

Die hydrographisch-chemischen Bedingungen in der westlichen und zentralen Ostsee im Jahre 1983

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

Die Temperaturen in der Oberflächenschicht und im kalten Baltischen Zwischenwasser der zentralen Ostsee waren 1983 bis zum Herbst durch eine positive Anomalie gekennzeichnet. Als Folge des im Vorjahr beobachteten Salzwassereintruchs (1, 13) erreichten die Temperaturen im Tiefenwasser des Bornholmbeckens vorübergehend extrem hohe Werte ($> 9^\circ\text{C}$). Der Temperaturanstieg im Gdanskener Tief und im östlichen Gotlandbecken war geringer. Die Auswirkungen dieses Salzwassereintruchs auf das Sauerstoffregime im Tiefenwasser der zentralen Ostseebecken blieben hinter den Erwartungen zurück. Die Gründe dafür werden diskutiert.

In der nordöstlichen Gotlandsee hatte die thermohaline Sprungschicht Anfang November 1983 eine extreme Tiefenlage, im Finnischen Meerbusen fehlte sie völlig. Die für die Jahreszeit ungewöhnlich hohen Phosphat- und Nitratkonzentrationen in der Oberflächenschicht dieser Regionen deuten auf tiefreichende Vermischungsprozesse hin.

Die im Mittel signifikant zunehmenden Konzentrationen der produktionsbegrenzenden Nährstoffe Phosphat und Nitrat in der winterlichen Oberflächenschicht zeigen, daß die Eutrophierung in der zentralen Ostsee bis 1983 unvermindert andauerte. Der Phosphatgehalt nahm auch im oxischen Tiefenwasser weiter zu. Der seit 1979 beim Nitrat nach vorherigem Anstieg beobachtete negative Trend in dieser Schicht läßt den Schluß zu, daß das Budget dieses Nährstoffes in Abhängigkeit von den Sauerstoffbedingungen durch Denitrifikationsprozesse reguliert wird.

1. Einleitung

Die Untersuchungen über die ozeanologischen Bedingungen in der zentralen Ostsee wurden 1983 durch das Institut für Meereskunde der Akademie der Wissenschaften der DDR fortgesetzt. Sie dienen der Einschätzung jahreszeitlicher und zwischenjährlicher Veränderungen als Beitrag zur Erarbeitung von Fischereiprognosen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen, die seit 1969 systematisch durchgeführt und fortlaufend in der Zeitschrift „Fischerei-Forschung“ publiziert werden (13), bilden darüber hinaus die Grundlage für Trendanalysen ausgewählter ozeanologischer Größen.

Ebenso wie in früheren Jahren wurden auch 1983 fünf Terminfahrten durchgeführt, die alle im Fehmarnbelt

(Stat. 010) begannen und im Mai sowie im Oktober/November bis zum Finnischen Meerbusen (Stat. 22 A), im März/April bis in die nördliche Gotlandsee (Stat. 29 A), im August bis zum Färötief (Stat. 20 A) und im Januar/Februar bis in den Südteil des östlichen Gotlandbeckens (Stat. 9 A) reichten. Die Stationskarte (Abb. 1) enthält nur die nationalen und internationalen Standardstationen, die in den Schnittdarstellungen verwendet wurden oder im Zusammenhang mit weiteren Auswertungen von Interesse sind.

Das hydrographisch-chemische Meßprogramm beinhaltete die Standardparameter t ($^\circ\text{C}$), S (‰), O_2 , H_2S , PO_4^{3-} , NO_3^- , NO_2^- und NH_4^+ . Es wurde durch meteorologische Beobachtungen ergänzt.

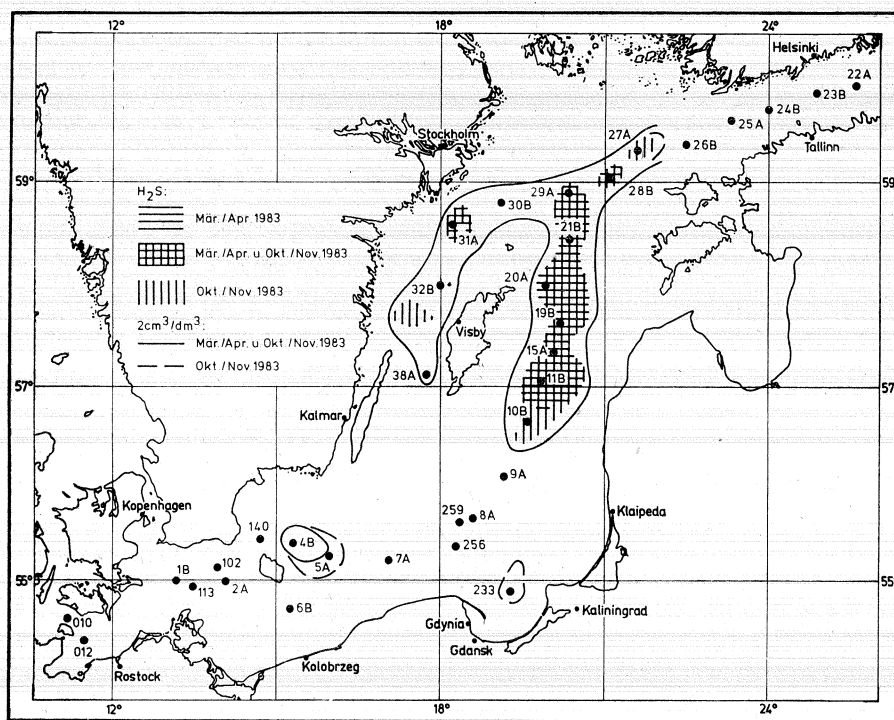


Abb. 1

Stationskarte und Gebiete mit Sauerstoffmangel und Schwefelwasserstoff in der grundnahen Wasserschicht der zentralen Ostsee (die Angaben für das Landorttief im Oktober/November wurden dem Reisebericht des schwedischen Forschungsschiffes „Argos“, 14. 11.—5. 12. 1983, entnommen)

2. Die meteorologischen Bedingungen

Der Winter 1982/83 war über Nordeuropa zu warm. Im Gebiet der Ostsee betrug die positive Abweichung der Lufttemperatur vom langjährigen Mittelwert mehr als 2 K (17), im Januar waren es sogar 4–5 K. Diese positive Anomalie setzte sich im Frühjahr und Sommer 1983 fort, wobei ihr Ausmaß abnahm. So lagen die Lufttemperaturen über der gesamten Ostsee bis zum Mai um 1–2 K über dem Erwartungswert. Danach betrug die Anomalie über den mittleren und südlichen Teilgebieten nur noch 0,5 bis 1 K; in den nördlichen Ostseeregionen waren noch geringere Abweichungen vom langjährigen Mittel vorhanden.

Bei der Erwärmung der Wasseroberfläche spielte während des Sommers 1983 das außerordentlich hohe Strahlungsangebot eine wesentliche Rolle. An der Küstenstation Arkona wurden z. B. im Juni 117 ‰, im Juli 143 ‰ und im August 133 ‰ der normalen Sonnenscheindauer registriert (18). Die abnehmende positive Anomalie der Lufttemperatur über weiten Teilen der Ostsee muß demzufolge auf die Zufuhr kühler Luftmassen zurückgeführt werden. Eine Ausnahme bildete hierbei die Küstenstation Arkona, die im Juli und August 1983 eine positive Anomalie von 2 K erreichte. Diese wurde durch den extrem warmen Sommer verursacht, der über Mitteleuropa herrschte.

Von großem Einfluß auf die Wassertemperatur in den oberflächennahen Schichten ist weiterhin die Luftbewegung. Dementsprechend kann vorausgesetzt werden, daß im sehr strahlungsreichen, aber windarmen Juli eine starke Aufheizung der Oberfläche erfolgte. Während der ersten Augushälfte besaß der Wetterablauf vorwiegend zyklonalen Charakter, so daß über der Ostsee Windstärken von 5–7 Beaufort vorherrschten. Die dadurch bedingte Vermischung der Oberflächenschicht führte vor allem in den westlichen Teilgebieten der Ostsee zu einer Abkühlung trotz des weiterhin hohen Strahlungsangebotes und zu einem Absinken der Temperatursprungschicht (vgl. auch Abschnitt 3.1.).

Die positive Temperaturabweichung der Luftmassen über der Ostsee hielt bis zum Oktober 1983 an und wurde erst im November mit Werten zwischen –0,5 und –2 K beendet. Diese negative Anomalie setzte sich auch im Dezember fort.

3. Die hydrographisch-chemischen Bedingungen

Die Ergebnisse der hydrographisch-chemischen Untersuchungen sind wiederum in Form von Profilen (Abb. 2–6) längs des Talweges der zentralen Ostsee dargestellt. Bei der nachfolgenden Auswertung wird vorausgesetzt, daß die jahreszeitlichen Veränderungen größer sind als die kurzfristigen raum-zeitlichen Variabilitäten.

3.1. Die Wassertemperatur

Die Vertikalverteilung der Wassertemperaturen während der Terminfahrten ist in Abb. 2 dargestellt. Infolge des milden Winters lagen die Wassertemperaturen in der Oberflächenschicht der zentralen Ostsee im März/April um 1,5–2 K über den langjährigen Mittelwerten (2, 3). Da auch das Frühjahr überdurchschnittlich mild war, setzten die Erwärmung und Differenzierung der Wassersäule relativ früh ein, so daß im Mai bereits eine ausgeprägte Temperatursprungschicht vorhanden war.

Infolge des extrem strahlungsreichen Sommers wurden im August hohe Wassertemperaturen in der zentralen Ostsee registriert, wobei die positive Anomalie im Gotlandtief Werte über 2,5 K erreichte. In der Arkona- und Bornholmsee war sie geringer und betrug nur etwa 0,5 K. Gleichzeitig wies die homotherme Deckschicht mit 15–17 m eine relativ große Mächtigkeit auf.

Anfang November entsprachen die Temperaturen in der Oberflächenschicht nahezu den mittleren Bedingungen. In diesem Zusammenhang muß jedoch auf die extreme Mächtigkeit der homothermen Deckschicht hingewiesen werden, die in der nordöstlichen Gotlandsee (Stat. 27 A, 26 B) bis in über 100 m Tiefe reichte (vgl. Abb. 2). Gleichzeitig war auf allen Stationen des Finnischen Meerbusens keine thermische Differenzierung der Wassersäule vorhanden. Eine ähnliche Situation, die nicht allein nur die Folge der geringen winterlichen Abkühlung war, wurde Anfang Februar auch im Gdansker Tief angetroffen.

Da die winterliche Abkühlung der Ostsee geringer als normal war, zeigte auch das Baltische Zwischenwasser positive Abweichungen von 0,5–1 K im Vergleich zu den von MATTHÄUS (3) berechneten langjährigen Mittelwerten. Bemerkenswerte Temperaturänderungen wurden im Tiefenwasser der zentralen Ostsee beobachtet. Im Bornholm-

becken erfaßte der Temperaturanstieg, der im Herbst 1982 bereits im oberen Bereich der thermohalinen Sprungschicht eingesetzt hatte (13), auch das Bodenwasser, wobei Anfang Februar mit über 9 °C vorübergehend extrem hohe Werte gemessen wurden. Im weiteren Jahresverlauf sanken die Temperaturen stark ab, lagen im August aber immer noch um 1,7 K über den Werten des Vorjahres.

Im Bodenwasser des Gdansker Tiefs und des Gotlandtiefs wurde ebenfalls eine Temperaturzunahme festgestellt, die allerdings geringer als im Bornholmbecken war. Die Differenz zum Vorjahr betrug im Gdansker Tief und Gotlandtief vorübergehend mehr als 1,2 K bzw. 0,6 K. Im weiteren Jahresverlauf war dann jedoch eine Temperaturabnahme um 0,9 K bzw. 0,4 K zu verzeichnen, so daß im November kaum noch Differenzen zu den Temperaturen des Vorjahres auftraten. Im Tiefenwasser der anderen Ostseeregionen wurden keine nennenswerten Temperaturänderungen beobachtet.

Wie häufig in früheren Jahren (12), wurden im August im Westteil des Bornholmbeckens Intrusionen wärmeren Wassers aus dem Arkonabecken festgestellt. Ende Oktober hatte sich dieser Warmwasserzustrom weiter verstärkt.

3.2. Der Salzgehalt

Die Veränderungen des Salzgehalts in der zentralen Ostsee werden anhand von Abb. 3 erläutert. Im Winter und Frühjahr wurden in der Oberflächenschicht des Arkona-, Bornholm- und Gdansker Beckens relativ hohe Salzkonzentrationen gemessen. Mit 9,4 und 8,4 ‰ lagen sie Ende Januar, Anfang Februar im Arkona- und Bornholmbecken, um etwa 1 bzw. 0,8 ‰ über den von MATTHÄUS (4) berechneten jahreszeitlichen Mittelwerten. In den weiter östlich und nördlich gelegenen Ostseeregionen waren die Abweichungen geringer oder sogar schwach negativ.

Im weiteren Jahresverlauf verringerte sich die positive Salzgehaltsanomalie in der Oberflächenschicht auch in der Arkona- und Bornholmsee. Sie nahm hier jedoch im Oktober erneut zu.

Die starke vertikale Ausdehnung der homothermen Deckschicht, die im November in der nordöstlichen Gotlandsee (Stat. 27 A, 28 B) sowie im Finnischen Meerbusen nachgewiesen wurde, zeichnete sich auch im Salzgehalt ab (Abb. 3). Ähnlich wie bei der Temperatur herrschte bis in 100 m Tiefe Homohalie, die Salzgehaltsdifferenz zwischen der Meeresoberfläche und 103 m Tiefe war kleiner als 0,2 ‰. Im Finnischen Meerbusen fehlte die Salzgehaltssprungschicht vollständig.

Eine große Tiefenlage wies die haline Sprungschicht Anfang Februar auch im Gdansker Tief auf. Hohe Salzkonzentrationen, die an der Meeresoberfläche Werte zwischen 19 und 20,5 ‰ erreichten, wurden Ende Oktober vorübergehend westlich der Darßer Schwelle gemessen.

Nachhaltige Veränderungen im Salzgehalt des Tiefenwassers wurden in den westlichen Teilgebieten der Ostsee beobachtet. Nach der extrem niedrigen Konzentration von 14,43 ‰, die Ende Oktober 1982 im Bodenwasser des Bornholm-tiefs registriert wurde (13), lag der Salzgehalt zu Beginn des Jahres 1983 bei 17,6 ‰. Eine ähnlich starke Zunahme erfolgte auch im Bodenwasser des Gdansker Tiefs. Während der Salzgehalt hier Anfang Februar mit 10,2 ‰ noch extrem niedrig war, wurden im Mai bereits 12,3 ‰ festgestellt. Im Bornholmbecken ging der Salzgehalt im weiteren Jahresverlauf um 1 ‰, im Gdansker Tief um 0,8 ‰ zurück.

Ein geringfügiger Anstieg des Salzgehalts trat auch im Bodenwasser des Gotlandtiefs ein (Tab. 2). Während hier im Herbst des Vorjahres nur 12,5 ‰ gemessen wurden (13), waren es Anfang April 12,8 ‰. Anfang November war der Salzgehalt jedoch bereits wieder auf 12,6 ‰ abgesunken.

Im Bodenwasser des nördlichen und westlichen Gotlandbeckens war das Verhalten des Salzgehalts unübersichtlich. Außerdem war die Beprobung zu gering, um konkrete Aussagen machen zu können. Es scheint jedoch, daß im Bodenwasser des Norrköpping- und Karlsötiefs ein Anstieg des Salzgehalts um 0,4 bzw. sogar um 0,6 ‰ eingetreten ist.

Ende November wurden im Tiefenwasser des zentralen Arkonabeckens (Stat. 113) mit 17–18 ‰ keine extrem hohen Salzkonzentrationen gemessen. Gemäß Tab. 1 war auch im Gebiet des Fehmarnbelt's nur in der Oberflächenschicht eine positive Salzgehaltsanomalie vorhanden. Diese Verteilung, insbesondere die Normalwerte im Tiefenwasser, läßt nicht auf ungewöhnlich hohe Salzkonzentrationen im südlichen Kattegat schließen.

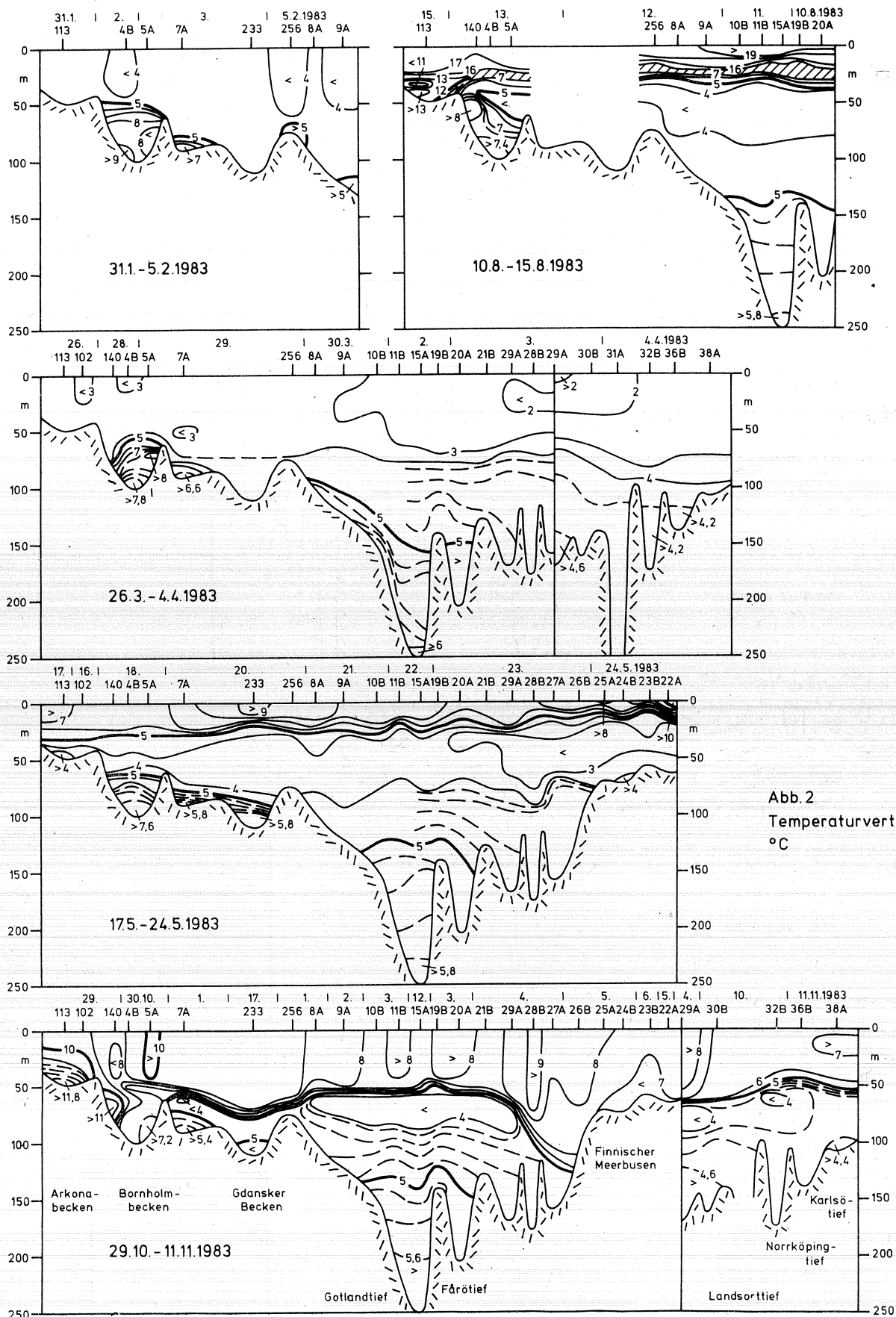


Abb. 2
Temperaturverteilung
°C

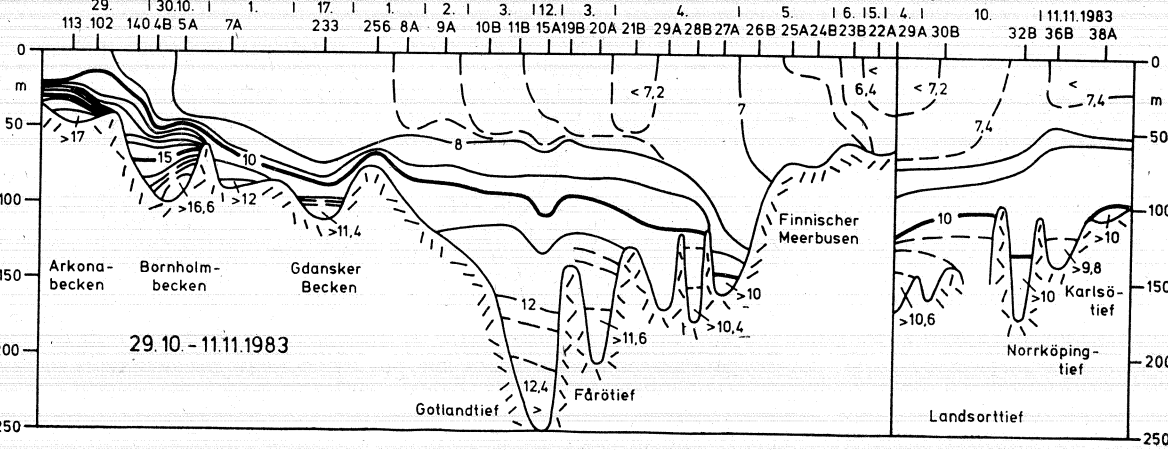
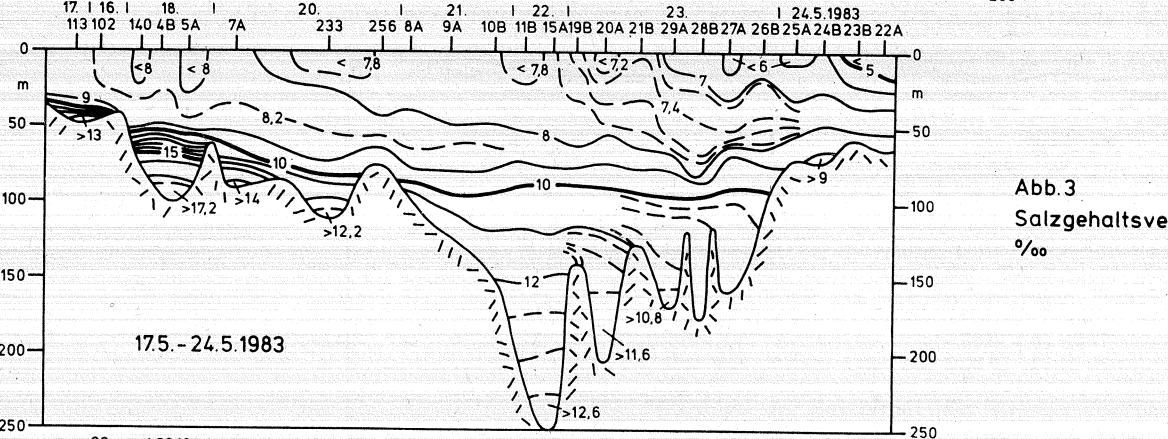
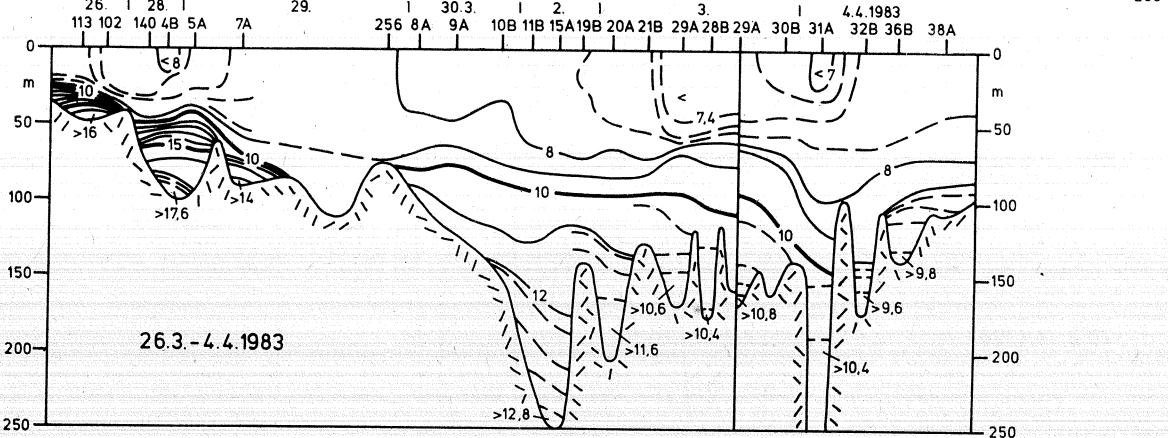
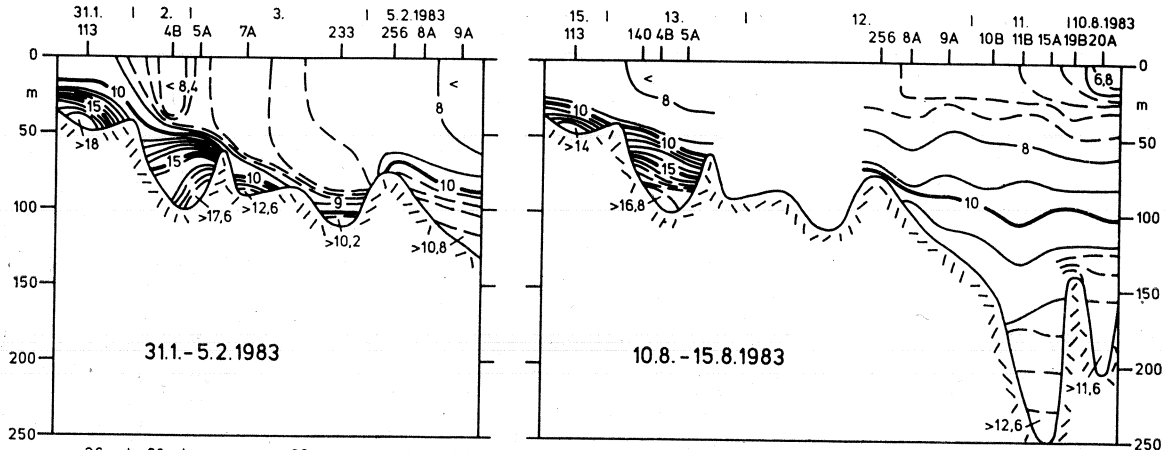


Abb. 3
Salzgehaltsverteilung
‰

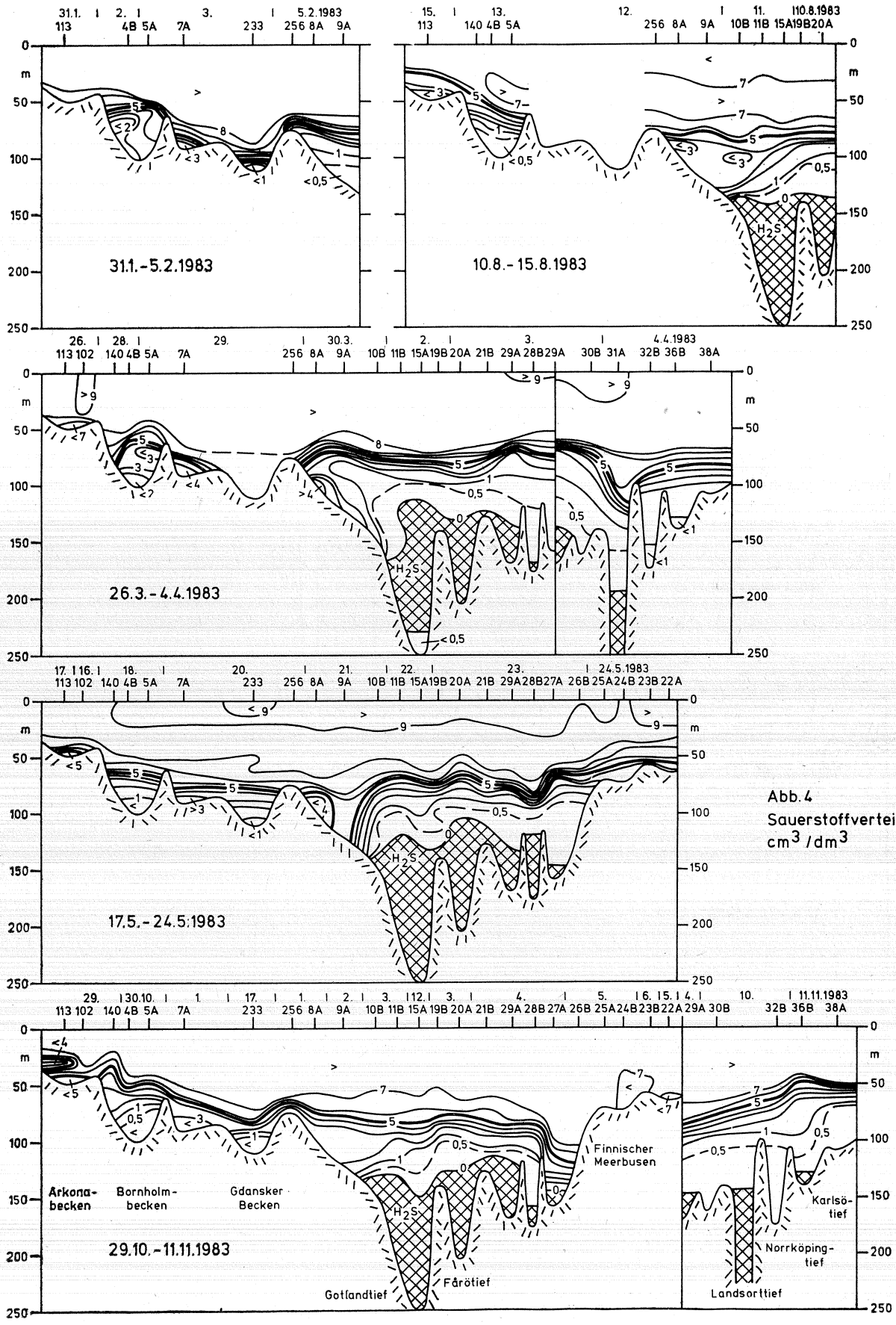


Abb. 4
Sauerstoffverteilung
cm³/dm³

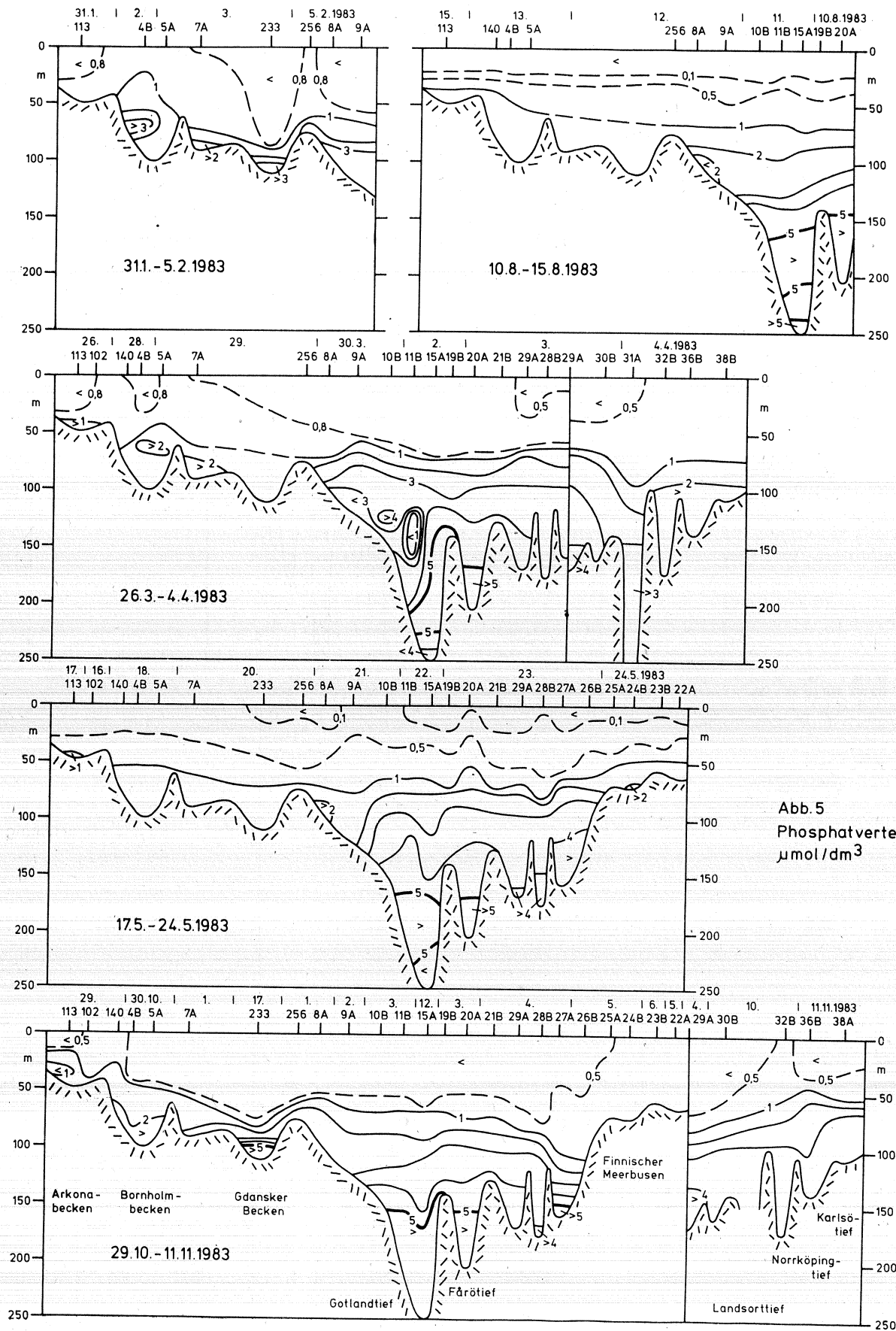


Abb. 5
Phosphatverteilung
 $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$

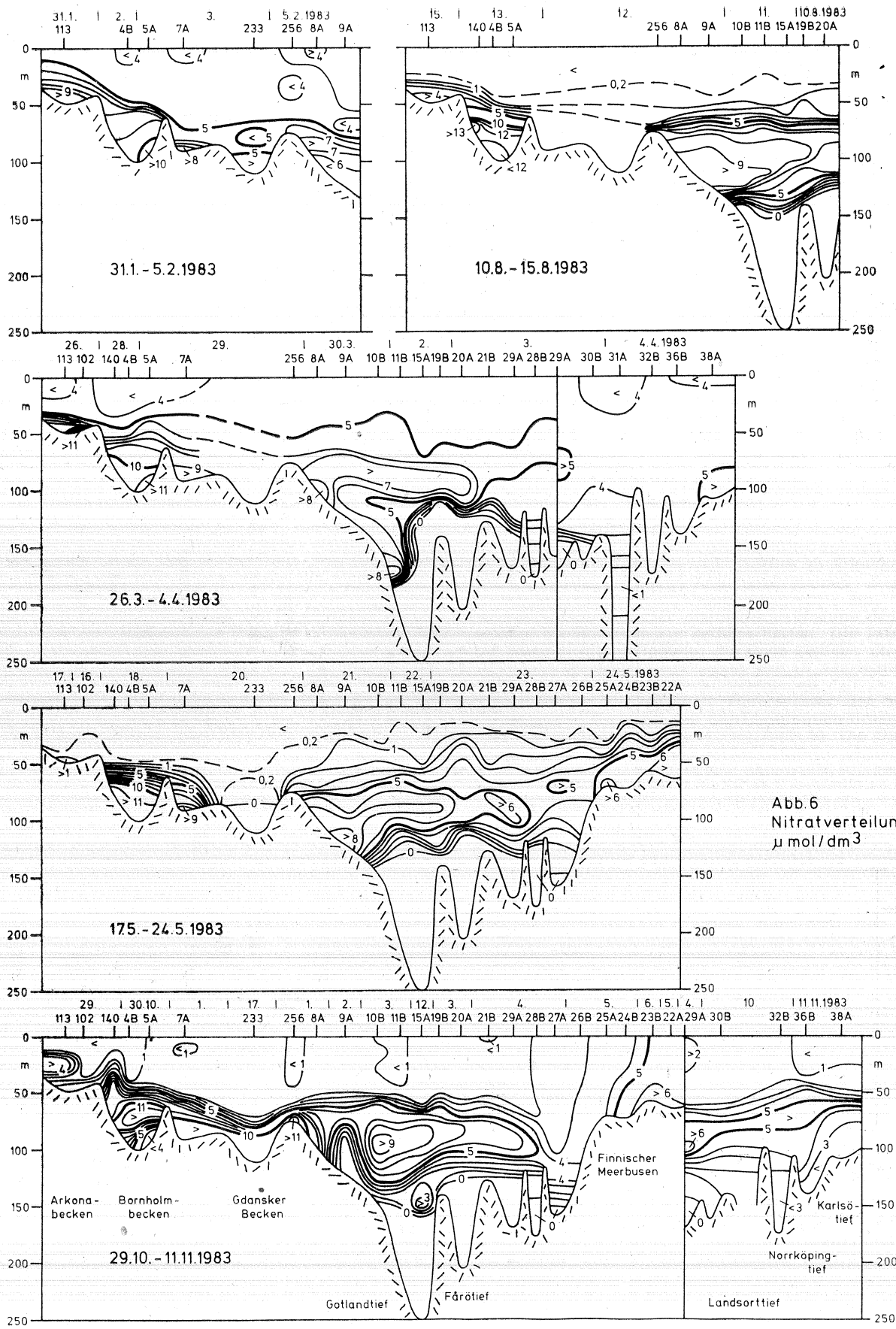


Abb. 6
Nitratverteilung
 $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$

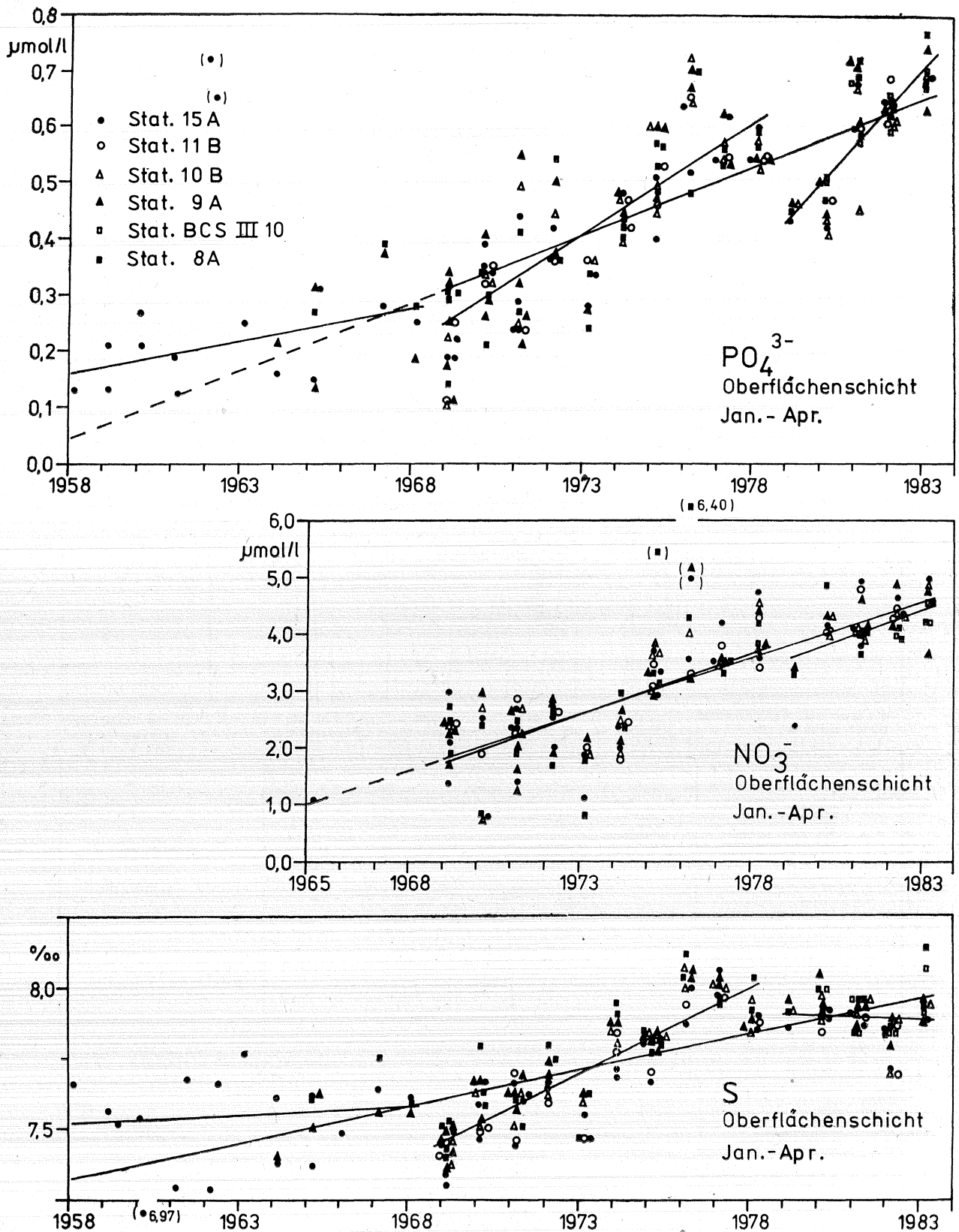


Abb. 7

Langzeitveränderungen der essentiellen Nährstoffe und des Salzgehalts in der winterlichen Oberflächenschicht der südöstlichen Ostsee

3.3. Sauerstoff und Schwefelwasserstoff

Die Sauerstoffkonzentrationen in der Oberflächenschicht, die vorrangig von der Wassertemperatur und dem Salzgehalt sowie der Massenentwicklung des Phytoplanktons im Frühjahr bestimmt werden, zeigten in der zentralen Ostsee die bekannten jahreszeitlichen Veränderungen (5), mit hohen Werten in der kalten und niedrigen in der

warmen Jahreszeit (Abb. 4). Das kalte Baltische Zwischenwasser war im August entsprechend seiner niedrigeren Temperatur durch ein intermediäres Sauerstoffmaximum gekennzeichnet. Die extreme Tiefenlage bzw. das Fehlen der thermohalinen Sprungschicht, die Anfang November in der nordöstlichen Gotlandsee und im Finnischen Meerbusen beobachtet wurden, spiegeln sich auch in tiefreichenden, hohen Sauerstoffkonzentrationen wider.

Tabelle 1

Novembermittelwerte (1949—1978) und aktuelle Salzkonzentrationen (‰) auf Station 010 im Fehmarnbelt

Tiefe m	Mittelwerte (nach 16)	Aktuelle Konz. 23. 11. 1983
0	15,21	18,41 (1 m)
5	15,49	18,42
10	16,54	18,44
15	17,69	18,80
20	19,01	19,13
25	20,45	20,52
28	20,82	20,58 (26 m)

Mit dem Anstieg des Salzgehalts im Tiefenwasser des Bornholmbeckens gingen die anoxischen Bedingungen, die im Vorjahr geherrscht hatten (13), in oxische über. Dabei stieg der Sauerstoffgehalt zu Jahresbeginn jedoch nur auf 3—4 cm³/dm³ an (Abb. 4). Im weiteren Jahresverlauf nahm er relativ schnell ab und betrug Ende Oktober nur noch 0,1 cm³/dm³. Drei Wochen später wurde im Bodenwasser des zentralen Bornholmbeckens jedoch ein erneuter Anstieg des Sauerstoffgehalts auf 1,3 cm³/dm³ festgestellt. Eine Besserung der Sauerstoffbedingungen trat auch im Gdansker Tief ein, wo im Vorjahr ebenfalls anoxische Bedingungen geherrscht hatten. Trotz der starken Zunahme des Salzgehalts stieg die Sauerstoffkonzentration in der grundnahen Wasserschicht jedoch nur auf 0,8 cm³/dm³ an und war Mitte November bereits wieder auf 0,1 cm³/dm³ abgesunken.

Im östlichen Gotlandbecken zeichnete sich der Einstrom sauerstoffreicher Wassermassen Ende März, Anfang April deutlich ab (Abb. 4). Er bewirkte im weiteren Jahresverlauf eine vertikale Verringerung der schwefelwasserstoffhaltigen Tiefenschicht (Tab. 2). Die anoxischen Bedingungen in Tiefenwasser blieben jedoch erhalten. Lediglich im Bodenwasser des Gotlandtiefs wurden Anfang April geringe Sauerstoffmengen festgestellt. Gemäß Tab. 2 war damit auch eine Abnahme der Schwefelwasserstoffkonzentration verbunden. Im weiteren Jahresverlauf erkennt man jedoch deutlich die erneute Konzentrationszunahme dieses Gases vom Boden her.

Relativ günstige Sauerstoffbedingungen wurden im Spätherbst auch im Bodenwasser des Norrköpping- und Karlstiefs beobachtet (Abb. 4), wo in dieser Jahreszeit zumeist anoxische Bedingungen herrschen. Hier wurden Sauerstoffkonzentrationen von 0,1 bis 0,2 cm³/dm³ registriert.

W. H. H. H. H.

3.4. Essentielle Nährstoffe

Die Verteilung der produktionsbegrenzenden Nährstoffe Phosphat und Nitrat ist in den Abb. 5 und 6 dargestellt. In der winterlichen Oberflächenschicht der zentralen Ostsee wurden auch 1983 erhebliche Anreicherungen dieser Nährstoffe beobachtet, die besonders deutlich beim Phosphat in Erscheinung traten. Insgesamt setzt sich der positive Trend der winterlichen Phosphat- und Nitratanreicherung (8) trotz zeitweilig gleichbleibender oder abnehmender Tendenz fort. Abb. 7 veranschaulicht dies für die südöstliche Gotlandsee. Ähnliche Trendentwicklungen wurden auch für die winterliche Oberflächenschicht der zentralen Arkona- und Bornholmsee ermittelt (10). Die Nährstofftrends in dieser Schicht waren eng mit dem Salzgehalt korreliert.

Anfang November wurden im Finnischen Meerbusen und im Übergangsgebiet zur nordöstlichen Gotlandsee Nährstoffkonzentrationen in der Oberflächenschicht registriert, die für die Jahreszeit extrem hoch waren. Die Phosphatkonzentrationen lagen zwischen 0,5 und 0,6 µmol/dm³, so daß die 0,5-µmol-Isolinie außerhalb des Finnischen Meerbusens die Meeresoberfläche erreichte (Abb. 5). Ähnliches gilt für die Nitratkonzentrationen, die Werte zwischen 3 und 5,5 µmol/dm³ aufwies und deren 3-µmol-Isolinie ebenfalls sehr weit westlich die Oberfläche berührte (Abb. 6). Diese Isolinien erreichen im Spätherbst normalerweise erst weit im Inneren des Finnischen Meerbusens die Meeresoberfläche (12, 13).

Hohe Phosphatkonzentrationen von 0,8—0,9 µmol/dm³ wurden im November auch an der Oberflächenschicht der Seegebiete westlich der Darßer Schwelle gemessen. Sie lagen bereits über den für dieses Gebiet üblichen Winterwerten (7). Die Nitratkonzentrationen waren dagegen mit 0,9—1,3 µmol/dm³ noch verhältnismäßig niedrig.

Mit der Verbesserung der Sauerstoffbedingungen stiegen die Nitratkonzentrationen im Tiefenwasser des Bornholmbeckens und Gdansker Tiefs stark an, während der Phosphatgehalt zurückging. Auch im östlichen Gotlandbecken

Tabelle 2

Sauerstoff- und Schwefelwasserstoffkonzentrationen sowie Salzgehalt im Tiefenwasser des Gotlandtiefs (Stat. 15 A)

Datum	Tiefe m	O ₂ cm ³ /dm ³	H ₂ S mg/dm ³	S ‰	
31. 10. 1982	215	—	1,98	12,44	
	239	—	3,57	12,52	
2. 4. 1983	101	0,50	—	10,21	
	111	0,19	—	10,51	
	127	—	0,96	11,79	
	154	—	0,97	11,79	
	179	—	1,37	12,17	
	203	—	1,21	12,33	
	229	—	0,76	12,60	
	246	0,14	—	12,85	
	22. 5. 1983	100	1,04	—	10,32
		109	0,89	—	10,65
125		0,07	—	11,09	
149		0,00	0,00	12,00	
174		—	0,55	12,26	
200		—	1,28	12,41	
224		—	0,64	12,56	
245		—	1,04	12,75	
11. 8. 1983		99	2,08	—	10,07
		109	1,37	—	10,52
	123	0,94	—	11,14	
	149	—	0,84	11,91	
	173	—	1,44	12,18	
	198	—	1,77	12,39	
	224	—	0,93	12,56	
	246	—	2,10	12,68	
	12. 11. 1983	100	2,28	—	9,64
		110	0,79	—	10,22
124		0,52	—	10,84	
149		0,15	—	11,55	
174		—	1,50	12,15	
199		—	1,63	12,34	
224		—	1,79	12,51	
237	—	1,94	12,56		

ist der Einstrom in die Zwischenschicht anhand der Veränderungen dieser Parameter deutlich zu erkennen.

Infolge geringer Sauerstoffkonzentrationen setzten im Bornholmbecken Denitrifikationsprozesse ein, die im Herbst bereits zu einer deutlichen Abnahme des Nitratgehalts im Bodenwasser geführt hatten. Die Intrusionen im Westteil dieses Beckens, die Ende Oktober ihre größte Intensität erreichten, zeichneten sich in der Nitratverteilung durch geringere Konzentrationen ab.

Trendanalysen im oxischen Tiefenwasser der zentralen Ostseebecken ergaben, daß die Phosphatanreicherung seit 1958 unvermindert andauert (vgl. auch 8). Die Nitratkonzentrationen nehmen dagegen seit 1979 im Mittel ab. Als Ursache sind die ungünstigen Sauerstoffbedingungen zu nennen, die seit diesem Jahr in den grundnahen Wasserschichten dominierten und zu einer verstärkten Denitrifikation führten. Die Langzeitveränderungen des Phosphats und Nitrats im 100-m-Horizont des Gotlandtiefs sind in Abb. 8 dargestellt. Ein ähnliches Verhalten zeigten diese beiden Nährstoffe auch im oxischen Tiefenwasser des Färö- und Landsorttiefs (10). Keine Langzeitrends konnten dagegen im Tiefenwasser des Bornholm- und Arkonabeckens nachgewiesen werden. Außerdem sind die bei früheren Untersuchungen (8) für das Gdansker Tief berechneten Nährstofftrends unsicher.

Die Phosphatkonzentrationen im schwefelwasserstoffhaltigen Tiefenwasser der zentralen Ostseebecken lagen 1983 zwischen 5 und 6 µmol/dm³ (Abb. 5). Sie erreichten damit für anoxische Bedingungen keine sehr hohen Beträge.

Ammonium- und Nitritstickstoff treten als Zwischenstufen des oxischen Stickstoffkreislaufs (9) nur im Spätherbst in Erscheinung, wenn diese beiden Verbindungen nach ihrer Mineralisierung wegen des unzureichenden Lichtangebots nicht mehr vollständig durch das Phytoplankton assimiliert werden können und die Nitrifikation noch nicht beendet ist. Folgerichtig wurden in dieser Jahreszeit mit bis zu 1,3 µmol Ammonium- und 0,5 µmol Nitritstickstoff pro Liter relativ hohe Konzentrationen in der Oberflächenschicht der zentralen Ostsee gemessen (vgl. auch 11). Unter anoxischen Bedingungen, unter denen eine Oxydation wegen des fehlenden Sauerstoffs nicht möglich ist, wird Ammoniumstickstoff angereichert, der teilweise beim biochemischen Abbau sedimentierender organischer Materialien entsteht, im überwiegenden Maße aber aus dem Sediment bzw. dessen Porenwasser ins anoxische Tiefenwasser gelangt. Die unter diesen Bedingungen im östlichen Gotlandbecken vorhandenen Ammoniumkonzentrationen erreichten daher mit 10—14 µmol/dm³ relativ hohe Beträge. Im nördlichen und westlichen Gotlandbecken wurden im anoxischen Tiefenwasser nur Werte von 3—4 µmol/dm³ gemessen.

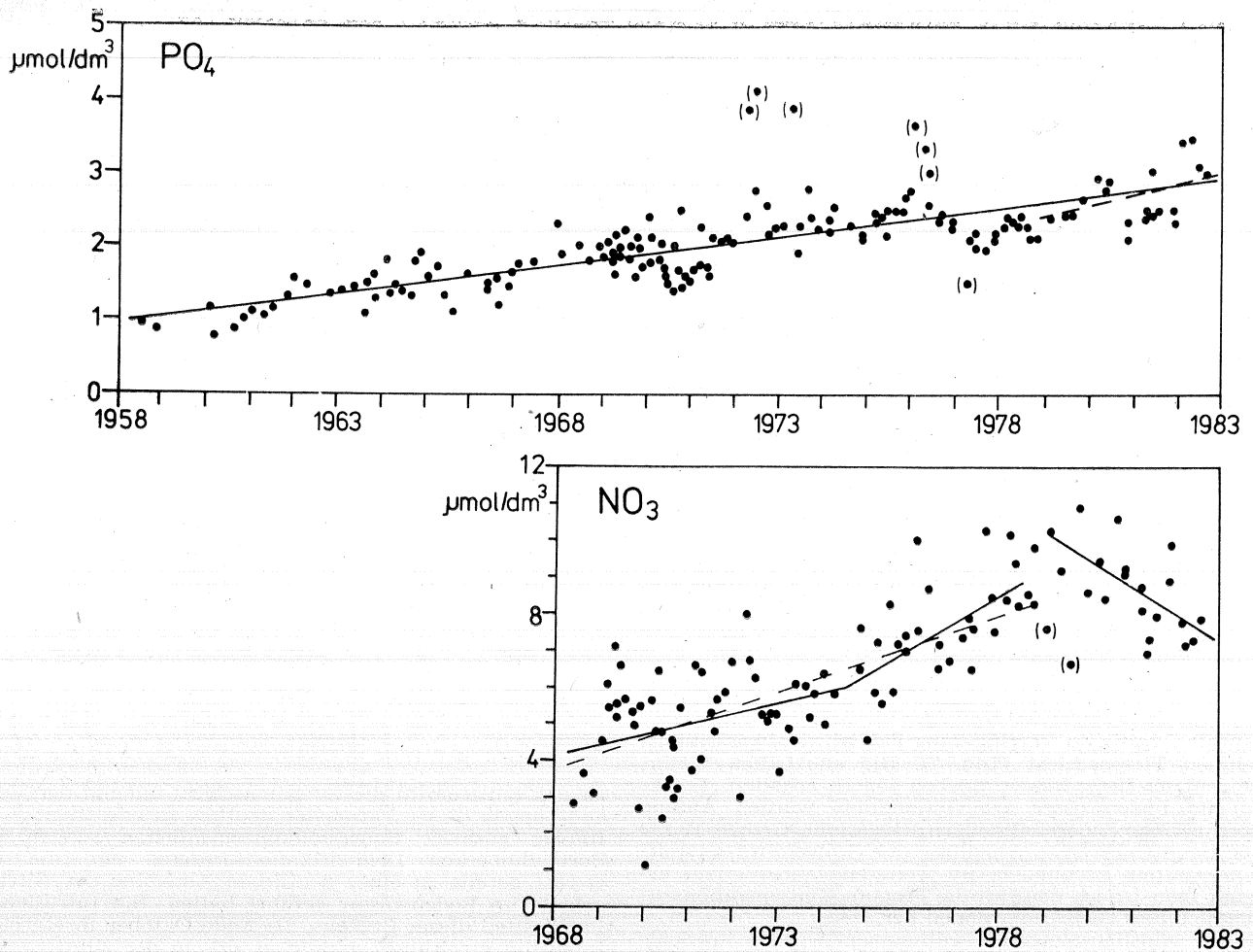


Abb. 8
Langzeitvariationen der Phosphat- und Nitratkonzentrationen im 100-m-Horizont des Gotlandtiefs (Stat. 15 A)

4. Diskussion

Die meteorologischen Bedingungen im Ostseeraum waren vom Herbst 1982 bis zum Herbst 1983 durch Lufttemperaturen gekennzeichnet, die teilweise erheblich über dem klimatologischen Mittelwert lagen. Das Temperaturregime in den oberflächennahen Wasserschichten der zentralen Ostsee war daher im Jahre 1983 bis zum Herbst durch eine positive Anomalie gekennzeichnet. Wegen des über Nordeuropa herrschenden milden Winters und Frühjahrs betrug die Abweichungen von den langjährigen Mittelwerten (2, 3) im März/April generell 1,5 bis 2 K. In dem nachfolgenden sehr strahlungsreichen Sommer wurden vor allem in den zentralen Teilen der Ostsee um 2,5 K zu hohe Temperaturen gemessen. In den westlichen Teilgebieten war die Anomalie geringer. Gleichzeitig wies die homotherme Deckschicht mit 15–17 m eine relativ große vertikale Ausdehnung auf. Als Ursache müssen die in der ersten Augushälfte vorherrschenden zyklonalen Wetterlagen angesehen werden, die mit starken bis stürmischen Winden einen hohen Energieeintrag in die Ostsee und damit eine verstärkte vertikale Durchmischung verursachten. Sie bewirkten, daß keine so extrem thermischen Bedingungen angetroffen wurden, wie in den vergleichbaren Sommern 1975 (6) und 1982 (13), die Deckschicht jedoch eine größere Mächtigkeit erreichte.

Die geringe winterliche Abkühlung war auch die Ursache dafür, daß das kalte Baltische Zwischenwasser im August eine positive Temperaturanomalie von 0,5–1 K aufwies. Im Tiefenwasser kam es vor allem im Bornholmbecken zu einem extremen Temperaturanstieg. Die Anfang Februar vorübergehend gemessenen Werte von über 9 °C lagen höher als die in den letzten 15 Jahren beobachteten (12, 13). Aber auch im Gdänsker Tief und im östlichen Gotlandbecken stiegen die Temperaturen im Bodenwasser an, ohne jedoch ein Ausmaß wie im Bornholmbecken zu erreichen. Damit bestätigte sich die Vorhersage, daß der Salzwassereintrich, der im Herbst 1982 beobachtet wurde,

infolge der noch relativ hohen Temperaturen des einströmenden Wassers zu einer Temperaturerhöhung im Tiefenwasser der zentralen Ostseebecken führen würde (1, 13). Eine weitere Folge dieses Salzwassereintrichs waren die relativ hohen Salzkonzentrationen, die im Winter und Frühjahr in der Oberflächenschicht des Arkona-, Bornholm- und Gdänsker Beckens gemessen wurden. Ende Januar, Anfang Februar lagen sie in den beiden zuerst genannten Becken um 1 bzw. 0,8 ‰ über den jahreszeitlichen Mittelwerten. Vergleichbar hohe Werte wurden nur 1976 (12), ebenfalls nach einem Salzwassereintrich, beobachtet. Im Tiefenwasser des Bornholm- und Gdänsker Beckens führte die Umschichtung zu einem deutlichen Anstieg des Salzgehalts.

Hinsichtlich des Sauerstoffs blieben die Auswirkungen des Salzwassereintrichs jedoch hinter den Erwartungen zurück, obgleich mit etwa 33 km³ (13) ebensoviel salz- und sauerstoffreiches Wasser die Darßer Schwelle passiert hatte wie bei früheren Salzwassereintrichen. Während im Bodenwasser des zentralen Arkonabeckens mit 6–7 cm³/dm³ im Herbst 1982, unmittelbar nach dem Salzwassereintrich, noch hohe Sauerstoffkonzentrationen gemessen wurden (1, 13), war der Anstieg in den zentralen Ostseebecken viel geringer. Die Gründe dafür scheinen komplexer Art zu sein. Da der Salzwassereintrich zu einer Jahreszeit erfolgte, in der die biologische Aktivität in den Übergangsgebieten zur Nordsee noch hoch ist, kann angenommen werden, daß das einfließende Wasser mit biochemisch leicht abbaubarem organischem Material belastet war. Auf seinem Weg in die zentralen Ostseebecken verarmte es daher bereits an Sauerstoff. Dieser Prozeß wurde durch die relativ hohen Temperaturen des einströmenden Wassers begünstigt. Hinzu kommen die erheblichen Schwefelwasserstoffkonzentrationen, die sich im Verlauf mehrerer Jahre im stagnierenden Tiefenwasser der zentralen Ostseebecken angereichert hatten, und für deren Oxydation ebenfalls größere Sauerstoffmengen erforderlich waren. Trotz der deutlichen Zunahme des Salzgehalts stie-

gen deshalb die Sauerstoffkonzentrationen im Tiefenwasser des Bornholm- und Gdankscher Beckens nur relativ wenig an. Im östlichen Gotlandbecken nahm die Schwefelwasserstoffkonzentration vorübergehend zwar ab, die anoxischen Bedingungen blieben jedoch in den grundnahen Wasserschichten erhalten.

Ein weiterer Grund scheint der extrem niedrige Salzgehalt zu sein, der im Vorjahr im Tiefenwasser des Bornholm- und Gdankscher Beckens gemessen wurde (13). Er begünstigte zwar die Erneuerung des Bodenwassers in diesen Becken. Das dabei verdrängte Tiefenwasser besaß jedoch nur eine relativ geringe Dichte und konnte deshalb nur teilweise in die grundnahe Wasserschicht des Gotlandtiefs vordringen. Zum überwiegenden Teil passierte es das östliche Gotlandbecken in intermediären Wasserschichten. Es hatte bereits im Herbst das westliche Gotlandbecken erreicht, wo im Norrköping- und Karlsöteief ein Anstieg des Salzgehalts im Bodenwasser festgestellt wurde. Im November war daher vor allem in den grundnahen Wasserschichten des östlichen Gotlandbeckens Schwefelwasserstoff vorhanden (Abb. 1), während im westlichen Gotlandbecken relativ günstige Sauerstoffbedingungen herrschten.

Bis Ende November waren keine Anzeichen dafür vorhanden, daß im Winter 1983/84 ein erneuter Salzwassereintritt erfolgt. Die salzreichen Wassermassen, die zwischenzeitlich westlich der Darßer Schwelle festgestellt wurden, reichten nicht aus, um zu einer nachhaltigen Erhöhung des Salzgehalts im Tiefenwasser des Arkonabeckens zu führen. Sie waren aber offensichtlich die Ursache dafür, daß Mitte November eine geringe Besserung der Sauerstoffbedingungen im Bodenwasser des zentralen Bornholmbekens eintrat, ohne daß der Salzgehalt nennenswert zunahm.

Die große Tiefenlage der thermohalinen Sprungschicht in der nordöstlichen Gotlandsee sowie ihr Fehlen im Finnischen Meerbusen waren offenbar die Folge tiefreichender vertikaler Vermischungsprozesse. Hierauf deuten vor allem die für die Jahreszeit sehr hohen Phosphat- und Nitratkonzentrationen an der Meeresoberfläche hin. Eine vergleichbare Extremsituation wurde in den letzten 15 Jahren nicht in dieser Region beobachtet (vgl. auch 12, 13). Die verstärkte Nährstoffzufuhr in die Oberflächenschicht kann ferner die Ursache der ausgeprägten Blaualgen-Herbstblüte (*Aphanizomenon flos-aquae*) sein, die im Finnischen Meerbusen festgestellt wurde.

Untersuchungen über die Langzeitveränderungen ergaben, daß Phosphat und Nitrat zunehmend im winterlichen Oberflächenwasser aller zentraler Ostseebecken angereichert werden (8). Dem statistisch hochsignifikanten Gesamttrend sind dabei Perioden mit gleichbleibender oder abnehmender Tendenz überlagert. Die enge Korrelation, die zwischen der Nährstoffanreicherung und der Salzgehaltszunahme besteht, zeigt, daß diese Eutrophierung nicht nur anthropogene Ursachen hat, sondern auch die Folge eines verstärkten vertikalen Austausches ist, durch den sowohl salz- als auch nährstoffreiches Tiefenwasser in die Oberflächenschicht gelangt.

Die hochsignifikante Phosphatanreicherung im oxischen Tiefenwasser, die vorrangig anthropogene Ursachen hat (8), dauerte im Gotland-, Färö- und Landsortteief ebenfalls unvermindert an (10). Nitrat zeigte dagegen seit 1979 parallel zu den sehr ungünstigen Sauerstoffbedingungen im Bodenwasser einen signifikant abnehmenden Trend. Offensichtlich regulieren Denitrifikationsprozesse das Budget dieses Nährstoffes in der Ostsee. Im Tiefenwasser des Gdankscher-, Bornholm- und Arkona-Beckens konnten keine statistisch gesicherten Nährstofftrends nachgewiesen werden. Die Gründe dafür sind im Arkonabecken ausgeprägte jahreszeitliche Veränderungen (7) und in den beiden anderen Regionen das relativ häufige Auftreten von Schwefelwasserstoff bis in den Bereich der thermohalinen Sprungschicht. Diese Prozesse beeinflussen die Nährstoffverteilung nachhaltig und maskieren dadurch die Langzeitveränderungen.

Die signifikant zunehmenden Konzentrationen der produktionsbegrenzenden Nährstoffe zeigen, daß die Eutrophierung der zentralen Ostsee unvermindert andauert. Dieser zunächst günstig erscheinenden Entwicklung, von der wahrscheinlich die gesamte Nahrungskette bis hin zum Fisch erfaßt wird (vgl. auch 15), steht jedoch eine verstärkte Belastung des Sauerstoffhaushalts gegenüber, weil im Tiefenwasser zunehmende Mengen toten organischen Materials biochemisch abgebaut werden müssen. Der dabei verbrauchte Sauerstoff kann nur unzureichend durch advective Zufuhr und vertikalen Austausch ersetzt werden, da untermeerische Schwellen und die permanente thermohaline Sprungschicht die horizontalen und vertikalen Austauschprozesse stark einschränken. Im Tiefenwasser der zentralen Ostseebecken ist daher mit dem verstärkten Auftreten von Schwefelwasserstoff und der weiteren Einschränkung des Lebensraumes, der den Fischen und anderen aeroben Organismen zur Verfügung steht, zu rechnen.

Literatur

- FRANCKE, E., NEHRING, D.: The salt water influx in autumn 1982 and in winter 1982/83 - the beginning of a renewed change in the marine environment of the Baltic Sea in 1983. *Proceed. Intern. Symp. „Ecological investigations of the Baltic Sea environment“*, March 16-20, 1983, Riga, UdSSR, im Druck.
- LENZ, W.: Monatskarten der Temperatur der Ostsee, dargestellt für verschiedene Tiefenhorizonte. *Dt. Hydrogr. Z., Erg.-H. 1971, Reihe B, Nr. 11, 1-148.*
- MATTHÄUS, W.: Zur mittleren jahreszeitlichen Veränderlichkeit der Temperatur in der offenen Ostsee. *Beitr. Meeresk. H. 40 (1977), 117-155.*
- MATTHÄUS, W.: Zur mittleren jahreszeitlichen Veränderlichkeit des Oberflächensalzgehaltes der Ostsee. *Gerlands Beitr. Geophysik 87 (1978), 369-376.*
- MATTHÄUS, W.: Zur mittleren jahreszeitlichen Veränderung im Sauerstoffgehalt der offenen Ostsee. *Beitr. Meeresk. H. 41 (1978), 61-94.*
- MATTHÄUS, W., STURM, M., FRANCKE, E.: Einige Aspekte des thermischen Regimes der Ostsee im Sommer 1975 am Beispiel der Bornholmsee. *Z. Meteorol. H. 26 (1976), 360-372.*
- NEHRING, D.: Hydrographisch-chemische Untersuchungen in der Ostsee von 1969-1978. II. Die chemischen Bedingungen und ihre Veränderungen unter besonderer Berücksichtigung des Nährstoffregimes. *Geod. Geoph. Veröff. R. IV, H. 35 (1981), 39-137.*
- NEHRING, D.: Langzeitrends des Phosphat- und Nitratgehalts in der Ostsee. *Beitr. Meeresk. H. 47 (1982), 61-86.*
- NEHRING, D.: On the denitrification in stagnant Baltic deep waters. *Proceed. XIII Conf. Baltic Oceanographers 1982, 567-573.*
- NEHRING, D.: The further development of the nutrient situation in the Baltic Proper. *Ophelia, 1984, im Druck.*
- NEHRING, D., FRANCKE, E.: Hydrographisch-chemische Veränderungen in der Ostsee im Jahre 1978. *Fischerei-Forsch. 18 (1980), 61-70.*
- NEHRING, D., FRANCKE, E.: Hydrographisch-chemische Untersuchungen in der Ostsee von 1969-1978. I. Die hydrographischen Bedingungen und ihre Veränderungen. *Geod. Geoph. Veröff. R. IV, H. 35 (1981), 5-38.*
- NEHRING, D., FRANCKE, E.: Die hydrographisch-chemischen Bedingungen in der Ostsee im Jahre 1981. *Fischerei-Forsch. 21 (1983), 45-55.*
- NEHRING, D., FRANCKE, E.: Die hydrographisch-chemischen Bedingungen in der Ostsee im Jahre 1982. *Fischerei-Forsch. 21 (1983), 56-65.*
- NEHRING, D., SCHULZ, S., KAISER, W.: Long-term phosphate and nitrate trends in the Baltic Proper and some biological consequences: A contribution to the eutrophication discussion concerning these waters. *Rapp. P. v. Reun. Cons. int. Explor. Mer 181 (1983), 190-200.*
- REICHEL, U.: Mittlere monatliche Temperatur- und Salzgehaltswerte im Gebiet des Fehmarnbelt. Untersuchungen auf der Grundlage von Feuerschiffbeobachtungen 1949-1978. *Inst. Meeresk., 1980, unveröff.*
- Monatlicher Witterungsbericht für das Gebiet der Deutschen Demokratischen Republik. Beilage zum Täglichen Wetterbericht. *Hrsg. Meteorol. Dienst der DDR, HA für Klimatologie Potsdam, 1983.*
- Die Großwetterlagen Europas. D. 617 OE. *Amtsblatt des Dtsch. Wetterdienstes. Offenbach (Main), 1983.*