

Die hydrographisch-chemischen Bedingungen in der westlichen und zentralen Ostsee im Jahre 1987

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

Der strenge Winter und der erheblich zu kalte Sommer führten 1987 zu negativen Temperaturanomalien von 2 bis 4 K im Oberflächenwasser der westlichen und zentralen Ostsee. Der Ausgleich dieses Wärmedefizits erfolgte erst im Spätherbst. Extrem kalt war auch das baltische Zwischenwasser.

Im Tiefenwasser des westlichen Gotlandbeckens führte eine Wassererneuerung zur Verbesserung der Sauerstoffbedingungen. Stagnierende Bedingungen bewirkten dagegen, daß es in der grundnahen Wasserschicht des Bornholm- und Gdansk Beckens erneut zur Bildung von Schwefelwasserstoff kam. Im östlichen Gotlandbecken dauerte die Stagnationsperiode, die vor 11 Jahren begonnen hat, an. In diesem Becken wurden unterhalb 125 bis 150 m Tiefe anoxische Bedingungen mit z.T. sehr hohen Schwefelwasserstoffkonzentrationen festgestellt.

Die Phosphat- und Nitratakkumulation erreichte in der winterlichen Oberflächenschicht hohe Beträge, die sich in den seit zwei Jahrzehnten beobachteten positiven Trend einordnen.

1. Einleitung

Zur Untersuchung saisonaler und zwischenjähriger Anomalien sowie von Langzeitveränderungen erfolgten 1987 weitere ozeanologische Messungen in der westlichen und zentralen Ostsee. Damit wurde das Observatoriumsprogramm fortgesetzt, das seit 1969 im gegenwärtigen Umfang durchgeführt wird. *) Infolge günstiger meteorologischer Bedingungen traten während der 5 planmäßigen Terminfahrten kaum Ausfalltage auf. Darüber hinaus wurde die Februarreise trotz des kalten Winters noch nicht nennenswert durch Eis behindert. Für das Jahr 1987 liegt daher im Vergleich zu früheren Jahren besonders umfangreiches ozeanologisches Datenmaterial vor, das durch eine zusätzliche Kurzreise im Dezember noch erweitert wurde.

Die Februarterminfahrt wurde mit dem Fischereiforschungsschiff „Eisbär“ des Instituts für Hochseefischerei und Fischverarbeitung des VEB Fischkombinat Rostock durchgeführt. Für die übrigen Reisen stand das Forschungsschiff „Prof. Albrecht Penck“ des Instituts für Meereskunde, Rostock-Warnemünde, zur Verfügung.

*) Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden fortlaufend in der Zeitschrift Fischerei-Forschung, Rostock, publiziert.

Technische Gründe erforderten die Verschiebung der Februarterminfahrt auf das Ende des Monats sowie der Augustterminfahrt, die auf die 2. Julihälfte vorgezogen werden mußte. Geringfügige Abweichungen der Meßtermine traten jedoch auch in den anderen Jahreszeiten auf.

Ozeanologische Messungen wurden 1987 im Februar und Juli in den Seegebieten zwischen Fehmarnbelt (Stat. 010) und nördlichem Gotlandbecken (Stat. 30 B) durchgeführt. Im März endete die Meßfahrt bereits im Gotlandtief (Stat. 15 A) und erstreckte sich im Mai und im Oktober–November bis in den Finnischen Meerbusen (Stat. 22 A). Die Kurzreise im Dezember, die speziell der Untersuchung der Einstromsituation und des Nährstoffregimes in dieser Jahreszeit diente, war auf die Seegebiete zwischen Fehmarnbelt und Bornholmtief (Stat. 5A) beschränkt. Die nationalen und internationalen Standardstationen, die für die nachfolgende Einschätzung der hydrographisch-chemischen Bedingungen in der westlichen und zentralen Ostsee verwendet wurden, sind in Abb. 1 enthalten. Während der Februarterminfahrt erfolgte die Temperaturmessung mit Tiefsee-Kippthermometern und die Entnahme der Wasserproben mit Nansen-Wasserschöpfern. Auf allen anderen Reisen des Jahres 1987 wurde die Tiefseesonde

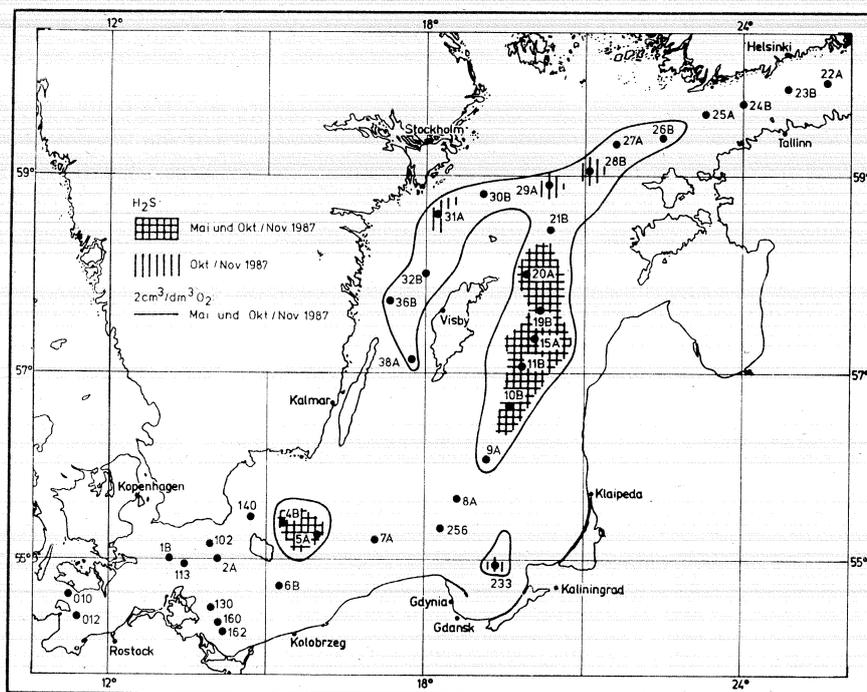


Abb. 1 Stationskarte und Gebiete mit Sauerstoffmangel und Schwefelwasserstoff in der grundnahen Wasserschicht der Ostsee (Landsorttief nach schwedischen Messungen im September 1987, 2)

OM 75 /9/ für die Gewinnung der Temperaturwerte und Wasserproben benutzt.

Als Standardparameter wurden in den Wasserproben der Salzgehalt, die Sauerstoff- und Schwefelwasserstoffkonzentrationen sowie die Nährstoffe Phosphat, Nitrat Nitrit und Ammonium gemäß /19/ analysiert. Darüber hinaus wurden einige Proben auf ihren Gehalt an Gesamtphosphor und -stickstoff sowie Harnstoff untersucht. Das Meßprogramm wurde durch meteorologische Beobachtungen ergänzt. Über die Ergebnisse der in der produktiven Jahreszeit durchgeführten meeresbiologischen Untersuchungen wird an anderer Stelle berichtet.

2. Die meteorologischen Bedingungen

Nach zwei vorangegangenen strengen Wintern /13, 15/ begann auch das Jahr 1987 mit einem sehr kalten Januar, der in der 2. Dekade die niedrigsten Temperaturen dieses Jahrhunderts sowie die längste Periode extremer Kälte für das Gebiet der DDR aufwies /24/. Wie Tab. 1 zeigt, wich die monatliche Mitteltemperatur der Luft über der Ostsee regional um -5 bis -10 K vom Normalwert ab. Für die Küstenstation Warnemünde wurde eine Abweichung von -5 K ermittelt.

Als Folge der extremen Kältewelle kam es in den meisten Teilgebieten der Ostsee einschließlich des Kattegats sehr schnell zur Eisbildung und teilweisen Eisbedeckung /26/, die auch während des überwiegend temperaturnormalen Februars erhalten blieb.

Ausschlaggebend für das Ausmaß der Eisbedeckung der Ostsee im Winter 1986/87 war jedoch die zweite Kälteperiode, die Ende Februar begann und während der ersten Märzdekade andauerte. Sie bewirkte einen Bedeckungsgrad, der den des Vorjahres erheblich übertraf, aber auch noch stärker war als im Winter 1984/85 /26/.

Die Kältesumme, die aus den negativen Tagesmitteltemperaturen der Luft für den Winter 1986/87 berechnet wurde, beträgt für die Küstenstation Warnemünde 256,5 K /22/ und liegt damit deutlich über der Summe von 204,5 K des vorangegangenen Winters. Sie ist jedoch niedriger als die des Winters 1984/85 mit einer Kältesumme von 278,9 K /vgl. auch 17/.

Nach den Kältesummen von Warnemünde gehört der Winter 1986/87 zu den 12 kältesten dieses Jahrhunderts und muß gemäß der Klassifikation von Hupfer /4/ als eisreich eingestuft werden. Berücksichtigt man jedoch den Grad der Eisbedeckung der Ostsee, dann muß er den eisreichsten Wintern dieses Jahrhunderts zugeordnet werden.

Aus Tab. 1 ist zu entnehmen, daß über der gesamten Ostsee bis in den September hinein negative Anomalien der Lufttemperaturen auftraten. Sie wurden im wesentlichen durch die Zufuhr kalter Meeres- und Polarluft verursacht. Erst Ende Juni wurde die Zufuhr kalter Luftmassen aus nördlichen Breiten durch eine südwestliche Luftströmung unterbrochen.

Die Temperaturen in den oberflächennahen Wasserschichten der Ostsee werden außer vom Wärmeaustausch an der Grenzfläche Meer-Atmosphäre und von der Eisbedeckung durch die Sonneneinstrahlung bestimmt. Sie war 1987 überwiegend geringer als der langjährige Mittelwert und erreichte an der Küstenstation Arkona im strahlungsintensivsten Monat Juni nur etwa 30 % der astronomisch möglichen bzw. 55 % der mittleren Sonnenschein-

dauer (Tab. 1). Deutlich über dem langjährigen Erwartungswert lag die Sonnenscheindauer vor allem in den Monaten Oktober und November.

Die kurzen Hochsommerperioden im Juli konnten die immer wieder eintretenden Kaltlufteinbrüche temperaturmäßig nicht vollständig kompensieren, so daß auch dieser Monat insgesamt zu kalt war. Einen ähnlichen Witterungscharakter zeigten die Monate August und September, die ebenfalls zu kalt und zum Teil sehr niederschlagsreich waren. Insgesamt lag die Niederschlagsmenge des Jahres 1987 im Einzugsgebiet der Ostsee über dem langjährigen Mittel /25/.

Die für 1987 ermittelte Wärmesumme für die Küstenstation Warnemünde, die aus den Differenzen der über 16 °C liegenden Tagesmitteltemperaturen berechnet wurde, beträgt nur 60,8 K /22/. Der Sommer 1987 ist damit der viertkälteste dieser seit 1947 vorhandenen Klassifizierung und kann als mäßig warm eingeordnet werden /vgl. auch 17/. Berücksichtigt man jedoch die Anzahl der Tage mit einer Mitteltemperatur über 16 °C /22/, so rangiert er gleich hinter dem bisher kältesten Sommer, der 1962 beobachtet wurde.

Lufttemperaturen, die den mittleren Bedingungen entsprachen oder geringfügig darüber lagen (Tab. 1), traten 1987 erst im Oktober auf. Infolge geringer Bedeckung stand in diesem Monat zwar ein hohes Strahlungsangebot zur Verfügung, das jedoch weitgehend durch Einschübe feuchtkalter Luftmassen kompensiert wurde.

Mit wolken- und niederschlagsreicher Witterung fiel der November durch advektive Zuführung maritimer Luftmassen zu warm aus. Er gehörte für einige Gebiete der DDR zu den sonnenscheinärmsten dieses Jahrhunderts, wie auch am Beispiel der Küstenstation Arkona (Tab. 1) ersichtlich ist. Während die erste Dezemberhälfte kalt, jedoch sonnenscheinreich war, lagen die Lufttemperaturen in der letzten Dekade bei starker Bewölkung zum Teil erheblich über den Normalwerten.

3. Die hydrographisch-chemischen Bedingungen

In Anlehnung an frühere Untersuchungen wurden die Feldverteilungen der hydrographisch-chemischen Parameter als Vertikalschnitte, die dem Talweg durch die Ostsee folgen, dargestellt (Abb. 2-6). Dabei wird vorausgesetzt, daß die jahreszeitlichen und zwischenjährlichen Veränderungen der untersuchten Parameter größer sind als die Abweichungen, die durch zeitliche Unterschiede in der Bearbeitung der Stationen verursacht werden oder die aus thermisch, dynamisch und chemisch-biologisch bedingten Variabilitäten und Inhomogenitäten resultieren.

3.1. Die Wassertemperaturen

In der westlichen Ostsee, dem Seegebiet zwischen Fehmarnbelt und Darßer Schelle, wurden im Februar 1987 in der gesamten Wassersäule Temperaturen von -0,2 bis -0,5 °C gemessen. Lediglich in der grundnahen Wasserschicht des Fehmarnbels wurden mit 0,2 °C positive Werte ermittelt. Bezogen auf die langjährigen Mittel der Feuerschiffsbeobachtungen im Fehmarnbelt /18/ und am Gedser Rev /23/ betrug die Temperaturanomalie in der gesamten Wassersäule dieses Seegebietes -1,6 bis -2,1 K. Sie hatte damit nahezu den Höchstwert, der durch die Gefrieretemperatur in Abhängigkeit vom Salzgehalt des Wassers bestimmt wird, erreicht.

Tabelle 1

Abweichungen der monatlichen Mitteltemperaturen der Luft (ΔT_L in K) sowie Anteil der monatlichen Sonnenscheindauer (SS in %) bezogen auf die Normalwerte (Küstenstation Arkona 1951-1980, Ostseestationen 1931-1960)

Monat	ΔT_L (K) Küstenstation Arkona (24)	SS (%) Küstenstation Arkona (24)	ΔT_L (K) Belt-, Arkona-, Bornholmsee (25)	ΔT_L (K) südl. Gotlandsee (25)	ΔT_L (K) nördl. Gotlandsee, Finn. Meerbusen (25)
Dez. 1986	0,9	61	0	0	-1 bis -4
Jan. 1987	-4,2	70	-5 bis -7	-5 bis -7	-5 bis -10
Feb. 1987	-0,6	58	0	0	-1 bis 1
März 1987	-3,2	108	-2 bis -3	-3	-2 bis -3
April 1987	0,1	83	0 bis -1	0 bis -1	0
Mai 1987	-1,0	87	-2	-1	-1
Juni 1987	-1,8	55	-2	-2	-2 (bis -1)
Juli 1987	-1,4	84	-1 bis -2	-2	-2
Aug. 1987	-1,7	83	-1 bis -2	-2	-3
Sep. 1987	-0,7	102	0 bis -1	0 bis -1	-1 (bis -2)
Okt. 1987	0,4	148	0 bis 1	0 bis 1	1 bis 2
Nov. 1987	0,7	33	1	0	0
Dez. 1987	0,9	125	0	0	-1 bis -2

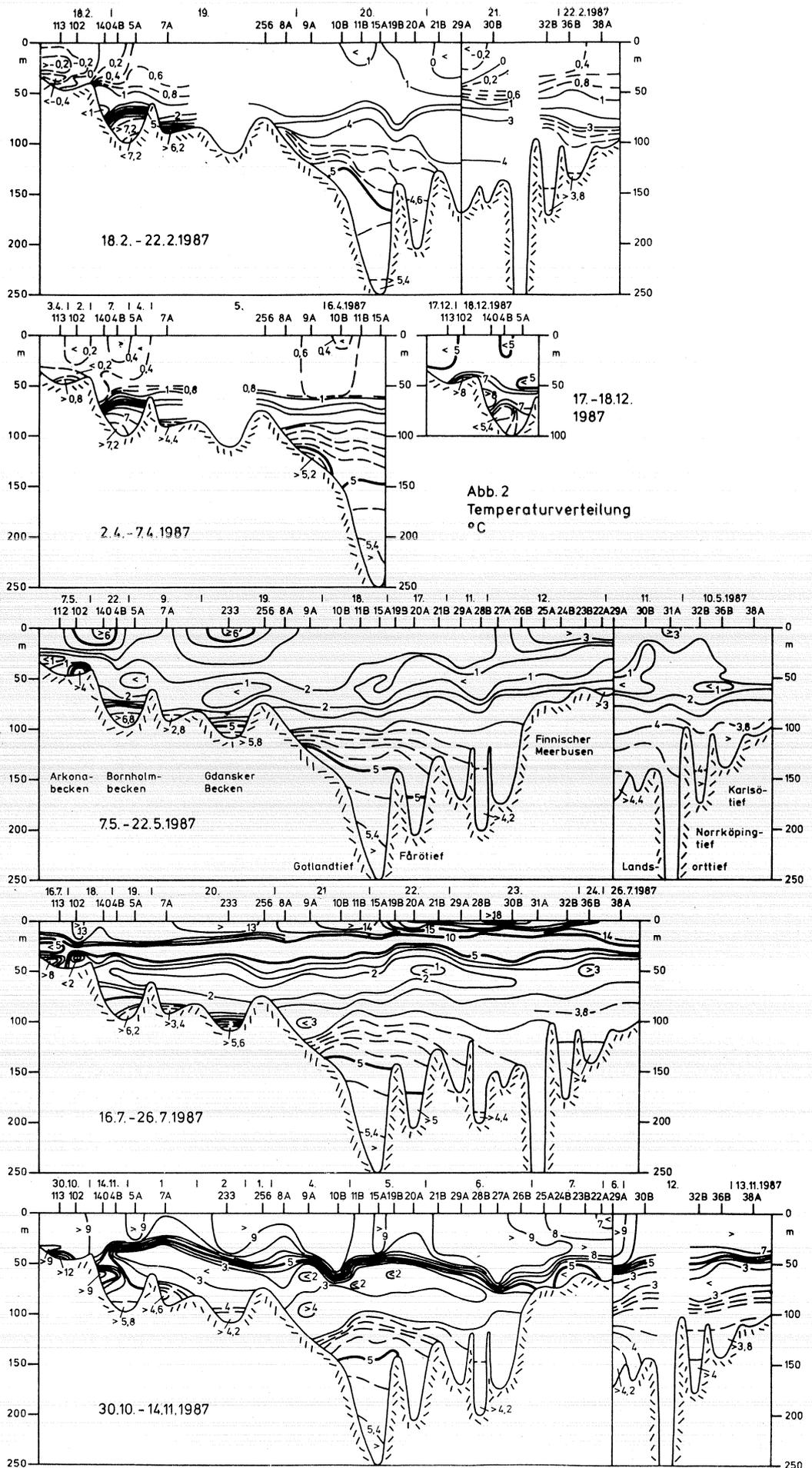


Abb. 2
Temperaturverteilung
°C

Abb. 2

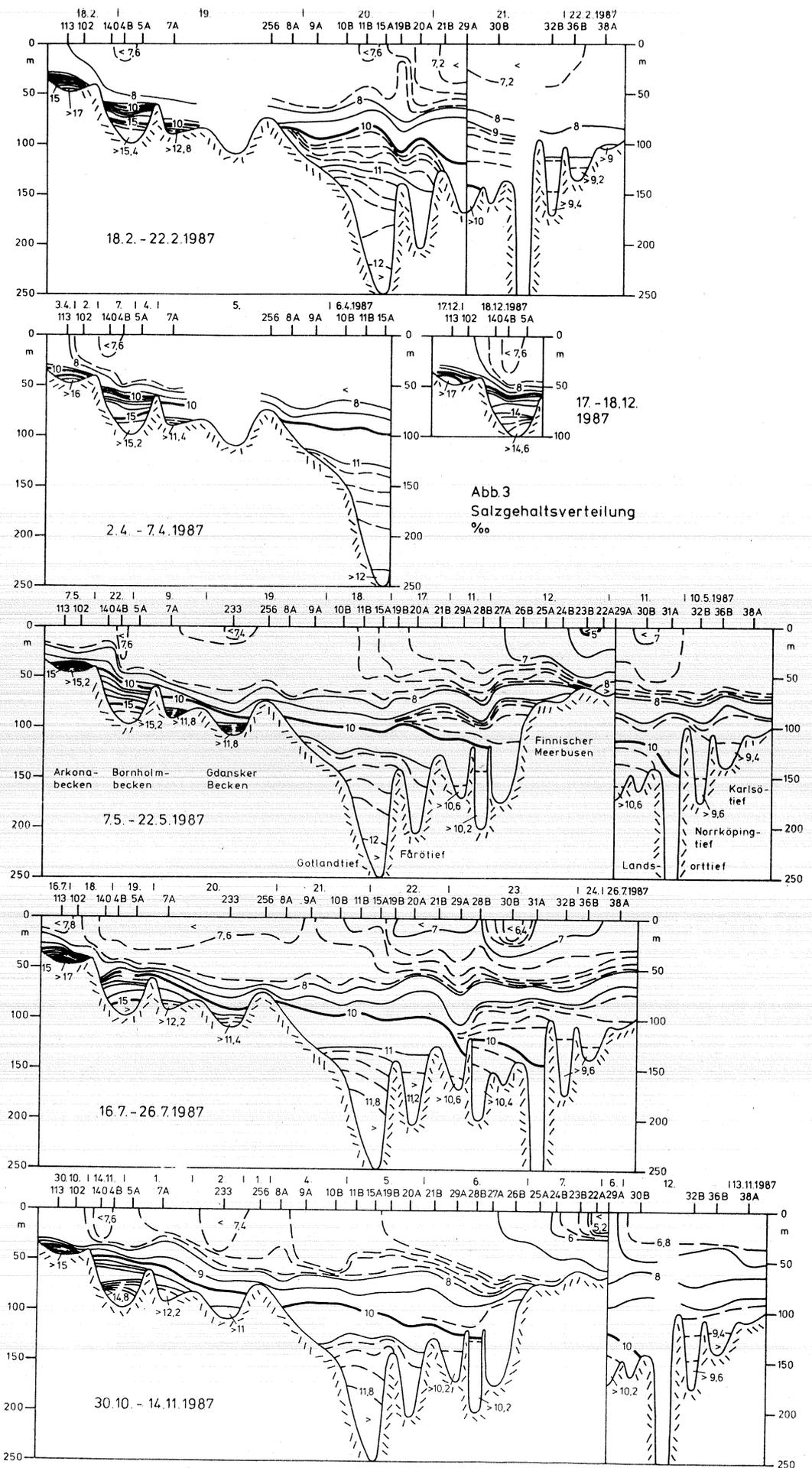


Abb. 3

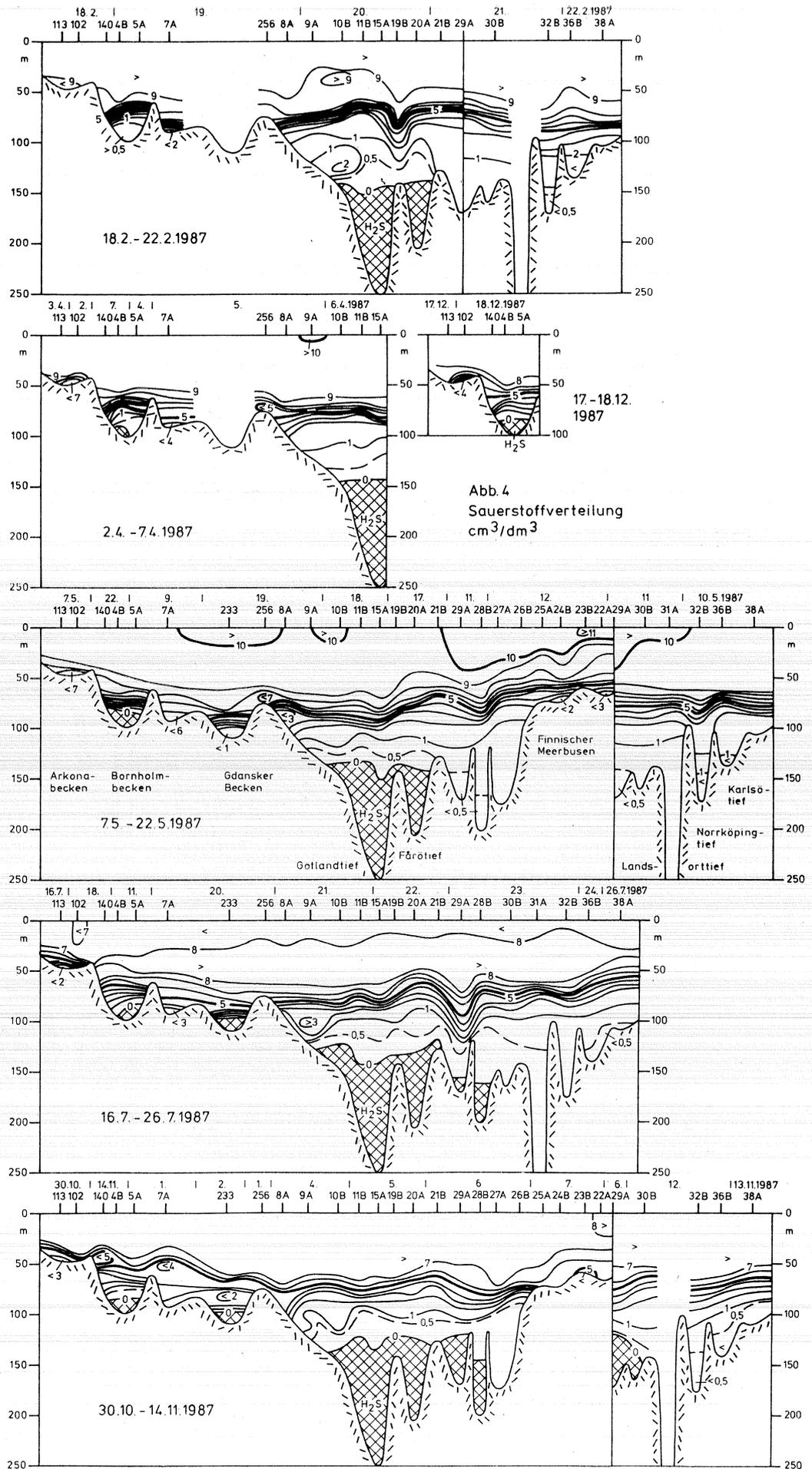


Abb. 4

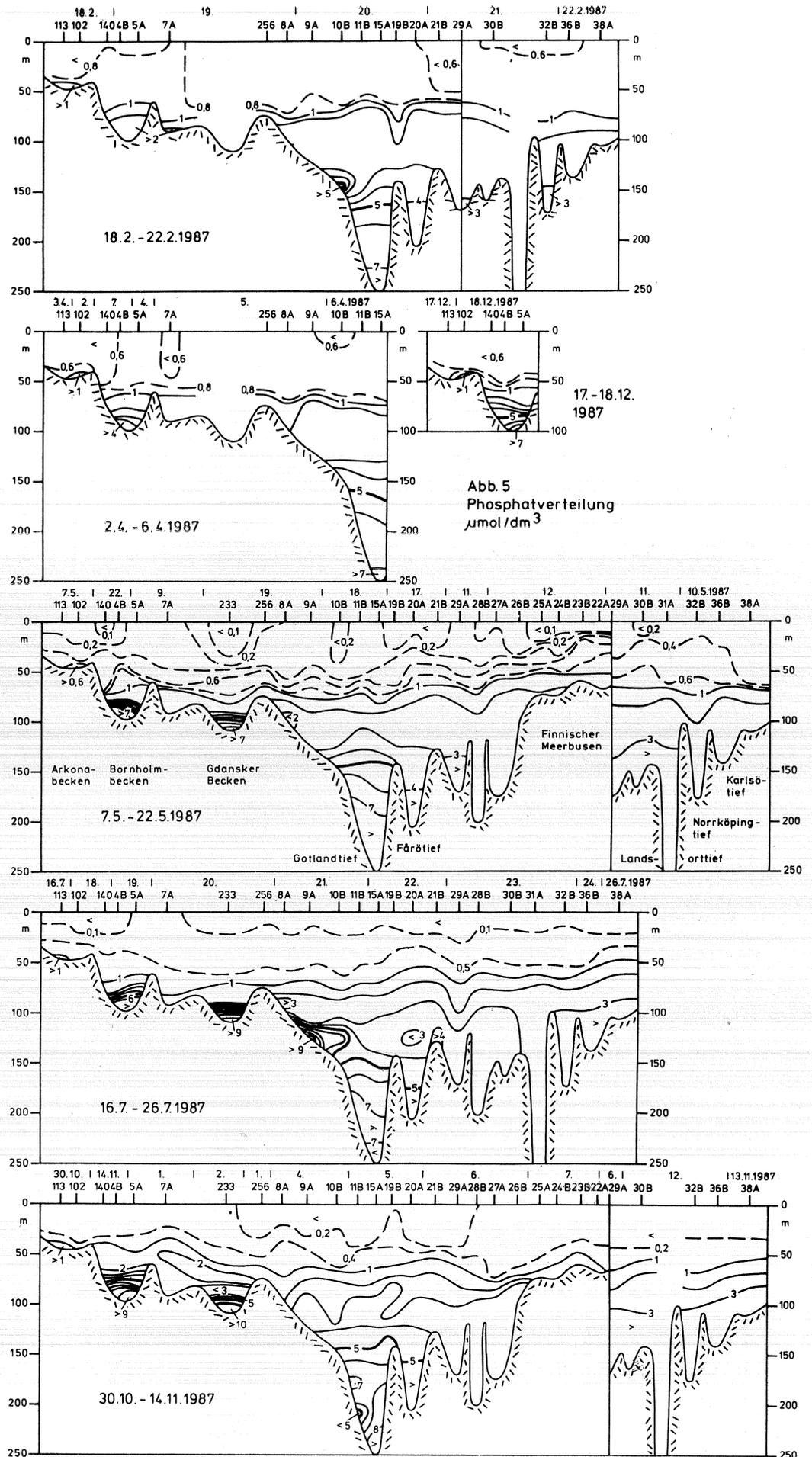


Abb. 5

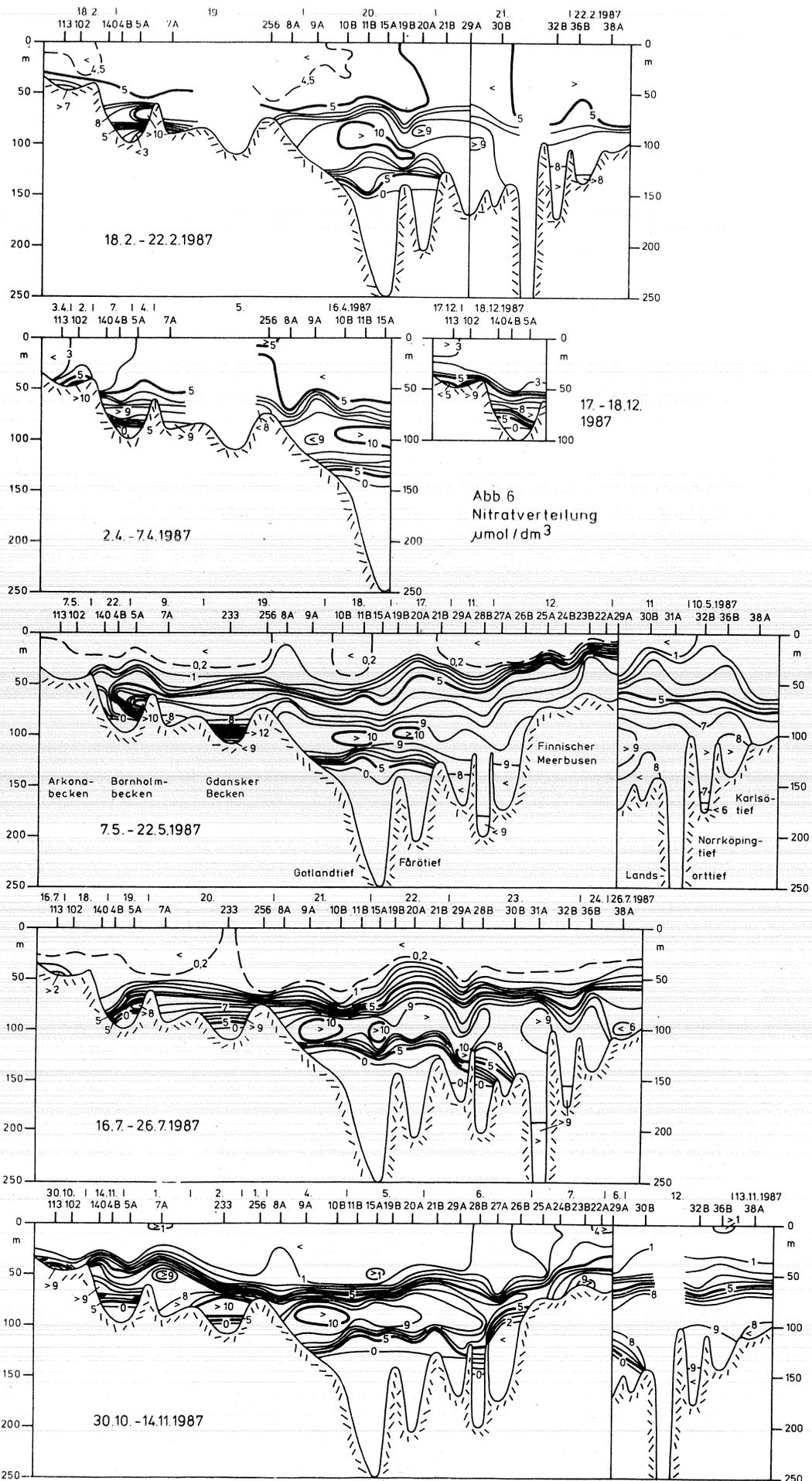


Abb. 6

Wie die Feldverteilung der Wassertemperatur in Abb. 2 zeigt, waren im Februar auch im Arkonabecken negative Wassertemperaturen vorhanden, die intermediäre Extrema von $-0,2^{\circ}\text{C}$ bzw. $-0,4^{\circ}\text{C}$ aufwiesen. Temperaturen zwischen 0 und $-0,2^{\circ}\text{C}$ wurden auch in der oberflächennahen Wasserschicht der nördlichen Gotlandsee beobachtet, während im zentralen Teil der Ostsee noch 1 bis $1,3^{\circ}\text{C}$ auftraten. Bezogen auf die von MATTHÄUS /6/ berechneten mittleren Bedingungen resultieren daraus Anomalien von $-1,8\text{ K}$ bis $-2,3\text{ K}$ in der Arkona- und Bornholmsee, jedoch von nur etwa $-0,3\text{ K}$ im Gotlandtief.

Wegen des ungünstigen Witterungscharakters und des geringen Strahlungsangebotes erwärmte sich die Ostsee im weiteren Jahresverlauf nur sehr allmählich, so daß die Temperatursprungschicht in ihren zentralen Teilen im Mai erst sehr schwach ausgebildet war (Abb. 2). Im Juli 1987 wurden hier nur Temperaturen von 12°C bis 14°C in der Oberflächenschicht erreicht. Die Anomalien lagen in dieser Jahreszeit zwischen -2 K und -4 K , in der Bornholmsee erreichten sie sogar $-4,5\text{ K}$. Annähernd normale Sommertemperaturen von 15°C bis 17°C wurden nur in der westlichen Ostsee sowie von 17°C bis 18°C in der nördlichen Gotlandsee beobachtet. Sie waren auf eine sehr flache Deckschicht begrenzt (Abb. 2) und traten offensichtlich nur kurzzeitig auf.

Im Spätherbst hatten die Temperaturen in der Oberflächenschicht der Ostsee annähernd den jahreszeitlichen Erwartungswert erreicht, so daß das bis zum Sommer vorhandene Wärmedefizit weitgehend abgebaut war. Im Dezember zeichnete sich bereits der Beginn einer positiven Temperaturanomalie ab.

Die relativ langsam verlaufende Erwärmung sowie die niedrigen Temperaturen in der Deckschicht der zentralen Ostsee waren die Ursache dafür, daß der Gradient der sommerlichen Temperatursprungschicht schwächer als in anderen Jahren ausgebildet war. Im kalten baltischen Zwischenwasser, dessen Temperaturen von der Strenge des vorangegangenen Winters bestimmt werden, traten im Juli 1987 Temperaturminima von $1,1^{\circ}\text{C}$ bis $1,3^{\circ}\text{C}$ auf (Abb. 2). Die mit $0,9^{\circ}\text{C}$ niedrigste Temperatur wurde im Färötief in 50 m Tiefe gemessen. Für die südöstliche Gotlandsee ergeben sich daraus Abweichungen vom langjährigen Mittelwert /17/, die $-1,4\text{ K}$ bis $-1,6\text{ K}$ betragen.

Die Temperaturzunahme im Tiefenwasser des Arkonabeckens entsprach dem Jahresgang, der in diesem Teilgebiet der Ostsee noch bis zum Grund reicht /5/. Nach den starken Intrusionen warmen Wassers im Herbst des Vorjahres /15/ traten zu Beginn des Jahres 1987 relativ hohe Temperaturen im Tiefenwasser des Bornholmbeckens auf (Abb. 2). Im weiteren Jahresverlauf erfolgte ein Temperaturrückgang um insgesamt $1,8\text{ K}$. Eine ähnlich starke Temperaturabnahme scheint im Gdansker Becken eingetreten zu sein. Im Tiefenwasser des westlichen Gotlandbeckens wurde dagegen eine Temperaturzunahme um $0,2\text{ K}$ festgestellt. In den grundnahen Wasserschichten der anderen zentralen Ostseebecken wurden keine nennenswerten Temperaturänderungen beobachtet. Intrusionen warmen Wassers aus dem Arkonabecken ins Bornholmbecken wurden 1987 nur im November festgestellt. Die Temperaturen dieser Wassermassen, die sich im oberen Bereich der Halokline einschichteten, waren relativ niedrig.

3.2. Der Salzgehalt

In der gesamten Wassersäule des Fehmarnbelt (Stat. 010) war der Salzgehalt im Februar sowie im November und Dezember 1987 durch negative Anomalien von $1-2,5\text{ ‰}$ gekennzeichnet, wenn man den Mittelwert der Feuerschiffsbeobachtungen im Zeitraum 1949 bis 1978 zugrunde legt /18/. Unter Berücksichtigung des Jahresganges wich der Salzgehalt in der Oberflächenschicht der zentralen Ostseeregionen (Abb. 3, vgl. auch Tab. 2) nur geringfügig von den Mittelwerten ab, die von MATTHÄUS /7/ berechnet wurden. Gegenüber den Salzkonzentrationen, die noch Ende der 70er Jahre und Anfang der 80er Jahre beobachtet wurden, ist jedoch ein deutlicher Rückgang eingetreten. Tab. 2 weist dies für die winterlichen Bedingungen aus.

Mit Konzentrationen zwischen $15,2$ und $17,5\text{ ‰}$ war die Salzgehaltsverteilung in der grundnahen Wasserschicht des Arkonabeckens 1987 relativ geringen Schwankungen unterworfen (Abb. 3). Der Salzgehalt im Tiefenwasser des Bornholmbeckens nahm im Jahresverlauf um $0,8\text{ ‰}$ ab und war im Dezember 1987 durch den sehr niedrigen Wert von $14,7\text{ ‰}$ gekennzeichnet. Ein ähnlich starker Salzgehaltsrückgang wurde im Gdansker Tief festgestellt. Im

Gotlandtief liegt die Salzkonzentration in der grundnahen Wasserschicht (236 m) nunmehr bei $12,00\text{ ‰}$. Im Zeitraum November 1986 /15/ bis November 1987 ist sie um $0,12\text{ ‰}$ abgesunken. In den anderen Teilen des östlichen Gotlandbeckens wurde ebenfalls ein geringer Salzgehaltsrückgang festgestellt.

Zwischen Februar und Mai 1987 ist im westlichen Gotlandbecken eine Erneuerung des Tiefenwassers eingetreten. Sie war im Norrköping- und Karlsötief mit einer Zunahme des Salzgehalts um $0,2\text{ ‰}$ verbunden.

3.3. Sauerstoff und Schwefelwasserstoff

Die Faktoren, die den Sauerstoffgehalt in der Oberflächenschicht der Ostsee bestimmen, wurden bereits ausführlich diskutiert /vgl. 15/. Unter Berücksichtigung dieser Faktoren entsprachen die Veränderungen des Sauerstoffgehalts, die 1987 beobachtet wurden, den Erwartungen. Als Folge der Frühjahrsblüte des Phytoplanktons wurden Sättigungswerte von $110-125\text{ ‰}$ erreicht. Das mit der herbstlichen Abkühlung einhergehende Sauerstoffdefizit betrug $1-4\text{ ‰}$. Höhere Beträge, $6-10\text{ ‰}$, wurden jedoch im Oberflächenwasser von einigen Stationen in der westlichen Ostsee ermittelt.

Das intermediäre Sauerstoffmaximum im baltischen Zwischenwasser (Abb. 4) betrug im Juli $8,4$ bis $8,8\text{ cm}^3/\text{dm}^3$. Die aus diesen hohen Sauerstoffkonzentrationen resultierenden Anomalien liegen im Bornholmbecken bei $+0,7\text{ cm}^3/\text{dm}^3$ und im südöstlichen Gotlandbecken bei $+0,5\text{ cm}^3/\text{dm}^3$. Sie weichen damit signifikant von den langjährigen Mittelwerten /17/ ab.

Die Sauerstoffbedingungen im Tiefenwasser der westlichen Ostsee waren 1987 relativ günstig. Im Verlauf der jahreszeitlichen Abnahme sanken die Konzentrationen nur auf $2-3\text{ cm}^3/\text{dm}^3$ ab. Eine Ausnahme bildete die innerste Station (023) in der Lübecker Bucht, auf der im November nur $0,3\text{ cm}^3/\text{dm}^3$ in Grundnähe gemessen wurden.

Der Jahresgang des Sauerstoffgehalts im Tiefenwasser des Arkonabeckens mit hohen Werten im Winter und Frühjahr und niedrigen im Sommer und Herbst /6/ war auch 1987 deutlich erkennbar (Abb. 4). Die niedrigste Konzentration betrug $1,3\text{ cm}^3/\text{dm}^3$ und wurde im Juli registriert. Im Bornholmbecken traten ab April 1987 anoxische Bedingungen auf. Schwefelwasserstoff wurde im Juli auch im Gdansker Tief festgestellt. In dieser Region waren anoxische Bedingungen zuletzt 1982 /12/ beobachtet worden.

Tabelle 2

Mittlere Phosphat-, Nitrat- und Salzkonzentrationen in der Oberflächenschicht ausgewählter Ostseeregionen vor Beginn der Frühjahrsentwicklung des Phytoplanktons (in Klammern Anzahl der Messungen)

Gebiet	Jahr	PO_4^{3-} $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$	NO_3^- $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$	S ‰
Meckl. Bucht Jan.-Feb.	1980	0,64 (2)	10,9 (2)	13,64 (2)
	1981	0,65 (2)	8,6 (2)	11,29 (2)
	1982	0,60 (3)	9,0 (3)	12,92 (3)
	1983	0,75 (1)	6,1 (1)	13,1 (1)
	1984	0,90 (4)	6,3 (4)	14,5 (4)
	1985	1,09 (4)	8,3 (4)	14,1 (4)
	1986	0,86 (4)	8,3 (4)	10,97 (4)
	1987	0,74 (8)	8,4 (8)	12,00 (8)
Arkonasee Jan.-Feb. (März)	1980	0,46 (8)	3,8 (4)	8,48 (8)
	1981	0,55 (11)	4,4 (10)	8,23 (11)
	1982	0,54 (11)	4,0 (11)	7,83 (11)
	1983	0,79 (13)	4,1 (11)	8,72 (12)
	1984	0,75 (9)	3,9 (9)	8,97 (9)
	1985	0,74 (11)	4,4 (11)	8,36 (11)
	1986	0,67 (9)	4,6 (9)	7,86 (9)
	1987	0,74 (7)	4,5 (7)	7,98 (7)
Bornholmsee Feb. (März)	1980	0,50 (6)	3,7 (4)	8,02 (6)
	1981	0,69 (6)	3,7 (5)	7,85 (6)
	1982	0,58 (8)	4,1 (7)	7,79 (8)
	1983	0,82 (10)	4,1 (7)	8,44 (9)
	1984	0,74 (8)	3,9 (8)	8,44 (8)
	1985	0,76 (8)	4,2 (8)	7,82 (8)
	1986	0,66 (8)	3,8 (8)	7,56 (8)
	1987	0,73 (6)	4,4 (6)	7,71 (6)
Südöstliche Gotlandsee Feb.-März (April)	1980	0,46 (11)	4,3 (6)	7,84 (11)
	1981	0,64 (13)	4,2 (13)	7,90 (13)
	1982	0,63 (15)	4,2 (15)	7,81 (15)
	1983	0,67 (12)	4,3 (11)	7,96 (12)
	1984	0,68 (12)	4,4 (12)	7,83 (12)
	1985	0,67 (12)	4,3 (12)	7,76 (12)
	1986	0,58 (12)	4,7 (12)	7,59 (12)
	1987	0,67 (12)	4,7 (12)	7,72 (12)

Im östlichen Gotlandbecken zeichnete sich besonders im Mai 1987 der Einstrom sauerstoffreicherer Wassermassen im Tiefenbereich zwischen 80 und 100 m ab (Abb. 4). Im Tiefenwasser dieses Beckens war ganzjährig Schwefelwasserstoff vorhanden, dessen vertikale Ausdehnung aufgrund jahreszeitlicher Fluktuationen zwischen 125 und 150 m Tiefe schwankte. Im Gotlandtief wurde im Juli mit $5,71 \text{ mg/dm}^3$ in 223 m Tiefe die bisher höchste Schwefelwasserstoffkonzentration seit Beginn unserer 19jährigen Beobachtungsreihe gemessen.

Die Sauerstoffbedingungen im Tiefenwasser des nördlichen Gotlandbeckens verschlechterten sich im Verlauf des Jahres 1987. In der zweiten Jahreshälfte trat Schwefelwasserstoff auf, der sich teilweise bis in 100 m Tiefe ausbreitete.

Relativ günstige Bedingungen herrschten im westlichen Gotlandbecken, obgleich sich die am Salzgehalt beobachtete Erneuerung des Tiefenwassers nur im Norrköpingtief in einem geringfügigen Anstieg des Sauerstoffgehalts widerspiegelt. Dieser Prozeß scheint jedoch die Ursache dafür gewesen zu sein, daß in diesem Becken auch im Spätherbst keine anoxischen Bedingungen auftraten.

3.4. Die Nährstoffe

Die Feldverteilung der wichtigen produktionsbegrenzenden Nährstoffe Phosphat und Nitrat ist in den Abb. 5 und 6 dargestellt. Tab. 2 enthält ihre mittleren Konzentrationen in der winterlichen Oberflächenschicht ausgewählter Ostseeregionen. Für die Arkonasee konnten die Anfang April gemessenen Werte nicht mehr zur Mittelbildung herangezogen werden, weil die Frühjahrsentwicklung des Phytoplanktons bereits zu einem teilweisen Nährstoffverbrauch geführt hatte. In der Bornholmsee und in der südöstlichen Gotlandsee waren die in dieser Jahreszeit gemessenen Phosphatkonzentrationen generell niedriger, im Mittel um $0,1 \mu\text{mol/dm}^3$, als im Februar. Da entsprechende Unterschiede im Nitratgehalt nicht beobachtet wurden, kann eine beginnende Phytoplanktonentwicklung als Ursache ausgeschlossen werden.

Die winterlichen Phosphat- und Nitratkonzentrationen, die 1987 in der Oberflächenschicht der untersuchten Ostseeregionen ermittelt wurden, ordnen sich in den positiven Nährstofftrend ein, der seit etwa zwei Jahrzehnten beobachtet wird. Eine Ausnahme bilden die Phosphatkonzentrationen in der Mecklenburger Bucht, die im Vergleich zu den Vorjahren (Tab. 2) deutlich geringer sind. In der Lübecker Bucht wurden winterliche Nitratkonzentrationen von 11 bis $12 \mu\text{mol/dm}^3$ gemessen, während die Phosphatkonzentrationen denen der anderen Ostseeregionen entsprachen.

Extrem hohe Nitratkonzentrationen, bis zu $33 \mu\text{mol/dm}^3$, wurden im Mai auf der Oderbank und östlich von Rügen beobachtet, während der Phosphatgehalt an der Grenze der analytischen Nachweisbarkeit lag. Winde aus nördlichen Richtungen hatten in dieser relativ flachen Region zu einem Anstau von Oderwasser geführt. Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang, daß damit nur eine Salzgehaltsabnahme um maximal 1‰ im Vergleich zu den küstenfernen Regionen der Arkonasee verbunden war.

Im Dezember hatte die Nährstoffakkumulation, die im Herbst in der Oberflächenschicht der Ostsee einsetzt, etwa $\frac{2}{3}$ der Winterwerte erreicht (Abb. 6). Geringe Ammonium- und Nitritkonzentrationen ($0,1\text{--}0,3 \mu\text{mol NH}_4^+$ und $0,1\text{--}0,5 \mu\text{mol NO}_2^-$) zeigten, daß die Nitrifikation langsam verlief. Hinsichtlich des Nitrits weicht diese Beobachtung von der des Vorjahres /15/ ab.

Im Tiefenwasser wurde die Nährstoffverteilung vor allem durch das Redoxpotential bestimmt. Unter anoxischen Bedingungen wurden Phosphatkonzentrationen von $6\text{--}10 \mu\text{mol/dm}^3$ erreicht (Abb. 5), während Nitrat unter diesen Bedingungen unbeständig ist (Abb. 6). Geringe Konzentrationen dieser Stickstoffverbindung in Gegenwart von Schwefelwasserstoff wurden auf analytische Unzulänglichkeiten zurückgeführt und blieben unberücksichtigt.

Niedrigere Phosphatkonzentrationen ($2,5\text{--}3,5 \mu\text{mol/dm}^3$) und hohe Nitratkonzentrationen ($8\text{--}10 \mu\text{mol/dm}^3$) lagen in der oxischen Tiefenschicht vor. Die Phosphatverteilung in dieser Schicht scheint jahreszeitlichen Fluktuationen zu unterliegen, wobei die höchsten Konzentrationen im Herbst auftreten.

Im oxischen Tiefenwasser ist die Konzentration an Ammoniumstickstoff zumeist gering ($<1 \mu\text{mol}$). Ausnahmen bilden die westliche Ostsee und das Arkonabecken. In

diesen Regionen wurden 1987 gelegentlich 2 bis maximal $8 \mu\text{mol NH}_4^+$ unter oxischen Bedingungen gemessen.

Als Endstufe der Stickstoffmineralisierung unter anoxischen Bedingungen wurden vor allem in den grundnahen Wasserschichten der zentralen Ostseebecken hohe Ammoniumkonzentrationen ($8\text{--}12 \mu\text{mol}$) gemessen. Mit $34\text{--}37 \mu\text{mol/dm}^3$ wurden im November 1987 im Gotlandtief extrem hohe Konzentrationen registriert.

4. Diskussion

Der Winter 1986/87 war der dritte strenge Winter in Folge. Auch der Frühling und Sommer waren zu kalt, so daß das Jahr 1987 für das Gebiet der Ostsee durch negative Anomalien der Lufttemperaturen und ein niedriges Strahlungsangebot geprägt war. Darüber hinaus war es niederschlagsreich.

Der Winter 1986/87 mit zwei ausgeprägten Kälteperioden führte zu einer langanhaltenden, großflächigen Eisbedeckung der Ostsee. Nach den Kältesummen von Warnemünde wurde er als eisreich klassifiziert. Messungen des Meteorologischen Dienstes der UdSSR zeigen, daß der Winter 1986/87 in den baltischen Sowjetrepubliken sehr kalt war. In Riga wurden am 11. Januar 1987 mit einer Tagesmitteltemperatur von $-29,3^\circ\text{C}$ bei einem nächtlichen Minimum von -33°C die seit 110 Jahren niedrigsten Temperaturen gemessen. Die Kältesumme für Riga betrug in diesem Winter 849 K. Die bisher höchste Kältesumme von 1358 K wurde für den Winter 1941/42 ermittelt; der auch für die DDR sehr strenge Winter 1962/63 (vgl. auch 17) war in Riga durch die Kältesumme von 923 K gekennzeichnet.

Die offensichtlich größere Strenge des Winters 1986/87 über den zentralen Teilen der Ostsee führte am 13. März 1987 zu dem höchsten Eisbedeckungsgrad seit dem Winter 1946/47 /26/. Dabei wies auch das nur in extrem kalten Jahren gefrierende östliche Gotlandbecken an diesem Tag eine in großen Teilen geschlossene Eisdecke auf. Das im Winter 1986/87 entstandene Wärmedefizit im Oberflächenwasser der Ostsee blieb infolge des zu kalten und strahlungsarmen Frühjahrs und Sommers bis in den September hinein erhalten /2/. Im November war es jedoch weitgehend abgebaut, so daß die Ostsee mit normalen Temperaturen in den Winter ging.

Die Temperaturen, die 1987 in der warmen Jahreszeit in der Deckschicht und im baltischen Zwischenwasser festgestellt wurden, sind die niedrigsten seit Beginn unserer 19jährigen Beobachtungsreihe. Die im baltischen Zwischenwasser der zentralen Ostsee angetroffenen extremen Temperaturminima sind nicht allein auf die niedrigen Wintertemperaturen zurückzuführen. Sie sind vermutlich auch eine Folge der relativ geringen Erwärmung der Deckschicht im Sommer 1987. Anderenfalls hätten ähnlich niedrige Temperaturen auch nach anderen strengen Wintern auftreten müssen.

Die negativen Anomalien im Salzgehalt, die im Februar sowie im November und Dezember 1987 im Gebiet des Fehmarnbelts beobachtet wurden, zeigen, daß in den für Salzwassereinbrüche besonders günstigen Jahreszeiten /3/ kein Einstrom salzreichen Wassers erfolgte, zumindest nicht über einen längeren Zeitraum, der auch bei den stichprobenartigen Terminfahrtbeobachtungen erfaßt wird. Die Erneuerung des Tiefenwassers im westlichen Gotlandbecken im Mai 1987 hängt wahrscheinlich mit dem Einstrom zusammen, der im Frühjahr 1986 im Bornholmbecken beobachtet wurde /15/. Dabei brauchten die Wassermassen, die das östliche Gotlandbecken in mittleren Tiefen passierten, 10 bis 12 Monate, um die Entfernung Bornholmtief – Karlsötief zurückzulegen. Hieraus läßt sich, dem Talweg (860 km) durch die zentrale Ostsee folgend, eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit von rund $3 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$ berechnen. Dieser Wert stimmt gut mit früheren Abschätzungen /11/ überein.

Während der Salzgehalt in der Oberflächenschicht gegenwärtig etwa den mittleren ozeanologischen Bedingungen nach MATTHÄUS /7/ entspricht, ist er im Tiefenwasser der zentralen Ostseebecken niedrig bis extrem niedrig. Im Gotlandtief liegt er bereits deutlich unter dem Wert vor dem großen Salzeinbruch /21/, der im Jahre 1952 zu einem starken Anstieg des Salzgehalts führte. Dadurch haben sich dichtemäßig die Voraussetzungen für eine durchgreifende Wassererneuerung der grundnahen Wasserschichten weiter verbessert. Die Umschichtung kann jetzt bereits durch Wassermassen erfolgen, deren Salzgehalt relativ gering ist.

Die Abnahme des Salzgehalts in der Oberflächenschicht dauert an (vgl. auch /15/). Als Ursache ist neben dem nunmehr 11jährigen Ausbleiben eines größeren Salzwasser-einbruchs die erhöhte Niederschlagsmenge im Einzugsgebiet der Ostsee zu nennen.

Das hohe Sauerstoffdefizit, das im Herbst im Oberflächenwasser einiger Stationen in der westlichen Ostsee angetroffen wurde, kann nicht allein auf die verzögerte Einstellung des Sättigungsgleichgewichts während der Abkühlungsphase zurückgeführt werden. Als weiterer Grund ist die verstärkte organische Belastung, auf die bereits im Vorjahr hingewiesen wurde /15/, zu nennen.

Relativ günstige Sauerstoffbedingungen herrschten 1987 im Tiefenwasser des westlichen Gotlandbeckens. Als Ursache dafür ist die Wassererneuerung anzusehen, die vor allem in der Salzgehaltszunahme sichtbar wurde, sich jedoch in keinem nennenswerten Anstieg des Sauerstoffgehalts widerspiegelte. Auf seinem Weg durch die Ostsee ist offensichtlich in den einströmenden Wassermassen eine weitgehende Sauerstoffverarmung eingetreten.

Wie Abb. 1 zeigt, herrschten im November im Tiefenwasser der anderen zentralen Ostseebecken anoxische Bedingungen. Nach 4 Jahren mit relativ günstigen Sauerstoffbedingungen wurde in der zweiten Jahreshälfte erstmals wieder Schwefelwasserstoff im Gdanskner Tief angetroffen. Wie die winterlichen Phosphat- und Nitratkonzentrationen in der Oberflächenschicht der Arkonasee, der Bornholmsee und der südöstlichen Gotlandsee zeigen (Tab. 2), ist mit einer Fortdauer der Eutrophierung in der Ostsee zu rechnen. Die im Winter 1986 in diesen Regionen beob-

achteten etwas geringeren Nährstoffkonzentrationen sind auf zwischenjährliche Fluktuationen zurückzuführen.

Da der Salzgehalt in der winterlichen Oberflächenschicht seit einigen Jahren abnimmt, bestehen gegenwärtig keine Korrelationen mit den weiterhin ansteigenden Phosphat- und Nitratkonzentrationen, wie das besonders in den 70er und zu Beginn der 80er Jahre beobachtet wurde. Als Ursache dieser Korrelation wurde ein verstärkter Vertikalaustausch vermutet /10/. Da der Salzgehalt im Tiefenwasser der Ostsee gegenwärtig schneller abnimmt als in der Oberflächenschicht /8/, kann diese These aufrechterhalten werden.

Die hohen Nitratkonzentrationen, die im Mai im Gebiet der Oderbank und östlich von Rügen gemessen wurden, entsprechen denen im ozeanischen Tiefenwasser. Eine direkte Schädigung kann daher ausgeschlossen werden. Sie sind jedoch ein Indikator für die Ausbreitung des Oderwassers, mit dem auch Schadstoffe in die wichtigen Heringslaichgebiete Greifswalder Bodden und die Gewässer um Rügen transportiert werden können.

Die Kombination von hohen Nitratkonzentrationen und relativ geringer Salzgehaltsabnahme läßt auf einen hohen Verdünnungsgrad schließen. Die ursprünglich im Oderwasser vorhandenen Konzentrationen sind somit um ein Vielfaches höher anzusetzen.

Die Nährstoffverteilung im Tiefenwasser der Ostsee, die nachhaltig durch die Sauerstoffbedingungen bestimmt wird, folgte der früherer Jahre. Die Fortsetzung der Trendabschätzungen muß späteren Untersuchungen vorbehalten bleiben.

Literatur

- ANTONOV, A. E.: Zur zwischenjährlichen und langjährigen Veränderlichkeit der Wassertemperatur im Bereich des kalten Zwischenwassers der Ostsee. Ryb. Issled. Balt. Morja 3 (1967), S. 49-63 (in russ.).
- FYRBERG, L.: Report of the oceanographic expedition in the Kattegat, the Sound, and the Baltic proper in the period 20-25 September 1987. The Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI), Göteborg, Oct. 1987, S. 1-9.
- FRANCK, H.; MATTHÄUS, W.; SAMMLER, R.: Major inflows of saline water into the Baltic Sea during the present century sent century. Gerlands Beitr. Geophysik, Leipzig 76 (1987), S. 517-531.
- HUPFER, P.: Die Ostsee - kleines Meer mit großen Problemen. Leipzig 1978, S. 1-152.
- MATTHÄUS, W.: Mittlere Temperatur- und Sauerstoffverhältnisse in der Arkonasee am Beispiel der Station BY2A auf 55° N, 14° E. Beitr. Meereskunde, Berlin 36 (1975), S. 5-27.
- MATTHÄUS, W.: Zur mittleren jahreszeitlichen Veränderlichkeit der Temperatur in der Ostsee. Beitr. Meereskunde, Berlin 40 (1977), S. 117-155.
- MATTHÄUS, W.: Zur mittleren jahreszeitlichen Veränderlichkeit des Oberflächensalzgehalts der Ostsee. Gerlands Beitr. Geophysik 87 (1978), S. 369-376.
- MATTHÄUS, W.: Die Veränderungen des ozeanologischen Regimes im Tiefenwasser des Gotlandtiefs während der gegenwärtigen Stagnationsperiode. Fisch.-Forsch., Rostock 25 (1987) 2, S. 17-22.
- MÖCKEL, F.: Die ozeanologische Meßkette OM 75 - eine universelle Datenerfassungsanlage für Forschungsschiffe. Beitr. Meereskunde, Berlin 43 (1980), S. 5-14.
- NEHRING, D.: Langzeitveränderungen essentieller Nährstoffe in der zentralen Ostsee. Acta hydrochim. hydrobiol. 13 (1985), S. 591-609.
- NEHRING, D.; FRANCKE, E.: Hydrographisch-chemische Untersuchungen in der Ostsee von 1968-1978. I. Die hydrographischen Bedingungen und ihre Veränderungen. Geod. Geoph. Veröff. R. IV, H. 35 (1981), S. 1-38.
- NEHRING, D.; FRANCKE, E.: Die hydrographisch-chemischen Bedingungen in der Ostsee im Jahre 1982. Fisch.-Forsch., Rostock 21 (1983) 4, S. 56-65.
- NEHRING, D.; FRANCKE, E.: Die hydrographisch-chemischen Bedingungen in der westlichen und zentralen Ostsee im Jahre 1985. Fisch.-Forsch., Rostock 25 (1987) 2, S. 7-14.
- NEHRING, D.; FRANCKE, E.: Untersuchungen über die mittelfristige Vorhersage einiger fischereirelevanter ozeanologischer Größen in der Ostsee. Fisch.-Forsch., Rostock 26 (1988) 2, S. 7-13.
- NEHRING, D.; FRANCKE, E.: Die hydrographisch-chemischen Bedingungen in der westlichen und zentralen Ostsee im Jahre 1986. Fisch.-Forsch., Rostock 25 (1987) 4, S. 68-79.
- NEHRING, D.; SCHULZ, S.; RECHLIN, O.: Eutrophication and fishery resources in the Baltic Sea. Symposium on Baltic Sea fishery resources, Rostock, GDR, ICES 1988 BAL/No. 11, S. 1-8.
- NEHRING, D.; TIESEL, R.; FRANCKE, E.: Beziehungen zwischen einigen ozeanologischen Größen der Ostsee und den Lufttemperaturen an der DDR-Küste. Beitr. Meereskunde (im Druck).
- REICHEL, U.: Mittlere monatliche Temperatur- und Salzgehaltswerte im Gebiet des Fehmarnbells. Untersuchungen auf der Grundlage von Feuerschiffsbeobachtungen 1949-1978. Inst. für Meeresk., Warnemünde 1980, unveröff.
- ROHDE, K.-H.; NEHRING, D.: Ausgewählte Methoden zur Bestimmung von Inhaltsstoffen im Meer- und Brackwasser. Geod. Geoph. Veröff. R. IV, H. 24 (1979), S. 1-68.
- POPIEL, I.: Some remarks on the Baltic herring. ICES C.M. 1964 Doc 68 (1964), S. 1-8.
- WYRTKI, K.: Der große Salzeinbruch in die Ostsee im November und Dezember 1951. Kieler Meeresforsch. 10 (1954), S. 19-25.
- TIESEL, R.: Jährliche Kälte- und Wärmesummen für die meteorologische Beobachtungsstation Rostock-Warnemünde. Amt für Meteorologie Rostock, 1987, unveröff.
- Mittelwerte der Temperatur und des Salzgehalts, Gedser Rev (1931-1960). Inst. für Meeresk., Warnemünde 1982, unveröff.
- Monatlicher Witterungsbericht für das Gebiet der Deutschen Demokratischen Republik. Hrsg. Meteorol. Dienst der DDR, HA für Klimatologie Potsdam 41 (1987).
- Die Großwetterlagen Europas. Amtsblatt des Dtsch. Wetterdienstes Offenbach (Main), 40 (1987).
- A summary of the ice season and icebreaking activities 1986/87. The Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI), Norrköping 1987, S. 1-61.