

Meereswissenschaftliche Berichte
MARINE SCIENCE REPORTS

No. 7

Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1993

von

**Dietwart Nehring, Wolfgang Matthäus, Hans-Ulrich Lass
und Günther Nausch**

Institut für Ostseeforschung
Warnemünde
1994

Inhalt

	Seite
Zusammenfassung	3
Summary	4
1. Einleitung	5
2. Meteorologische Bedingungen	9
3. Wasseraustausch im Bereich der Darßer Schwelle	14
3.1 Salzwassereinbruch im Januar 1993	14
3.2 Beobachtungen an der Bojenstation „Darßer Schwelle“	22
3.2.1 Wassertemperatur und Salzgehalt	22
3.2.2 Strömung	28
4. Hydrographisch-chemische Bedingungen	33
4.1 Wassertemperatur	34
4.2 Salzgehalt	36
4.3 Sauerstoff und Schwefelwasserstoff	38
4.4 Nährsalze	41
5. Spezielle Untersuchungen im Gotlandtief	47
5.1 Hydrographisch-chemische Veränderungen im Tiefenwasser während der Stagnationsperiode 1977-1993	47
5.2 Austausch des Tiefenwassers 1993	52
6. Diskussion	58
Danksagung	65
Literaturverzeichnis	66

Zusammenfassung

Die Temperaturen in der Oberflächenschicht und im Zwischenwasser der untersuchten Ostseeregionen wurden durch den milden Winter 1992/93 sowie das überdurchschnittlich warme Frühjahr und den deutlich zu kühlen Sommer 1993 geprägt.

Im Januar 1993 erfolgte ein Salzwassereinbruch mittlerer Stärke, der gegenüber früheren Ereignissen dieser Art einige Besonderheiten, wie den Anstieg des Wasserstandes in der Ostsee auf 70 cm über die mittlere Füllung in nur drei Wochen und den anschließenden erheblichen Rücktransport von Salz in die Beltsee, aufwies. Das salz- und sauerstoffreiche Wasser drang sehr schnell in die zentralen Ostseebecken vor. Erste Auswirkungen wurden bereits Anfang April im Gotlandtief nachgewiesen. Der Salzwassereinbruch unterbrach dort die seit 16 Jahren herrschende und bisher längste Stagnationsperiode.

Während der Umschichtung traten im Gotlandtief kurzfristige Fluktuationen zwischen oxischen und anoxischen Bedingungen auf, die durch die insgesamt nur geringe Zunahme des Salzgehalts begünstigt wurden und Pulsationen im Einstrom durch die Stolper Rinne widerspiegeln. Die meiste Zeit über blieb eine schwefelwasserstoffhaltige Zwischenschicht erhalten. Nur Anfang Juli 1993 wurden kurzzeitig in der gesamten Wassersäule oxische Bedingungen registriert. Zwischen der Sauerstoff-Schwefelwasserstoff-Verteilung und den Konzentrationen der anorganischen Phosphor- und Stickstoffverbindungen bestanden enge Korrelationen.

Im ersten Halbjahr 1993 herrschten die seit Ende der 70er Jahre günstigsten Sauerstoffverhältnisse im Tiefenwasser der zentralen Ostsee, wobei nur im Fårötief anoxische Bedingungen erhalten blieben. Unter stagnierenden Bedingungen kam es in der zweiten Jahreshälfte zu einem deutlichen Rückgang des Sauerstoffgehalts im Bornholm- und Danziger Becken sowie zur erneuten Ausbreitung von Schwefelwasserstoff im Gotlandtief.

Die Winterkonzentrationen des Phosphats und Nitrats ordneten sich 1993 in die positiven Gesamttrends ein, die seit einigen Jahrzehnten in der Oberflächenschicht der eigentlichen Ostsee beobachtet werden. Als Besonderheit muß die ungewöhnlich lange Verarmung an Nährsalzen in der euphotischen Schicht der östlichen Gotlandsee hervorgehoben werden, die bis Mitte November 1993 vorhielt und auch durch extrem niedrige Silikatkonzentrationen gekennzeichnet war.

Summary

The temperatures in the surface layer and in the intermediate water of the Baltic sub-regions under investigation were dominated by the mild winter 1992/93, the warm spring and the cool summer 1993.

A major Baltic inflow of moderate intensity was observed in January 1993 transporting water of higher salinity into the central Baltic basins. This event was characterized by some particularities such as the short duration of the inflow lifting the sea level of the Baltic up to 70 cm above the mean value within only three weeks and the following considerable back flow of salt from the Arkona Basin into the Belt Sea. Additionally, the oxygen containing water with the higher salinity proceeded very quickly to the central Baltic basins influencing the bottom water of the Gotland Deep as early as the beginning of April. This influx interrupted the longest stagnation period observed so far lasting there for about 16 years.

Short-term fluctuations between oxic and anoxic conditions were observed during the deep-water renewal in the Gotland Deep favoured by small vertical salinity gradients and by pulsations of the inflow through the Stolpe Channel. An intermediate layer containing hydrogen sulphide was preserved during most of the time. Only in the beginning of July 1993, oxygen was measured in the whole water column. The concentrations of the inorganic phosphorus and nitrogen compounds closely correlated with the distribution of oxygen and hydrogen sulphide.

During the first half of 1993, the oxygen conditions were the most favourable in central Baltic deep waters since the late 1970ies. Hydrogen sulphide was only present in the Fårö Deep. Under stagnant conditions in the second part of 1993, oxygen conditions strongly deteriorated in the deep water of the Bornholm and Gdańsk Basins, whereas hydrogen sulphide again spread in the bottom water of the Gotland Deep.

In 1993, the winter concentrations of phosphate and nitrate met the positive overall trends observed in the surface layer of the Baltic proper in recent decades. The long lasting nutrient impoverishment in the euphotic layer of the eastern Gotland Sea also including extremely low silicate concentrations must be emphasized as particularity in November 1993.

1. Einleitung

Das Umweltüberwachungsprogramm des Instituts für Ostseeforschung Warnemünde (IOW) wurde auch 1993 fortgesetzt. Die Grundlage hierfür bildete die Verwaltungsvereinbarung mit dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Hamburg. Sie beinhaltet die Durchführung meereskundlicher Untersuchungen vor der Küste des Landes Mecklenburg-Vorpommern und gestattet auch die kontinuierliche Fortsetzung des bereits 1969 vom früheren Institut für Meereskunde in Warnemünde begonnenen hydrographisch-chemischen Observatoriumsprogramms in der westlichen und zentralen Ostsee. Die Ergebnisse des Vorjahres wurden von NEHRING, MATTHÄUS und LASS (1993) in der Deutschen Hydrographischen Zeitschrift publiziert. Eine Kurzfassung des vorliegenden Berichtes erscheint an gleicher Stelle.

Das hydrographisch-chemische Überwachungsprogramm des IOW in der Ostsee dient der aktuellen Zustandseinschätzung der beprobten Seegebiete und der Kontrolle des Wasseraustausches zwischen Ostsee und Nordsee. Es bildet ferner eine wichtige Grundlage für die Abschätzung von jahreszeitlichen und zwischenjährlichen Anomalien und die Untersuchung von Langzeitvariationen sowie für die Prognosen der Ostseefischerei. Für die Bundesrepublik Deutschland werden darüber hinaus im Rahmen dieser Monitoring-Aufgabe auch Verpflichtungen gegenüber der Helsinki-Kommission (HELCOM) zum Schutz der Meeresumwelt der Ostsee wahrgenommen.

Neben den 5 terminlich fixierten Monitoring-Fahrten wurden im Januar 1993 zusätzliche schiffsgebundene Messungen durchgeführt, als sich beim Überströmen der Darßer Schwelle mit salz- und sauerstoffreichem Wasser die Anzeichen für einen Salzwassereinbruch verdichteten. Abb. 1 zeigt die bearbeiteten Stationen, soweit sie für die nachfolgenden Auswertungen von Bedeutung sind. Tabelle 1 gestattet die Zuordnung der Standardstationsbezeichnungen des IOW zu den Stationen des International Baltic Year 1969/70 und des Baltic Monitoring Programme der HELCOM, deren Bezeichnungen im Ostseeraum häufig verwendet werden.

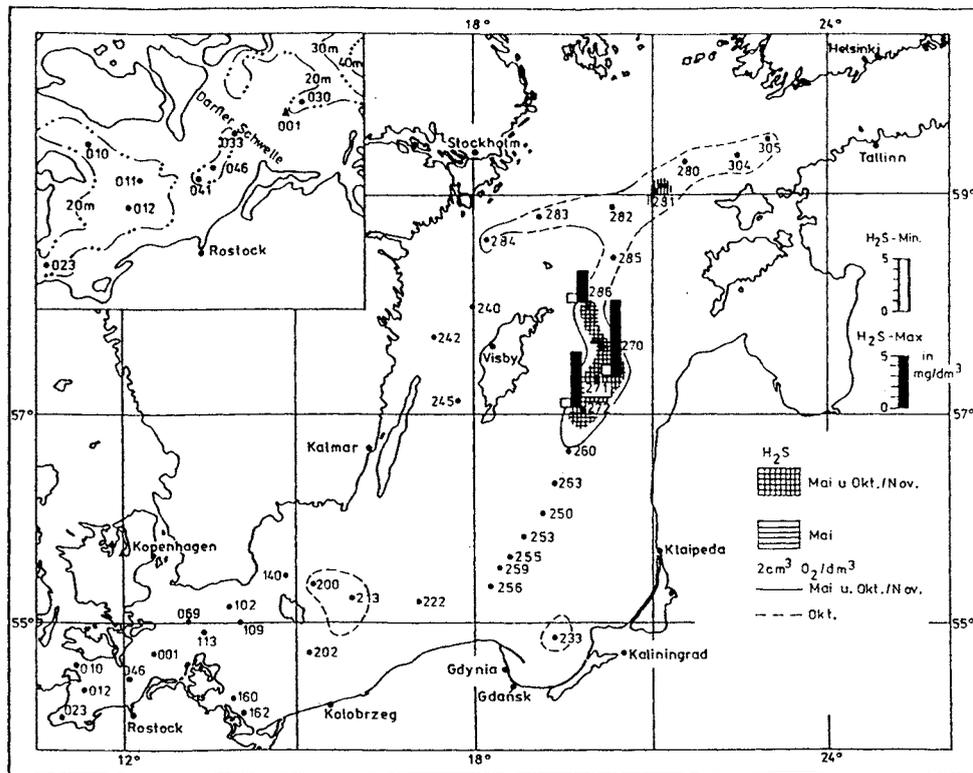


Abb. 1
 Stationskarte und Gebiete mit Sauerstoffmangel und Schwefelwasserstoff in
 der grundnahen Wasserschicht der Ostsee im Jahre 1993

Tabelle 1 Standardstationsbezeichnungen des IOW und internationale Kennung gemäß International Baltic Year (IBY) 1969/70 und Baltic Monitoring Programme (BMP) der HELCOM

IOW ¹	IBY	HELCOM	IOW	IBY	HELCOM
010		BMP N1	260	BY 10A	
012		BMP M2	270	BY 19B	
030		BMP K8	271	BY 15B	BMP J1
046		BMP M1	272	BY 11B	
069	BY 1B	BMP K7	280	BY 27A	
109	BY 2A	BMP K4	281	BY 28B	BMP H2
113		BMP K5	282	BY 29A	
200	BY 4B		283	BY 30B	
202	BY 6B		284	BY 31A	BMP H3
213	BY 5A	BMP K2	285	BY 21B	
222	BY 7A		286	BY 20A	
233		BMP L1	300	BY 22A	
240	BY 32B		301	BY 23B	BMP F3
242	BY 36A		302	BY 24B	
245	BY 38A	BMP I1	303	BY 25B	BMP F5
250	BY 9A		304	BY 26B	
255	BY 8A		305		BMP H1
259		BMP K1			

¹ Hier nicht aufgeführte Stationen des IOW sind weder IBY- noch BMP-Stationen

Die Termine der Monitoring-Fahrten sowie die beprobten Seegebiete sind den Abb. 18–22 zu entnehmen. Auf allen regulären Monitoring-Fahrten des Jahres 1993 wurde auch das Danziger Tief beprobt. Außer im August trifft das ebenfalls für das nördliche und westliche Gotlandbecken zu. Im Mai wurden zusätzliche Messungen im Gotland- und Fårötief sowie im nördlichen Gotlandbecken durchgeführt, um die Auswirkungen des eingeströmten salz- und sauerstoffreichen Wassers detaillierter zu erfassen. Zusammen mit anderen Forschungsvorhaben erfolgten im Juni–Juli weitere zusätzliche Untersuchungen zu dieser Problematik im Gotlandtief. Die zügige Bearbeitung des Monitoring-Programms infolge sehr günstiger meteorologischer Bedingungen im Oktober – November 1993 gestattete darüber hinaus ergänzende Messungen auf internationalen Standardstationen im Finnischen Meerbusen.

Der Überwachung des Wasseraustausches zwischen Ostsee und Nordsee dient eine autonome Bojenstation im Gebiet der Darßer Schwelle (Stat. 001), an der ganzjährig die Wassertemperatur und der Salzgehalt sowie die Strömungsgeschwindigkeit und -richtung registriert werden. Diese Untersuchungen sind ebenfalls Bestandteil des IOW-Monitoring-Programms und ergänzen die schiffsgebundenen Messungen.

Das hydrographisch-chemische Meßprogramm auf den Monitoring-Fahrten wurde unter Beachtung der Richtlinien für die dritte Stufe des Baltic Monitoring Programme (BMP) der HELCOM durchgeführt (HELCOM, 1988). Es umfaßt die Bestimmung der Wassertemperatur aus Sondenregistrierungen sowie des Salzgehalts und der Konzentrationen von Sauerstoff, Schwefelwasserstoff, Phosphat, Nitrit, Nitrat und Silikat in diskreten Wasserproben. Auf ausgewählten Stationen wurde auch der Gehalt an Ammonium sowie an Gesamtphosphor und -stickstoff analysiert. Die Gewinnung der Wasserproben, sowie die verwendeten Meßverfahren und ihre Eichung wurden bereits von NEHRING, MATTHÄUS und LASS (1993) ausführlich erläutert. Dies gilt auch für die kontinuierlichen Registrierungen der Wassertemperatur und des Salzgehalts sowie für die Strömungsmessungen an der Bojenstation „Darßer Schwelle“.

Neben den hydrographisch-chemischen Untersuchungen werden auch meteorologische Beobachtungen durchgeführt. An Bord der Forschungsschiffe „Professor Albrecht Penck“ und „A. v. Humboldt“ stehen hierfür automatische Wetterstationen zur Verfügung. Darüber hinaus werden auch Ergebnisse von Messungen an den Wetterstationen Warnemünde und Arkona in die Auswertung einbezogen.

2. Meteorologische Bedingungen

Die Oberflächenschicht des Meeres wird nachhaltig durch die meteorologischen Bedingungen beeinflusst. Informationen über den Witterungsablauf sind daher auch für die hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee von Bedeutung.

Frühere Untersuchungen haben gezeigt, daß im Winter zwischen den Lufttemperaturen an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns und den Wassertemperaturen in der Oberflächenschicht der zentralen Ostsee enge Beziehungen bestehen (NEHRING u.a., 1990). Die Strenge eines Winters spiegelt sich in der Kältesumme der Lufttemperaturen wider. Analog dazu kann der Sommer durch seine Wärmesumme charakterisiert werden.

In Tabelle 2 sind Temperatursummen für den Winter 1992/93 und für den Sommer 1993 zusammengefaßt. Sie basieren auf Messungen an der Wetterstation Warnemünde des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach, Wetteramt Rostock.

Tabelle 2 Temperatursummen der Lufttemperaturen an der Wetterstation Warnemünde (TIESEL, 1993); mittlere Temperatursummen 1961 bis 1990 in Klammern

	Kältesummen ¹⁾ (K)		Wärmesummen ²⁾ (K)	
Nov. 1992	-	(2,4)	Apr. 1993	8,1 (0,3)
Dez. 1992	15,2	(26,5)	Mai 1993	8,0 (5,2)
Jan. 1993	41,3	(50,2)	Jun. 1993	12,6 (19,2)
Feb. 1993	6,2	(32,7)	Jul. 1993	26,6 (41,6)
Mär. 1993	1,5	(10,7)	Aug. 1993	19,0 (38,2)
Apr. 1993	-	(0,4)	Sep. 1993	0,3 (7,7)
			Okt. 1993	- (0,5)
Σ 1992/93	64,2	(123,0)	Σ 1993	75,0 (112,7)

¹⁾ Summe der negativen Tagesmitteltemperaturen

²⁾ Summe der über 16 °C liegenden Beträge der Tagesmitteltemperaturen

Die Kältesumme von 64,2 K liegt deutlich unter dem langjährigen Mittelwert, so daß der Winter 1992/93 insgesamt als mild einzustufen ist. Die auf den Kältesummen basierenden Schlußfolgerungen über die Vereisung der Ostsee (HUPFER, 1978) gestatten gerade noch die Klassifikation dieses Winters als eisarm.

Die Wärmesumme im April 1993 war die höchste seit Beginn der vorliegenden Beobachtungsreihe im Jahre 1947. Auch im Mai wurde der langjährige Mittelwert überschritten. In den eigentlichen Sommermonaten lagen die Wärmesummen jedoch deutlich darunter. In Übereinstimmung mit der Wärmesumme von insgesamt 75,0 K kann der Sommer 1993 daher nur als mäßig warm (vgl. NEHRING u.a., 1990) klassifiziert werden.

Tabelle 3 enthält Angaben zur Anomalie der Lufttemperaturen sowie zur prozentualen Sonnenscheindauer und Niederschlagshöhe im Jahre 1993 an der Wetterstation Arkona. Die positiven Temperaturanomalien an dieser Station deuten ebenso wie die Kältesummen an der Station Warnemünde auf einen milden Winter hin. Erst ab Juni traten im Einklang mit dem als mäßig warm klassifizierten Sommer 1993 negative Temperaturanomalien auf, die im November ihren Höchstwert erreichten. Im Jahresmittel glichen sich positive und negative Temperaturanomalien aus.

Die prozentuale Sonnenscheindauer entsprach im Mittel ebenfalls dem langjährigen Erwartungswert. Sie wurde sehr stark durch den hohen Wert im Januar geprägt. Diese Jahreszeit ist jedoch infolge niedrigen Sonnenstandes von geringer Bedeutung für die Phytoplanktonentwicklung der Ostsee. Wichtiger sind in diesem Zusammenhang die positiven Anomalien im April und Mai 1993, die den Verlauf der Planktonblüte beschleunigen können.

Bei der prozentualen Niederschlagshöhe lag der Jahresmittelwert deutlich über 100 %. Besonders niederschlagsreich waren die Monate September, Oktober und Dezember, während der März 1993 niederschlagsarm war. Auch im April und im November fiel relativ wenig Niederschlag.

Tabelle 3 Abweichungen der monatlichen Mitteltemperaturen der Luft (ΔT_L) sowie prozentualer Anteil der monatlichen Sonnenscheindauer (SS) und Niederschlagshöhe (NH) an der Wetterstation Arkona im Jahre 1993 bezogen auf die Normalwerte des Zeitraumes 1951 bis 1980 (ANONYM, 1993)

Monat (1993)	ΔT_L (K)	SS (%)	NH (%)
Januar	2,1	213	119
Februar	1,3	72	71
März	1,5	102	19
April	1,3	115	46
Mai	1,7	115	73
Juni	-0,1	95	78
Juli	-0,6	76	158
August	-1,0	114	90
September	-1,9	61	234
Oktober	-1,2	93	194
November	-2,4	55	49
Dezember	0,5	76	189
Mittel	0,1	99	110

Die Windverhältnisse des Jahres 1993 an der Wetterstation Arkona, die in Abb. 2 dargestellt sind, wurden zu etwa 30 % durch Winde aus westlichen, zu 24 % aus südwestlichen bis südlichen und zu 22 % der Fälle aus östlichen Richtungen geprägt. Die Ostkomponente des Windes (Abb. 3) zeigte im Verlaufe des Jahres drei länger andauernde Perioden mit westlichen Winden im Januar, Juni bis August und Dezember, während im April/Mai, September und November östliche Winde dominierten.

Die über etwa drei Wochen anhaltende Westwetterlage zwischen dem 6. und 28. Januar 1993 führte im Bereich des Übergangsgebietes zwischen Nord- und Ostsee zu anhaltenden Weststürmen mit mittleren Windgeschwindigkeiten von 14,5 m/s (Abb. 4), die in drei Orkanen (14., 22. und 24. Januar 1993) gipfelten. Dabei wurden an der Wetterstation Arkona Windgeschwindigkeiten von mehr als 40 m/s registriert.

Arkona 1993
Gesamtübersicht

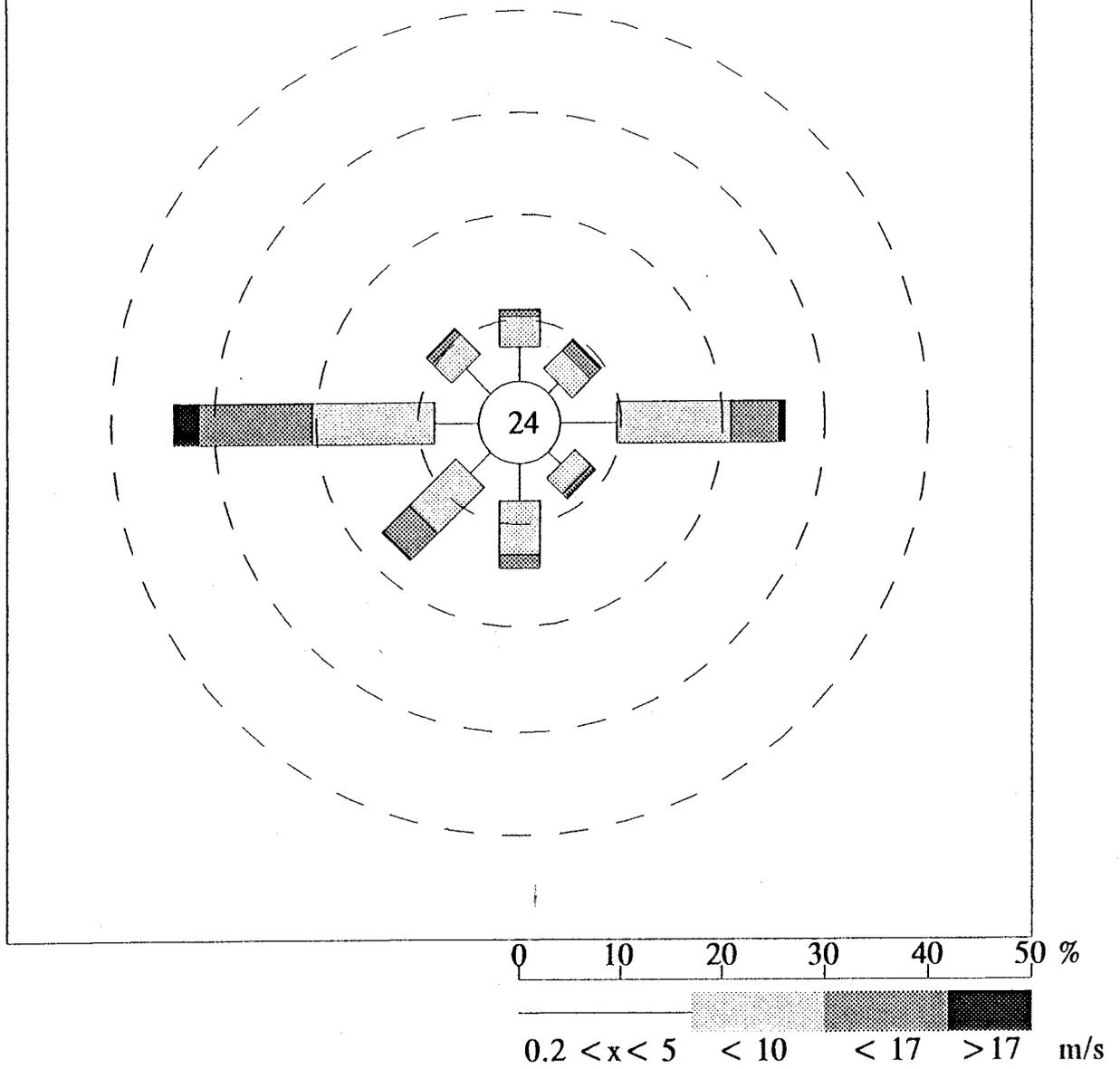


Abb. 2
Verteilung von Windrichtung und -geschwindigkeit an der Wetterstation Arkona
im gesamten Jahr 1993

3. Wasseraustausch im Bereich der Darßer Schwelle

3.1 Salzwassereinbruch im Januar 1993

Im Januar 1993 erfolgte nach 16 Jahren wieder ein effektiver Salzwassereinbruch. Erstmals in der Geschichte der Erforschung dieses Phänomens konnte dabei die zeitliche Entwicklung während des Überströmens der Darßer Schwelle und das Auffüllen des Arkonabeckens mit salz- und sauerstoffreichem Wasser messend verfolgt werden (MATTHÄUS u. a. 1993). Mit Hilfe von Temperatur-, Leitfähigkeits- und Strömungsmessungen in 3 bis 4 Horizonten an der Station 001 sowie CTD-Sondierungen auf einem Längsschnitt von der Darßer Schwelle ins Arkonabecken wurde der Einstromprozeß erfaßt.

Die Entfernung zwischen dem Salzwasserreservoir des Kattegats und dem Arkonabecken über den Sund ist relativ gering (etwa 100 km). Bei hohem Wasserstand im Kattegat und/oder niedrigem Wasserstand im Arkonabecken kann daher sehr schnell salzreiches Wasser (> 25 PSU) über die Drogden Schwelle (Querschnitt $0,1 \text{ km}^2$) in die Ostsee vordringen. Der Einstrom über diese Schwelle allein kann jedoch trotz des hohen Salzgehaltes des Wassers nicht zu einem Salzwassereinbruch führen, da die einströmenden Volumina gering bleiben. Erst wenn das über den Großen Belt, den Fehmarnbelt und die Mecklenburger Bucht (ca. 280 km) transportierte salzreiche Wasser (> 17 PSU) in breiter Front mehrere Tage lang über die Darßer Schwelle (Querschnitt $0,8 \text{ km}^2$) gedrückt wird, spricht man von einem Salzwassereinbruch (MATTHÄUS, FRANCK, 1992). Auf seinem Weg durch die flache Beltsee wird dieses Wasser infolge seegangsbedingter Durchmischung mit Sauerstoff gesättigt und dringt zusammen mit dem über den Sund eingeströmten Wasser in die Tiefenbecken der zentralen Ostsee vor. Die dominierende Rolle bei Salzwassereinbrüchen spielt somit die Darßer Schwelle, wobei stets auch das über den Sund einströmende Wasser einen Beitrag leistet.

Einstromprozesse, die in Salzwassereinbrüchen kulminieren, weisen zwei grundlegende Phasen auf, die Vorlaufphase und die Periode des effektiven Einstroms überdurchschnittlich salzreichen Wassers, den eigentlichen Salzwassereinbruch (FRANCK, MATTHÄUS, 1992). Die Vorlaufphase umfaßt den Zeitraum zwischen einem dem Ereignis zuzuordnenden minimalen Ostseewasserstand und dem Beginn des Salzwassereinbruchs (im Durchschnitt 22 Tage). Sie ist durch den Einstrom von Wasser mit vergleichsweise niedrigem Salzgehalt über die

Darßer Schwelle gekennzeichnet. Über die Drogden-Schwelle strömt dabei bereits Wasser höheren Salzgehaltes ein. In der Vorlaufphase kommt es zu einem unterschiedlich starken mittleren Anstieg des Ostseewasserstandes. Während des Salzwassereintruchs, der sich bis zum Erreichen eines maximalen Wasserstandes der Ostsee erstreckt, erfolgt der Einstrom beträchtlicher Wassermengen mit hohen Salzgehalten über beide Schwellen.

Diese zwei Phasen waren auch für den Salzwassereintruch im Januar 1993 charakteristisch. Eine längere Periode östlicher bis südöstlicher Winde Ende 1992 – Anfang 1993 (Abb. 5B) führte zur Erniedrigung des Wasserstandes der Ostsee auf etwa 20 cm unter dem mittleren Füllungsgrad. Daran schloß sich eine 3wöchige Periode an, in der in ununterbrochener Folge Tiefdruckgebiete vom Nordostatlantik über die Norwegische See bzw. die Nord- und Ostsee hinwegzogen und zwischen dem 6. und 26. Januar ständig starke bis stürmische westliche Winde im Übergangsbereich zwischen Nord- und Ostsee aufrechterhielten (Abb. 4 und 5C). Mit dem Drehen des Windes von östlichen auf westliche Richtungen setzte der Einstrom in die Ostsee ein und hielt bis auf kurze Unterbrechungen bis zum 28. Januar an. Dieser Einstrom führte zusammen mit der Flußwasserzufuhr zu einem Anstieg des mittleren Wasserstandes in der Ostsee um 90 cm (Abb. 6).

Begünstigt durch den geringen Füllungsgrad der Ostsee begann bereits mit der Umstellung der Großwetterlage am 6. Januar der Einstrom von sehr salzreichem Wasser (etwa 27 PSU, vgl. HÅKANSSON u. a. 1993) durch den Sund direkt in das Arkonabecken, wo sich eine dünne salzreiche Bodenschicht ausbildete (Abb. 7A). Die Mächtigkeit dieser Bodenschicht veränderte sich nur geringfügig zwischen dem 21. und 28. Januar, was auf ein Gleichgewicht zwischen den über den Sund einströmenden und über das Bornholmshat abfließenden Mengen dieser charakteristischen Wassermasse (Abb. 8) hinweist.

Der Einstrom des salzreichen Wassers über den Großen Belt und die Darßer Schwelle in das Arkonabecken war um ein bis zwei Wochen verzögert. Der Salzgehalt auf der Darßer Schwelle erreichte am 13. Januar 15 PSU, blieb dann mehrere Tage annähernd konstant und überschritt 17 PSU am 18. Januar (Abb. 9), womit die Hauptphase des Einstroms – der eigentliche Salzwassereintruch – begann.

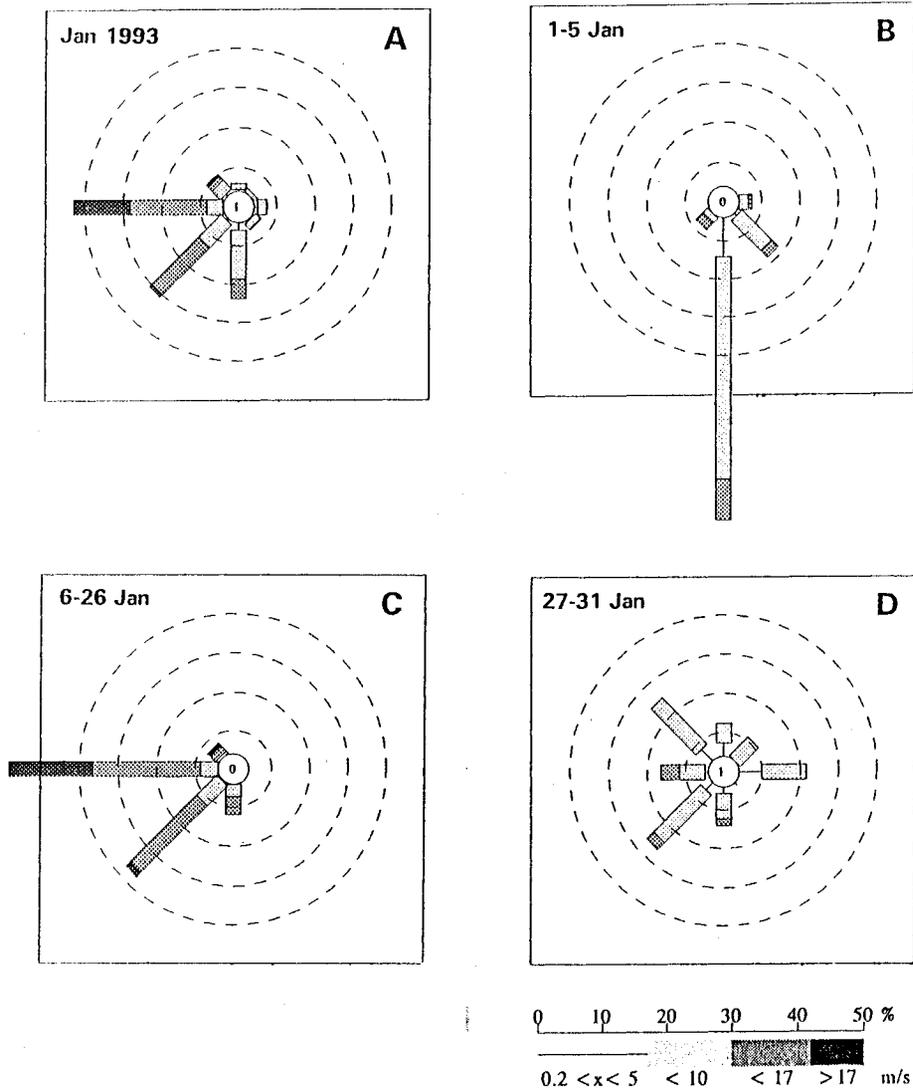


Abb. 5
Verteilung von Windrichtung und -geschwindigkeit an der Wetterstation Arkona im gesamten Monat Januar 1993 (A) und während der drei charakteristischen Großwetterlagen des Januar (B-D)

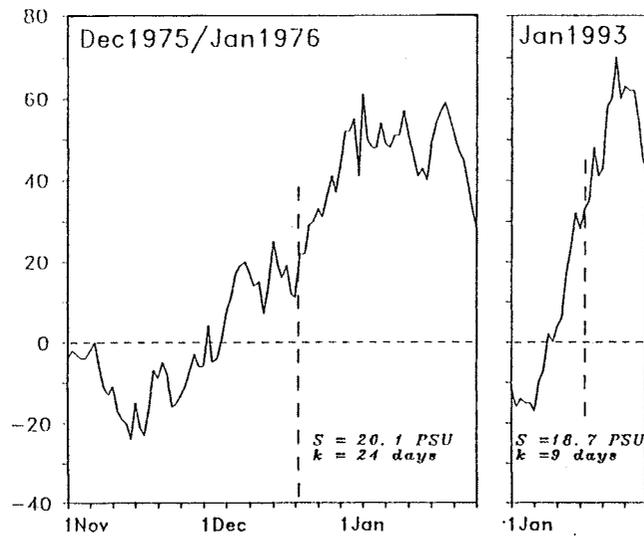


Abb. 6
 Variationen im Füllungsgrad der Ostsee (Pegel Landsort) während des Salzwassereintruchs im Januar 1993 verglichen mit dem Einbruch 1975/76 (S = mittlerer Salzgehalt des während der Andauer k über die Darßer Schwelle eingeströmten salzreichen Wassers [$\geq 17 \text{ PSU}$])

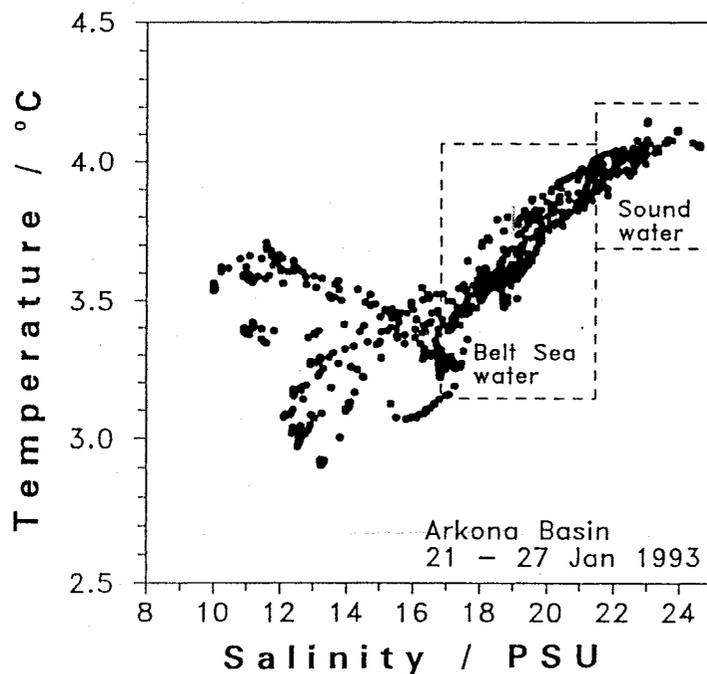


Abb. 8
 TS-Diagramm der CTD-Messungen im zentralen Arkonabecken während der Hauptphase des Salzwassereintruchs

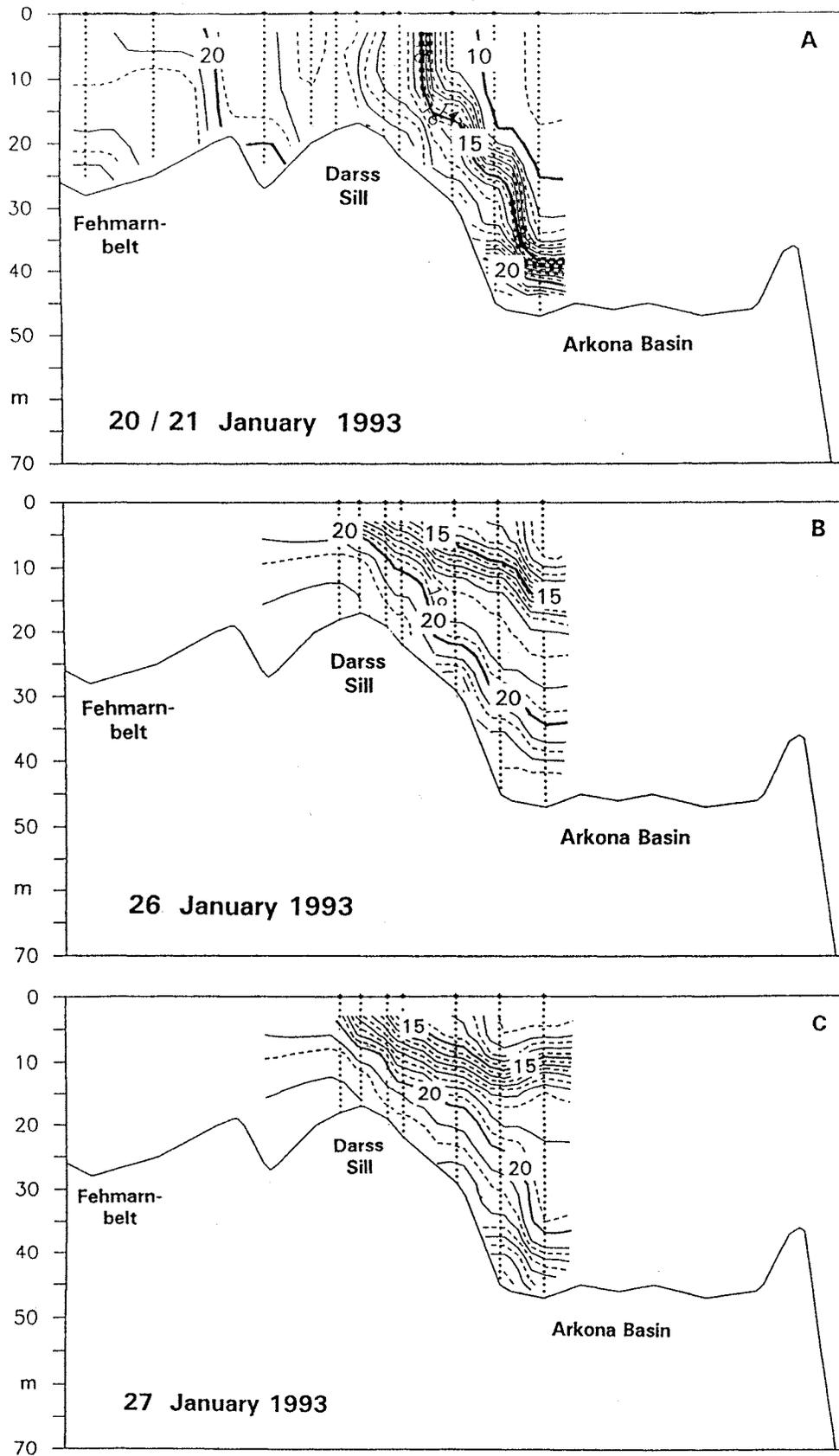


Abb. 7
 Längsschnitte des Salzgehaltes über die Darßer Schwelle während
 der Hauptphase des Salzwassereintruchs

Der Höhepunkt des Salzwassereintruchs über die Darßer Schwelle war zwischen dem 26. und 28. Januar erreicht, als Wasser mit Temperaturen von 3,6 °C und Salzgehalten von 22 PSU in das Arkonabecken einströmte (Abb. 7B,C). Die primäre Salzgehaltssprungschicht im zentralen Arkonabecken wurde von etwa 38 m auf 10 m Tiefe angehoben (Abb. 7A,C), und die 20 PSU-Isohaline verlagerte sich von 42 m auf 32 m Tiefe. Der über die Darßer Schwelle eingeströmte Wasserkörper schichtete sich über dem Bodenwasser ein, das Salzgehalte von 22 bis 24 PSU und Temperaturen von etwa 4 °C aufwies und über den Sund ins Arkonabecken gelangt war (Abb. 8). Beide Wassermassen waren durch eine sekundäre haline Sprungschicht in etwa 40 m voneinander getrennt (Abb. 7C).

Im Gegensatz zum Wassereintrag durch den Sund weisen der Anstieg und die Schrägstellung der primären Salzgehaltssprungschicht (Abb. 7B) auf ein Ungleichgewicht zwischen dem über die Darßer Schwelle einströmenden und dem über das Bornholmogat abfließenden Wasser hin. Anhand der bisher zur Verfügung stehenden Beobachtungen kann nicht entschieden werden, ob das eindringende salzreiche Wasser sich nicht schnell genug über das gesamte Arkonabecken ausbreiten kann oder ob der Abfluß durch das Bornholmogat kleiner als der Einstrom über die Darßer Schwelle ist.

Dieses Ungleichgewicht hatte einen bedeutenden Einfluß auf die Salzbilanz des Arkonabeckens. Da die primäre Salzgehaltssprungschicht in der Hauptphase des Salzwassereintruchs über die Satteltiefe der Darßer Schwelle angehoben wurde, konnten erhebliche Wassermengen mit Salzgehalten ≥ 17 PSU durch den am 28. Januar beginnenden Ausstrom in die Beltsee zurückfließen. Der aus Strömungs- (Abb. 10) und Salzgehaltsmessungen auf der Darßer Schwelle (Abb. 9) berechnete Transport zeigte, daß etwa die Hälfte des Salzes, das während des Einstromprozesses über die Darßer Schwelle ins Arkonabecken einströmte, in der sich anschließenden Ausstromperiode die Ostsee wieder verlassen hat (Abb. 11).

Das während der Hauptphase über die Darßer Schwelle eingeströmte Wasser hatte mittlere Eigenschaften von etwa 19 PSU und 3,5 °C, was einer mittleren Dichte von etwa 15 σ -Einheiten entspricht, und wies Sauerstoffkonzentrationen von rund 8 cm³/dm³ auf.

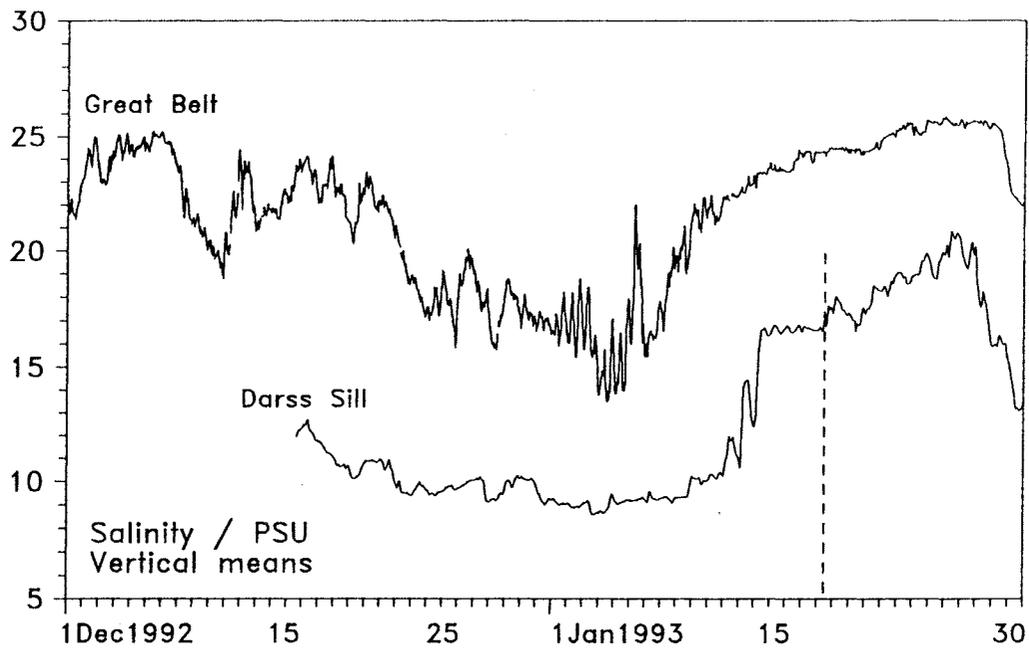


Abb. 9

Vertikalmittel des Salzgehaltes im Großen Belt (Daten von Storebæltsforbindelsen A/S, Kopenhagen) und auf der Darßer Schwelle (Stat. 001) im Dezember 1992 und Januar 1993

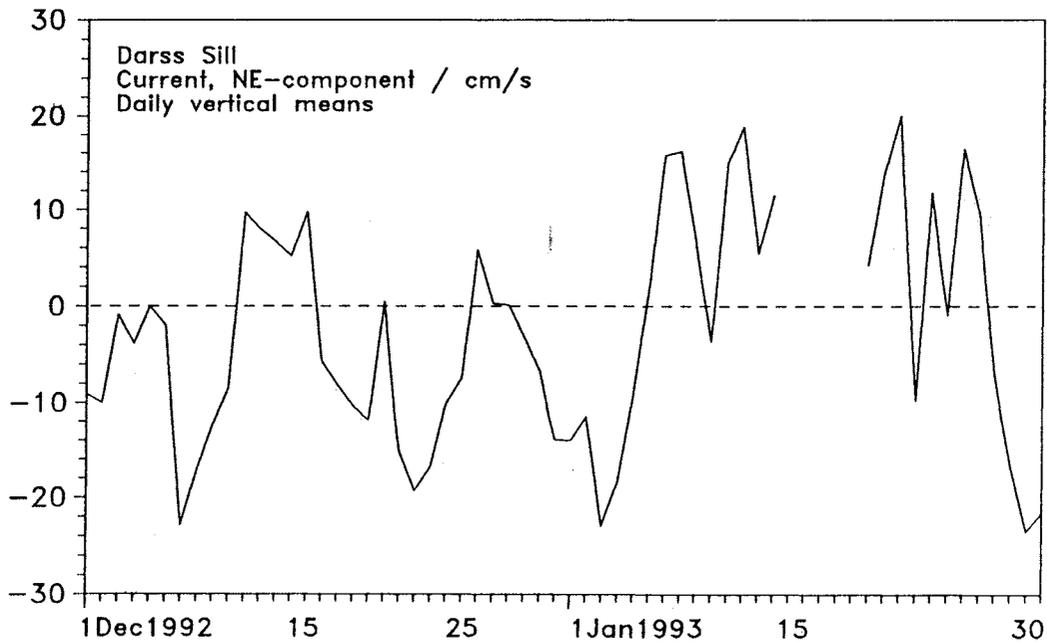


Abb. 10

Vertikalmittel der Nordostkomponente der Strömung auf der Darßer Schwelle (Stat. 001) im Dezember 1992 und Januar 1993 (positive Werte entsprechen Einstrom in die Ostsee)

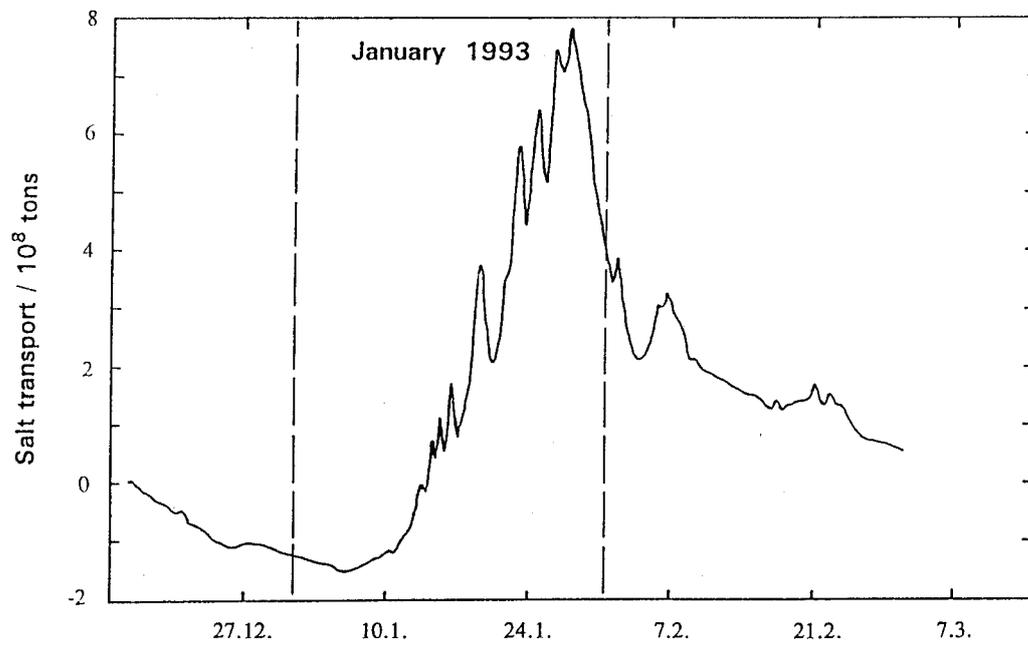


Abb. 11
Kumulativer Salztransport über die Darßer Schwellen zwischen Dezember 1992
und Februar 1993

schicht ist zwar in beiden Jahren gleich, die Standardabweichungen sind jedoch in allen Beobachtungstiefen und die Mittelwerte in der Bodenschicht im Jahre 1993 bis zu 1,6 PSU höher als 1992. Das bedeutet, daß 1993 der Austausch von Salzwasser zwischen dem Kattegat und der Arkonasee im Mittel intensiver gewesen ist als 1992. Diese Interpretation stimmt mit der zwischenjährlichen Variation der Wassertemperatur überein, da intensivere Westwinde zwar den Wasseraustausch über die Darßer Schwelle verstärken, im Sommerhalbjahr aber auch mit einer reduzierten Sonneneinstrahlung einhergehen.

Die Wassertemperaturen auf der Darßer Schwelle im Jahre 1993 sind für alle Meßtiefen in Abb. 12 (oben) dargestellt. Sie zeigen einen ausgeprägten Jahresgang parallel zum Gang der Lufttemperatur in mittleren Breiten. Charakteristisch ist auch 1993 wieder die geringe thermische Schichtung. Im Gegensatz zu 1992 beginnt die thermische Stabilisierung jedoch fast zwei Monate früher, nämlich im April, und dauert zwei Monate länger, nämlich bis Mitte November. Das winterliche Minimum der Wassertemperatur lag 1993 bei 2 °C und damit signifikant über dem Gefrierpunkt des Wassers. Auffällig niedrig war die Oberflächentemperatur im Juli und August 1993, als nur 14 bis 16 °C gemessen wurden. Damit lag das sommerliche Temperaturmaximum um annähernd 3 bis 4 K niedriger als 1992. Diese Beobachtungen korrespondieren mit den in Kapitel 2 beschriebenen Temperatursummen und thermischen Anomalien der Atmosphäre. Dem Jahresgang der Temperatur sind 1993 ebenso wie 1992 Schwankungen mit einer charakteristische Zeitskala von ungefähr 10 Tagen überlagert, die mit den Variationen des Transports in der Beltsee und Auftriebsprozessen im Bereich der Darßer Schwelle gekoppelt sind.

Die Salzgehaltsverteilung über der Darßer Schwelle im Jahre 1993 ist in Abb. 12 (unten) dargestellt. Sie zeigt wie auch 1992 keinen ausgeprägten Jahresgang. Ihre Variationen sind dadurch charakterisiert, daß sich ausgehend von minimalen Werten zwischen 8 und 9 PSU, kurzzeitige Pulse hohen Salzgehaltes mit einer typischen Zeitskala von 10 Tagen bilden. Diese Pulse wurden 1993 während des ganzen Jahres insbesondere in der bodennahen Schicht (17 m und 19,5 m Tiefe) beobachtet. Hoher Salzgehalt mit mehr als 15 PSU in der gesamten Wassersäule wurde lediglich während des Salzwassereinbruchs im Januar 1993 und

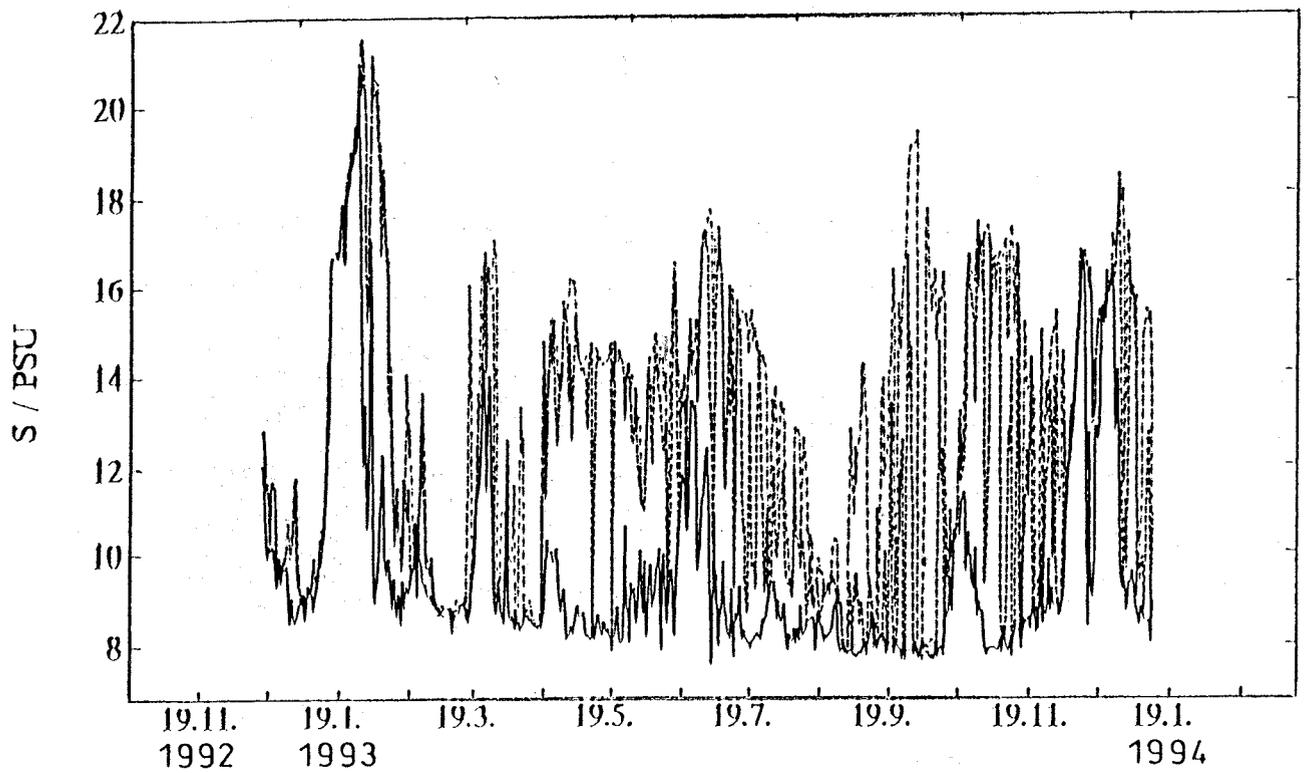
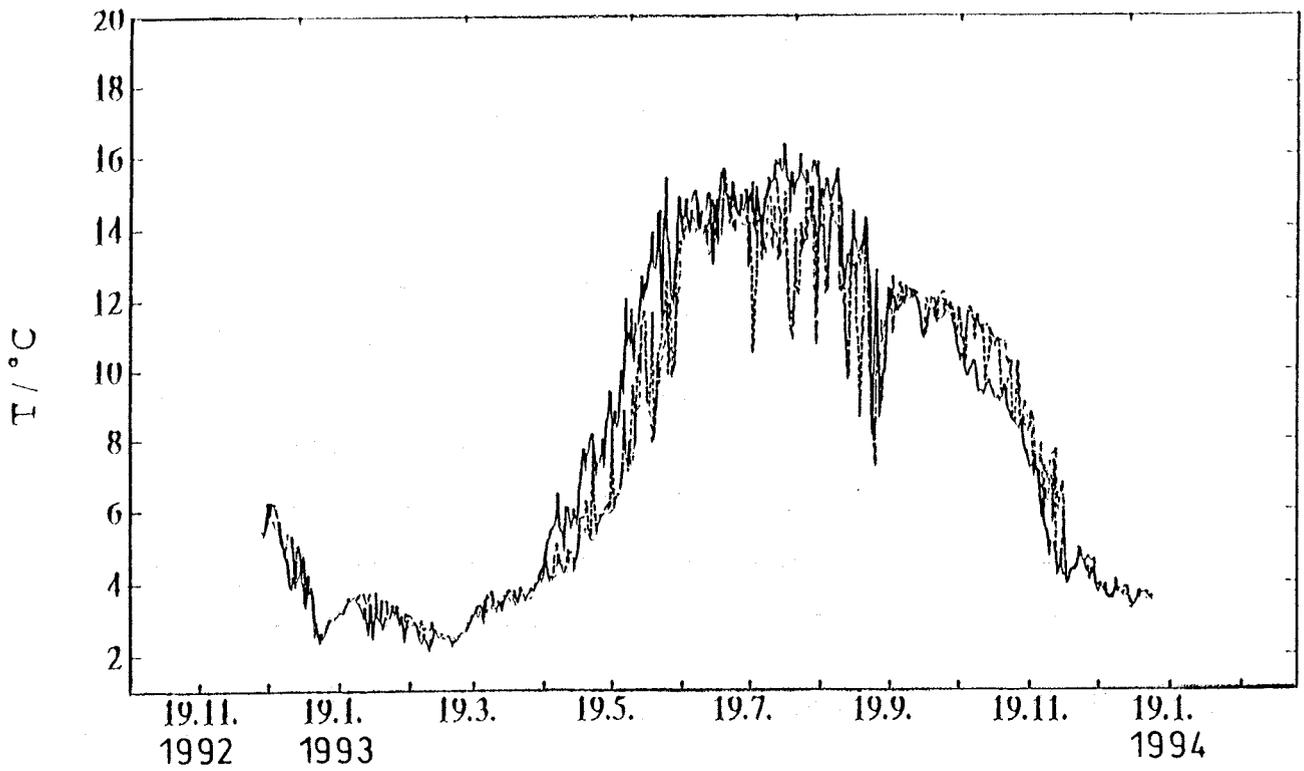


Abb. 12
 Zeitreihen der Wassertemperatur (oben) und des Salzgehaltes (unten) auf der Darßer Schwelle in 7 m (ausgezogen), 17 m (gestrichelt) und 19,5 m Tiefe (gepunktet)

darüber hinaus auch kurzzeitig im Dezember 1993 festgestellt. In diesen Fällen strömte das Beltseewasser in der ganzen Wassersäule über die Darßer Schwelle. Im Sommerhalbjahr gelangte salzreiches Beltseewasser dagegen nur in einer relativ dünnen Bodenschicht in das Arkonabecken. Es ersetzt dort das am Boden lagernde Wasser.

Neben dem Salzwassereinbruch im Januar 1993 wurden fünf Einstromereignisse beobachtet, in denen der Salzgehalt auf der Darßer Schwelle in der gesamten Wassersäule 10 PSU überschritt. Es kann vermutet werden, daß während dieser Ereignisse Wasser aus dem Kattegat bis zur Darßer Schwelle transportiert und somit im größten Teil der Beltsee stagnierendes Tiefenwasser durch frisches Oberflächenwasser ersetzt wurde. Von besonderer Intensität war der Einstrom im Dezember 1993. Das Maximum des vertikal gemittelten Salzgehaltes erreichte auf der Darßer Schwelle fast 17 PSU. Damit kann dieses Ereignis als ein in seiner Anfangsphase abgebrochener Salzwassereinbruch charakterisiert werden. Erfahrungsgemäß werden während der Vorlaufphase eines Salzwassereinbruchs größere Mengen salzreichen Wassers durch den Sund in das Arkonabecken transportiert (vgl. Kapitel 3.1). Über die Auswirkungen dieses Einstroms, bei dem vermutlich eine signifikante Menge salz- und sauerstoffreichen Wassers in die Ostsee eingeflossen ist, können erst die Beobachtungen im Jahre 1994 Auskunft geben.

Die Einstromereignisse sind eng mit dem Verlauf der Ostkomponente des Windes von Arkona korreliert, wie er in Abb. 3 dargestellt ist. Sie treten bevorzugt dann auf, wenn nach einer Ostwetterlage eine Periode intensiver Westwinde folgt.

Der minimale Salzgehalt auf der Darßer Schwelle unterlag 1993 ähnlich wie auch 1992 geringen jahreszeitlichen Schwankungen, wie im TS-Diagramm der Abb. 13 durch die scharfe Begrenzung in Richtung niedriger Salzgehalte deutlich zu erkennen ist. Der Salzgehalt ist im Sommer um einige Zehntel PSU geringer als im Winter. Hier spiegelt sich offensichtlich der durch die Variation der Flußwasserzufuhr erzeugte Jahresgang im Oberflächenwasser der Ostsee wieder.

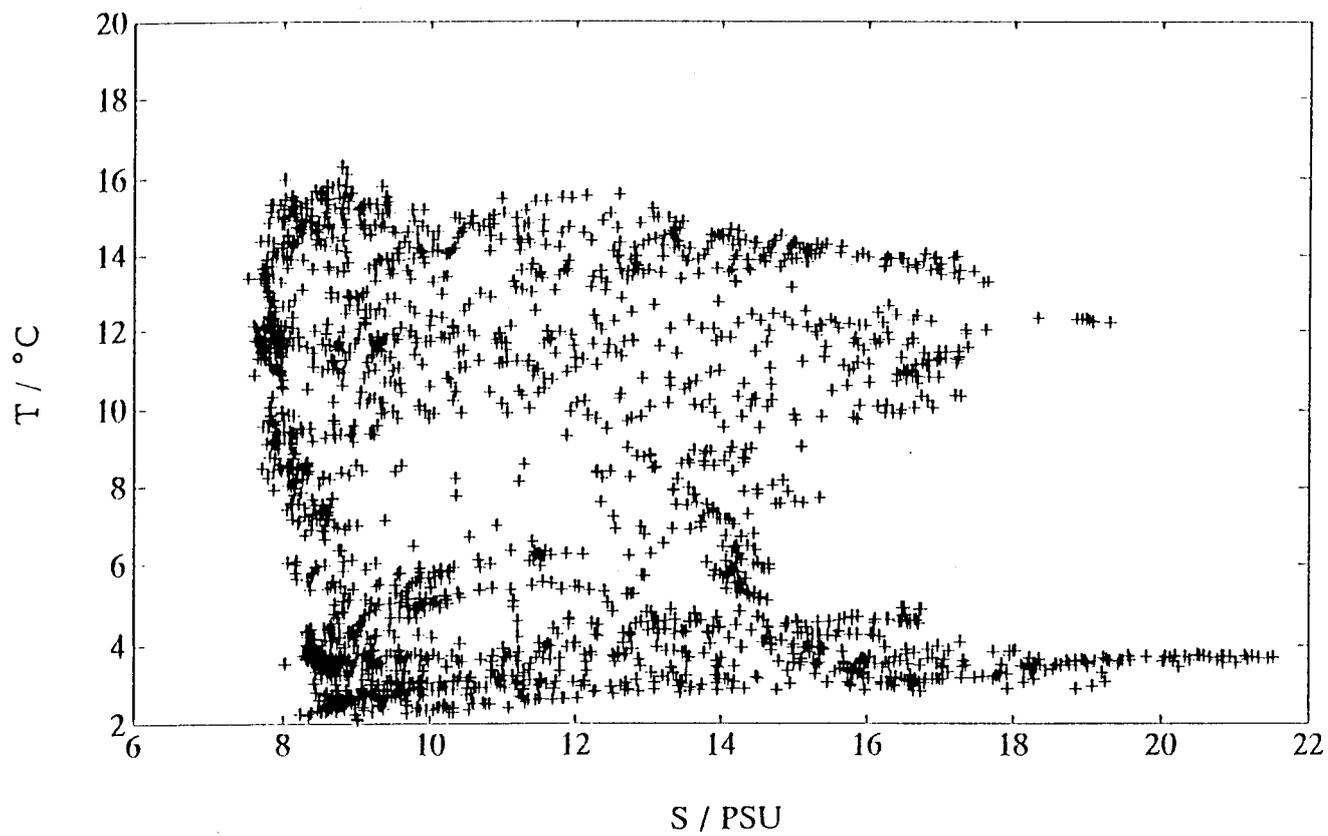


Abb. 13 TS-Beziehung auf der Darßer Schwelle im Jahre 1993

3.2.2 Strömung

Aus den Streudiagrammen der Strömungsvektoren in den verschiedenen Tiefen, dargestellt in Abb. 14, kann abgeleitet werden, daß die Mittelwerte der Strömung 1993 in allen Tiefen eine Größenordnung von 1 cm/s hatten. Die Fluktuationen der Strömung lagen dagegen in der Größenordnung von 10 cm/s. Im Tiefenbereich von 7 m bis 17 m erreichten die maximalen Geschwindigkeiten fast 100 cm/s. In Bodennähe (19,5 m) reduzierte sich ihr Betrag auf die Hälfte. Die charakteristischen Muster der Strömungsfluktuationen waren auch 1993 in allen Tiefen elliptisch, wobei sie in Richtung der Hauptachse annähernd das zweifache der Fluktuationen in Richtung der Nebenachse betragen. Die Elliptizität war während des Salzwassereintruchs im Januar 1993 stärker ausgeprägt als bei „normalen“ Einstrombedingungen über die Darßer Schwelle.

Die Hauptachsen der Strömungsfluktuationen waren 1993 in den Tiefen 17 m und 19,5 m wie auch 1992 annähernd in Richtung Südwest zu Nordost orientiert. Die Ausrichtung der Stromellipsen scheint somit zeitlich unabhängig zu sein. Das weist darauf hin, daß sie durch die Topographie im Bereich der Meßposition bestimmt sind. Die vertikale Variation der Ellipsenausrichtung erlaubt darüber hinaus die Schlußfolgerung, daß ihre Ausrichtung auch durch die Corioliskraft beeinflusst wird. Die Stabdiagramme der auf der Darßer Schwelle gemessenen Strömungsvektoren zeigten sowohl in einer Periode intensiven Einstroms (Abb. 15, oben) als auch unter Normalbedingungen (Abb. 15, unten) charakteristische Fluktuationen, deren typische Zeitskala bei 10 Tagen lag.

Von wesentlich größerer Aussagekraft für die Austauschprozesse zwischen der Nordsee und der Ostsee sind die aus den fortschreitenden Vektordiagrammen ermittelten Komponenten der Partikelverschiebung in Nord- und Ostrichtung. Während des Salzwassereintruchs im Winter 1992/93 dominierten in der Ostkomponente Amplituden von mehreren 100 km mit einer Zeitskala von mehreren 10 Tagen (Abb. 16, oben). Diese Verschiebungen deuten an, daß ein Wasserteilchen mit hoher Wahrscheinlichkeit direkt vom nördlichen Eingang der Beltsee bis zur Darßer Schwelle transportiert wird. Die Zeitskalen der meridionalen Verschiebung entsprachen denen der zonalen (Abb. 16, unten) die Amplituden lagen jedoch unter 100 km.

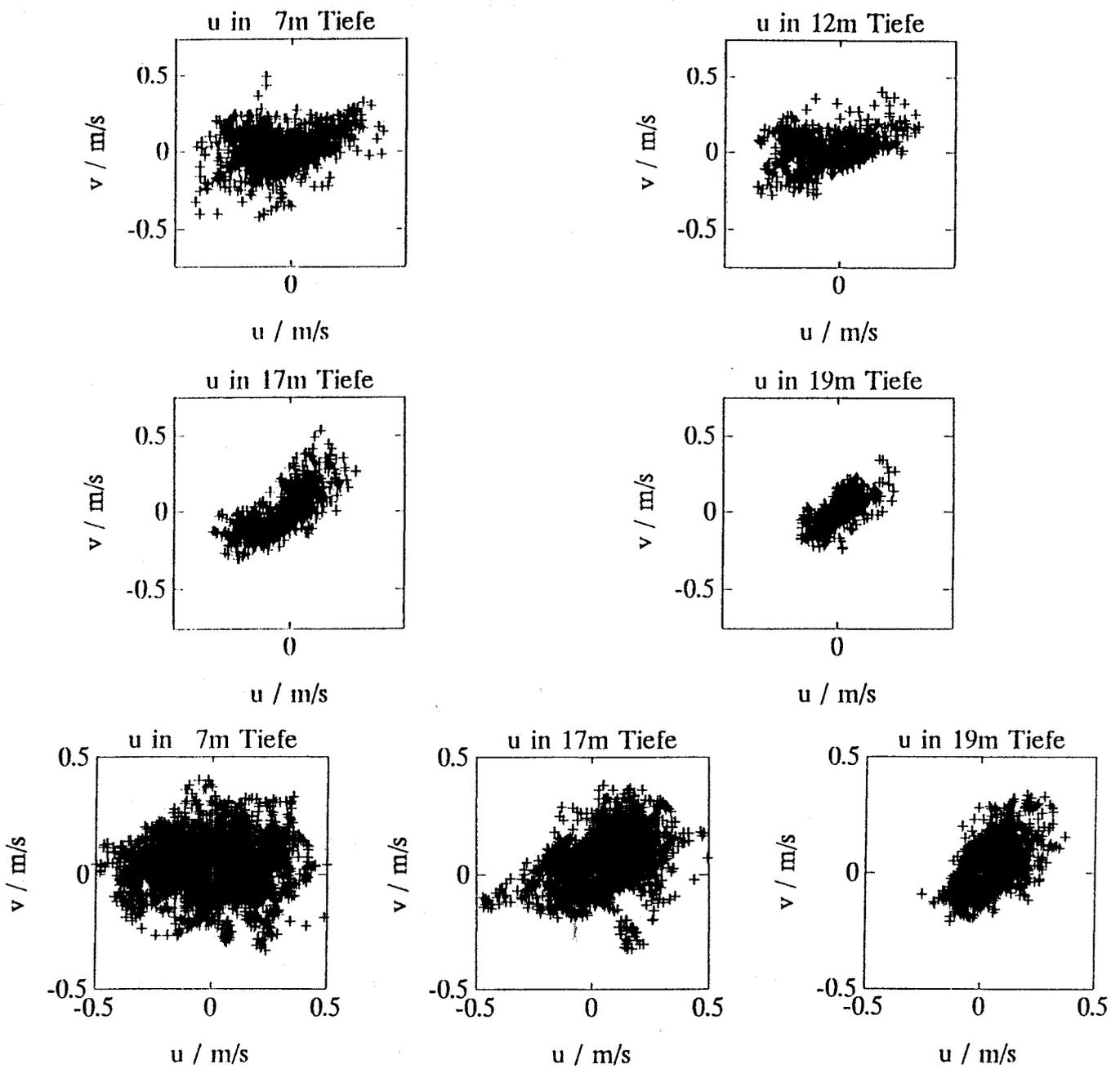


Abb. 14

Streudiagramm der Geschwindigkeitsvektoren in verschiedenen Meßtiefen auf der Darßer Schwelle vom Dezember 1992 bis März 1993 (oben) und April bis Juli 1993 (unten)

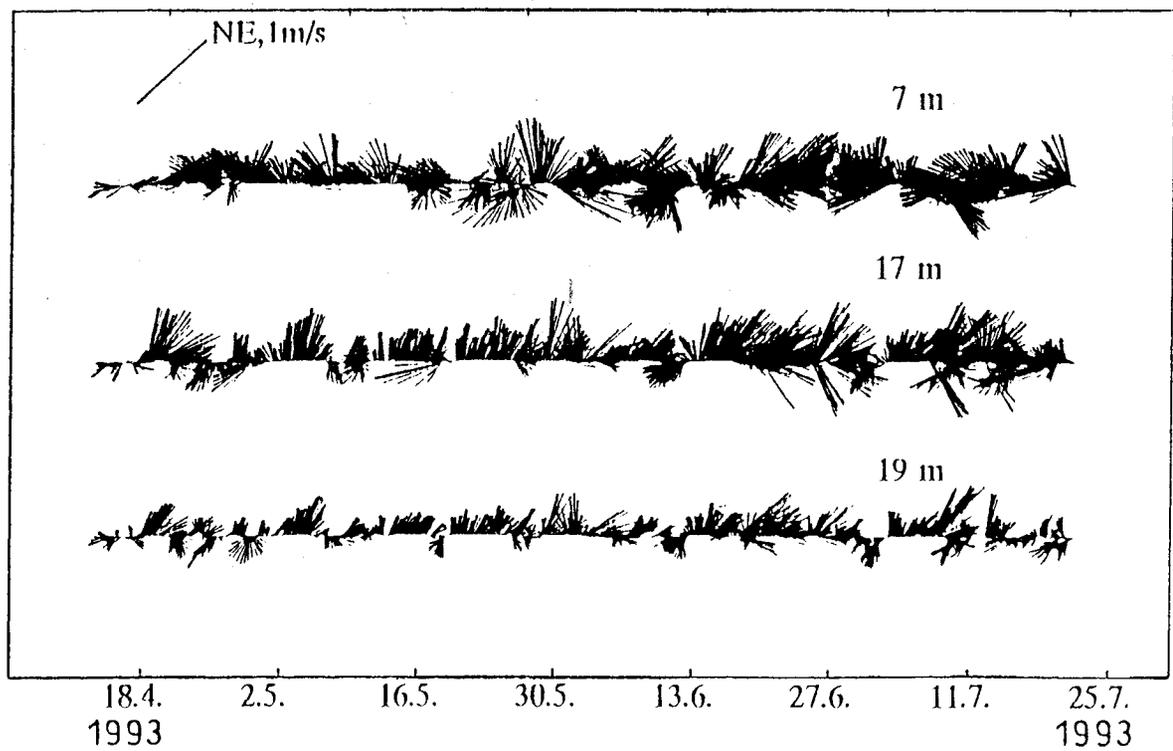
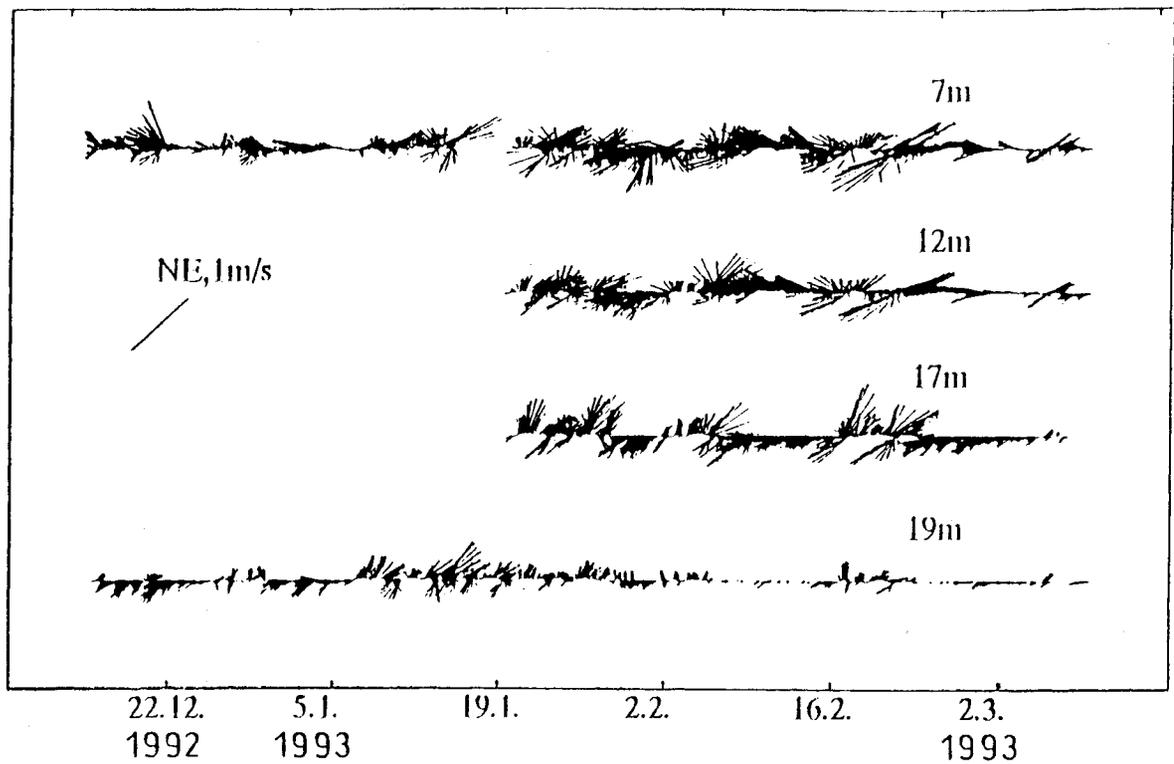


Abb. 15
Stickdiagramme der Strömung auf der Darßer Schwelle während einer Einstromperiode mit Salzwassereinbruch (oben) und bei einer „normalen“ Periode (unten)

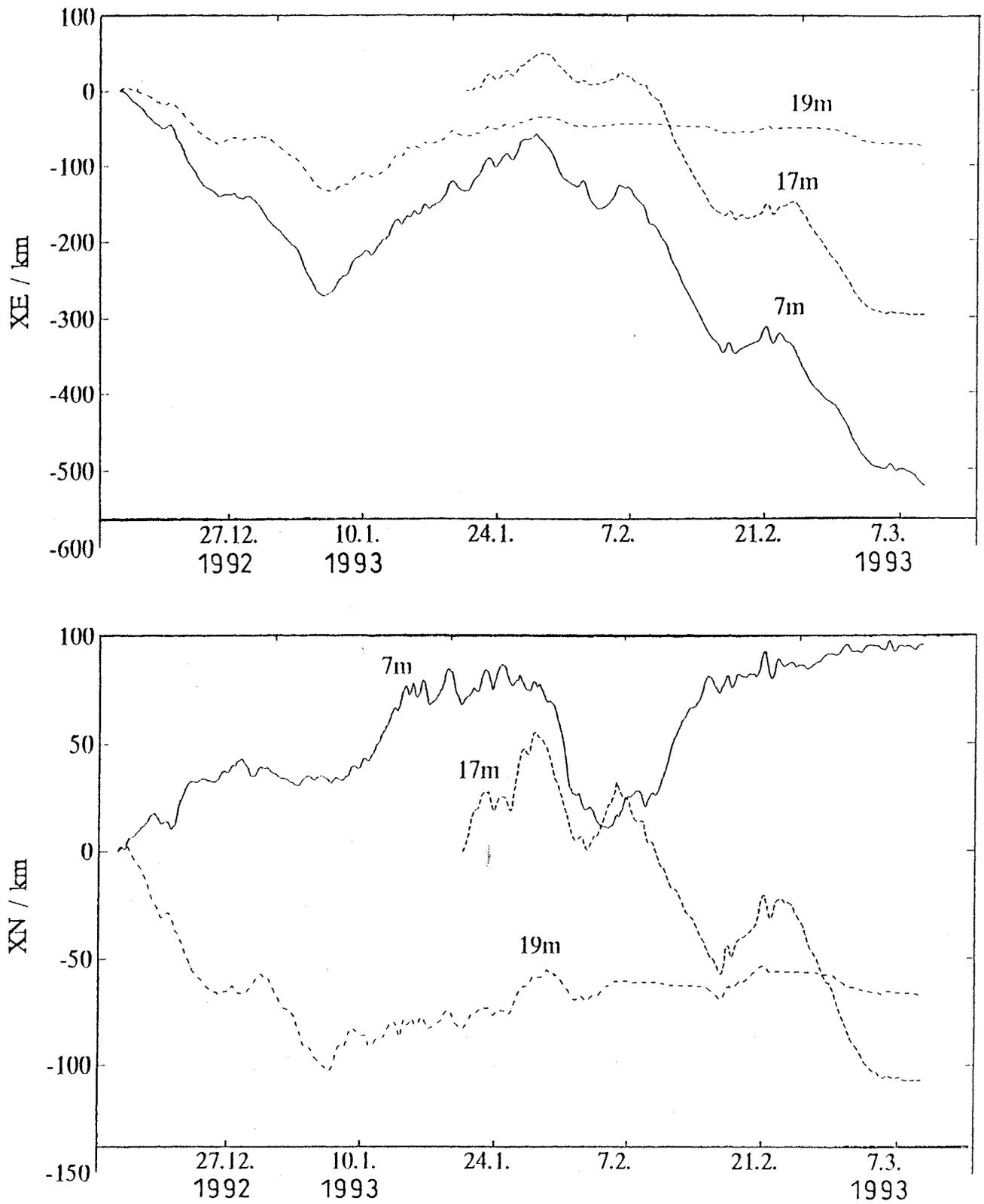


Abb. 16
 Zeitreihen der Ostkomponente (oben) und Nordkomponente (unten) der Partikelverschiebung eines Wasserteilchens auf der Darßer Schwelle in einer Einstromphase mit Salzwassereinbruch

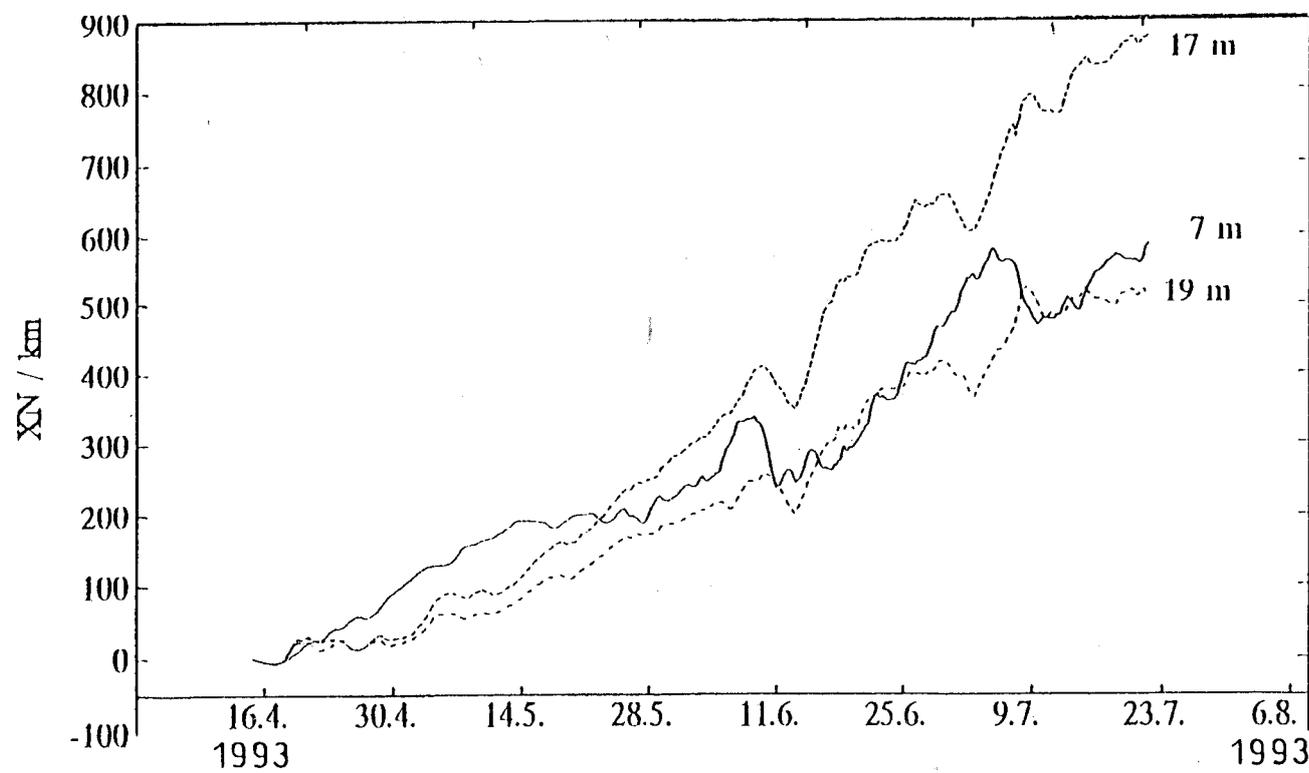
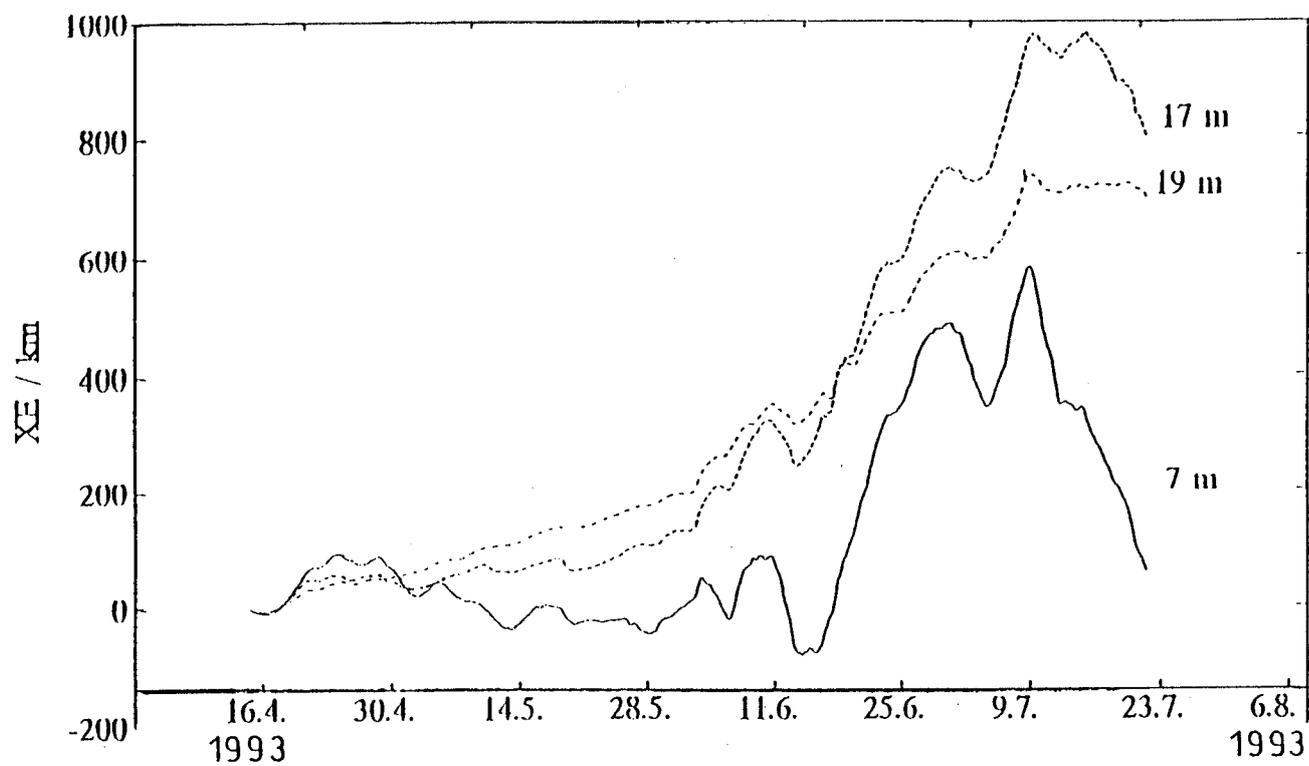


Abb. 17
 Zeitreihen der Ostkomponente (oben) und Nordkomponente (unten) der Partikelverschiebung eines Wasserteilchens auf der Darßer Schwelle bei „normalem“ Wasseraustausch

Bei Austauschsituationen wie sie z. B. im Sommerhalbjahr gegeben sind, werden zwischen April und Juni nur zonale Verschiebungen mit Amplituden von 100 km beobachtet (Abb. 17, oben). In dieser Phase stagniert das Wasser im Bereich der Beltsee. Von Mitte Juni bis Mitte Juli 1993 schloß sich eine Periode mit Verschiebungen um mehrere 100 km in Richtung Osten an, die in der Bodenschicht größer waren als in der Oberflächenschicht. Diese Beobachtung zeigt, daß auch im Sommerhalbjahr Einstromereignisse auftreten können und einen Transport von Wasserteilchen durch das gesamte Übergangsgebiet zwischen Nord- und Ostsee ermöglichen. Sie korreliert mit den Messungen in Abb. 12 (unten), die einen Salzgehaltsanstieg in der gesamten Wassersäule Ende Juni 1993 anzeigen. Es ist zu vermuten, daß die Einstromereignisse im Sommerhalbjahr zu einem sporadischen Austausch des Bodenwassers in der Beltsee führen. Ein Beweis dieser Vermutung kann jedoch nur mit einer Kombination kontinuierlich messender Salz- und Sauerstoffsensoren im Bodenwasser der Beltsee erbracht werden, da auf Grund der charakteristischen Zeitskala der Beltsee von 10 Tagen die Variationen der hydrographisch-chemischen Zustandsgrößen durch die üblichen Monitoring-Fahrten nicht erfaßt werden.

4. Hydrographisch-chemische Bedingungen

Für einen großräumigen Überblick über die hydrographisch-chemischen Bedingungen in der westlichen und zentralen Ostsee im Jahre 1993 sind in den Abb. 18–22 die Vertikalschnitte der Wassertemperatur, des Salz- und Sauerstoffgehalts sowie der Phosphat- und Nitratkonzentrationen dargestellt. Diese Schnitte folgen dem Talweg durch die tiefen Becken der Ostsee. Die im Vorjahr eingeführte Zweiteilung in die Seegebiete Fehmarnbelt bis Arkonabecken und Bornholmbecken bis östliches Gotlandbecken wurde beibehalten. In diesen Schnittdarstellungen werden das Danziger Tief (Stat. 233) sowie das westliche und nördliche Gotlandbecken mit dem Landsorttief (Stat. 284) und dem Karlsötief (Stat. 245) nicht berücksichtigt. Die hydrographisch-chemischen Bedingungen in diesen Seegebieten der Ostsee werden jedoch soweit erforderlich verbal erläutert.

Bei den Schlußfolgerungen aus den Schnittdarstellungen müssen die Einschränkungen berücksichtigt werden (vgl. NEHRING u.a., 1993), die mit der fehlenden Synoptik der Messungen zusammenhängen.

4.1 Wassertemperatur

Die Verteilung der Wassertemperatur in den untersuchten Seegebieten der Ostsee ist in Abb. 18 dargestellt. Sie war im Jahre 1993 im Bereich des Oberflächen- und Zwischenwassers durch den milden Winter und den nur mäßig warmen Sommer geprägt. Das Tiefenwasser der zentralen Ostsee wurde dagegen durch das während des Salzwassereintruchs im Januar eingedrungene Wasser beeinflusst.

Die Oberflächentemperaturen im Bereich der Beltsee zwischen Fehmarnbelt und Darßer Schwellen lagen im Februar/März um etwa 0,5 bis 1 K über den langjährigen Mittelwerten (REICHEL, 1980, 1982) und erreichten erst im Sommer ihre Normalwerte. Das Arkonabekken wies im Winter eine positive Anomalie von 1 bis 1,5 K und im Sommer eine negative Anomalie von 0,5 bis 1 K auf, wenn die von (MATTHÄUS, 1975, 1977) angegebenen mittleren Bedingungen zugrunde gelegt werden.

In der zentralen Ostsee kühlte sich das Oberflächenwasser aufgrund des milden Winters nur auf 3 bis 3,5 °C ab und lag Ende März/Anfang April um 1 bis 1,5 K über dem langjährigen Mittel (MATTHÄUS, 1977). Der relativ sonnige und windarme Mai (vgl. Tabelle 3 und Abb. 3) brachte im unmittelbaren Oberflächenbereich eine Erwärmung auf 2 K über den Erwartungswert, während der mäßig warme Sommer und der Herbst nur zu geringen Abweichungen von den langjährigen Oberflächentemperaturen führte. Die Kernschicht des kalten Zwischenwassers wies infolge des milden Winters Temperaturen von 3,5 bis 4 °C auf, was einer positiven Anomalie von 1 bis 1,5 K entspricht.

Das während des Salzwassereintruchs eingeströmte Wasser mit Temperaturen von 3,5 bis 4 °C (Abb. 8) hatte im Februar bereits das Bornholmbecken erreicht und verursachte einen Rückgang im Jahresmittelwert um etwa 2 °C (vgl. Tabelle 6). Im Mai drang dieses Wasser ins Gotlandtief vor (vgl. Abb. 18) und führte zu einem geringen Temperaturrückgang im Tiefenwasser (vgl. Abb. 23), hatte jedoch kaum Auswirkungen auf die Jahresmitteltemperatur (Tabelle 7).

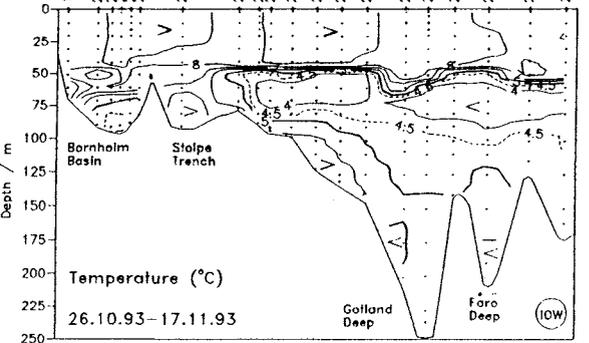
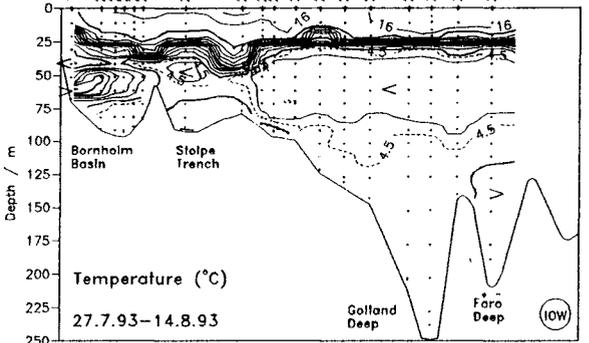
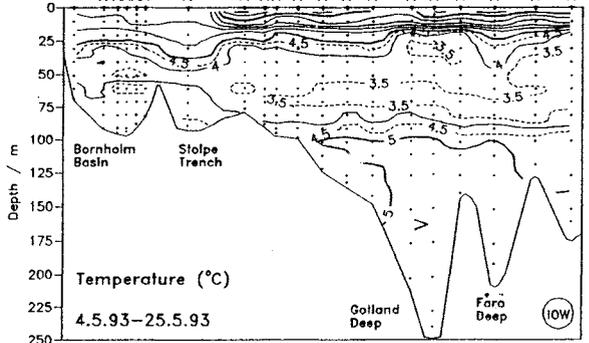
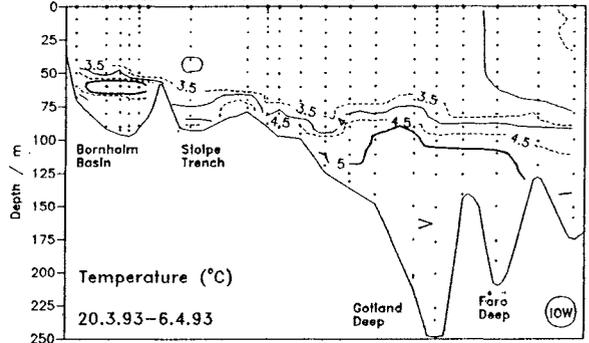
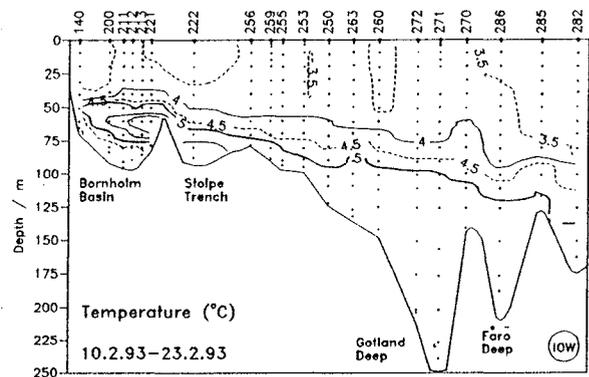
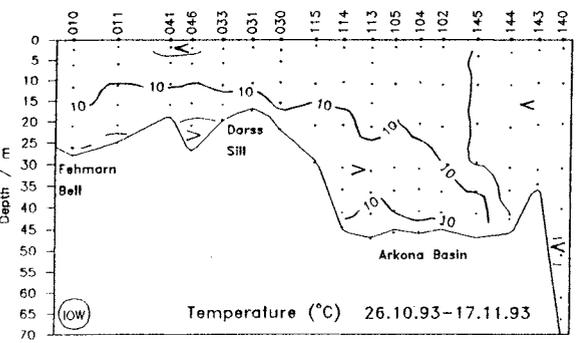
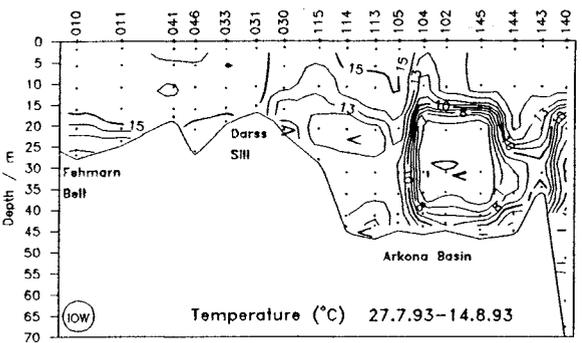
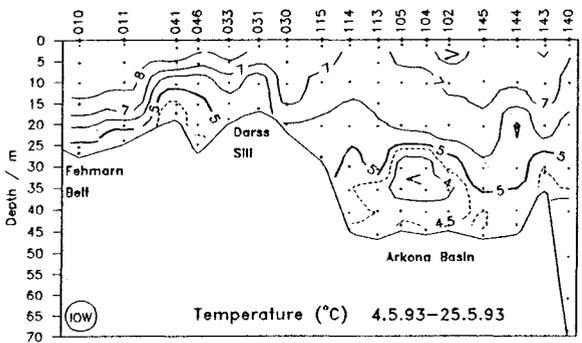
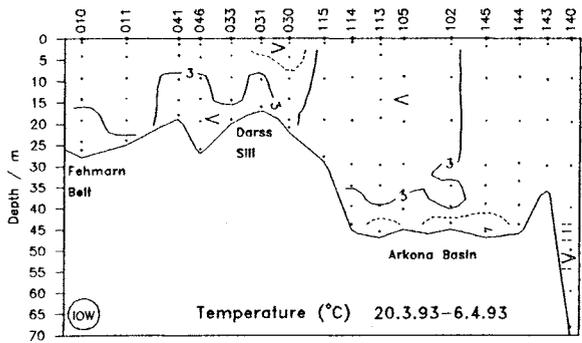
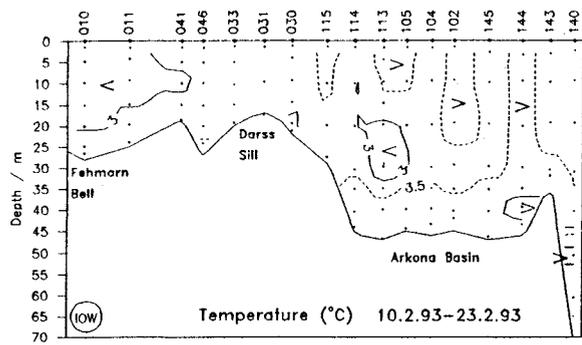


Abb. 18 Temperaturverteilung

Tabelle 6 Jahresmittelwerte und Standardabweichungen ausgewählter Größen im 80 m Horizont des Bornholmtiefs (Stat. BMP K2 bzw. 213)

Jahr	T °C	S PSU	O ₂ cm ³ /dm ³
1989	6,92 ± 0,51	14,38 ± 0,28	0,58 ± 0,87
1990	6,98 ± 0,60	13,88 ± 0,37	0,54 ± 0,73
1991	5,90 ± 0,97	14,19 ± 0,25	2,26 ± 1,06
1992	6,22 ± 0,35	15,26 ± 0,45	2,90 ± 1,38
1993	4,26 ± 0,18	17,66 ± 0,38	4,81 ± 1,70

4.2 Salzgehalt

Im Zusammenhang mit der Salzgehaltsverteilung des Jahres 1993 sei auf Abb. 19 verwiesen. Mitte Februar befand sich die primäre Salzgehaltssprungschicht im Arkonabecken in 30 – 35 m Tiefe. Während ein Teil des beim Salzwassereinbruch eingeströmten salzreichen Wassers das Arkonabecken wieder in Richtung Kattegat verlassen hat, wird sich ein anderer Teil mit dem Wasser im flachen Seegebiet östlich der Insel Rügen vermischt haben. Der größte Teil des eingeströmten Wassers ist bis Mitte März ins Bornholmbecken abgeflossen und hat das dort stagnierende Bodenwasser verdrängt (Abb. 19). Zwischen Oktober 1992 und März 1993 hat sich der Salzgehalt im Bodenwasser dieses Beckens von etwa 15 PSU bis auf 21 PSU erhöht. Das stagnierende Bodenwasser wurde auf das Niveau der Satteltiefe zur Stolper Rinne angehoben und ist zwischen März und Juni schubweise in Richtung zentrale Ostsee abgeflossen.

Erste Anzeichen der Erneuerung des Bodenwassers im östlichen Gotlandbecken wurden bereits Anfang April 1993 festgestellt. Der Höhepunkt des Salzgehaltsanstiegs wurde im Mai–Juni beobachtet. Die Zunahme erreichte in der grundnahen Wasserschicht des Danziger Beckens 3 PSU und im Gotlandtief 0,7 PSU. Im Fårötief sowie im westlichen Gotlandbecken war der Salzgehalt in dieser Schicht bis November um 0,3 bis 0,4 PSU angestiegen. Im grundnahen Bereich des nördlichen Gotlandbeckens wurde sogar ein Anstieg des Salzgehaltes bis zu 1 PSU beobachtet.

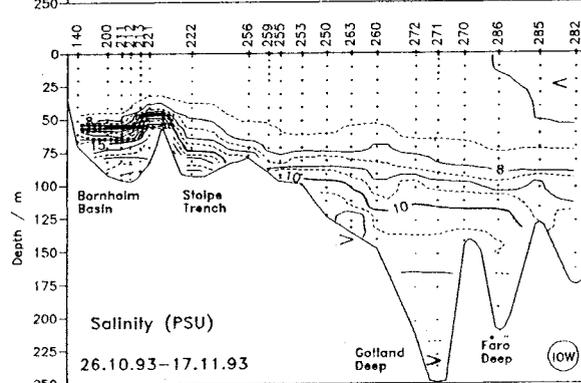
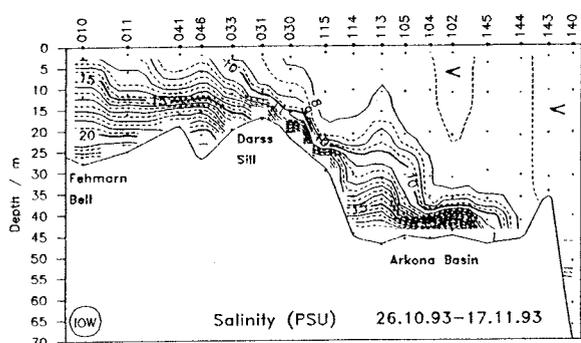
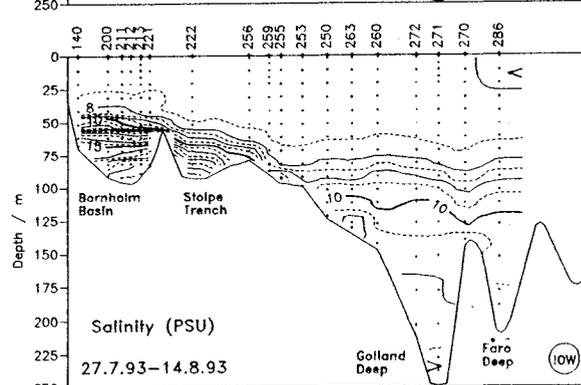
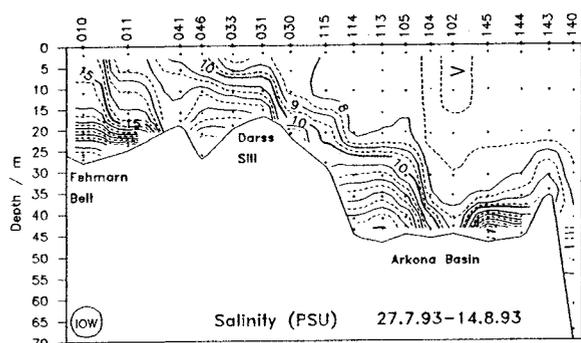
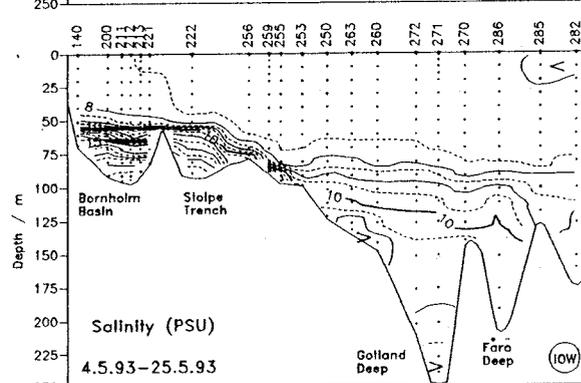
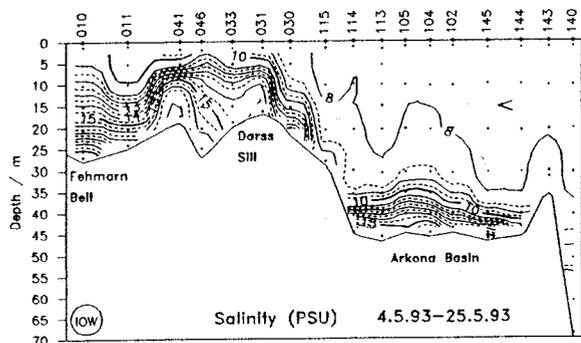
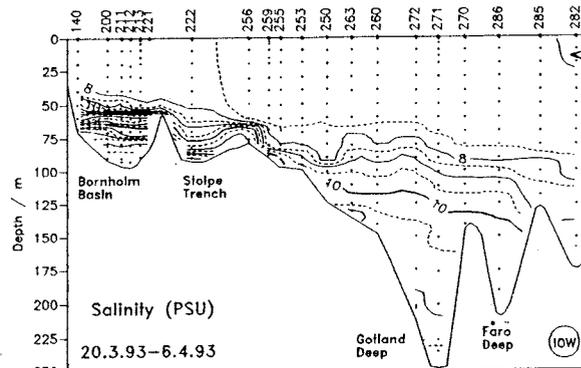
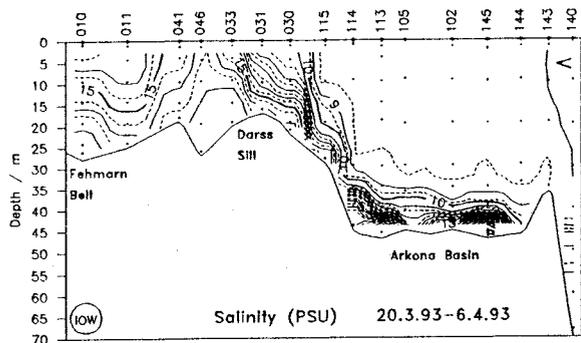
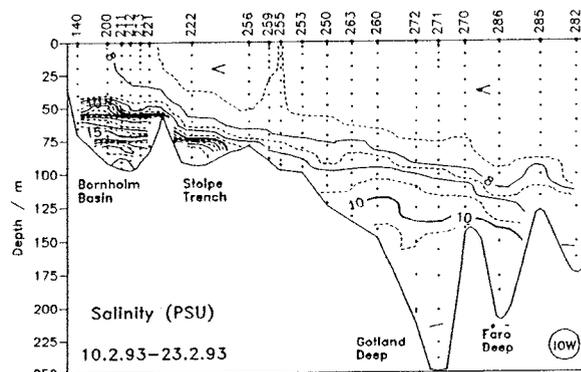
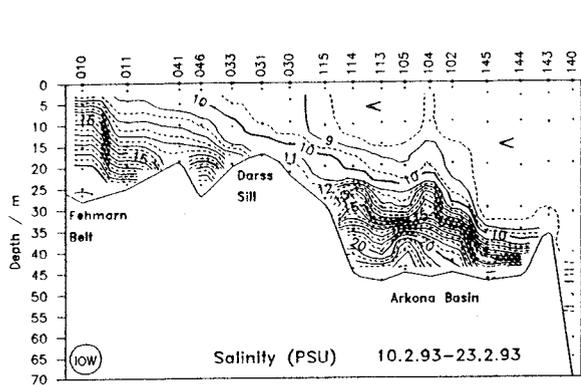


Abb. 19 Salzgehaltsverteilung

Seit 1990 ist im grundnahen Wasser des Bornholmbeckens ein Anstieg im Jahresmittel des Salzgehaltes zu beobachten, der im Jahre 1993 mit einem Wert von 17,7 PSU seinen vorläufigen Höhepunkt erreichte (vgl. Tabelle 6). Im Tiefenwasser des Gotlandtiefs kam es infolge des Salzwassereinbruchs erstmalig zu einem Anstieg in den Jahresmittelwerten um 0,4 PSU in 100 m bzw. 0,1 PSU in 200 m Tiefe (vgl. Tabelle 7 und Abb. 23).

4.3 Sauerstoff und Schwefelwasserstoff

Die Vertikalverteilung des Sauerstoffs und Schwefelwasserstoffs, die im allgemeinen nicht nebeneinander existieren, ist in Abb. 20 dargestellt. Die höchsten Sauerstoffkonzentrationen, die 10,5 bis 11,5 cm³/dm³ (130 bis 145 % Sauerstoffsättigung) erreichten, wurden im Mai 1993 während der Phytoplanktonblüte in der östlichen Gotlandsee beobachtet. Sie waren auf die in dieser Jahreszeit 30 bis 40 m mächtige euphotische Schicht begrenzt. Vor allem im Norteil der östlichen Gotlandsee wurden in 10 bis 20 m Tiefe auch intermediäre Sauerstoffmaxima festgestellt.

Das Sauerstoffmaximum des kalten Zwischenwassers in der zentralen Ostsee ist vor allem im August deutlich zu erkennen. Mit Werten bis zu 8 cm³/dm³ wies es im Vergleich zu den mittleren Bedingungen (NEHRING u.a., 1987) eine negative Anomalie von 0,1 bis 0,3 cm³/dm³ auf.

Jahreszeitliche Veränderungen prägen die Sauerstoffverteilung im Tiefenwasser der Mecklenburger Bucht und des Arkonabeckens (vgl. auch MATTHÄUS, 1975, NEHRING, FRANCKE, 1981). Sie sind auch in Abb. 20 deutlich zu erkennen. Obgleich das Sauerstoffminimum, das sich im Spätsommer einstellt, Ende Juli – Anfang August 1993 noch nicht erreicht war, deuten die gemessenen Konzentrationen von 2 bis 3 cm³/dm³ auf relativ günstige Bedingungen im Tiefenwasser dieser Ostseeregionen hin.

Tabelle 7 Jahresmittelwerte und Standardabweichungen ausgewählter Größen im Tiefenwasser des Gotlandtiefs (Stat. BMP J1 bzw. 271)

Tiefe m	Jahr	T °C	S PSU	O ₂ ¹⁾ cm ³ /dm ³	PO ₄ ³⁻ μmol/dm ³	NO ₃ ⁻ μmol/dm ³	NH ₄ ⁺ μmol/dm ³
100	1989	4,05 ±0,12	9,52 ±0,24	1,18 ±0,43	3,13 ±0,30	9,52 ±0,81	0,13±0,04
	1990	4,63 ±0,13	9,42 ±0,39	1,51 ±0,58	2,76 ±0,40	8,94 ±0,66	0,22±0,33
	1991	5,27 ±0,16	9,17 ±0,20	2,02 ±0,44	2,41 ±0,31	9,20 ±1,89	0,30±0,15
	1992	4,93 ±0,18	8,91 ±0,28	2,58 ±0,49	2,04 ±0,05	9,58 ±1,25	0,28±0,16
	1993	4,87 ±0,17	9,29 ±0,26	2,59 ±0,59	2,09 ±0,16	10,25 ±0,84	0,14±0,02
200	1989	5,07 ±0,07	11,56 ±0,07	-3,00 ±0,87	7,01 ±0,56	-	20,3 ±4,1
	1990	4,98 ±0,05	11,46 ±0,09	-3,10 ±0,91	6,42 ±1,03	-	23,2 ±2,8
	1991	4,96 ±0,04	11,26 ±0,07	-4,54 ±1,62	7,21 ±0,36	-	26,6 ±6,4
	1992	5,03 ±0,02	11,04 ±0,04	-4,63 ±1,74	7,15 ±0,37	-	26,7 ±4,3
	1993	5,01 ±0,13	11,16 ±0,13	-0,61 ±2,39	4,61 ±1,73	3,68 ±5,43	12,6 ±7,9

¹⁾ Schwefelwasserstoff wurde gemäß $S^{2-} + 2O_2 = SO_4^{2-}$ in negative Sauerstoffäquivalente umgerechnet.

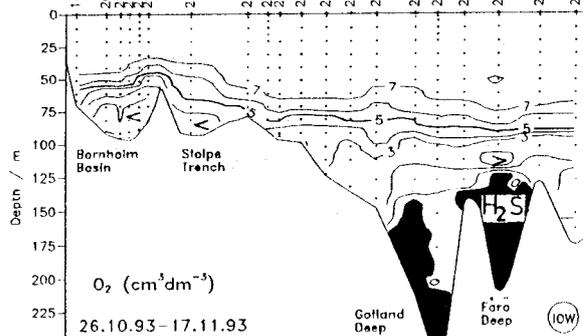
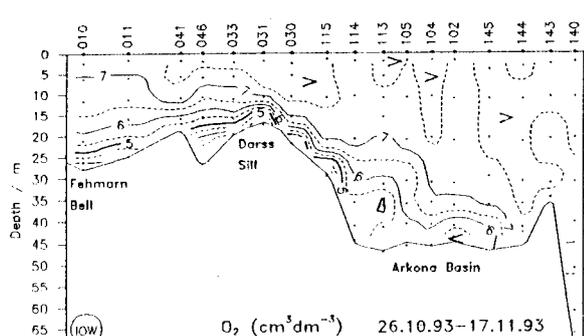
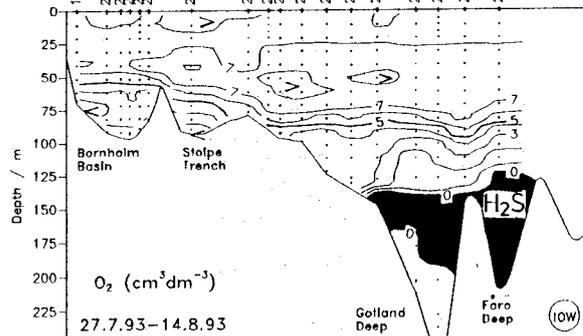
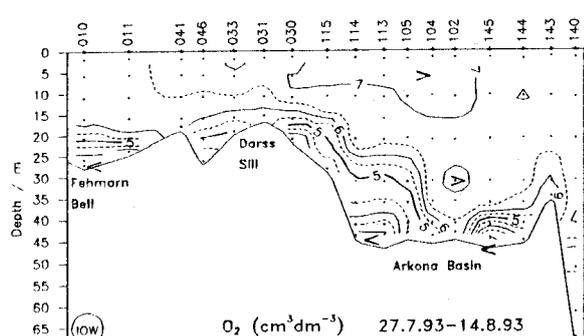
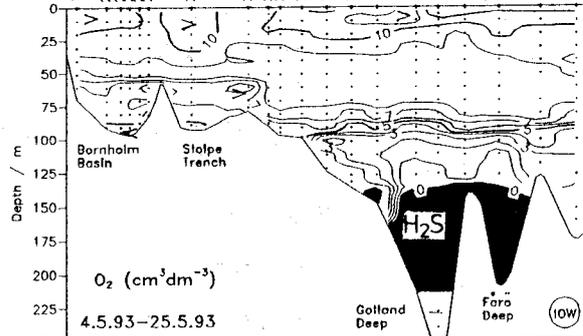
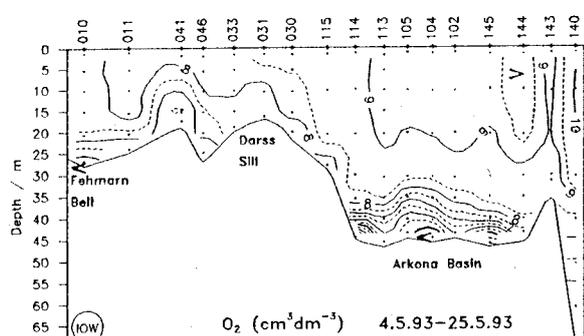
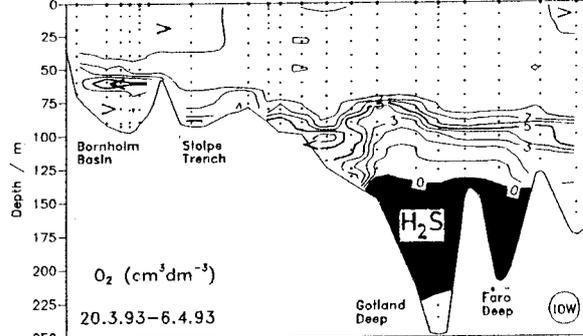
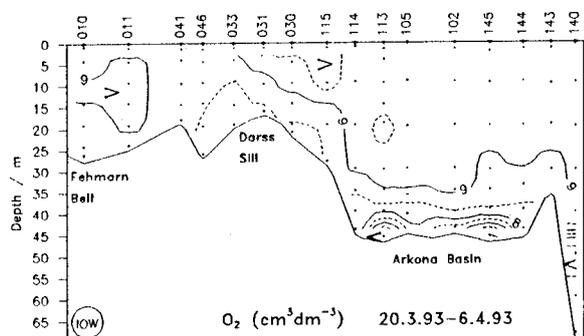
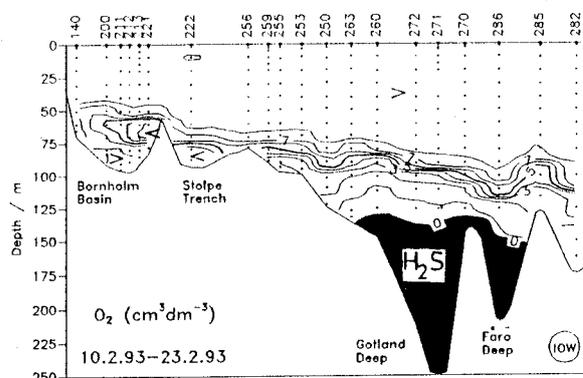
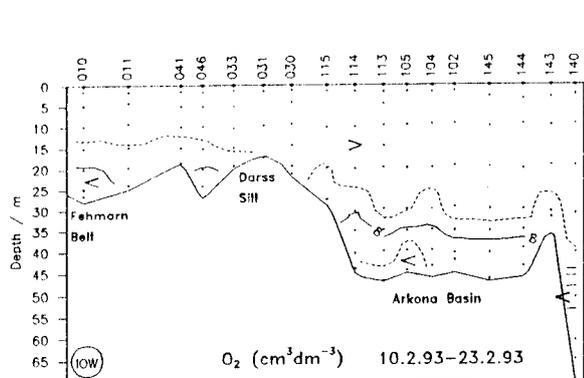


Abb. 20 Sauerstoffverteilung

Da im Herbst und Winter horizontale und vertikale Austauschprozesse in jedem Jahr zu einer Sauerstoffversorgung des Tiefenwassers in der Mecklenburger Bucht und im Arkona-becken führen, zeichneten sich Auswirkungen des im Januar 1993 beobachteten Salzwasser-einbruchs auf die Sauerstoffverteilung erst im Bornholmbecken ab. Unter Ausbildung einer sauerstoffarmen Zwischenschicht stieg der Sauerstoffgehalt im Tiefenwasser dieses Beckens Ende März 1993 vorübergehend auf 6 bis 7 cm^3/dm^3 an. Biochemische Zehrungsprozesse führten mit fortschreitender Jahreszeit zu einer erneuten Sauerstoffverarmung, in deren Ver-lauf die Konzentrationen im Oktober–November auf 1 bis 1,5 cm^3/dm^3 absanken. Die positiven Auswirkungen des Salzwassereinbruchs auf die Sauerstoffbedingungen im Tiefen-wasser des Bornholmbeckens spiegeln sich erwartungsgemäß auch in den Jahresmittelwerten (Tabelle 6) wider.

Im Tiefenwasser des Danziger Tiefs wurden in der ersten Jahreshälfte ähnlich wie im Bornholmbecken relativ hohe Sauerstoffkonzentrationen als Folge des Salzwassereinbruchs gemessen. Der höchste Wert von 4,2 cm^3/dm^3 wurde Ende März in der grundnahen Wasserschicht (107 m) registriert, die mit 0,3 cm^3/dm^3 niedrigste Sauerstoffkonzentration trat im August 1993 auf.

Der Einstrom sauerstoffreichen Tiefenwassers durch die Stolper Rinne ins östliche Got-landbecken erreichte im Mai sein Maximum, obgleich die Umschichtung im Gotlandtief bereits Anfang April begonnen und unterhalb 200 m Tiefe zu oxischen Bedingungen geführt hatte (Abb. 20). Im Februar wurde in dieser Schicht noch Schwefelwasserstoff in Konzen-trationen von 7 mg/dm^3 gemessen. Im Kern der verbliebenen anoxischen Zwischenschicht (175 m) waren die Schwefelwasserstoffkonzentrationen von 3,6 mg/dm^3 im Februar auf 2,4 mg/dm^3 im März 1993 zurückgegangen.

Im Mai 1993 wurden im Gotlandtief Sauerstoffkonzentrationen bis zu 1,8 cm^3/dm^3 in der grundnahen Wasserschicht (225 m Tiefe) registriert. Die insgesamt günstigsten Sauerstoff-verhältnisse herrschten jedoch im Juni–Juli (vgl. Kapitel 5.2). Anfang November war die schwefelwasserstoffhaltige Zwischenschicht zwar verschwunden, mit dem Beginn einer neuen Stagnationsperiode hatte sich jedoch vom Boden her erneut Schwefelwasserstoff ausgebreitet.

In Abhängigkeit von der 1993 erfolgten Wassererneuerung im Gotlandtief zeigt auch die mittlere negative Sauerstoffkonzentration in der grundnahen Wasserschicht eine deutliche Abnahme im Vergleich zu den Werten der Vorjahre (Tabelle 7). In 100 m Tiefe setzte sich jedoch der seit 1989 im Jahresmittel beobachtete Anstieg des Sauerstoffgehalts nicht fort.

Unsere Untersuchungen lassen keine nachhaltigen Veränderungen im Sauerstoffregime erkennen, die über das Gotlandtief hinausreichen und eindeutig mit dem Salzwassereinbruch im Januar 1993 zusammenhängen. Im Fårötief blieben die anoxischen Bedingungen im Tiefenwasser das ganze Jahr über erhalten. Anfang April zeigte die Schwefelwasserstoffkonzentration jedoch kurzzeitig eine deutliche Abnahme.

Im Tiefenwasser des nördlichen Gotlandbeckens lagen die Sauerstoffkonzentrationen im allgemeinen zwischen 0,5 und 2 cm^3/dm^3 und wiesen starke Fluktuationen auf. Die ungünstigsten Bedingungen wurden im November ermittelt, als auf einer Station (vgl. Abb. 1) unmittelbar über dem Grund sogar geringe Schwefelwasserstoffkonzentrationen auftraten.

Relativ günstige Bedingungen herrschten im Tiefenwasser des westlichen Gotlandbeckens. Im Landsorttief sanken die Sauerstoffkonzentrationen 1993 nicht unter 1 bis 2 cm^3/dm^3 ab, im Karlsötief wurden in der grundnahen Wasserschicht (107 m) sogar 3,5 bis 4 cm^3/dm^3 nicht unterschritten.

4.4 Nährsalze

Phosphat, Nitrat, Nitrit und Ammonium sind die wichtigsten anorganischen Nährstoffe, die bei ausreichendem Lichtangebot die Entwicklung des Phytoplanktons in der Ostsee begrenzen. Silikat kann in der Beltsee und im Kattegat zur limitierenden Größe für das Wachstum von Kieselalgen werden.

Zur Charakterisierung des Nährstoffpotentials in der Oberflächenschicht der Ostsee sind die Winterkonzentrationen geeignet. Tabelle 8 enthält Angaben für Phosphat, Nitrat und die Summe der anorganischen Stickstoffverbindungen Nitrat, Nitrit und Ammonium im Februar

1993. In der Gotlandsee sind auch die Anfang April gemessenen Nährsalzkonzentrationen für die Charakterisierung der Wintersituation geeignet, weil hier die Frühjahrsentwicklung des Phytoplanktons nicht vor Ende April einsetzt.

Tabelle 8 Mittlere Nährsalzkonzentrationen und Standardabweichungen in der Oberflächenschicht (0–10 m) im Februar und Anfang April 1993

Gebiet	Monat	PO_4^{3-} $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$	NO_3^- $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$	$\Sigma \text{N}_{\text{anorg.}}$ $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$
Lübecker Bucht Stat. 023	Feb.	0,91 ±0,02	14,3 ±1,6	16,9 ±1,5
Meckl. Bucht Stat. 012 (BMP M2)	Feb.	0,80 ±0,05	6,9 ±1,2	8,4 ±1,8
Oderbucht Stat. 162	Feb.	1,11 ±0,03	19,4 ±2,0	28,2 ±3,1
Arkonasee Stat. 113 (BMP K5)	Feb.	0,71 ±0,01	4,8 ±0,0	5,3 ±0,1
Bornholmsee Stat. 213 (BMP K2)	Feb.	0,75 ±0,00	4,8 ±0,0	5,2 ±0,1
Zentrale Gotlandsee Stat. 271 (BMP J1)	Feb. Apr.	0,71 ±0,01 0,71 ±0,01	5,1 ±0,0 4,9 ±0,1	5,3 ±0,0 5,4 ±0,2

Hohe Standardabweichungen der Mittelwerte, die jeweils aus drei Meßtiefen resultieren, deuten auf eine inhomogene Verteilung der Nährsalzkonzentrationen in der Oberflächenschicht hin. Größere Differenzen zwischen der Nitratkonzentration und der Summe der anorganischen Stickstoffverbindungen sind als Zeichen für eine noch nicht beendete Stickstoffreminalisierung zu werten. Dies war 1993 vor allem in der Lübecker Bucht, der Mecklenburger Bucht und der Oderbucht der Fall.

In der Oberflächenschicht der eigentlichen Ostsee wiesen die Winterkonzentrationen der Nährsalze kaum regionale Unterschiede auf (Tab. 8). In der zentralen Gotlandsee waren auch die im Februar und Anfang April 1993 gemessenen Konzentrationen nahezu identisch.

Die jahreszeitlichen Veränderungen der Phosphat- und Nitratkonzentrationen sind den Abb. 21 und 22 zu entnehmen. Im Mai 1993 war die gesamte Wassersäule im Arkonabecken an Nitrat verarmt. Andeutungsweise zeichnet sich dieser Prozeß auch bei der Phosphatverteilung ab. Im Sommer wiesen die Phosphat- und Nitratkonzentrationen in der Oberflächenschicht aller untersuchten Ostseeregionen sehr geringe Werte auf, zum Teil waren sie bis an die analytische Nachweisgrenze abgesunken.

Abweichend von früheren Untersuchungen blieb die sommerliche Phosphat- und Nitratverarmung in der Oberflächenschicht der östlichen Gotlandsee bis zum November 1993 erhalten. Nitrit- und Ammoniumkonzentrationen verharrten ebenfalls auf sehr niedrigen Werten oder zeigten erst eine relativ geringe Zunahme. Auch in den anderen Teilgebieten der Ostsee, ausgenommen die Lübecker Bucht und Oderbucht, setzte die herbstliche Nährsalzakkumulation nur zögerlich ein.

Im Winter liegen die Silikatkonzentrationen in der Oberflächenschicht der eigentlichen Ostsee im allgemeinen zwischen 14 und 18 $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$. Sie sinken während der Diatomeenblüte im Frühjahr auf 5 bis 10 $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ab, wurden aber bisher nicht zur limitierenden Größe. Im November 1993 wurde eine weitere Silikatverarmung festgestellt, wobei vor allem im östlichen Gotlandbecken extrem niedrige Konzentrationen, die zwischen 0,5 und 2 $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ lagen, auftraten.

Im August 1993 wurden in der zentralen Ostsee kräftig ausgeprägte, intermediäre Ammonium- und Nitritmaxima beobachtet, die im Bornholmbecken und Danziger Tief im Bereich der sommerlichen Temperatursprungschicht begannen und oberhalb der Salzgehaltssprungschicht endeten. Im östlichen Gotlandbecken nahmen sie nur einen relativ schmalen Tiefenbereich oberhalb der Halokline ein. Diese Maxima erreichten im Danziger Tief Beträge zwischen 2 und 3 $\mu\text{mol NH}_4^+/\text{dm}^3$ sowie 0,2 und 0,4 $\mu\text{mol NO}_2^-/\text{dm}^3$ und im Bornholmbecken und östlichen Gotlandbecken zwischen 0,9 bis 1,3 $\mu\text{mol NH}_4^+/\text{dm}^3$ sowie 0,3 bis 0,7 $\mu\text{mol NO}_2^-/\text{dm}^3$. Sie trafen im Bornholmbecken und im Danziger Tief teilweise mit positiven Temperatur- und negativen Sauerstoffinversionen zusammen.

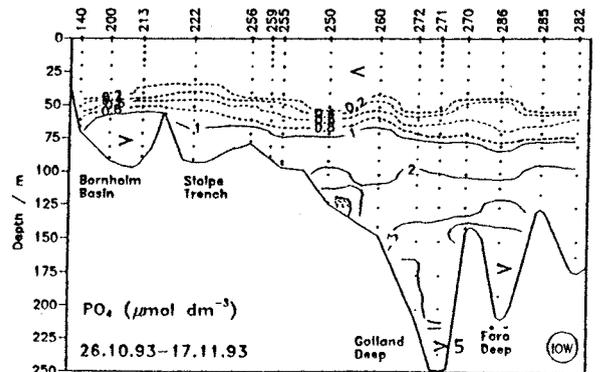
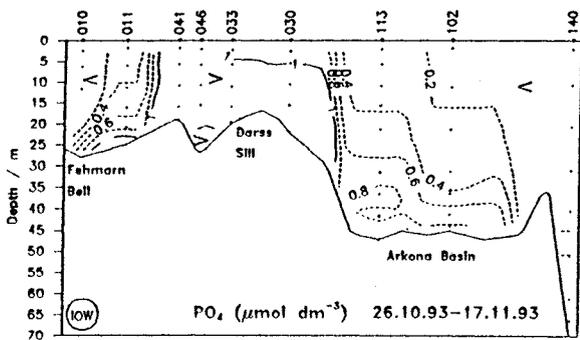
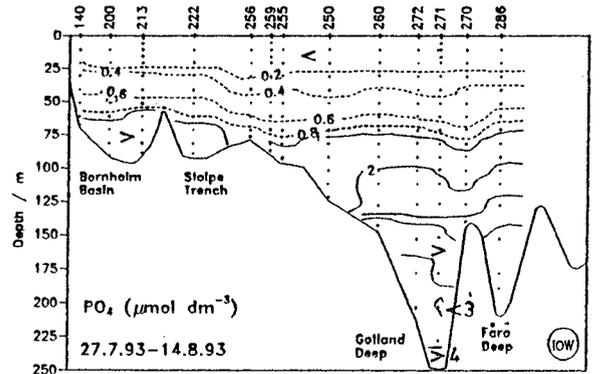
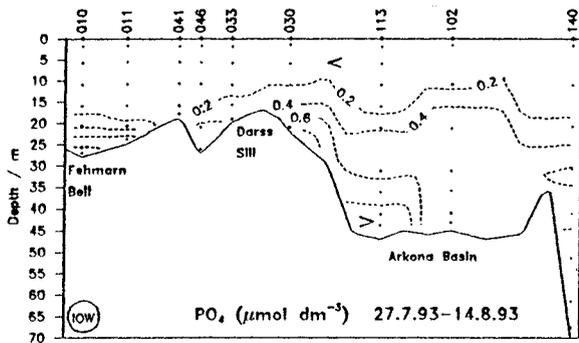
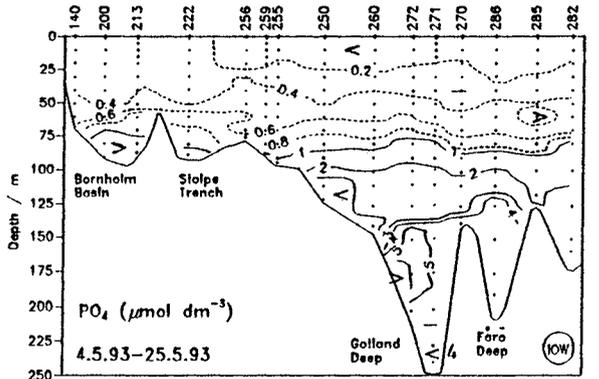
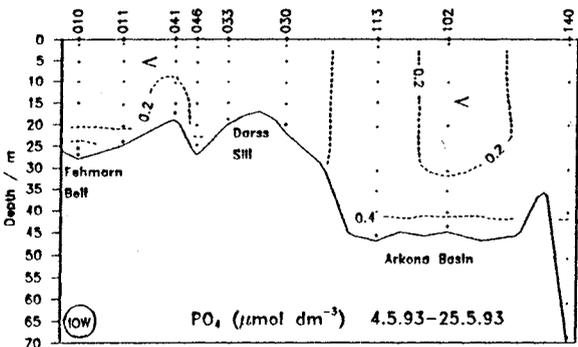
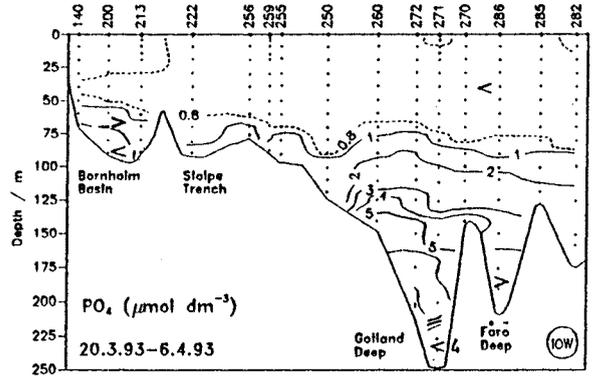
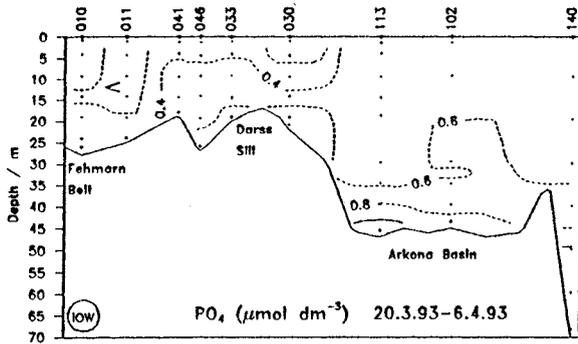
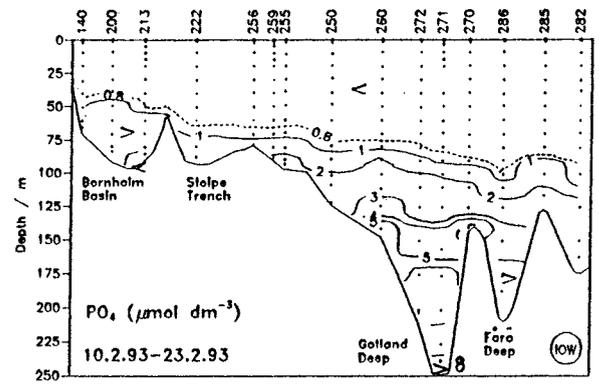
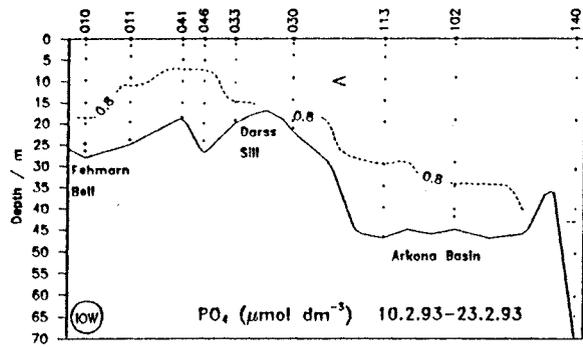


Abb. 21 Phosphatverteilung

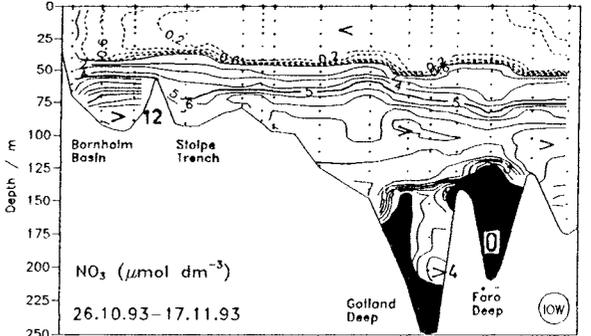
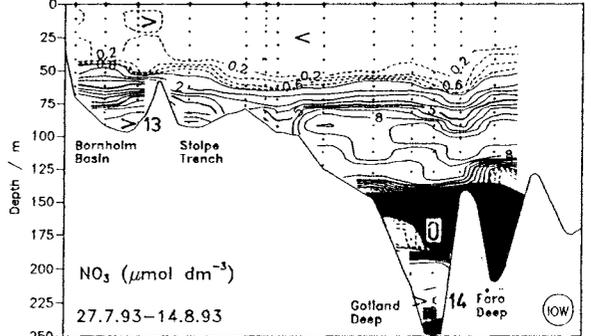
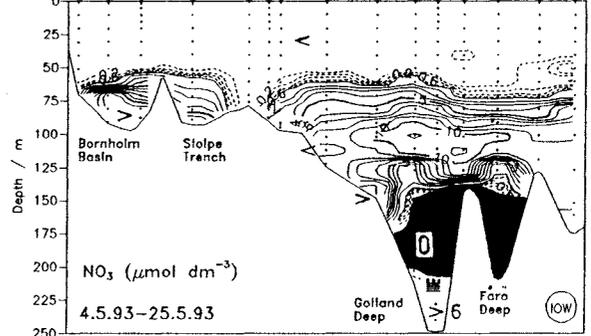
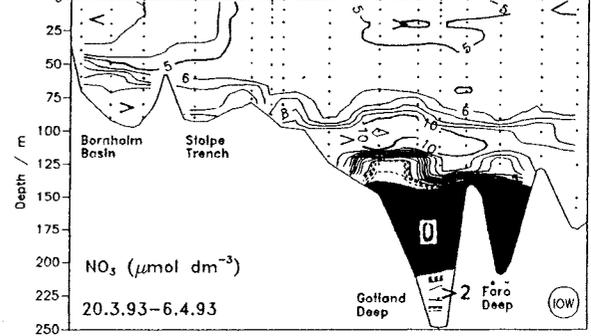
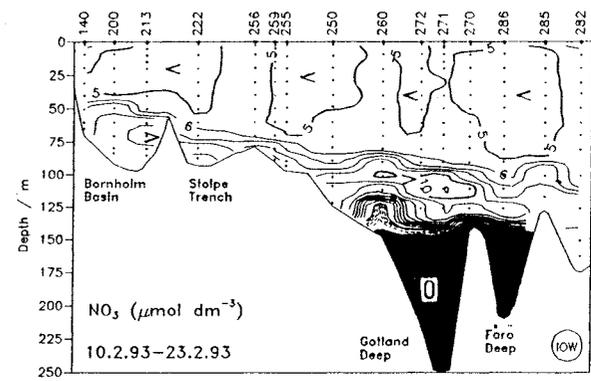
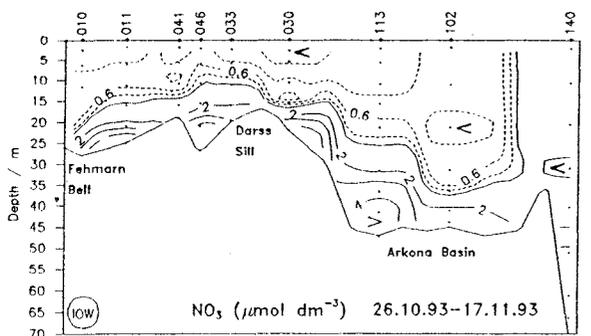
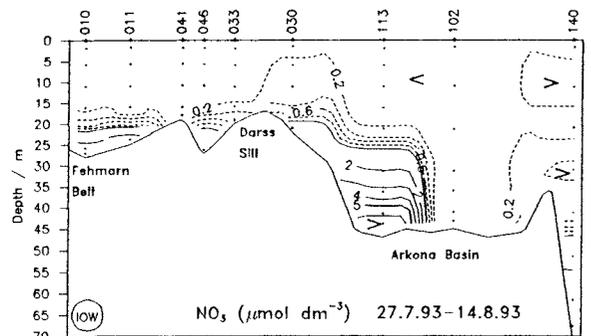
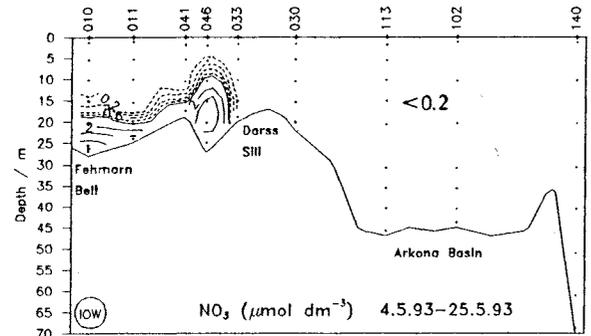
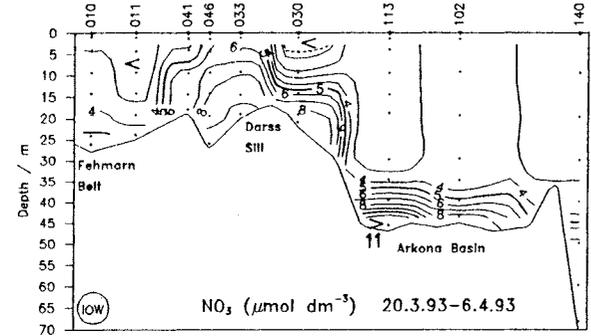
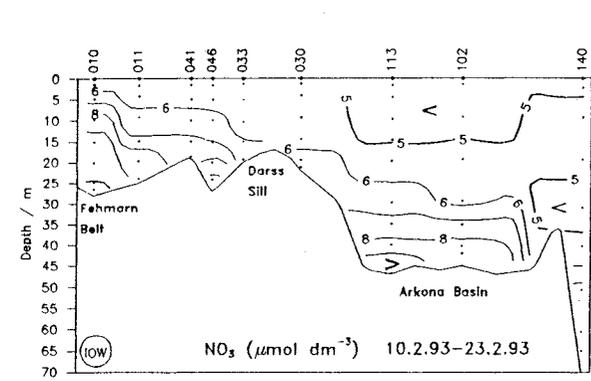


Abb. 22 Nitratverteilung

Die Erneuerung des Tiefenwassers beeinflusste auch die Phosphat- und Nitratverteilung in den zentralen Ostseebecken (Abb. 21 und 22). Die Auswirkungen auf das Bornholmbecken waren allerdings gering und hatten im Februar 1993 vorübergehend zur Ausbildung einer etwas nährstoffreicheren Zwischenschicht von ehemals stagnierendem Tiefenwasser geführt. Im Danziger Tief wurden keine Inversionen beobachtet.

Mit 13 bis 13,7 $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ wurden im August in der grundnahen Wasserschicht des Bornholmbeckens (> 80 m Tiefe) sehr hohe Nitratkonzentrationen gemessen. Ähnlich hohe Werte traten in dieser Jahreszeit auch im Danziger Tief auf. Darüber hinaus wurden im Tiefenwasser dieser Station (> 100 m Tiefe) Phosphatkonzentrationen von 8,6 bis 8,8 $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ registriert, die für oxische Bedingungen ungewöhnlich hoch sind.

Der Einstrom ins östliche Gotlandbecken spiegelt sich auch in der Phosphat- und Nitratverteilung wider (Abb. 21 und 22). Am nachhaltigsten waren die Veränderungen im Gotlandtief, in dessen Tiefenwasser das Redoxpotential zwischen anoxischen und oxischen Bedingungen variierte. Das anoxische Tiefenwasser wies hohe Phosphat-, Silikat- und Ammoniumkonzentrationen auf, während Nitrat und Nitrit fehlten. Unter oxischen Bedingungen nahmen die Konzentrationen dieser Substanzen ab, während der Nitratgehalt stark anstieg. Im August 1993 wurden im Gotlandtief 14,1 $\mu\text{mol NO}_3^-/\text{dm}^3$ in 228 m Tiefe gemessen. Sie traten in einer Zwischenschicht auf, die in einem anoxischen Wasserkörper eingebettet war.

Die mit dem Wechsel des Redoxpotentials im Gotlandtief verbundenen Nährsalzvariationen werden im Kapitel 5.2 ausführlich erläutert. Sie spiegeln sich indirekt auch in den Mittelwerten für das Jahr 1993 wider (Tabelle 7). In 200 m Tiefe erscheint erstmals wieder ein Nitratwert. Relativ hohe Jahresmittelwerte traten bei dieser Stickstoffverbindung auch in 100 m Tiefe auf.

Im Fårötief wurden 1993 keine nennenswerten Veränderungen in der Verteilung der anorganischen Phosphor- und Stickstoffverbindungen sowie des Silikatgehalts festgestellt. Dies gilt auch für das Tiefenwasser im nördlichen und westlichen Gotlandbecken.

5. Spezielle Untersuchungen im Gotlandtief

5.1 Hydrographisch-chemische Veränderungen im Tiefenwasser während der Stagnationsperiode 1977-1993

Durch den Salzwassereinbruch im Januar 1993 wurde die 16jährige Stagnationsperiode im Gotlandtief unterbrochen, die nach der letzten Umschichtung im Jahre 1977 begann, und die gegenüber früheren Perioden wesentliche Unterschiede aufwies (MATTHÄUS, 1986). Zu Beginn wurden mit > 8 PSU die höchsten Salzgehalte im Oberflächenwasser und mit $7,4$ °C die höchsten jemals in Grundnähe gemessenen Temperaturen beobachtet (FONSELIUS, 1977). Die 1977 ermittelten Tiefen der Isohalinen, 9 PSU in 50 m, 10 PSU in 60 m, 11 PSU in 75 m und 12 PSU in 100 m, gehören zu den geringsten, die bisher beobachtet wurden (MATTHÄUS, 1990). Während der Stagnationsperiode wurden im 100 m-Horizont die größten mittleren und maximalen Rückgänge von Temperatur ($0,13$ K pro Jahr bzw. $2,5$ K insgesamt) und Salzgehalt ($0,16$ PSU pro Jahr bzw. $3,5$ PSU insgesamt) festgestellt (vgl. Abb. 23). Anfang 1988 wurden mit $3,6$ °C die niedrigsten Temperaturen und zum Ende der Stagnationsperiode mit $8,6$ PSU auch die geringsten bisher beobachteten Salzgehalte dieses Horizontes registriert. Zwischen 1988 und Anfang 1993 stieg die Temperatur jedoch um etwa 2 °C an.

Auch im 200 m Horizont ergaben sich mit $0,10$ K bzw. $0,11$ PSU Extremwerte für die mittleren jährlichen Abnahmen. Die 10 PSU-, 11 PSU- und 12 PSU-Isohalien sanken jährlich im Mittel um $3,3$ m, $5,6$ m und $8,9$ m in größere Tiefen ab. Die 8 PSU-, 9 PSU-, 10 PSU- und 11 PSU-Isohalinen befanden sich Anfang 1993 in rund 85 m, 95 m, 120 m und 170 m. Sie haben sich damit seit 1977 um 30 bis 90 m in größere Tiefen verlagert.

Seit Januar 1988 war der Salzgehalt in der grundnahen Wasserschicht ständig kleiner als 12 PSU und erreichte Anfang 1993 mit $11,1$ PSU den niedrigsten bisher beobachteten Wert. Da der mittlere Rückgang des Salzgehaltes in der Oberflächenschicht geringer als im Tiefenwasser war, ist im Verlaufe der Stagnationsperiode die Stabilität der Schichtung zurückgegangen und der Vertikalaustausch erleichtert worden.

Im 100 m-Horizont des Gotlandtiefs herrschten während der gesamten Stagnationsperiode oxische Bedingungen, obgleich der Sauerstoffgehalt in den Jahren 1981–1984 und 1987–1990 auf sehr niedrige Werte abgesunken war. Zwischenzeitlich wurde die Advektion sauerstoffreicherer Wassers, die 1984/85 einen Höhepunkt erreichte (vgl. Abb. 23), beobachtet.

Mit Beginn der Stagnationsperiode nahm der Sauerstoffgehalt in 150 m und 200 m schnell ab, so daß bereits 1979 in beiden Tiefen anoxische Bedingungen auftraten. Während in der grundnahen Wasserschicht nach 1980 ständig anoxische Bedingungen herrschten, wurden in 150 m Tiefe bis zum Ende der Stagnationsperiode gelegentlich geringe Sauerstoffmengen, die mit advektiven Prozessen zusammenhängen, registriert.

In den vorliegenden Untersuchungen wurde Schwefelwasserstoff gemäß $S^{2-} + 2O_2 = SO_4^{2-}$ in negative Sauerstoffäquivalente umgerechnet. Die starken Fluktuationen dieser Werte in Abb. 23 sind nur teilweise die Folge jahreszeitlicher und zwischenjährlicher Variationen. Sie können darüber hinaus auch mit analytischen Unzulänglichkeiten zusammenhängen, die bei hohen Schwefelwasserstoffkonzentrationen auftreten und erst am Ende des Untersuchungszeitraumes eliminiert wurden.

Die Schwefelwasserstoffkonzentrationen erreichten sowohl in 150 m als auch in 200 m Tiefe extreme Werte. Als absoluter Höchstwert wurden am Ende der Stagnationsperiode (November 1992) $7,7 \text{ mg/dm}^3$ ($-10,2 \text{ cm}^3 \text{ O}_2/\text{dm}^3$) in der bodennahen Wasserschicht (238 m) ermittelt. Mit der Wassererneuerung erfolgte im Frühjahr 1993 auch die Zufuhr von Sauerstoff.

Abschwächung und Intensivierung der advektiven Prozesse führten im 100 m-Horizont des Gotlandtiefs zu Variationen im Phosphatgehalt, die sich spiegelbildlich zu denen des Sauerstoffs verhalten (Abb. 23). Die Auswirkungen auf den Nitratgehalt sind schwächer ausgeprägt und werden von einem positiven Trend überlagert (vgl. auch NEHRING, MATTHÄUS, 1991/92).

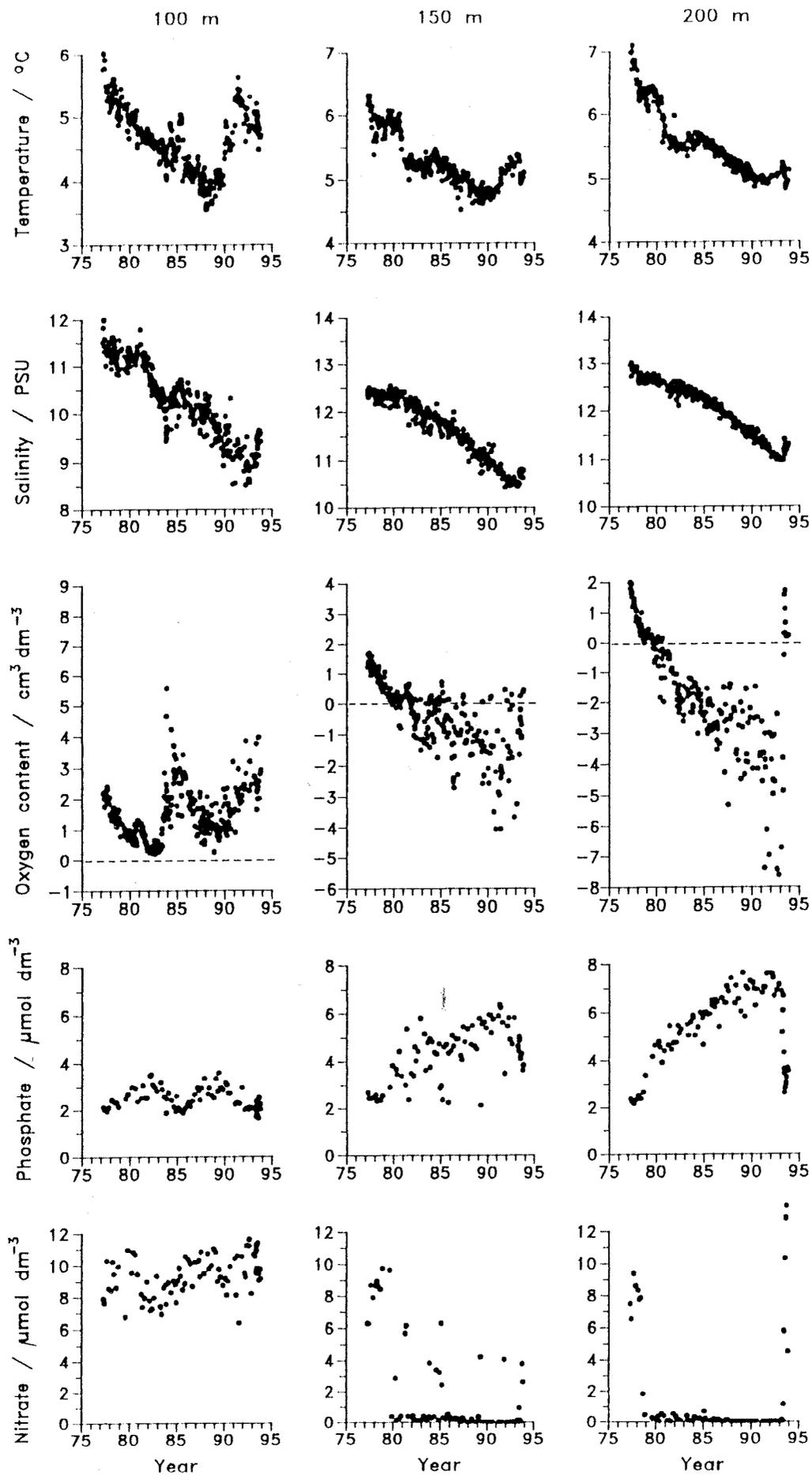


Abb. 23

Variationen von Temperatur und Salzgehalt sowie Sauerstoff-, Phosphat- und Nitratkonzentrationen während der Stagnationsperiode 1977 bis 1993 im Gotlantief (Schwefelwasserstoff als negative Sauerstoffäquivalente)

Im stagnierenden Tiefenwasser ist die sprunghafte Änderung des Redoxpotentials, die mit dem Wechsel zwischen anoxischen und oxischen Bedingungen zusammenhängt, von entscheidender Bedeutung für die Verteilungsmuster des Phosphats und Nitrats. Neben der Remineralisierung ist es vor allem die mit der Schwefelwasserstoffbildung einhergehende Freisetzung aus den Sedimenten, die zu einem starken Anstieg des Phosphatgehalts in 150 m und 200 m Tiefe führte. Dieser Akkumulation scheinen jedoch bei langen Stagnationsperioden Grenzen gesetzt zu sein, denn seit Ende der 80er Jahre verharrte der Phosphatgehalt in der grundnahen Wasserschicht bei 6 bis 8 $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$, bis ab April 1993 eine starke Abnahme infolge Wassererneuerung einsetzte.

Nitrat lag nur zu Beginn der Stagnationsperiode und während der Wasserumschichtung in hohen Konzentrationen vor. Die bei Sauerstoffmangel einsetzenden Denitrifikationsprozesse führten zwischenzeitlich sehr schnell zu einer praktisch vollständigen Elimination dieser Stickstoffverbindung (Abb. 23). Die Nitratwerte, die vereinzelt auch nach 1980 in 150 m Tiefe gemessen wurden, sind an das kurzzeitige Auftreten oxischer Bedingungen gekoppelt. Auf die gleiche Ursache sind auch einige relativ niedrige Phosphatwerte in dieser Schicht zurückzuführen.

Der Verlauf der zeitlichen Veränderungen in Abb. 23 läßt zwischen einigen der untersuchten hydrographischen und chemischen Parametern enge Beziehungen erwarten. Diese Beziehungen werden in Abb. 24 näher untersucht. Bei ihnen handelt es sich zumeist um keine echten Ursache-Wirkungsbeziehungen, sondern um Korrelationen, die durch dritte Parameter gesteuert werden.

Die enge Korrelation zwischen den Verteilungsmustern des Phosphat- und Sauerstoffgehalts in 100 m Tiefe hängen vorrangig mit der Intensität der advektiven Prozesse in dieser Schicht zusammen. In 150 m und 200 m Tiefe werden die Beziehungen zwischen diesen beiden Größen dagegen durch die Dauer der Stagnationsperiode und die Änderungen des Redoxpotentials durch mikrobielle Sauerstoffzehrungsprozesse sowie die Phosphatremineralisierung und -remobilisierung, um nur einige wichtige Einflußgrößen zu nennen, bestimmt. Die meisten dieser Einflußgrößen sind auch für die Korrelationen zwischen dem Phosphat- und

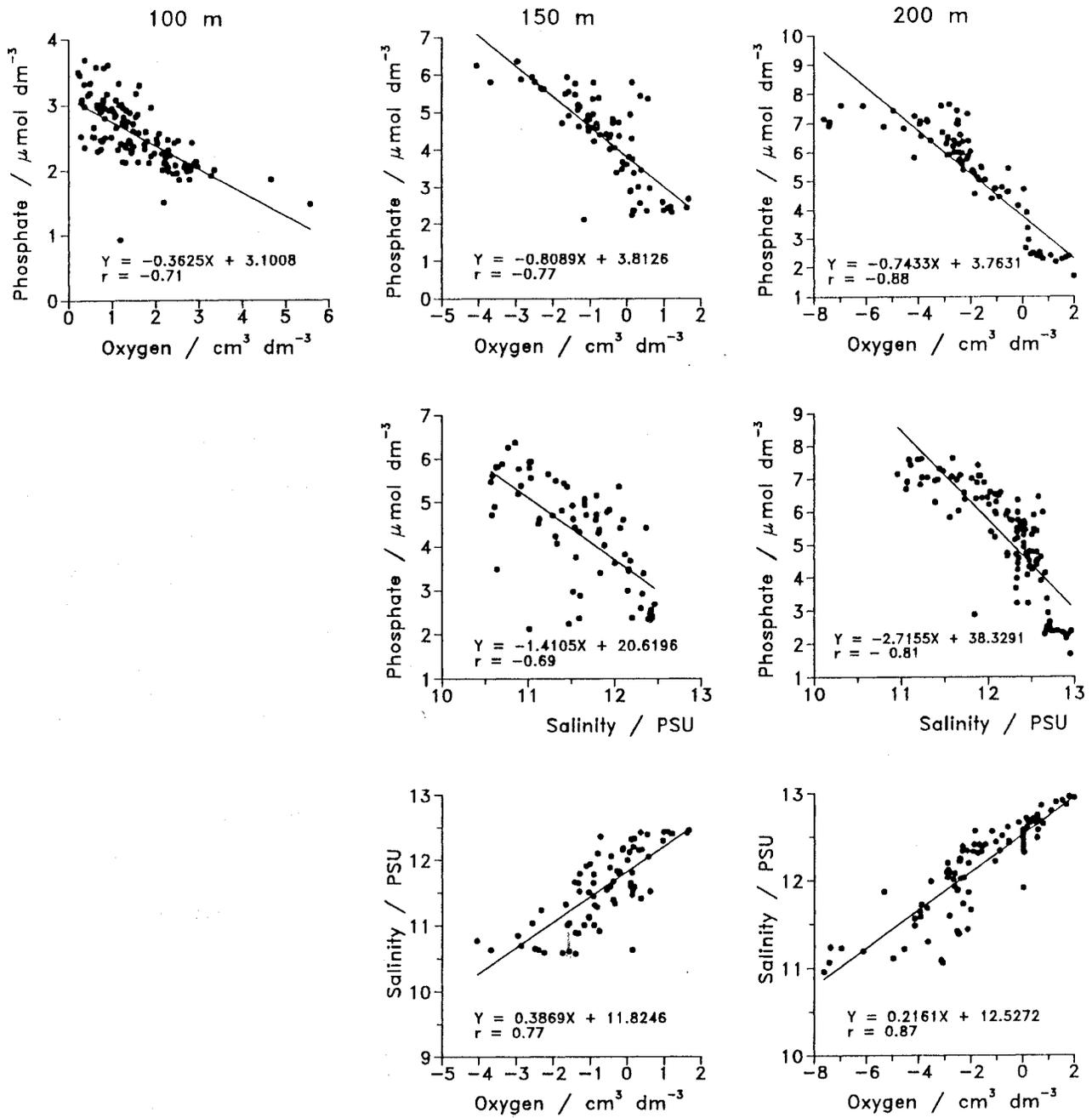


Abb. 24

Korrelationen zwischen dem Phosphat-, Sauerstoff- und Salzgehalt während der Stagnationsperiode 1977 bis 1993 im Gotlantief (Schwefelwasserstoff als negative Sauerstoffäquivalente)

Salzgehalt von Bedeutung. Bei den Beziehungen zwischen dem Salz- und Sauerstoffgehalt dominieren zeitliche Veränderungen. Während der Phosphat- und Sauerstoffgehalt sowie der Phosphat- und Salzgehalt negativ miteinander korreliert sind, verändern sich der Salz- und Sauerstoffgehalt gleichsinnig.

5.2 Austausch des Tiefenwassers 1993

Die ersten Auswirkungen des Salzwassereinbruchs vom Januar 1993 wurden im Gotlandtief bereits Anfang April festgestellt. Dies spricht verglichen mit früheren Ereignissen, bei denen die Wassererneuerung erst nach 6–9 Monaten begann (NEHRING, FRANCKE, 1981), für ein sehr schnelles Vordringen des salzreicheren Wassers. Der Salzgehalt im grundnächsten Meßhorizont (235–238 m Tiefe) erhöhte sich zwischen Februar und April 1993 von 11,1 PSU auf 11,6 PSU und erreichte im Mai mit rund 11,8 PSU sein Maximum (vgl. auch Kapitel 4.2). Die Sauerstoffverteilung zeigte in der grundnahen Schicht unterhalb 200 m Tiefe Intrusionen sauerstoffhaltigen Wassers, die das schwefelwasserstoffhaltige, stagnierende Tiefenwasser angehoben hatten. Die anoxische Zwischenschicht, die sich in 140 bis 190 m Tiefe befand, blieb im wesentlichen während der folgenden Monate erhalten. Im August wurde bereits wieder ein starker Rückgang des Sauerstoffgehaltes auf $0,05 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$ im bodennahen Horizont beobachtet. Im November hatte sich die schwefelwasserstoffhaltige Zwischenschicht aufgelöst. Dafür herrschten unterhalb 200–225 m Tiefe bereits wieder anoxische Bedingungen. In Abb. 25 sind die Veränderungen im 225 m-Horizont des Gotlandtiefs dargestellt, wie sie bei 8 Beprobungen zwischen November 1992 und November 1993 angetroffen wurden. Aus der Darstellung wird sichtbar, daß über einen Zeitraum von etwa 5 Monaten oxische Verhältnisse in dieser Tiefe vorlagen. Die günstigsten Sauerstoffbedingungen herrschten hierbei im Zeitraum von Mai bis Juni 1993. Die Zufuhr sauerstoffhaltigen Wassers war durch deutlich niedrigere Phosphat- und Ammoniumkonzentrationen sowie höhere Nitratkonzentrationen gekennzeichnet.

Die Nährsalzverteilung reagierte drastisch auf das sich kurzfristig ändernde Redoxpotential (Abb. 25). Als Endprodukt der Mineralisation der organischen Substanz wird im anoxischen Milieu Ammonium akkumuliert. Mit dem Einstrom sauerstoffhaltiger Wassermassen wurde auch Nitrat zugeführt. Außerdem setzte eine starke Nitrifikation ein, die zur Abnahme des

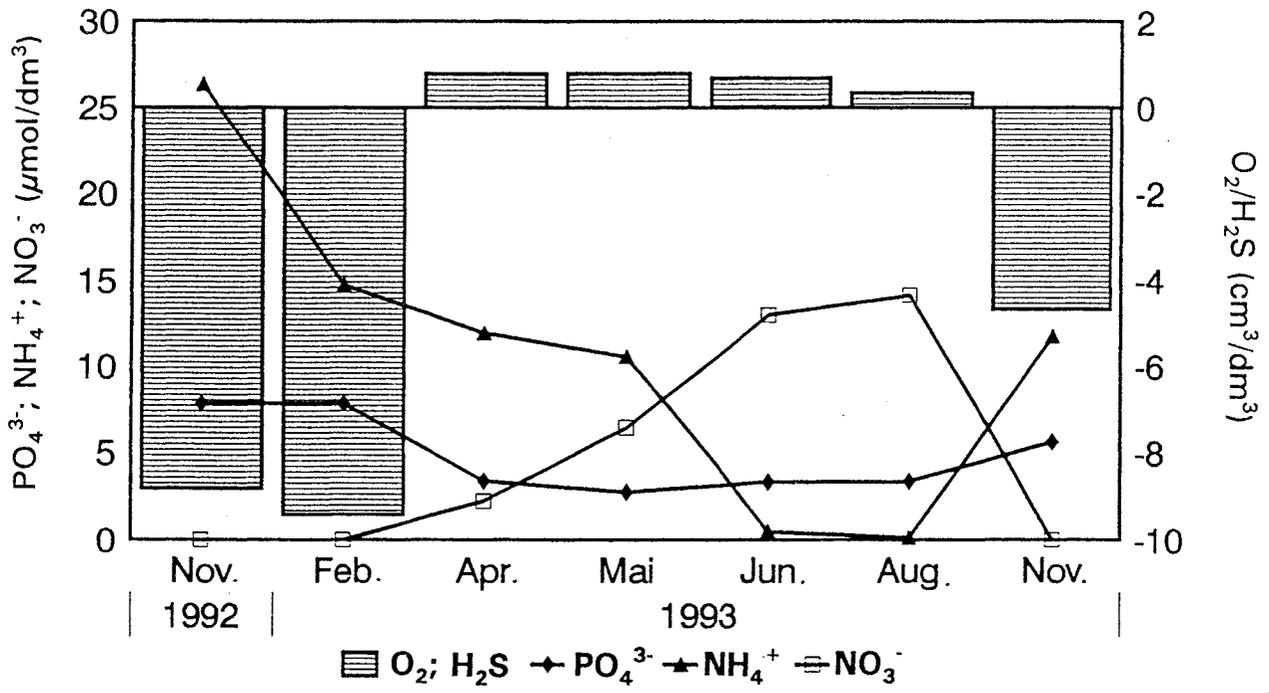


Abb. 25

Verteilung von Nährsalzen in Abhängigkeit von den Sauerstoff-Schwefelwasserstoffkonzentrationen in 225 m Tiefe im Gotlandtief

Ammoniums führte. Im Juni–Juli lagen die Konzentrationen dieser Stickstoffverbindung nahe Null. Gleichzeitig nahm die Nitratkonzentration deutlich zu. Im November kehrten sich die Verhältnisse aufgrund der wechselnden Redox–Bedingungen wieder um. Auch der Phosphatgehalt zeigte klare Reaktionen auf die Veränderungen der Redox–Bedingungen. Im anoxischen Wasser kam es durch Mineralisation und Rücklösung aus dem Sediment zu hohen Phosphatanreicherungen. Umgekehrt führten oxische Bedingungen zur Bindung zuvor gelöster Phosphate an Eisenoxidhydrate und deren Ablagerung im Sediment (vgl. auch BALZER, 1984), so daß die Phosphat–Konzentrationen von $7,8 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ im Februar 1993 auf $2,8 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ im Mai zurückgingen. Zusätzlich muß hier auch der niedrigere Phosphatgehalt des einströmenden Wassers berücksichtigt werden. Im November wurden unter anoxischen Bedingungen bereits wieder $5,6 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ Phosphat registriert.

Die Wasserumschichtung im Gotlandtief ist ein Prozeß, dessen Dynamik während der routinemäßigen Monitoring–Beprobungen nicht voll erfaßt werden kann. Während einer zusätzlichen Meßkampagne vom 27. Juni bis 3. Juli 1993 konnten die starken Variabilitäten, die besonders im Tiefenbereich von 140 m bis 180 m ausgeprägt waren, genauer untersucht werden. In Abb. 26 ist exemplarisch die zeitliche Veränderlichkeit in 150 m Tiefe dargestellt. Deutlich zu erkennen ist der kurzfristige Wechsel zwischen oxidierenden und reduzierenden Bedingungen. Damit verbunden sind starke Veränderungen in der Verteilung des Phosphatgehaltes sowie der anorganischen Stickstoffverbindungen.

Bei den Untersuchungen, die Ende Juni/Anfang Juli 1993 im Gotlandtief durchgeführt wurden, verliefen die Variabilitäten in den verschiedenen Tiefenhorizonten durchaus nicht synchron. So herrschten nur an 4 der 8 Meßtermine im 150 m– und 175 m–Horizont gleichermaßen oxische bzw. anoxische Bedingungen.

Da die Dichteunterschiede zwischen einströmendem und stagnierendem Wasser relativ gering waren, bildeten sich separate Wasserkörper, die auch Pulsationen im Einstrom durch die Stolper Rinne widerspiegeln. Wie bereits NEHRING u.a. (1971) feststellten, ist dies für die Wasserumschichtungen im Gotlandtief charakteristisch und die Ursache für den raschen

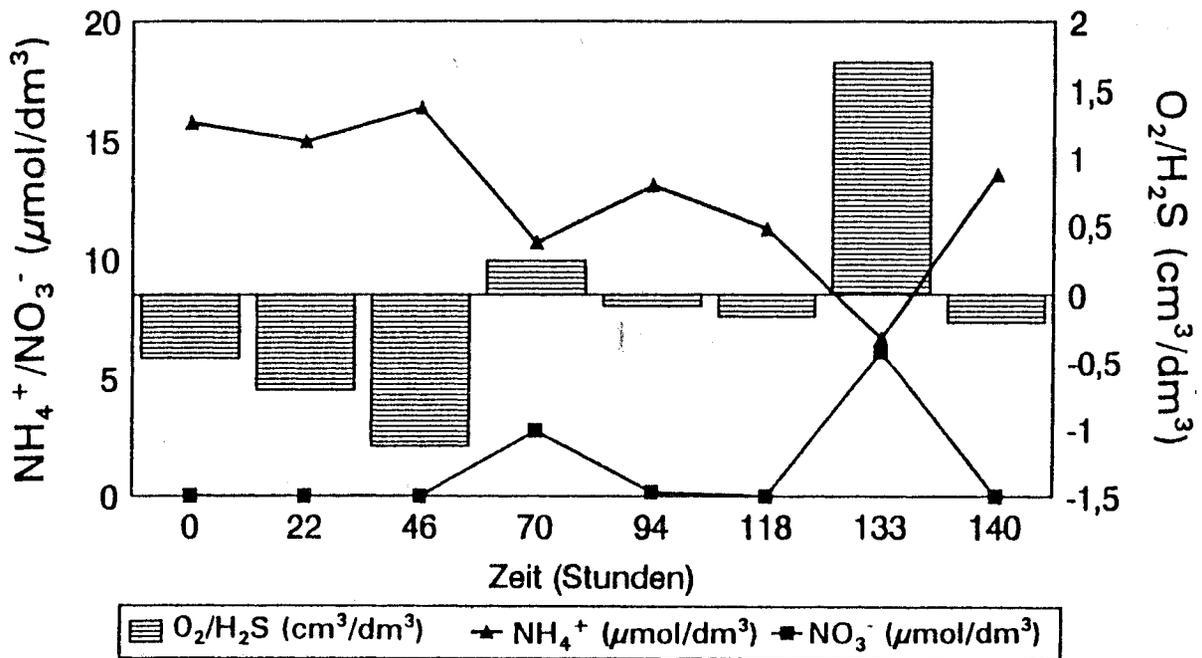
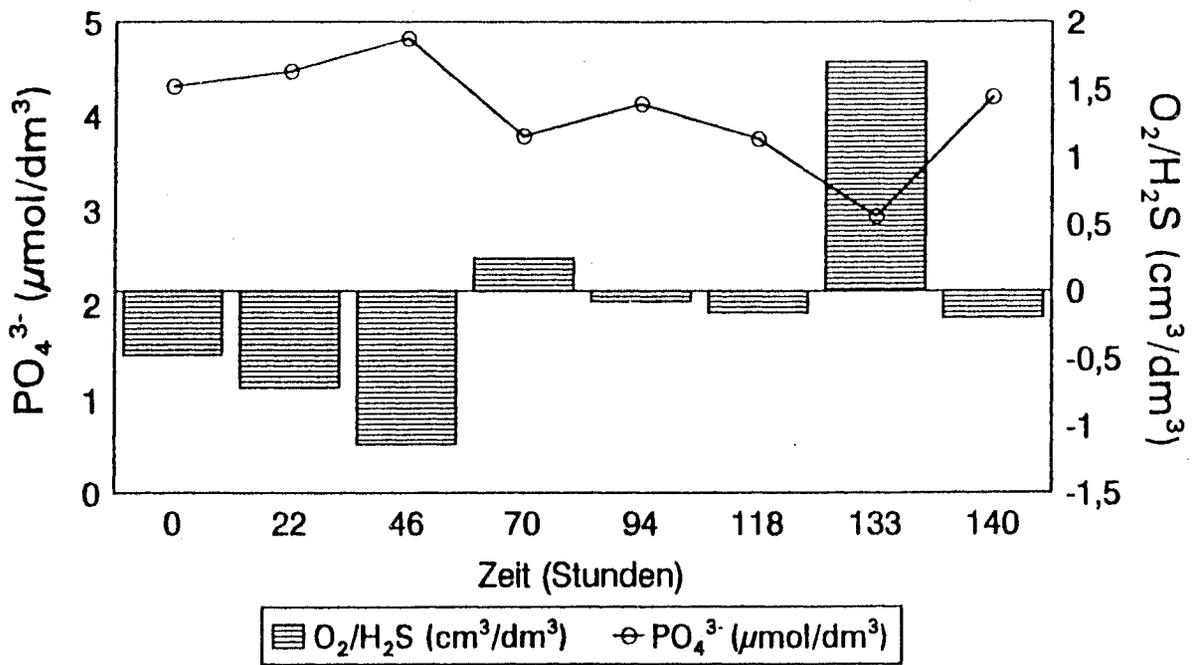


Abb. 26

Wechselwirkung zwischen den Nährsalzen und den oxischen/anoxischen Bedingungen in 150 m Tiefe im Gotlandtief (27.6. bis 3.7.1993)

Wechsel zwischen oxydierenden und reduzierenden Verhältnissen im Tiefenwasser. Diese Aussage trifft gleichermaßen für kleinskalige zeitliche und räumliche Veränderungen zu. Angemerkt werden soll in diesem Zusammenhang, daß kurzzeitig (2. Juli 1993) im gesamten Profil Sauerstoff vorhanden war.

Die oben beschriebene enge Verknüpfung zwischen dem Redoxpotential und der Nährsalzverteilung wurde auch durch gezielte Untersuchungen im Bereich der Redox-Sprungschicht bestätigt. Am 1. Juli 1993 wurde der Übergangsbereich vom oxischen zum anoxischen Milieu in 2 m-Abständen beprobt. Während die Temperatur und der Salzgehalt nur wenig zunahm ($\Delta T = 0,11 \text{ K}$; $\Delta S = 0,15 \text{ PSU}$), zeigten die chemischen Parameter sehr starke Fluktuationen. Abb. 27 macht deutlich, daß selbst bei dieser hohen Auflösung keine lineare Zu- bzw. Abnahme zu verzeichnen ist, was für die hohe Dynamik des Systems spricht. Interessant ist auch die rasche Nitrat-Abnahme beim Übergang zum anoxischen Milieu. Der Tiefenbereich der Redox-Sprungschicht ist für die Stickstofftransformationen von dominanter Bedeutung (NEHRING, 1984). In Gegenwart von Sauerstoff werden erhebliche Nitratmengen durch die mikrobielle Nitrifikation erzeugt. Dieses Nitrat stellt im unmittelbar darunter befindlichen, an Sauerstoff verarmten Milieu das Substrat für die Denitrifikation dar. Der Übergangsbereich Wasser - Sediment, der im Gotlandtief über längere Zeiträume reduzierende Bedingungen aufweist, verliert demgegenüber wegen der fehlenden Nitratnachlieferung an Bedeutung für die Denitrifikation.

Wie oben gezeigt wurde, herrschten in der bodennahen Wasserschicht des Gotlandtiefs im November 1993 bereits wieder anoxische Bedingungen. Einen Hinweis auf die Intensität sauerstoffverbrauchender Prozesse geben Untersuchungen zur Sauerstoffzehrung (z.B. SCHULZ, 1992). In Abb. 28 ist die vertikale Zonierung dieses Prozesses im Gotlandtief dargestellt. Im euphotischen Bereich erfolgt neben der Sauerstoffproduktion auch ein erheblicher Sauerstoffverbrauch durch Atmungsvorgänge tierischer Organismen und Mineralisation der reichlich vorhandenen organischen Substanz im kurzgeschlossenen Kreislauf. Im darunter liegenden winterlichen Zwischenwasser wurden keine (50 m Tiefe) bzw. nur minimale Zehrungsraten gemessen, was für einen nur geringen Vorrat abbaubarer Substanz spricht. Im Bereich der Salzgehaltssprungschicht kommt es aufgrund der zunehmenden Dichte zu einer

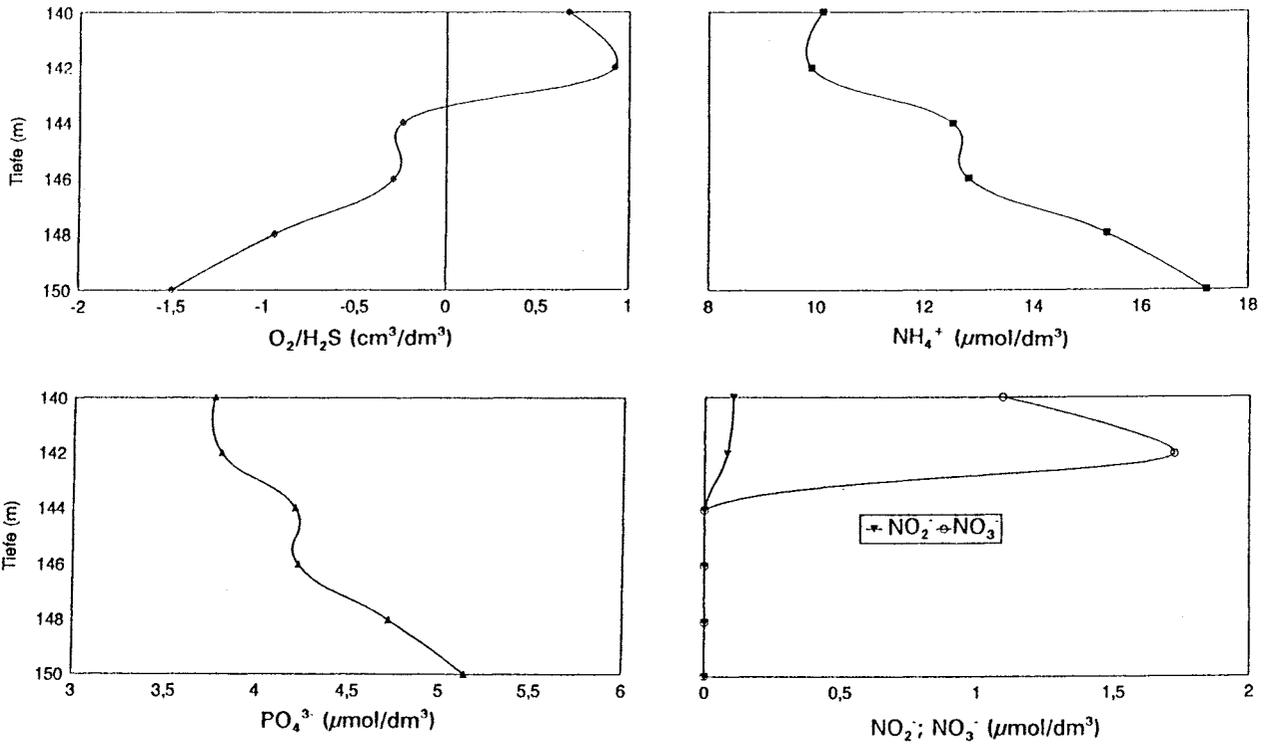


Abb. 27

Nährsalzverteilung und Sauerstoff-Schwefelwasserstoffkonzentrationen im Bereich der Redox-Sprungschicht im Gotlandtief (1.7.1993)

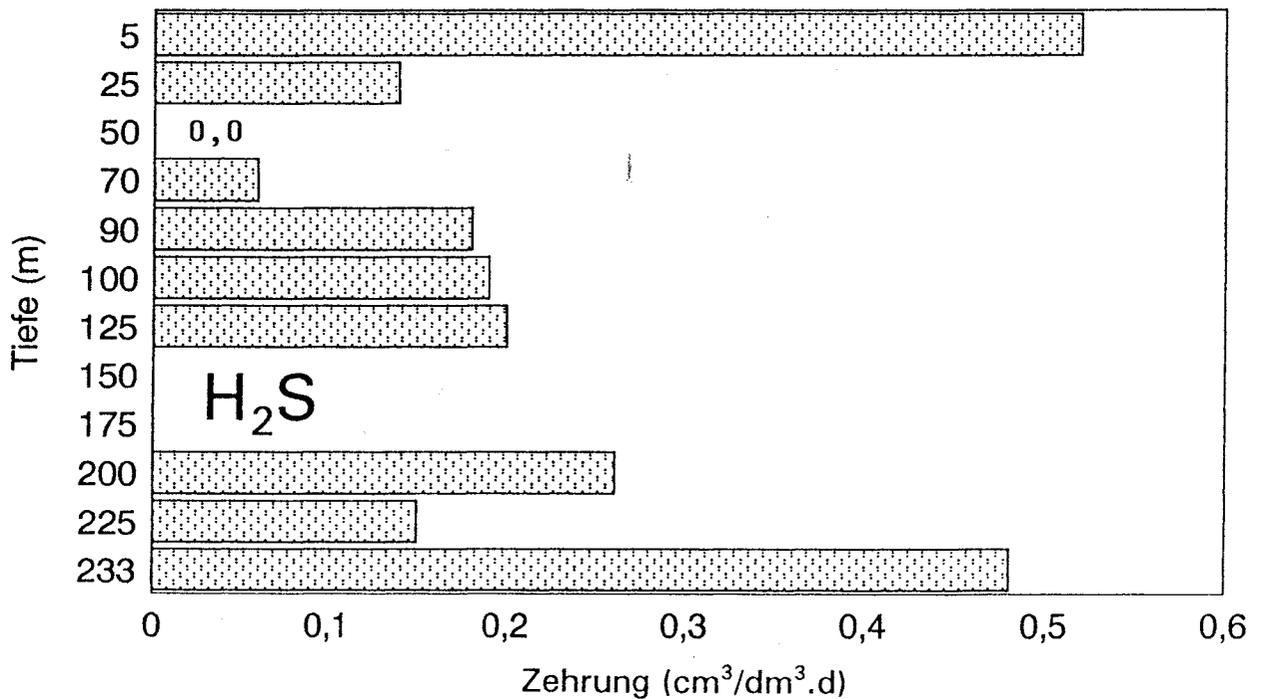


Abb. 28

Vertikale Zonierung der Sauerstoffzehrung im Gotlandtief (1.7.1993)

verlangsamten Sedimentation. Die damit verbundene Akkumulation organischer Partikel war durch einen Anstieg der Zehrungswerte gekennzeichnet. Besonders hervorzuheben ist jedoch der starke Sauerstoffverbrauch im Tiefenwasser, vor allem in der bodennahen Schicht. Die hohen Zehrungsraten in der grundnahen Wasserschicht des Gotlandtiefs zeigen, daß besonders bei langen Stagnationsperioden große Mengen reduktiver Verbindungen akkumuliert werden. Bei fehlender Nachlieferung von Sauerstoff können daher sehr rasch wieder anoxische Bedingungen auftreten, so daß die Verbesserung der Lebensbedingungen in den Tiefenbecken der zentralen Ostsee nur von kurzer Dauer ist.

6. Diskussion

Der Winter 1992/93 war der sechste milde Winter in Folge und die Ursache für positive Temperaturanomalien in der Oberflächenschicht und im kalten Zwischenwasser der Ostsee. Weiter verstärkt wurden diese Anomalien durch das überdurchschnittlich warme Frühjahr, so daß trotz des insgesamt deutlich zu kühlen Sommers 1993 die Wassertemperaturen nur geringfügig unter den für diese Jahreszeit charakteristischen Mittelwerten blieben.

Die Jahresmittelwerte des grundnahen Salzgehaltes auf der Darßer Schwelle waren 1993 bis zu 1,4 PSU höher als 1992, was auf einen intensiveren Austausch von Salzwasser zwischen Kattegat und Arkonabecken hinweist. Salzgehalte von mehr als 15 PSU in der gesamten Wassersäule wurden jedoch nur im Januar sowie im Dezember 1993 festgestellt.

Die hydrographisch-chemischen Bedingungen im Tiefenwasser der zentralen Ostsee wurden 1993 durch einen Salzwassereinbruch geprägt, bei dem im Januar salzreiches Wasser die Darßer und Drogden Schwelle passierte. Vorausgegangen war eine längere Periode starker westlicher Winde und orkanartiger Stürme, in deren Verlauf der Einstrom zwischen dem 18. und 28. Januar in einem Salzwassereinbruch kulminierte. Insgesamt gelangten dabei 310 km³ Wasser in die Ostsee, davon etwa 135 km³ mit Salzgehalten ≥ 17 PSU.

Der Salzwassereinbruch des Jahres 1993 gehört bei den meist in Gruppen über mehrere Jahre auftretenden Salzwassereinbrüchen zu den wenigen Einzelereignissen dieses Jahrhunderts. Für die Intensität des Einstroms wurde nach der empirischen Formel von MATTHÄUS und FRANCK (1992) ein Index von rund 21 ermittelt. Dieser Wert kennzeichnet den Salzwassereinbruch nur als Ereignis mittlerer Stärke. Seine Effektivität wurde außerdem dadurch reduziert, dass erhebliche Salzmengen mit dem sich anschließenden Ausstrom die Ostsee wieder verließen und somit für den Erneuerungsprozeß im Tiefenwasser verloren gingen.

Verglichen mit allen Salzwassereinbrüchen dieses Jahrhunderts nimmt das jüngste Ereignis eine Sonderstellung im Hinblick auf die mit 21 Tagen sehr kurze Andauer des gesamten Einstromprozesses (im Mittel 32 Tage) und den in diesem Zeitraum mit +70 cm bisher erst einmal bei Salzwassereinbrüchen (November/Dezember 1913) erreichten Füllungsgrad der Ostsee ein (FRANCK, MATTHÄUS, 1992). Auch bezüglich der mittleren Ausbreitungsgeschwindigkeit des eingeströmten salzreichen Wassers, die mit mindestens 16 cm/s sehr hoch war, unterscheidet er sich von früheren Salzwassereinbrüchen (NEHRING, FRANCKE, 1981), bei denen für die Distanz Darßer Schwelle - Gotlandtief nur 2,5 bis 6 cm/s ermittelt wurden.

Durch den Salzwassereinbruch wurde die längste und in ihren Veränderungen gravierendste Stagnationsperiode unterbrochen, die bisher in der Ostsee beobachtet wurde (MATTHÄUS, 1990). Im Tiefenwasser des östlichen Gotlandbeckens wurde im Verlauf dieser Periode ein drastischer Rückgang der Temperatur sowie des Salz- und Sauerstoffgehalts beobachtet. Zu Beginn der Stagnation wurden in Grundnähe mit 7,4 °C die höchsten Temperaturen gemessen und im Jahre 1991/92 mit 7-8 mg/dm³ die höchsten Konzentrationen an Schwefelwasserstoff registriert, die jemals im Gotlandtief vorhanden waren. Der Anfang 1993 im Bodenwasser (236 m Tiefe) beobachtete Salzgehalt von 11,1 PSU war der niedrigste auf dieser Station seit Beginn regulärer Messungen vor rund 100 Jahren. Im Verlaufe der Stagnationsperiode kam es im 200 m Horizont des Gotlandtiefs zu einem mittleren Rückgang der Temperatur um 2 K und des Salzgehaltes um 2 PSU. Die Abnahme des Sauerstoffgehalts, einschließlich negativer Sauerstoffäquivalente durch die Zunahme der Schwefelwasserstoffkonzentration, erreichte Beträge um 9,5 cm³/dm³.

Im Verlauf der Wassererneuerung stieg der Salzgehalt in der grundnahen Wasserschicht des Gotlandtiefs nur von 11,1 PSU auf 11,8 PSU an. Bei früheren Salzwassereinbrüchen wurde dagegen eine Zunahme auf 12,5 bis 14 PSU beobachtet.

Durch den Salzwassereinbruch wurde vor allem das Tiefenwasser des Bornholm- und Danziger Beckens nachhaltig mit Sauerstoff versorgt. Die im Februar bzw. März 1993 beobachteten Sauerstoffkonzentrationen waren die höchsten seit Ende der 70er Jahre. Relativ günstige Sauerstoffverhältnisse herrschten in dieser Zeit auch im Südteil des östlichen Gotlandbeckens.

Die Umschichtung im Gotlandtief führte nur zu einer sehr begrenzten Sauerstoffversorgung im Tiefenwasser dieser Station. Sie wurde begleitet durch starke Fluktuationen in der Sauerstoff- und Schwefelwasserstoffverteilung und spiegelt Pulsationen im Einstrom durch die Stolper Rinne wider. Lediglich Anfang Juli 1993 herrschten kurzzeitig in der gesamten Wassersäule oxische Bedingungen. Zumeist war eine anoxische Zwischenschicht vorhanden, die allerdings nur relativ geringe Schwefelwasserstoffkonzentrationen aufwies. Der hohe Gehalt an reduktiven Substanzen, der durch Sauerstoffzehrungsmessungen nachgewiesen wurde, ist die Ursache dafür, daß sich bereits ab November 1993 erneut Schwefelwasserstoff in der grundnahen Wasserschicht des Gotlandtiefs auszubreiten begann. Im Bornholm- und Danziger Becken wurde in der 2. Jahreshälfte ebenfalls ein starker Rückgang des Sauerstoffgehalts beobachtet.

Abb. 1 gibt einen Überblick über die Sauerstoffverhältnisse in der grundnahen Wasserschicht im Jahre 1993. Sie zeigt die vorübergehende Abnahme der Schwefelwasserstoffkonzentrationen auf allen Stationen des östlichen Gotlandbeckens sowie die relativ günstigen Sauerstoffbedingungen in den anderen Teilgebieten der Ostsee. Im westlichen und nördlichen Gotlandbecken setzt sich damit eine Entwicklung fort, die seit einigen Jahren beobachtet wird und deshalb unabhängig von dem Salzwassereinbruch im Januar 1993 ist. Infolge des gegenwärtig sehr niedrigen Salzgehalts in der grundnahen Wasserschicht dieser Becken kann die Sauerstoffversorgung offensichtlich auch durch Wassermassen erfolgen, die das östliche Gotlandbecken in einer Zwischenschicht passiert haben. Vorstellungen, daß auch die verringerte Schichtungsstabilität den vertikalen Austausch entscheidend erleichtert und damit zur Sauerstoffversorgung des Tiefenwassers beiträgt, sind nicht eindeutig belegt.

Allen Teilgebieten der Ostsee ist gegenwärtig gemeinsam, daß die Konzentrationen der anorganischen Phosphor- und Stickstoffverbindungen im Mittel zunehmen, während der Silikatgehalt abnimmt (HELCOM, 1990). Diese Langzeitveränderungen sind in der zentralen Ostsee deutlicher ausgeprägt als in den Übergangsgebieten zur Nordsee sowie im Bott-nischen, Finnischen und Rigaer Meerbusen. Sie weisen regionale und zwischenjährige Unterschiede auf.

Die 1993 ermittelten Winterkonzentrationen des Phosphats und Nitrats ordnen sich in die positiven Gesamttrends ein, die seit einigen Jahrzehnten in der Oberflächenschicht der zentralen Ostseebecken beobachtet werden (NEHRING, MATTHÄUS, 1991). Dies trifft auch für die Phosphat- und Nitratkonzentrationen zu, die im 100 m-Horizont des Gotlandtiefs gemessen wurden.

Die ungewöhnlich niedrigen Nährsalzkonzentrationen, die im November 1993 in der euphotischen Schicht des östlichen Gotlandbeckens festgestellt wurden, scheinen mit einer intensiven Herbstblüte von Diatomeen zusammenzuhängen, wie die extrem niedrigen Silikatkonzentrationen ausweisen. Damit ergibt sich erstmals ein Hinweis darauf, daß auch Silikat zum produktionsbegrenzenden Nährstoff in der eigentlichen Ostsee werden kann.

Die Verteilungsmuster der anorganischen Phosphor- und Stickstoffverbindungen sowie des Silikats im Tiefenwasser der zentralen Ostsee wurden durch den Salzwassereinbruch im Januar 1993 geprägt. Die damit verbundene Wassererneuerung führte vor allem in den grundnahen Schichten zu starken Veränderungen und Variabilitäten in der Verteilung dieser Parameter. Im Einklang mit früheren Untersuchungen (GIESKES, GRASSHOFF, 1971, NEHRING u.a., 1971) zeigten diese Messungen im Gotlandtief erneut, daß dabei das Redox-potential, das sich im Wechsel von oxischen und anoxischen Bedingungen kurzfristig änderte, eine entscheidende Rolle spielt.

Die Beziehung zwischen dem Phosphatgehalt einerseits und den Sauerstoff- und Schwefelwasserstoffkonzentrationen andererseits wird in Abb. 29 (oben) näher untersucht. Mit einem Korrelationskoeffizienten von $r = -0,86$ ist diese Beziehung sehr eng.

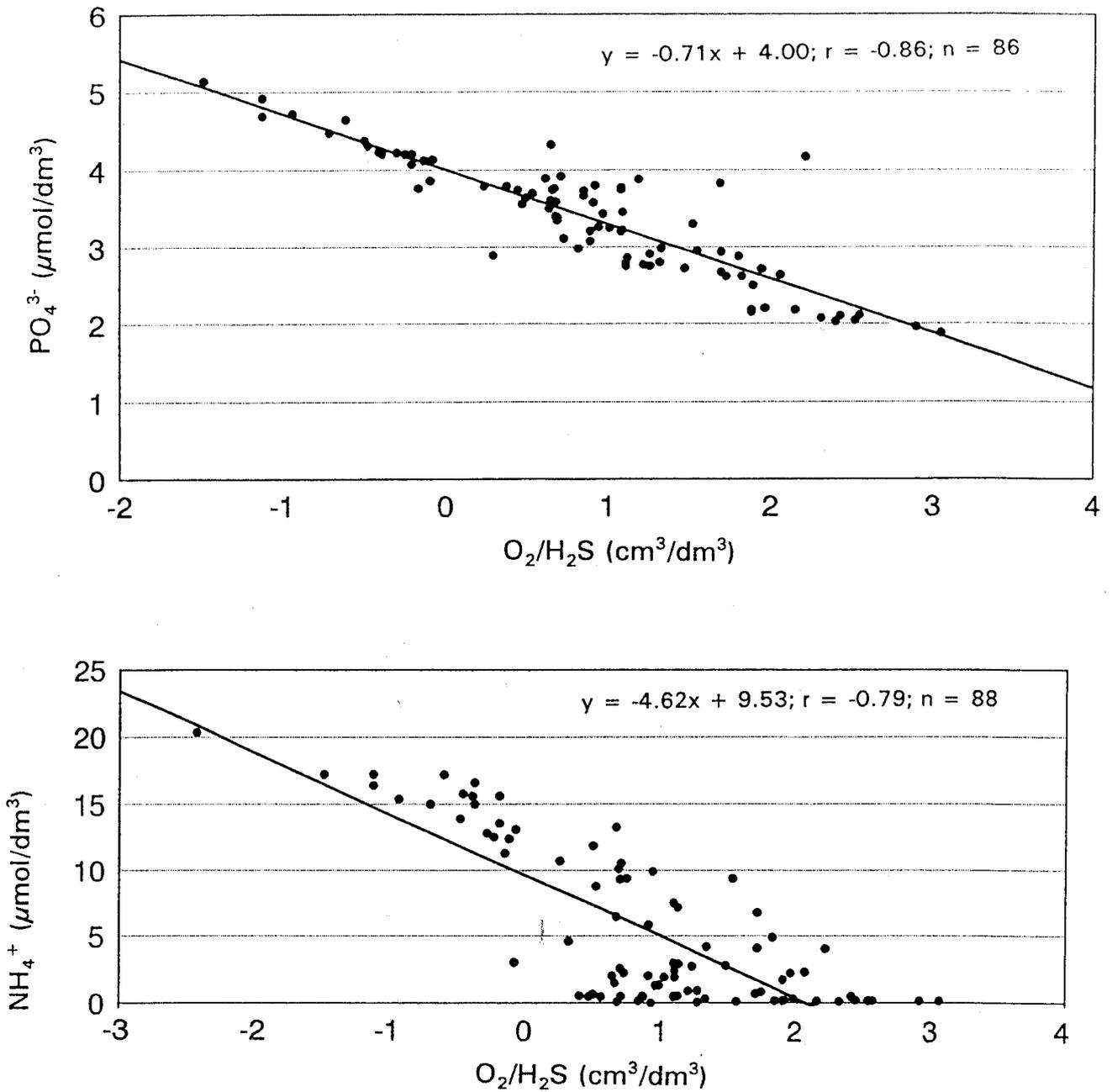


Abb. 29
 Beziehungen zwischen der Sauerstoffabnahme/Schwefelwasserstoffbildung und der Phosphat- (oben) bzw. Ammoniumakkumulation (unten) im Gotlandtief (27.6. bis 3.7.1993; 100 m Tiefe bis Boden)

Eine nicht ganz so enge Korrelation erhält man, wenn die gesamte Stagnationsperiode 1977 bis 1993 berücksichtigt wird (vgl. Abb. 24). Von Bedeutung ist in diesem Zusammenhang, daß der Phosphatgehalt in den grundnahen Horizonten des Gotlandtiefs am Ende längerer Stagnationsperioden kaum noch zunimmt, während die Schwefelwasserstoffkonzentration weiter stark ansteigt (vgl. Abb. 23).

Gemäß dem Redfield-AOU-Konzept (apparent oxygen utilization) ist das molare Verhältnis von Sauerstoffverbrauch und Phosphatakkumulation im Tiefenwasser des offenen Ozeans durch 276 : 1 charakterisiert (REDFIELD u.a., 1963). Für den ausreichend mit Sauerstoff versorgten Bereich oberhalb der Redox-Sprungschicht der Ostsee wurde von SHAFFER (1987) ein nahezu konstantes Verhältnis von 318 : 1 ermittelt. Ältere Untersuchungen (MAJEWSKI u.a., 1976) ergaben eine Relation von 286 : 1, die damit nur wenig über dem Redfield-Verhältnis liegt.

Im Tiefenwasser der zentralen Ostsee ist das Verhältnis von Sauerstoffverbrauch zu Phosphatakkumulation nicht so gut definiert. Es nimmt in größeren Tiefen sehr stark ab, selbst wenn nur solche Phosphatwerte in die Untersuchungen einbezogen werden, die unter oxidischen Bedingungen gemessen wurden (NEHRING, 1989). Ursache für diese Abnahme ist die Freisetzung von Phosphat aus den Sedimenten (GIESKES, GRASSHOFF, 1971), die mit der Bildung von Schwefelwasserstoff hohe Beträge erreicht, bei langen Stagnationsperioden aber durch den Vorrat an remobilisierbarem Phosphat begrenzt wird (NEHRING, 1989). Für das an Sauerstoff verarmte Tiefenwasser wird ein mittleres Verhältnis von 74 : 1 angegeben (MAJEWSKI u.a., 1976). Das bei unseren Untersuchungen ermittelte Verhältnis von 63 : 1 ist nur wenig niedriger. Eine allmähliche Abnahme dieses Verhältnisses kann als Hinweis auf die Verschlechterung der Sauerstoffbedingungen und die Phosphatakkumulation als Folge der Eutrophierung der Ostsee gewertet werden.

Ähnlich eng gestaltet sich die Beziehung zwischen Sauerstoff und Ammonium (Abb. 29, unten). Interessant ist hierbei insbesondere die Gruppe von Werten, die bei geringen Sauerstoffgehalten nur vergleichsweise niedrige Ammoniumkonzentrationen aufweist. Diese Wertepaare stammen aus dem Tiefenwasser unterhalb 200 m, das während der Unter-

suchungen permanent oxisch war. Diese Bedingungen fördern die mikrobielle Nitrifikation, die zu einer Abnahme der Ammoniumkonzentrationen bei gleichzeitigem Anstieg des Nitratgehaltes führte.

Advektive Prozesse und mikrobielle Nitrifikation sind die Ursachen für die sehr hohen Nitratkonzentrationen, die im Bereich der Redox-Sprungschicht während der Umschichtung im Gotlandtief gemessen wurden (Abb. 26, unten). Die Konzentration von $16 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$, die am 2. Juli 1993 in 200 m Tiefe ermittelt wurde, ist die bisher höchste im Tiefenwasser der zentralen Ostsee.

Durch den Salzwassereinbruch, der zu einem Anstieg des Salz- und Sauerstoffgehalts im Tiefenwasser führte, waren die abiotischen Umweltbedingungen für die Entwicklung eines starken Dorschjahrganges 1993 günstig (vgl. auch NEHRING u.a., 1993). Dies gilt insbesondere für das Bornholm- und Danziger Becken, in geringerem Umfang auch für den Südtteil des östlichen Gotlandbeckens, die die wichtigsten Dorschlaichplätze in der eigentlichen Ostsee sind. Voraussetzung für einen starken Jahrgang ist jedoch ein entsprechender Laicherbestand. Für die allmähliche Erholung der Dorschbestände ist ferner die Einhaltung der von den internationalen Fischereiorganisationen empfohlenen Schonmaßnahmen von großer Bedeutung.

Der milde Winter 1992/93 läßt darüber hinaus günstige Auswirkungen auf die Entwicklung anderer Fischarten erwarten (vgl. auch NEHRING u.a., 1993). Die positiven Temperatur-anomalien im kalten Zwischenwasser der zentralen Ostsee, in dem die Wintertemperaturen „konserviert“ sind, bildeten eine günstige Voraussetzung für die Reproduktion der Sprottbestände. Da milde Winter die Wanderungsaktivität der Heringe verringern und ihr Wachstum fördern, waren 1993 auch günstige Bedingungen für die Entwicklung dieser Fischart vorhanden. Die weiterhin rückläufige Nährstoffbelastung der deutschen Küstengewässer und Bodden läßt ferner ein geringeres Algenwachstum erwarten und hat damit positive Auswirkungen auf die Laichplätze insbesondere des Rügenschens Frühjahrsherings. Die Sprott- und Heringsbestände der Ostsee profitieren ferner von dem gegenwärtig sehr geringen Fraßdruck der Dorsche.

Danksagung

Die Autoren danken den am Ostseeüberwachungsprogramm beteiligten Mitarbeitern des Instituts für Ostseeforschung für die sorgfältige Durchführung der Messungen sowie Kapitän und Besatzung der Forschungsschiffe „Professor Albrecht Penck“ und „A. v. Humboldt“ für die Unterstützung und den Einsatz bei den Meßfahrten des Jahres 1993. Dem Deutschen Wetterdienst in Offenbach und dem Wetteramt Rostock gilt unser Dank für die Bereitstellung von Datenmaterial. Dem Schwedischen Meteorologischen und Hydrologischen Institut (SMHI) in Norrköping sowie dem Ozeanographischen Labor des SMHI in Göteborg sind wir für die Überlassung von Wasserstands- und hydrographisch-chemischen Daten ausgewählter Ostseestationen zu Dank verpflichtet. Für die Bereitstellung von Salzgehaltsdaten aus dem Großen Belt danken wir der Storebæltsforbindelsen A/S in Kopenhagen.

Literaturverzeichnis

- ANONYM, 1993: Monatlicher Witterungsbericht. – Amtsblatt des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach, **39**, H. 1-12.
- BALZER, W., 1984: Organic matter degradation and biogenic element cycling in a nearshore sediment (Kiel Bight). – *Limnol. Oceanogr.* **29**, 1231-1246.
- FONSELIUS, S.H., 1977: An inflow of unusually warm water into the Baltic deep basins. – *Medd. Havsfiskelab. Lysekil, Hydrogr. avdeln.*, **229**, 1 - 15.
- FRANCK, H., MATTHÄUS, W., 1992: Sea level conditions associated with major Baltic inflows. – *Beitr. Meereskunde, Berlin*, **63**, 65 - 90.
- GIESKES, J.M., GRASSHOFF, K., 1971: Some correlations of chemical factors in the central Baltic Sea. – *Ber. dt. wiss. Komm. Meeresforsch.* **22**, 211-218.
- HÅKANSSON, B., BROMAN, B., DAHLIN, H., 1993: The flow of water and salt in the Sound during the Baltic major inflow event in January 1993. – ICES Statutory Meeting Dublin, Paper C.M.1993/C:57.
- HELCOM, 1988: Guidelines for the Baltic Monitoring Programme for the third stage. – *Baltic Sea Environ. Proc. N° 27B, Part A, Introductory chapters*, 1-49; Part B, Physical and chemical determinants in sea water, 1-60.
- HELCOM, 1990: Second periodic assessment of the state of the marine environment of the Baltic Sea, 1984-1988; Background document. – *Baltic Sea Environ. Proc. N° 35B*, 109-152.
- HUPFER, P., 1978: Die Ostsee: Kleines Meer mit großen Problemen. Teubner-Verlag, Leipzig, 1-152.
- MAJEWSKI, A., TRZOSI ŃSKA, A., ZMUDZI ŃSKI, L., 1976: Environmental conditions in the Baltic Sea, 1971 - 1975. – *Przegląd Geofizyczny* **21**, 271-279 (in poln.).
- MATTHÄUS, W., 1975: Mittlere Temperatur- und Sauerstoffverhältnisse in der Arkonasee am Beispiel der Station BY 2A auf 55° N, 14° E. – *Beitr. Meereskunde, Berlin*, **36**, 5-27.
- MATTHÄUS, W., 1977: Zur mittleren jahreszeitlichen Veränderlichkeit der Temperatur in der offenen Ostsee. – *Beitr. Meereskunde, Berlin*, **40**, 117-155.

- MATTHÄUS, W., 1986: Charakteristische Eigenschaften von Stagnationsperioden im Tiefenwasser der Ostsee. – Beitr. Meereskunde, Berlin, **55**, 39–53.
- MATTHÄUS, W., 1990: Langzeittrends und Veränderungen ozeanologischer Parameter während der gegenwärtigen Stagnationsperiode im Tiefenwasser der zentralen Ostsee. – Fischerei-Forsch., Rostock, **28**, 3, 25–34.
- MATTHÄUS, W., FRANCK, H., 1992: Characteristics of major Baltic inflows – a statistical analysis. – Cont. Shelf Res., **12**, 1375–1400.
- MATTHÄUS, W., LASS, H.-U., TIESEL, R., 1993: The major Baltic inflow in January 1993. – ICES Statutory Meeting Dublin, Paper C.M.1993/C:51.
- NEHRING, D., 1984: Chemical investigations into nitrate reduction in Baltic deep waters. – Beitr. Meereskunde, Berlin, **51**, 51–56.
- NEHRING, D., 1989: Phosphate and nitrate trends and the ratio oxygen consumption to phosphate accumulation in central Baltic deep waters with alternating oxic and anoxic conditions. – Beitr. Meereskunde, Berlin, **59**, 47–58.
- NEHRING, D., FRANCKE, E., BROSIN, H.-J., 1971: Beobachtungen über ozeanologische Veränderungen im Gotlandtief während der Wasserumschichtung im Oktober 1969. – Beitr. Meereskunde, Berlin, **28**, 75–82.
- NEHRING, D., FRANCKE, E., 1981: Hydrographisch-chemische Untersuchungen in der Ostsee von 1969–1978. I. Die hydrographischen Bedingungen und ihre Veränderungen. – Geod.Geoph. Veröff., R. IV, **35**, 5–38.
- NEHRING, D., TIESEL, R., FRANCKE, E., 1987: Untersuchungen zur mittelfristigen Vorhersage ozeanologischer Größen in der Ostsee. – Wissenschaftlicher Bericht des Instituts für Meereskunde, Rostock-Warnemünde, 1–13.
- NEHRING, D., TIESEL, R., FRANCKE, E., 1990: Beziehungen zwischen einigen ozeanologischen Größen der Ostsee und den Lufttemperaturen an der DDR-Küste. – Beitr. Meereskunde, Berlin, **61**, 79–92.
- NEHRING, D., MATTHÄUS, W., 1991: Current trends in hydrographic and chemical parameters and eutrophication in the Baltic Sea. – Int. Revue ges. Hydrobiol. **76**, 297–316.
- NEHRING, D., MATTHÄUS, W., 1991/92: Die hydrographisch-chemischen Bedingungen in der westlichen und zentralen Ostsee im Jahre 1991. – Dt. Hydrogr. Z. **44**, 217–238.

- NEHRING, D., MATTHÄUS, W., LASS, H.-U., 1993: Die hydrographisch-chemischen Bedingungen in der westlichen und zentralen Ostsee im Jahre 1992. - Dt. Hydrogr. Z. **45**, 281-331.
- REDFIELD, A., KETCHUM, B., RICHARDS, F., 1963: The influence of organisms on the composition of the sea water. - In: The Sea, Ed. HILL, M.N., Wiley Interscience, New York: Bd. 2, 26-77.
- REICHEL, U., 1980: Mittlere monatliche Temperatur- und Salzgehaltswerte im Gebiet des Fehmarnbelts. Untersuchungen auf der Grundlage von Feuerschiffsbeobachtungen 1949-1978. - Institut für Meereskunde, Rostock-Warnemünde, unveröff.
- REICHEL, U., 1982: Monatsmittel der Temperatur und des Salzgehaltes am Feuerschiff „Gedser Rev“ (1931-1960). - Institut für Meereskunde, Rostock-Warnemünde, unveröff.
- SCHULZ, S., 1992: Production, sedimentation and oxygen consumption of organic matter in the Baltic Sea. - Paper of the 18th Conference of Baltic Oceanographers, St. Petersburg, Russia, 23. -27 . November 1992.
- SHAFFER, G., 1987: Redfield ratios, primary production and organic burial in the Baltic Sea. - Deep-Sea Res. **34**, 769-784.
- TIESEL, R., 1993: Temperatursummen der Lufttemperaturen an der Wetterstation Warnemünde. - Deutscher Wetterdienst, Offenbach, Wetteramt Rostock (unveröff.).

Anschriften der Verfasser:

Prof. Dr. D. Nehring
Dr. habil. W. Matthäus
Dr. habil. H.U. Lass
Dr. habil. G. Nausch
Institut für Ostseeforschung Warnemünde
an der Universität Rostock
Seestr. 15
18119 Warnemünde

Meereswissenschaftliche Berichte

MARINE SCIENTIFIC REPORTS

Verzeichnis der veröffentlichten Arbeiten
(List of Published Contributions)

- 1 (1990) Postel, Lutz:
Die Reaktion des Mesozooplanktons, speziell der Biomasse, auf küstennahen Auftrieb vor Westafrika (The Mesozooplankton Response to Coastal Upwelling off West Africa with Particular Regard to Biomass)
- 2 (1990) Nehring, Dietwart:
Die hydrographisch-chemischen Bedingungen in der westlichen und zentralen Ostsee von 1979 bis 1988 - ein Vergleich (Hydrographic and Chemical Conditions in the Western and Central Baltic Sea from 1979 to 1988 - a Comparison)
Nehring, Dietwart; Matthäus, Wolfgang:
Aktuelle Trends hydrographischer und chemischer Parameter in der Ostsee, 1958 - 1989 (Topical Trends of Hydrographic and Chemical Parameters in the Baltic Sea, 1958 - 1989)
- 3 (1990) Zahn, Wolfgang:
Zur numerischen Vorticityanalyse mesoskaler Strom- und Massenfelder im Ozean (On Numerical Vorticity Analysis of Mesoscale Current and Mass Fields in the Ocean)
- 4 (1992) Lemke, Wolfram; Lange, Dieter; Endler, Rudolf (Eds.):
Proceedings of the Second Marine Geological Conference - The Baltic, held in Rostock from October 21 to October 26, 1991
- 5 (1993) Endler, Rudolf; Lackschewitz, Klas (Eds.):
Cruise Report RV "Sonne" Cruise SO82, 1992
- 6 (1993) Kulik, Dmitri A.; Harff, Jan:
Physicochemical modeling of the Baltic Sea water-sediment column:
I. Reference ion association models of normative seawater and of Baltic brackish waters at salinities 1-40 ‰, 1 bar total pressure and 0 to 30°C temperature
(system Na-Mg-Ca-K-Sr-Li-Rb-Cl-S-C-Br-F-B-N-Si-P-H-O)
- 7 (1994) Nehring, Dietwart; Matthäus, Wolfgang; Lass, Hans-Ulrich; Nausch, Günther:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1993