

Hydrographisch-chemische Veränderungen in der Ostsee im Jahre 1972 unter besonderer Berücksichtigung des Salzwassereinbruchs im März/April 1972

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

Die hydrographisch-chemischen Veränderungen in der Ostsee waren im Jahre 1972 durch einen umfangreichen Salzwassereinbruch gekennzeichnet, der im März/April erfolgte und zu einer durchgreifenden Erneuerung des Tiefenwassers im Bornholmbecken, im Gdanskener Becken sowie im Südteil des östlichen Gotlandbeckens führte. Seine Auswirkungen reichten nicht über das Färötief hinaus, so daß es im nördlichen und westlichen Gotlandbecken zu einer starken Verschlechterung der Sauerstoffverhältnisse im Jahresverlauf kam. Im Oktober 1972 wurde erstmals direkt nachgewiesen, daß unterhalb der halinen Sprungschicht auch für einige Teilgebiete der relativ flachen westlichen Ostsee einschließlich des Arkonabeckens die akute Gefahr des Sauerstoffmangels und der zeitweiligen Schwefelwasserstoffbildung mit allen sich daraus ableitenden Konsequenzen besteht.

1. Einleitung

Ebenso wie in den vergangenen Jahren (7, 8) wurde auch 1972 das ozeanologische Observatoriumsprogramm in der Ostsee fortgesetzt. Diese Untersuchungen des Instituts für Meereskunde der AdW der DDR in Rostock-Warnemünde dienen als Grundlage für Fischereiprososen und zur Erforschung des Wasseraustausches in den tiefen Becken der Ostsee.

Im Jahre 1972 wurden wiederum 5 Meßfahrten durchgeführt, auf denen Untersuchungen gemäß den Empfehlungen des Internationalen Ostseejahres 1969/70 (12) erfolgten.

Aus technischen Gründen konnten im Februar nur das Arkona- und Bornholmbecken bearbeitet werden. Im April und August erstreckten sich die Untersuchungen bis zum Gotlandtief (Station 15 A) bzw. darüber hinaus bis zur Station 21 B. Auf den Forschungsfahrten im Mai und Oktober/November wurden die Messungen bis in den Finnischen Meerbusen ausgedehnt, wobei die letzte Reise vorzeitig abgebrochen werden mußte, so daß für das 4. Quartal 1972 aus dem Südteil des östlichen Gotlandbeckens sowie aus dem Gdanskener Becken keine eigenen ozeanologischen Beobachtungen vorliegen.

Die hydrographisch-chemischen Meßwerte wurden abermals in Form eines Längsschnittes durch die tiefen Bek-

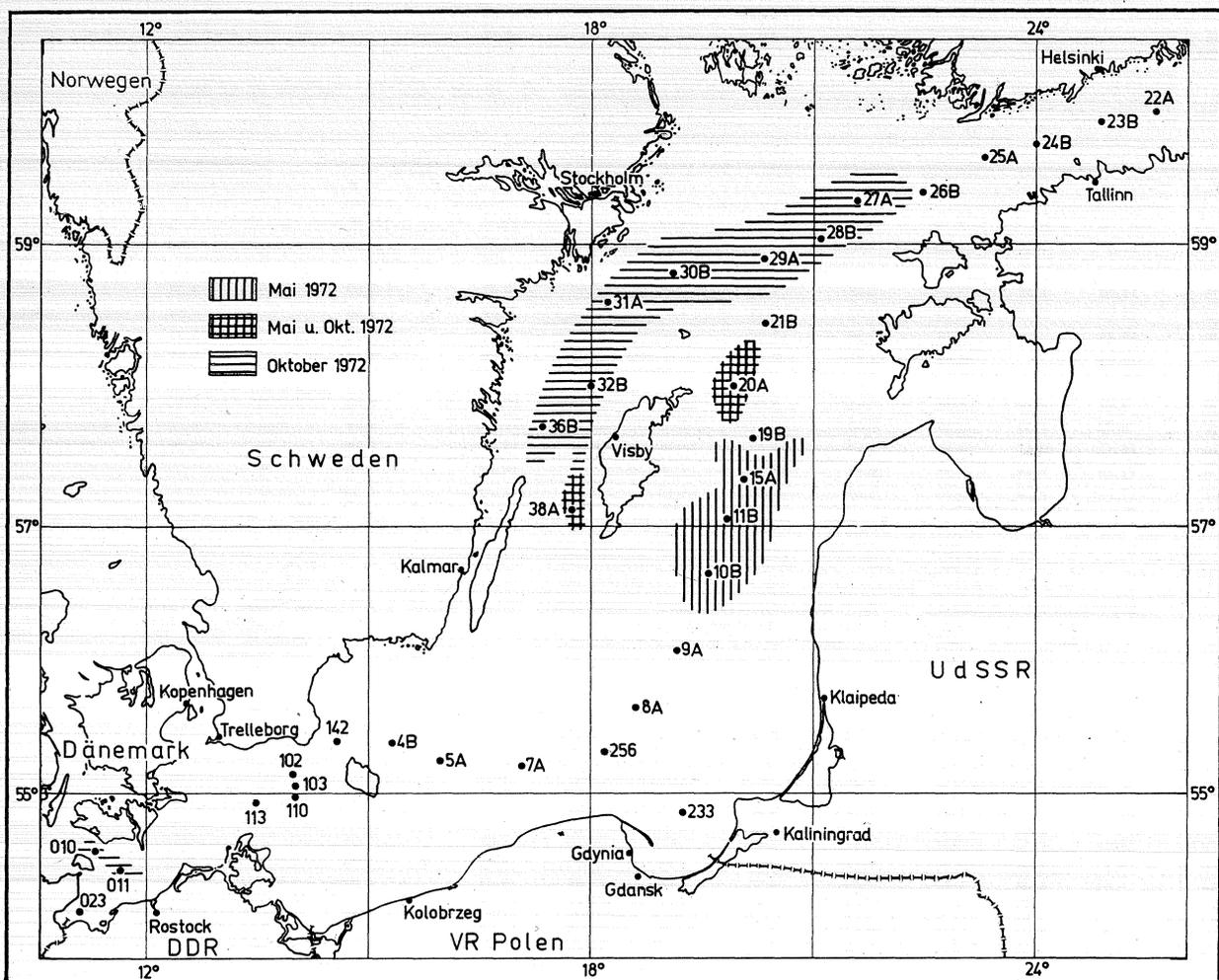


Abb. 1 Stationskarte und Gebiete mit Schwefelwasserstoff in der grundnahen Schicht im Jahre 1972

ken und Mulden der Ostsee dargestellt (7, 8). In Abb. 1 sind nur die für die Schnittdarstellungen verwendeten Standardstationen sowie zusätzlich 3 Stationen in der westlichen Ostsee und 2 Stationen im Arkonabecken aufgeführt. Daneben wurden besonders in der westlichen Ostsee sowie im Arkona- und Bornholmbecken weitere Stationen untersucht.

Für die Bearbeitung der Meßwerte mittels elektronischer Datenverarbeitung erhielten die nationalen Stationen der DDR neue Stationsnummern.

Die Stationsbezeichnungen des Internationalen Ostseejahres werden dagegen unverändert beibehalten.

Auch bei der Bestimmung des Salzgehalts traten Änderungen ein. Ab August 1972 wird der Salzgehalt in allen Ostseewasserproben ausschließlich auf konduktometrischem Wege (6) ermittelt.

2. Hydrographisch-chemische Veränderungen

Während einer Stagnationsperiode, die im Herbst 1970 begann (2, 3, 5), kam es im Tiefenwasser des Bornholmbeckens, des Gdansk Beckens und der Gotlandsee ver-

breitet zur Schwefelwasserstoffbildung (7, 8). Doch bereits im Oktober 1971 zeichnete sich der Einstrom relativ salz- und sauerstoffreicher, jedoch phosphatarmer Wassermassen im Südtel des Arkonabeckens ab, der in der Folgezeit auch zu einer geringen Besserung der Sauerstoffverhältnisse im Bornholmbecken führte (Tabelle 2 und 3). Schwefelwasserstoff, der in diesem Becken während des Höhepunktes der Stagnationsperiode (8) bereits in 80 m Tiefe angetroffen wurde, war im Februar 1972 nur noch in Grundnähe vorhanden.

Weitere Untersuchungen, die vom 4. bis 14. April 1972 mit dem DDR-Forschungsschiff „Professor Albrecht Penck“ durchgeführt wurden, zeigten, daß unmittelbar vor dieser Meßfahrt ein großer Salzwassereintrich in die Ostsee begonnen hatte. Im Arkonabecken war der Salzgehalt am 6. April gegenüber den Messungen im Februar erheblich angestiegen (Tabelle 1). Lediglich in der salzarmen Deckschicht wurden etwas geringere Werte gemessen. Am 7. April war das salzreiche Tiefenwasser bereits bis ins westliche Bornholmbecken vorgedrungen und hatte auf Station 4 B zu einem Anstieg des Salzgehalts unterhalb der halinen Spungschicht geführt (Tabelle 2). Gleichzeitig war die 10‰-Isohaline um mehr als 10 m angestiegen. Im Gegensatz dazu war auf Station

Tab. 1 Wassertemperatur, Salzgehalt und Sauerstoffkonzentration auf Station 113 (54°55,5'N, 13°30,0'E) im Arkonabecken

Tiefe [m]	T [°C]			S [‰]			O ₂ [ml/l]		
	17. 2. 1972	6. 4. 1972	13. 4. 1972	17. 2. 1972	6. 4. 1972	13. 4. 1972	17. 2. 1972	6. 4. 1972	13. 4. 1972
1	0,22	3,26	4,15	8,96	8,60	8,40	9,44	9,31	9,36
10	0,21	3,11	3,77	9,14	8,60	8,40	9,41	9,23	10,09
20	0,15	2,14	3,17	9,48	12,47	8,96	9,44	8,72	9,10
30	0,41	2,58	2,62	11,98	15,79	15,48	9,01	8,27	8,29
35	0,57	3,02	3,95	13,77		18,44	8,81		7,66
40	0,25	3,74	3,60	14,04	21,35	19,85	8,87	7,31	7,30
45	1,85	3,56	3,98	17,25	22,60	22,62	7,98	7,27	6,47

Tab. 2 Wassertemperatur, Salzgehalt und Sauerstoffkonzentration auf IBY-Station 4 B (55°23,0'N, 15°20,0'E) im Bornholmbecken

Tiefe [m]	T [°C]				S [‰]				O ₂ [ml/l]			
	14. 10. 1971	16. 2. 1972	7. 04. 1972	12. 4. 1972	14. 10. 1971	16. 2. 1972	7. 4. 1972	12. 4. 1972	14. 10. 1971	16. 2. 1972	7. 4. 1972	12. 4. 1972
1	12,05	1,38	2,60	2,92	7,59	7,66	8,00	8,04	7,09	9,17	9,36	9,31
10	12,05		2,60	2,92	7,59		8,00	8,04	7,09		9,28	9,35
20	12,05		2,78	2,94	7,59		8,00	8,04	7,10		9,29	9,38
30	12,03		2,85	2,91	7,59		8,00	8,04	7,10		9,35	9,27
40	11,64	2,07	1,56	3,27	7,61	8,00	8,15	8,67	7,07	8,93	9,22	9,10
50	5,09	2,10	2,02	2,41	8,36	8,00	10,98	11,15	6,05	8,88	8,44	7,78
60	9,00	4,30	2,30	5,69	11,67	10,01	12,52	14,34	3,24	5,82	8,18	4,22
70	13,73	9,41	3,55	7,47	14,31	14,76	13,01	15,41	3,75	1,31	8,32	0,53
80	11,35	8,19	3,29	4,41	15,25	15,28	15,77	16,58	1,98	0,29	7,37	5,64
90	7,29	8,20	3,25	3,59	15,50	15,45	16,51	18,35	0,06	0,00 ¹⁾	7,50	7,19

¹⁾ H₂S

Tab. 3 Wassertemperatur, Salzgehalt und Sauerstoffkonzentration auf IBY-Station 5 A (55°15,0'N, 15°59,0'E) im Bornholmbecken

Tiefe [m]	T [°C]				S [‰]				O ₂ [ml/l]			
	14. 10. 1971	16. 2. 1972	8. 4. 1972	12. 4. 1972	14. 10. 1971	16. 2. 1972	8. 4. 1972	12. 4. 1972	14. 10. 1971	16. 2. 1972	8. 4. 1972	12. 4. 1972
1	11,87	1,29	2,45	2,75	7,59	7,66	7,91	7,93	7,14	9,14	9,21	9,42
10	11,89		2,46	2,73	7,59		7,91	7,93	7,14		9,23	9,38
20	11,89		2,48	2,85	7,59		7,91	7,93	7,14		9,26	9,17
30	11,80		2,39	2,77	7,59		7,91	7,93	7,08		9,30	9,14
40	10,97	1,91	2,37	2,26	7,59	7,86	7,91	8,04	7,23	8,99	9,29	9,35
50	5,62	1,88	2,28	2,63	8,17	7,95	7,95	10,93	6,30	9,03	9,30	7,84
60	8,00	2,59	3,19	2,80	10,55	9,86	10,39	13,37	4,23	8,05	7,38	7,50
70	6,82	6,80	7,10	3,23	13,77	14,00	13,64	14,65	0,28	4,26	3,45	7,51
80	7,00	8,30	7,41	5,59	15,32	15,37	14,69	15,50	0,00 ¹⁾	0,49	1,89	3,27
90	6,63	8,04	6,94	3,27	15,66	15,48	15,25	16,49	0,00 ¹⁾	0,00 ¹⁾	1,27	7,50

¹⁾ H₂S

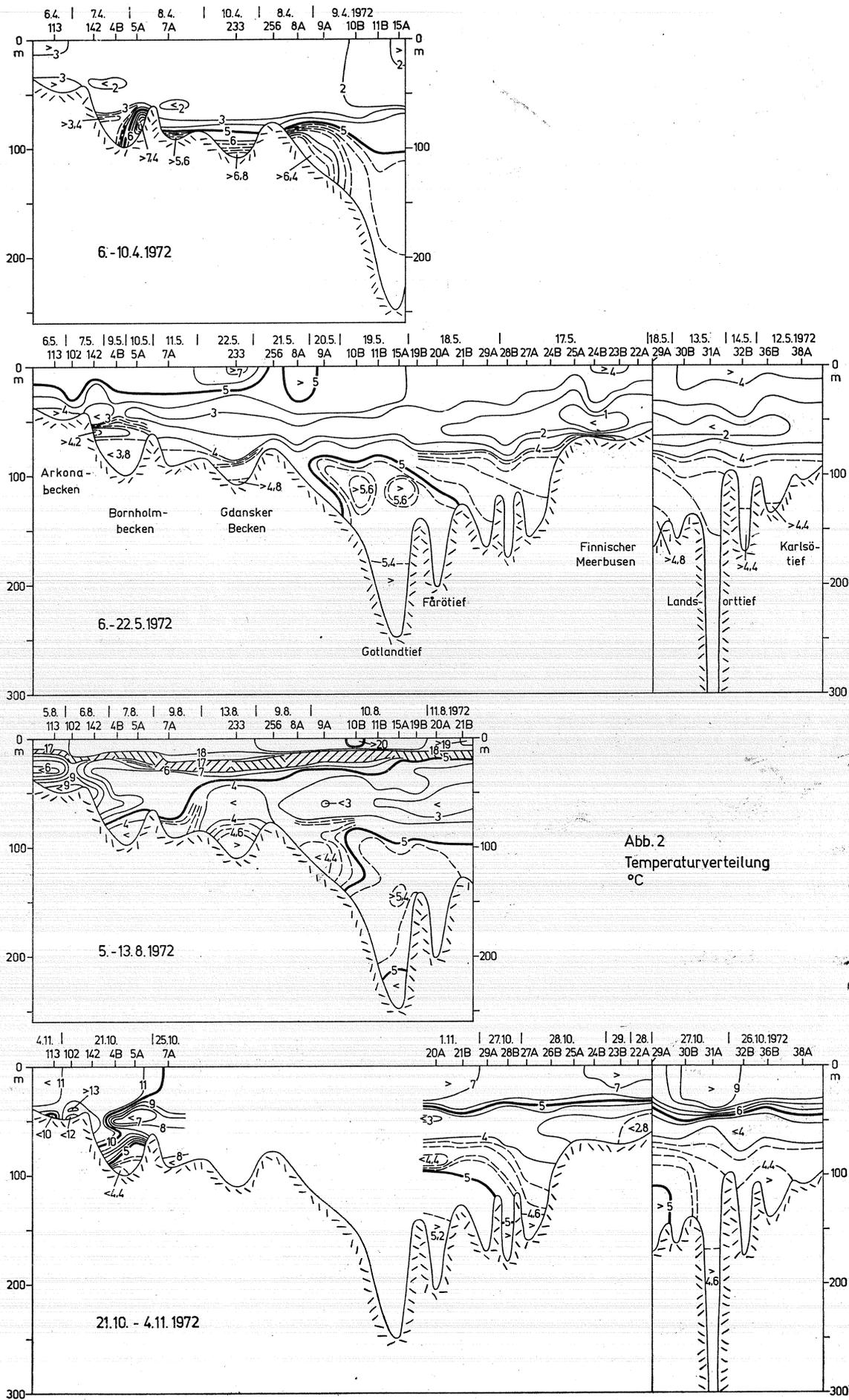


Abb. 2
Temperaturverteilung
°C

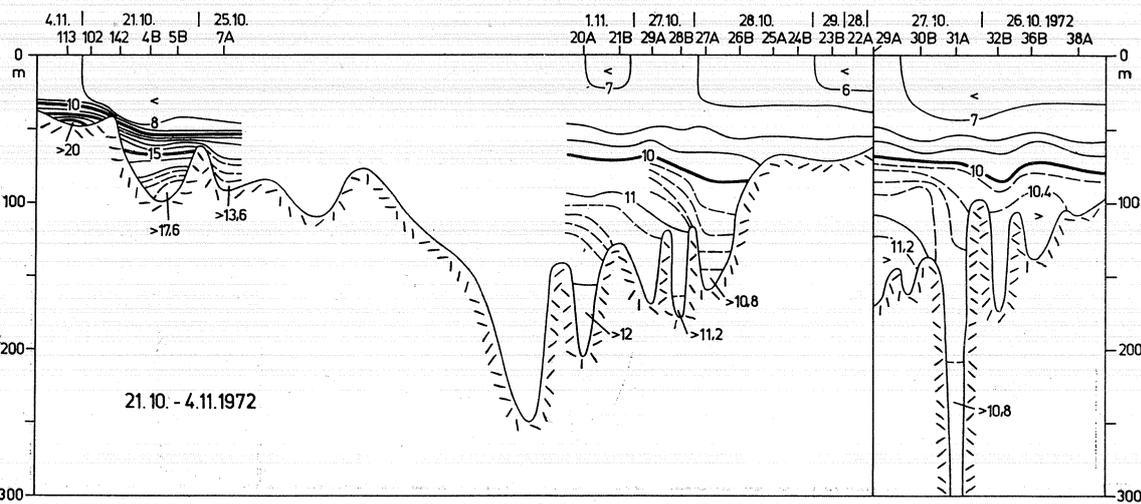
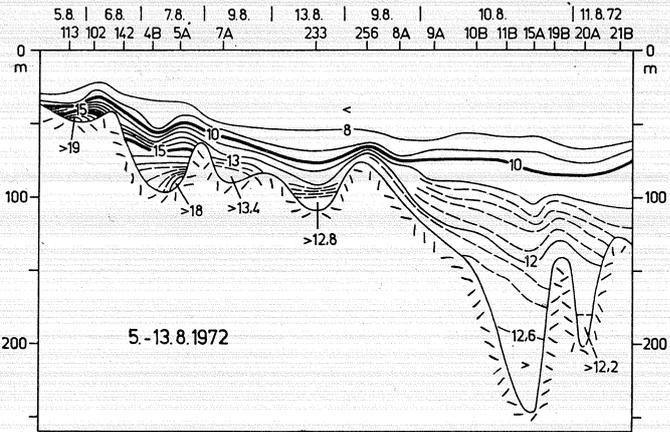
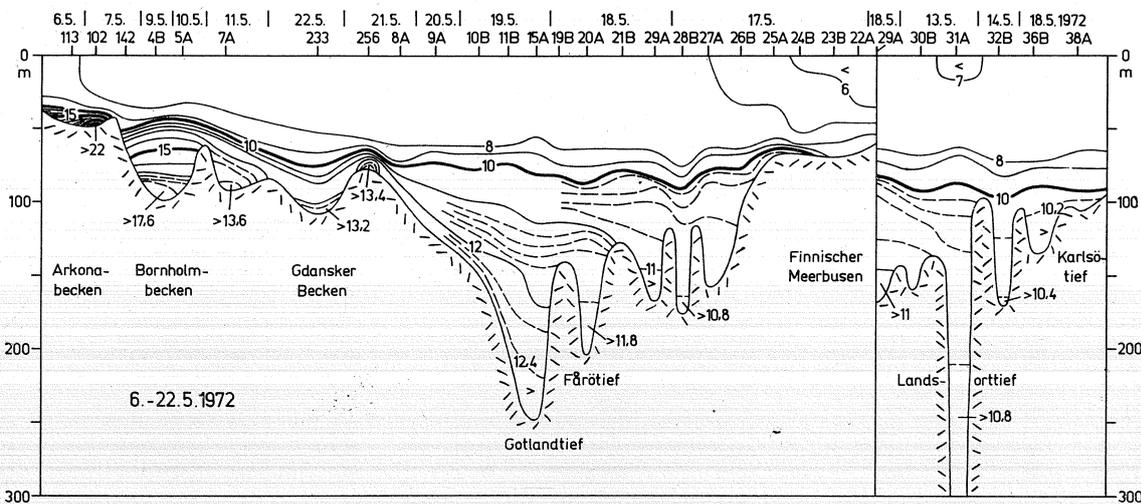
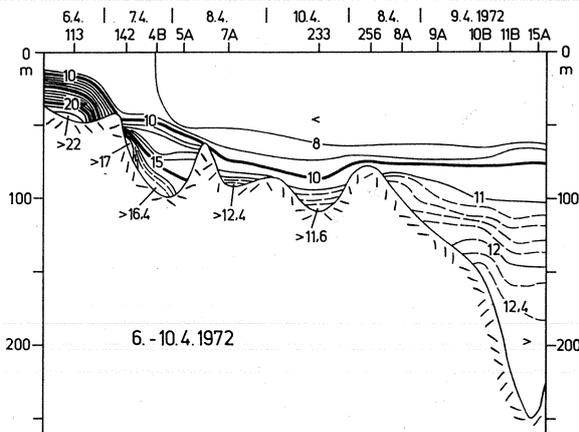


Abb. 3
Salzgehaltsverteilung
‰

5 A im östlichen Bornholmbecken am 8. April noch keine durchgreifende Wasserumschichtung erfolgt (Tabelle 3, Abb. 3). Diese war hier erst am 12. April eingetreten. Inzwischen hatte auch der Salzgehalt auf Station 4 B weiter zugenommen. Im Arkonabecken zeigte dagegen die Wiederholung der Messungen, daß bereits am 13. April ein Teil des salzreichen Tiefenwassers abgeflossen war und nur noch in unmittelbarer Grundnähe hohe Salzgehaltswerte vorlagen.

Auch auf allen späteren Meßfahrten des Jahres 1972 wurden im Tiefenwasser des Arkonabeckens hohe Salzgehaltswerte festgestellt, die zwischen 19,6 und 22,8 ‰ schwankten (Abb. 3). Diese Werte lagen im Mittel um rund 5 ‰ höher als 1970 (8) und 1971 (8). Sie übertrafen aber auch die Messungen des Jahres 1969 (8), in dem ebenfalls ein großer Salzwassereinbruch erfolgt war (2, 5).

Bedingt durch den Salzwassereinbruch im Frühjahr 1972 wurden auch im Bornholmbecken bei allen weiteren Untersuchungen sehr hohe Salzgehaltswerte im Tiefenwasser gemessen (Abb. 3). Sie lagen verbreitet über 17,6 ‰, stellenweise wurden sogar Werte über 18 ‰ nachgewiesen. Im Jahresmittel waren sie um rund 0,8 ‰ höher als nach dem Salzwassereinbruch 1969, wo nur während des Einstroms kurzzeitig Werte über 17,6 ‰ erreicht wurden (8). Verglichen mit Untersuchungen während der Stagnationsperiode 1970/71 wurden 1972 sogar um 1 — 2 ‰ höhere Werte ermittelt.

Die Temperaturen im Tiefenwasser des Arkonabeckens unterliegen starken Schwankungen (Abb. 2), die aus windbedingten und konvektiven Vermischungsvorgängen sowie aus Advektionsprozessen resultieren. Diese Schwankungen sind dem Jahresgang überlagert. Deshalb lassen sich Unterschiede zwischen den einzelnen Jahren nur schwierig abschätzen. Es scheint jedoch, daß die Temperaturschwankungen im Vergleich zu den Vorjahren (7, 8) etwas geringer waren. Außerdem war das Wasser in der gesamten Wassersäule Ende März, Anfang April wärmer als bei früheren Untersuchungen zu dieser Jahreszeit. Diese Beobachtungen unterstreichen, daß Salzwassereinbrüche, die im Winter und Frühjahr erfolgen, im Tiefenwasser der flacheren Becken und Mulden der westlichen Ostsee (z. B. Fehmarnbelt, Kadet-Rinne, Arkonabecken) fast ausnahmslos eine Erwärmung bewirken (Tabelle 1). Das schubartig aus dem Kattegat eindringende, relativ warme und salzreiche Tiefenwasser sorgt hier für eine rasche Verdrängung des durch winterliche Konvektionsprozesse bis in die Bodenschicht ausgekühlten Ostseewassers (11).

In der Bornholmsee sowie in den zentralen Becken östlich und nördlich dieses Seegebiets sind die jahreszeitlich bedingten Temperaturschwankungen unterhalb der thermohalinen Sprungschicht nur gering. Auftretende Veränderungen sind vorrangig advektiven Ursprungs und treten besonders nach Salzwassereinbrüchen auf. Am Westhang des Bornholmbeckens wird darüber hinaus im Herbst häufig der Einstrom relativ warmen Wassers beobachtet (7, 8), das aus dem Arkonabecken kommt und sich seiner Dichte entsprechend einschichtet. Ein solcher Vorgang konnte auch 1972 nachgewiesen werden (Abb. 2).

Im Gegensatz zur westlichen Ostsee sind Salzwassereinbrüche im Winter und Frühjahr in den tiefen Becken und Mulden der Ostsee (Tiefe > 70 m) zumeist mit einer erheblichen Abkühlung des Tiefenwassers verbunden. Der im April 1972 festgestellte Salzwassereinbruch führte daher im Bornholmbecken nicht nur zu einer Erhöhung des Salzgehaltes, sondern auch zu einem starken Rückgang der Temperatur in der grundnahen Wasserschicht (Tabelle 2 und 3). Im weiteren Jahresverlauf erfolgte ein kontinuierlicher Temperaturanstieg von 3,2 — 3,4 °C im April auf 4,2 — 4,4 °C im Oktober 1972 (Abb. 2). Die Erwärmung im Tiefenwasser des Bornholmbeckens nahm damit einen ähnlichen Verlauf wie nach dem Salzwassereinbruch 1969 (7). Die Temperaturen waren jedoch um 0,5 — 1 °C niedriger als 1970 (7) und um 2 — 3 °C niedriger als 1971 (8).

Die nachhaltigste und in fischereilicher Hinsicht wichtigste Veränderung, die 1972 infolge des Salzwassereinbruchs eintrat, war die Besserung der Sauerstoffver-

hältnisse in den grundnahen Wasserschichten einiger zentraler Ostseebecken. Das Arkonabecken nimmt in diesem Zusammenhang eine Sonderstellung ein, weil sein Sauerstoffgehalt nicht allein durch den Einstrom sauerstoffreichen Tiefenwassers bestimmt wird. In diesem Becken ist analog dem Temperaturverlauf ein Jahrgang vorhanden, der von kurzfristigen Veränderungen überlagert wird. Im Winter und Frühjahr, wenn die windabhängige Durchmischung am größten und die thermische Stabilisierung am geringsten ist, werden unabhängig von einem Salzwassereinbruch hohe Sauerstoffwerte in der gesamten Wassersäule (Abb. 4) gemessen. Außerdem spielt dabei auch die konvektive Vermischung eine wichtige Rolle. Während des Sommers und Frühherbstes, in Zeiten geringer Windintensität und hoher thermischer Stabilisierung, überwiegen im Tiefenwassers die Sauerstoffzehrungsvorgänge. Hierauf sind die besonders ungünstigen Sauerstoffverhältnisse zurückzuführen, die Ende Oktober 1972 im Nordteil des zentralen Arkonabeckens beobachtet wurden. Auf Station 102 betrug der Sauerstoffgehalt in 43,5 m Tiefe nur 0,27 ml/l. Etwas südlich davon, auf Station 103, war in unmittelbarer Grundnähe (45 m) überhaupt kein Sauerstoff mehr vorhanden. Schwefelwasserstoff hatte sich jedoch noch nicht gebildet. Zwei bis drei Meter oberhalb dieser Meßtiefen lagen die Sauerstoffwerte bereits wieder bei 3 — 4 ml/l.

Im Gegensatz zu diesen Stationen wurden auf der weiter südlich gelegenen Station 110 in Grundnähe (46 m) noch 1,18 ml O₂/l gemessen. Die günstigeren Sauerstoffverhältnisse in diesem Gebiet konnten bei früheren Untersuchungen darauf zurückgeführt werden, daß der Einstrom relativ salz- und sauerstoffreichen Wassers unter der Wirkung der Corioliskraft im Südteil des Arkonabeckens erfolgt (8).

Im Oktober 1972 widerspricht dem jedoch die Verteilung des Salzgehalts, der mit 20,5 ‰ auf Station 110 größer war als auf Station 103, wo nur 17,8 ‰ gemessen wurden.

Als die Messungen zwei Wochen später wiederholt wurden, hatte inzwischen die herbstliche Umstellung der Wetterlage stattgefunden. Die damit verbundenen stürmischen Winde hatten zu einer Vermischung und damit zu einer Belüftung der grundnahen Wasserschichten des Arkonabeckens geführt. Hierauf gehen auch die relativ hohen Sauerstoffwerte zurück, die auf Station 113 in Grundnähe gemessen wurden (Abb. 4).

Das im April aus der Arkonasee ins Bornholmbecken einströmende, salzreiche Tiefenwasser war gut durchlüftet und konnte die in der Tiefe lagernden, schwefelwasserstoffhaltigen Wassermassen verdrängen. Während dieser Umschichtung stiegen die Sauerstoffwerte auf über 7 ml/l an, wobei vorübergehend sauerstoffarme Zwischenschichten gebildet wurden. Ein Vergleich der Tabellen 2 und 3 läßt sehr gut das Vordringen des salz- und sauerstoffreichen Tiefenwassers in östlicher Richtung sowie den zeitlichen Verlauf der Wassererneuerung auf Station 5 A erkennen.

Auch im Mai 1972 wurden im Bornholmbecken noch hohe Sauerstoffwerte unterhalb der thermohalinen Sprungschicht gemessen (Abb. 4). Im August und Oktober war dagegen bereits wieder eine Verschlechterung zu verzeichnen. Insgesamt entwickelten sich 1972 auch die Sauerstoffverhältnisse im Bornholmbecken sehr ähnlich wie nach dem Salzwassereinbruch im Jahre 1969 (8).

Das in das Bornholmbecken einströmende, salz- und sauerstoffreiche Tiefenwasser war relativ arm an Mikronährstoffen (Tabelle 4 und 5). Im Verlauf der Wassererneuerung sank der Phosphatgehalt von 8 — 9 µg-at./l im Oktober 1971 auf Werte unter 1 µg-at./l ab. Bei den anorganischen Stickstoffverbindungen muß die Nitrifikation des Ammoniumstickstoffs im oxydierenden Milieu berücksichtigt werden. In der Stickstoffbilanz erscheint deshalb der während der Stagnationsperiode angereicherte Ammoniumstickstoff vorwiegend als Nitrat. Aus der Summe beider Stickstoffkomponenten ergibt sich, daß das im April 1972 ins Bornholmbecken frisch eingeströmte Tiefenwasser nur etwa halb soviel anorganische Stickstoffverbindungen enthielt wie das im Ok-

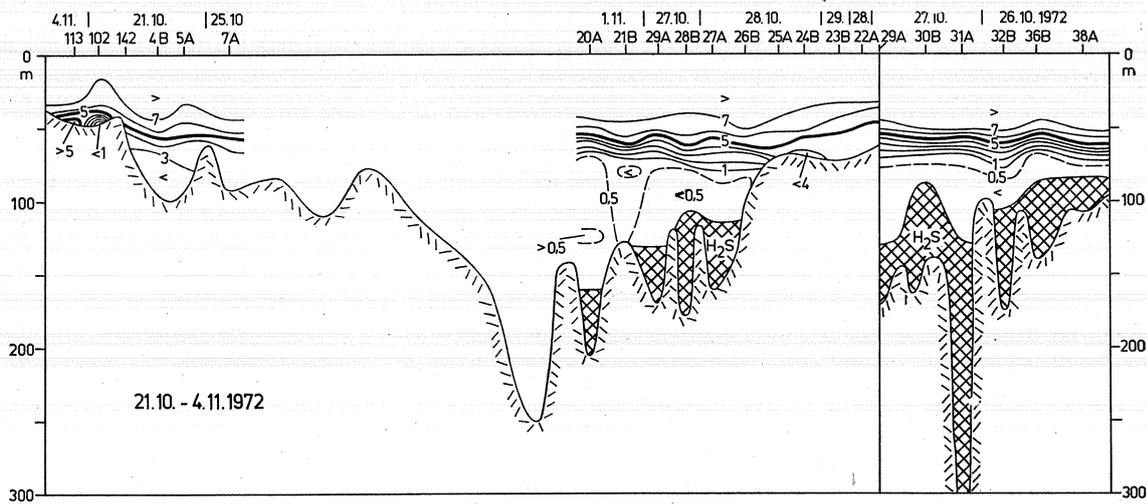
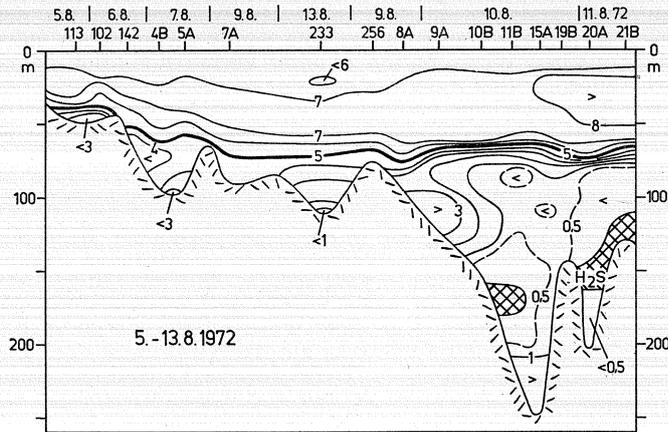
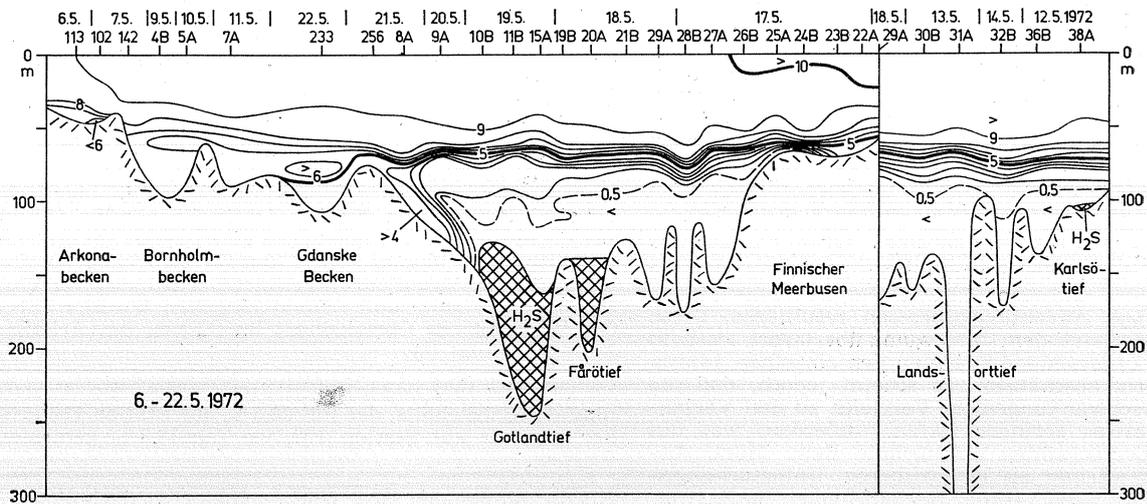
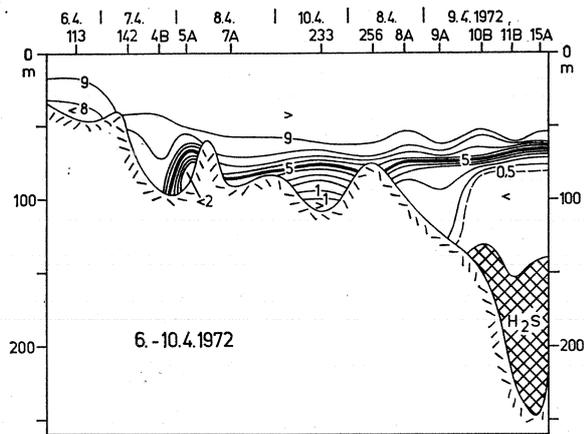


Abb. 4
Sauerstoffverteilung
ml/l

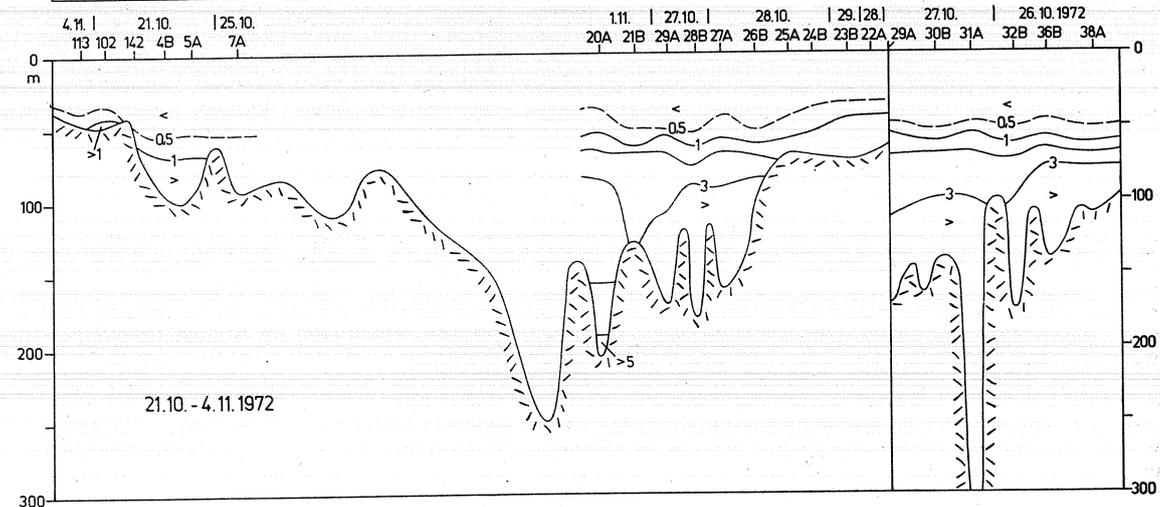
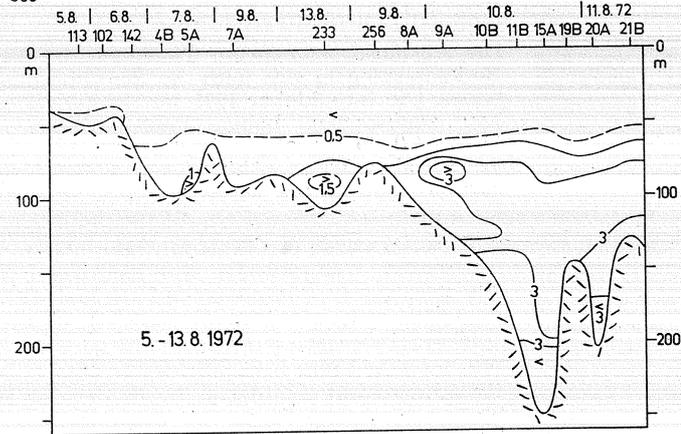
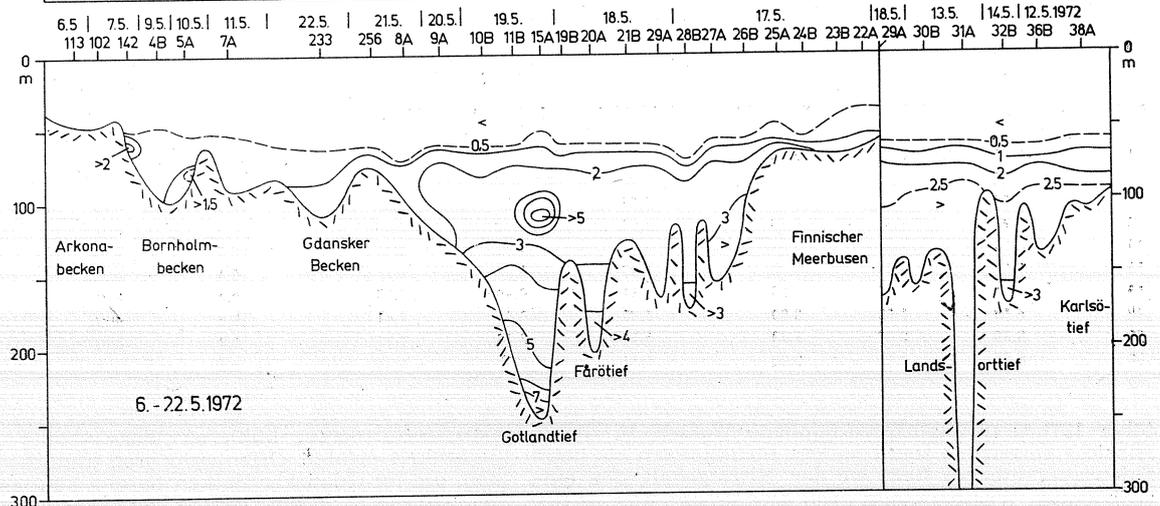
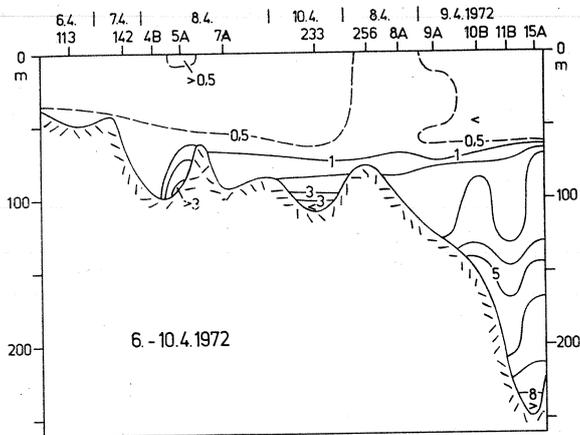


Abb. 5
Phosphatverteilung
 $\mu\text{g} - \text{at./l}$

Tab. 4 Verteilung der Mikronährstoffe Phosphat, Nitrat und Ammonium [$\mu\text{g-at./l}$] auf IBY-Station 4 B ($55^{\circ}23,0'N$, $15^{\circ}20,0'E$) im Bornholmbecken

Tiefe [m]	PO ₄ -P			NO ₃ -N			NH ₄ -N		
	14. 10. 1971	7. 4. 1972	12. 4. 1972	14. 10. 1971	7. 4. 1972	12. 4. 1972	14. 10. 1971	7. 4. 1972	12. 4. 1972
1	0,11	0,29	0,25	0,07	0,66	0,08	0,4	0,50	0,14
10	0,08	0,24	0,21	0,07	0,52	0,16	0,3	0,27	0,20
20	0,08	0,22	0,24	0,07	0,50	0,10	0,4	0,73	0,00
30	0,07	0,24	0,22	0,07	0,27	0,22	0,2	0,37	0,15
40	0,13	0,25	0,09	0,11	0,54	0,17	0,5	0,30	0,04
50	0,46	0,52	0,82	2,03	4,16	7,11	0,3	0,69	0,16
60	0,96	0,59	1,60	4,76	3,73	6,90	0,3	0,81	0,24
70	0,99	0,52	3,29	5,14	3,23	6,50	0,3	0,89	0,15
80	2,50	0,85	1,50	6,58	3,06	4,38	0,2	0,99	0,54
90	8,65	0,75	0,83	0,17	2,99	3,11	9,4	1,23	0,86

Tab. 5 Verteilung der Mikronährstoffe Phosphat, Nitrat und Ammonium [$\mu\text{g-at./l}$] auf IBY-Station 5 A ($55^{\circ}15,0'N$, $15^{\circ}59,0'E$) im Bornholmbecken

Tiefe [m]	PO ₄ -P			NO ₃ -N			NH ₄ -N		
	14. 10. 1971	8. 4. 1972	12. 4. 1972	14. 10. 1971	8. 4. 1972	12. 4. 1972	14. 10. 1971	8. 4. 1972	12. 4. 1972
1	0,06	0,54	0,40	0,07	2,01	0,29	0,5	0,37	0,66
10	0,06	0,48	0,39	0,09	1,96	0,42	0,4	0,47	0,59
20	0,06	0,43	0,43	0,09	1,57	1,68	0,4	0,36	0,59
30	0,03	0,48	0,46	0,09	1,57	1,88	0,5	0,36	0,50
40	0,16	0,48	0,43	0,09	1,57	0,38	0,5	0,34	0,64
50	0,37	0,48	0,90	1,37	1,83	7,19	0,4	0,37	0,58
60	0,74	0,94	0,85	3,54	6,66	4,55	0,3	0,32	0,99
70	2,10	1,89	0,89	3,35	8,63	3,41	0,2	0,31	1,01
80	5,95	2,57	2,39	0,14	8,15	7,77	4,8	0,31	0,43
90	9,63	3,11	0,80	0,14	8,58	3,18	8,5	0,32	1,24

tober 1971 ursprünglich vorhandene Wasser. In dieser Hinsicht herrschten somit andere Bedingungen als beim Salzwassereintrich 1969, wo der Nitratgehalt des einströmenden Wassers gleich groß oder größer war als der Gehalt an anorganischen Stickstoffverbindungen im stagnierenden Tiefenwasser (2). Die Messungen am 8. April 1972 auf Station 5 A lassen ferner erkennen, daß Wasserkörper mit einem hohen Gehalt an ehemals stagnierendem Tiefenwasser — gekennzeichnet durch relativ hohe Temperaturen und geringen Sauerstoffgehalt — reich an Nitratstickstoff waren, der offensichtlich durch die Nitrifikation des angereicherten Ammoniumstickstoffs entstanden ist.

Die während der Umschichtung im Bornholmbecken beobachteten Inversionen in der Mikronährstoffverteilung stimmen gut mit den Temperatur- und Sauerstoffverhältnissen überein. Die Tabellen 4 und 5 lassen ferner erkennen, daß das nährstoffreiche Tiefenwasser angehoben wurde, wobei die im Verlauf der Stagnationsperiode akkumulierten Phosphor- und Stickstoffverbindungen in die produktive Oberflächenschicht gelangten. Ähnlich wie nach dem Salzwassereintrich 1969 (7) erfolgte die erneute Phosphatanreicherung im Tiefenwasser dieses Beckens sehr allmählich und erreichte erst im Oktober 1972 verbreitete Werte über $1 \mu\text{g-at./l}$ (Abb. 5).

Im Gdansker Becken war die Wassererneuerung Ende Mai 1972 bereits erfolgt. Damit verbunden war eine Temperaturabnahme um rund 2°C (Abb. 2) und ein Anstieg des Salzgehalts um $1,2 \text{‰}$ (Abb. 3).

Die Sauerstoffverhältnisse erfuhren bereits im Winter 1971/72 eine erhebliche Besserung. Während im Oktober 1971 im Tiefenwasser des Gdansker Beckens noch reduzierende Bedingungen herrschten (8), wurden im April 1972 bereits Sauerstoffwerte um 1 ml/l gemessen (Abb. 4), die jedoch nicht in unmittelbarem Zusammenhang mit dem Salzwassereintrich 1972 stehen können, weil zu diesem Zeitpunkt das frische, salz- und sauerstoffreiche Wasser erst bis ins Bornholmbecken vorgedrungen war. Der durch diesen Salzwassereintrich bedingte Anstieg des Sauerstoffgehalts trat erst später ein, wobei im Mai vorübergehend sogar Werte zwischen 4 und 5 ml/l in Grundnähe beobachtet wurden. Diese Besserung war jedoch nur von kurzer Dauer. Denn schon im August 1972 war eine erneute Advektion wesentlich

sauerstoffärmeren, kühleren Wassers mit geringerem Salzgehalt erfolgt. Offenbar waren ähnliche Advektionen, die im Gdansker Becken bereits häufiger beobachtet wurden (7, 8) die Ursache für die günstige Entwicklung der Sauerstoffverhältnisse im Winter 1971/72.

Die Austauschprozesse im Tiefenwasser des Gdansker Beckens spiegeln sich auch in der Phosphatverteilung wider. Die im Oktober 1971 im Schwefelwasserstoffmilieu gemessenen, hohen Phosphatwerte von über $11 \mu\text{g-at./l}$ (9) waren im April 1972 bereits auf $2 - 3 \mu\text{g-at./l}$ abgesunken (Abb. 5) und gingen während der Wasserumschichtung weiter auf $1 - 2 \mu\text{g-at./l}$ zurück.

Im Südteil des östlichen Gotlandbeckens (Stationen 8 A und 9 A) wurde der Einstrom relativ salz- und sauerstoffreicher Wassermassen mit niedrigerer Temperatur und geringerem Phosphatgehalt im Mai 1972 beobachtet (Abb. 2—5), die das Gotlandtief (Station 15 A) im August erreichten.

Wie im Jahre 1969 hatte sich dabei eine sauerstoffarme Zwischenschicht gebildet (2, 7), in der im Bereich der Station 11 B noch Reste von Schwefelwasserstoff vorhanden waren. In Grundnähe wurden aber bereits Sauerstoffwerte von über $1,5 \text{ ml/l}$ gemessen.

Nach polnischen Beobachtungen soll das Gotlandtief bereits im Juni 1972 frei von Schwefelwasserstoff gewesen sein (11). Ende Oktober, Anfang November ergaben schwedische Untersuchungen (1), daß auf dieser Station unterhalb der Salzgehaltssprungschicht Sauerstoffkonzentrationen von 1 ml/l vorhanden waren, die bis in Grundnähe reichten. Nur in 150 bis 200 m Tiefe befand sich eine sauerstoffarme Zwischenschicht, in der Werte von $0,1 - 0,4 \text{ ml/l}$ gemessen wurden. Im Südteil des östlichen Gotlandbeckens (Station 9 A) wurden rund $4 \text{ ml O}_2/\text{l}$ in Grundnähe festgestellt. Damit hatten sich die Sauerstoffverhältnisse in diesem Becken gegenüber unseren Messungen im August 1972 nur geringfügig verändert.

Durch die Wassererneuerung stieg der Salzgehalt im Gotlandtief um rund $0,2 \text{‰}$ an, während die Temperatur um $0,5^{\circ}\text{C}$ absank. Der Phosphatgehalt, der im Oktober 1971 über $6 \mu\text{g-at./l}$ betrug (8), erreichte mit mehr als $8 \mu\text{g-at./l}$ im April 1972 einen Höchstwert und sank im August, während der Umschichtung, auf Werte unter $3 \mu\text{g-at./l}$ ab.

Sauerstoffhaltiges Wasser war im August bereits bis zum Färötief (Station 20 A) vorgestoßen und hatte dort das schwefelwasserstoffhaltige Tiefenwasser angehoben (Abb. 4). Zu einer nachhaltigen Besserung der Sauerstoffverhältnisse kam es jedoch nicht; denn Anfang November wurde auf dieser Station erneut Schwefelwasserstoff in Grundnähe nachgewiesen.

Im nördlichen und westlichen Gotlandbecken (Stationen 26 B bis 38 A) war in den Wintermonaten 1971/72 eine Besserung der Sauerstoffverhältnisse eingetreten. Während im Oktober 1971 Schwefelwasserstoff im Tiefenwasser beider Becken weit verbreitet war (8), wurde dieses lebensfeindliche Gas im Mai 1972 nur noch in unmittelbarer Grundnähe der Station 38 A nachgewiesen (Abb. 4). Diese Beobachtung steht im Einklang mit früheren Ergebnissen (8).

Im Verlauf des Sommers trat eine wesentliche Verschlechterung der Sauerstoffverhältnisse ein. Unterhalb 80 bis 100 m Tiefe war im Oktober auf allen Stationen

einschließlich des Landorttiefs (Station 31 A) Schwefelwasserstoff vorhanden. Gleichzeitig hatte auch der Phosphatgehalt im Tiefenwasser zugenommen (Abb. 5), während der Salzgehalt und die Wassertemperatur eine schwach ansteigende Tendenz aufwiesen (Abb. 2 und 3). Aufgrund der vorliegenden Untersuchungen kann nicht entschieden werden, ob im nördlichen und westlichen Gotlandbecken die Stagnationsperiode andauerte und Schwefelwasserstoff sich verstärkt entwickelte, oder ob durch die Wassererneuerung im östlichen Gotlandbecken schwefelwasserstoffhaltiges Tiefenwasser in diese Ostseeregionen gedrückt wurde.

In der Oberflächenschicht entsprachen die hydrographisch-chemischen Veränderungen dem Jahresverlauf und zeigten gegenüber den Vorjahren keine nennenswerten Unterschiede (7, 8).

Lediglich bei der Phosphatverteilung im Oktober 1972 schienen im nördlichen Gotlandbecken Abweichungen vorhanden zu sein, die sich durch einen kräftigen An-

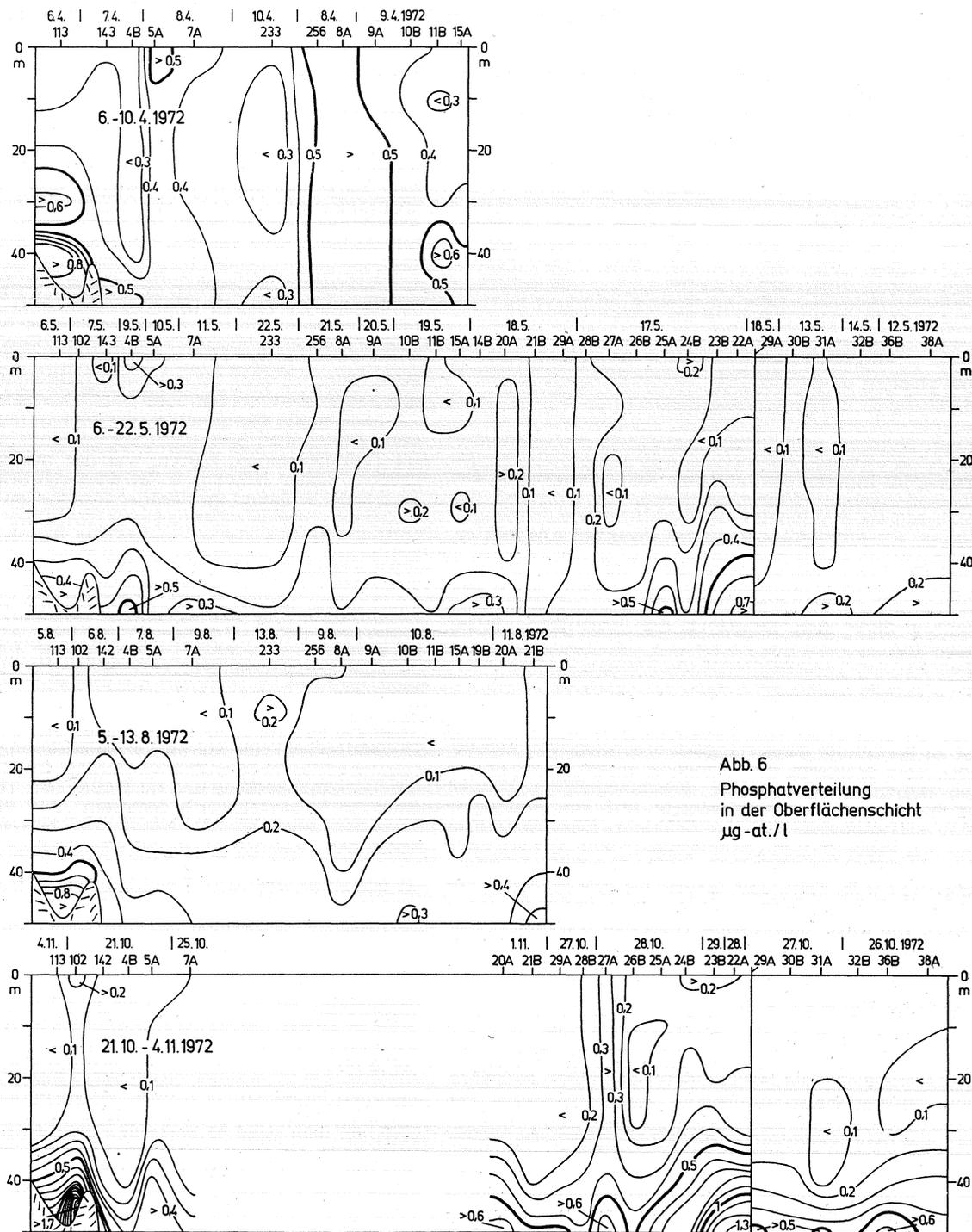


Abb. 6
Phosphatverteilung
in der Oberflächenschicht
µg-at./l

stieg der Isobathen mit mehr als 0,3 $\mu\text{g-at./l}$ abzeichnen (Abb. 6). Die 0,3 $\mu\text{g-at./l}$ -Isobathe durchstößt im Gebiet der Station 27 A sogar die Meeresoberfläche.

Abschließend sei auf eine bemerkenswerte ozeanologische Situation im Gebiet des Fehmarnbelt und der Lübecker Bucht hingewiesen.

Auf der Meßfahrt im Oktober 1972 wurde beobachtet, daß auf den Stationen 010 und 011 in Grundnähe der gesamte Sauerstoff verbraucht und Schwefelwasserstoff an seine Stelle getreten war. Dies ist umso bemerkenswerter, weil die Wassertiefe in diesem Seegebiet unter 30 m liegt.

Zusammen mit der Schwefelwasserstoffbildung hatte der Gehalt an Phosphat und Ammoniumstickstoff stark zugenommen, während Nitrit- und Nitratstickstoff nur noch spurenweise vorhanden waren. In Tabelle 6 ist die Verteilung ausgewählter hydrographisch-chemischer Parameter auf Station 010 im Fehmarnbelt zusammengestellt. Mit 11,26 $\mu\text{g-at./l}$ wurde die höchste bisher von uns in der Ostsee beobachtete Ammoniumkonzentration gemessen.

Tab. 6 Verteilung ausgewählter hydrographisch-chemischer Parameter auf Station 010 (54°34,2'N, 11°20,0'E) im Fehmarnbelt am 16. 10. 1972

Tiefe [m]	T [°C]	S [‰]	O ₂ [ml/l]	PO ₄ -P	NO ₃ -N	NO ₂ -N	NH ₄ -N
				[$\mu\text{g-at./l}$]			
0,5	11,17	10,35	7,33	0,15	0,44	0,01	0,48
5,0	11,46	11,03	7,19	0,06	0,20	0,02	0,37
10,0	12,24	13,20	6,62	0,14	0,11	0,02	0,47
15,0	12,17	15,41	5,91	0,29	0,13	0,00	0,41
17,5	12,21	17,74	4,89				
20,0	10,45	25,96	0,15	2,65	1,22	0,01	8,47
22,5	10,10	27,07	0,00 ¹⁾				
26,0	9,97	27,32	0,00 ¹⁾	3,82	0,21	0,00	11,26

¹⁾ H₂S

Eine ähnliche ungünstige Verteilung der hydrographisch-chemischen Faktoren wurde auf 5 weiteren Stationen im Inneren der Lübecker Bucht festgestellt. Der Sauerstoffgehalt dieser Stationen, die zwischen den Meßpunkten 011 und 023 lagen, war in Grundnähe kleiner als 0,5 ml/l, teilweise wurden sogar nur 0,04 ml/l erreicht.

Diese ungünstige Situation wurde während einer langen windarmen Periode beobachtet, die seit Mitte September über dem Seegebiet der westlichen Ostsee herrschte.

3. Schlußfolgerungen

Das Ereignis eines Salzwassereintruchs in die Ostsee ist an bestimmte meteorologisch-ozeanologische Voraussetzungen geknüpft, die vorrangig in den Wintermonaten Dezember bis Februar zusammentreffen können (2, 5). Abweichend davon erfolgte 1972 ein umfangreicher Salzwassereintruch im Frühjahr. Wie Messungen auf den Feuerschiffen „Fehmarnbelt“ und „Gedser Rev“ zeigten, begann der Einstrom großer Mengen salzreichen Wassers am 21. März und dauerte bis zum 10. April. Pegelbeobachtungen in Warnemünde und Darßer Ort führten zu ähnlichen Ergebnissen. Ausgelöst wurde der Salzwassereintruch durch eine Umstellung der Großwetterlage, wobei eine lange Periode mit östlichen bis südöstlichen Winden beendet wurde und zeitweilig starke westliche Winde einsetzten.

Unabhängig von diesem Salzwassereintruch trat bereits im Winter 1971/72 eine Besserung der Sauerstoffverhältnisse ein, die insbesondere zu einem Rückgang des Schwefelwasserstoffgehalts im Tiefenwasser der Ostsee führte. Nur im östlichen Gotlandbecken hatte sich die schwefelwasserstoffhaltige Tiefenschicht weiter ausgedehnt. Im Bornholmbecken war der kontinuierliche Wasseraustausch mit dem Arkonabecken die Ursache für die günstige Entwicklung der Sauerstoffverhältnisse. Derartige Advektions- und Austauschprozesse spielen vermutlich auch zwischen den anderen Becken

eine wichtige Rolle, ohne daß bisher Einzelheiten darüber bekannt sind.

Endgültig beendet wurde die Stagnationsperiode, die seit Herbst 1970 in der Ostsee herrschte (6), durch die salzreichen Wassermassen aus dem Kattegat und der Beltsee, die Ende März, Anfang April 1972 die Darßer Schwelle passierten. Dieser Salzwassereintruch hatte bereits am 7. April das Bornholmbecken erreicht. Die Wasserschichtung in diesem Becken, die zu einer durchgreifenden Besserung der Sauerstoffverhältnisse im Tiefenwasser sowie zu einer Reaktivierung der Mikronährstoffe führte, war Mitte April beendet.

Im Gdanksker Becken hatte die Erneuerung des Tiefenwassers in der 2. Maihälfte bereits stattgefunden und ebenso wie im Bornholmbecken zu einem erheblichen Anstieg des Sauerstoffgehalts und zu einer Abnahme der Mikronährstoffe geführt. Etwa zur gleichen Zeit begann auch der Einstrom verhältnismäßig salz- und sauerstoffreicher sowie nährstoffarmer Wassermassen im Südtteil des östlichen Gotlandbeckens. Dieses Wasser hatte Anfang August das Gotlandtieft erreicht.

Wie der zeitliche Verlauf der Wassererneuerung in den verschiedenen Becken der Ostsee zeigt, breitete sich das eingeströmte salz- und sauerstoffreiche Tiefenwasser sehr rasch ost- und nordwärts aus und hatte bereits 4 — 5 Monate nach Passieren der Darßer Schwelle das Gotlandtieft (Station 15 A) erreicht. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit war damit erheblich größer als nach dem Salzwassereintruch im Jahre 1969, wo für die gleiche Entfernung 8 — 9 Monate benötigt wurden (2, 5). Als Ursache hierfür ist in erster Linie der relativ hohe Salzgehalt zu nennen, der maßgeblich die Dichte des Wassers und dadurch seine Ausbreitungsgeschwindigkeit bestimmt. Abgesehen von diesem Unterschied und dem späteren Termin des Salzwassereintruchs, verliefen 1972 die hydrographisch-chemischen Veränderungen in der Ostsee ähnlich wie im Jahre 1969 (2, 5, 7).

Trotz seiner großen Ausbreitungsgeschwindigkeit hatte der Salzwassereintruch vom Frühjahr 1972 nicht das Ausmaß, um in der gesamten Ostsee kurzfristig zu einer durchgreifenden Besserung der Sauerstoffverhältnisse im Tiefenwasser zu führen, wie das 1951/52 nach dem größten bisher bekannten Salzwassereintruch der Fall war (2, 5). Während im Färötief (Station 20) im August 1972 noch eine vorübergehende Besserung der Sauerstoffverhältnisse eintrat, wurde auf den Stationen des nördlichen und westlichen Gotlandbeckens in verstärktem Maße Schwefelwasserstoff beobachtet. Abb. 1 zeigt die Veränderungen in der Verteilung des Schwefelwasserstoffs, die vom Mai bis Oktober 1972 eintraten. In den kariert-schraffierten Gebieten war Schwefelwasserstoff bei beiden Untersuchungen vorhanden. In den längs- und querschraffierten Regionen wurde H₂S dagegen nur im Mai oder im Oktober festgestellt.

Während sich im Oktober im nördlichen und westlichen Gotlandbecken eine starke Verschlechterung der Sauerstoffverhältnisse abzeichnete, wurden im Tiefenwasser des Bornholmbeckens und im Gotlandtieft (1) noch relativ hohe Sauerstoffwerte gemessen. Für diese Teilgebiete der Ostsee besteht deshalb die berechtigte Hoffnung, daß zunächst günstige Lebensbedingungen erhalten bleiben. Frühestens in der 2. Hälfte des Jahres 1973 ist mit einer kritischen Verschlechterung der Sauerstoffverhältnisse bzw. mit Schwefelwasserstoffbildung zu rechnen. Die Aussichten für eine Erneuerung des Tiefenwassers im Winter 1972/73 sind namentlich für das Bornholmbecken ungünstig, weil das im Frühjahr 1972 eingeströmte Wasser zu einer merklichen Erhöhung des Salzgehalts und damit zu einer verstärkten Stabilisierung in diesen Becken geführt hat (vgl. auch 2, 5).

Die 1972 in der Ostsee beobachteten hydrographisch-chemischen Veränderungen lassen den Schluß zu, daß der im Frühjahr dieses Jahres erfolgte Salzwassereintruch etwa die gleiche Größenordnung besaß, wie der des Jahres 1969, bei dem rund 30 km³ salz- und sauerstoffreichen Wassers in die Ostsee eingeflossen waren (2, 6). Die intensiven ozeanologischen Untersuchungen der letzten Jahre haben gezeigt, daß Salzwassereintrüche dieses Ausmaßes offenbar häufiger sind als ursprünglich angenommen wurde.

Neben dem sporadischen Einstrom großer Wassermengen aus dem Kattegat- und der Beltsee erfolgte der kontinuierliche Zustrom salzreichen Tiefenwassers in die Ostsee. Schon bei früheren Untersuchungen (4) wurde darauf hingewiesen, daß dieses Wasser zumindest zeitweilig mit organischen Stoffen belastet ist, die stark sauerstoffzehrend wirken. Ein weiterer Hinweis darauf wurde im Oktober 1972 im Gebiet der Lübecker Bucht und des Fehmarnbelt erhalten. Nach einer langen, windarmen Periode mit unzureichender vertikaler Vermischung wurde auf diesen flachen Arealen erstmals die Bildung von Schwefelwasserstoff in der grundnahen Wasserschicht beobachtet. Damit wurde bewiesen, daß,

wie bereits SCHULZ (9) vermutete, die gelegentlich sehr ungünstigen Sauerstoffverhältnisse den Rückgang des Benthos in der Lübecker Bucht vorübergehend auch im Nordteil des zentralen Arkonabeckens festgestellt. Diese Beobachtungen zeigen, daß nicht nur die tiefen Becken der Ostsee von einer ungünstigen Entwicklung der Sauerstoffverhältnisse bedroht sind. Unterhalb der halinen Sprungschicht besteht auch für einige Teilgebiete der relativ flachen westlichen Ostsee einschließlich des zentralen Arkonabeckens die akute Gefahr des Sauerstoffmangels und der zeitweiligen Schwefelwasserstoffbildung mit allen sich daraus ableitenden Konsequenzen.

Literatur

1. ENGSTRÖM, S. G.:
Report from hydrographical-planktological cruise in the Baltic with R/V Skagerak Oktober 25 - November 11, 1972
Fishery Board of Sweden, Hydrographic Department
2. FRANCKE, E. und NEHRING, D.:
Erste Beobachtungen über einen erneuten Salzwassereintritt in die Ostsee im Februar 1969¹⁾
Beitr. Meeresk. 28 (1971), S. 33-47
3. FRANCKE, E. und NEHRING, D.:
Physical and chemical variations in the eastern part of the Gotland Basin during the IBY 1969/70
OIKOS Suppl. 15 (1973), 14-20
4. NEHRING, D.:
Untersuchungen über die Verteilung der anorganischen Stickstoffverbindungen im Hinblick auf die zunehmende Wasserverschlechterung in der Ostsee
Beitr. Meeresk. 28 (1971), S. 57-74
5. NEHRING, D. und FRANCKE, E.:
Hydrographisch-chemische Veränderungen in der Ostsee seit Beginn dieses Jahrhunderts und während des Internationalen Ostseejahres 1969/70¹⁾
Fischereiforsch. Rostock, 9 (1971), S. 35-42
6. NEHRING, D. und FRANCKE, E.:
Beiträge der DDR zur internationalen Ostseeforschung. Das ozeanographische Beobachtungsmaterial des Internationalen Ostseejahres 1969/70. Teil I: Meßwerte des Jahres 1969
Geod. Geoph. Veröff. R. IV H. 4 (1971), 63 S.
7. NEHRING, D. und FRANCKE, E.:
Zusammenfassende Darstellung der hydrographisch-chemischen Veränderungen in der Ostsee 1969/70
Fischereiforsch., Rostock 9, 1971, 35-42
8. NEHRING, D. und FRANCKE, E.:
Hydrographisch-chemische Veränderungen in der Ostsee im Jahre 1971
Fischereiforsch., Rostock, 11, 1973 45-52
9. SCHULZ, S.:
Rückgang des Benthos in der Lübecker Bucht
Monatsber. Dt. Akad. Wiss. zu Berlin 10 (1968), S. 748-754
10. SIUDZINSKI, K., MAJEWSKI, A. und VOIGT, K.:
Preliminary Report on a thorough renewal of the Baltic deep water starting in spring 1972
ICES C. M. 1972/C: 2 Hydrography Committee
11. STURM, M.:
Zu Fragen des horizontalen Wärmeaustausches zwischen Nord- und Ostsee
Monatsber. Dt. Akad. Wiss. Berlin 12 (1970), S. 267-286
12. . . .
The Baltic Year 1969/70. Program manual Göteborg 1968

¹⁾ In dieser Publikation wird die Originalliteratur ausführlich zitiert.