

# Die hydrographisch-chemischen Bedingungen in der westlichen und zentralen Ostsee im Jahre 1986

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

Die Temperaturen im Oberflächenwasser der Ostsee waren 1986 durch negative Anomalien im Winter und positive im Sommer gekennzeichnet. Im Bornholmbecken wurden erstmalig während des Winters anoxische Bedingungen festgestellt. Der Einstrom salzreicheren Wassers, der nicht das Ausmaß eines Salzwassereintruchs erreichte, führte jedoch im späten Frühjahr zu einem Anstieg des Salz- und Sauerstoffgehalts im Tiefenwasser dieses Beckens. Im östlichen Gotlandbecken dauerte die Stagnationsperiode an. Die sich verschlechternden Sauerstoffbedingungen und die vorübergehende Bildung von Schwefelwasserstoff im Tiefenwasser der Lübecker Bucht deuten ebenso wie die verstärkte Nährstoffakkumulation im Winter auf die rasante Eutrophierung der westlichen Ostsee hin. Die 1986 beobachteten ozeanologischen Veränderungen in der Ostsee werden unter fischereilichen Aspekten diskutiert.

В 1986 году поверхностные температуры в Балтике были охарактеризованы отрицательными аномалиями зимой и положительными летом. В первый раз наблюдали даже зимой в Борнхольмском бассейне анаэробные условия. Вторжение солёной воды, которое не имело высокую интенсивность, вызвало весной повышение солёности и концентрации кислорода в этом бассейне. В восточном Готландском бассейне период стагнации продолжался. Концентрации биогенных микроэлементов достигли высоких величин зимой особенно в Белтах.

## 1. Einleitung

Als Beitrag zur Sicherung eines jährlichen Dauerfangertrages von 70 kt durch die Ostseefischerei der DDR sowie zum Nachweis saisonaler und zwischenjährlicher Anomalien und Langzeitvariationen wurden auch 1986 ozeanologische Messungen in der Ostsee durchgeführt. Diese Untersuchungen erfolgten auf fünf planmäßigen Terminfahrten, mit denen das 1969 begonnene Observatoriumsprogramm fortgesetzt wurde<sup>\*)</sup>. Eine zusätzliche Reise wurde operativ angesetzt aufgrund von Informationen des Schwedischen Meteorologischen und Hydrologischen Instituts (SMHI) und des ICES über den Einstrom salzreichen Wassers durch den Sund im Dezember 1986.

Die Untersuchungen umfaßten im Februar und August die Seegebiete zwischen Fehmarnbelt (Stat. 010) und Gotlandtief (Stat. 15A bzw. 19B). Im März konnten wegen teilweiser Vereisung der westlichen Ostsee nur die Stationen zwischen der Ansteuerung Warnemünde (Stat. 041) und dem Gotlandtief bearbeitet werden. Während der Termin-

fahrt im April-Mai wurden die Seegebiete zwischen Fehmarnbelt und Finnischem Meerbusen (Stat. 22A) untersucht. Im Oktober-November kamen darüber hinaus noch Stationen im südlichen Kattegat (Stat. 350–352) hinzu. Die zusätzlichen Messungen im Dezember betrafen vorrangig das Arkona- und Bornholmbecken.

Die Terminfahrt im April-Mai wurde vom 20. 4.–8. 5. 1986 durch das internationale Patchiness Experiment PEX '86 unterbrochen, das der Erforschung von Inhomogenitäten diente. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden zu einem späteren Zeitpunkt publiziert.

Abbildung 1 zeigt die nationalen und internationalen Standardstationen, die bei der Auswertung verwendet wurden. Die Gewinnung der Wasserproben erfolgte durch die Tiefseesonde OM 75 /7/, die auch die Temperaturwerte lieferte. Die gemäß ROHDE und NEHRING /15/ analysierten Standardparameter sind der Salzgehalt, die Sauerstoff- und Schwefelwasserstoffkonzentrationen sowie die Nährstoffe Phosphat, Nitrat, Nitrit und Ammonium. Dieses Meßprogramm wurde durch meteorologische Beobachtungen sowie durch biologische Untersuchungen, die gesondert ausgewertet werden, ergänzt.

<sup>\*)</sup> Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden kontinuierlich in der Zeitschrift Fischerei-Forschung publiziert.

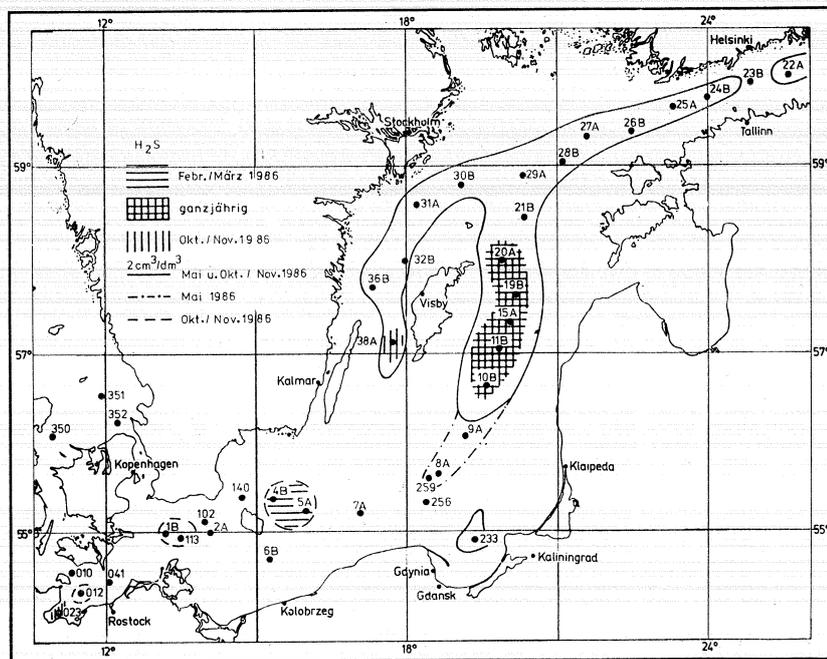


Abb. 1  
 Stationskarte und Gebiete mit Sauerstoffmangel und Schwefelwasserstoff  
 in der grundnahen Wasserschicht

## 2. Die meteorologischen Bedingungen

Im Vergleich zu den mittleren Bedingungen war der Winter 1985/86 über Nordeuropa zu kalt. Untersuchungen des Schwedischen Meteorologischen und Hydrologischen Instituts zeigen, daß bereits im November und Dezember 1985 an den Stationen der schwedischen Ostseeküste Lufttemperaturen auftraten, deren 5tägige Mittel bis zu 5 K, im Bottnischen Meerbusen sogar bis zu 10 K, unter den Normalwerten lagen /21/.

Im Januar 1986 betrug die negativen Anomalien der Lufttemperatur der monatlichen Mittelwerte für das Gebiet der Ostsee -1 bis -5 K, im Februar -4 K /20/. Die für die Beurteilung der DDR-Seegewässer günstig gelegene Küstenstation Arkona meldete für Januar +0,1 und für Februar -3,2 K /19/. Die entsprechenden Werte für Warnemünde waren -0,2 bzw. -4,8 K. Ursache des zu kalten Winters waren eine starke zyklonale Tätigkeit über Nordeuropa, verbunden mit dem Zustrom polarer Luftmassen aus dem Nordatlantik.

Nach einem nahezu normalen März traten im April 1986 nochmals Abweichungen der Lufttemperatur von -1 bis -2 K auf. Diese wurden nicht nur durch die Advektion kalter Luftmassen, sondern auch durch ein sehr geringes Strahlungsangebot verursacht. Für die DDR-Küstenstationen wurden nur 50-70 % der mittleren Sonnenscheindauer gemessen /19/. Damit waren die Voraussetzung für die Frühjahrserwärmung der Ostsee relativ ungünstig. Aus schwedischen Untersuchungen geht hervor /21/, daß ähnliche Bedingungen auch für andere Ostseestationen galten.

Erst im Mai wurden 110 % der normalen Sonnenscheindauer durch vorwiegend antizyklonale Wetterlagen in der ersten Monatshälfte und die Zuführung warmer Luftmassen durch eine anhaltende Südwestlage im weiteren Verlauf erreicht. Damit verbunden trat eine rasche Erwärmung der Luftmassen über der Ostsee mit positiven Anomalien von durchschnittlich 2 K auf. Diese Tendenz verstärkte sich im Juni mit 120 % des normalen Strahlungsangebots und bis +3 K Abweichung der mittleren Lufttemperatur, während im Juli wieder nahezu die Normalwerte erreicht wurden. August und September waren mit -1 bis -3 K zu kalt. In den letzten drei Monaten des Jahres 1986 waren die Lufttemperaturen insgesamt erhöht, wobei im November sogar Abweichungen um +2 K auftraten. Die langanhaltende Schönwetterperiode im Spätherbst mit antizyklonalen bzw. Süd- und Südwestwetterlagen bewirkte wiederum den Zustrom warmer Luftmassen in den Ostseeraum bzw. eine hohe Sonnenscheindauer von 120 % des Normalwertes /19/ in der südlichen Ostsee.

## 3. Die hydrographisch-chemischen Bedingungen

In Übereinstimmung mit den früheren Auswertungen 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 durch dynamische und chemisch-biologische Prozesse verursachten Variabilitäten und Inhomogenitäten.

### 3.1. Die Wassertemperaturen

Die Auswirkungen des 1985/86 über Nordeuropa herrschenden strengen Winters spiegeln sich deutlich in den niedrigen Wassertemperaturen der Ostsee wider. Im Fehmarnbelt (Stat. 010) betrug die negative Temperaturanomalie im Februar 1986 rund 1,6 K, wenn das Mittel der Feuerschiffsbeobachtungen der Jahre 1949-1978 /14/ zugrunde gelegt wird. Im März ist nur der Vergleich mit den Feuerschiffsbeobachtungen Gedser Rev 1931 bis 1960 /18/ möglich, weil die weiter westlich gelegenen Teilgebiete der Ostsee infolge Eisbedeckung nicht zugänglich waren. Bei Wassertemperaturen von -0,3 °C betrug die negative Abweichung vom Erwartungswert 1,7 K. Sie hatte damit nahezu den durch die Gefrieretemperatur des Wassers begrenzten Höchstwert erreicht.

Wie Abb. 2 zeigt, wurden Minusgrade im Wasser nicht nur in der westlichen Ostsee gemessen, sondern im März auch im Arkonabecken (bis -0,3 °C) und im Bornholmbecken (bis -0,2 °C) beobachtet. Im östlichen Gotlandbecken wurden in dieser Jahreszeit Temperaturen von 0,2-0,7 °C in der Oberflächenschicht registriert. Im Vergleich zu den von MATTHÄUS /5/ berechneten mittleren Bedingungen resultieren daraus negative Temperaturanomalien zwischen 0,8 und 1,8 K, die im Gotlandtief die geringsten Abweichungen vom Erwartungswert zeigten. Da

im baltischen Zwischenwasser der zentralen Ostsee die Wintertemperaturen konserviert sind, herrschten 1986 auch in dieser Schicht negative Temperaturanomalien, die im August über 2 K im Bornholmbecken und bei 1 K im östlichen Gotlandbecken lagen.

Die sommerliche Erwärmung der Deckschicht (Abb. 2) war örtlich durch positive Temperaturanomalien gekennzeichnet, die Abweichungen bis zu 1,5 K erreichten, im allgemeinen jedoch deutlich geringer waren. Im Oktober-November sowie im Dezember lagen die Temperaturen in der Oberflächenschicht ebenfalls über dem jahreszeitlichen Erwartungswert.

Im Tiefenwasser der zentralen Ostseebecken waren die zeitlichen Temperaturveränderungen gering (Abb. 2). Ausnahmen bildeten das Arkonabecken, das die bekannten jahreszeitlichen Variationen zeigte /4/, sowie das Bornholmbecken, in dem im April der Zustrom relativ kalter und ab August wärmerer Wassermassen, sogenannter Intrusionen, festgestellt wurde.

### 3.2. Der Salzgehalt

Im Gebiet des Fehmarnbelts (Stat. 010) betrug der Salzgehalt im Februar 1986 nur 9,2 ‰ an der Oberfläche und 17,2 ‰ in der grundnahen Wasserschicht. Im Vergleich mit den jahreszeitlichen Mittelwerten /14/ resultiert daraus eine negative Salzgehaltsanomalie von 4,4 ‰ in der Deckschicht und 3 ‰ in der Tiefe.

Der Salzgehalt in der Oberflächenschicht der zentralen Ostseebecken (Abb. 3) wich ganzjährig nur wenig von den von MATTHÄUS /6/ angegebenen langjährigen Mittelwerten ab. In der grundnahen Wasserschicht des Arkonabeckens wurden sehr starke Salzgehaltsschwankungen mit Beträgen bis zu 11 ‰ registriert. Im März und im August wurden Konzentrationen über 21 ‰ gemessen. Ähnlich hohe Werte, die jedoch eindeutig auf das westliche und südliche Becken beschränkt waren, wurden auch im Dezember registriert. Der mit 11,2 ‰ niedrigste Salzgehalt trat im Februar auf.

Der Einstrom salzreicherer Wassermassen in die Ostsee führte im April und August zu einer teilweisen Erneuerung des Tiefenwassers im Bornholmbecken, wobei der Salzgehalt um 1,7 ‰ anstieg.

Die über das Bornholmbecken hinaus reichenden Auswirkungen dieses Einstroms waren gering. Aus dem Bornholmbecken verdrängtes Wasser ist möglicherweise die Ursache für die Salzgehaltsschwankungen von 1,4 ‰, die 1986 in der grundnahen Wasserschicht des Gdańsker Tiefs beobachtet wurden. Bemerkenswert sind die relativ niedrigen Salzkonzentrationen auf dieser Station zu Jahresbeginn.

Der Salzgehalt im Bodenwasser des östlichen Gotlandbeckens war durch eine weiter abnehmende Tendenz gekennzeichnet. Während er 1985 im Gotlandtief in 235 m Tiefe noch ganzjährig über 12,2 ‰ lag /13/, wurden Anfang 1986 nur noch 12,12 ‰ gemessen.

Die Salzkonzentrationen, die Ende November im südlichen Kattegat sowie im Fehmarnbelt registriert wurden, sind in Tab. 1 zusammengefaßt. Die Stationen 350 und 010 sind nahezu identisch mit den Positionen der ehemaligen Feuerschiffe „Kattegat SW“ und „Fehmarnbelt“. Der Vergleich der jahreszeitlichen Mittelwerte des Salzgehalts mit den aktuellen Konzentrationen zeigt, daß im Eingang zum Großen Belt eine positive Anomalie von rund 4 ‰ in der Oberflächenschicht vorhanden war. Im Tiefenwasser lagen die Werte dagegen um 1-2 ‰ unter dem jahreszeitlichen Erwartungswert.

Tabelle 1

Aktuelle Salzkonzentrationen im südlichen Kattegat und im Fehmarnbelt sowie Novembermittelwerte des Salzgehalts bei den Feuerschiffen „Kattegat SW“ (1931-1960) und „Fehmarnbelt“ (1949-1978) in Promille

| Tiefe m | „Kattegat SW“ (17) | 350                   | 351    | 352    | 010    | „Fehmarnbelt“ (14) |
|---------|--------------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------------------|
|         |                    | 21.-23. November 1986 |        |        |        |                    |
| 0-1     | 19,8               | 24,5                  | 24,6   | 14,9   | 14,1   | 15,2               |
| 5       | 20,3               | 24,5                  | 24,6   | 14,9   | 14,5   | 15,5               |
| 10      | 22,1               | 24,5                  | 24,6   | 16,7   | 15,8   | 16,5               |
| 15      | 26,4               | 24,6                  | 24,6   | 28,1   | 15,9   | 17,7               |
| 20      | 29,3               | 27,0                  | —      | 31,2   | 16,1   | 19,0               |
| G *)    | 31,0               | 30,4                  | 31,7   | 31,5   | 25,4   | 20,8               |
|         | (30 m)             | (25 m)                | (31 m) | (21 m) | (26 m) | (28 m)             |

\*) Grundnähe

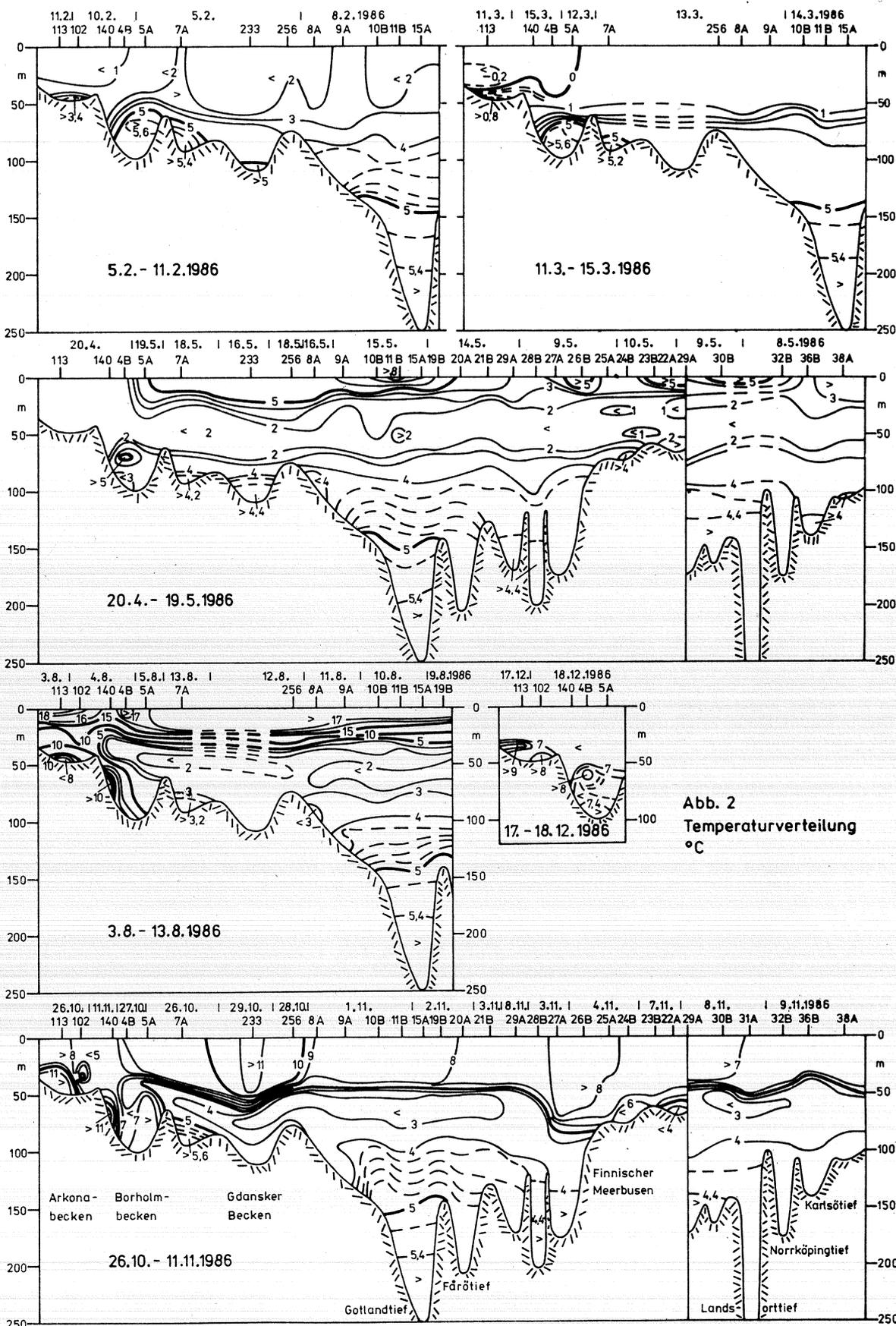


Abb. 2  
Temperaturverteilung  
°C

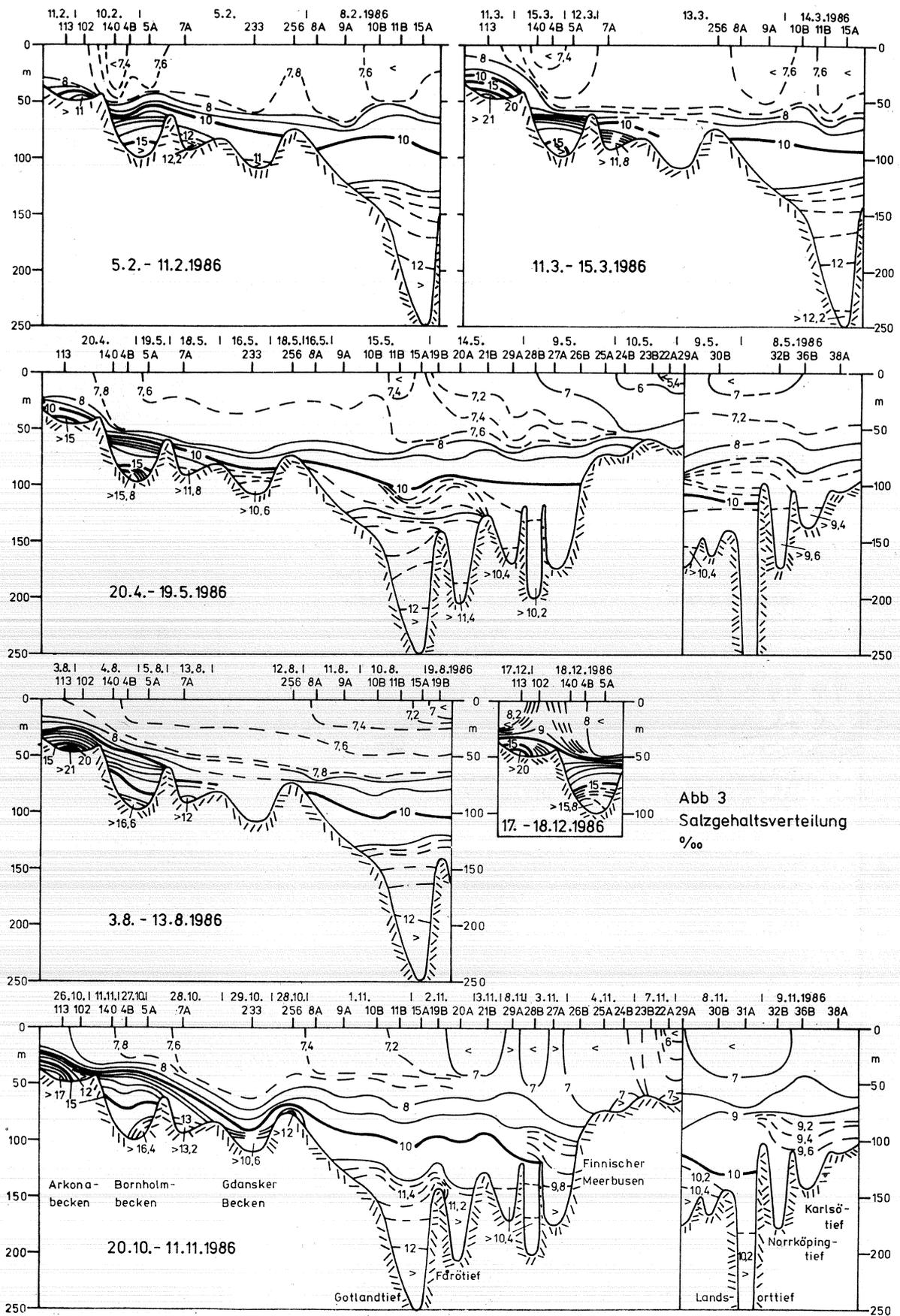


Abb 3  
 Salzgehaltsverteilung  
 ‰

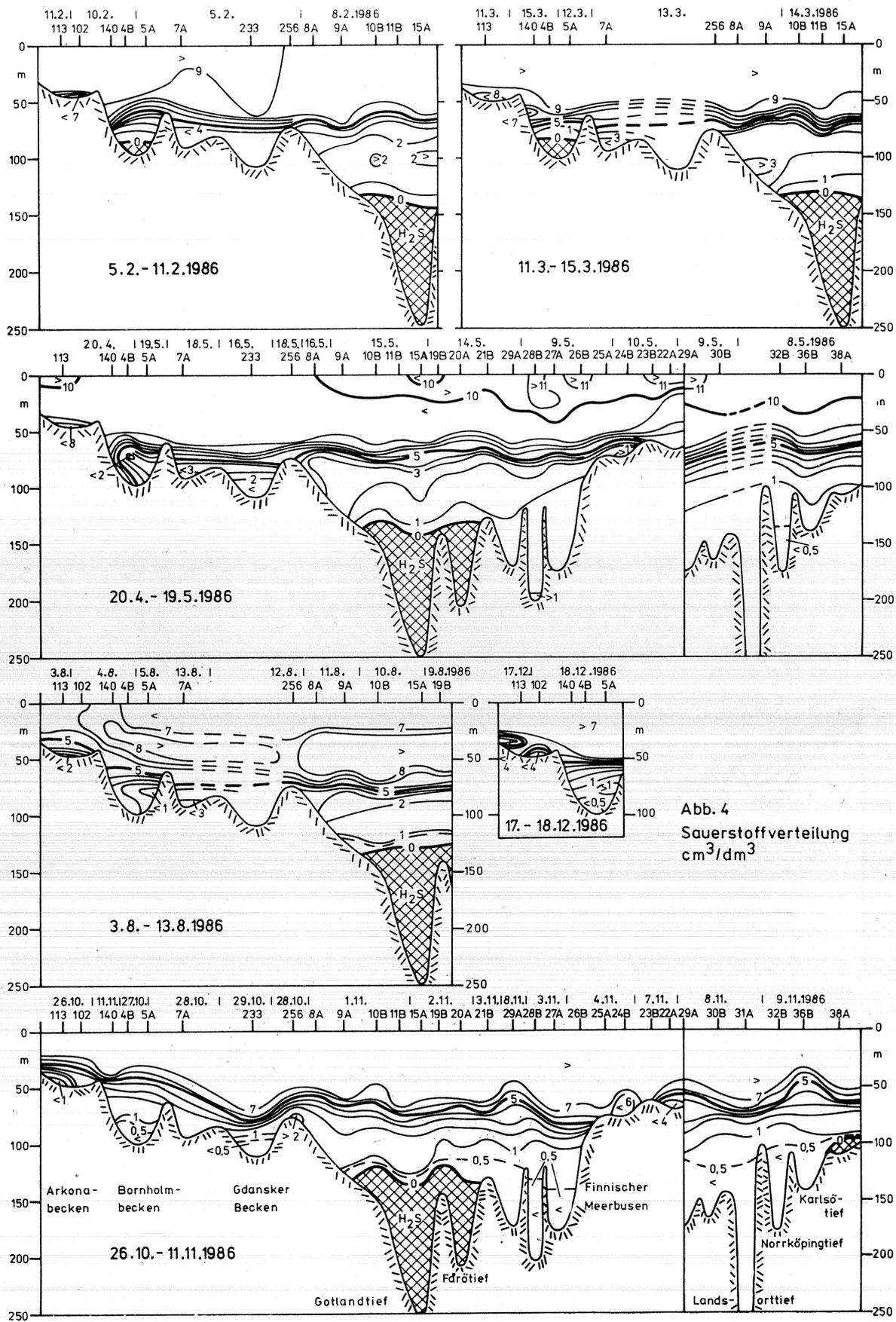


Abb. 4  
 Sauerstoffverteilung  
 $\text{cm}^3/\text{dm}^3$

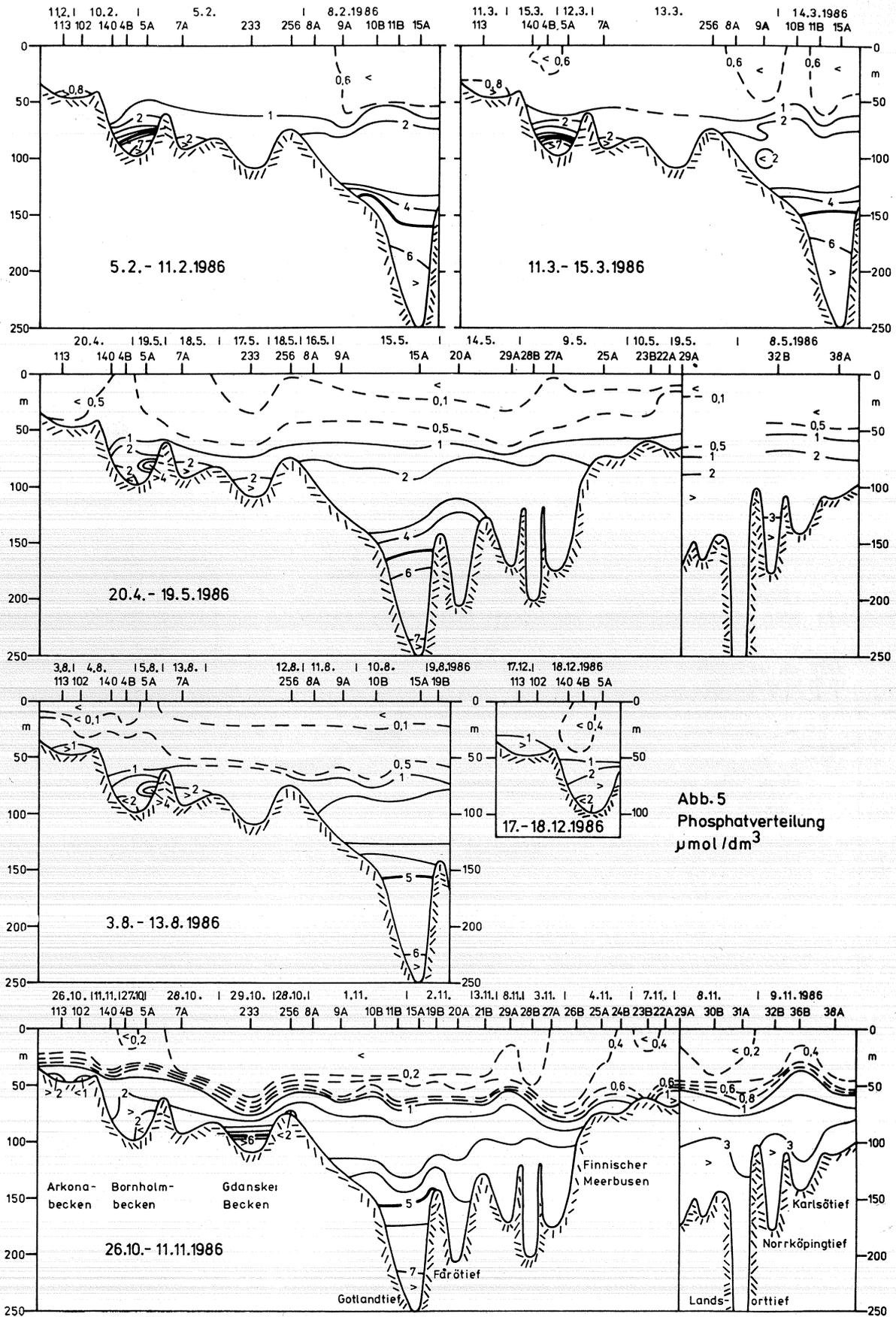


Abb. 5  
Phosphatverteilung  
 $\mu\text{mol/dm}^3$

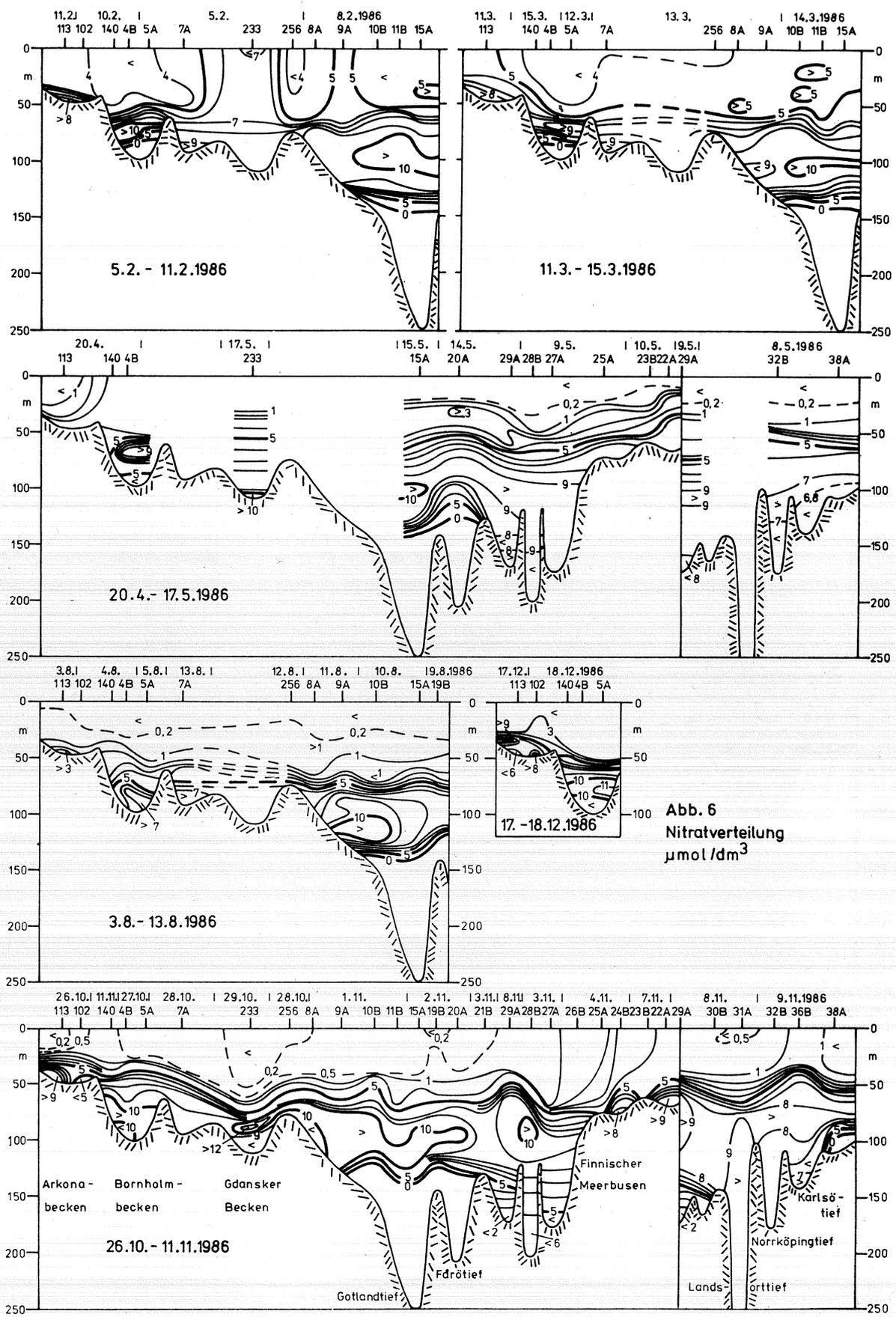


Abb. 6  
Nitratverteilung  
 $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$

Im Fehmarnbelt herrschte eine negative Anomalie vor (Tab. 1), die von 1 ‰ an der Oberfläche auf 3 ‰ in 20 m Tiefe zunahm. Lediglich im grundnahen Bereich war sehr salzreiches Wasser vorhanden. Diese Verteilung zeigt, daß nur geringe Mengen salzreichen Kattegatwassers den Fehmarnbelt passierten.

### 3.3. Sauerstoff und Schwefelwasserstoff

Der Sauerstoffgehalt in der Oberflächenschicht wird durch die Jahresgänge der Temperatur, des Salzgehalts und der Phytoplanktonentwicklung sowie von Zehrungsprozessen beim biochemischen Abbau von organischer Substanz bestimmt. Er steht darüber hinaus mit den Gasen der Luft im Gleichgewicht. Da sich der Austausch mit der Atmosphäre relativ langsam vollzieht, kommt es im Frühjahr mit der Erwärmung des Wassers und der Massenentwicklung des Phytoplanktons regelmäßig zu einer Übersättigung mit Sauerstoff, die im Mai–Juni ihr Maximum erreicht /3, 4/. Während der Abkühlungsphase im Herbst und Winter tritt dagegen ein deutliches Sauerstoffdefizit auf, das durch Zehrungsprozesse verstärkt wird.

Die Extremwerte der Sauerstoffsättigung fallen nicht mit denen der Absolutkonzentrationen zusammen. So erreicht der Sauerstoffgehalt in Abhängigkeit vom unterschiedlichen Beginn der Frühjahrsentwicklung des Phytoplanktons /2/ sein Maximum in der westlichen Ostsee bereits Ende März–Anfang April, während es in den zentralen Becken erst einen Monat später beobachtet wird. Die niedrigsten Sauerstoffkonzentrationen treten im Spätsommer auf, wenn die Wassertemperaturen ihr Maximum erreichen und das pelagische System sich in einem relativ stabilen Gleichgewicht befindet.

Unter Berücksichtigung dieser Faktoren zeigte der Jahresgang des Sauerstoffgehalts in der Oberflächenschicht den erwarteten Verlauf (Abb. 4), wobei im Mai in den nördlichen Teilgebieten der Ostsee Sättigungswerte bis 130 ‰ beobachtet wurden. Das Sauerstoffdefizit lag im Oktober–November bei 2–4 ‰. Lediglich in der westlichen Ostsee und im Finnischen Meerbusen wurden mit 5–10 ‰ bzw. 4–6 ‰ höhere Beträge ermittelt.

Die sauerstoffreiche Zwischenschicht des baltischen Zwischenwasser, die im August deutlich in Erscheinung trat (Abb. 4), war in Übereinstimmung mit den niedrigen Temperaturen durch eine positive Anomalie gekennzeichnet. Im Vergleich zu den mittleren jahreszeitlichen Bedingungen /3/ wurde im Gebiet des Gotlandtiefs eine Abweichung von etwa 0,3 cm<sup>3</sup>/dm<sup>3</sup> bestimmt.

Im Inneren der Lübecker Bucht (Stat. 023) wurden im Oktober 1986 erstmals anoxische Bedingungen in der grundnahen Wasserschicht beobachtet. Im Gegensatz dazu waren in der Mecklenburger Bucht Sauerstoffkonzentrationen von 1–5 cm<sup>3</sup>/dm<sup>3</sup> vorhanden. Diese Verteilung zeigt, daß die advective Erneuerung des Tiefenwassers, die in der westlichen Ostsee sowie im Arkonabecken /12/ alljährlich im Winter erfolgt, bereits begonnen hatte.

Im Tiefenwasser des Arkonabeckens wurden die bekannten Variationen des Sauerstoffgehalts mit hohen Werten im Winter und niedrigen im Sommer beobachtet (Abb. 4). Der schubweise Einstrom salzreicheren Wassers in dieses Becken verursachte keine nennenswerten Veränderungen. Die adjektiv zugeführten Wassermassen müssen deshalb von ihrem Ursprung her sauerstoffarm gewesen sein.

Zu Jahresbeginn herrschten anoxische Bedingungen im Tiefenwasser des Bornholmbeckens. Der Einstrom salzreicheren Wassers hatte jedoch im April–Mai sowie im August auch zu einer deutlichen Zunahme des Sauerstoffgehalts bis zum Grund geführt, ehe im Oktober ein erneuter starker Rückgang registriert wurde. Auswirkungen des im Dezember im Arkonabecken beobachteten Einstroms salzreichen Wassers auf das Sauerstoffregime des Bornholmbeckens wurden nicht festgestellt.

Mit 3,5 cm<sup>3</sup>/dm<sup>3</sup> waren im Februar 1986 sehr günstige Sauerstoffbedingungen im Bodenwasser des Gdańsker Tiefs vorhanden. Ab Mai setzte jedoch ein starker Rückgang des Sauerstoffgehalts ein, so daß Ende Oktober nur noch 0,4 cm<sup>3</sup>/dm<sup>3</sup> gemessen wurden.

Im Vergleich zum Vorjahr /13/ war der Einstrom sauerstoffreicherer Wassermassen ins östliche Gotlandbecken, der häufig im Mai beobachtet wird, verhältnismäßig schwach ausgebildet. Im Tiefenwasser dieses Beckens herrschten ganzjährig anoxische Bedingungen. Die Schwefelwasserstoffkonzentration erreichte unterhalb der in 125–150 m Tiefe gelegenen Redoxsprungschicht hohe Beträge. Mit 3,8 mg/dm<sup>3</sup> (240 m Tiefe) wurde im Mai 1986 ein neuer Höchstwert im Gotlandtief registriert. Die Akku-

mulation des Schwefelwasserstoffs verlief jedoch diskontinuierlich. So wurden im Februar nur 2,6 mg/dm<sup>3</sup> und im November 2,4 mg/dm<sup>3</sup> in der gleichen Schicht gemessen. Über die Ursachen dieser starken Fluktuationen, die auch in anderen Jahren beobachtet wurden, liegen noch keine Erkenntnisse vor.

Im Tiefenwasser des nördlichen und westlichen Gotlandbeckens dominierten mit Sauerstoffkonzentrationen von 0,1–0,5 cm<sup>3</sup>/dm<sup>3</sup> oxische Bedingungen. Lediglich im Karlsödtief wurde im November 1986 spurenweise Schwefelwasserstoff nachgewiesen.

### 3.4. Nährstoffe

Die Verteilung des Phosphats und Nitrats ist in den Abb. 5 und 6 dargestellt. In der winterlichen Oberflächenschicht lagen die mittleren Phosphatkonzentrationen in der Arkona- und Bornholmsee sowie der südöstlichen Gotlandsee (Tab. 2) um rund 0,1 µmol/dm<sup>3</sup> unter den Werten des Vorjahres /13/. Der mittlere Nitratgehalt war in der Bornholmsee ebenfalls niedriger als 1985, in den beiden anderen Seegebieten hatte er dagegen zugenommen.

Die hohen Standardabweichungen in der Mecklenburger Bucht zeigen, daß die Einzelwerte stark differieren. Ursache war der infolge Ostwetterlage bei den Untersuchungen im Februar herrschende, starke Ausstrom, mit dem salz- und nährstoffärmeres Wasser aus der Arkonasee zugeführt wurde. Während die südlichen Stationen in der Mecklenburger Bucht ähnlich hohe Phosphat-, Nitrat- und Salzkonzentrationen wie 1985 aufwiesen /13/, wurden auf den nördlichen Stationen deutlich niedrigere Werte gemessen. Die höchsten Nährstoff- und Salzkonzentrationen (1,1 µmol PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, 12,7 µmol NO<sub>3</sub><sup>-</sup> und 13,9 ‰ S) wurden jedoch im winterlichen Oberflächenwasser im Inneren der Lübecker Bucht (Stat. 023) ermittelt.

**Tabelle 2**

Mittlere Phosphat-, Nitrat- und Salzkonzentrationen in der winterlichen Oberflächenschicht 1986 (Standardabweichungen)

| Gebiet                 | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup><br>µmol/dm <sup>3</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup><br>µmol/dm <sup>3</sup> | Salz<br>‰     |
|------------------------|---|--|---------------|
| Mecklenburger Bucht    | 0,86 (±0,15)  | 8,26 (±2,83)   | 10,94 (±2,54) |
| Arkonasee              | 0,67 (±0,04)  | 4,56 (±0,77)   | 7,86 (±0,09)  |
| Bornholmsee            | 0,66 (±0,04)  | 3,76 (±0,18)   | 7,56 (±0,15)  |
| Südöstliche Gotlandsee | 0,58 (±0,04)  | 4,69 (±0,33)   | 7,59 (±0,06)  |

Die Frühjahrsentwicklung des Phytoplanktons setzte 1986 in den westlichen Teilgebieten der Ostsee erst spät ein, so daß in der Bornholmsee, beim Phosphat auch in der Arkonasee, Ende April noch relativ hohe Nährstoffkonzentrationen in der euphotischen Schicht auftraten (Abb. 5 und 6). Während des PEX-Programms, das in die Zeit der Frühjahrsblüte fiel, verarmte diese Schicht sehr schnell an Nährstoffen. Mitte Mai waren daher die Phosphat- und Nitratkonzentrationen im Oberflächenwasser der Gotlandsee und des Finnischen Meerbusens bis an die analytische Nachweisgrenze abgesunken.

Nach Beendigung der Vegetationsperiode wurde Ende Oktober im Oberflächenwasser der westlichen Ostsee bereits eine starke Phosphatakkumulation beobachtet, die in der Mecklenburger und Lübecker Bucht Beträge von 0,5–0,8 µmol/dm<sup>3</sup> erreichte. Im Finnischen Meerbusen wurden Anfang November sowohl beim Phosphat als auch beim Nitrat relativ hohe Konzentrationen in dieser Schicht gemessen (Abb. 5 und 6), während in der zentralen Ostsee vor allem beim Nitrat noch kein nennenswerter Anstieg zu verzeichnen war.

Mitte Dezember war die winterliche Nährstoffakkumulation in der Arkona- und Bornholmsee bereits weit fortgeschritten. Bemerkenswert waren die hohen Nitritkonzentrationen von 0,4–0,9 µmol/dm<sup>3</sup> im Oberflächenwasser, die zeigen, daß die Nitrifikation der Stickstoffverbindungen in dieser Jahreszeit noch nicht abgeschlossen ist.

Die Verteilung des Phosphats und Nitrats im Tiefenwasser wird von der Dauer der Stagnationsperiode und vom Sauerstoffregime bestimmt. Die hohen Phosphatkonzentrationen, die unter anoxischen Bedingungen im Bornholm- und Gotlandbecken ermittelt wurden (Abb. 5), sind nicht nur auf die Akkumulation aus Mineralisierungsprozessen zurückzuführen, sondern vor allem die Folge

einer Freisetzung aus den Sedimenten, die mit der Schwefelwasserstoffbildung erfolgt.

Nitrat wird bereits bei niedrigen Sauerstoffkonzentrationen ( $< 0,5 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$ ) reduziert, wobei überwiegend molekularer Stickstoff entsteht. Schwefelwasserstoff und Nitrat sind nur kurzzeitig nebeneinander beständig /8/. Geringe Konzentrationen dieser Stickstoffverbindung, die unter stagnierenden Bedingungen in Gegenwart von Schwefelwasserstoff auftraten, wurden daher auf Unzulänglichkeiten bei der Probengewinnung oder Analytik zurückgeführt und in den graphischen Darstellungen (Abb. 3) nicht

bis zum Jahresende erhalten blieb. Betrachtet man die Wärmesummen, die THIESEL /16/ aus den Tagesmitteltemperaturen über  $16^\circ\text{C}$  für die Beobachtungsstation Warnemünde berechnete, ist der Sommer nach der in Abb. 7 vorgenommenen Klassifizierung nur als „normal warm“ einzustufen, obgleich die Wärmesummen, die in den Monaten Juni und Juli ermittelt wurden, einen sehr warmen Sommer erwarten ließen. In der Periode starker zyklonaler Aktivitäten von Mitte August bis Ende September blieben die Lufttemperaturen jedoch weit unter dem jahreszeitlichen Erwartungswert.

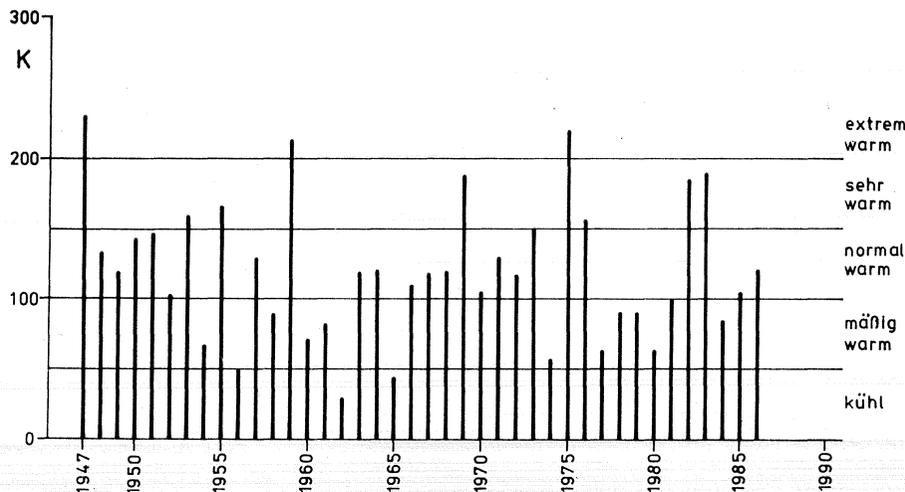


Abb. 7

Wärmesummen nach THIESEL /16/ nach Messungen der Seewetterdienststelle Warnemünde und Klassifizierung der Sommer in der westlichen Ostsee

berücksichtigt. Im Bornholmbecken ist die Erneuerung des anoxischen Tiefenwassers deutlich an der Abnahme des Phosphat- und an der Zunahme des Nitratgehalts zu erkennen.

Da ohne Sauerstoff keine Nitrifikation erfolgen kann, wird Ammonium im anoxischen Tiefenwasser angereichert. Während in Gegenwart von Schwefelwasserstoff bislang Ammoniumkonzentrationen von  $7-12 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$  auftraten /13/ wurden 1986 im Gotlandtief Werte zwischen 16 und  $25 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$  registriert.

Vor allem im Sommer und Herbst wurden im oxischen Tiefenwasser der Mecklenburger Bucht und des Arkonabeckens Ammoniumkonzentrationen von  $3-7 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$  gemessen. Diese hohen Werte deuten auf eine unvollständige Nitrifikation und zunehmende organische Belastung von Wasser und Sediment hin.

#### 4. Diskussion

Für die Beobachtungsstation Warnemünde des Meteorologischen Dienstes der DDR ermittelte THIESEL /16/ im Winter 1985/86 eine Kältesumme (Summe der negativen Tagesmitteltemperaturen) von  $204,5 \text{ K}$ , die deutlich unter der des Vorjahres ( $279 \text{ K}$ ) bleibt (vgl. auch /13/). Daß dieser Winter nicht ganz so streng war wie der vorangegangene, bestätigen auch Messungen auf allen Stationen entlang der schwedischen Ostseeküste /21/.

Wenn man die Klassifikation von HUPFER /1/ zugrunde legt, muß aber auch der Winter 1985/86 als eisreich eingestuft werden. Schwedische Untersuchungen belegen das für die gesamte Ostsee /21/. Wie aus der Karte der maximalen Eisverteilung hervorgeht, war am 27. Februar 1986 außer der Bornholmsee und östlichen Gotlandsee die gesamte Ostsee, einschließlich der Übergangsgebiete zur Nordsee, mit Eis bedeckt. Der strenge Winter spiegelte sich auch noch während des Sommers 1986 in den niedrigen Temperaturen des baltischen Zwischenwassers, in dem die Wintertemperaturen konserviert sind, wider.

Die Erwärmung der Ostsee erfolgte 1986 stark verzögert. Ursachen dafür waren die erheblichen Eismassen, deren Schmelze hohe Energiemengen erfordert, das bis April zu geringe Strahlungsangebot sowie die aus polaren Regionen zugeführten kalten Luftmassen.

Trotz des Eiswinters und der verzögerten Erwärmung im Frühjahr entwickelte sich im weiteren Jahresverlauf eine positive Temperaturanomale im Oberflächenwasser der Ostsee, insbesondere in ihren westlichen Teilgebieten, die

Temperaturveränderungen unterhalb der thermohalinen Sprungschicht waren 1986 auf die westlichen Teilgebiete der Ostsee beschränkt, in denen es alljährlich während der kalten Jahreszeit zu einer Erneuerung des Tiefenwassers durch advective Prozesse kommt. Im Bornholmbecken führten Intrusionen aus dem Arkonabecken im Sommer und Herbst zu einem Temperaturanstieg im Tiefenwasser. Diese Intrusionen, die ebenfalls in jedem Jahr beobachtet werden /12/ und sich lediglich in ihrer Intensität unterscheiden, waren 1986 relativ stark ausgebildet.

Im Frühjahr 1986 begann der Einstrom salzreicheren Wassers in die Ostsee. Wie die starken Salzgehaltsschwankungen im Arkonabecken zeigen (Abb. 3), erfolgte dieser Einstrom schubweise über das ganze Jahr verteilt. Er erreichte nicht das Ausmaß eines Salzwassereinbruchs, führte jedoch zu einer teilweisen Wassererneuerung und zu einem deutlichen Anstieg des Salzgehalts im Tiefenwasser des Bornholmbeckens. Die Salzgehaltsvariationen im Gdańsker Becken müssen ebenfalls mit diesem Ereignis in Verbindung gebracht werden.

Die Stagnationsperiode im Tiefenwasser der anderen zentralen Ostseebecken dauerte auch 1986 an, wobei sich der Salzgehalt weiter verringerte. Im Gotlandtief wurde ein neues Salzgehaltsminimum in der grundnahen Wasserschicht registriert, so daß sich die Voraussetzungen für eine durchgreifende Wassererneuerung in diesem Becken weiter verbessert haben.

Der geringe Salzeintrag in das Tiefenwasser wirkt sich zunehmend auf die homohaline Deckschicht aus. So lag der Salzgehalt, der im Winter 1986 in dieser Schicht gemessen wurde, deutlich unter den Werten früherer Jahre. Trotz positiver Salzgehaltsanomalie im Oberflächenwasser des südlichen Kattegats zeichnete sich Ende November 1986 kein Einstrom salzreichen Wassers durch den Fehmarnbelt ab. Nach Informationen des Schwedischen Meteorologischen und Hydrologischen Instituts passierten jedoch Anfang Dezember Wassermassen mit einem Salzgehalt von  $26 \text{ ‰}$  den Sund. Dieser Einstrom erstreckte sich über 6 Tage. Zeitgleich durchgeführte Messungen ergaben im Gebiet der Darßer Schelle keine erhöhten Salzkonzentrationen. Der Einstrom des salzreichen Wassers war somit auf den Sund beschränkt. Er bewirkte nur lokal eine Erhöhung des Salzgehalts im westlichen und südlichen Arkonabecken. Nachhaltige Auswirkungen auf die zentralen Becken können daher ausgeschlossen werden. Der Einstrom durch den Sund ist demnach für die Erneuerung des Tiefenwassers der Ostsee von untergeordneter Bedeutung.

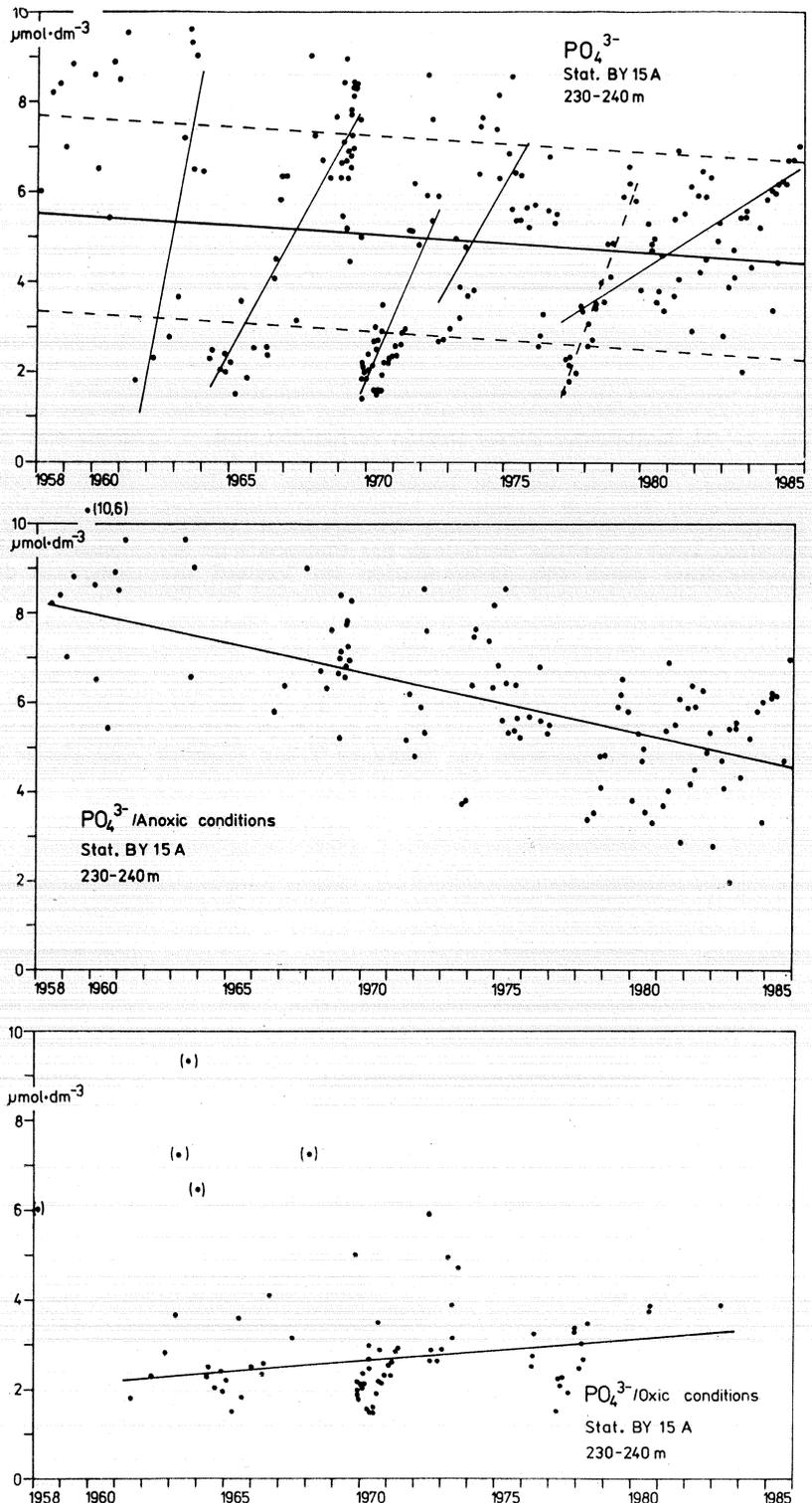
Abbildung 1 gibt über das Sauerstoffregime im Tiefenwasser der untersuchten Ostseeregionen Auskunft. Sie unterstreicht die bereits beim Salzgehalt getroffene Aussage, daß die Stagnationsperiode im östlichen Gotlandbecken, die 1977 begonnen hat, auch 1986 andauerte. Damit verbunden waren hohe Schwefelwasserstoffkonzentrationen und ein Anstieg der Redoxsprungschicht um 10–20 m. Im nördlichen und westlichen Gotlandbecken waren ganzjährig oxische Bedingungen vorhanden, wenn auch der Sauerstoffgehalt in der grundnahen Wasserschicht auf sehr geringe Werte abgesunken ist. Eine Ausnahme bildete das Karlsötief, wo im Herbst 1986 spurenweise Schwefelwasserstoff festgestellt wurde. Diese Entwicklung steht im Einklang mit früheren Beobachtungen.

Zum ersten Mal seit Beginn unserer Terminuntersuchungen wurde 1986 im Tiefenwasser des Bornholmbeckens während des Winters eine Verschlechterung der Sauer-

stoffbedingungen und ein Anstieg der Schwefelwasserstoffkonzentrationen festgestellt. Die befürchtete extreme Verschlechterung des Sauerstoffregimes trat jedoch nicht ein, weil die im Mai beobachtete Erneuerung des Tiefenwassers mit einer deutlichen Zunahme des Sauerstoffgehalts verbunden war.

Vertikale Vermischungsprozesse sind offenbar die Ursache für die günstigen Sauerstoffbedingungen, die im Winter 1986 im Tiefenwasser des Gdańsker Beckens angetroffen wurden. Die später beobachtete, starke Abnahme des Sauerstoffgehalts ist wohl nicht allein auf Zehrungsprozesse, sondern auch auf die advective Zufuhr sauerstoffärmerer Wassermassen, die aus dem Bornholmbecken verdrängt wurden, zurückzuführen.

Das im Herbst 1986 beobachtete Sauerstoffdefizit im Oberflächenwasser sowie Schwefelwasserstoff in der grundnahen Wasserschicht der Lübecker Bucht deuten ebenso



**Abb. 8**

Gesamtrend des Phosphatgehalts unabhängig von den Sauerstoffbedingungen und Trends unter anoxischen und oxischen Bedingungen im Bodenwasser des Gotlandtiefs (die Summe der den anoxischen und oxischen Bedingungen zugeordneten Phosphatwerte ist kleiner als die Gesamtsumme, da für einige Phosphatwerte keine exakten Angaben über die Sauerstoffbedingungen vorlagen).

wie die unvollständige Nitrifikation der Stickstoffverbindungen unter oxidischen Bedingungen auf eine verstärkte Belastung der westlichen Ostsee mit oxidierbaren organischen Substanzen hin. Diese Entwicklung ist eng mit der Eutrophierungsproblematik verknüpft. Die zunehmende Akkumulation von Phosphat und Nitrat in der winterlichen Oberflächenschicht ist ein Hinweis auf das wachsende Produktionspotential dieser Region.

Seit einigen Jahren, so auch 1986, werden im Oberflächenwasser der westlichen Ostsee bereits im Herbst hohe Phosphatkonzentrationen beobachtet /13/. Sie sind auf eine Beschleunigung des biogeochemischen Stoffkreislaufs zurückzuführen und ein weiterer Hinweis auf die verstärkte Eutrophierung. Infolge geringerer Umsatzraten bei der Nitrifikation der Stickstoffverbindungen verläuft die Nitratakkumulation langsamer.

Die Phosphatakkumulation in der winterlichen Oberflächenschicht der zentralen Ostsee war 1986 im Mittel um rund 15% niedriger als in den Vorjahren /13/. Der ebenfalls niedrigere Salzgehalt in dieser Schicht läßt auf einen verringerten Vertikalaustausch als Ursache schließen (vgl. auch /9/). Im Widerspruch dazu steht die weitere Zunahme des Nitratgehalts in der Arkona- und Gotlandsee.

Trotz der geringeren Phosphatakkumulation im Winter 1986 ist das Produktionspotential der zentralen Ostsee hoch. Die im Vergleich zu den Vorjahren niedrigeren Phosphatkonzentrationen liegen im Bereich zwischenjährlicher Fluktuationen und sind kein Hinweis auf ein Ende der Eutrophierung.

Während im oxidischen Tiefenwasser der zentralen Ostsee eine im Mittel signifikante Zunahme des Phosphatgehalts nachgewiesen werden konnte /9/, führten Trenduntersuchungen im zeitweilig anoxischen Tiefenwasser bisher zu keinem Erfolg. Eine Ausnahme bildete das Landsortief, in dem unter diesen Bedingungen ein signifikant positiver Phosphattrend beobachtet wurde. Diese Ausnahme wurde damit begründet, daß nur relativ geringe Phosphatmengen, die durch Schwefelwasserstoff remobilisiert werden können, in den Sedimenten dieser Region vorhanden sind.

Die inzwischen vorliegenden, umfangreichen Zeitreihen gestatteten nunmehr weitere Untersuchungen zu dieser Problematik /11/. Abb. 8 zeigt die Langzeitvariationen des Phosphatgehalts in der grundnahen Wasserschicht des Gotlandtiefs (Stat. 15A). Die Verteilung des Phosphats ist gekennzeichnet durch die Akkumulation im Verlauf der Stagnationsperioden und dem Rückgang während der Erneuerung des Tiefenwassers. Im Mittel ist der Phosphatgehalt jedoch im Zeitraum 1958–1985 abnehmend. Dieser Trend konnte statistisch nicht gesichert werden.

Weil die Phosphatakkumulation im stagnierenden Tiefenwasser vom Redoxpotential abhängt /10/, wurden die Daten unterteilt nach oxidischen und anoxischen Bedingungen. Im anoxischen Milieu wird ein negativer Trend erhalten (Abb. 8), der statistisch hoch signifikant ist. Ursache scheint

der begrenzte Vorrat an Phosphat im Sediment zu sein, der durch Schwefelwasserstoff remobilisiert werden kann. In Abhängigkeit von der Häufigkeit und Dauer sowie der Schwefelwasserstoffkonzentration erschöpft sich dieser Vorrat allmählich, so daß der Phosphatgehalt in der grundnahen Wasserschicht im Mittel rückläufig ist.

Die unter oxidischen Bedingungen gemessenen Phosphatkonzentrationen zeigen dagegen eine ansteigende Tendenz. Ein statistisch gesicherter Trend läßt sich daraus jedoch nicht ableiten. Der mittlere jährliche Anstieg ( $0,05 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ) ist nahezu von gleicher Größe wie der im 100-m-Horizont ( $0,06 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ) und spiegelt somit die generelle Phosphatakkumulation im permanent oxidischen Tiefenwasser wider.

Die ozeanologischen Bedingungen waren 1986 in bezug auf die Ostseefischerei günstiger als im Vorjahr /13/. Obgleich der Winter 1985/86 ebenfalls als eisreich einzustufen ist, setzte die Eisbedeckung in den westlichen Teilgebieten der Ostsee erst Mitte Februar /21/ ein und war von geringerer Intensität als 1985.

Niedriger Salzgehalt und Schwefelwasserstoff beeinträchtigten zu Beginn des Jahres die Laichbedingungen des Dorsches im Tiefenwasser des Bornholmbeckens. Die Wassererneuerung im späten Frühjahr führte jedoch zu einer nachhaltigen Besserung dieser Bedingungen.

Aufgrund der guten Sauerstoffversorgung des Tiefenwassers herrschten im Winter und Frühjahr sehr günstige Lebensbedingungen im Gdańsker Becken. Hier kann sich jedoch der niedrige Salzgehalt nachteilig auf die Schwimmfähigkeit des Dorschlaichs ausgewirkt haben.

Die vergleichsweise zu anderen Jahren geringere Einstromintensität sowie die vertikale Ausdehnung des anoxischen Tiefenwassers führten zu einer Verschlechterung der Lebensbedingungen im östlichen Gotlandbecken. In den anderen zentralen Ostseebecken waren die zwischenjährlichen Variationen gering.

In der westlichen Ostsee wird infolge rasanter Eutrophierung eine zunehmende Verschlechterung der Lebensbedingungen durch Sauerstoffmangel und Schwefelwasserstoffbildung erwartet. Davon wird vor allem das Tiefenwasser der Mecklenburger und Lübecker Bucht im Sommer und Herbst betroffen, wenn der horizontale und vertikale Austausch stark eingeschränkt ist.

Obgleich die Phosphatakkumulation im Winter 1986 geringer als in den Vorjahren war, ist mit der Fortdauer der Eutrophierung und einer hohen Bioproduktion in der zentralen Ostsee zu rechnen. Während sich damit die Nahrungsgrundlage für die pelagischen Fischarten günstig entwickelt, ist andererseits mit einer zunehmenden Belastung des Sauerstoffregimes im Tiefenwasser und mit einer weiteren Einschränkung des Lebensraumes, der für die Fische und anderen aeroben Organismen verfügbar ist, zu rechnen.

## Literatur

- HUPFER, P.: Die Ostsee – kleines Meer mit großen Problemen. Leipzig 1978, S. 1–152.
- KAISER, W.; SCHULZ, S.: Zur Ursache der zeitlichen und räumlichen Differenzen des Beginns der Phytoplanktonblüte in der Ostsee. Fischerei-Forschung, Rostock 14 (1976), S. 77–81.
- MATTHÄUS, W.: Zur Hydrographie der Gotlandsee IV. Zum mittleren Jahresgang des Sauerstoffgehalts im Oberflächenbereich des Gotlandtiefs. Beitr. Meeresk. H. 33 (1974), S. 141–151.
- MATTHÄUS, W.: Mittlere Temperatur- und Sauerstoffverhältnisse in der Arkonasee am Beispiel der Station BY2A auf 55° N, 14° E. Beitr. Meeresk. H. 36 (1975), S. 5–27.
- MATTHÄUS, W.: Zur mittleren jahreszeitlichen Veränderlichkeit der Temperatur in der Ostsee. Beitr. Meeresk. H. 40 (1977), S. 117–155.
- MATTHÄUS, W.: Zur mittleren jahreszeitlichen Veränderlichkeit des Oberflächensalzgehalts der Ostsee. Gerlands Beitr. Geophysik 87 (1978), S. 369–376.
- MÜCKEL, F.: Die ozeanologische Meßkette OM 75 – eine universelle Datenerfassungsanlage für Forschungsschiffe. Beitr. Meeresk. H. 43 (1980), S. 5–14.
- NEHRING, D.: Chemical investigations into nitrate reduction in Baltic deep waters. Beitr. Meeresk. H. 51 (1984), S. 51–56.
- NEHRING, D.: Langzeitveränderungen essentieller Nährstoffe in der zentralen Ostsee. Acta hydrochim. hydrobiol. 13 (1985), S. 591–609.
- NEHRING, D.: Temporal variations of phosphate and inorganic nitrogen compounds in central Baltic deep waters. Limnol. Oceanogr. 32 (1987), im Druck.
- NEHRING, D.: Is the phosphate supply decreasing in central Baltic deep waters? Proceed. XV Conference of the Baltic Oceanographers, Copenhagen/Denmark 1986 (1987), S. 427–434.
- 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 westlichen und zentralen Ostsee im Jahre 1985. Fischerei-Forschung, Rostock 25 (1987), im Druck.
- REICHEL, U.: Mittlere monatliche Temperatur- und Salzgehaltswerte im Gebiet des Fehmarnbelt. Untersuchungen auf der Grundlage von Feuerschiffsbeobachtungen 1949–1978. Inst. für Meeresk., Warnemünde 1980, unveröff.

15. 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.
16. THIESEL, R.:  
Jährliche Kälte- und Wärmesummen für die meteorologische Beobachtungsstation Rostock-Warnemünde.  
Seewetterdienststelle Warnemünde des Meteorologischen Dienstes der DDR, 1986, unveröff.
17. Oceanografiske Observationer fra Danske Fyrskibe og Kyststationer 1970.  
Danske Meteorol. Inst., Charlottenlund 1971.
18. Mittelwerte der Temperatur und des Salzgehalts. Gedser Rev (1931-1960).  
Inst. für Meeresk., Warnemünde 1982, unveröff.
19. Monatlicher Witterungsbericht für das Gebiet der Deutschen Demokratischen Republik.  
Hrsg.: Meteorol. Dienst der DDR, HA für Klimatologie Potsdam 40/41 (1986/87).
20. Die Großwetterlagen Europas.  
Amtsblatt des Dtsch. Wetterdienstes Offenbach (Main), 39 (1986).
21. A summary of the ice season and icebraking activities 1985/86.  
Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (SMHI) Norrköping 1986, S. 1-60.