

Meereswissenschaftliche Berichte
MARINE SCIENCE REPORTS

No. 49

Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2001

von

Günther Nausch, Rainer Feistel, Hans Ulrich Lass, Klaus Nagel, Herbert Siegel

S. 2 - 77

Die Schwermetall-Situation in der Ostsee im Jahre 2001

von

Christa Pohl und Ursula Hennings

S. 78 - 102

Institut für Ostseeforschung
Warnemünde
2002

NAUSCH, G.; FEISTEL, R.; LASS, H.U.; NAGEL, K.; SIEGEL, H.:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2001

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenfassung	4
Summary	5
1. Einleitung	6
2. Meteorologische Bedingungen	8
3. Wasseraustausch durch die Ostseezugänge	16
3.1 Beobachtungen an der Meßplattform „Darßer Schwelle“	16
3.1.1 Wassertemperatur, Salzgehalt und Sauerstoffgehalt	16
3.1.2 Strömung	22
4. Beobachtungen an der Bojenstation „Oder Bank“	24
5. Hydrographisch- chemische Bedingungen	26
5.1. Wassertemperatur	26
5.1.1 Jahresgang der Oberflächentemperatur	27
5.1.2 Vertikalverteilung der Wassertemperatur	31
5.2 Salzgehalt	35
5.3 Sauerstoff und Schwefelwasserstoff	38
5.4 Anorganische Nährstoffe	45
5.5 Natürliche organische Nährstoffe	57
Danksagung	74
Literaturverzeichnis	74

Zusammenfassung

Der Winter 2000/2001 war mit nur geringer Eisbildung in der südlichen Ostsee der vierte milde Winter in Folge. Er reiht sich damit in eine Periode relativ eisarmer Winter ein, die seit 1987/88 anhält. In der nördlichen Ostsee entsprach die maximale Ausdehnung des Eises dagegen weitgehend normalen Verhältnissen. Da auch der Sommer überdurchschnittlich warm war, ist das Jahr 2001 das achtwärmste in Norddeutschland seit 55 Jahren. Die stärksten positiven Abweichungen zeigte der Oktober, der damit der wärmste Oktober seit mindestens 55 Jahren war. Infolge des milden Winters lagen die Temperaturen des Oberflächenwassers im Januar bis 2 K über dem langjährigen Mittelwert. Das Jahresminimum wurde erst im März erreicht, was seit 1990 nicht oft zu verzeichnen war. Der warme Sommer führte erneut zu positiven Anomalien bis 3 K im Juli. Ab August lagen die Oberflächentemperaturen im Bereich der langjährigen Erwartungswerte. Die Temperaturen des Tiefenwassers liegen auf Grund der Einstrome warmen Wassers, insbesondere im Jahr 1997, noch deutlich über den langjährigen Mittelwerten. Im östlichen Gotlandbecken wurden die Maximalwerte jedoch nicht mehr erreicht. Im Landsort- und Karlsötief erreichten die Temperaturen dagegen im Jahr 2001 in 400 m bzw. 100 m Tiefe mit 5,24 °C und 4,66 °C die höchsten Werte seit Jahren.

Das Jahr 2001 war erneut nur durch schwache Einstromaktivität gekennzeichnet. Lediglich im Oktober/November konnte ein stärkeres Einstromereignis beobachtet werden. Hierbei gelangten innerhalb von 16 Tagen ca. 200km³ Wasser in die zentralen Becken der Ostsee. Effekte konnten bereits im Dezember 2001 im Bornholmbecken registriert werden, wo der Sauerstoffgehalt des Tiefenwassers rasch auf 4,68 ml/l anstieg. Im Januar 2002 machte sich der Einstrom auch kurzzeitig im östlichen Gotlandbecken bemerkbar.

Dessen ungeachtet hält die 1995 begonnene Stagnationsperiode in den Tiefenbecken der zentralen Ostsee unvermindert an. Im östlichen Gotlandbecken herrschten zwischen 125 m Tiefe und dem Meeresboden anoxische Verhältnisse, wobei die Schwefelwasserstoffkonzentrationen in der bodennahen Schicht bereits in der gleichen Größenordnung lagen wie sie am Ende der letzten lang anhaltenden Stagnationsperiode im Jahre 1992 gemessen wurden. Dies trifft auch auf die Ammonium- und Phosphatkonzentrationen des bodennahen Wasserkörpers zu. Auch im westlichen Gotlandbecken setzte sich die Stagnationsperiode fort. Im Landsorttief herrschten ganzjährig anoxische Bedingungen während im Karlsötief noch bis Mai Sauerstoff gefunden wurde. Hier wurde erstmals ein negativer Jahresmittelwert für Sauerstoff errechnet. Die Mächtigkeit der schwefelwasserstoffhaltigen Schicht betrug im November 2001 im Landsorttief ca. 330 m und im Karlsötief ca. 20 m.

Die Nährstoffkonzentrationen des winterlichen Oberflächenwasser können als Eutrophierungsanzeiger genutzt werden. Die anorganischen Stickstoffkomponenten befinden sich seit Anfang der 1990er Jahre auf einem einheitlichen Niveau, hier sind keine Veränderungen sichtbar. Für Phosphat konnte in der 2. Hälfte der 1990er Jahre in vielen Seegebieten ein Rückgang beobachtet werden. Diese Tendenz wurde im Winter 1999/2000 unterbrochen. Im Winter 2000/2001 lagen die Konzentrationen mit Ausnahme des Bornholmbeckens jedoch wieder auf einem relativ niedrigen Niveau. Ein weiterer Rückgang ist jedoch nicht zu erwarten. Auch muss der auf Grund der Anoxie erhöhte Phosphorpool des Tiefenwassers beachtet werden, der unter bestimmten hydrographischen Bedingungen zu einer erhöhten Nährstoffversorgung des Oberflächenwassers führen kann. Erstmals können auch über einen längeren Zeitraum gemittelte Konzentrationen für verschiedene natürliche organische Verbindungen angegeben werden. So

liegt der mittlere Gehalt an partikulärem organischen Kohlenstoff (POC) der Ostsee bei 26,8 $\mu\text{mol/l}$ (Oberflächenschicht) bzw. 24,6 $\mu\text{mol/l}$ (bodennahe Wasserschicht), wobei an der Oberfläche eine ausgeprägte Saisonalität zu beobachten ist. Für den gelösten organischen Kohlenstoff (DOC) sind die saisonalen Schwankungen vergleichsweise gering. Die durchschnittlichen Konzentrationen liegen in der Oberflächenschicht bei 312 $\mu\text{mol/l}$, im bodennahen Wasserkörper bei 272 $\mu\text{mol/l}$.

Summary

The winter 2000/2001 was characterized by only minor ice coverage in the southern Baltic Sea and was the fourth mild winter after each other. The winter belongs to a period of relative mild winters which started 1987/1988. In the northern Baltic Sea the maximum ice coverage was normal. Because also the summer was warmer than the average the year 2001 was the eight warmest in northern Germany since 55 years. The strongest positive anomalies of the air temperature were observed in October making this month to the warmest October at least for the last 55 years. Due to the mild winter the surface temperature in January was 2 K above the long-term mean. The minimum temperature was observed not before March which occurred only seldom since 1990. The warm summer resulted in positive water temperature anomalies up to 3 K in July. From August onwards the surface temperatures were on average. The deep water temperatures of the central Baltic Sea were still high due to the inflows of warm water, especially in 1997. In the eastern Gotland Basin maximum values of the years before were not reached. In the Landsort and Karlsö Deep, however, temperatures measured in the 400 m and 100 m level respectively were with 5,24 °C and 4,66 °C the highest of the last years.

Again, in the year 2001 only low inflow activity across the sills was detected. Only in October/November a stronger inflow event occurred. Within 16 days around 200 km³ were flowing into the central Baltic Sea causing a rapid increase of the oxygen content in the deep water of the Bornholm Basin up to 4,68 ml/l in December. In January 2002 the effects of this inflow were registered shortly in the eastern Gotland Basin.

Despite that, the stagnation period which started in 1995 continues in the central Baltic Sea deep basins. In the eastern Gotland Basin, the anoxic water covered the layer between 125 m and the bottom whereby the hydrogen sulphide concentrations in the bottom-near layer were comparable to the concentrations measured at the end of the long lasting stagnation period in 1992. This is also valid for the phosphate and ammonium concentrations. The stagnation period continues also in the western Gotland Basin. In the Landsort Deep, hydrogen sulphide is present all the year round. In the Karlsö Deep low oxygen concentrations were found until May followed by anoxic conditions in the rest of the year. For the first time a negative annual mean for oxygen was calculated in the 100 m-level. The thicknesses of the hydrogen sulphide containing layers in November were 330 m and 20 m in the Landsort and Karlsö Deep, respectively.

Nutrient concentrations in the mixed winter surface layer are used as indicator for eutrophication. The inorganic nitrogen compounds are on a similar level since the beginning of the 1990s, no trends can be observed. For phosphate a decreasing trend was detected in many sea areas in the 2nd half of the 1990s. This trend was interrupted in the winter 1999/2000. In the winter 2000/2001 phosphate concentrations were, with the exception of the Bornholm Basin, again on a relative low level. However, a further decrease cannot be expected. Additionally the higher

phosphate pool in the deep water due to the anoxic conditions has to be taken into account. This pool can lead under given hydrographic circumstances to an additional phosphate supply to the surface water. For the first time, mean concentrations for different natural organic substances averaged over a longer period of time can be given. The mean content of particulate organic carbon (POC) in the Baltic Sea is 26,8 $\mu\text{mol/l}$ (surface layer) and 24,6 $\mu\text{mol/l}$ (bottom-near layer). In the surface layer a pronounced seasonality can be seen. For dissolved organic carbon (DOC) seasonal variability is comparatively low. The mean concentrations are 312 $\mu\text{mol/l}$ in the surface layer and 272 $\mu\text{mol/l}$ in the bottom-near layer.

1. Einleitung

Die Einschätzung des hydrographisch-hydrochemischen Zustandes der Ostsee im Jahre 2001 erfolgte im wesentlichen auf der Basis 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 wird dem IOW der deutsche Beitrag für das Überwachungsprogramm (COMBINE) 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.

Im Jahre 2001 wurden fünf Monitoring-Fahrten durchgeführt, die alle vier Jahreszeiten sowie zusätzliche Beobachtungen im März/April umfassten. Die Zustandseinschätzung basiert auf den Daten, die im Rahmen dieser Überwachungsfahrten gewonnen wurden sowie auf Ergebnissen anderer Forschungsarbeiten des IOW. Ausgewählte Daten von Forschungseinrichtungen anderer Ostseeanliegerstaaten, insbesondere des *Schwedischen Meteorologischen und Hydrologischen Instituts* (SMHI) wurden in die Auswertung einbezogen. Die Lage der wesentlichsten Stationen, die in die nachfolgenden Auswertungen einbezogen wurden, ist aus Abb. 1 zu entnehmen. Die internationale Zuordnung dieser Stationen ist bei MATTHÄUS et al. (1999b) zusammengestellt. Grundlage des hydrographisch-chemischen Standard-Messprogramms, das mit den Forschungsschiffen „A.v.Humboldt“ und „Gauss“ durchgeführt wurde, sind die Richtlinien der HELCOM für die Überwachung der Ostsee im Rahmen des COMBINE-Programms (HELCOM, 2000). 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. DS) und in der Pommerschen Bucht (Messboje; Stat. OB „Oder Bank“) liegen (vgl. Abb. 1). Neben meteorologischen Parametern wurden an diesen Stationen die Wassertemperatur und der Salzgehalt in 6 bzw. 4 Tiefen (Darßer Schwelle) und 2 Tiefen (Oder Bank) sowie der Sauerstoffgehalt in jeweils 2 Tiefen registriert. Alle Daten werden als Stundenmittel aus 6 Messungen telemetrisch via Wettersatellit (METEOSAT) an die Datenbank des BSH übertragen (KRÜGER et al., 1998; KRÜGER, 2000a, b). Angaben über die Strömungsverhältnisse im Bereich der Darßer Schwelle liefert ein selbstregistrierender akustischer Doppler-Profil-Strömungsmesser (ADCP).

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., 1999).

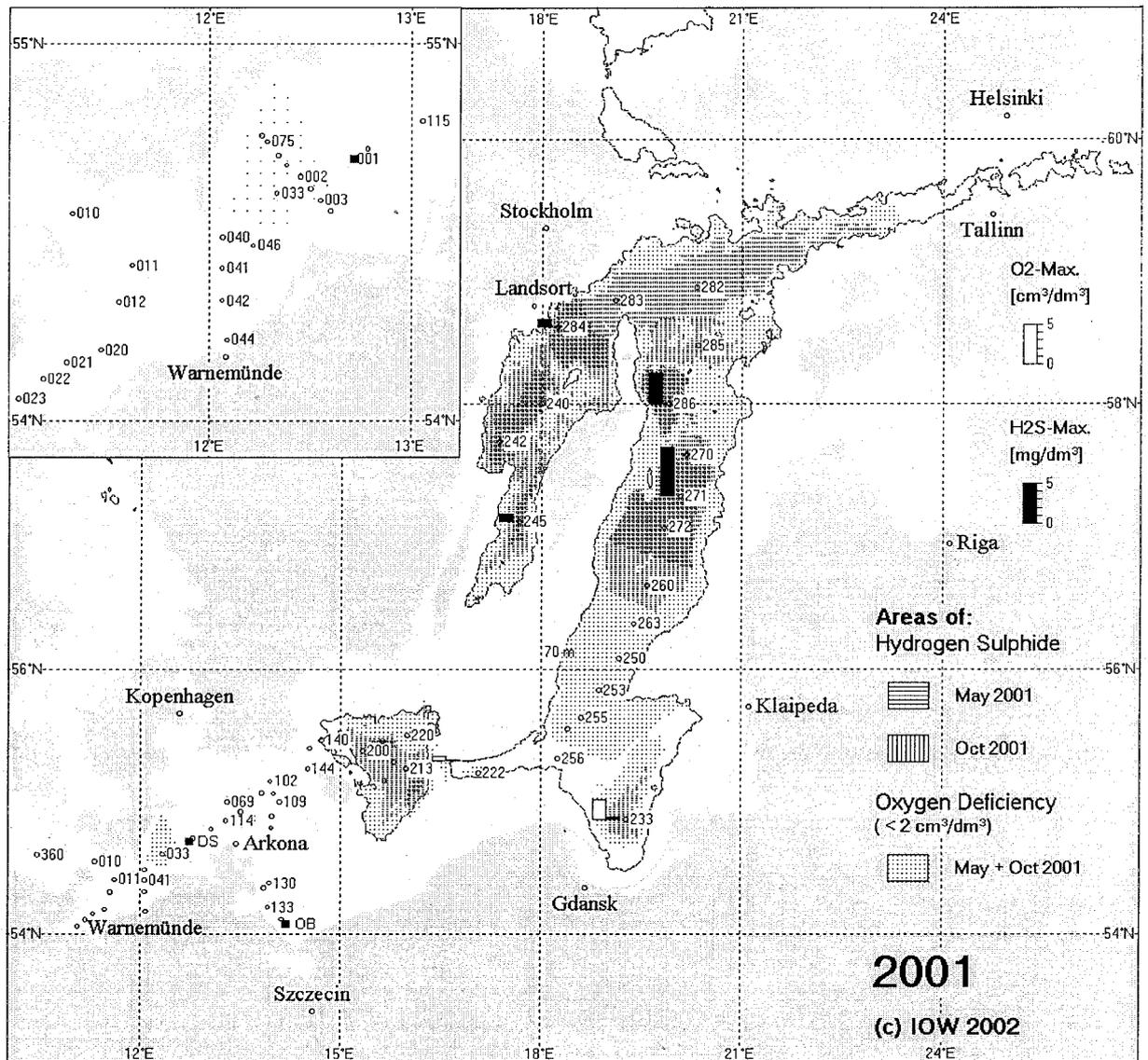


Abb. 1

Stationskarte (• MARNET-Stationen) und Gebiete mit Sauerstoffmangel und Schwefelwasserstoff in der grundnahen Wasserschicht der Ostsee sowie maximale Sauerstoff- und Schwefelwasserstoffkonzentrationen an ausgewählten Stationen (Histogramme) im Jahre 2001; die Abb. enthält zusätzlich die 70 m - Tiefenlinie bzw. die 20 m - Tiefenlinie (Bildausschnitt)

Fig. 1

Location of stations (• MARNET-stations) and areas of oxygen deficiency and hydrogen sulphide in the near bottom layer of the Baltic Sea in 2001. Histograms show the maximum oxygen and hydrogen sulphide concentrations of this layer in 2001; the figure contains additionally the 70 m – depth line resp. 20 m – depth line (small picture)

2. Meteorologische Bedingungen

Der Witterungsverlauf des Jahres 2001 in der südlichen Ostsee kann durch die Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD, 2001) an der Wetterstation Arkona auf Rügen, die Wärme- und Kältesummen der Wetterstation Warnemünde (TIESEL, 2002a) sowie den Verlauf des Eiswinters beschrieben werden. Tabelle 1 enthält die Kälte- und Wärmesummen zusammen mit dem langjährigen Mittel. Tabelle 2 zeigt die Abweichungen der Temperatur, der Sonnenscheindauer und der Niederschlagshöhe vom langjährigen Mittelwert.

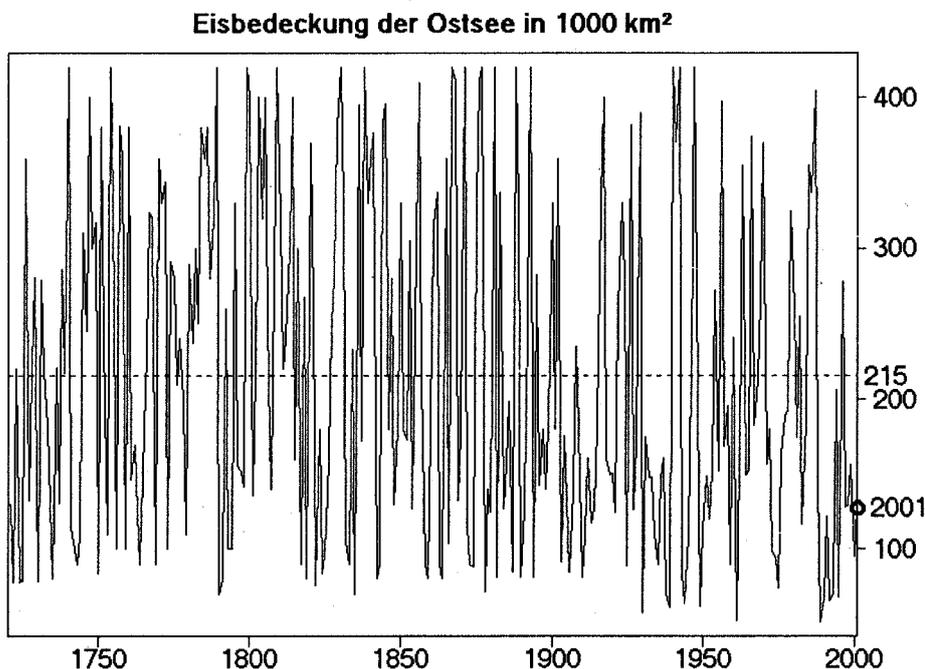


Abb. 2
Maximale Eisbedeckung der Ostsee in 1000 km² in den Jahren 1720 bis 2001 nach Daten des FMI (FMI, 2001b). Der Langzeit-Mittelwert von 215 000 km² ist gestrichelt dargestellt. Der Kreis zeigt den Winter 2000/2001 mit 128 000 km²

Fig. 2
Maximum ice covered area in 1000 km² of the Baltic Sea in the years 1720 to 2001 after data of FMI (FMI, 2001b). The long-time average of 215,000 km² is shown as dashed line. The winter 2000/2001 with 128,000 km² is encircled

Der Winter 2000/2001 war der vierte milde Winter mit geringer Eisbildung an deutschen Küsten in Folge (BSH, 2001a). In der nördlichen Ostsee dagegen entsprach die maximale Ausdehnung des Eises, die am 26. März 2001 auftrat, weitgehend normalen Verhältnissen (SMHI, 2001a). Jedoch setzte die Eissaison erst Ende November ein und war mit ca. 4 Wochen verringerter Dauer ungewöhnlich kurz (FMI, 2001a). In der Bottenwiek erreichte die Eisdicke 30-50 cm. Die Bottensee, der Finnische und Rigaer Meerbusen froren etwa zur Hälfte zu (Abb. 12a), wobei in der südlichen Ostsee noch Oberflächentemperaturen von über 3 °C in der Arkonasee und im Gebiet Stolper Rinne/Danziger Bucht herrschten. Die Eisbildung des folgenden Winters 2001/2002 begann dagegen am 6. November 2001 in der Bottenwiek bereits eine Woche früher

als normal (BSH, 2001b). Im klimatischen Vergleich seit 1720 war die Bedeckung mit 128 000 km² zwar relativ gering, aber nicht außergewöhnlich (Abb. 2, FMI, 2001b). Sie gehört jedoch zu einer längeren Periode relativ eisarmer Winter ohne größere geschlossene Eisdecke in der südlichen Ostsee seit 1987/88, wie sie erst zweimal, und zwar in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts, in ähnlicher Form beobachtet wurden.

Das Jahr 2001 war mit +0,8 K Abweichung in Arkona (vgl. Tabelle 2) nach 2000, 1990, 1999, 1989, 1992, 1994 und 1949 das achtwärmste in Norddeutschland seit 55 Jahren (TIESEL, 2002b).

Die stärksten positiven Abweichungen zeigte der Oktober mit +2,3 K. Er war damit der wärmste Oktober seit mindestens 55 Jahren. Durch das Ausbleiben der sommerlichen Monsunströmung vom Atlantik („Siebenschläfer“) wurde auch der Juli mit 19,1 °C Mitteltemperatur in Warnemünde (TIESEL, 2002b) und +2,1 K über Normal in Arkona zum fünftwärmsten seit 1947. Kälteste Monate mit -0,7 K waren der Juni und der Dezember.

Die Kältesummen des Winters 2000/2001 lagen deutlich unter den langjährigen Mittelwerten, insbesondere der Januar erreichte mit 11 Kd nur ein Viertel der normalen Summe von 43 Kd (Tabelle 1). Der Winter insgesamt war mit 46 Kd zwar mild im Vergleich zum klimatischen Durchschnittswert von 119 Kd, jedoch nicht außergewöhnlich mild. Er fiel deutlich kälter aus als der extrem milde Winter 1999/2000, der mit nur 11 Kd über alle Wintermonate den niedrigsten Wert des vergangenen Jahrhunderts erreichte (MATTHÄUS et al., 2001). Die Beurteilung des Winters mittels Kältesummen von Warnemünde ist sehr ähnlich zu der oben gegebenen, die auf Basis der Vereisung der gesamten Ostsee basiert.

Tab. 1

Summen der Tagesmittel der Lufttemperatur an der Wetterstation Warnemünde (TIESEL, 2002a). Die Kältesumme (KS) ist das Zeitintegral der Lufttemperatur unterhalb der Linie $t = 0$ °C, in K * d, die Wärmesumme (WS) das entsprechende Integral oberhalb der Linie $t = 16$ °C. Zum Vergleich sind die entsprechenden Mittelwerte 1961 bis 1990 angegeben

Table 1

Sums of daily mean air temperatures at the weather station Warnemuende (TIESEL, 2002a). The 'cold sum' (KS) is the time integral of air temperatures below the line $t = 0$ °C, in K * d, the 'heat sum' (WS) is the corresponding integral above the line $t = 16$ °C. For comparison, the corresponding mean values 1946 till 2000 are given

Monat	KS 2000/01	Mittelwert	Monat	WS 2001	Mittelwert
November		3,1	April		0,3
Dezember	7,6	23,6	Mai	0,5	5,2
Januar	11,5	43,2	Juni	14,8	19,2
Februar	21,1	38,4	Juli	99,5	41,6
März	6,0	10,4	August	83,0	38,2
April		0,1	September	1,4	7,7
			Oktober	0,9	0,5
Σ 2000/2001	46,2	118,8	Σ 2001	200,1	112,7

Tab. 2

Anomalien der Monatsmittel der Temperatur (T_L , in K), prozentualer Anteil der monatlichen Sonnenscheindauer (SD, in %) und der Niederschlagsmenge (NH, in %) an der Wetterstation Arkona im Jahr 2001 bezogen auf das vieljährige Mittel 1961-1990 (DWD, 2001). Minimale und maximale Werte hervorgehoben

Table 2

Anomalies of the monthly mean temperatures (T_L , in K), percentage of the monthly sunshine duration (SD, in %), and of the precipitation level (NH, in %) at the weather station Arkona in the year 2001, relative to the long-time average 1961-1990 (DWD, 2001). Minimum and maximum values in bold

Monat	T_L / K	SD / %	NH / %
Januar	+1,6	116	57
Februar	+1,2	158	104
März	+0,1	109	59
April	+0,5	85	147
Mai	+1,6	124	81
Juni	-0,7	91	98
Juli	+2,1	119	49
August	+1,5	95	162
September	-0,4	57	261
Oktober	+2,3	94	70
November	+0,4	113	64
Dezember	-0,7	55	105
Mittel	+0,8	101	105

Die höchste Abweichung von der mittleren Sonnenscheindauer trat mit 158 % im Februar auf, die geringsten Werte wurden mit 55 % im Dezember erreicht. Dem widerspricht die Tatsache nicht, dass der Februar der kälteste Monat des Winters war, da klarer Himmel in der Nacht zu verstärkter Abstrahlung führt und diese im Winter nicht durch die tagsüber eingestrahlte Sonnenenergie kompensiert werden kann. Hinzu kommt natürlich die geographische Lage der südlichen Ostsee, bei der klarer Himmel häufig mit Hochdrucklagen und östlichen Winden einhergeht, die kalte kontinentale Luft herantransportieren können. Aber obwohl der Februar relativ kalt war, lag seine Durchschnittstemperatur in Arkona noch 1,2 K über dem langjährigen Mittel (Tab. 1).

Ausgesprochen regenreich war der September mit 261 % des normalen Wertes, während der Juli mit 49% besonders trocken ausfiel. Gleichzeitig war der September recht kühl (-0,4 K in Arkona) und sonnenscheinarm (57 %), während der Juli sehr warm (+2,1 K) und sonnig (119 %) verlief. Ebenfalls sonnenreich (124 %) und warm (+1,6 K) war der Mai, dem ein ausgesprochen kühler Juni (-0,7 K) folgte. Auf das gesamte Jahr gesehen jedoch waren - im Gegensatz zur Temperatur mit einem Plus von 0,8 K - die Niederschlagsmengen (105 %) nur leicht erhöht und die Sonnenscheindauer (101 %) etwa durchschnittlich. Die Wärmesummen in Juli und August fielen für Warnemünde ungewöhnlich hoch aus (vgl. Tabelle 1), sie betragen mehr als das doppelte der Durchschnittswerte.

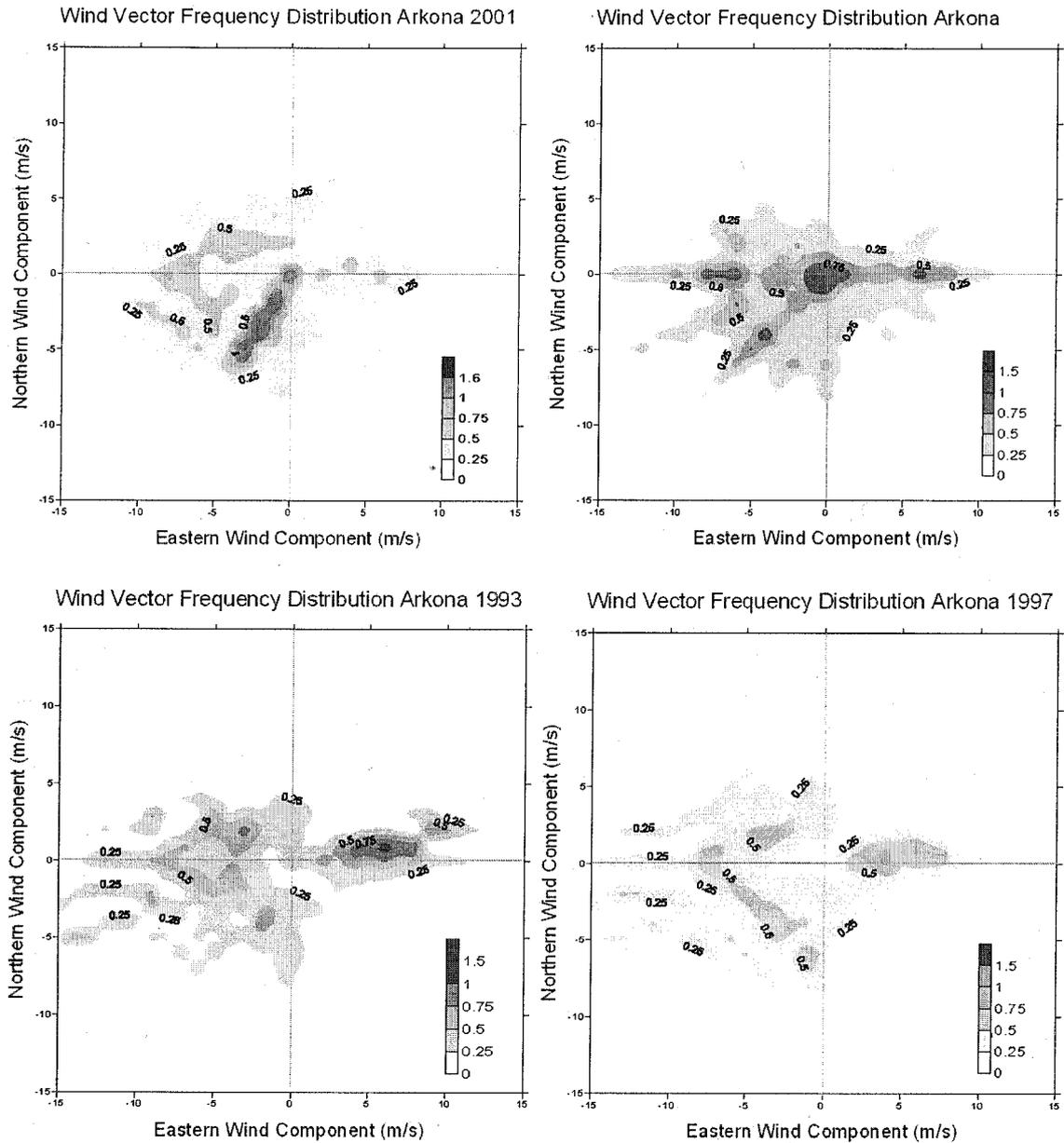


Abb. 3

Häufigkeitsdichteverteilungen $p(v)$ des Windvektors v (in m/s) an der Wetterstation Arkona (nach Daten des DWD, 2001), in $0,01 \text{ s}^2/\text{m}^2$, positiv aus nördlichen und östlichen Richtungen. Links oben: 2001, rechts oben: Langzeitverteilung 1951-2001, links unten: 1993, rechts unten: 1997

Fig. 3

Frequency density distribution $p(v)$ of the wind vector v (in m/s) at the weather station Arkona (after data of DWD, 2001), in $0,01 \text{ s}^2/\text{m}^2$, positive in northerly and easterly directions. Upper left: 2001, upper right: long-time distribution 1951-2001, lower left: 1993, lower right: 1997

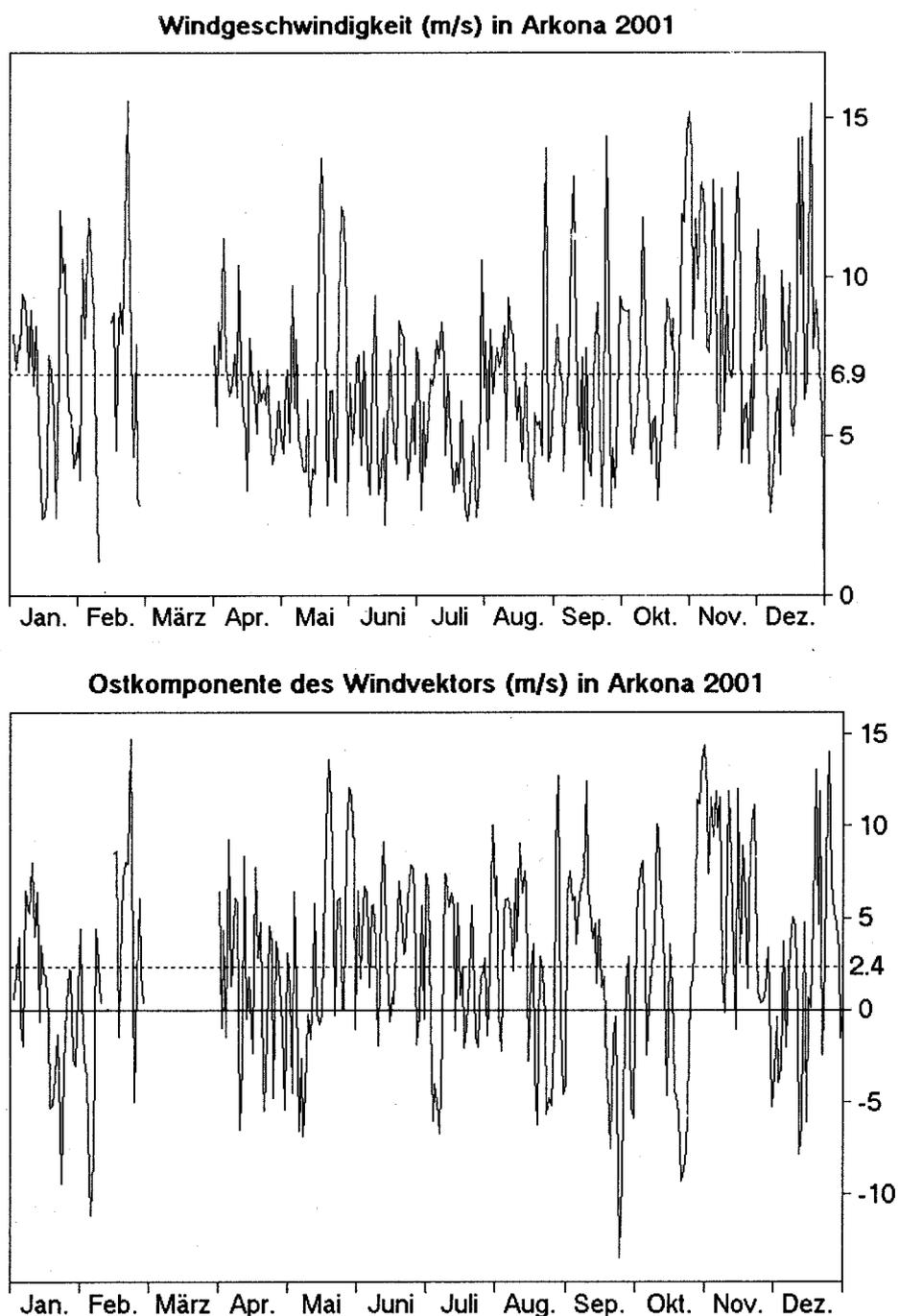


Abb. 4
Windmessungen an der Wetterstation Arkona (nach Daten des DWD, 2002). Oben: Tagesmittelwerte der Windgeschwindigkeit in m/s, Jahresmittelwert 6,9 m/s gestrichelt. Unten: Tagesmittelwerte der Ostkomponente (Westwind positiv), Jahresmittelwert 2,4 m/s ist gestrichelt

Fig. 4
Wind measurements at the weather station Arkona (after data of DWD, 2002). Above: Daily means of wind speed, in m/s, the dashed line is the annual average of 6.9 m/s. Below: Daily means of the eastern component (westerly wind positive), the dashed line is the annual average of 2.4 m/s

Die Aufzeichnung der Windgeschwindigkeiten an der Wetterstation Arkona des Deutschen Wetterdienstes (DWD, 2002) weist für März eine Lücke auf. Aus dem Jahresgang mit stärkeren Winden im Winter und schwächeren im Sommer heben sich der Mai (16,4 m/s am 18.5. und 16,7 m/s am 29.5.) und August/September (17,5 m/s am 28.8. und 16,6 m/s am 9.9.) mit starken Winden in normalerweise zumeist ruhigen Monaten heraus. Die durchschnittliche Windgeschwindigkeit von 6,9 m/s liegt leicht unter dem Wert des Vorjahres (7,4 m/s, MATTHÄUS et al., 2001).

Starke Ostwinde traten am 24. September (19,7 m/s im Stundenmittel) und am 1. Februar (19,6 m/s) auf. Die häufigsten und stärksten Stürme jedoch kamen erwartungsgemäß von West mit Spitzen von 24,3 m/s am 25. Dezember, 21,1 m/s am 15. November und 20,9 m/s am 31. Oktober. Windspitzen über 30 m/s und Tagesmittel von 19 m/s wie im vorangegangenen Jahr (MATTHÄUS et al., 2001) wurden in 2001 deutlich unterschritten. Die Häufigkeitsverteilung des Windvektors v von Arkona ist in Abb. 3a über der östlichen Komponente (x -Achse, Ostwind positiv) und der nördlichen Komponente (y -Achse, Nordwind positiv) als Dichte $p(v)$ dargestellt.

Besonders markant ist das häufige Auftreten von Winden mit Vorzugsrichtung aus SSW mit Stärken zwischen 0 und 10 m/s. Die Verteilung über die letzten 50 Jahre (Abb. 3b) zeigt dagegen eine etwa gleiche Wahrscheinlichkeit für Windrichtungen von West bis Südwest, stärkere Winde bis 15 m/s aus West, und relativ häufigen Ostwind. Selten sind dagegen Nord-, Nordost- und Südostwind. Ebenfalls dargestellt sind in Abb. 3c und 3d die entsprechenden Verteilungen für 1993 und 1997, d.h. die Jahre, in denen zuletzt größere Einstromereignisse aus der Nordsee beschrieben worden sind (NEHRING et al., 1995a, MATTHÄUS et al., 1999a, HAGEN and FEISTEL, 2001). Beide ähneln einander mit starken und häufigen Winden um West (-10 bis -15 m/s), einer deutlichen reinen Ostkomponente, sowie dem Fehlen von Winden aus NO und SO.

Der Füllungsgrad der Ostsee wird gut durch den Pegel an der schwedischen Station Landsort wiedergegeben (Abb. 5a, nach Daten des SMHI, 2002). Abgesehen von kurzen Ausnahmen, lag der Pegel von Ende Januar bis Ende Mai im Schnitt 10 cm unter dem Jahresmittel, der niedrigste Pegel des ganzen Jahres trat am 30. und 31. März mit 145 cm (35 cm unter Normal) auf. Über den Sommer (Juni bis August) war der Füllungsgrad ausgeglichen und stieg im Herbst (September bis Dezember) mit starken Schwankungen auf durchschnittlich fast 20 cm über Normal. Der höchste Wasserstand des Jahres wurde am 8. und am 12. November mit 220 cm (40 cm über dem Mittelwert) registriert.

Besonders bemerkenswert ist der schnelle und starke Pegelanstieg Ende Oktober / Anfang November. Der Wasserstand der Ostsee erhöhte sich um 58 cm vom 26.10. bis zum 8.11., das entspricht einer Vergrößerung des Wasservolumens um ca. 223 km³ in 12 Tagen oder 19 km³/d, wenn man eine Oberfläche der Ostsee von 384 000 km² zu Grunde legt (HAGEN and FEISTEL, 2001).

Zunächst begann am 14.10. bei einem Pegel von 191 (11 cm erhöht) ein Ausstrom bis auf 162 (18 cm erniedrigt) am 25.10., das sind 29 cm oder 111 km^3 in 11 Tagen. An der Station Arkona wechselte der Wind am 14.10. gegen 11 Uhr auf Ost und blieb mit einer kurzen Pause am 16./17.10. bis zum 24.10. in dieser Richtung, wobei als Spitze $13,9 \text{ m/s}$ am 23.10. erreicht wurde. Dann schlug der Wind am 25.10. um 1 Uhr auf West um und erreichte mit 15 m/s am 28.10. das erste Maximum. Das zweite Maximum trat mit $18,5 \text{ m/s}$ am 30.10. bei anhaltender Westlage auf, das dritte mit $20,9 \text{ m/s}$ am 31.10., ein viertes mit $17,2 \text{ m/s}$ am 5.11. und das fünfte mit $16,8 \text{ m/s}$ am 6.11. und, nach einer Pause, ein sechstes mit $21,1 \text{ m/s}$ aus West am 15.11. Dadurch blieb der Ostseepegel nach dem schnellen Anstieg vom 18.11. mit 220 cm bis zum 23.11. mit 219 cm über 6 Tage hinweg auf einem sehr hohen Stand ohne wesentlichen zwischenzeitlichen Ausstrom.

Drei weitere relativ schnelle Anstiege des Ostseepegels fanden in 2001 statt: vom 8.2. bis 22.2. um 34 cm (entsprechend einem Wasservolumen von 131 km^3) innerhalb 14 Tagen (entsprechend etwa $8 \text{ km}^3/\text{d}$ Einstrom), vom 26.8. bis 11.9. um 43 cm (165 km^3) in 16 Tagen ($10 \text{ km}^3/\text{d}$) und vom 17.12. bis 29.12. um 39 cm (150 km^3) in 12 Tagen ($12 \text{ km}^3/\text{d}$). Filtert man die Stärke des Nordwestwinds an der Wetterstation Arkona mit einem exponentiellen Gedächtnis von 10 Tagen, so weist die resultierende Zeitreihe eine hohe Korrelation mit den um einige Stunden späteren Messungen des Wasserstands an der Station Landsort auf (HAGEN and FEISTEL, 2001).

Abb. 5b zeigt diese Kurve für das Jahr 2001 gemeinsam mit den Tagesmittelwerten der Südost-Komponente der Windgeschwindigkeit. Die einzelnen Ereignisse von Pegelanstiegen und -abfällen können der gefilterten Windstärke gut zugeordnet werden. So erreicht diese z.B. am 26.10. mit $-3,1 \text{ m/s}$ ein Minimum und steigt bis 7.11. auf ein erstes Maximum von $4,0 \text{ m/s}$, in guter Übereinstimmung mit den oben aus den Pegelwerten abgeleiteten Zeitpunkten.

Das progressive Vektordiagramm (Abb.10) der barotropen Strömung an der Darßer Schwelle liefert ebenfalls ein Maß für die Einstromdauer und -menge. Es zeigt ein Minimum von $L_1 = -1043,7 \text{ km}$ am 26.10. um 1 Uhr und ein Maximum von $L_2 = -807,6 \text{ km}$ am 11.11. um 13 Uhr. Der Vergleich mit dem Landsortpegel ergibt einen effektiven Einstromquerschnitt (einschließlich Öresund) für den Messmast von $A = V / (L_2 - L_1) = (223 - 22) \text{ km}^3 / 236 \text{ km} = 0,85 \text{ km}^2$. Dabei wurde vom Gesamtvolumen 223 km^3 der geschätzte Anteil von ca. 22 km^3 für die Süßwasserzufuhr innerhalb von 16,5 Tagen abgezogen. Der akkumulierte Einstrom durch den Öresund allein wurde mit etwa 50 km^3 vom 25.10. bis 9.11.2001 festgestellt (SMHI, 2001b).

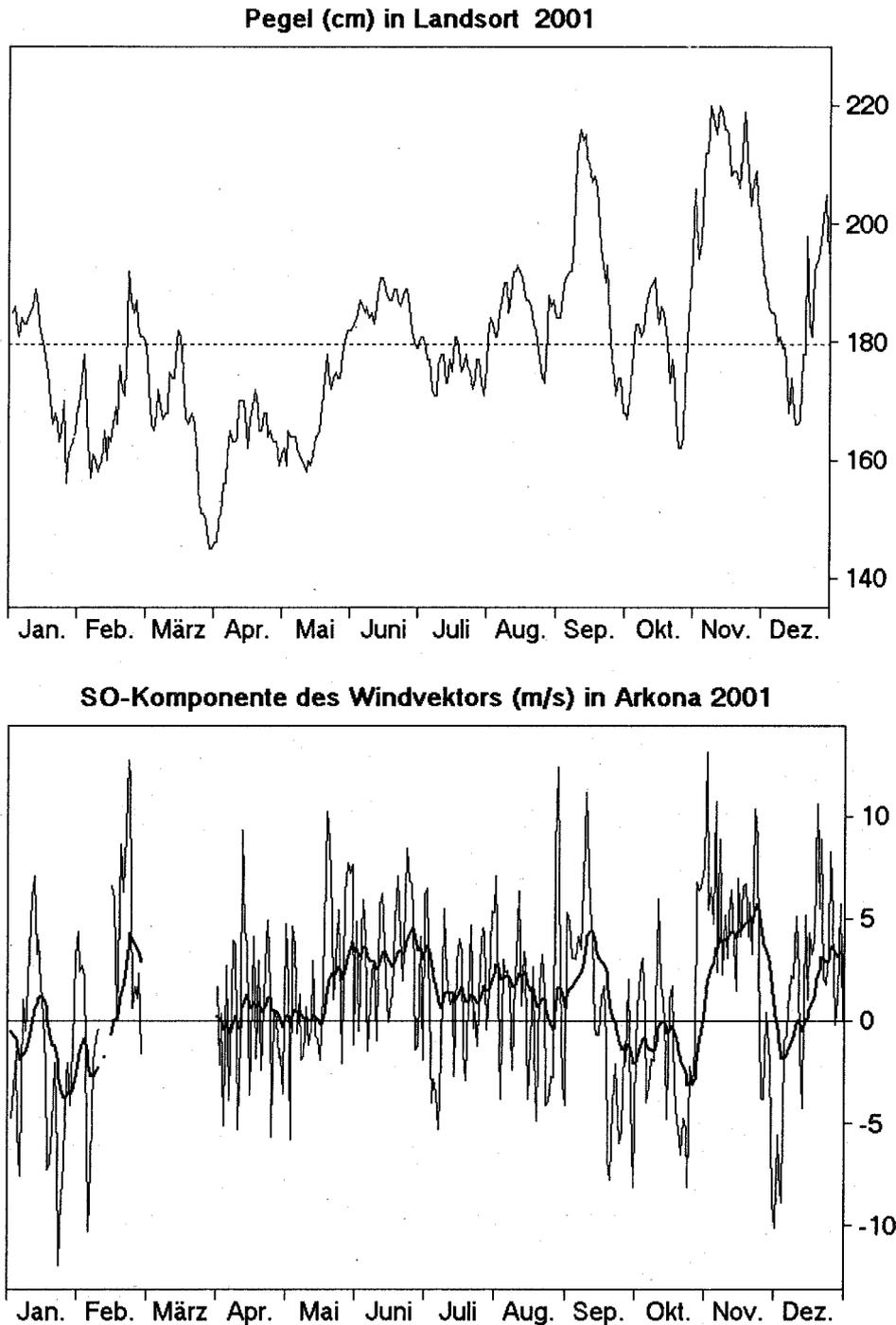


Abb. 5

Oben: Pegel bei Landsort als Maß für den Füllungsgrad der Ostsee (nach Daten des SMHI, 2002). Unten: Stärke des Nordwestwinds (positiv) an der Wetterstation Arkona (nach Daten des DWD, 2002). Die fett gezeichnete Kurve entstand durch Filterung mit einem exponentiellen 10-Tage-Gedächtnis

Fig. 5

Above: Sea level at Landsort as a measure of the Baltic Sea fill factor (after data of SMHI, 2002). Below: Strength of the north-west wind (positive) at the weather station Arkona (after data of DWD, 2002). The bold curve appeared by filtering with an exponential 10-days memory

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. DS, vgl. Abb. 1) fortgesetzt. Der Sauerstoffgehalt des Wassers wurde mit einem SEACAT-Sauerstoff-Recorder im 7 m und 19 m Tiefenniveau am Messmast gemessen. Vereinzelt Vergleichsmessungen des Sauerstoffgehalts an Wasserproben aus der Messtiefe der Geräte wurden mit Hilfe der Winklermethode (vgl. GRASSHOFF et al., 1983) während der Wartungszyklen des Messmastes durchgeführt. Die Zeitreihenmessungen des Sauerstoffs mit den SEACAT-Recordern wiesen einen Trend auf und wurden entsprechend korrigiert.

3.1.1 Wassertemperatur, Salzgehalt und Sauerstoffgehalt

Die Jahresmittel der Wassertemperatur an der Darßer Schwelle, dargestellt in Tabelle 3 und Abb. 7, wiesen 2001 sowohl in der durchmischten Deckschicht (7 m Tiefe) als auch in der bodennahen Wasserschicht (19 m Tiefe) – verglichen mit dem Zeitraum seit 1992 – über dem Durchschnitt liegende Werte auf. Die Standardabweichungen der Wassertemperatur sind in allen Tiefen nahe dem Mittelwert des Beobachtungszeitraums. Die thermische Schichtung ist 2001 verglichen mit dem Mittel seit 1992 von überdurchschnittlicher Intensität (Abb. 6A).

Die Fourieramplituden des Jahresganges der Wassertemperatur seit 1992 sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Der Jahresgang der Temperatur in der Deckschicht weist 2001 innerhalb des Beobachtungszeitraums wie die Standardabweichung einen nahe dem Mittelwert liegenden Wert auf. Der Jahresgang der Temperatur in den tiefer liegenden Schichten liegt dagegen nahe dem Minimum, was auf eine verstärkte Schichtung innerhalb des Jahres hinweist. Die Phase des Jahresganges entspricht in der gesamten Wassersäule den mittleren Werten auf der Darßer Schwelle. Die Phasenlage des Jahresganges weist darauf hin, dass die jahreszeitliche Erwärmung des Wassers im Gebiet der Darßer Schwelle zwischen Ende März und Mitte April 2001 begann. Die im Jahre 2001 beobachteten thermischen Verhältnisse im Bereich der Darßer Schwelle können als Ergebnis eines recht milden Winters 2000/2001, dem ein warmer Sommer folgte, erklärt werden (Abb. 2). Dies führte dazu, dass die Amplitude des Jahresganges der Wassertemperatur nahe dem Durchschnitt liegt und ihr Mittelwert dem der wärmeren Jahre entspricht (Tabelle 4). Der normale Anstieg der Wassertemperaturen der Deckschicht auf der Darßer Schwelle entspricht 2001 einem durchschnittlichen Wärmefluß aus der Atmosphäre in die Ostsee während des Frühjahrs. Die sommerlichen Extremwerte der Wassertemperatur auf der Darßer Schwelle waren in 2001 relativ hoch. Dies ist auf eine offensichtlich kurzfristige Erwärmung durch die Atmosphäre zurück zu führen.

Der aktuelle Verlauf der Wassertemperatur des Jahres 2001 ist für die Messtiefen 7 m und 19 m in Abb. 6A dargestellt. Das Minimum der Wassertemperatur wurde außergewöhnlich spät, nämlich Ende März 2001 mit Werten um 2,5 °C erreicht. Die thermische Schichtung der Wassersäule begann Anfang April und war bis Anfang Oktober ausgeprägt. Der Anstieg der Wassertemperatur in der Deckschicht wurde während des gesamten Sommers immer wieder durch Kaltwassereinschübe unterbrochen.

Tab. 3

Jahresmittelwerte der Wassertemperatur (T) und des Salzgehaltes (S) sowie deren Standardabweichungen auf der Darßer Schwelle. Maxima der Zeitreihe sind fett und Minima kursiv gedruckt

Table 3

Mean values and standard deviation of temperature (T) and salinity (S) at the Darss Sill of the corresponding year. Maximum values are printed bold and minimum values with italics

Jahr	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	11,9 ± 3,01	8,10 ± 3,83	12,80 ± 3,22
1999	8,83 ± 5,28	8,50 ± 1,52	7,96 ± 4,39	12,08 ± 3,97	7,72 ± 4,22	13,64 ± 4,39
2000	9,21 ± 4,27	9,40 ± 1,33	8,49 ± 3,82	11,87 ± 2,56	8,44 ± 3,81	13,16 ± 2,58
2001	9,06 ± 5,16	8,62 ± 1,29	8,27 ± 4,06	12,14 ± 3,10	8,22 ± 3,86	13,46 ± 3,06

Tab. 4

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

Table 4

Amplitude and phase of the yearly cycle of temperature measured at the Darss Sill in different depths

Jahr	7 m Tiefe		17 m Tiefe		19 m Tiefe	
	Amplitude K	Phase Monat	Amplitude K	Phase Monat	Amplitude K	Phase Monat
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	-	-
1999	7,19	4,52	5,93	4,00	5,70	3,83
2000	5,72	4,50	5,02	4,11	5,09	4,01
2001	6,96	4,46	5,35	4,01	5,11	3,94

Diese Ereignisse gingen mit anhaltenden Ostwindperioden (vgl. Abb. 4, Ostkomponente) einher und wurden durch von der Insel Hiddensee zur Darßer Schwelle vordringende Filamente mit kaltem Auftriebswasser verursacht (vgl. LASS et al., 1996), welches aus dem winterlichen Zwischenwasser des Arkonabeckens stammt. Drei besonders stark ausgeprägte Ereignisse dieser Art wurden während einer Ostwindphase im Juli 2001 beobachtet (vgl. Abb. 4). Das Maximum der Wassertemperatur in der Deckschicht wurde Ende Juli mit Werten um 19 °C erreicht. Die herbstliche Abkühlungsphase des Wassers begann auf der Darßer Schwelle in allen Tiefen bereits Anfang September. Das Wasser kühlte sich bis Ende Dezember auf rund 4 °C ab (Abb. 6A). Während der Abkühlungsphase sank die Temperatur des oberflächennahen Wassers durch den aus dem Wasser in die Atmosphäre gerichteten Wärmefluß ab Anfang Oktober 2001 unter die Temperatur der Bodenwasserschicht.

Im Jahre 2001 wies der mittlere Salzgehalt in 7 m Tiefe den zweitniedrigsten Wert innerhalb des Beobachtungszeitraums der Salzgehaltsmessungen auf der Darßer Schwelle auf (Tabelle 3 und Abb. 8). Der Salzgehalt in der Bodenschicht lag leicht unterhalb des Maximums der vorliegenden Beobachtungsreihe. Die Standardabweichungen des Salzgehaltes in der Deckschicht lagen im Bereich des Minimums und in der Bodenschicht lagen sie leicht unterhalb des Mittelwertes. In 2001 war die mittlere Schichtung bezüglich des Salzgehaltes stark ausgebildet (Tabelle 3), was auf einen andauernden baroklinen Anteil des Wasseraustausches zwischen Nord- und Ostsee von mittlerer Intensität hinweist.

Der zeitliche Verlauf des Salzgehalts im Bereich der Darßer Schwelle ist für 2001 in Abb. 6B dargestellt. Zwischen Januar und Oktober wurden im Gegensatz zu vorangegangenen Jahren (vgl. auch MATTHÄUS et al., 1996, 1998, 1999a, 2000, 2001) nur äußerst schwache barotrope Einstromereignisse in die Ostsee registriert (vgl. auch SMHI, 2001). Der Zeitraum von Januar bis Oktober war durch sehr intensive barokline Salzwassereinschübe in der bodennahen Schicht gekennzeichnet. Pulsförmige Einschübe mit erhöhtem Salzgehalt von mehr als 15 PSU in der gesamten Wassersäule, wie sie für barotrope Einstromereignisse typisch sind, wurden 2001 wie auch in 2000 gar nicht beobachtet.

Einzelne Einstromereignisse traten zwischen Januar und Oktober mit einer gewissen Regelmäßigkeit in einem Abstand von ungefähr zwei Monaten auf. Der Salzgehalt an der Oberfläche überschritt bei diesen Ereignissen nicht die 12 PSU Grenze. Bei dem stärksten Einstromereignis des Jahres 2001 im November erreichte der Oberflächensalzgehalt Maximalwerte von 14 –15 PSU bei einer Temperatur von ~ 9°C. Über die Drogden Schwelle strömte häufiger salzreiches Wasser in die Ostsee als über die Darßer Schwelle. Während aller Einstromereignisse über die Drogden Schwelle wurden auch auf der Darßer Schwelle Einstromereignisse beobachtet. Bei den Einstromereignissen über die Drogden Schwelle lag der maximale Salzgehalt zwischen 20 und 25 PSU (vgl. SMHI, 2001b). Die untere Grenze der Variationen des Oberflächensalzgehalts an der Darßer Schwelle sank von annähernd 8,5 PSU im Januar bis auf etwa 7,5 PSU Ende Juli, was auf eine signifikante Aussüßung des Oberflächenwassers im Arkonabecken in diesem Zeitraum hindeutet.

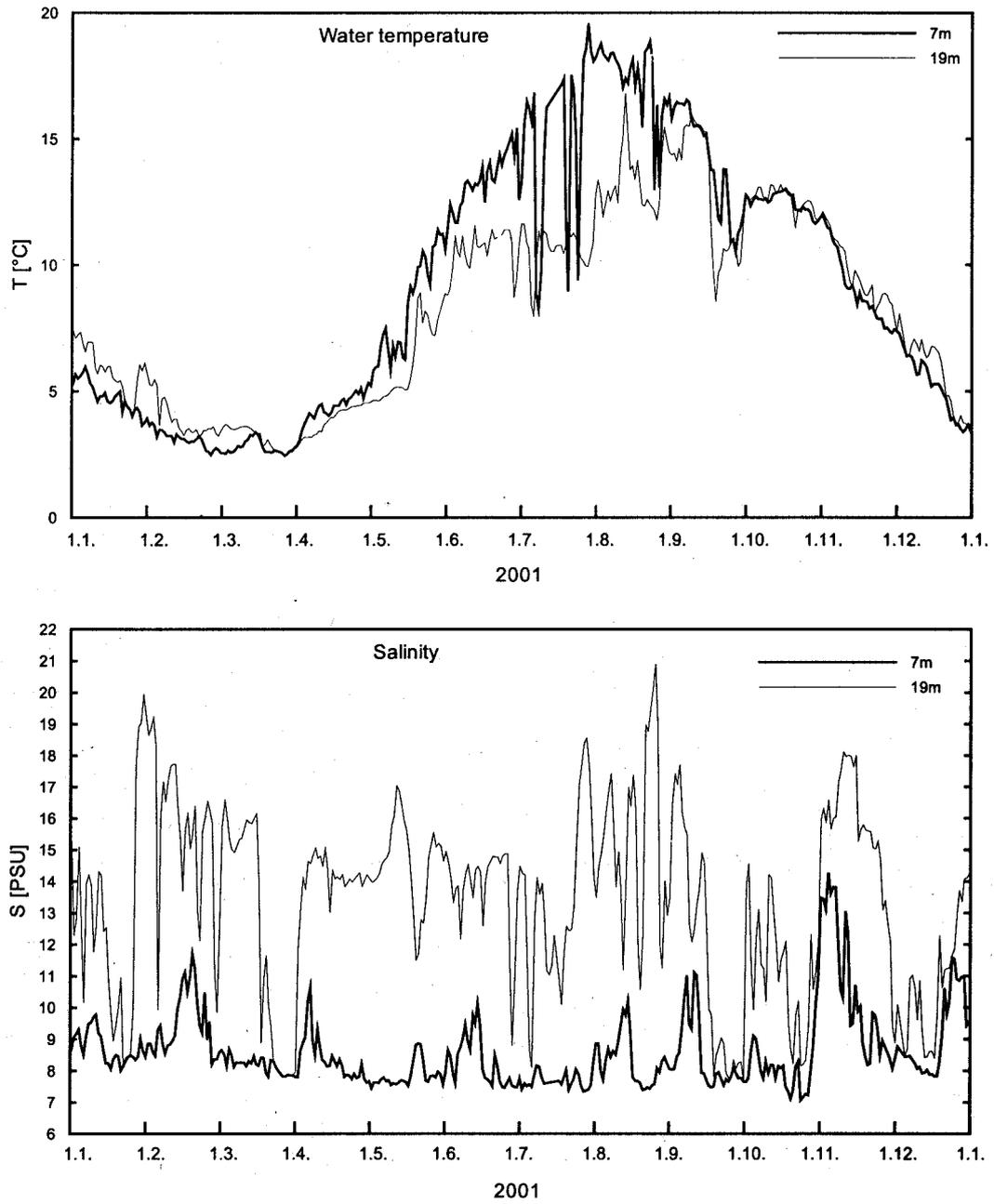


Abb. 6

Verlauf der Wassertemperatur (A) und des Salzgehaltes (B) in der Deck- und Bodenschicht auf der Darßer Schwelle (Stat. DS in Abb. 1) im Jahre 2001

Fig. 6

Water temperature (A) and salinity (B) measured in the surface layer and near the bottom at Stat. DS in 2001 at the Darss Sill

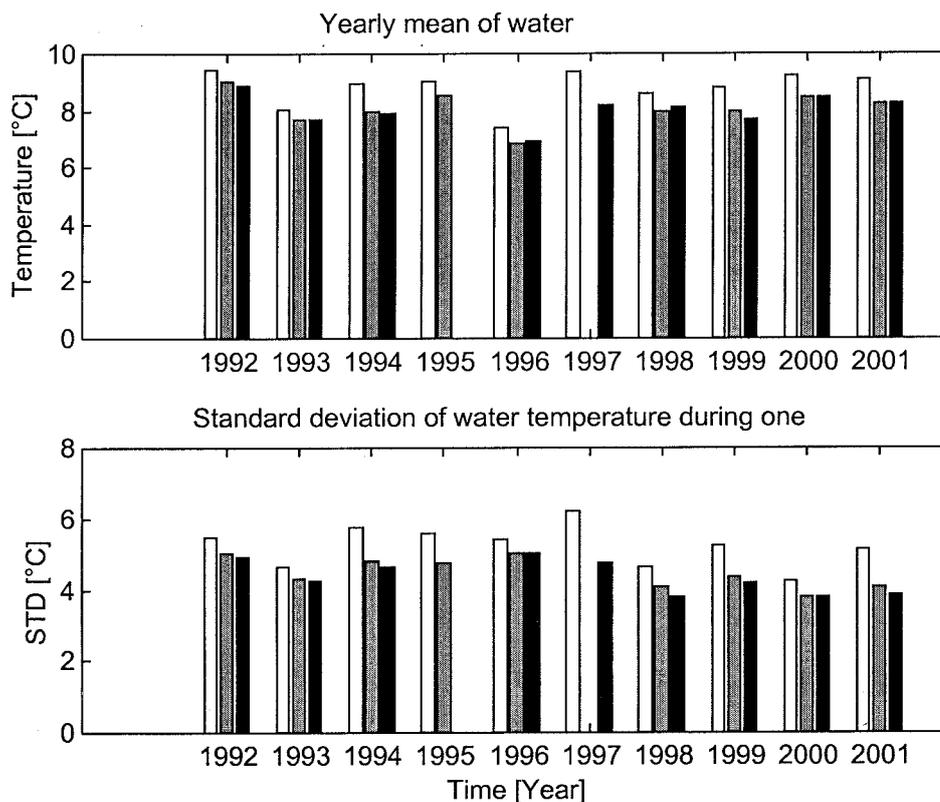


Abb. 7

Jahresmittel und Standardabweichung der Wassertemperatur in der Deckschicht (7 m, helle Säule), und der Bodenschicht (17 m, graue Säule und 19 m, schwarze Säule) auf der Darßer Schwelle

Fig. 7

Mean and standard deviation of the water temperature taken over one year in the surface layer (7 m, white bar) and in the bottom layer (17 m, grey bar and 19 m, black bar) at the Darss Sill

Fast während des ganzen Jahres wurde eine ausgeprägte haline Schichtung beobachtet (Abb. 6B). Dies deutet auf eine intensive ästuarine Zirkulation hin. Sie wurde nur durch intensive Ausstromereignisse Ende Januar, Ende März, Ende September, Ende Oktober und Mitte Dezember unterbrochen. Während der Ausstromereignisse wurden niedrige Salzgehalte in der ganzen Wassersäule gemessen, was auf einen mehrere Wochen anhaltenden Ausstrom von Oberflächenwasser aus dem Arkonabecken (vgl. auch SMHI, 2001b) hinweist, der von persistenten Ostwindlagen unterstützt wurde (Abb. 4).

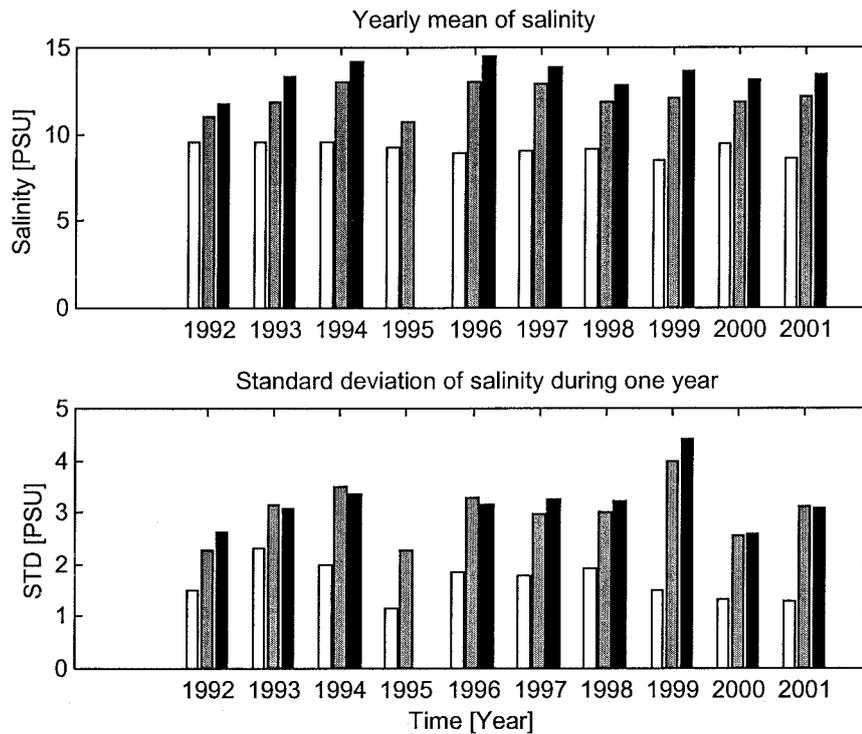


Abb. 8

Jahresmittel und Standardabweichung des Salzgehaltes in der Deckschicht (7 m, helle Säule), und der Bodenschicht (17 m, graue Säule und 19 m, schwarze Säule) auf der Darßer Schwelle

Fig. 8

Mean and standard deviation of the salinity taken over one year in the surface layer (7 m, white bar) and in the bottom layer (17 m, grey bar and 19 m, black bar) at the Darss Sill

Die kontinuierlichen Sauerstoffmessungen am Messmast sind im Jahr 2001 in 7 m und 19 m Tiefe durchgeführt worden. Der Sauerstoffgehalt des Oberflächenwassers war während des ganzen Jahres in der Nähe des Sättigungsbereiches. Der Sauerstoffgehalt des Bodenwassers auf der Darßer Schwelle war während der Wintersaison ebenfalls in der Nähe des Sättigungswertes. Jedoch beginnt er Anfang April 2001, von kurzzeitigen Fluktuationen überlagert, bis Ende August auf annähernd 1 ml/l kontinuierlich zu sinken. Dies weist darauf hin, dass durch die Planktonproduktion im Frühjahr und Sommer eine kontinuierliche Sauerstoffzehrung im Bodenwasser der Beltsee bedingt war. Während der Ausstromereignisse erfolgte im Bodenwasser auf der Darßer Schwelle eine kurzzeitige Belüftung durch Advektion von Oberflächenwasser aus dem Arkonabecken. Im Verlauf des Septembers stiegen die Sauerstoffkonzentrationen des Bodenwassers mit abnehmender Planktonaktivität und vertikaler Durchmischung bis zum Grund (Abb. 6) kontinuierlich bis Dezember wieder auf Werte bis 8 ml/l an.

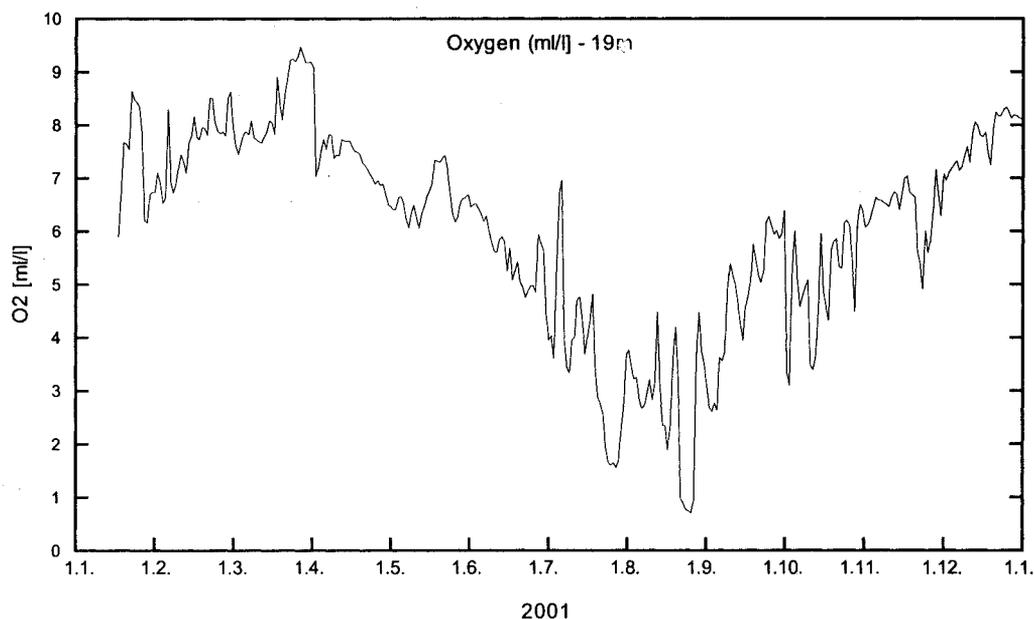


Abb. 9
Verlauf des Sauerstoffgehaltes in der Bodenschicht auf der Darßer Schwelle (Stat. DS in Abb. 1) im Jahre 2001

Fig. 9
Dissolved oxygen content measured in the bottom water layer at Stat. DS (c.f. Fig. 1) in 2001 at the Darss Sill

3.1.2 Strömung

Der auf der Darßer Schwelle eingesetzte Akustische Doppler-Profilströmnesser (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 Meeresgrund stationiert. Die bisherigen Einsätze haben gezeigt, dass die hochgenauen Messungen nicht durch Algenbewuchs und Sedimentablagerungen beeinflusst werden.

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 Grundnähe (19 m) sind in Abb.10 dargestellt. Ihre Nordkomponenten sind vergleichsweise klein (zwischen 0 und 100 km) und werden deshalb hier nicht gezeigt. Der generelle Verlauf der Pseudotrajektorien innerhalb eines Jahres ist nach Westen gerichtet und entspricht der positiven Wasserbilanz der Ostsee, die über Zeitskalen von mehr als einigen Monaten einen Ausstrom in die Nordsee zur Folge hat.

Die Strömung in 3 m Tiefe weist im Februar und April zwei marginale Einstromereignisse auf, die einem starken Ausstrom von Januar bis Anfang April überlagert sind. Dieser Ausstrom in Oberflächennähe ist im Januar und in der zweiten Hälfte des März besonders kräftig. Von April bis Ende Juni stagniert der Wasseraustausch mit der Nordsee. Verstärkter Ausstrom wird wieder von Ende Juni bis Ende Juli beobachtet. Bis zum Ende des Jahres schwächt sich der Ausstrom etwas ab. Er wird durch die schwachen Einstromereignisse im August und im September unterbrochen, die durch die Wechsel zwischen Ost- und Westwindereignissen in der zweiten Jahreshälfte (siehe Abb. 4) verursacht wurden. Ein intensiveres Einstromereignis wird durch die Folge anhaltend starker Westwinde Anfang November 2001 auf ein längeres Ostwindereignis Ende Oktober angeregt (vgl. Kapitel 2).

In der bodennahen Schicht in 19 m Tiefe herrscht im Wesentlichen während des ganzen Jahres stagnierender Strom. Diese Stagnation wird durch einen von April bis Ende Juni andauernden Einstrom unterbrochen. Die Einstromereignisse im Frühjahr und ab August pausen sich auch im Strömungsregime der Bodenschicht durch.

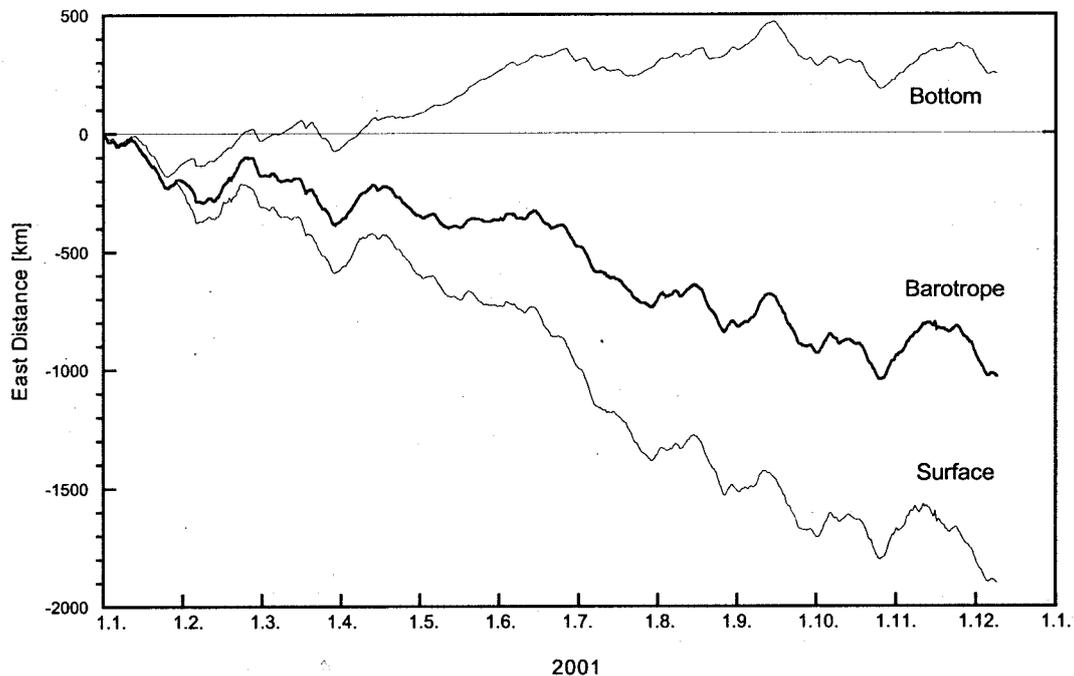


Abb. 10

Ostkomponekte der Pseudotrajektorie des Vertikalmittels der Strömung (Barotrope) sowie der Strömung an der Oberfläche (3 m Tiefe) und am Boden (19 m Tiefe) im Bereich der Darßer Schwelle (Stat. DS) im Jahre 2001

Fig. 10

East component of the progressive vector diagram of current measured at the Darss Sill (Stat. DS) in 2001. The different lines correspond to the barotropic current, the current measured near the sea surface (3 m depth) and near the bottom (19 m depth). The water depth at the site is 21 m

Die vertikal integrierte Strömung auf der Darßer Schwelle weist im Februar ein schwaches Einstromereignis auf. Im März erfolgt ein Ausstrom in der gesamten Wassersäule, der im April durch einen Einstrom abgelöst wird. Danach stagniert der barotrope Ausstrom bis Ende Juni. Ab Juli folgt eine bis Anfang Dezember anhaltende Ausstromphase, die von den kurzzeitigen Einstromereignissen im August, September und November unterbrochen wird. Die Fluktuationen der Ostkomponente der Pseudotrajektorie der Strömung an der Darßer Schwelle korreliert mit den dortigen Schwankungen des Salzgehaltes (vergleiche mit der Abb. 6b). Das stärkste barotrope Einstromereignis beginnt am 26. Oktober und endet am 11. November 2001. Die scheinbare Verschiebung der Wassersäule beträgt 236 km nach Osten.

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 *P*ommerschen Bucht) untersucht (v. BODUNGEN et al., 1995; TRUMP, 1998) sowie durch SIEGEL et al. (1996), MOHRHOLZ (1998) und LASS et al. (2001) 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 Oderhaff 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 m nordöstlich von Koserow/Usedom auf 15 m Wassertiefe (Stat. OB, vgl. Abb. 1). Von September bis Ende Oktober 2001 war die obere Messkette gestört, so dass aus diesem Zeitraum keine Messungen aus dem 3 m Niveau vorliegen. Die Zeitreihen von Wassertemperatur und Salzgehalt in 3 m und 13 m Tiefe sind in Abb. 11 dargestellt. Die an dieser Station gemessene Wassertemperatur (Abb. 11) folgt in ihrem Jahresgang weitgehend dem auf der Darßer Schwelle gemessenen Verlauf (vgl. Abb. 6). Jedoch sind die Extremwerte des Jahresgangs der Wassertemperatur in der Pommerschen Bucht kräftiger ausgebildet als auf der Darßer Schwelle.

Das Jahresminimum der Wassertemperatur wird hier gegen Anfang Februar früher als auf der Darßer Schwelle erreicht. Es liegt jedoch etwas unter 1 °C, während es auf der Darßer Schwelle bei 3 °C liegt. Ab Anfang März steigt die Wassertemperatur, von leichten Schwankungen überlagert, bis Ende Juli auf rund 22 °C an. Die Wassertemperatur bleibt bis Ende August über 20 °C. Danach sinkt sie der Jahreszeit entsprechend bis zum Ende des Jahres kontinuierlich auf rund 2 °C ab, während sie sich auf der Darßer Schwelle nur bis etwa 4 °C abgekühlt hat. 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 2001 an der Station "Oder Bank" Mitte Januar und mehr oder weniger durchgehend von Anfang April bis Ende August beobachtet.

Der in den gleichen Tiefen wie die Wassertemperatur gemessene Salzgehalt ist in Abb. 11 dargestellt. Er variierte im Laufe des Jahres zwischen 5,0 und 8 PSU und wies somit geringere Schwankungen als 2000 auf (vgl. MATTHÄUS et al., 2001). Der Salzgehalt in 3 m Tiefe ist durch Phasen mit erniedrigtem Salzgehalt gekennzeichnet, die im Wesentlichen mit den Phasen signifikanter thermischer Schichtung übereinstimmen.

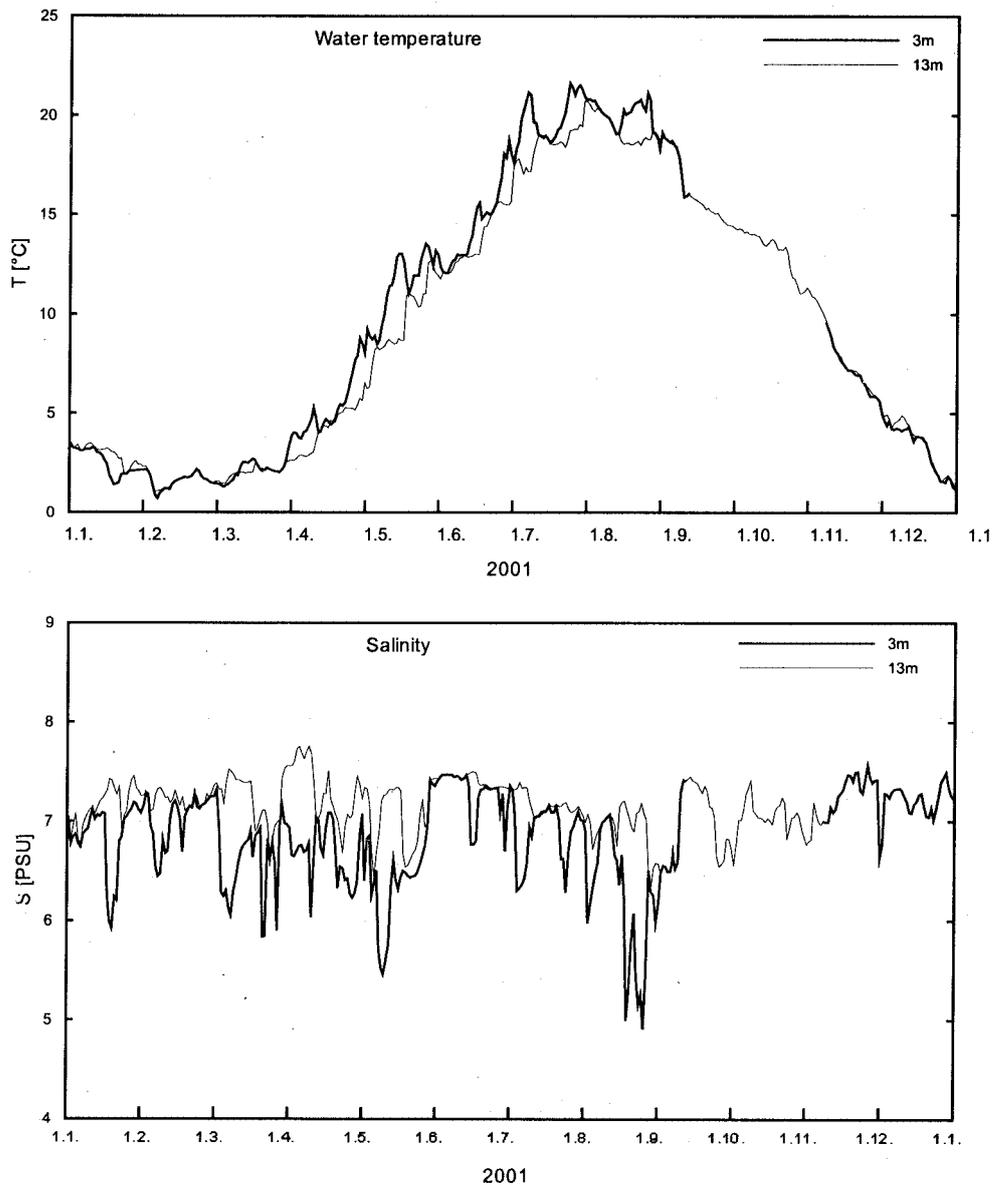


Abb. 11

Verlauf der Wassertemperatur (A) und des Salzgehaltes (B) in der Deck- und Bodenschicht in der Pommerschen Bucht (Stat. OB) im Jahr 2001

Fig. 11

Water temperature (A) and salinity (B) measured in the surface layer and near the bottom in 2001 at Stat. OB in the Pomeranian Bight

In diesen Phasen, mit einer Dauer von einigen Tagen bis einigen Wochen, schichtet sich Mischwasser aus dem Oderhaff mit einem um 1 bis 3 PSU niedrigeren Salzgehalt über das Wasser der Pommerschen Bucht. Dieser Prozeß war wie in den vorangegangenen Jahren an schwache und vor allem östliche Windlagen (vgl. Abb. 4) gekoppelt, war jedoch im Frühjahr ausgeprägter als im Sommer, da ab Mitte Mai überwiegend Westwind auftrat. Das deutet darauf hin, daß für die Herausbildung der Salzgehaltsschichtung in der Oderbucht im Frühjahr 2001 der erhöhte Abfluß der Oder und der vorherrschende Ostwind die entscheidende Rolle spielten. Eine stark ausgeprägte Schichtung des Salzgehaltes wurde von Mitte bis Ende August 2001

beobachtet. Während dieses Zeitraums führte die Oder Hochwasser. Der vorherrschende Ostwind während dieses Zeitraums trieb die Oder-Abflussfahne vor die Küste Usedom. Die sich dabei ausbildende stabile Bodenwasserschicht ist auf Grund der Atmung von Benthosorganismen und der Remineralisierung von partikulärem organischen Material aus der Flusswasserfahne durch eine Reduktion des Sauerstoffgehaltes gekennzeichnet (vgl. NEHRING et al., 1995b; SIEGEL et al., 1998). Die Sauerstoffmessungen auf der Station „Oder Bank“ wiesen in diesem Zeitraum eine kontinuierliche Abnahme des Sauerstoffgehalt auf 2,5 ml/l bis zum 27. August auf. Mit dem Einsetzen des Westwindes am 27. August wurde die Flusswasserlinse nach Osten entlang der polnischen Küste abgeführt. Die Schichtung vor Usedom wurde abgebaut und das Bodenwasser wieder belüftet.

5. Hydrographisch-chemische Bedingungen

Die nachfolgend dargestellten Beschreibungen der hydrographisch-chemischen Situation im Jahre 2001 konzentrieren sich im Wesentlichen auf die Seegebiete östlich der Darßer Schwelle, d.h. die eigentliche Ostsee. In diesem Bereich nehmen die kurzfristigen Variationen der Parameter auf Grund der größeren Entfernung von den Ostseezugängen und von der Küste deutlich ab.

Die Kieler und Mecklenburger Bucht liegen im Übergangsbereich zwischen Nord- und Ostsee und sind daher durch starke Schwankungen der hydrographischen und chemischen Parameter gekennzeichnet. Gleiches trifft für die stark landseitig beeinflusste Lübecker und Pommersche Bucht zu. Die in diesem Bereich gewonnenen Daten werden vorrangig zusammen mit den Messungen der Landesämter für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern (LUNG) und für Natur und Umwelt Schleswig-Holstein (LANU) im Rahmen der Jahresberichte des Bund-Länder-Messprogramms für die Meeresumwelt der Nord- und Ostsee (BLMP) ausgewertet. Hier wird nur auf spezielle Aspekte, in der Regel in der Langzeitbetrachtung der Daten, eingegangen (vgl. z.B. Kapitel 5.5). Die Vertikalverteilungen der Wassertemperatur (Abb. 16), des Salz- (Abb. 17) und des Sauerstoffgehaltes (Abb. 18) sowie der wesentlichsten Nährstoffe Phosphat (Abb. 21) und Nitrat (Abb. 22) sind auf einem Längsschnitt zwischen Darßer Schwelle und nordöstlichem Gotlandbecken, der dem Talweg durch die zentralen Ostseebecken folgt, dargestellt. Die Situation im westlichen Gotlandbecken wird separat beschrieben. Von ausgewählten Stationen und Tiefen werden Jahresmittelwerte für einige hydrographische und hydrochemische Parameter berechnet und mit denen früherer Jahre verglichen (Tabellen 5 - 7; 9). Trendaussagen für Nährstoffe im Oberflächenwasser werden dagegen nur an Hand der Winterkonzentrationen vorgenommen (Tabelle 8).

5.1 Wassertemperatur

Die Verteilung der Wassertemperatur in den untersuchten Seegebieten wird in den folgenden Abschnitten dargestellt. Für die Analyse der Oberflächentemperaturen werden auch mittlere monatliche Verteilungen einbezogen, die aus Satellitendaten berechnet wurden (SIEGEL et al., 1996, 1999). Die Satellitendaten gestatten durch ihren synoptischen Charakter und die hohe zeitliche Folge das Studium der Entwicklung der Wasseroberflächentemperatur in der gesamten Ostsee. Die Entwicklung der vertikalen Temperaturverteilung wird anhand der Überwachungsfahrten entlang des Standardschnittes durch die zentralen Becken der Ostsee dargestellt.

5.1.1 Jahresgang der Oberflächentemperatur

Die Einschätzung des Jahres 2001 anhand der Wasseroberflächentemperatur der Ostsee wurde auf der Grundlage von Monatsmittelwerten durchgeführt und für besondere Monate werden im folgenden die Anomalien verwendet, die aus den Mittelwerten der Monate des Jahre 2001 und den langjährigen Monatsmitteln der Jahre 1990 - 2000 berechnet wurden. Die Anomalien der Wasseroberflächentemperatur zeigen, dass es starke Unterschiede in den verschiedenen Monaten, aber auch regional gab. Besonderheiten traten in den Monaten Januar, Juli, August, September und Oktober auf, die in Abb. 12 zusammengefasst sind.

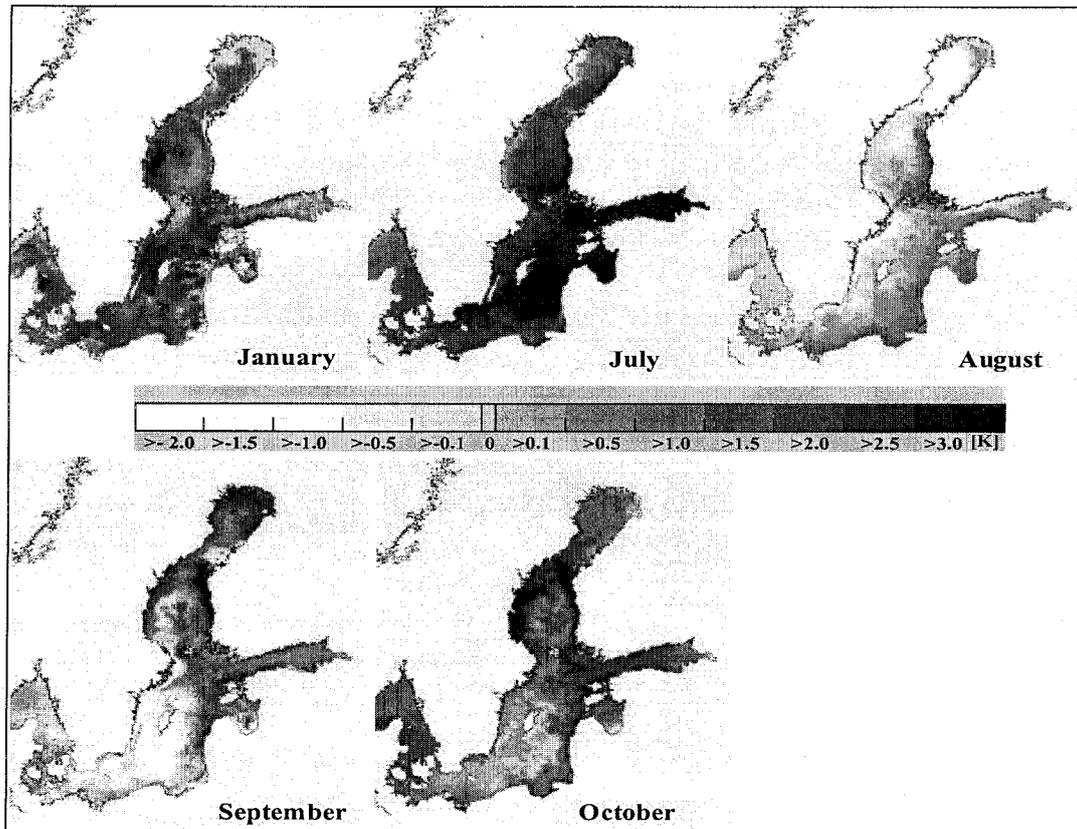


Abb. 12

Anomalien der Wasseroberflächentemperatur der Ostsee des Jahres 2001 bezogen auf die Mittelwerte der Jahre 1990 - 2000

Fig. 12

Anomalies of sea surface temperature in the Baltic Sea in the year 2001 referring to the mean values of the years 1990 - 2000

Der Januar 2001 gehörte mit Wassertemperaturen im Mittel bis $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ zu den wärmsten seit 1990. Positive Anomalien traten in der gesamten Ostsee außer im äußersten Norden des Bottnischen Meerbusens auf. In der zentralen Ostsee betrug die Anomalien bis $+2\text{ K}$. In den Folgemonaten Februar und März kühlte das Wasser weiter ab und erreichte sein Jahresminimum im Monat März, was seit 1990 nicht oft zu verzeichnen war. Die Hochdrucklagen mit lang anhaltender Schwachwindphase und teilweise geringer Wolkenbedeckung im März sorgten für die weitere Auskühlung des Oberflächenwassers. Die Monate April bis Juni verliefen weitgehend normal. Dieses zeigt auch der Jahresgang der Oberflächentemperatur für jeweils eine zentrale Station in der Arkonasee und in der östlichen Gotlandsee im Vergleich zu den 11-Jahresmitteln (Abb. 13). Im Juli erreichten die mittleren SST nach 1994 die zweithöchsten Werte seit 1990, was sich auch in den Anomalien bis über $+3\text{ K}$ ausdrückt.

Im August 2001 waren die Temperaturen in der zentralen Ostsee niedriger als im Juli (Abb. 13), was in den 1990er Jahren noch nicht beobachtet worden war. Lang anhaltende westliche bis südwestliche Winde haben starken Auftrieb entlang der schwedischen Küste erzeugt, der dadurch auch im Monatsmittel zu finden war und sich bis in die zentrale östliche Gotlandsee auswirkte. Im Vergleich zum langjährigen Mittelwert gab es dagegen im August nur geringe Unterschiede. In den Auftriebsgebieten lag die Temperatur leicht unter und an den Süd- und Ostküsten über dem Mittelwert, wodurch sich geringfügig negative und positive Anomalien ergaben (Abb. 12).

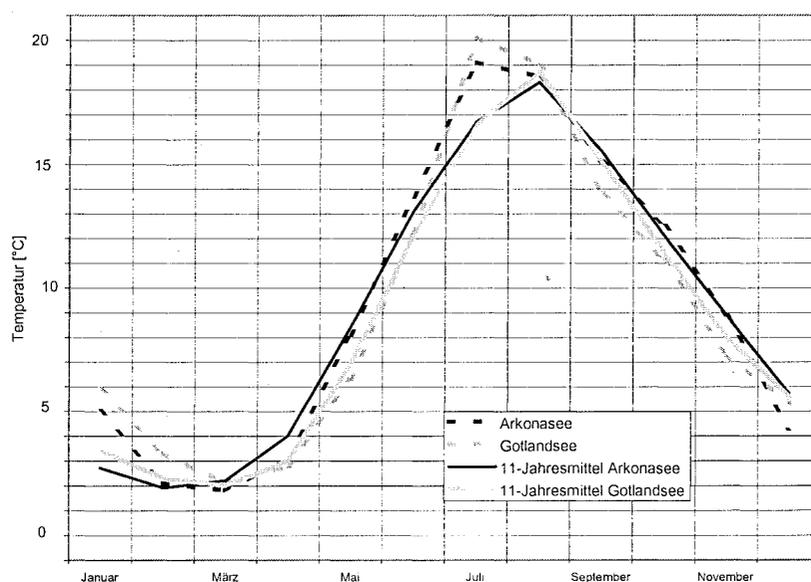


Abb. 13

Saisonaler Verlauf der Wasseroberflächentemperatur (NOAA-SST) an zwei Stationen in der Arkona- und östlichen Gotlandsee im Vergleich zum jeweiligen 11-Jahresmittel

Fig. 13

Seasonal course of sea surface temperature (NOAA-SST) at two stations in the Arkona- and eastern Gotland Sea in comparison to the mean values of the last 11 years

In Abb. 14 sind noch einmal die Wasseroberflächentemperaturen der Monate Juli und August des Jahres 2001 den langjährigen Mittelwerten (1990 - 2000) entlang des Terminfahrtschnittes durch die zentralen Becken von der Arkonasee bis in den Nordteil der östlichen Gotlandsee gegenübergestellt. Die Linien mit Signaturen stellen die Juli-Werte dar. Man sieht einerseits, dass im Juli 2001 Maximalwerte von über 20 °C erreicht worden sind. Sie liegen in der Arkona- und Bornholmsee etwa 2 K höher als im langjährigen Mittel und in der östlichen Gotlandsee erreichen sie sogar Werte über +3 K. Die Augustwerte liegen in der gesamten Ostsee in der Nähe des Mittelwertes und in der östlichen Gotlandsee bis 1 K unter den Julitemperaturen. Im September erfolgte eine rasche Abkühlung, so dass es ein eher kälterer Monat September war, was sich auch in den Anomalien widerspiegelt. Auffällig war in den Monaten September und Oktober das Temperaturmuster in der zentralen Ostsee. Von der Gdanskener Bucht bis zum Finnischen Meerbusen gab es einen breiten Streifen wärmeren Wassers entlang der Küste der baltischen Länder, was sich auch im August schon andeutete. Diese Strukturen, die durch den Auftrieb an der schwedischen Küste aufgrund der dominierenden westlichen Winde entstanden, sind von August bis Oktober nicht typisch für die Ostsee, was aus den Anomalien ablesbar ist.

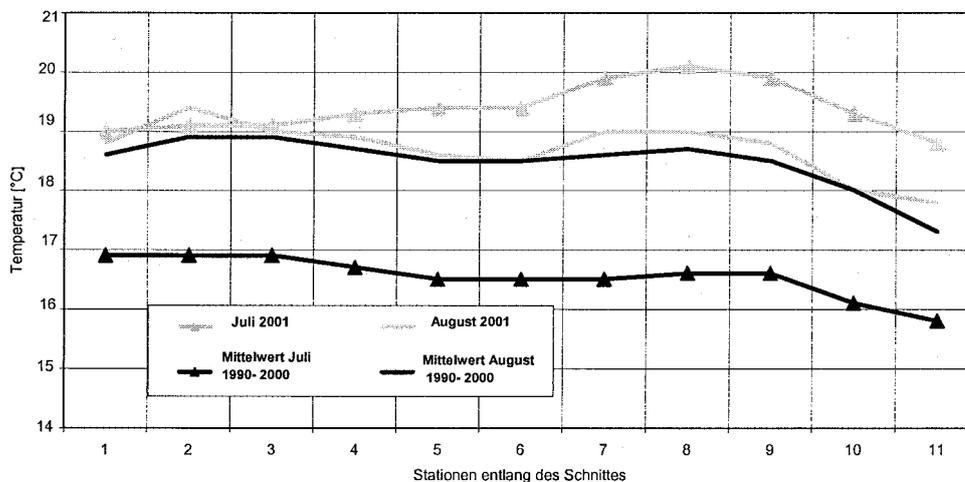


Abb. 14

Temperaturverteilung der Monate Juli und August im Vergleich zu Mittel 1990 - 2000 entlang eines Schnittes durch die zentralen Becken der Ostsee

Fig. 14

Temperature distribution in July and August in comparison to the mean value of 1990 - 2000 along a transect through the central basins of the Baltic Sea

In Abb. 15 sind noch einmal der kälteste und der wärmste Tag des Jahres 2001 gegenübergestellt. Wie schon dargestellt, war die Ostsee 2001 im März am kältesten und die geringsten Temperaturen und die maximale Eisausdehnung wurden am 26. März 2001 beobachtet. In weiten Teilen lagen die Temperaturen zwischen 2 und 3 °C. Nur entlang der Küste wurden Werte unter 2 °C bestimmt. Der wärmste Tag war der 29. Juli, wo Temperaturen zwischen 22 und 23 °C in der westlichen und zentralen Ostsee aus dem Tagesmittel abgeleitet wurden.

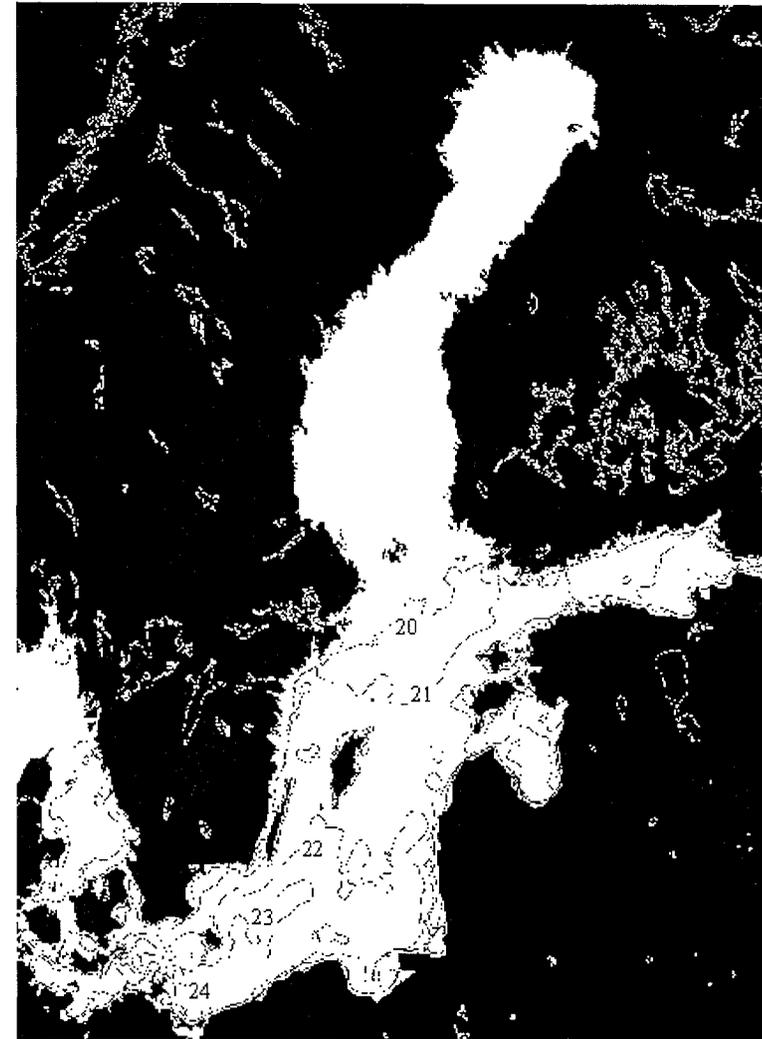
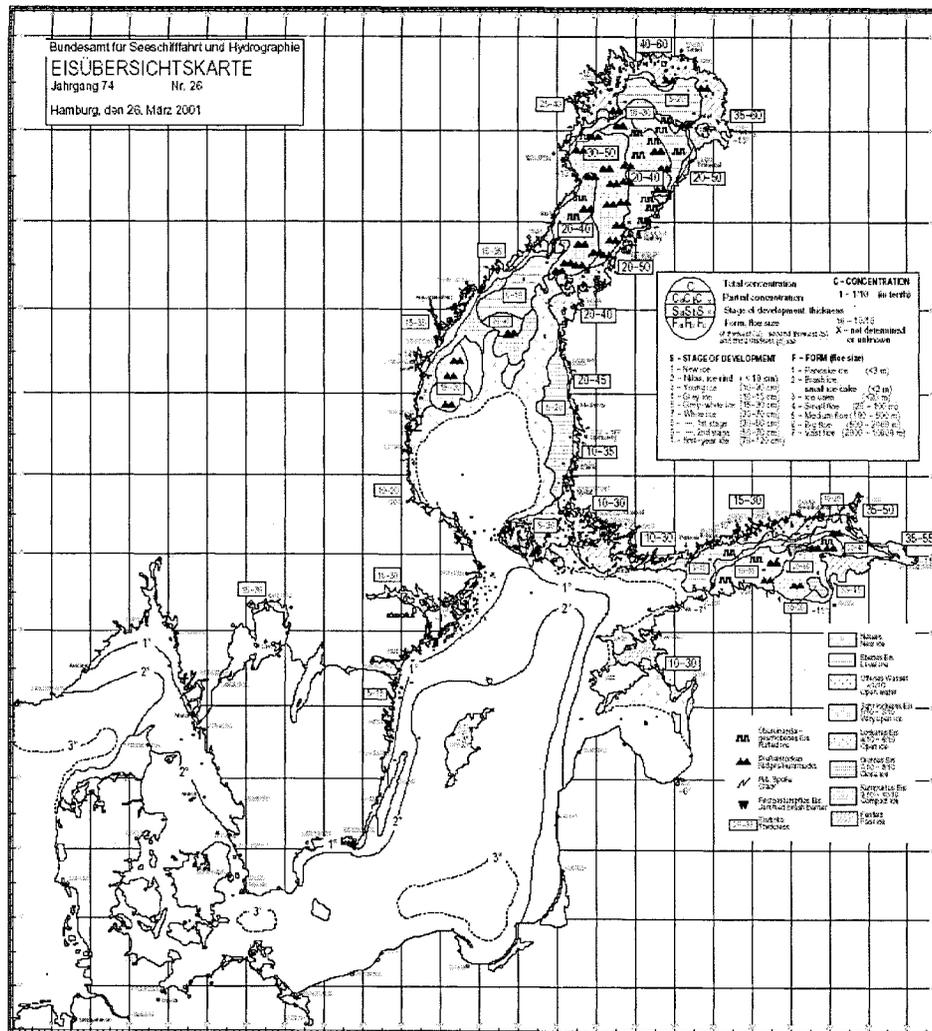


Abb. 15
 Temperaturverteilung der Ostsee zur Zeit der Minimal- (26. März, A) und Maximalwerte (29. Juli, B) des Jahres 2001. (A) ist die Temperatur- und Eiskarte des BSH und (B) SST

Fig. 15
 Temperature distribution of the Baltic in the period of minimum (26 March, A) and maximum values (29 July, B) of the year 2001. (A) Temperature and Ice Map of BSH and (B) SST

5.1.2 Vertikalverteilung der Wassertemperatur

Die vertikale Temperaturverteilung der westlichen und zentralen Ostsee im Verlauf des Jahres 2001 ist anhand der Überwachungsfahrten des IOW in der Abb. 16 zusammengestellt.

Die Temperaturen im Tiefenwasser lagen 2001 generell höher als 1996 und 1997 und auch höher als die langjährigen Mittelwerte. Jedoch reagierten die einzelnen Becken mit unterschiedlicher Stärke und Verzögerung auf die vorangegangenen Einstromereignisse vom Herbsttypus (HAGEN and FEISTEL, 2001), d.h. Einströme warmen, salzreichen aber sauerstoffarmen Wassers, die im September/Oktober 1997 (MATTHÄUS et al., 1999a, HAGEN and FEISTEL, 2001), im Oktober 1999 (SMHI, 1999, MATTHÄUS et al., 2001) und im Oktober/November 2001 (siehe Kapitel 2.1 und 5.2) stattfanden.

Das Bornholmbecken reagiert zumeist schnell und kräftig auf einströmendes Nordseewasser. Das Ereignis von 1997 bewirkte einen Anstieg von 5,95 °C (1996) über 7,32 °C (1997) auf 8,53 °C (1998), wobei die hohe Standardabweichung von fast 2 K in 1997 auf ablaufende rege Prozesse hinweist. Das Ereignis von 1999 steigerte die Temperatur noch einmal von 8,04 °C (1999) auf ungewöhnlich hohe 8,86 °C im Jahresmittel 2000. Der jüngste Einstrom 2001 erfolgte erst spät im Jahr und ist nur deutlich im abrupt angestiegenen Wert für Dezember 2001 zu erkennen, kaum aber in Jahresmittel von 7,45 °C (siehe auch Kapitel 5.2).

Das Gotlandbecken reagierte erst später und schwächer auf die Einstromsignale. Zwei Verankerungen zeigten bei 170 m Tiefe einen allmählichen Anstieg der Temperatur von 5 °C im Dezember 1997 auf 6 °C im April 1998, wobei während des Vorgangs starke Fluktuationen mit Spitzenwerten von fast 7 °C auftraten (HAGEN and FEISTEL, 2001). In 200 m Tiefe stieg die Jahresmitteltemperatur sogar um fast 1,5 K von 5,17 °C auf 6,62 °C (Tabelle 5). Das nachfolgende Ereignis von 1999 zeigt sich in den Jahresmitteln nur durch eine verlangsamte Abkühlung um zunächst 0,24 K (1998/99) und dann aber nur 0,1 K (1999/2000) und 0,08 K (2000/01) auf nunmehr 6,20 °C. Eine Auswirkung des Signals vom November 2001 auf den Mittelwert von 2001 ist in der Gotlandsee wegen der Kürze der verstrichenen Zeitspanne noch nicht zu erwarten, und tatsächlich zeigt die geringe Standardabweichung von nur 0,02 K eine hohe Konstanz der Temperatur im Gotlandtief über das gesamte Jahr 2001.

Noch deutlich träger reagierten Farö-, Landsort- und Karlsötief auf die kurzzeitige Zufuhr von warmem, schwerem Wasser aus der Nordsee. Das Farötief zeigt einen langsamen Anstieg der Temperatur in 150 m Tiefe von 4,84 °C (1997) auf 5,95 °C (2000), wobei der größte Sprung um 0,82 K von 1997 nach 1998 erfolgte, zusammen mit einer deutlich erhöhten Standardabweichung in diesen beiden Jahren (Tabelle 5), die auf intensive Prozesse des Wasseraustauschs hindeutet. Im Jahr 2001 fiel die Temperatur mit 5,88 °C um 0,07 K wieder leicht unter das vorjährige Maximum.

Im Landsort- und Karlsötief erreichten die Temperaturen 2001 in 400 und 100m Tiefe mit 5,24 °C und 4,66 °C die höchsten Werte seit Jahren. Beginnend mit 1997 ist ein kontinuierlicher Anstieg zu verzeichnen (Tabelle 5), wobei erhöhte Fluktuationen im Landsorttief 1998 (0,23 K) und 1999 (0,14 K) und im Karlsötief erst 1999 (0,1 K) registriert wurden. Die ungewöhnlich hohe Variabilität der Temperatur 2001 im Karlsötief von 0,18 K beruht auf einem permanenten Anstieg der monatlichen Temperaturen von Januar bis Dezember um erhebliche 0,53 K, möglicherweise noch als stark verzögerte Reaktion auf den sehr warmen Zustrom vom September 1997.

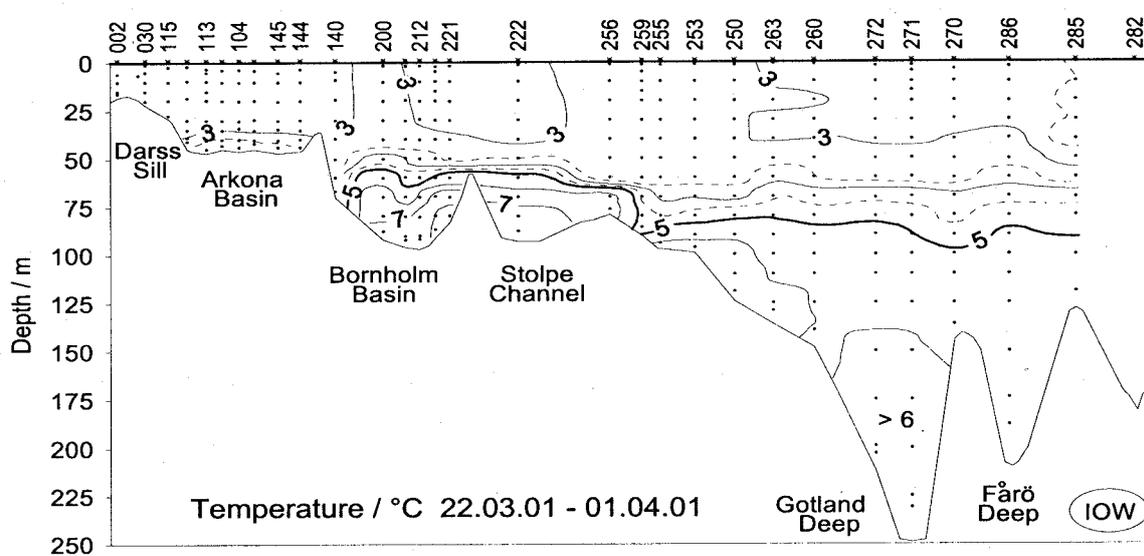
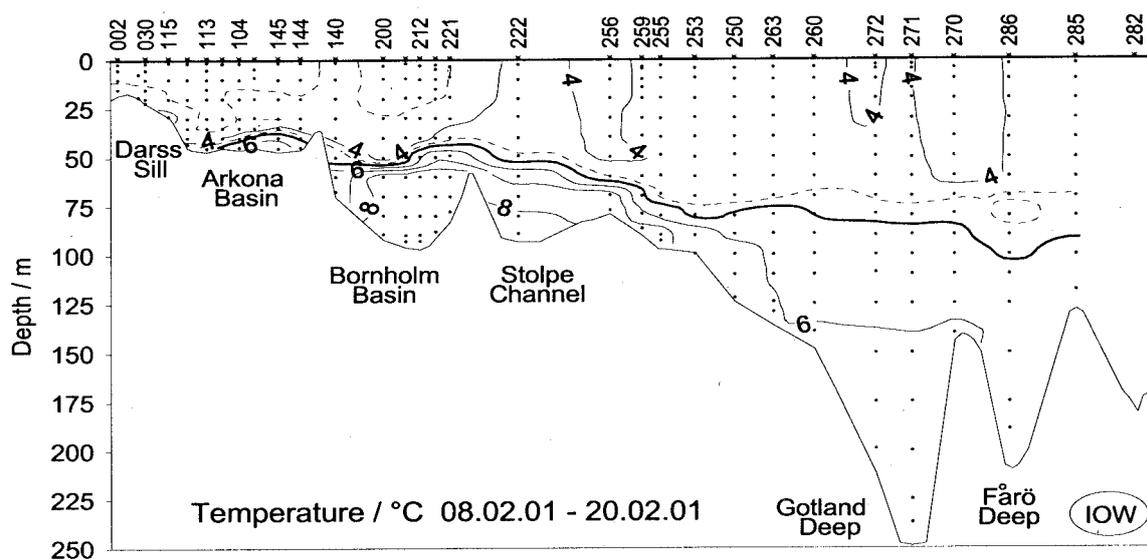


Abb. 16

Vertikale Verteilung der Wassertemperatur zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 16

Vertical water temperature distribution between Darß sill and northern Gotland Basin

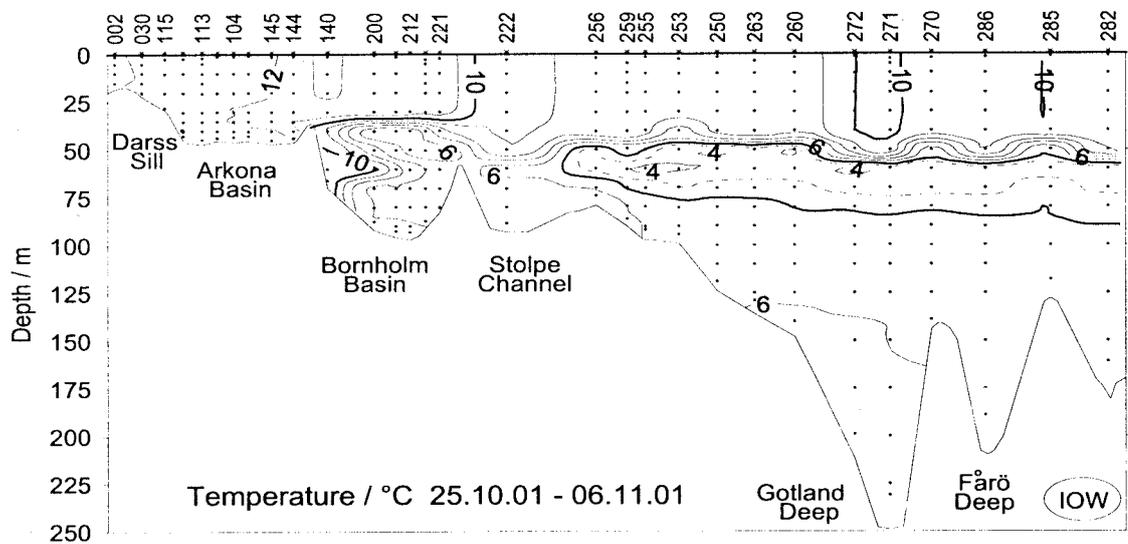
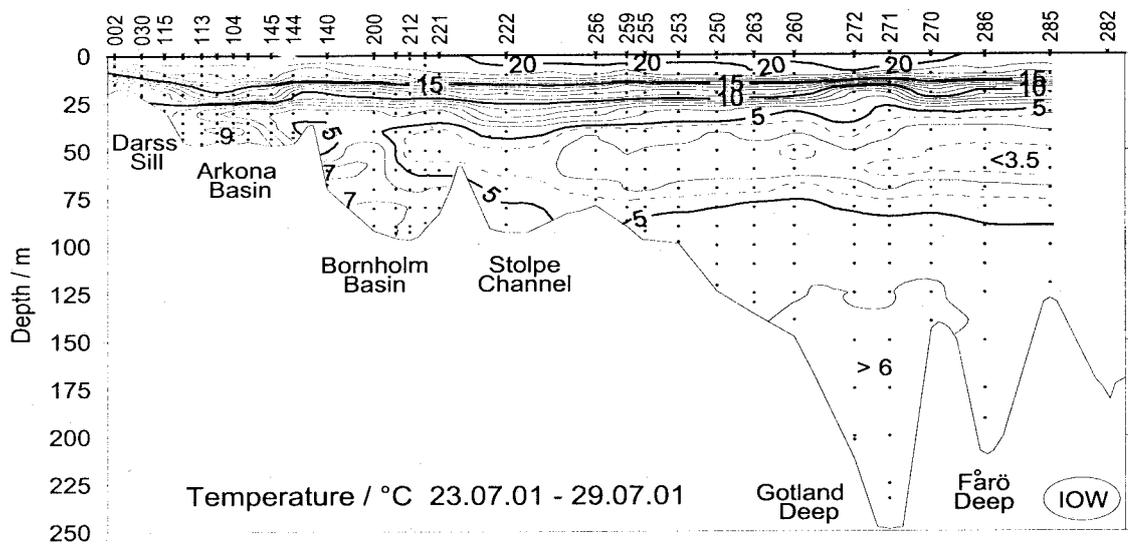
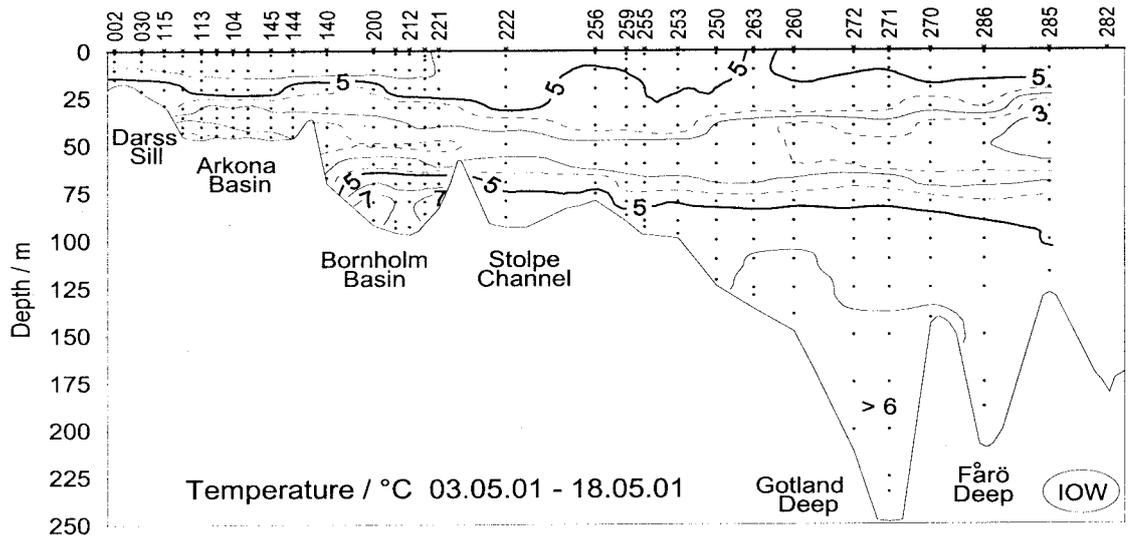


Abb. 16 Forts.

Fig. 16 cont.

Tab. 5

Jahresmittelwerte und Standardabweichungen ausgewählter hydrographischer Parameter im Tiefenwasser der zentralen Ostsee

Table 5

Annual means and standard deviations of selected hydrographic parameters in the deep water of the central Baltic Sea

Wassertemperatur (°C; Maximalwerte hervorgehoben)						
Station	Tiefe/m	1997	1998	1999	2000	2001
213 (Bornholmtief)	80	7,32 ± 1,91	8,53 ± 0,45	8,04 ± 1,13	8,86 ± 0,57	7,45 ± 1,05
271 (Gotlandtief)	200	5,17 ± 0,06	6,62 ± 0,15	6,38 ± 0,06	6,28 ± 0,04	6,20 ± 0,02
286 (Färötief)	150	4,84 ± 0,20	5,66 ± 0,32	5,86 ± 0,03	5,95 ± 0,03	5,88 ± 0,02
284 (Landsorttief)	400	4,66 ± 0,08	4,88 ± 0,23	5,17 ± 0,14	5,21 ± 0,07	5,24 ± 0,01
245 (Karlsötief)	100	4,35 ± 0,08	4,33 ± 0,05	4,47 ± 0,10	4,61 ± 0,05	4,66 ± 0,18
Salzgehalt (PSU; Maximalwerte hervorgehoben)						
Station	Tiefe/m	1997	1998	1999	2000	2001
213 (Bornholmtief)	80	16,52 ± 0,50	16,38 ± 0,49	15,79 ± 0,42	16,3 ± 0,36	15,46 ± 0,35
271 (Gotlandtief)	200	11,97 ± 0,04	12,32 ± 0,07	12,21 ± 0,04	12,10 ± 0,03	11,98 ± 0,03
286 (Färötief)	150	11,32 ± 0,13	11,62 ± 0,09	11,57 ± 0,04	11,53 ± 0,06	11,33 ± 0,04
284 (Landsorttief)	400	10,22 ± 0,11	10,50 ± 0,16	10,58 ± 0,07	10,42 ± 0,04	10,32 ± 0,04
245 (Karlsötief)	100	9,33 ± 0,14	9,51 ± 0,13	9,57 ± 0,17	9,47 ± 0,08	9,50 ± 0,28
Sauerstoffgehalt (ml/l; Schwefelwasserstoff als negative Sauerstoffäquivalente; Minimalwerte hervorgehoben)						
Station	Tiefe/m	1997	1998	1999	2000	2001
213 (Bornholmtief)	80	1,34 ± 0,72	-0,20 ± 0,81	0,29 ± 1,23	0,92 ± 1,12	0,57 ± 1,23
271 (Gotlandtief)	200	-0,03 ± 0,25	0,02 ± 0,48	-1,68 ± 0,46	-2,56 ± 0,63	-3,75 ± 0,54
286 (Färötief)	150	0,14 ± 0,39	-0,03 ± 0,33	-0,78 ± 0,50	-1,27 ± 0,53	-1,82 ± 0,40
284 (Landsorttief)	400	0,60 ± 0,14	0,37 ± 0,14	0,15 ± 0,22	-0,57 ± 0,15	-0,75 ± 0,22
245 (Karlsötief)	100	0,66 ± 0,34	0,43 ± 0,22	0,32 ± 0,59	0,31 ± 0,32	-0,35 ± 0,72

5.2 Salzgehalt

Die Verteilung des Salzgehalts in der Ostsee 2001 ist in Abb. 17 sowie in den Tabellen 5 und 6 dargestellt. Generell ist in der zentralen Ostsee im Jahr 2001 ein Trend zur Aussüßung zu verzeichnen, der die Tendenz des Vorjahres fortsetzt (MATTHÄUS et al., 2001). Im Tiefenwasser der Bornholmsee (80 m) wurde mit 15,46 PSU seit 1996 der niedrigste Wert registriert (Tabelle 5). Nur das Jahr 1999 wies dort ebenfalls einen Salzgehalt von unter 16 PSU auf. Im östlichen Gotlandtief (200 m) fiel der Salzgehalt vom relativen Maximum 12,32 PSU im Jahre 1998 nach dem Einstromereignis vom Herbst 1997 (MATTHÄUS et al., 1999a, HAGEN and FEISTEL, 2001) pro Jahr um 0,1 PSU und hat 2001 mit 11,98 PSU wieder einen Wert unter 12 PSU wie schon 1996 und 1997 erreicht. Ähnliches, wenn auch weniger ausgeprägt, gilt für das Farötief bei 150 m; auch hier trat 1998 mit 11,62 PSU ein Maximum im Salzgehalt auf, der bis 2001 auf 11,33 PSU abgesunken ist und damit wieder das Niveau von 1997 erreicht hat. Im Landsort- (400m) und Karlsötief (100m) trat das Salzmaximum erst ein Jahr später, nämlich 1999 mit 10,58 bzw 9,57 PSU auf. Seither sind die Werte auf gegenwärtig 10,32 PSU bzw. 9,50 PSU gefallen, die aber noch deutlich über den entsprechenden Messwerten von 1996 und 1997 liegen (Tabelle 5). Das in den Kapiteln 2.1 und 3.1 beschriebene Einstromereignis von der Nordsee im Oktober/November 2001 hat zunächst nur relativ geringe Auswirkungen auf die Eigenschaften des Tiefenwassers der Ostsee gezeigt.

Tab. 6

Jahresmittelwerte von 1997 bis 2001 sowie Langzeitmittelwert der Jahre 1961-1990 und Standardabweichungen des Salzgehalts (in PSU) im Oberflächenwasser der zentralen Ostsee (Minimalwerte hervorgehoben)

Table 6

Annual means of 1997 to 2001 as well as long-time averages of the years 1961-1990 and standard deviations of surface water salinity (in PSU) in the central Baltic Sea (minimum values in bold)

Station	1997	1998	1999	2000	2001	1961-1990
213 (Bornholmtief)	7,45 ± 0,09	7,17 ± 0,14	7,20 ± 0,18	7,57 ± 0,18	7,29 ± 0,19	7,72 ± 0,25
271 (Gotlandtief)	7,05 ± 0,20	7,04 ± 0,20	6,81 ± 0,23	7,09 ± 0,14	6,86 ± 0,30	7,41 ± 0,46
286 (Farötief)	6,90 ± 0,13	6,79 ± 0,35	6,64 ± 0,29	6,79 ± 0,21	6,61 ± 0,26	7,15 ± 0,31
284 (Landsorttief)	6,59 ± 0,24	6,30 ± 0,41	6,39 ± 0,19	6,45 ± 0,44	6,29 ± 0,26	
245 (Karlsötief)	6,89 ± 0,22	6,60 ± 0,15	6,78 ± 0,10	6,77 ± 0,44	6,52 ± 0,19	

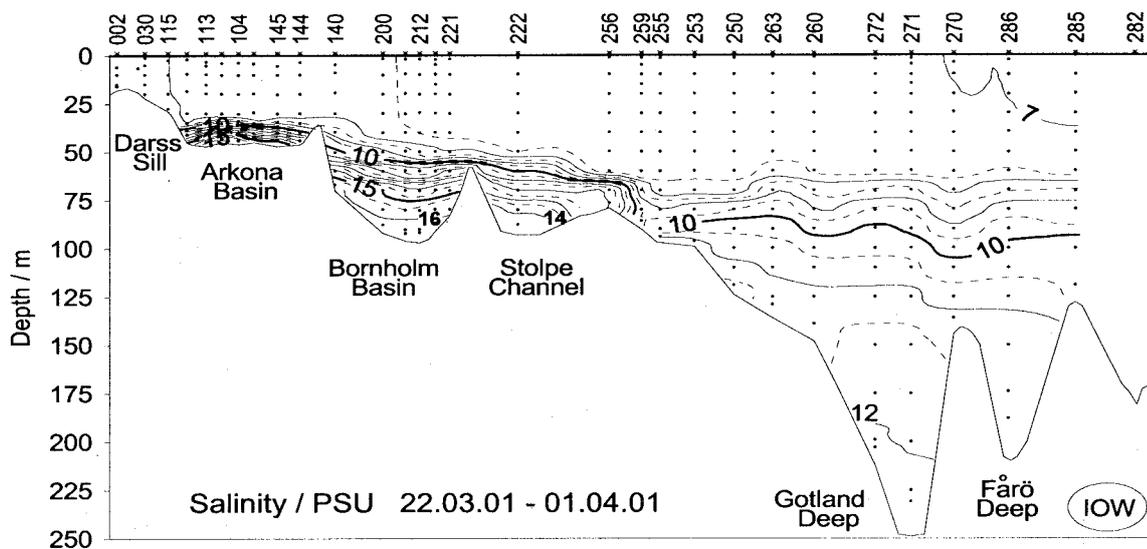
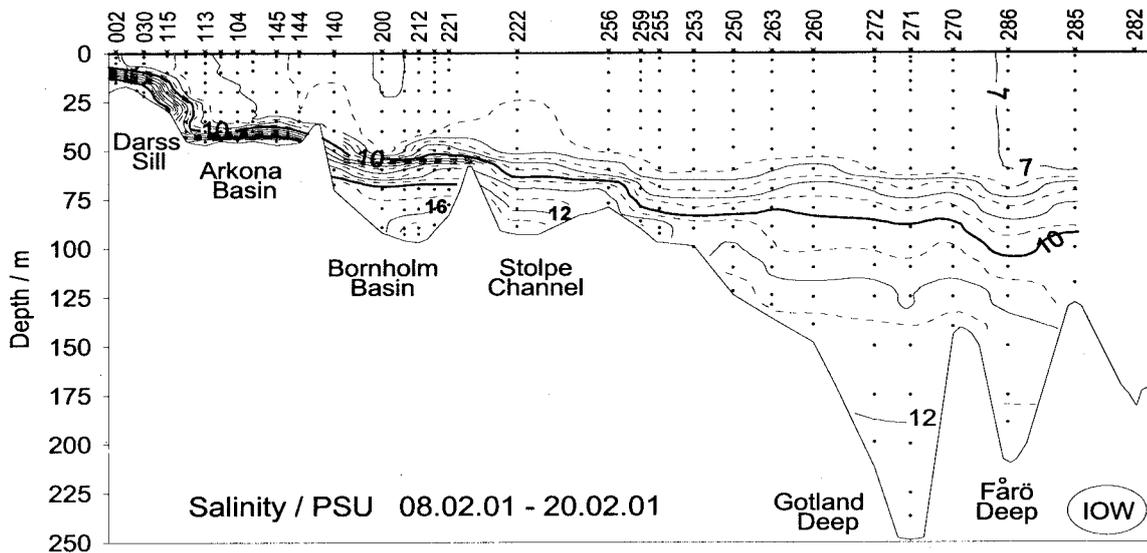


Abb. 17

Vertikale Verteilung des Salzgehaltes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 17

Vertical salinity distribution between Darß sill and northern Gotland Basin

So stieg zwischen Mitte November und Mitte Dezember der Salzgehalt in 80 m Tiefe in der Bornholmsee um etwa 1 PSU und die Temperatur sogar um etwa 3 K an. Das war verbunden mit einer Erhöhung des gelösten Sauerstoffs von $-0,98$ ml/l auf $4,68$ ml/l (SMHI, 2002; vgl. auch Kapitel 5.3). In der östlichen Gotlandsee waren entsprechende Veränderungen im Jahr 2001 noch nicht zu erwarten. Im Januar und Februar 2002 konnten jedoch schon Effekte beobachtet werden. Der Salzgehalt im Oberflächenwasser der zentralen Ostsee ist von 2000 bis 2001 um etwa 0,2 PSU abgesunken (Tabelle 6). Im Bereich des Fårö-, Landsort- und Karlsötiefs wurden die niedrigsten Werte der letzten Jahre festgestellt, in der östlichen Gotlandsee wurde das Minimum von 1999 nur knapp verfehlt. Die aktuellen Zahlen liegen $0,43 - 0,55$ PSU unter den langjährigen Durchschnittswerten. Der mehrjährige Trend zur Aussüßung, der im Jahre 2000 kurz unterbrochen worden war, setzt sich damit weiter fort.

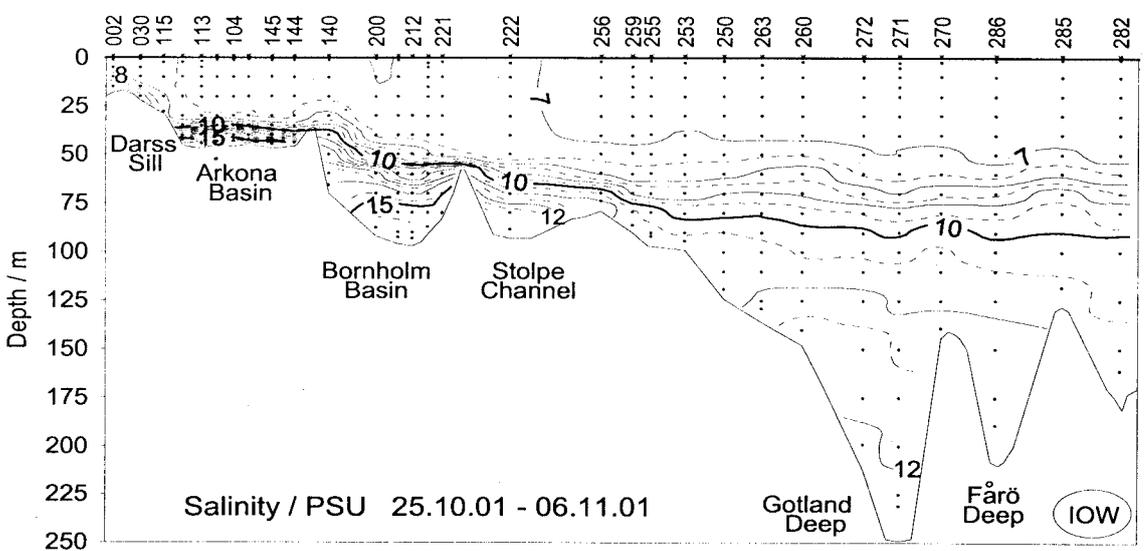
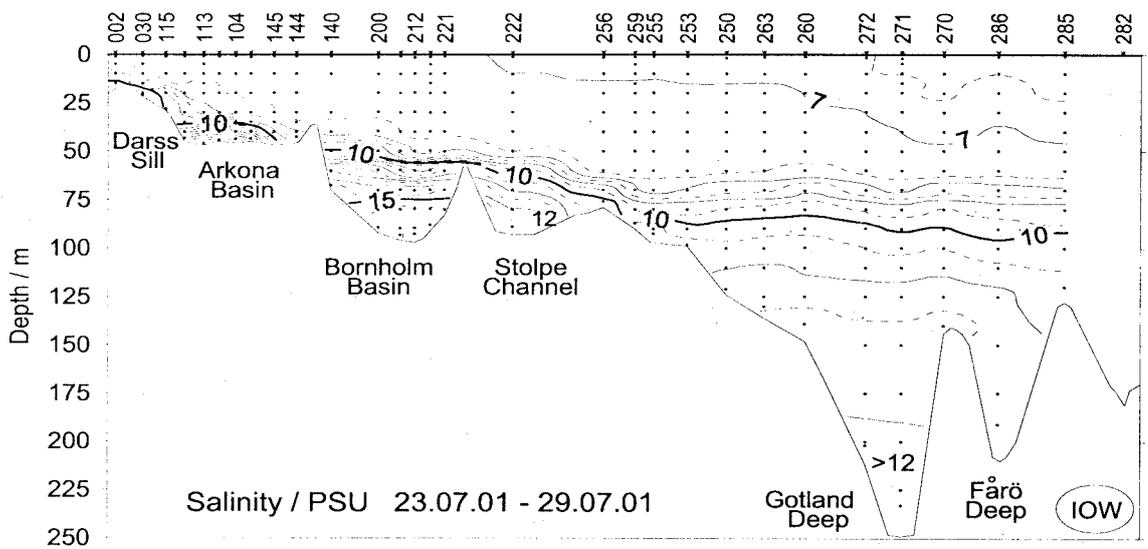
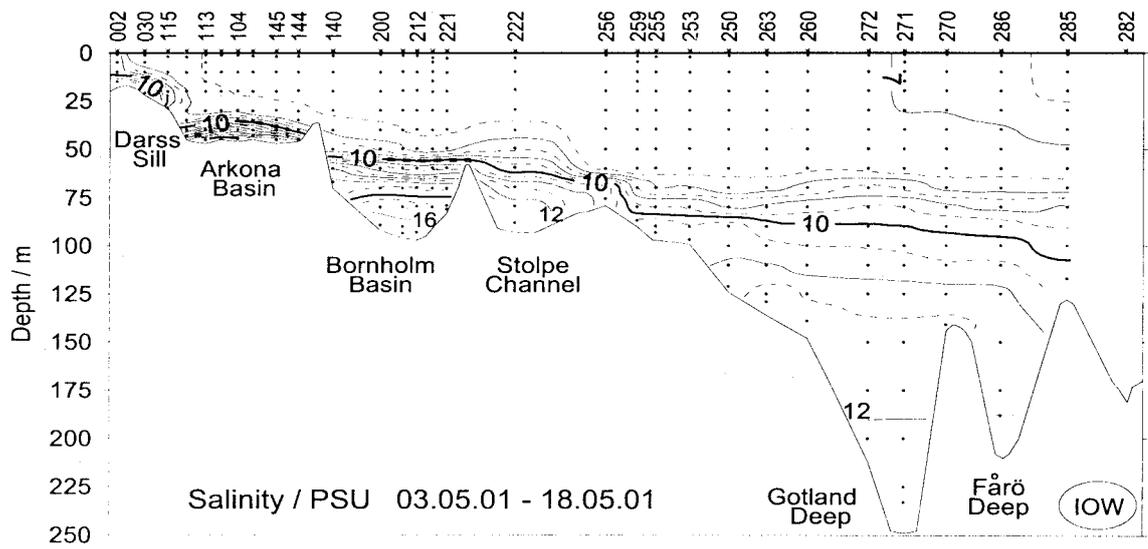


Abb. 17 Forts.

Fig. 17 cont.

5.3 Sauerstoff und Schwefelwasserstoff

Die Komponenten der Sauerstoffbilanz eines Gewässers sind durch Zufuhr durch Atmosphäre und Photosynthese sowie Verbrauch durch Atmung, Abbau und Mineralisation organischer Stoffe und Verlust an die Atmosphäre gekennzeichnet. Demnach ist die Sauerstoffbilanz eines Gewässers um so schlechter je geringer der Eintrag an Sauerstoff durch die Oberfläche und die Photosyntheseaktivität und je intensiver die Stoffwechselleistungen der heterotrophen Organismen sind (SCHWOERBEL, 1984). Der Sauerstoffgehalt wird auch durch temperatur- und salzgehaltsbedingte Schichtungen, vertikale Zirkulation, Advektion und Konvektion beeinflusst. Die nachfolgenden Ausführungen nehmen Bezug auf die in Abb. 18 dargestellten Verteilungen des Sauerstoff- und Schwefelwasserstoffgehaltes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken.

Tab. 7

Sauerstoffsättigungswerte (%) für die Oberflächenschicht (0 - 10 m) der Jahre 1998 - 2001 zwischen Kieler Bucht und nördlichem Gotlandbecken

Table 7

Oxygen saturation (%) in the surface layer (0 - 10 m) for 1998 - 2001 between Kiel Bight and northern Gotland Basin

	1998	Feb.	März	Mai	Juli/Aug.	Okt./Nov.
Mittel		98,2	101,2	107,7	101,7	95,5
Stabw.		1,4	1,9	5,6	1,6	0,9
Max		100,8	106,9	127,7	105,4	97,7
Min		95,2	98,2	96,4	97,3	93,1
n		72	72	72	72	72
	1999	Feb.	März	Mai	Juli/Aug.	Okt./Nov.
Mittel		95,8	104	103,8	106,4	n.d.
Stabw.		1,5	3,6	3,7	6,0	n.d.
Max		98,7	118,7	112,7	120,2	n.d.
Min		92,0	99,3	94,5	88,1	n.d.
n		85	78	85	81	n.d.
	2000	Feb.	März	Mai	Juli/Aug.	Okt./Nov.
Mittel		97,2	103,8	107,7	104,4	95,4
Stabw.		1,7	4,3	7,5	6,4	2,5
Max		104,6	116,9	127,3	115,6	99,5
Min		92,1	97,8	92,3	78,0	87,3
n		71	69	69	71	71
	2001	Feb.	März	Mai	Juli/Aug.	Okt./Nov.
Mittel		96,1	100,8	106,2	107,7	92,6
Stabw.		1,4	1,9	5,3	2,7	1,9
Max		99,5	107,4	117,4	118,8	95,4
Min		93,0	93,4	91,9	102,7	86,2
n		67	67	67	68	69

In der Oberflächenschicht kann ein typischer Jahresgang des Sauerstoffgehaltes beobachtet werden (MATTHÄUS, 1978). Auf Grund der erhöhten Gaslöslichkeit bei geringeren Temperaturen finden sich hohe Sauerstoffkonzentrationen im Winter sowie während der Frühjahrsblüte des Phytoplanktons (Abb. 18). Im Sommer finden sich dagegen temperaturbedingt niedrigere Konzentrationen. Um eine bessere Vergleichbarkeit zu ermöglichen, kann die Sauerstoffsättigung verwendet werden, da hier der Einfluß von Temperatur und Salzgehalt eliminiert ist.

In Tabelle 7 sind die Mittel- sowie Extremwerte der Sauerstoffsättigung für die Messungen der Jahre 1998 – 2001 dargestellt. Wenngleich zwischen den einzelnen Jahren gewisse Unterschiede auftreten, ist der generelle Jahresverlauf unverkennbar. Im Ergebnis der Dominanz sauerstoffzehrender Prozesse und einer geringen Produktion ist die Oberflächenschicht im Winter leicht untersättigt. Mit Beginn der Phytoplanktonblüte im März steigt die Sättigung an und erreicht maximale Werte im Mai sowie in den Sommermonaten. Auf Grund der unterschiedlichen zeitlichen Entwicklung der Algen schwanken die Werte in diesem Zeitraum stärker. Im Herbst führen verstärkte Abbauprozesse erneut zu einer Untersättigung. Die im Jahre 2001 gefundenen Sättigungswerte sind mit denen der Vorjahre vergleichbar (MATTHÄUS et al., 1999a, 2000, 2001). Extreme Sauerstoffsättigungen von 140 – 160 %, wie sie von NEHRING et al. (1995a, b) für das Jahr 1994 beschrieben wurden, treten in den letzten Jahren nicht mehr auf.

Das winterliche Zwischenwasser ist durch ein Temperaturminimum gekennzeichnet (Abb. 16). Der Kern dieses Zwischenwassers befindet sich im Bornholmbecken bei 50 m und im östlichen Gotlandbecken bei 60 m. Die niedrigen Temperaturen resultieren aus der winterlichen Durchmischung, wobei gleichzeitig eine Sauerstoffanreicherung erfolgte. Das intermediäre Sauerstoffmaximum bleibt während des gesamten Sommers erhalten und liegt in der Regel 10 - 20 m über dem Temperaturminimum. Im August 2001 wurden im Bornholmbecken in 30 m Tiefe noch Sauerstoffkonzentrationen von $7,75 \pm 0,09$ ml/l ($n = 7$) gemessen, im östlichen Gotlandbecken lag das Maximum mit $7,88 \pm 0,14$ ml/l ($n = 5$) in 40 m Tiefe. Die alljährliche Existenz dieses Sauerstoffmaximums wird auch aus höher auflösenden Untersuchungen im Bereich des Gotlandtiefs deutlich (Abb. 20). Im Juli/August der Jahre 1993 – 2001 wurden jeweils Werte um 8 ml/l gemessen.

Das Tiefenwasser des Arkonabeckens wird alljährlich im Winterhalbjahr vertikal durchmischt. Zusätzlich führen Einstromereignisse wiederholt zur Wassererneuerung, so dass im Winter und Frühjahr eine gute Sauerstoffversorgung bis zum Grund vorherrscht. So fanden sich im Februar 2001 von der Oberfläche bis in 40 m Wassertiefe sehr einheitliche Sauerstoffkonzentrationen um 8,50 ml/l. Lediglich in unmittelbarer Bodennähe hatte sich eine salzreichere Schicht eingelagert, deren Sauerstoffgehalt um 0,6 ml/l niedriger war. Die Ausbildung der thermischen Schichtung und der verstärkte Abbau der organischen Substanz führen im Sommer zu einem Sauerstoffrückgang in den bodennahen Wasserschichten. Ein Minimum wurde Anfang August mit 1,72 ml/l (24 % Sättigung) registriert.

Auch in den flachen Küstengewässern vor der deutschen Küste kommt es in jedem Jahr im Sommer und Herbst zu Sauerstoffdefiziten. Ursache ist eine stabile thermohaline Schichtung, die eine Zirkulation bis zum Boden verhindert. So wurden im Juli/August in der Pommernbucht in Bodennähe Minimalwerte von 1,49 ml/ (23 % Sättigung) gemessen. Eine ruhige Wetterlage in der 1. Oktoberhälfte 2001 führte in Verbindung mit einer starken halinen Schicht auch in der Lübecker Bucht (0,72 ml/l = 11 % Sättigung) und im Seegebiet vor Warnemünde (0,34 ml/l = 5 % Sättigung) zu starken Untersättigungen im bodennahen Bereich. Die einsetzenden Herbststürme durchmischten den Wasserkörper jedoch rasch wieder bis zum Grund.

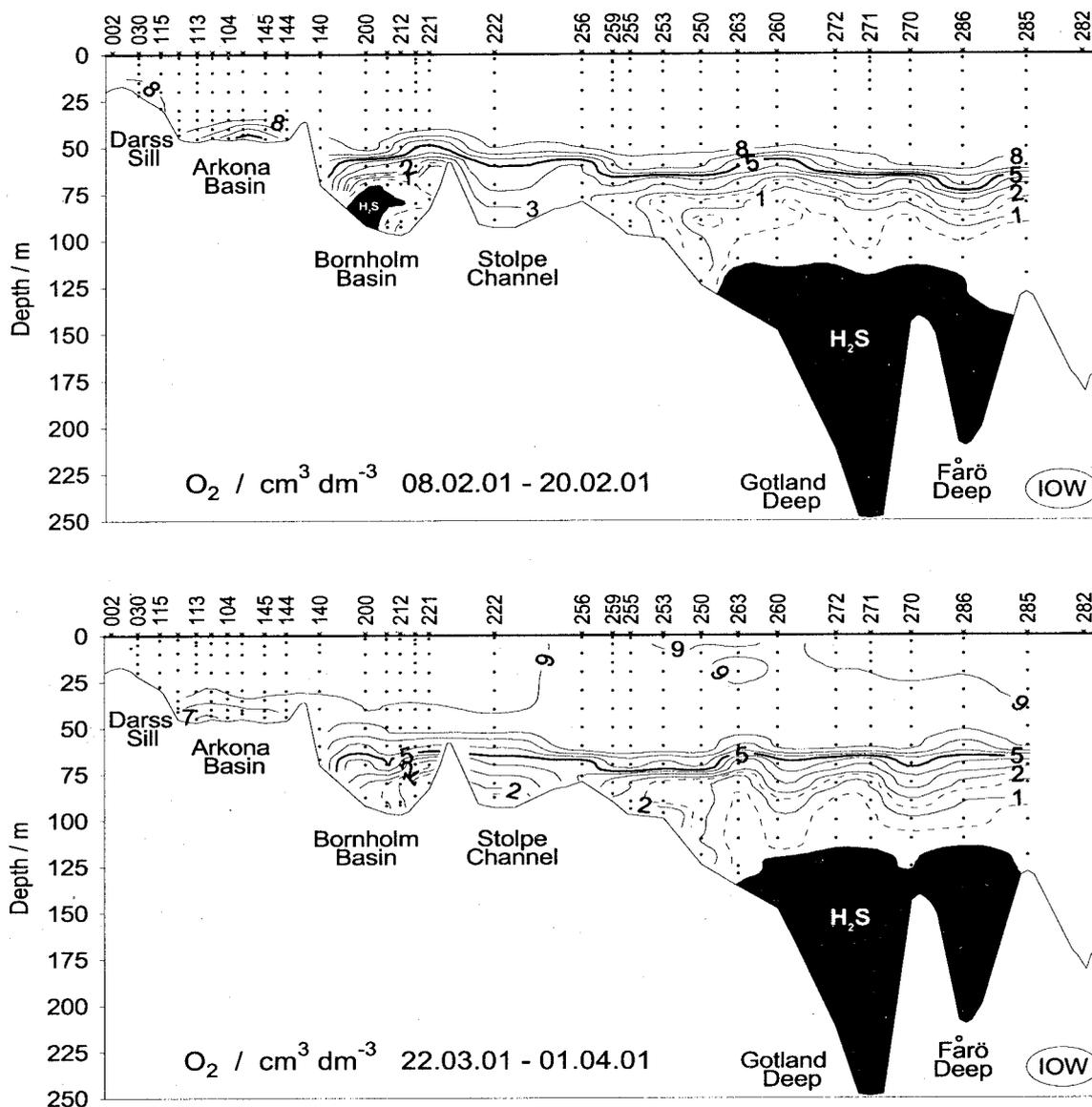


Abb. 18
Vertikale Verteilung des Sauerstoff- und Schwefelwasserstoffgehaltes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 18
Vertical distribution of oxygen resp. hydrogen sulphide between Darß sill and northern Gotland Basin

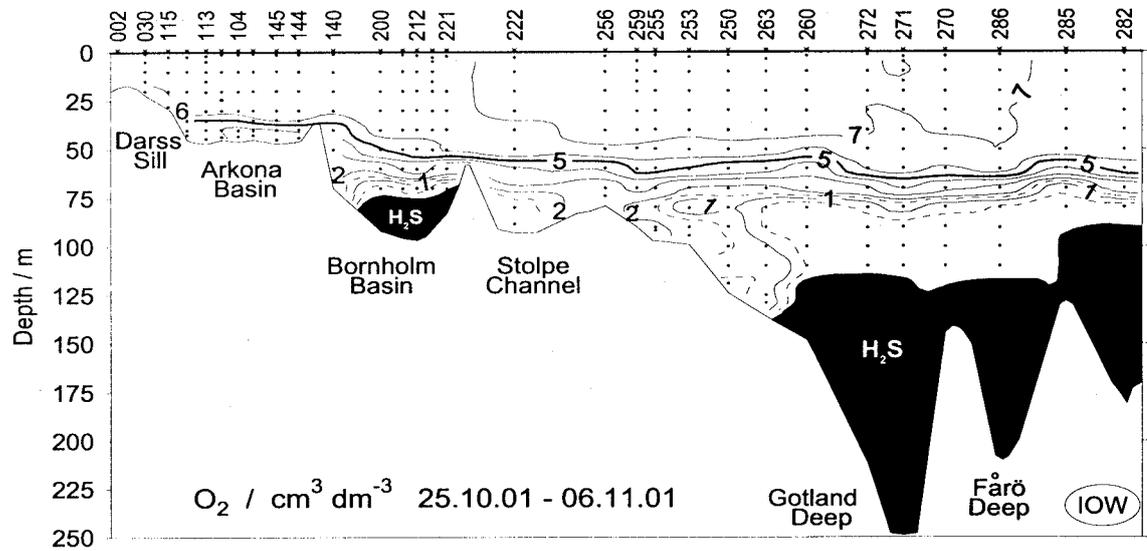
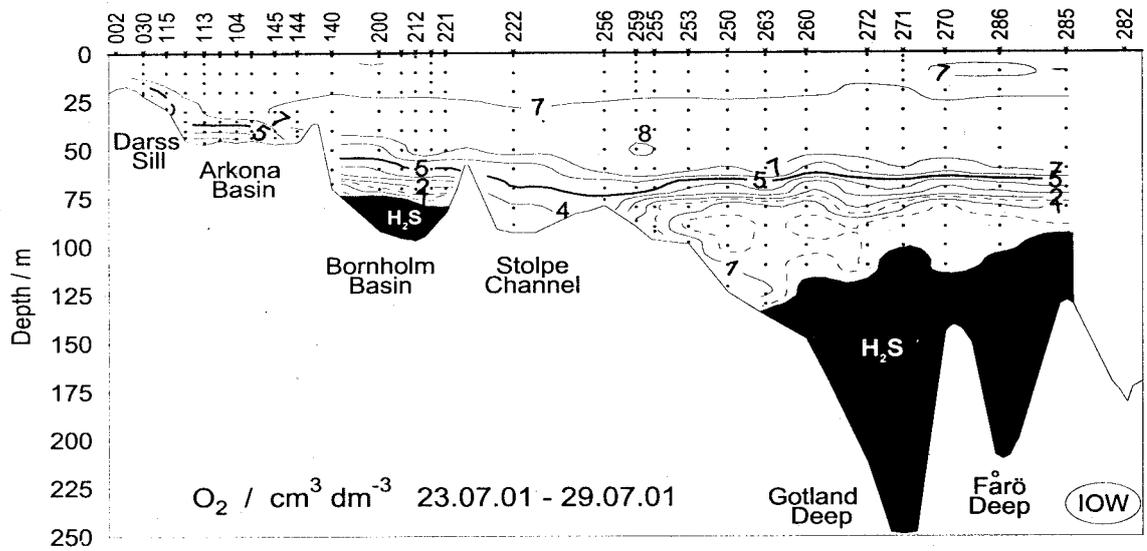
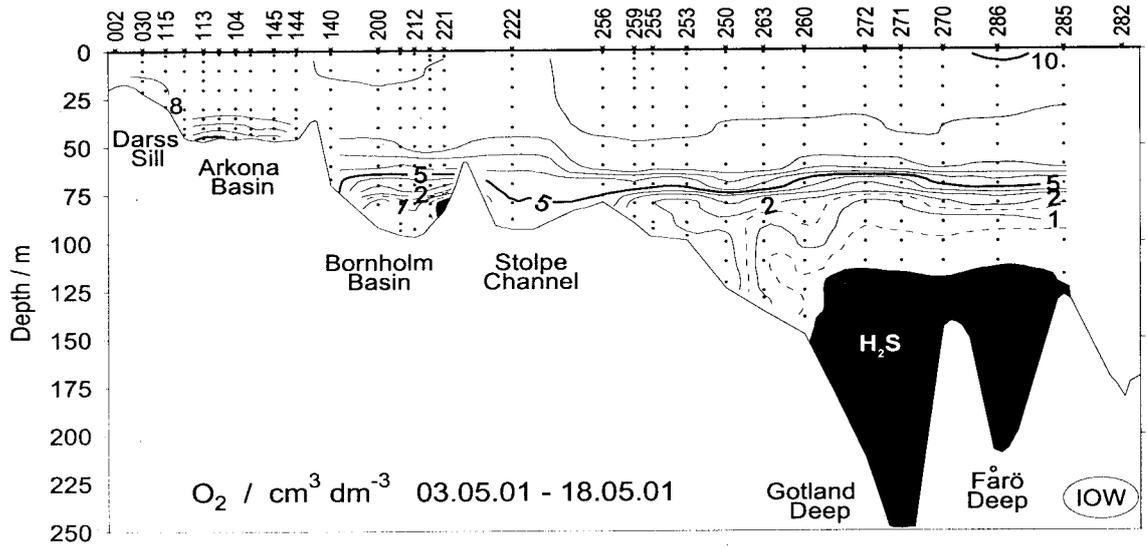


Abb. 18 Forts.

Fig. 18 cont.

Auch im Bornholmbecken führen kleinere Einstrome salzreichen Wassers, die bei jedem baroklinen oder schwachen barotropen Ereignis über die Schwellen ins Arkonabecken gelangen, noch relativ regelmäßig zu einer Sauerstoffversorgung des Tiefenwassers. Schwache Einstrome Ende Oktober und Mitte Dezember 2000 (MATTHÄUS et al., 2001) führten in der ersten Jahreshälfte 2001 zu oxischen Verhältnissen in Bodennähe. Die 2. Jahreshälfte war bis Anfang Dezember durch Anoxie des Tiefenwassers gekennzeichnet. Der starke Einstrom über die Darßer Schwelle und den Sund Anfang November 2001 (vgl. Kapitel 3) spiegelte sich bereits Mitte Dezember 2001 im Tiefenwasser des Bornholmbeckens wider, wo 4,68 ml/l Sauerstoff gefunden wurden.

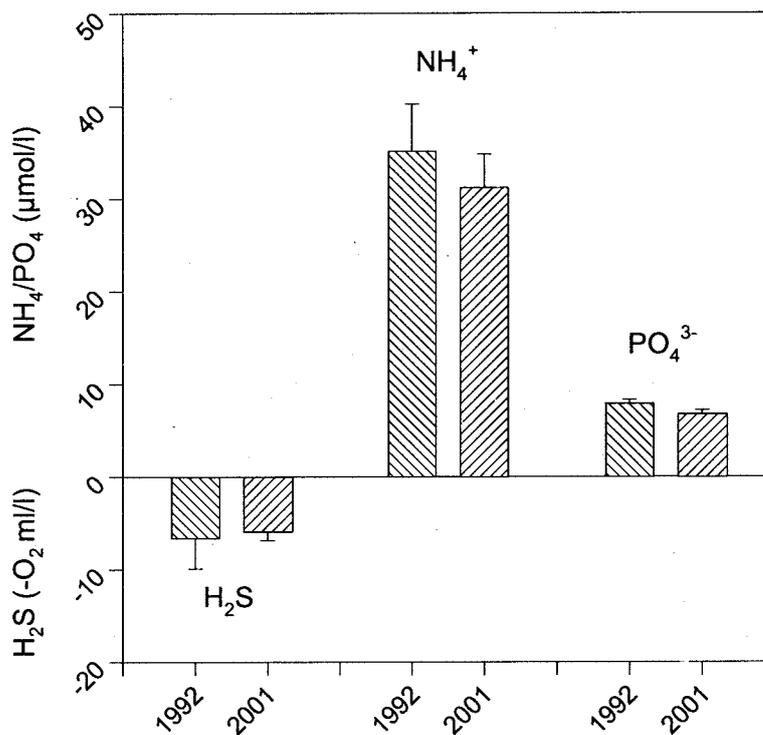


Abb. 19

Vergleich der Schwefelwasserstoff- und Nährstoffkonzentrationen in der bodennahen Schicht des Gotlandtiefs in den Jahren 1992 und 2001

Fig. 19

Comparison of hydrogen sulphide and nutrient concentrations in the near bottom layer of the Gotland Deep in 1992 and 2001

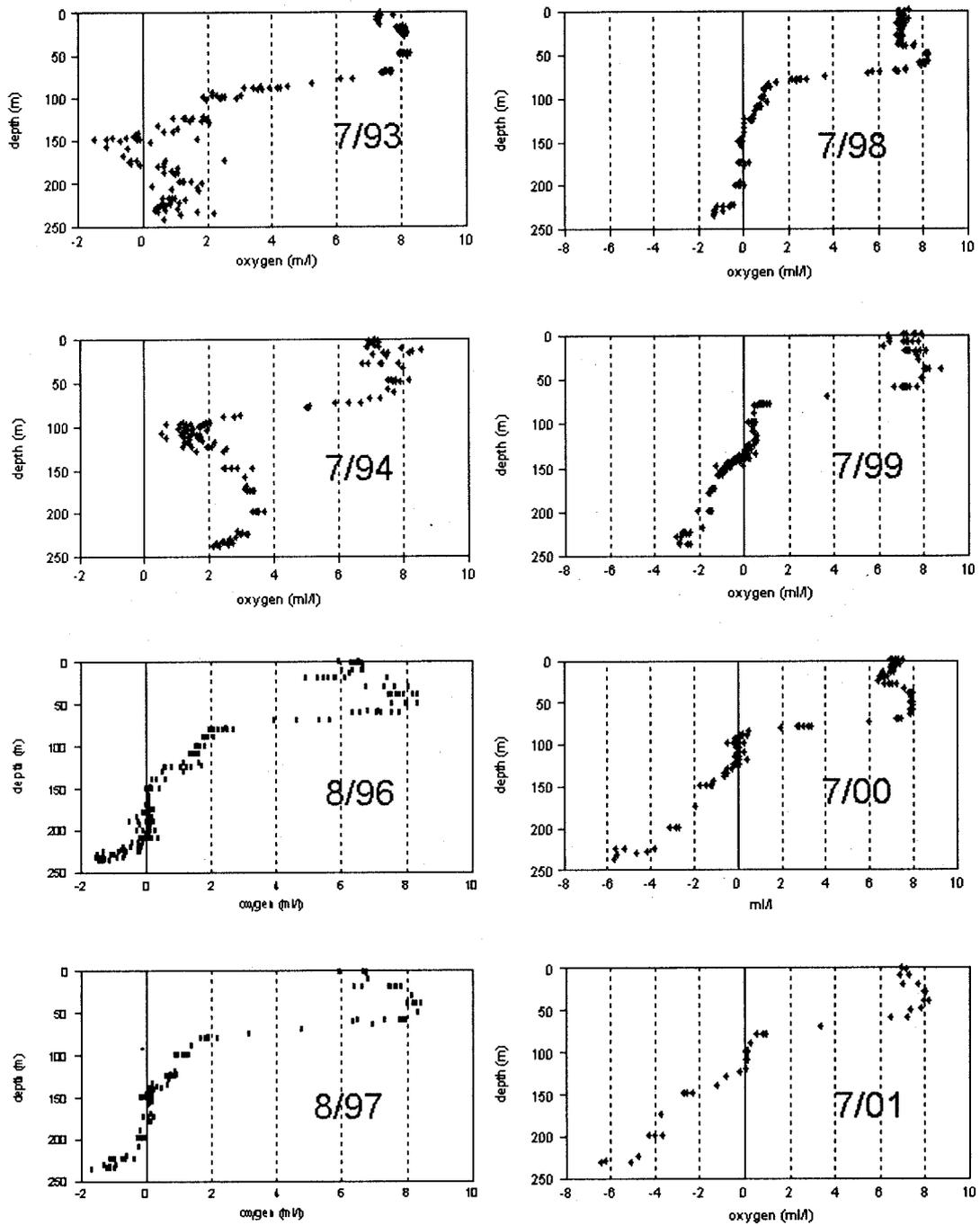


Abb. 20
Vertikalprofile von Sauerstoff/Schwefelwasserstoff im Gotlandtief (Station 271) zwischen 1993 und 2001

Fig. 20
Vertical profiles for oxygen resp. hydrogen sulphide at the Gotland Deep station (St. 271) between 1993 and 2001

Der Füllungsgrad des Bornholmbeckens mit salzreichem Wasser unterhalb der Salzgehaltssprungschicht hat wesentlichen Einfluß auf den Effekt schwächerer Einströme für das Tiefenwasser der zentralen Ostsee (MATTHÄUS and NAUSCH, 2002). Wenn die Pufferkapazität des Bornholmbeckens erschöpft ist, können diese Einströme das Becken in einer Tiefe von 50 - 60 m direkt passieren und nehmen signifikanten Einfluß auf die Sauerstoffversorgung des östlichen Gotlandbeckens. Eine solche Situation wurde nach dem großen Salzwassereinbruch im Januar 1993 beobachtet, als das salz- und sauerstoffreiche Wasser der schwachen Einströme vom Dezember 1993 und März 1994 relativ ungestört und ohne signifikante Vermischungen bis in den Bereich des Gotlandtiefs vordringen konnte (NEHRING et al., 1995b, MATTHÄUS and NAUSCH, 2002).

In den anderen Tiefenbecken der Ostsee hält die Stagnationsperiode, die 1995 begonnen hat (NEHRING et al., 1995c) unvermindert an. Bis 1998 wurde die Stagnationsphase im östlichen Gotlandbecken noch durch alljährliche schwache Einströme im Winter/Frühjahr unterbrochen, die zu einer kurzzeitigen Verbesserung der Sauerstoffverhältnisse führten (MATTHÄUS et al. 1997, 1998, 1999a). Seitdem herrschen permanent anoxische Verhältnisse. Folgerichtig wurden die höchsten Schwefelwasserstoffkonzentrationen, ausgedrückt als negative Sauerstoffäquivalente, in allen Tiefenbecken der zentralen Ostsee im Jahre 2001 ermittelt (Tabelle 8).

Die Entwicklung der Stagnationsperiode im Bereich des Gotlandtiefs kann besonders gut anhand höher auflösender Beprobungen in den Sommermonaten der Jahre 1993 - 2001 dokumentiert werden (Abb. 20). Im Ergebnis des starken Salzwassereinbruchs im Januar 1993 wurde das Tiefenwasser des Gotlandbeckens belüftet. Darüber befand sich jedoch nach wie vor eine intermediäre Schicht schwefelwasserstoffhaltigen Wassers. Eine deutliche Verbesserung der Sauerstoffverhältnisse wurde erst mit den nachfolgenden schwachen Einströmen im Dezember 1993 und März 1994 erreicht, die zum Ergebnis hatten, dass im Mai 1994 der gesamte Tiefenbereich der Ostsee frei von Schwefelwasserstoff war (NEHRING et al., 1995b, MATTHÄUS and NAUSCH, 2002). Bereits im Sommer 1996 wurden im Tiefenbereich unterhalb 225 m wieder anoxische Verhältnisse gefunden. Darüber erstreckt sich ein weiter Bereich, in dem häufig niedrige Sauerstoffkonzentrationen mit geringen Mengen an Schwefelwasserstoff alternieren. Diese Situation bleibt im wesentlichen bis 1998 erhalten. Nach dem Ausbleiben der schwachen Einströme nimmt die Stärke der schwefelwasserstoffhaltigen Schicht kontinuierlich zu. Gleichzeitig erhöhen sich die Konzentrationen an Schwefelwasserstoff (Maximalwert $4,90 \text{ mg/l H}_2\text{S} = -6,46 \text{ ml/l O}_2$). Vergleicht man die Verhältnisse in der bodennahen Schicht des Gotlandtiefs im Jahre 2001 mit der Situation am Ende der vorhergehenden Stagnationsperiode im Jahre 1992 (Abb. 19), wird deutlich, dass die Schwefelwasserstoffkonzentrationen bereits wieder in der gleichen Größenordnung liegen.

Auch im Tiefenwasser des westlichen Gotlandbeckens setzt sich die Stagnationsperiode fort (MATTHÄUS et al., 2001). Diese Entwicklung ist für die erste Phase von Stagnationsperioden charakteristisch (MATTHÄUS, 1995). Im Landsorttief herrschten ganzjährig anoxische Verhältnisse während im Karlsötief in der 1. Jahreshälfte 2001 noch Sauerstoff gefunden wurde, ab Mai setzten sich auch dort anoxische Bedingungen durch. Dies führte dazu, dass erstmals ein negativer Jahresmittelwert errechnet wurde (Tabelle 5). Die Mächtigkeit der schwefelwasserstoffhaltigen Schicht betrug im November 2001 im Landsorttief ca. 330 m und im Karlsötief ca. 20 m.

5.4 Anorganische Nährstoffe

Eutrophierungseffekte konnten im Bereich großer Städte entlang der Ostseeküste bereits in der 1. Hälfte des 20. Jahrhunderts nachgewiesen werden (ELMGREN and LARSSON, 2001). Für die offene See fanden sich in den 1960er Jahren erste Anzeichen der Eutrophierung (FONSELIUS, 1969), die bis Mitte der 1980er Jahre ernsthafte Ausmaße annahm. Die Stickstoffbelastung der Ostsee hatte sich zwischen 1900 und 1985 vervierfacht, der Phosphoreintrag nahm um den Faktor 8 zu (LARSSON et al., 1985). Im Ergebnis dieses erhöhten Eintrages nahmen die Winterkonzentrationen der anorganischen Nährstoffe signifikant zu (HELCOM, 1996, 2001). Da die Eutrophierung nach wie vor zu den gravierendsten Problemen der Ostsee zählt, wird den Nährstoffverhältnissen große Aufmerksamkeit geschenkt. In die Untersuchungen sind vor allem die anorganischen Nährstoffe Phosphat, Ammonium, Nitrit, Nitrat und Silikat einbezogen. Der gegenwärtige Kenntnisstand zum Silikat ist bei MATTHÄUS et al. (1997, 2001) beschrieben und soll hier nicht weiter ausgeführt werden.

Die 2001 beobachteten Vertikalverteilungen für Phosphat und Nitrat sind in den Abb. 21 und 22 dargestellt. In der Oberflächenschicht der Ostsee weisen die Nährstoffkonzentrationen den für die gemäßigten Breiten typischen Jahresgang auf (NAUSCH and NEHRING, 1996). Für die zentrale und nördliche Ostsee ist dabei ein stabiles Winterplateau auf hohem Niveau charakteristisch, welches durch ein Gleichgewicht aus mikrobieller Mineralisation, geringer Produktivität und tiefem vertikalen Austausch verursacht wird. Nur diese „Plateauphase“ kann für Trenduntersuchungen genutzt werden (NEHRING and MATTHÄUS, 1991). Tabelle 8 faßt die winterlichen Oberflächenkonzentrationen für Phosphat, Nitrat und die Summe der anorganischen Stickstoffkomponenten für die Jahresreihe 1997 – 2001 zusammen. Die Werte stellen das Mittel der Messtiefen 1 m, 5 m und 10 m dar. Geringe Standardabweichungen stehen für eine homogene Deckschicht.

Beim Vergleich der 1. und 2. Hälfte der 90er Jahre des vergangenen Jahrhunderts konnte für das Phosphat vor allem in den Küstengewässern ein signifikanter Rückgang festgestellt werden. Maßnahmen zur Reduktion des Phosphoreintrages aus Kläranlagen haben hier gegriffen. Aber auch in der offenen Ostsee war dieser Rückgang deutlich sichtbar (MATTHÄUS et al., 2000; HELCOM, 2001). Dieser Trend wurde im Jahr 2000 unterbrochen. Es wurden generell sehr hohe Phosphatwinterkonzentrationen gefunden (Tabelle 8). Die Ursachen für diese Veränderungen sind noch nicht völlig klar. Starke Stürme von Dezember 1999 bis März 2000 könnten in der offenen Ostsee zu einer tiefer reichenden Durchmischung geführt haben bzw. in den flacheren Gebieten eine Resuspension abgelagerten Materials verursacht haben. Beide Prozesse bewirken eine erhöhte Phosphatzufuhr. Im Winter 2001 wurden solche starken Stürme nicht beobachtet. Die Phosphatkonzentrationen liegen in der zentralen Ostsee wieder auf recht niedrigem Niveau. Lediglich das Bornholmbecken ist durch höhere Werte gekennzeichnet (Tabelle 8). Die Ergebnisse der letzten Jahre legen jedoch den Schluss nahe, dass sich bereits ein neues Gleichgewicht eingestellt hat und mit einem weiteren Rückgang der Konzentrationen in einem kurzen Zeitraum nicht zu rechnen ist. Auch die starke Phosphatanreicherung des Tiefenwassers auf Grund der lang anhaltenden Stagnationsperiode muss berücksichtigt werden. Tiefreichende Durchmischung und Auftriebsprozesse können in der offenen Ostsee zu einer zusätzlichen Phosphatversorgung führen (siehe auch S. 49).

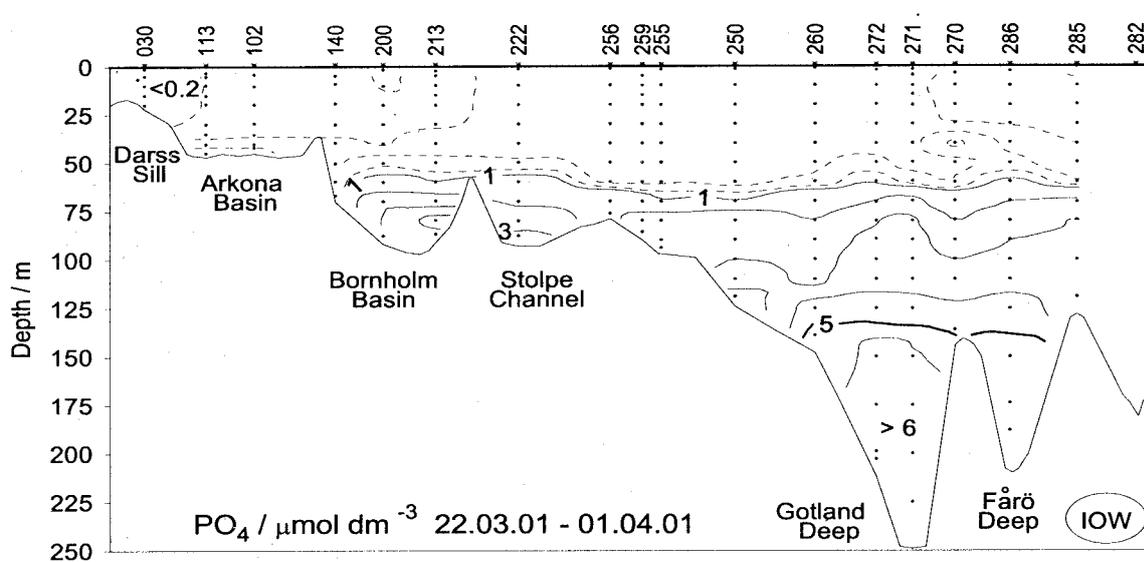
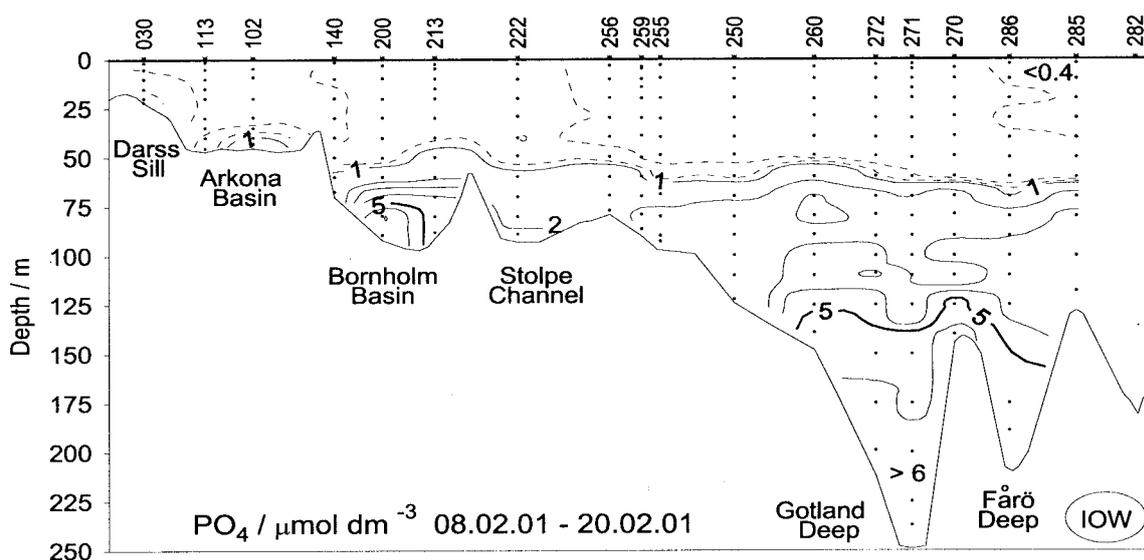


Abb. 21
Vertikale Verteilung des Phosphatgehaltes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 21
Vertical distribution of phosphate between Darß sill and northern Gotland Basin

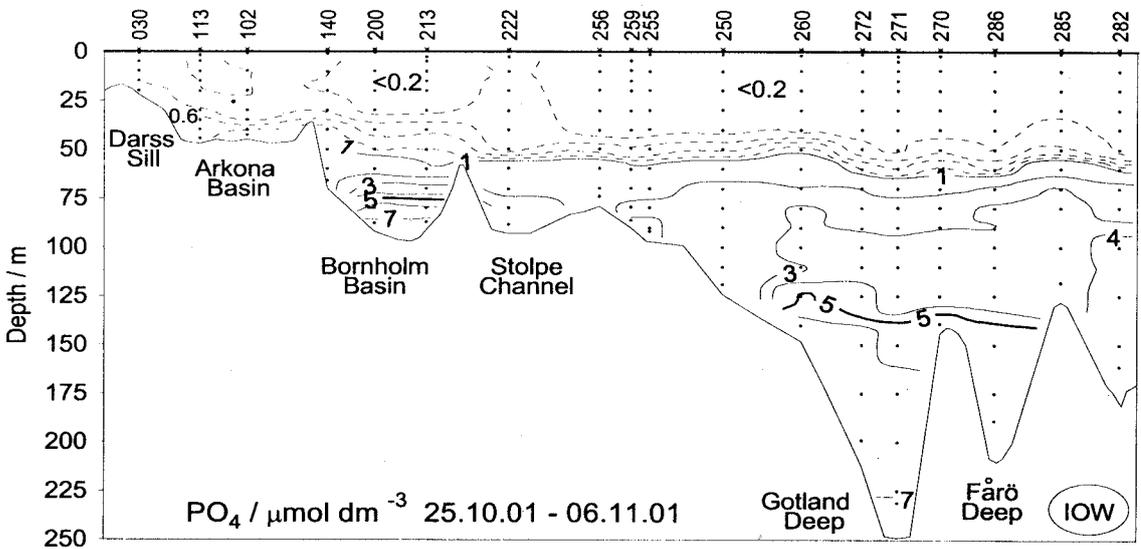
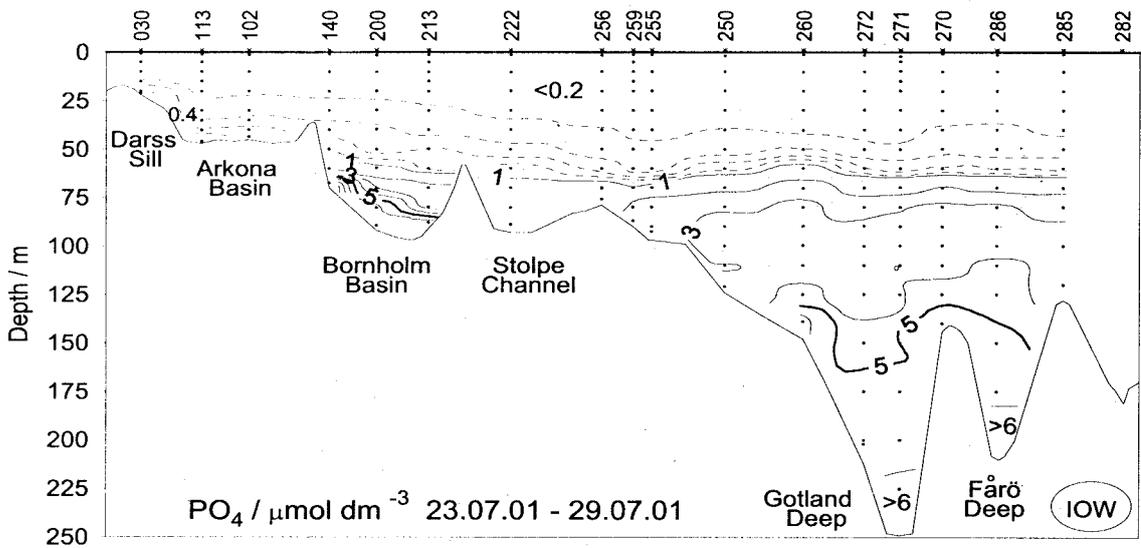
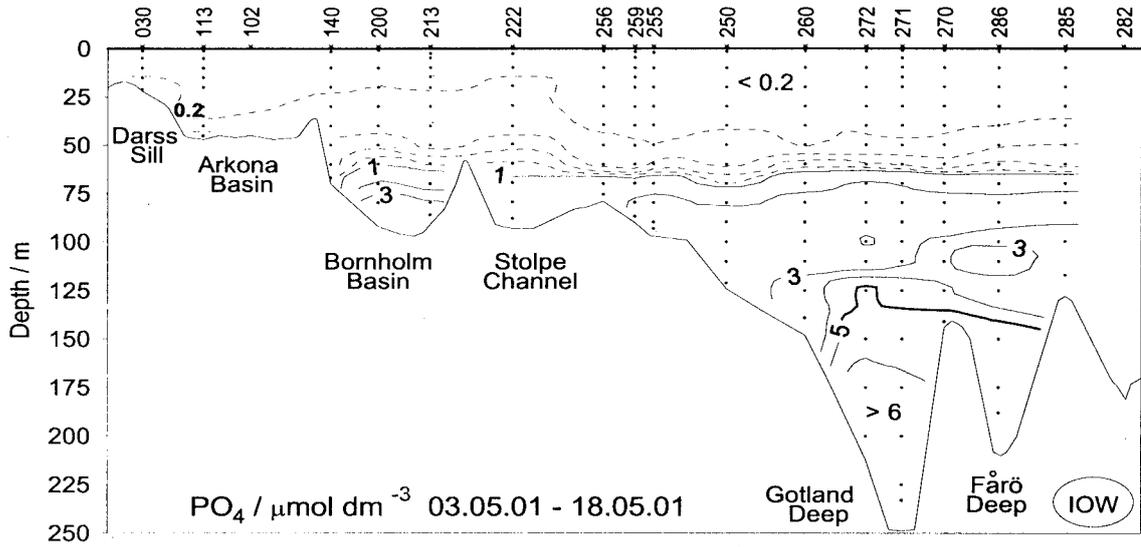


Abb. 21 Forts.

Fig. 21 cont.

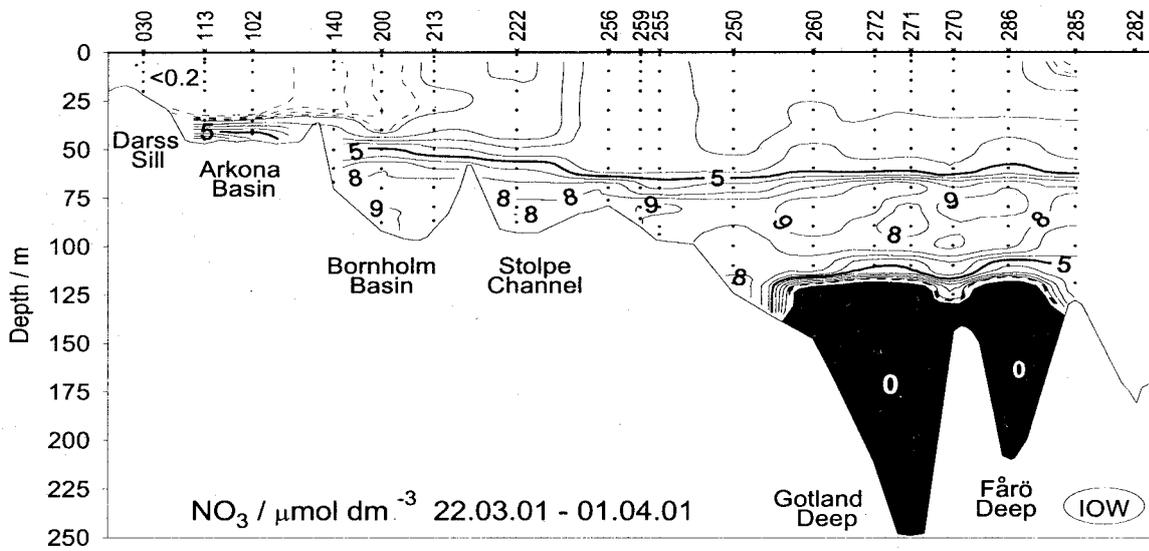
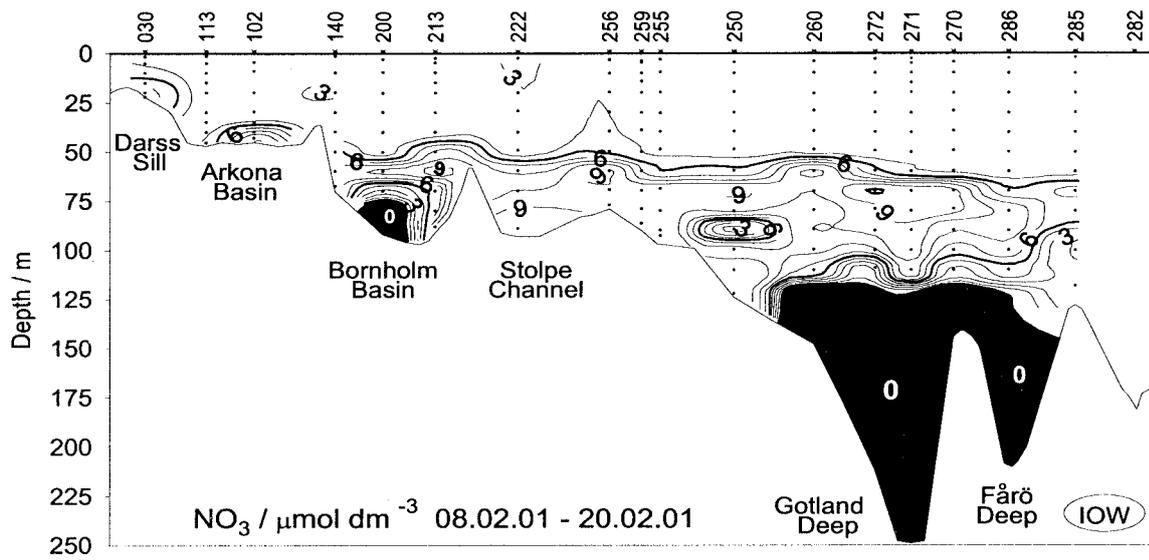


Abb. 22
Vertikale Verteilung des Nitratgehaltes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 22
Vertical distribution of nitrate between Darß sill and northern Gotland Basin

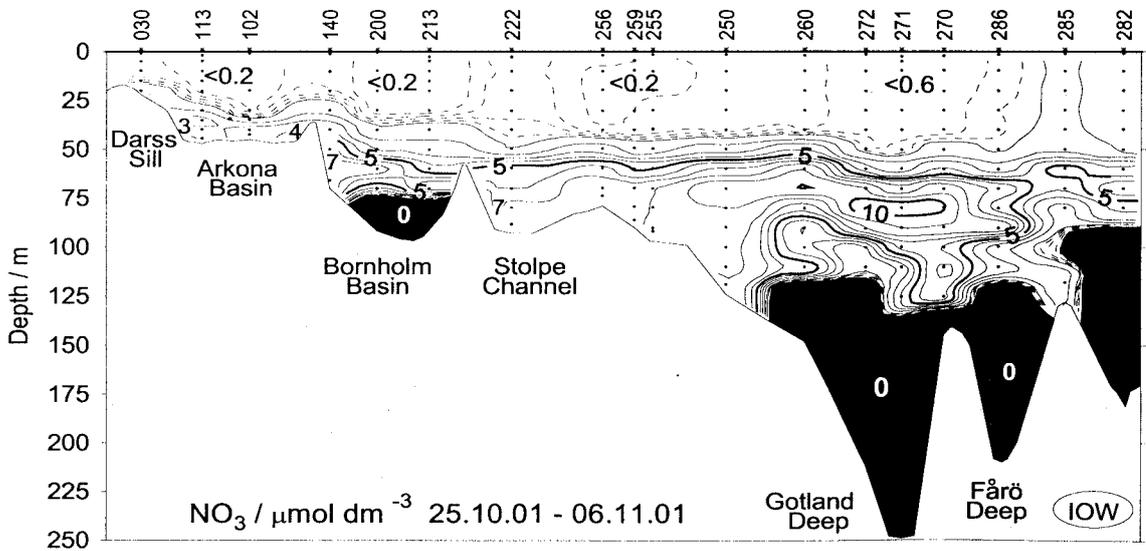
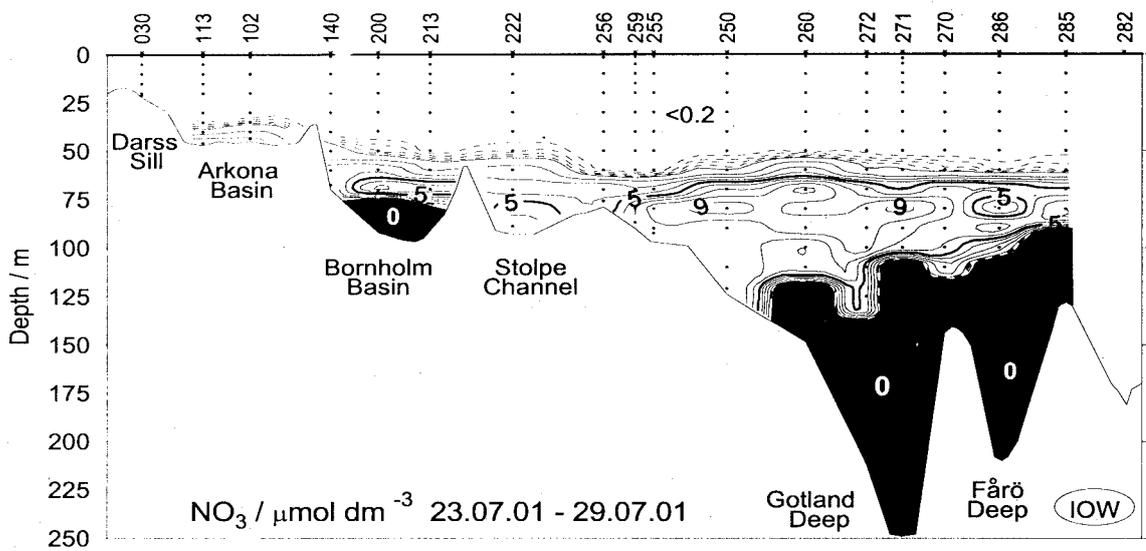
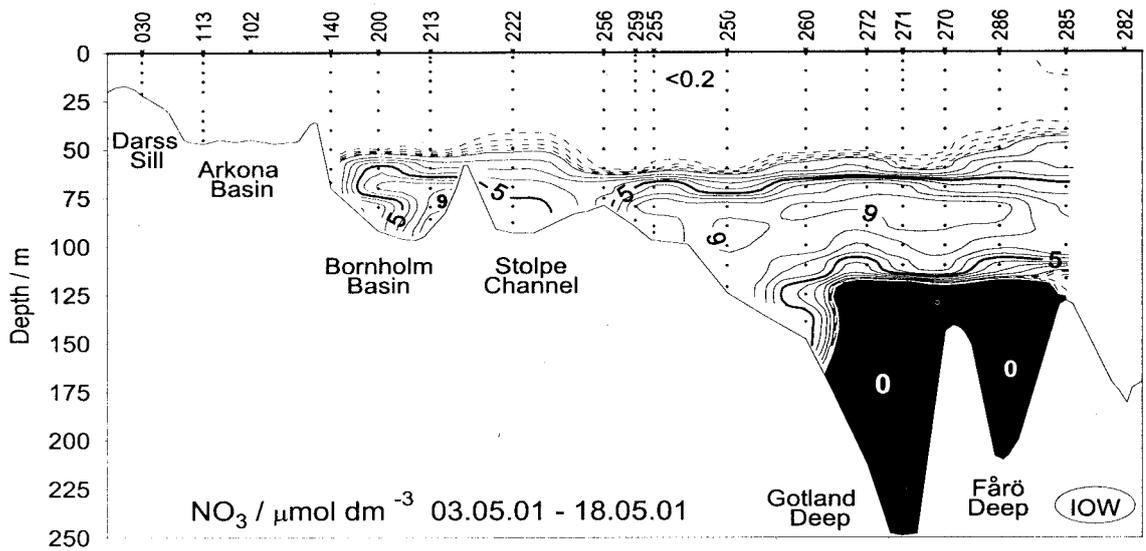


Abb. 22 Forts.

Fig. 22 cont.

Bei den anorganischen Stickstoffkomponenten konnte im Gegensatz zum Phosphat in den 1990er Jahren kein eindeutiger Trend festgestellt werden. So ordnen sich auch die Ergebnisse des Jahres 2001 in dieses Bild ein (Tabelle 8). Nitrat stammt zu einem sehr hohen Prozentsatz aus diffusen Quellen und ist eng an das Abflussgeschehen gekoppelt (NAUSCH et al., 1999). Reduktionsmaßnahmen sind für diffuse Quellen wesentlich schwieriger umzusetzen als für Einträge aus Punktquellen.

Tab. 8

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

Table 8

Mean nutrient concentrations in the surface layer (0 - 10 m) in winter in the western and central Baltic Sea (Minima in bold)

Phosphat ($\mu\text{mol/l}$)

Station	Monat	1997	1998	1999	2000	2001
023 (Lübecker Bucht)	Feb.	0,60 ± 0,03	0,64 ± 0,01	0,63 ± 0,01	0,67 ± 0,02	0,63 ± 0,02
012 (Meckl. Bucht)	Feb.	0,56 ± 0,01	0,66 ± 0,01	0,61 ± 0,02	0,70 ± 0,02	0,70 ± 0,02
162 (Pommersche Bucht)	Feb.	0,74 ± 0,01	0,66 ± 0,01	0,64 ± 0,01	0,58 ± 0,01	0,76 ± 0,02
113 (Arkonasee)	Feb.	0,38 ± 0,01	0,40 ± 0,01	0,49 ± 0,01	0,56 ± 0,02	0,54 ± 0,02
213 (Bornholmtief)	Feb.	0,50 ± 0,01	0,46 ± 0,01	0,56 ± 0,01	0,75 ± 0,00	0,71 ± 0,00
271 (Gotlandtief)	Feb.	0,43 ± 0,01	0,49 ± 0,01	0,49 ± 0,04	0,70 ± 0,01	0,40 ± 0,01
	Apr.	-	0,52 ± 0,01	0,42 ± 0,02	0,67 ± 0,00	-
286 (Färötief)	Feb.	0,37 ± 0,01	0,49 ± 0,01	0,46 ± 0,02	0,65 ± 0,00	0,39 ± 0,01
	Mär.	-	0,47 ± 0,01	0,50 ± 0,00	0,57 ± 0,00	-
284 (Landsortief)	Feb.	0,50 ± 0,01	0,42 ± 0,03	0,38 ± 0,01	0,65 ± 0,00	0,37 ± 0,01
	Mär.			0,39 ± 0,01	0,64 ± 0,00	
245 (Karlsötief)	Feb.	0,57 ± 0,01	0,47 ± 0,01	0,54 ± 0,00	0,75 ± 0,01	0,49 ± 0,01

Tabelle 8 (Fortsetzung)**Nitrat ($\mu\text{mol/l}$)**

Station	Monat	1997	1998	1999	2000	2001
023 (Lübecker Bucht)	Feb.	8,1 \pm 0,2	12,0 \pm 1,0	9,0 \pm 0,1	7,2 \pm 0,1	5,1 \pm 0,2
012 (Meckl. Bucht)	Feb.	5,7 \pm 0,1	6,6 \pm 0,0	7,9 \pm 0,1	7,1 \pm 0,1	4,6 \pm 0,0
162 (Pommersche Bucht)	Feb.	16,1 \pm 0,5	14,1 \pm 0,4	14,8 \pm 0,2	5,1 \pm 0,1	8,2 \pm 0,0
113 (Arkonasee)	Feb.	4,2 \pm 0,0	3,1 \pm 0,0	4,4 \pm 0,0	4,2 \pm 0,0	3,4 \pm 0,0
213 (Bornholmtief)	Feb.	4,2 \pm 0,0	3,1 \pm 0,0	3,8 \pm 0,0	3,9 \pm 0,0	3,3 \pm 0,0
271 (Gotlandtief)	Feb. Apr.	3,6 \pm 0,0 -	3,7 \pm 0,1 3,3 \pm 0,0	4,2 \pm 0,0 4,1 \pm 0,1	4,5 \pm 0,1 4,2 \pm 0,0	3,3 \pm 0,0 -
286 (Färötief)	Feb. Mär.	3,6 \pm 0,0 -	3,7 \pm 0,0 3,2 \pm 0,1	3,5 \pm 0,1 4,5 \pm 0,1	5,2 \pm 0,0 4,6 \pm 0,0	3,3 \pm 0,0 -
284 (Landsorttief)	Feb. Mär.	4,2 \pm 0,0	4,2 \pm 0,1	3,6 \pm 0,1 4,4 \pm 0,0	4,7 \pm 0,0 4,3 \pm 0,0	4,0 \pm 0,0 -
245 (Karlsötief)	Feb.	3,7 \pm 0,0	3,1 \pm 0,0	3,1 \pm 0,0	4,2 \pm 0,0	3,7 \pm 0,0

Summe der anorganischen Stickstoffverbindungen ($\text{NO}^3 + \text{NO}^2 + \text{NH}^4+$; $\mu\text{mol/l}$)

Station	Monat	1997	1998	1999	2000	2001
023 (Lübecker Bucht)	Feb.	9,8 \pm 0,1	-	11,6 \pm 0,0	10,5 \pm 0,3	6,3 \pm 0,3
012 (Meckl. Bucht)	Feb.	6,6 \pm 0,1	-	10,3 \pm 0,1	11,8 \pm 0,1	5,6 \pm 0,0
162 (Pommersche Bucht)	Feb.	19,4 \pm 0,6	16,5 \pm 0,5	17,3 \pm 0,2	6,3 \pm 0,2	10,1 \pm 0,0
113 (Arkonasee)	Feb.	4,4 \pm 0,0	3,3 \pm 0,0	4,9 \pm 0,0	4,6 \pm 0,1	3,9 \pm 0,1
213 (Bornholmtief)	Feb.	4,4 \pm 0,0	3,3 \pm 0,0	4,3 \pm 0,0	4,2 \pm 0,1	3,5 \pm 0,1
271 (Gotlandtief)	Feb. Apr.	3,8 \pm 0,1 -	3,9 \pm 0,1 3,8 \pm 0,0	4,8 \pm 0,0 4,6 \pm 0,1	4,8 \pm 0,2 4,6 \pm 0,0	3,4 \pm 0,0 -
286 (Färötief)	Feb. Mär.	3,8 \pm 0,1 -	3,9 \pm 0,0 3,5 \pm 0,0	4,1 \pm 0,0 5,0 \pm 0,1	5,4 \pm 0,0 4,8 \pm 0,0	3,4 \pm 0,0 -
284 (Landsorttief)	Feb. Mär.	4,5 \pm 0,0	4,3 \pm 0,1	3,9 \pm 0,0	4,8 \pm 0,0 4,6 \pm 0,1	4,2 \pm 0,0 -
245 (Karlsötief)	Feb.	4,0 \pm 0,1	3,4 \pm 0,1	3,7 \pm 0,1	-	3,9 \pm 0,0

¹⁾ Ende März

Alljährlich wird in den Tiefenbecken der Ostsee eine Nitritakkumulation oberhalb der Salzgehaltssprungschicht beobachtet, die im August beginnt. Im Tiefenbereich zwischen 50 m und 60 m wurden im Jahr 2001 Konzentrationen bis $0,45 \mu\text{mol/l}$ gemessen. Dieser Bereich verstärkter Mineralisation ist gleichzeitig durch ein intermediäres Ammoniummaximum gekennzeichnet (Abb. 23). Mit der herbstlichen Durchmischung bis zur Salzgehaltssprungschicht dehnt sich der Bereich erhöhter Nitritkonzentrationen bis zur Oberfläche aus. Während des Winters und Frühjahrs gehen die Konzentrationen auf Grund von Verbrauch und Nitrifikationsprozessen zurück, um im Sommer wieder an der Nachweisgrenze zu liegen. In den küstenbeeinflussten Regionen (Lübecker Bucht, Pommersche Bucht) finden sich im Winter deutlich erhöhte Nitritkonzentrationen, die ihre Ursache im landseitigen Eintrag und einer nicht abgeschlossenen Nitrifikation haben. So wurden im Februar in der gesamten Pommerschen Bucht Konzentrationen zwischen $1,3$ und $1,7 \mu\text{mol/l}$ gemessen.

Die Nährstoffsituation im Tiefenwasser kann ebenfalls aus den Abb. 21 und 22 entnommen werden. Das Jahr 2001 war nur durch schwache Einstromereignisse gekennzeichnet, so dass sich die Stagnationsperiode, die bereits 1995 begonnen hat (NEHRING et al., 1995c), unvermindert fortgesetzt hat. Lediglich das Bornholmbecken wird wiederholt von kleineren Einstömen salz- und sauerstoffreichen Wassers beeinflusst (vgl. auch Kapitel 5.3), was sich auch in den Nährstoffverhältnissen widerspiegelt.

Die in der 1. Jahreshälfte 2001 vorherrschenden oxischen Verhältnisse im Bodenwasser dokumentierten sich in recht niedrigen Phosphatkonzentrationen ($2,6 - 4,3 \mu\text{mol/l}$) und hohen Nitratwerten ($4,4 - 9,2 \mu\text{mol/l}$). Anoxie in der 2. Jahreshälfte führte zur Denitrifikation des Nitrats und zu einem Anstieg der Ammonium- und Phosphatkonzentrationen. Bereits im Dezember reagieren die Nährstoffe auf den starken Einstrom über die Darßer Schwelle und den Sund Anfang November. Die Jahresmittelwerte des Tiefenwassers sind Tabelle 9 zu entnehmen.

Wie auch aus Tabelle 9 zu entnehmen, finden sich mit Ausnahme des Bornholmbeckens die Extremwerte der Nährstoffkonzentrationen alle im Jahre 2001, ein weiteres Indiz für den Fortbestand der Stagnationsperiode. Die Entwicklung der Stagnation im östlichen Gotlandbecken konnte in Abb. 20 gezeigt werden. Die Reaktion der Nährstoffverhältnisse wird besonders deutlich, wenn man die Situation nach der Wassererneuerung im Jahre 1994 mit dem Zustand im Jahre 2001 vergleicht (Abb. 23). Wieder wurden höher auflösende Beprobungen aus den Sommermonaten herangezogen. Unter den durchweg oxischen Bedingungen im Juli 1994 lagen die Ammoniumkonzentrationen im gesamten Tiefenwasser nahe der Nachweisgrenze. Der vorhandene Sauerstoff ermöglichte die Nitrifikation, so dass Nitratkonzentrationen bis $11 \mu\text{mol/l}$ gemessen werden konnten. Die starke Streuung der Messwerte spricht dafür, dass dieser Prozess noch nicht abgeschlossen ist. Da Phosphat unter oxischen Bedingungen sorptiv gebunden wird, liegen die Konzentrationen unter $2 \mu\text{mol/l}$. Lediglich in unmittelbarer Sedimentnähe und im Bereich des intermediären Sauerstoffminimums werden erhöhte Werte gefunden.

Nach 6-jähriger Stagnation zeigt sich ein völlig anderes Bild. Die Nitratverteilung zeigt lediglich ein sehr begrenztes Nitratmaximum im Bereich der Salzgehaltssprungschicht, wo noch ausreichend Sauerstoff für Nitrifikationsprozesse vorhanden ist. Darunter führt die Denitrifikation zu vollständiger Nitratfreiheit. Ammonium, das nunmehr das Endprodukt der Mineralisation darstellt, ist extrem angereichert. Auch das Phosphat erreicht Maximalwerte, da es unter anoxischen Verhältnissen in Lösung geht.

Erneut ist ein Vergleich der Situation in der bodennahen Schicht am Ende der vorgehenden Stagnationsperiode im Jahre 1992 mit dem Jahr 2001 interessant (Abb. 19). Ähnlich wie beim Schwefelwasserstoff haben Ammonium- und Phosphatkonzentrationen bereits wieder vergleichbare Werte erreicht. Mit Bezug auf die Eutrophierungsproblematik ist besonders die Phosphatanreicherung zu beachten. Nach LARSSON and ANDERSSON (2001) hat sich der Phosphorgehalt der zentralen Ostsee zwischen 1995 und 2000 auf Grund der Phosphatzunahme unterhalb der Salzgehaltssprungschicht um ca. 20 % erhöht. Sollte sich die Stabilität der Haloklinen verringern, könnten tiefreichende Durchmischungen zu einer erhöhten Phosphatversorgung des Oberflächenwassers führen. Auch lokale Auftriebsprozesse sind hierbei zu beachten. Auch der Silikatgehalt der gesamten Wassersäule hat sich aufgrund der starken Anreicherung im Tiefenwasser im selben Zeitraum um etwa 20 % erhöht. Der Gesamtstickstoffgehalt ist dagegen relativ stabil geblieben (LARSSON and ANDERSSON, 2001).

Bereits in den vorhergegangenen Zustandseinschätzungen wurde auch der Entwicklung im westlichen Gotlandbecken, insbesondere im Bereich des Landsorttiefs, große Aufmerksamkeit geschenkt (MATTHÄUS et al., 1999b, 2000, 2001). In Abb. 24 wird die Entwicklung im 400 m-Horizont seit 1992 zusammengefasst (vgl. auch Tabelle 9). Seit 1993 sinkt der Sauerstoffgehalt kontinuierlich, in den Jahren 2000 und 2001 herrschten durchgängig anoxische Verhältnisse. Die Nitratkonzentrationen blieben bis 1998 auf einem recht hohen und stabilen Niveau. Nachdem jedoch die Sauerstoffkonzentration einen kritischen Wert von $10 \mu\text{mol/l} = 0,22 \text{ ml/l}$ erreicht hatte (GOERING, 1968), konnte Denitrifikation einsetzen. Rasch sanken die Nitratwerte ab. 2000 und 2001 war die Wassersäule von ca. 100 m Tiefe bis zum Boden frei von Nitrat. Im gleichen Zeitraum nahmen die Ammoniumkonzentration deutlich zu und erreichten im Jahresmittel 2001 $5,4 \mu\text{mol/l}$. Der Anstieg der Phosphatkonzentrationen unter anoxischen Verhältnissen verläuft dagegen langsamer als im östlichen Gotlandbecken. Eine anders geartete Sedimentbeschaffenheit könnte hierfür die Ursache sein.

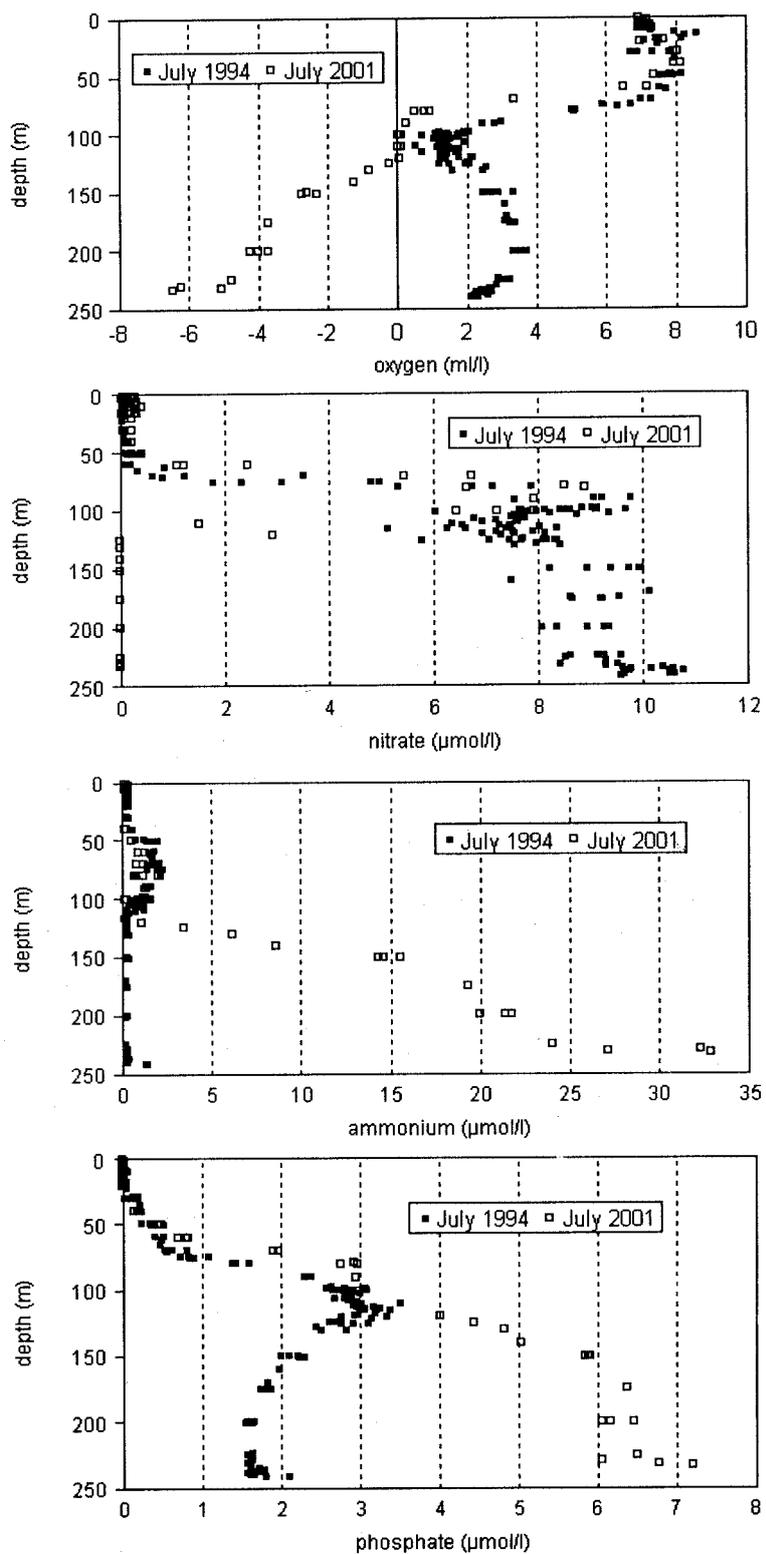


Abb. 23
Vergleich der Sauerstoff- und Nährstoffverteilung im Gotlandtief (St. 271) zwischen 1994 und 2001

Fig. 23
Comparison of oxygen and nutrient profiles at the Gotland Deep station (St. 271) between 1994 and 2001

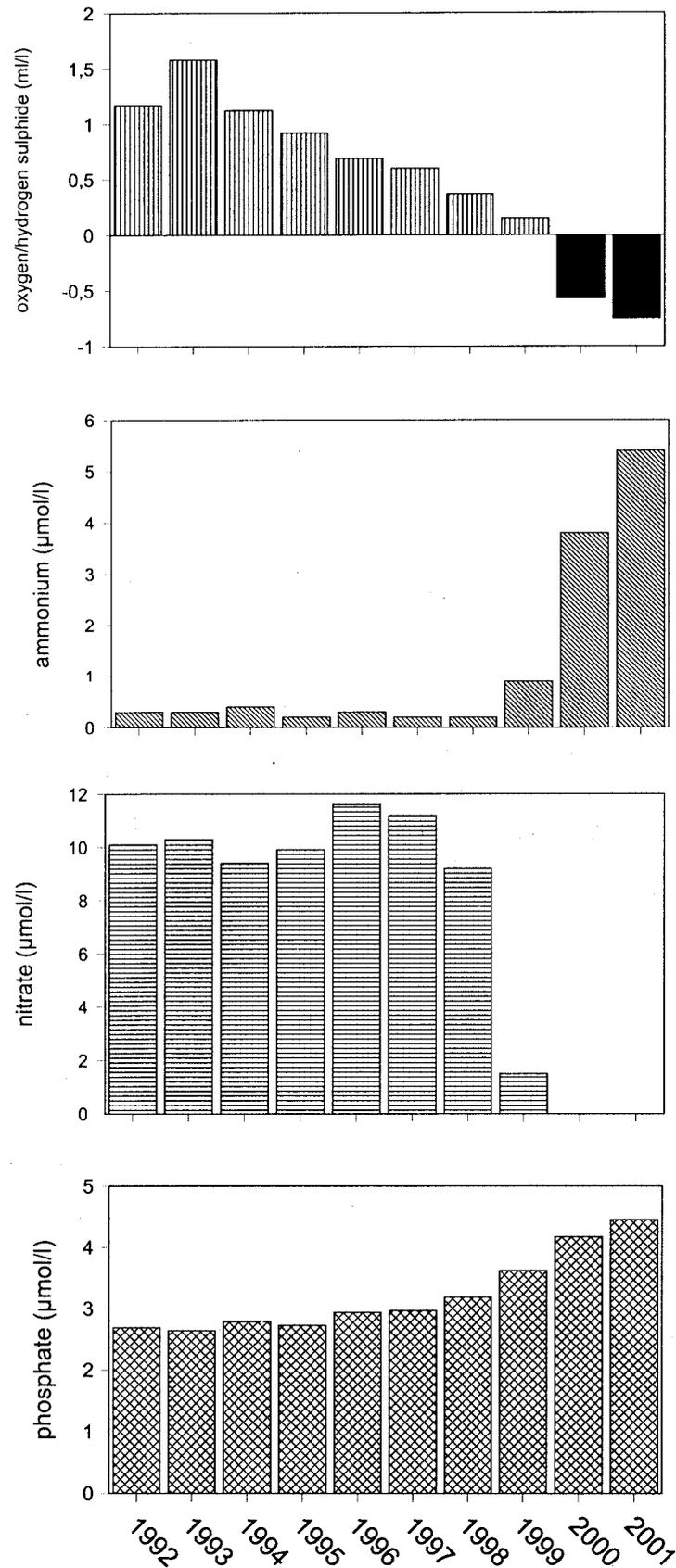


Abb. 24

Die Entwicklung der Sauerstoff- und Nährstoffverhältnisse im 400 m-Horizont des Landsortiefs zwischen 1992 und 2001 (Jahresmittelwerte; n = 5 - 20)

Fig. 24

The development of oxygen and nutrient conditions in the 400 m-level of the Landsort Deep (annual means; n = 5 - 20)

Tab. 9

Jahresmittelwerte und Standardabweichungen von Nährstoffen im Tiefenwasser der zentralen Ostsee [1997: nur IOW- Daten (n = 5); 1998-2001: IOW- sowie SMHI- Daten (n = 9-20)]

Table 9

Annual means and standard deviations for phosphate, nitrate and ammonium in the deep water of the central Baltic Sea [1997: only IOW-data (n = 5), 1998-2001: IOW- and SMHI- data (n = 9-20)]

Phosphat ($\mu\text{mol/l}$; Maximalwerte hervorgehoben)

Station	Tiefe/m	1997	1998	1999	2000	2001
213 (Bornholmtief)	80	2,66 \pm 0,97	5,10 \pm 2,18	4,86 \pm 1,72	3,07 \pm 1,84	3,94 \pm 1,30
271 (Gotlandtief)	200	4,47 \pm 0,54	3,48 \pm 0,55	4,75 \pm 0,29	5,28 \pm 0,34	5,87 \pm 0,33
286 (Färötief)	150	3,40 \pm 0,45	3,44 \pm 0,29	4,16 \pm 0,35	4,76 \pm 0,33	5,06 \pm 0,22
284 (Landsortief)	400	2,97 \pm 0,44	3,19 \pm 0,17	3,62 \pm 0,20	4,17 \pm 0,24	4,45 \pm 0,33
245 (Karlsötief)	100	3,23 \pm 0,73	3,53 \pm 0,24	3,79 \pm 0,52	3,59 \pm 0,27	4,16 \pm 0,46

Nitrat ($\mu\text{mol/l}$; Minimalwerte hervorgehoben)

Station	Tiefe/m	1997	1998	1999	2000	2001
213 (Bornholmtief)	80	10,2 \pm 1,9	2,9 \pm 4,2	4,3 \pm 4,9	4,6 \pm 4,4	4,8 \pm 3,8
271 (Gotlandtief)	200	0,5 \pm 0,9	3,6 \pm 4,1	0,0 \pm 0,0	0,0 \pm 0,0	0,0 \pm 0,0
286 (Färötief)	150	2,4 \pm 2,6	1,1 \pm 1,6	0,0 \pm 0,1	0,0 \pm 0,0	0,0 \pm 0,0
284 (Landsortief)	400	11,2 \pm 1,1	9,2 \pm 1,7	1,5 \pm 1,7	0,0 \pm 0,0	0,0 \pm 0,0
245 (Karlsötief)	100	10,6 \pm 0,5	9,3 \pm 1,7	4,8 \pm 4,0	3,0 \pm 2,3	1,0 \pm 1,8

Ammonium ($\mu\text{mol/l}$; Maximalwerte hervorgehoben)

Station	Tiefe/m	1997	1998	1999	2000	2001
213 (Bornholmtief)	80	0,2 \pm 0,1	4,9 \pm 5,4	3,9 \pm 4,6	2,6 \pm 3,9	0,6 \pm 1,2
271 (Gotlandtief)	200	3,5 \pm 1,4	1,7 \pm 2,0	9,0 \pm 2,6	12,0 \pm 1,7	17,7 \pm 3,0
286 (Färötief)	150	1,8 \pm 1,4	1,7 \pm 1,4	5,1 \pm 2,3	7,6 \pm 1,4	10,4 \pm 2,5
284 (Landsortief)	400	0,2 \pm 0,1	0,2 \pm 0,2	0,9 \pm 1,1	3,8 \pm 1,3	5,4 \pm 1,2
245 (Karlsötief)	100	0,3 \pm 0,1	0,3 \pm 0,4	1,7 \pm 2,2	1,4 \pm 1,5	3,8 \pm 2,8

5.5 Natürliche organische Verbindungen

Natürliche organische Verbindungen spielen im biogeochemischen Stoffkreislauf eine wichtige Rolle, da sie bei der Remineralisation als Substrat dienen. Sie beeinflussen daher direkt oder indirekt eine Reihe von Prozessen, die den Zustand aquatischer Ökosysteme bestimmen (z.B. winterrliche Nährstoffkonzentrationen, Sauerstoffzehrung, etc.). Natürliches organisches Material kann sowohl im aquatischen Bereich selbst gebildet werden als auch aus landseitigen Quellen eingetragen werden. Da im organischen Material grundsätzlich alle Verbindungen und deren Abbauprodukte vorkommen können, die im katabolen oder anabolen Stoffwechsel von Organismen gebildet werden, ist seine Zusammensetzung sehr komplex und im Detail unbekannt. Zur Abschätzung der Konzentration organischen Materials in einem System wird deshalb in der Regel die in diesem Material festgelegte Menge an Kohlenstoff, Stickstoff oder Phosphor herangezogen.

Das in marinen Ökosystemen vorkommende organische Material kann in die beiden Fraktionen 'partikuläres organische Material' (POM) und 'gelöstes organische Material' (DOM) unterteilt werden. Analytisch direkt zugänglich ist die Bestimmung des partikulären und gelösten organischen Kohlenstoffs (POC bzw. DOC). Der im organischen Material gebundene Gesamtstickstoff (TON) ist in der Regel nicht direkt zu erfassen. Da die Konzentration an partikulären anorganischen Stickstoffverbindungen im allgemeinen als vernachlässigbar gering angesehen werden kann, ist die Konzentration der partikulären organischen Stickstoffverbindungen (PON) in erster Näherung gleich der Konzentration des partikulären Gesamtstickstoffs (PN). Der gelöste organische Stickstoff (DON) stellt die Differenz aus dem gelösten Gesamtstickstoffgehalt (DN) und der Konzentration gelöster anorganischer Stickstoffverbindungen (DIN) dar. TON ist somit die Summe aus PN und DON.

Im Rahmen des Umweltüberwachungsprogramms wurde 1993 damit begonnen, Messungen zur Erfassung des Anteils natürlicher organischer Verbindungen in der Ostsee durchzuführen. Dazu sind die Konzentrationen von POC und PN (beginnend 1993), DOC (seit 1994) und DN (seit 1995) routinemäßig an einer Reihe ausgewählter Stationen von der westlichen bis zur zentralen Ostsee bestimmt worden, deren Lage in Abb. 25 dargestellt ist. In der Regel fanden fünf Beprobungen pro Jahr statt (Februar, März/April, Mai, Juli/August, Oktober/November).

Anhand der vorliegenden Daten wurde versucht, erste Abschätzungen über die mittleren Konzentrationen der verschiedenen Fraktionen des DOM in der Ostsee sowie jährliche und saisonale Variabilitäten vorzunehmen. Bedingt durch Ausfälle bei der Probenbeschaffung, durch technische Probleme bei der Durchführung einzelner Analysen und Einstellung der routinemäßigen Beprobung zweier Stationen ist sowohl die Anzahl der in den einzelnen Seegebieten vorliegenden Daten als auch ihre saisonale Verteilung nicht homogen. Die angegebenen Mittelwerte für die gesamte Ostsee sollten deshalb zunächst nur als 'Anhaltswerte' angesehen werden.

Betrachtet man zunächst die Werte für die gesamte Ostsee, so fällt generell auf, dass die Streuung der Mittelwerte und saisonale Konzentrationsunterschiede klein sind im Vergleich zu dem durch die gemessenen Maximal- und Minimalkonzentrationen bestimmten Konzentrationsbereich. Die Spanne zwischen Maximal- und Minimalkonzentrationen ist dabei in der Oberflächenschicht deutlich größer als in der bodennahen Schicht.

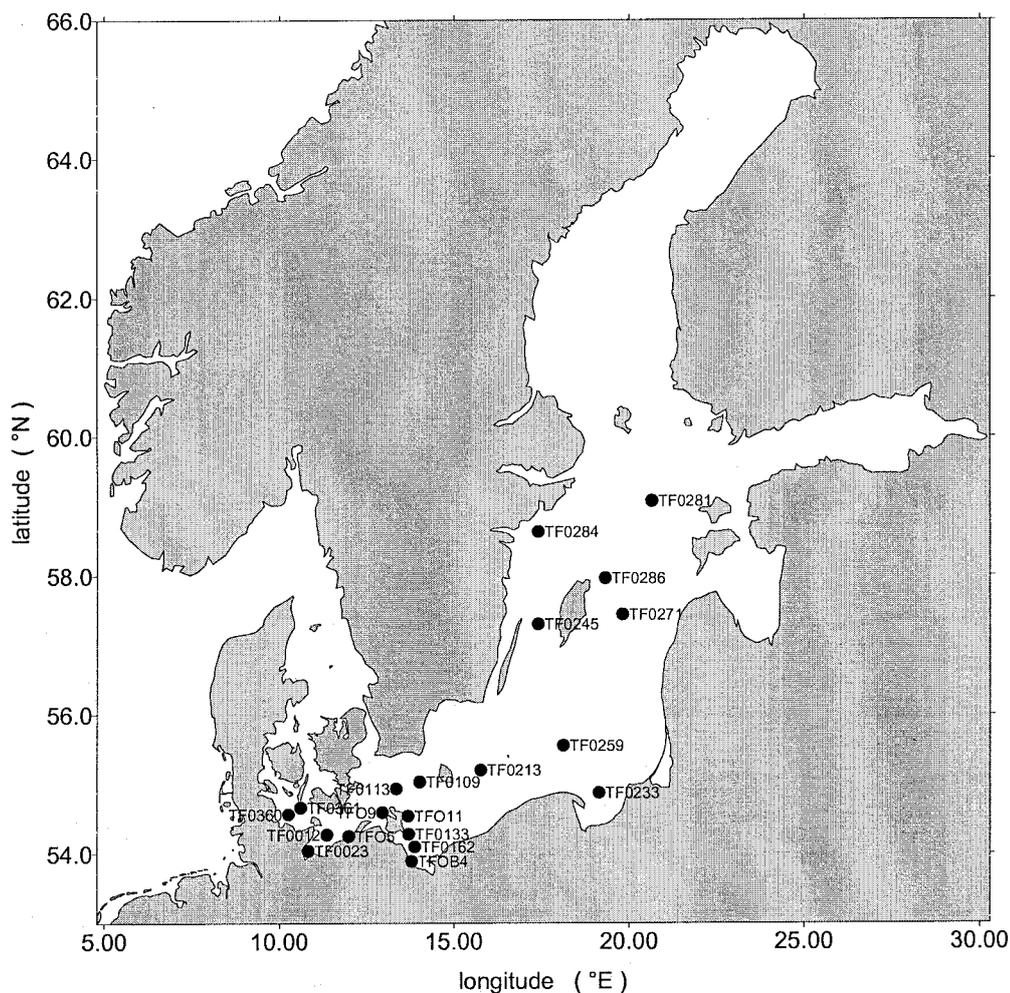


Abb. 25

Lage ausgewählter Stationen, an denen im Rahmen des Umweltüberwachungsprogramms Proben zur Untersuchung natürlicher organischer Verbindungen genommen wurden

Fig. 25

Monitoring stations selected for analysis of organic matter

Diese Beobachtung weist darauf hin, dass nur lokal oder nur kurzzeitig wirksame Einflüsse (z.B. landseitige Einträge durch Flüsse, die eine hohe saisonale Variabilität aufweisen können, hydrographische Vorgänge; etc.) zu extremen Konzentrationsunterschieden führen können. In den Abb. 26a - h sind die Mittelwerte und Standardabweichungen sowie die Maximal- bzw. Minimalwerte der Konzentrationen von DOC, DN, DON, POC und PN dargestellt, zum einen berechnet aus den Ergebnissen aller beprobten Stationen, zum anderen nur aus den Werten, die an drei ausgewählten Stationen gemessen wurden. Getrennt nach Proben aus der Oberflächenschicht (0 - 20 m) und dem bodennahen Wasserkörper (ca. 5 m über Grund) sind die angegebenen Werte entweder über das gesamte Jahr gemittelt oder als Quartalsmittelwerte angegeben.

Tab. 10

Jährliche Mittelwerte (\pm Standardabweichung) für einzelne Fraktionen des organischen Materials in der oberflächennahen (0 – 20 m) und in der bodennahen Wasserschicht (ca. 5 m über Grund), berechnet aus den Messungen an allen in Abb. 25 bezeichneten Stationen und an der Station 271 im zentralen östlichen Gotlandbecken

Table 10

Annual mean values (\pm std.dev.) for fractions of organic material calculated from all measurements performed in the surface and bottom layer at the stations indicated in Fig. 25 and for a station in the central Gotland Basin (station 271)

ganzjährige Mittelwerte annual mean values	Oberflächenschicht surface layer		bodennahe Schicht bottom layer	
	Ostsee	Stat. 271	Ostsee	Stat. 271
DOC ($\mu\text{mol} / \text{l C}$)	312 \pm 38.9	323 \pm 25,3	272 \pm 45.3	274 \pm 22,6
DN ($\mu\text{mol} / \text{l N}$)	21.1 \pm 8.1	20,1 \pm 3,8	25.2 \pm 8.7	29,4 \pm 8,6
DON ($\mu\text{mol} / \text{l N}$)	17.6 \pm 3.9	17,6 \pm 2,9	15.3 \pm 5.5	11,8 \pm 7,1
POC ($\mu\text{mol} / \text{l C}$)	26.8 \pm 20.5	21,4 \pm 16,9	24.6 \pm 24.6	15,9 \pm 6,0
PN ($\mu\text{mol} / \text{l N}$)	3.7 \pm 3.0	2,7 \pm 2,0	3.3 \pm 3.2	2,1 \pm ,9
DOC / DON ratio	18.4 \pm 4.9	18,5 \pm 3,0	20.7 \pm 11.7	34,1 \pm 21,3
POC / PN ratio	7.5 \pm 1.5	8,0 \pm 1,6	7.8 \pm 1.8	8,2 \pm 2,0

Die für den gesamten Bereich der Ostsee ermittelten Durchschnittswerte in der Oberflächenschicht stimmen recht gut mit den mittleren Konzentrationen überein, die für die Zentralstation in der östlichen Gotlandsee (Station 271, vgl. auch Abb. 26c) berechnet wurden (Tabelle 10). Aufgrund ihrer küstenfernen Lage sind an dieser Station Einflüsse durch landseitige Einträge ebenso unwahrscheinlich wie hydrographische Effekte, die kurzfristig zu extremen Konzentrationsunterschieden führen könnten. Die Standardabweichungen für alle gemessenen Parameter und die durch die Maximal- und Minimalkonzentrationen bestimmten Spannweiten sind deshalb hier ähnlich groß und können daher in erster Näherung als Maß für die zwischenjährliche bzw. saisonale Variabilität angesehen werden. In der Oberflächenschicht der Station 271 ist für POC und PN eine ausgeprägte Saisonalität zu erkennen, wobei die sommerlichen Höchstwerte um einen Faktor 4 bis 5 über den winterlichen Minimalwerten liegen. Diese saisonalen Konzentrationsunterschiede führen zu Standardabweichungen des jährlichen Mittelwertes, die fast die gleiche Größe wie der Mittelwert selbst haben.

Obwohl auch DOC und DON ein saisonales Maximum im Sommer bzw. Herbst besitzen (LEINWEBER, 2001), sind die saisonalen Veränderungen der Konzentrationen klein im Vergleich zu einem hohen Hintergrundwert. Die Standardabweichungen der jährlichen Mittelwerte machen hier deutlich weniger als 20 % des Mittelwertes aus. Bemerkenswert ist der Befund, dass in der Oberflächenschicht das mittlere C/N - Verhältnis des partikulären Materials (POC/PN - ratio) nicht wesentlich vom Redfield-Verhältnis abweicht, während das mittlere C/N - Verhältnis in der gelösten Fraktion (DOC/DON - ratio) mit einem Wert von 18 - 19 signifikant größer ist. Die Ursache für die Abweichung des C/N - Verhältnisses in der gelösten Fraktion vom Redfield - Verhältnis ist unbekannt. Es besteht jedoch die Vermutung, dass refraktäres, stärker

kohlenstoffhaltiges Material aus landseitigen Quellen in die Ostsee eingetragen und hier nicht oder nur unvollständig abgebaut wird.

Eine andere Ursache für das höhere C/N - Verhältnis könnte jedoch auch darin bestehen, dass der im DOM gebundene Kohlenstoff und Stickstoff durch unterschiedliche Mechanismen mit verschiedenen Geschwindigkeiten remineralisiert bzw. abgebaut wird. Da der Abbau des organischen Materials ein sauerstoffzehrender Prozess ist, stellt die langfristige Entwicklung der Konzentrationen von POM und DOM eine wichtige Größe zur Abschätzung möglicher Veränderungen der Sauerstoffsituation in den zentralen Gebieten der Ostsee dar. Außerdem ist im organischen Material eine große Menge an Stickstoff festgelegt, dessen Konzentration die im saisonalen Zyklus umgesetzte Menge an anorganischen stickstoffhaltigen Nährstoffen bei weitem übersteigt (MATTHÄUS et. al., 1997). Einflüsse, die zu unterschiedlichen Umwandlungsraten von organischen Verbindungen in die entsprechenden anorganischen Nährstoffe führen, können daher andere Effekte, wie z.B. die Verminderung von Einträgen, überlagern.

Für eine Abschätzung möglicher langfristiger Änderungen in der Konzentration oder der relativen Zusammensetzung des organischen Materials ist der bisherige Beobachtungszeitraum noch zu kurz. Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse erscheint es jedoch nur durch eine ausreichend lange Beobachtungsreihe in der östlichen Gotlandsee möglich, derartige Veränderungen relativ schnell erkennen zu können, da die zwischenjährliche bzw. saisonale Variabilität hier klein ist.

Die für den gesamten untersuchten Bereich der Ostsee ermittelten Durchschnittswerte in der bodennahen Wasserschicht zeigen ein ähnliches Verhalten wie die entsprechenden Werte in der Oberflächenschicht. Auch hier ist die Streuung der Mittelwerte klein im Vergleich zur dem durch Minimal- und Maximalwerte bestimmten Konzentrationsbereich. Bei einem Vergleich der jährlichen Mittelwerte in der Bodenschicht für die gesamte Ostsee (Abb. 26b) und für die Station 271 (Abb. 26d) zeigen sich hingegen einige deutliche Unterschiede. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass bei der Berechnung der Mittelwerte für die gesamte Ostsee sowohl flache Stationen, die häufig bis zum Boden durchmischt werden, als auch tiefe Stationen, an denen stagnierende Wasserkörper vorherrschen und nur selten Vermischungsprozesse auftreten, berücksichtigt worden sind. An der Station 271 fällt im bodennahen Wasserkörper für einige Parameter eine deutlich größere Streuung auf als in der Oberflächenschicht, wobei die Größe der zwischenjährlichen bzw. saisonalen Unterschiede im Wesentlichen durch die hohen Variabilitäten in den Wintermonaten verursacht werden. Auf mögliche Ursachen soll später noch einmal eingegangen werden.

Der Station 271 in der zentralen östlichen Gotlandsee sollen zwei Stationen gegenüber gestellt werden, die durch hydrographische bzw. landseitige Einträge beeinflusst sind. Austauschprozesse zwischen dem Kattegat und der Ostsee prägen die Station 360 (Abb. 26e,f), die im Übergangsbereich zwischen der Beltsee und der westlichen Ostsee in der äußeren Kieler Bucht liegt (Abb. 25). Die mittleren Konzentrationen für DOM liegen hier deutlich unter denjenigen, die in der zentralen Ostsee beobachtet werden, während diejenigen für POM etwas erhöht sind. Die geringeren DOM - Konzentrationen an dieser Station sind darauf zurückzuführen, dass zeitweise Wasser aus dem Skagerrak bzw. dem Kattegat mit deutlich geringeren DOM - Konzentrationen in die westliche Ostsee einströmt. Eigene Messungen der DOC - Konzentrationen im Kattegat im Sommer 2000 ergaben Werte zwischen 100 und 200 $\mu\text{mol/l C}$. Diese Werte liegen in der gleichen Größenordnung wie diejenigen, die in der Norwegischen See

gemessen wurden (BØRSHEIM and MYKLESTAD,1997). Da der Wasseraustausch zwischen Nordsee und Ostsee im Winterhalbjahr durch die vorherrschenden Wetterbedingungen begünstigt wird, sind die beobachteten Variabilitäten in dieser Zeit am größten. Bei einer Beobachtungsdichte von nur fünf Messungen pro Jahr ist nicht zu erwarten, dass Veränderungen, die durch Prozesse im saisonalen Stoffkreislauf bedingt sind, von denen unterschieden werden können, die durch die Vermischung der verschiedenen Wasserkörper aus Nord- bzw. Ostsee hervorgerufen werden. Zur Beurteilung möglicher Veränderungen des Gehalts an organischen Verbindungen in der Ostsee wäre es jedoch hilfreich, den Austrag dieser Stoffe über Kattegat und Skagerrak in die Nordsee abschätzen zu können.

Ein Beispiel für eine Station, die durch landseitige Einträge geprägt wird, ist die Station OB4, die in unmittelbarer Nähe der Swinemündung liegt und durch die Einträge der Oder beeinflusst wird (Abb. 26g,h). Außerdem gibt es in der Pommerschen Bucht eine Reihe hydrographischer Besonderheiten, die die Ausprägung der durch die Odereinträge verursachten Effekte überlagern können (MOHRHOLZ, 1998). Generell ist die zum Teil extreme Spannweite zwischen beobachteter Minimal- und Maximalkonzentration und die hohe zwischenjährliche und saisonale Variabilität in diesem Bereich hervorzuheben. Die im Rahmen der Monitoring - Untersuchungen für die gesamte Ostsee beobachteten Maximalwerte stammen fast ausschließlich von den Stationen, die im Einflussbereich des Oderaustroms liegen.

Besonders große Standardabweichungen und Spannweiten zwischen Maximal- und Minimalkonzentrationen wurden im Herbst und in den Wintermonaten beobachtet. Die hohe Variabilität zu Jahresbeginn wird verursacht durch die hohen Abflussmengen der Oder zu dieser Zeit, verbunden mit einer inhomogenen Verteilung der Flussfahne in der Pommerschen Bucht. Im Sommer, wenn der Zufluss aus der Oder geringer ist, dominieren Effekte, die durch Prozesse im Oderhaff gesteuert werden (PASTUSZAK et al., 2001). Auch Einzelereignisse wie z.B. die Oderflut im Sommer 1997 können sich auf die Variabilität an Stationen in diesem Seegebiet langfristig auswirken. Die während dieses Ereignisses gemessenen DOC- und POC-Konzentrationen sind die höchsten, die bisher in der Ostsee im Rahmen des vom IOW durchgeführten Umweltüberwachungsprogramms gemessen wurden (MOHRHOLZ et al., 1998).

Für das POM in den zentralen Gebieten der Ostsee, das zum großen Teil aus lebenden oder abgestorbenen Planktonorganismen besteht, ist eine saisonale Konzentrationsänderung zu beobachten, die größenordnungsmäßig durch den vollständigen Umsatz der winterlichen Konzentration anorganischer Nährstoffe erklärt werden kann (MATTHÄUS et al., 2000). Analoge Abschätzungen treffen demgegenüber für das DOM nicht zu, da seine Konzentration ein Mehrfaches dessen beträgt, was durch den internen Kreislauf im marinen System erklärt werden kann. Im Rahmen anderer Untersuchungen konnte jedoch gezeigt werden, dass auch das DOM saisonalen Konzentrationsänderungen unterliegt, die jedoch klein sind im Vergleich zum hohen Hintergrundwert (LEINWEBER, 2001). Bisher liegen kaum gesicherte Erkenntnisse über den Ursprung dieser hohen Hintergrundkonzentrationen des DOM vor. Aufgrund von Befunden, die erhöhte DOM - Konzentrationen in den Bereichen der Ostsee ausweisen, die stark durch landseitige Einträge beeinflusst sind, könnten Einträge von Land im Laufe der Zeit zu diesen hohen DOM - Hintergrundkonzentrationen geführt haben. Voraussetzung für die Anreicherung von DOM wäre neben der langen Verweilzeit eingetragener Verbindungen aufgrund des langsamen Wasseraustausches, dass das DOM entweder refraktär ist, oder dass es Mechanismen gibt, die einen unvollständigen Abbau des DOM begünstigen. Bedingt durch unzureichende Kenntnisse über die Zusammensetzung des organischen Materials lässt sich diese Frage nach den

vorherrschenden Abbauprozessen zurzeit nicht abschließend beantworten. Erste Hinweise auf mögliche Abbaumechanismen lassen sich jedoch aus den Veränderungen der Konzentrationen organischer Verbindungen im Tiefenwasser des östlichen Gotlandbeckens (Stat. 271) ableiten. Man kann davon ausgehen, dass das Wasser in diesem Becken stagniert. Ein nachhaltiger Austausch wird im Wesentlichen nur durch den Einstrom von salz- und sauerstoffhaltigem Wasser in das Becken bei Salzwassereinbrüchen verursacht. Während einer Stagnationsphase erfolgt ein Abbau organischen Materials unter aeroben Bedingungen, solange noch Sauerstoff im Wasser vorhanden ist. Wenn der gesamte Sauerstoff umgesetzt ist, dominieren anaerobe Prozesse und es kommt zur Bildung von Schwefelwasserstoff.

Im östlichen Gotlandbecken fand der letzte große Salzwassereinbruch im Jahr 1993 statt. In den Folgejahren bis zum Jahr 1998 war die Situation im Tiefenwasser des Gotlandbeckens gekennzeichnet durch einen häufigen Wechsel zwischen oxischen und anoxischen Perioden, wobei das Wasser während dieser Zeit zu Beginn des Jahres in der Regel sauerstoffreicher war als in der zweiten Jahreshälfte (Abb. 27). Einströme kleinerer Wassermengen während der Wintermonate waren die Ursache für diese Variabilitäten (MATTHÄUS et al. 1997, 1998, 1999a). Erst ab 1999 stellten sich ganzjährig stabile anoxische Bedingungen ein, wobei jedoch auch während dieser Zeit größere Unterschiede in der H_2S - Konzentration gefunden wurden (vgl. auch Kapitel 5.3). Im gleichen Zeitraum fanden auch Veränderungen im organischen Material statt, wobei sich die Veränderungen für POM deutlich von denjenigen des DOM unterschieden. POM, das in diesem Seegebiet hauptsächlich aus sedimentierendem Material bestehen dürfte (SCHNEIDER et al., 2000), unterliegt nur geringfügigen Konzentrationsänderungen und besitzt ein konstantes C/N- Verhältnis. Im DOM zeigen sich demgegenüber gravierende Veränderungen (Abb. 27). Während mit zunehmender H_2S - Konzentration die DOC - Konzentration tendenziell ansteigt, nimmt diejenige von DON deutlich ab. Die Variabilität der DOM - Konzentrationen ist dabei sehr groß und eng mit der Variabilität der O_2 - bzw. H_2S - Konzentration verbunden. Berechnet man das C/N- Verhältnis im DOM, so werden die Veränderungen mit zunehmender Dauer der Stagnationsperiode noch deutlicher, da dieser Wert von knapp 20 im Jahr 1996 auf über 80 im Jahr 2001 zunimmt (Abb. 28). Die zuletzt beobachteten DOC/DON - Verhältnisse betragen damit mehr als das 10fache des Redfield - Verhältnisses. Unterstellt man eine weitgehend homogene Zusammensetzung des DOM zumindest in den zentralen Gebieten der Ostsee mit einem mittleren DOC/DON- Verhältnis von ca. 20, so würden die unter Stagnationsbedingungen beobachteten Werte bedeuten, dass dem DOM erheblich mehr Stickstoff entzogen wurde als unter oxischen Bedingungen zu erwarten gewesen wäre. Ein Teil dieses aus dem DOM stammenden Stickstoffs trägt dabei sicherlich zu der beobachteten Zunahme der Ammoniumkonzentration im Tiefenwasser bei (vgl. auch Kapitel 5.4).

Obwohl die Details der Vorgänge in weitgehend abgeschlossenen Wasserkörpern unter anoxischen Bedingungen in vielen Punkten noch unverstanden sind, stellen sie die Annahme, dass ein großer Teil des DOM aus refraktärem Material besteht, insofern in Frage, als offenbar zumindest ein nicht unwesentlicher Teil des im DOM gebundenen Stickstoffs unter bestimmten Bedingungen verfügbar werden kann. Da die Gesamtmenge des im DOM festgelegten Stickstoffs ganzjährig mehr als 50% des Gesamtstickstoffs ausmacht (MATTHÄUS et al., 1997), stellen die hohen DOM - Gehalte ein großes Stickstoffreservoir dar. Ein besseres Verständnis der Abbaumechanismen des DOM würden deshalb dazu beitragen, sowohl die durch den Abbau organischen Materials verursachte Sauerstoffzehrung als die im saisonalen Kreislauf zur Verfügung stehende Menge an anorganischen Stickstoffverbindungen besser interpretieren zu können.

Abb. 26

Mittlere Konzentrationen von DOC (dissolved organic carbon), DN (dissolved nitrogen), DON (dissolved organic nitrogen), POC (particulate organic carbon) und PN (particulate nitrogen), berechnet aus den an ausgewählten Monitoringstationen vorliegenden Ergebnissen der Jahre 1993 – 2001. Die mittleren Konzentrationen \pm Standardabweichungen sowie die Maximal- und Minimalkonzentrationen sind berechnet zum einen als jährliche Mittelwerte (Monat 1 – 12), zum anderen gesondert für jedes Quartal (Monate 1 – 3, 4 – 6, 7 – 9 und 10 – 12). Die Zahlen unter den Mittelwerten geben die Anzahl der bei der Berechnung berücksichtigten Meßwerte an.

Fig 26

Mean concentrations of DOC (dissolved organic carbon), DN (dissolved nitrogen), DON (dissolved organic nitrogen), POC (particulate organic carbon) and PN (particulate nitrogen) calculated from the results obtained at selected monitoring stations during the years 1993 – 2001. Mean concentrations \pm std.dev. and maximal concentrations were calculated as annual mean (months 1 – 12) and for each quarter of the year (months 1 – 3, 4 – 6, 7 – 9, 10 – 12). Numbers below the mean values indicate the numbers of measurements used for calculation.

Abb. 26a

Oberflächenschicht aller in Abb. 25 bezeichneten Stationen

Fig. 26a

Surface layer at all stations shown in Fig. 25

Abb. 26b

Bodennahe Wasserschicht aller in Abb. 25 bezeichneten Stationen

Fig. 26b

Bottom near layer at all stations shown in Fig. 25

Abb. 26c

Oberflächenschicht der Station 271

Fig. 26c

Surface layer layer at station 271

Abb. 26d

Bodennahe Wasserschicht der Station 271

Fig. 26d

Bottom near layer at station 271

Abb. 26e

Oberflächenschicht der Station 360

Fig. 26e

Surface layer layer at station 360

Abb. 26f

Bodennahe Wasserschicht der Station 360

Fig. 26f

Bottom near layer at station 360

Abb. 26g

Oberflächenschicht der Station OB4

Fig. 26g

Surface layer layer at station OB4

Abb. 26h

Bodennahe Wasserschicht der Station OB4

Fig. 26h

Bottom near layer at station OB4

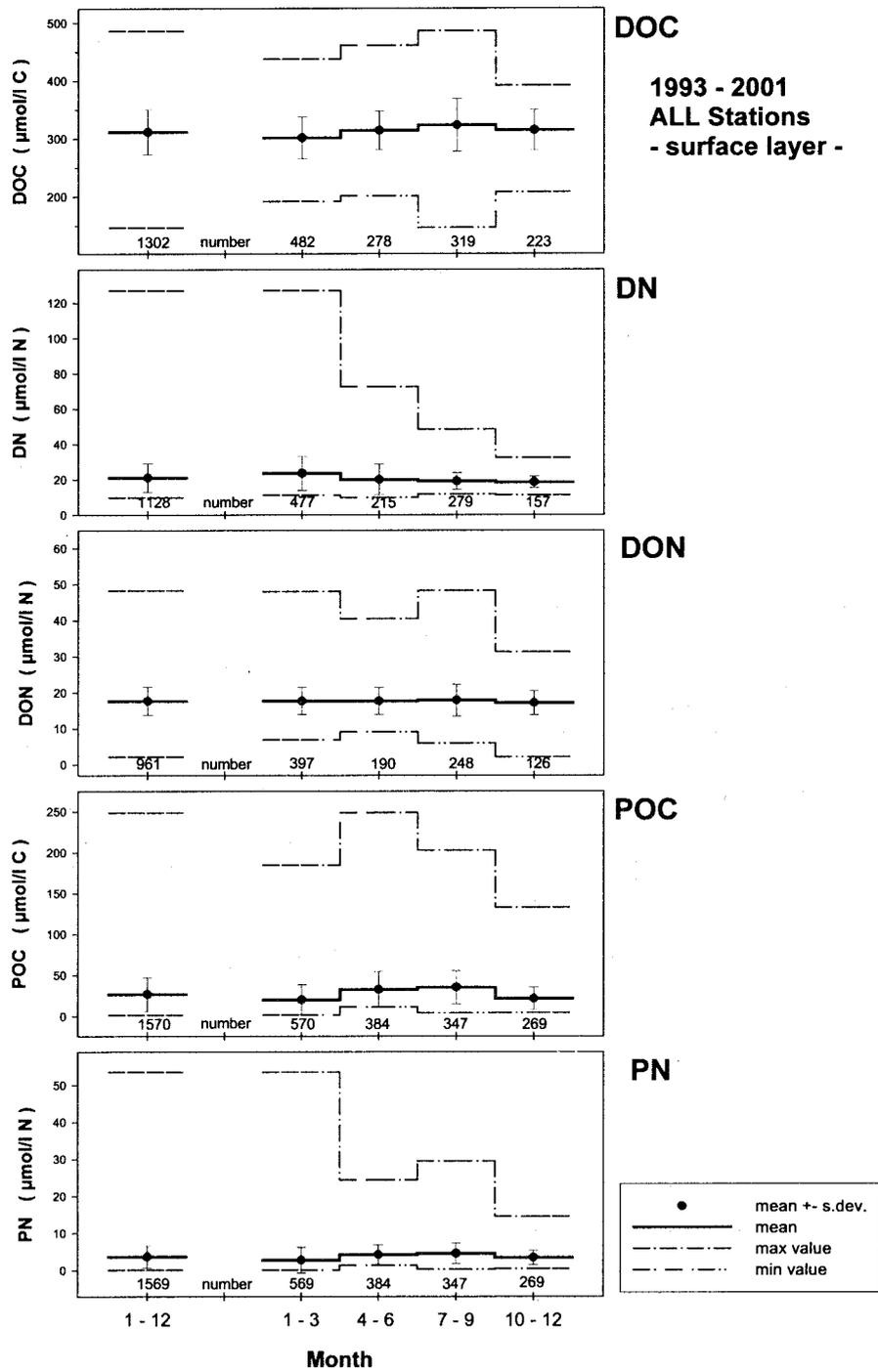


Abb. 26a

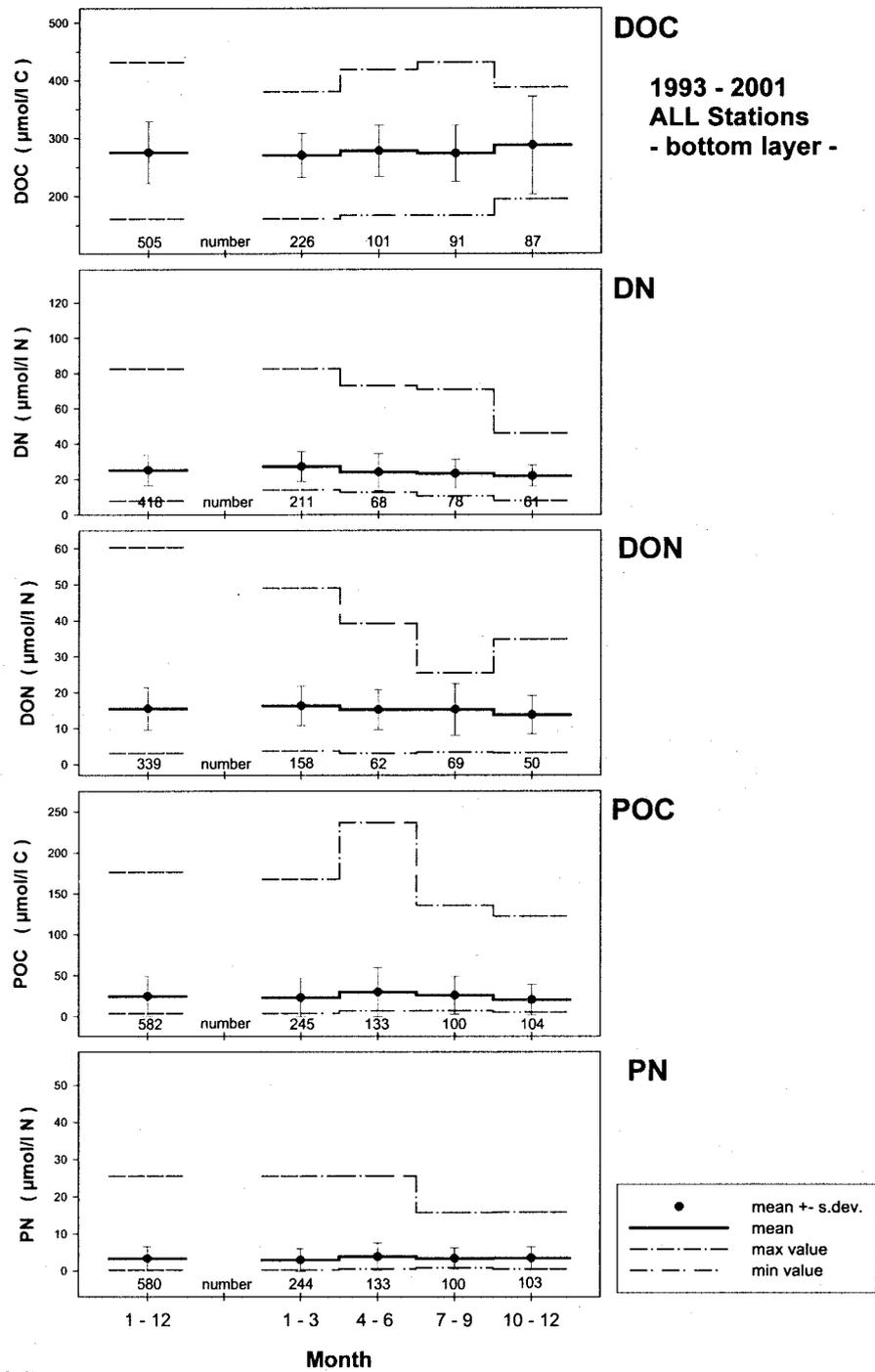


Abb. 26b

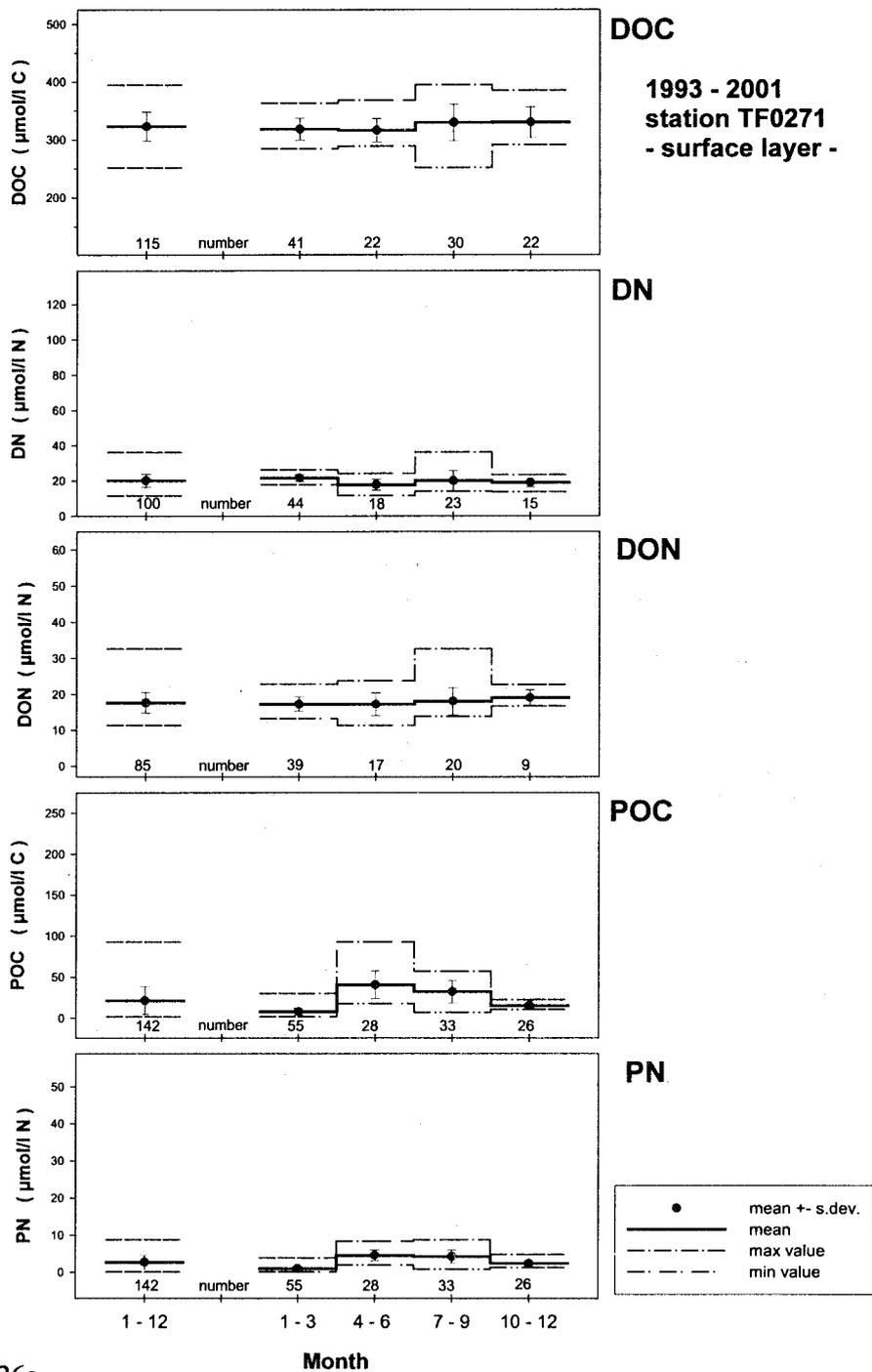


Abb. 26c

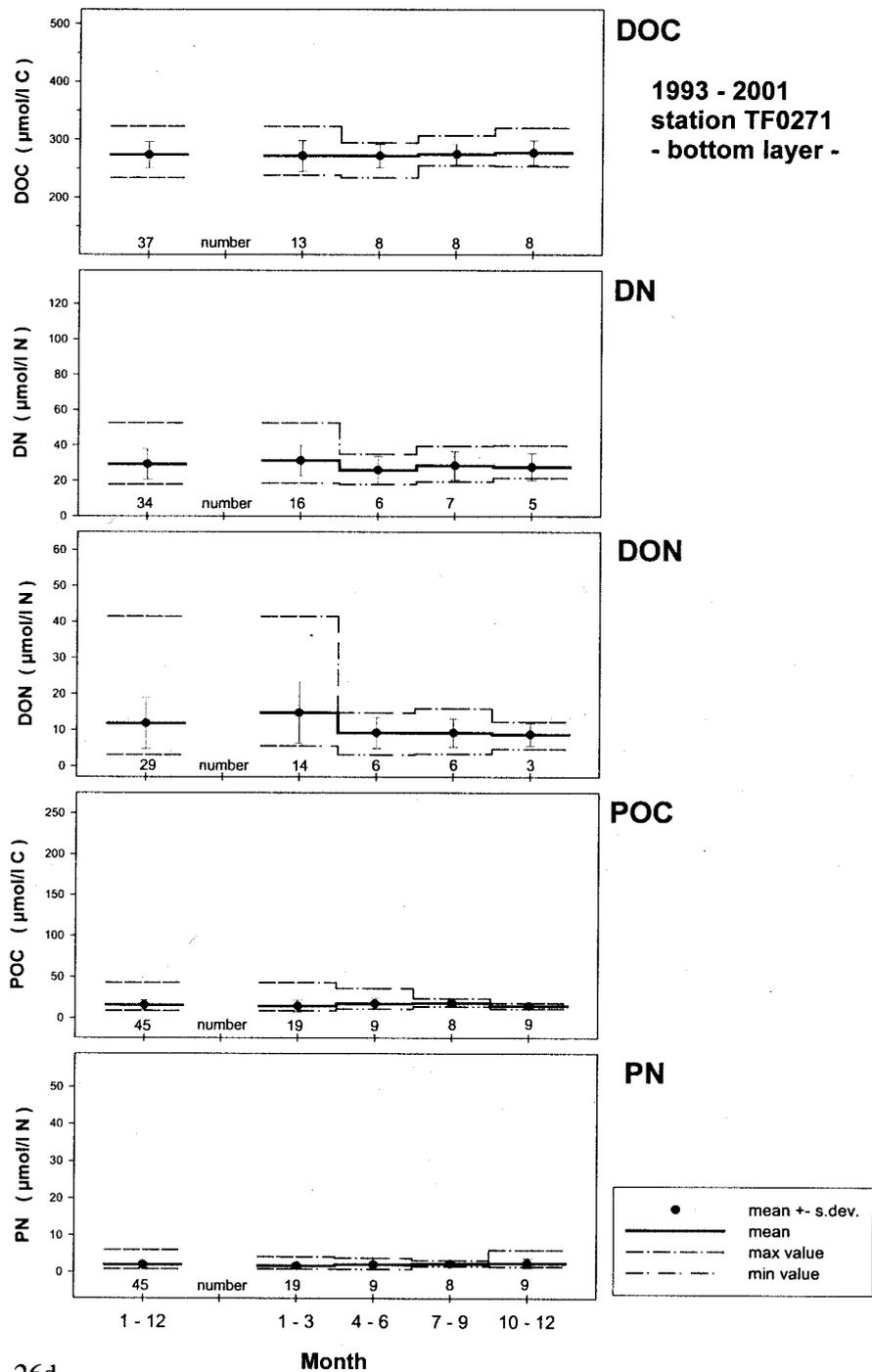


Abb. 26d

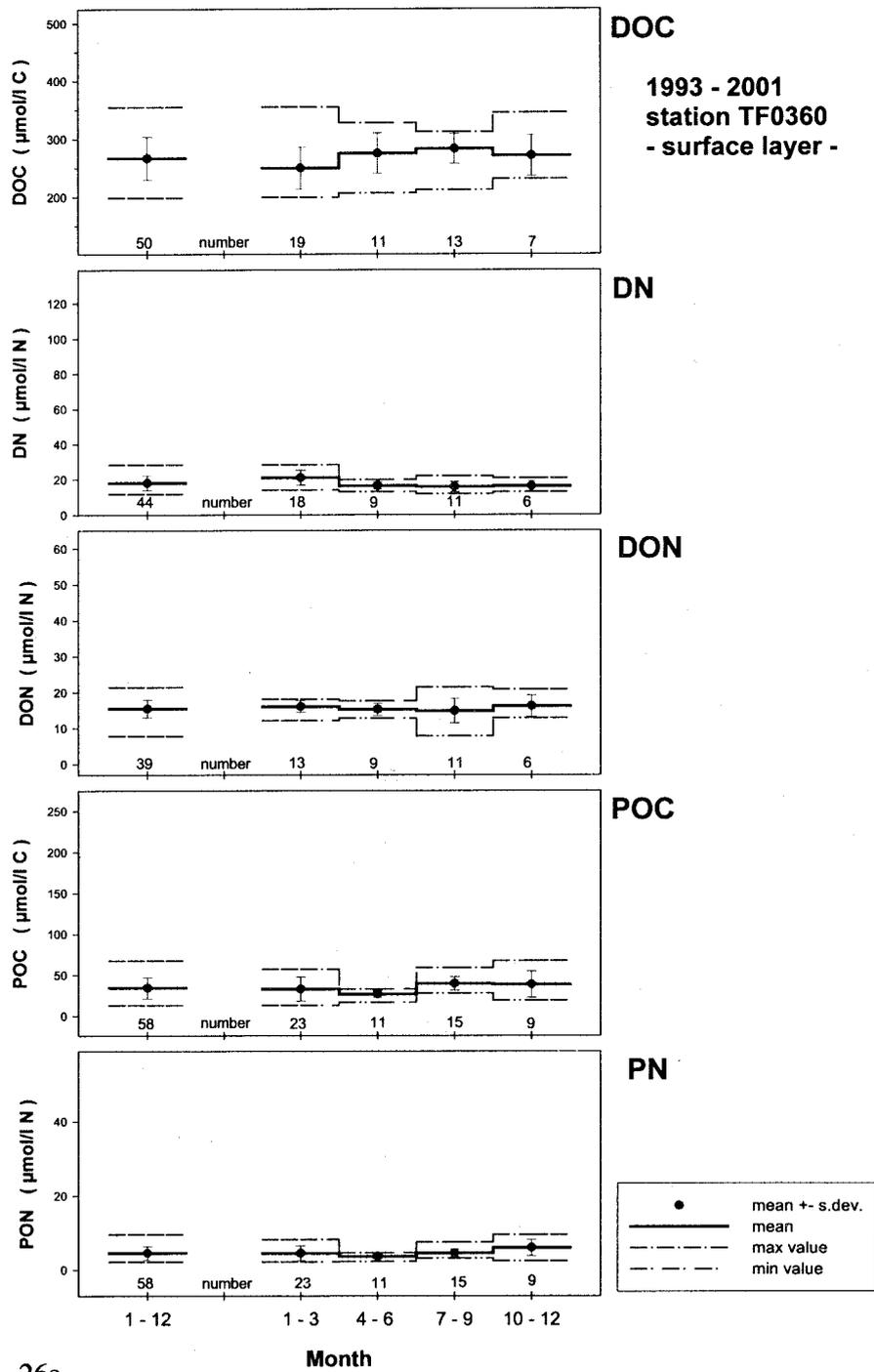


Abb. 26e

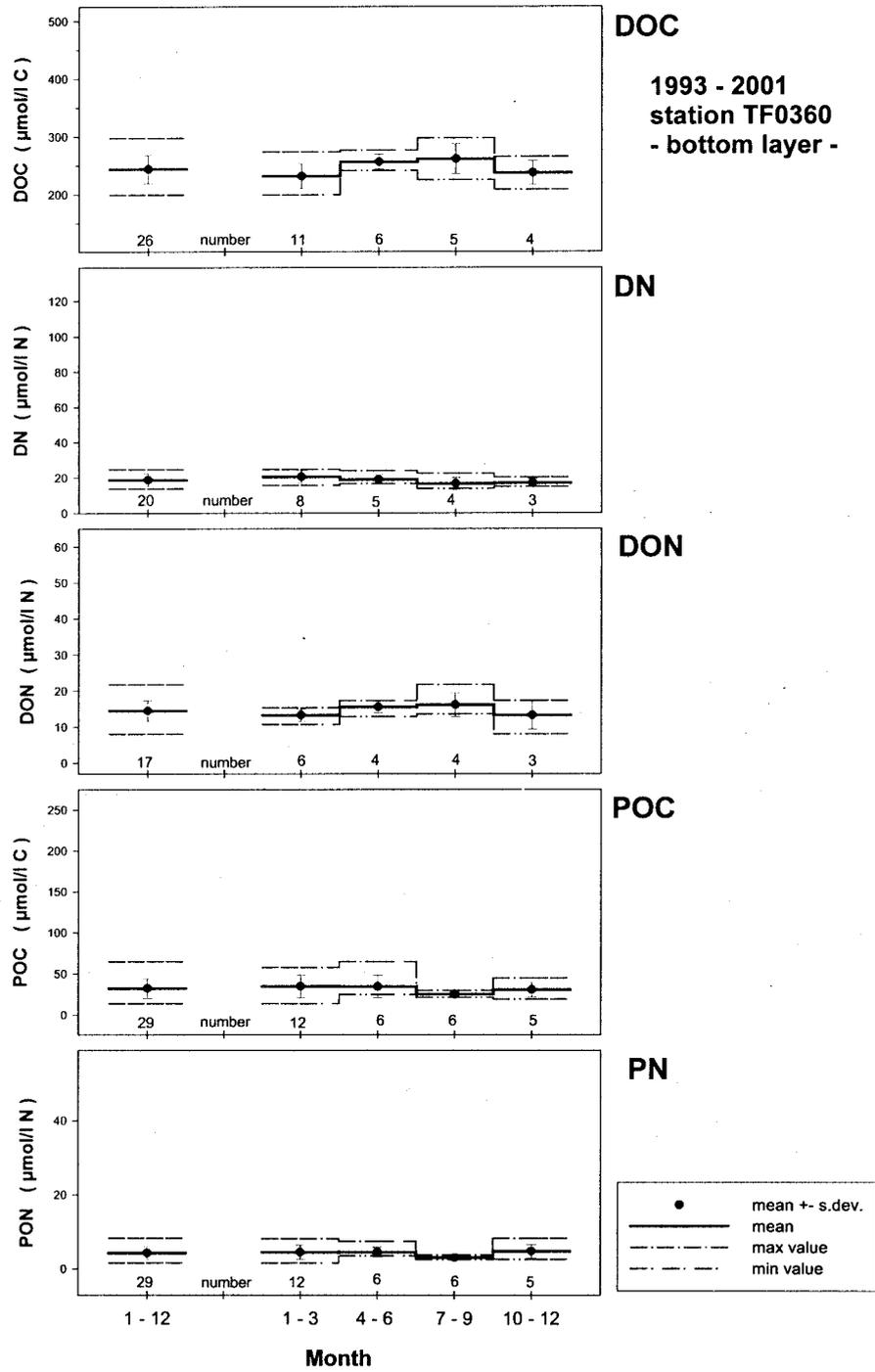


Abb. 26f

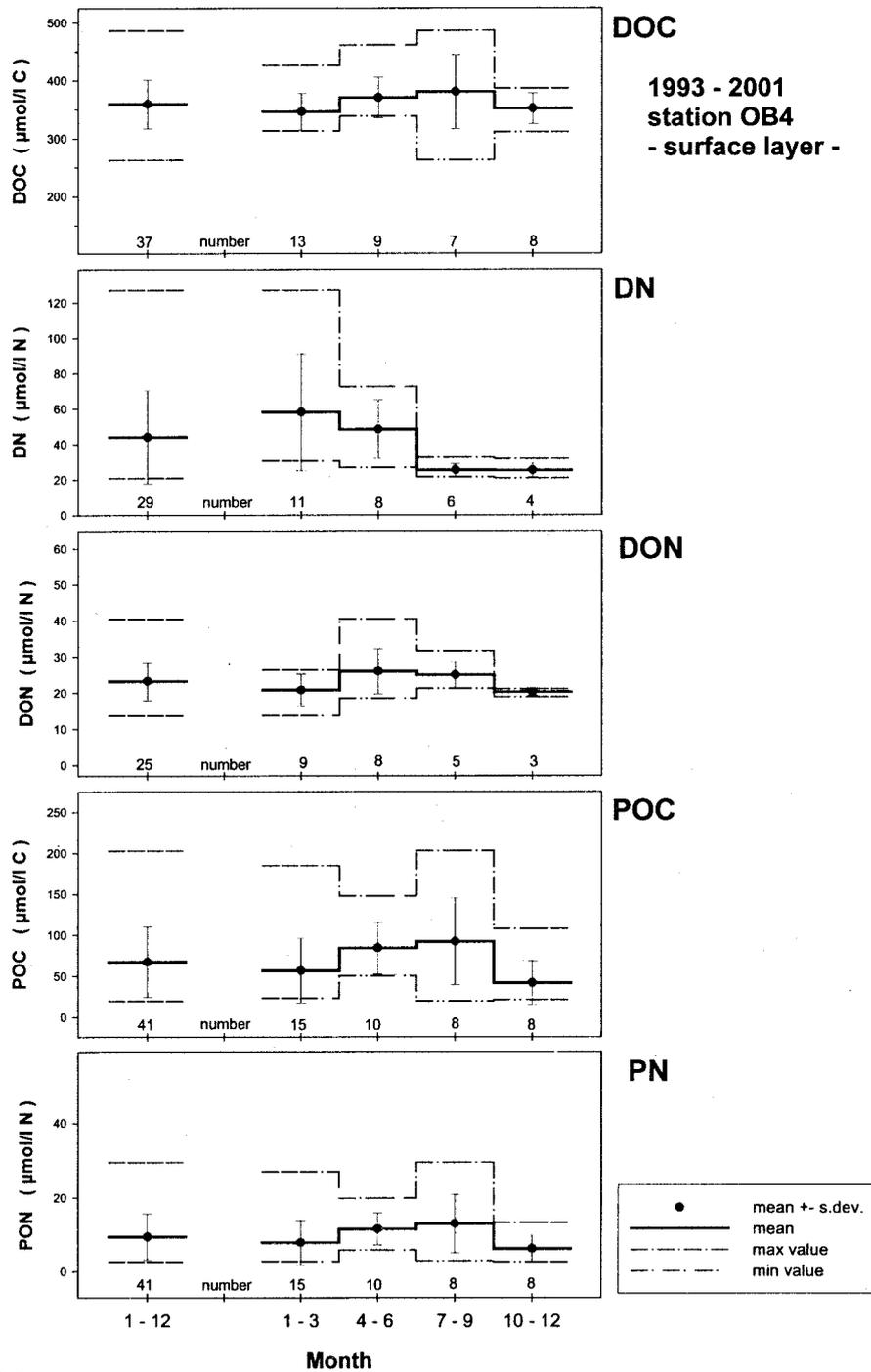


Abb. 26g

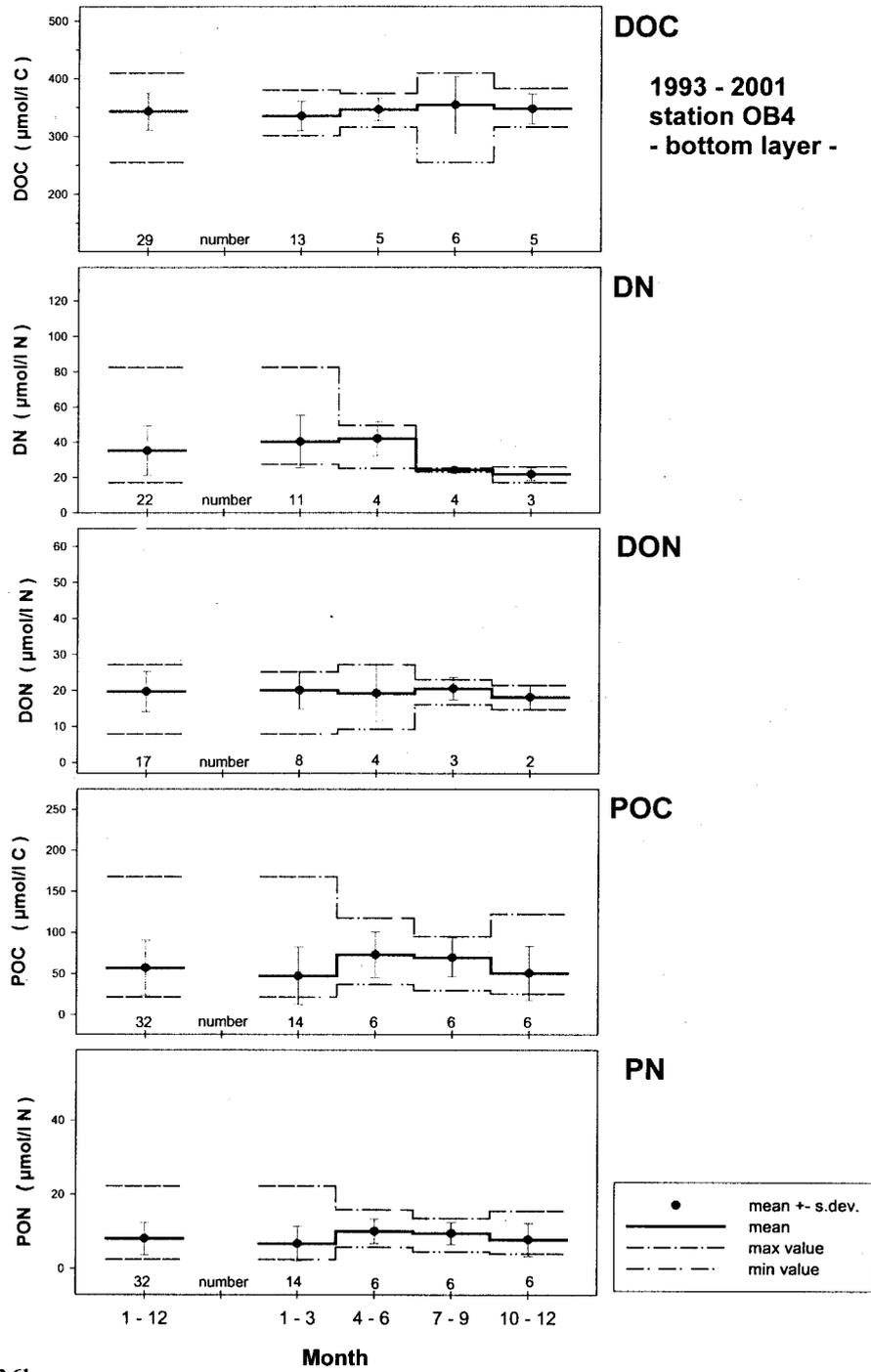


Abb. 26h

Station TF0271 - bottom layer -

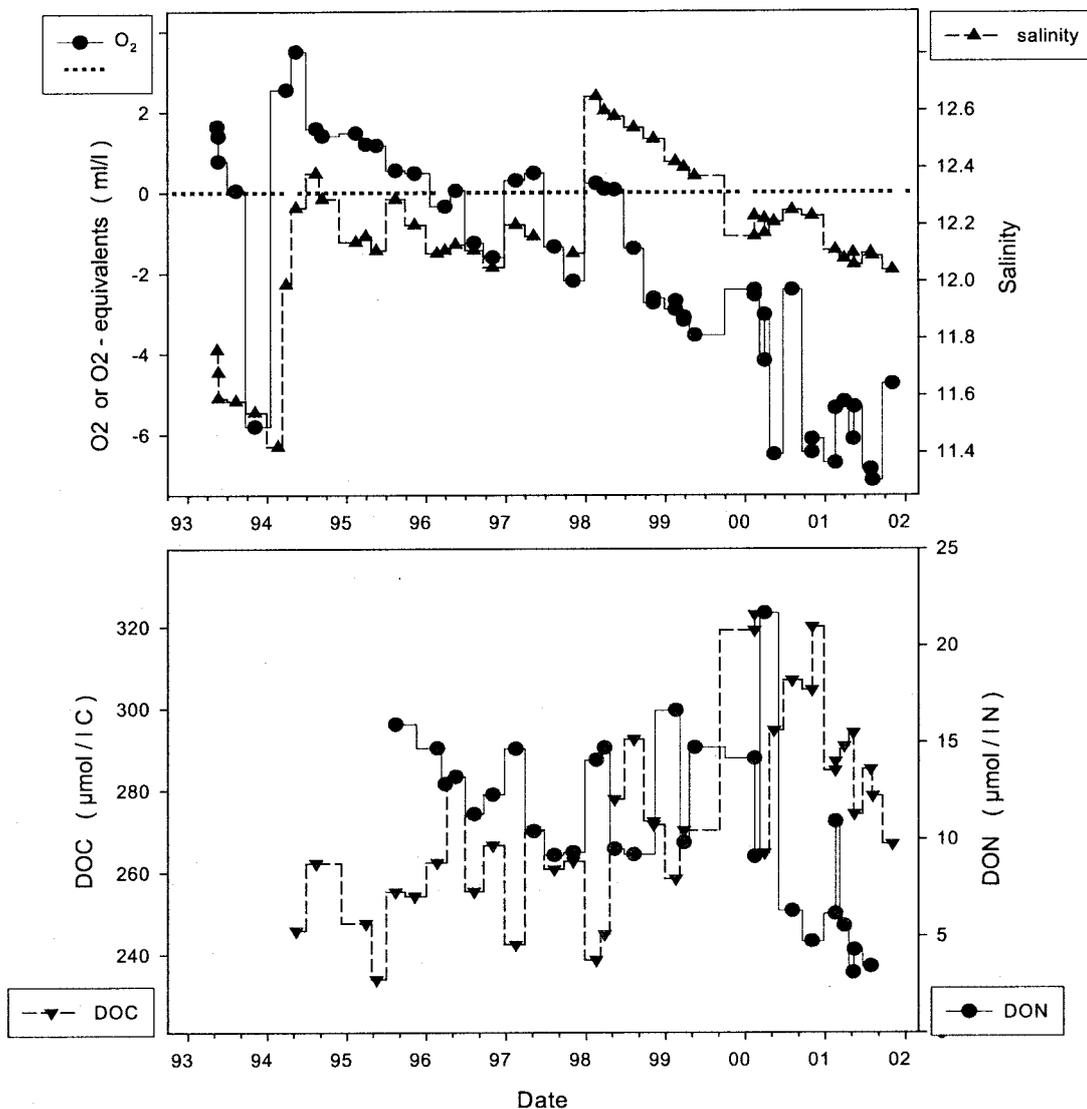


Abb. 27

Veränderungen des Salzgehalts und der Konzentrationen von O₂ bzw. H₂S (oben) und DOC und DON (unten) in der bodennahen Wasserschicht an der Station 271 seit 1993 (überarbeitet nach MATTHÄUS et al., 1999)

Fig. 27: Changes of salinity and concentrations of O₂ and H₂S, respectively, (top) and DOC and DON (bottom) in the near bottom layer at station 271 since 1993 (completed and redrawn from MATTHÄUS et al., 1999)

Station TF 0271 - bottom layer -

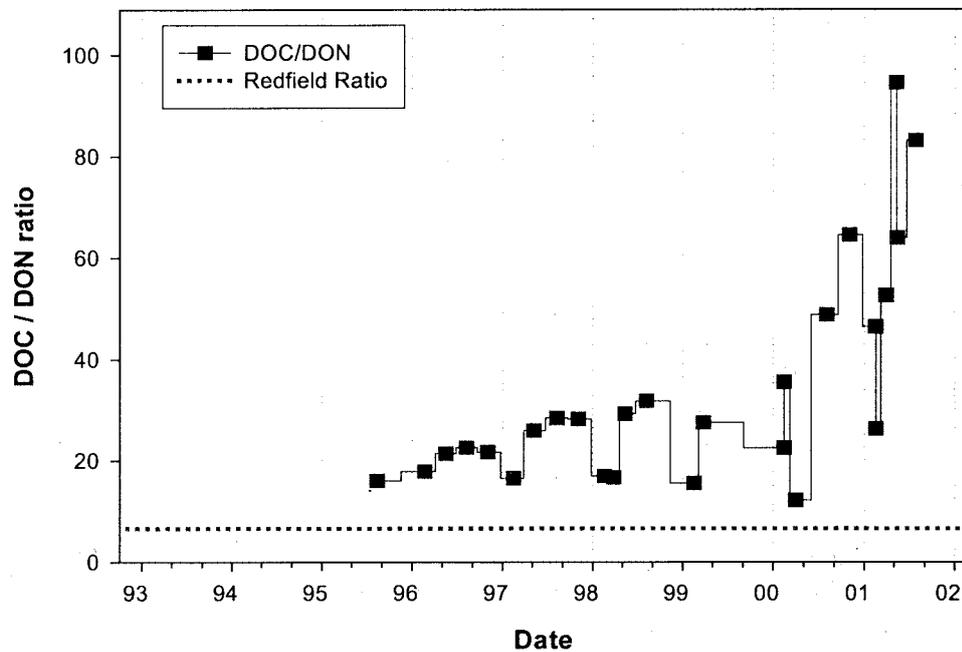


Abb. 28

Veränderungen des DOC/DON - Verhältnisses in der bodennahen Wasserschicht an der Station 271. Die gepunktete Linie markiert die Lage des Redfield- Verhältnisses

Fig. 28: Changes of DOC/DON - ratio in the near bottom layer at station 271. The dotted line indicates the value of the Redfield ratio

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 „Gauss“ für die Unterstützung und den Einsatz bei den Messfahrten des Jahres 2001. Für die Unterstützung bei der Beschreibung des Eiswinters, insbesondere durch Übermittlung einer Bedeckungskarte, sind wir Frau NATALIJA SCHMELZER vom Eisdienst des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Hamburg, dankbar. Wir danken Herrn THOMAS FADING vom Deutschen Wetterdienst (DWD), Offenbach, für die Bereitstellung der Winddaten von Arkona, Herrn REINER TIESEL für die Angabe der Kälte- und Wärmesummen der Wetterstation Warnemünde und Frau GISELA TSCHERSICH vom BSH für die Bereitstellung der NOAA- Wettersatellitendaten. Die Autoren bedanken sich bei Herrn BARRY BROMAN, Schwedisches Meteorologisches Institut (SMHI), Norrköping, für die Überlassung der Pegeldaten. Herr JAN SZARON, Ozeanographisches Labor des SMHI in Göteborg, stellte uns hydrographisch-chemische Beobachtungen ausgewählter Ostseestationen aus dem Schwedischen Ozean Archiv (SHARK) zur Verfügung, die im Rahmen des nationalen schwedischen Umweltüberwachungsprogramms gewonnen wurden. Frau ELZBIETA LYSIAK-PASTUSZAK von der Maritimen Abteilung des Instituts für Meteorologie und Wasserwirtschaft in Gdynia (IMGW) stellte uns freundlicherweise Beobachtungsdaten für das „Danziger Tiefe“ zur Verfügung. Nicht zuletzt gilt unser Dank Herrn WOLFGANG MATTHÄUS, ehemals Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW), der im Jahre 2002 in den verdienten Ruhestand getreten ist, aber dessen ungeachtet durch Rat und Tat wesentlich zur Vorbereitung und zum Gelingen des diesjährigen Berichts beigetragen hat.

Literaturverzeichnis

- V.BODUNGEN, GRAEVE, M., KUBE, J., LASS, H.U., MEYER-HARMS, B., MUMM, N., NAGEL, K., POLLEHNE, F., POWILLEIT, M. RECKERMANN, M., SATTLER, C., SIEGEL, H. and WODARD, D. (1995) Stoff-Flüsse am Grenzfluss – Transport- und Umsatzprozesse im Übergangsgebiet zwischen Oderästuar und Pommerscher Bucht (TRUMP). – *Geowiss.* **13**, 479-485.
- BØRSHEIM, K.Y. and MYKLESTAD, S.M. (1997): Dynamics of DOC in the Norwegian Sea inferred from monthly profiles collected during 3 years at 66°N, 2°E. – *Deep Sea Res.* **44**, 593-601.
- BSH (2001a): Eiswinter ade - Bilanz 2000/2001. <http://www.bsh.de>.
- BSH (2001b): Eiswinter 2001/02 hat begonnen. <http://www.bsh.de>.
- BSH (2001c): Eisübersichtskarte, **74**, Nr.26, Hamburg.
- DWD.(2001): WitterungsReport Daten. – Deutscher Wetterdienst, Offenbach, **3**, Nr. 1-13.
- DWD (2002): Winddaten der Wetterstation Arkona des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach, unveröffentlicht.
- ELMGREN, R. AND LARSSON, U. (2001): Nitrogen and the Baltic Sea: Managing nitrogen in relation to phosphorus. - *The Scientific World* **1** (S2), 371-377.
- FMI,(2001a): The Ice Winter 2000/2001. http://ice.fmi.fi/winter00_01.html.
- FMI (2001b): The maximum annual extent of ice cover in the Baltic Sea 1720- 1995. <http://ice.fmi.fi/maxalat.html>.
- FONSELIUS, S.H. (1969): Hydrography of the Baltic deep basins. – III. Fish. Board Swed. Ser. *Hydrogr.* **23**, 1-97.

- GOERING, J.J. (1968): Denitrification in the oxygen minimum zone of the eastern tropical North Pacific. – *Deep Sea Res.* **15**, 157-164.
- GRASSHOFF, K., ERHARD, M. and KREMLING, K. (1983): *Methods of seawater analysis*. 2nd Ed., Verlag Chemie, Weinheim.
- HAGEN, E., and FEISTEL, R. (2001): Spreading of Baltic deep water: A case study for the winter 1997- 1998. *Meereswiss. Ber. (Mar. Sci. Rep., Warnemünde)* **45**, 99-133.
- HELCOM (1996): Third periodic assessment of the state of the marine environment of the Baltic Sea, 1989-1993; Background Document. – *Baltic Sea Environ. Proc.* **64B**, 1-252.
- HELCOM (2000): *Manual for marine monitoring in the COMBINE programme of HELCOM*. – Baltic Marine Environment Protection Commission, Helsinki. Updated 2002: www.helcom.fi/Monas/CombineManual2/CombineHome.htm.
- HELCOM (2001): Fourth periodic assessment of the state of the environment of the Baltic Marine Area, 1994 – 1998; Background Document. – *Baltic Sea Environ. Proc.* **82B**, im Druck.
- KRÜGER, S., ROEDER, W., WLOST, K.-P., KOCH, M., KÄMMERER, H. AND 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.
- KRÜGER, S. (2000a): Basic shipboard instrumentation and fixed autonomic stations for monitoring in the Baltic Sea. – In: EL-HAWARY, F. (Ed.): *The Ocean Engineering Handbook*, CRC Press, Boca Raton, USA, 52-61.
- KRÜGER, S. (2000b): Activities of the Institut für Ostseeforschung (IOW), Germany. – *Proc. Int. Workshop on the "Coordinated Adriatic Observing System" CAOS*, 21-22 October 1998, Trieste, Italy, 53-60.
- LARSSON, U., ELMGREN, R. and WULFF, F. (1985): Eutrophication and the Baltic Sea – causes and consequences. – *Ambio* **14**, 9-14.
- LARSSON, U. and ANDERSSON, L. (2001): Östersjön 2000; Swedish report on the environmental state of the Baltic proper. – *Stockholms Marina Forskningscentrum*, 51-54.
- LASS, H.U., SCHMIDT, T. and SEIFERT, T. (1996): Hiddensee upwelling field measurements and modelling results. – *Baltic Marine Science Conference*, Rønne, Denmark, October 22-26, 1996.
- LASS, H.U., MOHRHOLZ, V. and SEIFERT, T. (2001): On the dynamics of the Pomeranian Bight. – *Cont. Shelf Res.* **21**, 1237-1261.
- LEINWEBER, A. (2001): Progress in ecosystem modelling by inclusion of the CO₂ system. – Oral presentation "Baltic Sea Science Conference", 25.-29. October 2001, Stockholm.
- MATTHÄUS, W. (1978): Zur mittleren jahreszeitlichen Veränderlichkeit im Sauerstoffgehalt der offenen Ostsee. – *Beitr. Meereskunde*, Berlin, **41**, 61-94.
- MATTHÄUS, W. (1995): Natural variability and human impacts reflected in long-term changes in the Baltic deep water conditions – a brief overview. – *Dt. Hydrogr. Z.* **47**, 47-65.
- MATTHÄUS, W., NEHRING, D., NAUSCH, G., LASS, H.-U., NAGEL, K. and 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. and SIEGEL, H. (1997): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1996. – *Meereswiss. Ber./Mar. Sci. Rep., Warnemünde* **24**, 1-49.
- MATTHÄUS, W., NAUSCH, G., LASS, H.-U., NAGEL, K. and SIEGEL, H. (1998): The Baltic Sea in 1997 – Impacts of the extremely warm summer and of the exceptional Oder flood. – *Dt. Hydrogr. Z.* **50**, 47 – 69.

- MATTHÄUS, W., NAUSCH, G., LASS, H.-U., NAGEL, K. and SIEGEL, H. (1999a): The Baltic Sea in 1998 - Characteristic features of the current stagnation period, nutrient conditions in the surface layer and exceptionally high deep water temperature. - *Dt. Hydrogr. Z.* **51**, 67-84.
- MATTHÄUS, W., NAUSCH, G., LASS, H.-U., NAGEL, K. and SIEGEL, H. (1999b): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1998. - *Meereswiss. Ber./Mar. Sci. Rep.*, Warnemünde **35**, 1-69.
- MATTHÄUS, W., NAUSCH, G., LASS, H.-U., NAGEL, K. and SIEGEL, H. (2000): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1999. - *Meereswiss. Ber./Mar. Sci. Rep.*, Warnemünde **39**, 1-73.
- MATTHÄUS, W., NAUSCH, G., LASS, H.-U., NAGEL, K. and SIEGEL, H. (2001): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2000. - *Meereswiss. Ber./Mar. Sci. Rep.*, Warnemünde **45**, 27-88.
- MATTHÄUS, W. and G. NAUSCH (2002): Hydrographic-hydrochemical variability in the Baltic Sea during the 1990s in relation to changes during the 20th century. - ICES Symposium: "Hydrobiological Variability in the ICES Area, 1990 - 1999", Edinburgh, Scotland 8. - 10. August 2001. - *ICES Journal of Marine Science*, in press.
- MOHRHOLZ, V. (1998): Transport- und Vermischungsprozesse in der Pommerschen Bucht. - *Meereswiss. Ber./Mar. Sci. Rep.*, Warnemünde **33**, 1-106.
- MOHRHOLZ, V., PASTUSZAK, M., SITEK, S., NAGEL, K., and LASS, H.U. (1998): The exceptional Oder flood in summer 1997 - Riverine mass and nutrient transport into the Pomeranian Bight. - *Dt. Hydrogr. Z.* **50**, 129-144.
- NAUSCH, G. and 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. and AERTJEBERG, G. (1999): Anthropogenic nutrient load of the Baltic Sea. - *Limnologia* **29**, 233-241.
- NEHRING, D. and MATTHÄUS, W. (1991): Current trends in hydrographic and chemical parameters and eutrophication in the Baltic Sea. - *Int. Revue ges. Hydrobiol.* **76**, 297-316.
- NEHRING, D., MATTHÄUS, W. and 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. and NAGEL, K. (1995a): Hydrographisch-hydrochemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1994. - *Meereswiss. Ber./Mar. Sci. Rep.*, Warnemünde **9**, 1-71.
- NEHRING, D., MATTHÄUS, W., LASS, H.-U., NAUSCH, G. and 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. and NAGEL, K. (1995c): The Baltic Sea in 1995 - beginning of a new stagnation period in ist central Baltic deep waters and decreasing nutrient load in ist surface layer. - *Dt. Hydrogr. Z.* **47**, 319-327.
- NEHRING, D., MATTHÄUS, W., LASS, H.-U., NAUSCH, G. and NAGEL, K. (1996): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1995. - *Meereswiss. Ber./Mar. Sci. Rep.*, Warnemünde **16**, 1-43.
- PASTUSZAK, M., WIELGAT, M. and SITEK, S. (2001): Nutrient status in the Szczecin Lagoon - Past, present and future perspectives. - *Oceanological Studies* **30**, 59-86.

- SCHNEIDER, B., NAGEL, K. and STRUCK, U. (2000): Carbon fluxes across the halocline in the eastern Gotland Sea. - *J. mar. Systems* **25**, 261-268.
- SCHWOERBEL, J. (1984): Einführung in die Limnologie. - VEB Gustav Fischer Verlag Jena, 233S.
- SIEGEL, H., GERTH, M. and SCHMIDT, T. (1996): Water exchange in the Pomeranian Bight investigated by satellite data and shipborne measurements. - *Cont. Shelf Res.* **16**, 1993-1817.
- SIEGEL, H., MATTHÄUS, W., BRUHN, R., GERTH, M., NAUSCH, G., NEUMANN, T. and POHL, C. (1998): The exceptional Oder flood in summer 1997 - distribution patterns of the Oder discharge in the Pomeranian Bight. - *Dt. Hydrogr. Z.* **50**, 145-167.
- SIEGEL, H., GERTH, M., TIESEL, R. and TSCHERSICH, G. (1999): Seasonal and interannual variations in satellite derived sea surface temperature of the Baltic Sea in the 1990s. - *Dt. Hydrogr. Z.* **51**, 407-422.
- SMHI (1999): Flow through the Sound in 1999. <http://www.smhi.se>.
- SMHI (2001a): Sammanfattning av isvintern och isbrytarverksamheten 2000/2001, Norrköping.
- SMHI (2001b): http://www.smhi.se/hfa_coord/BOOS/Y2001/inflow2001_*.html.
- SMHI (2002): unveröffentlichte Daten.
- TIESEL, R. (2002a): unveröffentlichte Daten.
- TIESEL, R. (2002b): Wetterrekorde 2001 und Klimaänderung. <http://www.tiesel.de/klima1.html>.
- TRUMP (1998): Transport- und Umsatzprozesse in der Pommerschen Bucht (TRUMP) 1994-1996. - Abschlußbericht, IOW Warnemünde, 1-32 (unveröff.).

Pohl, C.; Hennings, U.:

Die Schwermetall- Situation in der Ostsee im Jahre 2001

Inhaltsverzeichnis	Seite
Zusammenfassung	80
Summary	80
1. Einleitung	81
2. Probenahme	81
2.1. Probenaufarbeitung	82
2.2. Qualitätssicherung	82
3. Ergebnisse und Diskussion	85
3.1. Verteilungsmuster der Metallkonzentrationen in der gelösten und partikulären Phase an den in 2001 beprobten Stationen und Tiefen. Cadmium Blei Kupfer Zink Quecksilber	85
3.2. Spurenmetall-Trends zwischen den Jahren 1993-2001 an Stationen in der westlichen und zentralen Ostsee	96
4. Schlußfolgerungen	101
Danksagung	101
Literaturverzeichnis	101

Zusammenfassung

Wie in den Vorjahren wies die Schwermetallverteilung im Ostseewasser im Jahr 2001 keine deutlichen oder gesundheitsgefährdenden Veränderungen auf. Während der Ostseeüberwachungsfahrt im Februar 2001 wurden in der westlichen Ostsee im Vergleich zu den beiden Vorjahren niedrigere Konzentrationen und im Vergleich zur zentralen Ostsee höhere Konzentrationen für die gelösten und partikulären Anteile von Cadmium, Kupfer, Blei, Zink und Hg (gesamt) registriert. Aufgrund der gemäßigten Windsituation zur Zeit der Probenahme, ist dieses auf eine verminderte bodennahe Durchmischung der Wassersäule und den damit verbundenen geringeren Einträgen von feinkörnigen Oberflächensedimenten aus der Lübecker Bucht zurückzuführen.

Die seit 1995 anhaltende Stagnationsperiode beeinflusst die Schwermetallverteilung im Tiefenwasser der Ostseebecken. Die gelösten Konzentrationen der Metalle Cd, Cu, Zn, und Pb stabilisierten sich unterhalb der Redoxgrenzschicht auf einem sehr niedrigen Konzentrationsniveau. Die Frage inwieweit die Elimination dieser Metalle durch die Bildung schwerlöslicher Sulfide im Tiefenwasser Einfluß auf die Schwermetallverteilung im Oberflächenwasser nimmt, kann in diesem Zusammenhang nicht beantwortet werden, da zur Zeit nicht bekannt ist, welcher schwebstoffgebundene Schwermetallanteil vom Oberflächenwasser quantitativ in den Tiefenwasserkörper eingetragen wird. Hinzu kommen diffusive Prozesse an den Grenzschichten, sowie strömungsbedingte Austauschprozesse.

Summary

The 2001 results of heavy metal monitoring in Baltic Sea water revealed no pronounced changes compared to previous years. According to the central Baltic Sea, elevated levels of suspended particulate material (SPM), Pb(dissolved), Pb(SPM), Cd(dissolved), Cd (SPM), Cu(SPM), Zn(dissolved), Zn(SPM) and Hg (total) were observed in the western Baltic Sea. In the 1960th a dumping area for dust and mud highly contaminated in trace metals was established in the Bay of Lübeck. In subject of wind induced mixing and bioturbation of marine organism this area could be more or less a source for SPM and trace metal enrichment in the watercolumn.

An analysis of the temporal trends at the sampling stations in the western Baltic for the period 1993-2001 demonstrated that not only salinity but also heavy metal concentrations are subject to large fluctuations especially in the transition area between the North Sea and Baltic Sea. The temporal heavy metal trends for the same period in central Baltic deep waters showed decreasing trends of Cd(dissolved) and Cu(dissolved) for the last 7 respectively 5 years, which is due to the stabilising of anoxic conditions in the deep waters. The observation period was perhaps too short for the detection of clear trends in this transition area, especially because the system was influenced by a major saltwater inflow in 1993 and 1994.

1. Einleitung

Die Schwermetallüberwachung der Ostsee wurde im Jahr 2001 durch das Institut für Ostseeforschung zum elften mal durchgeführt. Grundlage bildet die Verwaltungsvereinbarung mit dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) in Hamburg und Rostock. In dem diesjährigen wissenschaftlichen Bericht werden die Analysen zur Qualitätskontrolle tabellarisch aufgeführt. Weiterhin wurden die Konzentrationen der untersuchten Schwermetalle als Balkendiagramme und zur besseren Orientierung auch als Flächendiagramme an den beprobten Stationen in der Ostsee dargestellt. Die Häufigkeitsverteilungen geben einen Hinweis darauf, in welchem Konzentrationsbereich die verschiedenen Parameter am häufigsten anzutreffen sind, und ob sich eine Verschiebung des Konzentrationsbereiches zum Vorjahr ergeben hat. Eine Trendauswertung wurde für den Zeitraum 1993-2001 für die westliche Ostsee, sowie für das Oberflächenwasser und das Tiefenwasser der Bornholmsee und der Gotlandsee durchgeführt. Die Schwermetallverteilung an den Stationen im Bornholm Becken (213) und im Gotland Becken (271) wurden als Tiefenprofile dargestellt.

2. Probenahme

Die Monitoringbeobachtung erfolgte im Jahr 2001 zwischen dem 8.2.-23.2.2001. Angaben zu den Stationen sind in Tabelle 1 und Abb. 1 zusammengefaßt.

Tab. 1
Stationen Schwermetalle, Februar 2001

Table 1
Trace metal stations, February 2001

Station	Grad Nord	Grad Ost	Stationstiefe (m)	Tiefenbeobachtung (m)
012 / M2	54°18,90'	11°33,00'	25	5, 15
030 / K8	54°43,40'	12°47,00'	22	5, 15
046 / M1	54°28,00'	12°13,00'	27	5, 15, 20
069 / K7	55°00,00'	13°18,00'	46	5, 15, 35
109 / K4	55°00,00'	14°05,00'	47	5, 15, 35
113 / K5	54°55,50'	13°30,00'	47	5, 15, 35
213 / K2	55°15,00'	15°59,00'	91	10, 15, 50, 65, 80
222	55°13,00'	17°04,00'	93	5, 50
250	56°05,00'	19°10,00'	124	5, 50
253	55°50,40'	18°52,00'	99	5, 50
256	55°19,60'	18°15,10'	79	5, 50
259 / K1	55°33,00'	18°24,00'	90	10, 50, 80
260	56°38,00'	19°35,00'	148	5, 50
263	56°20,80'	19°22,70'	136	5, 50
271 / J1	57°19,20'	20°03,00'	249	10,50,75,100,125,150,175, 200,225,237
272	57°04,30'	19°49,80'	212	5, 50

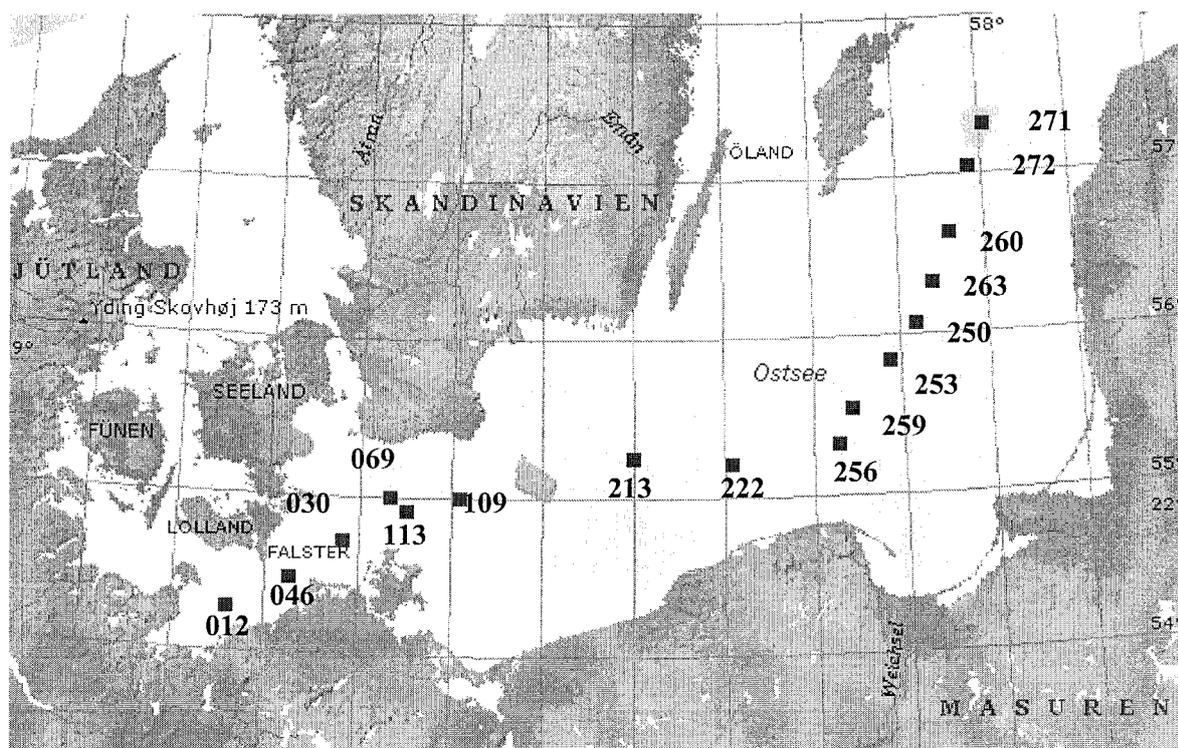


Abb. 1
Stationskarte

Fig. 1
Station map

2.1 Probenaufarbeitung

Bezüglich der Probenvorbereitung, Analytik und Messung kamen die gleichen Methoden und Meßgeräte wie im Berichtsjahr 2000 zum Einsatz. Detaillierte Beschreibungen dazu finden sich bei Pohl 1994, Pohl et al. 1995, 1997 sowie 1998.

2.2 Qualitätssicherung

Zusätzlich zur internen Methodenabsicherung nahm unser Labor erfolgreich an der QUASIMEME Performance Study 2001 (Round 26); Exercise 492 für Metalle in Sedimenten teil.

Die analytische Qualitätssicherung für die gelösten Metallkonzentrationen wurden mit Hilfe des Referenzstandards CASS-3 und NASS-4 (Tabelle 2; Tabelle 3) sowie eines Substandards (unfiltriert) von der Station 263/30m durchgeführt (Tabelle 4). Die Qualitätssicherung in suspendiertem partikulärem Material (SPM) wurde mit Hilfe des Referenzstandards MESS-2 und BCSS-1 und Quecksilber mit Hilfe von CRM 579 parallel zur Probenaufarbeitung durchgeführt (Tabelle 5-Tabelle 7). Als Ergänzung sind in Tabelle 8 Filterblanks aufgeführt, die parallel zu den Probenaufarbeitungen des suspendierten Materials bearbeitet wurden.

Tab. 2

Qualitätssicherung von Metallen in der gelösten Phase mit Hilfe von Zertifiziertem Referenzmaterial
-CASS 3-

Table 2

Quality assurance of metals in the dissolved phase with CRM-CASS 3-

	Cd (ng/kg)	Cu (ng/kg)	Pb (ng/kg)	Zn (ng/kg)	Mn (ng/kg)
Soll	30+-5	517+-62	12+-4	1240+-250	2510+-360
11.1.-26.7.2001	n=11	n=11	n=8	n=11	n=9
Mean	28,7	501,7	5,2	1318,7	2646,4
STDEV	1,7	28,5	1,9	133,5	257,2
%	5,9	5,7	36,5	10,1	9,7

Tab. 3

Qualitätssicherung von Metallen in der gelösten Phase mit Hilfe von zertifiziertem Referenzmaterial
-NASS 4-

Table 3

Quality assurance of metals in the dissolved phase with CRM-NASS 4-

	Cd (ng/kg)	Cu (ng/kg)	Pb (ng/kg)	Zn (ng/kg)
Soll	16+-3	228+-11	8+-5	115+-18
29.1.-11.6.2001	n=7	n=7	n=6	n=7
Mean	15,9	222,7	4,5	103,7
STDEV	1,1	9,7	2,9	13,5
%	6,8	4,4	64,0	13,0

Tab. 4

Qualitätssicherung von Metallen in der gelösten Phase mit Hilfe von Substandard – Station 263,
30m Tiefe

Table 4

Quality assurance of metals in the dissolved phase with Substandard – Station 263, 30m depth

Datum	Cd (ng/kg)	Cu (ng/kg)	Pb (ng/kg)	Zn (ng/kg)
11.1.-18.7.2001,	n=21	n=25	n=20	n=21
Mean	10,6	599	59	470
STDEV	0,99	36,81	16,95	79,30
%	9,3	6,1	28,7	16,9

Tab. 5

Qualitätssicherung von Quecksilber im Meerwasser mit Hilfe von zertifiziertem Referenzmaterial
-CRM 579-

Table 5

Quality assurance of mercury in seawater with CRM 579-

CRM 579	Hg (ng/dm ³)
Soll	1,85+0,2
5.1.-22.5.2001	n=13
Mean	1,96
StDEV	0,14
(%)	7,07

Tab. 6

Qualitätssicherung von Metallen in der partikulären Phase mit Hilfe von zertifiziertem Referenzmaterial -MESS-2

Table 6

Quality assurance of metals in the particulate phase with CRM- Mess-2-

Datum	Cd (µg/g)	Cu(µg/g)	Pb (µg/g)	Zn(µg/g)	Mn (µg/g)	Hg (ng/g)	As (µg/g)
Soll	0,24+0,01	39,3+-2,0	21,9+-1,2	172+-16	365+-21	92+-9	20,7+-0,8
27.9.- 27.11. 2001	n=7	n=7	n=7	n=7	n=7	n=7	n=7
MEAN	0,25	36,21	23,49	168,57	337,71	95,86	24,94
STDEV	0,01	4,15	2,81	17,29	21,38	6,18	2,01
%	5,07	11,45	11,95	10,26	6,33	6,44	8,07

Tab. 7

Qualitätssicherung von Metallen in der partikulären Phase mit Hilfe von zertifiziertem Referenzmaterial -BCSS-1

Table 7

Quality assurance of metals in the particulate phase with CRM -BCSS-1

Datum	Cd (µg/g)	Cu (µg/g)	Pb (µg/g)	Zn (µg/g)	Mn (µg/g)	As (µg/g)
Soll	0,25+0,04	18,5+-2,7	22,7+-3,4	119+-12	229+-15	11,1+-1,4
27.09.01	n=3	n=3	n=3	n=3	n=3	n=3
MEAN	0,26	15,27	23,60	131,00	229,67	13,20
STDEV	0,02	2,02	0,66	8,19	32,59	0,75
%	5,80	13,25	2,78	6,25	14,19	5,72

Tab. 8

Überprüfung der Filterblanks nach Reinigung (Nuclepore; 47mm; 0,4 µm). Im Verhältnis zur Probe, gehen die Filterblanks je nach Beladung der Filter mit 0,5-4% als Fehlerkorrektur ein

Table 8

Check up of filterblanks (Nuclepore; 47mm, 0,4 µm). In relation to the sample the error correction is considering with 0,5-4%

Datum	Cd ng/Filter	Cu ng/Filter	Pb ng/Filter	Zn ng/Filter	Mn ng/Filter	As ng/Filter
27.9.-8.10.2001	n=4	n=4	n=4	n=4	n=4	n=4
MEAN	0,01	0,58	0,93	3,43	0,96	0,00

3. Ergebnisse und Diskussion

Für die graphischen Darstellungen der Verteilungsmuster wurde die Konzentrationsangabe ng/kg für gelöste Metalle beibehalten. Für die graphische Auswertung der Tiefenprofile wurde die in der internationalen Literatur geforderte Konzentrationsangabe nmol/kg für die gelöste Phase gewählt. Bei den Konzentrationsangaben in SPM (suspendiertem partikulärem Material) muß zwischen der massenbezogenen Konzentrationsangabe ($\mu\text{g/g}$), und der volumenbezogenen Konzentrationsangabe (ng/L bzw. nmol/L) differenziert werden. Während die massenbezogene Konzentrationsangabe die Beladung des SPM mit Metallen beschreibt, und somit einen direkten Vergleich zu den Konzentrationen im Sediment darstellt, ist die volumenbezogene Konzentrationsangabe abhängig vom Anteil des Schwebstoffs in einem Liter Meerwasser. Somit kann diese Konzentrationsangabe zum direkten Vergleich mit den gelösten Metallkonzentrationen im Wasser herangezogen werden. Es ist darauf zu achten, das bei den Grafiken in diesem Bericht alle drei Konzentrationsangaben vorkommen können.

3.1. Verteilungsmuster der Metallkonzentrationen in der gelösten und partikulären Phase an den im Jahre 2001 beprobten Stationen und Tiefen

Wie in den vorangegangenen Jahren konzentrierten sich auch 2001 die Untersuchungen auf die gelösten und partikulären Anteile der Metalle Cadmium, Kupfer, Blei und Zink, auf die Quecksilberkonzentrationen (gesamt) sowie auf das Mangan als redoxsensitives Metall zur Charakterisierung von Prozessen in den tieferen Ostseebecken (Abb. 2-8). Der gegenwärtige Kenntnisstand zur Geochemie dieser Metalle in der Ostsee, sowie Interpretationen zu bestimmten Ausnahmesituationen und vertikalen Verteilungen wurden in den vorangegangenen Berichten (Pohl et al. 1995, 1997, 1998, 1999, 2000 und 2001) zum Schwermetallmonitoring beschrieben. Im Vergleich zum Vorjahr ist im Jahre 2001 der Schwebstoffanteil an den Stationen in der westlichen Ostsee (Abb. 3) um den Faktor 2 niedriger, welches auf die gemäßigten Windverhältnisse, und damit auf eine geringere bodennahe Durchmischung der Wassersäule verbunden mit Einträgen von feinkörnigen Oberflächensedimenten zurückzuführen ist. Allerdings sind die Schwebstoffanteile in der westlichen Ostsee ca. um den Faktor 2-5 höher als in der zentralen Ostsee.

Cadmium

Die gelösten Cadmiumkonzentrationen (Cd_{gel}) in der westlichen Ostsee variieren im Vergleich zum Vorjahr zwischen 16-20ng/kg und gehen in der zentralen Ostsee geringfügig auf Werte zwischen 10-15ng/kg zurück. Konzentrationen <10ng/kg werden im anoxischen Tiefenwasser des Gotland Beckens sowie im sauerstoffarmen Bodenwasser des Bornholm Beckens angetroffen (Abb. 9-10).

Bei den schwebstoffgebundenen Cd-anteilen Cd(SPM) sind leicht erhöhte Gehalte im Oberflächenwasser der westlichen Ostsee zu beobachten, die auf den ebenfalls erhöhten Schwebstoffanteil in der Wassersäule zurückzuführen sind. Weiterhin fallen die erhöhten Cd(SPM) Gehalte im Tiefenwasser des Bornholm Beckens sowie des Gotland Beckens auf, welches auf die geochemischen Prozesse unter anoxischen Bedingungen zurückzuführen ist.

Für Cd_{gel} wird vergleichbar dem Vorjahr am häufigsten der Konzentrationsbereich zwischen (10-16 ng/kg) angetroffen. Für CdSPM (volumenbezogen) wird der Bereich <1 ng/dm³ am häufigsten

frequenziert. An der Gesamtkonzentration in der Wassersäule variiert der partikuläre Cd-anteil zwischen 5-10%.

Blei

Im Jahre 2001 variieren die gelösten (Pb_{gel}) und partikulären (PbSPM) Bleikonzentrationen in der westlichen Ostsee zwischen 20-60 ng/kg bzw. 20-60 ng/dm³. Sie sind damit um den Faktor 3-5 höher als in der zentralen Ostsee. Der schwebstoffgebundene volumenbezogene Bleianteil entspricht ca. 50% der Gesamtkonzentrationen in der Wassersäule.

Kupfer

Die gelösten Kupferkonzentrationen (Cu_{gel}) sind vergleichbar zum Vorjahr am häufigsten im Konzentrationsbereich zwischen 400-600 ng/kg anzutreffen. Weiterhin ist eine geringe Zunahme der Oberflächenkonzentrationen von der westlichen in die zentrale Ostsee zu beobachten. Da Kupfer primär in der gelösten Fraktion meistens organisch komplexiert vorliegt, hat es eine längere Aufenthaltszeit in der Wassersäule. Die partikuläre Fraktion in der Wassersäule nimmt mit < 5% nur einen geringen Anteil ein. Kupfer wird primär über die Flüsse eingetragen, es korreliert in der Ostsee negativ zum Salzgehalt. Mit der partikulären Phase wird es nur langsam aus dem Oberflächenwasser eliminiert, was zu einer geringen "Anreicherung" im Oberflächenwasser der zentralen Ostsee führen kann. Im Vergleich dazu werden die Konzentrationen in der westlichen Ostsee durch Vermischungsprozesse mit weniger kontaminierten Nordseewasser beeinflusst, welches hier zu niedrigeren Konzentrationen führen kann.

Erhöhte Kupfergehalte in der partikulären Phase (20-60 ng/dm³) sind in der westlichen Ostsee, sowie im anoxischen Tiefenwasser der Stationen im Bornholm- Becken (Abb. 9) und im Gotland-Becken (Abb. 10) zu beobachten, welches auf die geochemischen Prozesse zurückzuführen ist.

Zink

Die gelösten Zinkkonzentrationen (Zn_{gel}) variieren ähnlich dem Vorjahr zwischen 400-1000 ng/kg, in der westlichen Ostsee sind die Konzentrationen um den Faktor 2-3 höher als in der zentralen Ostsee.

Die volumenbezogenen partikulären Zinkgehalte (ZnSPM) sind im Jahre 2001 im Bereich zwischen 50-200 ng/dm³ anzutreffen, und damit um den Faktor 2-3 geringer als im Vorjahr.

Quecksilber

Im Jahr 2001 wurde für die Quecksilberkonzentrationen (gesamt) der Bereich zwischen 200-1200 pg/dm³ am häufigsten angetroffen. Damit sind die Werte etwa um den Faktor 3 niedriger als im Vorjahr. Im Oberflächenwasser fallen die erhöhten Konzentrationen in der westlichen Ostsee auf, die auf den erhöhten Schwebstoffanteil in der Wassersäule zurückzuführen sind.

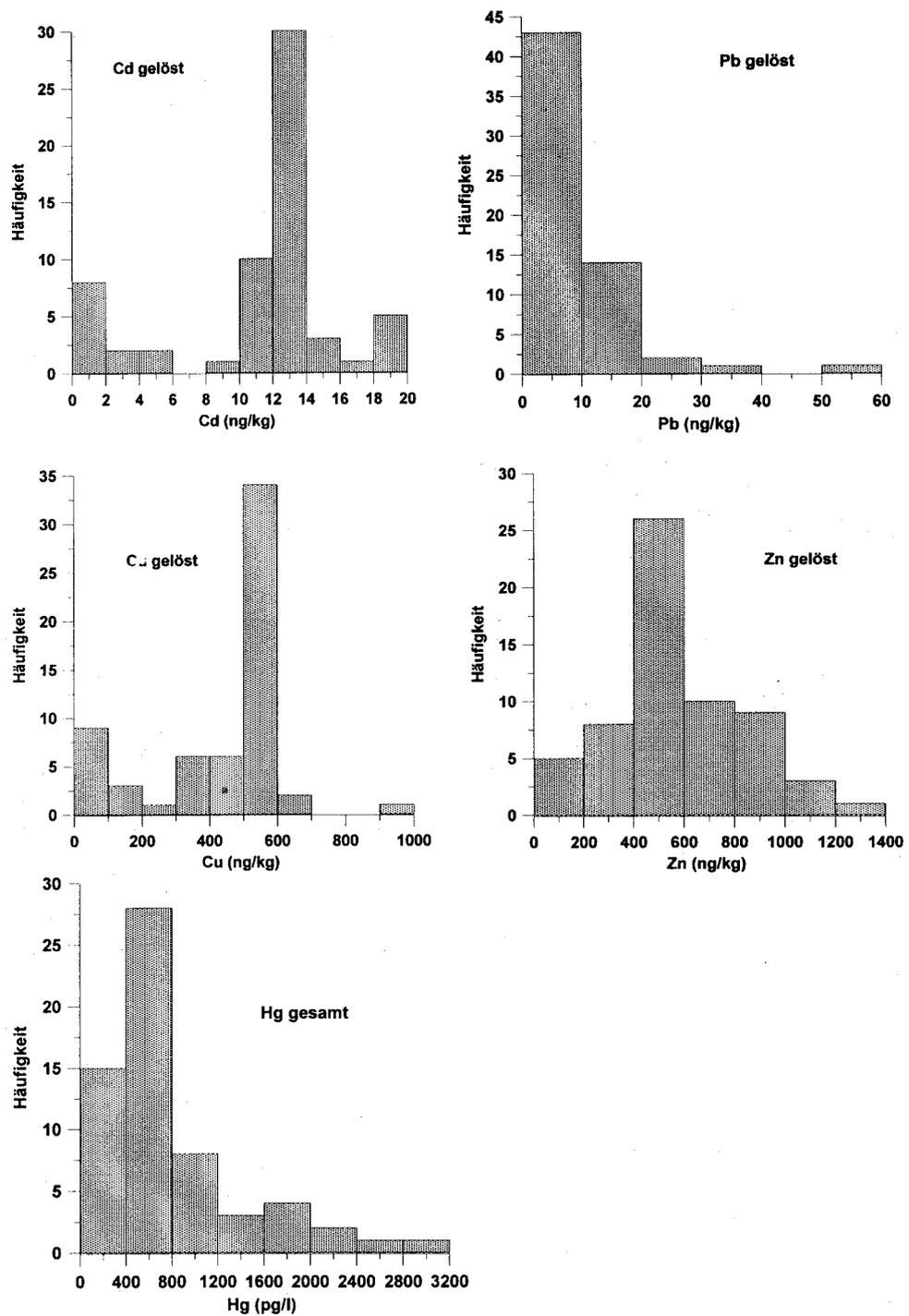


Abb. 4
Häufigkeitsverteilungen der gelösten Metallkonzentrationen in der Ostsee, Februar 2001

Fig. 4
Frequency distribution of metal concentrations in the dissolved phases in the Baltic; February 2001

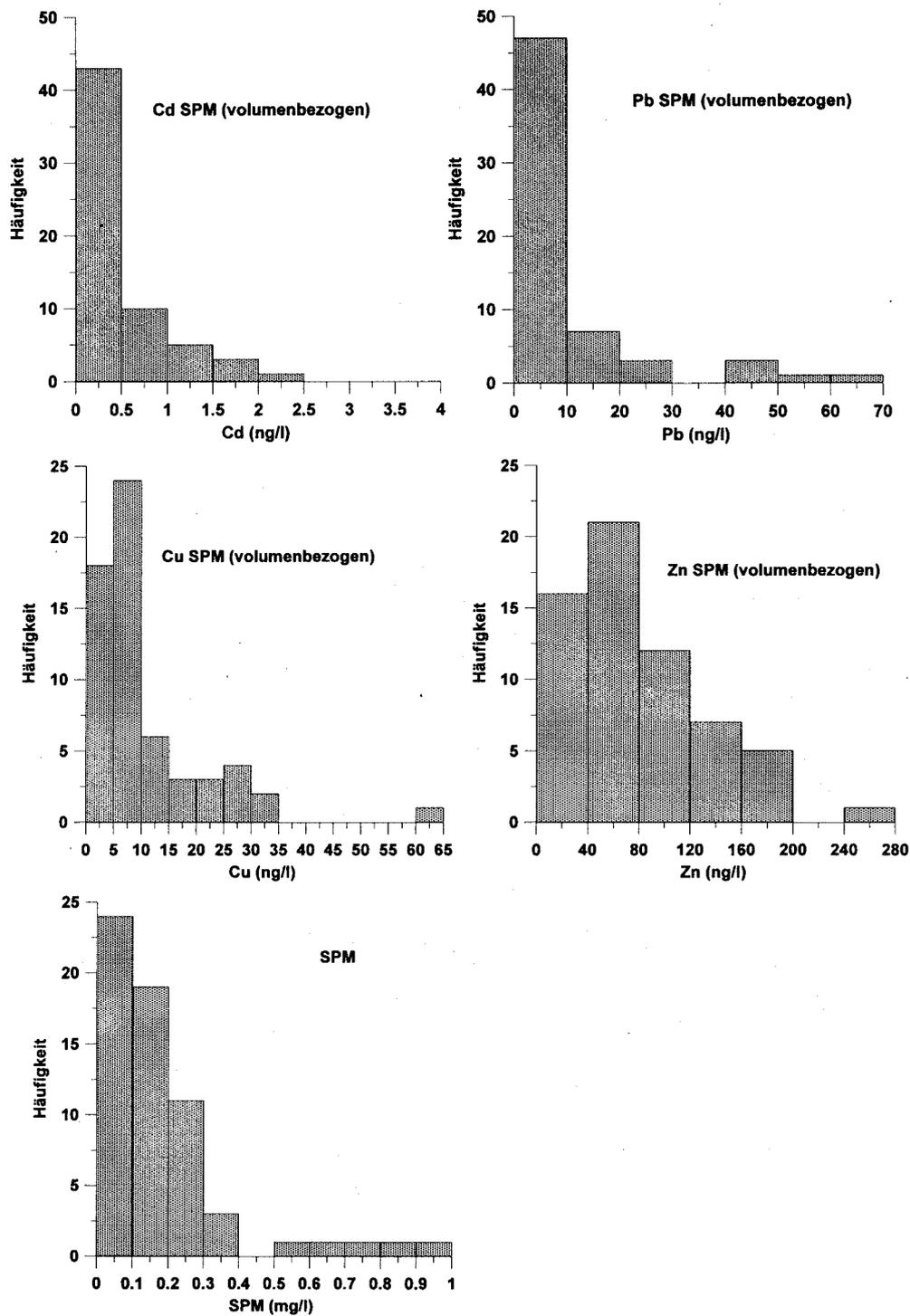


Abb. 5
Häufigkeitsverteilungen der Metallkonzentrationen in der Schwebstoffphase (volumenbezogen) in der Ostsee, Februar 2001

Fig. 5
Frequency distribution of metal concentrations in the particulate phases (related to the volume) in the Baltic; February 2001

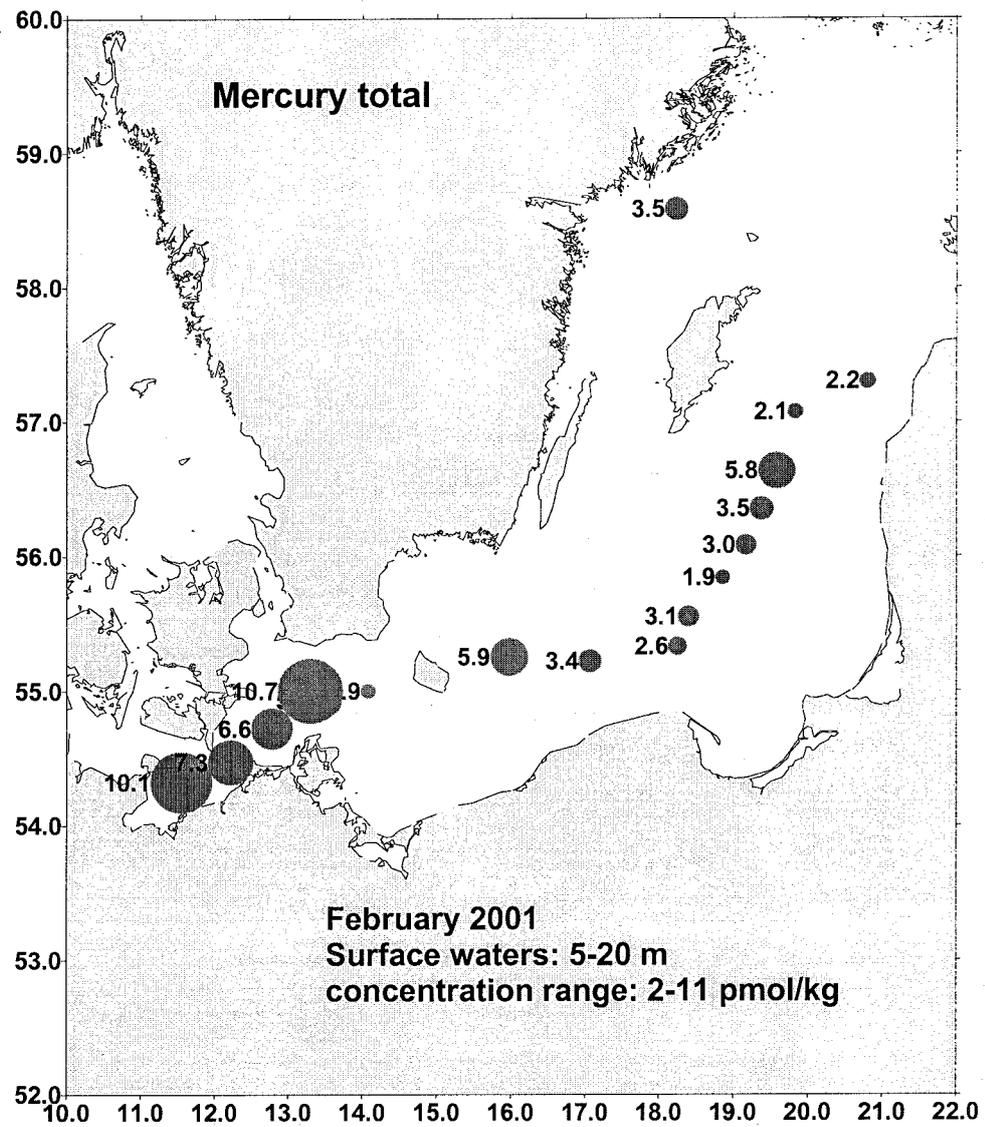


Abb. 8
 Verteilung von Hg gesamt im Oberflächenwasser der Ostsee

Fig. 8
 Distribution of Hg (total) in surface waters of the Baltic

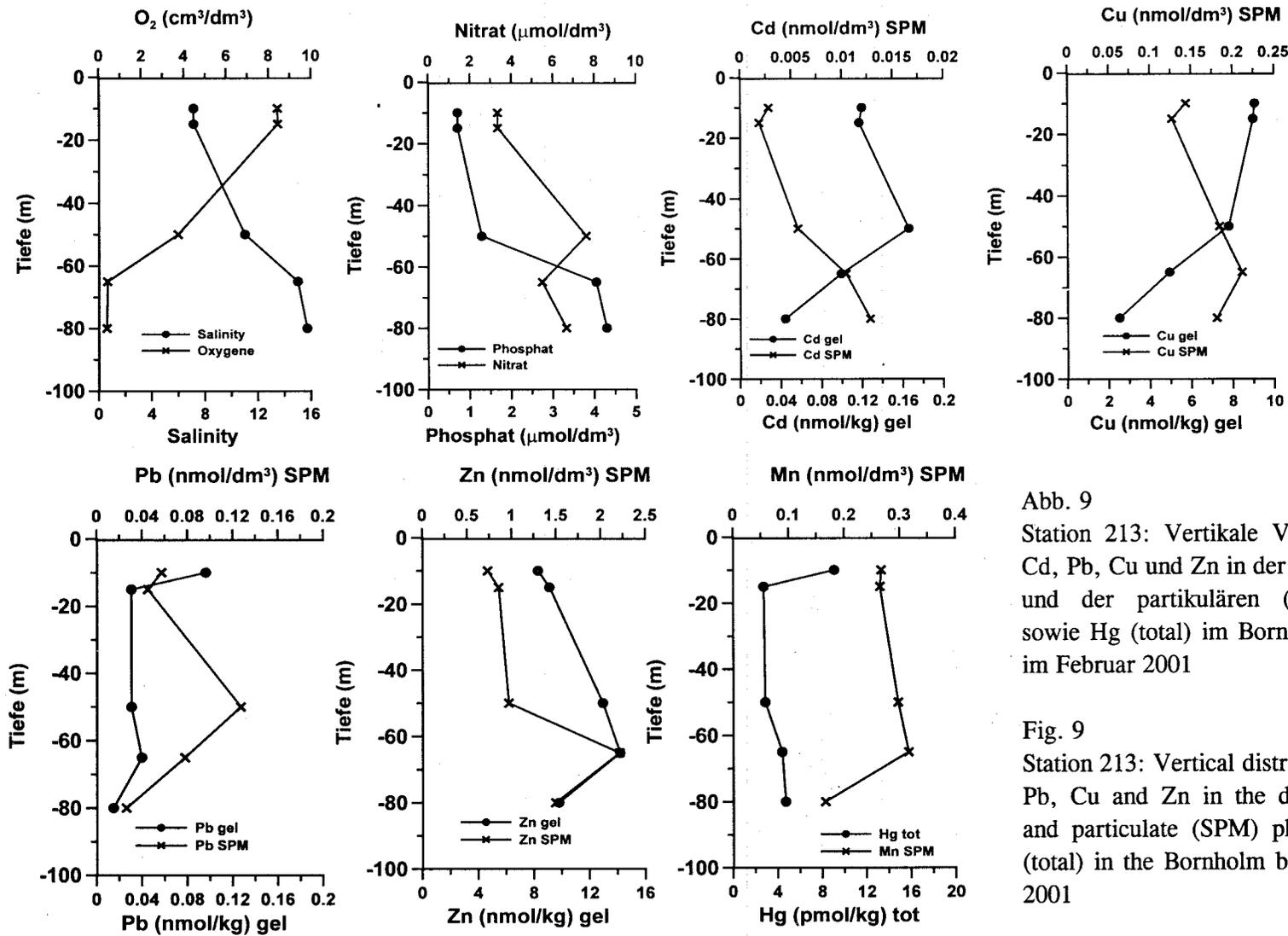


Abb. 9

Station 213: Vertikale Verteilung von Cd, Pb, Cu und Zn in der gelösten (gel) und der partikulären (SPM) Phase sowie Hg (total) im Bornholm- Becken im Februar 2001

Fig. 9

Station 213: Vertical distribution of Cd, Pb, Cu and Zn in the dissolved (gel) and particulate (SPM) phases and Hg (total) in the Bornholm basin; february 2001

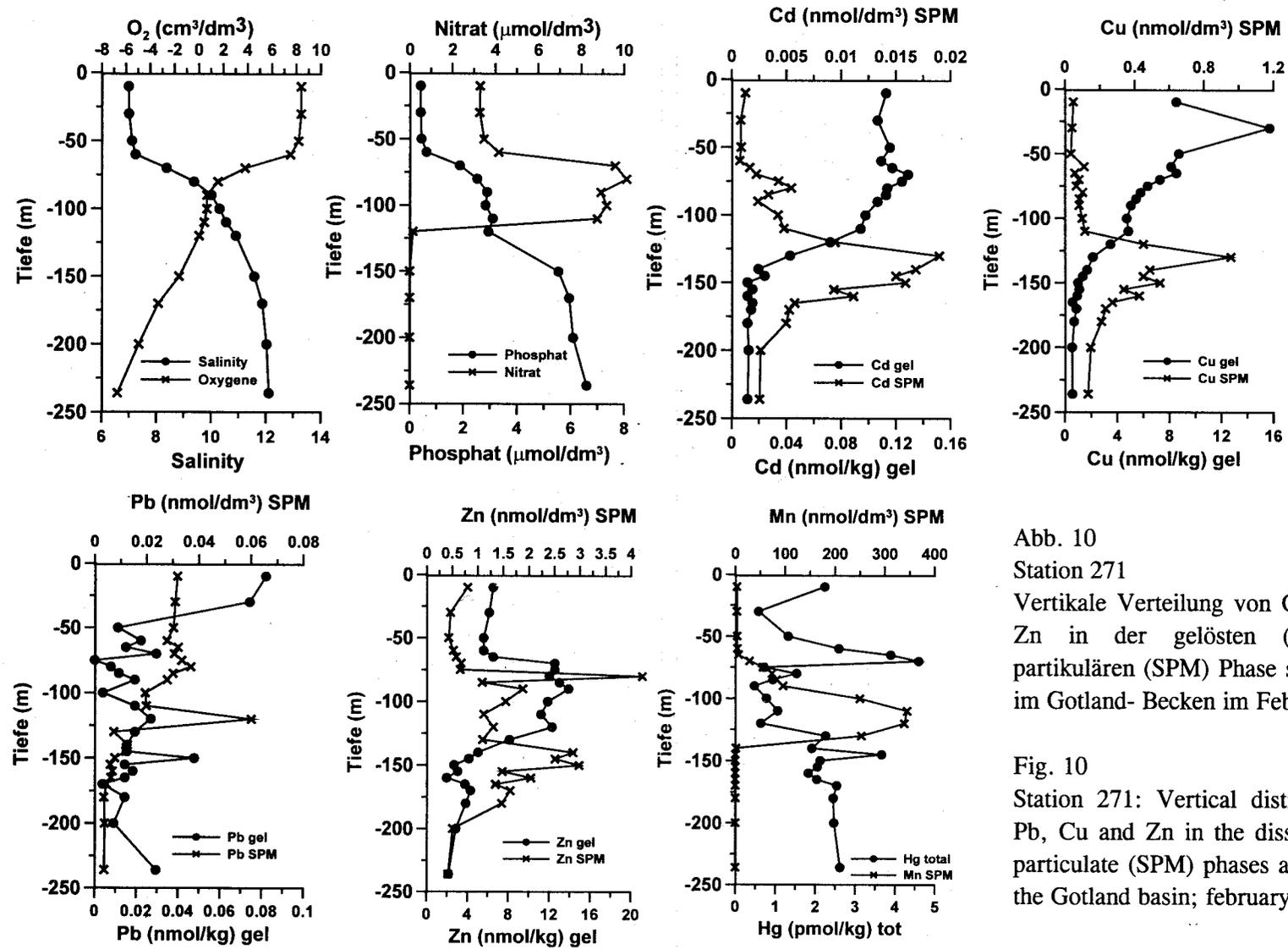


Abb. 10
Station 271
Vertikale Verteilung von Cd, Pb, Cu und Zn in der gelösten (gel) und der partikulären (SPM) Phase sowie Hg (total) im Gotland- Becken im Februar 2001

Fig. 10
Station 271: Vertical distribution of Cd, Pb, Cu and Zn in the dissolved (gel) and particulate (SPM) phases and Hg (total) in the Gotland basin; february 2001

3.2 Spurenmetall – Trends zwischen den Jahren 1993-2001 an Stationen in der westlichen und zentralen Ostsee

In dem diesjährigen Bericht wurden die grafischen Darstellungen der Trends mit den Daten des Jahres 2001 ergänzt (Abb. 11-15). Eine detaillierte Interpretation der Schwermetalltrends für Cd, Cu, Pb, Zn und Hg in der gelösten und partikulären Phase wurde bei Pohl & Hennings (2001) für die westliche und zentrale Ostsee durchgeführt. Die seit 1995 anhaltende Stagnationsperiode, und die damit verbundene Stabilisierung der anoxischen Verhältnisse in den tieferen Ostseebecken spiegelt sich vor allem in den abnehmenden Trends für Cd_{gel}, Cu_{gel}, Pb_{gel} und Zn_{gel} und den ansteigenden Trends für gelöstes Mangan unterhalb der Haloclinen an den Stationen in der zentralen Ostsee wieder. Inwieweit die Änderung der Redoxverhältnisse im Tiefenwasser, und die damit verbundene Elimination der Metalle als schwerlösliche Sulfide Einfluß auf die Metallverteilung im Oberflächenwasser nimmt ist nicht bekannt.

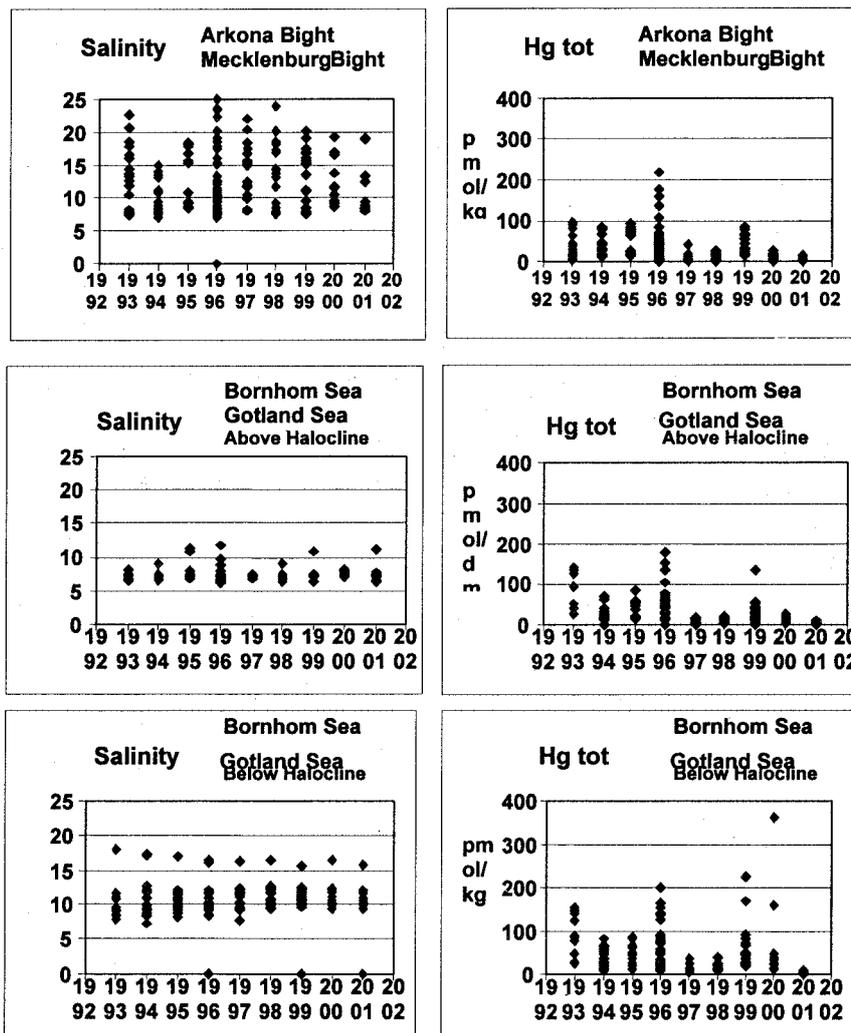


Abb. 11 Trends für Salzgehalt und Quecksilber gesamt (Hgtot), in der westlichen Ostsee, sowie oberhalb und unterhalb der Haloclinen in der zentralen Ostsee von 1993-2001

Fig. 11 Analysis of trends for salinity and mercury (Hgtot) in the western Baltic as well as above and below the halocline in the central Baltic between 1993-2001

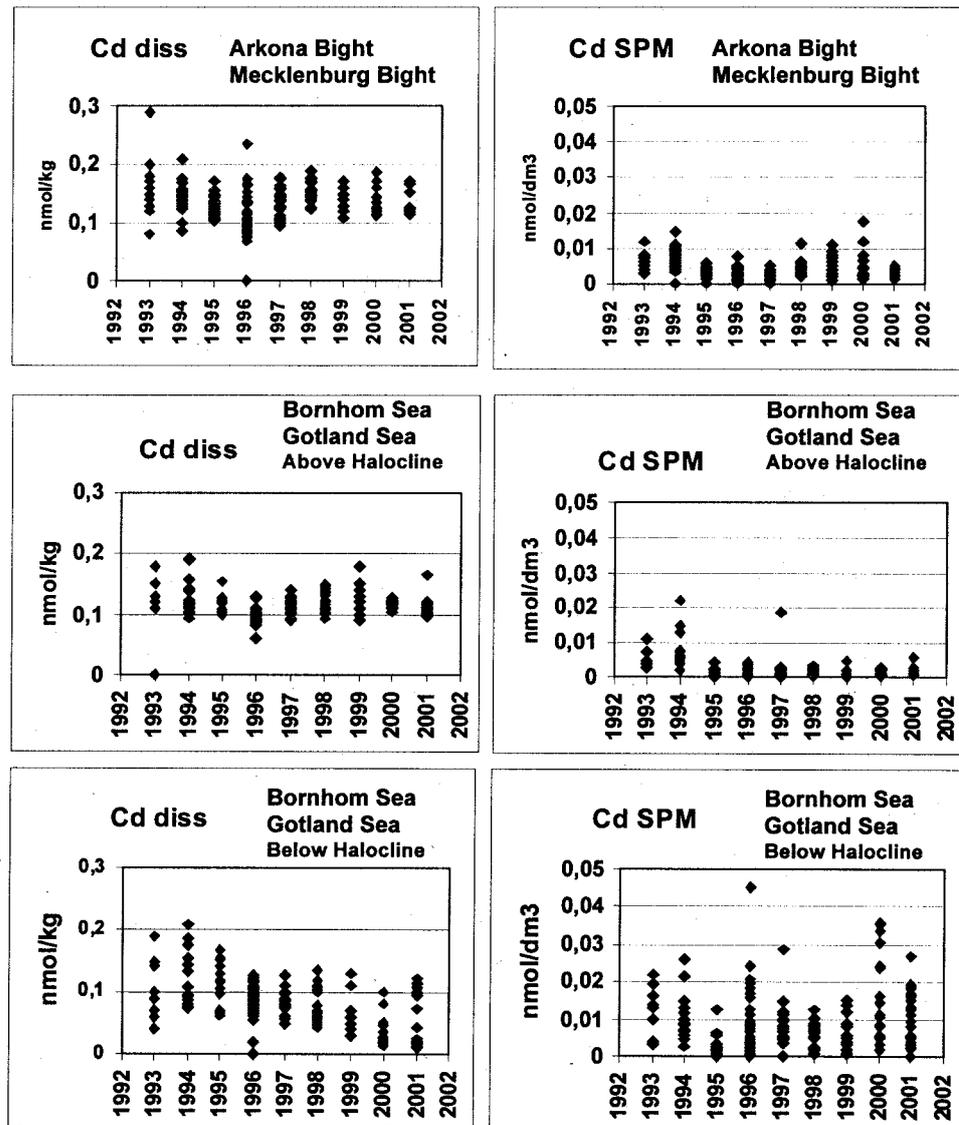


Abb. 12

Trends für gelöstes (diss) und partikuläres (SPM) Cadmium; in der westlichen Ostsee, sowie oberhalb und unterhalb der Haloclinen in der zentralen Ostsee von 1993-2001

Fig. 12

Analysis of trends for dissolved (diss) and particulate (SPM) Cd in the western Baltic as well as above and below the halocline in the central Baltic between 1993-2001

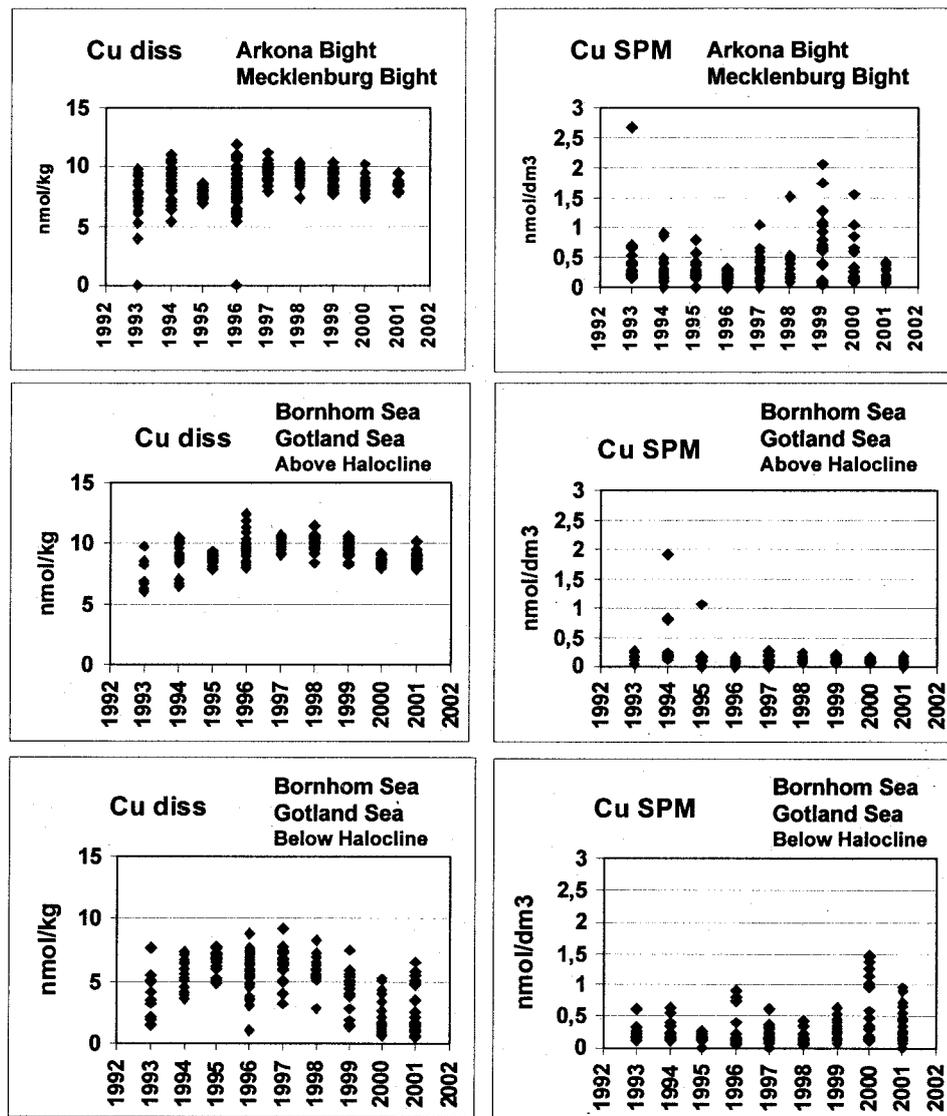


Abb. 13

Trends für gelöstes (diss) und partikuläres (SPM) Kupfer, in der westlichen Ostsee, sowie oberhalb und unterhalb der Haloclinen in der zentralen Ostsee von 1993-2001

Fig. 13

Analysis of trends for dissolved (diss) and particulate (SPM) Cu in the western Baltic as well as above and below the halocline in the central Baltic between 1993-2001

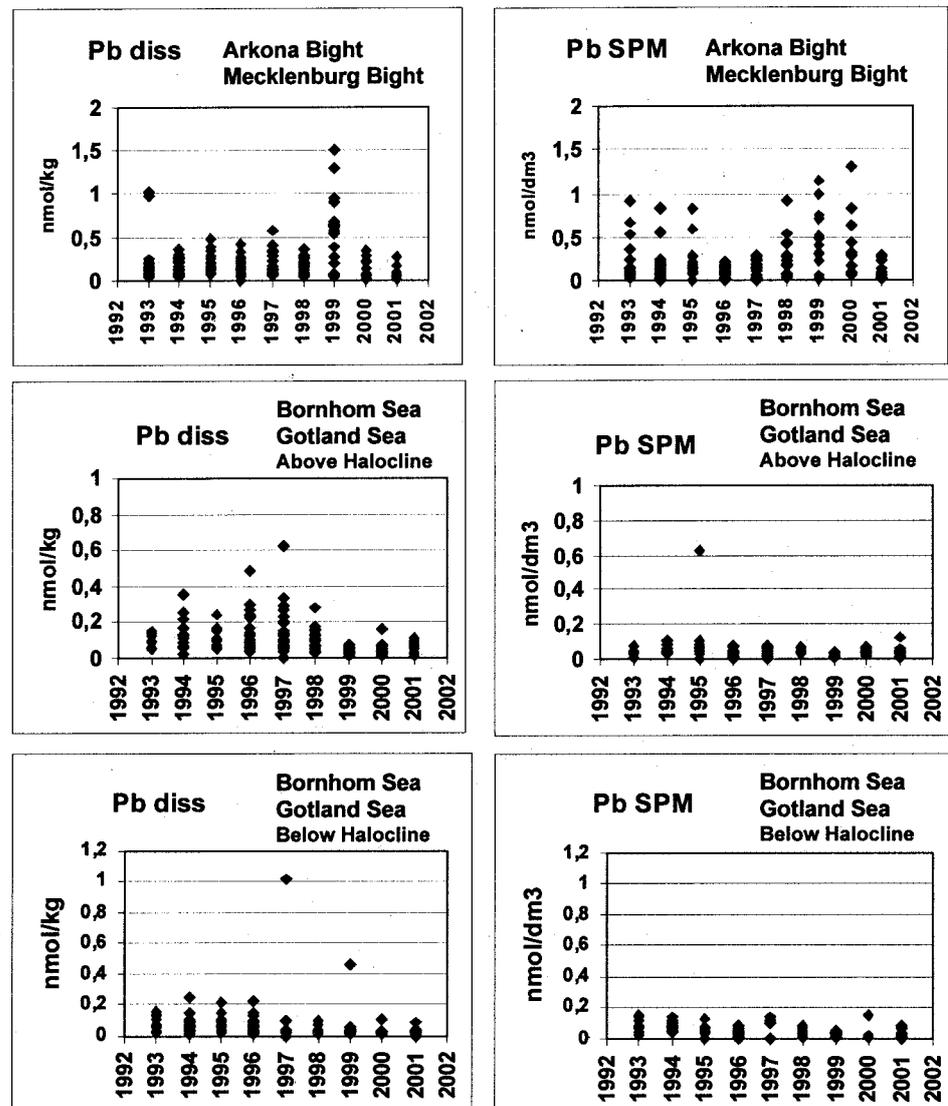


Abb. 14

Trends für gelöstes (diss) und partikuläres (SPM) Blei, in der westlichen Ostsee, sowie oberhalb und unterhalb der Halocline in der zentralen Ostsee von 1993-2001

Fig. 14

Analysis of trends for dissolved (diss) and particulate (SPM) Pb in the western Baltic as well as above and below the halocline in the central Baltic between 1993-2001

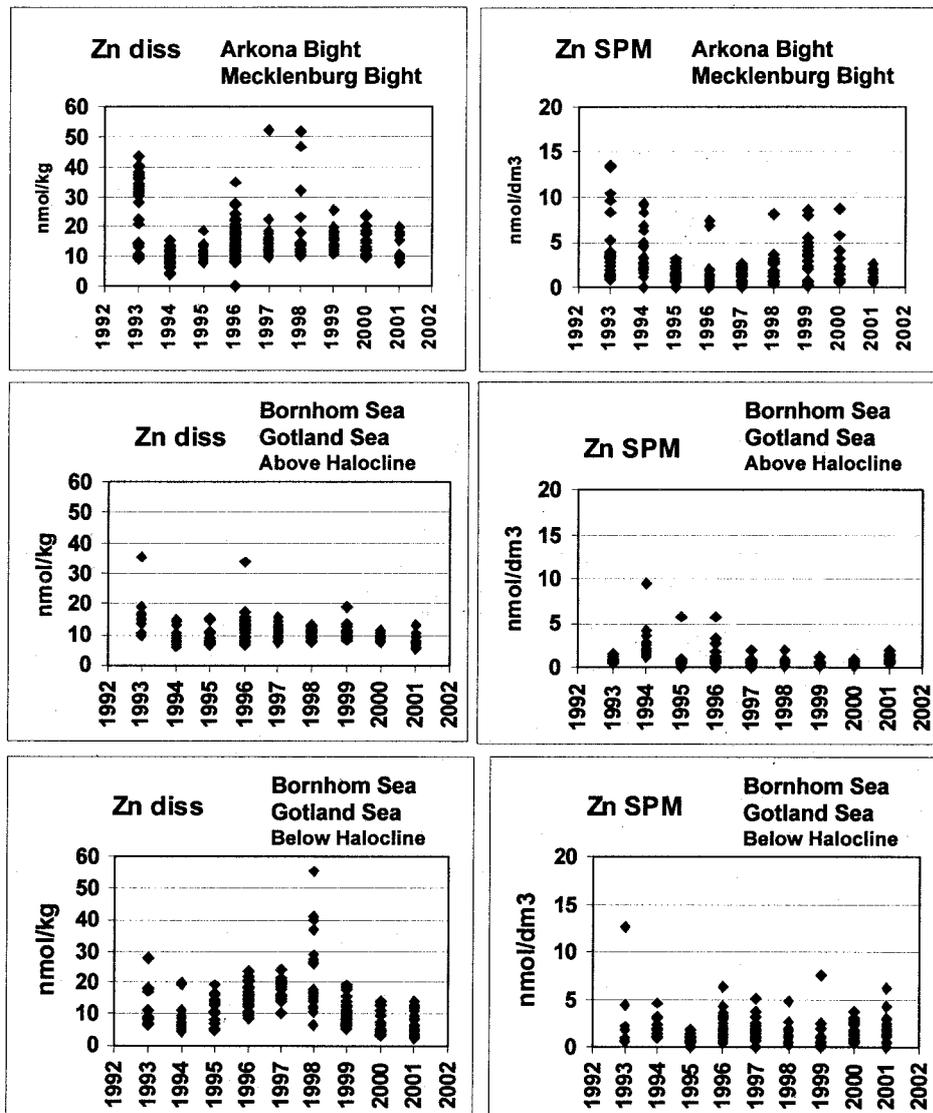


Abb. 15

Trends für gelöstes (diss) und partikuläres (SPM) Zink, in der westlichen Ostsee, sowie oberhalb und unterhalb der Haloclinen in der zentralen Ostsee von 1993-2001

Fig. 15

Analysis of trends for dissolved (diss) and particulate (SPM) Zn in the western Baltic as well as above and below the halocline in the central Baltic between 1993-2001

4. **Schlußfolgerungen**

Wie in den Vorjahren wies die Schwermetallverteilung im Ostseewasser im Jahr 2001 keine deutlichen oder gesundheitsgefährdenden Veränderungen auf. Regionale Konzentrationserhöhungen wie sie z. B. in den letzten Jahren in der westliche Ostsee zu beobachten sind, werden auf den sehr variablen Schwebstoffanteil in der Wassersäule zurückgeführt. Dieser Schwebstoffanteil ist abhängig von der Windsituation und der bodennahen Durchmischung der Wassersäule und dem damit verbundenen Eintrag von besonders feinkörnigen Oberflächensedimenten. In diesem Zusammenhang spielt das ehemalige Verklappungsgebiet in der Lübecker Bucht eine besondere Rolle. In den 60er Jahren wurden hier schwermetallhaltige Stäube und Schlämme verklappt. Geologische Kartierungsarbeiten, die im Herbst 2001 in diesem Gebiet durchgeführt wurden, haben ergeben, daß diese Altlast nach wie vor eine relevante Quelle für Schwermetalle darstellt. Obwohl das eigentliche Verklappungsgebiet nur eine relativ kleine Fläche einnimmt, wurden erhöhte Schwermetallkonzentrationen in den Sedimenten der Lübecker- und der Mecklenburger Bucht nachgewiesen. Windbedingte Turbulenzen, Bioturbation durch benthische Organismen und erhöhte Strömungen am Meeresboden, führen hier zu einer stetigen Vermischung, Resuspension und Verfrachtung des schwermetallkontaminierten Sedimentes.

Seit 1995 hat eine neue Stagnationsperiode begonnen, die Einfluß auf die geochemischen Prozesse der Schwermetalle in den einzelnen Ostseebecken nimmt. Seit 1999 hat sich diese Stagnationsperiode dadurch verstärkt, das z.B. im Gotlandbecken unterhalb 130 m das gesamte Jahr hindurch anoxische Bedingungen angetroffen wurden. Die qualitativen Auswirkungen auf die redoxsensitiven Elemente (Mangan, Kobalt, Eisen) und die durch Sulfidfällung beeinflussten Elemente (Cadmium, Kupfer, Blei, Zink, Quecksilber) ist bekannt. Eine quantitative Abschätzung der Elimination von Metallen aus dem Oberflächenwasserkörper in den Tiefenwasserkörper wird zur Zeit im Rahmen eines BMBF-Projektes bilanziert.

Danksagung

Unser Dank geht an die Arbeitsgruppe "Allgemeine Chemie", die uns die Nährstoffdaten zur Verfügung stellte, sowie Kapitän und Besatzung der FS "A. v. HUMBOLDT".

Literaturverzeichnis

- POHL, C. (1994): Meerwasser-Probennahme, Anreicherung und Analytik. In: M. Stoeppler (ed.); Probenahme und Aufschluß; Springer-Labormanual, Heidelberg, 181pp.
- POHL, C.; HENNINGS, U.; KOBUROK, B.; RICHTER, R. (1995): Ostsee-Monitoring "Die Schwermetall- Situation in der Ostsee in den Jahren 1992-1995. Wissenschaftlicher Abschlußbericht zu den Monitoring Daten. Institut für Ostseeforschung Warnemünde, an der Universität Rostock; 150pp.
- POHL, C. (1997): Trace Metals (Cu, Pb, Zn, Cd, Al, Li, Fe, Mn, Ni, Co) in Marine Suspended Particulate Matter: An International ICES Intercomparison Exercise. Accred. Qual. Assur.; 2 / 1; 2-10.
- POHL, C.; HENNINGS, U.; KOBUROK, B.; RICHTER, R. (1998): Ostsee-Monitoring; Die Schwermetall-Situation in der Ostsee im Jahre 1997 inclusive Oderflut. Institut für Ostseeforschung Warnemünde, an der Universität Rostock; 32pp.

- POHL, C.; HENNINGS, U.; KOBUROK, B.(1999): Ostsee-Monitoring; Die Schwermetall-Situation in der Ostsee im Jahre 1998. Institut für Ostseeforschung Warnemünde, an der Universität Rostock; 25pp.
- POHL, C.; HENNINGS, U. (2000): Ostsee-Monitoring; Die Schwermetall-Situation in der Ostsee im Jahre 1999. Institut für Ostseeforschung Warnemünde, an der Universität Rostock; 32pp.
- POHL, C.; HENNINGS, U. (2001): Ostsee-Monitoring; Die Schwermetall-Situation in der Ostsee im Jahre 2000. Institut für Ostseeforschung Warnemünde, an der Universität Rostock; 32pp.

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 mesoskaler Strom- und Massenfelder im Ozean (On numerical vorticity analysis of mesoscale current and mass fields in the ocean)
- 4 (1992) Lemke, Wolfram; Lange, Dieter; Ender, Rudolf (Eds.):
Proceedings of the Second Marine Geological Conference – The Baltic, held in Rostock from October 21 to October 26, 1991
- 5 (1993) Ender, Rudolf; Lackschewitz, Klas (Eds.):
Cruise Report RV "Sonne" Cruise SO82, 1992
- 6 (1993) Kulik, Dmitri A.; Harff, Jan:
Physicochemical modeling of the Baltic Sea water-sediment column: I. Reference ion association models of normative seawater and of Baltic brackish waters at salinities 1–40 ‰, 1 bar total pressure and 0 to 30 °C temperature
(system Na–Mg–Ca–K–Sr–Li–Rb–Cl–S–C–Br–F–B–N–Si–P–H–O)
- 7 (1994) Nehring, Dietwart; Matthäus, Wolfgang; Lass, Hans-Ulrich; Nausch, Günther:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1993
- 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:
Spurenmittelkonzentrationen 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:
Ultraphytoplankton 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, Annekatrin:
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 Plankton-

- dynamik 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 (1999) Matthäus, Wolfgang; Nausch, Günther; Lass, Hans Ulrich; Nagel, Klaus; Siegel, Herbert:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1998
- 36 (1999) Schernewski, Gerald:
Der Stoffhaushalt von Seen: Bedeutung zeitlicher Variabilität und räumlicher Heterogenität von Prozessen sowie des Betrachtungsmaßstabs - eine Analyse am Beispiel eines eutrophen, geschichteten Sees im Einzugsgebiet der Ostsee (Belauer See, Schleswig-Holstein)
- 37 (1999) Wasmund, Norbert; Alheit, Jürgen; Pollehne, Falk; Siegel, Herbert; Zettler, Michael L.:
Der biologische Zustand der Ostsee im Jahre 1998 auf der Basis von Phytoplankton-, Zooplankton- und Zoobenthosuntersuchungen
- 38 (2000) Wasmund, Norbert; Nausch, Günther; Postel, Lutz; Witek, Zbigniew; Zalewski, Mariusz; Gromisz, Sławomira; Łysiak-Pastuszek, Elżbieta; Olenina, Irina; Kavolyte, Rima; Jasinskaite, Aldona; Müller-Karulis, Bärbel; Ikauniece, Anda; Andrushaitis, Andris; Ojaveer, Henn; Kallaste, Kalle; Jaanus, Andres:
Trophic status of coastal and open areas of the south-eastern Baltic Sea based on nutrient and phytoplankton data from 1993 - 1997
- 39 (2000) Matthäus, Wolfgang; Nausch, Günther; Lass, Hans Ulrich; Nagel, Klaus; Siegel, Herbert:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1999
- 40 (2000) Schmidt, Martin; Mohrholz, Volker; Schmidt, Thomas; John, H.-Christian; Weinreben, Stefan; Diesterheft, Henry; Iita, Aina; Filipe, Vianda; Sangolay, Bomba-Bazik; Kreiner, Anja; Hashoongo, Victor; da Silva Neto, Domingos:
Data report of R/V "Poseidon" cruise 250 ANDEX'1999
- 41 (2000) v. Bodungen, Bodo; Dannowski, Ralf; Erbguth, Wilfried; Humborg, Christoph; Mahlburg, Stefan; Müller, Chris; Quast, Joachim; Rudolph, K.-U.; Schernewski, Gerald; Steidl, Jörg; Wallbaum, Volker:
Oder Basin - Baltic Sea Interactions (OBBSI): Endbericht
- 42 (2000) Zettler, Michael L.; Bönsch, Regine; Gosselck, Fritz:
Verbreitung des Makrozoobenthos in der Mecklenburger Bucht (südliche Ostsee) - rezent und im historischen Vergleich
- 43 (2000) Wasmund, Norbert; Alheit, Jürgen; Pollehne, Falk; Siegel, Herbert:
Der biologische Zustand der Ostsee im Jahre 1999 auf der Basis von Phytoplankton- und Zooplanktonuntersuchungen
- 44 (2001) Eichner, Christiane:
Mikrobielle Modifikation der Isotopensignatur des Stickstoffs in marinem partikulärem Material
- 45 (2001) Matthäus, Wolfgang; Nausch, Günther (Editors):
The hydrographic-hydrochemical state of the western and central Baltic

- Sea in 1999/2000 and during the 1990s
- 46 (2001) Wasmund, Norbert; Pollehne, Falk; Postel, Lutz; Siegel, Herbert; Zettler, Michael L.:
Biologische Zustandseinschätzung der Ostsee im Jahre 2000
- 47 (2001) Lass, Hans Ulrich; Mohrholz, Volker; Nausch, Günther; Pohl, Christa; Postel, Lutz; Rüß, Dietmar; Schmidt, Martin; da Silva, Antonio; Wasmund, Norbert:
Data report of R/V "Meteor" cruise 48/3 ANBEN'2000
- 48 (2001) Schöner, Anne Charlotte:
Alkenone in Ostseesedimenten, -schwebstoffen und -algen: Indikatoren für das Paläomilieu?
- 49 (2002) Nausch, Günther; Feistel, Rainer; Lass, Hans Ulrich; Nagel, Klaus; Siegel, Herbert:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2001
Pohl, Christa; Hennings, Ursula:
Ostsee-Monitoring - Die Schwermetall-Situation in der Ostsee im Jahre 2001