

**Meereswissenschaftliche Berichte**  
MARINE SCIENCE REPORTS

No. 55

Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2002

von

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

S. 1 - 71

Die Schwermetallsituation in der Ostsee im Jahre 2002

von

Christa Pohl, Ursula Hennings

S. 72 - 100

**Institut für Ostseeforschung**  
**Warnemünde**  
**2003**



# **Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2002**

von

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

Institut für Ostseeforschung Warnemünde  
an der Universität Rostock

Im Auftrag  
des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie  
Hamburg und Rostock

Warnemünde  
April 2003

NAUSCH, G.; FEISTEL, R.; LASS, H.U.; NAGEL, K.; SIEGEL, H.:  
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2002

## Inhaltsverzeichnis

	<b>Seite</b>
Zusammenfassung	3
Summary	4
1. Einleitung	5
2. Meteorologische Bedingungen	8
3. Wasseraustausch durch die Ostseezugänge/ Beobachtungen an der Messplattform „Darßer Schwelle“	18
4. Beobachtungen an der Bojenstation „Arkonabecken“	23
4.1 Wassertemperatur und Salzgehalt	24
4.2 Strömung	26
5. Hydrographisch- chemische Bedingungen	28
5.1 Wassertemperatur	28
5.1.1 Jahresgang der Oberflächentemperatur	29
5.1.2 Vertikalverteilung der Wassertemperatur	36
5.2 Salzgehalt	40
5.3 Sauerstoff und Schwefelwasserstoff	43
5.4 Anorganische Nährstoffe	51
5.5 Natürliche organische Nährstoffe	62
Danksagung	67
Literaturverzeichnis	68

## Zusammenfassung

Der Winter 2001/2002 war der fünfte milde Winter in Folge und gehört damit zur Periode relativ milder Winter, die 1987/1988 begann. In der südlichen Ostsee wurden im Februar Anomalien bis +4.8 °C beobachtet. Ursache waren positive Abweichungen der Lufttemperatur, die bis zum September andauerten. Besonders im August und in der ersten Septemberhälfte verursachten sehr warme Luftmassen aus Südeuropa stabile „subtropische“ Bedingungen. Insgesamt war der Sommer 2002 zumindest im Bereich der südlichen Ostsee der zweitwärmste seit 1890. Lediglich der Sommer 1997 war noch wärmer.

Die erste Jahreshälfte 2002 war jedoch nicht nur ungewöhnlich warm. Dieser Zeitraum war gleichzeitig in fast allen Monaten durch extrem hohe Niederschläge im Einzugsgebiet der westlichen Ostsee gekennzeichnet. So betrug der Niederschlag im nordöstlichen Deutschland im Februar 273% des Durchschnittswertes. Mit einem Flächenmittel von 1018 mm war 2002 das niederschlagsreichste Jahr seit Beginn (1901) der deutschlandweiten Berechnungen. Daraus resultierend waren auch die Flusswasserzufuhr und mit ihr die Stickstoffeinträge in die Ostsee außergewöhnlich hoch.

Die hohen Nährstoffeinträge verursachten seit Beginn des Frühjahrs Algenblüten. Im Juni bildete sich eine starke thermohaline Schichtung in der westlichen Ostsee heraus. In der Folge begannen die Sauerstoffkonzentrationen in der bodennahen Schicht durch Mineralisationsprozesse des sedimentierenden organischen Materials zu sinken. Eine lang anhaltende Periode sonnigen, warmen und ruhigen Wetters im Spätsommer führte dann zu einer dramatischen Verschlechterung der Sauerstoffbedingungen. Sauerstoff war teilweise nicht mehr nachweisbar und es kam zur Bildung von Schwefelwasserstoff in Bodennähe. Das Ergebnis war eine weitreichende Schädigung der Bodenfauna in dänischen und deutschen Gewässern. Fischsterben wurde in weiten Gebieten der westlichen Ostsee beobachtet. Das betroffene Gebiet war größer als jemals zuvor beobachtet und reichte vom Kattegat bis zur Mecklenburger Bucht. Stärkere Winde zu Beginn des Herbstes führten zu einer leichten Verbesserung der Situation. Im späteren Verlauf des Jahres wurden dann wieder normale Sauerstoffbedingungen registriert.

Das Jahr 2002 war in der westlichen Ostsee auch durch eine außerordentliche Häufigkeit und Dauer von östlichen und südlichen Winden gekennzeichnet. Diese Bedingungen haben sturmbedingte Einstromereignisse aus der Nordsee kaum begünstigt, führten aber teilweise zu ungewöhnlichem Wasseraustausch zwischen Kattegat und der Ostsee. Im August und September wurde am Messmast auf der Darßer Schwelle in einer ausgeprägten Bodenschicht überwiegend einströmendes Wasser mit hohem Salzgehalt und Sauerstoffkonzentrationen zwischen 4 und 1 ml/l registriert. Durch diesen Einstrom gelangte zudem außerordentlich warmes Wasser in die nachfolgenden Becken. Verursacht durch westliche Winde erfolgte im Oktober/November 2002 ein weiterer kleiner Einstrom, der ebenfalls bemerkenswert warmes Wasser in die Becken transportierte und zu einer Belüftung des Danziger Beckens im November 2002 führte. Die auffällig warmen Wassermassen drangen später weiter in Richtung des östlichen Gotlandbeckens vor und verbesserten auf ihrem Weg die Sauerstoffbedingungen unterhalb der Salzgehaltssprungschicht. Die kurzzeitige Wassererneuerung im Januar als Ergebnis des Einstroms von Nordseewasser im Herbst 2001 konnte schon im Sommer 2002 nicht mehr beobachtet werden.

## Summary

The winter of 2001/2002 was the fifth mild winter in succession. Moreover, it belongs to a period of relative mild winters which started 1987/1988. In the southern Baltic Sea anomalies up to +4.8 °C were observed in February. Indeed, positive deviations from the long-term mean air temperature continued until September, with very warm air masses from southern Europe causing unusually stable “subtropical” conditions in August and in the first part of September. All in all, the summer of 2002 was the second warmest since 1890, at least for the southern Baltic Sea area. Only that of 1997 was warmer.

However, not only was the first half of 2002 unusually warm. During nearly all months precipitation in the western Baltic drainage area was abnormally high. For example, precipitation in north-east Germany in February was 273% of the average. With a spatial average of 1018 mm the year 2002 was the richest in precipitation since the beginning of Germany-wide calculations in 1901. Consequently, riverine flows and with them nitrogen inputs into the Baltic Sea were exceptionally high.

High nutrient inputs enhanced algal blooms from spring onwards. With the development of strong thermohaline stratification in the western Baltic Sea in June, oxygen concentrations in the near bottom waters began to decrease through processes of mineralization of sedimenting organic matter. A long period of sunny, warm, and calm weather conditions in late summer then caused the oxygen situation in the near bottom waters to deteriorate rapidly. Oxygen levels fell to the limit of detection and there was production of hydrogen sulphide. The result was a wide-range depletion of bottom fauna in Danish and German waters and reports of fish kills over wide areas of the western Baltic Sea. The affected areas were larger than ever observed before, covering the area between Kattegat and Mecklenburg Bight. Stronger winds in early autumn, however, led to a slight improvement in the situation. In the further course of the year, oxygen conditions returned to normality.

In 2002, the western Baltic experienced an exceptional frequency and duration of easterly and southerly winds, which hardly favoured major gale-forced inflow events from the North Sea, but partly led to unusual ways of water exchange between the Kattegat and the Baltic. In August/September, the Darss Sill most dominantly recorded inflowing waters in a thick bottom layer with high salinity and oxygen content between 4 and 1 ml/l, which carried exceptionally warm water into the adjacent basins. In October/November 2002 an additional small inflow occurred, driven by westerly winds, which added even more remarkably warm water and apparently caused a ventilation of the Gdansk Basin by November 2002. Eye-catching warm waters later propagated further towards the eastern Gotland Basin and improved along their way the stagnation conditions below the halocline. The intermittent water renewal in January, caused by arriving North Sea waters which entered the Baltic in autumn 2001, could already no longer be observed in summer 2002.

## Einleitung

Die Einschätzung des hydrographisch-hydrochemischen Zustandes der Ostsee im Jahre 2002 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 2002 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) und der *Maritimen Abteilung des polnischen Instituts für Meteorologie und Wasserwirtschaft* (IMGW) wurden bei der Auswertung ebenfalls berücksichtigt. Die Lage der wesentlichsten Stationen, die in die nachfolgenden Analysen einbezogen wurden, ist aus Abb. 1 zu ersehen. Die internationale Zuordnung dieser Stationen kann Tabelle 1 entnommen werden.

Grundlage des hydrographisch-chemischen Standard-Messprogramms, das mit den Forschungsschiffen „A.v.Humboldt“, „Professor Albrecht Penck“ 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. (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; Station DS) und im Arkonabecken (Bojestation „Arkona“) 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 (Arkona) 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 selbst registrierender akustischer Doppler-Profil-Strömungsmesser (ADCP).

Die Überwachung der Wasseroberflächentemperatur der Ostsee wurde durch Einzelszenen und mittlere monatliche Verteilungen, ermittelt aus NOAA- und 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).

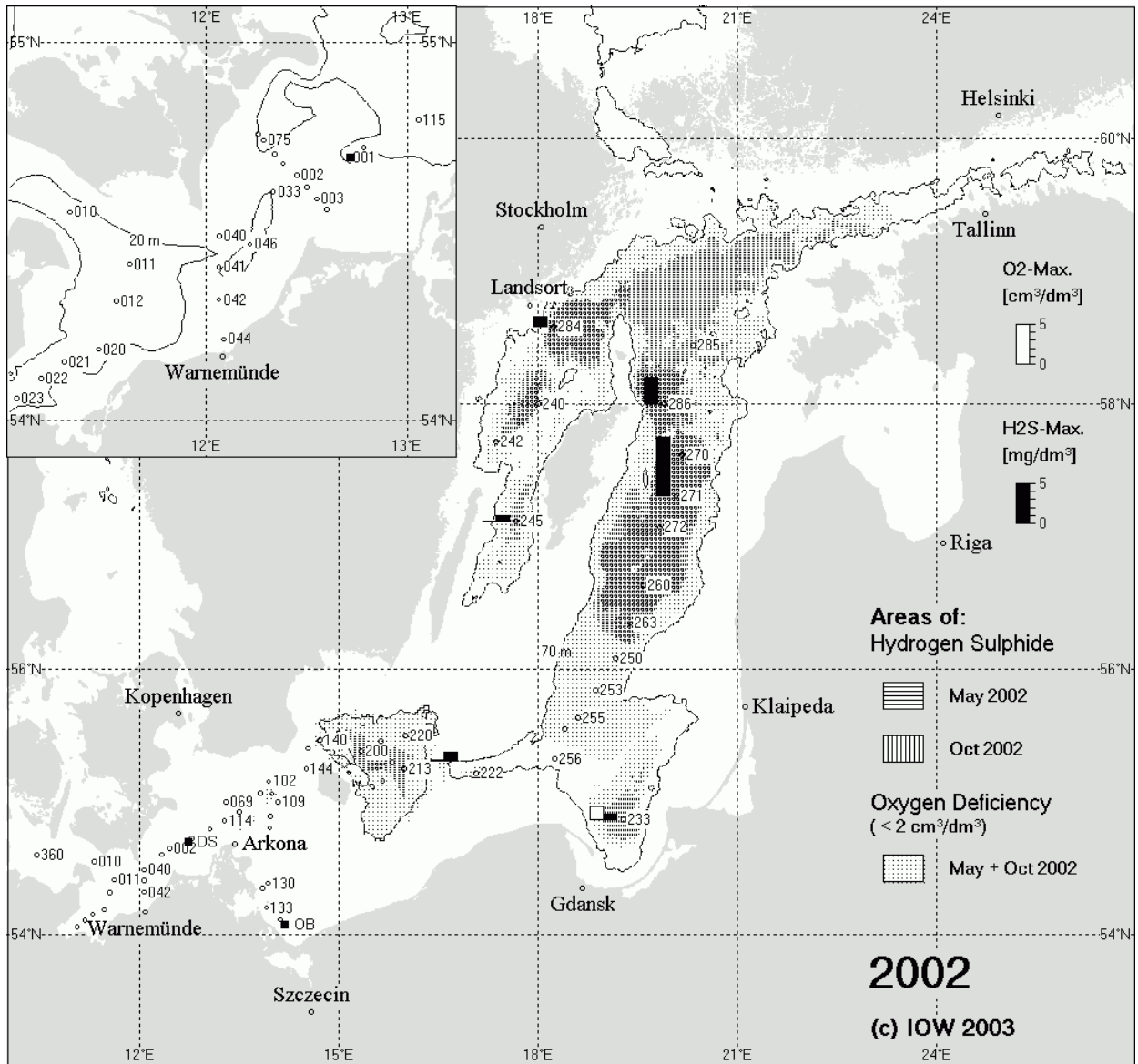


Abb. 1

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 2002; 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 2002. Histograms show the maximum oxygen and hydrogen sulphide concentrations of this layer in 2002; the figure contains additionally the 70 m – depth line resp. 20 m – depth line (small picture)



Tab. 1

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

Table 1

Selection of most important monitoring stations visited by IOW and their corresponding names according to the International Baltic Year (IBY) and Baltic Monitoring Programme (BMP) of HELCOM (c.f. Fig. 1)

IOW	Bezeichnung	IBY	HELCOM	IOW	Bezeichnung	IBY	HELCOM
001	Darßer Schwelle		BMP K 54	200		4B	
010	Fehmarnbelt		BMP N1	202		6B	
011				213	Bornholmtief	5A	BMP K2
012	Mecklenburger Bucht		BMP M2	214			
020				220			
021				222	Stolper Rinne	7A	
022				240		32B	
023				242		36B	
030			BMP K8	245	Karlsötief	38A	BMP I1
033				250		9A	
041				253			
046	Kadet Rinne		BMP M1	255		8A	
069		1B	BMP K7	256			
102				259			BMP K1
109		2A	BMP K4	260		10B	
111				263			
113	Arkonabecken		BMP K5	270		19B	
116				271	Gotlandtief	15A	BMP J1
120				272		11B	
121				284	Landsorttief	31A	BMP H3
130				285		21B	
131				286	Fårötief	20A	
132				360	Kieler Bucht		BMP N3
133				361			BMP N4
140				OB	Oder Bank		BMP K58
150				O5			
152			BMP K3	O9			
160				O11			
162				OB4			
164							

## 2. Meteorologische Bedingungen

Der Witterungsverlauf des Jahres 2002 in der südlichen Ostsee kann durch Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD, 2002) an der Wetterstation Arkona auf Rügen, die Wärme- und Kältesummen der Wetterstation Warnemünde (TIESEL, 2003) sowie den Verlauf des Eiswinters beschrieben werden. Tabelle 2 zeigt die monatlichen Temperaturen, die Luftfeuchtigkeit, die Sonnenscheindauer, den Niederschlag sowie die Zahl der Frost- und Eistage gemessen an der Station Arkona. Tabelle 3 enthält die Kälte- und Wärmesummen zusammen mit dem langjährigen Mittel.

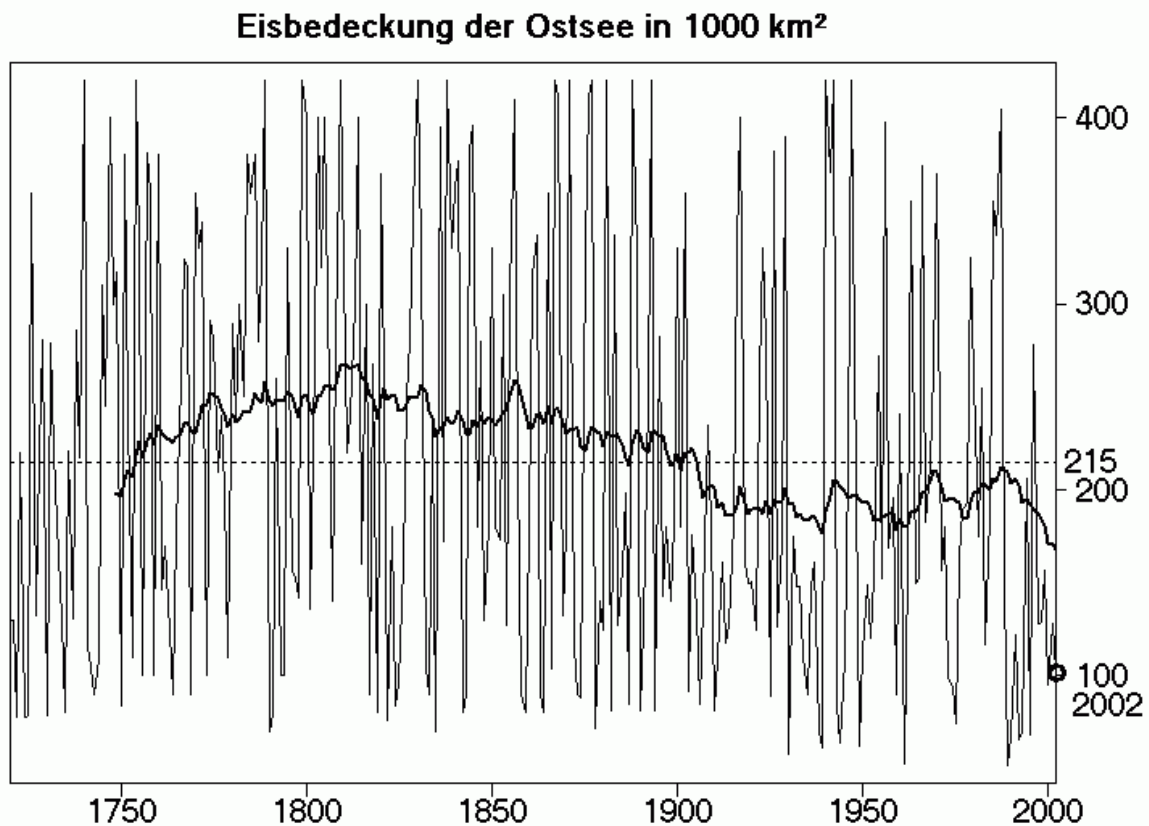


Abb. 2

Maximale Eisbedeckung der Ostsee in 1000 km<sup>2</sup> in den Jahren 1720 bis 2002 nach Daten des FMI (FMI, 2002). Der Langzeit-Mittelwert von 215 000 km<sup>2</sup> ist gestrichelt dargestellt. Die dicke Linie ist ein gleitender Mittelwert über die vorherigen 30 Jahre. Der Kreis zeigt den Winter 2001/2002 mit 102 000 km<sup>2</sup>

Fig. 2

Maximum ice covered area in 1000 km<sup>2</sup> of the Baltic Sea in the years 1720 to 2002 after data of FMI (FMI, 2002). The long-time average of 215,000 km<sup>2</sup> is shown as dashed line. The bold line is a running mean value over the past 30 years. The winter 2001/2002 with 102,000 km<sup>2</sup> is encircled

Der Winter 2001/2002 war der fünfte milde Winter in Folge. Er lag mit einer maximalen Eisbedeckung der Ostsee von 102,000 km<sup>2</sup> nach finnischen Angaben am 1. Februar unter der Hälfte des langjährigen Mittelwerts (FMI, 2002). Das zeigen auch die deutlich zu niedrig ausgefallenen Kältesummen (Tabelle 3) aller Wintermonate von November bis April. Die Eisbildung begann Anfang November in der Bottenwiek eine Woche später als normal, und endete Mitte Mai etwa zwei Wochen früher als gewöhnlich (BSH, 2002a). Die weiteste Eisausdehnung wurde vom BSH erst am 14. März registriert (BSH, 2002c). Die Bottenwiek war zu diesem Zeitpunkt vollständig vereist, Bottensee und Finnischer Meerbusen aber nur zu ca. 20 %. Die zentrale Ostsee wies ähnlich wie im Vorjahr noch Oberflächentemperaturen von über 2 °C auf, die südliche sogar über 3 °C (Abb. 16). In der westlichen Ostsee traten keine Vereisungen auf.

Der 30-jährige Mittelwert der Eisbedeckung setzte seinen Abwärtstrend seit 1980 fort und erreichte damit seinen tiefsten Wert seit mindestens 250 Jahren (Abb. 2). Eine Bedeckung von etwa 25 % fällt aber noch in den Bereich 20-40 %, der im langfristigen Mittel am häufigsten beobachtet wird, während Bedeckungen unterhalb von 20 % bereits selten sind (SMHI, 1982).

Zu Beginn des Jahres 2002 traten anhaltende Überschwemmungen im Bereich der Peene- und Odermündung auf (LUNG, 2002a). Während im Januar noch mittlerer Niederschlag beobachtet wurde (Tabelle 2), fiel im Februar (189 % in Arkona, sogar 273 % in Mecklenburg-Vorpommern insgesamt) extrem viel Niederschlag. Nach Angaben des Deutschen Wetterdienstes waren diese Gebietsniederschläge die höchsten seit 1891 im Februar in diesem Bundesland (LUNG, 2002a). Das nur sehr zögernd abfließende Wasser löste vermutlich Düngemittel aus den landwirtschaftlichen Flächen; im Bereich der Oder- und Warnowmündungen wurden mit bis zu 200 % stark erhöhte Nitratkonzentrationen in der Ostsee gemessen (LUNG, 2002a, FEISTEL, 2002).

Das Wochenende am 2./3. Februar war mit 16 °C der wärmste Februaranfang seit 1899 in Rostock. Der gesamte Februar war sehr sonnig und mit fast 5 K über dem langfristigen Mittel auch ungewöhnlich mild. Der Sommer 2002 begann mit einem relativ kühlen „Siebenschläfer“-Juni, obwohl dessen Wärmesumme deutlich über dem langfristigen Mittel lag. Er verlief dann in vielen Teilen Deutschlands mit fast subtropischen Bedingungen bei häufig schwachen südlichen/östlichen Winden mit anhaltend hohen Temperaturen und hoher Luftfeuchtigkeit. Der August war um 3.4 K zu warm und wies mit 127 Kd eine extrem große Wärmesumme auf (Tabelle 3). Der Sommer war der zweitheißeste seit mindestens 1890 (TIESEL, 2002) und dauerte mit Tagesmittelwerten über 20 °C in Warnemünde (DWD, 2002) bis zum Eintreffen einer Kaltfront am 15. September. Atlantische Tiefs nahmen ungewöhnlich oft den Weg über Spanien/Frankreich zum Mittelmeer, um von dort über die Alpen im Bereich von Elbe/Oder als Vb- oder Adriatiefs wieder nordwärts zu ziehen. Die zugehörigen Fronten lieferten ergiebige und zum Teil extreme Niederschläge. Im Gegensatz zu den sonst üblichen Westwindlagen über Deutschland blieben diese Fronten jedoch oft über viele Stunden nahezu ortsfest, was mehrfach zu anhaltenden starken lokalen Regenfällen mit Überschwemmungen führte, wie z.B. in Niedersachsen durch das Tief „Claudia“ am 17. und 18. Juli. Das markanteste Ereignis dieser Art war das Augusthochwasser in Tschechien und Sachsen an Moldau, Elbe, Mulde und Saale, das unter anderem Dresden überschwemmte und an vielen Orten erhebliche ökonomische Schäden anrichtete. Im Gegensatz zum Oderhochwasser 1997 (SIEGEL et al., 1998), das ähnliche meteorologische Ursachen hatte, fielen die extremen Niederschläge 2002 aber überwiegend im Einzugsgebiet der Nordsee und konnten so keine direkten Auswirkungen auf das Ostseewasser haben. Die schwachen Winde und die hohe Sonneneinstrahlung dieses Sommers bewirkten in der westlichen und südlichen Ostsee hohe Oberflächentemperaturen, z.B. 22.5 °C in der Pommernbucht am 28. August (LUNG 2002b), starke biologische Produktivität und Auszehrung des Sauerstoffs in flachen Regionen vor dänischen und deutschen Küsten (LUNG, 2002c) sowie die intensive Entwicklung von Cyanobakterien in der zentralen Ostsee (CABS, 2003).

Die geringe Windgeschwindigkeit im Sommer 2002 insbesondere auch im Raum des Kattegats behinderte den vertikalen Wasseraustausch, was wiederum zu den besonders hohen Oberflächentemperaturen, damit zu weiter verstärkter Schichtung und zusätzlicher Unterdrückung des Austauschs zwischen oberen und tieferen Schichten führte. Diesem Rückkopplungsmechanismus wird eine wichtige Rolle bei der Erklärung der aufgetretenen extremen Sauerstoffdefizite zugewiesen (HELCOM, 2003b).

Über 7 Wochen hinweg, vom 28. Juli bis zum 15. September, herrschten mit kurzen Unterbrechungen weitgehend konstante und für die Region außergewöhnliche Bedingungen (vgl. Abb. 4). Es ist zu vermuten, dass sich in der Ostsee in diesem Zeitraum weitgehend stationäre Strömungsverhältnisse ausbildeten, die den Windschub gegen die barotropen und baroklinen Druckgradienten ausbalancierten. Durch den Sund erfolgte ein fast permanenter Ausstrom von etwa 60 km<sup>3</sup>, was grob dem mittleren Flusseintrag in diesem Zeitraum entspricht. Als Folge wird der Gesamttransport durch den Belt nahezu ausgeglichen gewesen sein; wenn es einen nennenswerten oberflächennahen Ausstrom gegeben hat, so musste er durch einen vergleichbar starken bodennahen Einstrom kompensiert worden sein. Modellergebnisse (HELCOM, 2003b) zeigen aber auch für den Großen Belt im Juli/August einen Ausstrom aus der Ostsee und erst für September eine etwa ausgeglichene Bilanz.

Die kontinuierlichen Messungen am Messmast „Darßer Schwelle“ weisen auf einen solchen anhaltenden, kräftigen Einstrom am Boden hin (Abb. 6), der am 5. August begann und 55 Tage bis zum 28. September dauerte. Die zugehörige Wasserschicht war ca. 5 m dick und wies folgende Charakteristika auf: Salzgehalt 16 - 18 PSU, Temperatur 13-16 °C und Sauerstoff 2-4 ml/l. Nach ersten Analysen der Strömungsmessdaten von der Darßer Schwelle floss auch die darüber liegende salzarme Schicht ständig in die gleiche Richtung wie die salzreiche am Boden (FEISTEL et al., 2003b). Dieser ungewöhnliche „schleichende“ Einstrom hatte zur Folge, dass sich das ohnehin seit 1997 sehr warme Tiefenwasser des Bornholmbeckens noch deutlich weiter erwärmte (WASMUND, 2002, SCHMIDT, 2002, Kapitel 5) und seine Effekte bis in die Stolper Rinne deutlich nachweisbar waren.

Im Zusammenspiel damit erhielt der eigentlich unbedeutend kleine Einstrom von Nordseewasser Ende Oktober eine größere Wirkung. Er verursachte am Boden des Danziger Beckens einen unerwarteten Umschlag von anoxischen (-3.35 ml/l O<sub>2</sub>-Äquivalent) Bedingungen im September auf oxische (+1.63 ml/l O<sub>2</sub>) im November (Abb. 1). Beide Zuflüsse von schwerem warmem sauerstoffhaltigem Wasser hatten Auswirkungen bis in die Gotlandsee, die noch im März 2003 messbar waren (FEISTEL, 2003). Die hydrographischen Details dieser Vorgänge sind zum Zeitpunkt des hier vorgelegten Berichts jedoch noch nicht endgültig geklärt (FEISTEL et al., 2003b).

Der Oktober war in Norddeutschland sehr regenreich, aber mit normalen Temperaturen. Zusammen mit dem sehr sonnigen Februar ähnelte dieses Jahr in so fern dem vorigen. Der nachfolgende Winter begann trotz des warmen Sommers in der nördlichen Ostsee bereits 3 Wochen früher als im Durchschnitt (BSH 2002b) und setzte sich im Dezember 2002 mit zahlreichen sehr kalten Tagen fort (Tabelle 2).

Tab. 2

Monatliche Wetterdaten der Station Arkona (Rügen, 42 m über NN) nach DWD (2002). t: Lufttemperatur,  $\Delta t$ : Lufttemperatur-Anomalie, h: Luftfeuchte, s: Sonnenscheindauer, r: Niederschlag, Frost: Zahl der Tage mit Tiefsttemperatur unter 0 °C, Eis: Zahl der Tage mit Höchsttemperatur unter 0 °C. Prozentangaben sind relativ zum langjährigen Mittel

Table 2

Monthly weather data at Arkona station (Rügen island, 42 m above sea level) after DWD (2002). t: air temperature,  $\Delta t$ : air temperature anomaly, h: humidity, s: sun shine duration: r: precipitation, Frost: days with minimum temperature below 0 °C, Eis: days with maximum temperature below 0 °C. Percentages are given with respect to the long-time mean

Monat	t/°C	$\Delta t$ /K	h/%	s/%	r/%	Frost	Eis
Jan	2.2	+2.8	<b>91</b>	92	100	14	2
Feb	4.3	<b>+4.8</b>	87	<b>163</b>	189	6	
Mrz	4.5	+2.3	82	127	71	4	
Apr	6.4	+1.1	87	92	79	2	
Mai	11.4	+2.2	85	88	162		
Jun	15.6	+2.0	79	105	152		
Jul	17.3	+1.3	82	96	82		
Aug	<b>19.8</b>	+3.4	86	105	<b>38</b>		
Sep	16.3	+2.3	<b>74</b>	126	129		
Okt	8.8	-1.4	81	<b>70</b>	<b>284</b>		
Nov	5.2	-0.5	84	79	123	3	
Dez	<b>0.7</b>	<b>-2.3</b>	81	108	51	<b>20</b>	<b>5</b>

Tab. 3

Summen der Tagesmittel der Lufttemperatur an der Wetterstation Warnemünde (TIESEL, 2003). Die Kältesumme (KS) ist das Zeitintegral der Lufttemperatur unterhalb der Linie  $t = 0$  °C, in  $K \cdot d$ , die Wärmesumme (WS) das entsprechende Integral oberhalb der Linie  $t = 16$  °C. Zum Vergleich sind die entsprechenden Mittelwerte 1946 bis 2000 angegeben

Table 3

Sums of daily mean air temperatures at the weather station Warnemuende (TIESEL, 2003). The 'cold sum' (KS) is the time integral of air temperatures below the line  $t = 0$  °C, in  $K \cdot d$ , 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 2001/02	Mittelwert	Monat	WS 2002	Mittelwert
November		3,1	April		0,3
Dezember	13,0	23,6	Mai	8,5	5,2
Januar	14,7	43,2	Juni	45,9	19,2
Februar		38,4	Juli	69,1	41,6
März		10,4	August	126,9	38,2
April		0,1	September	41,5	7,7
			Oktober		0,5
$\Sigma$ 2001/2002	27,5	118,8	$\Sigma$ 2002	291,9	112,7

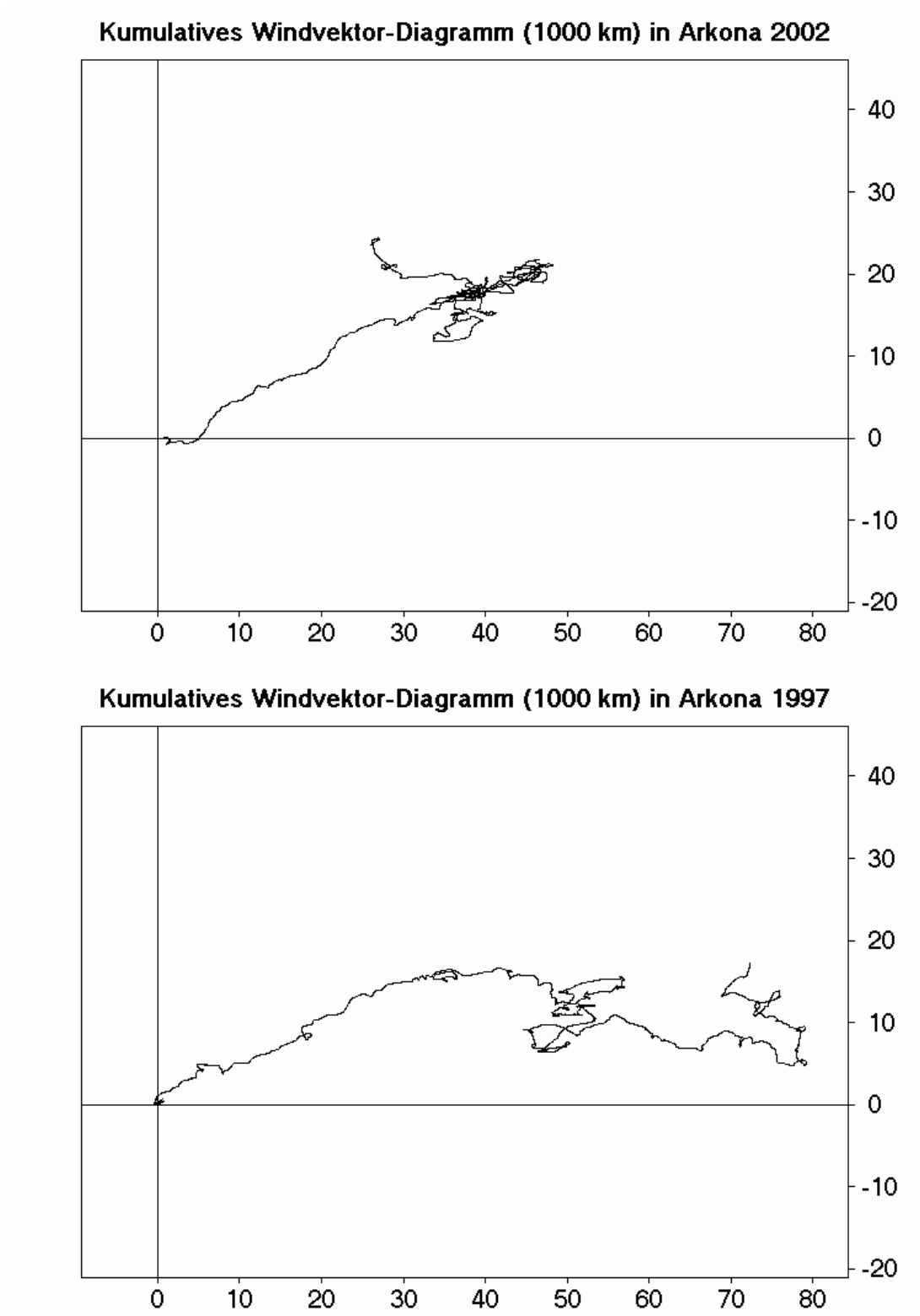


Abb. 3

Fortschreitende Vektordiagramme des Winds an der Wetterstation Arkona (nach Daten des DWD, 2003), in 1000 km, positiv nach nördlichen und östlichen Richtungen. Von oben nach unten: 2002, 1997, 1993, Langzeitmittel

Fig. 3

Progressive vector diagram of the wind at the weather station Arkona (after data of DWD, 2003), in 1000 km, positive in northerly and easterly directions. From top to down: 2002, 1997, 1993, long-time average

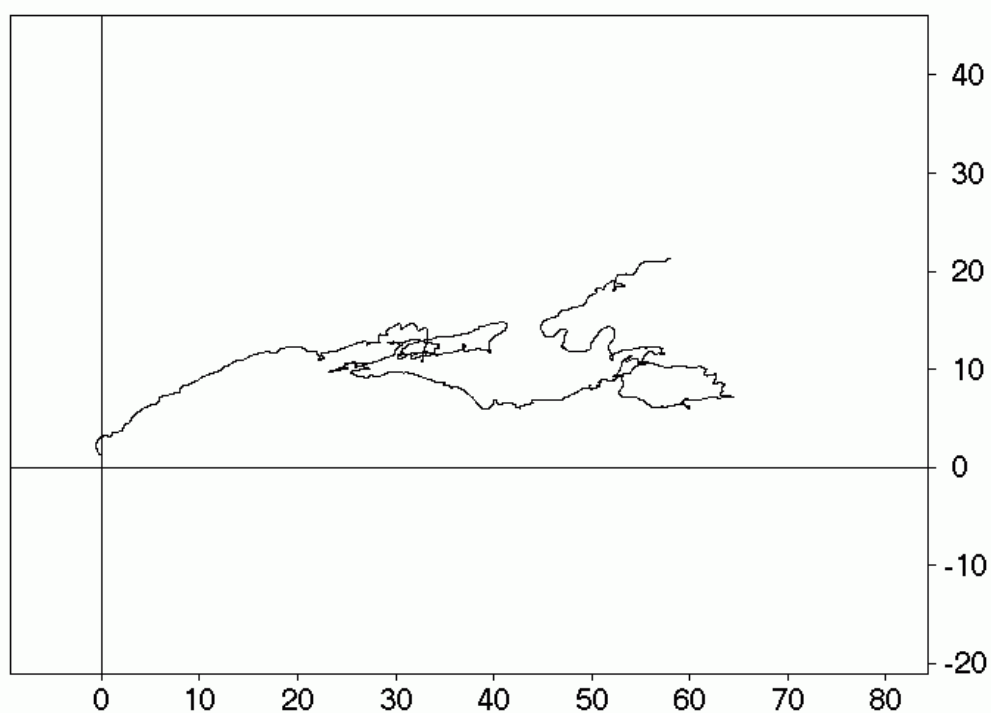
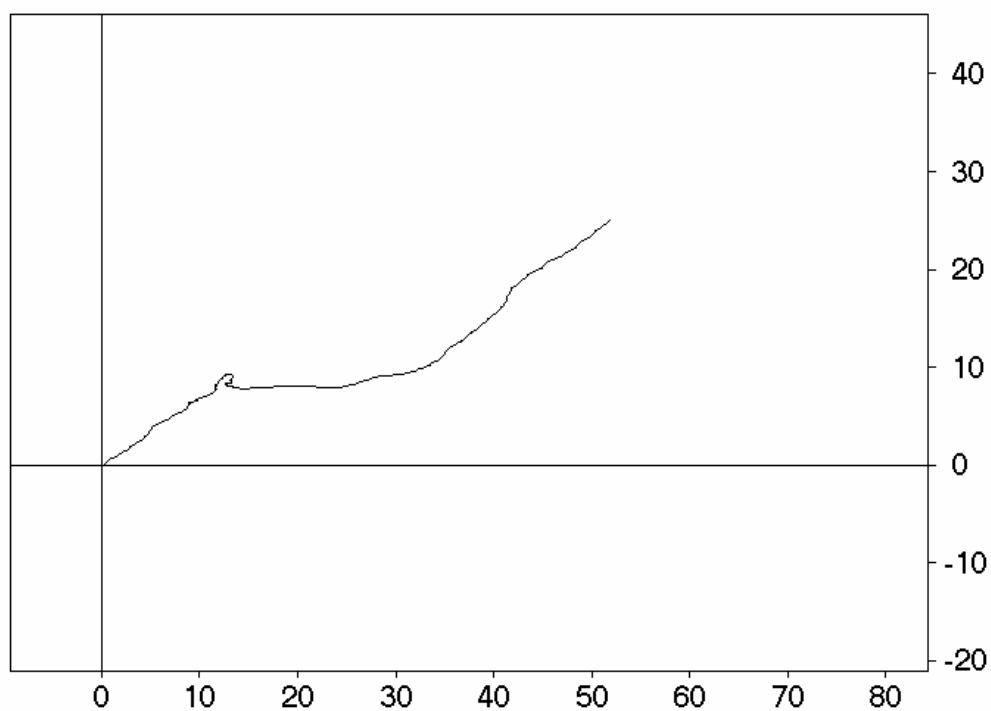
**Kumulatives Windvektor-Diagramm (1000 km) in Arkona 1993****Kumulatives Windvektor-Diagramm (1000 km) in Arkona 1991-2002**

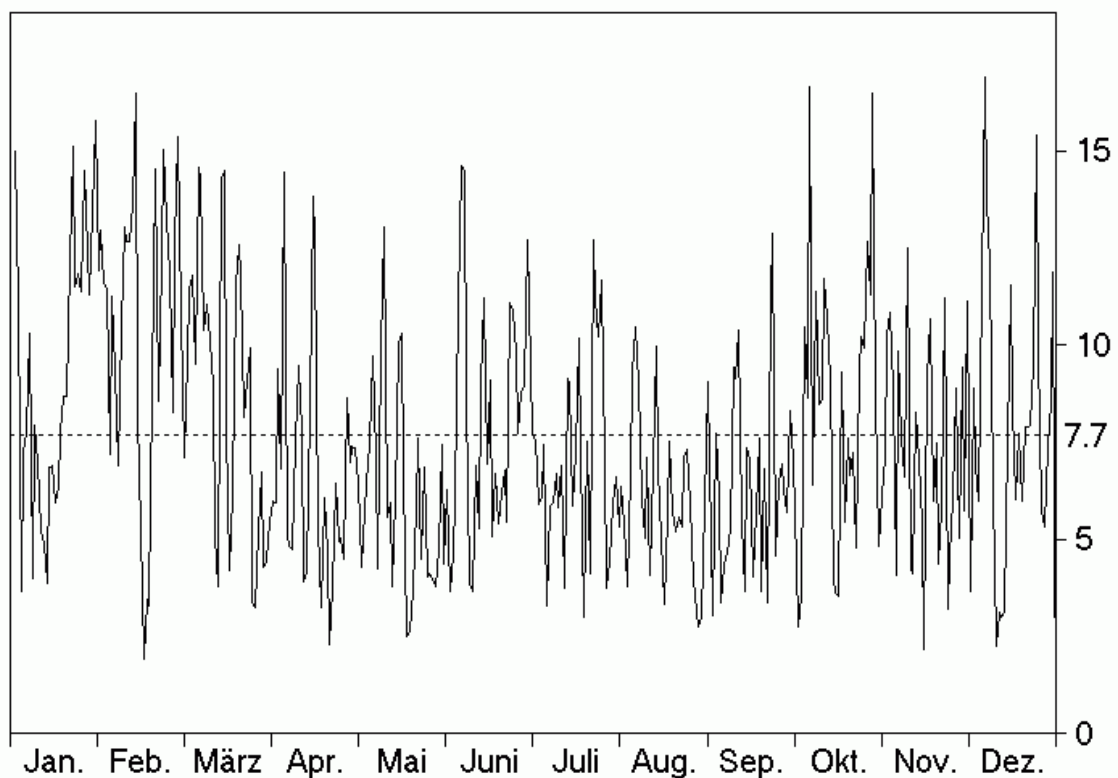
Abb. 3 Forts.

Fig. 3 cont.

Abbildung 3 zeigt den Verlauf der Windgeschwindigkeit mit Hilfe fortschreitender Vektordiagramme für die Station Arkona, wobei die Trajektorie durch zeitliche Integration des Windvektors am Ort entsteht. Das Jahr 2002 ist dargestellt im Vergleich mit dem des letzten größeren Einstroms im Spätsommer 1997 (HAGEN and FEISTEL, 2001), dem der letzten großen Tiefwasserbelüftung der Ostsee 1993 (NEHRING et al., 1995b) sowie dem klimatischen mittleren Wind der Jahre 1951 bis 2002. Es fällt auf, dass der Verlauf 2002 in der zweiten Jahreshälfte sehr ungewöhnlich war und so zu den besonderen Ereignissen führte, die zuvor beschrieben worden sind. Der mittlere Westwind war 2002 nur halb so stark wie normal. Die Jahre 1997 und 1993 dagegen weisen stärkere Westkomponenten, aber schwächere Südkomponenten auf als im langfristigen Mittel.

Die klimatische Windkurve in Abbildung 3 ist erwartungsgemäß glatter als die der einzelnen Jahre. Sie besteht aus einer Winterphase mit Südwestwind, die im Mai endet und im September langsam neu wieder einsetzt. Die Sommerphase dagegen besitzt keine meridionale Komponente und verläuft deshalb parallel zur x-Achse. Die auffälligste Struktur jedoch ist der kleine Knick, der ein schnelles Umschalten von Winter auf Sommer markiert. Er tritt am 12. Mai auf und gehört zur Phase der so genannten „Eisheiligen“. Die außergewöhnliche Regelmäßigkeit des Auftretens dieses Nordostwinds mit Kälterückfall in Deutschland über viele Jahre hinweg ist schon lange bekannt und lässt sich physikalisch aus dem Sonnenstand und der Land-Meer-Verteilung erklären (BEZOLD, 1883).

**Windgeschwindigkeit (m/s) in Arkona 2002**





### Ostkomponente des Windvektors (m/s) in Arkona 2002

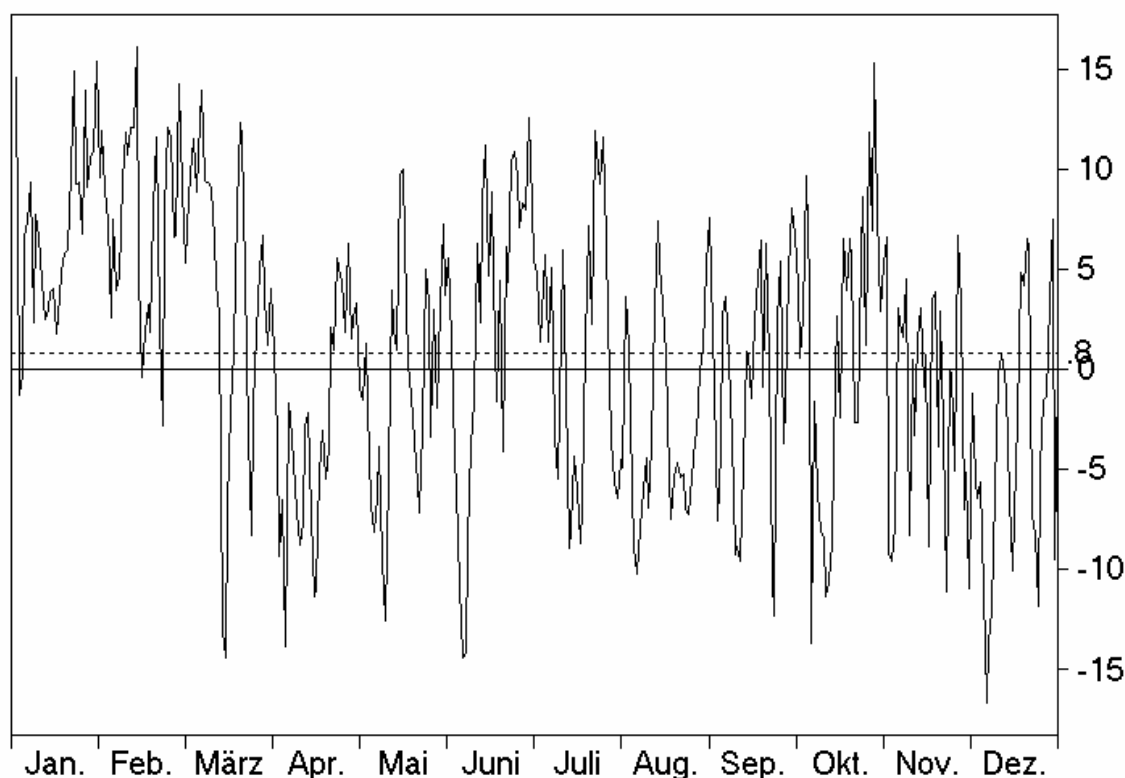


Abb. 4

Windmessungen an der Wetterstation Arkona (nach Daten des DWD, 2003). Oben: Tagesmittelwerte der Windgeschwindigkeit in m/s, Jahresmittelwert 7,7 m/s gestrichelt. Unten: Tagesmittelwerte der Ostkomponente (Westwind positiv), Jahresmittelwert 0,8 m/s ist gestrichelt

Fig. 4

Wind measurements at the weather station Arkona (after data of DWD, 2003). Above: Daily means of wind speed, in m/s, the dashed line is the annual average of 7,7 m/s. Below: Daily means of the eastern component (westerly wind positive), the dashed line is the annual average of 0,8 m/s

Die mittlere Windgeschwindigkeit an der Station Arkona lag mit 7,7 m/s über den Werten der Vorjahre von 6,9 m/s im Jahr 2001 (NAUSCH et al., 2002) und 7,4 m/s im Jahr 2000 (MATTHÄUS et al., 2001b). Die Zeitreihe weist nur eine Lücke von 29 h am 15./16. Februar auf. Als Windspitzen traten auf 25,7 m/s am 21. Februar aus Nordost, 25,1 m/s am 26. Februar aus Südwest, 24,8 m/s am 29. Januar aus West und 23 m/s am 1. Januar aus West (Abb. 4). Damit wurden die Spitzenwerte von 24,3 m/s aus dem Vorjahr überstiegen, die von über 30 m/s im Jahre 2000 aber nicht wieder erreicht.

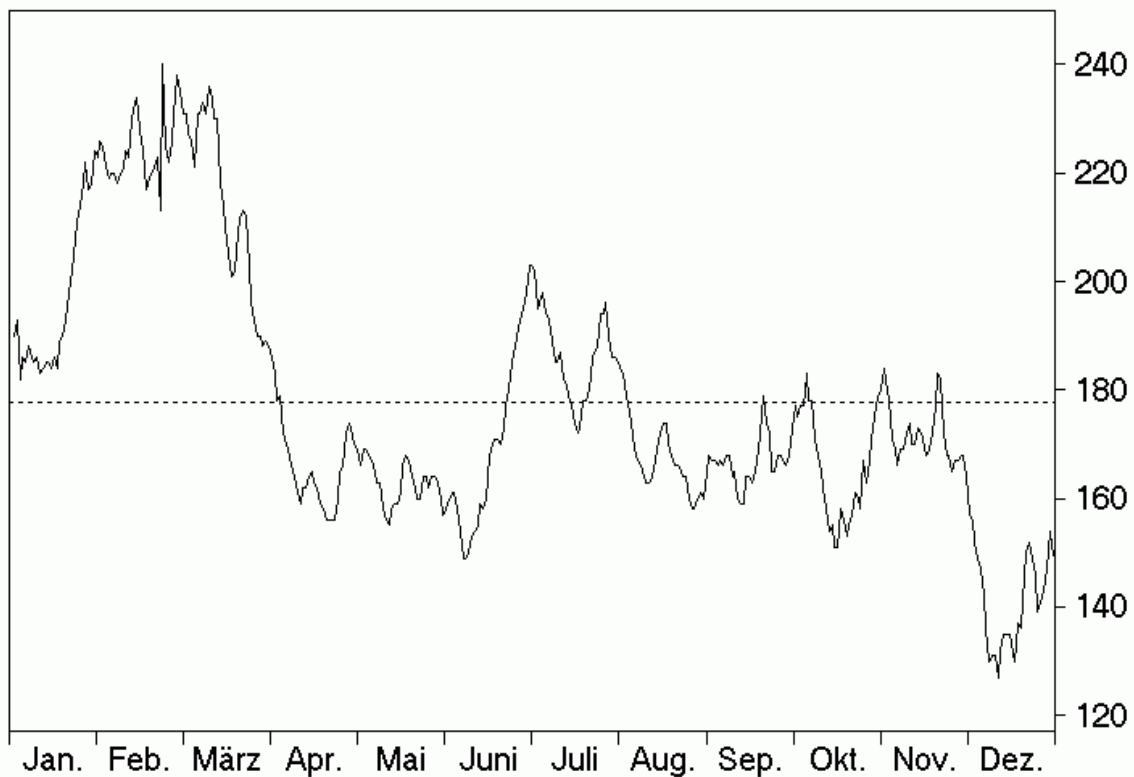
Die mittlere Stärke des Westwinds dagegen ist mit 0,8 m/s deutlich geringer als im Vorjahr mit 2,4 m/s, d. h. die sonst für die Breiten der Ostsee typischen überwiegenden Westwinde waren fast ausgeglichen durch starke und häufige Ostwindlagen (Abb. 4), die ab März in nahezu allen Monaten zu beobachten waren. Das ist auch am kumulativen Vektordiagramm klar zu erkennen, wo 2002 weniger als 30 000 km erreicht wurden anstelle der mittleren 50 000 km und 60 – 80000 km in den letzten Jahren (Abb. 3). Dagegen hat der scheinbare Transport nach Norden von ca. 20

000 km in den letzten Jahren zugenommen auf 25 000 km im Jahr 2002, was etwa dem langfristigen Mittelwert entspricht.

Der Füllungsgrad der Ostsee wird gut durch den Pegel an der schwedischen Station Landsort beschrieben (Abb. 5a, nach Daten des SMHI, 2003). Der Pegel lag in den Wintermonaten deutlich über dem Mittelwert, im Frühling und Herbst dagegen systematisch darunter. Von besonderem Interesse sind hier stets schnelle Pegelanstiege, die in der Regel nur durch einen Zustrom von Nordseewasser durch Sund und Belt hervorgerufen werden können.

Im Jahr 2002 waren drei solche Ereignisse zu beobachten, von 184 cm am 14. Januar auf 222 cm am 26. Januar, von 150 cm am 9. Juni auf 203 cm am 30. Juni., und von 151 cm am 16. Oktober auf 184 cm am 1. November. Mit der empirischen Formel (NAUSCH et al., 2002)  $\Delta V / km^3 = 3,8 \cdot \Delta L / cm - 1,3 \cdot \Delta t / d$  erhalten wir aus diesen Werten des Pegelunterschieds  $\Delta L$  und der Einstromdauer  $\Delta t$  als Schätzungen für die eingeströmten Volumina  $\Delta V = 129 km^3$  im Januar ( $10,7 km^3/d$ ),  $174 km^3$  im Juni ( $8,3 km^3/d$ ) und  $105 km^3$  im Oktober ( $6,6 km^3/d$ ). Die entsprechenden Durchflussmengen durch den Sund betragen (SMHI, 2002) allerdings nur ca.  $20 km^3$  im Januar,  $20 km^3$  im Juni und  $25 km^3$  im Oktober. Insbesondere im Juni schlug der Einstrom anschließend sofort wieder in einen Ausstrom von  $40 km^3$  durch den Sund um. Am Messmast Darßer Schwelle wurden über mehrere Tage an der Oberfläche Salzgehalte von etwa 12 PSU im Januar und Oktober und nur 10 PSU im Juni registriert (IOW, 2003).

**Pegel (cm) in Landsort 2002**



### SO-Komponente des Windvektors (m/s) in Arkona 2002

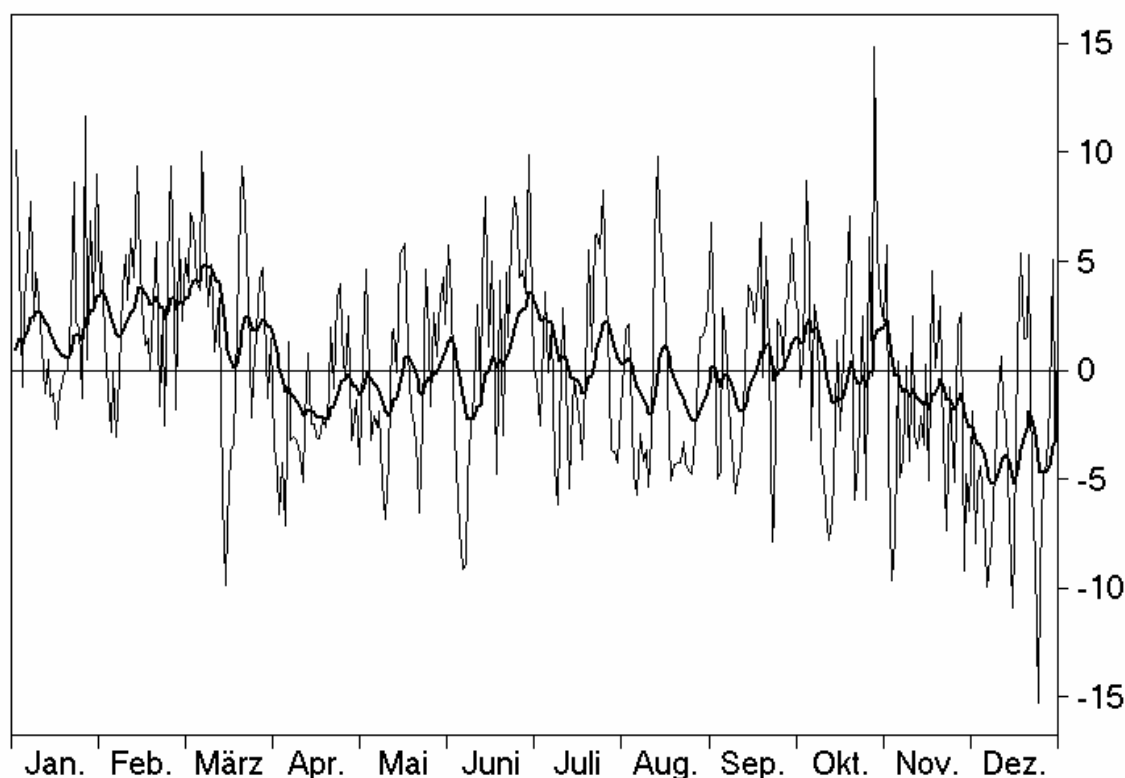


Abb. 5

Oben: Pegel bei Landsort als Maß für den Füllungsgrad der Ostsee (nach Daten des SMHI, 2003).  
 Unten: Stärke des Nordwestwinds (positiv) an der Wetterstation Arkona (nach Daten des DWD, 2003). 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, 2003).  
 Below: Strength of the north-west wind (positive) at the weather station Arkona (after data of DWD, 2003). The bold curve appeared by filtering with an exponential 10-days memory

Die mittlere Dichte der entsprechenden dabei eingeströmten Wassermassen kann also als relativ gering eingeschätzt werden. Insgesamt sind von diesen Ereignissen nur geringe Auswirkungen auf das Tiefenwasser der Ostsee zu erwarten. Eine besondere Rolle spielte anscheinend jedoch die zuvor beschriebene lange Ostwindlage von Ende Juli bis Mitte September. Während dieser Zeit lag der Landsortpegel permanent unter dem Mittelwert. Durch den Sund wurde ein anhaltender Ausstrom registriert, an der Darßer Schwelle aber gleichzeitig hoher Salzgehalt in einer dickeren Bodenschicht. Merkbare Wirkungen in Form von Erwärmung und Belüftung sind insbesondere im Arkona- und Bornholmbecken zu beobachten gewesen. Dieses Wasser sowie der herbstliche Zustrom waren wegen der hohen Temperaturen des Oberflächenwassers noch über mehrere Monate hinweg in der westlichen und zentralen Ostsee deutlich erkennbar.

### 3. Wasseraustausch durch die Ostseezugänge/ 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 wiesen einen Trend in der Empfindlichkeit der SEACAT-Registrierungen auf und wurden entsprechend korrigiert. Die Jahresmittel der Wassertemperatur an der Darßer Schwelle, dargestellt in Tabelle 4 und Abb. 7, wiesen 2002 sowohl in der durchmischten Deckschicht (7 m Tiefe) als auch in der bodennahen Wasserschicht (19 m Tiefe) – verglichen mit dem Zeitraum seit 1992 – maximale beziehungsweise nahe dem Maximum liegende Werte auf. Das gleiche gilt für die Standardabweichungen der Wassertemperatur in allen Tiefen. Die thermische Schichtung ist 2002 verglichen mit dem Mittel seit 1992 von überdurchschnittlicher Intensität (Abb. 6A). Die Fourieramplituden des Jahresganges der Wassertemperatur seit 1992 sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Der Jahresgang der Temperatur in der Deckschicht weist 2002 innerhalb des Beobachtungszeitraums wie die Standardabweichung einen nahe dem Maximum liegenden Wert auf. Der Jahresgang der Temperatur in den tiefer liegenden Schichten liegt ebenfalls nahe dem Maximum. Die Phase des Jahresgangs entspricht in der gesamten Wassersäule den mittleren Werten auf der Darßer Schwelle. Die Phasenlage des Jahresgangs weist darauf hin, dass die jahreszeitliche Erwärmung des Wassers im Gebiet der Darßer Schwelle zwischen Anfang und Mitte April 2002 begann.

Tab. 4

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

Table 4

Mean values and standard deviation of temperature (T) and salinity (S) at the Darss Sill of the corresponding year

Jahr	7 m Tiefe		17 m Tiefe		19 m Tiefe	
	T °C	S PSU	T °C	S PSU	T °C	S PSU
<b>1992</b>	9,41 ± 5,46	9,58 ± 1,52	9,01 ± 5,04	11,01 ± 2,27	8,90 ± 4,91	11,77 ± 2,63
<b>1993</b>	8,05 ± 4,66	9,58 ± 2,32	7,70 ± 4,32	11,88 ± 3,14	7,71 ± 4,27	13,36 ± 3,08
<b>1994</b>	8,95 ± 5,76	9,55 ± 2,01	7,94 ± 4,79	13,05 ± 3,48	7,87 ± 4,64	14,16 ± 3,36
<b>1995</b>	9,01 ± 5,57	9,21 ± 1,15	8,50 ± 4,78	10,71 ± 2,27	–	–
<b>1996</b>	7,44 ± 5,44	8,93 ± 1,85	6,86 ± 5,06	13,00 ± 3,28	6,90 ± 5,01	14,50 ± 3,14
<b>1997</b>	9,39 ± 6,23	9,05 ± 1,78	–	12,90 ± 2,96	8,20 ± 4,73	13,87 ± 3,26
<b>1998</b>	8,61 ± 4,63	9,14 ± 1,93	7,99 ± 4,07	11,90 ± 3,01	8,10 ± 3,83	12,80 ± 3,22
<b>1999</b>	8,83 ± 5,28	8,50 ± 1,52	7,96 ± 4,39	12,08 ± 3,97	7,72 ± 4,22	13,64 ± 4,39
<b>2000</b>	9,21 ± 4,27	9,40 ± 1,33	8,49 ± 3,82	11,87 ± 2,56	8,44 ± 3,81	13,16 ± 2,58
<b>2001</b>	9,06 ± 5,16	8,62 ± 1,29	8,27 ± 4,06	12,14 ± 3,10	8,22 ± 3,86	13,46 ± 3,06
<b>2002</b>	9,72 ± 5,69	8,93 ± 1,44	9,06 ± 5,08	11,76 ± 3,12	8,89 ± 5,04	13,11 ± 3,05

Tab. 5

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

Table 5

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
<b>1992</b>	7,43	4,65	6,84	4,44	6,66	4,37
<b>1993</b>	6,48	4,79	5,88	4,54	5,84	4,41
<b>1994</b>	7,87	4,42	6,55	4,06	6,32	4,00
<b>1995</b>	7,46	4,36	6,36	4,12	–	–
<b>1996</b>	7,54	4,17	6,97	3,89	6,96	3,85
<b>1997</b>	8,60	4,83	–	–	6,42	3,95
<b>1998</b>	6,39	4,79	5,52	4,46	–	–
<b>1999</b>	7,19	4,52	5,93	4,00	5,70	3,83
<b>2000</b>	5,72	4,50	5,02	4,11	5,09	4,01
<b>2001</b>	6,96	4,46	5,35	4,01	5,11	3,94
<b>2002</b>	7.87	4.53	6.91	4.32	6.80	4.27

Die im Jahre 2002 beobachteten thermischen Verhältnisse im Bereich der Darßer Schwelle können als Ergebnis eines recht milden Winters 2001/2002, dem ein ausgesprochen warmer Sommer folgte, erklärt werden (vgl. Kapitel 2). Dies führte dazu, dass die Amplitude des Jahresganges der Wassertemperatur nahe dem Maximum liegt und ihr Mittelwert dem der wärmsten Jahre entspricht (Tabelle 5). Der normale Anstieg der Wassertemperaturen der Deckschicht auf der Darßer Schwelle entspricht 2002 einem durchschnittlichen Wärmefluss aus der Atmosphäre in die Ostsee während des Frühjahrs. Die sommerlichen Extremwerte der Wassertemperatur auf der Darßer Schwelle waren in 2002 relativ hoch und andauernd. Dies ist auf die anhaltende Erwärmung durch die Atmosphäre bis in den späten Sommer zurück zu führen.

Der aktuelle Verlauf der Wassertemperatur des Jahres 2002 ist für die Messtiefen 7 m und 17 m in Abb. 6A dargestellt. Das Minimum der Wassertemperatur wurde außergewöhnlich früh, nämlich Ende Januar 2002 mit Werten um 2.5 °C erreicht. Die thermische Schichtung der Wassersäule begann Anfang April und war bis Ende September ausgeprägt. Der Anstieg der Wassertemperatur in der Deckschicht wurde während des gesamten Sommers immer wieder durch Kaltwassereinschübe unterbrochen. 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. Das Maximum der Wassertemperatur in der Deckschicht wurde Ende August mit Werten um 20 °C erreicht. Die herbstliche Abkühlungsphase des Wassers begann auf der Darßer Schwelle in allen Tiefen erst Ende September. Das Wasser kühlte sich bis Ende Dezember auf rund 3 °C ab (Abb. 6A). Während der Abkühlungsphase sank die Temperatur des oberflächennahen Wassers durch den aus dem Wasser in die Atmosphäre gerichteten Wärmefluss ab Ende September 2002 unter die Temperatur der Bodenwasserschicht.

Im Jahre 2002 wies der mittlere Salzgehalt in 7 m Tiefe einen nahe dem Minimum des Beobachtungszeitraums der Salzgehaltsmessungen auf der Darßer Schwelle liegenden Wert auf (Tabelle 4 und Abb. 8). Der Salzgehalt in der Bodenschicht lag leicht unterhalb des Mittelwertes der vorliegenden Beobachtungsreihe. Die Standardabweichungen des Salzgehaltes in der Deckschicht als auch in der Bodenschicht lagen leicht unterhalb des Mittelwertes. In 2002 war die mittlere Schichtung bezüglich des Salzgehaltes durchschnittlich ausgebildet (Tabelle 4), 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 für 2002 ist in Abb. 6B dargestellt. Zwischen Januar und Dezember wurden im Gegensatz zu vorangegangenen Jahren (vgl. auch MATTHÄUS et al., 1996, 1998, 1999, 2000, 2001a) aber ähnlich wie 2001 nur schwache barotrope Einstromereignisse in die Ostsee registriert (vgl. auch SMHI, 2001a). Während des ganzen Jahres erfolgten intensive barokline Salzwassereinschübe in der bodennahen Schicht. Ein andauernder Einstrom sehr salzreichen Bodenwassers wurde von Anfang August bis Mitte Oktober an der Darßer Schwelle beobachtet. Der Salzgehalt des einströmenden Bodenwassers erreichte ein Maximum von knapp 20 PSU. Pulsförmige Einschübe mit erhöhtem Salzgehalt von mehr als 15 PSU in der gesamten Wassersäule, wie sie für barotrope Einstromereignisse mittlere Stärke typisch sind, wurden 2002 wie auch in 2001 und 2000 gar nicht beobachtet. Schwache Einstromereignisse traten Ende Januar, Ende Juni, Ende Juli und Ende Oktober sowie im Dezember auf. Der Salzgehalt an der Oberfläche erreichte lediglich bei den Ereignissen im Januar und Oktober die 14 PSU Grenze. Bei dem stärksten Einstromereignis des Jahres 2002, im Januar, erreichte der Oberflächensalzgehalt Maximalwerte von 14.5 PSU bei einer Temperatur von  $\sim 2.5$  °C. Die schwachen Einstromereignisse im Juni und Juli waren durch einen Oberflächensalzgehalt von maximal 11 PSU charakterisiert. Während aller Einstromereignisse über die Darßer Schwelle wurde auch der Einstrom salzreichen Wassers über die Drogden Schwelle in das Arkonabecken beobachtet. Die Einstromereignisse über die Drogden Schwelle erfolgten einige Tage eher als an der Darßer Schwelle und waren mit einem höheren Salzgehalt verbunden, der bis 22 PSU betrug (vgl. SMHI, 2002). 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 August, was auf eine signifikante Aussüßung des Oberflächenwassers im Arkonabecken in diesem Zeitraum hindeutet.

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 ein intensives Ausstromereignis Ende Februar bis Mitte April unterbrochen. Während des Ausstromereignisses wurde niedriger Salzgehalt in der ganzen Wassersäule gemessen, was auf einen mehrere Wochen anhaltenden Ausstrom von Oberflächenwasser aus dem Arkonabecken (vgl. auch SMHI, 2001b) hindeutet, der von einer persistenten Ostwindlagen unterstützt wurde (Abb. 4).

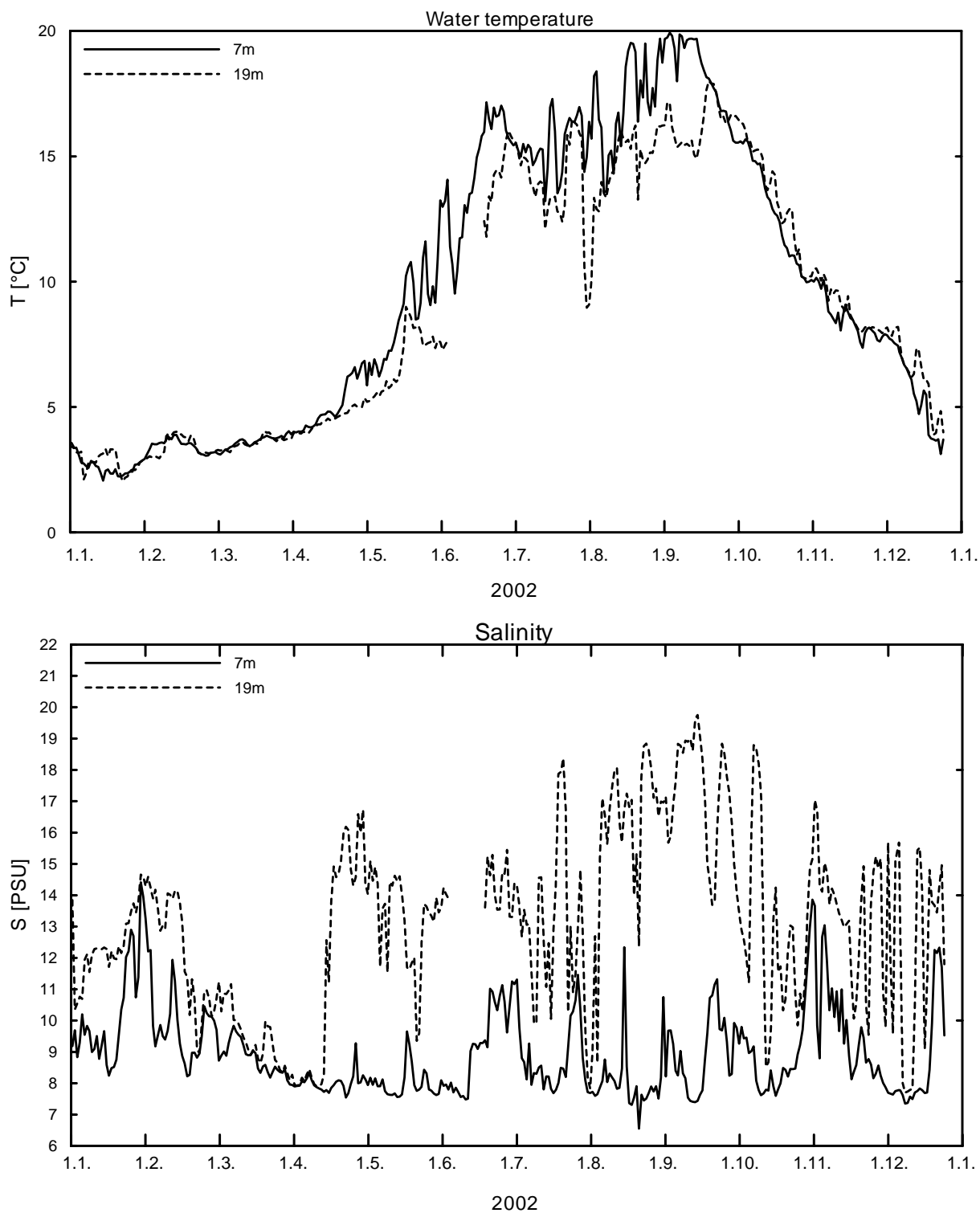


Abb. 6  
Verlauf der Wassertemperatur (A) und des Salzgehaltes (B) in der Deck- und Bodenschicht auf der Darßer Schwelle (Stat. DS in Abb. 1) im Jahre 2002

Fig. 6  
Water temperature (A) and salinity (B) measured in the surface layer and near the bottom at Stat. DS (Fig. 1) in 2002 at the Darss Sill

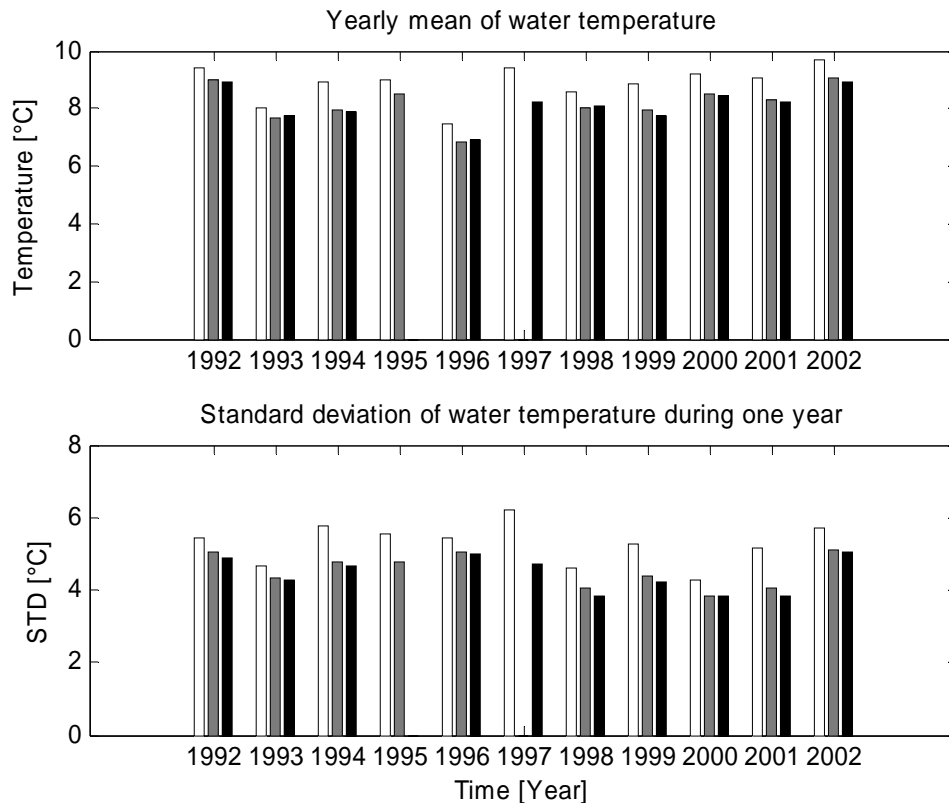


Abb. 7

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

Die kontinuierlichen Sauerstoffmessungen am Messmast sind im Jahr 2002 in 7 m und 19 m Tiefe durchgeführt worden (Abb. 9). 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. Er sinkt ab Anfang April 2002, von kurzzeitigen Fluktuationen überlagert, bis Anfang Oktober auf weniger als 1 ml/l. Dies weist darauf hin, dass durch die Planktonproduktion im Frühjahr und Sommer eine kontinuierliche Sauerstoffzehrung im Bodenwassers der Beltsee bedingt war. Während der Ausstromereignisse erfolgte im Bodenwasser auf der Darßer Schwelle eine kurzzeitige Belüftung durch Advektion von Oberflächenwasser aus dem Arkonabecken. Während der schwachen Einstromereignisse im Juni und Juli 2002 ist der Sauerstoffgehalt des Bodenwassers an der Darßer Schwelle mit annähernd 4 ml/l noch relativ hoch. Das absolute Minimum des Sauerstoffgehaltes (0.5 ml/l) wird während der anhaltenden Phase ästuariner Zirkulation an der Darßer Schwelle von Anfang August bis Anfang Oktober 2002 beobachtet. Im Verlauf des Oktobers stiegen die Sauerstoffkonzentrationen des Bodenwassers mit abnehmender Planktonaktivität und verstärkter vertikaler Durchmischung (Abb. 6) kontinuierlich bis Dezember wieder auf Werte bis 8 ml/l an. Die herbstliche Belüftung des Tiefenwassers der Beltsee begann in 2002 rund einen Monat später als in den voran gegangenen Jahren (vgl. auch MATTHÄUS et al., 1996, 1998, 1999, 2000, 2001b). Die Ursache der späten Durchlüftung liegt in der von August bis



Anfang Oktober 2002 anhaltenden Ostwindphase, die erst Mitte Oktober von starken Westwinden abgelöst wurde (Abb. 4).

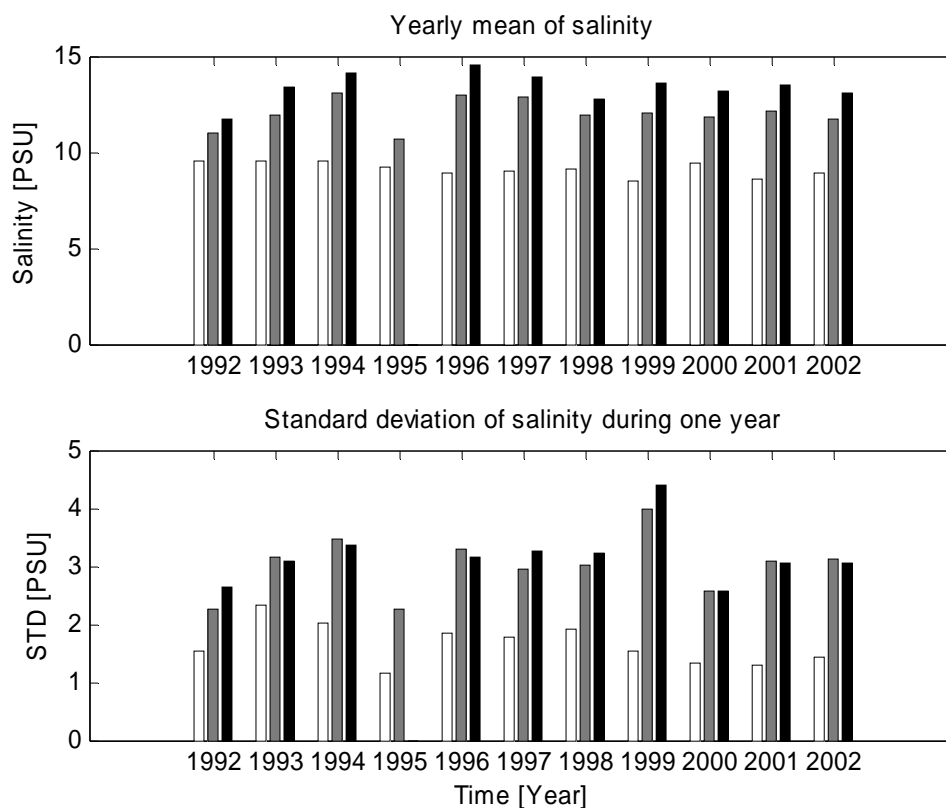


Abb. 8

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

#### 4. Beobachtungen an der Bojenstation "Arkonabecken "

Die Ausbreitung von salzreichem Wasser, das über die Drogden Schwelle und die Darßer Schwelle in das Arkonabecken eingeströmt ist, ist im Rahmen des SALPRO-Projektes (Salzwasserpropagation im Arkonabecken) untersucht worden (LASS and MOHRHOLZ, 2003). Die über die Schwellen einströmenden Salzwasserzungen breiten sich am Boden des Arkonabeckens entgegen dem Uhrzeigersinn entlang des Randes des Arkonabeckens in Richtung des Bornholmsgat aus. Die relativ geringe Bodenreibung der Salzwasserzungen bewirkt eine schwache, in das Zentrum des Beckens gerichtete spiralförmige Bewegung, wo die Salzwasserzungen zur Bildung des Salzwasserpools im Arkonabecken beitragen. Die durch den Wind angetriebene Ekmanzirkulation bewirkt eine zeitweilige Verschiebung des Salzwasserpools beziehungsweise der Salzwasserzungen in Richtung des Gradienten der Bodentopographie. Westlicher Wind verschiebt das salzreiche Bodenwasser am Südrand des Arkonabeckens in Richtung des Zentrums und östlicher Wind verschiebt es zum Rand des Beckens (Auftrieb).

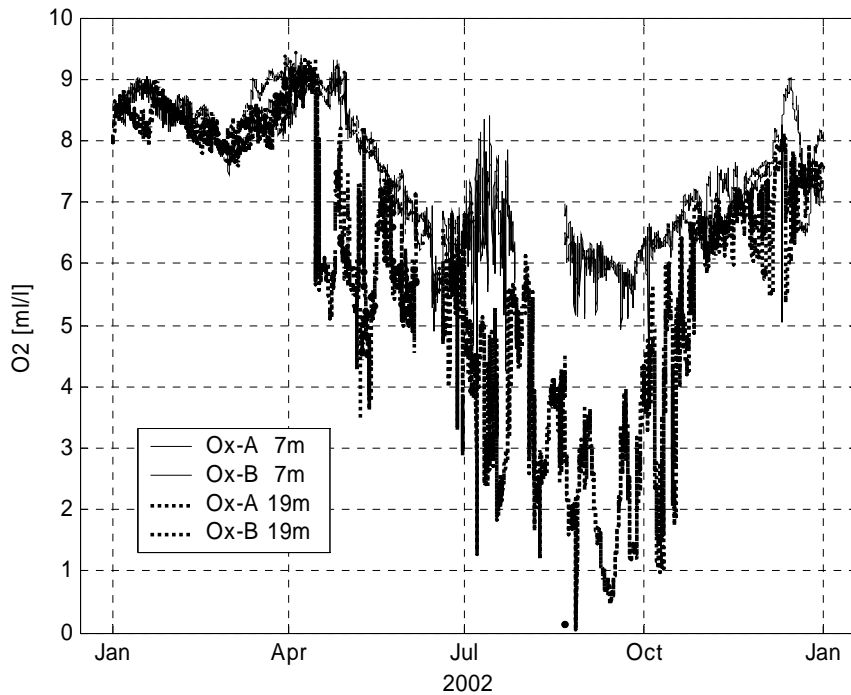


Abb. 9  
Verlauf des Sauerstoffgehaltes in der Deck- und Bodenschicht auf der Darßer Schwelle (Stat. DS in Abb. 1)

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

#### 4.1 Wassertemperatur und Salzgehalt

Die Bojenstation "Arkona Becken" befindet sich annähernd 20 sm nordöstlich von Arkona auf 46 m Wassertiefe (Stat. Arkona, vgl. Abb. 1). Die Station wurde Ende August 2002 auf ihrer Position verankert und im Laufe des Septembers mit Messgeräten ausgerüstet. Seit Ende September hat der reguläre Messbetrieb der Station begonnen. Die Zeitreihen von Wassertemperatur und Salzgehalt in 7 m und 40 m Tiefe sind in Abb. 10 dargestellt. Die an dieser Station gemessene Wassertemperatur (Abb. 10) folgt in ihrem Jahresgang weitgehend dem auf der Darßer Schwelle gemessenen Verlauf (vgl. Abb. 6). Die thermische Schichtung an der Station ist jedoch stärker ausgeprägt als auf der Darßer Schwelle. Dies ist auf die von den atmosphärischen Einflüssen weitgehend entkoppelte Zwischenlagerung des über die Schwellen eingeströmten Salzwassers zurück zu führen. Das Bodenwasser konserviert die Wassertemperatur, die es zum Zeitpunkt des Überströmens der Schwellen hatte.

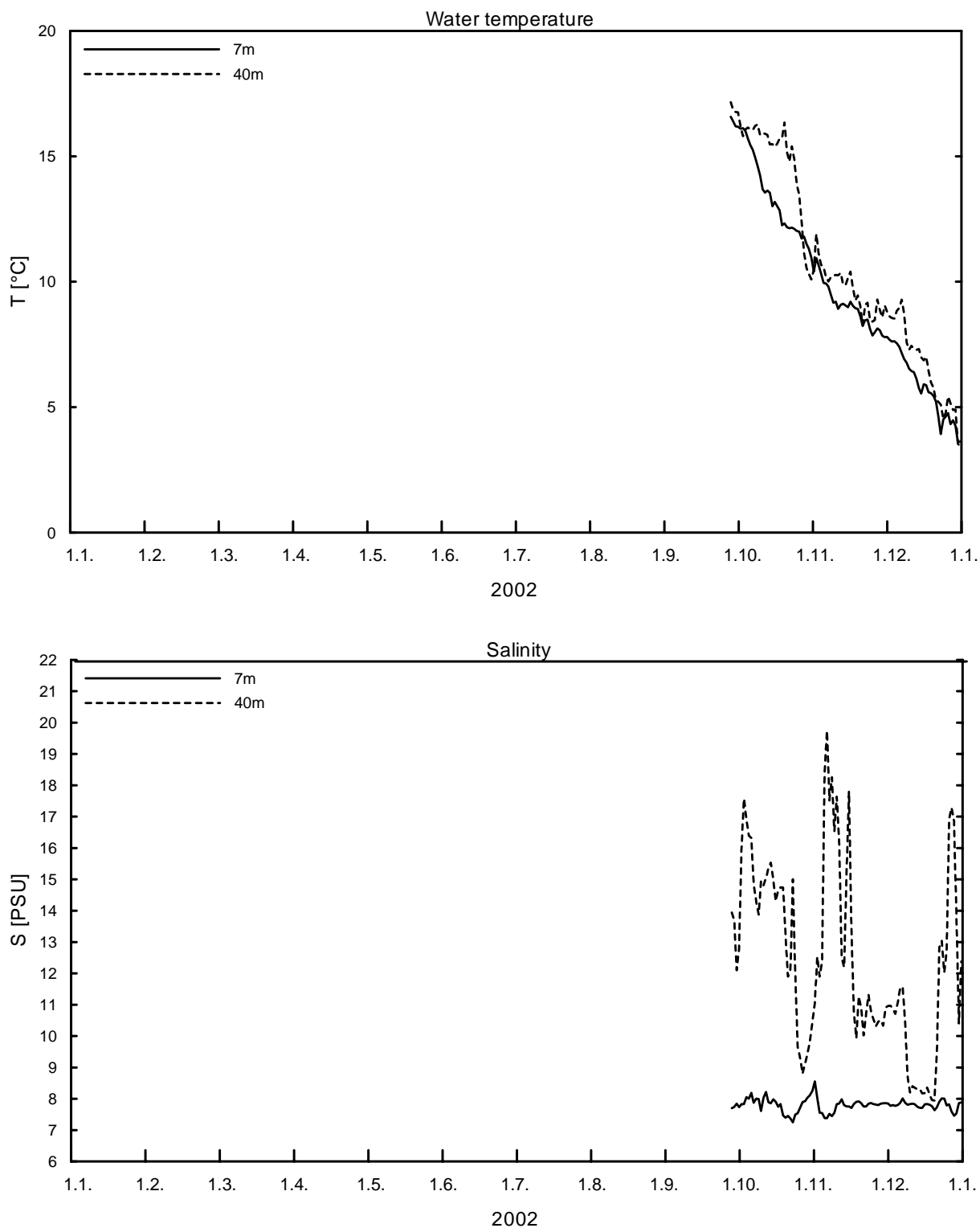


Abb. 10  
Verlauf der Wassertemperatur (A) und des Salzgehaltes (B) in der Deck- und Bodenschicht im Arkonabecken (Stat. Arkona) im Jahr 2002

Fig. 10  
Water temperature (A) and salinity (B) measured in the surface layer and near the bottom in 2002 at Stat. Arkona in the Arkona Basin

Der in den gleichen Tiefen wie die Wassertemperatur gemessene Salzgehalt im Arkonabecken ist in Abb.10 dargestellt. Der Salzgehalt in der Deckschicht ist nur geringen Schwankungen ausgesetzt. Er variierte zwischen 7.5 und 8.5 PSU. Der Salzgehalt des Bodenwassers an der Station „Arkona Becken“ schwankt dagegen zwischen dem Salzgehalt des Deckschichtwassers und annähernd 20 PSU. Der letztere Wert liegt höher als der Salzgehalt des über die Darßer Schwelle geströmten Salzwassers. Das weist darauf hin, dass das an der Station „Arkona Becken“ beobachtete Bodenwasser zum Teil über die Drogden Schwelle eingeströmt ist. Mit einer gewissen Verzögerung von einigen Tagen gegenüber der Messstation Darßer Schwelle wird ein Anstieg des Bodensalzgehalts im Arkonabecken nach den Einstromereignissen Ende September, Ende Oktober und Ende Dezember 2002 beobachtet. Insbesondere bei den letzten beiden Ereignissen überschreitet der Salzgehalt des Bodenwassers den maximalen Salzgehalt, der an der Darßer Schwelle beobachtet wurde.

## 4.2 Strömung

Seit dem 1. Oktober 2002 ist neben der Bojenstation „Arkona Becken“ ein Strömungsmesser (ADCP) am Meeresboden verankert. Das Gerät ist unabhängig von der Bojenstation und registriert die Daten in seinem internen Speicher. Die Schallsender des ADCP befinden sich in rund 42 m Wassertiefe und strahlen die Schallsignale zur Wasseroberfläche ab. Der ADCP ist in gleicher Weise konfiguriert wie der auf der Darßer Schwelle verankerte ADCP.

Die mittlere Strömung und ihre Fluktuationen sind während winterlicher Schichtung in der Wassersäule sehr kohärent. Zur Charakterisierung des baroklinen Anteils der Strömung ist sie in 3 m und 19 m Messtiefe zeitlich integriert und die fortschreitenden Vektordiagramme (Pseudotrajektorien) sind berechnet worden. Diese filtern insbesondere die kurzzeitigen Fluktuationen aus der Strömungsmessung und lassen die langzeitigen Eigenschaften der Strömung besser erkennen.

Die Projektion der Pseudotrajektorien der Strömung in Oberflächen- (5 m) und Grundnähe (40 m) auf die Kompassrichtung  $60^\circ$  sind in Abb.11 dargestellt. Die Projektionsrichtung entspricht annähernd der Tangente der Tiefenlinien im Bereich der Bojenstation und die Strömung sollte, über längere Zeit gemittelt, an den Tiefenlinien ausgerichtet sein.

Die langfristig gemittelte Bewegung an der Station Arkona Becken erfolgt bei winterlicher Schichtung offensichtlich sowohl an der Oberfläche als auch am Boden entlang der Tiefenlinien in Richtung des Bornholmsgat. Diese mittlere Bewegung ist von kräftigen kurzperiodischen Schwankungen überlagert, die zu einer Umkehr der Bewegungsrichtung führen können. Diese Schwankungen werden sowohl durch die Ausbreitung der Salzwasserzungen im Arkonabecken als auch durch den lokalen Wind gesteuert. Die an der Darßer Schwelle Ende September, Ende Oktober und Ende Dezember beobachteten Einstromereignisse bilden sich mit einiger Verzögerung in der Trajektorie der Strömung in 40 m Tiefe als positive Wegstrecken ab, denen kurze gegenläufige Wegstücke (in Richtung Arkona) folgen.

Letztere scheinen mit ausgeprägten Ostwindlagen zu korrespondieren. Die nach WSW gerichtete Bewegung ist in der Oberflächenschicht ausgeprägter als am Boden. Von Ende Dezember 2002 bis Ende Januar 2003 erfolgt sowohl am Boden als auch an der Oberfläche eine ausgeprägte Bewegung in Richtung Bornholmsegat. Hier überlagert sich offenbar die Ausbreitung des schwachen Einstromereignisses von Ende Dezember 2002 mit dem Salzwassereinbruch vom Januar 2003. Die Verschiebung der Wasserteilchen beträgt rund 200 km. Das lässt vermuten, dass das eingeströmte Salzwasser zum Teil direkt in das Bornholmbecken geströmt ist.

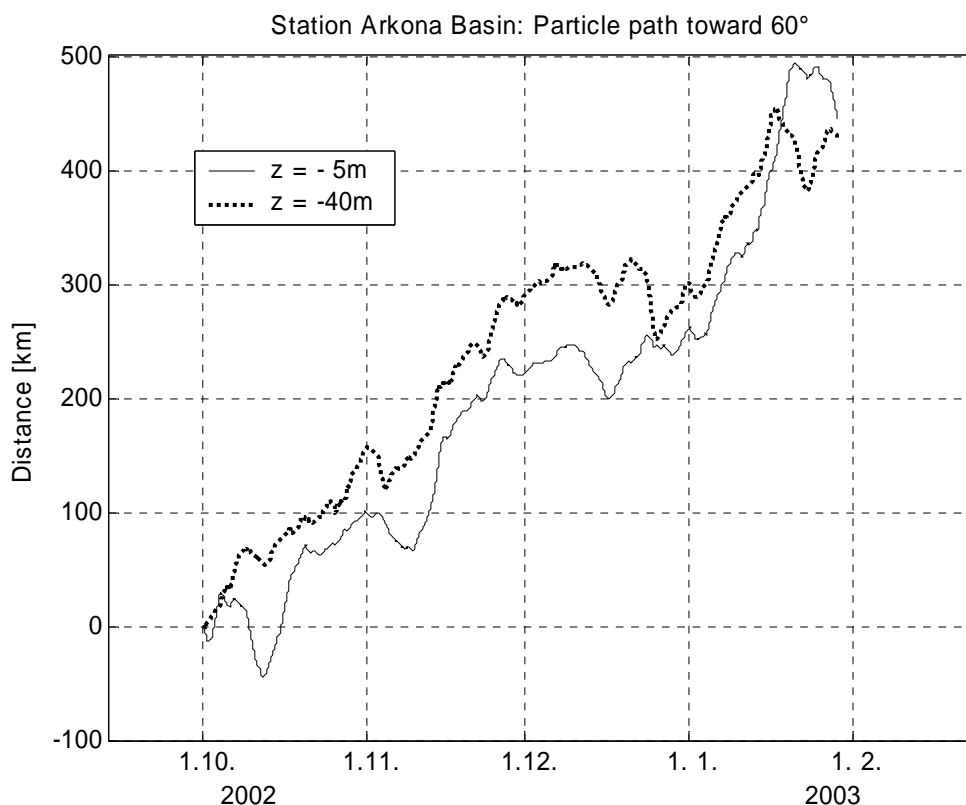


Abb. 11

Projektion der Pseudotrajektorien der Strömung an der Oberfläche (5 m Tiefe) und am Boden (40 m Tiefe) an der Bojenstation „Arkona Becken“ in Richtung 60°

Fig. 11

Projection of the progressive vector diagram of current measured at the Arkona Basin (Stat. Arkona). The different lines correspond to the current measured near the sea surface (5 m depth) and near the bottom (40 m depth). The water depth is 45 m at the site

## **5. Hydrographisch-chemische Bedingungen**

Die nachfolgend dargestellten Beschreibungen der hydrographisch-chemischen Situation im Jahre 2002 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. In diesem Bericht wird vor allem auf spezielle Aspekte eingegangen. Im Jahr 2002 war dies die extreme Sauerstoffmangelsituation im Bodenwasser der westlichen Ostsee, vor allem im Bereich der schleswig-holsteinischen und dänischen Küste, die die intensivste Sauerstoffarmut seit Beginn der Beobachtungen darstellt (vgl. Kapitel 5.3)

Die Vertikalverteilungen der Wassertemperatur (Abb. 17), des Salz- (Abb. 18) und des Sauerstoffgehaltes (Abb. 20) sowie der wesentlichsten Nährstoffe Phosphat (Abb. 23) und Nitrat (Abb. 24) sind auf einem Längsschnitt zwischen Darßer Schwelle und nordöstlichem Gotlandbecken, der dem Talweg durch die zentralen Ostseebecken folgt, dargestellt. Die Situation im wesentlichen 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 6 und 10). Trendaussagen für Nährstoffe im Oberflächenwasser werden dagegen nur an Hand der Winterkonzentrationen vorgenommen (Tabelle 9).

### **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 Die Oberflächentemperatur der Ostsee im Jahr 2002

Die Einschätzung der Wasseroberflächentemperatur der Ostsee des Jahres 2002 erfolgte auf der Grundlage von Tages- und Monatsmittelwerten abgeleitet aus Daten der NOAA Wettersatelliten. Die Monatsmittel dienen zur Interpretation der saisonalen thermischen Entwicklung und zur Betrachtung von zwischenjährlichen Variationen. Die Tagesmittel wurden für die Erarbeitung von Besonderheiten in der detaillierten Temperaturentwicklung verwendet. Aus den Mittelwerten der Monate des Jahre 2002 und den langjährigen Monatsmitteln der Jahre 1990 - 2000 wurden Anomalien berechnet, die zeigen, dass es erhebliche Abweichungen in den verschiedenen Monaten, aber auch regional gab. Besonderheiten traten in den Monaten Januar, Juni, August, September und Dezember auf, die in Abb. 12 zusammengefasst sind.

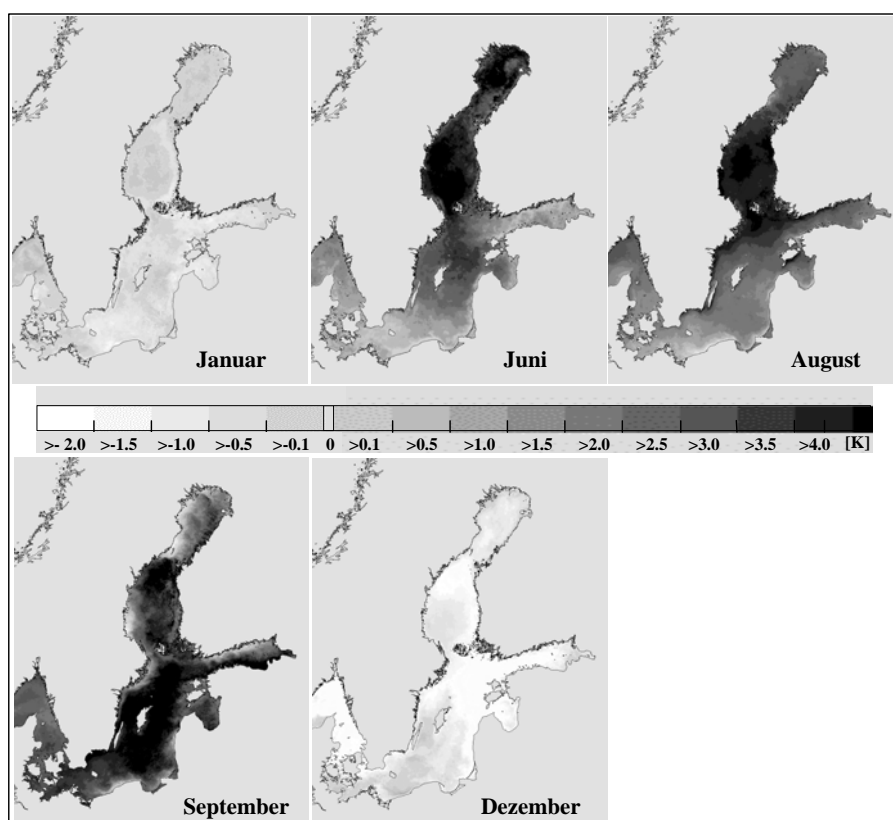


Abb. 12  
Anomalien der SST der Ostsee der Monate Januar, Juni, August, September und Dezember 2002 bezogen auf die Mittelwerte der Jahre 1990 - 2000

Fig. 12  
Anomalies of SST in the Baltic Sea in the months January, June, August, September and December 2002 referring to the mean values of the years 1990 - 2000

Der Januar 2002 gehörte mit Wassertemperaturen im Mittel unter  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  zu den kälteren seit 1990. Die Anomalien liegen im Allgemeinen zwischen  $-0.5$  und  $-1.5\text{ K}$  in der Bornholmsee. In der eigentlichen Ostsee nahm die Temperatur nicht wie üblich im Februar und März weiter ab. Abkühlungen waren nur in der Bottenwieck zu verzeichnen, wo dann auch eine verstärkte Eisbildung einsetzte und eine maximale Eisbedeckung Mitte März erreicht war (siehe auch Abb. 16). Insgesamt war der Sommer 2002 sehr warm und zählte neben 1997 und 1999 zu den wärmsten seit 1990, was auch in den Wärmesummen der Lufttemperatur von Warnemünde zum Ausdruck kommt (vgl. Tab. 3). Außergewöhnlich waren die bereits im Juni zu beobachtenden mittleren Temperaturen um  $14\text{ }^{\circ}\text{C}$  in der zentralen Ostsee. Ähnliches war nur im Juni 1992 registriert worden. Lagen die Anomalien in der Arkonasee und in der Bornholmsee bei  $+1\text{ K}$ , so waren in der nördlichen Gotlandsee Werte zwischen  $+3.5$  und  $+4\text{ K}$  zu beobachten und im Bottnischen Meerbusen wurden sogar bis  $+5\text{ K}$  erreicht. Der Juli war zwar relativ warm, aber erst der August und der September stellten wieder extreme Mittelwerte dar. Im August wurden in der gesamten Ostsee hohe Wasseroberflächentemperaturen registriert, die aber in der westlichen und in der zentralen Ostsee nicht die höchsten Werte von 1994 und 1997 erreichten. In der nördlichen Ostsee war der August 2002 der wärmste seit 1990. In Relation zum langjährigen Mittel traten Anomalien zwischen  $+1.5$  und  $+2\text{ K}$  in der gesamten südlichen und westlichen Ostsee und in der nördlichen Gotlandsee und im Bottnischen Meerbusen bis  $+4\text{ K}$  auf. Nur im Auftriebsgebiet vor der polnischen Küste wurde durch die lang anhaltende Hochdrucklage mit östlichen Winden eine negative Anomalie mit Werten bis  $-1.5\text{ K}$  beobachtet. Der September war in der gesamten Ostsee mit Abstand der wärmste seit 1990. Der zweitwärmste September war im Jahre 1999. Er war ca.  $2\text{ K}$  niedriger als 2002. Dadurch ergaben sich in weiten Teilen der zentralen Ostsee Anomalien zwischen  $+4\text{ K}$  und in der Gotlandsee sogar bis  $+5\text{ K}$ . Im Oktober normalisiert sich das wieder etwas, doch ist eine Zweiteilung zu erkennen. Die westliche Ostsee ist weiterhin ziemlich warm, wogegen der nördliche Teil vom Skagerrak bis zur nördlichen Ostsee schnell abkühlt, was sich auch im November und Dezember fortsetzte. Der Wintereinbruch in Nordeuropa führte im Dezember zu den niedrigsten Temperaturen seit 1990 beobachtet. Besonders im Bereich Skagerrak, Kattegat und nördlich Gotland wurden Temperaturen bis unter  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  erreicht und in der Bottenwieck setzte eine verstärkte Vereisung ein. Das drückt sich auch in den negativen Anomalien in der gesamten Ostsee aus. Die maximalen Werte mit  $< -4\text{ K}$  wurden im Skagerrak und Kattegat sowie in der nördlichen Gotlandsee beobachtet. Der Jahresgang der Oberflächentemperatur an jeweils einer zentralen Station in der Arkonasee und in der östlichen Gotlandsee im Vergleich zu den 11-Jahresmitteln (Abb. 13) hebt nochmals die außergewöhnlich hohen Temperaturen des Juni und die sehr erhöhten Werte von August und September hervor. Gleichzeitig wird die starke Abkühlung im nördlichen Teil der Ostsee deutlich.

Die besonderen Verhältnisse im Sommer 2002 sind auch noch einmal anhand der Wasseroberflächentemperaturen der Monate Juni, August und September entlang eines Schnittes durch die zentralen Becken dargestellt und mit den langjährigen Mittelwerten (1990 - 2000) und Extremwerten anderer Jahre verglichen. Man erkennt einerseits im Juni die hohen Temperaturen im Bereich nördlich der Bornholmsee, die sich bis in die Bottenwieck fortsetzen. Im August lagen die Temperaturen in der gesamten Ostsee höher als das langjährige Mittel. Im Vergleich zum bisher wärmsten Sommer 1997 erkennt man die erhebliche Erwärmung des nördlichen Teils der Ostsee. Im September lagen die Werte in der gesamten Ostsee weit über den langjährigen Mitteln und dem wärmsten seit 1990.



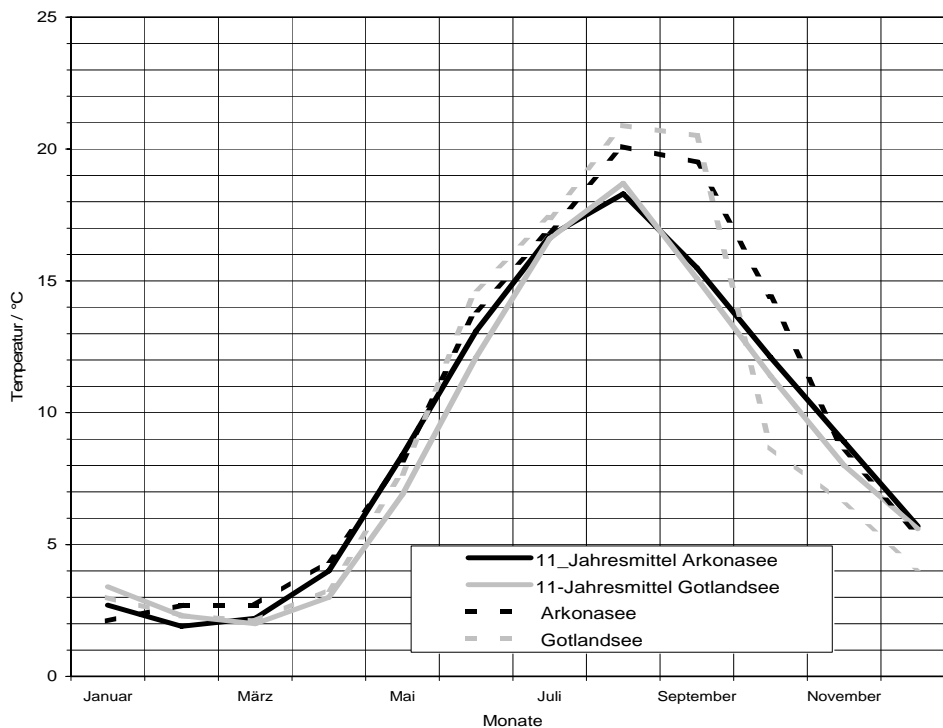


Abb. 13

Saisonaler Verlauf der Wasseroberflächentemperatur (NOAA-SST) an je einer Station in der Arkona- und östlichen Gotlandsee des Jahres 2002 im Vergleich zum jeweiligen 11-Jahresmittel

Fig. 13

Seasonal course of sea surface temperature (NOAA-SST) at stations in the Arkona- and eastern Gotland Sea in 2002 in comparison to the mean values of the last 11 years

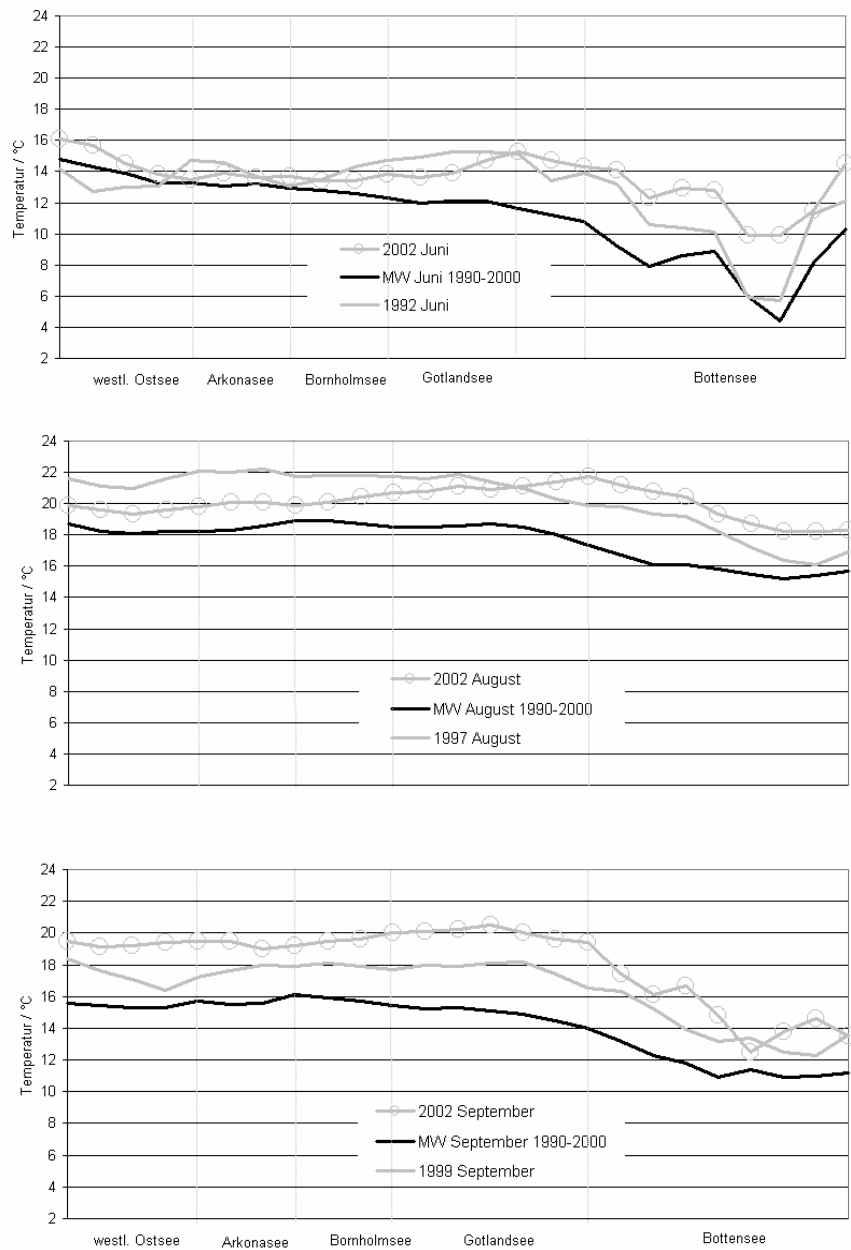


Abb. 14

Temperaturverteilung entlang des Monitoringschnittes durch die zentralen Becken der Ostsee für die Monate Juni, August und September im Vergleich zum Mittel 1990 – 2000 und zu Extremwerten anderer Jahre

Fig. 14

Temperature distribution along the monitoring transect through the central basins of the Baltic Sea in June, August and September in comparison to the mean value of 1990 – 2000 and to extreme values of other years

Im folgenden Abschnitt werden einige Besonderheiten in der raum-zeitlichen Entwicklung der Wasseroberflächentemperatur im Jahr 2002 in detaillierter Form dargestellt. Während einer Hochdrucklage mit fast durchgängigen östlichen Winden vom 1.- 20. April erreicht das Oderwasser vom 5.- 10. April, wie schon im Mai 2000 nachgewiesen, die zentrale Arkonasee, sehr gut sichtbar auch in Satellitendaten der Wasserfarbe (SeaWiFS). In der Folge erwärmt sich die südlichen Ostsee ab 21. April von 3 auf 5 °C, und ab 25. April hat die ganze Ostsee Temperaturen > 5 °C. Die Erwärmung wird allerdings gestoppt durch eine Windzunahme von 5 auf durchgängig 10 m/s ab 27. April. Durch die windbedingte Durchmischung sinkt die Temperatur Ende April / Anfang Mai wieder auf Werte < 5 °C. Durch Windberuhigung nach dem 13. Mai entsteht die nächste Erwärmungsphase und erreicht selbst an der Darßer Schwelle ab 18. Mai schon Werte über 10 °C. Ab 6. Juni entwickelt sich Auftrieb an der polnischen Küste und vor Hiddensee. Das Oderwasser reicht bis ca. 15. Juni wieder bis in die Arkonasee. In dieser Hochdruckphase erfolgt eine starke Erwärmung, wobei am 8. Juni in der zentralen Ostsee weite Teile über 15 °C, am 10. Juni bis 18 °C erreichen. Bei einer windbedingten Durchmischung sinken die Temperaturen wieder unter 13 °C, bevor sich die Erwärmung ab 16. Juni speziell in der westlichen Ostsee mit Werten bis 18/19 °C fortsetzt. Zu dieser Zeit wurden an der Darßer Schwelle in 2 m Wassertiefe Werte bis 17 °C gemessen. Eine weitere starke Erwärmung erfolgt ab 8. Juli in der ganzen Ostsee, was ab 18. Juli außerhalb der Auftriebsgebiete für Ostwind zu Temperaturen von 18-20 °C führt. Ab Ende Juli bis Anfang September erreichen weite Teile über 20 °C. Der wärmste Tag des Jahres ist der 29. August mit Werten über 22 °C in weiten Teilen der Ostsee. Die hohen Temperaturen im Sommer 2002 haben zu einer ausgedehnten Entwicklung der Cyanobakterien in der Ostsee geführt. Die Blüte begann um den 20. Juni und dauerte bis ca. 19. August, was im Detail in der biologischen Zustandseinschätzung diskutiert wird.

Temperaturen um 20 °C wurden noch bis 13. September beobachtet, bevor ab 14. September der Wind von Ost über Nord nach West dreht, Geschwindigkeiten bis 15 m/s erreicht und dadurch die Abkühlungsphase einleitet. Wurden bis 14. September auch an der Darßer Schwelle kontinuierlich Temperaturen bis 20 °C in obersten 5m gemessen, beginnt danach das kontinuierliche Absinken. Die Wochenmittel der Wasseroberflächentemperatur des Monats September in Abb. 15 dokumentieren diese Abkühlungsphase im Vergleich mit den Messungen an der MARNET- Station „Darßer Schwelle“ eindrucksvoll.

Ab 10. Oktober sinken in einer Phase starker Bewölkung bis 20. Oktober die Temperaturen auf Werte um 10 °C und darunter ab. Ende Oktober sind dann in der nördlichen Ostsee schon Temperaturen zwischen 3 und 5 °C, in der Gotlandsee zwischen 5 und 8°C erreicht. Nur in der Arkona- und Bornholmsee liegen die Werte noch zwischen 9 und 12 °C. Am 10. November gibt es kaum noch Gebiete die wärmer als 8 °C sind.

Die Abb. 16 zeigt die Temperaturverteilung des Tages mit der stärksten Eisbedeckung und des wärmsten Tages des Jahres 2002. Am 14. März war der gesamte nördliche Teil des Bottnischen Meerbusens vereist. In der zentralen Ostsee lagen die Temperaturen zwischen 2 und 4 °C ungewöhnlicherweise höher als im Januar. Der wärmste Tag war der 29. August, wo Temperaturen zwischen 22 und 23 °C in der westlichen und zentralen Ostsee aus dem Tagesmittel abgeleitet wurden. Das Besondere war, dass noch nördlich der Åland Inseln Wassertemperaturen um 20 °C anzutreffen waren.

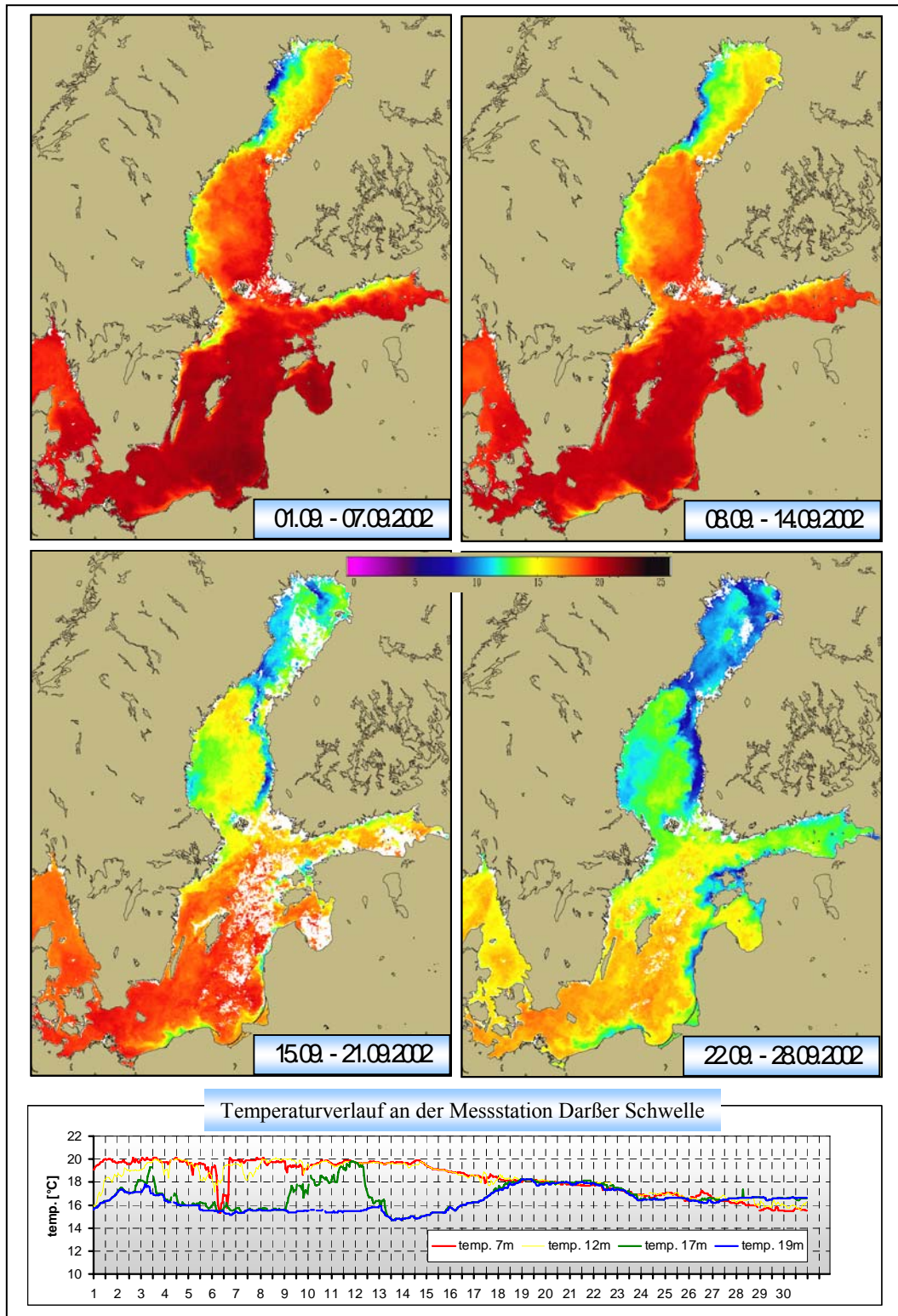


Abb. 15  
 Wochenmittel der SST im September 2002 im Vergleich zur Temperaturentwicklung an der Messstation Darßer Schwelle

Fig. 15  
 Monthly mean SST in September 2002 in comparison to the temperature development MARNET station Darss Sill

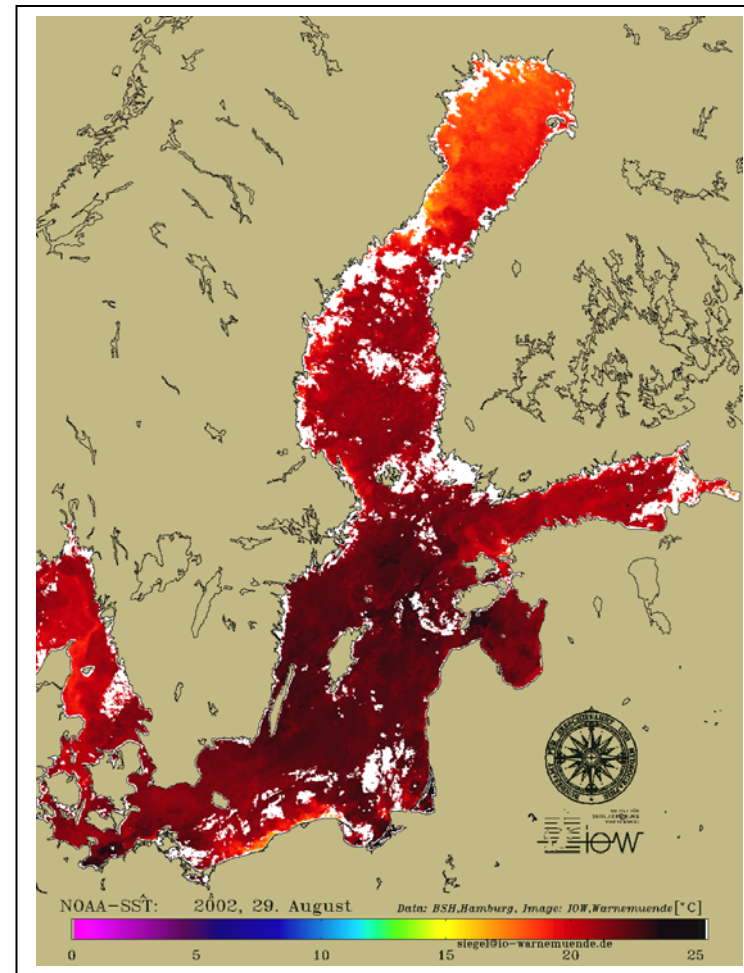
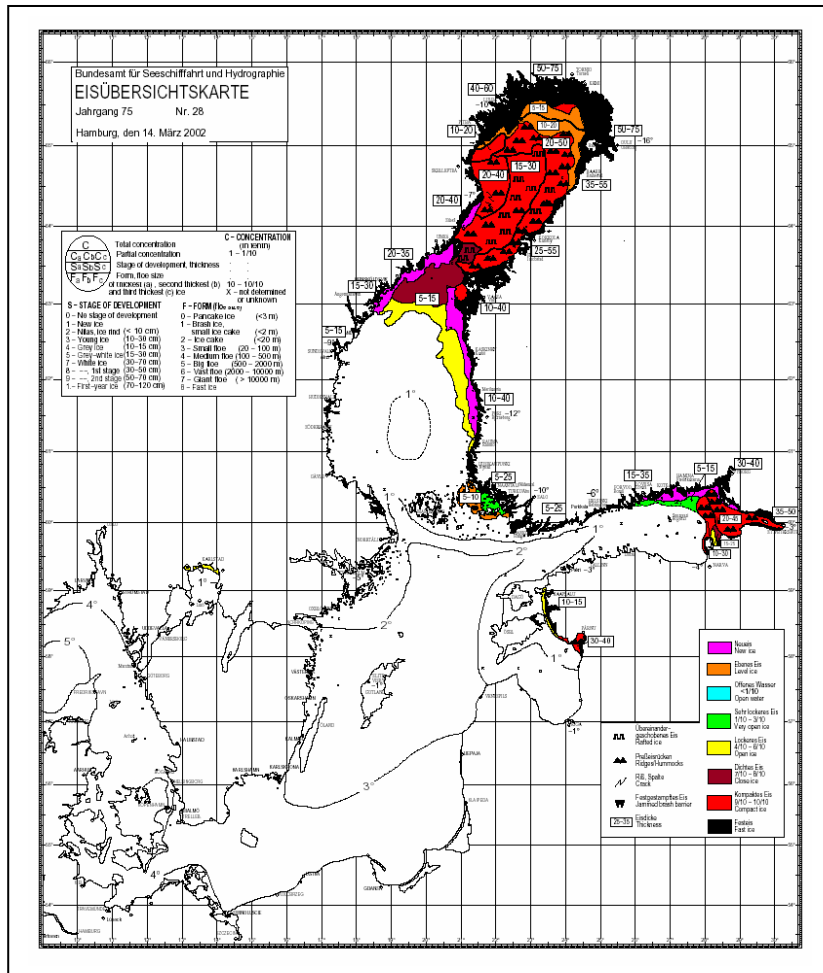


Abb. 16  
 Temperaturverteilung der Ostsee zur Zeit der Minimal- (14. März, A) und Maximalwerte (29. August, B) des Jahres 2002

Fig. 16  
 Temperature distribution of the Baltic in the period of minimum (14 March, A) and maximum values (29 August, B) of the year 2002

### 5.1.2 Vertikalverteilung der Wassertemperatur

Die vertikale Temperaturverteilung der westlichen und zentralen Ostsee im Verlauf des Jahres 2002 ist anhand der Überwachungsfahrten des IOW in der Abb. 17 zusammengestellt. Die Temperaturen im Tiefenwasser lagen 2002 generell höher als in den letzten 5 Jahren und auch höher als die langjährigen Mittelwerte. Verantwortlich dafür sind außer dem besonders warmen Einstromereignis vom September/Oktober 1997 (MATTHÄUS et al., 1999, HAGEN and FEISTEL, 2001) auch die nachfolgenden herbstlichen Zuflüsse von Nordseewasser im Oktober 1999 (SMHI, 1999, MATTHÄUS et al., 2001a), im Oktober/November 2001 (FEISTEL et al., 2003a) und im Sommer und Herbst 2002 (FEISTEL et al., 2003b), siehe auch Kapitel 2 und SCHMIDT, 2002).

Im Bornholmbecken zeigte die Temperatur in der Tiefe von 60 m, d.h. im Bereich der Halokline, besonders starke monatliche Schwankungen als Folge der kleineren Einströme sowie der langen konstanten sommerlichen Wetterlage, wie sie im Kapitel 2 beschrieben wurden. Sie fiel von 9,4 °C im Januar auf 5,1 °C im Mai, blieb bis Juli etwa konstant, stieg dann stark auf 10,7 °C im August und noch weiter auf 12,7 °C im November, um danach wieder auf 11,1 °C abzusinken. In Bodennähe bei 80 m Tiefe waren diese Effekte weitaus weniger ausgeprägt; von 9,4 °C im Januar kühlte sich das Wasser ab auf 8,3 °C im März, blieb mit Fluktuationen bis September auf diesem Wert und stieg dann über 9,1 °C im November auf 9,7 °C im Dezember. Das neu eingeströmte Wasser hat also das alte Tiefenwasser in diesem Fall nicht angehoben, sondern wurde hauptsächlich an dessen Oberkante eingeschoben, und nur kleine Anteile wurden in die tiefsten Schichten eingemischt. Das ungewöhnlich hohe Jahresmittel von 8,86 °C in 80 m Tiefe im Jahr 2000 wurde im Jahr 2002 erneut erreicht (Tabelle 5).

Obwohl der Oktober-Einstrom 2002 als unbedeutend für das Tiefenwasser der Ostsee insgesamt angesehen werden muss, ist sein ungewöhnlich hohes Temperatursignal als „passiver Tracer“ von besonderem Interesse. Das trifft anscheinend in noch stärkerem Maße zu auf den sonst seltenen substantiellen Einstrom in Form eines salzhaltigen Unterstroms durch Belt und westliche Ostsee bei anhaltender Ostwindlage, der vom 5. August bis zum 28. September vom Messmast an der Darßer Schwelle aufgezeichnet wurde, der sehr warmes oberflächennahes Kattegat-Wasser im Bereich der Halokline der Bornholmsee bei 60 m Tiefe einschob (FEISTEL et al., 2003b). Beide Wassermassen sind bei den CTD-Messungen im Herbst und Winter (und ebenfalls im folgenden Jahr) sehr auffällig. Somit konnte die weitere Ausbreitung auf dem Weg durch die Stolper Rinne (10,2 °C am 22. Oktober bei 88 m, SCHMIDT, 2002) und das Danziger Tief (9,4 °C am 20. November bei 100 m, IMGW 2003) besonders gut verfolgt werden.

Im östlichen Gotlandbecken traf am 3. Januar das Wasser des Einstroms vom Oktober/November 2001 (FEISTEL et al., 2003a) ein. Eine Langzeitverankerung (HAGEN and FEISTEL, 2001) registrierte den plötzlichen Anstieg der Temperatur von 6,1 °C auf 6,4 °C in 174 m Tiefe und von 6,2 °C auf 6,7 °C bei 204 m. In 240 m Tiefe wurden sogar 7,2 °C gemessen. Dieser Wert klang rasch ab auf 6,7 °C im März und 6,4 °C im Dezember. Im Jahresmittel bei 200 m wurden mit 6,24 °C die Werte von 1998 nicht wieder erreicht, jedoch weist die gleich hohe, überdurchschnittliche Standardabweichung von 0,15 °C auf verstärkten Wasseraustausch in diesen beiden Jahren im östlichen Gotlandbecken hin, wobei der Effekt im Jahr 2002 weit weniger nachhaltig war als die vom Einstrom 1997 ausgelöste auffällige und dauerhafte Erwärmung. Bereits im Februar erreichte das warme Einstromwasser von 2001 auch das Farö-Tief. In Bodennähe stieg die Temperatur von 5,9 °C im Januar auf 6,1 °C von Februar bis April, um danach wieder leicht abzusinken. Der Jahresdurchschnitt von 5,97 °C bei 190 m ist der höchste der „Warmzeit“, die dort seit 1998 besteht. Auch im Landsorttief stieg die bodennahe Temperatur von 5,2 °C im Januar auf 5,4 °C im Oktober, und die mittlere Temperatur von 5,32 °C setzt den kontinuierlichen Anstieg der letzten

Jahre weiter fort. Im Karlsö-Tief war die Mitteltemperatur von 4,77 °C ebenfalls höher als in den Vorjahren, das Eintreffen eines thermischen Einstrom-Signals kann aber im Jahresverlauf nicht klar ausgemacht werden.

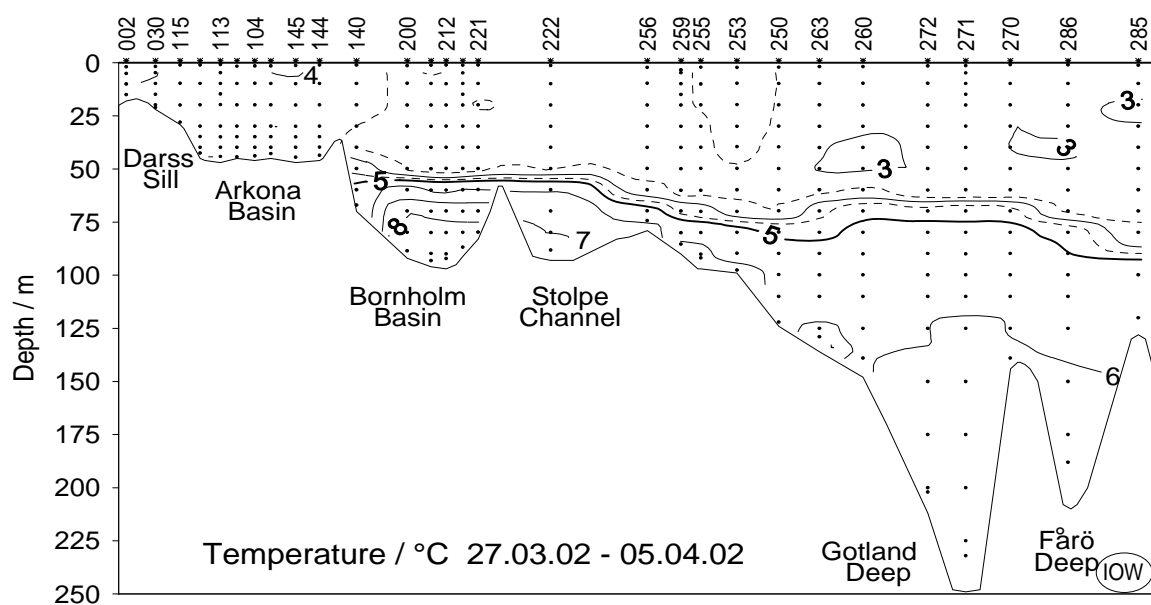
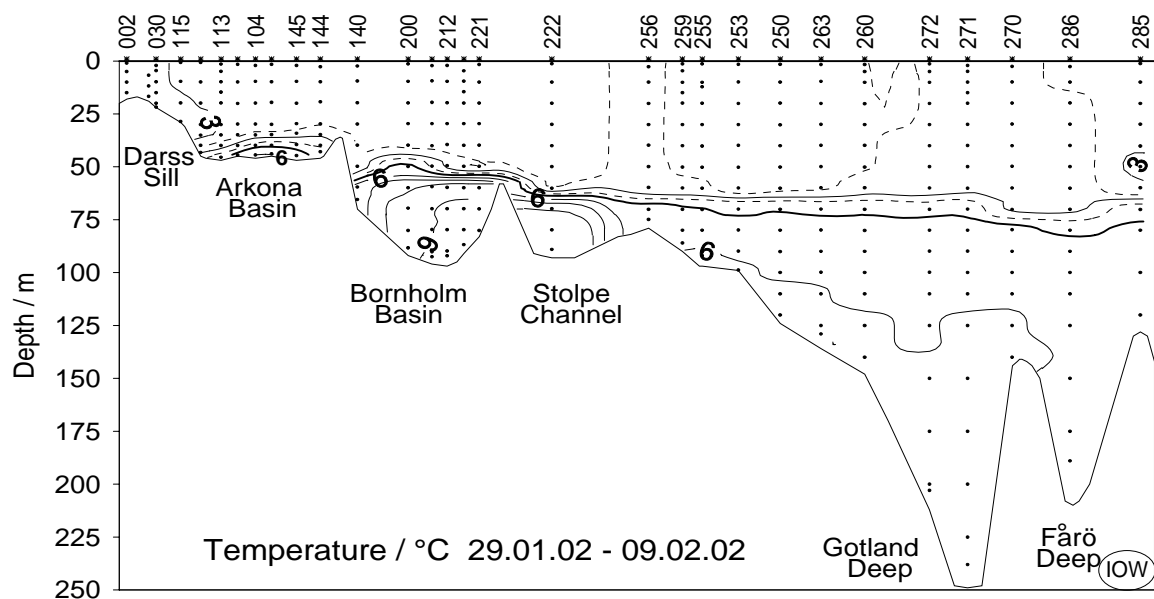


Abb. 17

Vertikale Verteilung der Wassertemperatur zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 17

Vertical water temperature distribution between Darss Sill and northern Gotland Basin

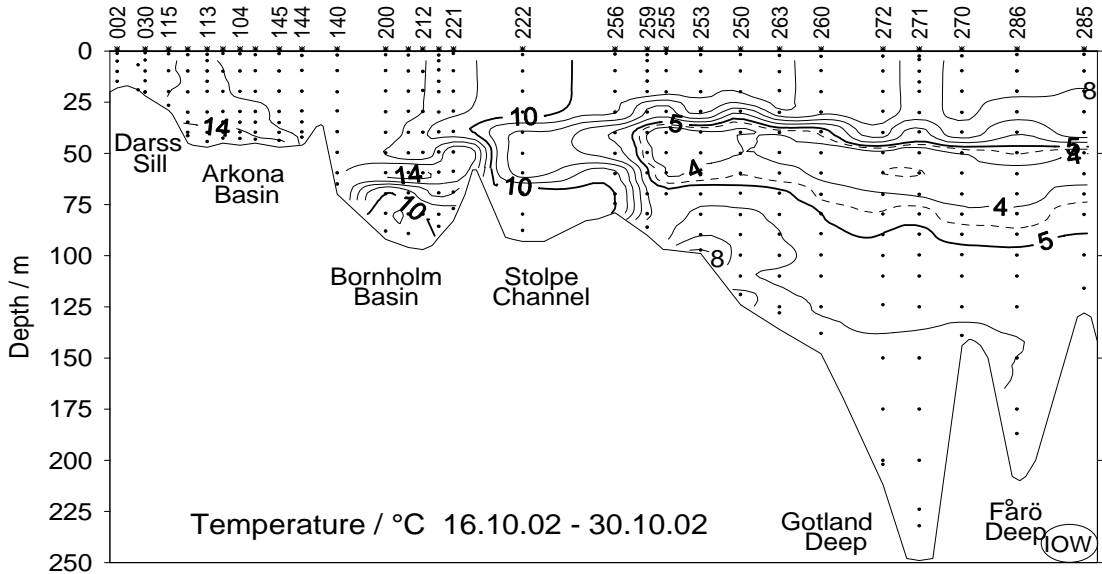
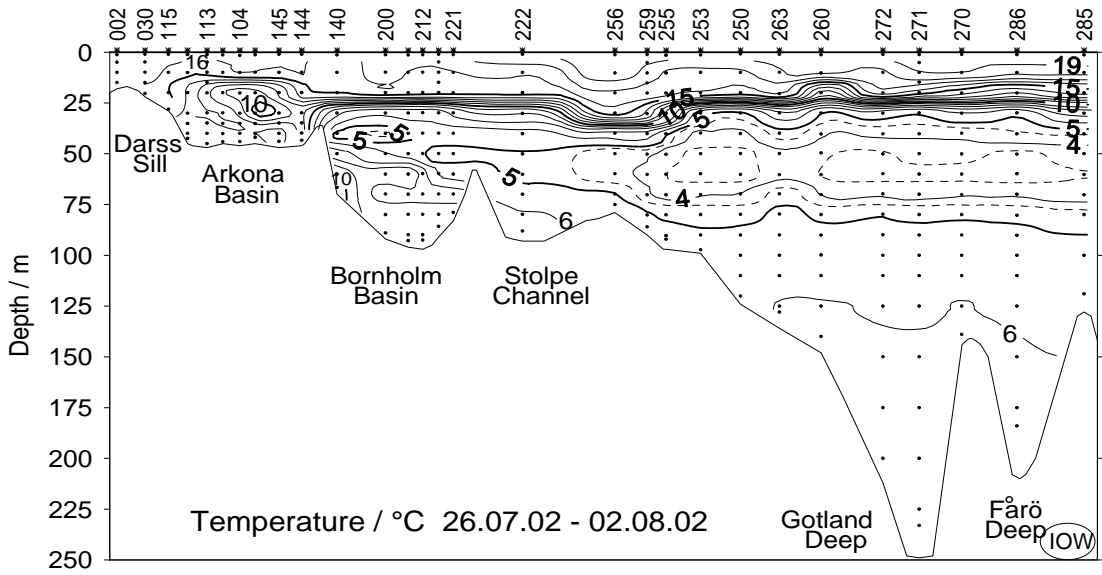
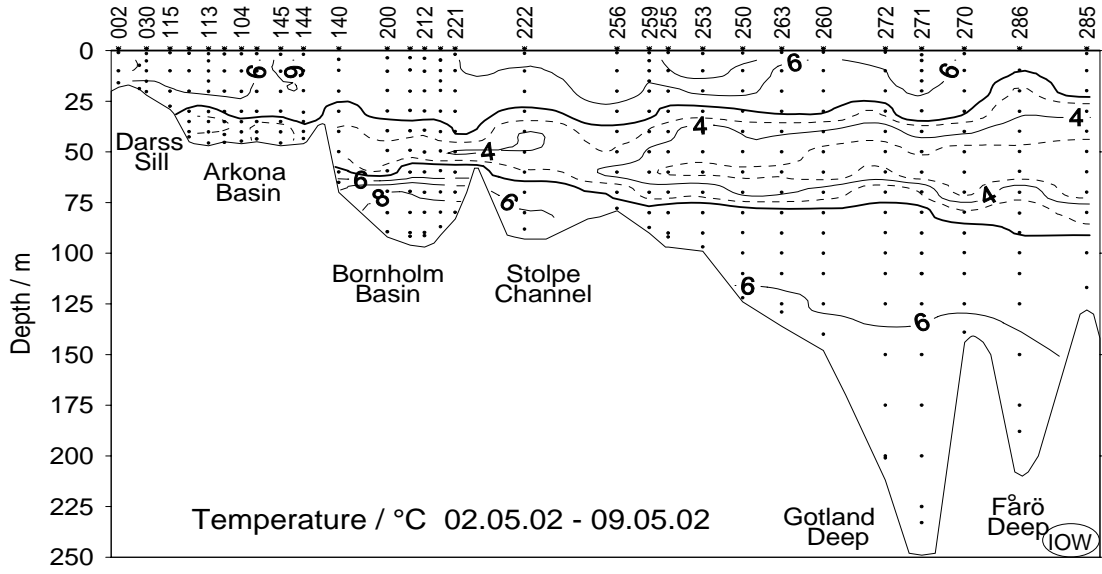


Abb. 17. Forts.

Fig. 17 cont.



Tab. 6

Jahresmittelwerte und Standardabweichungen ausgewählter hydrographischer Parameter im Tiefenwasser der zentralen Ostsee

Table 6

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

<b>Wassertemperatur (°C; Maximalwerte hervorgehoben)</b>						
Station	Tiefe/m	1998	1999	2000	2001	2002
<b>213</b> (Bornholmtief)	80	8,53 ± 0,45	8,04 ± 1,13	<b>8,86 ± 0,57</b>	7,45 ± 1,05	<b>8,86 ± 0,65</b>
<b>271</b> (Gotlandtief)	200	<b>6,62 ± 0,15</b>	6,38 ± 0,06	6,28 ± 0,04	6,20 ± 0,02	6,34 ± 0,15
<b>286</b> (Fårötief)	150	5,66 ± 0,32	5,86 ± 0,03	5,95 ± 0,03	5,88 ± 0,02	<b>5,97 ± 0,07</b>
<b>284</b> (Landsortief)	400	4,88 ± 0,23	5,17 ± 0,14	5,21 ± 0,07	5,24 ± 0,01	<b>5,32 ± 0,10</b>
<b>245</b> (Karlsötief)	100	4,33 ± 0,05	4,47 ± 0,10	4,61 ± 0,05	4,66 ± 0,18	<b>4,77 ± 0,09</b>
<b>Salzgehalt (PSU; Maximalwerte hervorgehoben)</b>						
Station	Tiefe/m	1998	1999	2000	2001	2002
<b>213</b> (Bornholmtief)	80	<b>16,38 ± 0,49</b>	15,79 ± 0,42	16,3 ± 0,36	15,46 ± 0,35	15,24 ± 0,34
<b>271</b> (Gotlandtief)	200	<b>12,32 ± 0,07</b>	12,21 ± 0,04	12,10 ± 0,03	11,98 ± 0,03	11,96 ± 0,10
<b>286</b> (Fårötief)	150	<b>11,62 ± 0,09</b>	11,57 ± 0,04	11,53 ± 0,06	11,33 ± 0,04	11,24 ± 0,06
<b>284</b> (Landsortief)	400	10,50 ± 0,16	<b>10,58 ± 0,07</b>	10,42 ± 0,04	10,32 ± 0,04	10,23 ± 0,08
<b>245</b> (Karlsötief)	100	9,51 ± 0,13	<b>9,57 ± 0,17</b>	9,47 ± 0,08	9,50 ± 0,28	9,37 ± 0,17
<b>Sauerstoffgehalt (ml/l; Schwefelwasserstoff als negative Sauerstoffäquivalente; Minimalwerte hervorgehoben)</b>						
Station	Tiefe/m	1998	1999	2000	2001	2002
<b>213</b> (Bornholmtief)	80	<b>-0,20 ± 0,81</b>	0,29 ± 1,23	0,92 ± 1,12	0,57 ± 1,23	0,85 ± 1,00
<b>271</b> (Gotlandtief)	200	0,02 ± 0,48	-1,68 ± 0,46	-2,56 ± 0,63	-3,75 ± 0,54	<b>-3,82 ± 1,14</b>
<b>286</b> (Fårötief)	150	-0,03 ± 0,33	-0,78 ± 0,50	-1,27 ± 0,53	<b>-1,82 ± 0,40</b>	-1,56 ± 0,28
<b>284</b> (Landsortief)	400	0,37 ± 0,14	0,15 ± 0,22	-0,57 ± 0,15	-0,75 ± 0,22	<b>-0,94 ± 0,16</b>
<b>245</b> (Karlsötief)	100	0,43 ± 0,22	0,32 ± 0,59	0,31 ± 0,32	<b>-0,35 ± 0,72</b>	-0,18 ± 0,40

## 5.2 Salzgehalt

Die Verteilung des Salzgehalts in der Ostsee 2002 ist in Abb. 18 sowie in den Tabellen 6 und 7 dargestellt. Generell ist in der zentralen Ostsee im Jahr 2002 ein Trend zur Aussüßung zu verzeichnen, der die Tendenz der Vorjahre seit 1998/99 fortsetzt (MATTHÄUS et al., 2001a). Im Tiefenwasser der Bornholmsee (80 m) wurde mit 15,24 PSU seit 1996 der niedrigste Wert registriert (Tabelle 5). 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., 1999, HAGEN and FEISTEL, 2001) bis 2001 pro Jahr um 0,1 PSU und hat 2002 mit 11,96 PSU wieder einen Wert wie schon 2001 erreicht. Dieser ist jedoch mit einer ungewöhnlich hohen Standardabweichung von 0,1 PSU verknüpft, die sich aus dem hohen Wert von 12,49 PSU im Januar, bedingt durch das am 3. Januar eingetroffene Wasser des herbstlichen Einstroms (FEISTEL et al., 2003a), erklärt. Schon im Februar fiel der Salzgehalt aber wieder auf 12,19 PSU und sank bis zum Jahresende weiter stetig ab. Ähnliches wie für die Gotlandsee, wenn auch weniger ausgeprägt, gilt für das Farö-Tief bei 150 m; auch hier trat 1998 mit 11,62 PSU ein Maximum im Salzgehalt auf, der bis 2002 auf 11,24 PSU kontinuierlich abgesunken ist und damit erstmals wieder unter dem Niveau von 1997 liegt. Im Landsort- (400m) und Karlsö-Tief (100m) trat das Salzmaximum erst ein Jahr später, nämlich 1999 mit 10,58 bzw. 9,57 PSU auf. Seither sind die Werte auf gegenwärtig 10,23 PSU bzw. 9,37 PSU gefallen, die mit den entsprechenden Messwerten von 1997 vergleichbar sind. Im Jahresverlauf zeigt sich im Farö-Tief bei 175 m Tiefe ein Anstieg von 11,38 PSU im Januar auf 11,41 PSU im März, gefolgt von einem gleichmäßigen Absinken auf 11,30 PSU im Dezember. Im Landsort-Tief stieg der Salzgehalt in Bodennähe von 10,2 PSU am Jahresbeginn auf 10,3 PSU am Ende. Im Karlsö-Tief finden wir am Boden maximale Werte von 9,66 PSU im Februar und 9,54 PSU im März, während die Werte in den übrigen Monaten etwa um 9,3 PSU fluktuieren.

Tabelle 7 zeigt die Jahresmittelwerte 2002 des Salzgehalts im Oberflächenwasser im Vergleich mit vorhergehenden Jahren. Alle Salzkonzentrationen liegen deutlich unter dem jeweiligen Langzeitmittelwert der Jahre 1961-1990. Es ist jedoch in diesem Zeitraum im Gegensatz zum Tiefenwasser kein klarer Trend zur Aussüßung festzustellen.

Tab. 7

Jahresmittelwerte von 1998 bis 2002 sowie Langzeitmittelwert der Jahre 1961-1990 und Standardabweichungen des Salzgehalts (in PSU) im Oberflächenwasser der zentralen Ostsee (Minimalwerte hervorgehoben)

Table 7

Annual means of 1998 to 2002 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	1998	1999	2000	2001	2002	1961-1990
<b>213</b> (Bornholmtief)	<b>7,17 ± 0,14</b>	7,20 ± 0,18	7,57 ± 0,18	7,29 ± 0,19	<b>7,17 ± 0,13</b>	7,72 ± 0,25
<b>271</b> (Gotlandtief)	7,04 ± 0,20	<b>6,81 ± 0,23</b>	7,09 ± 0,14	6,86 ± 0,30	6,98 ± 0,19	7,41 ± 0,46
<b>286</b> (Farötief)	6,79 ± 0,35	6,64 ± 0,29	6,79 ± 0,21	<b>6,61 ± 0,26</b>	6,75 ± 0,34	7,15 ± 0,31
<b>284</b> (Landsorttief)	6,30 ± 0,41	6,39 ± 0,19	6,45 ± 0,44	<b>6,29 ± 0,26</b>	6,48 ± 0,27	
<b>245</b> (Karlsötief)	6,60 ± 0,15	6,78 ± 0,10	6,77 ± 0,44	<b>6,52 ± 0,19</b>	6,77 ± 0,21	

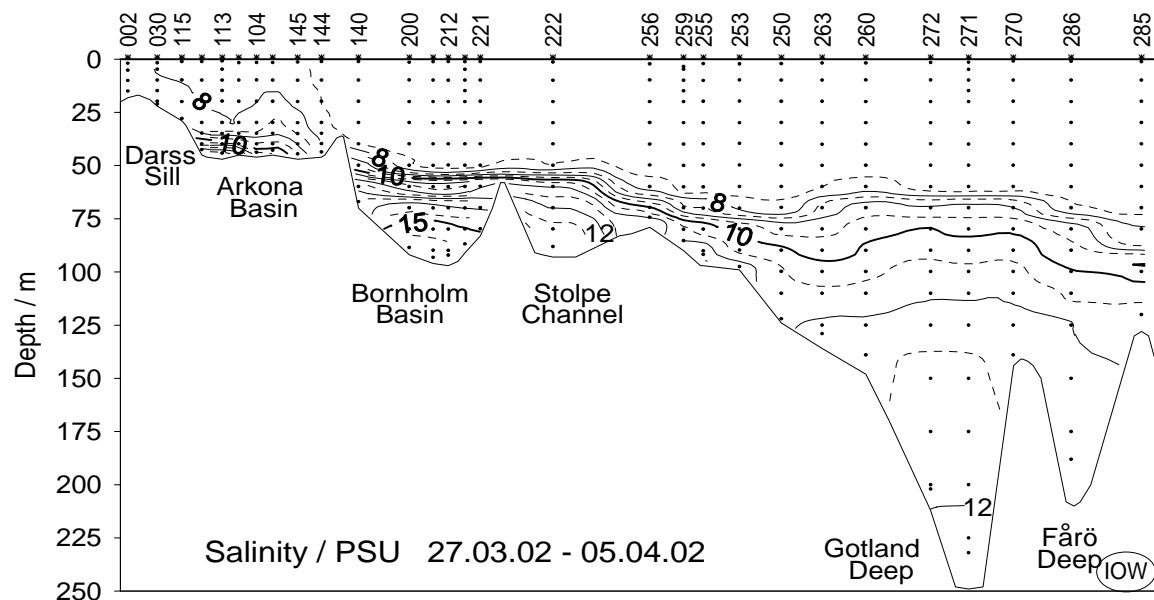
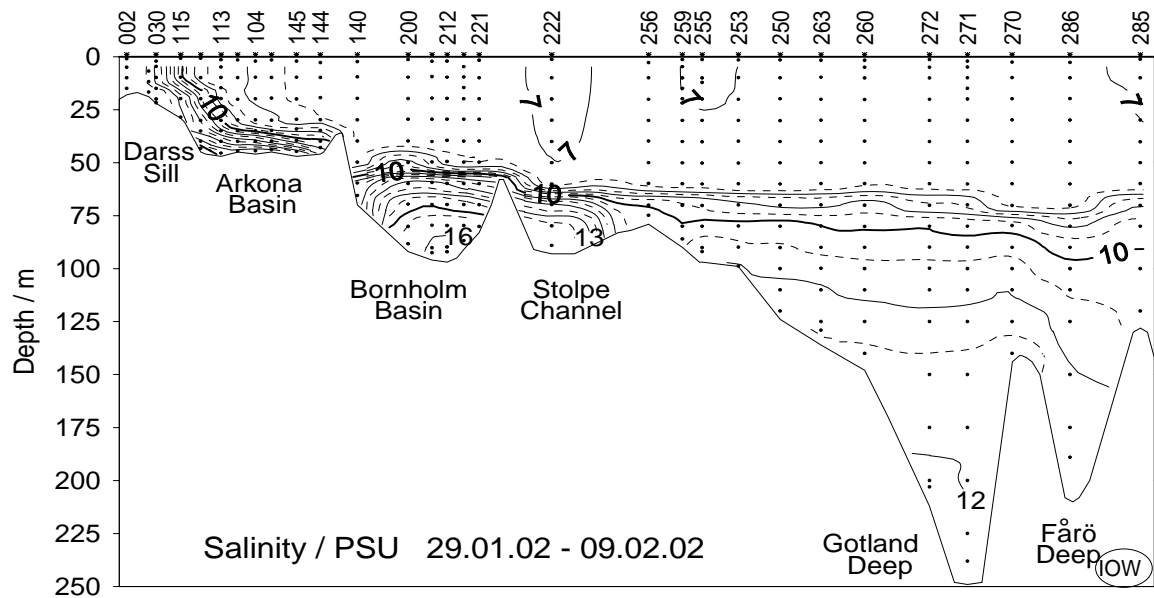


Abb. 18  
Vertikale Verteilung des Salzgehaltes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 18  
Vertical salinity distribution between Darss Sill and northern Gotland Basin

Mit Ausnahme der Bornholmsee liegen alle aktuellen Werte wieder über denen des Vorjahres. Das könnte darauf zurückgeführt werden, dass die herbstlichen Einstromereignisse aus der Nordsee seit 1997 zu einer Stabilisierung des generell relativ niedrigen Salzgehaltes geführt haben, obwohl sie kaum eine positive Wirkung auf die Stagnation der Sauerstoffverhältnisse hatten. Insbesondere kleinere Ereignisse bleiben wegen der geringeren Dichte des eingeströmten Wassers häufig auf den Bereich der Halokline beschränkt und werden nach vertikaler Vermischung dann eher im Salzgehalt des Oberflächen- als des Tiefenwassers sichtbar.

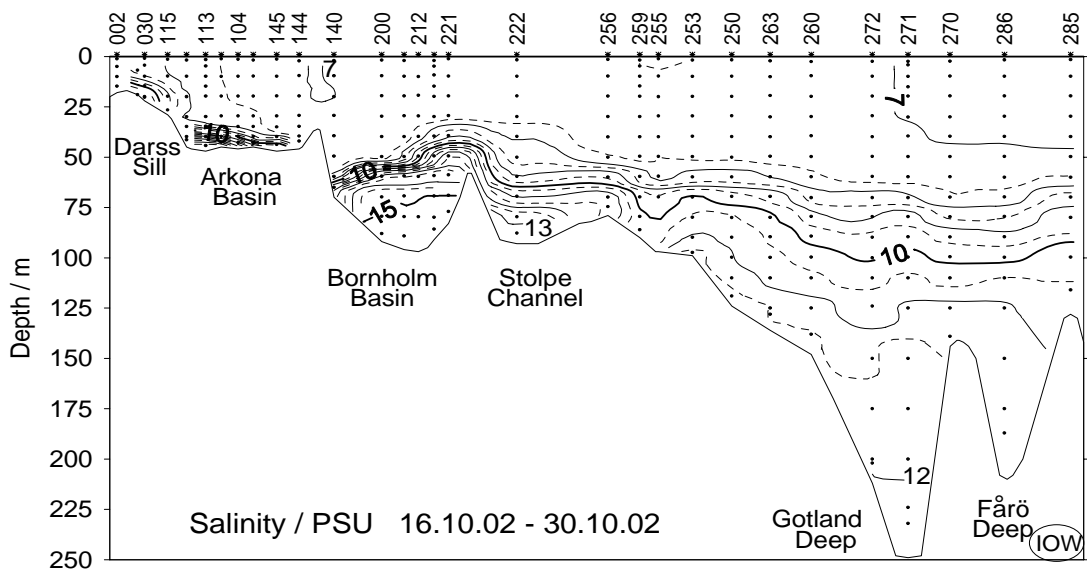
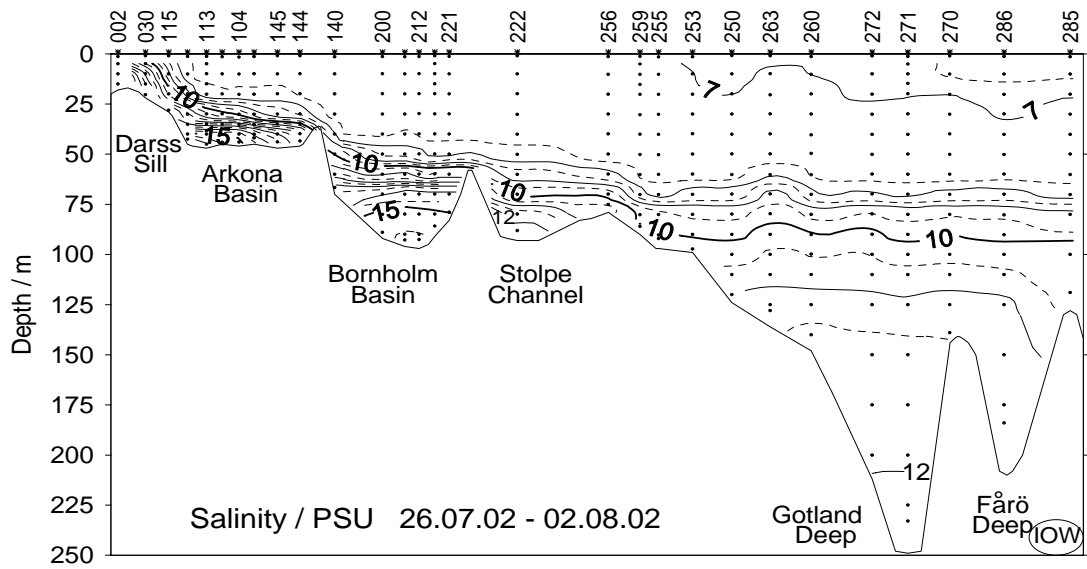
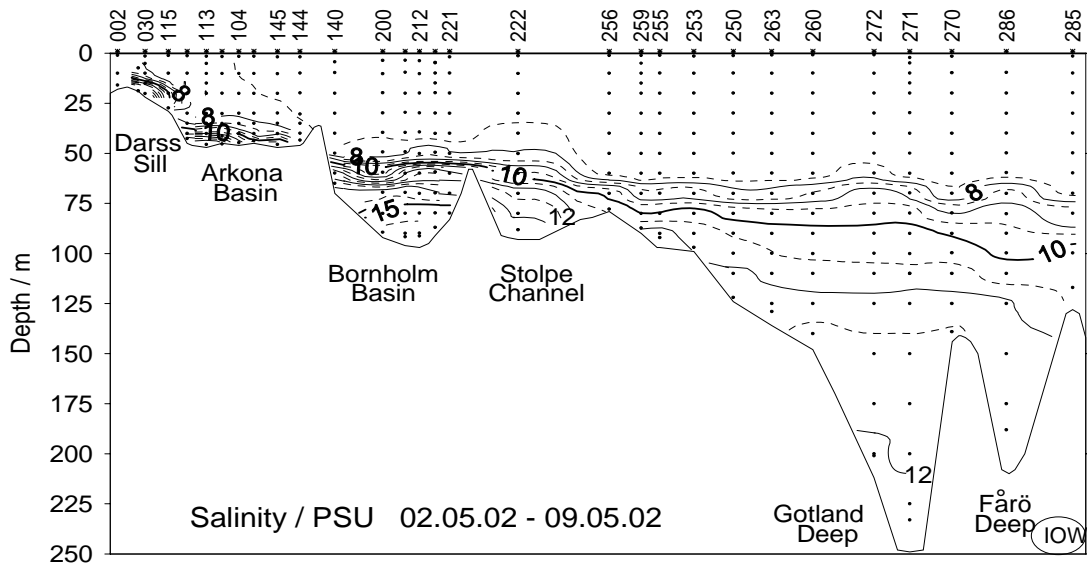


Abb. 18 Forts.

Fig. 18 cont.

### 5.3 Sauerstoff und Schwefelwasserstoff

Die Sauerstoffversorgung des Oberflächenwassers der Ostsee kann durch intensive Austauschvorgänge mit der Atmosphäre und photosynthetische Prozesse in der Regel als gut angesehen werden. Variationen des Sauerstoffgehaltes werden im Wesentlichen durch die Jahrgänge von Temperatur und Salzgehalt und die jahreszeitlich unterschiedlich stark ausgeprägte Intensität von Produktions- und Zehrungsprozessen verursacht. Zusätzlich spielen hydrodynamische Prozesse eine Rolle. Wesentlich problematischer ist die Sauerstoffzufuhr in die tieferen Wasserschichten. Die permanente Salzgehaltschichtung in den Tiefenbecken der Ostsee verhindert den vertikalen Austausch weitgehend. In den flacheren Gewässerteilen kann dieser Austausch durch temporäre haline und thermische Schichtung ebenfalls stark begrenzt sein. Unterhalb dieser Dichtesprungschichten kommt es zu einer deutlichen Abnahme des Sauerstoffgehaltes, der bis zum Auftreten von Schwefelwasserstoff führen kann. Die hier getroffenen Aussagen können durch Abb. 20 bestätigt werden, in der die Verteilung von Sauerstoff und Schwefelwasserstoff auf einem Schnitt von der Darßer Schwelle bis ins nördliche Gotlandbecken dargestellt ist.

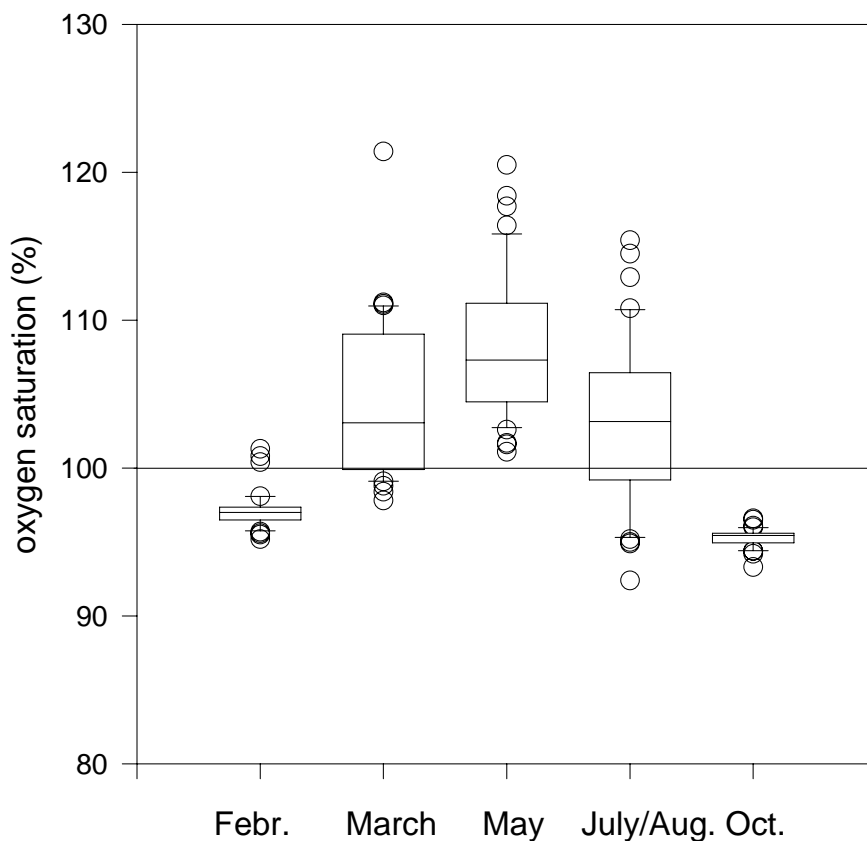


Abb. 19

Jahresgang der Sauerstoffsättigung (%) in der Oberflächenschicht (0 - 10 m) zwischen westlicher Ostsee und Gotlandbecken

Fig. 19 Annual cycle of oxygen saturation (%) in the surface layer (0 - 10 m) between western Baltic Sea and the Gotland Basin

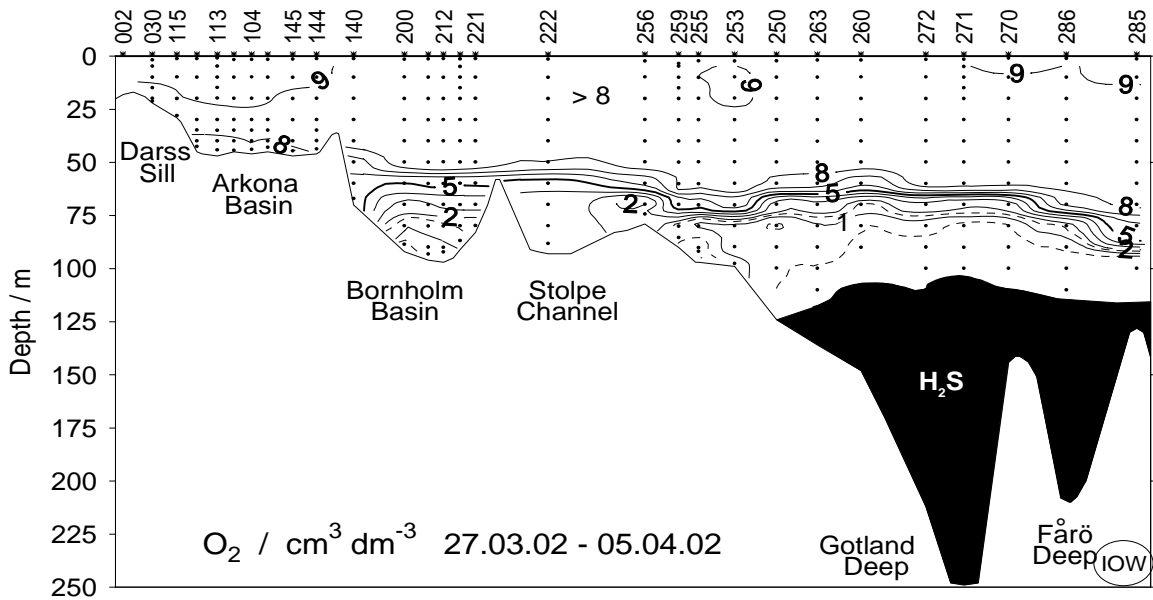
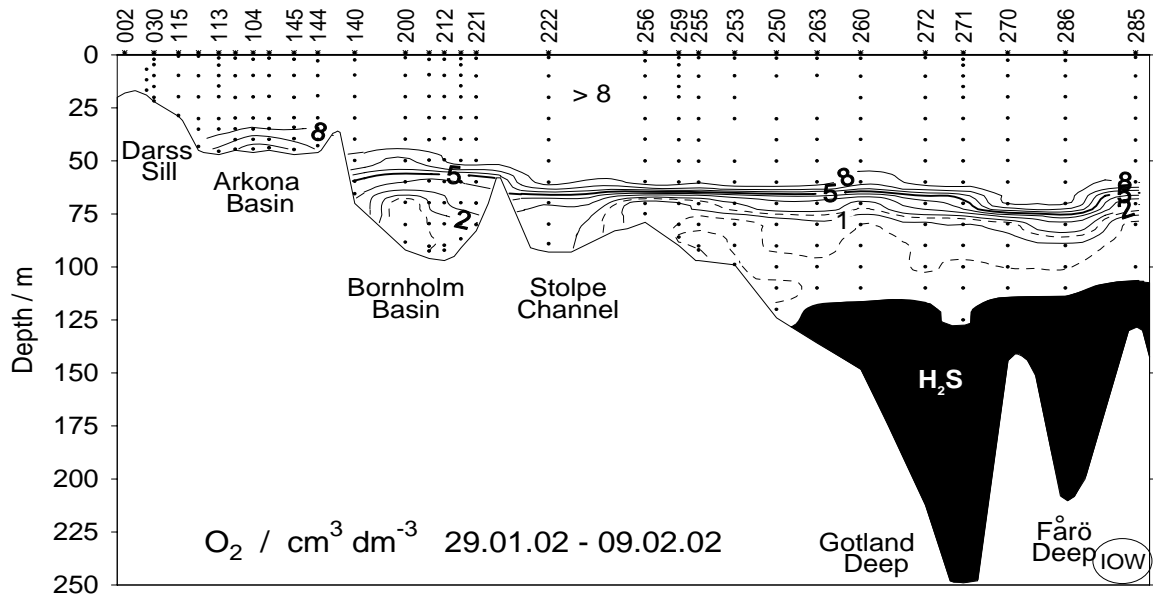


Abb. 20  
Vertikale Verteilung des Sauerstoff- und Schwefelwasserstoffgehaltes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 20  
Vertical distribution of oxygen resp. hydrogen sulphide between Darss Sill and northern Gotland Basin

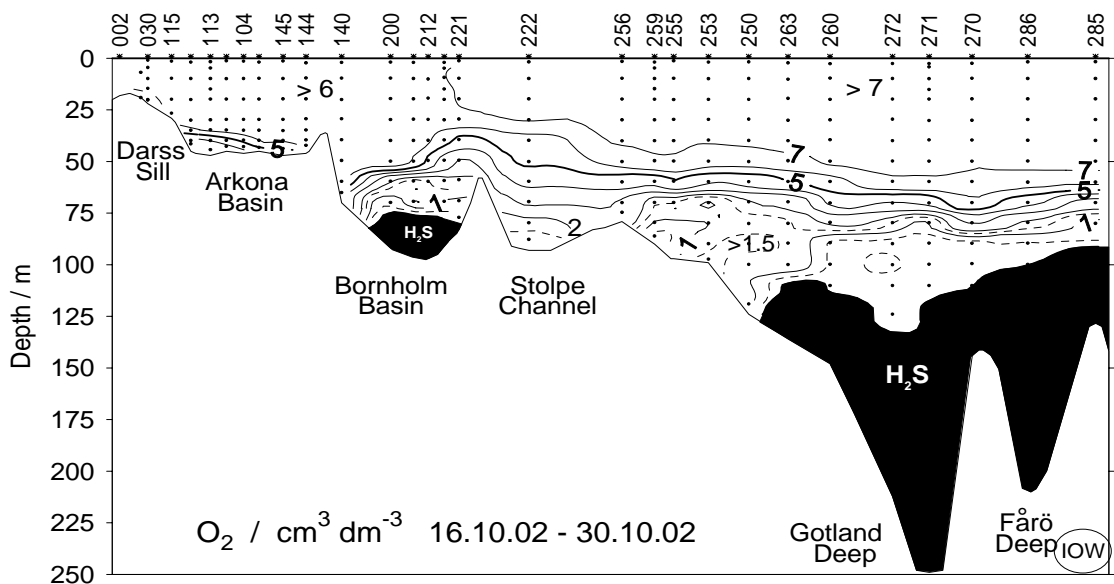
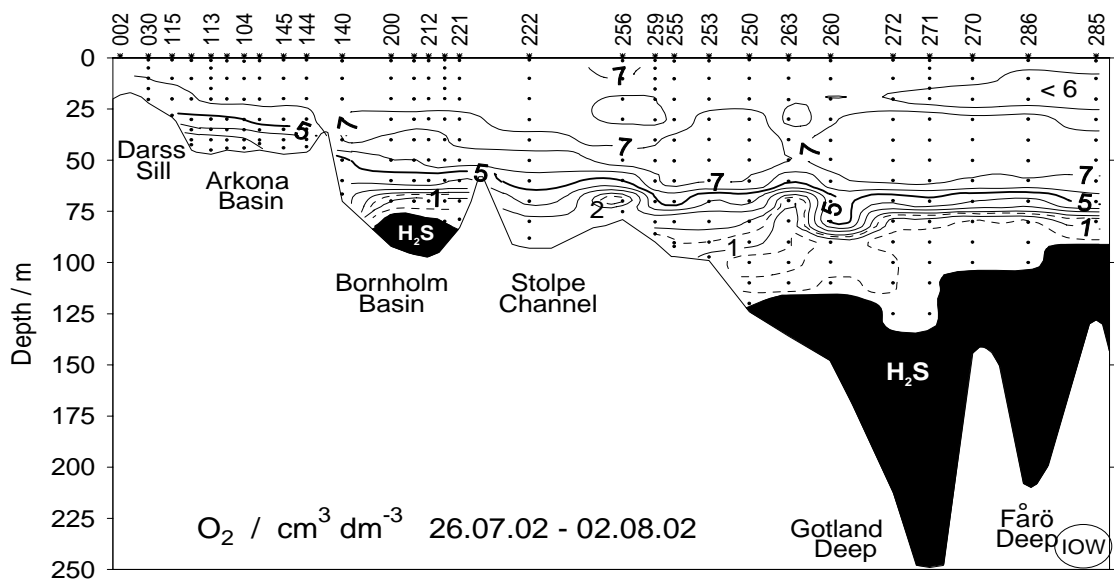
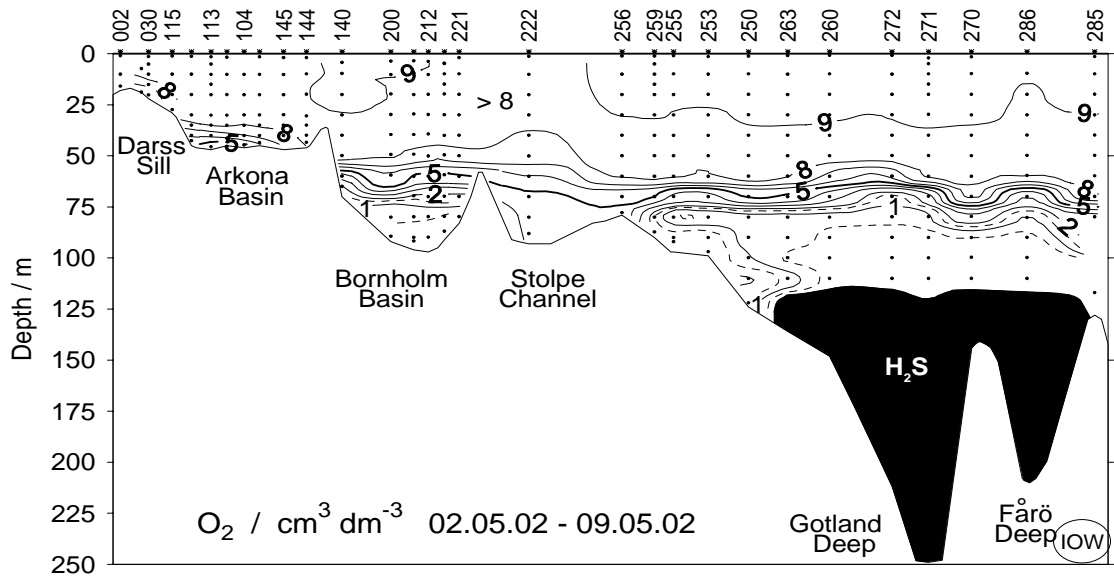


Abb. 20 Forts.

Fig. 20 cont.

Zur Beschreibung der Sauerstoffversorgung der durchmischten Oberflächenschicht gibt man in der Regel der Sauerstoffsättigung den Vorzug. Bei Betrachtung der Sauerstoffkonzentration treten typische jahreszeitliche Schwankungen auf, die im Wesentlichen temperaturdeterminiert, in der westlichen Ostsee auch salzgehaltsbeeinflusst sind. Die Sauerstoffsättigung eliminiert diese Einflüsse auf die Gaslöslichkeit und lässt eine bessere Vergleichbarkeit zu. In Abb. 19 sind die Sauerstoffsättigungswerte für die Untersuchungen des Jahres 2002 zusammengefasst. Hierbei wurden 38 Stationen berücksichtigt, die den Bereich von der westlichen Ostsee bis zum östlichen und westlichen Gotlandbecken umfassen. Abb. 19 verdeutlicht den typischen Jahresgang (MATTHÄUS et al., 2001b, NAUSCH et al., 2002). Im Februar und Oktober wird im gesamten Untersuchungsgebiet eine sehr einheitliche Situation angetroffen, regionale Unterschiede sind gering. Sowohl im Winter als auch im Herbst überwiegen sauerstoffverbrauchende Prozesse, so dass eine geringe Untersättigung auftritt. Das Sauerstoffdefizit beträgt im Februar im Mittel 3 %, im Oktober 5 %. Der Zeitraum von Frühjahr bis Sommer ist generell durch eine leichte Übersättigung der Oberflächenschicht charakterisiert. Ursache hierfür ist die intensive Primärproduktion. Auffällig ist auch die deutlich größere Schwankungsbreite der Messwerte, die auf die zeitlich unterschiedliche Entwicklung des Phytoplanktons zurückgeführt werden kann. In der westlichen Ostsee setzt die Frühjahrsblüte mit ihrer starken Sauerstoffproduktion in Abhängigkeit von den Witterungsbedingungen bereits im März ein. Zu dieser Zeit herrschen in der zentralen Ostsee noch winterliche Verhältnisse. Hier wird das Maximum der Frühjahrsentwicklung des Planktons erst im Mai registriert, wenn dieser Prozess in der westlichen Ostsee bereits abgeklungen ist. Im Sommer sind neben anderen Algenarten insbesondere die Blaualgen für Blütenbildungen verantwortlich. Sie treten räumlich sehr unterschiedlich auf und können somit auch den Sauerstoffgehalt des Oberflächenwassers sehr unterschiedlich beeinflussen. Der Sommer 2002 war auf Grund der warmen Wassertemperaturen und der ruhigen Witterungsbedingungen prädestiniert für die Entwicklung von Blaualgen. Große Gebiete waren von Oberflächenakkumulationen dieser Algen betroffen und die Intensität war vergleichbar mit dem Jahr 1997, in dem die bisher intensivsten Cyanobakterienblüten auftraten (HELCOM, 2003a). Die Sättigungswerte lagen im März im Mittel bei 104 %, im Mai bei 108 % und im August bei 103 %. Maximalwerte wurden im März in der westlichen Ostsee und im Mai im östlichen Gotlandbecken mit jeweils 120 % gemessen. Die für die Mitte der 1990er Jahre gefundenen extremen Übersättigungen von 40 – 60 % (NEHRING et al., 1995a, b) sind seither nicht mehr beobachtet worden.

Die tiefreichende Konvektion führt im Winter zu einem weitgehend homogenen Wasserkörper bis zum oberen Bereich der Haloklinen, was durch die Vertikalverteilung von Wassertemperatur und Salzgehalt belegt werden kann (Abb. 17 + 18). Hierbei kommt es ebenfalls zu einer intensiven Sauerstoffversorgung dieses Wasserkörpers, so dass Sauerstoffkonzentrationen  $>8$  ml/l die Regel sind. Mit Beginn der sommerlichen Erwärmung kommt es zur Herausbildung der Temperatursprungschicht, die das so genannte winterliche Zwischenwasser vom Vertikalaustausch ausschließt. Die winterlichen Bedingungen werden „konserviert“. Dieses Wasser ist durch ein Temperaturminimum (Abb. 17) und ein Sauerstoffmaximum (Abb. 19) gekennzeichnet, wobei das Sauerstoffmaximum ca. 10 – 20 m über dem Minimum der Temperatur liegt. Das Sauerstoffmaximum findet sich im Bornholmbecken in 30 m Wassertiefe, im östlichen Gotlandbecken kann es in 40 m lokalisiert werden (Tabelle 8). Vergleicht man nun die Sauerstoffkonzentrationen im Februar mit denen des Sommers (Tabelle 8), so können Aussagen über den Sauerstoffverbrauch in dieser Wasserschicht gezogen werden. Die Sauerstoffzehrung des Zwischenwassers ist auf Grund der geringen Mengen abbaubarer organischer Substanzen sehr niedrig und liegt nur bei 0.005 – 0.01 ml/l pro Tag. Im Bereich der Salzgehaltssprungschicht und besonders in der euphotischen Schicht muss in Abhängigkeit von der Jahreszeit mit deutlich höheren Zehrungsraten gerechnet werden. So wurden z.B. im Juli 2001 in der Oberflächenschicht



der östlichen Gotlandsee Zehrungsraten um 0.20 ml/l pro Tag gemessen. Kenntnisse der Zehrungsraten sind besonders wichtig, um die Dynamik der Sauerstoffverarmung tieferer Wasserschichten beschreiben zu können.

Tab. 8

Sauerstoffkonzentrationen (ml/l) ausgewählter Stationen im Bornholmbecken und im östlichen Gotlandbecken im Februar (0 – 30 m bzw. 40 m) und im Zwischenwasser im August (30 m bzw. 40 m)

Table 8

Oxygen concentrations (ml/l) of selected stations in the Bornholm Basin and eastern Gotland Basin in February (0 – 30 m resp. 40 m) and in the intermediate water in August (30 m resp. 40 m)

Bornholmbecken			Östliches Gotlandbecken		
Station	O <sub>2</sub> (m/l) Februar(0–30m)	O <sub>2</sub> (m/l) August (30m)	Station	O <sub>2</sub> (m/l) Februar(0–40m)	O <sub>2</sub> (m/l) August (40m)
200	8,65	7,32	253	8,73	7,79
211	8,62	7,02	250	8,68	7,85
212	8,65	7,02	263	8,64	6,87
213	8,64	7,43	260	8,58	7,73
221	8,62	7,31	272	8,50	7,76
220	8,65	7,49	271	8,49	7,54
210	8,61	7,30	270	8,50	7,60
214	8,56	7,42			
<b>Mittelwert</b>	<b>8,64 ± 0,03</b>	<b>7,29 ± 0,18</b>		<b>8,59 ± 0,10</b>	<b>7,59 ± 0,34</b>

Das Jahr 2002 war erneut durch eine nur geringe Intensität von Einstromereignissen von Wasser aus der Nordsee gekennzeichnet. Zusammen mit den Auswirkungen des Einstromes vom Herbst 2001 (FEISTEL et al., 2003a) konnten nur vier solcher Ereignisse registriert werden (vgl. Kapitel 2). Die Einstrome führten in der Regel zu deutlichen Effekten im Bornholmbecken, ihre Auswirkungen in den tieferen Becken waren gering.

So verursachte der Einstrom im Oktober/November 2001 einen starken Anstieg des Sauerstoffgehaltes im Bodenwassers des Bornholmtiefs von -0.98 ml/l am 14. November 2001 auf 4.68 ml/l am 11. Dezember 2001. Am 3. Januar 2002 erreichte dieser Einstrom relativ warmen Wassers das östliche Gotlandbecken, was autonome Temperaturregistrierungen belegen (FEISTEL et al., 2003a). Kurzzeitig kam es zu einer Sauerstoffzufuhr im Bereich des Gotlandtiefs, die einen Rückgang der Schwefelwasserstoffkonzentrationen bewirkte.

Am 14. Januar wurden zwischen 225 m und dem Boden sogar Sauerstoffkonzentrationen von 0,70 – 0,80 ml/l gemessen. Die Auswirkungen blieben jedoch nur von kurzer Dauer und bereits im Mai 2002 wurden wieder Schwefelwasserstoffkonzentrationen wie vor dem Einstrom gemessen (Abb. 21). Somit hat sich die seit 1995 anhaltende Stagnationsperiode (NEHRING et al., 1995c) in der zentralen Ostsee unvermindert fortgesetzt. Dies wird auch durch den höchsten Jahresmittelwert des Schwefelwasserstoffgehaltes seit 1993 belegt (Tabelle 6).

Erwähnenswert ist weiterhin der eigentlich sehr kleine Einstrom extrem warmen Wassers in der 2. Oktoberhälfte 2002 (vgl. Kapitel 2). Überraschenderweise konnten seine Auswirkungen nicht nur im Tiefenwasser des Bornholmbeckens beobachtet werden. Rasch führte der Einstrom zu einem Wechsel der Redoxverhältnisse im Danziger Tief, wo im November 1.63 ml/l gemessen wurden nachdem im September noch anoxische Bedingungen vorlagen (-3.35 ml/l). Beprobungen im Jahr 2003 deuten darauf hin, dass die Auswirkungen dieses Einstromes sogar bis ins Gotlandbecken verfolgt werden können. Auch im westlichen Gotlandbecken hält die bereits in den Vorjahren beschriebene Stagnationsperiode (MATTHÄUS et al., 2001b, NAUSCH et al., 2002) an. Im Landsorttief waren im gesamten Jahresverlauf nur geringfügige Veränderungen zu beobachten. Der Wasserkörper war zwischen 125 m und dem Boden durchweg anoxisch. Die Schwefelwasserstoffkonzentration stieg im Jahresmittel nochmals an und erreichte im 400 m-Horizont den höchsten Wert (Tabelle 6). Auch für das Karlsötief wurde zum zweiten Mal nach 2001 (NAUSCH et al., 2002) ein negativer Jahresmittelwert errechnet (Tabelle 6), wenngleich hier die Fluktuationen deutlich größer waren und zwischenzeitlich auch oxische Verhältnisse auftraten.

Jedoch nicht nur die Tiefenbecken der Ostsee sind von Sauerstoffarmut und dem Auftreten von Schwefelwasserstoff betroffen. Auch in den flachen Gewässern vor der deutschen und dänischen Küste kommt es alljährlich im Sommer und Herbst im Bodenbereich zu Sauerstoffdefiziten. Die Ursachen sind zum einen natürlicher Art. Die starke Erwärmung des Oberflächenwassers, verbunden mit ruhigen Wetterlagen und eine Übersichtung salzreichen Wassers am Boden mit salzärmerem Wasser an der Oberfläche führen zu einer äußerst stabilen thermohalinen Schichtung, die über einen recht langen Zeitraum aufrecht erhalten werden kann und sich meist erst im Herbst mit zunehmender Abkühlung des Oberflächenwassers und windbedingter Durchmischung auflöst. Die Schichtung verhindert den vertikalen Austausch, mikrobielle Abbauprozesse führen zur Sauerstoffverarmung, die im Extremfall bis zur Bildung von Schwefelwasserstoff führen kann. Länger anhaltender Sauerstoffmangel kann zum großflächigen Absterben der Bodenlebewesen wie Muscheln, Schnecken und Würmer und auch zu Fischsterben führen. Diese Situation kann durch anthropogene Einflüsse erheblich verstärkt werden. Der erhöhte Eintrag von Nährstoffen verursacht eine erhöhte planktische Produktion und eine nachfolgende verstärkte Mineralisation unter Sauerstoffverbrauch.

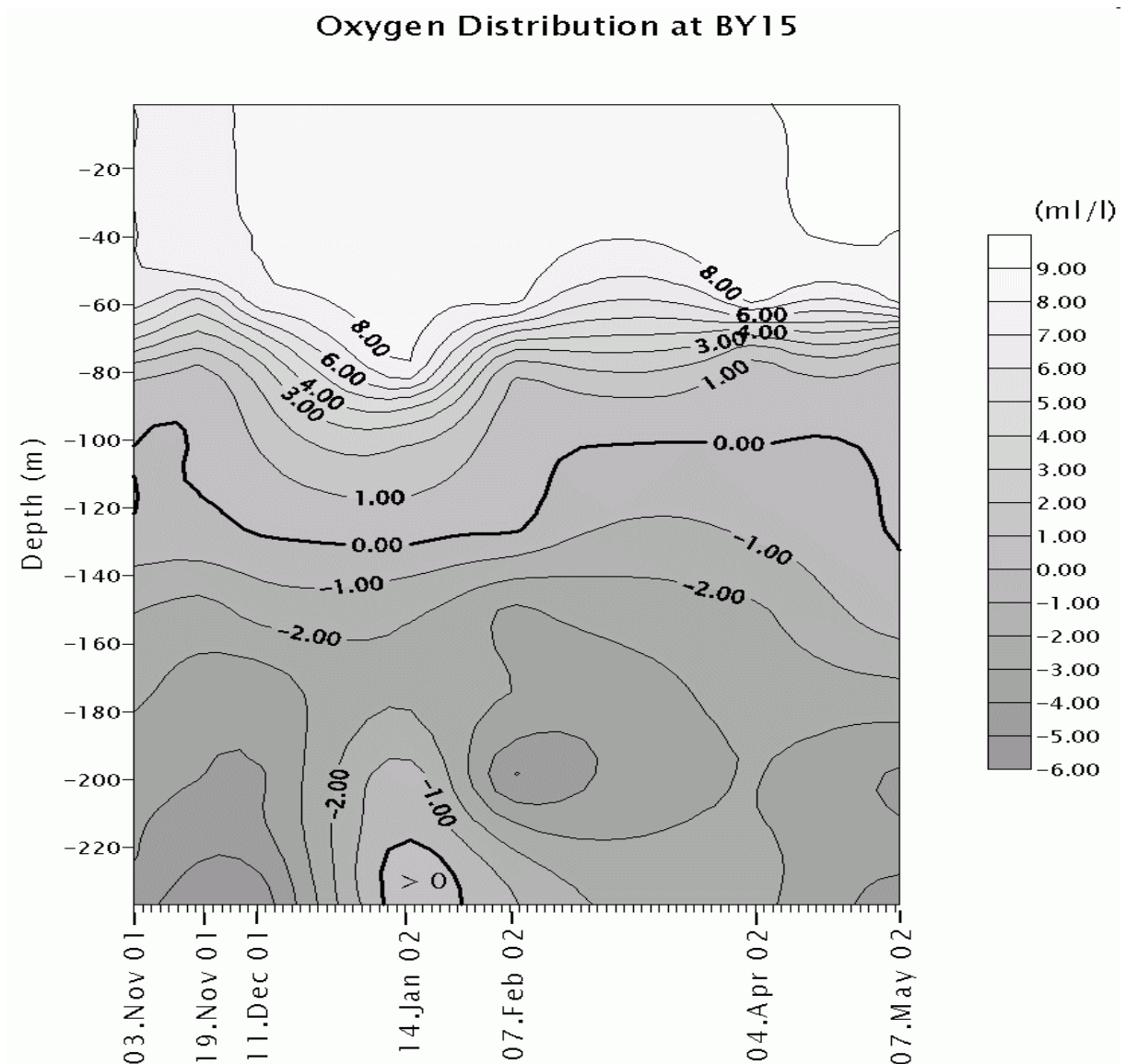


Abb. 21

Sauerstoffverteilung im östlichen Gotlandbecken (BY 15) zwischen 9. November 2001 und 7. Mai 2002. Beachte, dass die Graphik eine Interpolation aus diskreten Messungen darstellt, und rasche Gradienten, wie sie z.B. am 3. Januar 2002 erwartet werden, nicht widerspiegelt

Fig 21

Oxygen distribution in the eastern Gotland Basin (BY 15) between November 3<sup>rd</sup>, 2001, and May 7<sup>th</sup>, 2002. Note that the graph is interpolated between subsequent measurements and does not reflect, for example, the steep gradient to be actually expected on January, 3<sup>rd</sup>

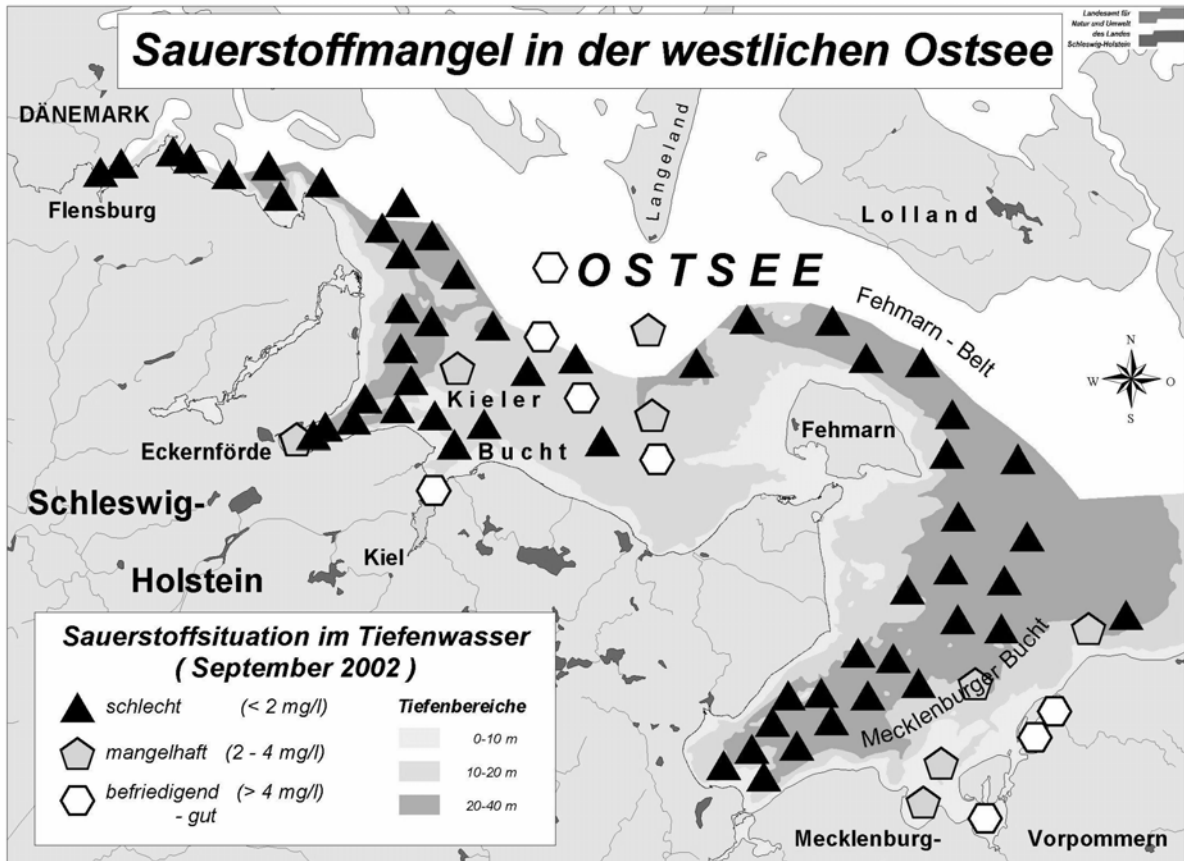


Abb. 22

Sauerstoffmangel in der westlichen Ostsee im September 2002 (LANU 2002)  $\text{mg/l} * 0.7005 = \text{ml/l}$

Fig. 22

Oxygen deficiency in the western Baltic Sea in September 2002 (LANU 2002)  $\text{mg/l} * 0.7005 = \text{ml/l}$

Der Sommer und Herbst 2002 stellten bezüglich dieser Prozesse eine Extremsituation dar. Starke Sonneneinstrahlung und nur schwache Winde bis weit in den September hinein führten zu einer starken Erwärmung des Oberflächenwassers und Schichtung des gesamten Wasserkörper (vgl. Kapitel 2). Die biologische Produktivität wurde zusätzlich verstärkt durch übernormale Nährstoffeinträge (LUNG 2000a), vor allem in Folge der erheblichen Niederschlagsmengen im Winter und Frühjahr (Tabelle 2). Im Ergebnis dieser Entwicklung herrschte im September in weiten Teilen der westlichen Ostsee, insbesondere vor der dänischen und schleswig-holsteinischen Küste extremer Sauerstoffmangel in Bodennähe (Abb. 22), verbreitet kam es zum Auftreten von Schwefelwasserstoff. Auch die Bereiche vor der Küste Mecklenburg-Vorpommerns waren im westlichen Teil betroffen. Die östliche Begrenzung des Sauerstoffmangelgebietes kann mit dem Bereich der Darßer Schwelle angegeben werden, wo in Bodennähe zwischen dem 11. und 15. September ebenfalls nur ca. 1ml/l Sauerstoff gefunden wurde. Die Flachwasserbereiche der Pommernbucht waren im Sommer/Herbst 2002 nicht von diesen Ereignissen betroffen.

## 5.4 Anorganische Nährstoffe

Weltweit stellt die Eutrophierung nach wie vor eines der ernstesten Probleme der Umweltbelastung dar, wie eine jüngste Erhebung belegt (GIWA, 2003). Betroffen sind sowohl zahlreiche limnische Systeme als auch Küstenregionen in Brasilien, Australien und Südostasien. Einen weiteren Schwerpunkt stellen mehr oder weniger abgeschlossene Meeresgebiete in Europa dar (GIWA, 2003). Es muss hinzugefügt werden, dass diese Erfassung noch nicht abgeschlossen ist, somit weitere Gebiete hinzukommen werden. Auch für die Ostsee ist die Eutrophierung weiterhin eines der gravierendsten Probleme (HELCOM, 2003a). Für den Prozess der Eutrophierung existieren zahlreiche Definitionen. Gemeinsam ist ihnen, dass eine verstärkte Zufuhr von Pflanzennährstoffen zu einer erhöhten Produktion von organischer Substanz im Gewässer mit entsprechenden nachteiligen Folgen führt (NIXON, 1995). Häufig wird auch darauf hingewiesen, dass im Gegensatz zur sehr langsam verlaufenden natürlichen Eutrophierung, die gegenwärtige rasante Eutrophierung im Wesentlichen anthropogen verursacht ist. Menschliche Aktivitäten in den Einzugsgebieten (kommunale Nutzungen, Landwirtschaft, Industrie) führen zu einer vermehrten Nährstoffzufuhr in die aquatischen Systeme (EUTROSYM, 1976). Folgerichtig ist die Überwachung der Nährstoffkonzentrationen in der Ostsee, vor allem der Konzentrationen von Phosphat und Nitrat im Oberflächenwasser, im anoxischen Tiefenwasser auch des Ammoniums, von Beginn an Kernbestandteil des Umweltüberwachungsprogramms der Helsinki-Kommission (HELCOM, 1980). Zunehmend findet auch das Silikat als essentieller Bestandteil für das Wachstum von Diatomeen Beachtung (RAHM et al., 1996, KUOSA et al., 1997, MATTHÄUS et al., 1997, 2001b). In den Abb. 23 und 24 sind die Verteilungen von Phosphat und Nitrat für das Jahr 2002 entlang des Hauptschnittes durch die Ostsee für die 5 untersuchten Zeiträume dargestellt. Beachtet werden muss, dass im anoxischen Tiefenwasser das Ammonium das Endprodukt der Mineralisation darstellt und dort an die Stelle des Nitrats tritt. Nitrit stellt ein Intermediat im Prozess der Nitrifikation bzw. Denitrifikation dar und ist normalerweise nur in vergleichsweise geringen Konzentrationen vorhanden. Im Sommer bildet sich jedoch in der Regel ein Maximum oberhalb der Haloklinen aus, das gleichzeitig mit einer Anreicherung von Ammonium verbunden ist. Aus den Abb. 23 und 24 ist ersichtlich, dass die anorganischen Nährstoffe in der Oberflächenschicht den für die gemäßigten Breiten typischen Jahresgang aufweisen. Lichtlimitation und die Dominanz abbauender Prozesse führen zu einer Nährstoffanreicherung im Winter. Vor allem in der zentralen Ostsee bildet sich hier ein winterliches Plateau, das für Trendaussagen genutzt wird. (NEHRING and MATTHÄUS, 1991; NAUSCH and LYSIK-PASTUSZAK, 2003). Zum Frühjahr hin nehmen die Nährstoffe rasch ab, wobei das Nitrat auf Grund des geringen Redfield-Verhältnisses (REDFIELD et al., 1963; MATTHÄUS et al., 2001b) deutlich schneller verbraucht wird als das Phosphat. Nach Ende der Produktionsperiode steigen die Nährstoffkonzentrationen zum Herbst und Winter hin wieder an.

In Abb. 25 ist der Jahresgang des Phosphats für zwei ausgewählte Regionen dargestellt. Im Bereich des östlichen Gotlandbeckens (Farötief, St. 286) findet sich der schon vielfach beschriebene Jahresgang (NAUSCH and NEHRING, 1996; MATTHÄUS et al., 2001b). Nach der Frühjahrsblüte verbleiben im Mai noch deutlich messbare Phosphatkonzentrationen um 0.1  $\mu\text{mol/l}$  erhalten. Zu diesem Zeitpunkt befinden sich die Nitratkonzentrationen schon im Bereich der Nachweisgrenze. Im weiteren Jahresverlauf gehen dann die Phosphatwerte ebenfalls stark zurück. Dieser Zeitraum ist durch Phosphatlimitation gekennzeichnet, da Cyanobakterien das Plankton dominieren, die atmosphärischen Stickstoff fixieren können (WASMUND et al., 2001, NAUSCH et al., 2003). Unterstützt durch die sehr warme und ruhige Witterungssituation im Sommer konnten auch 2002 äußerst intensive Cyanobakterienblüten beobachtet werden (HELCOM, 2003a). Ein vom normalen Jahresverlauf abweichendes Bild wurde in weiten Bereichen der Bornholmsee und der südlichen Gotlandsee beobachtet (Abb. 25, St. 213). Nachdem sich das winterliche Plateau normal aufgebaut

hatte, führte die Frühjahrsblüte nur zu einem moderaten Rückgang des Phosphats. Im Mai waren noch Konzentrationen um  $0.3 \mu\text{mol/l}$  verblieben, auch im weiteren Jahresgang waren stets messbare Konzentrationen vorhanden. Die Nachweisgrenze wurde bei keiner der Messungen erreicht. Die Ursachen für diese Entwicklung sind noch nicht eindeutig geklärt. Das Frühjahr 2002 war durch deutlich erhöhte Niederschläge charakterisiert (vgl. Kapitel 2). Da das Phosphat zunehmend auch aus diffusen Quellen stammt, könnte ein verstärktes Abflussgeschehen eine erhöhte Versorgung des Gewässers mit Phosphat bewirkt haben.

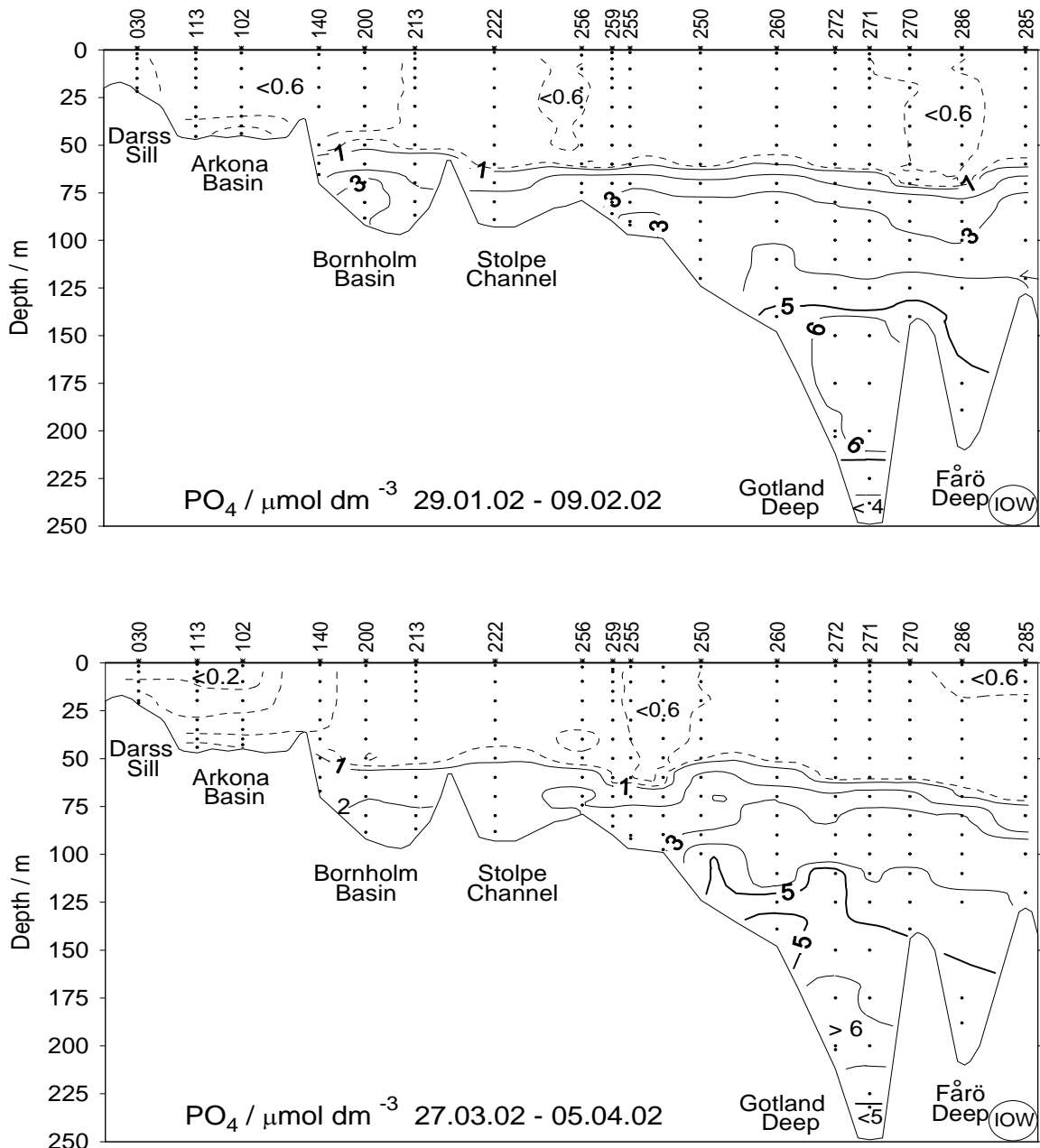


Abb. 23  
Vertikale Verteilung des Phosphatgehaltes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 23  
Vertical distribution of phosphate between Darss Sill and northern Gotland Basin

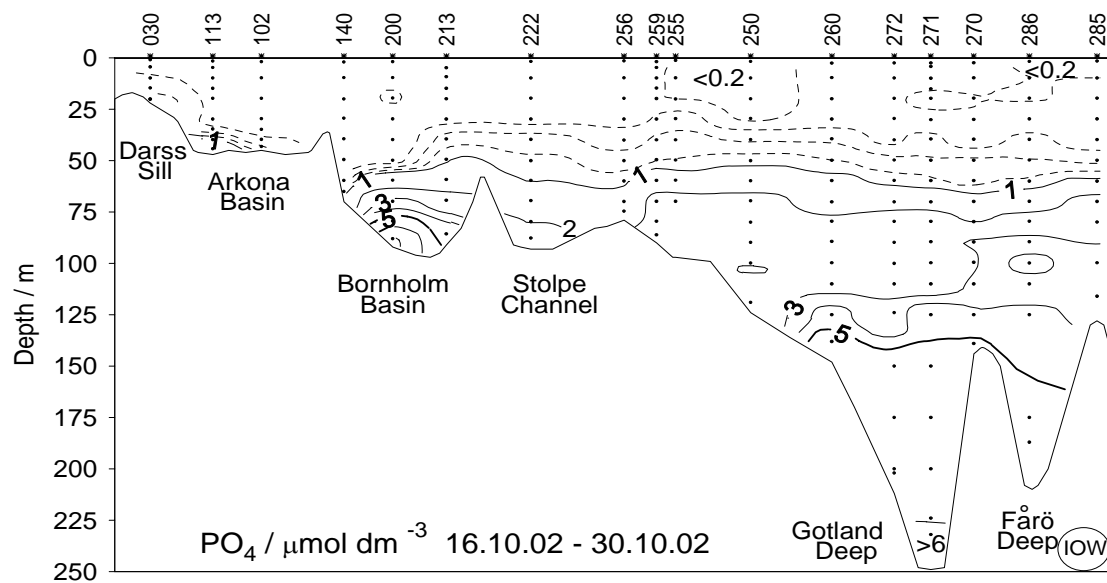
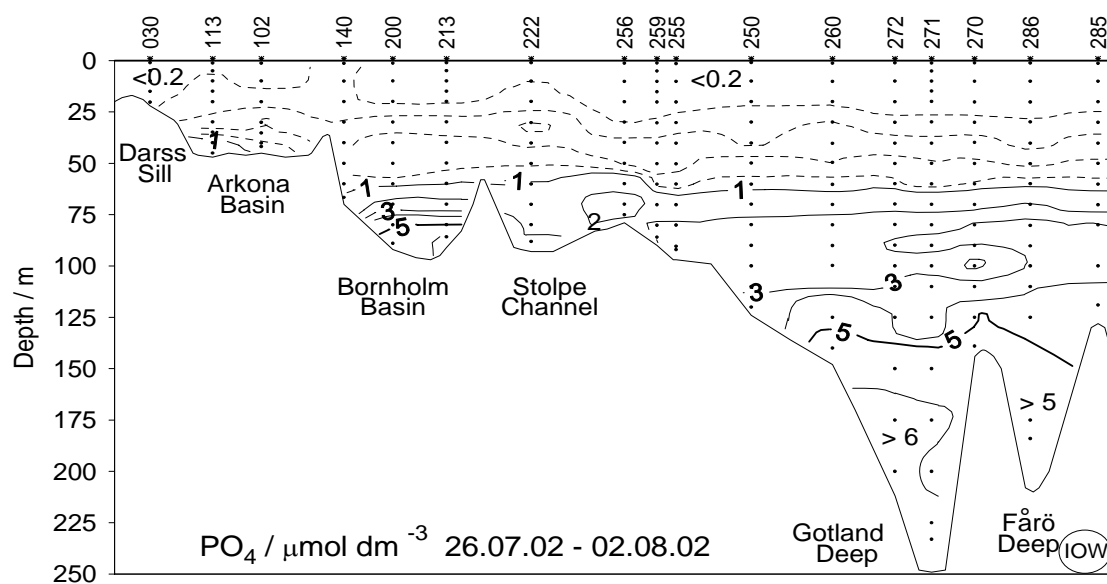
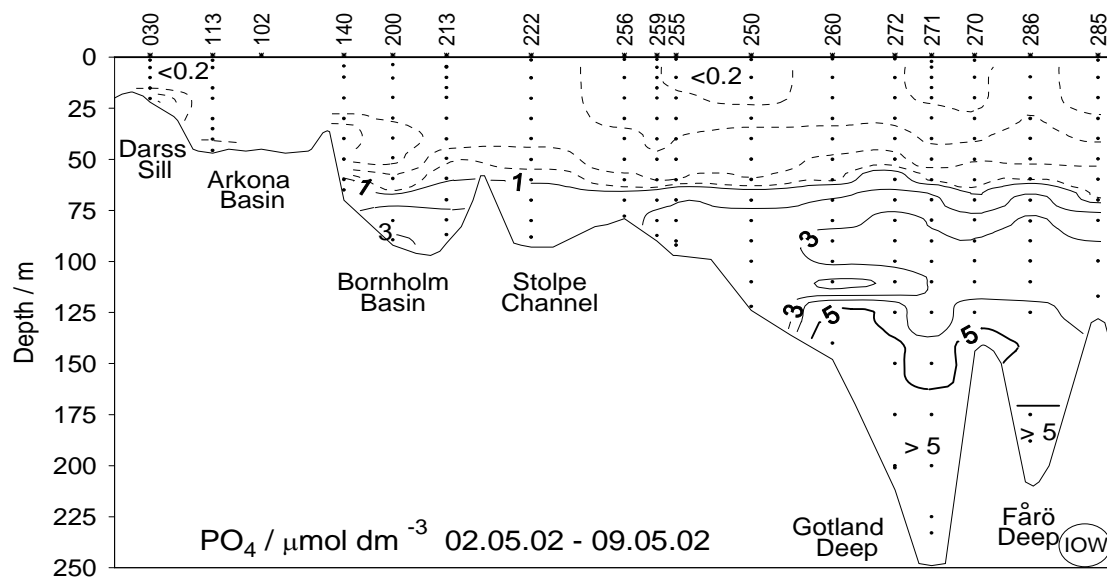


Abb. 23 Forts.

Fig. 23 cont.

Auch eine zusätzliche Versorgung aus dem Tiefenwasser durch intensive Auftriebsprozesse ist denkbar. Hier muss allerdings berücksichtigt werden, dass im Tiefenwasser des Bornholmbeckens in der 1. Hälfte des Jahres 2002 oxische Verhältnisse und somit der Phosphatgehalt vergleichsweise gering war. In den Folgejahren ist aufmerksam zu beobachten, ob sich diese Entwicklung, die im Jahr 2002 räumlich begrenzt war, wiederholt und möglicherweise ausbreitet, da ausreichende Phosphatvorräte eine potentielle Quelle für intensivierete Cyanobakterienblüten darstellen.

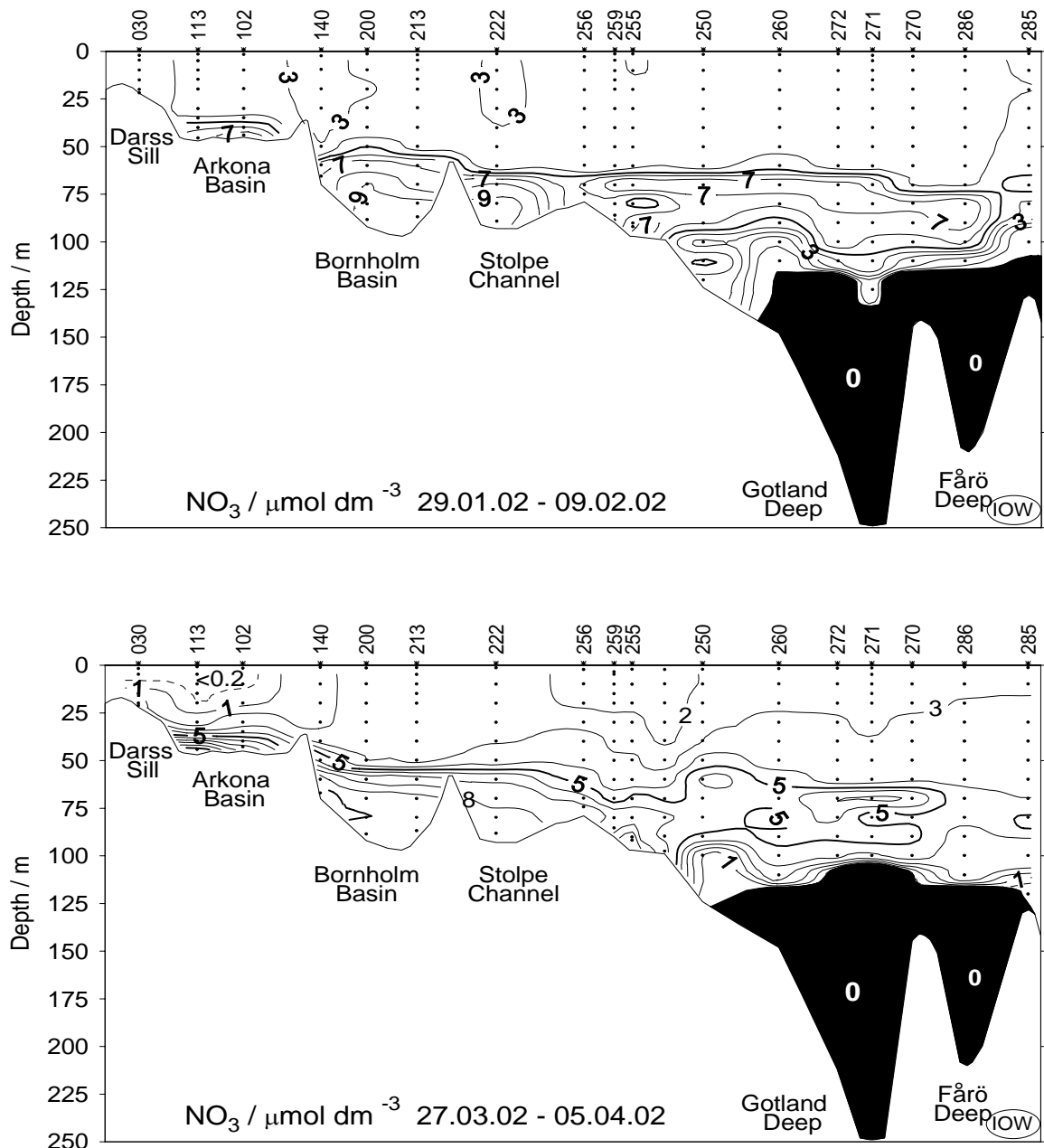


Abb. 24

Vertikale Verteilung des Nitratgehaltes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 24

Vertical distribution of nitrate between Darss Sill and northern Gotland Basin



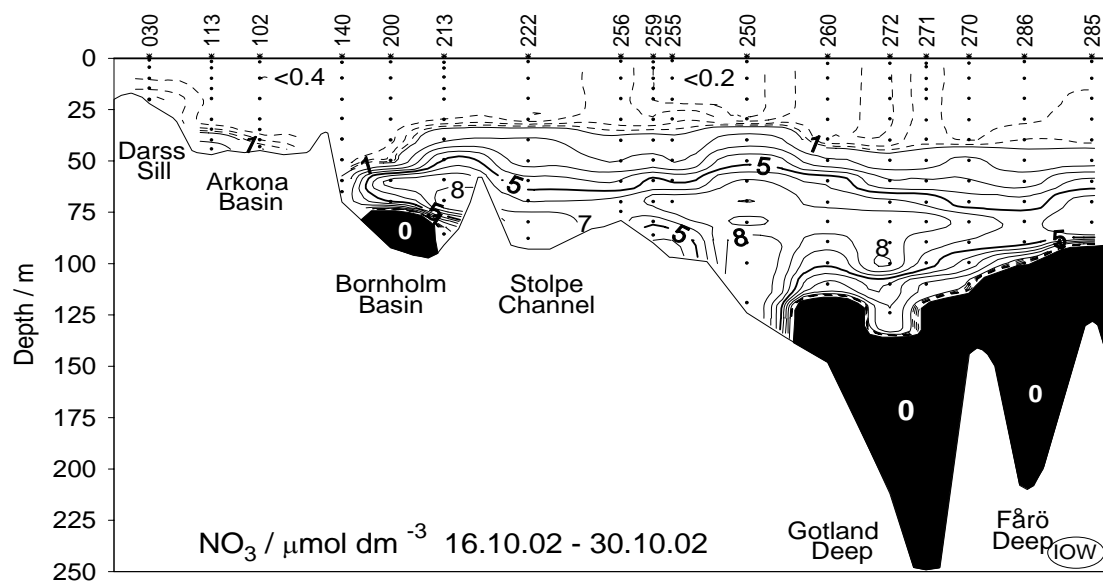
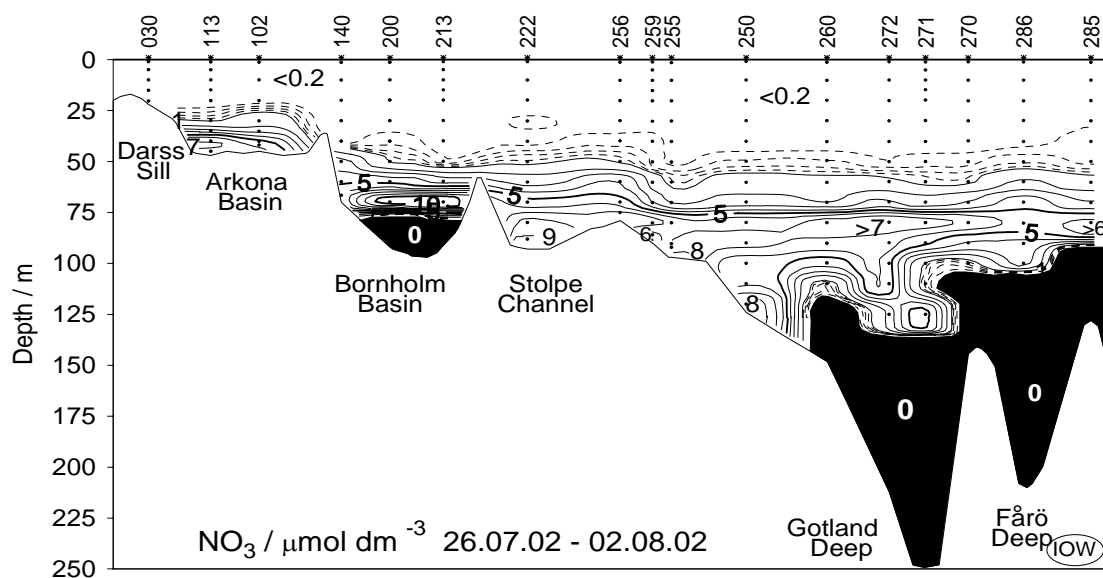
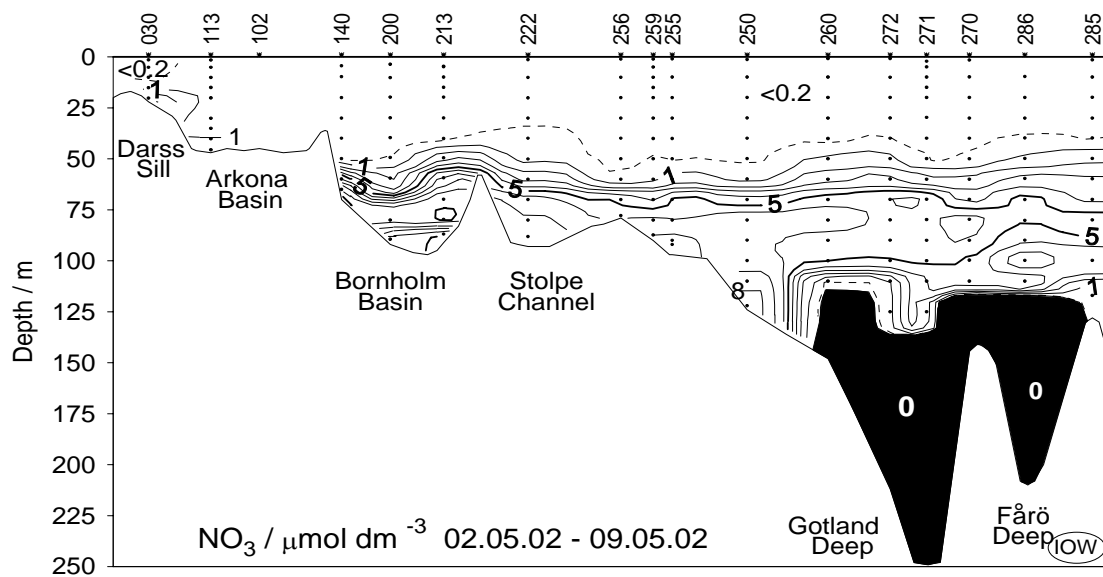


Abb. 24 Forts.

Fig. 24 cont.

Tab. 9

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

Table 9

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

<b>Phosphat (<math>\mu\text{mol/l}</math>)</b>						
Station	Monat	1998	1999	2000	2001	2002
<b>023</b> (Lübecker Bucht)	Feb.	0,64 $\pm$ 0,01	<b>0,63 <math>\pm</math> 0,01</b>	0,67 $\pm$ 0,02	<b>0,63 <math>\pm</math> 0,02</b>	0,64 $\pm$ 0,04
<b>012</b> (Meckl. Bucht)	Feb.	0,66 $\pm$ 0,01	<b>0,61 <math>\pm</math> 0,02</b>	0,70 $\pm$ 0,02	0,70 $\pm$ 0,02	0,64 $\pm$ 0,00
<b>162</b> (Pommersche Bucht)	Feb.	0,66 $\pm$ 0,01	0,64 $\pm$ 0,01	0,58 $\pm$ 0,01	0,76 $\pm$ 0,02	<b>0,52 <math>\pm</math> 0,00</b>
<b>113</b> (Arkonasee)	Feb.	<b>0,40 <math>\pm</math> 0,01</b>	0,49 $\pm$ 0,01	0,56 $\pm$ 0,02	0,54 $\pm$ 0,02	0,50 $\pm$ 0,00
<b>213</b> (Bornholmtief)	Feb.	<b>0,46 <math>\pm</math> 0,01</b>	0,56 $\pm$ 0,01	0,75 $\pm$ 0,00	0,71 $\pm$ 0,00	0,62 $\pm$ 0,00
<b>271</b> (Gotlandtief)	Feb. Apr.	0,49 $\pm$ 0,01 0,52 $\pm$ 0,01	0,49 $\pm$ 0,04 <b>0,42 <math>\pm</math> 0,02</b>	0,70 $\pm$ 0,01 0,67 $\pm$ 0,00	<b>0,40 <math>\pm</math> 0,01</b> -	0,60 $\pm$ 0,01 0,70 $\pm$ 0,02
<b>286</b> (Fårötief)	Feb. Mär.	0,49 $\pm$ 0,01 <b>0,47 <math>\pm</math> 0,01</b>	0,46 $\pm$ 0,02 0,50 $\pm$ 0,00	0,65 $\pm$ 0,00 0,57 $\pm$ 0,00	<b>0,39 <math>\pm</math> 0,01</b> -	0,60 $\pm$ 0,01 0,58 $\pm$ 0,01
<b>284</b> (Landsorttief)	Feb. Mär.	0,42 $\pm$ 0,03	0,38 $\pm$ 0,01 0,39 $\pm$ 0,01	0,65 $\pm$ 0,00 0,64 $\pm$ 0,00	<b>0,37 <math>\pm</math> 0,01</b>	0,68 $\pm$ 0,01 -
<b>245</b> (Karlsötief)	Feb.	<b>0,47 <math>\pm</math> 0,01</b>	0,54 $\pm$ 0,00	0,75 $\pm$ 0,01	0,49 $\pm$ 0,01	0,68 $\pm$ 0,01

Betrachtet man die zeitliche Entwicklung der winterlichen Konzentrationen für Phosphat und Nitrat (Tab. 9), wird deutlich, dass in den zurückliegenden 5 Jahren keine eindeutige Entwicklung zu beobachten ist. Minimalwerte waren in nahezu allen Jahren zu finden. Bezieht man jedoch die Jahresreihe seit 1990 in die Betrachtung ein (MATTHÄUS et al., 2001a), zeigen sich für das Phosphat Unterschiede. Bis Mitte der 1990er Jahre waren die Küstenbereiche (Lübecker Bucht, Mecklenburger Bucht, Pommersche Bucht) durch Phosphatkonzentration um 1  $\mu\text{mol/l}$  im Februar gekennzeichnet. Der Bau von Kläranlagen hat zum deutlichen Rückgang des Eintrags aus Punktquellen geführt. Das spiegelt sich in den entsprechenden Konzentrationen wieder, die nun im Mittel um 0,6  $\mu\text{mol/l}$  liegen. Auch in der zentralen Ostsee war im genannten Zeitraum ein leichter Rückgang der Konzentrationen zu beobachten. Dieser Trend setzt sich jedoch in den letzten Jahren nicht fort (Tabelle 9). Analysiert man die Datenreihen seit Beginn der 1980er Jahre konnte für Phosphat in 8 von 12 untersuchten Ostseegebieten eine statistisch belegter Rückgang gefunden werden (HELCOM, 2003a).

Tabelle 9 (Fortsetzung)

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

Station	Monat	1998	1999	2000	2001	2002
<b>023</b> (Lübecker Bucht)	Feb.	12,0 $\pm$ 1,0	9,0 $\pm$ 0,1	7,2 $\pm$ 0,1	<b>5,1 <math>\pm</math> 0,2</b>	5,3 $\pm$ 0,1
<b>012</b> (Meckl. Bucht)	Feb.	6,6 $\pm$ 0,0	7,9 $\pm$ 0,1	7,1 $\pm$ 0,1	<b>4,6 <math>\pm</math> 0,0</b>	5,4 $\pm$ 0,1
<b>162</b> (Pommersche Bucht)	Feb.	14,1 $\pm$ 0,4	14,8 $\pm$ 0,2	<b>5,1 <math>\pm</math> 0,1</b>	8,2 $\pm$ 0,0	5,7 $\pm$ 0,0
<b>113</b> (Arkonasee)	Feb.	3,1 $\pm$ 0,0	4,4 $\pm$ 0,0	4,2 $\pm$ 0,0	3,4 $\pm$ 0,0	<b>3,3 <math>\pm</math> 0,0</b>
<b>213</b> (Bornholmtief)	Feb.	<b>3,1 <math>\pm</math> 0,0</b>	3,8 $\pm$ 0,0	3,9 $\pm$ 0,0	3,3 $\pm$ 0,0	3,2 $\pm$ 0,0
<b>271</b> (Gotlandtief)	Feb.	3,7 $\pm$ 0,1	4,2 $\pm$ 0,0	4,5 $\pm$ 0,1	<b>3,3 <math>\pm</math> 0,0</b>	3,4 $\pm$ 0,0
	Apr.	3,3 $\pm$ 0,0	4,1 $\pm$ 0,1	4,2 $\pm$ 0,0	-	
<b>286</b> (Färötief)	Feb.	3,7 $\pm$ 0,0	3,5 $\pm$ 0,1	5,2 $\pm$ 0,0	<b>3,3 <math>\pm</math> 0,0</b>	3,8 $\pm$ 0,0
	Mär.	3,2 $\pm$ 0,1	4,5 $\pm$ 0,1	4,6 $\pm$ 0,0	-	
<b>284</b> (Landsortief)	Feb.	4,2 $\pm$ 0,1	<b>3,6 <math>\pm</math> 0,1</b>	4,7 $\pm$ 0,0	4,0 $\pm$ 0,0	4,3 $\pm$ 0,0
	Mär.		4,4 $\pm$ 0,0	4,3 $\pm$ 0,0	-	
<b>245</b> (Karlsötief)	Feb.	<b>3,1 <math>\pm</math> 0,0</b>	<b>3,1 <math>\pm</math> 0,0</b>	4,2 $\pm$ 0,0	3,7 $\pm$ 0,0	<b>3,1 <math>\pm</math> 0,1</b>

Die Einträge der anorganischen Stickstoffverbindungen sind in noch stärkerem Maße auf diffuse Quellen zurückzuführen. Somit ist hier eine sehr starke Bindung an das Abflussgeschehen gegeben (NAUSCH et al., 1999; MEYER and LAMPE, 1999). Für das Nitrat konnten demzufolge seit Beginn der 1990er Jahre keine signifikanten Veränderungen festgestellt werden. Auch die längere Datenreihe (HELCOM, 2003a) zeigt nur für das nördliche Gotlandbecken eine signifikante Abnahme. Es muss bemerkt werden, dass große Mengen von Stickstoff auch über die Atmosphäre in die Ostsee gelangen (HELCOM, 1997) und auch durch die Cyanobakterien große Mengen Stickstoff aus der Atmosphäre gebunden werden (WASMUND et al., 2001).

Die Nährstoffsituation im Tiefenwasser kann ebenfalls aus den Abb. 23 und 24 entnommen werden. Auch im Jahr 2002 waren keine intensiven Einstromvorgänge zu beobachten. Der Einstrom vom Oktober/November 2001 (vgl. Kapitel 5.3), der zu einem kurzzeitigen Rückgang der Schwefelwasserstoffkonzentrationen im Bereich des Gotlandtiefs geführt hat (Abb. 21), hat auf die Nährstoffkonzentrationen im Tiefenwasser keine nennenswerten Auswirkungen. Im Jahresmittel wurden für Phosphat sogar die höchsten Konzentrationen der gegenwärtigen Stagnationsperiode registriert (Tabelle 10). Gleiches gilt für die Ammoniumkonzentrationen, die mit 19,7  $\mu\text{mol/l}$  im Mittel bereits wieder in die Nähe des Wertes aus dem Jahr 1992 von 26,7  $\mu\text{mol/l}$  gelangen (MATTHÄUS et al., 20001a).

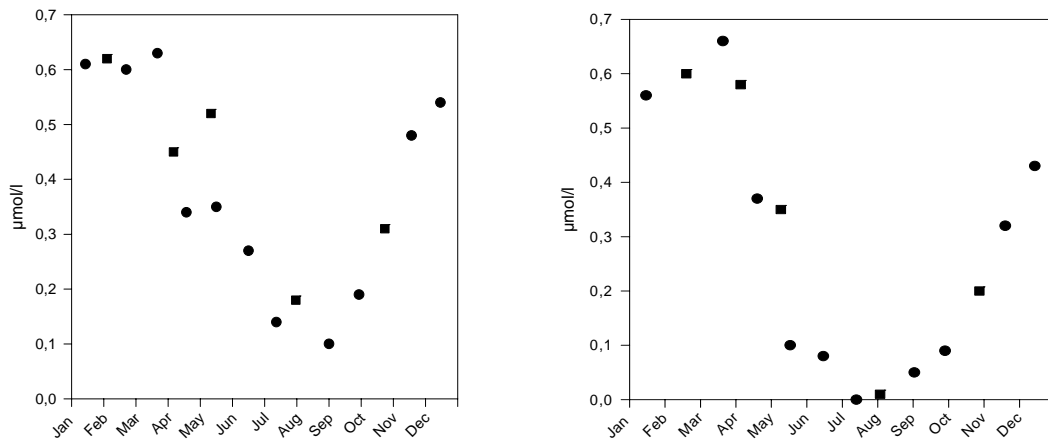


Abb. 25

Phosphatjahresgang 2002 im Oberflächenwasser der Bornholmsee (Station 213) (links) und der östlichen Gotlandsee (Farötief, Station 286) (rechts) - ■ IOW-Daten; ● SMHI-Daten

Fig. 25

Annual phosphate cycle 2002 in the surface layer of the Bornholm Sea (station 213) (left) and the eastern Gotland Sea (Farö Deep, station 286) (right) - ■ IOW-data; ● SMHI-data

Tab. 10

Jahresmittelwerte und Standardabweichungen von Nährstoffen im Tiefenwasser der zentralen Ostsee: IOW- sowie SMHI- Daten (n = 9-20)

Table 10

Annual means and standard deviations for phosphate, nitrate and ammonium in the deep water of the central Baltic: IOW- and SMHI- data (n = 9-20)

**Phosphat (µmol/l; Maximalwerte hervorgehoben)**

Station	Tiefe/m	1998	1999	2000	2001	2002
<b>213</b> (Bornholmtief)	80	<b>5,10 ± 2,18</b>	4,86 ± 1,72	3,07 ± 1,84	3,94 ± 1,30	3,46 ± 1,45
<b>271</b> (Gotlandtief)	200	3,48 ± 0,55	4,75 ± 0,29	5,28 ± 0,34	5,87 ± 0,33	<b>5,88 ± 0,81</b>
<b>286</b> (Färötief)	150	3,44 ± 0,29	4,16 ± 0,35	4,76 ± 0,33	<b>5,06 ± 0,22</b>	4,86 ± 0,37
<b>284</b> (Landsortief)	400	3,19 ± 0,17	3,62 ± 0,20	4,17 ± 0,24	<b>4,45 ± 0,33</b>	4,25 ± 0,32
<b>245</b> (Karlsötief)	100	3,53 ± 0,24	3,79 ± 0,52	3,59 ± 0,27	<b>4,16 ± 0,46</b>	4,02 ± 0,34

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

Station	Tiefe/m	1998	1999	2000	2001	2002
<b>213</b> (Bornholmtief)	80	<b>2,9 <math>\pm</math> 4,2</b>	4,3 $\pm$ 4,9	4,6 $\pm$ 4,4	4,8 $\pm$ 3,8	5,4 $\pm$ 4,1
<b>271</b> (Gotlandtief)	200	3,6 $\pm$ 4,1	<b>0,0 <math>\pm</math> 0,0</b>	<b>0,0 <math>\pm</math> 0,0</b>	<b>0,0 <math>\pm</math> 0,0</b>	<b>0,0 <math>\pm</math> 0,0</b>
<b>286</b> (Färötief)	150	1,1 $\pm$ 1,6	<b>0,0 <math>\pm</math> 0,1</b>	<b>0,0 <math>\pm</math> 0,0</b>	<b>0,0 <math>\pm</math> 0,0</b>	<b>0,0 <math>\pm</math> 0,0</b>
<b>284</b> (Landsorttief)	400	9,2 $\pm$ 1,7	1,5 $\pm$ 1,7	<b>0,0 <math>\pm</math> 0,0</b>	<b>0,0 <math>\pm</math> 0,0</b>	<b>0,0 <math>\pm</math> 0,0</b>
<b>245</b> (Karlsötief)	100	9,3 $\pm$ 1,7	4,8 $\pm$ 4,0	3,0 $\pm$ 2,3	<b>1,0 <math>\pm</math> 1,8</b>	

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

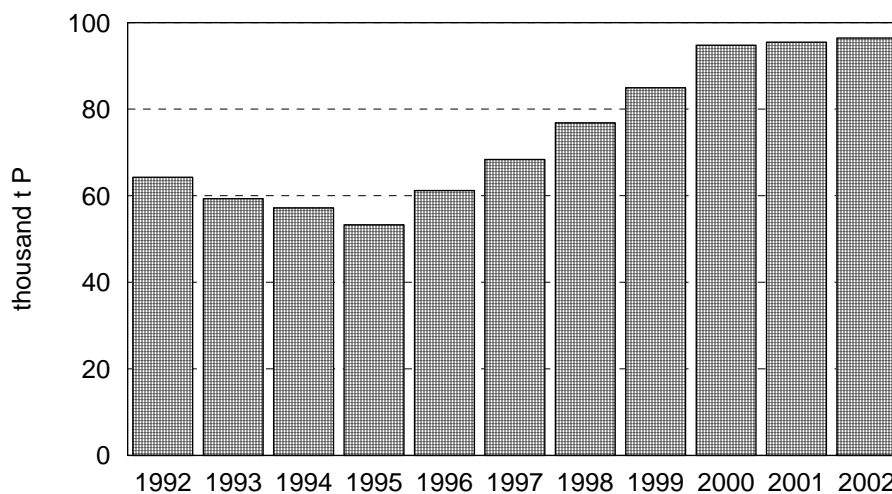
Station	Tiefe/m	1998	1999	2000	2001	2002
<b>213</b> (Bornholmtief)	80	<b>4,9 <math>\pm</math> 5,4</b>	3,9 $\pm$ 4,6	2,6 $\pm$ 3,9	0,6 $\pm$ 1,2	3,5 $\pm$ 3,8
<b>271</b> (Gotlandtief)	200	1,7 $\pm$ 2,0	9,0 $\pm$ 2,6	12,0 $\pm$ 1,7	17,7 $\pm$ 3,0	<b>19,7 <math>\pm</math> 4,9</b>
<b>286</b> (Färötief)	150	1,7 $\pm$ 1,4	5,1 $\pm$ 2,3	7,6 $\pm$ 1,4	<b>10,4 <math>\pm</math> 2,5</b>	9,8 $\pm$ 2,2
<b>284</b> (Landsorttief)	400	0,2 $\pm$ 0,2	0,9 $\pm$ 1,1	3,8 $\pm$ 1,3	5,4 $\pm$ 1,2	<b>6,5 <math>\pm</math> 1,5</b>
<b>245</b> (Karlsötief)	100	0,3 $\pm$ 0,4	1,7 $\pm$ 2,2	1,4 $\pm$ 1,5	3,8 $\pm$ 2,8	<b>4,0 <math>\pm</math> 1,5</b>

Auch im westlichen Gotlandbecken konnten keine grundlegenden Veränderungen im Vergleich zu den Vorjahren beobachtet werden. Im Landsorttief setzt sich die Stagnationsperiode, die schon ausführlich beschrieben wurde (MATTHÄUS et al., 2001b; NAUSCH et al., 2002) fort. Im 400 m-Horizont stieg der Ammoniumgehalt weiter an (Tabelle 10) und erreicht den höchsten Wert seit mindestens 1990 (MATTHÄUS et al., 2001a). Nitrat ist auf Grund der anhaltenden Anoxie ganzjährig nicht vorhanden, die Phosphatkonzentrationen stabilisieren sich seit dem Jahr 2000 auf einem recht einheitlichen Niveau. Die in sedimentären Ablagerungen gespeicherten Phosphate scheinen auf Grund der Topographie begrenzt zu sein, Rücklösungen unter sauerstofffreien Bedingungen somit ebenfalls gering.

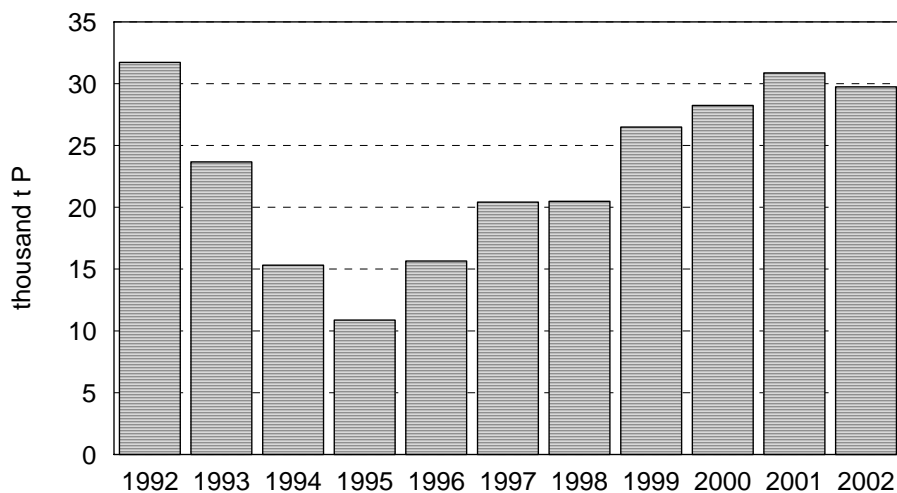
Anders stellt sich die Situation im östlichen Gotlandbecken dar. Seit Beginn der gegenwärtigen Stagnationsperiode im Jahr 1995 (NEHRING et al., 1995c) haben die Phosphatkonzentrationen kontinuierlich zugenommen (Tabelle 10), wenngleich sich, ähnlich wie in der vorhergehenden Stagnationsperiode, eine Plateauphase einzustellen beginnt. Möglicherweise kann dies auf eine Erschöpfung der partikelgebundenen Phosphatvorräte zurückgeführt werden. Denkbar ist aber auch die Etablierung eines Gleichgewichtes zwischen Freisetzung aus dem Sediment und abführenden Prozessen. Basierend auf den Daten der Station 271 (Gotlandtief) wurde versucht, eine grobe Abschätzung der gespeicherten Phosphatmengen unterhalb der Haloklinen vorzunehmen. Hierzu wurden 7 Tiefenbereiche zwischen 70 m und 236 m Wassertiefe definiert und ihre Volumina

berechnet (SCHNEIDER et al., 2002). Die Volumina wurden mit den korrespondierenden Phosphatkonzentrationen multipliziert. Im östlichen Gotlandbecken finden sich bei einer Fläche von 12 300 km<sup>2</sup> im Tiefenbereich unterhalb 70 m, die in Abb. 26 dargestellten Phosphatmengen. Mit Beginn der Stagnationsperiode im Jahr 1995 nehmen die vorhandenen Phosphatmengen unterhalb der Salzgehaltssprungschicht (Abb. 26 A) kontinuierlich zu. Bemerkenswert ist jedoch vor allem, dass der Salzwassereinbruch 1993 mit den nachfolgenden Einströmen 1994 nur zu einem vergleichsweise geringen Rückgang der Gesamtmenge geführt hat. Unterteilt man den Tiefenwasserbereich noch etwas genauer, werden Unterschiede deutlicher. Unterhalb der Redoxsprungschicht (< 138 m) hat die Wassererneuerung zu einem starken Rückgang der Phosphatmengen bis zum Jahr 1995 geführt (Abb. 26 B). Phosphat wurde an Partikel gebunden. Nach der Restaurierung der anoxischen Verhältnisse geht Phosphat wieder in Lösung und es kommt zu einer kontinuierlichen Zunahme bis zum Jahr 2000. Da das Wasservolumen unterhalb 138 m jedoch vergleichsweise gering ist, wirken sich diese Veränderungen in der Gesamtbilanz nicht so markant aus. Die deutliche Zunahme der Phosphatmenge seit 1995 auf ca. 180 % (Abb. 26 A) ist im Wesentlichen den Veränderungen im Bereich zwischen der Salzgehalts- und der Redoxsprungschicht geschuldet (Abb. 26 C). Am Ende der vorherigen Stagnationsperiode im Jahr 1992 war der Wasserkörper zwischen 80 m und ca. 125 m Wassertiefe relativ gut mit Sauerstoff versorgt, folgerichtig waren die Phosphatkonzentrationen vergleichsweise gering. Die Wassererneuerung führte zunächst zum Anheben sauerstoffarmer Wasserschichten mit hohen Phosphatgehalten. Deshalb kann zwischen 1992 und 1995 kein Rückgang in dieser Schicht beobachtet werden. In der weiteren Entwicklung blieben die Wasserschichten zwischen der Haloklinen und der Redoxkline extrem sauerstoffarm, so dass sich eine weitere Zunahme der Phosphatmengen vollziehen konnte. Diese Entwicklung ist insofern problematisch, da sich direkt unterhalb der Salzgehaltssprungschicht erheblich Phosphatmengen befinden, die bei entsprechend tiefreichender Konvektion bzw. durch lokale Auftriebsprozesse in die Oberflächenschicht gelangen und dort zu einer erhöhten Produktion führen können. Vor allem die Entwicklung von Cyanobakterienblüten kann dadurch forciert werden.

A) &lt; 70m Wassertiefe



B) &lt; 138 m Wassertiefe



C) 70 m – 137 m

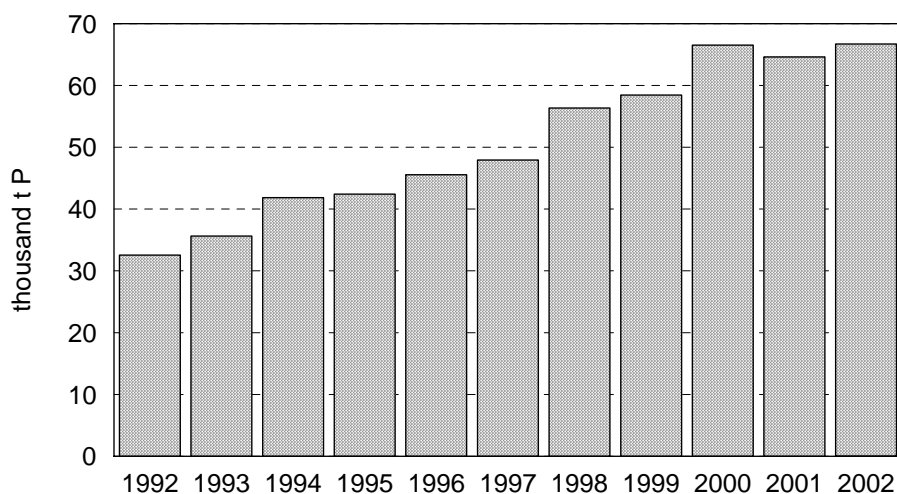


Abb. 26

Phosphatmengen unterhalb der Salzgehaltssprungschicht im östlichen Gotlandbecken (Boxgröße 12 300 km<sup>2</sup>)

Fig. 26

Amount of phosphate stored below the halocline in the eastern Gotland Basin (box size 12 300 km<sup>2</sup>)

## 5.5 Natürliche organische Verbindungen

Bei den in den letzten Jahren durchgeführten Untersuchungen natürlicher organischer Verbindungen haben sich deutliche Unterschiede zwischen den gelösten und partikulären Verbindungen gezeigt. Beispielhaft sollen diese Unterschiede anhand des gelösten und des partikulären organisch gebundenen Kohlenstoffs (DOC bzw. POC) in der Oberflächenschicht an der Station TF0271 im östlichen Gotlandbecken diskutiert werden (Abb. 27)

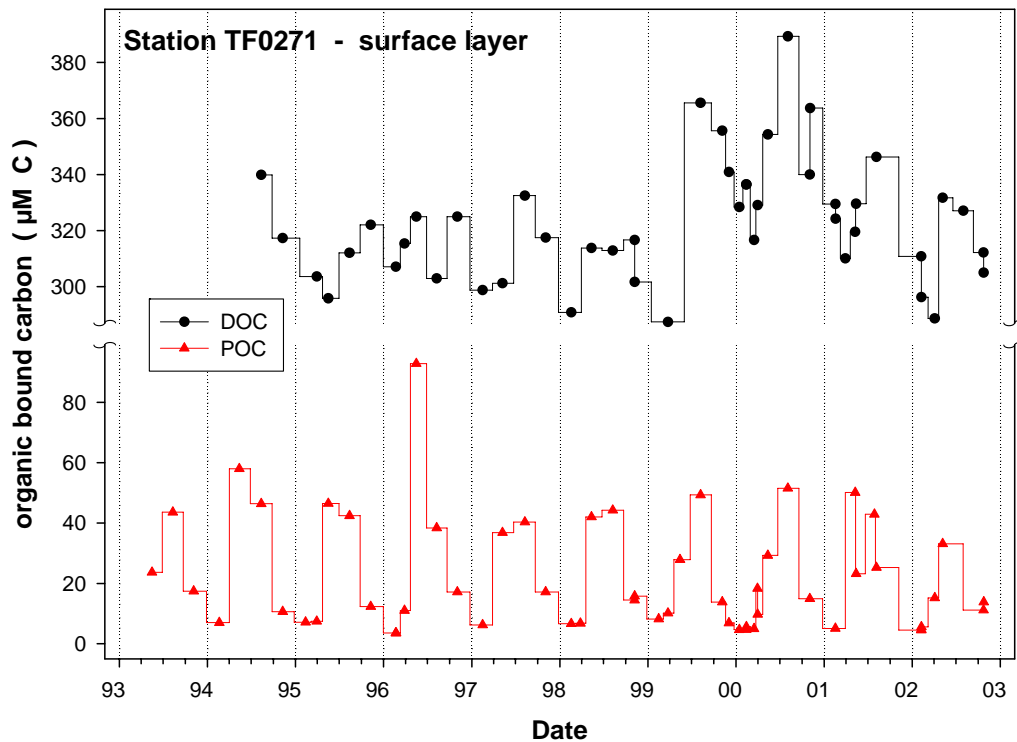


Abb. 27

Zeitreihe der Konzentrationen von DOC und POC in der Oberflächenschicht an der Station TF0271

Fig. 27

Time series of DOC and POC concentrations in the surface layer at station TF0271 (eastern Gotland Basin)

Bei der Betrachtung des Verlaufs der POC-Konzentrationen fällt eine ausgeprägte Saisonalität auf. Der sommerliche Maximalwert liegt im Mittel bei etwa  $40 \mu\text{mol/l C}$ , ist jedoch z. T. deutlichen Schwankungen unterworfen. So dürfte z.B. der auffallend hohe Wert im Sommer 1996 darauf zurückzuführen sein, dass der vorangegangene Winter recht kalt war und große Teile der Ostsee bis in das Frühjahr hinein mit Eis bedeckt waren. Angesichts der relativ geringen zeitlichen Auflösung der Messungen (5 Probenahmen im Jahr) können geringe zeitliche Verschiebungen bereits zu deutlich erkennbaren Veränderungen im Verlauf des saisonalen Signals führen. Die winterliche Minimalkonzentration lag während des gesamten Untersuchungszeitraums recht konstant zwischen  $5 \mu\text{mol/l C}$  und  $10 \mu\text{mol/l C}$ . Die saisonalen Konzentrationsunterschiede des partikulären organischen Materials (POM) sind auf den saisonalen Zyklus des Planktons im Jahresverlauf



zurückzuführen. Wie bereits früher gezeigt wurde, findet durch das Planktonwachstum eine fast vollständige Verlagerung des Anteils anorganischer Stickstoffverbindungen in die Fraktion des partikulär gebundenen Stickstoffs statt (MATTHÄUS et al., 1997). Dabei entspricht das Verhältnis von Kohlenstoff und Stickstoff (C/N – Verhältnis) im POM ungefähr dem Redfield – Verhältnis (langjähriger Mittelwert in der Oberflächenschicht an der Station TF0271 ca. 8). Die tatsächlich beobachteten sommerlichen Konzentrationen des POM liegen dabei in dem Bereich, den man unter der Annahme erwarten würde, dass die gesamte in der winterlichen Deckschicht vorhandene Menge an Nährstoffen entsprechend dem Redfield – Verhältnis in organisches Material eingebaut würde.

Einer der augenfälligsten Unterschiede zwischen den Zeitreihen von DOC und POC (Abb. 27) ist der große Konzentrationsunterschied zwischen beiden Verbindungsklassen. Dabei ist die DOC – Konzentration fast um einen Faktor 10 größer als die des POC. Als Quellen des DOC kommen neben der Freisetzung von Ausscheidungs- bzw. Zersetzungsprodukten des Planktons vor allem landseitige Einträge in Frage. Da in marinen Ökosystemen natürliches organisches Material praktisch ausschließlich beim Aufbau des Planktons neu gebildet wird, kann man erwarten, dass der Konzentrationsbereich des im marinen System gebildeten DOC nicht wesentlich von dem des POC abweicht. Betrachtet man unter diesem Gesichtspunkt die Zeitreihe der DOC – Konzentrationen, kann man feststellen, dass die beobachteten Unterschiede zwischen den saisonalen Maximal- und Minimalkonzentrationen etwa in der gleichen Größenordnung liegen wie diejenigen des POC. Das saisonale DOC – Signal scheint dabei gegenüber dem des POC verschoben, wobei sich ein systematischer Zusammenhang statistisch allerdings nicht belegen lässt. Hinzu kommt, dass sowohl die saisonalen Minima als auch die Maxima deutlich größeren Schwankungen unterliegen als diejenigen des POC.

Da sich nur zwischen 10 % und 20 % der DOC- Konzentrationen durch Umsetzungen der im marinen Ökosystem gebildeten organischen Verbindungen erklären lassen, erhebt sich die Frage nach dem Ursprung des restlichen DOC - Anteils. Unterstellt man den Eintrag aus landseitigen Quellen, sollte eine deutliche Korrelation mit dem Salzgehalt zu erwarten sein. Ein direkter Zusammenhang zwischen den einzelnen Messwerten des Salzgehalts und der DOC-Konzentration lässt sich jedoch in den meisten Gebieten der Ostsee, insbesondere in den zentralen Bereichen, statistisch nicht verifizieren. Lediglich in einzelnen lokal begrenzten Gebieten, die z. B. durch Flusseinträge geprägt sind, lassen sich derartige Korrelationen nachweisen (z.B. unter bestimmten Wetterbedingungen in der Pommerschen Bucht).

Als Ursachen für eine fehlende Korrelation zwischen Salzgehalt und DOC- Konzentration kommen in den zentralen Bereichen im Wesentlichen zwei Faktoren in Frage. Zum einen könnten sich die Prozesse, die für die saisonalen Veränderungen der DOC- Konzentration verantwortlich sind, stärker auswirken als eine mögliche Abhängigkeit der DOC- Konzentration vom Salzgehalt. Zum anderen könnten Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung des DOC, die z.B. bedingt sein können durch unterschiedliche Anteile des im marinen System gebildeten DOC und dem aus anderen Quellen stammenden DOC, einen möglichen Zusammenhang zwischen Salzgehalt und DOC- Konzentration überlagern.

Obwohl kaum konkrete Kenntnisse über die chemische Zusammensetzung des DOC vorliegen und die Prozesse zum Abbau des DOC weitgehend unbekannt sind, lassen sich aus den bisherigen Untersuchungen einige Schlussfolgerungen ziehen. Das beobachtete C/N- Verhältnis im gelösten organischen Material (DOM) in der Oberflächenschicht der gesamten Ostsee, das mit einem mittleren Wert von 18 ungefähr doppelt so hoch ist wie das im partikulären organischen Material (POM) (mittlerer Wert 7.5), lässt sich entweder dadurch erklären, dass der Stickstoff- und

Kohlenstoffanteil des organischen Materials in unterschiedlichen Umfang abgebaut wird, oder dass das in das marine System eingetragene DOM ein deutlich anderes C/N- Verhältnis besitzt als das aus anderen Quellen stammende. Hinweise auf mögliche Vorgänge beim Abbau des DOM lassen sich aus den Messungen in der Bodenschicht im östlichen Gotlandbecken ziehen. Da der letzte große Salzwassereinbruch 1993 erfolgte, kann man das Tiefenwasser im Gotlandbecken im Verlauf der andauernden Stagnationsperiode in erster Näherung als abgeschlossenen Wasserkörper ansehen. Dies zeigt sich nicht zuletzt in der Zunahme der Sauerstoffabnahme bzw.  $H_2S$ - Bildung in diesem Wasserkörper seit 1993. Während dieser Zeit wurde in der bodennahen Wasserschicht (Station TF0271) eine Zunahme der DOC- Konzentration bei einer gleichzeitigen Abnahme der DON- Konzentration beobachtet. Diese Konzentrationsveränderungen führten zu einem sehr deutlichen Anstieg des C/N- Verhältnisses im DOM auf Maximalwerte, die fast den Wert 100 erreichten (Abb. 28), während das C/N- Verhältnis im POM weitgehend konstant blieb. (vgl. auch NAUSCH et. al., 2002).

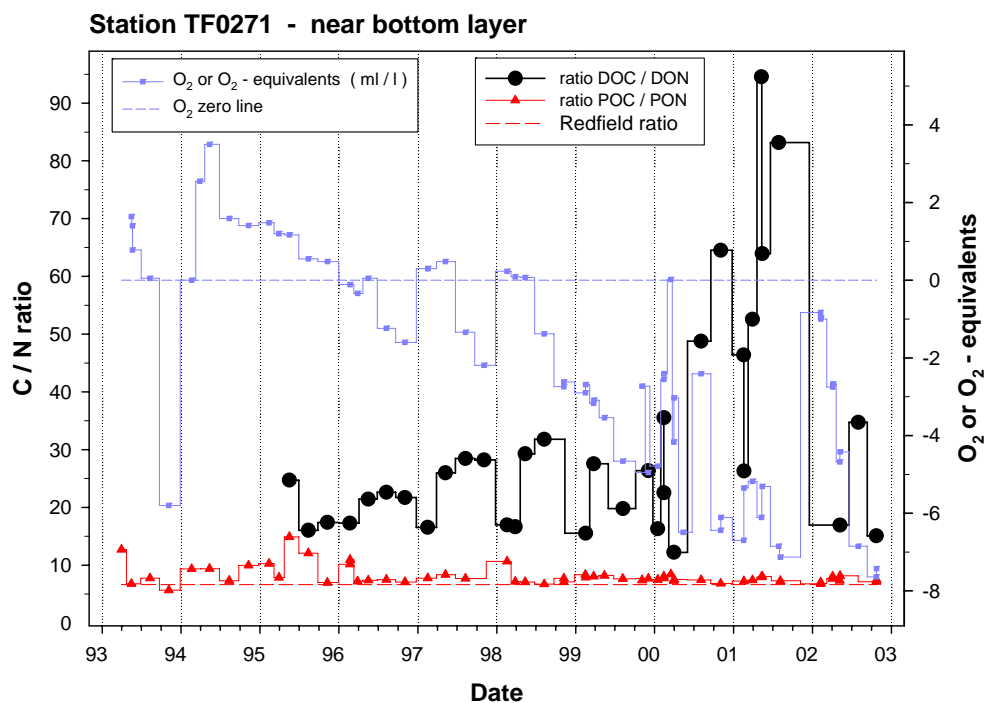


Abb. 28

Entwicklung der C/N- Verhältnisse im partikulären und gelösten organischen Material in der Bodenschicht an der Station TF0271 (östliches Gotlandbecken) nach dem letzten großen Salzwassereinbruch im Jahr 1993

Fig. 28

Development of C/N ratios in the particulate and dissolved organic material in the bottom layer at Station TF0271 (Eastern Gotland Basin) after the last major saltwater inflow in 1993

Diese Beobachtung lässt sich dadurch erklären, dass durch die Zersetzung absinkenden partikulären Materials DOM im Tiefenwasser freigesetzt wurde. Von den Prozessen, die den Abbau des DOM kontrollieren, werden die stickstoffhaltigen und kohlenstoffhaltigen Bestandteile offenbar in unterschiedlicher Weise betroffen, wobei dem DOM bevorzugt Stickstoff entzogen wird.

In der Abb. 28 fallen die sehr großen, relativ plötzlich auftretenden Schwankungen des C/N-Verhältnisses im DOM auf, die besonders in den Jahren 2000 bis 2002 sehr ausgeprägt waren. Sie stehen in engem zeitlichen Zusammenhang mit ebenso deutlichen Schwankungen im Sauerstoff bzw. H<sub>2</sub>S - Gehalt in diesem Wasserkörper. Da man davon ausgehen muss, dass die Schwankungen im O<sub>2</sub> – bzw. H<sub>2</sub>S – Gehalt nur durch den Eintrag kleinerer Mengen salz- und sauerstoffhaltigen Wasser hervorgerufen werden können, wäre hiermit auch der Eintrag von zusätzlichem DOM – möglicherweise mit einem entsprechend anderen C/N- Verhältnis verbunden. Mit den bisher verfügbaren Daten lässt sich die Frage, aus welchen Quellen diese DOM – Einträge in das Tiefenwasser stammen, nicht beantworten. Es ist nicht auszuschließen, dass es sich hierbei um DOM handelt, das ursprünglich aus der Nordsee stammt und mit dem salzreichen Wasser in die Ostsee transportiert wurde. Da derzeit geeignete analytische Möglichkeiten fehlen, zwischen DOM aus der Nordsee und dem aus der Ostsee auf Grund chemischer Unterschiede zu differenzieren, lässt sich diese Vermutung mit den zur Verfügung stehenden Daten nicht eindeutig belegen.

Wie zuvor diskutiert, muss in der Ostsee mit drei verschiedenen Klassen von DOM gerechnet werden: das DOM, das durch Prozesse in der Ostsee selbst gebildet wird, DOM, das aus landseitigen Einträgen stammt, und DOM, das mit den Wassermassen aus der Nordsee in die Ostsee gelangt. Unterstellt man, dass die Einträge von DOM in die Ostsee immer mit dem Einstrom von Wasser verbunden sind (d.h. atmosphärische Einträge von organischem Material sind vernachlässigbar), müsste man zwei Klassen von eingetragenen DOM aufgrund der Eigenschaften des Wassers, in dem das DOM gelöst ist, unterscheiden können: zum einen die landseitigen Einträge, die mit dem Einstrom von sehr salzarmen Wasser verbunden sind, zum anderen die Einträge aus der Nordsee, die über das Kattegat erfolgen und mit dem Einstrom von salzreichem Wasser verbunden sind. Da das DOM in der Nordsee durch atlantische Einflüsse geprägt ist, sind hier Konzentrationen in einem Bereich zu erwarten, die zwischen den Konzentrationen im Atlantik (50 µmol/l – 100 µmol/l C) und den Konzentrationen in den zentralen Bereichen der Ostsee (300 µmol/l C) liegen. Da vor diesem Hintergrund eine Beziehung zwischen der DOC- Konzentration und dem Salzgehalt zu vermuten ist, wurde versucht, diesen Zusammenhang anhand der vorliegenden Daten nachzuweisen. Um saisonale Einflüsse dabei zu eliminieren wurden hierzu die Mittelwerte des Salzgehalts und der DOC- Konzentration, die aus den vorliegenden Beobachtungsreihen der letzten Jahre berechnet wurden, herangezogen (NAUSCH et al., 2002). Die saisonalen und zwischenjährlichen Variabilitäten spiegeln sich dabei in den Standardabweichungen der Messwerte wider. Die Ergebnisse, die sich für ausgewählte Stationen in den zentralen Bereich der Ostsee und in der westlichen Ostsee ergaben, sind in Abb. 29 dargestellt. Zur Ergänzung wurde auch der Mittelwert der DOC- Konzentration mit aufgenommen, der im Sommer 1999 während eines Feldexperiments im Kattegat ermittelt wurde (K. Nagel, unveröffentlichte Ergebnisse).

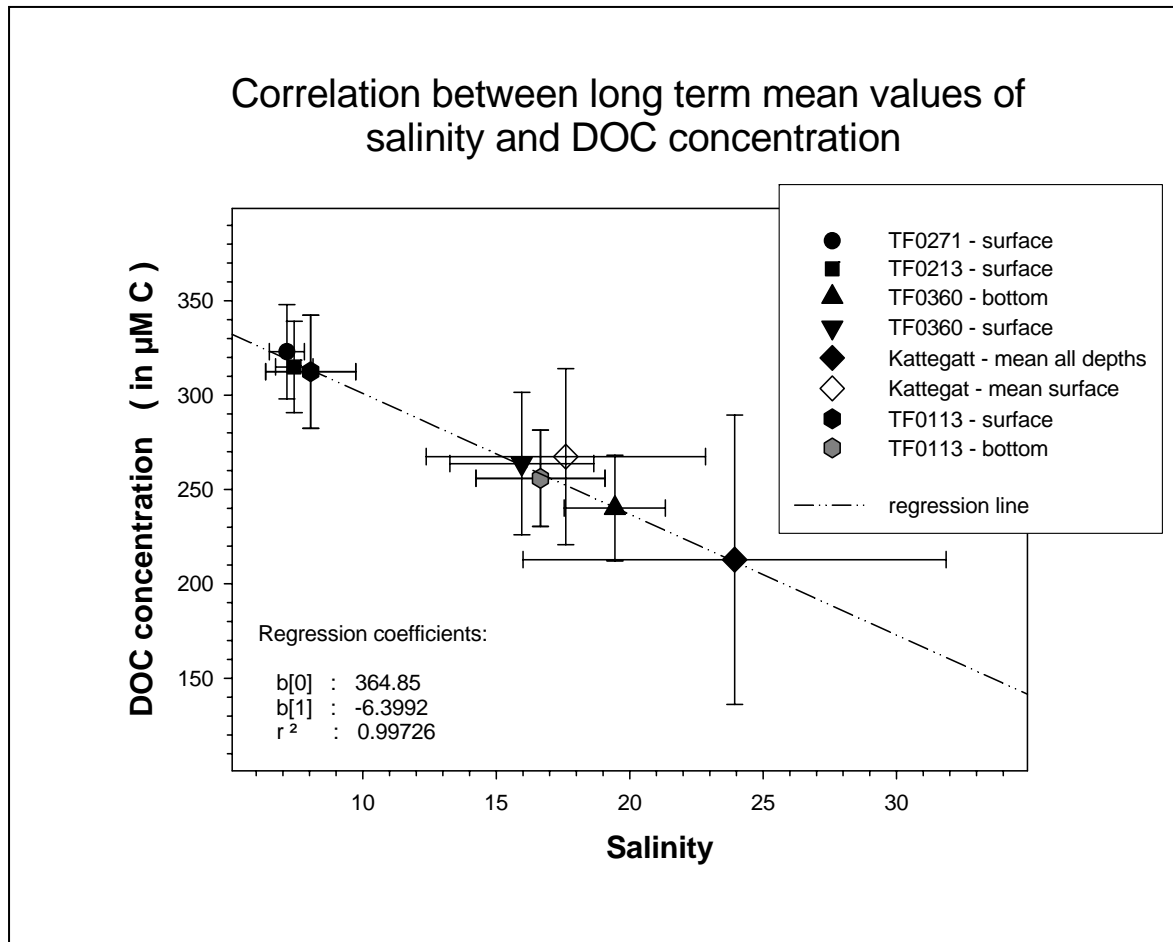


Abb. 29

Zusammenhang zwischen den langjährigen Mittelwerten der DOC- Konzentrationen und der Salzgehalte an ausgewählten Stationen in der Ostsee. Zur Berechnung der Werte der Regressionsgeraden wurden nur Werte herangezogen, die durch dunkel ausgefüllte Symbole dargestellt sind

Fig. 29

Correlation between long term means of DOC concentrations and salinity at selected stations in the Baltic Sea. The calculation of regression line is based on those data with are shown in filled dark symbols

Obwohl zum Teil eine sehr große Variabilität sowohl in den DOC- Konzentrationen als auch im Salzgehalt zu beobachten ist, zeigt sich für die Mittelwerte der erwartete Zusammenhang zwischen der DOC- Konzentration und dem Salzgehalt. Angesichts der Häufung der Werte in den Salzgehaltsbereichen zwischen 5 und 10 PSU bzw. 15 und 20 PSU erfordert es sicherlich noch weitere Messungen, um ausreichend abgesicherte quantitative Aussagen machen zu können. Aus der Abbildung wird jedoch deutlich, dass die Effekte, die durch saisonale und zwischenjährliche Variabilitäten der DOC- Konzentration hervorgerufen werden, in der gleichen Größenordnung liegen, wie diejenigen, die mit unterschiedlichen Salzgehalten verbunden sind. Der Zusammenhang zwischen dem Salzgehalt und der mittleren, von saisonalen Einflüssen bereinigten DOC- Konzentration wird nicht zuletzt durch die beiden Stationen in der westlichen Ostsee (TF0360) bzw. im Arkonabecken (TF0113) unterstrichen, die beide im Übergangsbereich zwischen Kattegat

und Ostsee liegen und bei denen die Oberflächenschicht durch ausströmendes Ostseewasser geprägt ist, während die bodennahe Wasserschicht durch einströmendes salzhaltiges Wasser aus der Nordsee beeinflusst wird.

Wenn eine quantitative Beziehung zwischen Salzgehalt und DOC- Konzentration abgesichert werden kann, würde dies die Möglichkeit eröffnen, Abschätzungen über die 'Hintergrundkonzentration' des DOC zu machen, die nicht durch biologische Aktivitäten im Ökosystem der Ostsee entstanden ist. Außerdem würde es eine solche Beziehung erlauben, auf eine DOC- Konzentration mit einem Salzgehalt von 0 zu extrapolieren. Dieser Wert würde einen Anhaltspunkt über die eingetragene Konzentration des DOC, gemittelt über alle landseitigen Einträge, geben. Unterstellt man, dass die aus den Werten in Abb. 29 berechnete Beziehung realistisch ist, würde sich eine über alle landseitigen Einträge gemittelte DOC Konzentration in den Einträgen von 350  $\mu\text{mol/l C}$  bis 400  $\mu\text{mol/l C}$  ergeben. Bei einer eingetragenen Wassermenge von ca. 450  $\text{km}^3/\text{Jahr}$  würde dies 1.5  $\times 10^{12}$  g C bis 2.0  $\times 10^{12}$  g C entsprechen, die jährlich aus landseitigen Quellen in die Ostsee eingetragen werden. Es muss jedoch betont werden, dass es sich hierbei zunächst um eine sehr grobe Abschätzung handelt, die durch weitere Untersuchungen verifiziert werden muss.

Unabhängig von den aus diesen Überlegungen abgeleiteten Ergebnissen bleibt es jedoch eine Aufgabe für die Zukunft, durch eine detailliertere Analyse der Bestandteile des DOC Verbindungen zu finden, die dazu herangezogen werden können, näher zu charakterisieren aus welchen Quellen das DOC stammt. Darüber hinaus sollte auch der Frage nachgegangen werden, nach welchen Mechanismen DOC abgebaut wird und welche Steuermechanismen dem Abbau zugrunde liegen.

### **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 „Prof. A. Penck“, „A. v. Humboldt“ und „Gauss“ für die Unterstützung und den Einsatz bei den Messfahrten des Jahres 2002. 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 Pegeldata. 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 Tief“ zur Verfügung.

## Literaturverzeichnis

- BEZOLD, W.V. (1883): Die Kälterückfälle im Mai. -Abhandlungen der königlich Bayerischen Akademie der Wissenschaften. Bd. **14**, Nr. 6, 71-108.
- BSH (2002a): Ice season in the northern Baltic ends early. - <http://www.bsh.de/Oceanography/Ice/EissaisonEngl.htm>.
- BSH (2002b): Early beginning of the ice season in the northern Baltic. - <http://www.bsh.de/Oceanography/Ice/ice%20season.htm>.
- BSH (2002c): Eisübersichtskarte Nr. 28, Jg. 75.
- CABS (2003): County Administrative Board of Stockholm: Report on the activities at the information office for the Baltic Proper during 2002 <http://www2.ab.lst.se/infobalt/gamlrapp/rapp02/2002eng.htm>.
- DWD (2002): WitterungsReport Daten. – Deutscher Wetterdienst, Offenbach, Nr. 1-12.
- DWD (2003): unveröffentliche Daten.
- EUTROSYM (1976): UNEP-Symposium über Eutrophierung und Sanierung von Oberflächengewässern. – Karl-Marx-Stadt, 20. – 25.9.1976, Bd. 1; Teil 2,2.
- FMI, 2002: The ice winter 2001/2002 was mild. - <http://2.fimr.fi/en/palvelut/jaapalvelu/jaatalvi2001-2002.html>.
- FEISTEL, R. (2002): IOW Cruise Report 11 / 02 / 02, March 2002. - <http://www.io-warnemuende.de/projects/monitoring/documents/cr110202.pdf>.
- FEISTEL, R. (2003): IOW Cruise Report 11 / 03 / 02, March 2003. <http://www.io-warnemuende.de/projects/monitoring/documents/cr110302.pdf>.
- FEISTEL, R., NAUSCH, G. and HAGEN, E. (2003a): The Baltic inflow in autumn 2001. - Meereswiss. Ber./ Mar. Sci. Rep., Warnemünde **54**, 55-68.
- FEISTEL, R., NAUSCH, G., MOHRHOLZ, V., LYSIAK-PASTUSZAK, E. and MATTHÄUS, W. (2003b): Summer Waters in the Deep Baltic in Winter 2002/3. In preparation.
- GIWA (2003): Newsletter **2**, 2003.- [http://www.giwa.net/mewsletter/giwa\\_2\\_2003.pdf](http://www.giwa.net/mewsletter/giwa_2_2003.pdf).
- GRASSHOFF, K., EHRHARDT, M. and KREMLING, K. (eds) (1983): Methods of seawater analysis.- 2<sup>nd</sup> 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 (1980): Assessment of the effects of pollution on natural resources of the Baltic Sea, 1980. – Balt. Sea Environ. Proc. **5B**, 1-425.
- HELCOM (1997): Airborne pollution load to the Baltic Sea 1991-1995. – Baltic Sea Environ. Proc. **69**, 1-55.
- HELCOM (2000): Manual of marine monitoring in the COMBINE programme of HELCOM. – Baltic Marine Environment Protection Commission, Helsinki, Updated 2002: [www.helcom.fi/Monas/CombineManual2/CombineHome.htm](http://www.helcom.fi/Monas/CombineManual2/CombineHome.htm).
- HELCOM (2003a): Environment of the Baltic Sea 1999-2002. – Balt. Sea Environ. Proc. in press.
- HELCOM (2003b): Assessment of the HELCOM Oxygen depletion 2002 Group. In press.
- IMGW (2003): Unpublished data. Institute of Meteorology and Water Management, Gdynia.
- IOW (2003): Salzgehalts- und Temperaturprofile gemessen an der Station "Darßer Schwelle".- [http://www.io-warnemuende.de/projects/monitoring/de\\_home.html](http://www.io-warnemuende.de/projects/monitoring/de_home.html).
- 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.
- KUOSA, H., KUUPOO, P., AUTIO, R., KUOSA, H., SETÄLÄ, O. and TANSKANEN, S. (1997): Nitrogen, silicon and zooplankton controlling the Baltic spring bloom. Nutrients and phytoplankton. – *Est. Coast. Shelf Sci.* **45**, 813-821.
- LANU (2002): Sauerstoffmangel in der westlichen Ostsee 4. - Bericht vom 19. Sept. 2002, Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein, Flintbek.
- 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. and MOHRHOLZ, V. (2003), On the dynamics and mixing of inflowing salt-water in the Arkona Sea. - *J. Geophys. Res.* in print.
- LUNG (2002a): Küstengewässer-Monitoring Mecklenburg-Vorpommern. - Küstengewässerbericht 1/2002, Januar/Februar, 2/2002, März.
- LUNG (2002b): Küstengewässer-Monitoring Mecklenburg-Vorpommern. - Küstengewässerbericht 7/2002,
- LUNG (2002c): Küstengewässer-Monitoring Mecklenburg-Vorpommern, Sonderbericht zur Sauerstoffsituation September 2002.
- 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. (1999): 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. (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. (2001a): The Baltic Sea in 1999 – Stabilization of nutrient concentrations in the surface water and increasing extent of oxygen deficiency in the central Baltic deep water. - *Meereswiss. Ber./Mar. Sci. Rep.*, Warnemünde **45**, 3-26.
- MATTHÄUS, W., NAUSCH, G., LASS, H.-U., NAGEL, K. and SIEGEL, H. (2001b): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2000. - *Meereswiss. Ber./Mar. Sci. Rep.*, Warnemünde **45**, 27-88.
- MEYER, H. and LAMPE, R. (1999): The restricted buffer capacity of south Baltic estuary – The Oder estuary. – *Limnologia* **29**, 242-248.
- NAUSCH, G. and NEHRING, D. (1996): Baltic proper, Hydrochemistry. In: Third Periodic Assessment of the State of the Marine Environment of the Baltic Sea. - *Balt. Sea Environ. Proc. No.* **64B**, 80-85.
- NAUSCH, G., NEHRING, D. and AERTJBERG, G. (1999): Anthropogenic nutrient load and protection of the Baltic Sea. - *Limnologia* **29**, 233-241.
- NAUSCH, G., FEISTEL, R. LASS, H.-U., NAGEL, K. and SIEGEL, H. (2002): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2001. - *Meereswiss. Ber.* **49**, 2-77.

- NAUSCH, G. and LYSIK-PASTUSZAK, E. (2003): Eutrophication and related fields: Baltic Proper: hydrochemistry. In Environment of the Baltic Sea area 1994 –1998. – Balt. Sea Environ. Proc **85B**, 42-45.
- NAUSCH, M., NAUSCH, G. and WASMUND, N. (2003): Phosphorus dynamics during the transition from nitron to phosphate limitation in the Baltic Sea. – Mar. Ecol. Progr. Ser., in press.
- 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., LASS, H.U., NAUSCH, G. and NAGEL, K. (1995a): Hydrographisch-chemische 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 an new stagnation period in its central deep waters and decreasing nutrient load in its surface layer. Dt. Hydrogr. Z. **47**, 319-327.
- NIXON, S. (1995): Coastal marine eutrophication: a definition, social causes, and future concerns. - *Ophelia* **41**, 199-219.
- RAHM, L., CONLEY, D., SANDEN, P., WULFF, F. and STALNACKE, P. (1996): A time series analysis of nutrient inputs to the Baltic Sea and changing Dsi/N ratios. – Mar. Ecol. Progr. Ser. **130**, 221-228.
- REDFIELD, A.C., KETCHUM, B.H., RICHARDS, F.A. (1963): The influence of organisms on the composition of sea water. – In: HILL, M.N. (Ed.): *The Sea*, Vol. II, Wiley, New York, 26-77.
- SCHMIDT, M. (2002): IOW Cruise Report 11 / 02 / 03, October 2002. – <http://www.io-warnemuende.de/projects/monitoring/documents/cr110203.pdf>.
- SCHNEIDER, B., NAUSCH, G., KUBSCH, H. and PETERSOHN, I. (2002): Accumulation of total CO<sub>2</sub> during stagnation in the Baltic Sea deep water and its relationship to nutrient and oxygen concentrations. – Mar. Chem. **77**, 277-291.
- 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 (1982) Climatological Ice Atlas.- Sjöfartsverkets tryckeri, Norrköping. 220 pp.
- 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](http://www.smhi.se/hfa_coord/BOOS/Y2001/inflow2001_*.html)
- SMHI (2002): Flow through the Sound 2002. [http://www.smhi.se/hfa\\_coord/BOOS/y2002/inflow2002\\_1.html](http://www.smhi.se/hfa_coord/BOOS/y2002/inflow2002_1.html), [http://www.smhi.se/hfa\\_coord/BOOS/y2002/inflow2002\\_2.html](http://www.smhi.se/hfa_coord/BOOS/y2002/inflow2002_2.html), [http://www.smhi.se/hfa\\_coord/BOOS/y2002/inflow2002\\_3.html](http://www.smhi.se/hfa_coord/BOOS/y2002/inflow2002_3.html), [http://www.smhi.se/hfa\\_coord/BOOS/y2002/inflow2002\\_4.html](http://www.smhi.se/hfa_coord/BOOS/y2002/inflow2002_4.html).
- SMHI (2003) unveröffentlichte Daten.
- TIESEL, R. (2002): Sommer 2002 - der zweitheieste Sommer seit wenigstens 1890. – <http://www.tiesel.de/klima1.html>.
- TIESEL, R. (2003): unveröffentlichte Daten.



- WASMUND, N., VOSS, M and LOCHTE, K. (2001): Annual nitrogen fixation patterns in the Baltic proper. –Mar. Ecol. Progr. Ser. **214**, 1-14.
- WASMUND, N. (2002): IOW Cruise Report 40 / 02 / 18, August 2002. -  
<http://www.io-warnemuende.de/projects/monitoring/documents/cr400218.pdf>.

POHL, C.; HENNINGS, U.:

Die Schwermetall- Situation in der Ostsee im Jahre 2002

## Inhaltsverzeichnis

	<b>Seite</b>
Zusammenfassung	73
Summary	73
1. Einleitung	75
2. Probenahme	75
2.1 Probenaufarbeitung	76
2.2 Qualitätssicherung	76
3 Ergebnisse und Diskussion	78
3.1 Verteilungsmuster der Metallkonzentrationen in der gelösten und partikulären Phase an den in 2002 beprobten Stationen und Tiefen Cadmium Blei Kupfer Zink Quecksilber	79
3.2 Spurenmetall-Trends zwischen den Jahren 1993-2001 an Stationen in der westlichen und zentralen Ostsee	91
4. Schlussfolgerungen	99
Danksagung	99
Literaturverzeichnis	99

## Zusammenfassung

Wie in den Vorjahren wies die Schwermetallverteilung im Ostseewasser im Jahr 2002 keine deutlichen oder gesundheitsgefährdenden Veränderungen auf. Während der Ostseeüberwachungsfahrt im Februar 2002 wurden im Vergleich zu 2001 leicht erhöhte Konzentrationen für die gelösten und partikulären Anteile von Cadmium, Kupfer, Blei, Zink und Hg (gesamt) in der westlichen Ostsee registriert. Aufgrund der variablen Windsituation zur Zeit der Probenahme, ist dieses auf eine mehr oder weniger starke bodennahe Durchmischung der Wassersäule und den damit verbundenen Einträgen von feinkörnigen Oberflächensedimenten in die Wassersäule 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 2002 results of heavy metal monitoring in Baltic Sea water revealed no pronounced changes compared to previous years. In relation to the central Baltic Sea, elevated levels of suspended particulate material (SPM), Pb(dissolved), Pb(SPM), Cu(dissolved), Cu(SPM), Zn(dissolved), and Zn(SPM) were observed in the western Baltic Sea, which is attributed to the wind induced mixing of the watercolumn coupled to a more or less enrichment of suspended matter and associated trace metals in the waterbody. For Hg(total) increasing levels were recognised in several depth horizons of Station 271 in the Gotland Basin.

Since 1995 a continuous stagnation period influenced the trace metal concentrations in the Gotland Basin below the halocline. Decreasing trends were observed for Cd(dissolved), Cu(dissolved), Pb(dissolved) and Zn(dissolved), which is due to the anoxic water conditions and the enrichment of insoluble sulfide species in surface sediments. Also the waterbody above the halocline is characterised by slightly decreasing trends (not significant) over the passed 2-5 years for the dissolved phases of Cd, Cu, Pb and Zn. This is possibly a result of the so-called "Manganese pump" at the redoxinterface in the watercolumn. To what extend the redox conditions of the deep water body have an influence on the quantitative trace metal export from the surface waterbody is unknown.

## 1. Einleitung

Die Schwermetallüberwachung der Ostsee wurde im Jahr 2002 durch das Institut für Ostseeforschung zum zwölften 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 1993-2002 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.

Im Anhang sind die Messwerte für das Schwermetallmonitoring im Wasser und in Schwebstoffen tabellarisch zusammengefasst. Weiterhin wurden die Ergebnisse von Quecksilber, Arsen und Cadmium in marinen Oberflächensedimenten im Rahmen des Sedimentmonitorings aufgeführt. Die wissenschaftliche Auswertung wird von der Sektion Geologie vorgenommen. Die Ergebnisse zum Schwermetalleintrag in die Ostsee während der Oderflut 1997 wurden in einer rezensierten Zeitschrift veröffentlicht: Pohl, C.; Hennings, U.; Siegel, H.; Bachor, A. (2002): Trace metal impact into the Baltic Sea during the exceptional Oder flood in summer 1997. *Mar. Chem.*, 79, 101-111.

## 2. Probenahme

Die Monitoringbeobachtung erfolgte im Jahr 2002 zwischen dem 29.1.-12.2.2002 mit FS "GAUSS". Angaben zu den Stationen sind in Tabelle 1 und Abbildung 1 zusammengefasst.

Tab. 1  
Stationen Schwermetalle, Februar 2002

Table 1  
Trace metal stations, February 2002

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, 170, 200, 225, 237
272	57°04,30'	19°49,80'	212	5, 50

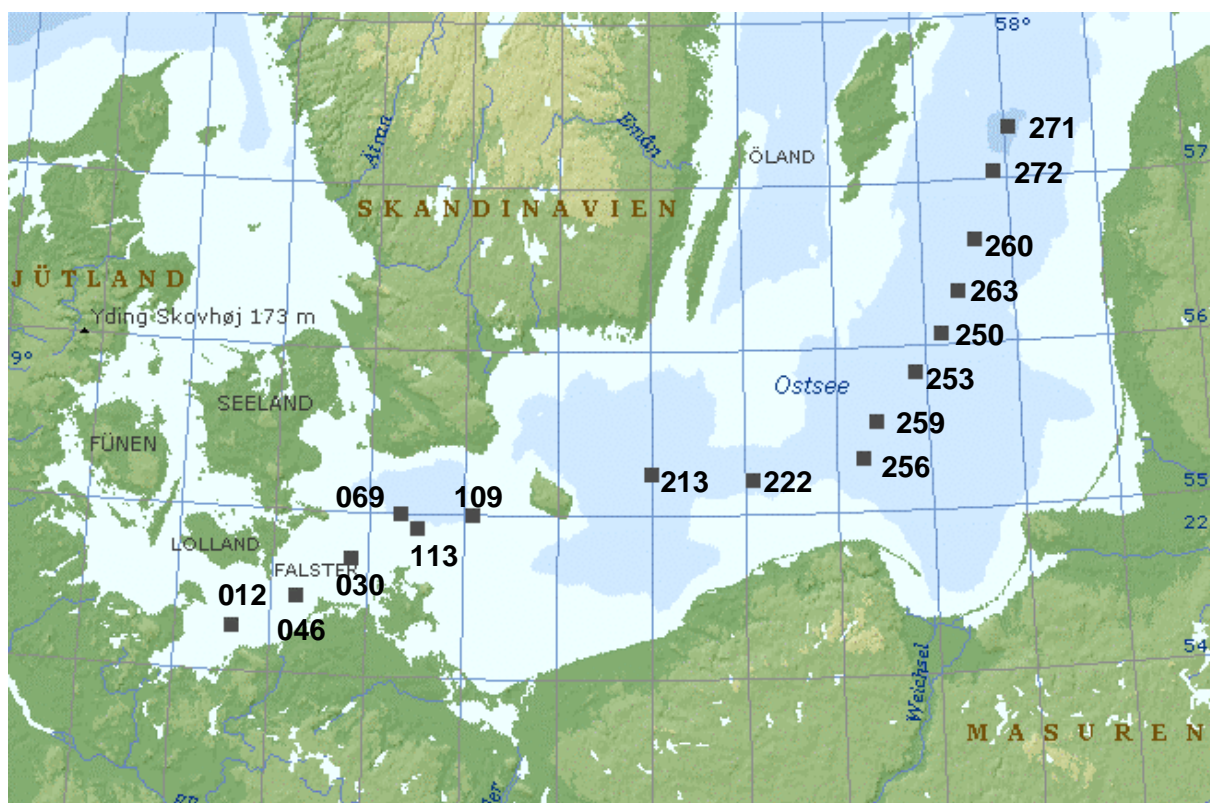


Abb. 1:  
Stationskarte

Fig. 1  
Station map

## 2.1 Probenaufarbeitung

Bezüglich der Probenvorbereitung, Analytik und Messung kamen die gleichen Methoden und Messgeräte wie in den letzten Berichtsjahren 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 2002 (Round 28); Exercise 506 für Metalle in Sedimenten teil. Um Kosten zu sparen, wurde die analytische Qualitätssicherung für die gelösten Metallkonzentrationen u.a. mit Hilfe eines Substandards (unfiltriert) von der Station 213/30m durchgeführt (Tabelle 3), sowie mit dem Referenzstandard NASS-5 (Tabelle 2). Die Qualitätssicherung in suspendiertem partikulären Material (SPM) wurde mit Hilfe des Referenzstandards MESS-2 und Quecksilber mit Hilfe von CRM 579 parallel zur Probenaufarbeitung durchgeführt (Tabelle 4; Tabelle 5). Als Ergänzung sind auch in diesem Jahr in Tabelle 6 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 -NASS 5-

Table 2

Quality assurance of metals in the dissolved phases with CRM-NASS 5

<b>Datum</b>	<b>Cd (ng/kg)</b>	<b>Cu (ng/kg)</b>	<b>Pb (ng/kg)</b>	<b>Zn (ng/kg)</b>
<b>Soll</b>	<b>23+-3</b>	<b>297+-46</b>	<b>8+-5</b>	<b>102+-39</b>
<b>Sept-Dez. 2002</b>	<b>n=3</b>	<b>n=3</b>	<b>n=3</b>	<b>n=3</b>
<b>Mean</b>	<b>20,53</b>	<b>344,67</b>	<b>13,07</b>	<b>145,00</b>
<b>STDEV</b>	<b>1,83</b>	<b>18,15</b>	<b>3,35</b>	<b>45,51</b>
<b>%</b>	<b>8,93</b>	<b>5,27</b>	<b>25,62</b>	<b>31,38</b>

Tab. 3

Qualitätssicherung von Metallen in der gelösten Phase mit Hilfe von Substandard; Station 213, 30m Tiefe

Table 3

Quality assurance of metals in the dissolved phases with substandard (Station 213, 30m depth)

<b>Datum</b>	<b>Cd (ng/kg)</b>	<b>Cu (ng/kg)</b>	<b>Pb (ng/kg)</b>	<b>Zn (ng/kg)</b>
<b>Sept-Dez. 2002</b>	<b>n=20</b>	<b>n=20</b>	<b>n=20</b>	<b>n=20</b>
<b>Mean</b>	<b>13,25</b>	<b>637,95</b>	<b>20,90</b>	<b>785,76</b>
<b>STDEV</b>	<b>2,16</b>	<b>70,14</b>	<b>10,65</b>	<b>175,98</b>
<b>%</b>	<b>16,31</b>	<b>10,99</b>	<b>50,97</b>	<b>22,40</b>

Tab. 4

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

Table 4

Quality assurance of mercury in seawater with CRM-579

<b>CRM 579</b>	<b>Hg (ng/dm<sup>3</sup>)</b>
<b>Soll</b>	<b>1,85+-0,2</b>
<b>Jul.-Aug.2002</b>	<b>n=9</b>
<b>MEAN</b>	<b>2,07</b>
<b>STDEV</b>	<b>0,21</b>
<b>%</b>	<b>10</b>

Tab. 5

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

Table 5

Quality assurance of metals in the particulate phases with CRM-MESS 2

<b>Datum</b>	<b>Cd (µg/g)</b>	<b>Cu (µg/g)</b>	<b>Pb (µg/g)</b>	<b>Zn (µg/g)</b>	<b>Mn (µg/g)</b>	<b>As (µg/g)</b>	<b>Hg (ng/g)</b>
<b>Soll</b>	<b>0,24+-0,01</b>	<b>39,3+-2,0</b>	<b>21,9+-1,2</b>	<b>172+-16</b>	<b>365+-21</b>	<b>20,7+-0,8</b>	<b>92+-9</b>
<b>Sept-Dez. 2002</b>	<b>n=11</b>	<b>n=11</b>	<b>n=11</b>	<b>n=11</b>	<b>n=11</b>	<b>n=11</b>	<b>n=6</b>
<b>Mean</b>	<b>0,26</b>	<b>38,07</b>	<b>23,04</b>	<b>173,45</b>	<b>355,91</b>	<b>27,35</b>	<b>98</b>
<b>STDEV</b>	<b>0,01</b>	<b>3,44</b>	<b>1,63</b>	<b>9,24</b>	<b>26,18</b>	<b>1,48</b>	<b>6,3</b>
<b>%</b>	<b>5,52</b>	<b>9,05</b>	<b>7,08</b>	<b>5,33</b>	<b>7,36</b>	<b>5,42</b>	<b>6,4</b>

Tab. 6

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

Table 6

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

<b>Datum</b>	<b>Cd ng/ Filter</b>	<b>Cu ng/ Filter</b>	<b>Pb ng/ Filter</b>	<b>Zn ng/ Filter</b>	<b>Mn ng/ Filter</b>	<b>As ng/ Filter</b>
<i>Sept-Dez.2002</i>	<b>n=5</b>	<b>n=5</b>	<b>n=5</b>	<b>n=5</b>	<b>n=5</b>	<b>n=5</b>
<b>Mean</b>	<b>0,02</b>	<b>1,06</b>	<b>0,53</b>	<b>3,13</b>	<b>0,72</b>	<b>0,20</b>

### 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 und der Trends 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 (µg/g), und der volumenbezogenen Konzentrationsangabe (ng/dm<sup>3</sup> bzw. nmol/dm<sup>3</sup>) 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, dass bei den Grafiken in diesem Bericht alle drei Konzentrationsangaben vorkommen können. Die zusammenfassenden Datentabellen im Anhang enthalten neben den massenbezogenen Ergebnissen für Schwermetalle in SPM (µg/g) auch die volumenbezogenen Ergebnisse in (ng/L).



### 3.1 Verteilungsmuster der Metallkonzentrationen in der gelösten und partikulären Phase an den im Jahre 2002 beprobten Stationen und Tiefen

Wie in den vorangegangenen Jahren konzentrierten sich auch 2002 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, 2001, 2002) zum Schwermetallmonitoring beschrieben. Im Vergleich zum Vorjahr ist im Jahre 2002 der Schwebstoffanteil an den Stationen in der westlichen Ostsee (Abb.3) um ca. 30% höher, welches auf die wechselnden Windverhältnisse, und damit auf eine mehr oder weniger starke bodennahe Durchmischung der Wassersäule verbunden mit Einträgen von feinkörnigen Oberflächensedimenten zurückzuführen ist. Allerdings sind die Schwebstoffanteile in der westlichen Ostsee ca. um den Faktor 3-6 höher als in der zentralen Ostsee. Der Schwebstoffanteil in der Wassersäule ist vor allem bei der Berechnung der "volumenbezogenen Schwermetallgehalte in suspeniertem partikulären Material" (SPM) wichtig.

#### Cadmium

Die gelösten Cadmiumkonzentrationen (Cd<sub>gel</sub>) in der westlichen Ostsee variieren ähnlich wie im Vorjahr zwischen 12-18ng/kg und gehen in der zentralen Ostsee geringfügig auf Werte zwischen 10-15ng/kg zurück. Sehr niedrige (Cd<sub>gel</sub>) Konzentrationen <8ng/kg werden im anoxischen Tiefenwasser des Gotland Beckens (Abb. 10) angetroffen. Im sauerstoffarmen Bodenwasser des Bornholm Beckens (Abb. 9) wird eine ähnliche Tendenz beobachtet. Da hier allerdings nur zeitweise anoxische Bedingungen im Jahresverlauf zu beobachten sind, variieren die Cd<sub>gel</sub> Konzentrationen hier zwischen 4ng/kg (2001) und 10 ng/kg (2002).

Bei den schwebstoffgebundenen Cd-anteilen (CdSPM) sind leicht erhöhte Gehalte im Oberflächenwasser der westlichen Ostsee zu beobachten, die auf den ebenfalls erhöhten Schwebstoffanteil in der Wassersäule zurückzuführen sind (Abb. 3; Abb. 6-8). Weiterhin fallen die erhöhten Cd(SPM) Gehalte im Bodenwasser des Bornholm Beckens sowie im Tiefenwasser des Gotland Beckens auf, welches auf die geochemischen Prozesse unter anoxischen Bedingungen zurückzuführen ist.

Für Cd<sub>gel</sub> wird im Vergleich zum Vorjahr am häufigsten der etwas niedrigere Konzentrationsbereich zwischen (8-14 ng/kg) angetroffen. Für CdSPM (volumenbezogen) wird der Bereich <1 ng/dm<sup>3</sup> am häufigsten frequentiert. An der Gesamtkonzentration in der Wassersäule variiert der partikuläre Cd-anteil zwischen 5-10%.

#### Blei

Im Jahre 2002 variieren die gelösten (Pb<sub>gel</sub>) (Abb.2) und partikulären (PbSPM) (Abb.3) Bleikonzentrationen in der westlichen Ostsee im Vergleich zum Vorjahr auf einem höheren Konzentrationsniveau zwischen 60-180 ng/kg bzw. 40-120 ng/dm<sup>3</sup>. Sie sind damit um den Faktor 5-8 höher als in der zentralen Ostsee. Am häufigsten wird hier der Pb<sub>gel</sub> Konzentrationsbereich

zwischen 2-14 ng/kg frequentiert (Abb. 4). Der schwebstoffgebundene volumenbezogene Bleianteil entspricht ca. 50% der Gesamtkonzentrationen in der Wassersäule. Die vertikale Bleiverteilung an den Tiefenstationen (Abb. 9-10) variiert sowohl in der gelösten wie auch der partikulären Phase ähnlich den Vorjahren stark. Erste Vermutungen gehen dahin, dass zum einen der Anteil von Al-Fe Silikaten in der Wassersäule eine Ursache ist, die sich auf die Bleispeziation (gelöst/partikulär) auswirkt, zum anderen könnten die reduzierenden Bedingungen, und die damit verbundene Änderung der Manganspeziation (MnII / MnIV) ebenfalls Einfluss auf die vertikale Bleiverteilung nehmen.

## **Kupfer**

Die gelösten und partikulären Kupferkonzentrationen (Cugel), Cu(SPM) (Abb. 2-3) sind vergleichbar zum Vorjahr am häufigsten im Konzentrationsbereich zwischen 300-600 ng/kg und <15 ng/dm<sup>3</sup> anzutreffen. Auffallend ist in diesem Jahr die hohe Cugel Konzentration (~1200 ng/kg) an der Station 12 im 15 m Tiefenhorizont der Mecklenburger Bucht. Eine Probenkontamination wird hier ausgeschlossen, da sowohl die Cd<sub>gel</sub> wie auch die Pb<sub>gel</sub> und Zn<sub>gel</sub> Konzentrationen im Normbereich liegen. 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 Nordseewasser beeinflusst (Abb. 6).

Erhöhte Kupfergehalte in der partikulären Phase (40-60 ng/dm<sup>3</sup>) sind in der westlichen Ostsee, sowie im anoxischen Tiefenwasser des Gotland Beckens zu beobachten, welches auf die geochemischen Prozesse zurückzuführen ist.

## **Zink**

Die gelösten Zinkkonzentrationen (Zn<sub>gel</sub>) variieren ähnlich dem Vorjahr zwischen 400-800 ng/kg. In der westlichen Ostsee sind die Konzentrationen mit ~1300ng/kg um den Faktor 2-3 höher als in der zentralen Ostsee.

Die volumenbezogenen partikulären Zinkgehalte (ZnSPM) sind im Jahre 2002 am häufigsten im Bereich zwischen 50-100 ng/dm<sup>3</sup> anzutreffen. Bei der vertikalen Verteilung im Gotland Becken fallen ähnlich wie beim Blei die starken Fluktuationen an und zwischen den beiden Grenzschichten Halocline und Redoxcline auf (Abb. 9-10). Hier wird vermutet, dass eine Partikelmodifikation als Resultat von Aggregation und/ oder dem Zerfall von Aggregaten sowie die selektive Auswahl während der Filtration eine mögliche Ursache ist. Weiterhin muss die Sinkgeschwindigkeit der unterschiedlich großen Aggregate berücksichtigt werden.

## **Quecksilber**

Im Jahr 2002 wurde für die Quecksilberkonzentrationen (gesamt) der Bereich zwischen 500-2500 pg/dm<sup>3</sup> am häufigsten angetroffen, wobei die Werte im Oberflächenwasser der westlichen Ostsee geringfügig höher sind als in der zentralen Ostsee. Besonders auffällig sind in diesem Jahr die

außergewöhnlich hohen Konzentrationen von bis zu  $\sim 11000$  pg/dm<sup>3</sup> an der Station 271 im Gotland Becken (Abb. 2; Abb.10). Ähnlich wie bei den Elementen Blei und Zink sind starke Fluktuationen an und zwischen den beiden Grenzschichten Halocline und Redoxcline zu beobachten. Dieses ist möglicherweise auf die Speziation des Quecksilbers zurückzuführen. Unter anoxischen Bedingungen, bildet Hg ähnlich wie Cd schwerlösliche Sulfide, die sich in den Oberflächensedimenten anreichern. Da diese anorganischen Hg-Verbindungen auf anaerobe Bakterien toxisch wirken, werden diese Verbindungen von den Bakterien zu organischen Methyl-Hg-Verbindungen "entgiftet". Diese Speziation des Quecksilbers ist wiederum löslich und gelangt aus den Sedimenten in die Wassersäule. Ob diese Prozesse bereits in der anoxischen Wassersäule stattfinden können, ist nicht geklärt.

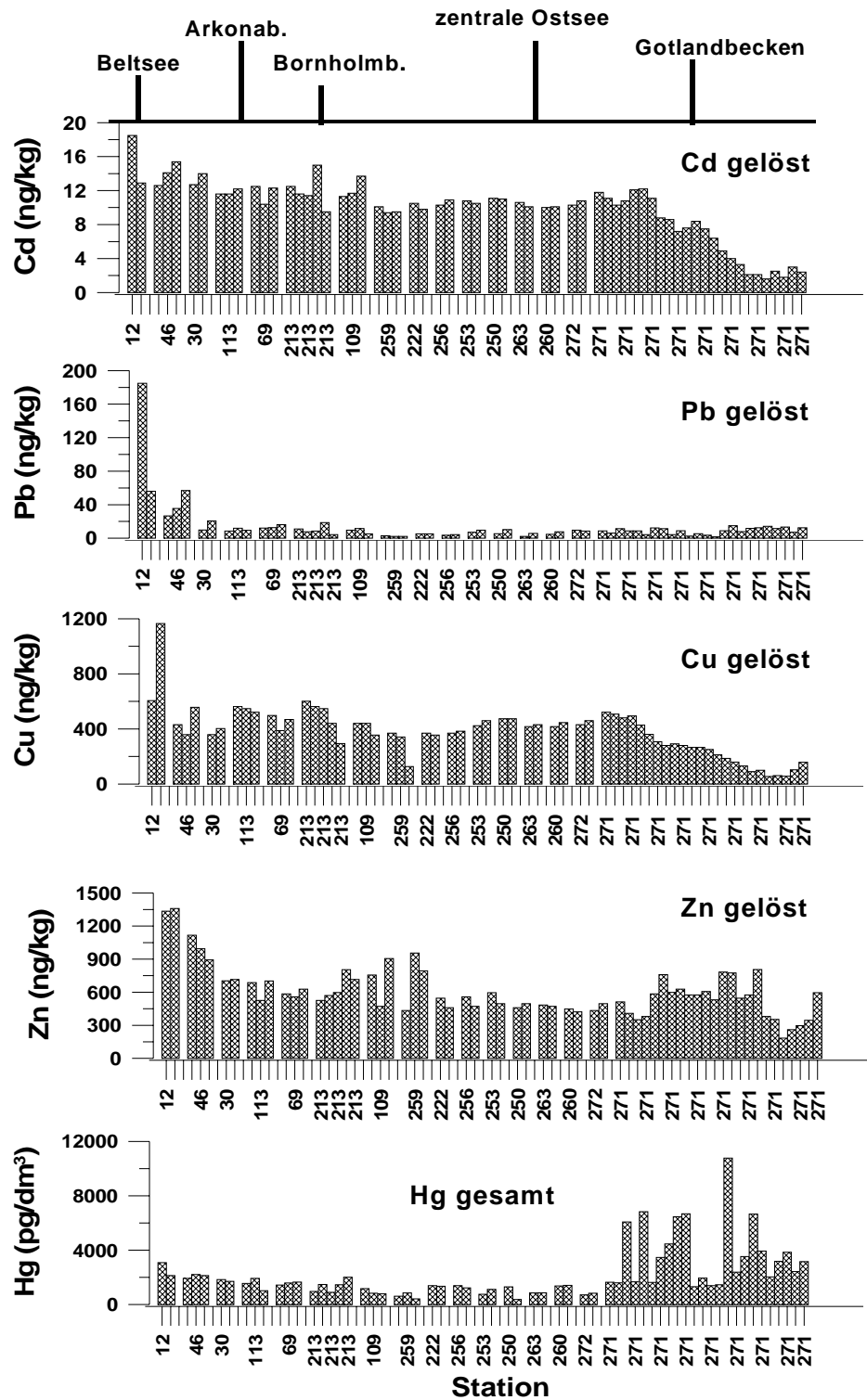


Abb.: 2

Verteilungsmuster der gelösten Metallkonzentrationen an den 2002 beprobten Stationen und Tiefen in der Ostsee (siehe Datenanhang)

Fig. 2

Distribution of metal concentrations in the dissolved phases in 2002, at the different sampling stations and sampling depth in the Baltic

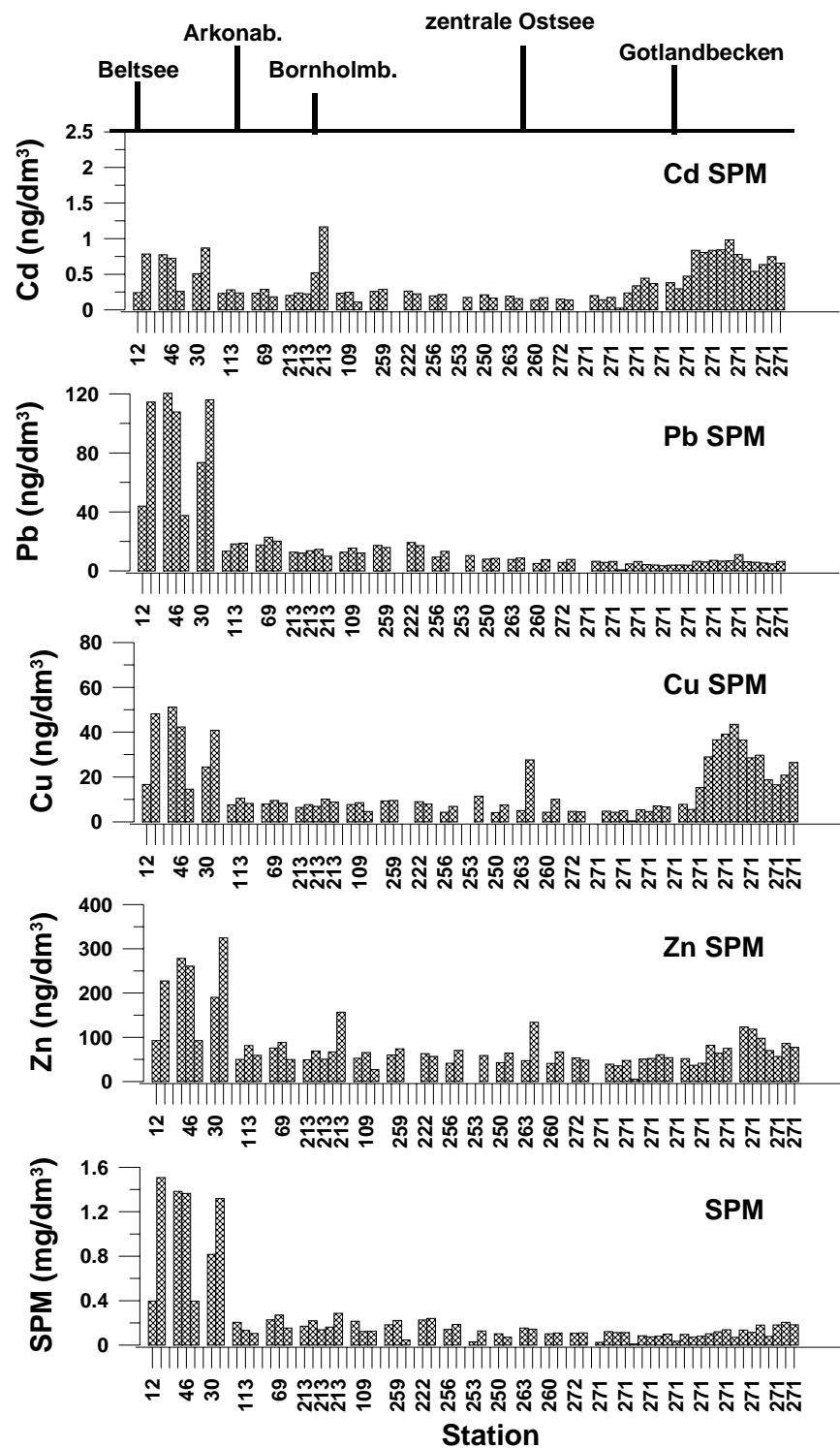


Abb. 3

Verteilungsmuster der Metallkonzentrationen in SPM (volumenbezogen) an den 2002 beprobten Stationen und Tiefen in der Ostsee (siehe Datenanhang)

Fig. 3

Distribution of metal concentrations in the particulate phases (related to the volume) in 2002, at the different sampling stations and sampling depth in the Baltic

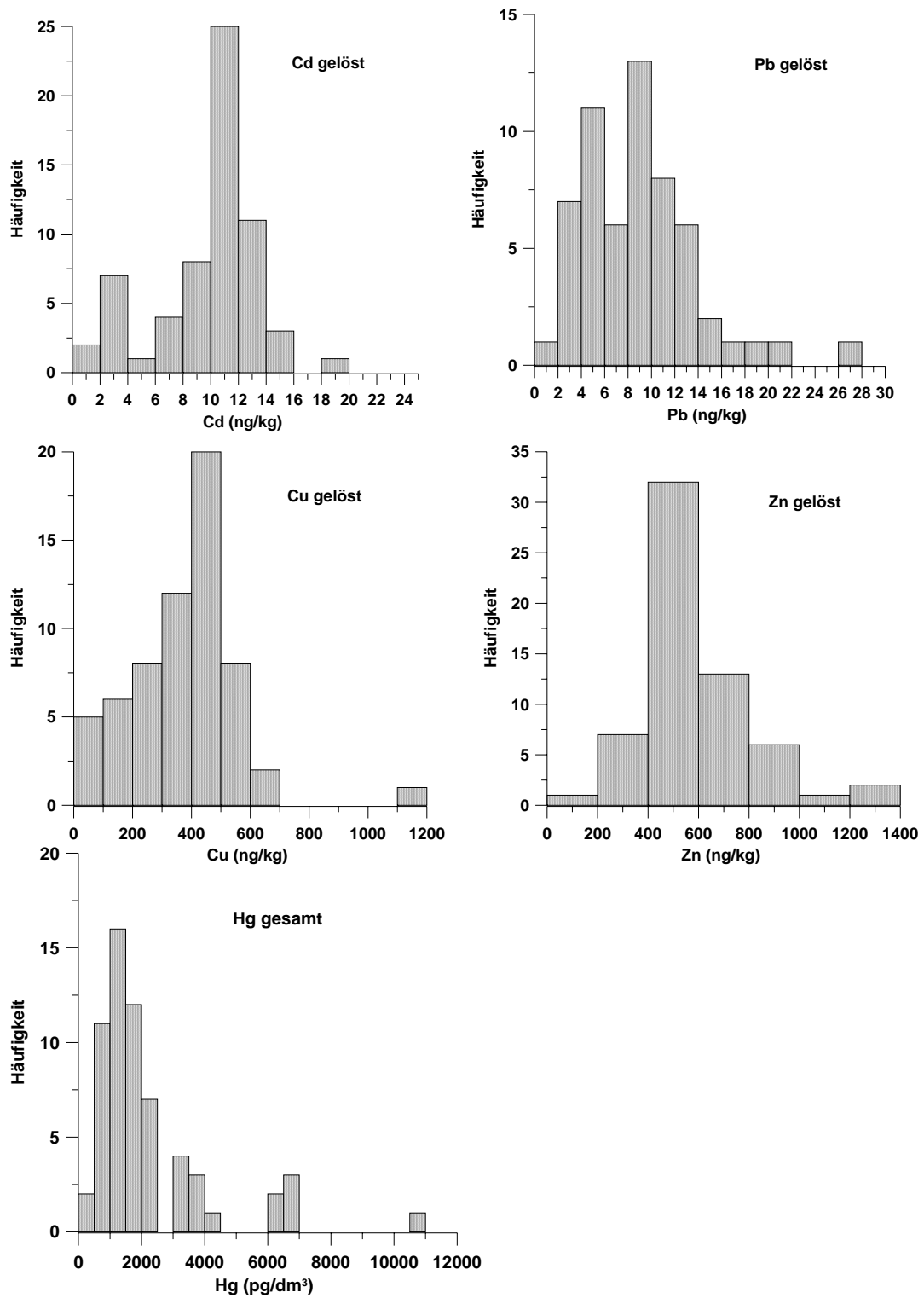


Abb.  
Häufigkeitsverteilungen der gelösten Metallkonzentrationen in der Ostsee, im Februar 2002

Fig. 4  
Frequency distribution of metal concentrations in the dissolved phases in the Baltic; February 2002

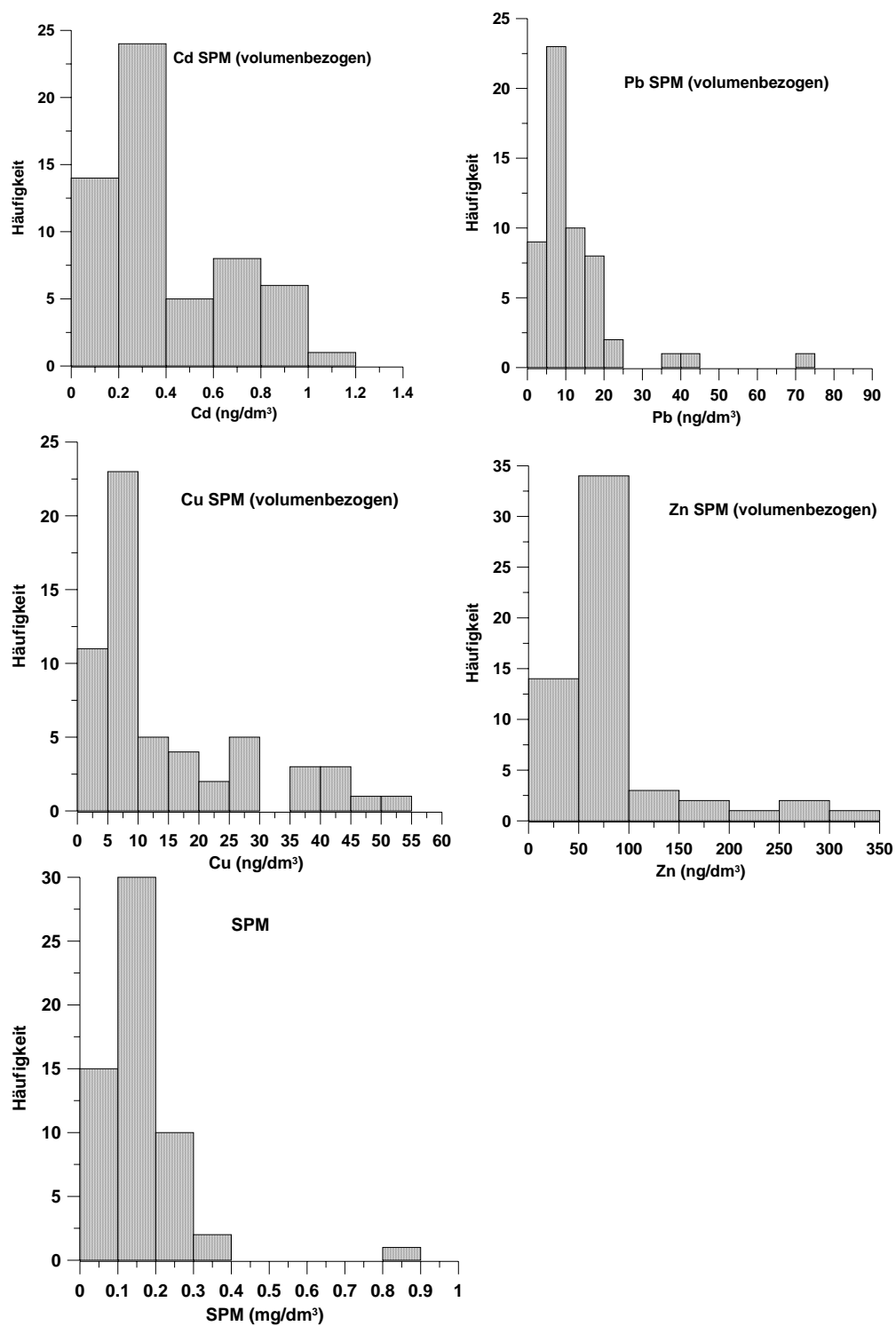


Abb. 5  
Häufigkeitsverteilungen der Metallkonzentrationen in der Schwebstoffphase (volumenbezogen) in der Ostsee, Februar 2002

Fig. 5  
Frequency distribution of metal concentrations in the particulate phases (related to the volume) in the Baltic; February 2002

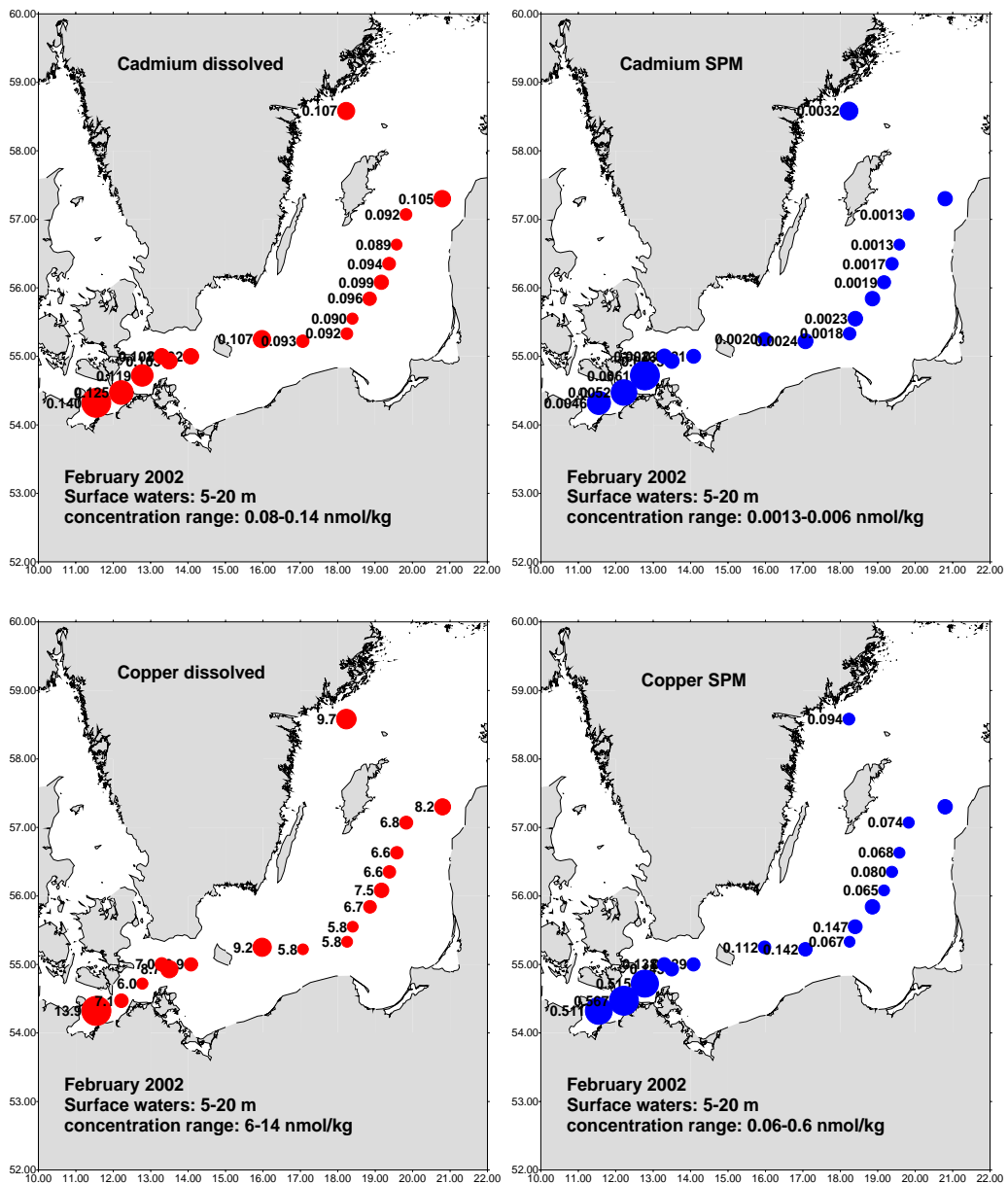


Abb. 6  
Verteilung von Cd und Cu in der gelösten und partikulären Phase im Oberflächenwasser der Ostsee

Fig. 6  
Distribution of Cd and Cu in the dissolved and particulate phases in surface waters of the Baltic



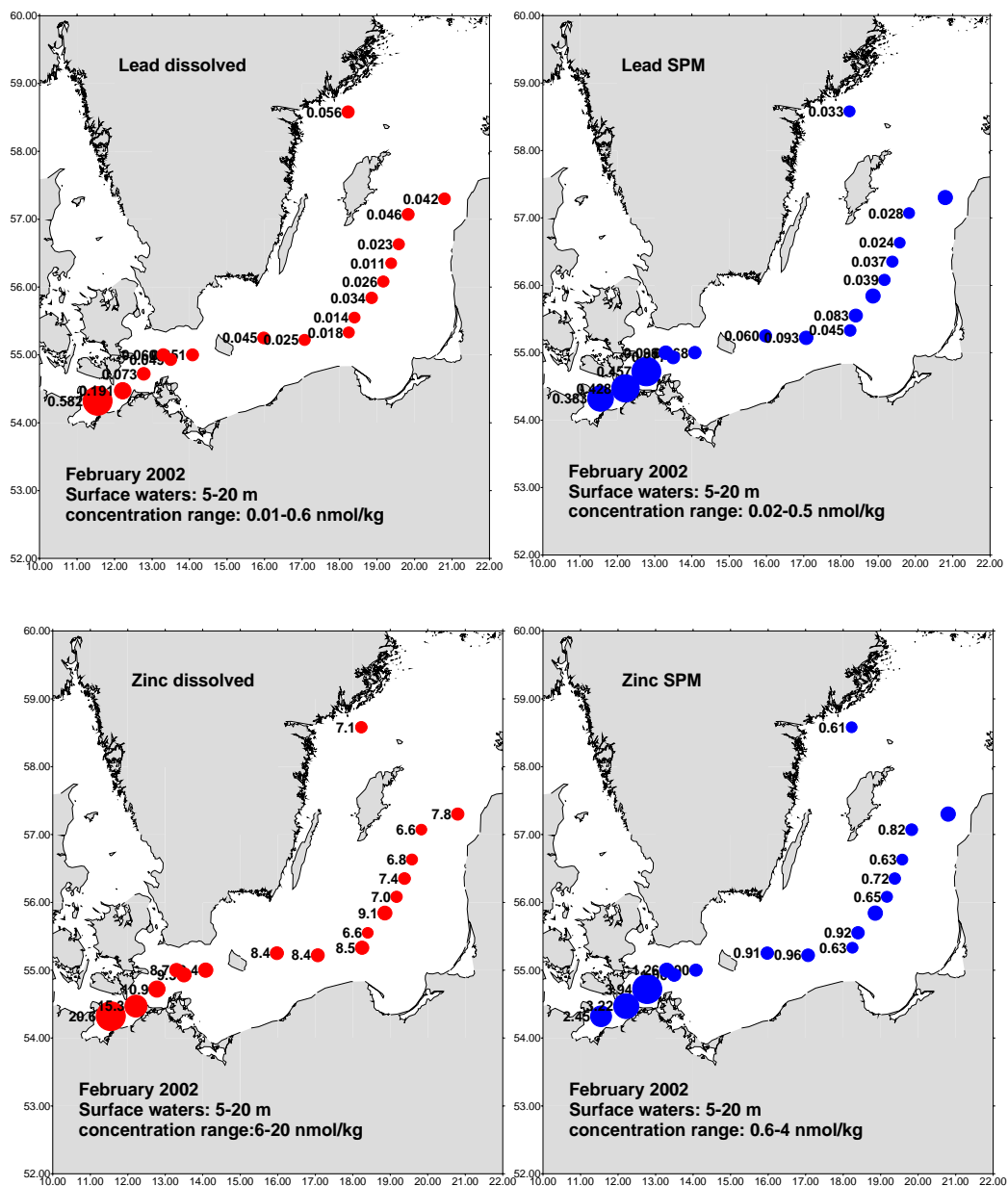


Abb. 7  
Verteilung von Pb und Zn in der gelösten und partikulären Phase im Oberflächenwasser der Ostsee

Fig. 7  
Distribution of Pb and Zn in the dissolved and particulate phases in surface waters of the Baltic

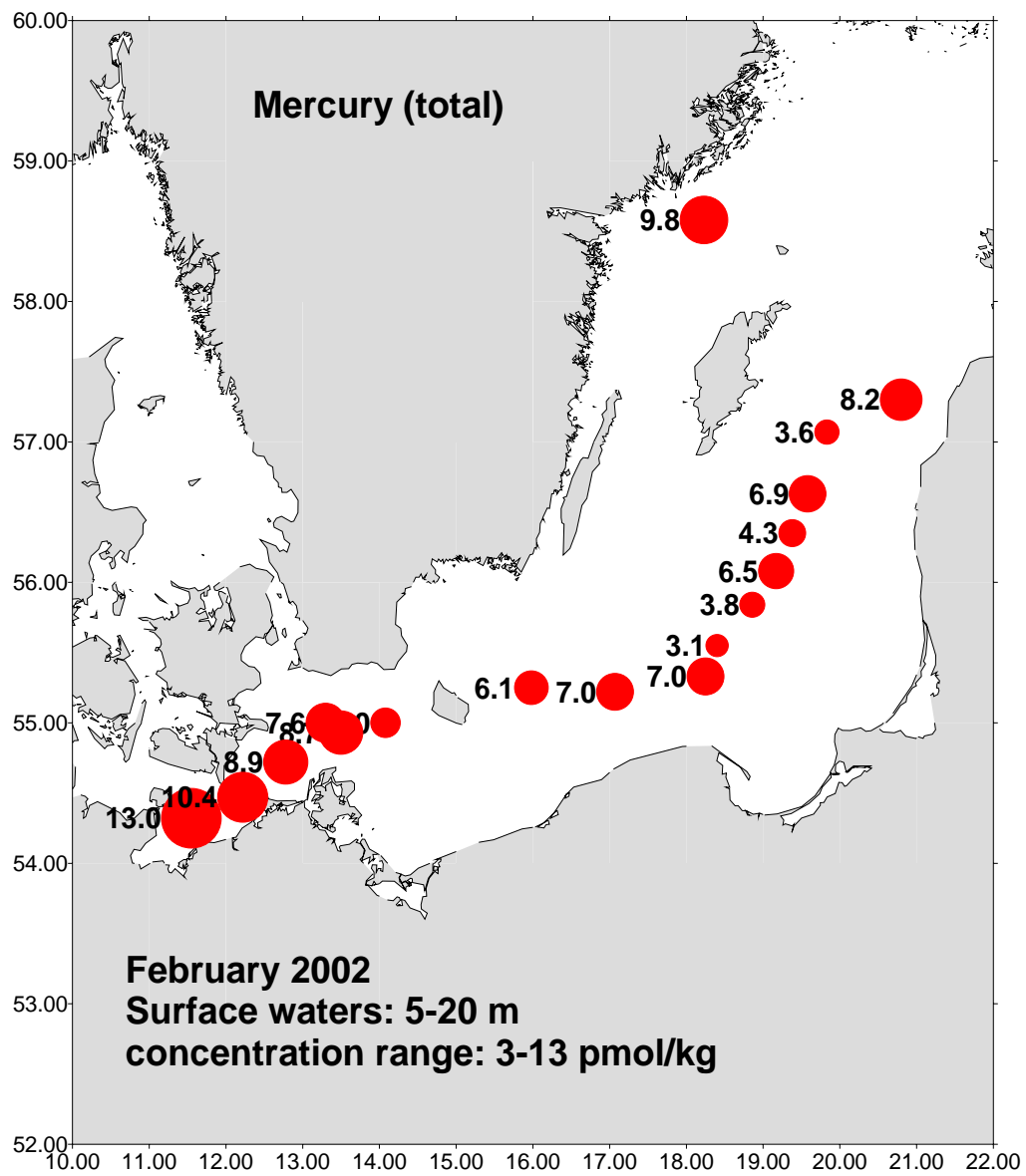


Abb. 8  
Verteilung von Quecksilber (gesamt) Hg (tot) im Oberflächenwasser der Ostsee

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

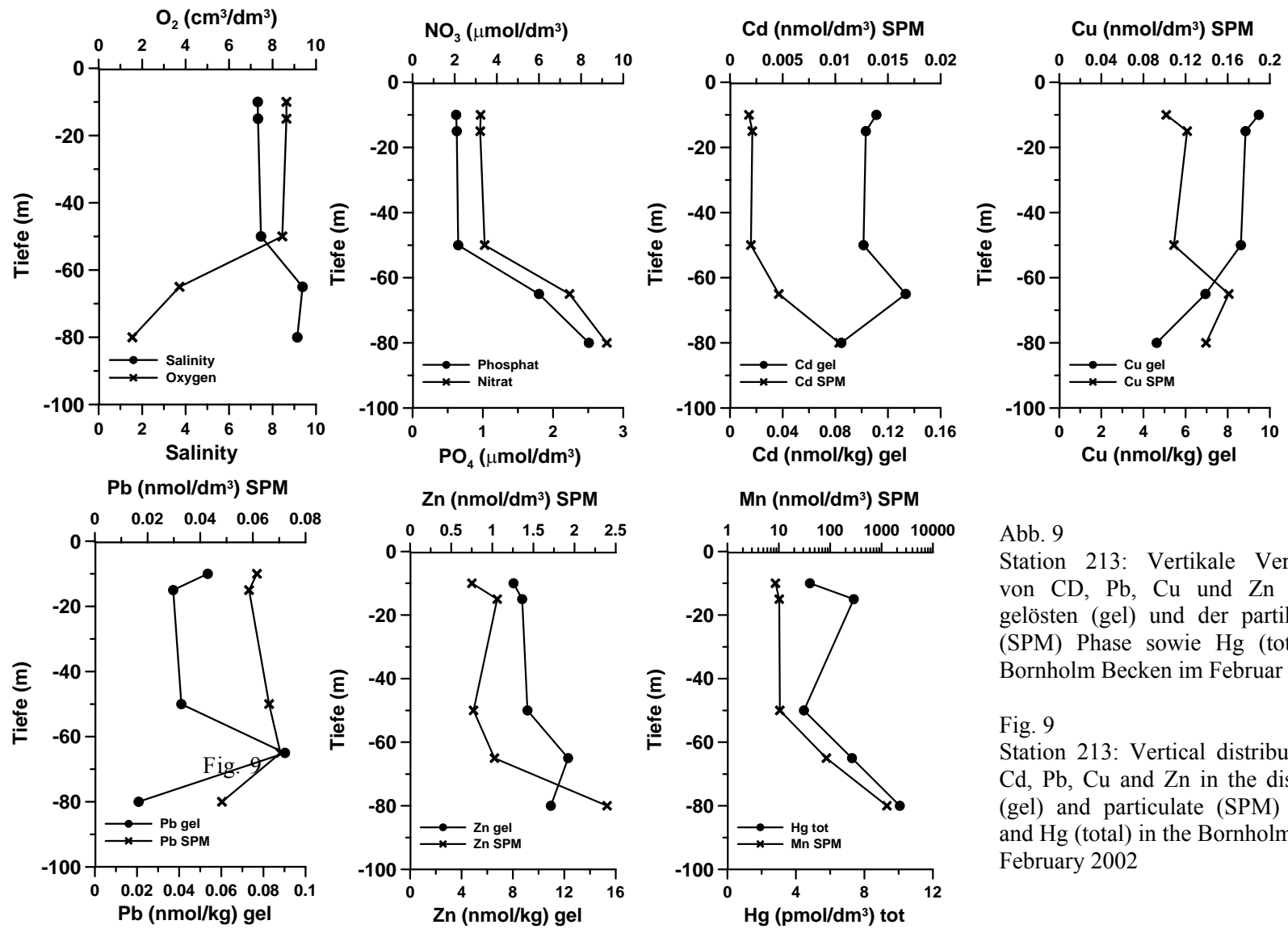


Abb. 9  
Station 213: Vertikale Verteilung von Cd, Pb, Cu und Zn in der gelösten (gel) und der partikulären (SPM) Phase sowie Hg (total) im Bornholm Becken im Februar 2002

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 2002

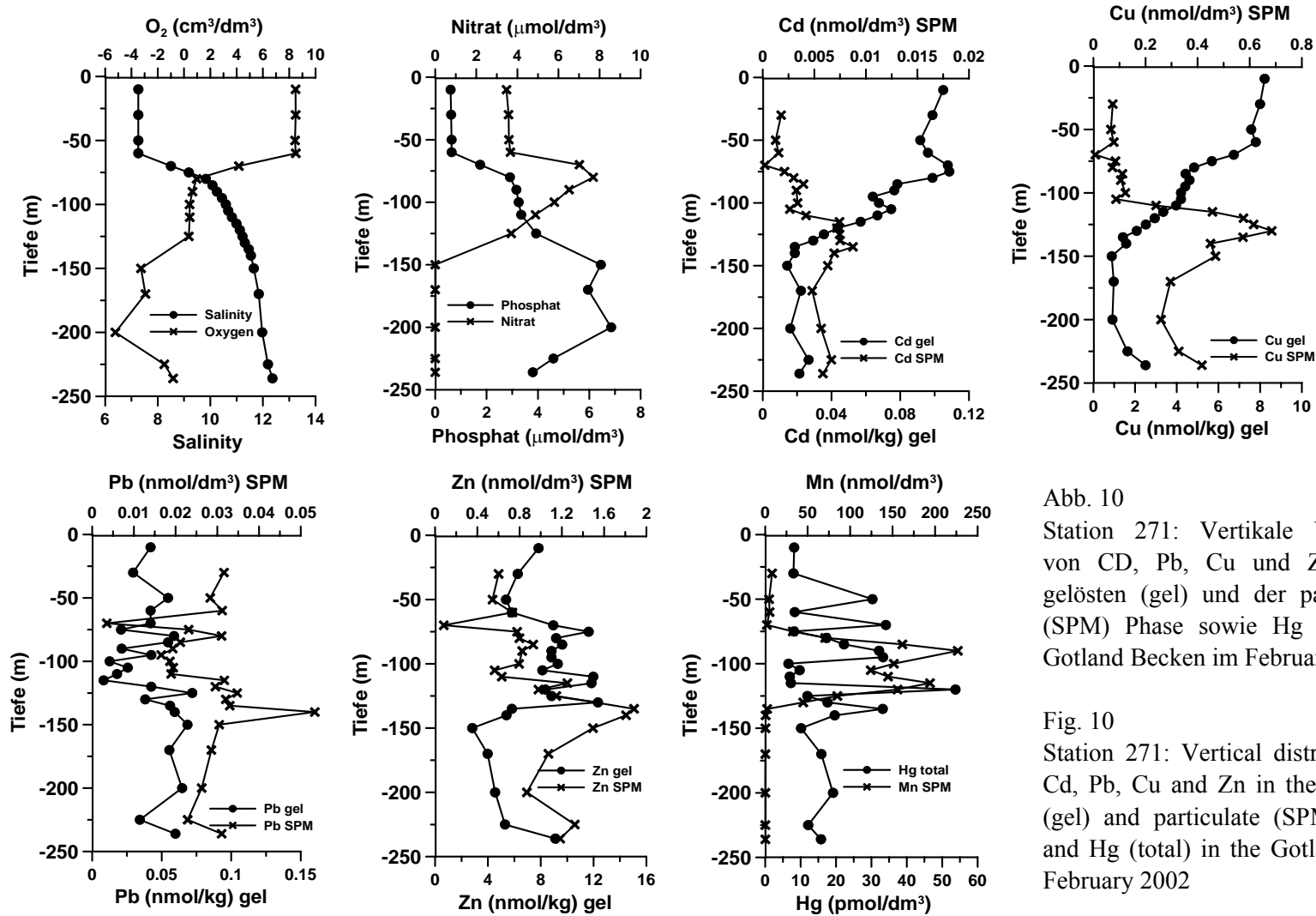


Abb. 10

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 2002

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 2002

### 3.2 Spurenmetall – Trends zwischen den Jahren 1993-2002 an Stationen in der westlichen Ostsee und zentralen Ostsee (Abb. 11 - Abb. 15)

#### Westliche Ostsee

In der Mecklenburger Bucht und im Arkonabecken wird in den Wintermonaten im Allgemeinen eine völlig durchmischte Wassersäule angetroffen. Für die Trendauswertung (Abb. 11-15) in der westlichen Ostsee wurden die Daten aus der Mecklenburger Bucht und dem Arkonabecken berücksichtigt. Dabei sind auch die durch das Orkantief 1999 erhöhten Messwerte in die Auswertung eingegangen.

In Anlehnung an das "Third Periodic Assessment" (HELCOM 1996) wurden folgende Stationen für die Auswertung berücksichtigt:

Mecklenburger Bucht: M1 (012), M2 (046)

Arkona Becken: K4 (109), K5 (113), K7 (069), K8 (030)

Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass die Probenahme 1993 im November, 1994 im Mai und seit 1995 im Februar stattfand.

Der Vollständigkeit halber wurden die Daten für die **Salzgehalte** an diesen Stationen ebenfalls dargestellt. Sie variieren zwischen 7-25 in der westlichen Ostsee. Diese doch recht großen Streuungen des Salzgehaltes lassen weiterhin erkennen, dass die westliche Ostsee einer hohen Dynamik in Bezug auf den Austausch von brackigem Wasser als auch von salzhaltigerem Kattegattwasser unterliegt. Ein nicht signifikant abnehmender Trend ist seit 1998 zu beobachten. Für **Quecksilber (gesamt)** konnte seit 1997 eine abnehmende Tendenz beobachtet werden, seit 1998 fluktuieren die Werte auf einem niedrigen Niveau, welches die Dynamik in der westlichen Ostsee widerspiegelt. Die erhöhten Konzentrationen 1999 sind auf das Orkantief, die damit verbundene bodennahe Durchmischung und den Eintrag von Oberflächensedimenten in die Wassersäule zurückzuführen. Da bei der Quecksilber (gesamt) Messung unfiltrierte Wasserproben aufgearbeitet werden, wirkt sich dieses auf die "Gesamtkonzentration" besonders stark aus.

Die Mehrzahl der **Cd<sub>gel</sub>** Konzentrationen variiert über den gesamten Zeitraum zwischen 0,1-0,2 nmol/kg. Eine tendenzielle Abnahme fällt bis 1996 auf, welches möglicherweise im Zusammenhang mit dem Salzwassereintrich 1994 und dem Ausstrom von Cd- armen Tiefenwasser aus dem Gotlandbecken zurückzuführen ist. Bis 1998 ist ein leichter Anstieg zu beobachten, und danach bis 2002 wieder eine tendenzielle Abnahme.

Für **CdSPM** sollten die Jahre 1993/1994 aufgrund der unterschiedlichen Jahreszeiten, und der damit verbundenen Beeinflussung der Wassersäule durch biologische Prozesse nur begrenzt berücksichtigt werden, in den folgenden Jahren bewegen sich die Gehalte zwischen 0,005-0,015 nmol/dm<sup>3</sup>, seit 1997 ist ein ansteigender Trend bis 2000 und eine Abnahme bis 2002 zu erkennen.

Für **Cugel** wurden 1993 sehr niedrige Konzentrationen in der westlichen Ostsee angetroffen, welches auf den Salzwassereinstrom 1993 und dem damit verbundenen Einstrom von Nordseewasser mit niedrigeren Cugel um 4 nmol/kg zurückgeführt wird. Danach ist bis 1997 wieder eine ansteigende Tendenz zu erkennen, und seit 1997 ist ein abnehmender Trend zu vermerken.

Die **CuSPM** Gehalte nehmen einen Anteil von etwa <5% an der gesamten Cu Konzentration in der Wassersäule ein, sie bewegen sich zwischen 0,1-1 nmol/dm<sup>3</sup>, ein Trend ist nicht zu erkennen.

Für **Pb<sub>gel</sub>** ist seit 1995 kein Trend zu erkennen. Die Ausreißer 1999 sind auf das Orkantief in der westlichen Ostsee zurückzuführen. Dieses spiegelt sich auch in den **PbSPM** Gehalten 1999 wider, ein Trend ist nicht zu erkennen.

Die **Zn<sub>gel</sub>** zeigen in den Jahren 1994 und 1995 nach dem Salzwassereinbruch Konzentrationen zwischen 5-20 nmol/kg, welches auch hier auf eine Vermischung mit zinkärmerem Nordseewasser hinweist. Zwischen 1996-1998 bewegen sich die Werte dann auf einem höheren Niveau mit Konzentrationen von bis zu 50 nmol/kg. Seit 1999 ist ein leichte Abnahme zu beobachten.

Die **ZnSPM** Gehalte zeigen bis 1996 keine Tendenz. Ab 1996 nimmt der Streuungsbereich der Einzelwerte zu. Die vereinzelt erhöhten Werte in den Jahren 1999 und 2000, die auch bei den Parametern PbSPM, CuSPM, CdSPM und Hggesamt registriert wurden, sind auf die Anreicherung von Bodensedimenten in der Wassersäule zurückzuführen, und müssen deshalb als Ausreißer angesehen werden.

## Zentrale Ostsee

Im Bornholm Becken und im Gotlandbecken wird auch in den Wintermonaten eine stabile Schichtung der Wassersäule angetroffen. Hier in der zentralen Ostsee, wird die Halocline im Allgemeinen unterhalb 50m angetroffen, deshalb wurden für die Trendauswertung (Abb. 11-15) die Schwermetalldaten nach Oberfläche (Above Halocline) und Tiefenwasser (Below Halocline) differenziert.

In Anlehnung an das "Third Periodic Assessment" (HELCOM 1996) wurden folgende Stationen für die Auswertung in der zentralen Ostsee berücksichtigt:

K2 (213); K1 (259); J1 (271); und soweit Daten vorhanden die H3 (284) im Landsorttief und I1 (245 in der westlichen Gotlandsee).

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<sub>gel</sub>, Cu<sub>gel</sub>, Pb<sub>gel</sub> und Zn<sub>gel</sub> 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.

Allerdings wurde im Oberflächenwasser der zentralen Ostsee ebenfalls seit 1996 ein abnehmender Trend für **Cu<sub>gel</sub>**, **Pb<sub>gel</sub>** und **Zn<sub>gel</sub>** registriert, während für **Cd<sub>gel</sub>** eine leicht ansteigende Tendenz bis 1999 und seitdem ein abnehmender Trend zu beobachten ist. Dieser leicht abnehmende Trend im Oberflächenwasser der Ostsee ist möglicherweise ein Resultat der sogenannten "Manganpumpe" im Bereich der Redoxgrenzschicht. Dabei gelangt gelöstes Mn(II) durch diffusive Prozesse aus dem anoxischen Wasserkörper in den oxischen Oberflächenwasserkörper und wird zu schwerlöslichem Mn(IV) Precipitaten oxidiert. Diese Mn (IV) Precipitate aggregieren, und bilden für Schwermetalle wie z. B. Cd, Cu, Pb und Zn eine geeignete Adsorptionsoberfläche mit denen sie dann wieder durch die Redoxcline in das anoxische Tiefenwasser eingetragen werden. Während Mn wieder zu seiner löslichen Mn(II) Spezies reduziert wird, werden die anderen Metalle als

schwerlösliche Sulfide gefällt, von anderen Partikeln wie Fe-Al Silikaten adsorbiert und bis ins Sediment transportiert.

Bei den partikulär fixierten Metallen **CuSPM**, **Hgtot**, **CdSPM**, **PbSPM** und **ZnSPM** kann weder oberhalb noch unterhalb der Haloclinen ein Trend beobachtet werden, was auf die o.g. Modifikation der Partikel in der Wassersäule zurückzuführen ist.

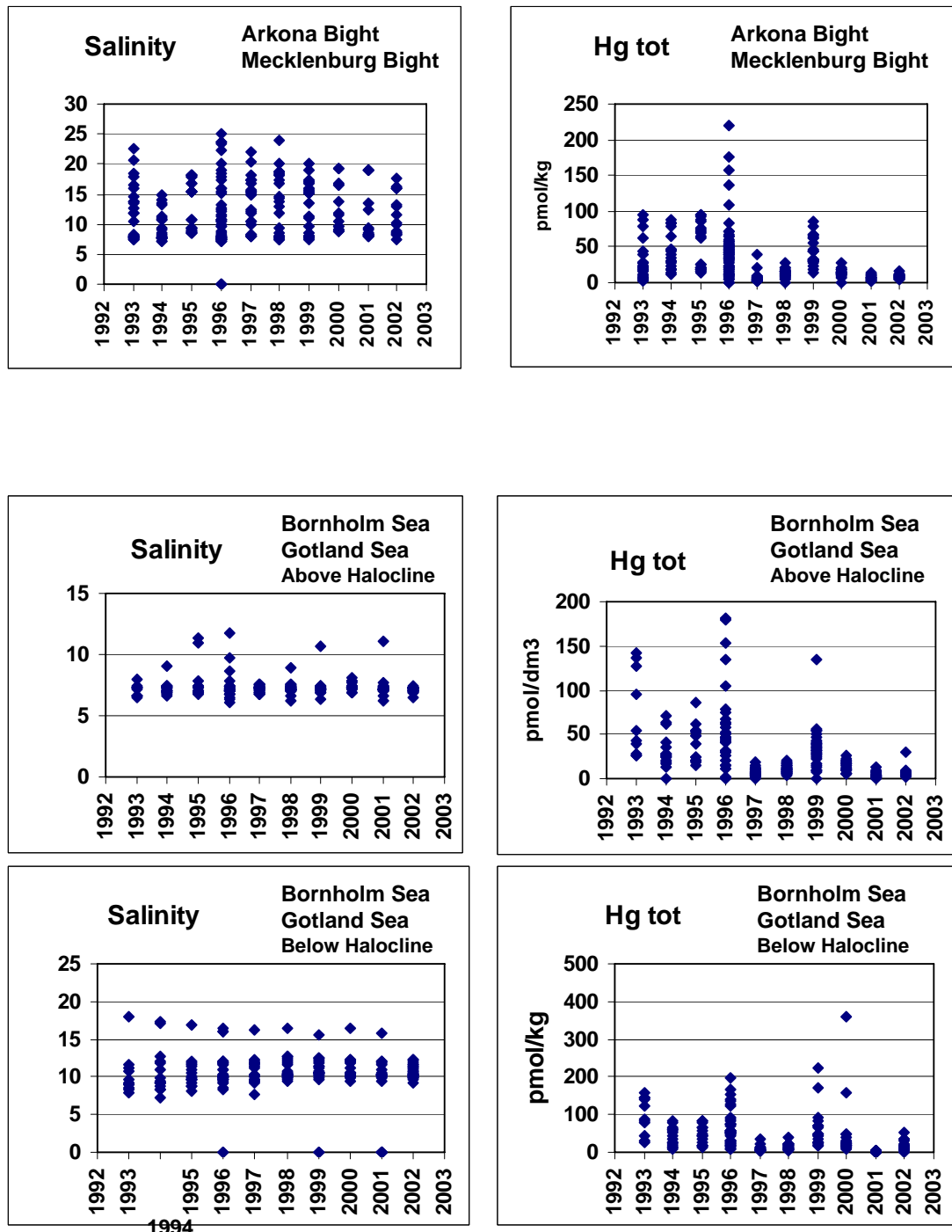


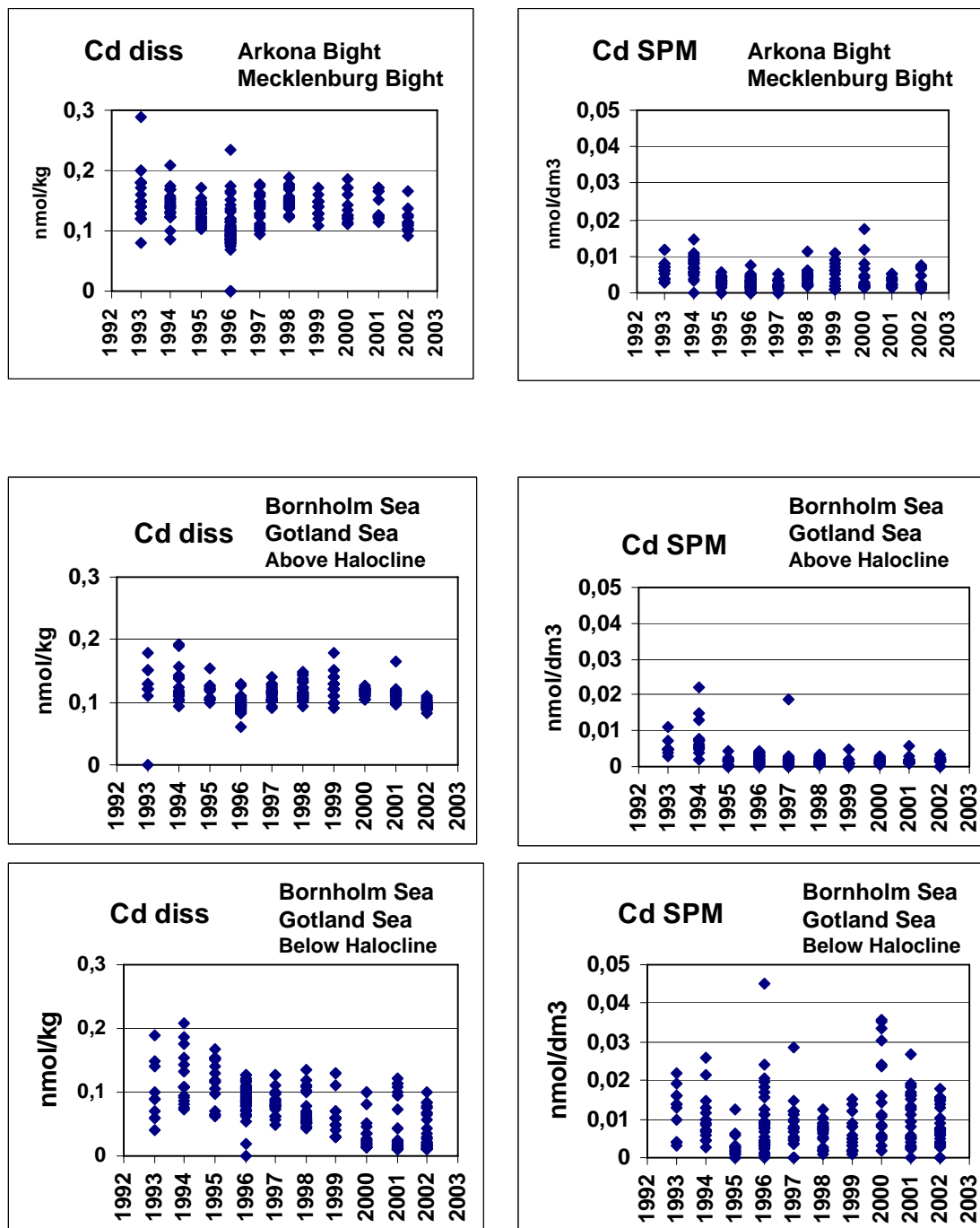
Abb. 11

Trends für Salzgehalt und Quecksilber gesamt (Hgtot), in der westlichen Ostsee, sowie oberhalb und unterhalb der Haloclinen in der zentralen Ostsee von 1993-2002

Fig. 11

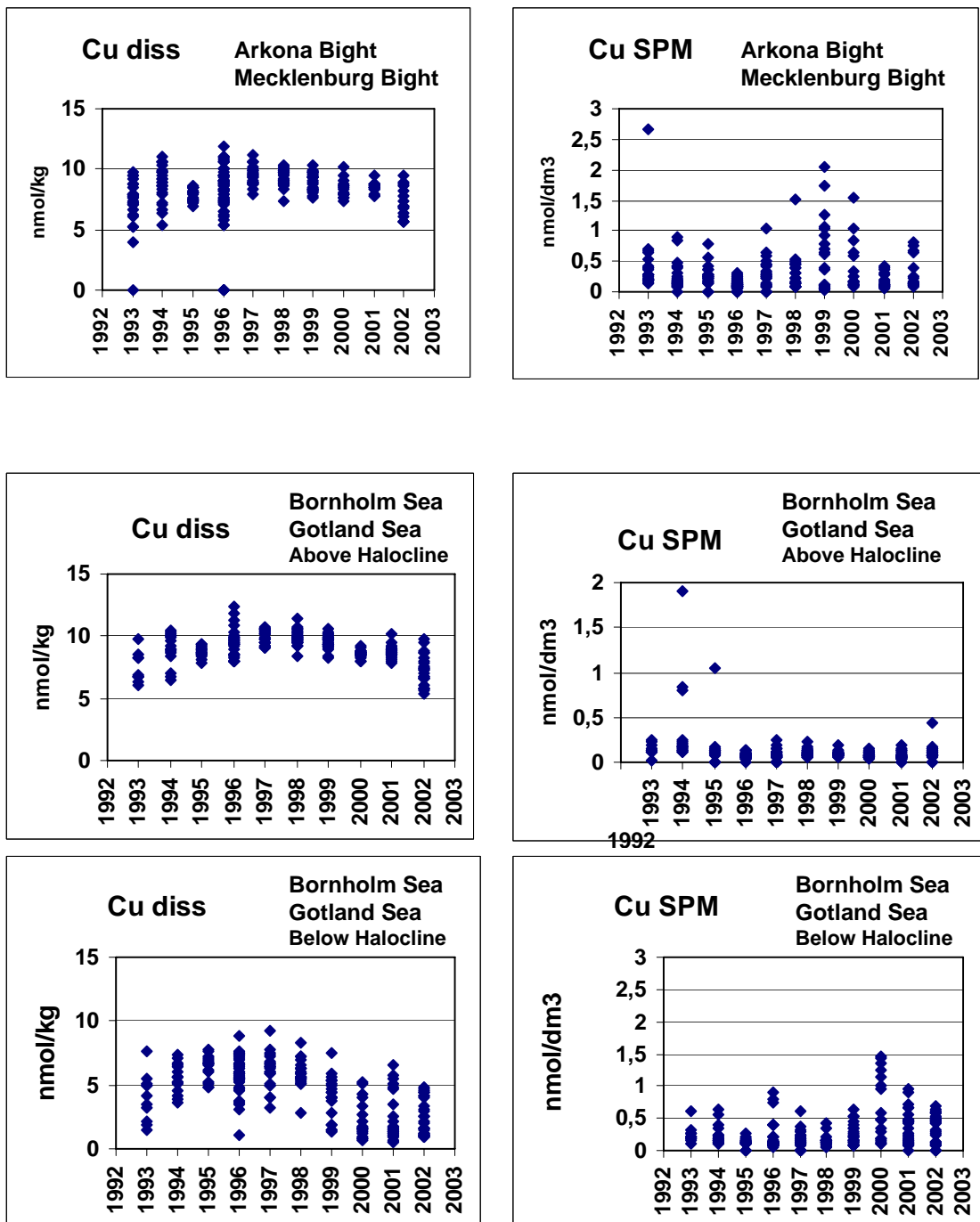
Analysis of trends for salinity and mercury (Hgtot) in the western Baltic as well as above and below the halocline in the central Baltic from 1993-2002





A Trends für gelöstes (diss) und partikuläres (SPM) Cadmium, in der westlichen Ostsee, sowie oberhalb und unterhalb der Haloclinen in der zentralen Ostsee von 1993-2002

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 from 1993- 2002



Abl

Trends für gelöstes (diss) und partikuläres (SPM) Kupfer, in der westlichen Ostsee, sowie oberhalb und unterhalb der Haloclinen in der zentralen Ostsee von 1993-2002

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 from 1993-2002

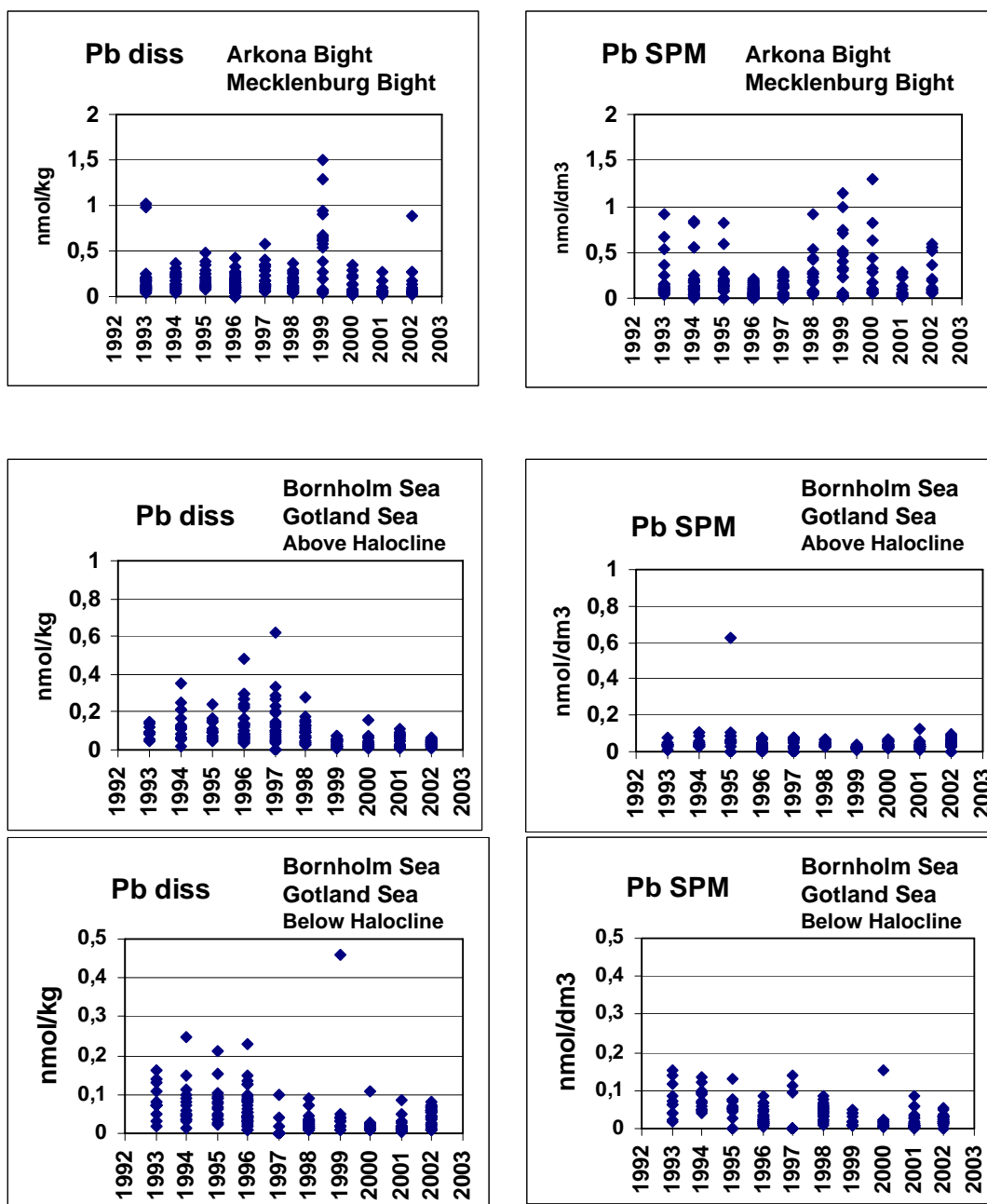


Abb.14

Trends für gelöstes (diss) und partikuläres (SPM) Blei, in der westlichen Ostsee, sowie oberhalb und unterhalb der Haloclinen in der zentralen Ostsee von 1993-2002

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 from 1993-2002

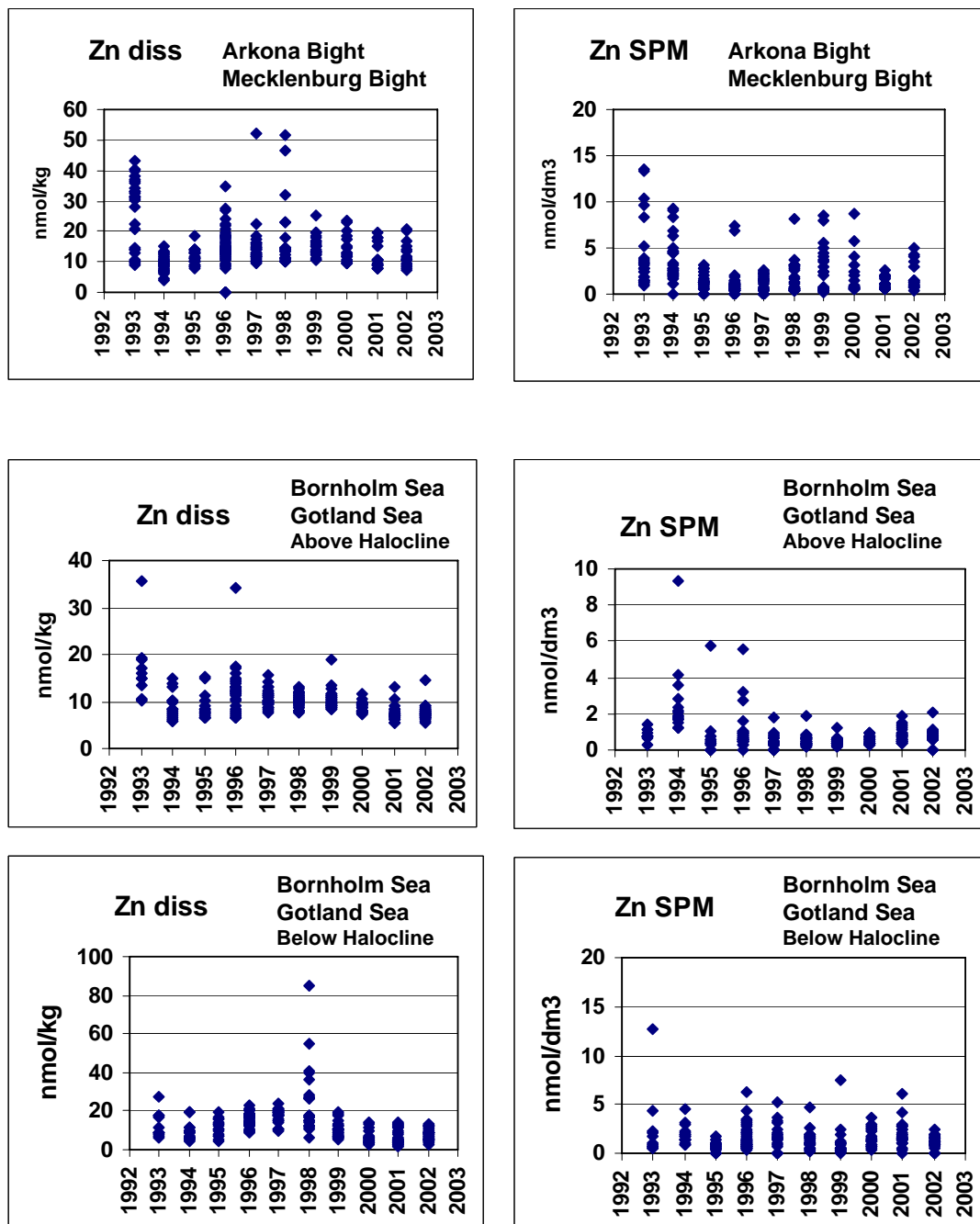


Abb. 15

Trends für gelöstes (diss) und partikuläres (SPM) Zink, in der westlichen Ostsee, sowie oberhalb und unterhalb der Haloclinen in der zentralen Ostsee von 1993-2002

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 from 1993-2002

#### 4. Schlussfolgerungen

Wie in den Vorjahren wies die Schwermetallverteilung im Ostseewasser im Jahr 2002 keine deutlichen oder gesundheitsgefährdenden Veränderungen auf. Regionale Konzentrationserhöhungen wie sie z. B. in den letzten Jahren in der westlichen 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 Schwermetall kontaminierten 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, dass 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) sind bekannt. Eine quantitative Abschätzung der Elimination von Metallen aus dem Oberflächenwasserkörper in den Tiefenwasserkörper wird zurzeit im Rahmen eines BMBF-Projektes bilanziert. Weiterhin wäre es sinnvoll die Einträge und die Ablagerungen von Metallen in Oberflächensedimenten zu bilanzieren.

#### Danksagung

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

#### Literatur

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 inklusive 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.

POHL, C.; HENNINGS, U. (2002) Die Schwermetallsituation in der Ostsee im Jahre 2001. Marine Science Reports, No. 49; Baltic Sea Research Institute, Warnemünde, Germany; pp. 102.