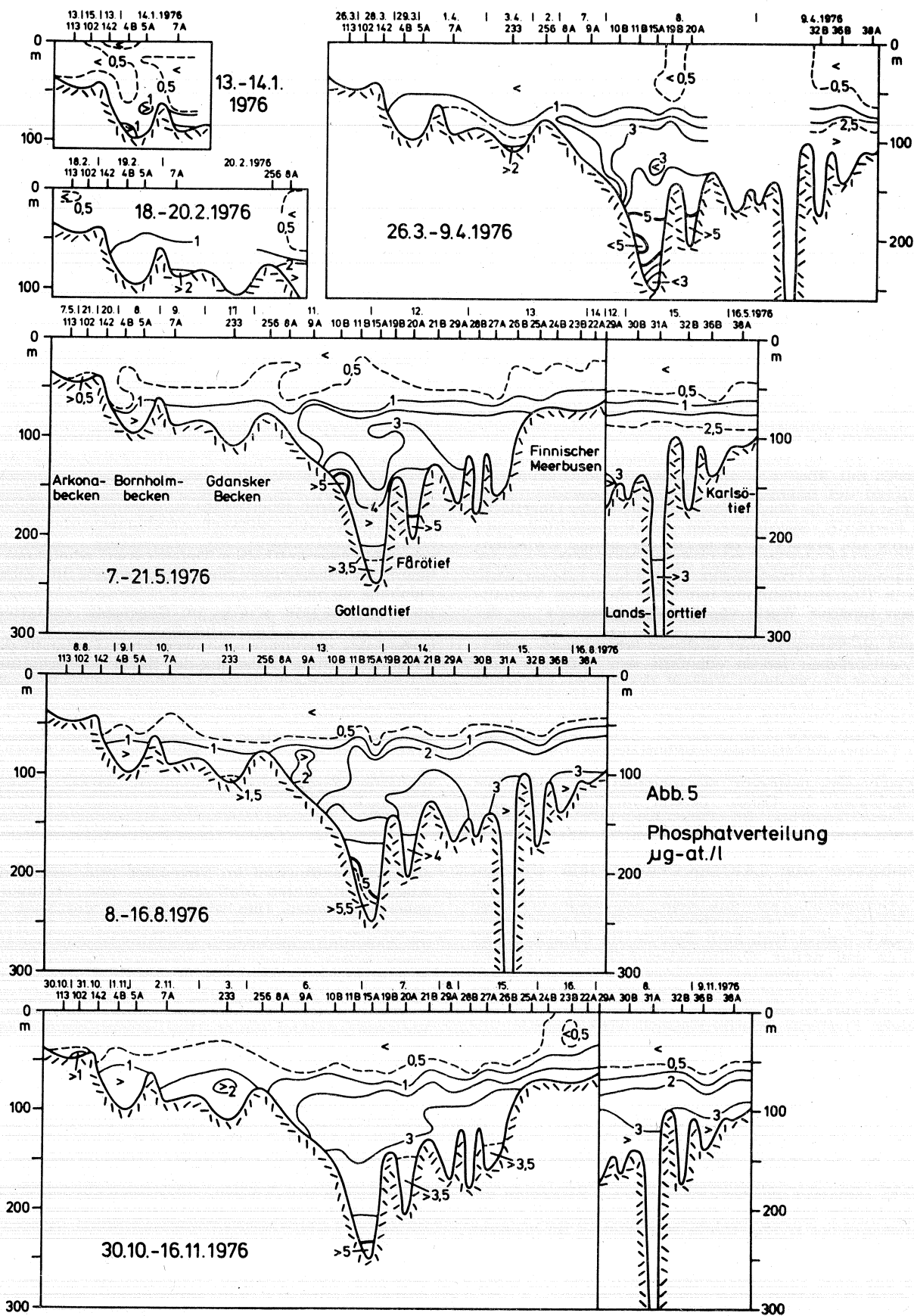


Abb. 5  
Phosphatverteilung  
 $\mu\text{g-at./l}$

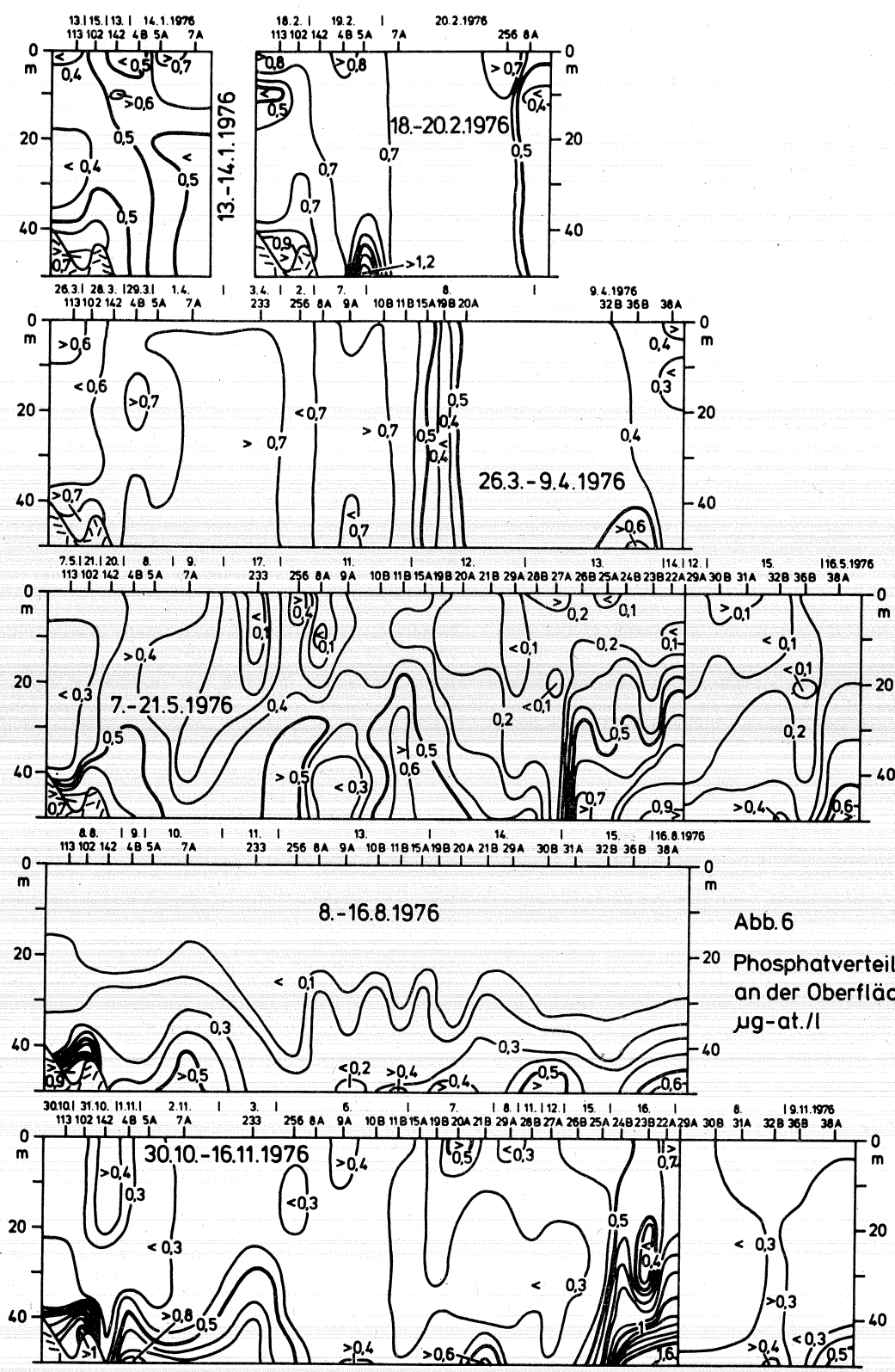


Abb. 6  
Phosphatverteilung  
an der Oberfläche  
µg-at./l



**Tabelle 1**

Verteilung ausgewählter Mikronährstoffe im Oberflächenwasser der westlichen Ostsee und des zentralen Arkonabeckens im Winter und Frühjahr 1976

	Westliche Ostsee			Arkonabecken		
	PO <sub>4</sub> -P μg-at./l	NO <sub>3</sub> -N μg-at./l	NH <sub>4</sub> -N μg-at./l	PO <sub>4</sub> -P μg-at./l	NO <sub>3</sub> -N μg-at./l	NH <sub>4</sub> -N μg-at./l
Januar	0,4-0,5	2-4	2-4	0,3-0,4	4-4	2-3
Februar	0,6-0,7	7-9	0,5	0,7-0,9	3-5	0,5
März	0,0-0,1	0,1-0,2	0,5	0,2-0,7	1-2,5	0,5

Auch im Bornholmbecken wurden während der Umschichtung im Januar und Februar Phosphatkonzentrationen von über 0,7 μg-at./l an der Oberfläche gemessen (Abb. 6). Bemerkenswert sind ferner die im Januar in diesem Becken beobachteten hohen Ammoniumkonzentrationen von 2-4 μg./l, die wie das Phosphat infolge Umschichtung aus dem ehemals stagnierenden Tiefenwasser in die Oberflächenschicht gelangten. Im Gegensatz dazu traten beim Nitrat mit 2-4 μg-at./l keine extrem hohen Winterkonzentrationen auf. Phosphatwerte von 0,5-0,7 μg-at./l wurden im März auch im Oberflächenwasser des östlichen Gotlandbeckens festgestellt, während Nitrat- und Ammoniumstickstoff keine Besonderheiten aufwiesen. Im westlichen Becken lagen mit 0,3-0,4 μg-at. Phosphat/l und 2-3 μg-at. Nitrat/l die üblichen Winterwerte vor. Weitere Angaben über die Vertikalverteilung des Phosphats können den Abbildungen 5 und 6 entnommen werden. Sie zeigen, daß auch im Mai noch relativ hohe Phosphatkonzentrationen im Oberflächenwasser der Ostsee vorhanden waren. Erst im August war dieser Nährstoff in der euphoten Schicht praktisch aufgezehrt.

In der Tiefenschicht führte die Wassererneuerung zu einem erheblichen Rückgang des Phosphatgehalts besonders in den Gebieten, in denen im Herbst 1975 anoxische Bedingungen geherrscht hatten. Angaben darüber sind in Tabelle 2 enthalten, die außerdem auch einen Überblick über Veränderungen bei einigen anderen Parametern gibt. Bei den hydrographisch-chemischen Veränderungen, die als Folge der Erneuerung des Tiefenwassers eintraten, muß jedoch berücksichtigt werden, daß die im März/April 1976 gewonnenen Meßwerte nur einen labilen Zwischenzustand widerspiegeln, da die Umschichtung noch nicht vollständig beendet war. Ein Vergleich zu einem späteren Zeitpunkt würde andererseits durch die beginnende Stagnationsperiode mit ihren Folgeerscheinungen beeinflusst werden.

**Tabelle 2**

Veränderungen ausgewählter hydrographisch-chemischer Parameter im Zeitraum Oktober/November 1975 bis März/April 1976 in der bodennahen Wasserschicht

Station	Tiefe m	T °C	S ‰	O <sub>2</sub> ml/l	PO <sub>4</sub> -P μg-at./l
5 A	88	- 2,22	+ 1,72	+ 7,35*)	- 10,10
233	107	+ 0,15	+ 1,27	+ 4,07*)	- 8,08
8 A	91	- 2,03	+ 1,47	+ 5,17	- 0,61
9 A	124	- 0,74	+ 0,41	+ 5,22*)	- 12,15
15 A	236	+ 0,61	+ 0,11	+ 5,34*)	- 3,12

\*) H<sub>2</sub>S wurde in negative Sauerstoffäquivalente umgerechnet und bei der Differenzbildung in Rechnung gestellt (1).

Seit 1974 werden im Herbst ozeanologische Messungen im Südtteil des Kattegats durchgeführt, um festzustellen, ob die ozeanologischen Voraussetzungen für einen Salzwassereinbruch in die Ostsee günstig sind. Da in diesem Zusammenhang der Salzgehalt die wichtigste Voraussetzung darstellt, sind in Tabelle 3 die entsprechenden Angaben von 3 Stationen zusammengefaßt, die am Zugang zum Sund im zentralen Teil des südlichen Kattegats und am Zugang zum Großen Belt liegen (Abb. 1). Die auf Station 350 gemessenen Salzgehalte können direkt mit dem langjährigen Monatsmittel verglichen werden, das auf den Daten des ehemaligen Feuerschiffs „Kattegat SW“ (56° 06,0' N, 11° 08,8' E) be-

siert (21). Außerdem enthält die Tabelle Meßwerte aus dem Fehmarnbelt (Station 010), die zur Charakterisierung der Einstromsituation dienen sollen.

**Tabelle 3**

Salzgehaltsverteilung (‰) im südlichen Kattegat und im Fehmarnbelt sowie langjähriges November-Monatsmittel

Tiefe m	„Kattegat SW“ Monatsmittel November	Stationsbezeichnung				
		350 24. 11. 1976	351 24. 11. 1976	352 24. 11. 1976	010 27. 10. 1976	010 25. 11. 1976
1	19,8	24,74	25,54	23,85	13,19	19,92
5	—	24,74	25,54	23,95	13,19	21,25
10	22,5	25,54	25,54	23,99	13,20	22,68
15	—	26,95	25,77	24,09	13,76	23,38
20	29,2	31,18	33,89	33,75	15,21	24,13
G*)	30,6 (30 m)	32,53 (24 m)	34,40 (31 m)	33,93 (22 m)	24,56 (24 m)	24,82 (24 m)

\*) Grundnähe

### 3. Schlußfolgerungen

Der Herbst des Jahres 1975 und der Beginn des Winters 1975/76 waren durch den intensiven Einstrom salzreichen Wassers in die Ostsee gekennzeichnet, der im Dezember das Ausmaß eines Salzwassereinbruchs erreichte. Erste Anzeichen für den Beginn einer extremen Einstromlage wurden bereits im November 1975 beobachtet (15). Durch Strömungsmessungen auf einer Bojenstation am Osthang der Darßer Schwelle konnte rückwirkend der Zeitraum der Einstromperiode relativ genau ermittelt werden (4). Danach herrschte bereits im September 1975 intensiver Oststrom, der im Oktober, Dezember und Januar Extremwerte erreichte. Seit Ende Januar wurden zunächst keine ungewöhnlich hohen Geschwindigkeitswerte mehr festgestellt. Damit konnte gezeigt werden, daß es sich nicht wie bei früheren Salzwassereinbrüchen um einen relativ eng begrenzten Zeitabschnitt, wie z. B. in den Jahren 1951 (18) oder 1972 (12), handelte, sondern um einen Zeitraum von etwa 4 Monaten, in dessen Verlauf intensive Einstromlagen, die im Gebiet der Darßer Schwelle die gesamte Wassersäule erfaßten, durch Perioden mit Ausstrom unterbrochen waren. Eine ähnliche Situation scheint 1968/69 vorgelegen zu haben, als die intensive Einstromlage bereits im Herbst 1968 begann (2) und wahrscheinlich mit Unterbrechungen bis zum Februar 1969 andauerte (3).

Der Beginn des intensiven Einstroms im Herbst 1975 ist die Ursache für die bereits im März/April 1976 beobachtete Erneuerung des Tiefenwassers im Gdansk Becken und in Teilen des östlichen Gotlandbeckens, nachdem bereits im Januar die Umschichtung im Bornholmbecken nachgewiesen wurde. Da das im November 1975 im südlichen Kattegat anstehende Wasser keine extremen Salzgehalte aufwies, kam es in den zentralen Becken der Ostsee nur zu einer geringen Salzgehaltszunahme im Tiefenwasser, die weit hinter den 1951/52 beobachteten Werten zurückblieb (16, 18). Infolge seiner geringen Dichte konnte darüber hinaus ein Teil des sich ost- und nordwärts ausbreitenden Tiefenwassers nicht bis in Grundnähe vordringen, sondern schichtete sich vor allem im östlichen Gotlandbecken in den mittleren Wasserschichten ein.

Von der Erneuerung des Tiefenwassers wurde nur der östliche Teil des nördlichen Gotlandbeckens nicht erfaßt. In seinem westlichen Teil sowie im westlichen Iotlandbecken war die Erneuerung im November 1976 eingetreten. Vom Beginn der extremen Einstromlage hatte es somit etwa ein Jahr gedauert, bis die Folgeerscheinungen im Karlsötief, der letzten Station des Tiefenwassers auf seinem zyklonalen Weg durch die Ostsee, nachgewiesen werden konnte.

Das uns vorliegende ozeanologische Beobachtungsmaterial reicht nicht aus, die Menge des eingeströmten salzreichen Wassers exakt zu bestimmen. Gemessen an seinen Folgeerscheinungen läßt sich jedoch abschätzen, daß der 1975/76 beobachtete Salzwassereinstrom etwas geringer oder von der gleichen Größenordnung wie in den Jahren 1968/69 und 1972 war. In diesen Jahren drangen etwa 30-50 km<sup>3</sup> Wasser aus dem Kattegat



kommend, episodisch in die Ostsee ein, wobei allein im Januar 1969 rund 30 km<sup>3</sup> (3) die Darßer Schwelle passierten.

Die winterlichen Temperaturverhältnisse oberhalb der thermohalinen Sprungschicht unterschieden sich 1976 nur wenig von den mittleren Bedingungen (5, 6). Durch den warmen und sehr trockenen Sommer erwärmte sich jedoch die Deckschicht etwas stärker als üblich, so daß die Wassertemperaturen in dieser Schicht rund 1°C über den Normalwerten lagen. Eine so extrem positive Anomalie, wie sie mit  $1 + 7,4$ °C im Sommer 1975 im Bornholmbecken festgestellt wurde (7), konnte jedoch nicht beobachtet werden.

In der Gotlandsee wies die kalte Zwischenwasserschicht, in der während der warmen Jahreszeit die winterlichen Temperaturverhältnisse konserviert sind, Temperaturen auf, die wiederum den mittleren Verhältnissen (5, 6) entsprachen. Im Bornholmbecken lagen die Temperaturen in dieser Schicht dagegen um rund 1°C unter den Normalwerten. Da die winterliche Abkühlung der Ostsee im großen und ganzen normal verlief, kann dies nur eine Folge des Salzwassereinstroms sein, der besonders die westlichen Teilgebiete dieses Binnenmeeres nachhaltig beeinflusste. Deshalb lagen auch die Temperaturen in der grundnahen Wasserschicht des Bornholmbeckens ganzjährig um 1–2°C niedriger als der Mittelwert.

Da sich die hydrographischen Auswirkungen eines Salzwassereintruchs im Gegensatz zu seinen chemischen Folgeerscheinungen mit zunehmender Entfernung von den Ostseezugängen stark verringern (9), waren die Temperaturänderungen im Gdanker Becken und im Gotlandtief, die infolge der Erneuerung des Tiefenwassers eintraten, erheblich schwächer als im Bornholmbecken ausgeprägt und im Gegensatz zu diesem Becken mit einem Temperaturanstieg verbunden (Tab. 2). Die Ursache für diese Temperaturzunahme, die vorübergehender Natur ist (Abb. 2), liegt darin begründet, daß sich das in die Ostsee vordringende Kattegatwasser auf seinem Talweg mit ehemals stagnierendem Tiefenwasser vermischt und dadurch seine physikalischen und chemischen Eigenschaften verändert. So steigt seine Temperatur im allgemeinen an, während sich sein Salzgehalt grundsätzlich verringert. Damit im Einklang steht, daß nach einer extremen Einstromlage der Salzgehaltsanstieg im Tiefenwasser des Bornholmbeckens wesentlich größer als im Gdanker Becken und im Gotlandbecken ist (Tab. 2).

Bis zum Gotlandtief sind die nach einem Salzwassereintruch advektiv zugeführten Sauerstoffmengen annähernd gleich (Tab. 2), da dem ost- und nordwärts vordringenden Tiefenwasser beim Passieren der relativ flachen, untermeerischen Schwellen sauerstoffreiches Wasser zugemischt wird. Bei geringen Dichteunterschieden vermischt sich der im Gotlandtief zunächst vorhandene, separate Bodenkörper (Abb. 4) bald mit den darüber lagernden Wasserschichten, in denen teilweise anoxische Bedingungen herrschen. Das nunmehr vorhandene, sauerstoffarme Mischwasser braucht auf seinem weiteren Weg um Gotland herum keine Schwellen mehr zu passieren, deren Sattelhöhen in die thermohaline Sprungschicht hineinragen. Es wird daher kaum mit Sauerstoff angereichert und führt im nördlichen und westlichen Gotlandbecken nur noch zu einer geringfügigen Verbesserung der Sauerstoffverhältnisse. In diesen Gebieten sind die advektiv zugeführten Sauerstoffmengen zumeist erheblich kleiner als 0,5 ml/l. Eine Besserung tritt hier nur im Winter durch die bereits erwähnten konvektiven Vorgänge und Vermischungsprozesse ein, durch die auch die bodennahen Wasserschichten im geringen Maße mit Sauerstoff versorgt werden.

Während im Herbst 1975 in allen großen Becken der zentralen Ostsee anoxische Bedingungen herrschten (15), wurde im November 1976 nur noch vereinzelt Schwefelwasserstoff im Tiefenwasser angetroffen (Abb. 1). Im Bornholm- und Gdanker Becken, zwei wichtigen Dorschlaichplätzen und Fanggebieten unserer Kutterflotte, führte die Wassererneuerung zu einer nachhaltigen Verbesserung der Sauerstoffverhältnisse, die sich bis in Grundnähe erstreckte. Obgleich der Sauerstoffgehalt im Tiefenwasser beider Becken im weiteren Jahresverlauf zurückging, waren im Novem-

ber 1976 noch fischereilich ausreichende Konzentrationen (1,5–2 ml/l) vorhanden. Infolge geringer Bioproduktivität in der kalten Jahreszeit sowie durch Salzwasserintrusionen ist im Winter mit keiner weiteren Verschlechterung, sondern eher mit einer Besserung der Sauerstoffverhältnisse zu rechnen (vgl. auch 15). Dies gilt besonders für das Gdanker Becken, wo im November Sauerstoffwerte von über 3 ml/l in Grundnähe beobachtet wurden (Abb. 4). Im Südteil des östlichen Gotlandbeckens waren bis in 120 m Tiefe fischereilich ausreichende Sauerstoffmengen vorhanden.

Insgesamt kann eingeschätzt werden, daß 1976 relativ günstige Sauerstoffverhältnisse im Tiefenwasser der Ostsee herrschten. Das gilt nicht nur für das Bornholmbecken, die Gotlandsee und das Gdanker Becken, sondern auch für die westliche Ostsee und das Arkonabecken. Neben dem Salzwassereinstrom im Winter 1975/76 wirkte sich in diesen Seegebieten die im Herbst beobachtete, verstärkte Zufuhr von Tiefenwasser (vgl. unten) positiv auf die Sauerstoffverhältnisse aus.

Bei einem Salzwassereintruch werden der Ostsee mit dem einströmenden Wasser merkliche Nährstoffmengen zugeführt, die besonders in den westlichen Teilgebieten eine zusätzliche Eutrophierung bewirken. Unter diesen Nährstoffen befanden sich 1976 auch größere Mengen an Ammoniumstickstoff. Im allgemeinen ist diese Verbindung nur in geringer Konzentration im Ostseewasser vorhanden. Lediglich im Spätherbst, wenn der bei der Ammonifikation organischer Substanz gebildete Ammoniumstickstoff nicht mehr durch das Phytoplankton verbraucht wird, erreicht seine Konzentration Werte um 1 µg-at./l, bevor er im Nitrifikationsprozeß zu Nitrat oxydiert wird.

Ammoniumstickstoff ist aber nicht nur ein wichtiger Pflanzennährstoff. Sein Auftreten unter oxischen Bedingungen zeigt auch eine noch nicht überwundene organische Belastung des Wassers an (8). Unter diesem Gesichtspunkt gewinnen die relativ hohen Ammoniumkonzentrationen, die zu Jahresbeginn während oder unmittelbar nach dem Salzwassereinstrom in der westlichen Ostsee und im Arkonabecken beobachtet wurden (Tab. 1), besondere Bedeutung. Sie lassen erkennen, daß das einströmende Wasser organisch belastet war und diese Belastung noch nicht vollständig überwunden hatte. Obgleich der episodische Salzwassereinstrom einerseits zu einer Erneuerung des Tiefenwassers und einer Verbesserung der Sauerstoffverhältnisse in der Ostsee führt, darf andererseits nicht übersehen werden, daß die dabei mitgeführte organische Substanz unter Sauerstoffzehrung abgebaut werden muß. Zusammen mit der organischen Biomasse, die durch zusätzliche Nährstoffzufuhr produziert werden kann, ist dies eine der Ursachen, daß immer häufiger anoxische Bedingungen im Tiefenwasser der Ostsee auftreten.

Neben der direkten Zufuhr wird die Oberflächenschicht der Ostsee zusätzlich mit Mikronährstoffen versorgt, die bei einem Salzwassereintruch aus dem Tiefenwasser reaktiviert werden. Auch während der Stagnationsperiode, die im Winter 1975/76 zu Ende ging, waren unter anoxischen Bedingungen erhebliche Phosphatmengen angereichert worden (Abb. 5, Tab. 2), die allerdings hauptsächlich aus dem Sediment stammten und bei der Entstehung oxischer Bedingungen größtenteils wieder ausgefällt werden (1). Ein Teil dieses Nährstoffes kann jedoch ebenso wie der unter anoxischen Bedingungen angereicherte Ammoniumstickstoff in die euphotische Schicht gelangen und Ursache für eine episodische Erhöhung der Bioproduktivität der Ostsee sein.

Nicht nur der Beginn, sondern auch das Ende des Jahres 1976 war durch eine erhöhte Einstromaktivität in die Ostsee charakterisiert, von der zeitweilig sogar die oberflächennahe Wasserschicht erfaßt wurde. Abbildung 7 zeigt den Verlauf der Strömung in 7 m Tiefe. Von August bis Dezember 1976 wurden am Osthang der Darßer Schwelle 4 Perioden registriert, in denen über einen längeren Zeitraum Einstrom vorherrschte. Wie weitere, hier nicht verwendete Meßreihen zeigten, wurde nach dem 5. Dezember in der oberflächennahen Wasserschicht kein nennenswerter Einstrom mehr beobachtet.

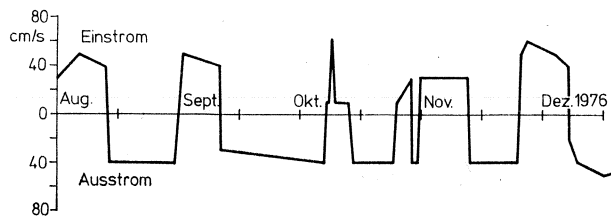


Abbildung 7

Registrierungen eines Strömungsmessers in 7 m Tiefe am Osthang der Darßer Schwelle

Die verstärkte Einstromintensität insbesondere im Spätherbst 1976 ist auch aus der Verteilung des Salzgehalts zu erkennen. Bedingt durch die relativ hohen

Salzkonzentrationen im Südteil des Kattegats, die im November 1976 an der Oberfläche um 4–5 ‰ und im Tiefenwasser um 2–4 ‰ über dem langjährigen Monatsmittel lagen (Tab. 3), führte der Einstrom zu einer Zunahme des Salzgehalts im Tiefenwasser des Fehmarnbelts, der westlichen Ostsee und des Arkonabekens. Im grundnahen Bereich des Fehmarnbelts (Tab. 3) lag er um 4–5 ‰ über dem Novembermittelwert, der auf den Beobachtungen der Jahre 1952–1956 basiert (19). Aber nicht nur zu diesem Zeitpunkt, sondern bereits 4 Wochen früher, Ende Oktober, wurde im Bodenwasser dieses Gebietes eine positive Salzanomalie registriert, die sich offenbar im Laufe des Novembers auf die gesamte Wassersäule ausdehnte. Zu einem erneuten Salzeinbruch in die Ostsee kam es jedoch nicht. Offenbar waren nicht alle Randbedingungen, die für die Entstehung einer extremen Einstromlage erforderlich sind, gleichzeitig erfüllt.

## Literatur

1. FONSELIUS, S. H.: Hydrography of the Baltic deep basins III. Fishery Board of Sweden, Ser. Hydrogr. 23 (1969), 97 S.
2. FONSELIUS, S. H.: On the stagnation and recent turnover of the water in the Baltic. Tellus 22 (1970), S. 533–544.
3. FRANCKE, E. und D. NEHRING: Erste Beobachtungen über einen erneuten Salzwassereinbruch in die Ostsee im Februar 1969. Beitr. Meeresk. 28 (1971), S. 33–47.
4. FRANCKE, E., NEHRING, D. und D. BÖHL: On the problem of the exchange of water in the deep basins of the Baltic Sea during the winter of 1975/76. Vortrag auf der 10. Konf. der Ostsee-Ozeanographen, Göteborg 1976.
5. LENZ, W.: Monatskarten der Temperatur der Ostsee, dargestellt für verschiedene Tiefenhorizonte. Dt. Hydrogr. Zeitsch., Erg. Heft, Reihe B, Nr. 11, 148 S.
6. MATTHÄUS, W.: Zur mittleren jährlichen Veränderlichkeit der Temperatur in der offenen Ostsee. Beitr. Meeresk. 40 (1977), S. 117–155.
7. MATTHÄUS, W., STURM, M. und E. FRANCKE: Einige Aspekte des thermischen Regimes der Ostsee im Sommer 1975 am Beispiel der Bornholmsee. Z. Meteorol. 26 (1976), S. 360–372.
8. NEHRING, D.: Untersuchungen über die Verteilung der anorganischen Stickstoffverbindungen im Hinblick auf die zunehmende Wasserverschlechterung in der Ostsee. Beitr. Meeresk. 28 (1971), S. 57–74.
9. NEHRING, D. und L. BRÜGMANN: Natürliche und anthropogene hydrographisch-chemische Veränderungen in der Ostsee. Fischerei-Forsch., Rostock, 13 (1976), S. 13–18.
10. NEHRING, D. und E. FRANCKE: Zusammenfassende Darstellung der hydrographisch-chemischen Veränderungen in der Ostsee 1969/70. Fischerei-Forsch., Rostock, 11 (1973), S. 31–43.
11. NEHRING, D. und E. FRANCKE: Hydrographisch-chemische Veränderungen in der Ostsee im Jahre 1971. Fischerei-Forsch., Rostock, 11 (1973), S. 45–52.
12. NEHRING, D. und E. FRANCKE: Hydrographisch-chemische Veränderungen in der Ostsee im Jahre 1972 unter besonderer Berücksichtigung des Salzwassereinbruchs im März/April 1972. Fischerei-Forsch., Rostock, 12 (1974), S. 23–33.
13. NEHRING, D. und E. FRANCKE: Hydrographisch-chemische Veränderungen in der Ostsee im Jahre 1973. Fischerei-Forsch., Rostock, 13 (1975), S. 7–14.
14. NEHRING, D. und E. FRANCKE: Hydrographisch-chemische Veränderungen in der Ostsee im Jahre 1974. Fischerei-Forsch., Rostock, 14 (1976), S. 19–27.
15. NEHRING, D. und E. FRANCKE: Hydrographisch-chemische Veränderungen in der Ostsee im Jahre 1975. Fischerei-Forsch., Rostock, 14 (1976), S. 65–75.
16. SCHEMAINDA, R.: Die ozeanographischen Veränderungen im Bornholmtief in den Jahren 1951–1955. Annal. Hydrogr. 8 (1956), S. 48–64.
17. VOIGT, K., HELM, R., LASS, H. U., MÖCKEL, F. und M. STURM: Vorläufige Ergebnisse der GATE-Expedition des FS „A. v. Humboldt“ in den äquatorialen Atlantik im Juli/August 1974. Beitr. Meeresk. 37 (1976), S. 7–27.
18. WYRTKI, K.: Der große Salzwassereinbruch in die Ostsee im November und Dezember 1951. Kieler Meeresforsch. 10 (1954), S. 19–25.
19. WOLF, G.: Salzwassereinbrüche im Gebiet der westlichen Ostsee. Beitr. Meeresk. 29 (1972), S. 67–77.
20. . . . : The Baltic Year 1969/70. Program manual. Göteborg, 1968.
21. . . . : Oceanografiske fra Danske Fyrskibe og Kystenstationer 1971. Charlottenlund 1972, 147 S.