

Hydrographisch-chemische Veränderungen in der Ostsee im Jahre 1977

DR. D. NEHRING UND E. FRANCKE
INSTITUT FÜR MEERESKUNDE ROSTOCK-WARNEMÜNDE
DER AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN DER DDR

Der Einstrom größerer Mengen salzreichen Wassers, der sich mit Unterbrechungen über den Zeitraum August bis Dezember 1976 erstreckte (4, 9) und damit nicht als Salzwassereinbruch im eigentlichen Sinne bezeichnet werden kann (12), führte im Verlauf des Jahres 1977 in der gesamten Ostsee zu einer Erneuerung des Tiefenwassers. Damit verbunden war eine Verbesserung der Sauerstoffverhältnisse. Erstmals seit mehr als 10 Jahren wurde im Mai 1977 in keinem der tiefen Becken Schwefelwasserstoff nachgewiesen.

Die zu Beginn des Jahres 1977 im Gotlandtief beobachteten Temperaturen waren die höchsten, die bisher im Tiefenwasser dieser Region gemessen wurden. Extrem hohe Werte wies auch der Salzgehalt auf, während die Phosphatkonzentration niedrig war.

Nach der Umschichtung, die in den einzelnen Becken zu verschiedenen Terminen erfolgte, begann eine weitere Stagnationsperiode, in deren Verlauf sich die Sauerstoffverhältnisse im Tiefenwasser des Bornholm-, Gdanker- und Gotland-Beckens wieder verschlechterten.

Die Untersuchungen über die Nährstoffverhältnisse haben erneut bestätigt, daß das einströmende Kattegatwasser einen nennenswerten Beitrag zur Eutrophierung der Ostsee leistet und teils direkt, teils indirekt zu einer Verschlechterung der Sauerstoffverhältnisse beiträgt.

1. Einleitung

Vom Institut für Meereskunde der Akademie der Wissenschaften der DDR werden seit 1957 in der westlichen Ostsee sowie im Arkona- und Bornholmbecken systematisch Terminbeobachtungen über die Verteilung der Wassertemperatur, des Salzgehalts und der Sauerstoffkonzentration durchgeführt. Ab 1969 wurden diese Untersuchungen auf die gesamte Ostsee mit Ausnahme des Bottnischen und Rigaer Meerbusens ausgedehnt und um die Bestimmung der Mikronährstoffe und anderer produktionsbiologischer Größen erweitert. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen lassen kurzfristige Veränderungen der hydrographisch-chemischen Bedingungen in der Ostsee erkennen und gestatten darüber hinaus Schlußfolgerungen über langfristige Variationen sowie über den chemisch-biologischen Stoffkreislauf.

Ebenso wie in früheren Jahren wurden auch 1977 im Februar, März/April, Mai, August und Oktober/November Terminbeobachtungen durchgeführt. Im September erfolgten anlässlich des **Baltic Open Sea Experiment „BOSEX'77“** zusätzliche Messungen. Teilergebnisse dieser Untersuchungen werden in dem vorliegenden Bericht ebenfalls berücksichtigt. Für alle Meßfahrten stand das Forschungsschiff „Prof. Albrecht Penck“ zur Verfügung.

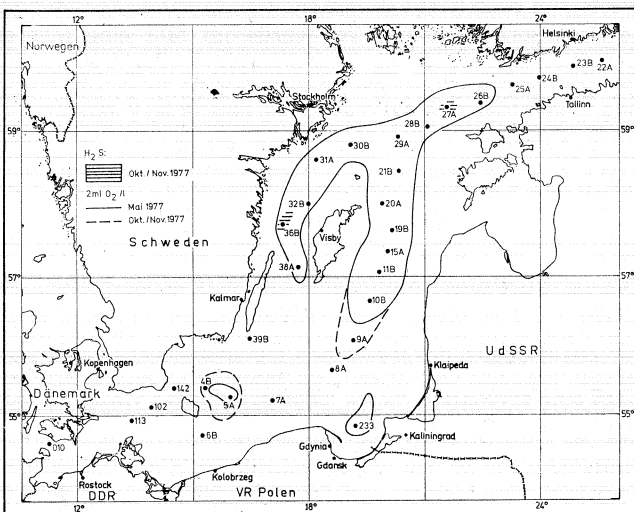


Abb. 1
Stationskarte und Gebiete fischereilich ungünstiger Lebensbedingungen im Tiefenwasser der Ostsee

Den Untersuchungen lag wiederum der ozeanologische Längsschnitt durch die tiefen Becken der Ostsee zugrunde (Abb. 1), dessen Stationen anlässlich des Internationalen Ostseejahres 1969/70 (4) festgelegt wurden. In der westlichen Ostsee, im Arkona- und Bornholmbecken, im Gdanker Tief sowie im Südteil des östlichen Gotlandbeckens wurden zusätzliche Stationen bearbeitet. Diese Stationen sind in den Abbildungen 1–6 nur berücksichtigt, wenn ihre Meßwerte für die Charakterisierung der ozeanologischen Bedingungen von besonderer Bedeutung waren. Infolge ungünstiger Wetterbedingungen mußte die Februar-Meßfahrt bereits im Gdanker Becken beendet werden. Aus dem gleichen Grunde konnten auch die für November geplanten Untersuchungen im Südteil des Kattegats, die zur Abschätzung der ozeanologischen Voraussetzungen eines Salzwassereinbruchs von Bedeutung sind, nicht durchgeführt werden.

Folgende ozeanologische Parameter wurden bestimmt: t °C, $S_{\text{‰}}$, O_2 , H_2S , $PO_4\text{-P}$, $NO_3\text{-N}$, $NO_2\text{-N}$ und $NH_4\text{-N}$. Im Mai, August und September 1977 wurde außerdem der Gehalt an organisch gebundenem Phosphor und Stickstoff in unfiltrierten Meerwasserproben nach UV-Bestrahlung untersucht. Darüber hinaus wurden auf allen Meßfahrten meteorologische und biologische Beobachtungen durchgeführt, deren Auswertung jedoch nicht Gegenstand dieses Beitrages ist.

Die Entnahme der Wasserproben geschah fast ausschließlich mittels der ozeanologischen Meßkette OM 75 des Instituts für Meereskunde in Rostock-Warnemünde. Diese Tiefseesonde gestattet die Datenerfassung und -bearbeitung „on line“ durch einen Prozeßrechner, der unmittelbar mit der Meßanordnung gekoppelt ist. Neben der quasikontinuierlichen Registrierung der Wassertemperatur und anderer ozeanologischer Größen können mit dieser Sonde 12 Wasserproben während einer Serie entnommen werden.

2. Hydrographisch-chemische Veränderungen

Die hydrographisch-chemischen Meßergebnisse wurden wiederum in Form ozeanologischer Längsschnitte durch die tiefen Becken und Mulden der Ostsee dargestellt. Diese Darstellungsform gibt die Veränderungen im Jahresverlauf gut wieder und gestattet den Vergleich mit den Untersuchungen früherer Jahre, auch wenn die Messungen auf den einzelnen Stationen aus technischen Gründen nur selten völlig termingleich erfolgten.

Dargestellt wurde die Verteilung der Wassertemperatur (Abb. 2), des Salzgehalts (Abb. 3), der Sauerstoffkonzentration (Abb. 4) und des Phosphatgehalts (Abb. 5). Diese Parameter reichen zur allgemeinen Charakterisierung der hydrographisch-chemischen Veränderungen in der Ostsee aus. Da der Nährstoffgehalt in der lichtdurchfluteten Oberflächenschicht für die Bioproduktivität von besonderer Bedeutung ist, wurde die Phosphatverteilung in der Schicht von 0–50 m Tiefe (Abb. 6) gesondert dargestellt.

Untersuchungen über die Verteilung der anorganischen Stickstoffverbindungen Nitrat, Nitrit und Ammonium sind für Fragen des Nährstoffhaushalts der Ostsee sowie im Zusammenhang mit dem Abstoffeintrag und der Entstehung anoxischer Bedingungen ebenfalls von hervorragender Bedeutung. Die dabei gewonnenen Ergebnisse können jedoch in der vorliegenden Arbeit nur in dem Umfang berücksichtigt werden, wie dies für das Verständnis einiger hydrographisch-chemischer Besonderheiten notwendig ist. Ebenso müssen auch die Untersuchungen über die Verteilung des organisch gebundenen Phosphors und Stickstoffs einer späteren zusammenfassenden Analyse vorbehalten bleiben.

2.1. Temperaturverteilung

Wie die Untersuchungen im Februar und März/April 1977 zeigten, lagen die Wassertemperaturen in der oberflächennahen unteren Ostseeregionen zwischen 1,7 und 2,3 °C (Abb. 2). Sie entsprachen damit oder übertrafen geringfügig die mittleren winterlichen Verhältnisse (5, 7, 8). Die im weiteren Jahresverlauf einsetzende Erwärmung der Deckschicht, die im Mittel im August ihr Maximum erreicht (7, 8), zeigte ebenso wie die Temperaturen in der kalten Zwischenwasserschicht eine geringe negative Anomalie zu den langjährigen Mittelwerten.

Unterhalb der thermohalinen Sprungschicht wurden dagegen relativ hohe Temperaturen gemessen, die erheblich über denen des Vorjahres lagen (9). Zu Jahresbeginn übertrafen sie die langjährigen Mittelwerte (4) im Bornholm- und Gdansk Becken um 1–1,5 °C. Mit über 7,3 °C herrschten darüber hinaus in der grundnahen Wasserschicht des Gotlandtiefs extrem hohe Temperaturen (Tab. 1). Diese Beobachtungen stehen im Einklang mit Angaben von FONSELIUS (2), nach denen im Januar 1977 sogar 7,43 °C, im März 7,31 °C und im Juni 7,23 °C in 240 m Tiefe gemessen wurden.

Tab. 1

Temperaturen und Konzentrationen ausgewählter ozeanologischer Parameter in der grundnahen Schicht des Gotlandtiefs (Station 15 A)

| Datum | Tiefe m | t °C | S ‰ | O ₂ ml/l | PO ₄ -P µg-at./l | NO ₃ -N µg-at./l |
|-------------|------------|---------|--------|------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 3. 4. 1977 | 239,2 | 7,22 | 13,22 | 1,55 | 2,28 | 9,76 |
| 16. 5. 1977 | 239,6 | 7,32 | 13,16 | 0,61 | 2,14 | 9,40 |
| 12. 8. 1977 | 234,6 | 7,03 | 13,11 | 0,31 | 1,98 | 11,78 |
| 4. 11. 1977 | 235,8 | 7,05 | 13,06 | 0,15 | 3,44 | 0,26 |

Während im Tiefenwasser des Arkonabeckens eine Temperaturzunahme eintrat, die dem Jahresgang folgte (7, 8), wurde in den anderen Becken unterhalb der thermohalinen Sprungschicht ein Temperaturrückgang beobachtet, der im Bornholmbecken im Mittel 0,6 °C, im Gdansk Becken 1,6 °C und im Gotlandtief 0,3 °C betrug. Am Westhang des Bornholmbeckens zeichnete sich ferner ab August 1977 der Einstrom relativ warmen Wassers ab, der im September besonders stark in Erscheinung trat und offenbar die Ursache für die im Oktober beobachtete geringfügige Temperaturerhöhung in der grundnahen Wasserschicht war.

Bemerkenswert sind ferner die Temperaturinversionen im Tiefenwasser des Landsorttiefs, die im November 1977 beobachtet wurden. Sie lassen auf eine noch nicht vollständig beendete Wasserumschichtung schließen.

2.2. Salzgehaltsverteilung

Die Verteilung des Salzgehalts in der oberflächennahen Schicht und die Tiefenlage der Salzgehaltssprungschicht entsprechen 1977 den von BOCK (1) beschriebenen mittleren Verhältnissen (Abb. 3). Im Tiefenwasser wurden dagegen zu Jahresbeginn positive Abweichungen beobachtet.

Gegenüber den Messungen im Oktober/November 1976 war der Salzgehalt in der grundnahen Wasserschicht des Bornholm- und Gdansk Beckens sowie im Gotlandtief um 0,8–1,6 ‰ angestiegen. Auf Station 15 A des Gotlandtiefs wurden im April 13,22 ‰ in 239 m Tiefe gemessen (Tab. 1) und damit der seit 1962 höchste Salzgehalt registriert. FONSELIUS (2) berichtete über eine Konzentration von 13,28 ‰ in 240 m Tiefe, die im Januar 1977 auf dieser Station beobachtet wurde. Gegenüber dem Novemberwert des Vorjahres, der 12,55 ‰ (237 m Tiefe) betrug, war damit ein Anstieg um rund 0,7 ‰ eingetreten.

Im Verlauf des Jahres 1977 trat eine zum Teil erhebliche Aussüßung des Tiefenwassers, die im Bornholm- und Gdansk Becken rund 1 ‰ und im Gotlandtief 0,2 ‰ betrug, ein. Bemerkenswert ist umgekehrt der Anstieg des Salzgehalts im Tiefenwasser des Landsorttiefs sowie aller Stationen des westlichen Gotlandbeckens, der im Zeitraum zwischen Mai und November 1977 eingetreten war und 0,2–0,4 ‰ ausmachte.

Für die Prognostizierung von Salzwassereintrüben ist der Salzgehalt im Südteil des Kattegats (13) sowie im Fehmarnbelt (12) von Bedeutung. Mit einer stark positiven Salzgehaltsanomalie im Herbst ist wahrscheinlich die wichtigste ozeanologische Voraussetzung dafür erfüllt, daß es zu einem verstärkten Einstrom größerer Mengen salzreichen Wassers in die Ostsee kommen kann.

Im Jahre 1977 kann nur auf Messungen im Fehrmanbelt, die im Oktober und November erfolgten, bezug genommen werden. Tabelle 2 enthält Angaben über den Salzgehalt auf Station 010. Ebenso wie im Vorjahr wurde auch im Zeitraum Oktober–November 1977 ein starker Anstieg des Salzgehalts im Fehmarnbelt festgestellt. Während jedoch

Tab. 2

Vertikale Salzgehaltsverteilung auf Station 010 im Herbst 1977

| Tiefe (m) | 19. 10. 1977 | Tiefe (m) | 17. 11. 1977 |
|-----------|--------------|-----------|--------------|
| | S ‰ | | S ‰ |
| 2,0 | 14,60 | 1,0 | 19,48 |
| 5,0 | 14,65 | 4,9 | 21,03 |
| 10,2 | 15,22 | 9,7 | 22,06 |
| 14,9 | 17,24 | 14,4 | 22,06 |
| 21,0 | 19,06 | 19,5 | 22,50 |
| 25,8 | 19,20 | 27,1 | 22,96 |

die Zunahme in der oberflächennahen Schicht bis etwa 10 m Tiefe ähnlich hohe Werte wie 1976 erreichte, war der Anstieg in der Tiefenschicht 1977 um 1,3 bis 1,8 ‰ niedriger. Die positive Salzgehaltsanomalie in der grundnahen Wasserschicht des Fehmarnbelts, die auf dem Novembermittelwert der Jahre 1952–1956 basiert (12), betrug daher nur 2–3 ‰, im Gegensatz zum Vorjahr (9), wo 4–5 ‰ festgestellt wurden.

2.3. Sauerstoffverteilung

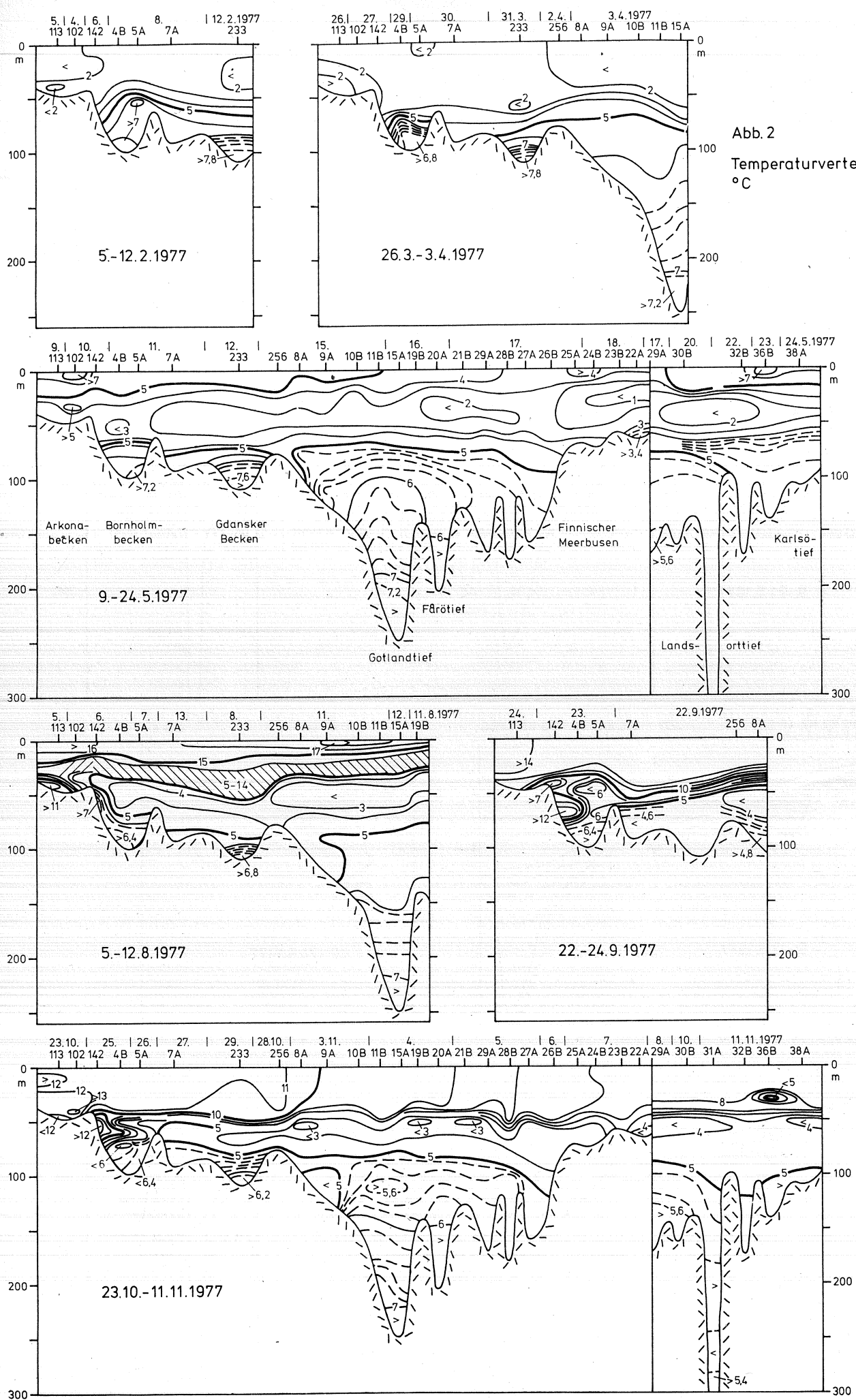
Verglichen mit den Untersuchungen im Herbst 1976 (9) wurde im Winter und Frühjahr 1977 generell eine Verbesserung der Sauerstoffverhältnisse im Tiefenwasser der Ostsee festgestellt, wenn auch die Werte im Bornholmbecken niedriger waren als nach der Umschichtung zu Beginn des Jahres 1976. Im Mai 1977 war auf keiner der in der Ostsee bearbeiteten Standardstationen Schwefelwasserstoff vorhanden (Abb. 1 und 4). In der grundnahen Wasserschicht des Gotlandtiefs wurden Anfang April zwischen 1,5–2 ml O₂/l beobachtet (Tab. 1). Diese Konzentrationen entsprachen den Verhältnissen nach der Wassererneuerung im Jahre 1969 (3). Nach FONSELIUS (2) wurden im Januar am Grund des Gotlandtiefs (240 m) sogar Sauerstoffwerte von rund 2 ml/l gemessen.

Im Landsorttief (Stat. 31 A) wurde im Mai eine inverse Sauerstoffverteilung im Tiefenwasser nachgewiesen, bei der sauerstoffärmeres Wasser über etwas sauerstoffreicheren Wassermassen lagerte. Weitere Inversionen wurden auf dieser Station im November beobachtet, wobei sich jedoch nunmehr etwas sauerstoffärmeres Wasser in 170–260 m Tiefe eingeschoben hatte. Zwischenzeitlich scheinen noch günstigere Sauerstoffverhältnisse vorgelegen zu haben. So berichtet FONSELIUS (2) über Sauerstoffwerte im Tiefenwasser des Landsorttiefs, die 1 ml/l übertrafen und im Juni gemessen wurden.

Die im November intermediär auf 36 B beobachteten, geringen Schwefelwasserstoffkonzentrationen lassen vermuten, daß während des Sommers anoxische Bedingungen im Tiefenwasser des westlichen Gotlandbeckens geherrscht haben. Erst mit der advektiven Wassererneuerung erfolgte auch eine Oxydation dieses lebensfeindlichen Gases, die jedoch zum Zeitpunkt der Untersuchungen noch nicht vollständig abgeschlossen war.

Nach Beendigung der Wasserumschichtung begann im Tiefenwasser des Arkona- und Bornholmbeckens, im Gdansk Tief sowie im östlichen und nordöstlichen Gotlandbecken eine erneute Stagnationsperiode. In ihrem Verlauf war der Sauerstoffgehalt im Oktober/November verbreitet auf 0,1–0,3 ml/l abgesunken. Diese ungünstige Entwicklung war im Bornholmbecken, im Gotlandtief sowie im nördlichen Got-

Abb. 2
Temperaturverteilung
°C



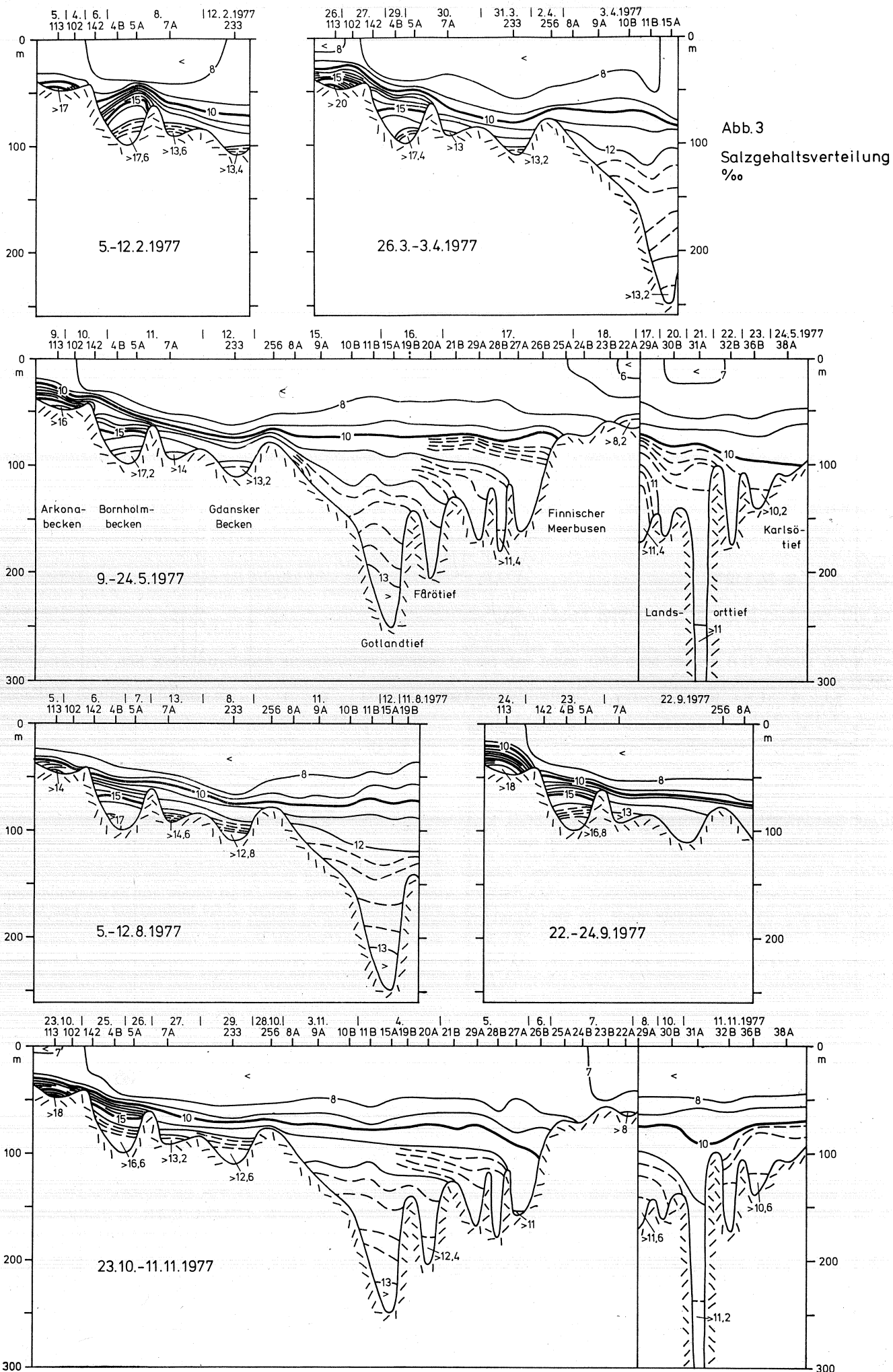


Abb. 3
Salzgehaltsverteilung
‰

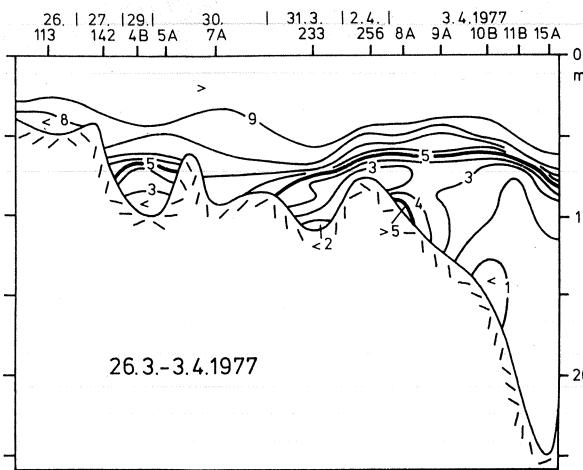
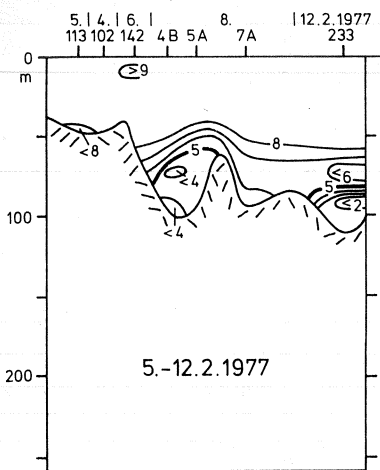
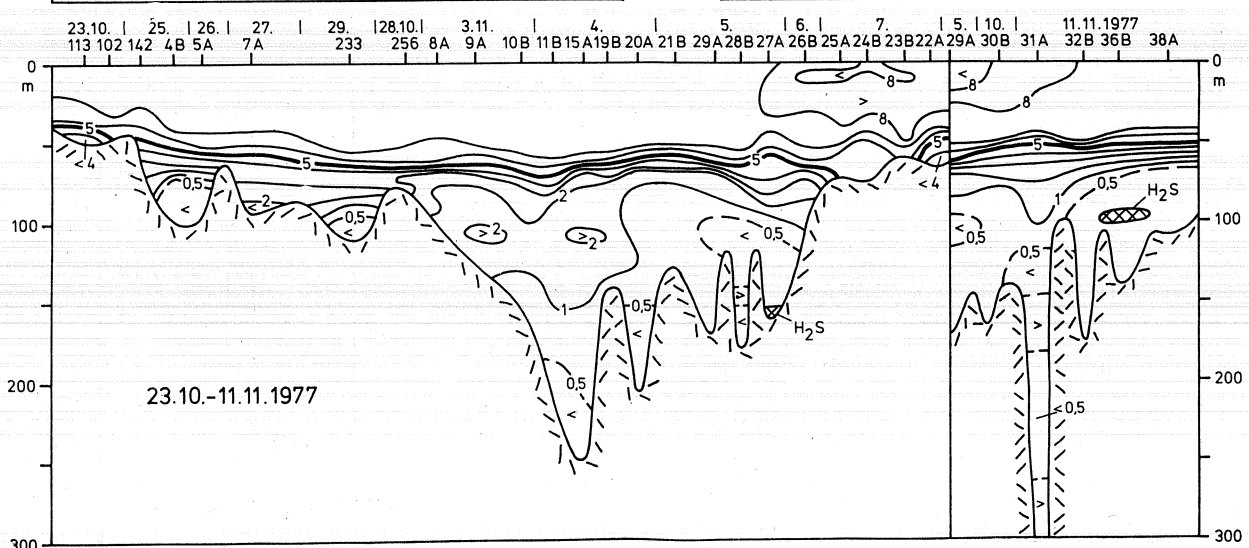
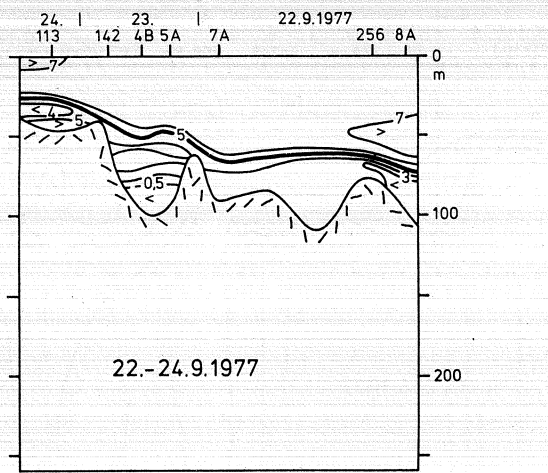
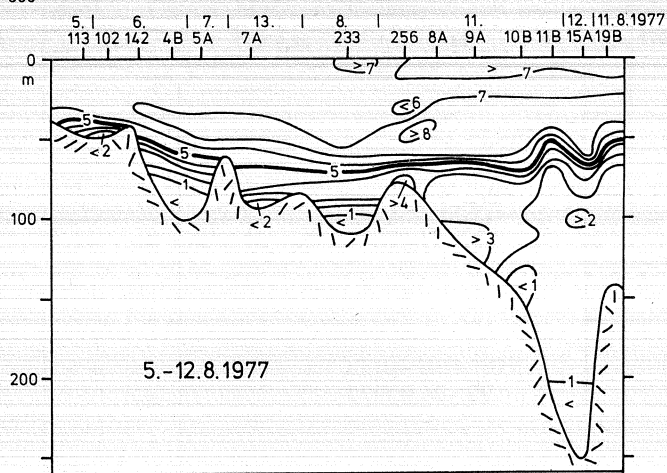
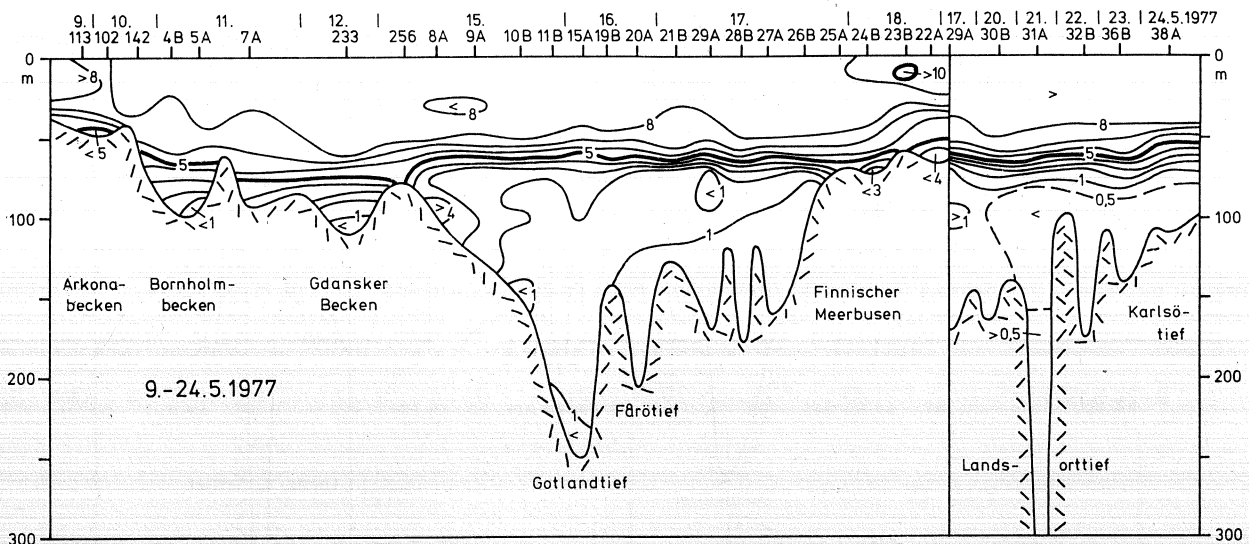
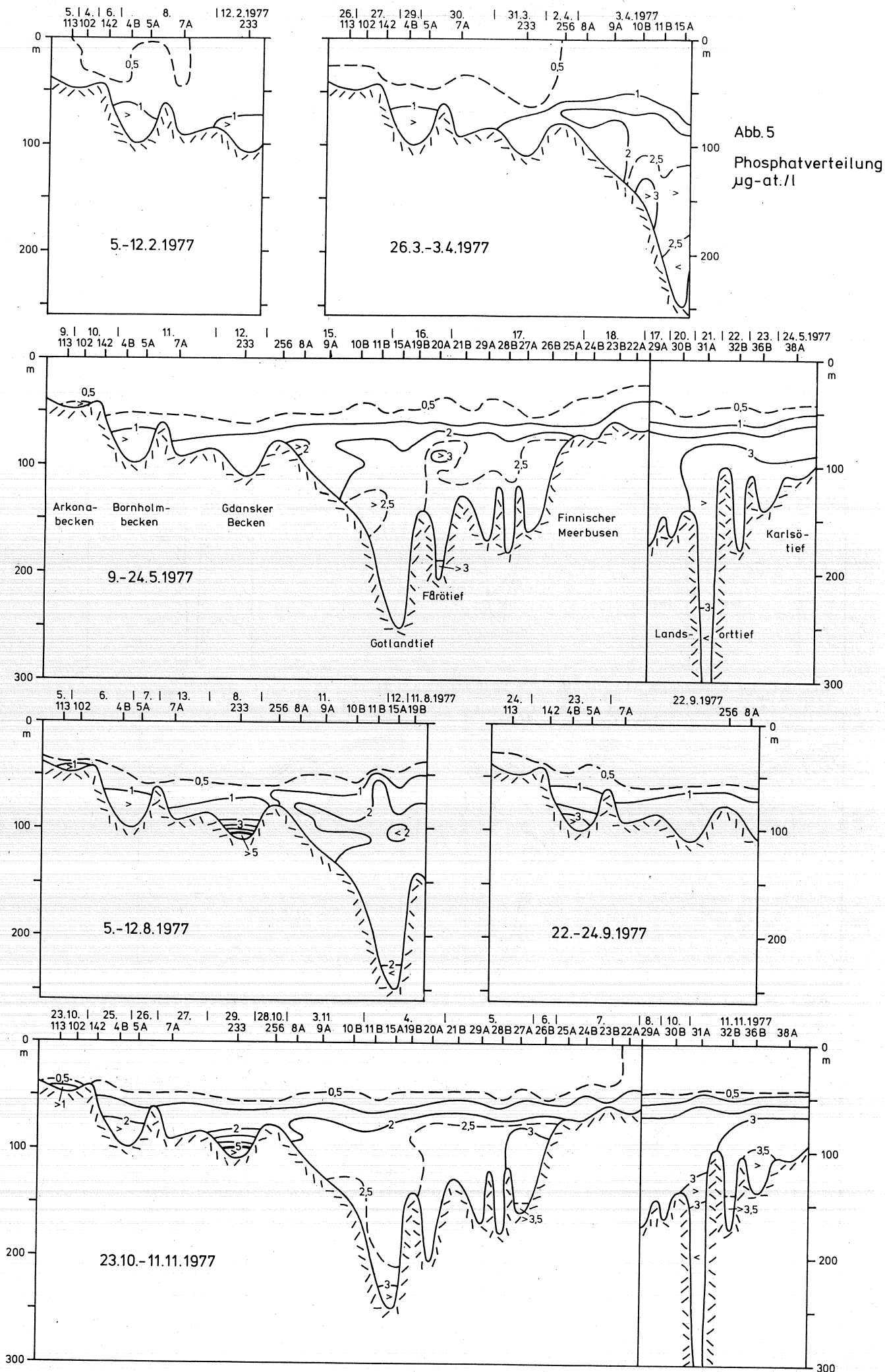


Abb. 4
Sauerstoffverteilung
ml/l





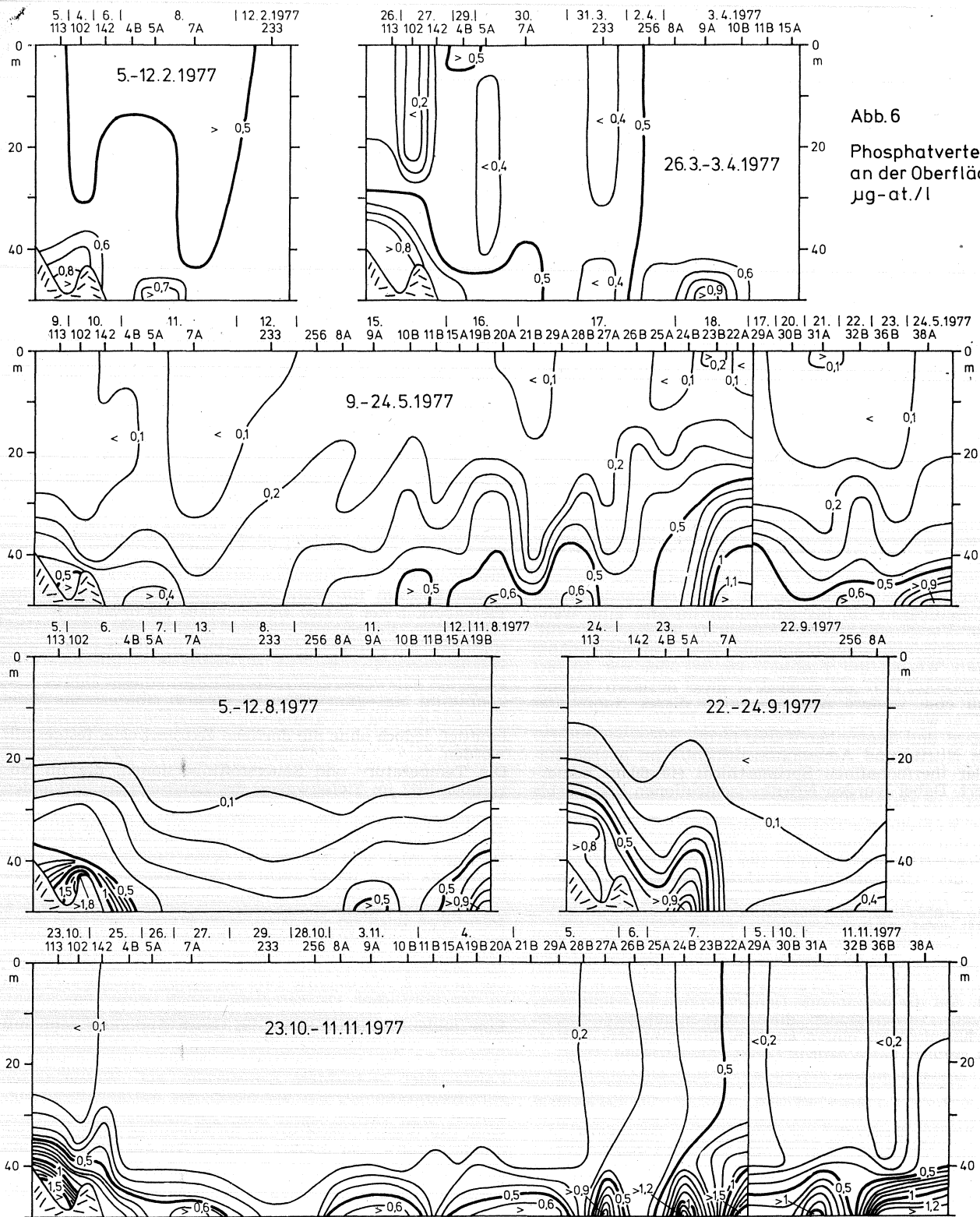


Abb. 6
Phosphatverteilung
an der Oberfläche
 $\mu\text{g-at./l}$

landbecken die Ursache für Denitrifikationsprozesse, bei denen Nitratstickstoff zu elementarem Stickstoff abgebaut wird. Im Gdanskier Becken scheinen im September sogar vorübergehend anoxische Bedingungen geherrscht zu haben.⁴⁾ Schwefelwasserstoff wurde im November auch auf Station 27 A in unmittelbarer Grundnähe nachgewiesen. Im Tiefenwasser der westlichen Ostsee wurden die niedrigsten Sauerstoffwerte während der Augustmessungen festgestellt. Bei diesen Untersuchungen lag der Sauerstoffgehalt in Grundnähe bei 1–2 ml/l. Vereinzelt wurden sogar Wasser der westlichen Ostsee noch 5–6 ml/l und war im Oktober bereits wieder auf 3–5 ml/l angestiegen.

⁴⁾ Trzosinska, A. und Fonselius, S. H.: Persönliche Mitteilungen

2.4. Nährstoffverteilung

Zu Beginn des Jahres 1977 wurden in der Oberflächenschicht der westlichen Ostseeregionen, aber auch im östlichen Gotlandbecken verbreitet Phosphatkonzentrationen Entwicklung kann jedoch nur von kurzer Dauer gewesen sein, denn im Mai betrug der Sauerstoffgehalt im Tiefen noch etwas geringere Werte beobachtet. Diese ungünstige über 0,5 $\mu\text{g-at./l}$ beobachtet (Abb. 6). Mit der Entwicklung des Phytoplanktons sank die Konzentration dieses wichtigen Algennährstoffes im Verlauf des Frühjahres und Sommers auf Werte unter 0,1 $\mu\text{g-at./l}$ ab, um im Spätherbst, mit Beendigung der Vegetationsperiode, erneut anzusteigen.

Parallel zur Verbesserung der Sauerstoffverhältnisse hatte der Phosphatgehalt im Tiefenwasser der Ostsee stark abgenommen und übertraf kaum $3 \mu\text{g-at./l}$ (Abb. 5). Nur im Gdanker Becken war in der 2. Jahreshälfte ein starker Anstieg zu verzeichnen, der mit der erneuten Verschlechterung der Sauerstoffverhältnisse im Einklang stand. Mit Werten um $2 \mu\text{g-at./l}$ (Tab. 1) wurden im Gotlandtief (Stat. 15 A) die niedrigsten Phosphatkonzentrationen seit 1969, dem Beginn unserer systematischen Nährstoffuntersuchungen in diesem Gebiet, festgestellt. Erst im Herbst kam es zusammen mit der Verschlechterung der Sauerstoffverhältnisse auch zu einem stärkeren Anstieg des Phosphatgehalts im Tiefenwasser dieser Station.

Bemerkenswert sind ferner die Inversionen in der Verteilung des Phosphatgehalts im Landsorttief, die im Einklang mit den Sauerstoffverhältnissen stehen. Sie sind auch im westlichen Gotlandbecken vorhanden. Da sie nur $0,2-0,3 \mu\text{g-at./l}$ betragen und innerhalb des vorgegebenen Isolinenbereichs liegen, treten sie in Abb. 5 nicht in Erscheinung.

Im Gebiet des Fehmarnbells wurden im Februar 1977 mit $0,7-0,9 \mu\text{g-at./l PO}_4\text{-P}$, $5-8 \mu\text{g-at./l NO}_3\text{-N}$ und $0,7-1,4 \mu\text{g-at./l NH}_4\text{-N}$ in der gesamten Wassersäule sehr hohe Nährstoffkonzentrationen festgestellt. Besonders auffällig war, daß die höchsten Nitratkonzentrationen in der salzärmeren Deckschicht auftraten. Im Arkona- und Bornholmbecken wurden mit $3-4 \mu\text{g-at./l}$ in der Oberflächenschicht und $5-8 \mu\text{g-at./l}$ im Tiefenwasser die der Jahreszeit entsprechenden Nitratwerte gemessen. Ähnlich verhielt es sich mit dem Ammoniumstickstoff, der nur im grundnahen Bereich dieser Becken vereinzelt Werte über $1 \mu\text{g-at./l}$ erreichte. In Abhängigkeit von der Frühjahrsentwicklung des Phytoplanktons nahm nicht nur der Phosphatgehalt, sondern auch die Nitratkonzentration in der lichtdurchfluteten Oberflächenschicht ab, bis schließlich im Mai eine weitgehende Verarmung dieser Nährstoffe eingetreten war. Dagegen war der Ammoniumgehalt noch verhältnismäßig hoch. Mit Werten um $1 \mu\text{g-at./l}$ lag er über der Nitratkonzentration. Erst im August konnte in allen Ostseegebieten eine weitere Abnahme auch dieses Nährstoffes beobachtet werden.

Im August und September waren ferner die Anreicherungen des Nitrit- und Ammoniumstickstoffs im oberen Bereich der thermohalinen Sprungschicht ($40-60 \text{ m}$) bemerkenswert. Dabei wurden Nitritkonzentrationen von $0,3$ bis $0,5 \mu\text{g-at./l}$ und Ammoniumkonzentrationen von $1-2 \mu\text{g-at./l}$ erreicht. Während der Untersuchungen im Oktober/November wurden entsprechend hohe Konzentrationen dieser beiden Stickstoffverbindungen in der gesamten Oberflächenschicht der Gotlandsee beobachtet, wobei Ammoniumstickstoff die in dieser Jahreszeit noch geringe Nitratkonzentration übertraf.

Im Tiefenwasser der westlichen Teilgebiete der Ostsee wurden 1977 zeitweilig extrem hohe Ammonium- und Nitritkonzentrationen nachgewiesen. Beispiele aus dem Fehmarnbelt und dem Arkonabecken sind in Abb. 7 dargestellt. Auf die beginnende Denitrifikation im Tiefenwasser einiger Ostseeregionen, die infolge ungünstiger Sauerstoffverhältnisse zu einem starken Rückgang des Nitratgehalts geführt hatte, wurde bereits hingewiesen.

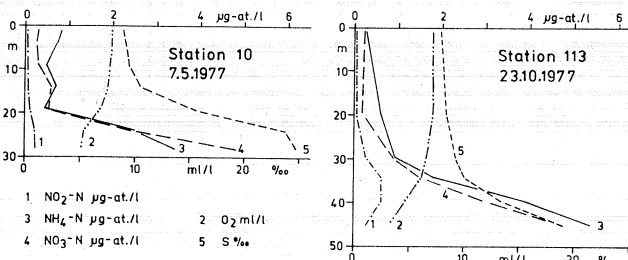


Abb. 7

Vertikalverteilung ausgewählter ozeanologischer Parameter im Fehmarnbelt und im Arkonabecken

3. Diskussion der Ergebnisse

Nicht nur der Beginn, sondern auch das Ende des Jahres 1976 war durch den verstärkten Einstrom salzreichen Wassers in die Ostsee gekennzeichnet (9). Da sich dieser Einstrom diskontinuierlich über einen längeren Zeitraum erstreckte, liegt kein Salzwassereinbruch im eigentlichen

Sinne vor (4). Der Wechsel zwischen Einstrom- und Ausstromlagen war ferner die Ursache dafür, daß sich keine größeren Mengen salzreichen Wassers im Arkonabecken ansammeln konnten. Zwischen den verschiedenen Einstromperioden hatte das salzreiche Wasser vielmehr Zeit, in die weiter östlich und nördlich gelegenen Becken abzufließen. Da der verstärkte Einstrom bereits im August begann, war das der Ostsee zugeführte Kattgatwasser relativ warm. Die Wassertemperatur kann daher benutzt werden, um die Ausbreitung dieser Wassermassen zu verfolgen.

Aus der Temperaturverteilung im Oktober/November 1976 ist zu erkennen (9), daß die in die Ostsee eingeströmten Wassermassen das Bornholmbecken zunächst in mittleren Tiefen passierte. Erst im weiteren Verlauf des Einstroms drangen sie bis zum Boden vor und führten dort zu einem Anstieg des Salzgehalts und zu einer Verbesserung der Sauerstoffverhältnisse.

Die Wassermassen, die zunächst das Bornholmbecken passierten, ohne zu einer Umschichtung zu führen, müssen sehr schnell in nordöstlicher Richtung vorangekommen sein und das Tiefenwasser des östlichen Gotlandbeckens erneuert haben. Diese Umschichtung, die nach schwedischen Untersuchungen bereits im Januar 1977 eingetreten war (2), führte zu einem extrem starken Anstieg der Wassertemperatur und zu einer deutlichen Zunahme des Salz- und Sauerstoffgehalts, während umgekehrt der Phosphatgehalt auf relativ niedrige Konzentrationen absank. Es ist bemerkenswert, daß die zu Beginn des Jahres 1977 beobachteten Temperaturen die höchsten waren (2), die bisher im Tiefenwasser dieses Beckens gemessen wurden. Außerdem erfuhr die im Mittel abnehmende Tendenz des Salzgehalts, die seit 1952 andauert (6), eine deutliche Unterbrechung.

Aufschlußreich für den Wasseraustausch zwischen den Tiefenbecken der Ostsee waren ferner die hydrographisch-chemischen Veränderungen im Landsorttief (Stat. 31 A). Nachdem auf dieser Station bereits im Herbst 1976 eine Wassererneuerung beobachtet wurde (9), die sicher eine Folge des Salzwassereinstroms zu Beginn dieses Jahres war, konnte im Mai-Juni 1977 (vgl. auch 2) eine erneute Wasserumschichtung mit ähnlichen Konsequenzen wie im Gotlandtief, jedoch ohne die dortigen Extremwerte, festgestellt werden.

Die Temperatur- und Sauerstoffinversionen, die im November 1977 im Tiefenwasser des Landsorttiefs vorhanden waren, deuten auf eine weitere Wassererneuerung in dieser Jahreszeit hin. Der Salzgehalt kann nicht für eine Beurteilung herangezogen werden, weil uns für den Zeitraum zwischen Mai und November keine Meßergebnisse vorliegen. Es kann daher nicht entschieden werden, ob der im November beobachtete Salzgehaltsanstieg auf die erste oder auf die zweite Umschichtung zurückzuführen ist.

Die rasche Folge der Wasserumschichtung im Landsorttief kann verschiedene Ursachen haben. So ist es denkbar, daß der Wechsel zwischen Einstrom- und Ausstromperioden, der in der 2. Jahreshälfte 1976 beobachtet wurde, sich auch in den nördlichen Ostseeregionen noch bemerkbar macht.

Eine andere Ursache kann die Geschwindigkeit sein, mit der die verschiedenen Wassermassen vorangekommen sind. So deutet FONSELIUS (2) an, daß die im Juni im Landsorttief beobachtete Erneuerung auf Wassermassen zurückzuführen ist, die unterhalb der Salzgehaltssprungschicht in mittleren Tiefen rasch nordwärts vorgedrungen sind. Die Wasserumschichtung im November kann dagegen durch Tiefenwasser erklärt werden, das aus anderen Becken verdrängt und beim Passieren der untermeerischen Schwellen in seiner Fortbewegung gehemmt wurde. Für ehemals stagnierendes Tiefenwasser spricht auch der relativ niedrige Sauerstoffgehalt. Eine endgültige Klärung dieser Fragen ist mit dem zur Verfügung stehenden Datenmaterial nicht möglich.

Das wichtigste Ergebnis der Wasserumschichtung in der Ostsee war die Verbesserung der Sauerstoffverhältnisse. Erstmals seit mehr als 10 Jahren war im Mai 1977 das gesamte Tiefenwasser frei von Schwefelwasserstoff (Abb. 1). Außerdem herrschten die günstigsten Sauerstoffverhältnisse seit Beginn dieses Jahrzehnts. Im Südteil des östlichen Gotlandbeckens waren mit $1-2 \text{ ml/l}$ bis in 150 m Tiefe fischereilich ausreichende Sauerstoffkonzentrationen vorhanden. Im Anschluß an die Wasserumschichtung, die in den verschiedenen Becken zu unterschiedlichen Terminen erfolgte, begann eine weitere Stagnationsperiode, die zu einer erneuten Verschlechterung der Sauerstoffverhältnisse im Tiefenwasser der Ostsee führte. So waren im Oktober/November 1977 fischereilich ausreichende Sauerstoffkonzentrationen

nen im Bornholmbecken nur noch bis 70 m, im Gdanker Becken bis 80 m und im Südteil des östlichen Gotlandbeckens bis 120 m Tiefe vorhanden (Abb. 1).

Diese rapide Verschlechterung der Sauerstoffverhältnisse wurde durch die relativ hohen Temperaturen, die unterhalb der thermohalinen Sprungschicht herrschten und sich fördernd auf die sauerstoffzehrenden biochemischen Abbauprozesse auswirkten, noch beschleunigt.

Wie weit die Sauerstoffverarmung im Herbst 1977 schon fortgeschritten war, wird durch Denitrifikationsprozesse unterstrichen, die im Tiefenwasser des Bornholmbeckens und Gotlandtiefs sowie im östlichen und westlichen Gotlandbecken bereits zu einer Nitratverarmung geführt hatten. Diese Prozesse beginnen etwa bei Sauerstoffkonzentrationen von 0,1–0,2 ml/l (10) und sind ein Zeichen dafür, daß in naher Zukunft mit anoxischen Bedingungen im Tiefenwasser dieser Regionen zu rechnen ist. Trotz der ungünstigen Entwicklung der Sauerstoffverhältnisse konnte im Oktober/November 1977 nur auf einer Station des nördlichen Gotlandbeckens Schwefelwasserstoff in Grundnähe festgestellt werden (Abb. 1). Auch im westlichen Gotlandbecken wurde Schwefelwasserstoff beobachtet, allerdings nicht am Grunde, sondern im unteren Bereich der Salzgehaltssprungschicht. Eine derartige Verteilung läßt auf eine Wasserrumschichtung in diesem Becken schließen und kommt dadurch zustande, daß das ehemals stagnierende Tiefenwasser durch advective Wasserzufuhr angehoben wurde.

Ebenso wie im Vorjahr (9, 11) wurden auch 1977 zu Jahresbeginn erhebliche Nährstoffmengen im Oberflächenwasser der westlichen Ostsee und des Arkonabeckens beobachtet, die über den mittleren Konzentrationen lagen. Damit wurde erneut bestätigt, daß der Einstrom größerer Mengen Kattegatwassers eine zusätzliche Eutrophierung in den westlichen Teilgebieten der Ostsee bewirkt. Die Reaktivierung von Nährstoffen aus dem Tiefenwasser als Folge der Wasserrumschichtung ist dagegen für 1977 von untergeordneter Bedeutung, weil es nach dem Salzwassereinstrom des Vorjahres noch nicht wieder zu nennenswerten Nährstoffanreicherungen in den tiefen Becken der Ostsee gekommen war.

Unter oxischen Bedingungen sind hohe Ammoniumkonzentrationen ein Hinweis auf eine noch nicht vollständig überwundene, organische Belastung des Wassers (9). Die hohen Konzentrationen dieser Stickstoffverbindung, die 1977 zeitweise im Tiefenwasser der westlichen Ostseeregionen angetroffen wurden (Abb. 7), lassen damit wichtige Schlußfolgerungen über die Wasserqualität zu. Die unvollständige Nitrifikation zeigt, daß das Tiefenwasser in diesen Gebieten erheblich organisch belastet war bzw. die Folgen einer organischen Belastung noch nicht überwunden hatte. Unter Berücksichtigung des Wasseraustausches an den Ostseezugängen, der im Mittel durch den Einstrom salzreichen Tiefenwassers und dem Ausstrom salzarmen Oberflächenwassers gekennzeichnet ist, liegt die Vermutung nahe, daß die organisch belasteten Wassermassen mit dem Tiefenstrom in die Ostsee gelangt sind. Die Ursachen dieser Belastung sind somit außerhalb der Ostsee zu suchen.

Da auf der Herbstreise 1977 keine Messungen im südlichen Kattegat durchgeführt wurden, kann eine Abschätzung der ozeanologischen Voraussetzungen für einen Salzwassereinstrom in die Ostsee nur aufgrund der Beobachtungen im Gebiet des Fehmarnbelts erfolgen. Ähnlich wie im Vorjahr (9) wurde auch im Zeitraum Oktober/November 1977 ein starker Anstieg des Salzgehalts in diesem Gebiet festgestellt, dessen Ursache in der vorangegangenen intensiven Einstromlage zu suchen ist. Dieser Anstieg war im Tiefenwasser jedoch gegenüber 1976 um 1,3 bis 1,8 ‰ niedriger. Da bei Einstromlagen der Salzgehalt im Tiefenwasser des Fehmarnbelts etwa dem des Oberflächenwassers im südlichen Kattegat entspricht, kann gefolgert werden, daß auch in dem zuletzt genannten Gebiet um 1–2 ‰ niedrigere Oberflächenwerte als im Vorjahr vorlagen.

Durch die Erneuerung des Tiefenwassers, die sowohl 1976 als auch 1977 erfolgte, war ferner der Salzgehalt in den grundnahen Schichten der Ostsee angestiegen. Um diese Wassermassen zu verdrängen, müßte das bei einem Salzwassereinstrom in die Ostsee einströmende Kattegatwasser relativ salzreich sein. Selbst bei intensiven Einstromlagen waren somit im November 1977 die Voraussetzungen für den Einstrom salzreichen Wassers mit nachfolgender Wasserrumschichtung in den tiefen Becken der Ostsee schlechter als im Spätherbst des Vorjahres.

Literatur

1. BOCK, K.-H.: Monatskarten des Salzgehalts der Ostsee dargestellt für verschiedene Tiefenhorizonte. Dt. Hydrogr. Zeitsch., Erg. H., R. B. Nr. 12 (1971), 147 S.
2. FONSELIUS, S. H.: An inflow of unusually warm water into the Baltic deep basins. Meddelande havsf.-lab. Lysekil 229 (1977), 15 S.
3. FRANCKE, E. und NEHRING, D.: Erste Beobachtungen über einen erneuten Salzwassereinstrom in die Ostsee im Februar 1969. Beitr. Meeresk. 28 (1971), S. 33–47.
4. FRANCKE, E., NEHRING, D. und RECHLIN, O.: Oceanographic and fishery-biological effects of the inflow pattern in the western Baltic in autumn 1976. Ann. Biol. 23 (1978), S. 40–41.
5. LENZ, W.: Monatskarten der Temperatur der Ostsee, dargestellt für verschiedene Tiefenhorizonte. Dt. Hydrogr. Zeitsch., Erg. H., R. B. Nr. 11 (1971), 148 S.
6. MATTHÄUS, W.: Zur Hydrographie der Gotlandsee. I. Säkuläre Variationen von Salzgehalt und Temperatur. Beitr. Meeresk. 29 (1972), S. 35–51.
7. MATTHÄUS, W.: Zur mittleren jahreszeitlichen Veränderlichkeit der Temperatur der offenen Ostsee. Beitr. Meeresk. 40 (1977), S. 117–155.
8. MATTHÄUS, W.: Grundzüge der Hydrographie der Ostsee. Acta hydrochim. hydrobiol. 6 (1978), S. 3–14.
9. NEHRING, D. und FRANCKE, E.: Die Erneuerung des Tiefenwassers und andere hydrographisch-chemische Veränderungen in der Ostsee im Jahre 1976. Fischerei-Forsch., Rostock, 18 (1978), (im Druck).
10. NEHRING, D.: Untersuchungen über die Verteilung der anorganischen Stickstoffverbindungen im Hinblick auf die zunehmende Wasserver-schlechterung in der Ostsee.
11. NEHRING, D.: On the input nutrients into the Baltic through the Belts and the Sound. Intern. Council Explor. Sea C.M. 1977/C: 17, S. 1–4.
12. WOLF, G.: Salzwassereinstürme im Gebiet der westlichen Ostsee. Beitr. Meeresk. 29 (1972), S. 67–77.
13. WYRTKI, K.: Der große Salzwassereinstrom in die Ostsee im November und Dezember 1951. Kieler Meeresforsch. 10 (1954), S. 19–25.
14. ———: The Baltic Year 1969/70. Program manual. Göteborg, 1968.