

Meereswissenschaftliche Berichte
MARINE SCIENCE REPORTS

No. 35

**Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung
der Ostsee 1998**

von

**Wolfgang Matthäus, Günther Nausch, Hans Ulrich Lass,
Klaus Nagel und Herbert Siegel**

**Institut für Ostseeforschung
Warnemünde
1999**

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenfassung	3
Summary	4
1. Einleitung	5
2. Meteorologische Bedingungen	7
3. Wasseraustausch durch die Ostseezugänge	12
3.1 Beobachtungen an der Meßplattform „Darßer Schwelle“	12
3.1.1 Wassertemperatur, Salzgehalt und Sauerstoffgehalt	12
3.1.2 Strömung	17
4. Beobachtungen an der Bojenstation "Oder Bank"	20
5. Hydrographisch-chemische Bedingungen	20
5.1 Wassertemperatur	21
5.1.1 Jahresgang der Oberflächentemperatur	21
5.1.2 Vertikalverteilung der Wassertemperatur	26
5.2 Salzgehalt	29
5.3 Sauerstoff und Schwefelwasserstoff	34
5.4 Anorganische Nährstoffe	36
5.5 Organische Nährstoffe	47
6. Variationen der Temperatur im Tiefenwasser der zentralen Ostsee	52
6.1 Extreme Temperaturen	52
6.2 Markante Trends	58
7. Diskussion	59
Danksagung	64
Literaturverzeichnis	65

Zusammenfassung

Der Winter 1997/98 war in der nördlichen Ostsee mild, in der südlichen Ostsee sogar sehr mild und einer der wärmsten dieses Jahrhunderts. Sommer und Herbst waren relativ kühl.

Infolge des milden Winters blieben die Oberflächentemperaturen im Winter und zeitigen Frühjahr um 1 - 1,5 K über den langjährigen Erwartungswerten, was sich auch in den Temperaturen im sommerlichen kalten Zwischenwasser widerspiegelte. Durch den kühlen Sommer wiesen die Oberflächentemperaturen in der westlichen und zentralen Ostsee nur geringe Abweichungen von den langjährigen Mittelwerten auf. Die Temperaturen im Tiefenwasser der zentralen Ostsee erreichten positive Anomalien von 0,5 bis 1,5 K gegenüber dem langjährigen Mittel 1950 - 1998.

Im Jahre 1998 erfolgte kein Salzwassereinbruch. Die kleineren Einströme im Laufe des Jahres hatten 1998 keine signifikanten Auswirkungen in der zentralen Ostsee, so daß Temperatur und Salzgehalt im Tiefenwasser des Gotlandtiefs wieder rückläufig waren.

Die Entwicklung im Sauerstoffgehalt des Tiefenwassers der zentralen Ostsee weist auf eine weiter andauernde Stagnation hin. Der Einstrom von salz- und sauerstoffreicherem, aber ungewöhnlich warmem Wasser im Herbst 1997 unterbrach die anoxischen Bedingungen im Tiefenwasser des östlichen Gotlandbeckens nur kurzzeitig zwischen Januar und April 1998. Ab Mai wurde Schwefelwasserstoff bereits wieder im Bornholmbecken und seit Juni im östlichen Gotlandbecken gemessen. Die Mächtigkeit der anoxischen Tiefenschicht verstärkte sich 1998 und breitete sich weiter nach Süden aus. Das Sauerstoffdefizit vergrößerte sich auch im Tiefenwasser des westlichen Gotlandbeckens, wo 1998 die niedrigsten Jahresmittel der Sauerstoffkonzentration seit Mitte der 80er Jahre erreicht wurden.

Bei den Winterkonzentrationen der anorganischen Nährstoffe setzte sich die in den Vorjahren erkennbare Entwicklung fort. Der Rückgang hat sich beim Nitrat auch im Winter 1997/98 gezeigt, während das Niveau der Phosphatkonzentration vergleichbar mit dem des Winters 1996/97 war.

Die Konzentrationen organischer Nährstoffe lagen 1998 im Schwankungsbereich der Messungen der letzten Jahre. Aus den bisherigen Meßreihen für gelöste organische Kohlenstoff- und Stickstoffverbindungen läßt sich ein Gradient mit zunehmenden Konzentrationen von der westlichen zur zentralen Ostsee erkennen.

Die extremen Oberflächentemperaturen im Sommer 1997 verbunden mit Einstromereignissen im Herbst verursachten im Jahre 1998 einen außergewöhnlichen Anstieg der Temperaturen im Tiefenwasser der zentralen Ostsee, wie er bisher lediglich im Jahre 1977 beobachtet wurde. An Hand ausgewählter repräsentativer Stationen wurden deshalb Perioden extremer Temperaturen und markanter Trends der Temperatur im Tiefenwasser der zentralen Ostsee seit Mitte dieses Jahrhunderts untersucht.

Die höchsten Temperaturen traten im gesamten Gotlandbecken Ende der 70er/Anfang der 80er Jahre und im östlichen Gotlandbecken nochmals 1998 auf. Niedrige Temperaturen wurden durchweg vor 1935, Ende der 80er/Anfang der 90er Jahre und Mitte der 90er Jahre beobachtet.

Signifikante Trends im Temperaturregime des Tiefenwassers waren in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts mit mittleren Zunahmen um 0,8 bis 1,3 °C zu beobachten und zwischen Mitte der 70er und Anfang der 90er Jahre mit einem drastischen Rückgang um 1,3 - 1,6 °C infolge des Ausbleibens von größeren Einströmen in die Ostsee zu verzeichnen.

Summary

The winter of 1997/1998 was mild in the northern Baltic Sea and even very mild in the southern Baltic, among the warmest of this century. The summer and autumn were relatively cool in northern Europe.

The mild winter led to sea surface temperatures that were by 1 - 1.5 K above the long-term mean during winter and early spring. This resulted in relatively warm water being trapped in the summer intermediate water layer of the central Baltic Sea. The surface temperatures in the summer lay close to the long-term mean due to the cool summer. The deep water temperatures of the central Baltic Sea were anomalously high, 0.5 - 1.5 K above the mean for the period 1950 - 1998.

The meteorological conditions in 1998 gave rise to only several small inflows which had no significant effects in the central Baltic in 1998. As a result temperature and salinity in the deep water of the Gotland Deep decreased during the year.

The inflow of saline and oxygen-rich, but unusually warm water into the Baltic Sea in autumn 1997 temporarily interrupted the anoxic conditions in the eastern Gotland Basin between January and April 1998. From May onwards hydrogen sulphide was again measured in the Bornholm Basin and, beginning in June, in the eastern Gotland Basin. The thickness of the anoxic deep layer increased in 1998 and spread southwards. Oxygen depletion also continued in the deep water of the western Gotland Basin resulting in the lowest annual mean in oxygen concentration since the mid-eighties. This development indicates continuation of the stagnation that started in 1995 in the central Baltic deep water.

In the winter of 1997/1998, the decrease in winter concentrations of nitrate appears to have continued whereas the phosphate concentrations were comparable to 1996/1997 levels.

In 1998, the concentrations of organic nutrients lay in the range measured over the last years. The time series of dissolved organic carbon and nitrogen compounds indicated a gradient with increasing concentrations from the western to the central Baltic.

The exceptional surface temperatures in summer 1997 combined with inflow events in autumn caused an unusual increase in the deep water temperatures of the central Baltic Sea in 1998. During the present century, such unusual high temperatures were only measured in 1977. Data from long-term measurements at representative stations were studied to identify periods of extreme temperatures and marked temperature trends in the central Baltic deep water between 1950 and 1998.

In the entire Gotland Basin, the highest temperatures were observed in the late 1970s/early 1980s, and in the eastern Gotland Basin additionally in 1998. Low temperatures were measured before 1935, at the end of the 1980s/beginning of the 1990s and during the mid-nineties.

Significant trends in the deep water temperature regime occurred during the first half of the present century with a mean increase of 0.8 to 1.3 °C, and from the mid-seventies to the early 1990s when a drastic downward trend of 1.3 - 1.6 °C was observed due to the absence of major Baltic inflows.

1. Einleitung

Die Einschätzung des hydrographisch-chemischen Zustandes der Ostsee im Jahre 1998 erfolgte auf der Grundlage des Ostsee-Überwachungsprogramms, das das *Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW)* im Auftrag des *Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)*, Hamburg und Rostock, durchführt. Im Rahmen einer Verwaltungsvereinbarung wurde dem IOW der deutsche Beitrag für das Baltic Monitoring Programme (BMP) der Helsinki-Kommission (HELCOM) zum Schutz der Meeresumwelt des Ostseegebietes übertragen. Zu den Aufgaben dieses Programms gehört die Überwachung des Wasseraustausches zwischen Ost- und Nordsee, der hydrographisch-chemischen Bedingungen in den zentralen Ostseebecken und deren zeitliche und räumliche Veränderungen sowie die Identifikation und Untersuchung von Langzeittrends.

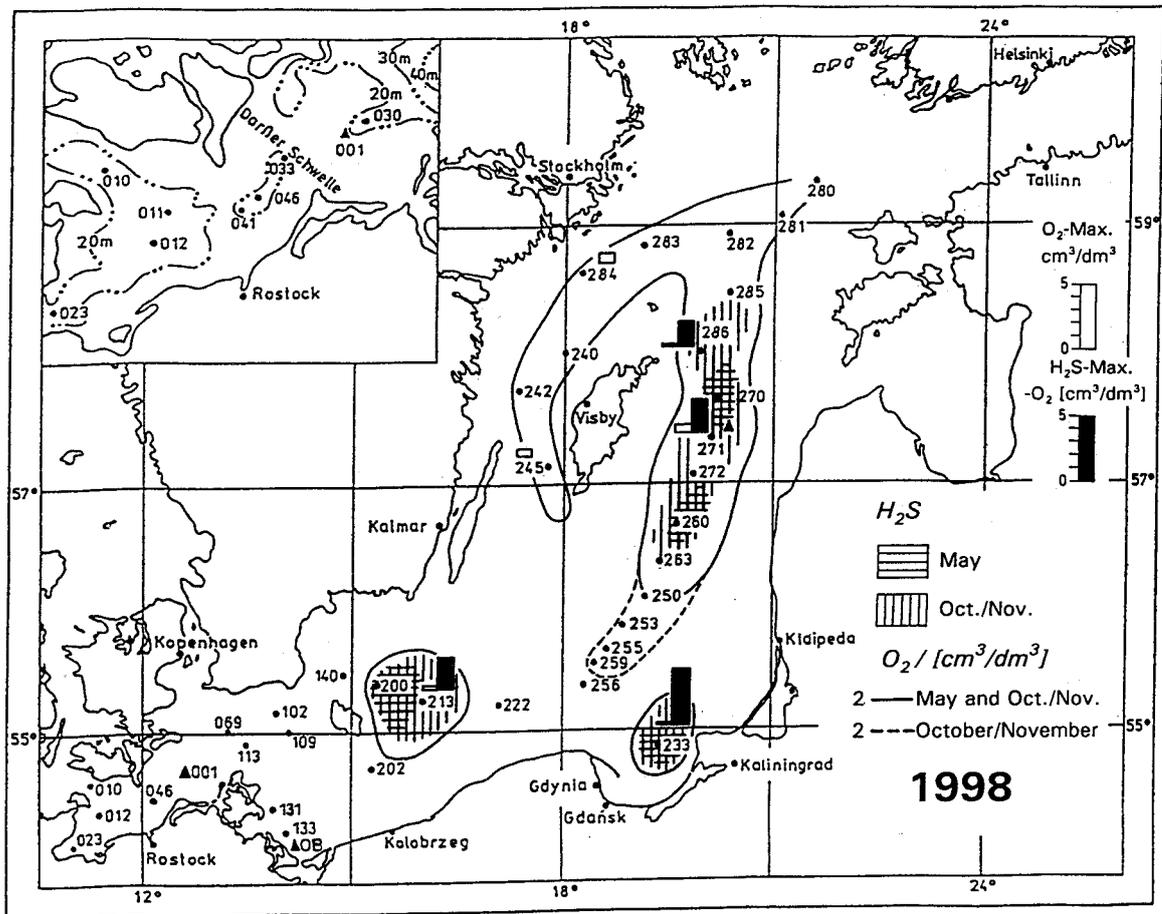


Abb. 1

Stationskarte (\blacktriangle MARNET und Bojenstationen) und Gebiete mit Sauerstoffmangel und Schwefelwasserstoff in der grundnahen Wasserschicht der Ostsee sowie maximale Sauerstoff- und Schwefelwasserstoffkonzentrationen an ausgewählten Stationen (Histogramme) im Jahre 1998

Tabelle 1 Die wichtigsten Beobachtungsstationen des Ostsee-Überwachungsprogramms des IOW und deren internationale Kennung gemäß International Baltic Year (IBY) und Baltic Monitoring Programme (BMP) der HELCOM (Lage ausgewählter Stationen vgl. Abb. 1)

IOW	Bezeichnung	IBY	HELCOM	IOW	Bezeichnung	IBY	HELCOM
001	Darßer Schwelle		BMP K54	213	Bornholmtief	5A	BMP K2
010	Fehmarnbelt		BMP N1	214			
011				220			
012	Mecklenburger Bucht		BMP M2	222	Stolper Rinne	7A	
020				233	Danziger Tief		BMP L1
021				240		32B	
022				242		36B	
023				245	Karlsötief	38A	BMP I1
030			BMP K8	250		9A	
033				253			
041				255		8A	
046	Kadet Rinne		BMP M1	256			
069		1B	BMP K7	259			BMP K1
102				260		10B	
109		2A	BMP K4	263			
111				270		19B	
113	Arkonabecken		BMP K5	271	Gotlandtief	15A	BMP J1
116				272		11B	
120				280		27A	
121				281		28B	BMP H2
130				282		29A	
131				283		30B	
132				284	Landsorttief	31A	BMP H3
133				285		21B	
140				286	Färötief	20A	
150				360	Kieler Bucht		BMP N3
152			BMP K3	361			BMP N4
160				OB	Oder-Bank		BMP K58
162				O5			
164				O9			
200		4B		O11			
202		6B		OB4			

Wie in den Vorjahren wurden auch 1998 fünf Monitoring-Fahrten durchgeführt, die alle vier Jahreszeiten sowie zusätzliche Beobachtungen im März/April umfaßten. Darüber hinaus wurden Umwelt-Daten, die im Rahmen von Forschungsarbeiten des IOW gewonnen wurden, sowie ausgewählte Daten von Forschungseinrichtungen der Ostseeanliegerstaaten in die Auswertungen einbezogen. Die beprobten Stationen, soweit sie für die nachfolgenden Auswertungen verwendet wurden, sind der Tabelle 1 und deren Lage der Abb. 1 zu entnehmen. Die internationale Zuordnung dieser Stationen ist in Tabelle 1 zusammengestellt.

Grundlage des hydrographisch-chemischen Standard-Meßprogramms, das mit den Forschungsschiffen "A. v. Humboldt" und "Prof. Albrecht Penck" durchgeführt wurde, sind die Richtlinien für die Überwachung der Ostsee im Rahmen des COMBINE-Programms der HELCOM

(HELCOM, 1998). Angaben über die Gewinnung der Wasserproben und die untersuchten Parameter sowie über die verwendeten Meßverfahren und ihre Genauigkeit sind bei NEHRING et al. (1993, 1995a) enthalten.

Die schiffsgebundenen Untersuchungen wurden durch Messungen an zwei autonomen Stationen des deutschen Umweltüberwachungs-Meßnetzes MARNET in der westlichen Ostsee ergänzt, die im Gebiet der Darßer Schwelle (Meßplattform; Stat. 001) und in der Pommerschen Bucht (Meßboje; Stat. OB) liegen. Neben meteorologischen Parametern werden an diesen Stationen die Wassertemperatur und der Salzgehalt in 6 bzw. 4 Tiefen (Darßer Schwelle) und 2 Tiefen (Oder-Bank) sowie der Sauerstoffgehalt in 2 Tiefen (beide Stationen) registriert. Alle Daten werden als Stundenmittel aus 6 Messungen telemetrisch via Wettersatellit (METEOSAT) an die Datenbank des BSH übertragen (vgl. KRÜGER et al., 1996, 1998). Angaben über die Strömungsverhältnisse im Bereich der Darßer Schwelle liefert ein selbstregistrierender akustischer Doppler-Profil-Strömungsmesser (ADCP).

Die Überwachung der Wasseroberflächentemperatur der Ostsee wurde durch mittlere monatliche Verteilungen, ermittelt aus NOAA-AVHRR-Wettersatellitendaten, ergänzt. Dabei wurden alle wolken- und eisfreien Bildpunkte (Pixel 1 x 1 km) der Satellitenüberflüge eines Monats berücksichtigt und in Karten zusammengestellt (SIEGEL et al., 1998b).

2. Meteorologische Bedingungen

Der Witterungsverlauf des Jahres 1998 wird anhand der meteorologischen Beobachtungen an den Wetterstationen Warnemünde und Arkona des Deutschen Wetterdienstes Offenbach sowie an der Meßplattform im Gebiet der Darßer Schwelle charakterisiert. Tabelle 2 zeigt die für Warnemünde ermittelten Summen der Lufttemperatur, die auch Rückschlüsse auf die Wassertemperaturen in der Oberflächenschicht der zentralen Ostsee gestatten (NEHRING et al., 1990).

Der Winter 1997/98 kann im Bereich der nördlichen Ostsee als mild, in der südlichen Ostsee als sehr mild und als einer der wärmsten Winter dieses Jahrhunderts charakterisiert werden (STRÜBING, 1998). Die maximale Eisbedeckung wird mit etwa 140 000 km² angegeben und blieb im wesentlichen auf die inneren Teile der Meerbusen beschränkt (vgl. Abb. 10). Die für die Station Warnemünde berechneten monatlichen Kältesummen erreichten lediglich im Dezember 1997 die langjährigen Mittelwerte. Die Kältesumme des gesamten Winters lag mit 43,2 K weit unter dem Mittel von 123 K (vgl. Tabelle 2). An der Wetterstation Arkona betrug die Anomalie der Monatsmittel der Lufttemperatur im Januar +2,8 K und im Februar sogar +4,1 K (vgl. Tabelle 3) und lagen in der zentralen Ostsee ähnlich hoch (vgl. STRÜBING, 1998). Auch die Monate März bis Mai waren in der westlichen und zentralen Ostsee mild mit positiven Anomalien der Lufttemperatur an der Wetterstation Arkona von 1,4 - 1,5 K (vgl. Tabellen 2 und 3). Der gesamte Sommer blieb kühl (vgl. auch Abb. 4), und die Temperaturen lagen unter den langjährigen Erwartungswerten. Die Monate Oktober bis Dezember waren mit Anomalien zwischen -1 und -3 K deutlich zu kalt. Infolge des milden Winters ergab sich jedoch im Jahresmittel 1998 eine positive Abweichung von 0,4 K.

Das Jahresmittel der Sonnenscheindauer lag im Bereich der Normalwerte. Die Monate Januar, März und Dezember waren überdurchschnittlich sonnenscheinreich. Bis auf den Mai blieben die anderen Monate z. T. erheblich unter den Mittelwerten.

Tabelle 2 Temperatursummen der Lufttemperatur an der Wetterstation Warnemünde (TIESEL, 1999); mittlere Temperatursummen 1961 bis 1990 in Klammern

		Kältesummen ¹⁾ (K)		Wärmesummen ²⁾ (K)	
				April 1998	1,8 (0,3)
Nov. 1997	1,8	(2,5)		Mai 1998	7,0 (5,2)
Dez. 1997	24,4	(26,5)		Juni 1998	23,0 (19,2)
Jan. 1998	8,4	(50,2)		Juli 1998	29,0 (41,6)
Feb. 1998	8,6	(32,7)		Aug. 1998	34,5 (38,2)
März 1998	0	(10,7)		Sep. 1998	9,9 (7,7)
April 1998	0	(0,04)		Okt. 1998	0 (0,5)
Σ 1997/98		43,2	(123,0)	Σ 1998	105,2 (112,7)

¹⁾ Summe der negativen Tagesmitteltemperaturen

²⁾ Summe der Tagesmitteltemperaturen minus 16 für alle Tage mit Mitteltemperaturen über 16 °C

Tabelle 3 Anomalien der monatlichen Mitteltemperaturen der Luft ($\overline{\Delta T_L}$) sowie prozentualer Anteil der monatlichen Sonnenscheindauer (SD) und Niederschlagshöhe (NH) an der Wetterstation Arkona im Jahre 1998 bezogen auf die Mittelwerte des Zeitraumes 1961 bis 1990 (DWD, 1998)

Monat	$\overline{\Delta T_L}$ (K)	SD (%)	NH (%)
Januar	2,8	179	154
Februar	4,1	81	93
März	1,5	146	100
April	1,4	74	147
Mai	1,5	115	49
Juni	0,1	93	219
Juli	-1,3	78	133
August	-1,2	76	91
September	0,4	79	129
Oktober	-0,9	83	155
November	-3,0	43	100
Dezember	-1,1	161	98
Mittel	0,4	101	122

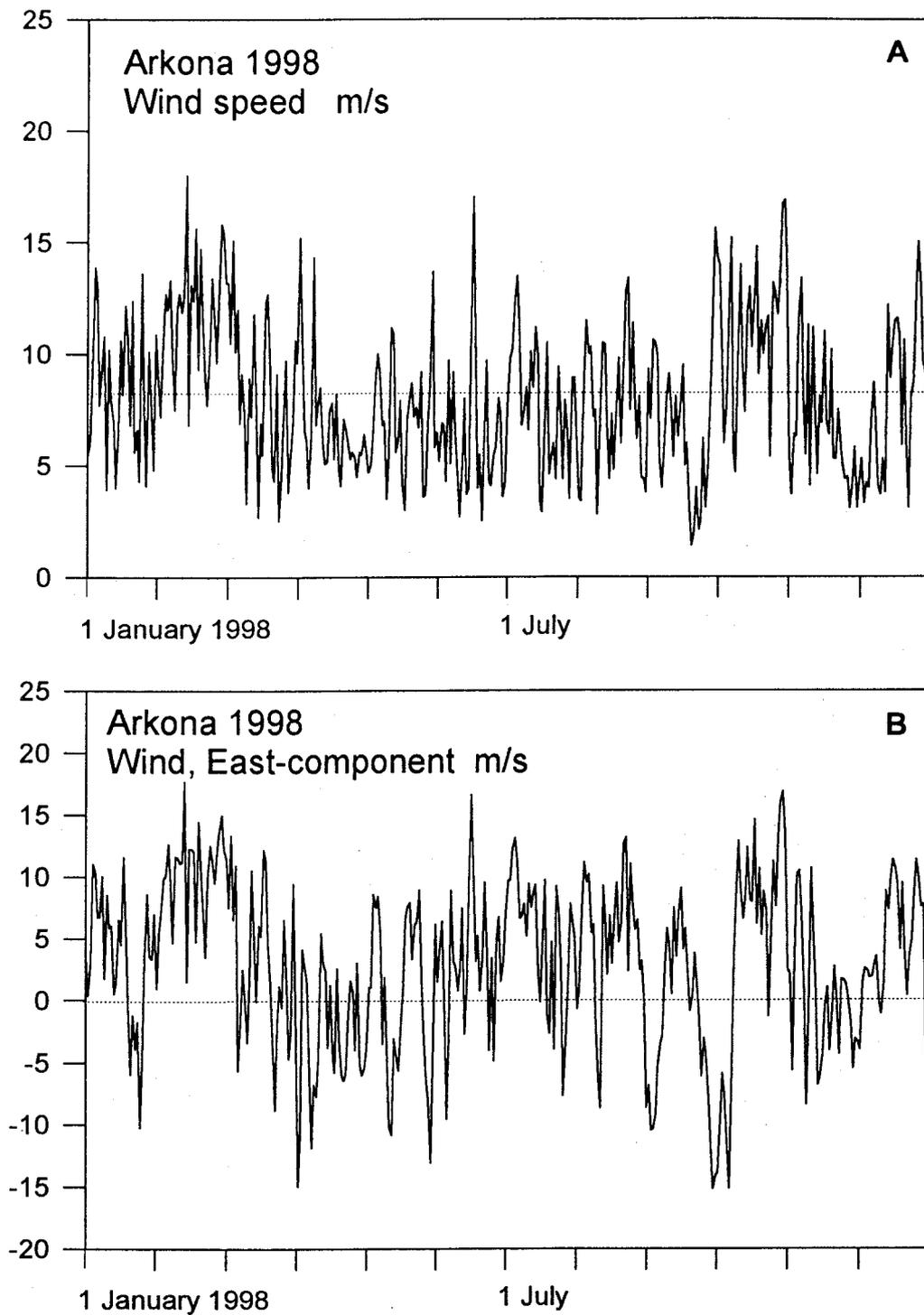


Abb. 2

Tagesmittel der Windgeschwindigkeit an der Wetterstation Arkona im Jahre 1998 (A) und ihrer Ostkomponente (B; Westwind positiv) (nach Daten des DWD)

Hohe Niederschlagsmengen wurden vor allem im Juni beobachtet, wo mehr als das Doppelte des normalen Niederschlags gemessen wurde. Niederschlagsarm war lediglich der Monat Mai. Im Jahresmittel ergab sich eine deutlich positive Niederschlagsanomalie (vgl. Tabelle 3).

Die in Abb. 2A dargestellten Tagesmittel der Windgeschwindigkeit an der Wetterstation Arkona zeigen den gesamten Februar (Monatsmittel 11,7 m/s) hindurch bis Anfang März und im Oktober 1998 (Monatsmittel 11,3 m/s) starke Winde mit Tagesmitteln der Windgeschwindigkeit meist > 10 m/s. In den übrigen Monaten lagen die mittleren monatlichen Windgeschwindigkeiten zwischen 6,5 m/s (Juni) und 8,2 m/s (März). Der Sommer 1998 (Juni - August) war relativ windreich und fast ausschließlich durch Winde aus West dominiert. Die Tagesmittel erreichten im Jahre 1998 maximal 18,0 m/s (12. Februar) und die höchste Windspitze wurde mit 32,4 m/s am 28. Oktober registriert. Die Häufigkeitsverteilung von Windrichtung und -geschwindigkeit auf die acht Hauptrichtungen für das gesamte Jahr 1998 ist in Abb. 3 dargestellt.

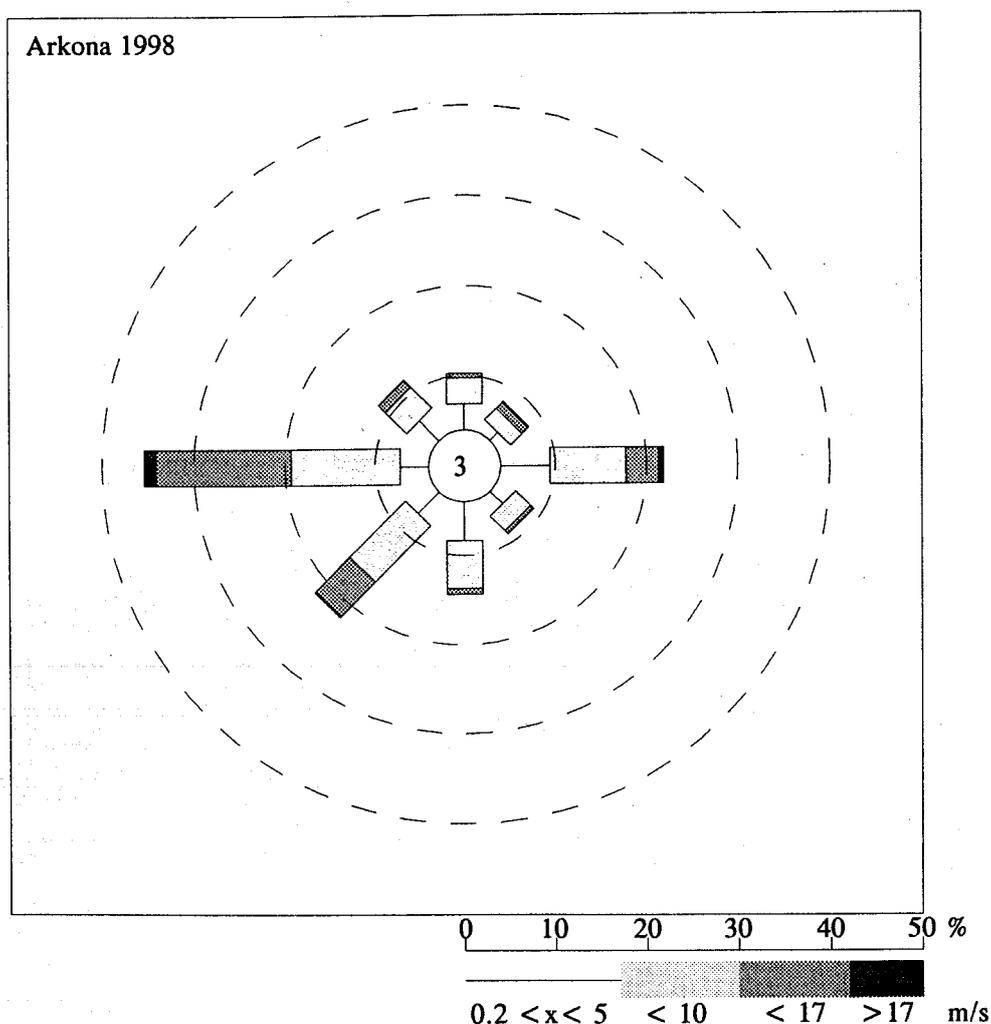


Abb. 3

Verteilung von Windrichtung und -geschwindigkeit an der Wetterstation Arkona im gesamten Jahr 1998 (nach Daten des DWD)

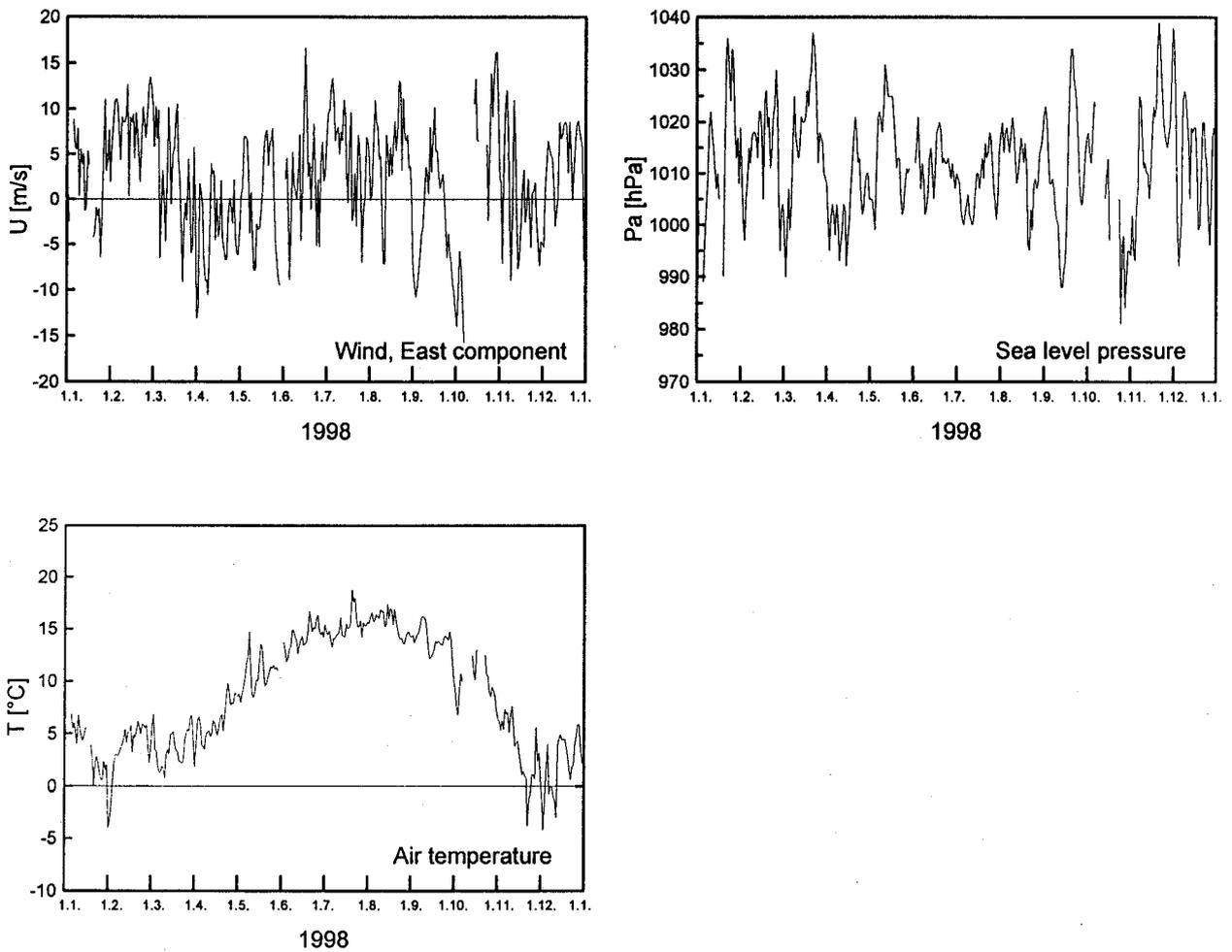


Abb. 4
 Tagesmittel der Ostkomponente der Windgeschwindigkeit (Westwind positiv), des Luftdrucks und der Lufttemperatur auf der Darßer Schwelle (Stat. 001) im Jahre 1998

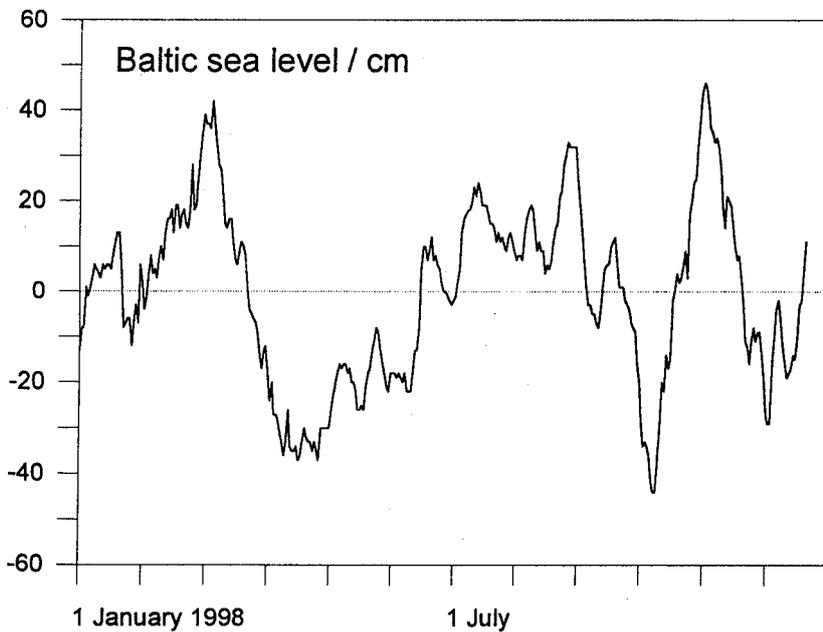


Abb. 5
 Schwankungen im Füllungsgrad der Ostsee im Jahre 1998, dargestellt anhand des Wasserstandes von Landsort (nach Daten des SMHI Norrköping)

Östliche Winde, die verstärkt Ende Januar, im März/April, sowie Anfang September, Ende September/Anfang Oktober und im November auftraten (Abb. 2B und 4), führten zu einer unternormalen Wasserfüllung der Ostsee (vgl. Abb. 5). Länger andauernde Perioden mit westlichen Winden im Bereich der westlichen Ostsee wurden vor allem im Februar bis Anfang März, Juni bis August, Mitte September, im Oktober und Dezember beobachtet.

Die markantesten Perioden mit starken westlichen Winden traten im Februar und Oktober auf. Infolge der Stürme im Februar erreichte die Wasserfüllung der Ostsee Ende Februar/Anfang März 1998 etwa 40 cm über Normal und ging dann bis Mitte April auf rund -35 cm zurück (vgl. Abb. 5). Im weiteren Verlauf des Jahres stieg der Wasserstand der Ostsee bis Ende August auf +30 cm an. Anfang Oktober erreichte die Ostsee infolge anhaltender östlicher Winde den gesamten September hindurch einen unternormalen Füllungsgrad von -40 cm und stieg dann innerhalb von 24 Tagen - verursacht durch anhaltende starke westliche Winde - um 90 cm auf +46 cm an.

3. Wasseraustausch durch die Ostseezugänge

3.1 Beobachtungen an der Meßplattform "Darßer Schwelle"

Die kontinuierlichen Registrierungen der Wassertemperatur und des Salzgehaltes sowie der Strömungsgeschwindigkeit wurden an der Station "Darßer Schwelle" (Stat. 001, vgl. Abb. 1) fortgesetzt.

Der Sauerstoffgehalt des Wassers wurde 1998 mit einem Seacat-Sauerstoff-Recorder im 7 m und 19 m Tiefenniveau am Meßmast gemessen. Vereinzelte Vergleichsmessungen des Sauerstoffgehalts an Wassersproben aus der Meßtiefe der Geräte wurden mit Hilfe der Winklermethode (vgl. GRASSHOFF et al., 1983) während der Wartungszyklen des Meßmastes durchgeführt. Die Zeitreihenmessungen wiesen einen Trend in der Empfindlichkeit der Seacat-Registrierungen auf und wurden entsprechend korrigiert.

3.1.1 Wassertemperatur, Salzgehalt und Sauerstoffgehalt

Die Jahresmittel der Wassertemperatur an der Darßer Schwelle, dargestellt in Tabelle 4, wiesen 1998 sowohl in der durchmischten Deckschicht (7 m Tiefe) als auch in der bodennahen Wasserschicht (19 m Tiefe) - verglichen mit dem Zeitraum seit 1992 - durchschnittliche Werte auf. Die Standardabweichung der Wassertemperatur ist sowohl in 7 m als auch in 19 m Tiefe die niedrigste des gesamten Beobachtungszeitraums. Die thermische Schichtung entsprach dem Mittel seit 1992.

Die Fourieramplituden des Jahresganges der Wassertemperatur von sieben aufeinander folgenden Jahren sind in Tabelle 5 zusammengefaßt. Der Jahresgang der Temperatur weist 1998 in 7 m und 17 m die niedrigsten Werte seit 1992 auf. Die Phase des Jahresganges entspricht den mittleren Werten seit dem Beginn der kontinuierlichen Wassertemperaturmessungen auf der Darßer Schwelle. Die Phasenlage des Jahresganges weist daraufhin, daß die jahreszeitliche Erwärmung des Deckschichtwassers im Gebiet der Darßer Schwelle Anfang April 1998 begann.

Tabelle 4 Jahresmittelwerte der Wassertemperatur (T) und des Salzgehaltes (S) sowie deren Standardabweichungen auf der Darßer Schwelle

	7 m Tiefe		17 m Tiefe		19 m Tiefe	
	T °C	S PSU	T °C	S PSU	T °C	S PSU
1992	9,41 ±5,46	9,58 ±1,52	9,01 ±5,04	11,01 ±2,27	8,90 ±4,91	11,77 ±2,63
1993	8,05 ±4,66	9,58 ±2,32	7,70 ±4,32	11,88 ±3,14	7,71 ±4,27	13,36 ±3,08
1994	8,95 ±5,76	9,55 ±2,01	7,94 ±4,79	13,05 ±3,48	7,87 ±4,64	14,16 ±3,36
1995	9,01 ±5,57	9,21 ±1,15	8,50 ±4,78	10,71 ±2,27	-	-
1996	7,44 ±5,44	8,93 ±1,85	6,86 ±5,06	13,00 ±3,28	6,90 ±5,01	14,50 ±3,14
1997	9,39 ±6,23	9,05 ±1,78	-	12,90 ±2,96	8,20 ±4,73	13,87 ±3,26
1998	8,61 ±4,63	9,14 ±1,93	7,99 ±4,07	11,90 ±3,01	8,10 ±3,83	12,80 ±3,22

Tabelle 5 Amplituden (in K) und Phasen (umgerechnet in Monate) des Jahresganges der Temperatur in verschiedenen Tiefen auf der Darßer Schwelle

	7 m Tiefe		17 m Tiefe		19 m Tiefe	
	Amplitude	Phase	Amplitude	Phase	Amplitude	Phase
1992	7,43	4,65	6,84	4,44	6,66	4,37
1993	6,48	4,79	5,88	4,54	5,84	4,41
1994	7,87	4,42	6,55	4,06	6,32	4,00
1995	7,46	4,36	6,36	4,12	-	-
1996	7,54	4,17	6,97	3,89	6,96	3,85
1997	8,60	4,83	-	-	6,42	3,95
1998	6,39	4,79	5,52	4,46	-	-

Die im Jahre 1998 beobachteten thermischen Verhältnisse im Bereich der Darßer Schwelle können als Folge eines kühlen Sommers 1998 auf einen milden Winter mit kurzen Kälteeinbrüchen Ende Januar 1998 (STRÜBING, 1998) und Mitte November bis Anfang Dezember 1998 erklärt werden (vgl. Abb. 4). Dies führte dazu, daß die Amplitude des Jahresgangs der Wassertemperatur mit $6,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ extrem niedrig war. Der normale Anstieg der Wassertemperaturen der Deckschicht auf der Darßer Schwelle entspricht einem durchschnittlichen Wärmefluß aus der Atmosphäre in die Ostsee während des Frühjahrs 1998. Das Bodenwasser wird dagegen durch Vermischung mit relativ warmem, von der Nordsee einströmenden Oberflächenwasser eher erwärmt als die Deckschicht. Die normale thermische Schichtung des Wassers im Gebiet der Darßer Schwelle weist auf eine Vermischung mit durchschnittlicher Intensität zwischen beiden Schichten hin (vgl. Tabelle 4).

Der aktuelle Verlauf der Wassertemperatur des Jahres 1998 ist für die Meßtiefen 7 m und 19 m in Abb. 6A dargestellt. Das Minimum der Wassertemperatur wurde Anfang Februar 1998 mit Werten um $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ erreicht. Die thermische Schichtung der Wassersäule begann Mitte April und war bis Ende August ausgeprägt. Der Anstieg der Wassertemperatur in der Deckschicht wurde Anfang Juni für fast zwei Wochen unterbrochen. Dieses Ereignis ging mit einem anhaltenden Ostwind (vgl. Abb. 2B) einher und wurde durch ein von der Insel Hiddensee zur Darßer Schwelle reichendes Filament mit kaltem Auftriebswasser verursacht (vgl. LASS et al., 1996), welches aus dem winterlichen Zwischenwasser des Arkonabeckens stammt. In der Zeit der ausgeprägten thermischen Schichtung war - wie für die Jahreszeit charakteristisch - eine deutliche mesomaßstäbliche Variabilität zu beobachten. Das Maximum der Wassertemperatur in der Deckschicht wurde Mitte August mit Werten um $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ erreicht. Die Abkühlungsphase des Wassers begann auf der Darßer Schwelle in allen Tiefen mit dem Starkwindereignis Anfang September (vgl. Abb. 2). Das Wasser kühlte sich bis Ende Dezember auf rund $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ab. Während des Kälteeinbruchs von Mitte November bis Anfang Dezember 1998 sank die Temperatur des oberflächennahen Wassers deutlich unter die der Bodenwasserschicht.

Im Jahre 1998 wies der mittlere Salzgehalt in 7 m Tiefe Werte auf, die im Bereich des Mittelwertes des gesamten Beobachtungszeitraums der Salzgehaltsmessungen auf der Darßer Schwelle lagen (Tabelle 4). Das Jahresmittel des Salzgehalts in Bodennähe lag etwas unterhalb des langjährigen Mittelwertes der seit 1992 vorliegenden Meßreihe. Die Standardabweichungen waren in allen Tiefen nicht extrem. Auch 1998 wurde wieder eine ausgeprägte mittlere Schichtung des Salzgehaltes beobachtet, die auf einen signifikanten baroklinen Anteil des Wasseraustausches zwischen Nord- und Ostsee hinweist.

Der zeitliche Verlauf des Salzgehaltes für 1998 ist in Abb. 6B dargestellt. Ein pulsformiger Einschub mit erhöhtem Salzgehalt von mehr als 15 PSU in der gesamten Wassersäule, wie er für barotrope Einstromereignisse typisch ist, wurde 1998 lediglich Ende Oktober beobachtet. Weitere Einstromereignisse mit Salzgehalten zwischen 12 und 14 PSU in der ganzen Wassersäule erfolgten im Januar, Februar, Anfang Juli und Ende Dezember.

Die untere Grenze der Variationen des Oberflächensalzgehalts im Arkonabecken sank von annähernd 8 PSU im Januar bis auf etwa 7 PSU Anfang Juli, was auf eine signifikante Aussüßung in diesem Zeitraum hindeutet.

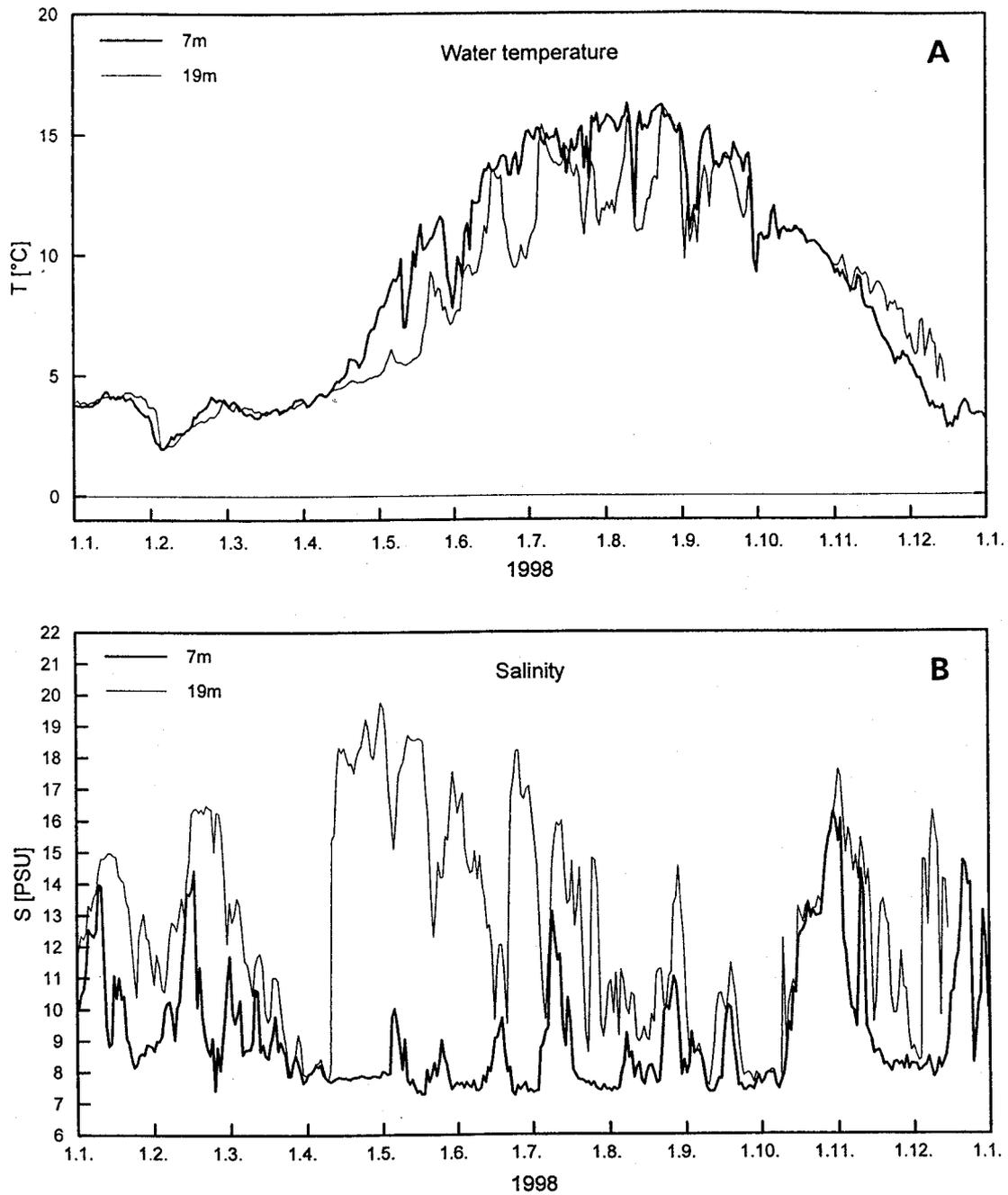


Abb. 6

Verlauf der Wassertemperatur (A) und des Salzgehaltes (B) in der Deck- und Bodenschicht auf der Darßer Schwelle (Stat. 001) im Jahre 1998

Der Salzgehalt in der bodennahen Schicht der Darßer Schwelle lag im Winter vereinzelt über 15 PSU. Er wurde von den charakteristischen 10tägigen Fluktuationen unterbrochen, die der typischen Zeitskala für den barotropen Wasseraustausch im System Kattegat - Ostsee entsprechen (LASS et al., 1987; NEHRING et al., 1993). Ein besonders lange andauernder Zeitraum ausgeprägter Schichtung des Salzgehaltes wurde von Mitte April bis Mitte Juli beobachtet (Abb. 6B). Dies deutet auf eine intensive ästuarine Zirkulation hin. Anfang April, im September und Anfang Oktober wurden niedrige Salzgehalte in der ganzen Wassersäule gemessen, was auf einen lang anhaltenden, intensiven Ausstrom von Oberflächenwasser aus dem Arkonabecken hinweist. Die Wassertemperatur zeigt dabei die für den Auftrieb charakteristischen niedrigen Werte.

Die Zeitreihen der kontinuierlichen Sauerstoffmessung am Meßmast in 7 m und 19 m Tiefe sind in Abb. 7 dargestellt. Der Sauerstoffgehalt in der Deckschicht des Meeres ist in erster Näherung gleich seinem durch Wassertemperatur und Salzgehalt bestimmten Sättigungswert, wengleich besonders im Frühjahr durch die Phytoplanktonblüte bedingte Übersättigungen auftreten können (vgl. Tabelle 8). Dementsprechend weist der Sauerstoffgehalt dort einen jahreszeitlichen Trend mit höheren Werten im Winter- und kleineren Werten im Sommerhalbjahr auf. Dem Jahresgang des Sauerstoffs im Oberflächenwasser der Darßer Schwelle sind mesomaßstäbliche Fluktuationen mit einer Amplitude von annähernd $0,5 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$ überlagert.

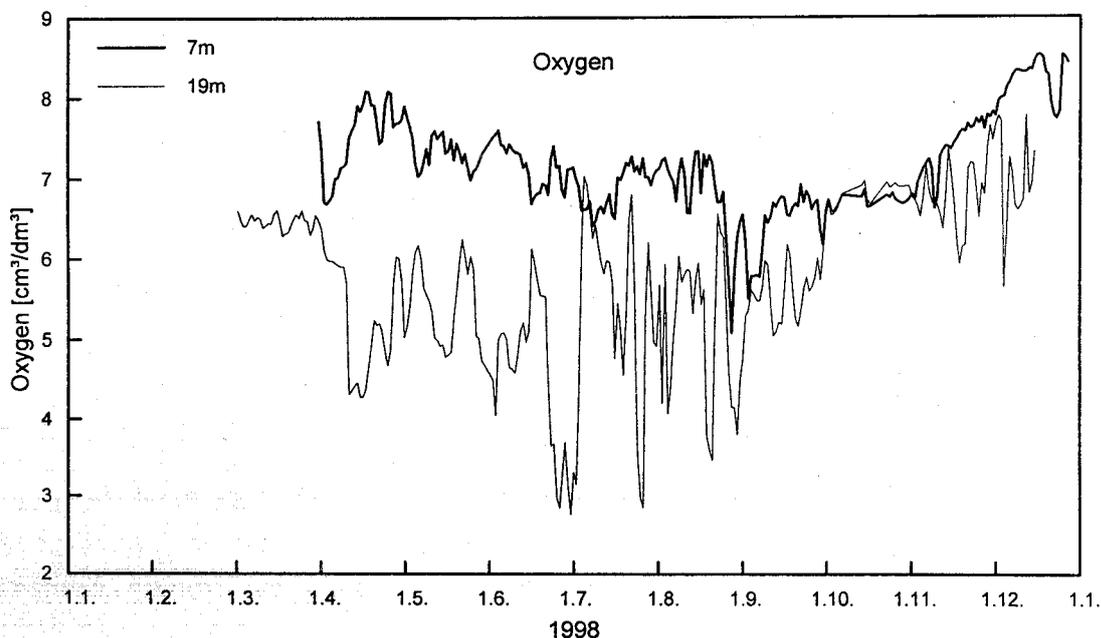


Abb. 7

Verlauf des Sauerstoffgehalts in der Deck- und Bodenschicht auf der Darßer Schwelle (Stat. 001) im Jahre 1998

Während eines durch anhaltenden Ostwind getriebenen Ausstromereignisses Anfang September sinkt der Sauerstoffgehalt in der Oberflächenschicht kurzzeitig sogar um $2 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$, obwohl die Wassertemperatur ebenfalls sinkt. Dies deutet darauf hin, daß sich sauerstoffarmes Tiefenwasser aus dem Arkonabecken durch Auftrieb mit dem Wasser der Deckschicht auf der Darßer Schwelle vermischt.

Der Sauerstoffgehalt in der bodennahen Schicht sinkt von $6,5 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$ im März/April auf rund $4,5 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$ im August. Diese Abnahme steht in ursächlichem Zusammenhang mit biochemischen Sauerstoffzehrungsprozessen in der stabilen Bodenwasserschicht. In diesem Zeitraum strömt salzreiches Bodenwasser mit vermindertem Sauerstoffgehalt in das Arkonabecken ein. Diesem jahreszeitlichen Trend sind Schwankungen des Sauerstoffgehaltes von einigen cm^3/dm^3 mit typischen Zeitskalen von 10 Tagen überlagert, die negativ mit dem Salzgehalt korreliert sind (vgl. Abb. 6B).

Der Sauerstoffgehalt des Bodenwassers steigt im September stetig auf den Wert des oberflächennahen Wassers an. Die stärkere vertikale Vermischung führt im Herbst zur Belüftung des bodennahen Wassers in der westlichen Ostsee.

3.1.2 Strömung

Der auf der Darßer Schwelle eingesetzte Akustische Doppler- Profilstrommesser (vgl. NEHRING et al., 1996) liefert seit dem 8. Juni 1994 Stromprofile mit einer vertikalen Auflösung von 1 m zwischen 3 m und 18 m Wassertiefe. Das Gerät ist am Meeresboden stationiert. Die bisherigen Einsätze haben gezeigt, daß die hochgenauen Messungen nicht durch Algenbewuchs beeinflusst werden. Durch eine unterbrochene Stromversorgung verursacht stehen aus den letzten zwei Wochen des Jahres 1998 leider keine Daten zur Verfügung.

Die fortschreitenden Vektordiagramme der Strömung in den einzelnen Meßhorizonten sind hier nicht dargestellt. Die mittlere Strömung und ihre Fluktuationen erweisen sich in der Wassersäule als sehr kohärent. Zur Charakterisierung des barotropen Anteils der Strömung ist die vertikal gemittelte Strömung und zur Beschreibung des baroklinen Anteils ist die Strömung in 3 m und 19 m Meßtiefe zeitlich integriert worden, und die fortschreitenden Vektordiagramme (Pseudotrajektorien) wurden berechnet. Diese filtern insbesondere die kurzzeitigen Fluktuationen aus der Strömungsmessung und lassen die langzeitigen Eigenschaften der Strömung besser erkennen.

Die Ostkomponenten der Pseudotrajektorien der vertikal gemittelten Strömung sowie der Strömung in Oberflächen- (3 m) und Bodennähe (19 m) sind in Abb. 8 dargestellt. Ihre Nordkomponenten sind vergleichsweise klein und werden deshalb hier nicht gezeigt.

Die Strömung in 3 m Tiefe weist im Januar und Februar zwei kleinere Einstromereignisse auf, denen sich ab Ende Februar bis Oktober ein starker Ausstrom anschließt. Dieser lang anhaltende Ausstrom in Oberflächennähe ist im März und April besonders kräftig, schwächt sich im Mai etwas ab und verstärkt sich danach wieder, bis er im Oktober durch ein ausgeprägtes Einstromereignis abgelöst wird. Der generelle Ausstrom in der Oberflächenschicht wird nur durch kurzzeitige Einstromepisoden unterbrochen.

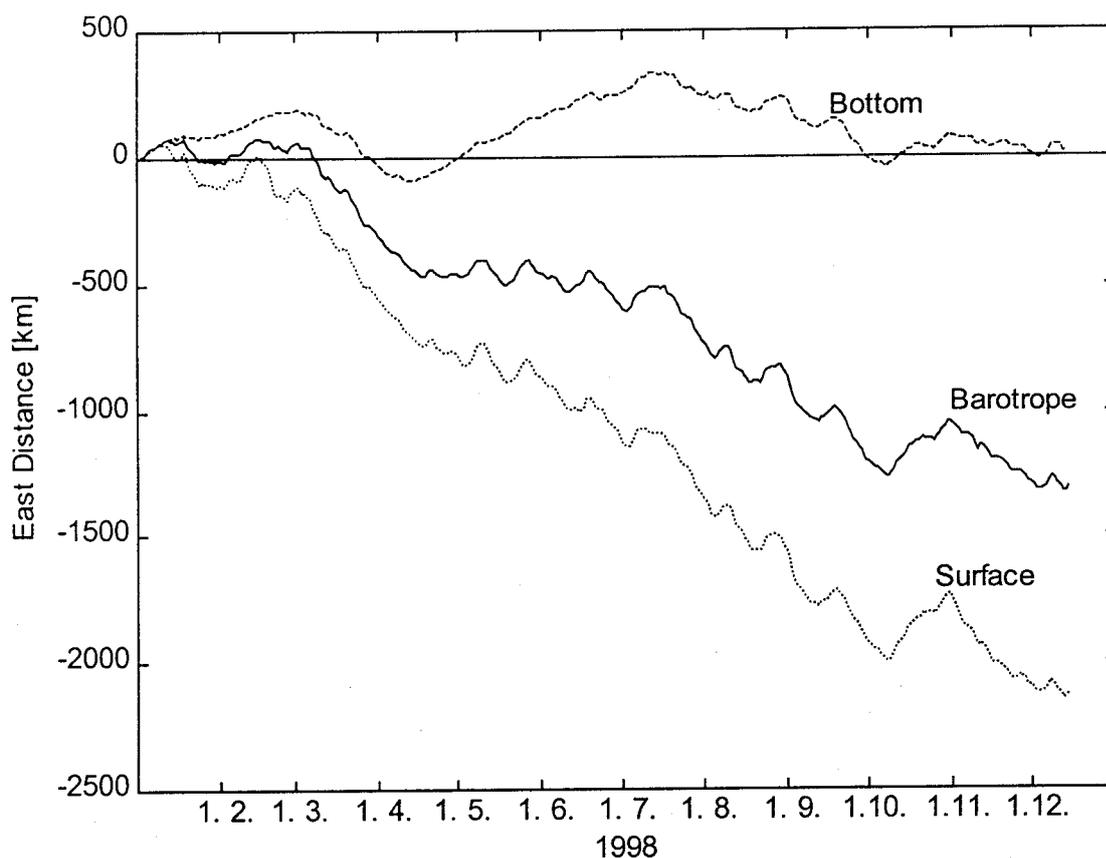


Abb. 8
Ostkomponente der Pseudotrajektorie des Vertikalmittels der Strömung sowie der Strömung an der Oberfläche (3 m Tiefe) und am Boden (19 m Tiefe) im Bereich der Darßer Schwelle (Stat. 001) im Jahre 1998

In der bodennahen Schicht in 19 m Tiefe herrscht bis Ende Februar Einstrom, der im März durch kräftigen Ausstrom abgelöst wird. Von Anfang April bis Anfang Juli schließt sich ein anhaltender Einstrom an, dem bis Ende September ein schwacher Ausstrom folgt. Im Oktober ist die Strömung in der Bodenschicht wiederum ostwärts gerichtet. Danach wird in der Bodenschicht nur schwache Strömung gemessen.

Die vertikal integrierte Strömung auf der Darßer Schwelle weist in den ersten beiden Monaten des Jahres zwei separate schwache Einstromereignisse auf. Von März bis Mitte April erfolgt ein intensiver Ausstrom in der gesamten Wassersäule. Der barotrope Ausstrom schwächt sich in der zweiten Aprilhälfte ab und stagniert, von kurzzeitigen Fluktuationen zwischen Ein- und Ausstrom überlagert, bis Mitte Juli. Eine kräftige Ausstromphase wird von Mitte Juli bis Anfang Oktober beobachtet. Im Oktober erfolgt auf der Darßer Schwelle ein Einstrom in der ganzen Wassersäule, woran sich schwacher Ausstrom bis Mitte Dezember anschließt.

Die Phase ausgeprägter barokliner Strömung auf der Darßer Schwelle spiegelt sich in der gleichzeitig beobachteten kräftigen Salzgehaltsschichtung wieder (vgl. Abb. 6B). Die barotropen Einstromereignisse im Januar und Februar, jedoch besonders das vom Oktober, hatten einen Einstrom salzreichen Wassers in der ganzen Wassersäule zur Folge.

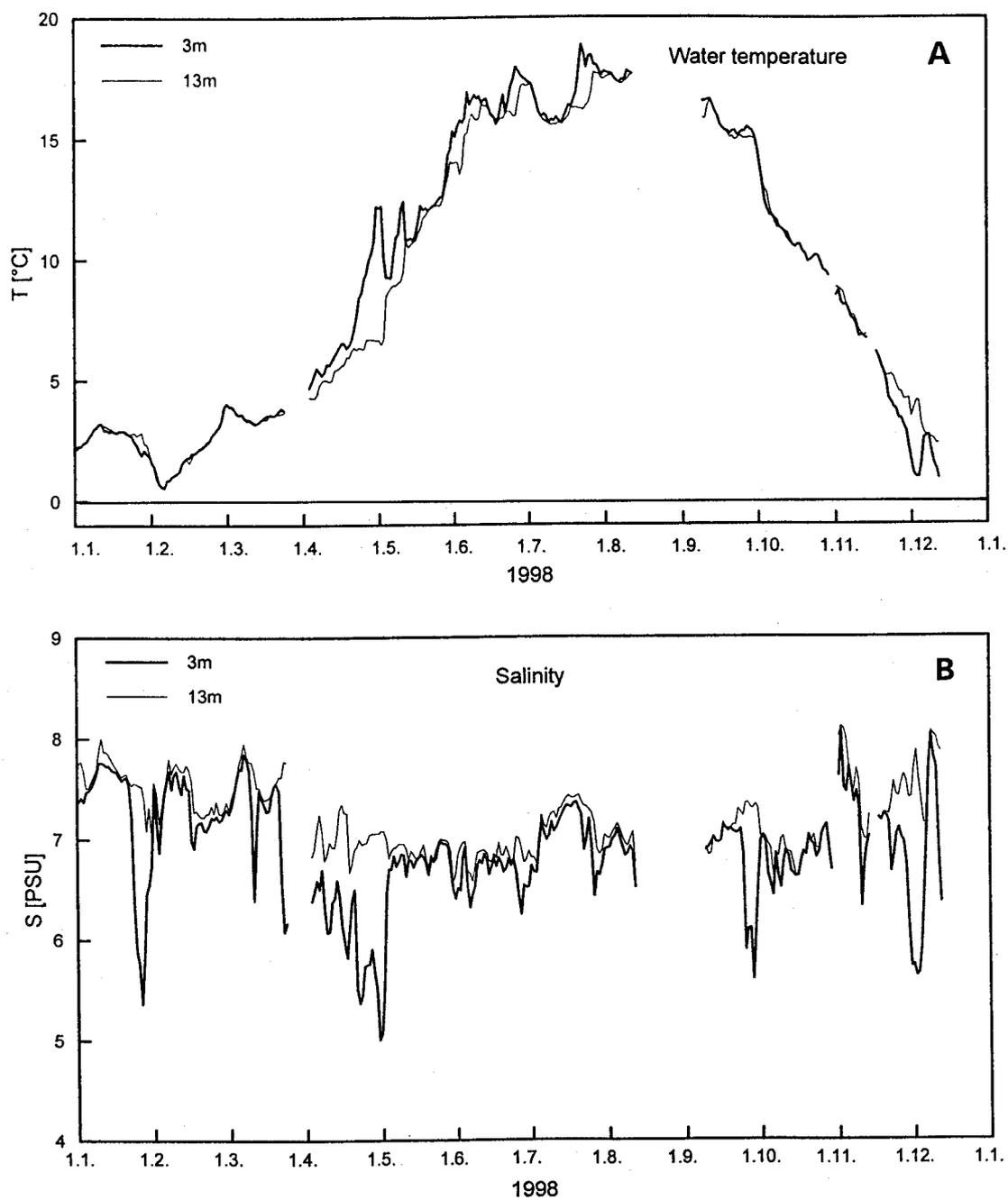


Abb. 9

Verlauf der Wassertemperatur (A) und des Salzgehaltes (B) in der Deck- und Bodenschicht in der Pommerschen Bucht (Stat. OB) im Jahre 1998

4. Beobachtungen an der Bojenstation "Oder Bank"

Die Verteilung von Wassermassen und die Zirkulation in der Pommerschen Bucht sind im Rahmen des TRUMP-Projektes (*TR*ansport und *UM*satzprozesse in der Pommerschen Bucht) untersucht (v. BODUNGEN et al., 1995; TRUMP, 1998) und durch SIEGEL et al. (1996) und MOHRHOLZ (1998) beschrieben worden. Bei Westwindlagen wird dort gut durchmischtes Wasser der Pommerschen Bucht, dem sich ein geringer Anteil von Oberflächenwasser aus dem Arkonabecken beimischt, beobachtet. Während anhaltender Ostwindlagen strömt Wasser aus dem Stettiner Haff durch Swina und Peenestrom in die Pommersche Bucht und schichtet sich vor der Küste Usedom über das Buchtwasser.

Die Bojenstation "Oder Bank" befindet sich annähernd 5 sm nordöstlich von Koserow/Usedom auf 15 m Wassertiefe (Stat. OB, vgl. Abb. 1). Die Zeitreihen von Wassertemperatur und Salzgehalt in 3 m und 13 m Wassertiefe sind in Abb. 9 dargestellt.

Die an dieser Station gemessene Wassertemperatur folgt in ihrem Jahresgang weitgehend dem auf der Darßer Schwelle gemessenen (vgl. Abb. 6A). Jedoch sind sowohl die Extremwerte des Jahresgangs als auch die mesoskalen Variationen der Wassertemperatur in der Pommerschen Bucht kräftiger ausgebildet als auf der Darßer Schwelle. Während der Wintermonate erreichte die Wassertemperatur der Pommerschen Bucht annähernd den Gefrierpunkt, und die Maxima im Sommer lagen knapp unter 20 °C. Dies weist darauf hin, daß die Wassertemperatur in der Pommerschen Bucht in stärkerem Maße durch den lokalen Wärmefluß durch die Meeresoberfläche bestimmt ist, als es an der stärker durch advective Prozesse beeinflussten Darßer Schwelle der Fall ist. Eine ausgeprägte thermische Schichtung wurde 1998 an der Station "Oder Bank" nur während der windschwachen Perioden (vgl. Abb. 2A) Ende April/Anfang Mai, Ende Juni und Ende November bis Anfang Dezember beobachtet.

Der in den gleichen Tiefen wie die Wassertemperatur gemessene Salzgehalt ist in Abb. 9B dargestellt. Er variierte im Laufe des Jahres lediglich zwischen 5 und 8 PSU und wies somit wesentlich geringere Schwankungen als auf der Darßer Schwelle auf. Der Salzgehalt in 13 m Tiefe zeigt einen schwachen Jahresgang mit Werten um 8 PSU im Winterhalbjahr und 7 PSU im Sommerhalbjahr. Der Salzgehalt in 3 m Tiefe folgt weitgehend dem in der bodennahen Schicht. Für kurze Phasen mit einer Dauer von einigen Tagen bis einigen Wochen schichtet sich Haffwasser mit einem um 1 bis 2 PSU niedrigeren Salzgehalt über das Buchtwasser. Dieser Prozeß trat 1998 bei schwachen und vor allem östlichen Windlagen (vgl. Abb. 2) in besonderem Maße Ende Januar, im April, Ende September und Ende November/Anfang Dezember auf.

5. Hydrographisch-chemische Bedingungen

Die Mecklenburger und die Kieler Bucht liegen im Übergangsgebiet zwischen Ost- und Nordsee und sind daher durch starke kurzfristige Schwankungen der hydrographischen und chemischen Variablen gekennzeichnet. Dies gilt auch für die Pommersche Bucht (vgl. Abb. 9 und Kapitel 4), die durch den Oderausstrom beeinflusst wird. Das Datenmaterial, das auf den dort bearbeiteten Stationen durch das IOW gewonnen wird, kann daher nur zu einer ersten Einschätzung herangezogen werden. Eine detaillierte Auswertung wird gemeinsam mit den Landesämtern für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern (LUNG) und für Natur und Umwelt Schleswig-Holstein (LANU) vorgenommen, mit denen im Rahmen des Bund/Länder-

Meßprogramms (BLMP) für die Meeresumwelt von Nord- und Ostsee eine Abstimmung der zu bearbeitenden Stationen mit dem Ziel einer höheren zeitlichen und räumlichen Auflösung der Beprobung erfolgt ist. In den östlich der Darßer Schwelle bearbeiteten Seegebieten, der eigentlichen Ostsee, nehmen die kurzfristigen Variationen mit zunehmender Entfernung von den Ostseezugängen deutlich ab. Die nachfolgenden hydrographisch-chemischen Untersuchungen konzentrieren sich daher vorrangig auf diese Seegebiete.

Die Vertikalverteilungen der Wassertemperatur (Abb. 12), des Salz- (Abb. 14) und Sauerstoffgehalts (Abb. 15) sowie der Phosphat- (Abb. 17) und Nitratkonzentrationen (Abb. 18) sind auf einem Längsschnitt zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken, der dem Talweg durch die zentralen Ostseebecken folgt, dargestellt. Im Bedarfsfall wird auch auf weitere Stationen im Danziger Becken (Stat. 233) und im westlichen Gotlandbecken (Stat. 245, 284) eingegangen.

Von ausgewählten Stationen und Tiefen wurden die Jahresmittelwerte für einige hydrographisch-chemische Variablen berechnet und mit denen früherer Jahre verglichen. Während bei der Wassertemperatur sowie dem Salz- und Sauerstoffgehalt (Tabelle 6) 16 bis 31 relativ gleichmäßig über das Jahr verteilte Messungen zur Mittelbildung zur Verfügung standen, resultieren die Mittelwerte der anorganischen Nährstoffe im Tiefenwasser (Tabelle 11) aus 16 - 19 Beprobungen.

5.1 Wassertemperatur

Die Verteilung der Wassertemperatur in den untersuchten Seegebieten der Ostsee ist in Abb. 10 und 12 dargestellt. Für die Analyse der Oberflächentemperaturen der Ostsee werden auch mittlere monatliche Verteilungen herangezogen, die aus Satellitendaten berechnet wurden (vgl. Abb. 11). Durch den synoptischen Charakter der Satellitendaten und die hohe Datenrate lassen sich statistisch gesicherte Mittel für die meisten Monate und Gebiete ableiten. Damit kann die zeitliche und räumliche Entwicklung der Oberflächentemperaturen für die gesamte Ostsee dargestellt werden (vgl. auch SIEGEL et al., 1998b).

5.1.1 Jahresgang der Oberflächentemperatur

Der Jahresgang der Temperaturen im Oberflächenwasser entsprach 1998 weitgehend dem langjährigen mittleren Verlauf (LENZ, 1971; MATTHÄUS, 1977). Infolge des milden Winters gingen die Temperaturen in der Beltsee sowie im Arkona- und Bornholmbecken nur auf 2,5 - 3,5 °C zurück. Auch im östlichen Gotlandbecken sanken sie nur auf 2,5 - 3,5 °C und im westlichen Gotlandbecken auf 2 - 2,5 °C (vgl. Abb. 10). Das entspricht einer positiven Anomalie von etwa 1 - 1,5 K (MATTHÄUS, 1977). Auf Grund des kühlen Sommers wiesen die Höchstwerte mit 15 - 17 °C in der westlichen und zentralen Ostsee (vgl. Abb. 6A, 10 und 11A) nur geringe Abweichungen vom langjährigen Erwartungswert auf.

Verglichen mit den aus Satellitendaten berechneten monatlichen Mittelwerten für jeden Monat August der 90er Jahre (MATTHÄUS et al., 1998b) wies der August 1998 in der gesamten Ostsee mit Ausnahme des Bottnischen Meerbusens die niedrigsten Wasseroberflächentemperaturen auf (Abb. 11). Durch die dominierenden westlichen Winde (vgl. Abb. 2B) während der in diesem Sommer vorherrschenden Tiefdrucklagen haben sich an der schwedischen Küste der zentralen Ost-

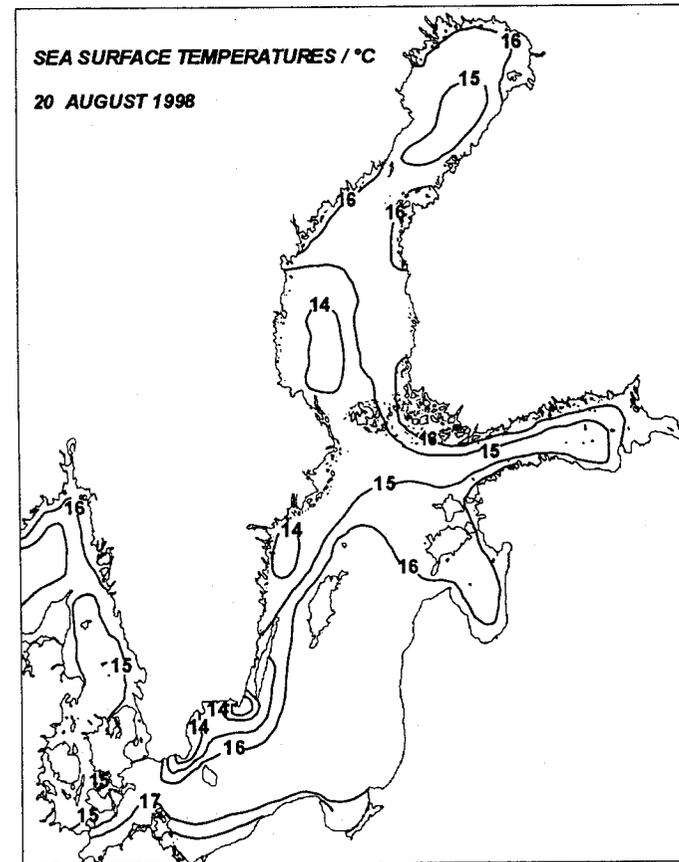
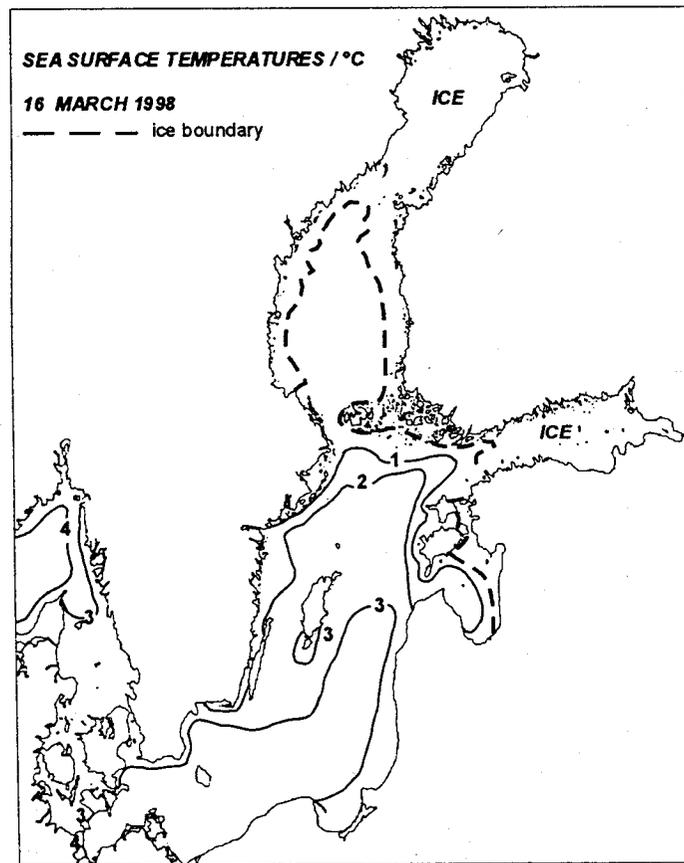


Abb. 10

Verteilung der Oberflächentemperatur der Ostsee zur Zeit der Minimal- (16. März, maximale Eisbedeckung) bzw. Maximalwerte (20. August) des Jahres 1998 (bearbeitet nach den Karten Nr. 21 und 64 des SMHI Norrköping; SMHI, 1998)

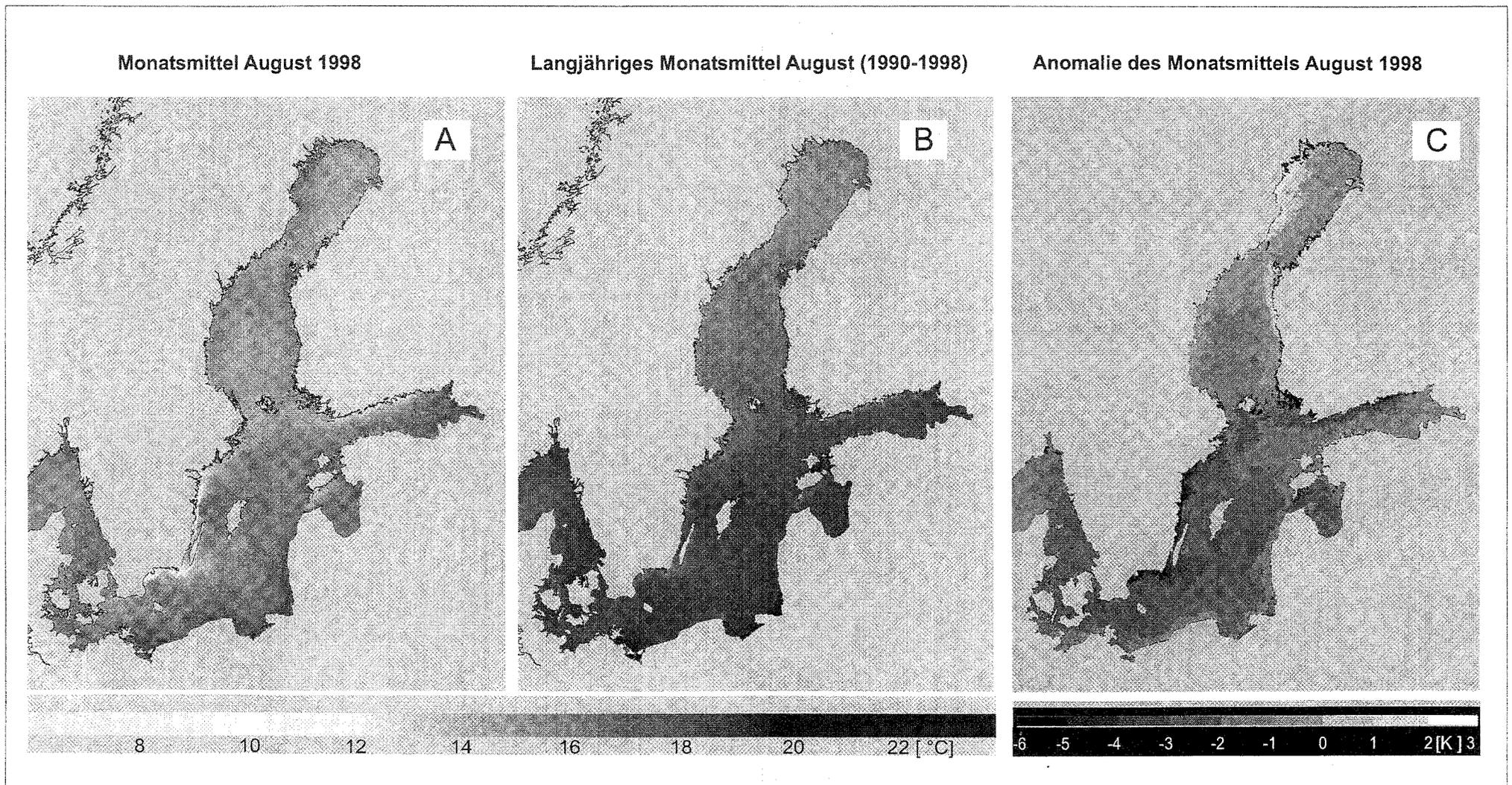


Abb. 11
 Mittlere Verteilung der Oberflächentemperatur der Ostsee im August 1998 und deren Abweichung vom langjährigen Monatsmittel 1990 - 1998,
 berechnet aus NOAA-AVHRR-Wettersatellitendaten

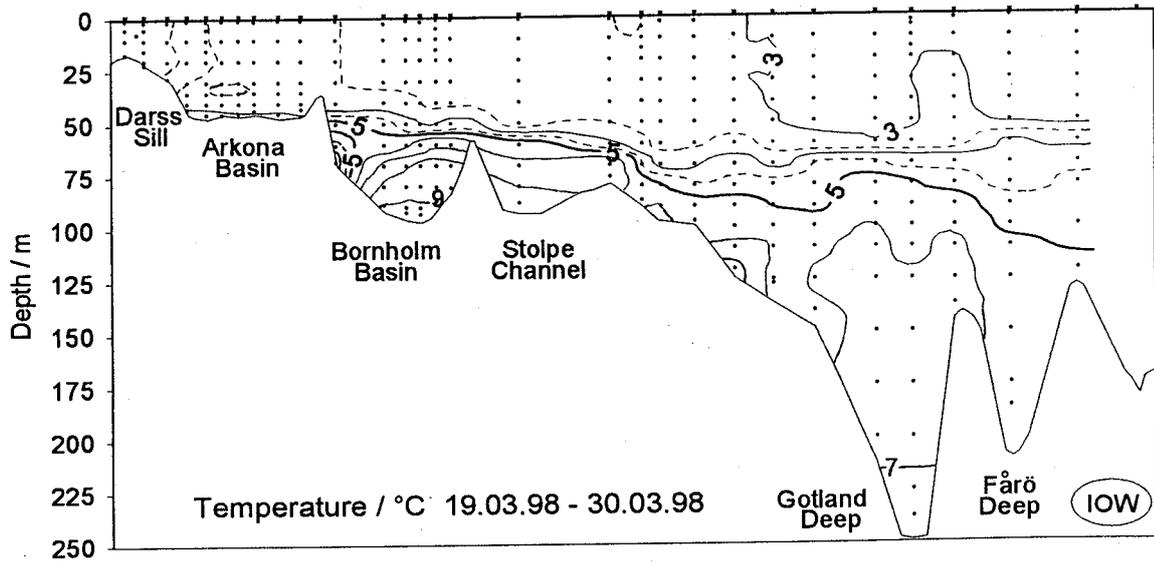
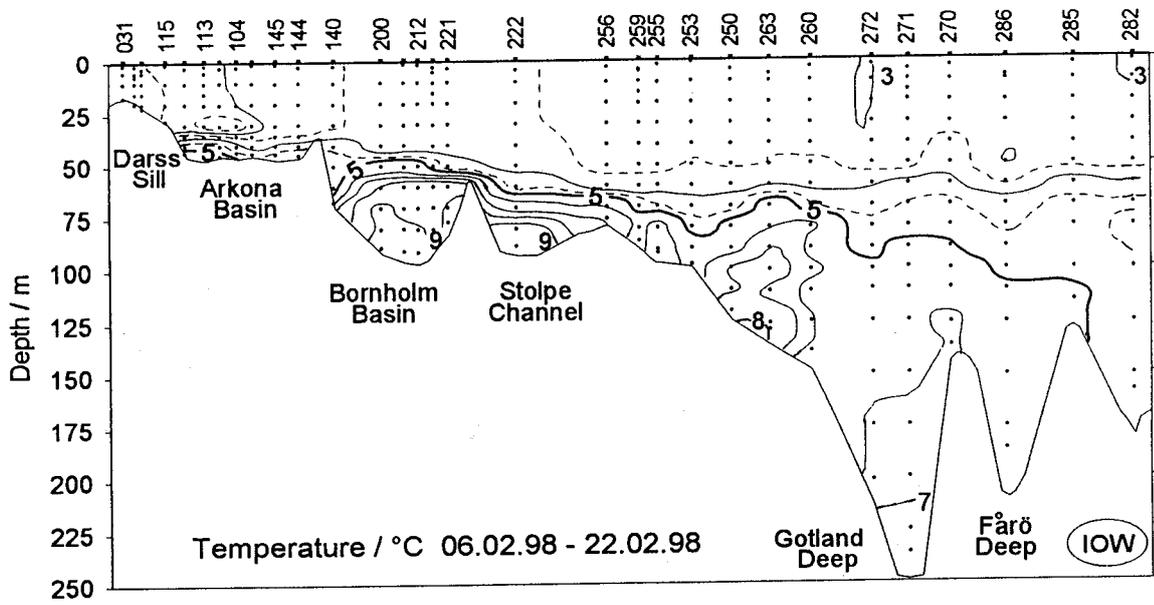
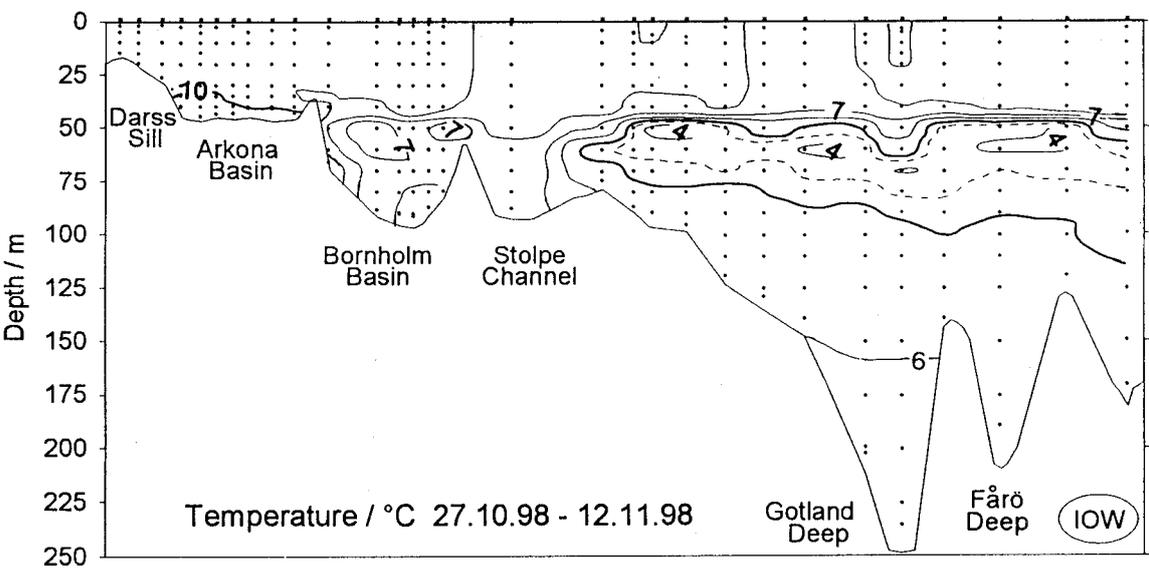
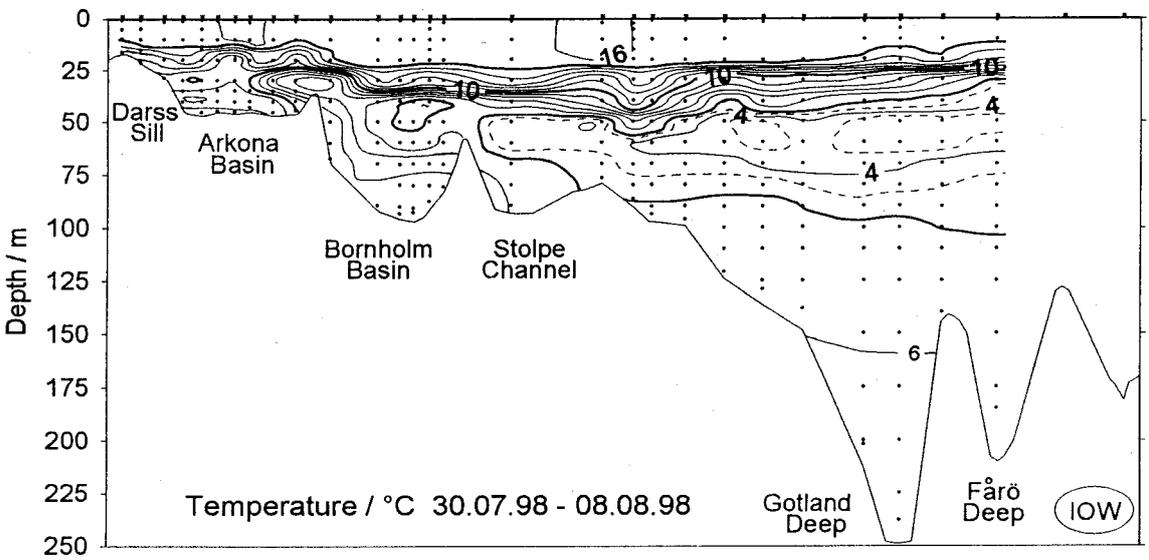
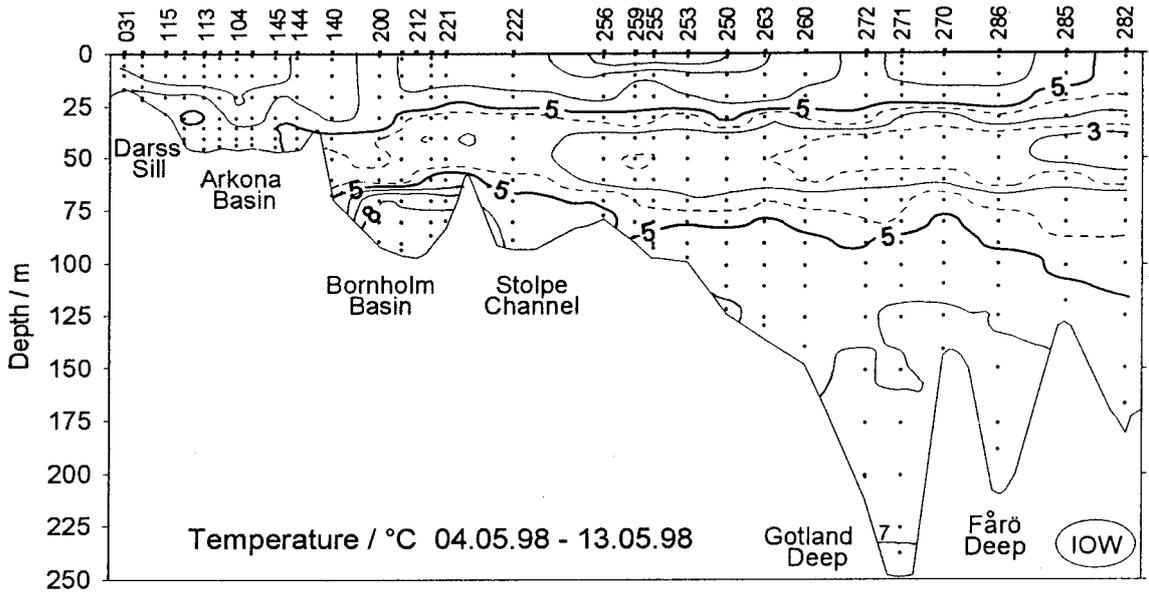


Abb. 12
 Vertikale Verteilung der Wassertemperatur zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken



see und an der südfinnischen Küste Auftriebsgebiete kalten Wassers mit Temperaturen von 11 - 13°C im Monatsmittel herausgebildet. Außerhalb der Auftriebsgebiete lag die Wassertemperatur zwischen 15 und 17°C. Es gab in diesem Sommer kaum regionale Unterschiede zwischen dem Bottnischen Meerbusen und der eigentlichen Ostsee wie sie sonst in einigen Jahren besonders stark ausgeprägt waren und wie sie sich auch im langjährigen Mittel 1990 - 1998 des Monats August widerspiegeln (Abb. 11B). Die Anomalie in den Wasseroberflächentemperaturen des Monats August 1998 in Abb. 11C zeigt, daß nur der nordwestliche Teil des Bottnischen Meerbusen wärmer war als das Mittel der 90er Jahre. Die meisten Teilgebiete der Ostsee waren bis zu 2 K kälter und in den Auftriebsgebieten an der schwedischen Küste wurden Anomalien von mehr als 4 K erreicht.

5.1.2 Vertikalverteilung der Wassertemperatur

Das im Oktober 1997 ins Bornholmbecken eingeströmte, sehr warme Tiefenwasser war Anfang November bereits bis zum Südhang des östlichen Gotlandbeckens vorgedrungen (MATTHÄUS et al., 1998b). Mitte Dezember 1997 begann der Einstrom ins Gotlandtief, der im Mai 1998 beendet war und zu einem Temperaturanstieg von etwa 1 K auf rund 6 °C in 140 - 170 m Tiefe (Abb. 13) und > 7 °C in Grundnähe führte (Abb. 12).

Kontinuierliche Registrierungen im Bereich des Gotlandtiefs (57° 25,4'N, 20° 20,8'E; Position vgl. Abb. 1) zeigten, daß während des Einstroms in mittleren Tiefen erhebliche Schwankungen der Temperatur um etwa 1 K bis auf knapp 7 °C auftraten (Abb. 13). HAGEN und FEISTEL (1999) vermuten, daß diese Variationen von etwa 20 Tagen durch eine im Tiefenwasser des Gotlandtiefs infolge des Einstroms angeregte zyklonale Zirkulation verursacht werden, bei der während des gesamten Einstromprozesses mit jedem Umlauf neues, am Südhang des östlichen Gotlandbeckens einfließendes, wärmeres Wasser (vgl. z. B. Abb. 12 und 24C) eingemischt wird.

Im Laufe des Jahres 1998 kühlte sich das Tiefenwasser im Bornholmbecken von 9,5 °C im Februar auf 8 °C am Jahresende ab (Abb. 12 und 23). Ab Mitte des Jahres begann auch der Temperaturrückgang im östlichen Gotlandbecken, der im Dezember zu Temperaturen um 6,7 °C im grundnahen Wasser des Gotlandtiefs führte.

Infolge des milden Winters wies die Kernschicht des kalten Zwischenwassers (50 - 70 m) im August 1998 Temperaturen zwischen 3,5 und 4,5 °C auf, was positiven Anomalien von etwa 1 bis 1,5 K entspricht.

Die außergewöhnlichen Wassertemperaturen im Sommer 1997 wirkten sich auch noch 1998 auf die Jahresmitteltemperaturen im Tiefenwasser des Bornholmbeckens aus. Das Jahresmittel lag 1998 um etwa 1,2 K über dem von 1997 (vgl. Tabelle 6). Im Tiefenwasser des östlichen Gotlandbeckens wurden die höchsten Jahresmitteltemperaturen seit 1977 gemessen. Im 200 m Horizont des Gotlandtiefs lag das Jahresmittel 1998 um 1,4 K über dem des Vorjahres. Auch im Landsorttief zeigten sich Auswirkungen des Einstroms ungewöhnlich warmen Wassers (vgl. auch Abb. 23). Im Tiefenwasser des Bornholmbeckens sind die Temperaturen seit 1994 im Jahresmittel um 4,3 K, im Gotland- und Färötief seit 1995 um 2,2 bzw. 0,9 K angestiegen.

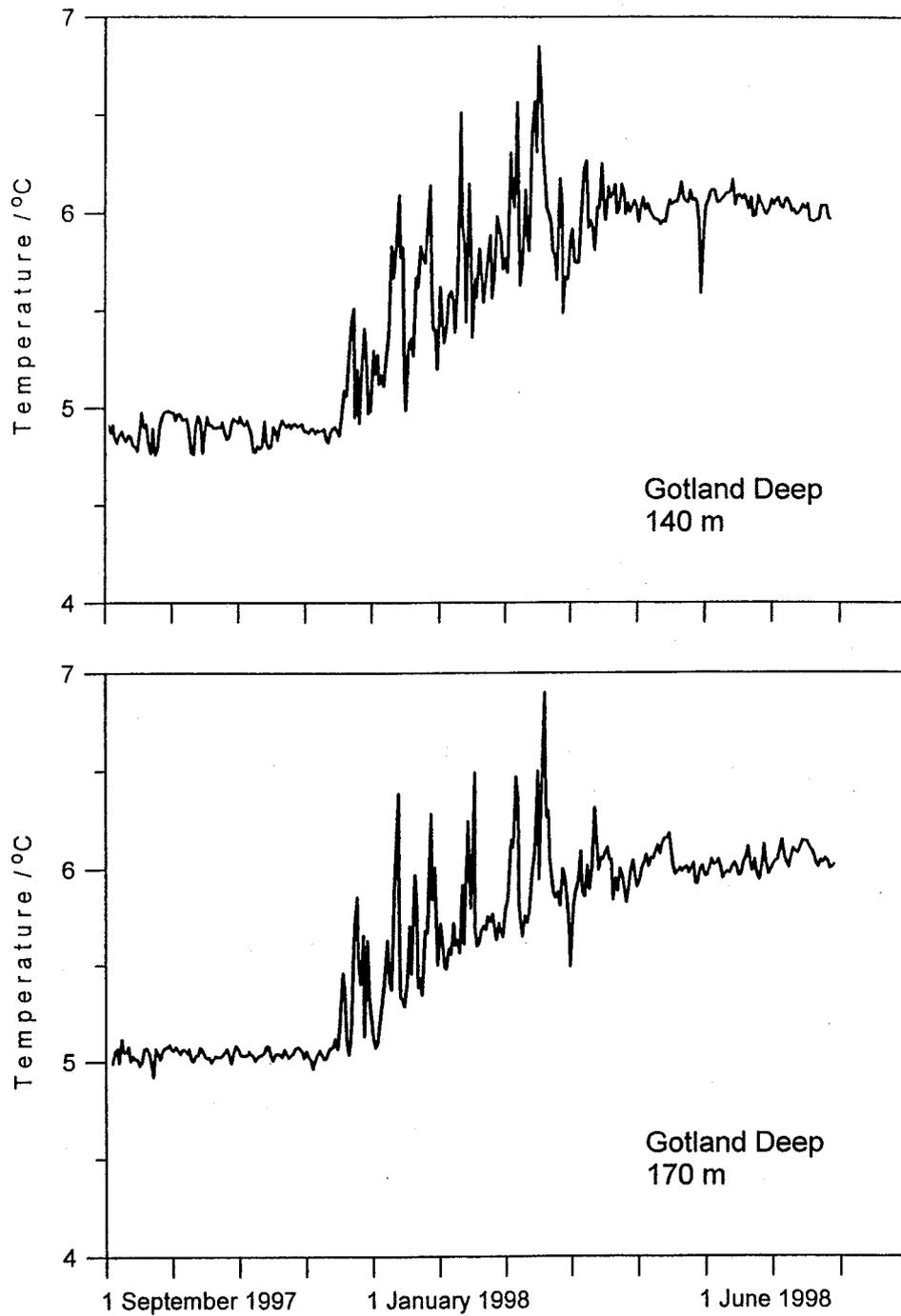


Abb. 13

Der Prozeß des Einstroms warmen, salzreicheren Wassers in mittleren Tiefen des östlichen Gotlandbeckens im 1. Halbjahr 1998, dargestellt an Hand kontinuierlicher Registrierungen der Temperatur im Bereich des Gotlandtiefs auf $57^{\circ} 25,4'N$, $20^{\circ} 20,8'E$; Position (\blacktriangle) vgl. Abb. 1 (HAGEN, FEISTEL, 1999)

Tabelle 6 Jahresmittelwerte und Standardabweichungen ausgewählter hydrographischer Parameter im Tiefenwasser der zentralen Ostsee

Wassertemperatur (°C); Maximalwerte hervorgehoben

Station	Tiefe/m	1994	1995	1996	1997	1998
213 (Bornholmtief)	80	4,21 ±0,46	5,85 ±0,56	5,95 ±0,94	7,32 ±1,91	8,53 ±0,45
271 (Gotlandtief)	200	4,68 ±0,48	4,43 ±0,13	4,64 ±0,07	5,17 ±0,06	6,62 ±0,15
286 (Fårötief)	150	5,03 ±0,13	4,72 ±0,04	4,79 ±0,03	4,84 ±0,20	5,66 ±0,32
284 (Landsorttief)	400	4,86 ±0,13	4,74 ±0,11	4,70 ±0,06	4,66 ±0,08	4,88 ±0,23
245 (Karlsötief)	100	4,41 ±0,06	4,39 ±0,15	4,45 ±0,07	4,35 ±0,08	4,33 ±0,05

Salzgehalt (PSU); Maximalwerte hervorgehoben

Station	Tiefe/m	1994	1995	1996	1997	1998
213 (Bornholmtief)	80	17,43 ±0,34	16,61 ±0,31	16,01 ±0,37	16,52 ±0,50	16,38 ±0,49
271 (Gotlandtief)	200	11,78 ±0,38	12,01 ±0,04	11,96 ±0,03	11,97 ±0,04	12,32 ±0,07
286 (Fårötief)	150	10,75 ±0,29	11,17 ±0,03	11,23 ±0,04	11,32 ±0,13	11,62 ±0,09
284 (Landsorttief)	400	9,49 ±0,23	9,94 ±0,16	10,09 ±0,11	10,22 ±0,11	10,50 ±0,16
245 (Karlsötief)	100	8,45 ±0,16	8,82 ±0,30	9,11 ±0,26	9,33 ±0,14	9,51 ±0,13

Sauerstoffgehalt (cm³/dm³; Schwefelwasserstoff als negative Sauerstoffäquivalente; Minimalwerte hervorgehoben)

Station	Tiefe/m	1994	1995	1996	1997	1998
213 (Bornholmtief)	80	2,43 ±1,07	0,76 ±0,91	0,54 ±0,59	1,34 ±0,72	-0,20 ±0,81
271 (Gotlandtief)	200	2,03 ±1,40	1,26 ±0,43	0,20 ±0,24	-0,03 ±0,25	0,02 ±0,48
286 (Fårötief)	150	0,17 ±0,44	0,70 ±0,26	0,16 ±0,39	0,14 ±0,39	-0,03 ±0,33
284 (Landsorttief)	400	1,12 ±0,36	0,92 ±0,22	0,69 ±0,11	0,60 ±0,14	0,37 ±0,14
245 (Karlsötief)	100	1,88 ±0,64	1,72 ±0,68	1,09 ±0,46	0,66 ±0,34	0,43 ±0,22

5.2 Salzgehalt

Die Salzgehaltsverteilungen für das Jahr 1998 sind in Abb. 14 zusammengestellt.

Im Jahre 1998 erfolgte kein Salzwassereinbruch. Nachdem sich das Bornholmbecken im Herbst 1997 mit salzreichem Wasser von >15 PSU ab etwa 60 m Tiefe und rund 18 PSU am Meeresboden aufgefüllt hatte (vgl. MATTHÄUS et al., 1998b), ging der bodennahe Salzgehalt im Laufe des Jahres 1998 von etwa 17,5 PSU im Januar auf 16,2 PSU Ende 1998 zurück. Das drückt sich auch in der Verlagerung der 15 PSU Isohaline von etwa 60 m Tiefe im Januar auf rund 75 m im Oktober/November aus (vgl. Abb. 14).

Das in die zentrale Ostsee eingeströmte Wasser führte in den grundnahen Schichten des Gotlandtiefs im Januar 1998 zur Erhöhung des Salzgehaltes um 0,7 PSU auf 12,7 PSU. Die kleinen Einströme im Laufe des Jahres (vgl. Kapitel 3) hatten 1998 keine signifikanten Auswirkungen in der zentralen Ostsee, so daß die Salzgehalte im Tiefenwasser des östlichen Gotlandbeckens wieder rückläufig waren.

Betrachtet man die langfristige Entwicklung im Tiefenwasser auf der Basis der Jahresmittelwerte, so ist der Trend im grundnahen Wasser des Bornholmbeckens wieder rückläufig und liegt 1,3 PSU unter dem Mittel von 1993. In der Bodenwasserschicht des gesamten Gotlandbeckens ist ein Anstieg um 0,2 bis 0,3 PSU gegenüber 1997 (vgl. Tabelle 6) auf die höchsten Werte seit 1992 zu verzeichnen (vgl. auch NEHRING et al., 1995b).

Der Salzgehalt im Oberflächenwasser der zentralen Ostsee wies im Jahresmittel 1998 die niedrigsten Werte der letzten fünf Jahre auf (vgl. Tabelle 7) und zeigte, verglichen mit dem langjährigen Mittelwert 1961 - 1990, negative Abweichungen von 0,55 PSU im Bornholmbecken und von etwa 0,4 PSU im östlichen Gotlandbecken. Die Mittelwerte lagen damit noch unter den für das Jahr 1996 berechneten Werten (vgl. MATTHÄUS et al., 1996). Die mittlere Jahresschwankung beträgt nur rund 0,2 PSU im Bornholmbecken und etwa 0,6 PSU im östlichen Gotlandbecken (vgl. MATTHÄUS, 1978a).

Tabelle 7 **Jahresmittelwerte sowie Langzeitmittel (\bar{S}_0) und Standardabweichungen des Salzgehalts (in PSU) im Oberflächenwasser der zentralen Ostsee (Minimalwerte hervorgehoben)**

Station	1994	1995	1996	1997	1998	\bar{S}_0 (1961 - 1990)
213 (Bornholmtief)	7,35 \pm 0,13	7,50 \pm 0,21	7,28 \pm 0,21	7,45 \pm 0,09	7,17 \pm 0,14	7,72 \pm 0,25
271 (Gotlandtief)	7,09 \pm 0,21	7,14 \pm 0,09	7,08 \pm 0,15	7,05 \pm 0,20	7,04 \pm 0,20	7,41 \pm 0,46
286 (Färötief)	6,91 \pm 0,25	6,82 \pm 0,20	6,74 \pm 0,24	6,90 \pm 0,13	6,79 \pm 0,35	7,15 \pm 0,31
284 (Landsortief)		6,64 \pm 0,27	6,36 \pm 0,37	6,59 \pm 0,24	6,30 \pm 0,41	
245 (Karlsötief)		6,94 \pm 0,17	6,68 \pm 0,24	6,89 \pm 0,22	6,60 \pm 0,15	

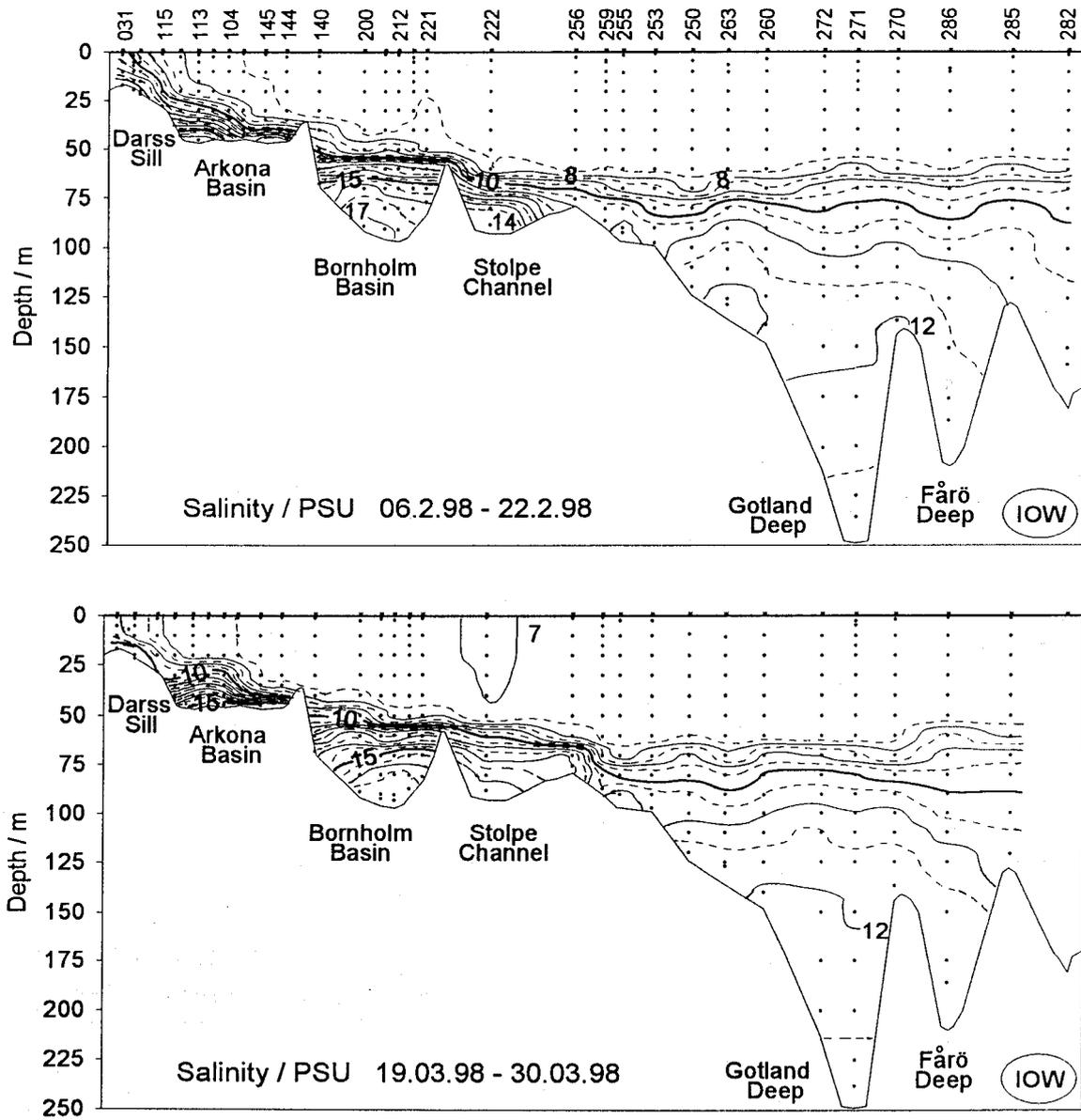
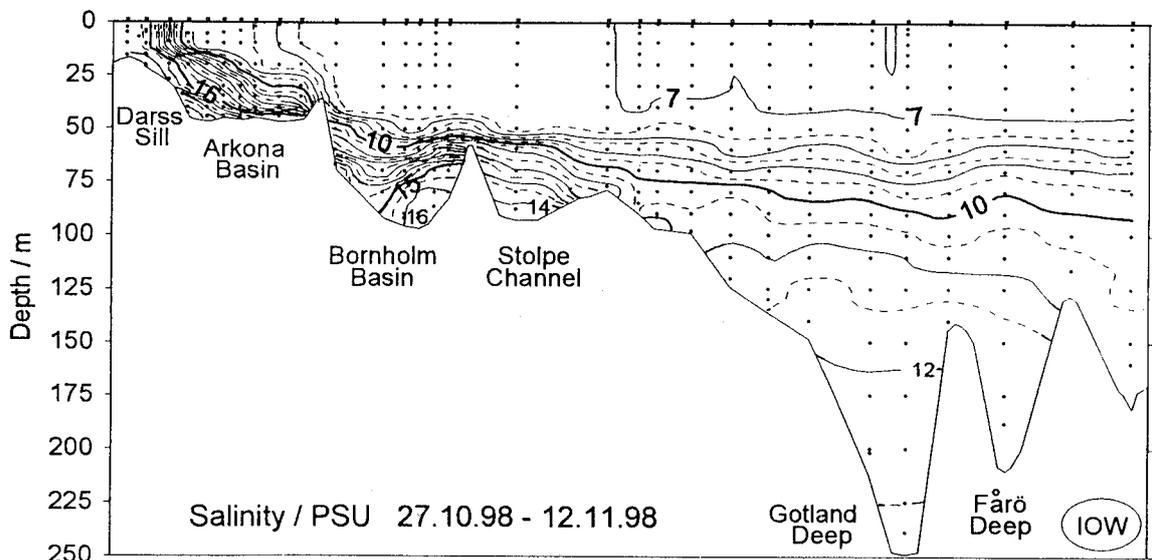
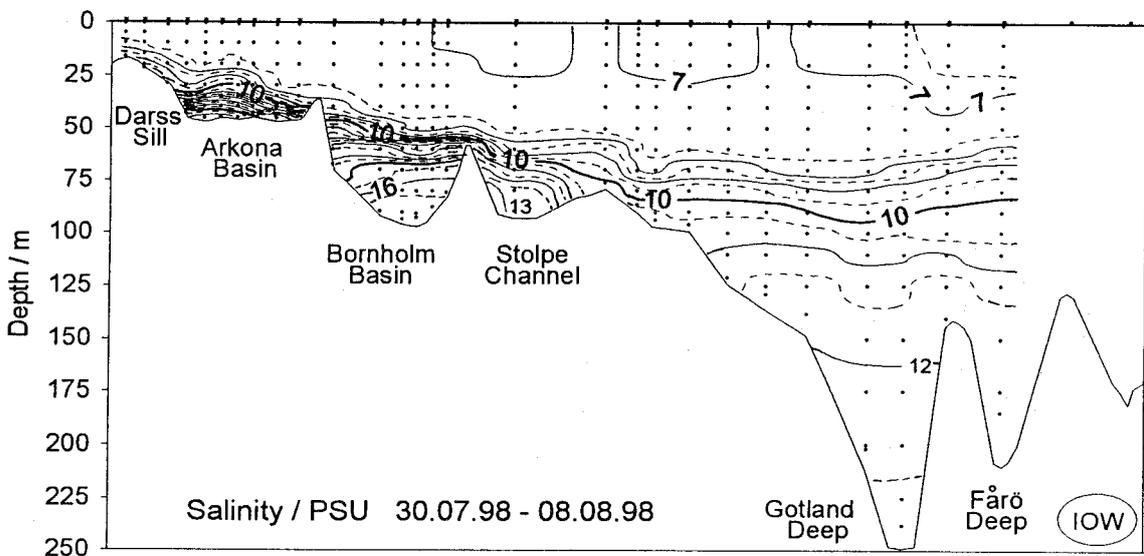
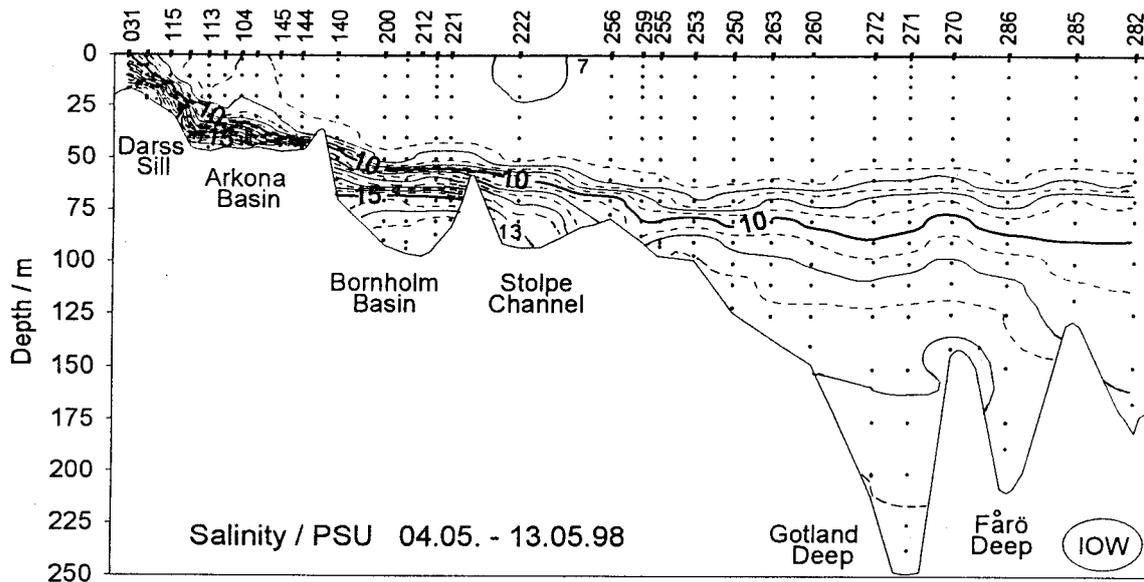


Abb. 14
 Vertikale Verteilung des Salzgehalts zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken



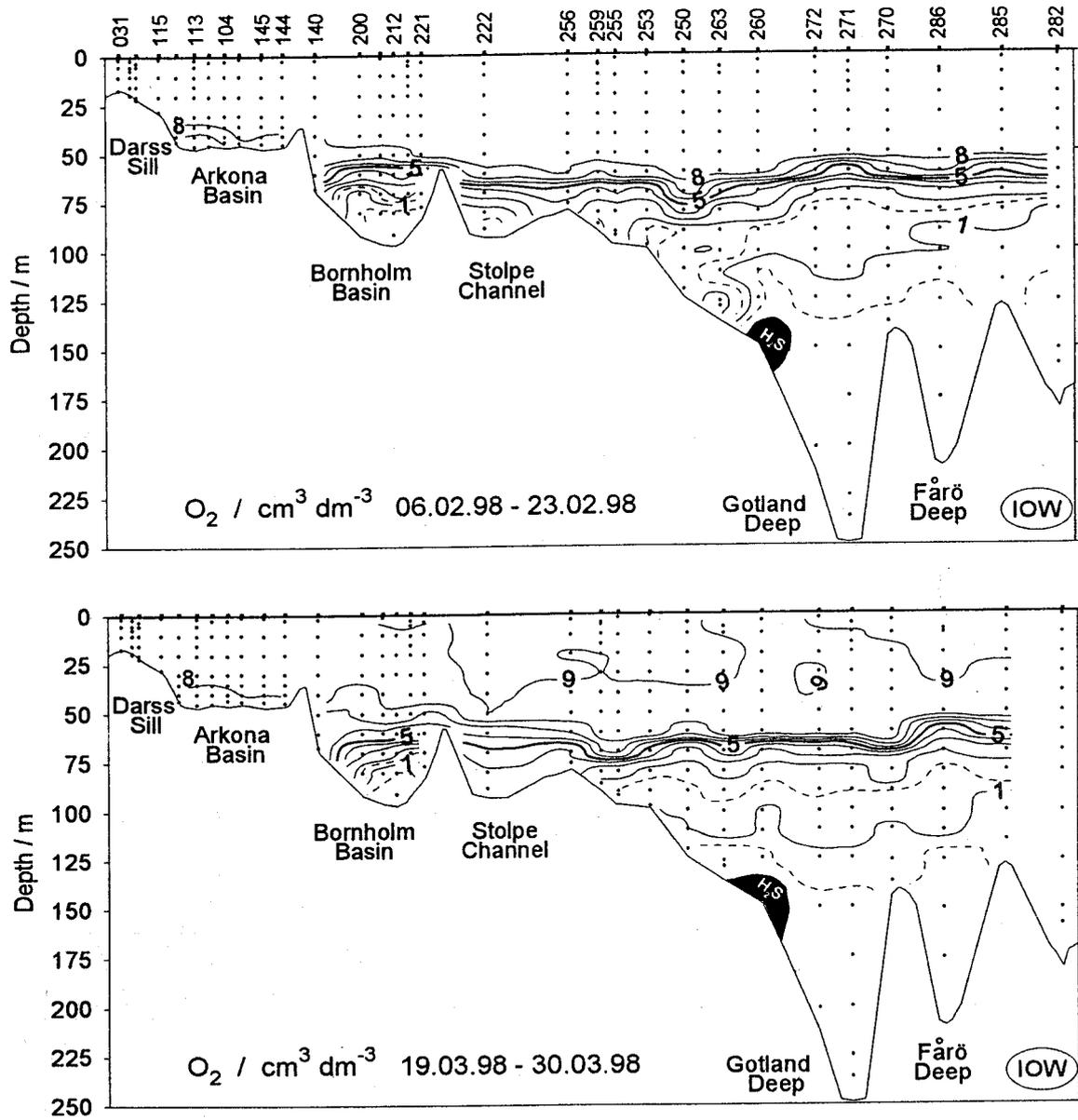
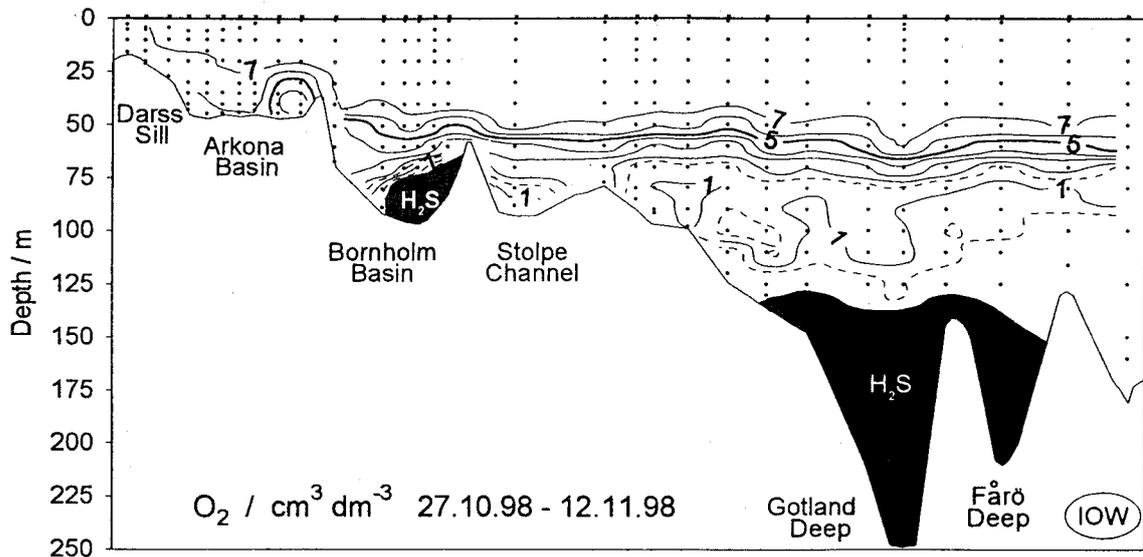
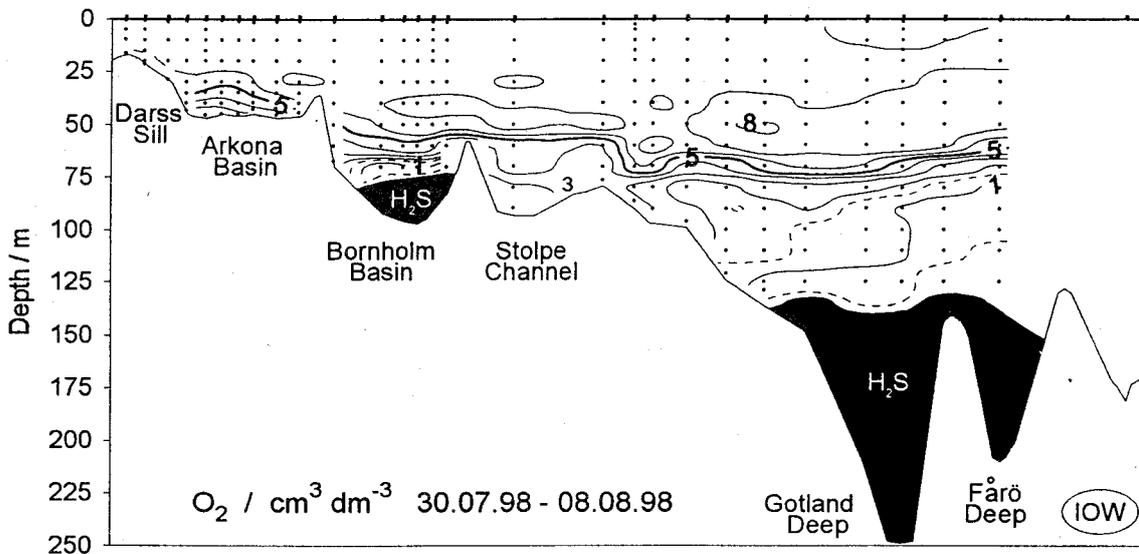
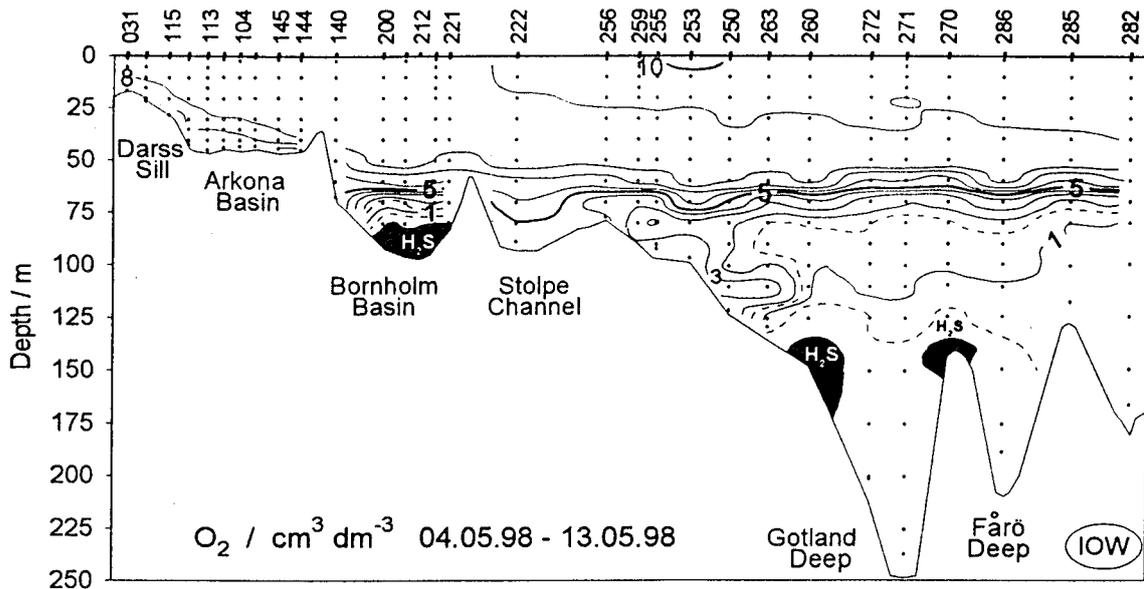


Abb. 15

Vertikale Verteilung des Sauerstoff- und Schwefelwasserstoffgehalts zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken



5.3 Sauerstoff und Schwefelwasserstoff

Der Sauerstoffgehalt des Wassers wird von verschiedenen Prozessen kontrolliert. Durch mikrobiellen und chemischen Abbau der organischen Substanz sowie metabolische Aktivitäten von Organismen wird Sauerstoff verbraucht. Andererseits wird dem Wasser durch Photosynthese sowie physikalische Austauschvorgänge zwischen Wasser und Atmosphäre wieder Sauerstoff zugeführt. Daneben spielen hydrodynamische Prozesse wie vertikale Zirkulation, Advektion und Konvektion eine Rolle. Die nachfolgenden Ausführungen nehmen Bezug auf die in Abb. 15 dargestellte Verteilung des Sauerstoff- und Schwefelwasserstoffgehalts zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken.

Die Sauerstoffkonzentration in der Oberflächenschicht ist durch die typischen jahreszeitlichen Schwankungen gekennzeichnet (MATTHÄUS, 1978b). Interessant ist aber vor allem die Betrachtung der Sauerstoffsättigung, da hier der Einfluß von Temperatur und Salzgehalt eliminiert ist (Tabelle 8).

Tabelle 8 Sauerstoffsättigungswerte (in %) für die Oberflächenschicht (0–10 m) zwischen Kieler Bucht und nördlichem Gotlandbecken im Jahre 1998

	Februar	März	Mai	August	Oktober/ November
Mittelwert	98,2	101,2	107,7	101,7	95,5
Standardabweichung	1,4	1,9	5,6	1,6	0,9
Minimum	95,2	98,2	96,4	97,3	93,1
Maximum	100,8	106,9	127,7	105,4	97,7
Anzahl n	71	70	70	66	72

Deutliche Übersättigungen wurden insbesondere im Mai beobachtet, wo die Frühjahrsblüte des Phytoplanktons in großen Teilen der zentralen Ostsee noch im Gange ist. Wenngleich nicht so extreme Übersättigungen wie im Jahre 1994 gemessen wurden (NEHRING et al., 1995a, b), so traten im östlichen Gotlandbecken doch Maximalwerte von rund 128 % auf. In den westlichen Teilen der Ostsee und der Pommerschen Bucht ist die Blüte im Mai bereits vorüber, so daß die Streubreite im Mai am größten ist. In den anderen untersuchten Monaten schwanken die Sauerstoffsättigungen nur gering. Besonders im Oktober/November finden sich sehr einheitliche Verhältnisse. Die generelle Untersättigung deutet auf eine Dominanz von sauerstoffverbrauchenden Prozessen hin.

Das kalte Zwischenwasser zeichnet sich in der zentralen Ostsee als sauerstoffreiche Schicht ab, die besonders im August als intermediäres Maximum in Erscheinung tritt (Abb. 15). Der

Sauerstoffgehalt in dieser Schicht ist eng mit der Strenge des vorhergegangenen Winters korreliert (vgl. NEHRING et al., 1990). Im August 1998 konnten in 40 m Tiefe im Bornholmbecken Werte zwischen 7,1 und 7,8 cm^3/dm^3 gemessen werden, im östlichen Gotlandbecken lagen die Maxima in 50 m Tiefe (7,0 bis 8,9 cm^3/dm^3).

Die oxischen Bedingungen im Tiefenwasser des Bornholmbeckens, die im Ergebnis der Zufuhr salz- und sauerstoffreichen Wassers im Herbst 1997 entstanden waren (MATTHÄUS et al., 1998a), wurden noch bis zum Frühjahr 1998 beobachtet. Ab Mai waren jedoch weite Teile des Beckens ab 80 m Wassertiefe wieder mit Schwefelwasserstoff gefüllt. Bei insgesamt 31 Beprobungen schwankten die Werte in 80 m Tiefe zwischen etwa 1,5 und -2,3 cm^3/dm^3 (Mittel $-0,20 \pm 0,81 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$; vgl. Tabelle 6).

Die gegenwärtige Stagnationsperiode ist im Bereich des Gotlandtiefs durch einige Besonderheiten gekennzeichnet. Nach dem Salzwassereinbruch 1993 und den kleineren Einströmen 1993 und 1994 (NEHRING et al., 1995b) wurde im März 1996 erstmals wieder Schwefelwasserstoff registriert (MATTHÄUS et al., 1996). In der zweiten Hälfte der Jahre 1996, 1997 und auch 1998 hatte sich der anoxische Horizont jeweils zwischen Meeresgrund und etwa 150 m ausgeweitet. Diese anoxischen Phasen wurden jedoch im Winter und Frühjahr durch die Präsenz geringer Mengen von Sauerstoff unterbrochen (Abb. 16), die infolge kleinerer Einstromereignisse in das Gotlandtief gelangten. Die Ursache für signifikante Auswirkungen von kleineren Einströmen auf das Tiefenwasser der zentralen Ostsee liegt in der regelmäßigen Füllung des Bornholmbeckens mit salzreichem Wasser $> 15 \text{ PSU}$ im Herbst des Vorjahres (vgl. MATTHÄUS et al., 1997, 1998a).

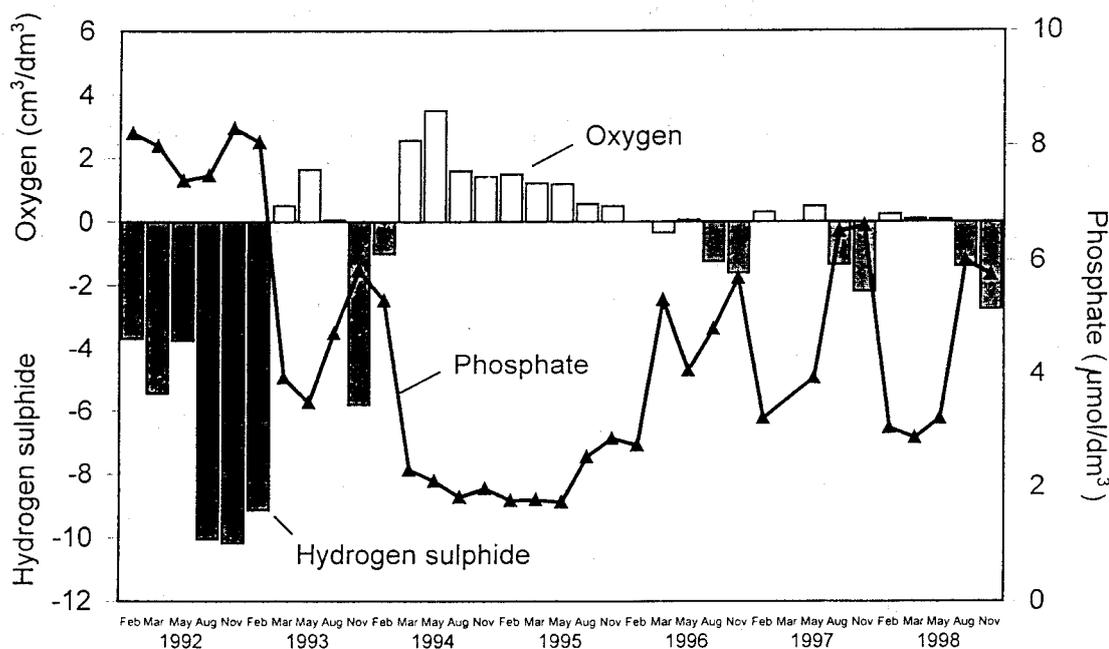


Abb. 16

Die Entwicklung des Sauerstoff- und Schwefelwasserstoffgehalts im Gotlandtief (Stat. 271; 230 - 240 m Tiefe) zwischen 1992 und 1998 und ihr Einfluß auf die Phosphatverteilung (Schwefelwasserstoff als negative Sauerstoffäquivalente)

Das salz- und sauerstoffreiche Wasser, das mit kleineren Einströmen im Winter über die Schwellen in die Ostsee transportiert wurde, konnte daher in größerer Menge das Bornholmbecken in 50 - 60 m Tiefe passieren und gelangte relativ schnell ins östliche Gotlandbecken. Eine ähnliche Situation wurde bereits 1994 registriert (NEHRING et al., 1995b).

Im Färötief wurde 1998 ein analoger Vorgang beobachtet. Während im bodennahen Horizont von Februar bis Mai geringe Sauerstoffmengen gemessen wurden ($0,03 - 0,13 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$), herrschten ab August anoxische Verhältnisse bis maximal $-1,7 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$.

Im westlichen Gotlandbecken setzte sich die in den Vorjahren (MATTHÄUS et al., 1998a) beobachtete Tendenz fort. Das Tiefenwasser war frei von Schwefelwasserstoff, jedoch nahmen die Sauerstoffkonzentrationen im Mittel weiter ab (vgl. Tabelle 6). Die Schwankungsbreite der Meßwerte lag im 400 m Horizont des Landsortiefs zwischen $0,07$ und $0,6 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$ ($n = 16$) und im 100 m Horizont des Karlsöties zwischen $0,05$ und $0,9 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$ ($n = 16$). Besonders in der zweiten Jahreshälfte wurden nur noch Sauerstoffkonzentrationen um $0,2 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$ gemessen. Nach GOERING (1968) werden $10 \mu\text{mol}/\text{dm}^3 = 0,22 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$ Sauerstoff als Grenzwert für Denitrifikationsprozesse angesehen. Ein Rückgang der Nitratwerte sowohl in den Messungen des IOW als auch des SMHI scheint dies zu bestätigen (vgl. Kapitel 5.4). Hier muß jedoch die weitere Entwicklung abgewartet werden.

5.4 Anorganische Nährstoffe

Unter dem Begriff Nährstoffe werden im allgemeinen solche Verbindungen zusammengefaßt, die für die Primärproduktion des Phytoplanktons unerlässlich sind und ihr Ausmaß begrenzen. Zu den wichtigsten Nährstoffen gehören Phosphat sowie die verschiedenen anorganischen Komponenten des Stickstoffkreislaufes Ammonium, Nitrit und Nitrat. Die 1998 beobachteten Vertikalverteilungen für Phosphat und Nitrat sind in den Abb. 17 und 18 dargestellt. Gelöstes Silikat, das für die Bildung der Diatomeenskelette benötigt wird, spielt in der Ostsee bisher nur im Kattegat und in der Beltsee eine Rolle als limitierende Größe. Nur kurzzeitig konnten auch bis in den Bereich der Arkonasee Minima nahe der Nachweisgrenze beobachtet werden (MATTHÄUS et al., 1997).

Wie generell in den gemäßigten Breiten weisen auch die Nährstoffkonzentrationen in der Oberflächenschicht der Ostsee ausgeprägte Jahrgänge auf (NAUSCH, NEHRING, 1996). Die hohen Winterkonzentrationen werden mit Beginn der Frühjahrsblüte des Phytoplanktons rasch verbraucht. Im Sommer ist der Oberflächenbereich weitgehend nährstoffverarmt. Erst im Herbst steigen die Nährstoffkonzentrationen mit erneuter Lichtlimitation wieder an, um dann wieder das Winterniveau zu erreichen. Anders als im Übergangsbereich zur Nordsee verharren die Phosphat- und Nitratkonzentrationen in den zentralen und nördlichen Teilgebieten der Ostsee bis zu 3 (4) Monate auf einem relativ stabilen, hohen winterlichen Niveau, das durch ein Gleichgewicht aus mikrobieller Mineralisation, geringer Produktivität und großem vertikalen Austausch verursacht wird. Diese "Plateauphase" wird für Trenduntersuchungen genutzt (NEHRING, MATTHÄUS, 1991).

In Tabelle 9 sind deshalb die Konzentrationen in der winterlich durchmischten Deckschicht für die Parameter Phosphat, Nitrat sowie Summe der anorganischen Stickstoffkomponenten - gemittelt aus 1, 5 und 10 m Tiefe - für die Jahresreihe 1994 - 1998 zusammengefaßt. Generell sind die Konzentrationen in den flachen westlichen Teilgebieten der Ostsee sowie vor allem in den küstenbeeinflussten Buchten höher als in der zentralen Ostsee. Die in den zurückliegenden Jahren beschriebene leichte Abnahme der Phosphatkonzentrationen in allen untersuchten Seegebieten (NEHRING et al., 1995c; MATTHÄUS et al., 1998b) setzt sich 1998 nicht in gleicher Eindeutigkeit fort. Die niedrigsten Werte finden sich teils 1997 (Arkonasee, östliches Gotlandbecken), teils 1998 (westliches Gotlandbecken). Dagegen scheint sich die für 1997 erstmals angedeutete Tendenz der Abnahme der winterlichen Konzentrationen für Nitrat und die anorganischen Stickstoffkomponenten (MATTHÄUS et al., 1998a) fortzusetzen (Tabelle 9).

In den tieferen Becken der Ostsee wird im oberen Bereich der Salzgehaltssprungschicht regelmäßig eine Akkumulation von Nitrit beobachtet, die im August einsetzt. Im Jahre 1998 wurde in dieser, häufig nur als schmales Band zwischen 50 und 60 m auftretenden Zone $0,23$ bis $0,28 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ Nitrit gemessen. Im weiteren Jahresverlauf dehnte sich diese Zone bis zur Oberfläche aus, so daß im Herbst 1998 in der gesamten zentralen Ostsee oberhalb der Salzgehaltssprungschicht Nitritwerte zwischen $0,2$ und $0,35 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ vorlagen. Generell wird beobachtet, daß die zunehmende biochemische Oxidation zu Nitrat in der Folgezeit stets die Nitritkonzentrationen so weit reduziert, daß im Februar und März des nachfolgenden Jahres nur um $0,1 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ gemessen werden. Im Sommer werden ähnlich wie für das Nitrat keine meßbaren Konzentrationen gefunden.

In der westlichen Ostsee und vor allem in den inneren Bereichen der Lübecker und der Pommerschen Bucht werden im Winter deutliche höhere Nitritkonzentrationen beobachtet ($0,85$ bis $1,75 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$), die auf Einträge aus dem Einzugsgebiet sowie eine noch nicht abgeschlossene Nitrifikation deuten.

Plankton enthält Stickstoff und Phosphor in einem molaren Verhältnis von etwa $16 : 1$ (REDFIELD et al., 1963). Ist die Primärproduktion lichtlimitiert, wird ein ähnliches Verhältnis auch im Meerwasser angetroffen. In der Ostsee ist diese Beziehung gestört. Denitrifikationsprozesse im Tiefenwasser, die sich bis in die Oberflächenschicht auswirken, werden dafür verantwortlich gemacht. Tabelle 10 faßt das Verhältnis der anorganischen Stickstoffkomponenten zu Phosphat für das winterliche Oberflächenwasser der zentralen Ostsee zusammen. Phosphat ist im Vergleich zum offenen Ozean im Überschuß vorhanden. Legt man das Redfield-Verhältnis zugrunde, könnte auf der Basis des vorhandenen Phosphats eine Biomasse produziert werden, die nahezu doppelt so hoch ist, als es die anorganischen Stickstoffkomponenten gestatten (WASMUND et al., 1998). Die Frühjahrsentwicklung des Phytoplanktons in der euphotischen Schicht ist also stickstofflimitiert.

Tabelle 9 Gemittelte Nährstoffkonzentrationen in der winterlichen Oberflächenschicht (0–10 m Tiefe) der westlichen und zentralen Ostsee (Minimalwerte hervorgehoben)

Phosphat ($\mu\text{mol}/\text{dm}^3$)

Station	Monat	1994	1995	1996	1997	1998
023 (Lübecker Bucht)	Feb.	0,73 \pm 0,02	0,84 \pm 0,02	-	0,60 \pm 0,03	0,64 \pm 0,01
012 (Meckl. Bucht)	Feb.	0,64 \pm 0,04	0,68 \pm 0,02	0,59 \pm 0,01	0,56 \pm 0,01	0,66 \pm 0,01
162 (Pommersche Bucht)	Feb.	1,03 \pm 0,07	0,78 \pm 0,03	-	0,74 \pm 0,01	0,66 \pm 0,01
113 (Arkonasee)	Feb.	0,56 \pm 0,01	0,46 \pm 0,01	0,51 \pm 0,03	0,38 \pm 0,01	0,40 \pm 0,00
213 (Bornholmtief)	Feb.	0,53 \pm 0,01	0,44 \pm 0,01	0,49 \pm 0,01	0,50 \pm 0,01	0,46 \pm 0,01
271 (Gotlandtief)	Feb. Apr.	0,48 \pm 0,02 0,55 ¹⁾ \pm 0,02	0,56 \pm 0,02 0,62 \pm 0,02	0,46 \pm 0,04 0,50 \pm 0,01²⁾	0,43 \pm 0,01 -	0,49 \pm 0,01 0,52 \pm 0,00
286 (Färötief)	Feb. Mär.	0,43 \pm 0,00 0,51 \pm 0,00	0,55 \pm 0,01 -	0,52 \pm 0,00 0,46 \pm 0,02	0,37 \pm 0,01 -	0,49 \pm 0,01 0,47 \pm 0,01
284 (Landsorttief)	Feb.	-	0,56 \pm 0,01	0,54 \pm 0,01	0,50 \pm 0,01	0,42 \pm 0,03
245 (Karlsötief)	Feb.	0,61 \pm 0,02	0,67 \pm 0,02	0,58 \pm 0,03	0,57 \pm 0,01	0,47 \pm 0,01

Nitrat ($\mu\text{mol}/\text{dm}^3$)

Station	Monat	1994	1995	1996	1997	1998
023 (Lübecker Bucht)	Feb.	16,1 \pm 0,2	11,5 \pm 1,2	-	8,1 \pm 0,2	12,0 \pm 1,0
012 (Meckl. Bucht)	Feb.	6,6 \pm 0,8	7,2 \pm 0,1	5,0 \pm 0,0	5,7 \pm 0,1	6,6 \pm 0,0
162 (Pommersche Bucht)	Feb.	19,6 \pm 0,2	11,5 \pm 0,0	-	16,1 \pm 0,5	14,1 \pm 0,4
113 (Arkonasee)	Feb.	4,9 \pm 0,1	4,2 \pm 0,0	5,8 \pm 0,0	4,2 \pm 0,0	3,1 \pm 0,0
213 (Bornholmtief)	Feb.	4,1 \pm 0,0	4,2 \pm 0,0	4,1 \pm 0,0	4,2 \pm 0,0	3,1 \pm 0,0
271 (Gotlandtief)	Feb. Apr.	3,8 \pm 0,1 4,5 ¹⁾ \pm 0,0	4,2 \pm 0,0 5,2 \pm 0,1	4,1 \pm 0,1 4,3 \pm 0,0 ²⁾	3,6 \pm 0,0 -	3,7 \pm 0,1 3,3 \pm 0,0
286 (Färötief)	Feb. Mär.	3,7 \pm 0,0 4,1 \pm 0,0	4,6 \pm 0,0 -	3,8 \pm 0,1 3,9 \pm 0,0	3,6 \pm 0,0 -	3,7 \pm 0,0 3,2 \pm 0,0
284 (Landsorttief)	Feb.	-	5,2 \pm 0,1	4,0 \pm 0,1	4,2 \pm 0,0	4,2 \pm 0,1
245 (Karlsötief)	Feb.	4,8 \pm 0,2	4,6 \pm 0,1	4,3 \pm 0,1	3,7 \pm 0,0	3,1 \pm 0,0

Tabelle 9 (Fortsetzung)

Summe der anorganischen Stickstoffverbindungen ($\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^- + \text{NH}_4^+$; $\mu\text{mol} / \text{dm}^3$)

Station	Monat	1994	1995	1996	1997	1998
023 (Lübecker Bucht)	Feb.	17,5 ± 1,5	15,3 ± 1,4	-	9,8 ± 0,1	-
012 (Meckl. Bucht)	Feb.	7,0 ± 0,8	8,7 ± 1,7	-	6,6 ± 0,1	-
162 (Pommersche Bucht)	Feb.	24,2 ± 0,2	14,7 ± 0,2	-	19,4 ± 0,6	16,5 ± 0,5
113 (Arkonasee)	Feb.	5,2 ± 0,1	5,4 ± 0,0	6,4 ± 0,5	4,4 ± 0,0	3,3 ± 0,0
213 (Bornholmtief)	Feb.	4,4 ± 0,0	4,5 ± 0,0	4,7 ± 0,2	4,4 ± 0,0	3,3 ± 0,0
271 (Gotlantief)	Feb. Apr.	3,9 ± 0,1 4,9 ¹⁾ ± 0,0	4,4 ± 0,0 5,6 ± 0,1	4,5 ± 0,1 4,7 ± 0,1 ²⁾	3,8 ± 0,1 -	3,9 ± 0,1 3,8 ± 0,0
286 (Färötief)	Feb. Mär.	3,8 ± 0,0 4,2 ± 0,0	4,7 ± 0,0 -	4,2 ± 0,0 4,6 ± 0,1	3,8 ± 0,1 -	3,9 ± 0,0 3,5 ± 0,0
284 (Landsorttief)	Feb.	-	5,5 ± 0,1	4,4 ± 0,1	4,5 ± 0,0	4,3 ± 0,1
245 (Karlsötief)	Feb.	4,8 ± 0,2	4,9 ± 0,1	4,6 ± 0,1	4,0 ± 0,1	3,4 ± 0,1

¹⁾ Station 272²⁾ Ende März

Ein weiteres Indiz für die Stickstofflimitation der Frühjahrsblüte sind die im Mai noch vorhandenen Phosphatkonzentrationen um $0,1 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$, während die Oberflächenschicht schon vollständig stickstoffverarmt ist. Zusätzlich wird Phosphat in einem höheren Maße als gewöhnlich gespeichert ("luxury uptake"). Im späteren Jahresverlauf wird das Stickstoffdefizit durch Cyanobakterien ausgeglichen, die molekularen Luftstickstoff verwerten, so daß die Phytoplanktonproduktion zunehmend durch Phosphat begrenzt werden kann. Als Stickstoffquelle können darüber hinaus auch organische Stickstoffverbindungen wie Harnstoff und Aminosäuren fungieren, wenn die anorganischen Stickstoffverbindungen aufgebraucht sind.

Ein völlig anderes Bild findet sich in der Pommerschen Bucht. In Abb. 19 ist die Nitratverteilung auf einem Schnitt von der Swinamündung bis zur schwedischen Küste für die Beprobungen der ersten Jahreshälfte dargestellt. Die aus der Oder stammenden Nitratkonzentrationen liegen bis zum 10fachen über den Nitratwerten der offenen Ostsee, während die Phosphatkonzentrationen mit maximal $0,8 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ nur wenig erhöht sind. Bemerkenswert ist vor allem der kontinuierliche Rückgang des Phosphates in der Pommerschen Bucht in den letzten 5 Jahren, der sich in gleicher Weise für das Nitrat nicht beschreiben läßt (Tabelle 9). Die Ursache dürfte in einer verbesserten Abwasserbehandlung im Einzugsgebiet zu suchen sein, die die Phosphorbelastung reduziert. Die vorrangig aus diffusen Quellen stammende Stickstoffbelastung ist schwerer zu senken. Ergebnis dieser Entwicklung sind N:P-Quotienten, die im Inneren der Pommerschen Bucht (Stat. 160, 162, 165) im Februar und März zwischen 24 und 42 liegen. Im Mai ist dieser Bereich bereits völlig verarmt an Phosphat, die Nitratkonzentrationen liegen dagegen noch zwischen 10 und $22 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ (Abb. 19).

Tabelle 10 Molare N:P-Quotienten der winterlich durchmischten Oberflächenschicht 1998 (0-10 m Tiefe)

Station	N:P (Februar)	N:P (März)
113 (Arkonasee)	8,6	7,8
213 (Bornholmtief)	7,0	6,9
259 (südl. Gotlandsee)	8,0	7,1
271 (Gotlandtief)	7,8	7,2
286 (Färötief)	7,8	7,5
284 (Landsorttief)	10,3	6,9
245 (Karlsötief)	7,3	7,7

Im Gegensatz zur offenen Ostsee besteht in der Pommerschen Bucht im Frühjahr eine eindeutige Phosphatlimitation. Die Stickstofffrachten der Oder können nur zu Teilen umgesetzt werden. Es erfolgt eine Verdünnung durch hydrographische Prozesse. Diese anorganischen Nährstoffe tragen letztlich zur Eutrophierung der Ostsee bei (NAUSCH et al., 1999).

Das außergewöhnliche Hochwasser der Oder im Sommer 1997 war durch andere Charakteristika gekennzeichnet (MATTHÄUS et al., 1998b; SIEGEL et al., 1998a). Die Nitratkonzentrationen sind verglichen mit der Frühjahrssituation niedriger. Es scheint, daß im Sommer der gelöste anorganische Stickstoff nicht in gleicher Weise wie im Frühjahr zur Verfügung steht, da bereits eine weitergehende Stickstofffixierung auf den landwirtschaftlichen Nutzflächen erfolgt ist. Die Phosphatkonzentrationen liegen dagegen in der Größenordnung des Frühjahrs, so daß das zugeführte Nitrat rasch verbraucht wird, weite Teile der Pommerschen Bucht nitratlimitiert sind und folglich das Phosphat- und Silikatangebot nicht effektiv genutzt werden kann (HUMBORG et al., 1998).

Die Veränderungen der Nährstoffverhältnisse im Tiefenwasser können ebenfalls aus Abb. 17 und 18 entnommen werden. Der Wechsel des Redoxstatus im Tiefenbereich des Bornholmbeckens ab Mai 1998 (vgl. Kapitel 5.3) führte erstmals zu einem negativen Jahresmittelwert des Sauerstoffgehalts (vgl. Tabelle 6) und spiegelt sich deutlich in den Nährstoffverhältnissen wider (Tabelle 11). Mit dem Übergang zu anoxischen Bedingungen kann kein Nitrat mehr nachgewiesen werden. Phosphat geht zusätzlich in Lösung und das durch Mineralisation entstehende Ammonium kann nicht nitrifiziert werden und reichert sich an, so daß im November Maximalwerte von $8,7 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ (Phosphat) bzw. $17,4 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ (Ammonium) gefunden werden. Die Jahresmittelwerte sind folglich durch große Schwankungsbreiten gekennzeichnet (Tabelle 11). Im Bereich des Gotlandtiefs finden sich ähnliche Verhältnisse wie bereits in den beiden Vorjahren (MATTHÄUS et al., 1997, 1998b). Während die 1. Jahreshälfte durch geringe Konzentrationen an Sauerstoff gekennzeichnet ist, treten ab August ab etwa 150 m Wassertiefe anoxische Verhältnisse auf, die einhergehen mit dem Fehlen von Nitrat und einer Zunahme von Ammonium und Phosphat.

Tabelle 11 Jahresmittelwerte und Standardabweichungen von Nährstoffen im Tiefenwasser der zentralen Ostsee; 1994-1997 nur IOW-Daten (n = 5), 1998 IOW- und SMHI-Daten (n = 16-19)

Phosphat ($\mu\text{mol} / \text{dm}^3$; Minimalwerte hervorgehoben)

Station	Tiefe/m	1994	1995	1996	1997	1998
213 (Bornholmtief)	80	1,46 ± 0,20	3,44 ± 2,27	7,71 ± 2,06	2,66 ± 0,97	5,10 ± 2,18
271 (Gotlandtief)	200	2,49 ± 1,08	1,86 ± 0,09	2,81 ± 1,00	4,47 ± 0,54	3,48 ± 0,55
286 (Färötief)	150	3,62 ± 0,43	2,65 ± 0,18	3,04 ± 0,45	3,40 ± 0,45	3,44 ± 0,29
284 (Landsorttief)	400	2,79 ± 0,45	2,73 ± 0,20	2,94 ± 0,18	2,97 ± 0,44	3,19 ± 0,17
245 (Karlsötief)	100	2,37 ± 0,29	2,34 ± 0,20	2,79 ± 0,56	3,23 ± 0,73	3,53 ± 0,24

Nitrat ($\mu\text{mol} / \text{dm}^3$; Maximalwerte hervorgehoben)

Station	Tiefe/m	1994	1995	1996	1997	1998
213 (Bornholmtief)	80	12,9 ± 1,1	6,9 ± 5,0	3,5 ± 4,1	10,2 ± 1,9	2,9 ± 4,2
271 (Gotlandtief)	200	6,1 ± 5,7	11,2 ± 1,1	6,6 ± 4,3	0,5 ± 0,9	3,6 ± 4,1
286 (Färötief)	150	4,0 ± 4,0	9,6 ± 0,5	6,5 ± 4,1	2,4 ± 2,6	1,1 ± 1,6
284 (Landsorttief)	400	9,4 ± 1,0	9,9 ± 1,2	11,6 ± 0,3	11,2 ± 1,1	9,2 ± 1,7
245 (Karlsötief)	100	10,2 ± 0,7	9,8 ± 0,9	10,3 ± 0,6	10,6 ± 0,5	9,3 ± 1,7

Ammonium ($\mu\text{mol} / \text{dm}^3$; Minimalwerte hervorgehoben)

Station	Tiefe/m	1994	1995	1996	1997	1998
213 (Bornholmtief)	80	0,3 ± 0,1	3,7 ± 5,1	7,6 ± 7,3	0,2 ± 0,1	4,9 ± 5,4
271 (Gotlandtief)	200	5,2 ± 4,4	0,1 ± 0,1	1,0 ± 1,7	3,5 ± 1,4	1,7 ± 2,0
286 (Färötief)	150			2,2 ± 2,3	1,8 ± 1,4	1,7 ± 1,4
284 (Landsorttief)	400	0,4 ± 0,2	0,2 ± 0,1	0,3 ± 0,0	0,2 ± 0,1	0,2 ± 0,2
245 (Karlsötief)	100	0,1 ± 0,1	0,2 ± 0,1	0,3 ± 0,2	0,3 ± 0,1	0,3 ± 0,4

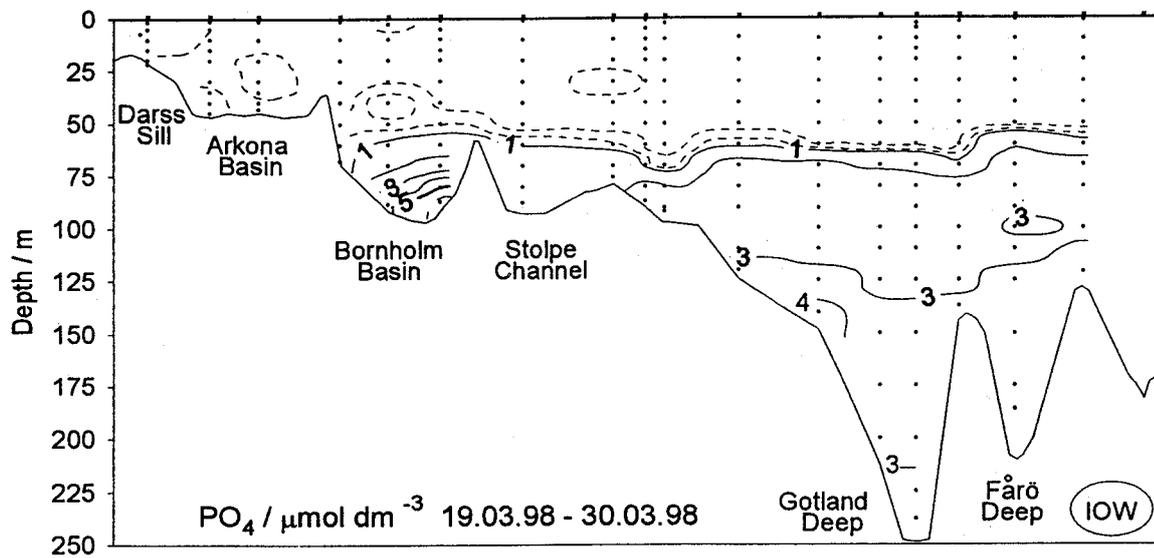
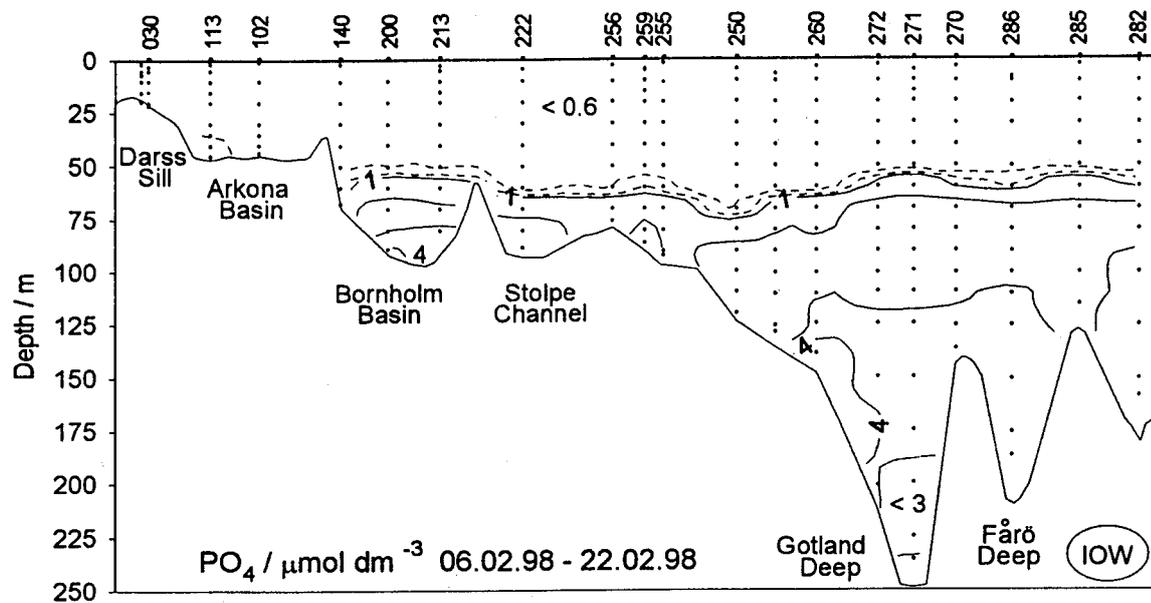
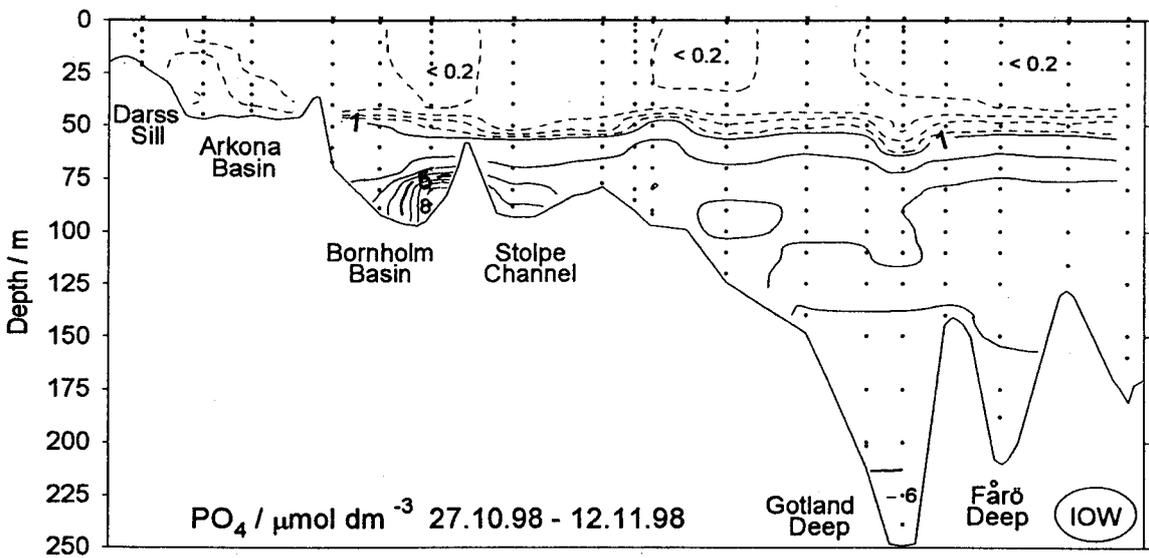
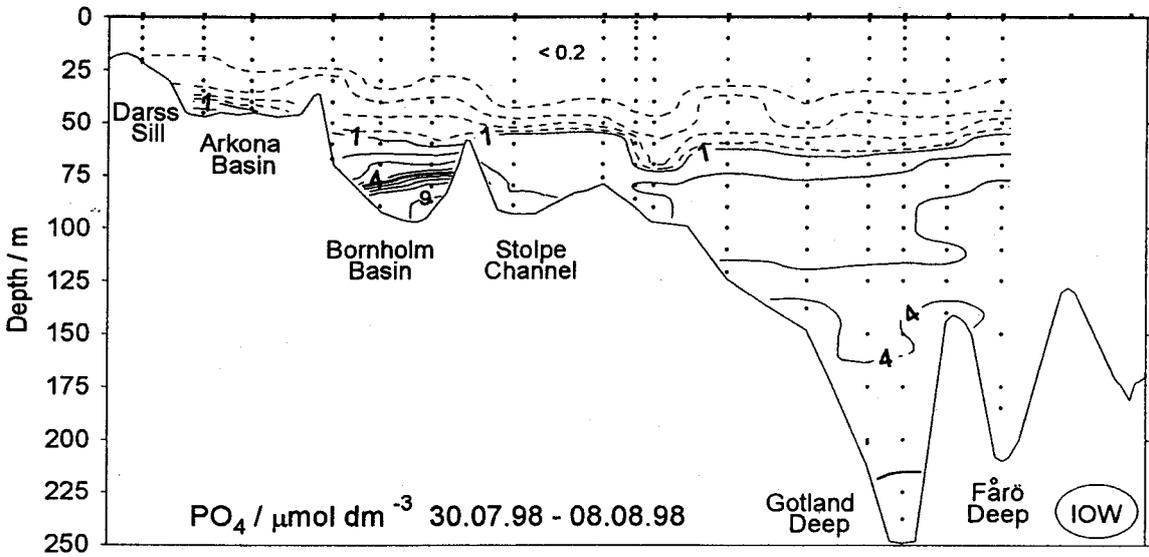
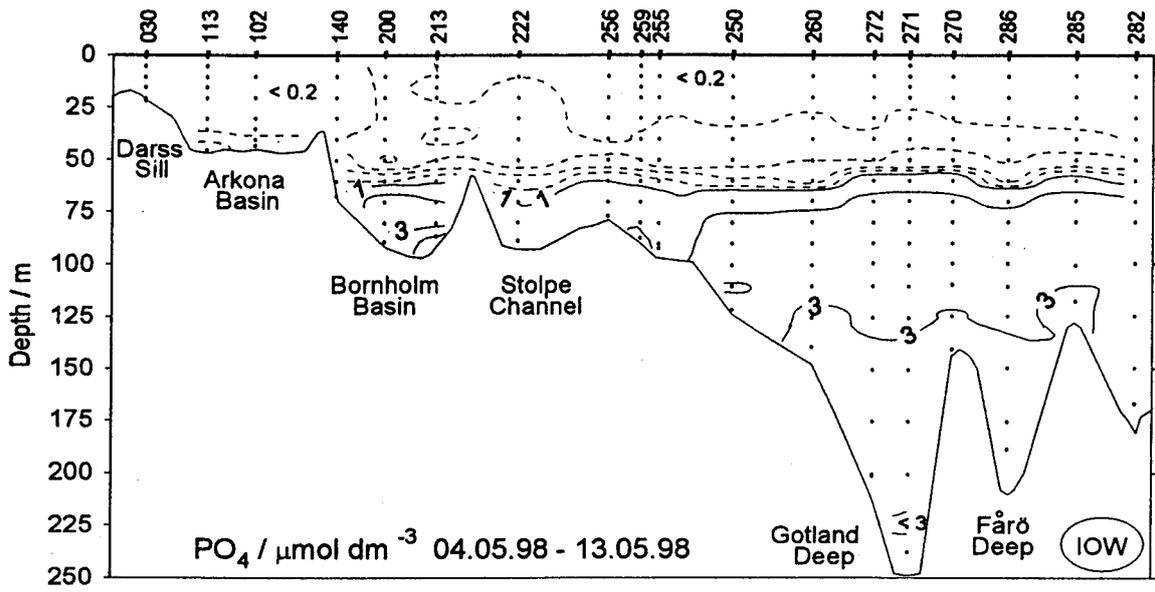


Abb. 17
Vertikale Verteilung des Phosphatgehalts zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken



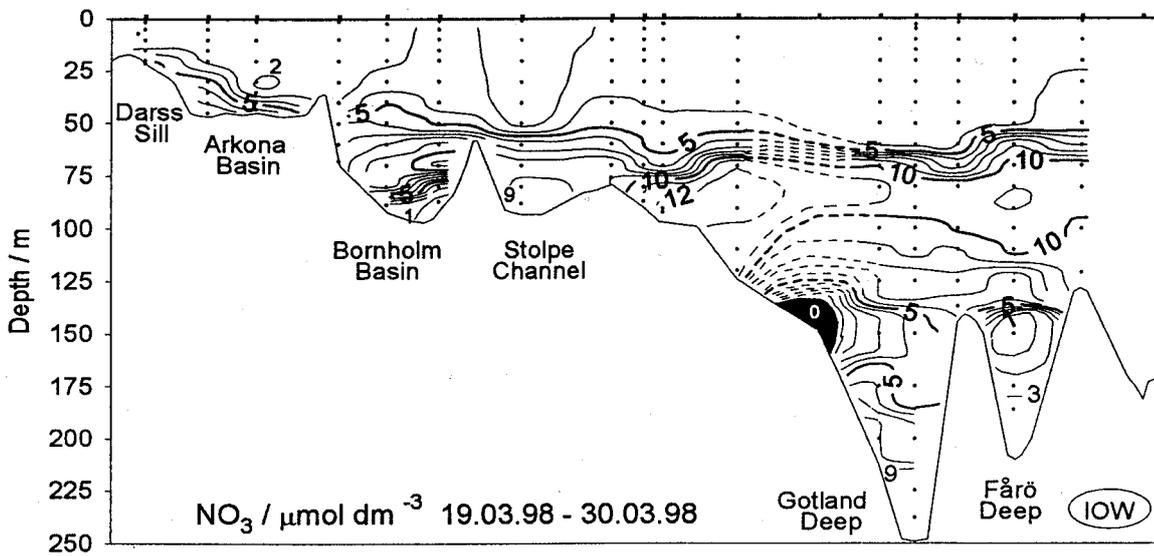
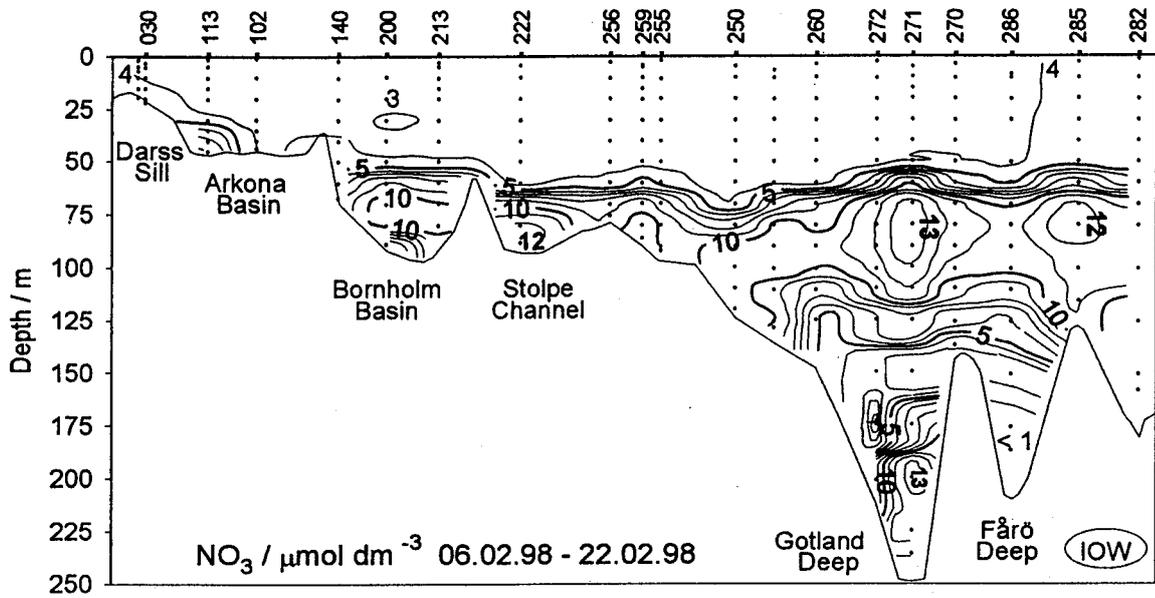
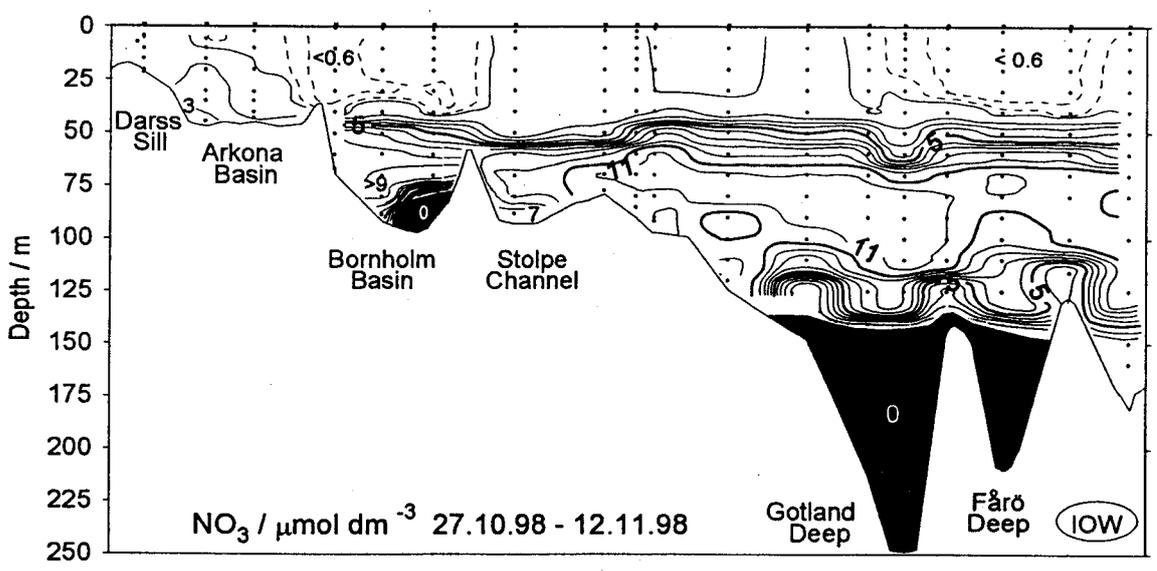
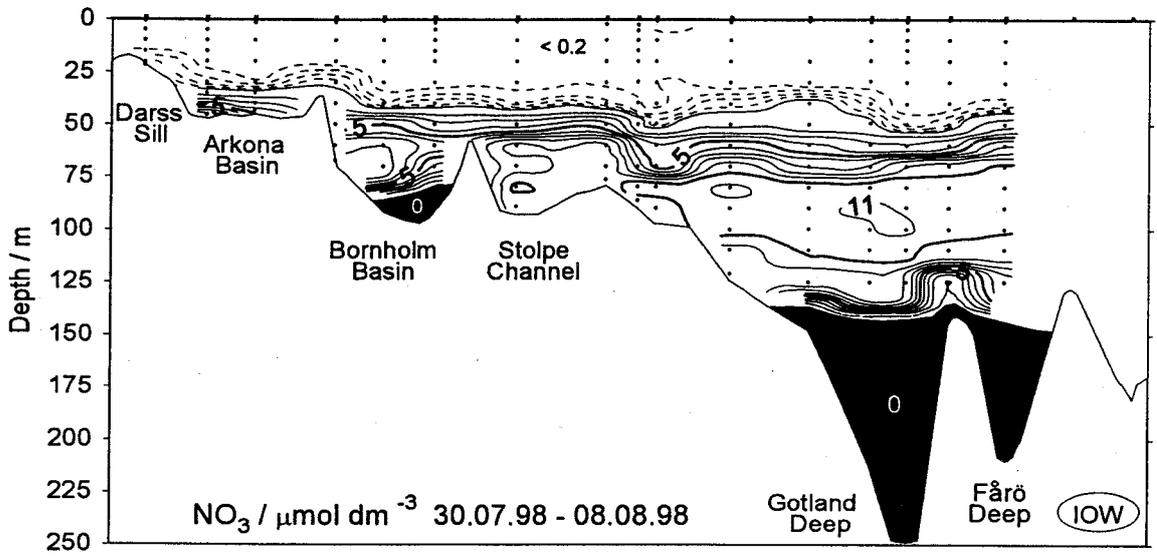
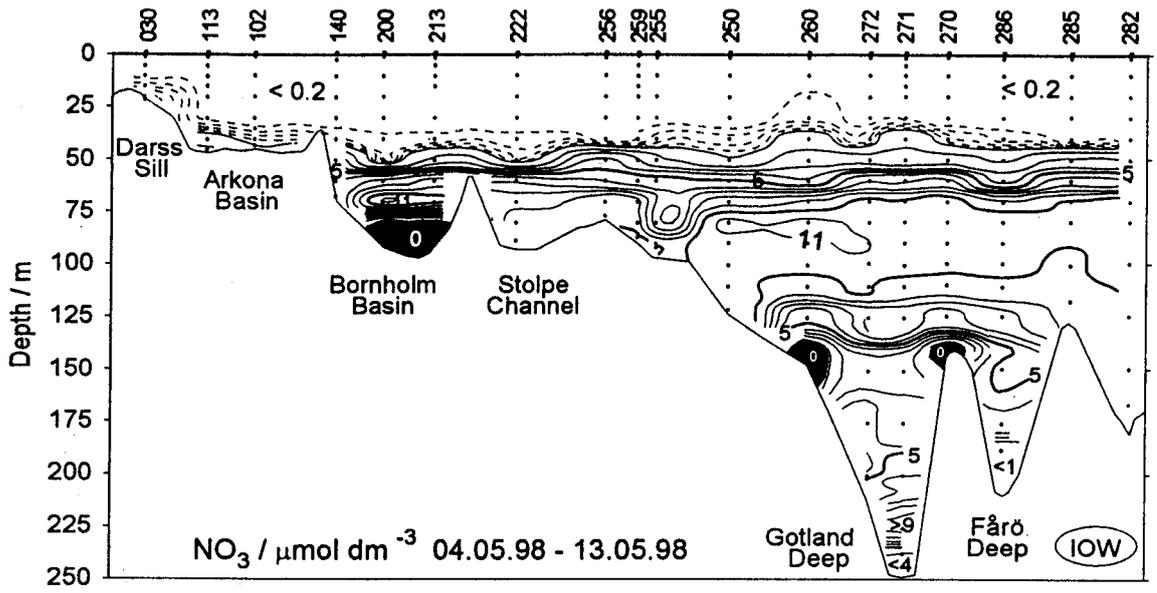


Abb. 18

Vertikale Verteilung des Nitratgehalts zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken



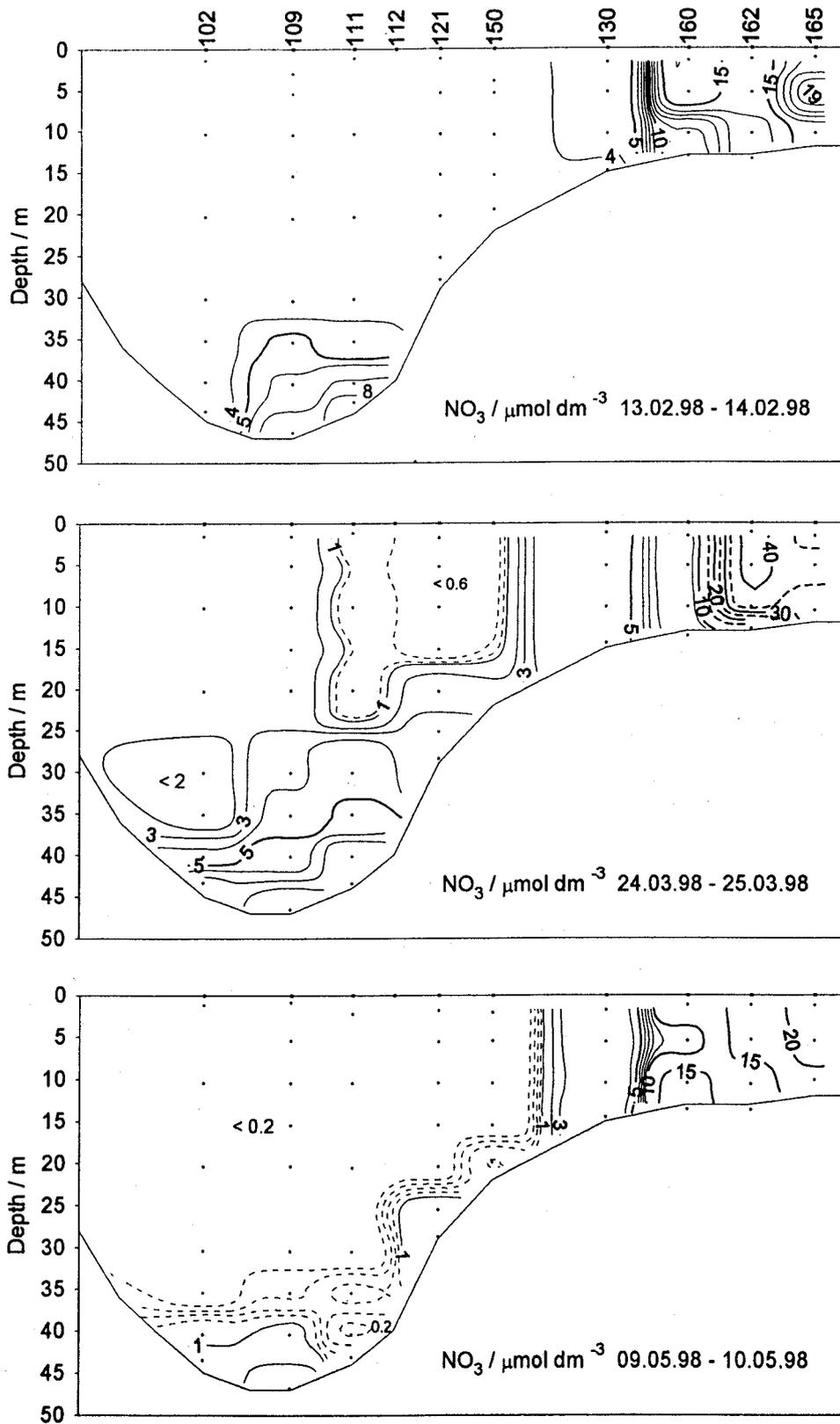


Abb. 19

Vertikale Verteilung des Nitratgehalts auf einem Schnitt durch das Arkonabecken zwischen der Swinamündung (nahe Stat. OB) und der schwedischen Küste (Stat. 102)

Das Wechselspiel zwischen Sauerstoffgehalt und Phosphatkonzentrationen wird auch auf längerfristigen Skalen deutlich (Abb. 16). Am Ende der Stagnationsperiode waren im Mittel etwa $8 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ Phosphat vorhanden. Die mit den Salzwassereinbrüchen verbundene Zufuhr von sauerstoffhaltigem Wasser führte zu einer Ausfällung von Phosphat, wenngleich Verdünnungen durch laterale Vermischungen nicht außer Acht gelassen werden dürfen. Auch in der Folgezeit sind bei Anwesenheit von Sauerstoff vergleichsweise geringe Phosphatkonzentrationen vorhanden. Unter anoxischen Bedingungen kommt es dagegen zu einer Akkumulation von Phosphat im Wasserkörper durch Remobilisierung aus dem Sediment.

Wie bereits in Kapitel 5.3 ausgeführt, nimmt der Sauerstoffgehalt im Tiefenwasser des westlichen Gotlandbeckens seit 1993 kontinuierlich ab, im 400 m Horizont des Landsorttiefs im Mittel jährlich um rund $0,2 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$. In der 2. Jahreshälfte 1998, besonders im letzten Quartal, scheinen sich die Sauerstoffverhältnisse soweit verschlechtert zu haben, daß Bedingungen für Denitrifikationsprozesse gegeben sind (GOERING, 1968), was sich in einem deutlichen Rückgang der Nitratkonzentrationen zeigt (Tabelle 12). Die Untersuchungen im Jahre 1999 werden zeigen, ob diese Tendenz anhält. Während die Ammoniumgehalte nach wie vor noch niedrig sind, deutet sich beim Phosphat bereits eine leichte Zunahme an (Tabelle 11).

Tabelle 12 Mittelwerte der Sauerstoff- und Nitratkonzentrationen im 400 m Horizont des Landsorttiefs (Stat. 284) im Jahre 1998

Quartale 1998	Anzahl n	Sauerstoff (cm^3/dm^3)	Nitrat ($\mu\text{mol}/\text{dm}^3$)
I	5	0,42	10,3
II	4	0,48	9,2
III	3	0,31	10,6
IV	4	0,23	6,7

5.5 Organische Nährstoffe

Im Jahre 1998 wurde die Untersuchung der organischen Nährstoffe POC (partikulärer organisch gebundener Kohlenstoff), PON (partikulärer organisch gebundener Stickstoff), DOC (gelöster organisch gebundener Kohlenstoff) und DN (gelöste Stickstoffverbindungen) weitergeführt. Die Konzentrationen der einzelnen Verbindungsklassen lagen dabei im Schwankungsbereich der Konzentrationen, die in den vorangegangenen Jahren beobachtet wurden. Eine Folgewirkung des außergewöhnlichen Oderhochwassers vom Sommer 1997, bei dem kurzzeitig deutlich erhöhte Konzentrationen in der Pommerschen Bucht auftraten (vgl. MATTHÄUS et al., 1998b), war nicht zu erkennen.

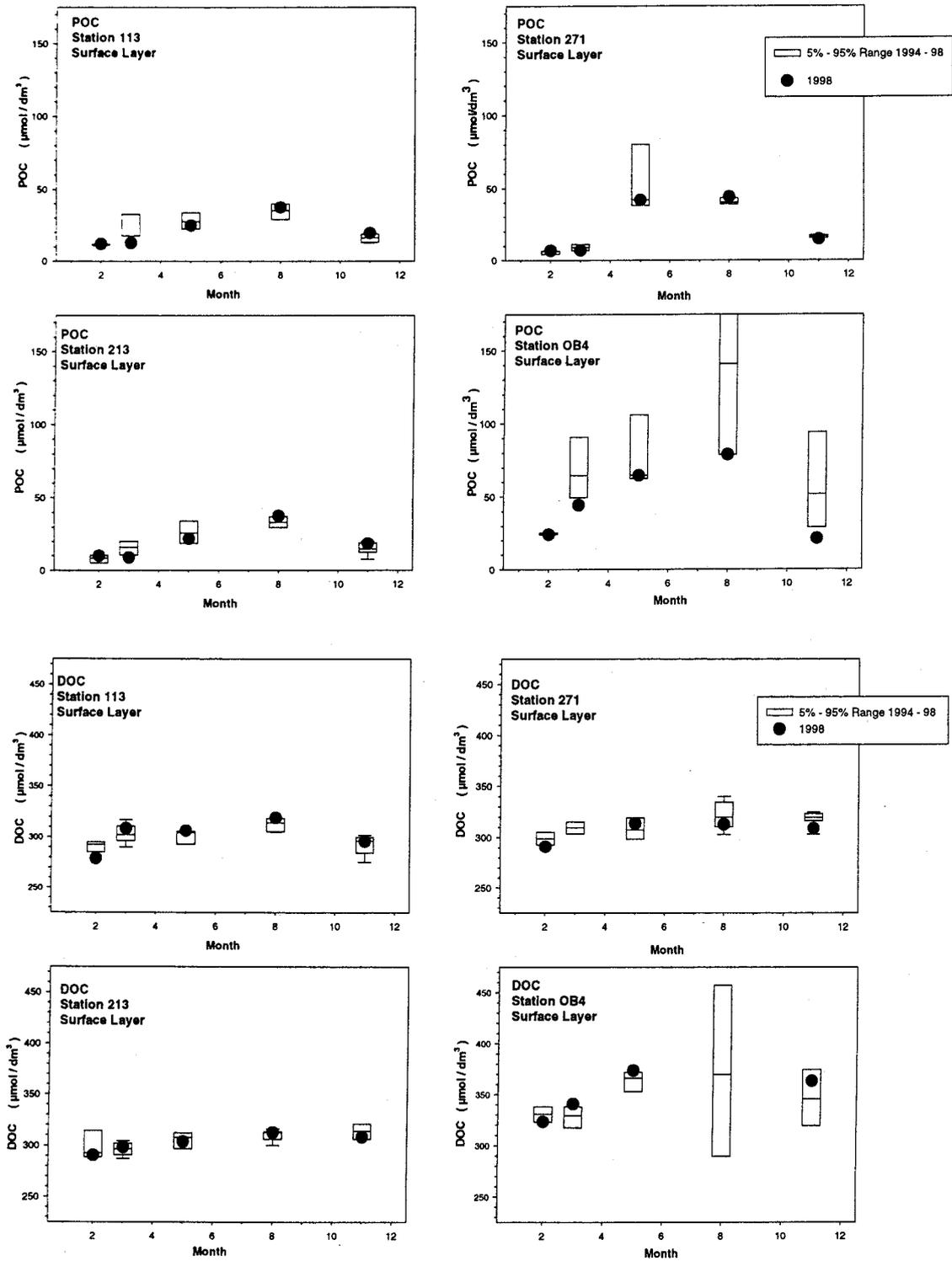


Abb. 20. Konzentrationen partikulärer (POC) und gelöster organischer Kohlenstoffverbindungen (DOC) in der oberflächennahen Schicht der Ostsee an ausgewählten Stationen im Jahre 1998 sowie der Streubereich der seit 1994 durchgeführten Messungen

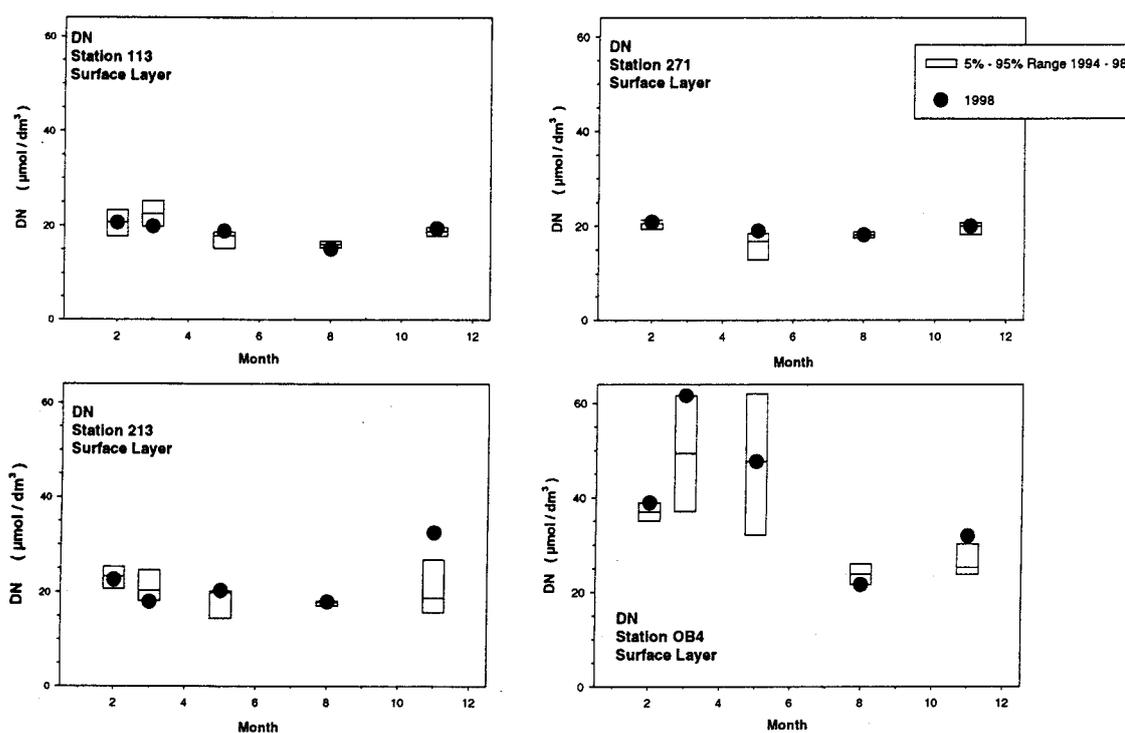


Abb. 21.

Konzentrationen an gelöstem Gesamtstickstoff (DN) in der oberflächennahen Schicht der Ostsee an ausgewählten Stationen im Jahre 1998 sowie der Streubereich der seit 1994 durchgeführten Messungen

Für ausgewählte Stationen in der Pommerschen Bucht (Stat. OB4; südlich OB), im zentralen Arkonabecken (Stat. 113), im zentralen Bornholmbecken (Stat. 213) und im zentralen östlichen Gotlandbecken (Stat. 271) sind die Ergebnisse in den Abb. 20 und 21 wiedergegeben, in denen jeweils die aktuellen Werte aus dem Jahre 1998 und ein Streubereich, der aus den seit 1994 durchgeführten Messungen ermittelt wurde, dargestellt sind. Die hier nicht dargestellten Ergebnisse der PON-Bestimmungen zeigen die gleichen Charakteristika wie die POC-Werte, wobei die Konzentrationen entsprechend dem Redfield-Verhältnis etwa um eine Größenordnung niedriger sind.

Bei den untersuchten Parametern hebt sich die Stat. OB4 insofern von den drei übrigen ab, als hier sehr große Schwankungsbreiten der Konzentrationen für die einzelnen Verbindungsklassen auftreten. Da sich diese Station nahe der Swinamündung befindet, machen sich hier unterschiedliche Einträge aus der Oder bzw. dem Stettiner Haff sehr stark bemerkbar. Hinzu kommt, daß während des Oderhochwassers im Sommer 1997 z.B. für DOC und POC sehr hohe Werte gemessen wurden (vgl. MATTHÄUS et al., 1998b), die aufgrund des kurzen Beobachtungszeitraums einen großen Beitrag zur Streuung der Werte liefern.

POC zeigt an allen Stationen ein ausgeprägtes Maximum in den Sommermonaten (Abb. 20). Abgesehen von Stat. OB4 liegt die Zunahme des POC- (und des PON-)Gehalts in der Größenordnung, die man erwarten würde, wenn man eine vollständige Aufnahme der in der winterlichen Deckschicht vorhandenen anorganischen Nährstoffe bei der Produktion neuer Biomasse im Rahmen der Photosynthese annimmt. In den zentralen Bereichen der Ostsee sind dabei die bisher beobachteten zwischenjährlichen Abweichungen relativ gering.

Auch bei den DOC-Konzentrationen (Abb. 20) ist ein Ansteigen der Werte in der zweiten Jahreshälfte zu beobachten, wengleich hier die Saisonalität deutlich weniger stark ausgeprägt ist als beim POC. Eine Ursache hierfür liegt darin, daß nur ein relativ geringer Anteil des vorhandenen DOC im marinen Bereich gebildet bzw. umgesetzt wird. Wie die Messungen an terrigen geprägten Stationen (z.B. Stat. OB4) zeigen, stammt ein bedeutender Anteil des DOC aus landseitigen Quellen. Berechnet man aus den Ergebnissen aller im Zeitraum von 1996 bis 1998 untersuchten Monitoringstationen eine mittlere DOC-Konzentration, so ergibt sich in der Oberflächenschicht ein Kohlenstoffgehalt von $303 \pm 33 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$. Dabei zeigt sich ein deutlicher Anstieg der Konzentrationen von den Stationen in der westlichen Ostsee hin zu denjenigen in den zentralen Gebieten (vgl. Abb. 25). Die niedrigeren Konzentrationen in der Kieler (Stat. 360 und 361) und der Mecklenburger Bucht (Stat. 12 und 23) dürften dabei auf Mischungsprozesse mit Wasserkörpern aus dem Skagerrak bzw. Kattegat zurückzuführen sein. Diese Vorgänge sind auch für die relativ großen saisonalen Unterschiede an diesen Stationen verantwortlich. Auch terrigene Einflüsse können eine hohe Variabilität in den DOC-Konzentrationen verursachen (z.B. Stat. 23: Lübecker Bucht; Stat. OB4: Pommersche Bucht; Stat. 233: Danziger Bucht). Diese terrigen geprägten Stationen zeichnen sich zudem durch DOC-Konzentrationen aus, die gegenüber denjenigen an landferneren Stationen des entsprechenden Seegebietes erhöht sind.

Die Konzentrationen an gelöstem Gesamtstickstoff (DN; Abb. 21) zeigen ein Verhalten, das in vielen Punkten dem des DOC ähnlich ist. Hervorzuheben ist auch hier der starke terrigene Einfluß, der sich sowohl in erhöhten Konzentrationen als auch in einer hohen saisonalen und zwischenjährlichen Variabilität ausdrückt. Berechnet man auf der Grundlage aller im Zeitraum von 1996 bis 1998 an den Monitoringstationen gemessenen Konzentrationen einen mittleren DN-Gehalt für die Ostsee, so ergibt sich für die Oberflächenschicht ein Stickstoffgehalt von $21 \pm 8 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$. Obwohl die Konzentration des gelösten Gesamtstickstoffs im Jahresverlauf relativ konstant ist, finden in dieser Fraktion, die sich in die beiden Verbindungsklassen gelöste anorganische Stickstoffverbindungen (DIN) und gelöste organische Stickstoffverbindungen (DON) unterteilen läßt, erhebliche Stoffumsätze statt. So wird während der Planktonblüte im Frühjahr praktisch das gesamte DIN vom Phytoplankton aufgenommen und in PON umgewandelt. Durch diesen Prozeß kann es in den Sommermonaten zu einer geringen Abnahme der DN-Konzentration in der Oberflächenschicht kommen. Andeutungsweise ist diese Abnahme in Abb. 21 zu erkennen, jedoch aufgrund des zu kurzen Beobachtungszeitraums statistisch nicht zu verifizieren. Der Grund dafür, daß sich diese saisonal unterschiedlichen Umsatzprozesse in der DN-Konzentration kaum widerspiegeln, liegt darin, daß DIN und PON zusammen weit weniger als 50% des Gesamtstickstoffgehalts (TN) ausmachen (vgl. MATTHÄUS et al., 1996). Der Hauptanteil der Stickstoffverbindungen liegt als DON vor, das seinerseits als Substrat bei der Remineralisation eine wichtige Rolle spielt.

Die im marinen Bereich vorkommenden organischen Verbindungen unterliegen Auf- und Abbauprozessen, die in der Regel biologisch kontrolliert sind und im Normalfall weitere Substrate erfordern. Von besonderer Bedeutung sind in diesem Zusammenhang – neben verschiedenen Spurenstoffen – Gase wie z. B. Sauerstoff, CO_2 oder einige stickstoffhaltige Gase, die in der Atmosphäre in großen Mengen vorkommen. Für den Ablauf der Reaktionen organischer Verbindungen in oberflächennahen Wasserschichten sind sie deshalb in der Regel nicht geschwindigkeitsbestimmend oder limitierend.

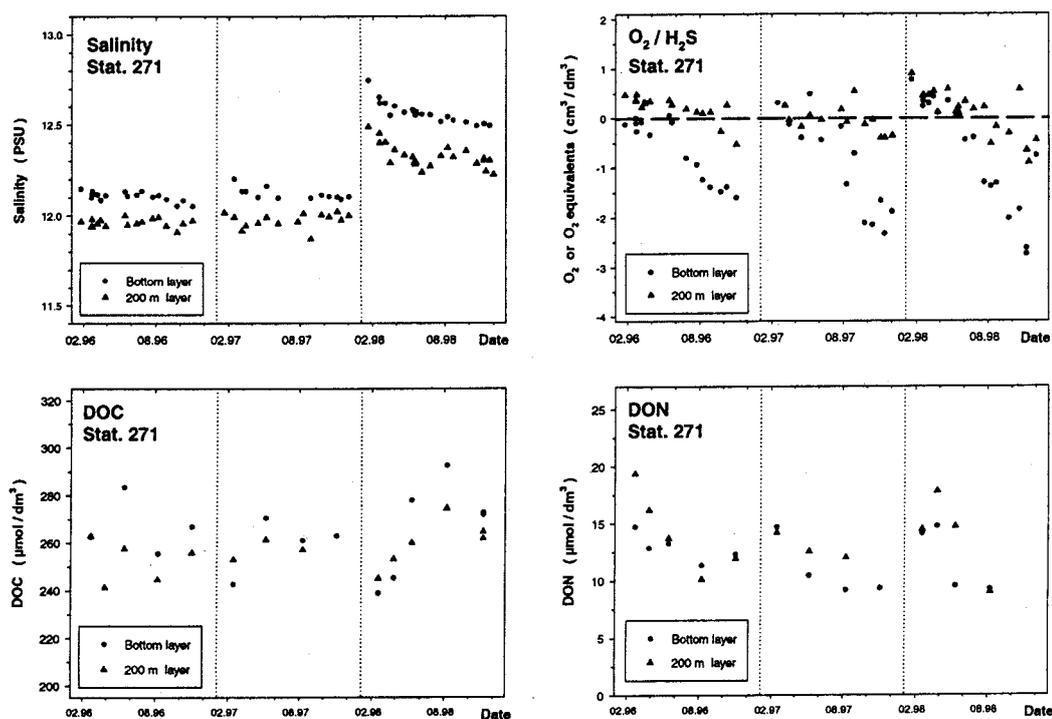


Abb. 22

Salz- und Sauerstoffgehalt sowie die Konzentrationen gelöster organischer Kohlenstoff- (DOC) und Stickstoffverbindungen (DON) im 200 m Horizont und in der grundnahen Schicht des Gotlandtiefs (Stat. 271) im Zeitraum 1996 - 1998

Über die Veränderungen, denen das organische Material unter limitierenden Bedingungen (wie z.B. anoxischen Bedingungen) unterliegt, gibt es bisher nur wenige gesicherte Ergebnisse. Die Stagnationsphase, die nach dem letzten großen Salzwassereintrich im Jahre 1993 im Tiefenwasser des östlichen Gotlandbeckens bereits 1995 begonnen hat (NEHRING et al., 1995c), bietet deshalb eine Möglichkeit, die Effekte einer Sauerstofflimitierung auf das organische Material zu verfolgen. Erste Befunde sind in Abb. 22 dargestellt. Dabei deutet sich eine Tendenz an, die auf eine Abnahme des DON bei gleichzeitigem Anstieg des DOC-Gehalts hinweist. Da sich die Situation insofern noch nicht stabilisiert hat, als in den Wintermonaten bisher immer

wieder geringe Mengen an Sauerstoff nachgewiesen werden konnten (vgl. auch Kapitel 5.3 und Abb. 16), ist eine genauere Interpretation des vorhandenen Datenmaterials zur Zeit noch nicht möglich. Unabhängig davon, ob sich die Stagnationsphase stabilisiert oder ob ein neuer Salzwassereinbruch eintritt, sollten die dann eintretenden Veränderungen jedoch weitere Einblicke in die Prozesse erlauben, denen das organische Material im marinen Bereich unterliegt.

6. Variationen der Temperatur im Tiefenwasser der zentralen Ostsee

Temperaturvariationen im Tiefenwasser der Ostsee sind ein Resultat der Wechselwirkung zwischen dem Wasseraustauschgeschehen mit der Nordsee, den Austauschprozessen an der permanenten Sprungschicht und der Anpassung des stagnierenden Tiefenwassers an die Umgebungstemperaturen in den tiefen Becken. Da seit Mitte dieses Jahrhunderts der Umfang der für Auswertungen zur Verfügung stehenden Datensätze dank der intensivierten und international abgestimmten Monitoringaktivitäten erheblich zugenommen hat, sollen im folgenden Extrema und markante Trends der Temperatur im Tiefenwasser der zentralen Ostsee an Hand ausgewählter repräsentativer Stationen (Stat. 213, 245, 271, 284, 286; vgl. Abb. 1) untersucht werden.

Schwankungen im Temperaturregime sind nicht nur im Hinblick auf klimatische Veränderungen von Bedeutung (MATTHÄUS, 1995; BACKHAUS, 1996) sondern spielen auch für die Bestandsentwicklung zahlreicher Fischarten und die Artenzusammensetzung der marinen Lebensgemeinschaften in der Ostsee eine Rolle (LAEVASTU, 1993). Ein Anstieg der Temperatur im weitgehend vom gut durchlüfteten Oberflächenwasser isolierten Tiefenwasser könnte darüber hinaus zu einer erhöhten Oxidationsrate und damit zum schnelleren Abbau des Sauerstoffs bis hin zu anoxischen Bedingungen führen (KULLENBERG, 1970).

6.1 Extreme Temperaturen

Der Sommer 1997 wird als der wärmste in diesem Jahrhundert charakterisiert und führte im August mit mehr als 23 °C in der zentralen Ostsee und bis zu 25 °C im Küstenbereich der westlichen Ostsee zu außergewöhnlichen Temperaturen im Oberflächenwasser (MATTHÄUS et al., 1998b). Diese extremen Oberflächentemperaturen leiteten im Spätherbst auch die Erwärmung des Tiefenwassers ein. Ende Oktober 1997 lag das Tiefenwasser im Arkonabecken mit Temperaturen > 14,5 °C um etwa 2 K (MATTHÄUS, 1975, 1977) und im Bornholmbecken mit 11,5 bis 13 °C um etwa 3 bis 4 K (MATTHÄUS, 1977; FRANCK, 1985) über den langjährigen Mittelwerten. Derartig hohe Temperaturen wurden im Tiefenwasser des Bornholmbeckens in diesem Jahrhundert nur selten erreicht (vgl. Abb. 23).

Anfang November 1997 war das warme Wasser bereits bis zum Südhang des östlichen Gotlandbeckens vorgedrungen (MATTHÄUS et al., 1998b). Im Verlaufe des Jahres 1998 machte sich die Erwärmung im Tiefenwasser des gesamten östlichen Gotlandbeckens bemerkbar. Vergleichbar hohe Temperaturen sind bisher nur im Jahre 1977 gemessen worden (FONSELIUS, 1977). Abb. 24A und C zeigt Beispiele für die Temperaturverteilung im Tiefenwasser der zentralen Ostsee zu Zeiten außergewöhnlich hoher Temperaturen.

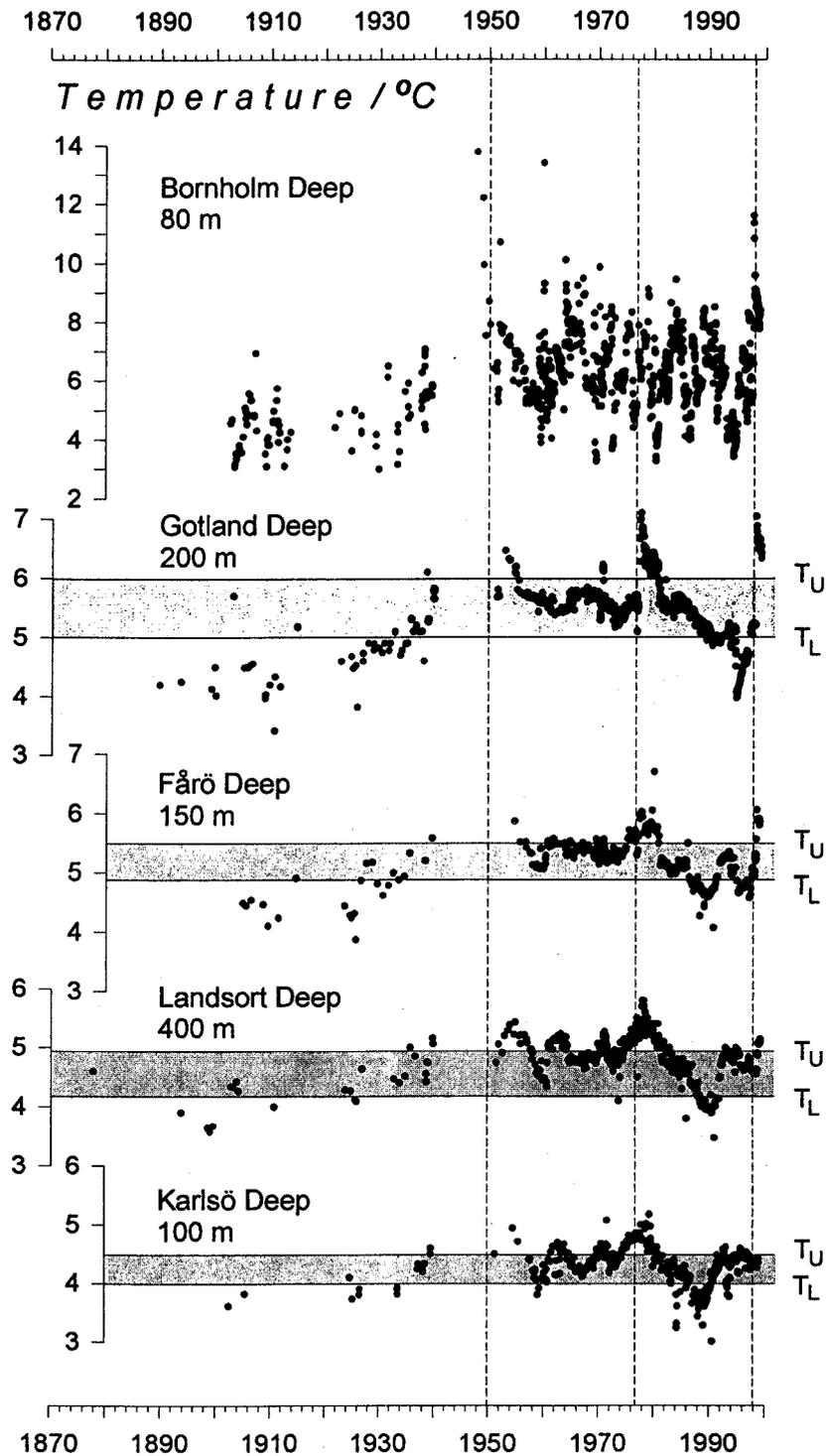


Abb. 23

Variationen der Temperatur im Tiefenwasser der Ostsee im Laufe dieses Jahrhunderts, dargestellt an Hand repräsentativer Stationen in den Tiefenbecken der zentralen Ostsee. T_U bzw. T_L = obere bzw. untere Temperaturgrenzwerte, festgelegt zur Beurteilung von Perioden mit außergewöhnlichen Temperaturen

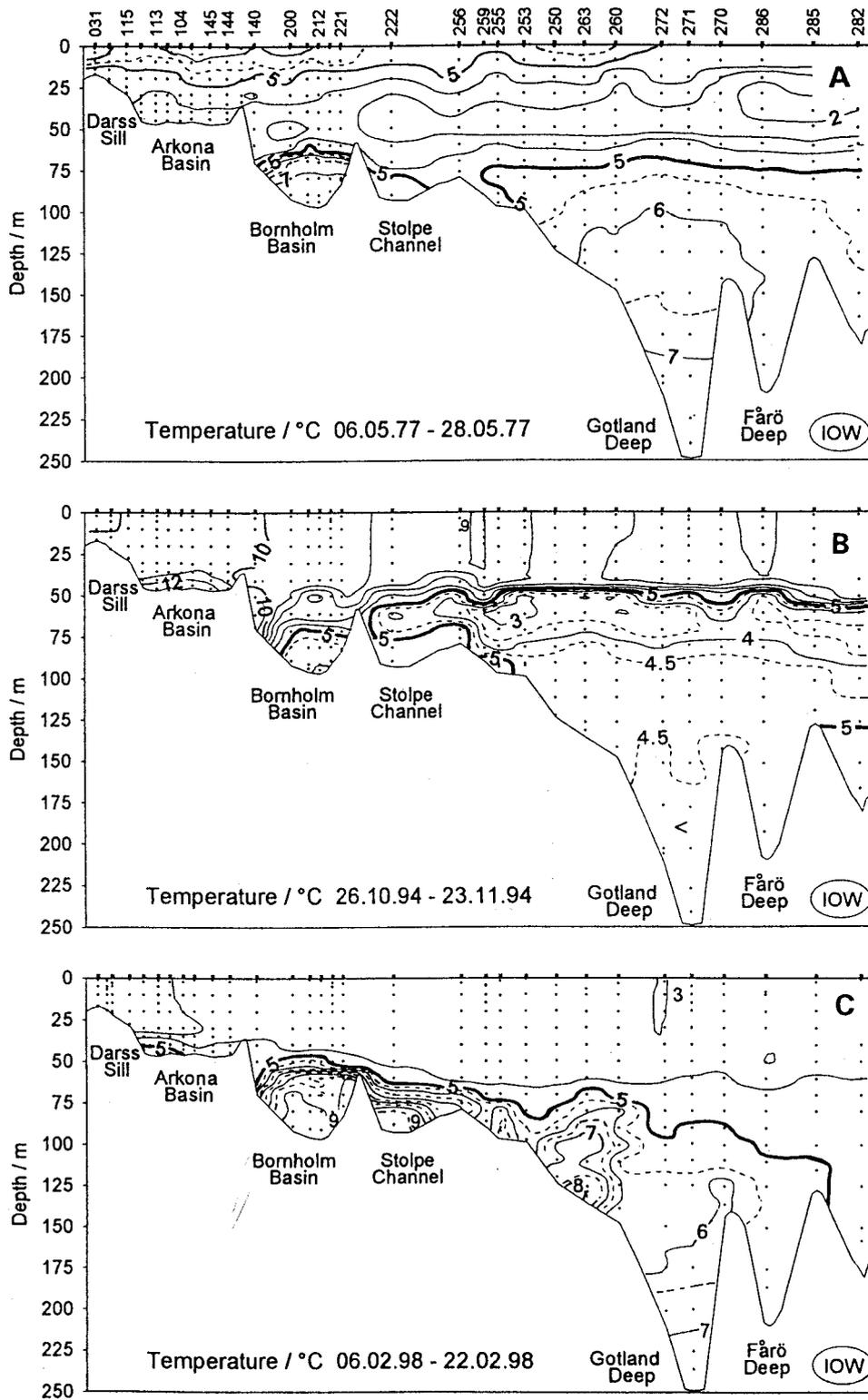


Abb. 24
 Temperaturverteilung im Tiefenwasser der zentralen Ostsee zu Zeiten außergewöhnlicher Erwärmung (A, C) bzw. Abkühlung des Tiefenwassers (B)

Tabelle 13 **Perioden hoher Temperaturen ($T \geq T_U$) im Tiefenwasser der zentralen Ostsee seit 1950**

Station	Tiefe/m	$\bar{T} / ^\circ\text{C}$ (1950-1998)	$T_U / ^\circ\text{C}$	Perioden hoher Temperaturen $T \geq T_U$							
213 (Bornholmtief)	80	$6,30 \pm 1,34$		Mittlere jährliche Variation etwa $2,3 \text{ } ^\circ\text{C}$ (MATTHÄUS, 1977)							
271 (Gotlandtief)	200	$5,53 \pm 0,51$	6,0	1952-1954			1970		1977-1980		1998-1999
286 (Färötief)	150	$5,22 \pm 0,46$	5,5	1954-1956	1961	1964	1970	1975-1976	1977-1980		1998-1999
284 (Landsorttief)	400	$4,83 \pm 0,37$	4,95	1952-1957	1960-1964	1969	1970-1971		1974-1981		1998-1999
245 (Karlsötief)	100	$4,31 \pm 0,39$	4,5	1951-1955	1961	1962	1963/64	1970-1971		1974-1979	

Es wurden aber auch erheblich unter dem langjährigen Mittel liegende Temperaturen beobachtet (Abb. 23). Zur Beurteilung extremer Temperaturen wurden Mittelwerte \bar{T} und Standardabweichungen für den Zeitraum 1950 - 1998 berechnet (Tabelle 13). Um Perioden hoher bzw. niedriger Temperaturen im Tiefenwasser zu definieren, wurden obere und untere Temperaturgrenzwerte T_U bzw. T_L festgelegt (vgl. Tabellen 13 und 15; Abb. 23). Im Tiefenwasser des Bornholmbeckens tritt ein beträchtlicher Jahresgang mit einer mittleren Variation von 2,3 °C auf, so daß Perioden extremer Temperaturen stets saisonalen Charakter aufweisen (MATTHÄUS, 1977; FRANCK, 1985) und daher hier nicht angegeben werden.

Die Temperaturen im Tiefenwasser der zentralen Ostsee sind von der Intensität des Einstromgeschehens zur jeweiligen Jahreszeit abhängig (vgl. MATTHÄUS, FRANCK, 1992). Hohe Einstromaktivitäten bis zu Salzwassereinbrüchen im Frühherbst transportieren warmes Wasser in die Tiefenbecken, und es kommt zur Erhöhung der Temperaturen (vgl. Abb. 24A, C). Bei Einströmen im Winter und Frühjahr gelangt kühles Wasser in die Ostsee, was zum Rückgang der Temperaturen führt (vgl. Abb. 24B). Hohe Temperaturen treten immer dann im Tiefenwasser auf, wenn die Oberflächentemperaturen im Übergangsgebiet infolge eines überdurchschnittlich warmen Sommers erhöht sind und gleichzeitig Salzwassereinbrüche erfolgen oder zumindest das Einstromgeschehen verstärkt ist.

Dieser Zusammenhang zeigt sich besonders deutlich im Gotlandtief (Stat. 271). Überdurchschnittlich warme Sommer in der südlichen Ostsee in den Jahren 1950, 1951, 1953 und 1955 (TIESEL, 1999) verbunden mit zahlreichen Salzwassereinbrüchen (MATTHÄUS, FRANCK, 1992) führten Mitte der 50er Jahre zu hohen Temperaturen (Tabelle 13 und 14). Verstärkte Einstromaktivitäten 1975/76 gekoppelt mit zwei Salzwassereinbrüchen (LASS, SCHWABE, 1990) nach den sehr warmen Sommern 1975 und 1976 (MATTHÄUS et al., 1976) resultierten 1977 in der extremen Erwärmung des gesamten Tiefenwassers der zentralen Ostsee (vgl. Tabelle 14; Abb. 23 und 24A). Verstärkter Einstrom des im August 1997 extrem erwärmten Wassers in die Ostsee in der 2. Hälfte des Jahres 1997, insbesondere im September und Anfang Oktober, führte schließlich zu einem Einstrom in das östliche Gotlandbecken (vgl. auch HAGEN, FEISTEL, 1999 und Abb. 13) und damit im Jahre 1998 zu den hohen Temperaturen im Tiefenwasser des östlichen Gotlandbeckens (Abb. 24C).

Niedrige Temperaturen $< T_L$ wurden im Tiefenwasser durchweg vor 1935 gemessen (vgl. Abb. 23). In der 2. Hälfte dieses Jahrhunderts wurde eine längere Periode niedriger Temperaturen Ende der 80er Jahre im Fårötief (Stat. 286) und westlichen Gotlandbecken (Stat. 245 und 284; vgl. Tabelle 15) während der ungewöhnlich langen Stagnationsperiode im östlichen Gotlandbecken (MATTHÄUS, 1990) beobachtet. Die Ursache hierfür könnte - ähnlich wie beim Anstieg des Sauerstoffgehaltes im Tiefenwasser des westlichen Gotlandbeckens im Verlaufe der Stagnation - mit einem verstärkten Zufluß in mittleren Tiefen und einem erleichterten vertikalen Austausch infolge geringerer Stabilität in Zusammenhang gebracht werden (MATTHÄUS, 1995).

Mitte der 90er Jahre wurden Temperaturen um 4 °C im Tiefenwasser des Gotlandtiefs gemessen, die zu den niedrigsten in diesem Jahrhundert zählen (Tabelle 15 und Abb. 23). Sie wurden durch kleinere Einstromereignisse im Dezember 1993 und März 1994 verursacht, bei denen 2 - 4 °C kaltes, salzreiches Wasser in 50 - 60 m Tiefe - über das bereits durch den Salzwassereinbruch im Januar 1993 (MATTHÄUS, LASS, 1995) in das Bornholmbecken gelangte salzreiche Tiefenwasser hinweg - relativ schnell ins Gotlandtief vordringen konnte (NEHRING et al., 1995b).

Tabelle 14 Maximaltemperaturen $T > T_U$ (°C) im Tiefenwasser der zentralen Ostsee seit 1950 (Maxima der einzelnen Stationen hervorgehoben)

Station	Tiefe/m	1950-1959	1960-1969	1970-1979	1980-1989	1990-1999
213 (Bornholmtief)	80	10,70 13,40 (1951) (1959)	10,10 9,48 9,87 (1963) (1967) (1969)			11,60 (1997)
271 (Gotlandtief)	200	6,47 (1952)		6,23 7,10 (1970) (1977)		7,04 (1998)
286 (Fårötief)	150	5,87 (1954)	5,57 5,53 (1961) (1964)	5,56 5,72 6,70 (1970) (1975/76) (1980)		6,06 (1998)
284 (Landsorttief)	400	5,43 (1954)	5,23 5,07 (1962) (1969)	5,27 5,80 (1970) (1977)		5,14 (1998)
245 (Karlsötief)	100	4,94 (1951)	4,63 4,69 4,67 (1961) (1962) (1963)	5,07 5,17 (1971) (1979)		

Tabelle 15 Perioden niedriger Temperaturen ($T < T_L$) im Tiefenwasser der zentralen Ostsee seit 1950

Station	Tiefe/m	\bar{T} / °C (1950-1998)	T_L / °C	Perioden niedriger Temperaturen $T < T_L$
213 (Bornholmtief)	80	6,30 ± 1,34		Mittlere jährliche Variation etwa 2,3 °C (MATTHÄUS, 1977)
271 (Gotlandtief)	200	5,53 ± 0,51	5,0	1993 1994-1996
286 (Fårötief)	150	5,22 ± 0,46	4,9	1986-1991 1994-1997
284 (Landsorttief)	400	4,83 ± 0,37	4,2	1987-1991
245 (Karlsötief)	100	4,31 ± 0,39	4,0	1984 1987-1990

6.2 Markante Trends

Die im Jahre 1998 beobachteten extrem hohen Temperaturen im Tiefenwasser der zentralen Ostsee bieten den Anlaß, auch markante Trends der Temperatur im Verlaufe dieses Jahrhunderts zu betrachten. Zur Untersuchung der Trends können Langzeitreihen nicht-äquidistanter Messungen der Temperatur herangezogen werden, die teilweise bis zum Ende des 19. Jahrhunderts zurückreichen (vgl. Abb. 23). Trendanalysen bis in die 60er und 70er Jahre liegen von FONSELIUS (1962, 1969) und MATTHÄUS (1979, 1983) vor. Die Entwicklung im Tiefenwasser während der Stagnationsperiode 1977 - 1993 wurde von MATTHÄUS (1990) und NEHRING et al. (1994a,b) untersucht.

Markante, länger anhaltende Trendentwicklungen in der Temperatur des Tiefenwassers der zentralen Ostsee sind vor allem in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts und während der Stagnation 1977 - 1993 aufgetreten (Abb. 23). Deshalb sollen die beiden Zeiträume 1900 - 1949 und 1977 bis Anfang bzw. Mitte der 90er Jahre betrachtet werden. In Tabelle 16 sind für ausgewählte Stationen die Mittelwerte \bar{T} in den entsprechenden Zeiträumen (n = Anzahl der Messungen), die Regressionsgeraden $T(t)$ und die Korrelationskoeffizienten r zusammengestellt. Zur Bestimmung der mittleren Variation der Temperatur $\overline{\Delta T}$ in den betrachteten Zeiträumen wurde die lineare Regression angewendet. Die Signifikanz der Korrelationen wurde nach dem F-Test für Korrelationskoeffizienten bestimmt (KOLLER, 1969; TAUBENHEIM, 1969). Alle berechneten Trends sind mindestens bis zum 99 % Niveau signifikant.

In der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts war im Tiefenwasser der zentralen Ostsee ein signifikanter mittlerer Anstieg der Temperatur um etwa 0,8 bis 1,3 K zu beobachten, der sich ab 1950 nicht mehr fortsetzte (Abb. 23). Zwischen 1950 und Mitte der 70er Jahre gelangte Wasser in die Tiefenbecken, dessen Temperaturen nahezu den Mittelwerten der 2. Hälfte dieses Jahrhunderts entsprachen (vgl. Tabelle 13). Der Temperaturverlauf war durch Schwankungen von etwa 0,5 K charakterisiert. Die Schwankungen werden durch die Eintrittszeit der Salzwassereinbrüche gesteuert, die im Herbst wärmeres und im Frühjahr kälteres Wasser über die Schwellen in die Ostsee transportieren.

Tabelle 16 Markante Trends der Temperatur im Tiefenwasser der zentralen Ostsee

Station	Tiefe/m	Zeitraum	n	$\bar{T}/^{\circ}\text{C}$	$T(t)$	r	$\overline{\Delta T}/\text{K}$
271 (Gotlandtief)	200	1900 - 1949	48	4,84	$-47,822 + 0,0273t$	0,61	1,34
		1977 - 1994	363	5,54	$196,923 - 0,0964t$	-0,90	-1,64
286 (Färötief)	150	1900 - 1949	25	4,69	$-40,549 + 0,0235t$	0,61	1,15
		1977 - 1990	111	5,25	$227,665 - 0,1121t$	-0,91	-1,46
284 (Landsorttief)	400	1900 - 1949	22	4,49	$-25,460 + 0,0156t$	0,64	0,76
		1977 - 1990	189	4,71	$252,808 - 0,1251t$	-0,96	-1,63
245 (Karlsötief)	100	1900 - 1949	17	4,08	$-32,901 + 0,0192t$	0,74	0,94
		1977 - 1990	128	4,19	$199,129 - 0,0983t$	-0,88	-1,28

(t = Zeit in Jahren)

Seit Mitte der 70er Jahre gingen im Tiefenwasser der zentralen Ostsee drastische Veränderungen vor sich (MATTHÄUS, 1990, 1995), die sich auch im Temperaturregime widerspiegelten. Nach den effektiven Salzwassereinbrüchen von 1975 und 1976 (MATTHÄUS, FRANCK, 1992) und der Umschichtung des Tiefenwassers im Jahre 1977 begann eine Stagnationsperiode, die gegenüber früheren Perioden wesentliche Unterschiede aufwies (MATTHÄUS, 1986). Häufigkeit und Intensität der Salzwassereinbrüche gingen zurück und zwischen Anfang 1983 und Ende 1992 sind überhaupt keine derartigen Ereignisse eingetreten. Dadurch trat im östlichen Gotlandbecken die längste und in ihren Veränderungen gravierendste Stagnationsperiode auf, die bisher in der Ostsee messend verfolgt wurde (MATTHÄUS, 1990, NEHRING et al., 1994a,b).

1977 wurden im Tiefenwasser die höchsten bisher gemessenen Temperaturen registriert und mit 7,4 °C die höchste in Grundnähe der zentralen Ostsee gemessene Temperatur beobachtet (vgl. Abb. 23 und Tabelle 14). Im Verlaufe der Stagnationsperiode gingen die Temperaturen im gesamten Tiefenwasser um ca. 0,1 K pro Jahr (Tabelle 16) auf Werte zurück, wie sie zu Beginn des Jahrhunderts beobachtet wurden (Abb. 23). Ab 1990 stiegen sie zumindest im westlichen Gotlandbecken und im Fårötief wieder bis auf die definierten oberen Grenzwerte (vgl. Tabelle 13). Im Gotland- und Fårötief brachten die kleineren Einströme vom Dezember 1993 und März 1994 nochmals einen deutlichen Temperaturrückgang um 1,2 bzw. 0,7 K (vgl. Abb. 23).

7. Diskussion

Der Winter 1997/98 kann im Bereich der nördlichen Ostsee als mild, in der südlichen Ostsee als sehr mild charakterisiert werden (STRÜBING, 1998). Die für die Station Warnemünde berechnete Kältesumme des Winters lag mit 43,2 K weit unter dem langjährigen Mittel von 123 K (vgl. Tabelle 2). An der Wetterstation Arkona betrug die Anomalie der Monatsmittel der Lufttemperatur im Januar +2,8 K und im Februar sogar +4,1 K (vgl. Tabelle 3) und lagen in der zentralen Ostsee ähnlich hoch (vgl. STRÜBING, 1998). Der gesamte Sommer blieb kühl, und die Lufttemperaturen lagen unter den langjährigen Erwartungswerten. Die Monate Oktober bis Dezember waren mit Anomalien zwischen -1 und -3 K deutlich zu kalt.

Infolge des milden Winters gingen die Oberflächentemperaturen in der Beltsee, im Arkona- und Bornholmbecken nur auf 2,5 - 3,5 °C zurück. Auch im östlichen Gotlandbecken lagen sie bei 2,5 - 3,5 °C und im westlichen Gotlandbecken bei 2 - 2,5 °C (vgl. Abb. 10). Dementsprechend wies die Kernschicht des kalten Zwischenwassers im Sommer positive Anomalien von etwa 1 bis 1,5 K auf. Auf Grund des kühlen Sommers zeigten die Höchstwerte im Oberflächenwasser der westlichen und zentralen Ostsee mit 15 - 17 °C (vgl. Abb. 10 und 11A) nur geringe Abweichungen vom langjährigen Mittelwert (MATTHÄUS, 1977). In den meisten Teilgebieten der Ostsee waren die Oberflächentemperaturen im August 1998 bis zu 2 K geringer als im Mittel der 90er Jahre (vgl. Abb. 11C).

Im Jahre 1998 erfolgte kein Salzwassereinbruch. Damit setzt sich die seit Mitte der 70er Jahre beobachtete Tendenz zum Rückgang der Häufigkeit und Intensität extremer Einstromereignisse fort (SCHINKE, MATTHÄUS, 1998), lediglich unterbrochen durch das Einzelereignis vom Januar 1993 (MATTHÄUS, LASS, 1995). Der Wasseraustausch zwischen Nord- und Ostsee über die Darßer Schwelle ist im Januar und Februar durch zwei kleinere barotrope Einstromereignisse

geprägt, bei denen Wasser mit Salzgehalten zwischen 12 und 14 PSU in die Ostsee gelangte (vgl. Abb. 6B). Im März und April erfolgte der Abfluß großer Mengen aus der Ostsee in der gesamten Wassersäule. Von Mitte April bis Mitte Juli war eine anhaltende ästuarine Zirkulation mit Ausstrom in Oberflächennähe und Einstrom in der bodennahen Schicht zu beobachten (vgl. Abb. 6B und 8). Ein Einstrom mit Salzgehalten von mehr als 15 PSU in der gesamten Wassersäule wurde 1998 lediglich Ende Oktober beobachtet (vgl. Abb. 5, 6B und 8). Ende Dezember erfolgte nochmals ein schwacher Einstrom von Wasser mit Salzgehalten zwischen 12 und 14 PSU. Zusammen mit dem gleichzeitig durch den Öresund erfolgten Einstrom führten die Ereignisse im Oktober und im Dezember 1998 - wie bereits in den Vorjahren - zu einer Belüftung des Tiefenwassers im Bornholmbecken im Frühjahr 1999.

Seit 1996 hat das Jahresmittel des Salzgehaltes auf der Darßer Schwelle im Oberflächenwasser um 0,2 PSU zu- und im Tiefenwasser um 1,1 - 1,7 PSU abgenommen (vgl. Tabelle 4). Damit hat sich die barokline Zirkulation im Jahresmittel abgeschwächt, was auf eine Verstärkung des Einstroms in die Ostsee hinweist. Das drückt sich auch im Salzgehalt des Tiefenwassers der zentralen Ostsee aus, der im Jahresmittel seit 1996 um rund 0,4 PSU angestiegen ist (vgl. Tabelle 6). Im gleichen Zeitraum hat sich die Temperatur des Tiefenwassers im Bornholmbecken im Jahresmittel um 2,6 K, im Gotlandtief um 2,0 K und im Fårötief um 0,9 K erhöht. Die Jahresmittelwerte des Sauerstoffgehalts sind dagegen die niedrigsten seit 1994 im östlichen und seit Mitte der 80er Jahre im westlichen Gotlandbecken (vgl. MATTHÄUS, 1995). Für den 80 m Horizont im Bornholmtief wurde erstmalig ein negativer Jahresmittelwert berechnet.

Im Frühjahr 1998 erfolgte ein deutlicher Zustrom von warmem (7 - 8 °C), salz- (> 12 PSU) und sauerstoffreichem Wasser (2 cm³/dm³), das im Februar am südlichen Hang des östlichen Gotlandbeckens angetroffen wurde (vgl. Abb. 12, 14 und 15). Der Zustrom führte im Jahresmittel 1998 - verglichen mit den Jahresmitteln der 90er Jahre - zu den höchsten Temperaturen und Salzgehalten im Tiefenwasser nahezu aller Teilgebiete der zentralen Ostsee (vgl. Tabelle 6).

Im grundnahen Wasser des Danziger Tiefs (Stat. 233) ging der Salzgehalt im Laufes des Jahres von 13 auf 11,6 PSU zurück. Im Februar 1998 wurden noch geringe Sauerstoffkonzentrationen (0,1 cm³/dm³) gemessen, im Herbst erreichten die H₂S-Konzentrationen Werte von -4,3 cm³O₂/dm³ (vgl. Abb. 1). Das salz- und sauerstoffreiche Wasser strömte bis Mai in die zentrale Ostsee ein (vgl. Abb. 13). Bereits ab Juli wies auch das Gotlandtief bei Salzgehalten von durchweg 12,5 PSU wieder anoxische Bedingungen zwischen etwa 150 m Tiefe und Meeresgrund auf.

Die gegenwärtige Stagnationsperiode im Tiefenwasser des östlichen Gotlandbeckens ist durch einige Besonderheiten gekennzeichnet. In der zweiten Hälfte der Jahre 1996, 1997 und auch 1998 hat sich der anoxische Horizont jeweils zwischen Meeresgrund und etwa 150 m ausgeweitet. Diese anoxischen Phasen wurden jedoch im Winter und Frühjahr durch die Präsenz geringer Mengen von Sauerstoff unterbrochen (vgl. Abb. 16), die infolge kleinerer Einstromereignisse in das Gotlandtief gelangten. Die Ursache für die Auswirkungen von kleineren Einstromen auf das Tiefenwasser der zentralen Ostsee liegt in der regelmäßigen Füllung des Bornholmbeckens mit salzreichem Wasser > 15 PSU im Herbst des Vorjahres (vgl. MATTHÄUS et al., 1997, 1998a). Das salz- und sauerstoffreiche Wasser, das mit kleineren Einstromen im Spätherbst und Winter

über die Schwellen in die Ostsee transportiert wurde, konnte daher in größerer Menge das Bornholmbecken in 50 - 60 m Tiefe passieren und gelangte relativ schnell ins östliche Gotlandbecken. Eine ähnliche Einstromsituation wurde bereits 1994 beobachtet (NEHRING et al., 1995b). Die geringen Sauerstoffmengen werden beim Abbau der organischen Substanz rasch verbraucht, so daß es jeweils in der 2. Jahreshälfte zur Bildung von Schwefelwasserstoff kam. Der relativ starke Anstieg der Temperaturen im Tiefenwasser (vgl. Tabelle 14 und Abb. 23) beschleunigt diesen Prozeß.

Im westlichen Gotlandbecken setzte sich die in den Vorjahren beobachtete Tendenz fort (vgl. MATTHÄUS et al., 1998a). Die Sauerstoffkonzentrationen nahmen im Jahresmittel weiter ab (vgl. Tabelle 6) und erreichten 1998 die niedrigsten Werte seit Mitte der 80er Jahre.

Bei den Winterkonzentrationen der anorganischen Nährstoffe im Oberflächenwasser setzte sich die in den Vorjahren erkennbare Entwicklung im wesentlichen fort. Allerdings war die Abnahme der Phosphatkonzentrationen im Jahre 1998 nicht in gleicher Eindeutigkeit zu beobachten. Die niedrigsten Jahresmittel wurden teils 1997 (Arkonasee, östliches Gotlandbecken), teils 1998 (westliches Gotlandbecken) gefunden (vgl. Tabelle 9). Es bleibt abzuwarten, ob sich die eingeleiteten Sanierungsmaßnahmen sowie veränderte Landnutzungen weiterhin in Rückgängen der Phosphatkonzentrationen dokumentieren. Dagegen scheint sich die für 1997 erstmals angedeutete Tendenz der Abnahme der winterlichen Konzentrationen für Nitrat und anorganische Stickstoffkomponenten fortzusetzen (vgl. Tabelle 9).

Im Tiefenwasser des westlichen Gotlandbeckens scheint die Sauerstoffkonzentration in einen Bereich zu kommen, in dem die Bedingungen für Denitrifikationsprozesse gegeben sind. In der 2. Jahreshälfte wurden nur noch Sauerstoffgehalte um $0,2 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$ gemessen und ein deutlicher Rückgang in den Nitratkonzentrationen beobachtet (vgl. Tabelle 12). Nach GOERING (1968) werden $10 \mu\text{mol}/\text{dm}^3 = 0,22 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$ Sauerstoff als Grenzwert für Denitrifikationsprozesse angesehen.

Die Konzentrationen organischer Nährstoffe lagen 1998 im Schwankungsbereich der Messungen der letzten Jahre. Besondere Auffälligkeiten, insbesondere Auswirkungen des außergewöhnlichen Oderhochwassers im Sommer 1997 (vgl. SIEGEL et al., 1998a; MATTHÄUS et al., 1998b), waren nicht zu erkennen.

Für gelöste organische Kohlenstoff- (DOC; vgl. Abb. 20) und Stickstoffverbindungen (DON) sind nur geringe saisonale Unterschiede zu erkennen, die auf Prozesse im marinen Ökosystem zurückzuführen sind. Wesentlich ausgeprägter sind saisonale und jahreszeitliche Variabilitäten, die durch terrigene Einflüsse oder durch den Wasseraustausch über das Kattegat und Skagerrak geprägt sind. Aus den Meßreihen der letzten Jahre läßt sich ein Gradient zwischen den westlichen Teilen der Ostsee und den zentralen östlichen Gebieten erkennen, wobei die niedrigeren Konzentrationen in der westlichen Ostsee beobachtet wurden (Abb. 25). Demgegenüber zeigen die Konzentrationen des partikulären organischen Materials (POC, PON) eine ausgeprägte Saisonalität, wobei die Zunahme in den Sommermonaten durch das Planktonwachstum verursacht wird.

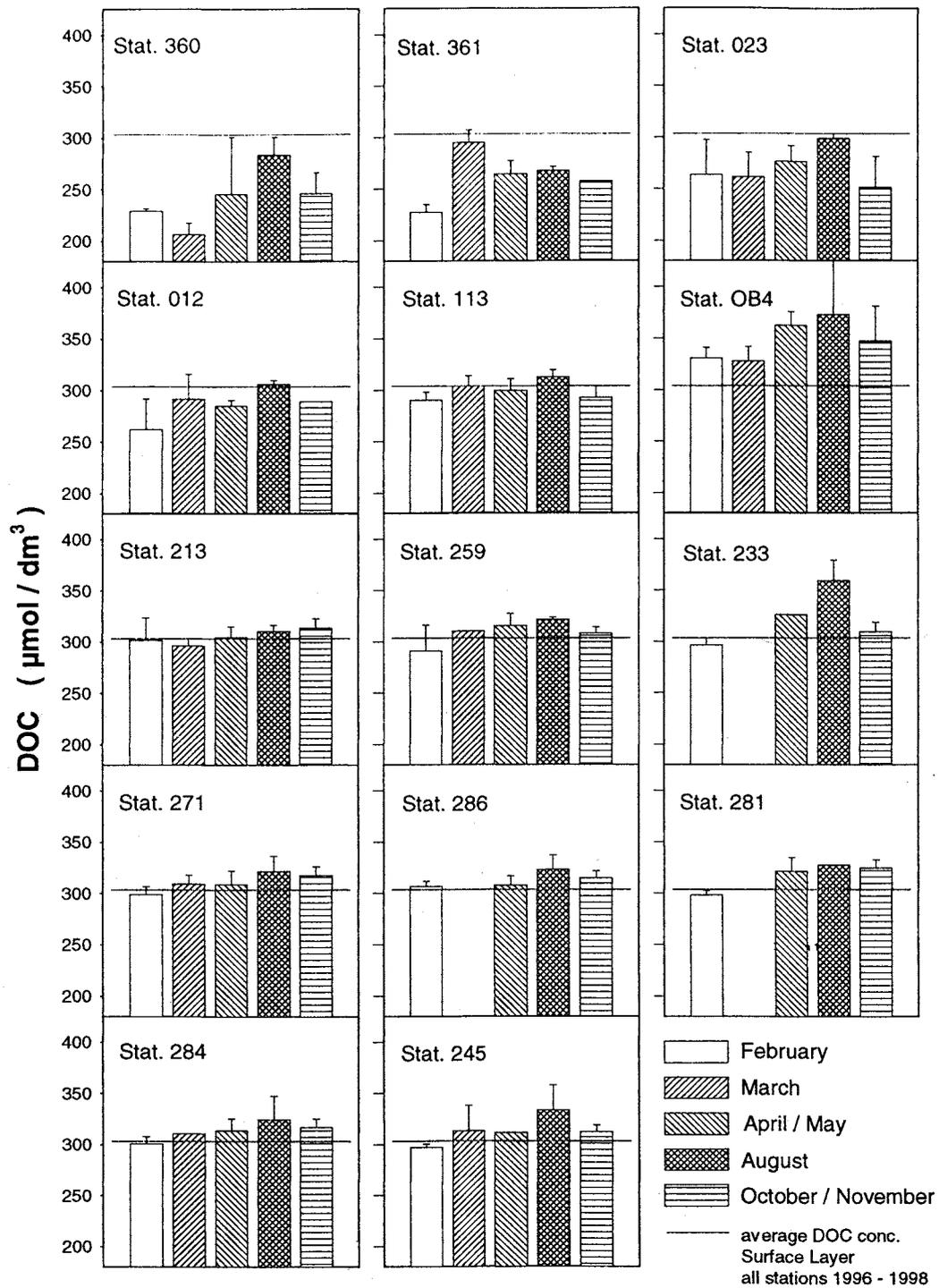


Abb. 25

Mittlere Konzentrationen gelöster organischer Kohlenstoffverbindungen (1996 - 1998) in der oberflächennahen Schicht an 14 ausgewählten Stationen der westlichen und zentralen Ostsee (Positionen vgl. Abb. 1)

Da sich nach dem letzten Salzwassereinbruch im Jahre 1993 (MATTHÄUS, LASS, 1995) eine neue Stagnationsperiode in den tiefen Becken der zentralen Ostsee entwickelt hat, zeigen sich erste Hinweise auf Veränderungen in der Zusammensetzung des organischen Materials unter anoxischen Bedingungen (vgl. Abb. 22). Dabei beginnen sich unterschiedliche Entwicklungen für organische Kohlenstoff- und Stickstoffverbindungen anzudeuten, die jedoch noch durch weitere Beobachtungen abgesichert werden müssen.

Temperaturvariationen im Tiefenwasser der Ostsee sind ein Resultat der Wechselwirkung zwischen dem Wasseraustauschgeschehen mit der Nordsee, den Austauschprozessen an der permanenten Sprungschicht und der Anpassung des stagnierenden Tiefenwassers an die Umgebungstemperaturen in den tiefen Becken. Schwankungen im Temperaturregime sind im Hinblick auf klimatische Veränderungen von Bedeutung (vgl. MATTHÄUS, 1995; BACKHAUS, 1996) und spielen für die Bestandsentwicklung zahlreicher Fischarten und die Artenzusammensetzung der marinen Lebensgemeinschaften in der Ostsee eine Rolle (vgl. LAEVASTU, 1993).

Die extremen Oberflächentemperaturen im Sommer 1997 verbunden mit Einstromereignissen im Herbst verursachten im Jahre 1998 einen außergewöhnlichen Anstieg der Temperaturen im Tiefenwasser der zentralen Ostsee (MATTHÄUS et al., 1998b), wie er bisher lediglich im Jahre 1977 beobachtet wurde (FONSELIUS, 1977). Im Laufe dieses Jahrhunderts wurden aber auch erheblich unter dem langjährigen Mittel liegende Temperaturen gemessen (vgl. Abb. 23). An Hand von fünf Stationen in der zentralen Ostsee wurden deshalb Perioden extremer Temperaturen und markanter Trends der Temperatur im Tiefenwasser der zentralen Ostsee seit Mitte dieses Jahrhunderts untersucht.

Hohe Temperaturen treten immer dann im Tiefenwasser auf, wenn die Oberflächentemperaturen im Übergangsbereich zwischen Nord- und Ostsee infolge eines überdurchschnittlich warmen Sommers erhöht sind und gleichzeitig im Frühherbst Salzwassereinbrüche erfolgen oder zumindest das Einstromgeschehen verstärkt ist. Das war in der 1. Hälfte der 50er Jahre, 1975/76 und 1997 der Fall. Bei Einströmen im Winter und Frühjahr gelangt kühles Wasser in die Ostsee, was zum Rückgang der Temperaturen im Tiefenwasser führt (z. B. 1993/94; vgl. Abb. 24 B).

Perioden hoher Temperaturen sind in Tabelle 13, Perioden niedriger Temperaturen in Tabelle 15 zusammengestellt. Die höchsten Temperaturen traten im gesamten Gotlandbecken mit Werten zwischen 7,1 °C (Gotlandtief: 200 m) und 5,2 °C (Karlsötief: 100 m) Ende der 70er/Anfang der 80er Jahre und im östlichen Gotlandbecken nochmals 1998 auf (vgl. Tabelle 14). Niedrige Temperaturen wurden durchweg vor 1935 gemessen (vgl. Abb. 23). In der 2. Hälfte dieses Jahrhunderts wurden sie vor allem Ende der 80er/Anfang der 90er Jahre und Mitte der 90er Jahre beobachtet (vgl. Abb. 23 und Tabelle 15).

Signifikante Trends im Temperaturregime des Tiefenwassers sind in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts mit mittleren Zunahmen um 0,8 bis 1,3 °C zu beobachten und zwischen Mitte der 70er und Anfang der 90er Jahre mit einem drastischen Rückgang um 1,3 - 1,6 °C infolge des Ausbleibens von größeren Einströmen in die Ostsee zu verzeichnen (vgl. Tabelle 16 und Abb. 23).

Danksagung

Die Autoren danken den am Ostseeüberwachungsprogramm beteiligten Mitarbeitern des Instituts für Ostseeforschung Warnemünde für die Durchführung der Messungen sowie Kapitänen und Besatzungen der Forschungsschiffe "A. v. Humboldt" und "Professor Albrecht Penck" für die Unterstützung und den Einsatz bei den Meßfahrten des Jahres 1998. Herrn GERD SCHENKEL danken wir für die gewissenhafte Vorbereitung und Durchführung der gesamten technisch-organisatorischen Arbeiten der Meßfahrten. Herrn BARRY BROMAN, Schwedisches Meteorologisches und Hydrologisches Institut (SMHI) Norrköping, gilt unser Dank für die Überlassung von Wasserstandsdaten. Das Ozeanographische Labor des SMHI in Göteborg stellte uns hydrographisch-chemische Beobachtungsdaten ausgewählter Ostseestationen aus dem Schwedischen Ozean Archiv (SHARK) zur Verfügung, die im Rahmen des nationalen schwedischen Umwelt-Überwachungsprogramms gewonnen wurden. Dem SMHI danken wir darüber hinaus für die Genehmigung zur Verwendung von Oberflächentemperaturkarten der Ostsee. Die Maritime Abteilung des Instituts für Meteorologie und Wasserwirtschaft (IMGW) in Gdynia übermittelte uns freundlicherweise Beobachtungsdaten der Station "Bornholmtief". Frau GISELA TSCHERSICH, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie in Hamburg, sind wir dankbar für die Bereitstellung von Satellitendaten. Herr Dr. REINER TIESEL stellte uns freundlicherweise die Langzeitreihen der Wärme- und Kältesummen der Lufttemperatur an der Wetterstation Warnemünde zur Verfügung. Vom Deutschen Wetterdienst erhielten wir die Wind-Daten der Wetterstationen Arkona und Warnemünde.

Literaturverzeichnis

- BACKHAUS, J., 1996: Climate-sensitivity of European marginal seas, derived from the interpretation of modelling studies. - *J. Mar. Syst.*, **7**, 361-382.
- V. BODUNGEN, B., GRAEVE, M., KUBE, J., LASS, H. U., MEYER-HARMS, B., MUMM, N., NAGEL, K., POLLEHNE, F., POWILLEIT, M., RECKERMANN, M., SATTLER, C., SIEGEL, H., WODARG, D., 1995: Stoff-Flüsse am Grenzfluß - Transport- und Umsatz-Prozesse im Übergangsgebiet zwischen Oderästuar und Pommerscher Bucht (TRUMP). - *Geowiss.* **13**, 479-485.
- DWD, 1998: Monatlicher Witterungsbericht. - Deutscher Wetterdienst, Offenbach, **46**, H. 1-13.
- FONSELIUS, S. H., 1962: Hydrography of the Baltic deep basins. - Fishery Board of Sweden, Ser. Hydrogr. **13**, 1-41.
- FONSELIUS, S. H., 1969: Hydrography of the Baltic deep basins III. - Fishery Board of Sweden, Ser. Hydrogr. **23**, 1-97.
- FONSELIUS, S. H., 1977: An inflow of unusually warm water into the Baltic deep basins. - *Havsfiskelab. Lysekil, Hydrogr. avdeln.*, **229**, 1-15.
- FRANCK, H., 1985: Zur jahreszeitlichen Variation des thermohalinen Geschehens im westlichen Bornholmbecken. - *Beitr. Meereskunde, Berlin*, **53**, 3-16.
- GOERING, J. J., 1968: Denitrification in the oxygen minimum zone of the eastern tropical North Pacific. - *Deep Sea Res.*, **15**, 157 - 164.
- GRASSHOFF, K., ERHARDT, M., KREMLING, K., 1983: Methods of seawater analysis. 2nd ed. Verlag Chemie, Weinheim, 1 - 419.
- HAGEN, E., FEISTEL, R., 1999: Deep water changes in the eastern Gotland Basin. - Institut für Ostseeforschung Warnemünde (unveröff. Manuskript).
- HELCOM, 1998: Manual for the marine monitoring in the COMBINE programme of HELCOM. - Baltic Marine Environment Protection Commission, Helsinki 1998.
- HUMBORG, C., NAUSCH, G., NEUMANN, T., POLLEHNE, F., WASMUND, N., 1998: The exceptional Oder flood in summer 1997 - the fate of nutrients and particulate organic matter in the Baltic Sea. - *Dt. Hydrogr. Z.*, **50**, H. 2/3 (im Druck).
- KOLLER, S., 1969: Neue graphische Tafeln zur Beurteilung statistischer Zahlen. 4. Aufl., Steinkopff Verlag, Darmstadt, 1-167.
- KRÜGER, S., ROEDER, W., WLOST, K.-P., 1996: The IOW - Baltic stations Darss Sill & Oder-Bank - part of the German Marine Monitoring Network - MARUM. Baltic Marine

- Science Conference, Rønne, Denmark, October 22-26, 1996 (Paper; Publikation in: Symposium Proceedings des ICES, 1997).
- KRÜGER, S., ROEDER, W., WLOST, K.-P., KOCH, M., KÄMMERER, H., KNUTZ, T., 1998: Autonomous instrumentation carrier (APIC) with acoustic transmission for shallow water profiling. - *Oceanology International 98: The Global Ocean. Conf. Proc.*, 2, 149-158.
- KULLENBERG, G., 1970: On the oxygen deficit in the Baltic deep water. - *Tellus* 22, 357.
- LAEVASTU, T., 1993: Marine climate, weather and fisheries. - Fishing News Books, Oxford, 1-201.
- LASS, H.-U., SCHWABE, R., 1990: An analysis of the salt water inflow into the Baltic in 1975 to 1976. - *Dt. Hydrogr. Z.*, 43, 97-123.
- LASS, H.-U., SCHMIDT, T., SEIFERT, T., 1996: Hiddensee upwelling - field measurements and modelling results. Baltic Marine Science Conference, Rønne, Denmark, October 22-26, 1996 (Paper; Publikation in: Symposium Proceedings des ICES, 1997).
- LASS, H.-U., SCHWABE, R., MATTHÄUS, W., FRANCKE, E., 1987: On the dynamics of water exchange between Baltic and North Sea. - *Beitr. Meereskunde, Berlin*, 56, 27-49.
- LENZ, W., 1971: Monatskarten der Temperatur der Ostsee. - *Dt. Hydrogr. Z., Erg.-H. B.*, 11, 1-148.
- 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., 1978a: Zur mittleren jahreszeitlichen Veränderlichkeit des Oberflächensalzgehaltes in der Ostsee. - *Gerlands Beitr. Geophys., Leipzig*, 87, 369-376.
- MATTHÄUS, W., 1978b: Zur mittleren jahreszeitlichen Veränderlichkeit im Sauerstoffgehalt der offenen Ostsee. - *Beitr. Meereskunde, Berlin*, 41, 61-94.
- MATTHÄUS, W., 1979: Langzeitvariationen von Temperatur, Salzgehalt und Sauerstoffgehalt im Tiefenwasser der zentralen Ostsee. - *Beitr. Meereskunde, Berlin*, 42, 41-93.
- MATTHÄUS, W., 1983: Aktuelle Trends in der Entwicklung des Temperatur-, Salzgehalts- und Sauerstoffregimes im Tiefenwasser der Ostsee. - *Beitr. Meereskunde, Berlin*, 49, 47-64.
- 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. 1995: Natural variability and human impacts reflected in long-term changes in the Baltic deep water conditions - a brief review. - *Dt. Hydrogr. Z.*, **47**, 47-65.
- MATTHÄUS, W., FRANCK, H., 1992: Characteristics of major Baltic inflows - a statistical analysis. - *Cont. Shelf Res.*, **12**, 1375-1400.
- MATTHÄUS, W., LASS, H.-U., 1995: The recent salt inflow into the Baltic Sea. - *J. Phys. Oceanogr.* **25**, 280-286.
- MATTHÄUS, W., STURM, M., FRANCKE, E., 1976: Einige Aspekte des thermischen Regimes der Ostsee im Sommer 1975 am Beispiel der Bornholmsee. - *Z. Meteorol.*, **26**, 360 - 372.
- MATTHÄUS, W., NEHRING, D., LASS, H.-U., NAUSCH, G., NAGEL, K., SIEGEL, H., 1996: The Baltic Sea in 1996 - continuation of stagnation and decreasing phosphate concentrations. - *Dt. Hydrogr. Z.* **48**, 161-174.
- MATTHÄUS, W., NEHRING, D., LASS, H.-U., NAUSCH, G., NAGEL, K., SIEGEL, H., 1997: Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1996. - *Meereswiss. Ber.*, Warnemünde, **24**, 1-49.
- MATTHÄUS, W., NAUSCH, G., LASS, H.-U., NAGEL, K., SIEGEL, H., 1998a: Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1997. - *Meereswiss. Ber.*, Warnemünde, **29**, 1-65.
- MATTHÄUS, W., NAUSCH, G., LASS, H.-U., NAGEL, K., SIEGEL, H., 1998b: The Baltic Sea in 1997 - Impacts of the extremely warm summer and of the exceptional Oder flood. - *Dt. Hydrogr. Z.* **50**, 47-69.
- MOHRHOLZ, V., 1998: Transport- und Vermischungsprozesse in der Pommerschen Bucht. - *Meereswiss. Ber.*, Warnemünde, **33**, 1-106.
- NAUSCH, G., NEHRING, D., 1996: Baltic proper, Hydrochemistry. In: Third periodic assessment of the state of the marine environment of the Baltic Sea, 1989-1993; Background Document. - *Baltic Sea Environ. Proc.* **64B**, 80-85.
- NAUSCH, G., NEHRING, D., ÆRTEBJERG, G., 1999: Anthropogenic nutrient load of the Baltic Sea. - *Limnologica* **29**, 233-241.
- 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., 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., LASS, H.-U., 1993: Die hydrographisch-chemischen Bedingungen in der westlichen und zentralen Ostsee im Jahre 1992. - Dt. Hydrogr. Z. **45**, 281-331.
- NEHRING, D., MATTHÄUS, W., LASS, H.-U., NAUSCH, G., 1994a: Die hydrographisch-chemischen Bedingungen in der westlichen und zentralen Ostsee im Jahre 1993. - Dt. Hydrogr. Z. **46**, 151-162.
- NEHRING, D., MATTHÄUS, W., LASS, H.-U., NAUSCH, G., 1994b: Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1993. - Meereswiss. Ber., Warnemünde, **7**, 1-68.
- NEHRING, D., MATTHÄUS, W., LASS, H.-U., NAUSCH, G., NAGEL, K., 1995a: Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1994. - Meereswiss. Ber., Warnemünde, **9**, 1-71.
- NEHRING, D., MATTHÄUS, W., LASS, H.-U., NAUSCH, G., NAGEL, K., 1995b: The Baltic Sea 1994 - consequences of the hot summer and inflow events. - Dt. Hydrogr. Z. **47**, 131-144.
- NEHRING, D., MATTHÄUS, W., LASS, H.-U., NAUSCH, G., NAGEL, K., 1995c: The Baltic Sea in 1995 - beginning of a new stagnation period in its central Baltic deep waters and decreasing nutrient load in its surface layer. - Dt. Hydrogr. Z. **47**, 319-327.
- NEHRING, D., MATTHÄUS, W., LASS, H.-U., NAUSCH, G., NAGEL, K., 1996: Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1995. - Meereswiss. Ber., Warnemünde, **16**, 1-43.
- REDFIELD, A. C., KETCHUM, B. H., RICHARDS, F. A., 1963: The influence of organisms on the composition of sea water. - In: HILL, M. N. (Ed.): The Sea, Vol. II. Wiley, New York, 26 - 77.
- SCHINKE, H., MATTHÄUS, W., 1998: On the causes of major Baltic inflows - an analysis of long time series. - Cont. Shelf Res., **18**, 67-97.
- SIEGEL, H., GERTH, M., SCHMIDT, T., 1996: Water exchange in the Pomeranian Bight investigated by satellite data and shipborne measurements. Cont. Shelf Res., **16**, 1793-1817.
- SIEGEL, H., MATTHÄUS, W., BRUHN, R., GERTH, M., NAUSCH, G., NEUMANN, T., POHL, C., 1998a: The exceptional Oder flood in summer 1997 - distribution patterns of the Oder discharge in the Pomeranian Bight. - Dt. Hydrogr. Z. **50**, H. 2/3 (im Druck).

- SIEGEL, H., GERTH, M., TIESEL, R., TSCHERSICH, G., 1998b: Seasonal and interannual variations in satellite derived sea surface temperature of the Baltic Sea in the 1990s. - Dt. Hydrogr. Z. 50, H. 4 (im Druck).
- SMHI, 1998: Ice conditions and sea surface temperatures. Maps No. 1 - 102, Norrköping.
- STRÜBING, K., 1998: The ice winter of 1997/98 on the German coasts between Ems and Oder, with a survey of the entire Baltic Sea. - Dt. Hydrogr. Z. 50, 81-89.
- TAUBENHEIM, J., 1969: Statistische Auswertung geophysikalischer und meteorologischer Daten. Akad. Verlags-Ges., Leipzig, 1-386.
- TIESEL, R., 1999: Temperatursummen der Lufttemperaturen an der Wetterstation Warnemünde 1946 - 1998. - Deutscher Wetterdienst, Wetterstation Warnemünde (unveröff.).
- TRUMP, 1998: Transport- und Umsatzprozesse in der Pommerschen Bucht (TRUMP) 1994 - 1996. Abschlußbericht, IOW Warnemünde, 1-32 (unveröff.).
- WASMUND, N., NAUSCH, G., MATTHÄUS, W., 1998: Phytoplankton spring blooms in the southern Baltic Sea - spatio-temporal development and long-term trends. - J. Plankton Res., 20, 1099-1117.

Meereswissenschaftliche Berichte

MARINE SCIENCE REPORTS

- 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 mesoskaliger Strom- und Massfelder 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-Cs-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
- 8 (1995) Hagen, Eberhard; John, Hans-Christian:
Hydrographische Schnitte im Ostrandstromsystem vor Portugal und Marokko 1991 - 1992
- 9 (1995) Nehring, Dietwart; Matthäus, Wolfgang; Lass, Hans Ulrich; Nausch, Günther; Nagel, Klaus:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1994
Seifert, Torsten; Kayser, Bernd:
A high resolution spherical grid topography of the Baltic Sea
- 10 (1995) Schmidt, Martin:
Analytical theory and numerical experiments to the forcing of flow at isolated topographic features
- 11 (1995) Kaiser, Wolfgang; Nehring, Dietwart; Breuel, Günter; Wasmund, Norbert; Siegel, Herbert; Witt, Gesine; Kerstan, Eberhard; Sadkowiak, Birgit:
Zeitreihen hydrographischer, chemischer und biologischer Variablen an der Küstenstation Warnemünde (westliche Ostsee)

- Schneider, Bernd; Pohl, Christa:
Spurenmetallkonzentrationen vor der Küste Mecklenburg-Vorpommerns
- 12 (1996) Schinke, Holger:
Zu den Ursachen von Salzwassereinbrüchen in die Ostsee
- 13 (1996) Meyer-Harms, Bettina:
Ernährungsstrategie calanoider Copepoden in zwei unterschiedlich trophierten Seegebieten der Ostsee (Pommernbucht, Gotlandsee)
- 14 (1996) Reckermann, Marcus:
Ultraplankton and protozoan communities and their interactions in different marine pelagic ecosystems (Arabian Sea and Baltic Sea)
- 15 (1996) Kerstan, Eberhard:
Untersuchung der Verteilungsmuster von Kohlenhydraten in der Ostsee unter Berücksichtigung produktionsbiologischer Meßgrößen
- 16 (1996) Nehring, Dietwart; Matthäus, Wolfgang; Lass, Hans Ulrich; Nausch, Günther; Nagel, Klaus:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1995
- 17 (1996) Brosin, Hans-Jürgen:
Zur Geschichte der Meeresforschung in der DDR
- 18 (1996) Kube, Jan:
The ecology of macrozoobenthos and sea ducks in the Pomeranian Bay
- 19 (1996) Hagen, Eberhard (Editor):
GOBEX - Summary Report
- 20 (1996) Harms, Andreas:
Die bodennahe Trübezone der Mecklenburger Bucht unter besonderer Betrachtung der Stoffdynamik bei Schwermetallen
- 21 (1997) Zülicke, Christoph; Hagen, Eberhard:
GOBEX Report - Hydrographic Data at IOW
- 22 (1997) Lindow, Helma:
Experimentelle Simulationen windangeregter dynamischer Muster in hochauflösenden numerischen Modellen
- 23 (1997) Thomas, Helmuth:
Anorganischer Kohlenstoff im Oberflächenwasser der Ostsee
- 24 (1997) Matthäus, Wolfgang; Nehring, Dietwart; Lass, Hans Ulrich; Nausch, Günther; Nagel, Klaus; Siegel, Herbert:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1996
- 25 (1997) v. Bodungen, Bodo; Hentzsch, Barbara (Herausgeber):
Neue Forschungslandschaften und Perspektiven der Meeresforschung - Reden und Vorträge zum Festakt und Symposium am 3. März 1997.
- 26 (1997) Lakaschus, Sönke:
Konzentrationen und Depositionen atmosphärischer Spurenmetalle an der Küstenstation Arkona
- 27 (1997) Löffler, Annetrin:
Die Bedeutung von Partikeln für die Spurenmetallverteilung in der Ostsee, insbesondere unter dem Einfluß sich ändernder Redoxbedingungen in den zentralen Tiefenbecken
- 28 (1998) Leipe, Thomas; Eidam, Jürgen; Lampe, Reinhard; Meyer, Hinrich; Neumann, Thomas; Osadczuk, Andrzej; Janke, Wolfgang; Puff, Thomas; Blanz, Thomas; Gingele, Franz Xaver; Dannenberger, Dirk; Witt, Gesine:
Das Oderhaff. Beiträge zur Rekonstruktion der holozänen geologischen Entwicklung und anthropogenen Beeinflussung des Oder-Ästuars.

- 29 (1998) Matthäus, Wolfgang; Nausch, Günther; Lass, Hans Ulrich; Nagel, Klaus; Siegel, Herbert:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1997
- 30 (1998) Fennel, Katja:
Ein gekoppeltes, dreidimensionales Modell der Nährstoff- und Planktondynamik für die westliche Ostsee
- 31 (1998) Lemke, Wolfram:
Sedimentation und paläogeographische Entwicklung im westlichen Ostseeraum (Mecklenburger Bucht bis Arkonabecken) vom Ende der Weichselvereisung bis zur Litorinatransgression
- 32 (1998) Wasmund, Norbert; Alheit, Jürgen; Pollehne, Falk; Siegel, Herbert; Zettler, Michael L.:
Ergebnisse des Biologischen Monitorings der Ostsee im Jahre 1997 im Vergleich mit bisherigen Untersuchungen
- 33 (1998) Mohrholz, Volker:
Transport- und Vermischungsprozesse in der Pommerschen Bucht
- 34 (1998) Emeis, Kay-Christian; Struck, Ulrich (Editors):
Gotland Basin Experiment (GOBEX) - Status Report on Investigations concerning Benthic Processes, Sediment Formation and Accumulation
- 35 (1998) Matthäus, Wolfgang; Nausch, Günther; Lass, Hans Ulrich; Nagel, Klaus; Siegel, Herbert:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1998