

Meereswissenschaftliche Berichte
MARINE SCIENCE REPORTS

No. 66

Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2005

von

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

S. 3 - 82

Die Schwermetallsituation in der Ostsee im Jahre 2005

von

Christa Pohl, Ursula Hennings, Thomas Leipe

S. 85 - 118

Institut für Ostseeforschung
Warnemünde
2006

NAUSCH, G.; FEISTEL, R.; LASS, H. U.; NAGEL, K.; SIEGEL, H.:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2005

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Abstract	3
Kurzfassung	3
1. Einleitung	4
2. Meteorologische Bedingungen	6
3. Wasseraustausch durch die Ostseezugänge/ Beobachtungen an der Messplattform „Darßer Schwelle“	15
3.1 Wassertemperatur, Salzgehalt und Sauerstoffgehalt	15
3.2 Strömung	22
4. Beobachtungen an der Bojenstation „Arkonabecken“	25
5. Beobachtungen an der Bojenstation „Oder Bank“	29
6. Hydrographisch- chemische Bedingungen	31
6.1. Wassertemperatur	31
6.1.1 Wasseroberflächentemperatur	32
6.1.2 Vertikalverteilung der Wassertemperatur	38
6.2 Salzgehalt	43
6.3 Sauerstoff und Schwefelwasserstoff	48
6.4 Anorganische Nährstoffe	56
6.5 Natürliche organische Verbindungen	68
Zusammenfassung	75
Summary	76
Danksagung	78
Literaturverzeichnis	79

Abstract

The article summarizes the hydrographic-hydrochemical conditions in the western and central Baltic Sea in 2005. Based on the meteorological situation, the horizontal and vertical distribution of temperature, salinity, oxygen/hydrogen sulphide, inorganic and organic nutrients are described on a seasonal scale.

In 2005, no important inflow events occurred. Thus, the stagnation period in the deeper basins which started in 2004 continued. At the end of August, with -3.12 ml/l the highest hydrogen sulphide concentration ever observed in the Bornholm Basin was detected near to the bottom. In the eastern Gotland Basin, the layer free of oxygen increased continuously. At the end of 2005 the whole column between 150 m depth and the bottom was anoxic. Near to the bottom a negative oxygen concentration of -3.75 ml/l was measured.

The winter phosphate concentrations in the surface layer were high in all areas of the central Baltic Sea. They are comparable with values from 1993. Extremely high concentrations were measured in the Bornholm Basin, but also in the Karlsö Deep area. Thus, in February a maximum of 1.14 $\mu\text{mol/l}$ was detected. Such high concentrations were found in the mid 1980s for the last time. The winter nitrate concentrations were similar to the years before.

Whereas in the whole eastern, northern and western Gotland Basin, the Gulf of Finland and the southern Bothnian Sea very intense cyanobacteria blooms were observed in 2005, no development of cyanobacteria worth to note occurred in the Bornholm Basin. This is especially remarkable because during the whole summer a considerable amount of phosphate with 0.3 $\mu\text{mol/l}$ was available. The reasons for this development have to be clarified still.

Kurzfassung

Die Arbeit fasst die hydrographisch-hydrochemischen Bedingungen in der westlichen und zentralen Ostsee für das Jahr 2005 zusammen. Basierend auf den meteorologischen Verhältnissen, werden die horizontalen und vertikalen Verteilungsmuster von Temperatur, Salzgehalt, Sauerstoff/Schwefelwasserstoff sowie der anorganischen und organischen Nährstoffe mit saisonaler Auflösung beschrieben.

Herausragende Einstromereignisse fanden in der Ostsee 2005 nicht statt, so dass sich die Stagnationsperiode in den Tiefenbecken der Ostsee, die im Vorjahr begann, fortsetzen konnte. So wurde im Bornholmbecken Ende August in Bodennähe mit $-3,12$ ml/l die höchste bisher berichtete Schwefelwasserstoffkonzentration gemessen. Auch im östlichen Gotlandbecken nahm die Mächtigkeit der sauerstofffreien Schicht kontinuierlich zu. Zum Jahresende 2005 war bereits die gesamte Wassersäule unterhalb 150 m anoxisch. In Bodennähe wurde ein negativer Sauerstoffwert von $-3,75$ ml/l gemessen.

Die winterlichen Phosphatoberflächenkonzentrationen lagen in allen Seegebieten der zentralen Ostsee sehr hoch. Sie sind vergleichbar mit den Befunden des Jahres 1993. Besonders hohe Phosphatwerte wurden im Bornholmbecken, aber auch im Bereich des Karlsötiefs gemessen. So wurde im Februar ein Maximalwert von $1,14$ $\mu\text{mol/l}$ gefunden. Ähnlich hohe Konzentrationen wurden letztmals Mitte der 1980er Jahre gemessen. Die winterlichen Nitratkonzentrationen liegen dagegen im Bereich der letzten Jahre.

Während im gesamten östlichen, nördlichen und westlichen Gotlandbecken, im Finnischen Meerbusen und auch in der südlichen Bottensee 2005 extrem starke Cyanobakterienblüten beobachtet wurden, kam es im Bornholmbecken zu keiner nennenswerten Entwicklung von Blaualgen. Dies ist besonders bemerkenswert, da hier im gesamten Sommer erhebliche Phosphatmengen von $0,3$ $\mu\text{mol/l}$ zur Verfügung standen. Die Ursachen für diese Entwicklung sind noch zu klären.

1. Einleitung

Die Einschätzung des hydrographisch-hydrochemischen Zustandes der Ostsee im Jahre 2005 erfolgte im Wesentlichen auf der Basis des Ostsee-Überwachungsprogramms, das das *Leibniz-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 2005 wurden fünf reguläre Monitoring-Fahrten durchgeführt, die alle vier Jahreszeiten sowie zusätzliche Beobachtungen im 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 in die Auswertung einbezogen. Die Lage der wesentlichsten Stationen, die in die nachfolgenden Auswertungen einbezogen wurden, ist aus Abb. 1 zu entnehmen. Die internationale Zuordnung dieser Stationen ist bei NAUSCH et al., (2003a) zusammengestellt.

Grundlage des hydrographisch-hydrochemischen Standard-Messprogramms, das mit dem Forschungsschiff „Gauss“ durchgeführt wurde, sind die Richtlinien der HELCOM für die Überwachung der Ostsee im Rahmen des COMBINE-Programms (HELCOM, 2000). Angaben über die Gewinnung der Wasserproben und die untersuchten Parameter sowie über die verwendeten Messverfahren und ihre Genauigkeit sind bei NEHRING et al., (1993, 1995a) enthalten.

Die schiffsgebundenen Untersuchungen wurden durch Messungen an drei autonomen Stationen des deutschen Umweltüberwachungs-Messnetzes MARNET ergänzt, die im Gebiet der Darßer Schwelle (Messplattform; Stat. DS), im Arkonabecken (Halbtaucher; Stat. AB) und in der Pommerschen Bucht (Messboje; Stat. OB „Oder- Bank“) liegen (vgl. Abb. 1). Neben meteorologischen Parametern wurden an diesen Stationen die Wassertemperatur und der Salzgehalt in 6 bzw. 4 Tiefen (Darßer Schwelle), 5 bzw. 3 Tiefen (Arkonabecken) und 2 Tiefen (Oder- Bank) sowie der Sauerstoffgehalt in jeweils 2 Tiefen registriert. Alle Daten werden als Stundenmittel aus 6 Messungen telemetrisch via Wettersatellit (METEOSAT) an die Datenbank des BSH übertragen (KRÜGER et al., 1998; KRÜGER, 2000a, b). Angaben über die Strömungsverhältnisse im Bereich der Darßer Schwelle und der Station „Arkonabecken“ liefert jeweils ein selbst registrierender akustischer Doppler-Profil-Strömungsmesser (ADCP).

Die Überwachung der Wasseroberflächentemperatur der Ostsee wurde durch Einzelszenen und mittlere monatliche Verteilungen, ermittelt aus NOAA-AVHRR-Wettersatellitendaten, ergänzt. Dabei wurden alle wolken- und eisfreien Bildpunkte (Pixel 1 x 1 km) der Satellitenüberflüge eines Monats berücksichtigt und in Karten zusammengestellt (SIEGEL et al., 1999).

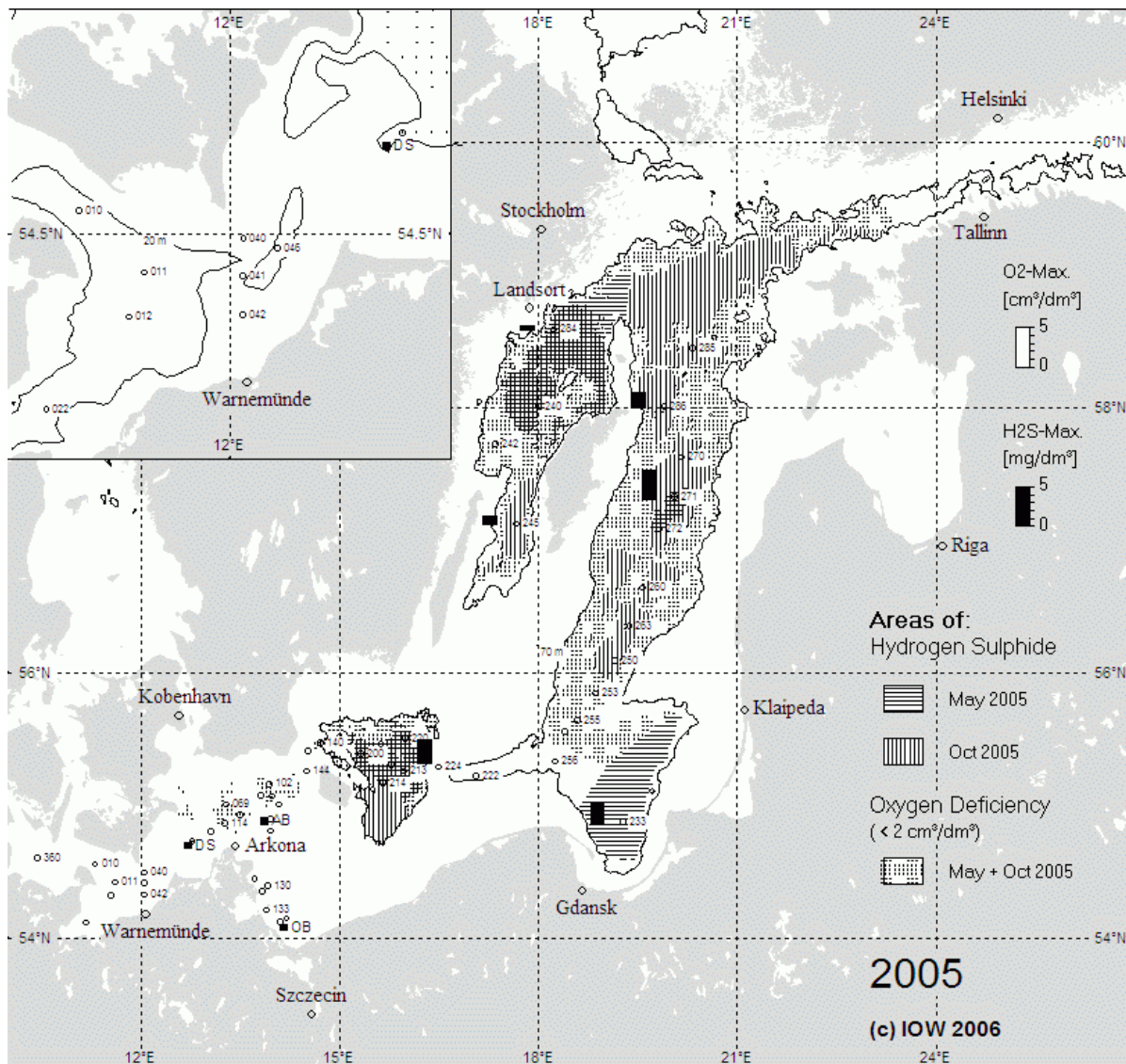


Abb. 1

Stationskarte (■ MARNET-Stationen) und Gebiete mit Sauerstoffmangel und Schwefelwasserstoff in der grundnahen Wasserschicht der Ostsee sowie maximale Sauerstoff- und Schwefelwasserstoffkonzentrationen an ausgewählten Stationen (Säulen) im Jahre 2005; 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 2005. Bars show the maximum oxygen and hydrogen sulphide concentrations of this layer in 2005; the figure contains additionally the 70 m – depth line resp. 20 m – depth line (small picture)

2. Meteorologische Bedingungen

Der Witterungsverlauf des Jahres 2005 in der südlichen Ostsee kann durch Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD, 2005) an der Wetterstation Arkona auf Rügen, die Wärme- und Kältesummen der Wetterstation Warnemünde sowie den Verlauf des Eiswinters beschrieben werden. Tab. 1 zeigt die monatlichen Temperaturen, die Luftfeuchtigkeit, die Sonnenscheindauer, den Niederschlag sowie die Zahl der Frost- und Eistage gemessen an der Station Arkona. Tab. 2 enthält die Kälte- und Wärmesummen der Wetterstation Warnemünde zusammen mit dem langjährigen Mittel.

Der Winter 2004/05 war ein mittelkalter Winter, jedoch nach 1996 und 2003 der drittkälteste Winter der vergangenen Dekade. Er lag nach finnischen Angaben (FIMR, 2005) mit einer maximalen Eisbedeckung der Ostsee von 177 000 km² am 17. März (Abb. 18) bei 82% des langjährigen Mittelwerts von 215 000 km² seit 1720. Die Eisbildung begann erst Mitte November, eine Woche später als im Durchschnitt, in der Bottenwiek und Anfang Dezember in der Bottensee und dem Finnischen Meerbusen, fast ein Monat früher als gewöhnlich. Wegen der milden Witterung im Dezember, Januar und Anfang Februar war die Bottenwiek aber erst ab dem 24. Februar vollständig zugefroren, über einen Monat später als normal. Der 30-jährige Mittelwert der Eisbedeckung steigt leicht über seinen sehr tiefen Wert der letzten Jahre an (Abb. 2). Eine Bedeckung von etwa 43% der Gesamtfläche von 415.266 km² fällt in den Bereich 40% - 60%. Dieser Bedeckungsgrad wird im langfristigen Mittel mit etwa 20% der Winter am zweithäufigsten beobachtet (SMHI, 1982). Die Wendepunkte im Langzeittrend der Eisbedeckung stehen in enger Beziehung zu denen des NAO, des Wasserstands der Ostsee und der Landtemperatur der ganzen Nordhalbkugel (HAGEN und FEISTEL, 2005).

1947/1948 wurde die reduzierte Eissumme für die Bewertung der Stärke eines Eiswinters in den deutschen Küstengebieten eingeführt. Es handelt sich dabei um den arithmetischen Mittelwert der Tage mit Eisvorkommen an den 13 Eisklimastationen, durch den Umfang und Dauer der Vereisung charakterisiert wird. Seit 1897 schwankte die reduzierte Eissumme für die deutsche Ostseeküste zwischen Null und maximal 98 Tagen. Das arithmetische Mittel beträgt 22 Tage, der Medianwert 12 Tage (BSH, 2004). Die reduzierte Eissumme für die deutsche Ostseeküste betrug im Jahr 2005 wie im Vorjahr nur 3 Tage, somit gehört der Eiswinter 2004/05 an der deutschen Ostseeküste zu den schwachen Eiswintern. An den Küsten Schleswig-Holsteins wurde in der inneren Schlei mit 20 Tagen und in Flensburg mit 6 Tagen länger Eis beobachtet als 2004, in Neustadt (4 Tage), Wismar (18 Tage) und Rostock (8 Tage) sowie auf der Unterwarnow (4 Tage) in Mecklenburg-Vorpommern dagegen verkürzt (BSH, 2005). Das zeigen auch die mit Ausnahme des März unterdurchschnittlich ausgefallenen Kältesummen von Warnemünde (Tab. 2) der anderen sehr milden Wintermonate 2004/05. Die Eissaison in deutschen Gewässern endete am 19. Mai (BSH, 2005).

Das Jahr 2005 war nach vorläufigen Berechnungen der WMO (2005) mit +0,48°C über dem Durchschnitt von 14°C der Jahre 1961-1990 global das zweitwärmste seit Beginn der Aufzeichnungen 1861 und folgte direkt auf 1998 mit +0,54°C Abweichung. Zum Vergleich, 2004 lag die durchschnittliche Land-Oberflächentemperatur +0,44°C über dem 30-Jahre-Mittel. Getrennt nach Hemisphären war 2005 das wärmste Jahr bisher überhaupt (+0,65°C) auf der Nordhalbkugel und das viertwärmste (+0,32°C) auf der Südhalbkugel. Global war der Oktober 2005 der wärmste Oktober seit 1861, gleich vor dem Oktober 2004, allerdings hauptsächlich bedingt durch positive Anomalien in Afrika, Australien, Brasilien, China und den USA. Auch die Oberflächentemperatur (SST) des Nordatlantiks war die höchste jemals beobachtete. Global war 2005 besonders auffällig durch die extreme Zahl der tropischen Wirbelstürme auf dem Atlantik; von den 26 benannten

waren 14 Hurrikans. Der bisherige Rekord von 12 Hurrikans aus dem Jahr 1969 wurde damit gebrochen. Am 11. Oktober zog erstmals ein Hurrikan an Madeira vorbei auf die portugiesische Küste zu.

In Warnemünde war es 2005 in Bezug auf die Wärmesumme zu warm (Tab. 2), nur der August fiel deutlich kälter aus. Wie die Temperaturen an der Station Arkona zeigen (Tab. 1), waren nur März und August zu kalt, sonst herrschten positive Temperaturanomalien vor, insbesondere im Januar (+3,3 K) und im „goldenen“ Spätsommer/Herbst, Oktober (+2,1 K) und September (+1,9 K). Die erstere Anomalie kann von den Wärmesummen in Warnemünde auf Grund ihrer Definition nicht widerspiegelt werden, weil sie relativ zur mittleren Temperatur von +0,2°C auftrat. Kältesummen erfassen Anomalien unter 0°C, Wärmesummen über +16°C, der Zwischenbereich wird von diesen Maßen ignoriert. Sowohl die positiven Temperaturanomalien im Januar und Oktober als auch die negative im März gingen mit größerer Sonnenscheindauer einher, nur im Februar und Mai war der Sonnenschein geringfügig unter dem langjährigen Durchschnitt. Diese beiden Monate waren mit 167% und 162% die deutlich niederschlagsreichsten des Jahres. Insgesamt war das Jahr also zu trocken, sonnig und warm. Das Frühjahr war insgesamt zu warm, aber im Niederschlag durchschnittlich, der Sommer zu warm und zu trocken, der Herbst sehr warm, trocken und sonnig, und der Dezember auch noch mild. Zuerst am 25. November (Tief „Thorsten“), und danach am 16. Dezember brachten die Tiefs „Bert“ und „Dorian“ großräumig Schneefälle. Der Tiefstwert der Luftfeuchte von nur 76% im April in Warnemünde, und Werte unter 82% von April bis Oktober unterstreichen den sehr trockenen Charakter des Jahres, denn Werte unter 82% wurden 2004 überhaupt nicht angetroffen.

Der Beginn des Jahres 2005 war stürmisch. Am 8. und 9. Januar zog das Orkantief „Erwin“ über Skandinavien hinweg, das in skandinavischen Berichten „Gudrun“ genannt wurde. In Pärnu, Estland, trat am 9. Januar um 6:50 Uhr lokaler Zeit ein Hochwasserpegel von +272 cm auf, der höchste seit Beginn der Registrierungen 1923 (BOOS, 2005), mit erheblichen ökonomischen Folgeschäden. Bei Flensburg wurden Windgeschwindigkeiten von bis zu 156 km/h registriert, auf dem Brocken im Harz betrug die Spitzengeschwindigkeit 165 km/h. Dieser Sturm wurde wegen seiner extremen Wirkungen Gegenstand mehrerer wissenschaftlicher Vorträge auf dem 5. Baltic Sea Science Congress in Sopot, 20. - 24. Juni 2005 (SOOMERE et al., 2005, 2006a, b). Am 12. und 13. Februar 2005 zog das Orkantief „Ulf“ von der Nordsee nach Polen, dabei fiel am 13. Februar der Luftdruck in Rostock auf 981 hPa. Die Windspitze am Messmast Darßer Schwelle betrug 32,4 m/s am 12. Februar um 19:50 UTC. Am 15. Februar stieg der Pegel in Travemünde auf +109 cm, in Warnemünde auf +88 cm. Am 23. Februar zog ein Tief über Hessen und brachte Schneeverwehungen in Norddeutschland, mit Wind um 19 m/s von Ost, starker Ausstromlage und einem Wasserstand in Kiel von +111 cm. Am 14. März endete eine anhaltende winterliche Blockierungslage, die mit nördlichen Winden Schnee bis Italien, Griechenland, Spanien und auf die Kanaren transportiert hatte.

Vom 9. bis 11. August brachte ein ortsfestes Ostseetief soviel Regen nach Finnland, dass zahlreiche Wettkämpfe der Leichtathletik-Weltmeisterschaften in Helsinki ausfallen mussten. Vom 22. bis 24. August zog ein Vb-Tief von der Adria nach Berlin und verursachte schwere Überschwemmungen im Alpenraum, die dort bis zum 25. August zu ansteigenden Pegeln führten. Am 16. September zerstören erste Herbststürme zeitweilig die durch überwiegend ruhiges Wetter entstandene thermische Schichtung in der Beltsee. Eine weitere ruhige Phase wurde am 26. Oktober vom Sturmtief „Heido“ abgelöst, das mit einem Tornado bei Bremervörde starke Schäden verursachte. Das danach auftretende Hoch „Sabine“ zog am 28. Oktober vom Mittelmeer zur Ostsee und hielt Atlantische Tiefs bis zum 15. November ab. Am 23. November meldete Hiddensee einen neuen deutschen Rekord in der jährlichen Sonnenscheindauer. Vom 25. bis 28. November kreiste das Schneetief „Thorsten“ zwischen Holland und Hessen; größere

Schneemengen zerstörten im Raum Osnabrück die Stromversorgung. Als weiteres Sturmtief mit Schnee und Regen kam „Dorian“ am 16. Dezember, gefolgt von einem Vb-Tief, das vom 26. bis 28. Dezember viel Schnee nach Deutschland brachte.

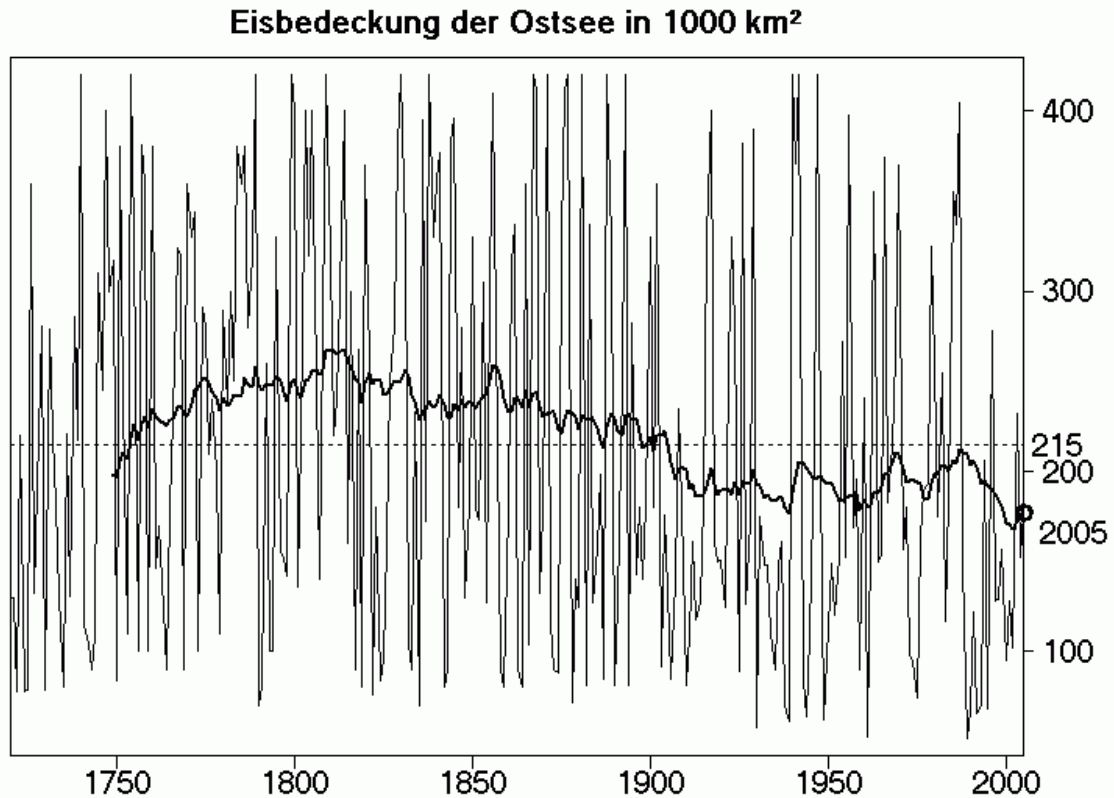


Abb. 2

Maximale Eisbedeckung der Ostsee in 1000 km² in den Jahren 1720 bis 2005 nach Daten des FIMR (FIMR, 2005). Der Langzeit-Mittelwert von 215 000 km² ist gestrichelt dargestellt. Die dicke Linie ist ein gleitender Mittelwert über die vorherigen 30 Jahre. Der Kreis zeigt die Eisbedeckung im Winter 2004/2005 mit 177 000 km²

Fig. 2

Maximum ice covered area in 1000 km² of the Baltic Sea in the years 1720 to 2005 after data of FIMR (FIMR, 2005). The long-term average of 215,000 km² is shown as dashed line. The bold line is a running mean value over the past 30 years. The ice coverage in winter 2004/2005 with 177,000 km² is encircled

Tab. 1

Monatliche gemittelte Wetterdaten der Station Arkona (Rügen, 42 m über NN) nach DWD (2005). t: Lufttemperatur, Δt : 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. Maxima und Minima hervorgehoben

Table 1

Monthly averaged weather data at Arkona station (Rügen island, 42 m above sea level) after DWD (2005). t: air temperature, Δt : air temperature anomaly, h: humidity, s: sunshine 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-term mean. Maxima and minima are shown in bold

Monat	t/°C	Δt /K	h/%	s/%	r/%	Frost	Eis
Jan	3,5	+3,3	86	182	71	10	-
Feb	0,5	+0,3	85	95	167	16	4
Mrz	1,1	-1,0	85	134	94	17	4
Apr	6,7	+1,7	76	149	56	2	-
Mai	10,8	+1,1	80	92	162	-	-
Jun	14,1	0,0	79	102	52	-	-
Jul	17,8	+1,6	80	107	105	-	-
Aug	16,1	-0,4	80	107	76	-	-
Sep	15,5	+1,9	80	122	80	-	-
Okt	12,0	+2,1	81	180	89	-	-
Nov	5,8	+0,5	84	166	83	6	-
Dez	2,7	+0,7	85	108	93	8	1

Tab. 2

Summen der Tagesmittel der Lufttemperatur an der Wetterstation Warnemünde. Die Kältesumme (KS) ist das Zeitintegral der Lufttemperatur unterhalb der Linie $t = 0^\circ\text{C}$, in $\text{K} \cdot \text{d}$, die Wärmesumme (WS) das entsprechende Integral oberhalb der Linie $t = 16^\circ\text{C}$. Zum Vergleich sind die entsprechenden Mittelwerte 1947 bis 2005 angegeben

Table 2

Sums of daily mean air temperatures at the weather station Warnemünde. The 'cold sum' (KS) is the time integral of air temperatures below the line $t = 0^\circ\text{C}$, in $\text{K} \cdot \text{d}$, the 'heat sum' (WS) is the corresponding integral above the line $t = 16^\circ\text{C}$. For comparison, the corresponding mean values 1947 till 2005 are given

Monat	KS 2004/05	Mittelwert	Monat	WS 2005	Mittelwert
November		2,7 ± 6,5	April		1,0 ± 2,5
Dezember	0,9	21,7 ± 26,9	Mai	16,3	5,2 ± 5,8
Januar	2,1	41,5 ± 43,0	Juni	34,7	23,2 ± 15,4
Februar	15,0	35,9 ± 44,3	Juli	73,9	51,1 ± 29,8
März	13,6	9,7 ± 14,5	August	34,6	50,4 ± 32,6
April		0,0 ± 0,2	September	29,0	11,2 ± 11,6
			Oktober		0,4 ± 1,2
Σ 2004/2005	31,6	111,6 ± 90,2	Σ 2005	188,5	142,6 ± 64,9

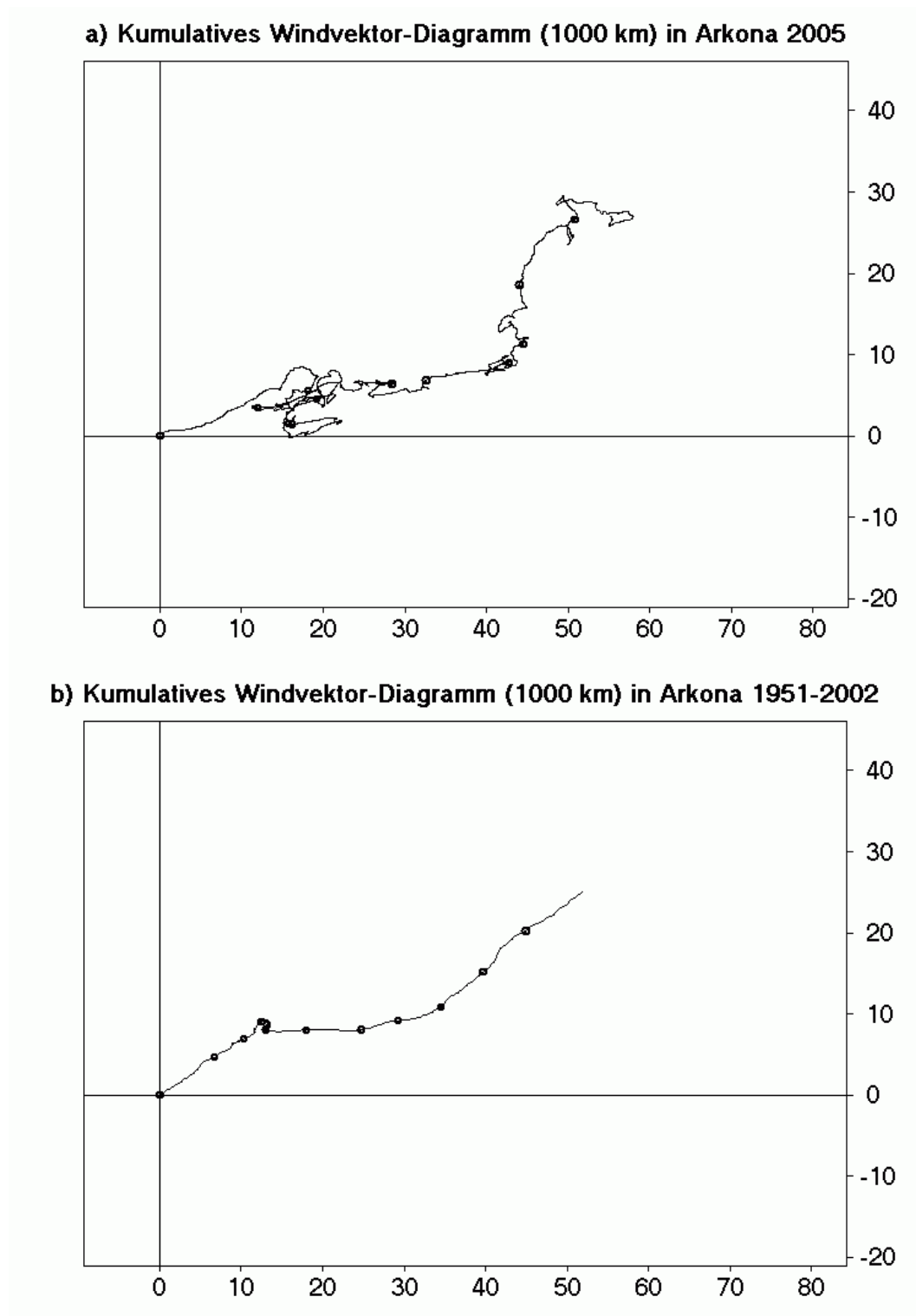


Abb. 3

Fortschreitende Vektordiagramme der Windgeschwindigkeit an der Wetterstation Arkona (nach Daten des DWD, 2005), in 1000 km, positiv nach nördlichen und östlichen Richtungen. a) 2005, b) Langzeitmittel. Der erste Tag des Monats ist durch einen Kreis markiert

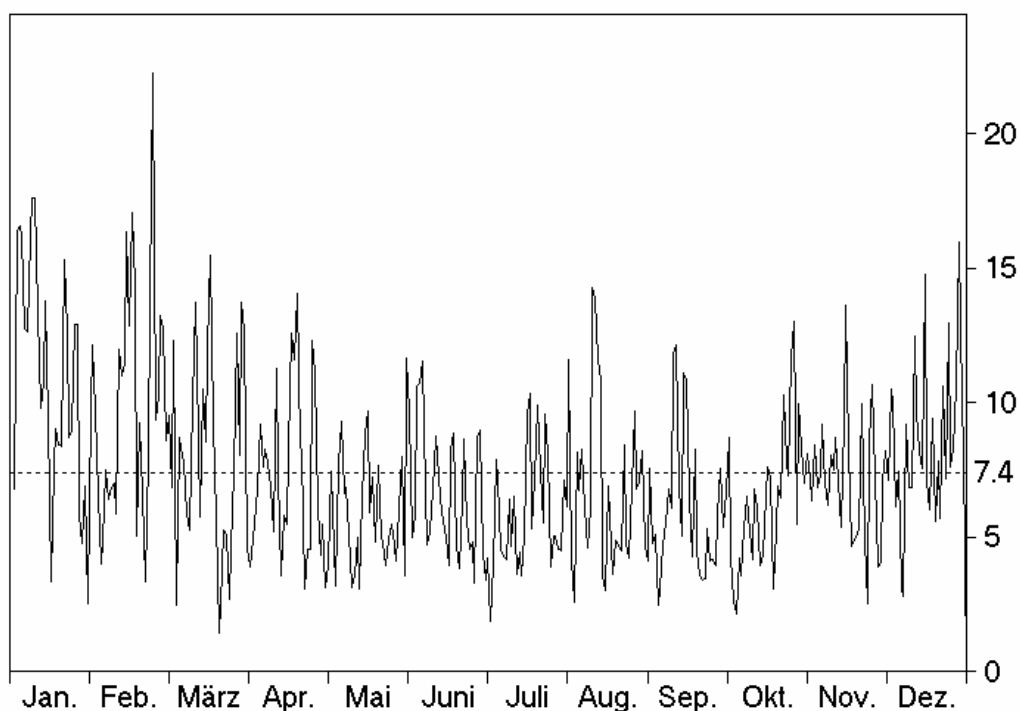
Fig. 3

Progressive vector diagram of the wind velocity at the weather station Arkona (after data of DWD, 2005), in 1000 km, positive in northerly and easterly directions. a) 2005, b) long-term average. The first day of each month is encircled

Abb. 3 zeigt die Windentwicklung mit Hilfe fortschreitender Vektordiagramme für die Station Arkona, wobei die Trajektorie durch zeitliche Integration des Windvektors am Ort entsteht. Das Jahr 2005 ist dargestellt im Vergleich mit dem klimatischen mittleren Wind der Jahre 1951 bis 2002. Die Kurve für 2005 (55000 km nach Osten, 27000 km nach Norden) ist der des klimatischen Mittelwerts (52000 km nach Osten, 25000 km nach Norden) sehr ähnlich. Insbesondere fallen die Endpunkte fast zusammen, was bedeutet, dass die Windkomponenten im Jahresdurchschnitt etwa übereinstimmen. Dabei ist der mittlere Betrag der Windgeschwindigkeit (7,4 m/s) gleich dem im Vorjahr, siehe Abb. 4. Der Verlauf 2005 zeigt das typische Sommerplateau wie im Langzeitmittel mit fast ausschließlich zonalen Windrichtungen. Davor, von März bis Mai, finden wir häufig wechselnde, aber jeweils anhaltende Windlagen, einschließlich solcher von Ost und Nord, wie sie im Langzeitmittel nur kurzzeitig während der Eiseiligen auftreten. Auffällig sind die vorherrschenden Südwinde von Mitte September bis Mitte Dezember, die mit dem langen, ruhigen und sonnig-milden Herbst korrespondieren (Tab. 1).

Herausragende Einstromereignisse mit Volumen um 200 km³ oder mehr fanden in der Ostsee 2005 nicht statt, weil die starken Winterstürme zu Beginn des Jahres jeweils nur zu kurz andauerten. Die Verhältnisse im zentralen Tiefenwasser waren noch immer geprägt durch die Nachwirkungen der warmen und kalten Einströme 2002 und 2003 (FEISTEL et al., 2003a, b, NAUSCH et al., 2003b, FEISTEL et al., 2004a, b, 2006), vergl. Kapitel 6. Die halinen Schichtungsverhältnisse am Messmast Darßer Schwelle (siehe Abb. 6B) während der ruhigen Ausstromlagen im Herbst lassen für diese Zeit einen baroklinen Einstrom erwarten, dessen Wirkung, wenn er denn mit hinreichender Stärke verlief, voraussichtlich erst 2006 in den zentralen Becken der Ostsee nachweisbar werden wird. Da barokline Einströme mit einer extremen Inhomogenität im Querschnitt über der Darßer Schwelle einhergehen und hauptsächlich in der Rinne vor Mön ablaufen (FEISTEL et al., 2004a), sind die Daten vom Messmast nicht repräsentativ für den Salztransport bei diesen Einströmen.

a) Windgeschwindigkeit (m/s) in Arkona 2005



b) Ostkomponente des Windvektors (m/s) in Arkona 2005

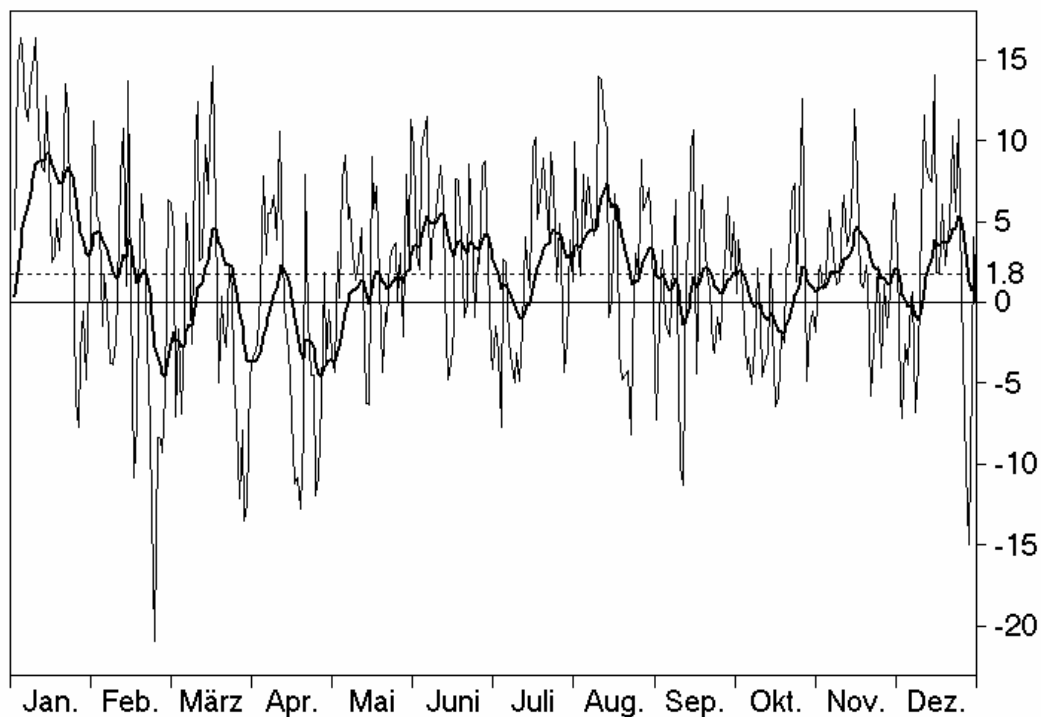


Abb. 4

Windmessungen an der Wetterstation Arkona (nach Daten des DWD, 2005). a) Tagesmittelwerte der Windgeschwindigkeit in m/s, Jahresmittelwert 7,4 m/s gestrichelt. b) Tagesmittelwerte der Ostkomponente (Westwind positiv), Jahresmittelwert 1,8 m/s gestrichelt. Die fett gezeichnete Linie ist mit einem exponentiellen Gedächtnis von 10 Tagen gefiltert

Fig. 4

Wind measurements at the weather station Arkona (after data of DWD, 2005). a) Daily means of wind speed, in m/s, the dashed line is the annual average of 7.4 m/s. b) Daily means of the eastern component (westerly wind positive), the dashed line is the annual average of 1.8 m/s. The line in bold is filtered with a 10-days exponential memory

Die klimatische Windkurve in Abb. 3b 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, bei dem der Wind für einige Tage auf nördliche und östliche Richtungen dreht und 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).

Die mittlere Windgeschwindigkeit an der Station Arkona lag mit 7,4 m/s, wie schon 2004, zwischen den Werten der Vorjahre von 7,1 m/s im Jahr 2003 (NAUSCH et al., 2004) und von 7,7 m/s im Jahr 2002 (NAUSCH et al., 2003a). Als Windspitzen der Stundenwerte traten auf 26,6 m/s am 8. Januar aus West, 25,6 m/s am 13. Februar aus West, 24,3 m/s am 23. Februar aus Ost, 21,8

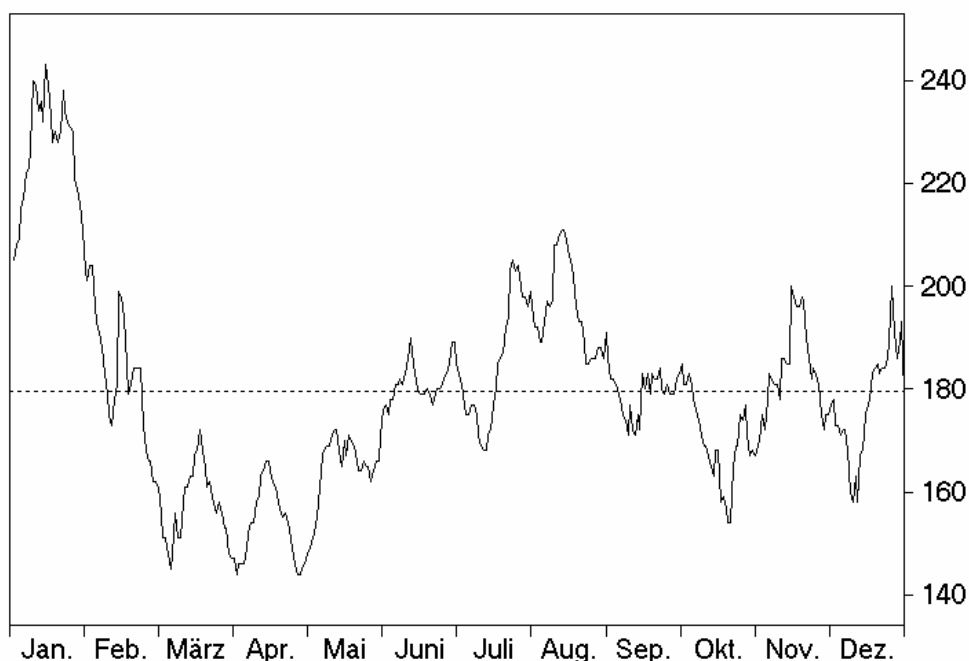
m/s am 21. Januar aus West und 20,4 m/s am 15. Dezember aus West (Abb. 4). Damit wurden zwar die Spitzenwerte von 2004 (23,1 m/s) und 2003 (21,5 m/s) wiederholt überstiegen, aber die von über 30 m/s im Jahre 2000 noch nicht wieder erreicht.

Der Füllungsgrad der Ostsee wird gut durch den Pegel an der schwedischen Station Landsort beschrieben (Abb. 5a, nach Daten des SMHI, 2006). Der Weststurm Anfang Januar und der Oststurm Ende Februar bewirkten den rapiden Anstieg auf 243 cm am 14. Januar und den anschließenden steilen Abfall um etwa 100 cm bis Ende Februar 2005. Anhaltende meridionale und östliche Winde bewirkten einen deutlich abgesenkten Pegel von März bis Mai mit Minima am 6. März (147 cm), am 2. April (142 cm), und am 28. April (145 cm). Nach dem Januar wurden die höchsten Pegelwerte am 24. Juli (201 cm) und am 13. August (212 cm) registriert. 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. Sie sind bedingt durch Stürme von West bis Nordwest, wie an der klaren Korrelation des Landsortpegels mit den gefilterten Kurven des Winds (Abb. 4b, 5b) zu erkennen ist. Die Filterung erfolgt nach der Formel

$\bar{v}(t) = \int_0^{\infty} d\tau v(t - \tau) \exp(-\tau/10d)$, wobei die Abklingzeit von 10 Tagen die sowohl theoretisch

als auch durch Beobachtungen gut belegte Tiefpasswirkung von Sund und Belten in Bezug auf Pegelschwankungen bei Landsort im Vergleich zu denen im Kattegat beschreibt. Kleine barotrope Einstromereignisse sind z.B. zu erkennen an den Anstiegen um 32 cm in 9 Tagen vom 1. bis 10. Januar, um 32 cm in 11 Tagen vom 13. bis 24. Juli oder um 46 cm in 14 Tagen vom 12. bis 26. Dezember. Mit der empirischen Näherungsformel (NAUSCH et al., 2002) $\Delta V / \text{km}^3 = 3,8 \cdot \Delta L / \text{cm} - 1,3 \cdot \Delta t / d$ erhalten wir aus diesen Werten des Pegelunterschieds ΔL und der Einstromdauer Δt als Schätzungen für das eingeströmte Volumen $\Delta V = 110 \text{ km}^3$ im Januar, 107 km^3 im Juli und 157 km^3 im Dezember. Der eventuelle barokline Einstrom zwischen September und Dezember dagegen war, wie ähnlich auch in den Jahren 2002 und 2003 beobachtet, durch schwache östliche Winde und einen abgesenkten Landsortpegel geprägt.

a) Pegel (cm) in Landsort 2005



b) SO-Komponente des Windvektors (m/s) in Arkona 2005

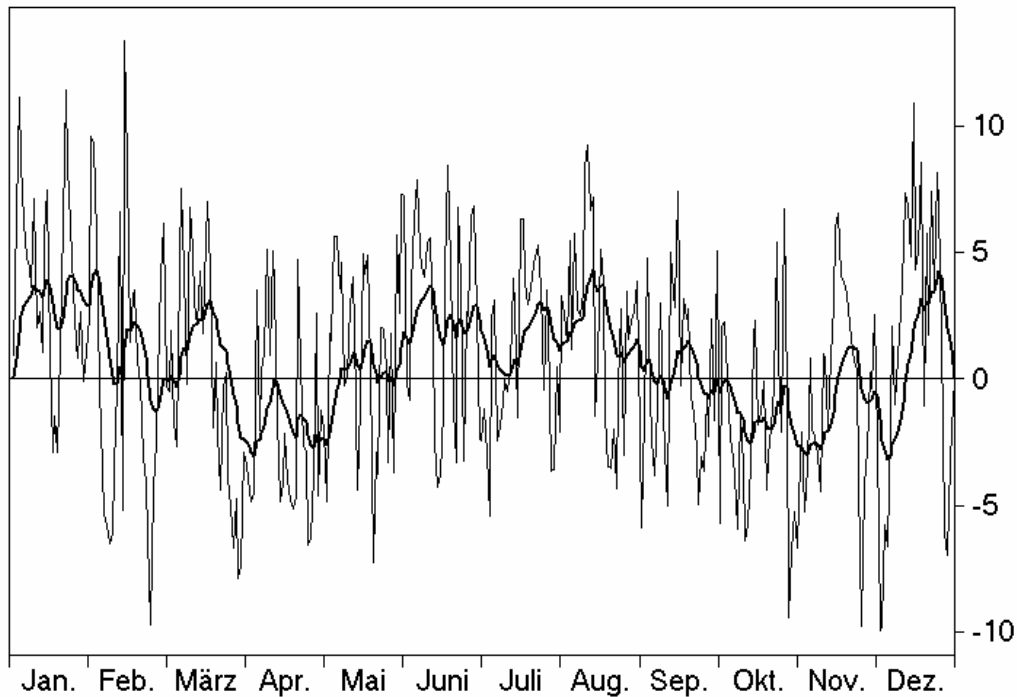


Abb. 5

a) Pegel bei Landsort als Maß für den Füllungsgrad der Ostsee (nach Daten des SMHI, 2006).
 b) Stärke des Nordwestwinds (positiv) an der Wetterstation Arkona (nach Daten des DWD, 2006).
 Die fett gezeichnete Kurve entstand durch Filterung mit einem exponentiellen 10-Tage-Gedächtnis

Fig. 5

a) Sea level at Landsort as a measure of the Baltic Sea fill factor (after data of SMHI, 2006).
 b) Strength of the north-west wind (positive) at the weather station Arkona (after data of DWD, 2006). The bold curve appeared by filtering with an exponential 10-days memory

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 bis zum 3. August 2005 mit je einem SEACAT-Sauerstoff-Recorder im 7 m und 19 m Tiefenniveau am Messmast gemessen. Danach wurden diese Sauerstoffsensoren durch Sauerstoffsonden des Typs S-14 der Firma Züllig, Schweiz, ausgetauscht. Die neuen S-14 Sensoren zeichnen sich durch eine bessere Langzeitstabilität und eine Vorrichtung zur Unterdrückung des biologischen Bewuchses aus. Vereinzelt Vergleichsmessungen des Sauerstoffgehaltes 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 Sauerstoffsensoren des Typs SBE-23Y auf und wurden entsprechend korrigiert. Die bisherigen Beobachtungen haben gezeigt, dass sich die Langzeitstabilität der Sauerstoffmessungen signifikant verbessert hat.

3.1 Wassertemperatur, Salzgehalt und Sauerstoffgehalt

Die Jahresmittel der Wassertemperatur an der Darßer Schwelle, dargestellt in Tab. 3 und Abb. 6, wiesen 2005 sowohl in der durchmischten Deckschicht (7 m Tiefe) als auch in der bodennahen Wasserschicht (19 m Tiefe) – verglichen mit dem Zeitraum seit 1992 – leicht über dem Mittel liegende Werte auf. Die Standardabweichungen der Wassertemperatur in 7 m, 17 m und 19 m Tiefe wies ebenfalls mittlere Werte auf. Die thermische Schichtung war 2005 verglichen mit dem Mittel seit 1992 von schwacher Intensität (Abb. 6a).

Die Fourieramplituden des Jahresganges der Wassertemperatur seit 1992 sind in Tab. 4 zusammengefasst. Der Jahresgang der Temperatur in der Deckschicht wies 2005 innerhalb des Beobachtungszeitraums wie die Standardabweichung einen nahe dem Mittel liegenden Wert auf. Die Jahresgänge der Temperaturen in der bodennahen Schicht erreichten ebenfalls mittlere Werte innerhalb des Beobachtungszeitraums. Die Phase des Jahresganges der Temperatur auf der Darßer Schwelle war 2005 relativ niedrig. Die Phasenlage des Jahresganges weist darauf hin, dass die jahreszeitliche Erwärmung des Wassers im Gebiet der Darßer Schwelle beginnend mit den bodennahen Schichten zwischen Ende März und Anfang April 2005 begann, siehe auch Abb. 6A.

Die im Jahre 2005 beobachteten thermischen Verhältnisse im Bereich der Darßer Schwelle können als Ergebnis eines mäßig kalten Winters 2004/2005 (Abb. 2), dem ein warmer Sommer folgte, erklärt werden (vgl. auch Kapitel 2 und 6.1). Dies führte dazu, dass sowohl der Mittelwert als auch die Amplitude des Jahresganges der Wassertemperatur nahe dem Mittelwert der letzten 13 Jahre liegt (Tab. 4). Der normale Anstieg der Wassertemperaturen der Deckschicht auf der Darßer Schwelle entsprach 2005 einem durchschnittlichen Wärmefluss aus der Atmosphäre in die Ostsee während des Frühjahrs. Die Extremwerte der Jahresgänge der Wassertemperatur der Bodenschicht auf der Darßer Schwelle wiesen 2005 auf eine durchschnittliche Advektion von warmem Deckschichtwasser aus dem Kattegat im Sommer 2005 hin.

Tab. 3

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

Table 3

Mean values and standard deviations of temperature (T) and salinity (S) at the Darss Sill of the corresponding years. Maxima are shown in bold

Jahr	7 m Tiefe		17 m Tiefe		19 m Tiefe	
	T °C	S PSU	T °C	S PSU	T °C	S PSU
1992	9,41 ± 5,46	9,58 ± 1,52	9,01 ± 5,04	11,01 ± 2,27	8,90 ± 4,91	11,77 ± 2,63
1993	8,05 ± 4,66	9,58 ± 2,32	7,70 ± 4,32	11,88 ± 3,14	7,71 ± 4,27	13,36 ± 3,08
1994	8,95 ± 5,76	9,55 ± 2,01	7,94 ± 4,79	13,05 ± 3,48	7,87 ± 4,64	14,16 ± 3,36
1995	9,01 ± 5,57	9,21 ± 1,15	8,50 ± 4,78	10,71 ± 2,27	–	–
1996	7,44 ± 5,44	8,93 ± 1,85	6,86 ± 5,06	13,00 ± 3,28	6,90 ± 5,01	14,50 ± 3,14
1997	9,39 ± 6,23	9,05 ± 1,78	–	12,90 ± 2,96	8,20 ± 4,73	13,87 ± 3,26
1998	8,61 ± 4,63	9,14 ± 1,93	7,99 ± 4,07	11,90 ± 3,01	8,10 ± 3,83	12,80 ± 3,22
1999	8,83 ± 5,28	8,50 ± 1,52	7,96 ± 4,39	12,08 ± 3,97	7,72 ± 4,22	13,64 ± 4,39
2000	9,21 ± 4,27	9,40 ± 1,33	8,49 ± 3,82	11,87 ± 2,56	8,44 ± 3,81	13,16 ± 2,58
2001	9,06 ± 5,16	8,62 ± 1,29	8,27 ± 4,06	12,14 ± 3,10	8,22 ± 3,86	13,46 ± 3,06
2002	9,72 ± 5,9	8,93 ± 1,44	9,06 ± 5,08	11,76 ± 3,12	8,89 ± 5,04	13,11 ± 3,05
2003	9,27 ± 5,84	9,21 ± 2,00	7,46 ± 4,96	14,71 ± 3,80	8,72 ± 5,20	15,74 ± 3,27
2004	8,95 ± 5,05	9,17 ± 1,50	8,36 ± 4,52	12,13 ± 2,92	8,37 ± 4,44	12,90 ± 2,97
2005	9,13 ± 5,01	9,20 ± 1,59	8,60 ± 4,49	12,06 ± 3,06	8,65 ± 4,50	13,21 ± 3,31

Tab. 4

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

Table 4

Amplitude and phases of the yearly cycle of temperature measured at the Darss Sill in different depths. Maxima are shown in bold

Jahr	7 m Tiefe		17 m Tiefe		19 m Tiefe	
	Amplitude K	Phase Monat	Amplitude K	Phase Monat	Amplitude K	Phase Monat
1992	7,43	4,65	6,84	4,44	6,66	4,37
1993	6,48	4,79	5,88	4,54	5,84	4,41
1994	7,87	4,42	6,55	4,06	6,32	4,00
1995	7,46	4,36	6,36	4,12	–	–
1996	7,54	4,17	6,97	3,89	6,96	3,85
1997	8,60	4,83	–	–	6,42	3,95
1998	6,39	4,79	5,52	4,46	–	–
1999	7,19	4,52	5,93	4,00	5,70	3,83
2000	5,72	4,50	5,02	4,11	5,09	4,01
2001	6,96	4,46	5,35	4,01	5,11	3,94
2002	7,87	4,53	6,91	4,32	6,80	4,27
2003	8,09	4,56	7,06	4,30	7,24	4,19
2004	7,11	4,48	6,01	4,21	5,90	4,18
2005	6,94	4,40	6,23	4,03	6,21	3,93

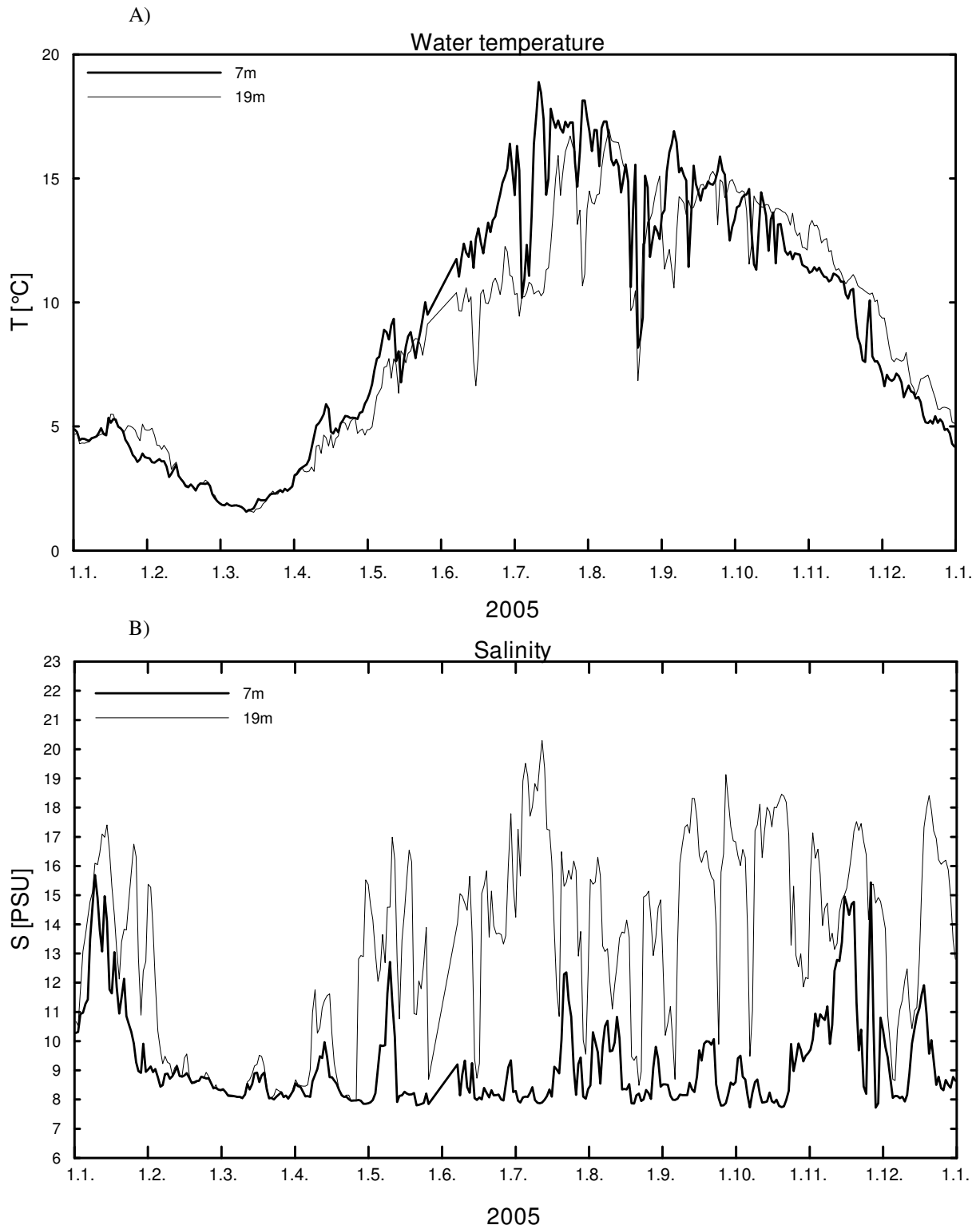


Abb. 6

Verlauf der Wassertemperatur (A) und des Salzgehaltes (B) in der Deck- und Bodenschicht auf der Darßer Schwelle (Stat. DS in Abb. 1) im Jahre 2005

Fig. 6

Water temperature (A) and salinity (B) measured in the surface layer and near the bottom at Stat. DS in 2005 at the Darss Sill

Der aktuelle Verlauf der Wassertemperatur des Jahres 2005 ist für die Messtiefen 7 m und 19 m in Abb. 6A dargestellt. Das Minimum der Wassertemperatur wurde relativ spät, nämlich Anfang März 2005 mit Werten um 2°C erreicht. Die thermische Schichtung der Wassersäule begann Anfang April und war bis Anfang September ausgeprägt. Der Anstieg der Wassertemperatur in der Deckschicht wurde zwischen Mai und September 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., 2003), welches aus dem winterlichen Zwischenwasser des Arkonabeckens stammt. Das Maximum der Wassertemperatur in der Deckschicht wurde Anfang Juli mit Werten um 19°C erreicht. Die herbstliche Abkühlungsphase des Wassers begann auf der Darßer Schwelle in allen Tiefen Ende September. Das Wasser kühlte sich bis Ende Dezember auf rund 5°C ab (Abb. 6A). Während der Abkühlungsphase sank die Temperatur des oberflächennahen Wassers durch den aus dem Wasser in die Atmosphäre gerichteten Wärmefluss Ende September 2005 unter die Temperatur der Bodenwasserschicht ab.

Der zeitliche Verlauf des Salzgehalts im Bereich der Darßer Schwelle für 2005 ist in Abb. 6B dargestellt. Barotrope Einstromereignisse wurden im Januar, im Mai, im Juli und im November beobachtet. Während die Ereignisse im Mai und Juli jeweils einen Salzwassereinstrom geringer Stärke darstellen, die zur Belüftung des Bodenwassers der Becken der mittleren Ostsee nur wenig beitragen können (vgl. auch Kapitel 6.3), sind die Salzwassereinbrüche vom Januar und November von mittlerer Stärke mit einem maximalen Salzgehalt von 16 psu an der Oberfläche. Diese Salzwassereinströme können nur zur Belüftung intermediärer Wasserschichten in der Halokline in den Ostseebecken beitragen. Zwischen Ende April und Dezember wurden 2005, von kurzen Unterbrechungen abgesehen, durchgehend barokline Salzwassereinschübe in der bodennahen Schicht beobachtet. Die maximalen Salzgehalte variierten in diesem Zeitraum näherungsweise zwischen 15 und 20 psu. Das Maximum der baroklinen Einstromaktivität wurde im Juni und Juli mit maximalem Salzgehalt von 20 psu bei einer Wassertemperatur von ungefähr 15°C beobachtet. Im August klang die Intensität der baroklinen Einströme ab, um sich dann von September bis Dezember wieder zu verstärken. Während dieses Zeitraums verstärkter ästuariner Zirkulation herrschte eine relativ schwache Windanregung über der Ostsee, siehe Abb. 4 (oben) und der Füllungsgrad der Ostsee schwankte um seinen langjährigen Mittelwert (Abb. 5, oben). Das bedeutet, dass der barotrope Wasseraustausch der Ostsee mit der Nordsee sehr gering war und sich im Wesentlichen auf den Ausstrom des Süßwasserüberschusses reduzierte. Der kompensierende Einstrom salzreichen Bodenwassers war verglichen mit dem von 2004 im Frühjahr deutlich schwächer, im Rest des Jahres jedoch häufiger. Die zeitweilige Abschwächung der ästuarinen Zirkulation im August hatte eine bessere Belüftung des Bodenwassers in der westlichen Ostsee zur Folge, so dass 2005 kein ausgedehnter Sauerstoffmangel in diesem Seegebiet beobachtet wurde, siehe Abb. 9.

Die untere Grenze der Variationen des Oberflächensalzgehalts an der Darßer Schwelle fiel in der ersten Hälfte des Jahres auf 8 psu und blieb auf diesem Wert bis zum Ende des Jahres. Dies deutet auf eine in der zweiten Jahreshälfte gegenüber dem langjährigen Verlauf vermehrte Flusswasserzufuhr in der nördlichen und zentralen Ostsee hin, die sich bis in das Arkonabecken ausbreitete.

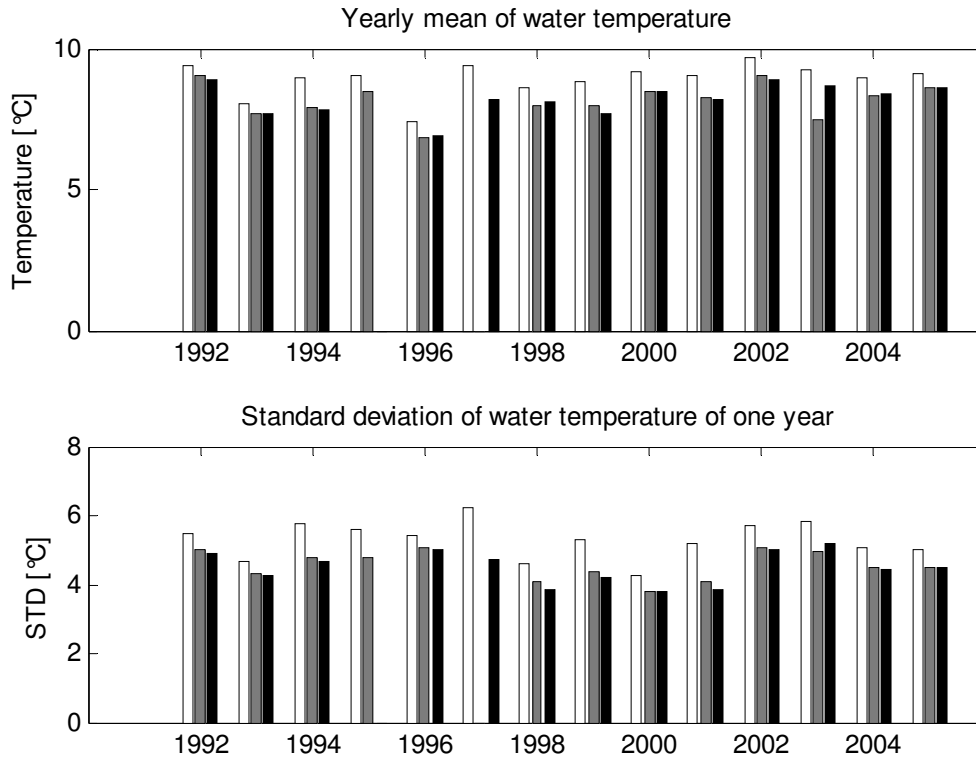


Abb. 7

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 2005 in 7 m und 19 m Tiefe durchgeführt worden (Abb. 9). Die den Sauerstoffgehalt des Wassers regulierenden Prozesse sind in Kapitel 6.3 dargelegt. Der Sauerstoffgehalt des Oberflächenwassers schwankte während des ganzen Jahres um die Sättigungskonzentration des Sauerstoffs. Von Mitte Januar bis Anfang Februar dominierten schwache Zehrungsprozesse im Wasser an der Darßer Schwelle, so dass der Sauerstoffgehalt leicht unterhalb des Sättigungswertes lag. Der Eintritt der Frühjahrsblüte konnte an Hand der Sauerstoffwerte nicht exakt bestimmt werden, trat aber spätestens Anfang April auf. Weitere Blüten können aus dem Verlauf des Sauerstoffgehaltes in 7 m Tiefe nicht abgeleitet werden. Der Sauerstoffgehalt des Bodenwassers lag bis zum Beginn der Frühjahrsblüte nicht signifikant unter dem des Oberflächenwassers, sank dann aber, von kurzzeitigen Unterbrechungen abgesehen, bis Mitte Oktober auf das Jahresminimum von ungefähr 0,5 ml/l. Das weist darauf hin, dass vom Frühjahr bis zum Herbst ständig in der euphotischen Schicht organisches Material produziert wurde und in die Bodenschicht absank, wo es unter Sauerstoffverbrauch bakteriell abgebaut wurde. Die vom Frühjahr bis zum Jahresende andauernde, an die ästuarine Zirkulation gebundene Schichtung verhinderte die Belüftung des Bodenwassers durch lokale vertikale Vermischung. Die Stagnationsphase des Bodenwassers wurde in diesem Zeitraum lediglich durch kurzzeitige Ausstromereignisse von sauerstoffreichem Oberflächenwasser des Arkonabeckens

unterbrochen. Der minimale Sauerstoffgehalt im Bodenwasser an der Darßer Schwelle trat 2005 deutlich später auf als in den vorangegangenen Jahren. Dies ist insbesondere auf die ruhige Wetterlage im Herbst zurückzuführen, die sich in positiven Anomalien der Lufttemperatur im September und Oktober ausdrückt, siehe Kapitel 2. Dadurch ist das von Ende August bis Ende Oktober mit der ästuarinen Zirkulation in das Arkonabecken eingeströmte salzreiche Bodenwasser schlechter belüftet und es ist fraglich, ob es durch seine Transformation im Arkonabecken so belüftet werden konnte, dass es auf die Belüftung des Zwischenwassers in den Becken der östlichen Ostsee wirken kann, wie es in den vorangegangenen Jahren zum Teil der Fall war, siehe z.B. (FEISTEL et al., 2003b).

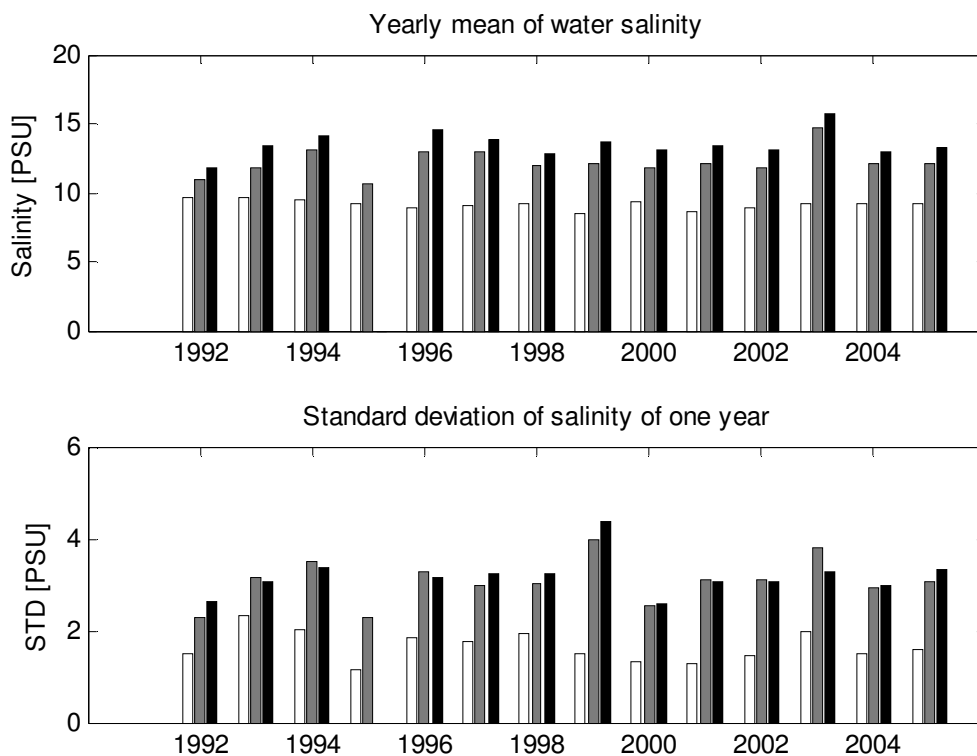


Abb. 8

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

3.2 Strömung

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

Die Ostkomponente der Pseudotrajektorien der Strömung in Oberflächen- (3 m) und Grundnähe (18 m) sowie der vertikal gemittelten Strömung sind in Abb. 10 dargestellt. Die Oberflächenströmung weist einen Wechsel zwischen Einstrom- und Ausstromlagen auf, der eine Zeitskala in der Größenordnung von ein bis zwei Monaten hat. Dabei wird Einstrom durch eine positive Änderung der Kurven und Ausstrom durch negative Änderungen angezeigt. Die in der Trajektorie der Oberflächenströmung sichtbaren Ein- und Ausstromphasen korrespondieren mit einer entsprechenden Änderung im Oberflächensalzgehalt an der Darßer Schwelle (siehe Abb. 6). Der langzeitige Trend der Oberflächenströmung weist am stärksten in negativer Richtung und repräsentiert damit den durch den Süßwasserüberschuss der Ostsee bedingten permanenten Ausstrom in die Nordsee.

Die Trajektorie der Bodenströmung führt die gleichen kurzperiodischen Schwankungen wie die der Oberflächenströmung und der vertikal gemittelten Strömung durch. Das bedeutet, dass die kurzfristigen Strömungsschwankungen barotrop und stärker als die barokline Strömungskomponente sind. Die im Jahresmittel nahezu ausgeglichene Bewegung der Bodenschicht in 18 m Tiefe zeigt an, dass sich die Wirkung des permanenten in die Ostsee gerichteten baroklinen Druckgradienten, der durch die Unterschiede im Salzgehalt zwischen Kattegat und Arkonabecken verursacht wird, gegen den in die Nordsee gerichteten barotropen Druckgradienten, der durch die positive Wasserbilanz der Ostsee verursacht wird, aufhebt (siehe LASS et al., 1987).

Der bodennahe Einstrom war besonders intensiv und andauernd zwischen Mai und August sowie von September bis Mitte November und hatte insbesondere im Frühjahr bis zum Sommer sowie im Herbst eine starke Advektion von warmem, salzreichem Bodenwasser über die Darßer Schwelle zur Folge, während an der Oberfläche im gleichen Zeitraum überwiegend Ausstrom herrschte. Diese ästuarine Zirkulation bewirkt, dass der Oberflächensalzgehalt die typischen Werte des Oberflächenwassers des Arkonabeckens annimmt, während der Bodensalzgehalt den Maximalwert innerhalb des Jahres erreicht (siehe Abb. 6) und somit eine starke Schichtung im Bereich der Darßer Schwelle aufrecht erhalten wird. Diese Schichtung führt im Zusammenwirken mit der Produktion in der euphotischen Schicht und dem anschließendem Absinken organischen Materials in die Bodenschicht zu der Zehrung des in dieser Schicht gelösten Sauerstoffs, siehe Abb. 9.

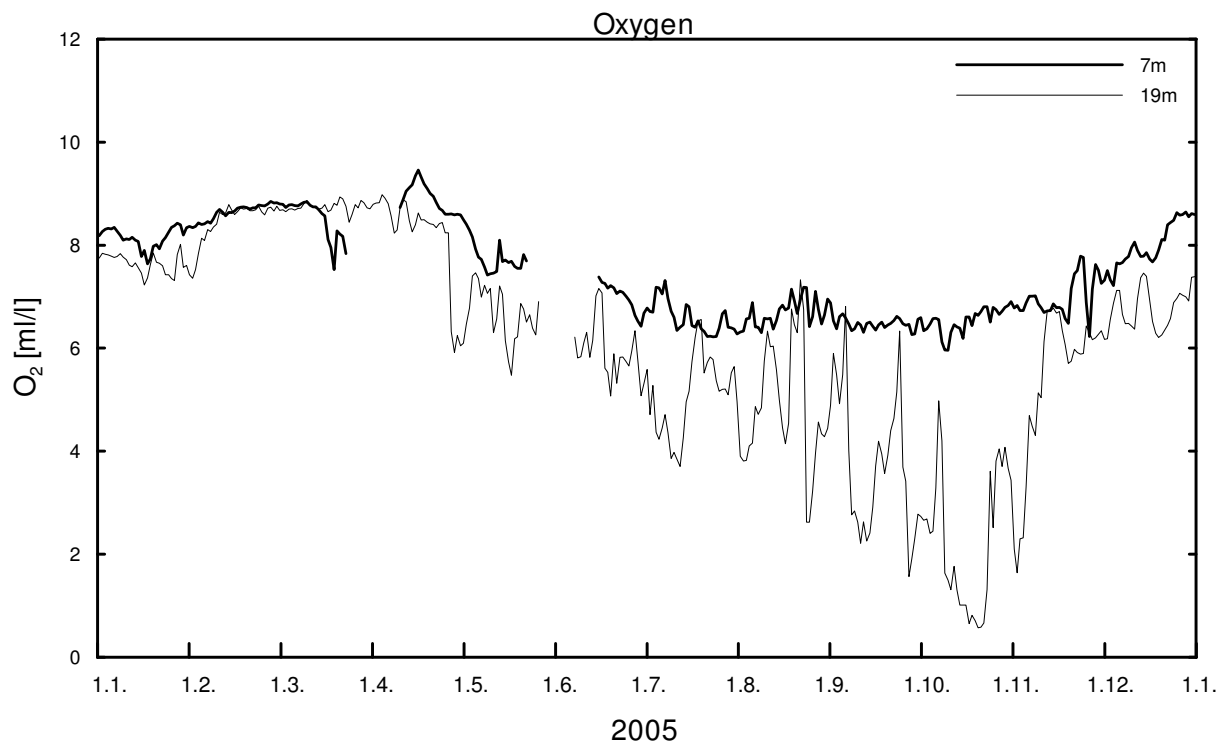


Abb. 9
Verlauf des Sauerstoffgehaltes in der Deck- und Bodenschicht auf der Darßer Schwelle im Jahre 2005

Fig. 9
Dissolved oxygen content measured in the surface and bottom water layer at the Darss Sill station in 2005

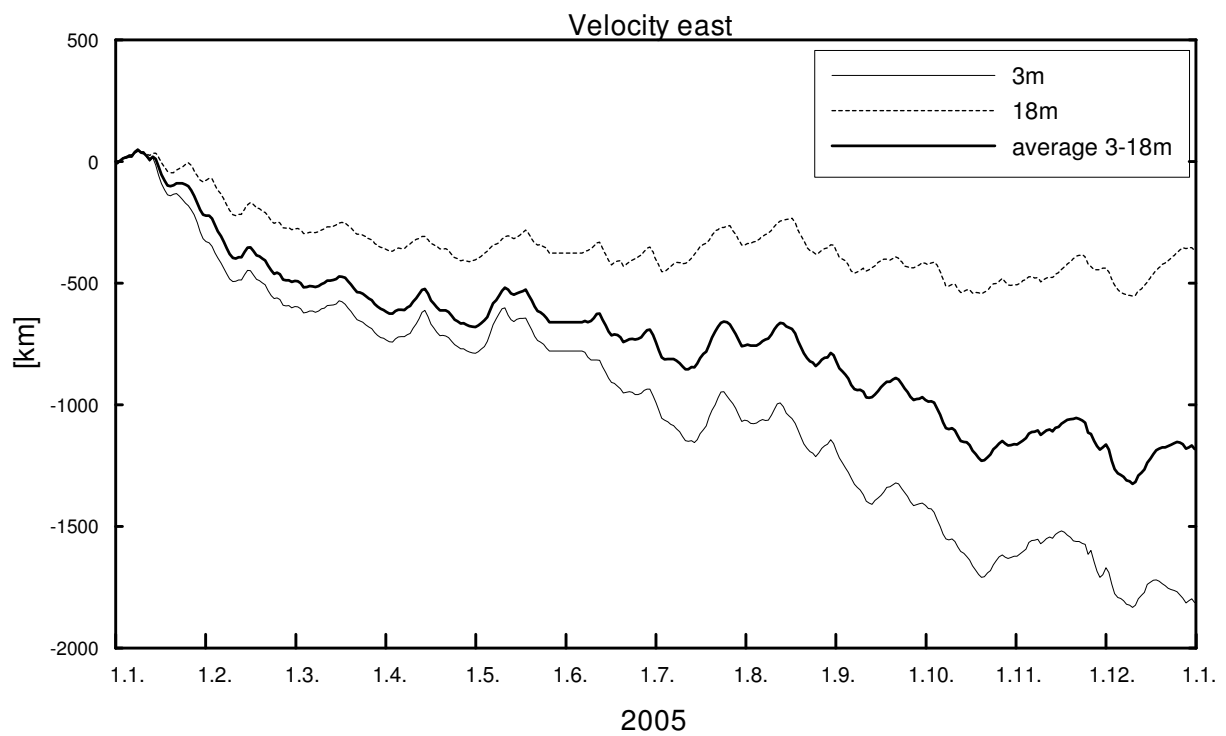


Abb. 10
Ostkomponente der progressiven Vektordiagramme der Strömung in 3 m Tiefe (ausgezogene Linie), der vertikal gemittelten Strömung (gestrichelte Linie) und der Strömung in 18 m Tiefe (gepunktete Linie) auf der Darßer Schwelle 2005

Fig. 10
East component of progressive vector diagrams of the current in 3 m depth (solid line), the vertical averaged current (dashed line) and the current in 18 m depth (dotted line) at the Darss Sill in 2005

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 und MOHRHOLZ, 2003, LASS et al., 2005). Die über die Schwellen einströmenden Salzwasserzungen breiten sich am Boden des Arkonabeckens entgegen dem Uhrzeigersinn entlang des Randes in Richtung Bornholmshgat aus. Während das über die Drogden- Schwelle einströmende salzreiche Wasser überwiegend nördlich des Kriegers Flak in die zentralen Teile des Arkonabeckens vordringt, breitet sich das über die Darßer Schwelle einströmende Salzwasser überwiegend entlang des südlichen Randes des Arkonabeckens Richtung Bornholmshgat 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 erzwingt 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).

Die Bojenstation "Arkonabecken" befindet sich annähernd 20 sm nordöstlich von Arkona auf 46 m Wassertiefe (Stat. AB, vgl. Abb. 1). Die Station war während des ganzen Jahres 2005 operativ. Die Zeitreihen von Wassertemperatur und Salzgehalt in 7 m und 40 m Tiefe sind in Abb. 11 dargestellt. Die an dieser Station an der Meeresoberfläche gemessene Wassertemperatur folgte in ihrem Jahresgang weitgehend dem auf der Darßer Schwelle gemessenen Verlauf (vgl. Abb. 6). Es gab jedoch auch charakteristische Unterschiede im Jahresgang der Wassertemperatur der Deckschicht an beiden Positionen, die besonders im Sommer ausgeprägt waren. Nachdem Anfang Juli das Jahresmaximum der Oberflächentemperatur mit annähernd 20°C erreicht wurde, sank die Temperatur bis Ende Juli etwas ab und schwankte dann leicht um 18°C bis Anfang September die herbstliche Abkühlungsphase begann. Die Temperatur der Deckschicht auf der Darßer Schwelle sank dagegen im August extrem stark auf unter 10°C ab. Sie lag damit noch unter der Temperatur des Bodenwassers im Arkonabecken. Diese Unterschiede in der thermischen Entwicklung der Deckschicht sind auf die charakteristischen Auftriebsereignisse von Zwischenwasser aus dem Arkonabecken vor Rügen und Hiddensee und dessen anschließende Verdriftung in den Bereich der Darßer Schwelle zurückzuführen. Die thermische Schichtung an der Station Arkonabecken ist stärker ausgeprägt als auf der Darßer Schwelle. Dies ist auf die von den atmosphärischen Einflüssen weitgehend entkoppelte Zwischenlagerung des über die Schwellen eingeströmten Salzwassers zurückzuführen. Das Bodenwasser konserviert die Wassertemperatur, die es zum Zeitpunkt des Überströmens der Schwellen hatte und kann sich dann bis zu drei Monaten im Arkonabecken aufhalten. Bemerkenswert sind zwei stufenförmige Erwärmungen des Bodenwassers Anfang Mai und Ende Juli. Letztere ist an der Darßer Schwelle rund zwei Wochen eher zu beobachten. Die plötzliche Abkühlung des Bodenwassers des Arkonabeckens Mitte Dezember ist an der Darßer Schwelle dagegen nicht zu beobachten.

Der in den gleichen Tiefen wie die Wassertemperatur gemessene Salzgehalt im Arkonabecken ist ebenfalls in Abb. 11 dargestellt. Der Salzgehalt in der Deckschicht ist nur geringen Schwankungen ausgesetzt. Er variierte zwischen dem Minimum von 7,0 psu und dem Maximum von 9,0 psu. Der Salzgehalt des Deckschichtwassers an der Station "Arkonabecken" wies 2005 keinen ausgeprägten Jahresgang auf. Der Salzgehalt des Bodenwassers schwankte zwischen 9 psu und annähernd 21 psu. Die Unterbrechung des Einstroms salzreichen Bodenwassers über die Darßer Schwelle von Februar bis April 2005 führte zu einem entsprechenden markanten Absinken des

Bodensalzgehaltes im Arkonabecken. Der barokline Einstrom von salzhaltigem Bodenwasser über die Darßer Schwelle war zeitweise mit Werten über 18 psu verbunden, die im Bodenwasser des Arkonabeckens nicht beobachtet wurden. Dies weist entweder auf eine Vermischung des eingeströmten Wassers von der Darßer Schwelle zur Station "Arkonabecken" mit dem umgebenden salzärmeren Wasser im Arkonabecken hin oder darauf, dass die Schicht salzreichen Wassers so dünn ist, dass sie sich unterhalb des tiefsten Salzgehaltssensors befindet. Der Anfang Dezember beobachtete maximale Bodensalzgehalt von 21 psu im Arkonabecken trat zwar nach einem Einstromereignis mittlerer Stärke über die Darßer Schwelle auf, war jedoch höher als die entsprechenden Bodensalzgehalte auf der Darßer Schwelle, was wie auch schon Ende Januar auf einen Einstrom von Salzwasser über die Drogden- Schwelle hinweist.

Die Zeitpunkte extremer Minima des Bodensalzgehalts korrelieren gut mit den Zeitpunkten kurzzeitiger starker Westwindlagen, die durch damit verbundene Querkirkulation ein Absenken der Salzgehaltssprungschicht am Südrand des Arkonabeckens bewirken.

Der an der Station "Arkonabecken" gemessene Sauerstoffgehalt ist in Abb. 12 dargestellt. Die Sauerstoffgehalte in der Deckschicht des Arkonabeckens und auf der Darßer Schwelle sind sehr ähnlich. Dies weist auf eine enge Korrelation der Löslichkeit und dem Gleichgewicht zwischen Produktion und Zehrung des Sauerstoffs im Deckschichtwasser auf der Darßer Schwelle und im Arkonabecken hin. Der Sauerstoffgehalt im Bodenwasser an beiden Positionen weist dagegen deutliche Unterschiede auf. So war im Winter bis zum Eintreten der Frühjahrsblüte der Sauerstoffgehalt des Bodenwassers im Arkonabecken deutlich niedriger als der in der Deckschicht. Dies deutet darauf hin, dass es auch im Winter im Arkonabecken im Bodenwasser eine höhere Sauerstoffzehrung als im Oberflächenwasser gab. Diese Zehrung erhöhte sich nach dem Eintreten der Frühjahrsblüte stetig bis Anfang September, wies aber wesentlich geringere Schwankung als auf der Darßer Schwelle auf. Während der Sauerstoffgehalt im Bodenwasser an der Darßer Schwelle bis Ende Oktober weiter abnahm, stieg er im Bodenwasser des Arkonabeckens ab Anfang September von seinem Minimalwert von ungefähr 2 ml/l bis zum Jahresende auf 8 ml/l permanent an. Dies zeigt, dass das Bodenwasser des Arkonabeckens durch Prozesse belüftet wird, die erst östlich der Darßer Schwelle wirksam werden. Dies kann zum Teil daran liegen, dass das über die Darßer Schwelle in das Arkonabecken strömende Tiefenwasser sich mit dem darüber liegenden gut belüfteten Brackwasser des Arkonabeckens vermischt oder/und sich das einströmende Tiefenwasser der Darßer Schwelle im Arkonabecken mit dem dort gut belüfteten, über die Drogden- Schwelle eingeströmten Wasser vermischt.

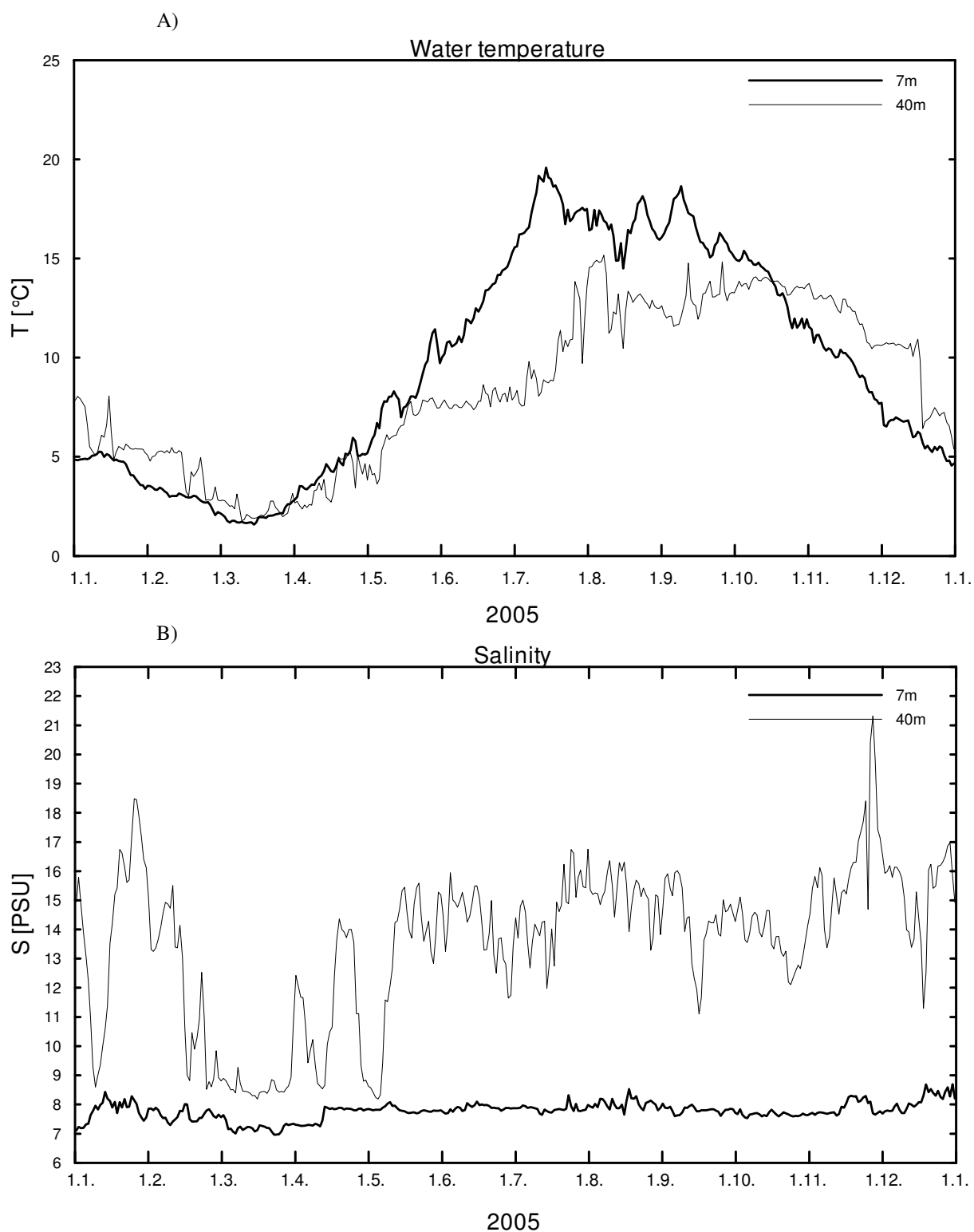


Abb. 11
Verlauf der Wassertemperatur (A) und des Salzgehaltes (B) in der Deck- und Bodenschicht im Arkonabecken (Station AB) im Jahr 2005

Fig. 11
Water temperature (A) and salinity (B) measured in the surface layer and near the bottom in 2005 at Station AB in the Arkona Basin

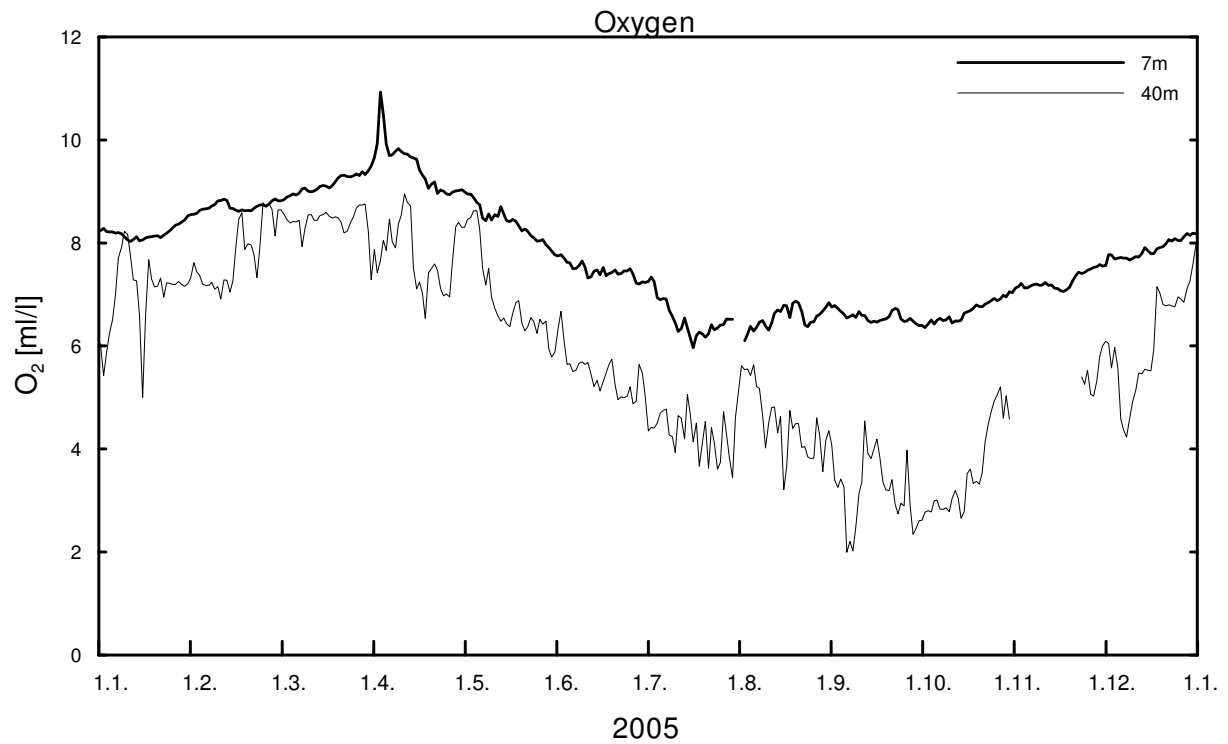


Abb. 12
Verlauf des Sauerstoffgehaltes in der Deck- und Bodenschicht im Arkonabecken (Station AB) im Jahr 2005

Fig. 12
Oxygen concentration measured in the surface layer and near the bottom in 2005 at Station AB in the Arkona Basin

5. Beobachtungen an der Bojenstation "Oder- Bank"

Die Verteilung von Wassermassen und die Zirkulation in der Pommerschen Bucht sind im Rahmen des TRUMP-Projektes (*TR*ansport und *UM*satzprozesse in der *P*ommerschen Bucht) untersucht (v. BODUNGEN et al., 1995; TRUMP, 1998) sowie durch SIEGEL et al., (1996), MOHRHOLZ (1998) und LASS et al., (2001) beschrieben worden. Bei Westwindlagen wird dort gut durchmischtes Wasser der Pommerschen Bucht, dem sich ein geringer Anteil von Oberflächenwasser aus dem Arkonabecken beimischt, beobachtet. Während anhaltender Ostwindlagen strömt Wasser aus dem Oderhaff durch Swina und Peenestrom in die Pommersche Bucht und schichtet sich vor der Küste Usedom über das Buchtwasser.

Die Bojenstation "Oder- Bank" befindet sich annähernd 5 sm nordöstlich von Koserow/Usedom auf 15 m Wassertiefe (Stat. OB, vgl. Abb. 1). Die Bojenstation konnte während des Winters 2004/2005 auf Grund der geringen Eisefahr durchgehend in Betrieb bleiben. Die Zeitreihen von Wassertemperatur und Salzgehalt in 3 m und 13 m Tiefe sind in Abb. 13 dargestellt. Die an dieser Station gemessenen Wassertemperaturen folgten in ihrem Jahresgang weitgehend dem auf der Darßer Schwelle und im Arkonabecken gemessenen Verlauf (vgl. Abb. 6 und Abb. 11), jedoch waren die Extremwerte in der Pommerschen Bucht kräftiger ausgebildet.

Die Wassertemperatur stieg, von leichten Schwankungen überlagert, bis Anfang Juli auf rund 21°C an und blieb bis Anfang September in dem Temperaturbereich um 20°C. Danach sank sie bis zum Ende des Jahres kontinuierlich auf rund 2°C ab, während sie sich auf der Darßer Schwelle und im Arkonabecken nur bis etwa 5°C abgekühlt hatte. Dies weist darauf hin, dass die Wassertemperatur in der Pommerschen Bucht in stärkerem Maße durch den lokalen Wärmeffluss durch die Meeresoberfläche bestimmt ist, als es an der stärker durch advective Prozesse beeinflussten Darßer Schwelle und dem Arkonabecken der Fall ist. Eine ausgeprägte thermische Schichtung wurde 2005 an der Station "Oder- Bank" bis auf kurze Unterbrechungen von April bis Ende August beobachtet.

Der in den gleichen Tiefen wie die Wassertemperatur gemessene Salzgehalt ist ebenfalls in Abb. 13 dargestellt. Er variierte im Laufe des Jahres zwischen 6 und 8,8 psu und wies somit einen für die Pommersche Bucht charakteristischen Schwankungsbereich auf. Der Salzgehalt in der Pommerschen Bucht war zum Beginn des Jahres relativ hoch und dem Oberflächensalzgehalt des Arkonabeckens gleich. Er verringerte sich von Ende Februar bis Anfang Juni allmählich und blieb dann bis zum Ende des Jahres relativ konstant. Dies weist darauf hin, dass im Winter 2004/2005 der Einfluss von Oderwasser im diesem Bereich der Oderbucht nur gering war, bis zum Juni zunahm und sich in der zweiten Jahreshälfte ein Gleichgewicht zwischen der Vermischung von Oberflächenwasser aus dem Arkonabecken und Oderwasser einstellte. Dies wird auch deutlich durch die kurzzeitigen Einschübe von Oberflächenwasser mit erniedrigtem Salzgehalt, die von März bis Mai relativ kräftig ausgebildet waren und ab April mit den Phasen signifikanter thermischer Schichtung übereinstimmten und dann während des restlichen Jahres deutlich schwächer auftraten. In diesen Phasen schichtete sich mit einer Dauer von einigen Tagen bis einigen Wochen Mischwasser aus dem Oderhaff mit einem um 1 bis 2 psu niedrigeren Salzgehalt über das Wasser der Pommerschen Bucht. Dieser Prozess war wie in den vorangegangenen Jahren an ausgedehnte Phasen östlicher Windlagen (vgl. Abb. 4) gekoppelt.

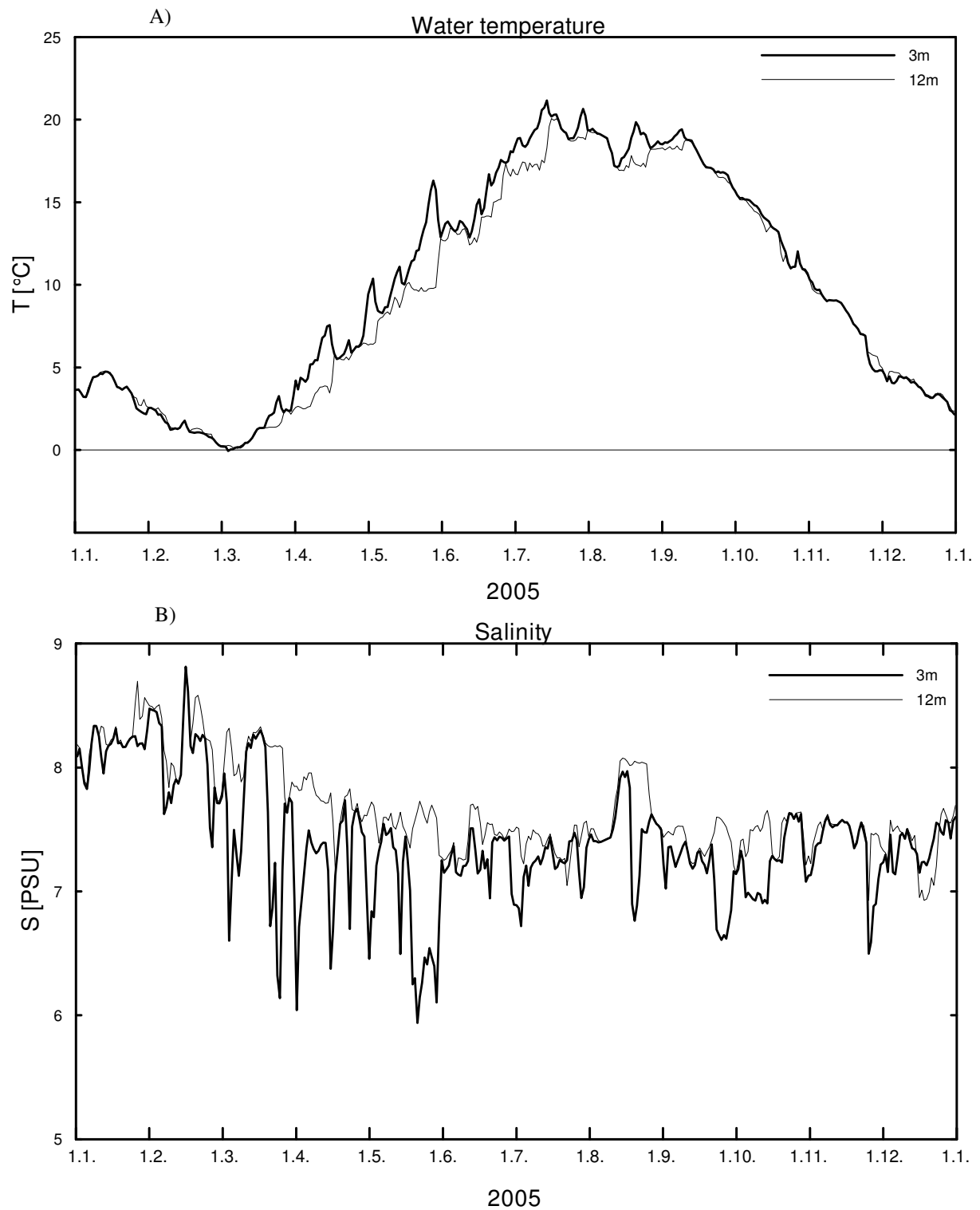


Abb. 13
Verlauf der Wassertemperatur (A) und des Salzgehaltes (B) in der Deck- und Bodenschicht in der Pommerschen Bucht (Stat. OB) im Jahr 2005

Fig. 13
Water temperature (A) and salinity (B) measured in the surface layer and near the bottom in 2005 at Stat. OB in the Pomeranian Bight

6. Hydrographisch-chemische Bedingungen

Die nachfolgend dargestellten Beschreibungen der hydrographisch-chemischen Situation im Jahre 2005 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. Im vorliegenden Bericht wird nur auf spezielle Aspekte eingegangen.

Die Vertikalverteilungen der Wassertemperatur (Abb. 19), des Salz- (Abb. 20) und des Sauerstoffgehaltes (Abb. 22) sowie der wesentlichsten Nährstoffe Phosphat (Abb. 25) und Nitrat (Abb. 26) sind auf einem Längsschnitt zwischen Darßer Schwelle und nordöstlichem Gotlandbecken, der dem Talweg durch die zentralen Ostseebecken folgt, dargestellt. Die Situation im westlichen Gotlandbecken wird separat beschrieben.

Für das Tiefenwasser werden für ausgewählte Stationen Jahresmittelwerte der relevanten hydrographischen und hydrochemischen Parameter berechnet und mit denen früherer Jahre verglichen (Tab. 5 und 9). Trendaussagen für Nährstoffe im Oberflächenwasser werden dagegen nur an Hand der Winterkonzentrationen vorgenommen (Tab. 8).

6.1 Wassertemperatur

Die thermische Entwicklung der Ostsee im Jahr 2005 wird in den folgenden Abschnitten dargestellt. Dabei werden Satellitendaten einbezogen, die durch ihren synoptischen Charakter und die hohe zeitliche Auflösung die Untersuchung der raum-zeitlichen Entwicklung der Wasseroberflächentemperatur in der gesamten Ostsee gestatten. Für die Analyse der Oberflächentemperaturen werden auch mittlere monatliche Verteilungen einbezogen, die aus Satellitendaten berechnet wurden (SIEGEL et al., 1996, 1999), um zwischenjährliche Variationen zu diskutieren.

Die Entwicklung der vertikalen Temperaturverteilung wird anhand der Überwachungsfahrten entlang des Standardschnittes durch die zentralen Becken der Ostsee dargestellt.

6.1.1 Wasseroberflächentemperatur

Die Entwicklung der Wasseroberflächentemperatur der Ostsee im Jahr 2005 wird auf der Grundlage von Satellitendaten des Advanced Very High Resolution Radiometers (AVHRR) der amerikanischen Wettersatelliten NOAA 16, 17 und 18 dargestellt. Für die detaillierte Beschreibung der thermischen Entwicklung wurden Tagesmittelwerte verwendet. Monatsmittel und Anomalien, bezogen auf die Periode 1990 – 2004, dienen zur Interpretation der saisonalen thermischen Entwicklung und zur Betrachtung von zwischenjährlichen Variationen.

Das Jahr 2005 war in der Wasseroberflächentemperatur gekennzeichnet durch vergleichsweise warme Monate Januar, Juli sowie Oktober, November und Dezember und war im Jahresmittel das wärmste Jahr des Untersuchungszeitraumes. Der Januar gehörte nahezu in der gesamten Ostsee nach 2001 zu den wärmsten seit 1990. Auch der Februar lag über dem Mittelwert der letzten 15 Jahre. Die maximale Eisbedeckung in der nördlichen Ostsee war am 17. März 2005 erreicht. Bereits im Juli wurden die höchsten Wasseroberflächentemperaturen im Jahresverlauf gemessen. Diese Beobachtung konnte seit 1990 nur noch im Jahre 2001 gemacht werden, ansonsten war immer der August der wärmste Monat des Jahres. Die hohen Temperaturen des Juli initiierten frühzeitiger als üblich eine intensive Cyanobakterienblüte, die ihre maximale Ausdehnung und Intensität am wärmsten Tag (13. Juli) hatte. Der August war vergleichsweise kalt und lag unter dem langjährigen Mittel. Der warme Herbst führte auch zu den relativ hohen Wasseroberflächentemperaturen im Oktober und November, die entscheidend zum hohen Jahresmittel beitrugen.

Anhand der Kältesummen der Lufttemperatur von Warnemünde (Tab. 2) zeigt sich, dass der Winter 2004/2005 vergleichsweise warm war. Nur im März lagen die Kältesummen etwas über dem langjährigen Mittelwert. Die Wärmesumme des Sommers 2005 lag mit 188,5 K über dem langjährigen Mittelwert (142,6). Das ist insbesondere auf die vergleichsweise warmen Monate Mai, Juni, Juli und September zurückzuführen. Dagegen war der Monat August mit 34,6 K vergleichsweise kalt (Mittelwert 50,4).

Diese Besonderheiten in der Lufttemperatur spiegeln sich auch in der Wasseroberflächentemperatur wider und sind teilweise noch ausgeprägter. Die Anomalien der Monatsmittel des Jahres 2005 sind in Abb. 14 dargestellt. Der Monat Januar gehörte mit +1 K bis +2 K neben dem Vergleichsmonat des Jahres 2001 zu den wärmsten des Untersuchungszeitraumes. Im Februar näherte sich die mittlere Temperatur mit Anomalien von ca. +1 K dem langjährigen Mittelwert. Im März lagen die Monatsmittel speziell im Skagerrak (bis -2 K) und in der westlichen Ostsee (-1 K) unter den langjährigen Mittelwerten, wogegen sich die Monate April bis Juni nur unwesentlich von den jeweiligen Mittelwerten unterschieden. Nur in der westlichen Ostsee traten geringe negative Anomalien auf. Der Juli war mit Monatsmitteltemperaturen um 20°C der wärmste Monat des Jahres und gehörte mit Anomalien von +2 K bis +3 K in der zentralen Ostsee zu den wärmsten des Untersuchungszeitraumes. Der August war mit Anomalien von -1 K in den nördlichen Teilen der Ostsee und Werten zwischen -1 K und teilweise -3 K in der westlichen Ostsee vergleichsweise kalt. Besonders kalt war es in den nördlichen Bereichen der westlichen Ostsee, was auf die Auftriebsprozesse entlang der schwedischen Südküste bei westlichen Winden zurückzuführen ist. Von September bis Dezember waren die Anomalien durch negative Werte in den westlichen Teilen der nördlichen und mittleren Ostsee gekennzeichnet, die durch Auftrieb bei häufig auftretenden westlichen bis südwestlichen Winden hervorgerufen wurden. Im September traten maximale Anomalien von bis zu -7 K auf. Dagegen wurden in den zentralen und westlichen Bereichen dieser Gebiete generell positive Anomalien beobachtet, die im Oktober und November Werte zwischen +1 K und +3 K erreichten. Es gab einige Maximalwerte zwischen +3 K und +4 K im Finnischen und Bottnischen Meerbusen.

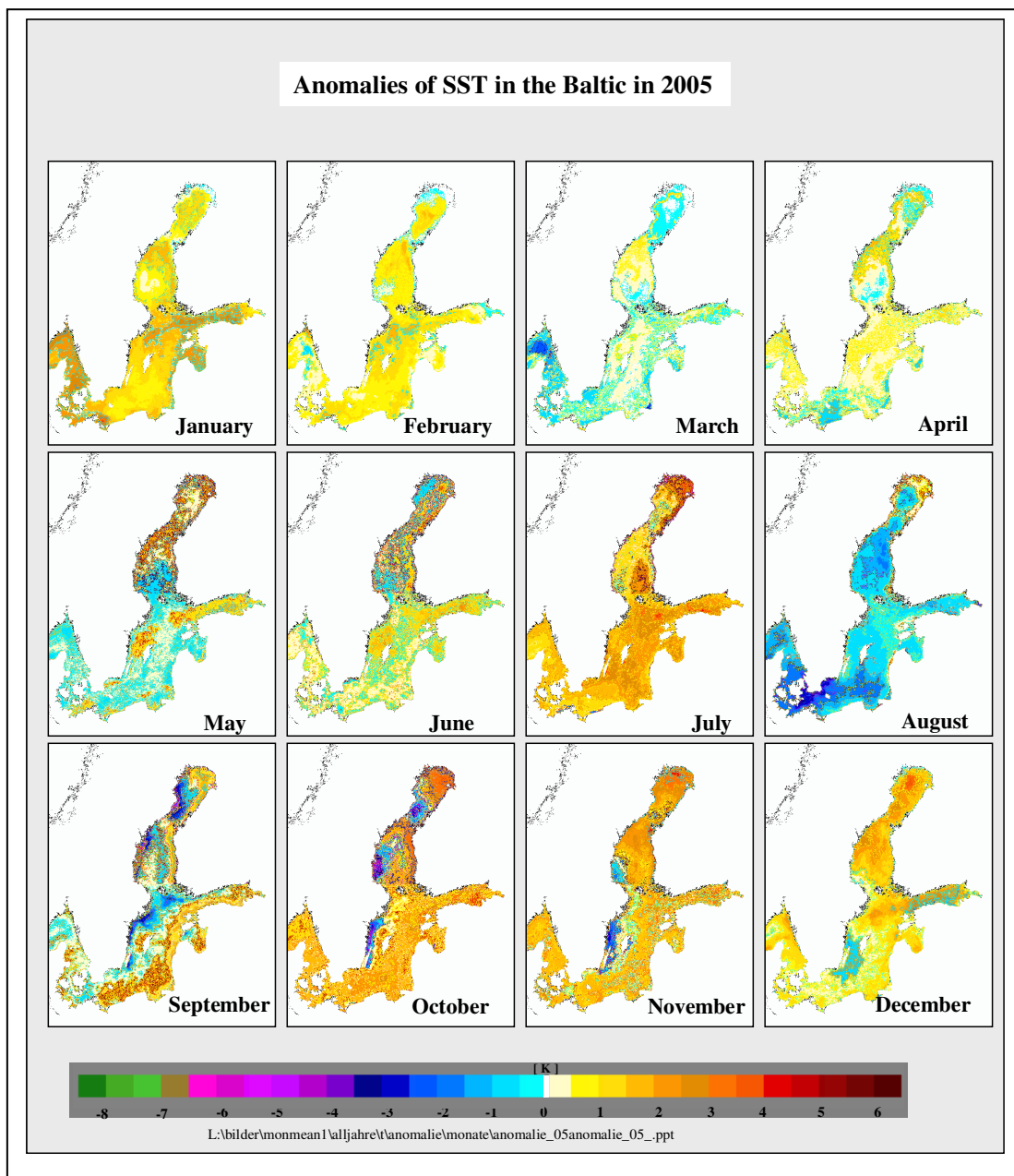


Abb. 14

Anomalien der Wasseroberflächentemperatur (SST) der Ostsee in den Monatsmittelwerten des Jahres 2005 bezogen auf die Mittelwerte der Jahre 1990 – 2004

Fig. 14

Anomalies of sea surface temperature (SST) in the Baltic Sea in the monthly mean values of the year 2005 referring to the mean values of the years 1990 - 2004

Die diskutierten Besonderheiten kommen auch sehr gut im saisonalen Verlauf der Monatsmitteltemperatur in der Arkonasee und in der Gotlandsee zum Ausdruck (Abb.15). Die Monate Januar (+2 K) und Februar (+1 K) wichen in ähnlicher Weise von den langjährigen Mittelwerten ab. Sehr deutlich sieht man in Abb. 15 die schnellere Erwärmung im Frühjahr in der Arkonasee gegenüber der Gotlandsee. Nachdem die langjährigen Mittel für Juli und August annähernd gleich sind, kühlte sich die Gotlandsee im Herbst schneller ab.

Im Juli hatte sich die Gotlandsee (+2,5 K) stärker erwärmt als die Arkonasee (+1,5 K). Entsprechend in der Gotlandsee der August dem langjährigen Mittelwert, so lag die Temperatur in der Arkonasee deutlich darunter (-2 K). Die positiven Anomalien waren im Oktober (+1,5 K) in beiden Gebieten ähnlich und im November waren die Abweichungen in der Gotlandsee um 0,5 K höher als in der Arkonasee (+1 K).

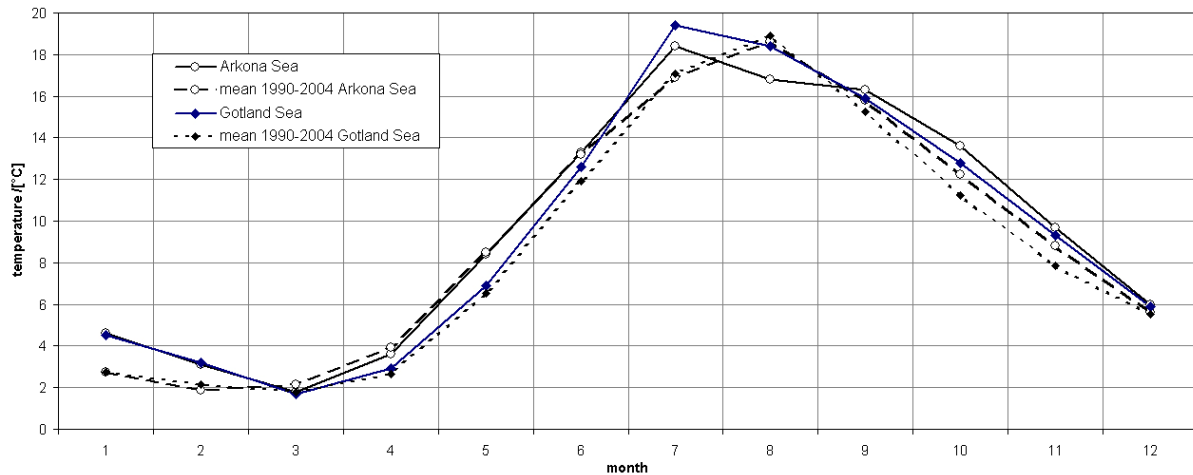


Abb. 15

Saisonaler Verlauf der Wasseroberflächentemperatur (NOAA-SST) in der zentralen Arkona- und Gotlandsee des Jahres 2005 im Vergleich zum jeweiligen 15-Jahresmittel

Fig. 15

Seasonal course of sea surface temperature (NOAA-SST) in the central Arkona- and Gotland Sea in 2005 in comparison to the mean values of the last 15 years

Im Folgenden wird detailliert die thermische Entwicklung im Jahr 2005 in der Ostsee dargestellt. Anfang Januar waren weite Teile der zentralen und westlichen Ostsee durch Temperaturen um 5°C charakterisiert. Erst ab dem 25. Januar kühlte sich die Ostsee während einer Hochdrucklage leicht ab. Auf der MARNET- Station "Arkonabecken" wurden erstmals in dem Winter Lufttemperaturen um 0°C gemessen. Die Abkühlung setzte sich langsam fort und erreichte Ende Februar Wassertemperaturen zwischen 2 und 3°C. Die geringsten Temperaturen um 2°C wurden in der westlichen Ostsee in der zweiten Woche des März erreicht, wogegen diese in der zentralen Ostsee in der dritten Woche zu beobachten waren. Die maximale Eisbedeckung war in der nördlichen Ostsee am 17. März erreicht (Fig. 18). In der westlichen Ostsee setzte bereits eine Erwärmung ein, die ab dem 21. März auch in der zentralen Ostsee begann. Die Erwärmung setzte sich im sehr wolkenarmen Monat April insbesondere nach dem 16. April während einer Hochdruckphase mit östlichen Winden im Arkonabecken bis Ende des Monats fort. Am 24. April wurden für diesen Monat die höchsten Temperaturen zwischen 7 und 8°C im Kattegat bestimmt. Ende des Monats waren in der westlichen Ostsee Werte zwischen 5 und 7°C und in der Gotlandsee um 5°C erreicht. Das Wasser der westlichen Ostsee erwärmte sich bis ca. 14. Mai auf Werte um 9-12°C und kühlte dann wieder auf ca. 8°C ab. Diese Situation hielt bis zum 24. Mai an. Von dieser ersten Erwärmungsphase im Mai war die zentrale Ostsee kaum betroffen. Ab 24. Mai setzte eine erneute

Erwärmung in der westlichen Ostsee ein, die auch in den südlichen Teilen und in Küstenbereichen der zentralen Ostsee stattfand. Das setzte sich bis Ende des Monats fort. Das monatliche Maximum war etwa am 29. Mai mit Werten um 10-12°C in der westlichen Ostsee und um 10°C in der zentralen Ostsee erreicht. Bei sehr wechselnder Bewölkung stagnierte die thermische Entwicklung bis ca. 7. Juni. Danach begann eine langsame Erwärmung, die ab 13. Juni massiver wurde. Ab ca. 25. Juni waren in der westlichen und südlichen Ostsee in Küstennähe Temperaturen zwischen 15 und 18°C zu beobachten, wogegen im Bottnischen Meerbusen die Temperaturen zwischen 8 und 13°C lagen. Ab 4. Juli erwärmte sich die Ostsee während einer anhaltenden Hochdrucklage sehr schnell von ca. 17°C auf 20-23°C in der zentralen Ostsee und in den nördlichen Teilen, dem Bottnischen und Finnischen Meerbusen. Der wärmste Tag des Jahres war dann der 13. Juli 2005 (Abb. 18). Entlang Ostküste der zentralen Ostsee und der Südküste der westlichen Ostsee traten dagegen, hervorgerufen durch nordöstliche Winde, Auftriebsereignisse auf, die nur Temperaturen im Bereich von 10-15°C zuließen. In dieser Phase entwickelten sich auch die Cyanobakterien in der zentralen Ostsee und hatten ihre maximale Intensität und Ausdehnung von Oberflächenakkumulationen am wärmsten Tag erreicht. Danach sorgte eine Wetterumstellung verbunden mit Tiefdruckgebieten und westlichen Winden für eine Abkühlung, so dass Ende Juli nur noch Temperaturen um 18°C in der gesamten Ostsee zu verzeichnen waren. Der Bottnische Meerbusen hatte sich schon auf 12-15°C abgekühlt. Wie sich die thermische Entwicklung auf das Monatsmittel Juli in den verschiedenen Gebieten ausgewirkt hat, zeigt die Abb. 16. Die höchsten Temperaturen (>19°C) und Anomalien (>2 K) waren in der zentralen und nördlichen Gotlandsee sowie im Übergangsbereich zum Bottnischen Meerbusen sowie in der nördlichen Bottonwiek zu verzeichnen. Im Vergleich zum Jahr 2004 sind das speziell in der Gotlandsee enorme zwischenjährliche Unterschiede.

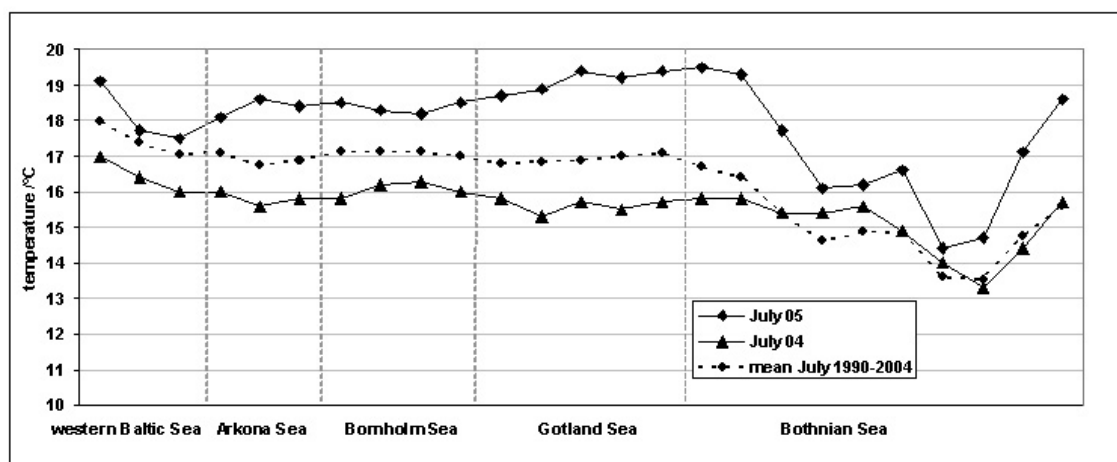


Abb. 16

Temperaturverteilung entlang des Monitoringschnittes durch die zentralen Becken der Ostsee für den Monat Juli 2005 im Vergleich zum Mittel 1990 – 2004 und zum Juli des Vorjahres

Fig. 16

Temperature distribution along the monitoring transect through the central basins of the Baltic Sea in July 2005 in comparison to the mean value of 1990 – 2004 and to July of the previous year

Im gesamten August blieben die Temperaturen nahezu unverändert, westliche Ostsee 13-17°C, zentrale Ostsee 15-18°C und Bottnischer Meerbusen 13 -15°C. Das wirkte sich auch entsprechend auf die Monatsmittel August aus. Der Vergleich der Temperaturverteilung entlang des Monitoringschnittes durch die zentralen Becken der Ostsee für den Monat August 2005 mit dem langjährigen Mittel 1990 – 2004 und zum Vorjahr ist in Abb. 17 dargestellt. Fast in der gesamten Ostsee lag die Wasseroberflächentemperatur unter dem langjährigen Mittelwert, was auch schon die Anomalien in Abb.14 belegten. Die maximale Monatsmitteltemperatur überstieg nicht 18°C. Im Übergangsbereich zwischen Arkonasee und westliche Ostsee lagen die Monatsmittel sogar nur bei 16°C, das sind mehr als 2,5 K unter dem langjährigen Mittelwert.

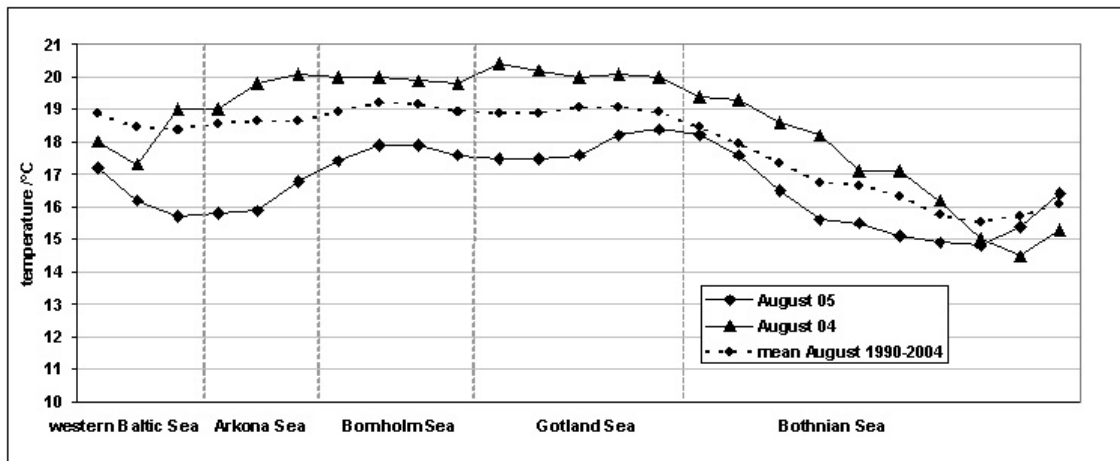


Abb. 17

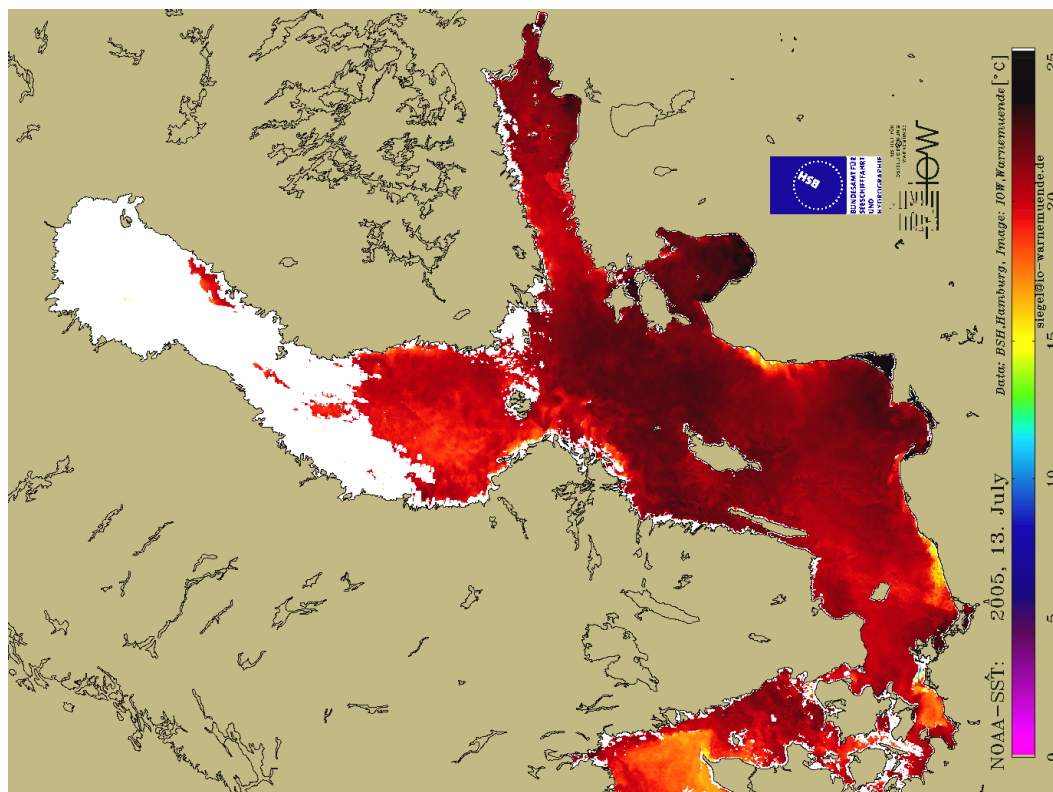
Temperaturverteilung entlang des Monitoringschnittes durch die zentralen Becken der Ostsee für den Monat August 2005 im Vergleich zum Mittel 1990 – 2004 und zum August 2004

Fig. 17

Temperature distribution along the monitoring transect through the central basins of the Baltic Sea in August 2004 in comparison to the mean value of 1990 – 2004 and to August 1997

Bis ca. 10. September blieb die Situation unverändert. Dann setzte Abkühlung bis ca. 15. September ein. Die zentrale Ostsee hatte 13-17°C. Der Bottnische Meerbusen hatte durch starken Auftrieb an der Westküste 5-12°C. Diese Situation hielt bis 25. September an. Danach erfolgte eine weitere Abkühlung besonders von Norden. Anfang Oktober hatten die zentrale und südliche Ostsee 13-16°C, die Ostküste Schwedens durch starken Auftrieb nur 7-10°C, Bottnischer Meerbusen 7-12°C. Die Situation hielt bis 20. Oktober an, worauf weitere Abkühlung besonders von Norden folgte. Ende Oktober hatten westliche und südliche Ostsee 10-12°C, Bottnischer Meerbusen und westliche Gotlandsee 4-7°C, östliche Gotlandsee 8-11°C. Die Abkühlung setzte sich im wolkenreichen November mit anhaltenden westlichen Winden in den zentralen Bereichen fort. Ende November waren weitgehend Temperaturen zwischen 4 und 7°C zu beobachten. Im Dezember gab es keinen ausgeprägten Auftrieb. Nach dem 13. Dezember sanken die Temperaturen auf 3-6°C, die dann bis Ende Dezember erhalten blieben.

Im Jahresmittel der Wasseroberflächentemperatur der Ostsee war das Jahr 2005 das wärmste Jahr des Untersuchungszeitraumes 1990-2005. Untersuchungen zur thermischen Entwicklung der gesamten Ostsee im Zeitraum 1990-2004 sind bei SIEGEL et al., (2005) zusammengefasst.



Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
EISÜBERSICHTSKARTE Nr. 33
 Rostock, 17.03.2005
 Jahrgang 78

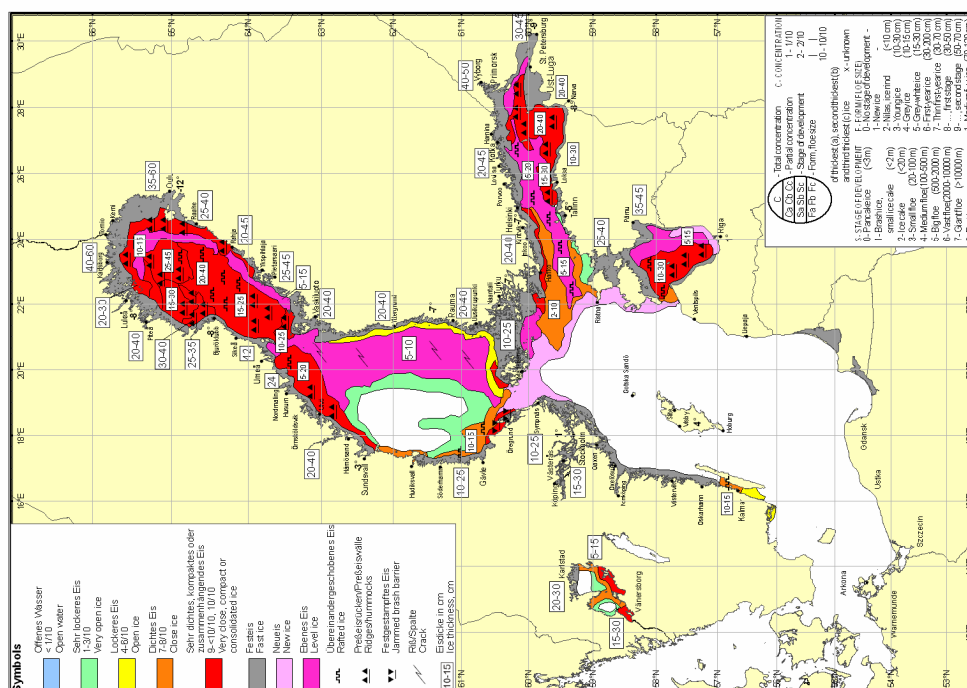


Abb. 17
 Temperaturverteilung der Ostsee zur Zeit der Minimal- (17. März) und Maximalwerte (13. Juli) des Jahres 2005

Fig. 17
 Temperature distribution of the Baltic in the period of minimum (17 March) and maximum values (13 July) of the year 2005

6.1.2 Vertikalverteilung der Wassertemperatur

Die vertikale Temperaturverteilung in der westlichen und zentralen Ostsee im Verlauf des Jahres 2005 ist anhand der Überwachungsfahrten des IOW in der Abb. 19 zusammengestellt.

Starke barotrope Einstromereignisse aus dem Kattegat in die Ostsee waren 2005 nicht zu beobachten, jedoch gibt es im Februar 2006 deutliche Anzeichen für einen erneuten baroklinen Einstrom im Spätherbst 2005. Ein endgültiges Urteil über dessen Wirksamkeit kann aber erst erfolgen, wenn seine Ausbreitung bis zum Gotlandtief nachweisbar ist, was die Messungen voraussichtlich erst im April oder Mai 2006 ergeben werden.

Das wichtigste Temperatursignal im Tiefenwasser der zentralen Ostsee 2005 war der warme barokline Einstrom von Kattegatwasser vom Spätsommer 2003 (FEISTEL et al., 2004a, 2006, NAUSCH et al., 2005), der die im Gotlandtief seit 1997 anhaltend hohen bodennahen Temperaturen, die durch den starken Einstrom vom Januar 2003 kurzzeitig dramatisch abgesenkt wurden, unerwartet schnell wieder ansteigen lassen. Nach Spitzenwerten von 6,8°C in ca. 200 m Tiefe im Februar 2004 (FEISTEL et al., 2004a, NAUSCH et al., 2005) schwankten die Werte in dieser Tiefe nun nur noch unwesentlich um 5,9°C ($\pm 0,02$ °C, siehe Tab. 5). Die seit März 2004 beobachteten starken Fluktuationen um einen Durchschnitt von ca. 6°C, die Dauermessungen an einer Verankerung im östlichen Gotlandbecken ergaben, klangen 2005 fast völlig ab. Das zeigt, dass es 2004 zu keiner wesentlichen neuen Einstromaktivität gekommen war, und dass die dynamischen Prozesse, die im Gotlandbecken durch einen Einstrom induziert werden, eine typische Relaxationszeit von 1-2 Jahren aufweisen. Die starken Temperaturkontraste der ungewöhnlichen Einstromfolge von 2002/2003 hatten diese und viele andere Einzelheiten dieser Vorgänge markant „herauspräpariert“ (FEISTEL et al., 2006).

Das Tiefenwasser im östlichen Gotlandbecken hatte sich 2005 thermisch stark homogenisiert. Die höchsten vorgefundenen Temperaturen lagen in der Schicht um 125 m Tiefe mit einem Maximum von 6,3°C im Februar, Mai und Juli. In den Schichten darunter lag kein Messwert tiefer als 5,9°C. Die Winterkonvektion hatte die Deckschicht auf 2,1°C bei 60 m Tiefe im April abgekühlt. Der Aufbau der Thermokline bei 20 m Tiefe begann im April; von Oktober bis Dezember verlagerte sie sich allmählich tiefer bis auf 50 m. Die höchsten Temperaturen an der Oberfläche wurden im ruhigen Juli mit 21,9°C gemessen, die dann stärkeren Winde im August (vgl. Kapitel 2) vermischten die Deckschicht bis 15 m Tiefe mit Temperaturen um 17,5°C.

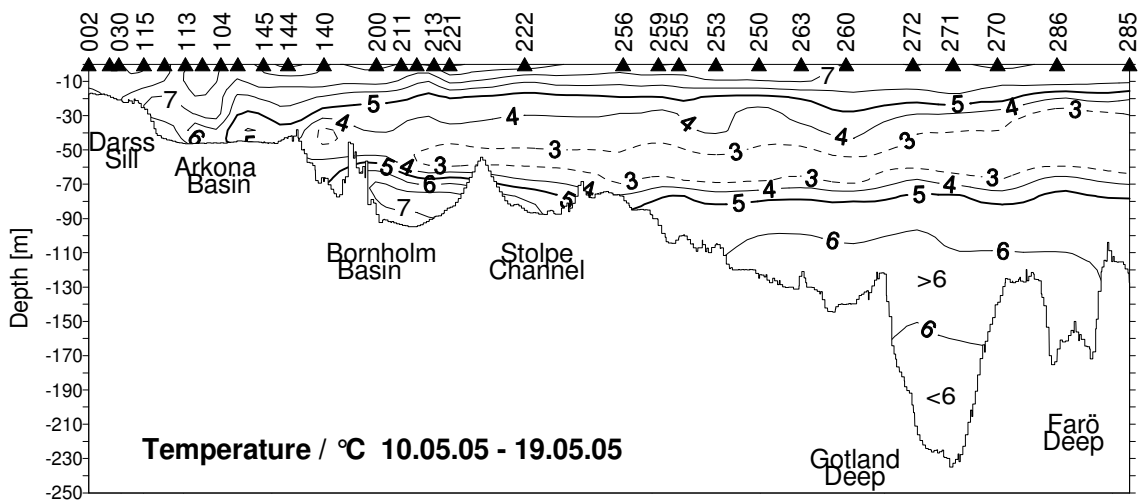
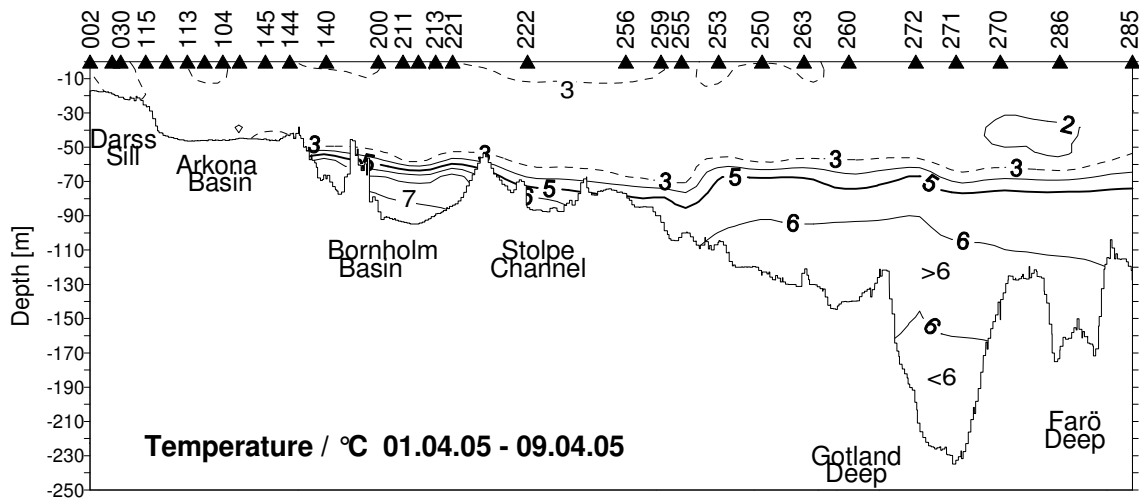
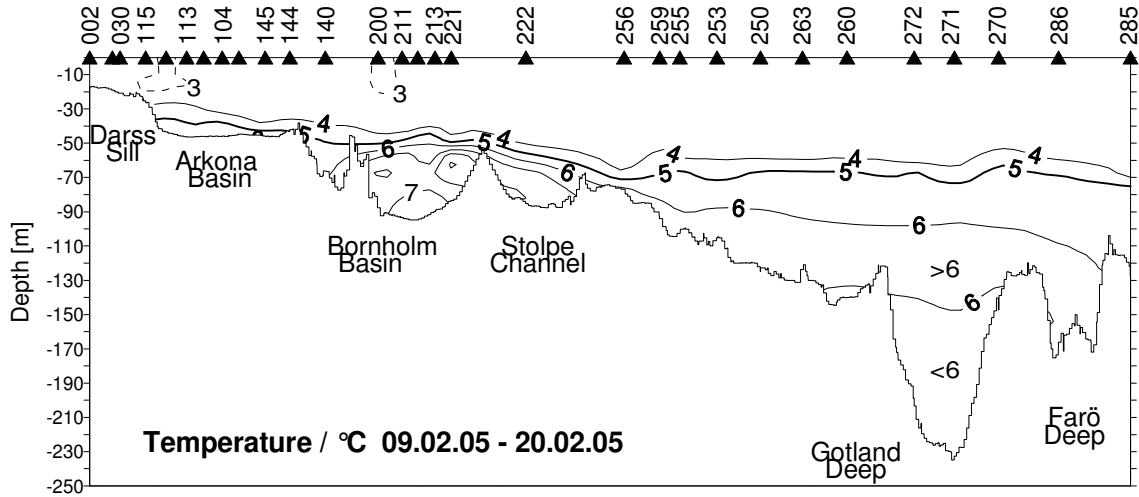
Im Landsorttief stieg die Temperatur in der gesamten Wassersäule unterhalb 200 m um etwa 0,1°C an, während zwischen der Sprungschicht und 125 m Tiefe ein genau entgegen gesetzter Trend stattfand, der sogar 1°C überstieg. Der vertikale Temperaturgradient wurde dadurch nicht abgebaut, sondern signifikant verstärkt. Das kann möglicherweise so gedeutet werden, dass im tiefsten Wasser ein Zustrom aus dem warmen Einstrom von 2003, im darüber liegenden aber aus dem kalten Einstrom von 2003 erfolgte. Die hohe Dichte des erneuten warmen Einstroms hatte 2004 das kalte Bodenwasser im Gotlandbecken angehoben und verdrängt. Diese Deutung wird durch Beobachtungen aus dem Farötief gestützt, wo im Verlauf von 2005 zwischen 70 und 100 m Tiefe eine Abkühlung, darunter aber eine Erwärmung stattfand. Im südlicher gelegenen Karlsö-Tief dagegen wurde unterhalb der Sprungschicht ausschließlich eine Abkühlung registriert. Wir schließen daraus, dass bis 2005 der kalte Einstrom von 2003 schon bis zum Karlsö-Tief vorgedrungen ist, der warme aber erst bis zum Landsorttief. Trotzdem ist die Temperatur 2005 im Karlsö-Tief die höchste in einer Jahr für Jahr ansteigenden Folge (Tab. 5), vermutlich bedingt durch das warme Tiefenwasser, das seit 1997 vom Gotlandtief aus allmählich immer weiter vordringt.

Der Temperaturverlauf im Tiefenwasser des Bornholmbeckens war 2005 deutlich dynamischer als der in der zentralen Ostsee. Bei 40 m Tiefe lag ganzjährig kaltes Zwischenwasser mit Werten steigend von 2,2°C (April) auf 4,6°C (November). Ausnahmen bildeten die Monate, in denen die Tiefenkonvektion diese Schicht erreichte, mit 4,8°C (Januar) und 6,6°C (Dezember). Darunter, bei 60 m Tiefe, direkt über der Sprungschicht und oberhalb der Stolper Schwelle, fanden 3 Temperaturschübe statt, der erste mit 4,3°C (Juni), 4,9°C (Juli), und 8,2°C (August), der zweite mit 7,0°C (September) und 10,2°C (Oktober), der dritte von 8,5°C (November) auf 9,1°C (Dezember). Da eine vertikale Verbindung mit dem Oberflächenwasser wegen der kalten Zwischenschicht darüber auszuschließen ist, kommen nur advective Einstromvorgänge für diese Temperaturanstiege in Frage. Diese Wassermassen konnten ohne Behinderung weiter in die Stolper Rinne abfließen. In der darunter liegenden Schicht, die von der Stolper Schwelle verriegelt ist, trat mit 10,0°C im Oktober ein noch höheres Maximum auf, ein weiteres wurde im Dezember mit 9,0°C bei 90 m Tiefe gefunden. Mit Temperaturen zwischen 6,4°C und 7,5°C waren die restlichen Monate in den Schichten ab 80 m Tiefe relativ gleichmäßig warm.

Teile der mehr als 6°C warmen Wassermasse hatten sich Ende Oktober bereits über die gesamte Stolper Rinne ausgebreitet, wie der Oktober-Schnitt in Abb. 19 zeigt, obwohl im Juli dafür noch keine Anzeichen vorlagen. Im Februar 2006 wurden in der Stolper Rinne (Station 222) in Bodennähe 8,4°C, an ihrem Ausgang (Station 256) Temperaturen von 8,2°C am Boden und im südwestlichen Gotlandbecken (Station 263) von 7,2°C in 124 m Tiefe registriert (NAGEL, 2006). Alle diese Befunde sprechen für einen erneuten stärkeren baroklinen Einstrom im Herbst 2005 nach denen von 2002 und 2003, da es zu den kleinen barotropen Einstromereignissen im Juli und Dezember (Kapitel 2) kaum erkennbare Zusammenhänge gibt. Diese Interpretation wird auch von den Befunden an der Darßer Schwelle gestützt.

Die MARNET-Station „Darßer Schwelle“ hat 2005 mehrere salzreiche, bodennahe Zuströme warmen Wassers registriert. Dabei sind für barokline Einströme die Fälle besonders interessant, in denen sowohl die Schicht an der Oberfläche als auch die am Boden relativ homogen sind, sich voneinander jedoch drastisch unterscheiden. Solche Phase fanden statt vom 3. bis 17. Juli mit Temperaturen in 19 m Tiefe bis 11°C, Salzgehalt bis 21 psu und Sauerstoff um 4 ml/l, vom 7. bis 22. September (15°C, 19 psu, 3-4 ml/l), vom 25. September bis 3. Oktober (15°C, 17 psu, 2 ml/l), und die ausgeprägteste vom 9. bis 23. Oktober 2005 (14°C, 18 psu, 1-2 ml/l).

Durch die MARNET-Station „Arkonabecken“ wurden in 40 m Tiefe in der Phase im Juli ca. 9°C gemessen, bei einem Salzgehalt um 14 psu und Sauerstoff über 4 ml/l, im September zwischen 12 und 15°C, 11 und 16 psu, 3 und 4 ml/l, im September/Oktober 13°C, 14 psu, und im Oktober 14°C, 13-15 psu, and 3 ml/l Sauerstoff.



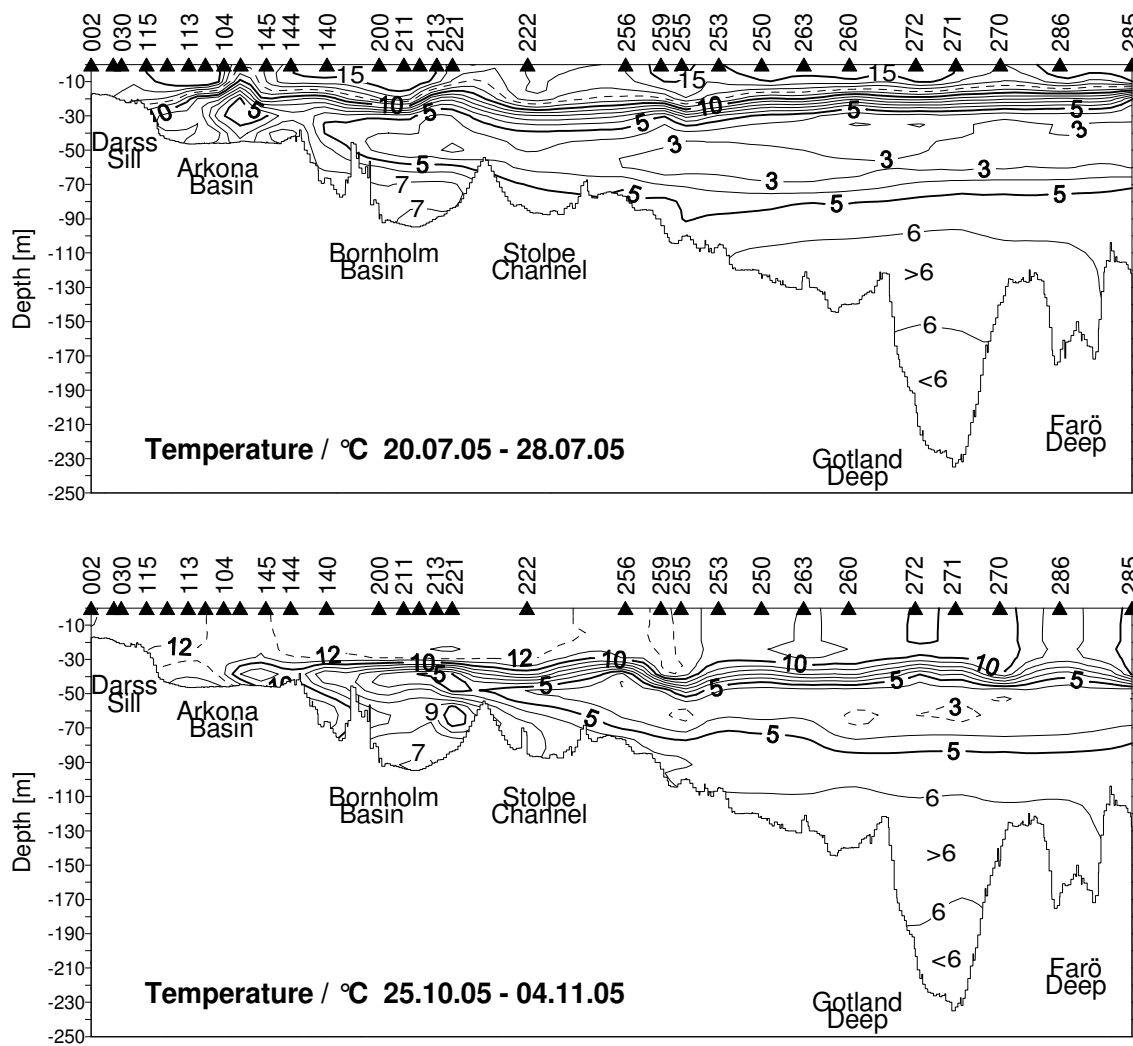


Abb. 19
Vertikale Verteilung der Wassertemperatur zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 19
Vertical water temperature distribution between Darss Sill and northern Gotland Basin

Tab. 5

Jahresmittelwerte und Standardabweichungen ausgewählter hydrographischer Parameter im Tiefenwasser der zentralen Ostsee: IOW sowie SMHI- Daten (n= 8-23)

Table 5

Annual means and standard deviations of selected hydrographic parameters in the deep water of the central Baltic Sea: IOW- and SMHI data (n= 8-23)

Wassertemperatur (°C; Maximalwerte hervorgehoben)

Station	Tiefe/m	2001	2002	2003	2004	2005
213 (Bornholmtief)	80	7,45 ± 1,05	8,86 ± 0,65	4,02 ± 1,69	5,83 ± 1,18	7,20 ± 0,15
271 (Gotlandtief)	200	6,20 ± 0,02	6,34 ± 0,15	5,38 ± 0,80	5,75 ± 0,22	5,91 ± 0,02
286 (Färötief)	150	5,88 ± 0,02	5,97 ± 0,07	6,10 ± 0,34	5,75 ± 0,16	6,05 ± 0,03
284 (Landsortief)	400	5,24 ± 0,01	5,32 ± 0,10	5,65 ± 0,30	5,66 ± 0,08	5,74 ± 0,06
245 (Karlsötief)	100	4,66 ± 0,18	4,77 ± 0,09	4,87 ± 0,07	5,06 ± 0,15	5,18 ± 0,11

Salzgehalt (psu; Maximalwerte hervorgehoben)

Station	Tiefe/m	2001	2002	2003	2004	2005
213 (Bornholmtief)	80	15,46 ± 0,35	15,24 ± 0,34	17,83 ± 0,91	17,10 ± 0,48	16,02 ± 0,21
271 (Gotlandtief)	200	11,98 ± 0,03	11,96 ± 0,10	12,27 ± 0,32	12,74 ± 0,08	12,60 ± 0,04
286 (Färötief)	150	11,33 ± 0,04	11,24 ± 0,06	11,54 ± 0,25	12,10 ± 0,07	12,08 ± 0,05
284 (Landsortief)	400	10,32 ± 0,04	10,23 ± 0,08	10,44 ± 0,28	10,92 ± 0,31	11,06 ± 0,06
245 (Karlsötief)	100	9,50 ± 0,28	9,37 ± 0,17	9,53 ± 0,14	9,79 ± 0,30	10,09 ± 0,21

Sauerstoffgehalt (ml/l; Schwefelwasserstoff als negative Sauerstoffäquivalente; Minimalwerte hervorgehoben)

Station	Tiefe/m	2001	2002	2003	2004	2005
213 (Bornholmtief)	80	0,57 ± 1,23	0,85 ± 1,00	4,53 ± 2,16	0,87 ± 0,91	-0,67 ± 0,95
271 (Gotlandtief)	200	-3,75 ± 0,54	-3,82 ± 1,14	0,50 ± 2,96	0,88 ± 0,47	-0,23 ± 0,44
286 (Färötief)	150	-1,82 ± 0,40	-1,56 ± 0,28	-1,45 ± 0,90	0,52 ± 0,29	-0,24 ± 0,47
284 (Landsortief)	400	-0,75 ± 0,22	-0,94 ± 0,16	-1,01 ± 0,23	-0,29 ± 0,33	-0,26 ± 0,35
245 (Karlsötief)	100	-0,35 ± 0,72	-0,18 ± 0,40	-0,64 ± 0,49	-0,78 ± 0,39	-0,54 ± 0,73

6.2 Salzgehalt

Die Verteilung des Salzgehalts in der Ostsee 2005 ist in Abb. 20 sowie in den Tabellen 5 und 6 dargestellt. Die mittleren Salzgehalte im Oberflächenwasser (Tab. 6) weisen sämtlich erhöhte Werte im Vergleich zum Vorjahr auf. Der generelle Trend zur Aussüßung des Oberflächenwassers hat sich nach 2001 nicht mehr fortgesetzt, sondern sogar umgekehrt. Damit folgt der Wert an der Oberfläche mit 8 Jahren Verzögerung dem Trendwechsel des Tiefenwassers, der sich bereits 1993 vollzogen hat. Dieses Nachhinken erklärt sich in natürlicher Weise aus den Residenzzeiten beider Wasserkörper und dem dynamischen Antwortverhalten des Oberflächenwassers auf die Veränderungen in der Tiefe (FEISTEL et al., 2006). Der Salzverlust des Tiefenwassers während der Stagnationsperiode 1980-1993 wurde durch die Einstromprozesse 1993, 1997, 2002 und 2003 ausgeglichen und führte 2004 im Gotlandtief zu den höchsten Werten seit 1977 (NAUSCH et al., 2005). Die aktuellen Werte liegen jetzt dicht an dem langjährigen Mittel von 1952-2005 und sind in allen Becken die höchsten seit 2001 (Tab. 6). Aus diesen Daten und der Dynamik des Vertikaltransports in der zentralen Ostsee kann somit ein weiterer Anstieg des Oberflächensalzgehalts prognostiziert werden, der sich in den kommenden Jahren noch fortsetzen wird und natürlich auch die Wassereigenschaften an der deutschen Ostseeküste einschließt.

In der Bornholmsee lag der Oberflächensalzgehalt mit $7,6 \pm 0,1$ psu zum wiederholten Male höher als im jeweiligen Vorjahr und war im Jahresverlauf, abgesehen von stärkeren Schwankungen im März und August, etwa konstant. In Bodennähe (80 m) dagegen war er mit $16,0 \pm 0,2$ psu sogar um ca. 1,1 psu niedriger als im Vorjahr und fluktuierte zwischen 15,5 and 16,3 psu zwischen den Monaten. Diese gegenläufige Tendenz erklärt sich aus der geringen Einstromaktivität 2005, die sich im Tiefenwasser der Bornholmsee sehr kurzfristig und unmittelbar erniedrigend auf den Salzgehalt auswirkt, während im Oberflächenwasser der Abfluss aus der gesamten Ostsee sichtbar wird, die das Salz über größere Zeiträume gepuffert abgibt. Der erhöhte Oberflächensalzgehalt zeigt einen verstärkten vertikalen Salztransport in den zentralen Becken durch die Sprungschicht nach oben in entsprechend verzögerter Form an, bedingt durch die kalten und warmen salzreichen Einströme 1993-2003.

Der leichte Rückgang des Salzgehalts im Tiefenwasser hatte, im Gegensatz zu 2004, nun auch schon das Gotland- und das Farötief erfasst (Tab. 5). In den untersuchten Becken jenseits des Farötiefs lagen alle Jahresmittelwerte der Salzgehalte an den ausgewählten Horizonten des Tiefenwassers aber wieder höher als in vielen Jahren zuvor. Im Gotlandtief bei 200 m Tiefe wurden höhere Werte als im Jahr 2004 (Tab. 5) das letzte Mal nach dem großen Salzwassereinbruch 1976/77 gemessen (NEHRING, 1990, NEHRING und MATTHÄUS, 1990), nämlich von April bis August 1977 mit Werten zwischen 12,9 und 13,0 psu. Zwischenzeitliche kleinere Maxima traten nach den Einströmen 1993 (12,0 psu im Jahresmittel 1995) und 1997 (12,3 psu im Jahr 1998) auf. Den letzten Höchstwert von 12,9 psu bei 200 m Tiefe am 18. Juli 2004 verdanken wir anscheinend der letzten Salzzufuhr durch den baroklinen warmen Sommereinstrom 2003, der schon an der Darßer Schwelle durch einen hohen Bodensalzgehalt und eine extrem scharf ausgeprägte Halokline auffiel (FEISTEL et al., 2004a). Der Mittelwert im aktuellen Berichtsjahr 2005 von $12,6 \pm 0,04$ psu in 200 m Tiefe zeigte einen leichten Rückgang um 0,1 psu gegenüber 2004 und war durch einen geringfügig fallenden Trend in Jahresverlauf charakterisiert.

Die vertikal weitgehend homogene Temperatur- und Salzverteilung in den oberen 60 m der östlichen Gotlandsee im Februar und März 2005 (Abb. 19, 20) deutet auf eine intensive Winterkonvektion in diesen Monaten hin. Im Februar fanden wir den Oberflächenmaximalwert des Jahres 2005 von 7,4 psu, während gleichzeitig auch das Maximum in der Schicht 80-100 m Tiefe durchlaufen wurde. Durch den fehlenden bodennahen Einstrom fiel der Salzgehalt am Boden von Januar bis Dezember leicht von 12,8 auf 12,7 psu. Die sehr geringe jährliche Variation zeigt ein weiteres Abklingen der insbesondere 2003 durch die Einströme bewirkten Unruhe an. Während zu Jahresbeginn 2005 nur die bodennahe Schicht Schwefelwasserstoff enthielt, wurde bis Jahresende schon die gesamte Säule unterhalb 150 m anoxisch.

Im Farötief stieg 2005 der Salzgehalt bei 150 m Tiefe zunächst an, von 12,0 psu (Januar) auf 12,15 psu (Juni), sank danach aber wieder ab auf 12,0 psu (Dezember). Das dort vorgefundene Wasser wurde ab Juli 2005 anoxisch. Der Mittelwert des Salzgehaltes von $12,1 \pm 0,1$ psu in dieser Tiefe war nur wenig geringer als 2004, sonst aber höher als alle Werte seit 20 Jahren, und seine verringerte Schwankung weist auf weiter abklingende Austauschprozesse hin.

Im 400 m-Horizont des Landsorttiefs stieg der Salzgehalt im Verlauf des Jahres 2005 nicht weiter an. Das Jahresmittel erhöhte sich im Vergleich zum Vorjahr aber um weitere 0,1 psu (Tab. 5). Die beschriebene Salzgehaltszunahme, die auch mit einem weiteren Anstieg der Temperatur verbunden war, resultierte vor allem aus der Zufuhr des freigesetzten Wassers aus anderen Becken im Vorjahr. Der 2004 eingeströmte Sauerstoff, der zu einer zeitweiligen Aufhebung der anoxischen Bedingungen in Frühjahr und Herbst 2004 führte, war 2005 nicht mehr vorhanden. Die Schwankungsbreite von unter 0,1 psu in der 400-m-Schicht war, im Gegensatz zu den für das Landsorttief 2003 und 2004 gefundenen außergewöhnlich hohen Werten, auf ein normales Maß zurückgekehrt und signalisiert ein Ende des intensiven Wasseraustauschs. Sehr starke Schwankungen (0,5 psu) wurden 2005 aber in der Schicht um 90 m Tiefe registriert, so dass in den Wasserkörpern geringerer Dichte von einem weiter anhaltenden Austauschprozess ausgegangen werden muss.

Auch der Salzgehalt des Tiefenwassers (100 m) des Karlsötiefs verzeichnete wie 2004 deutliche Schwankungen von 0,3 psu und stieg in 4 verschiedenen Monaten auf ein Maximum von 10,3 psu an. Das Jahresmittel 2005 lag noch einmal 0,3 psu höher als im Jahr davor. Ähnlich wie seinerzeit sind diese Veränderungen als sekundäre Effekte der Einstromvorgänge zu interpretieren, denn gemeinsam mit einem Temperaturanstieg erhöhte sich der Gehalt an Schwefelwasserstoff im Jahresverlauf stark, wie schon 2003 und 2004, wahrscheinlich durch die Übernahme überströmender alter, stagnierender Wassermassen aus den benachbarten Becken. Der Belüftungseffekt, der Februar – April 2005 bis 110 m Tiefe nachweisbar war, geht sehr wahrscheinlich auf die intensive Tiefenkonvektion im Oberflächenwasser im Winter 2004/2005 zurück, worauf die begleitenden niedrigen Temperatur- und Salzwerte hinweisen.

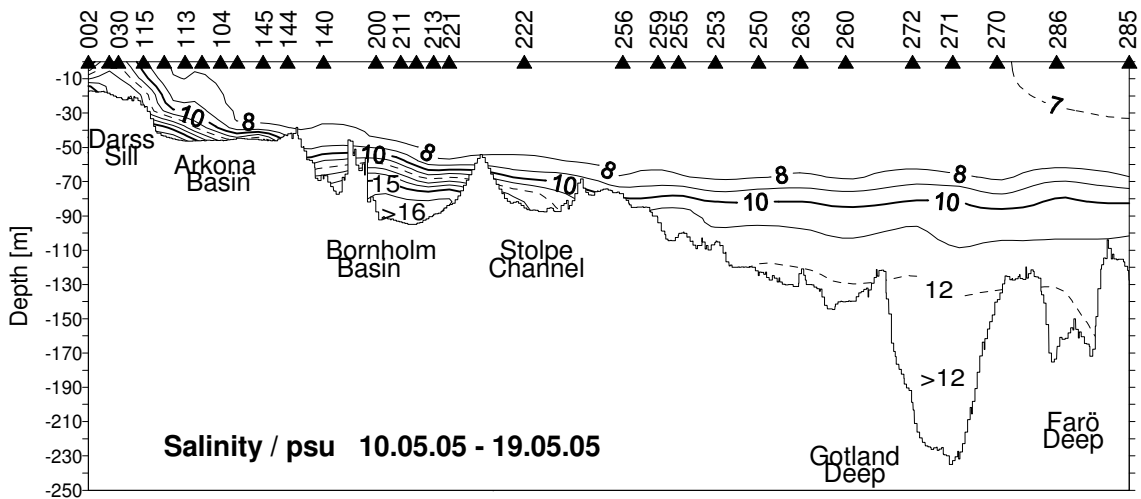
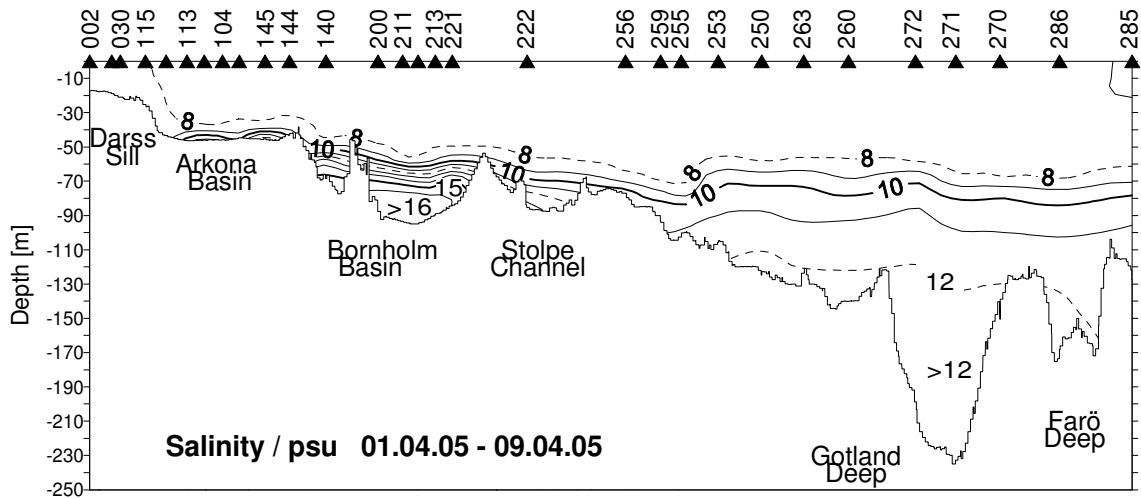
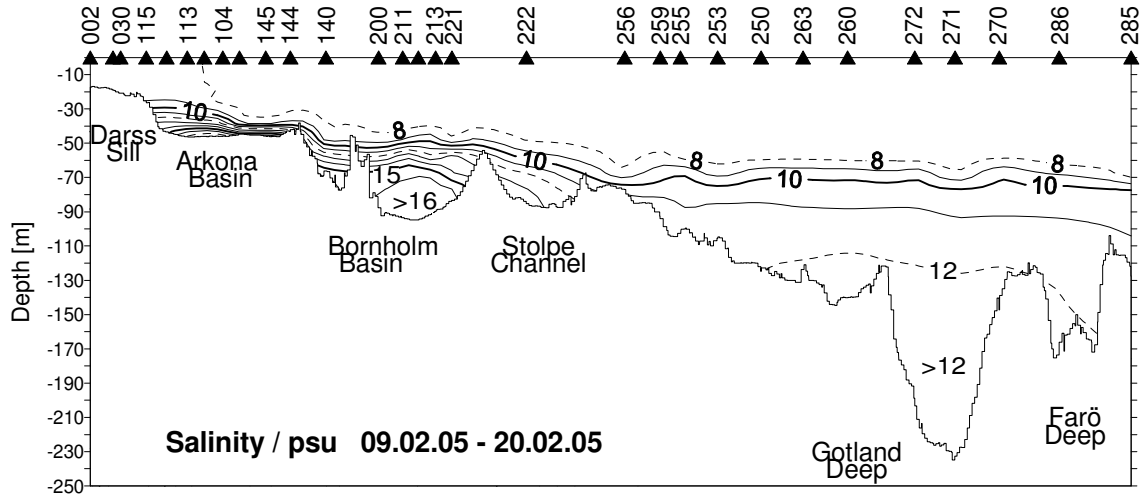
Tab. 6

Jahresmittelwerte von 2001 bis 2005 und Standardabweichungen des Salzgehalts (in psu) im Oberflächenwasser der zentralen Ostsee (Maximalwerte hervorgehoben). Die Langzeitmittelwerte der Jahre 1952-2005 sind dem BALTIC-Klimaatlas entnommen (FEISTEL et al., 2008)

Table 6

Annual means of 2001 to 2005 and standard deviations of surface water salinity (in psu) in the central Baltic Sea (maximum values in bold). The long-term averages of the years 1952-2005 are taken from the BALTIC climate atlas (FEISTEL et al., 2008)

Station	2001	2002	2003	2004	2005	1952-2005
213 (Bornholmtief)	7,29 ± 0,19	7,17 ± 0,13	7,30 ± 0,06	7,44 ± 0,10	7,59 ± 0,08	7,60 ± 0,29
271 (Gotlandtief)	6,86 ± 0,30	6,98 ± 0,19	6,93 ± 0,15	6,94 ± 0,36	7,20 ± 0,22	7,26 ± 0,32
286 (Farötief)	6,61 ± 0,26	6,75 ± 0,34	6,79 ± 0,14	6,78 ± 0,27	6,85 ± 0,26	6,92 ± 0,34
284 (Landsorttief)	6,29 ± 0,26	6,48 ± 0,27	6,52 ± 0,14	6,37 ± 0,37	6,60 ± 0,32	6,75 ± 0,35
245 (Karlsötief)	6,52 ± 0,19	6,77 ± 0,21	6,79 ± 0,13	6,96 ± 0,10	7,02 ± 0,22	6,99 ± 0,32



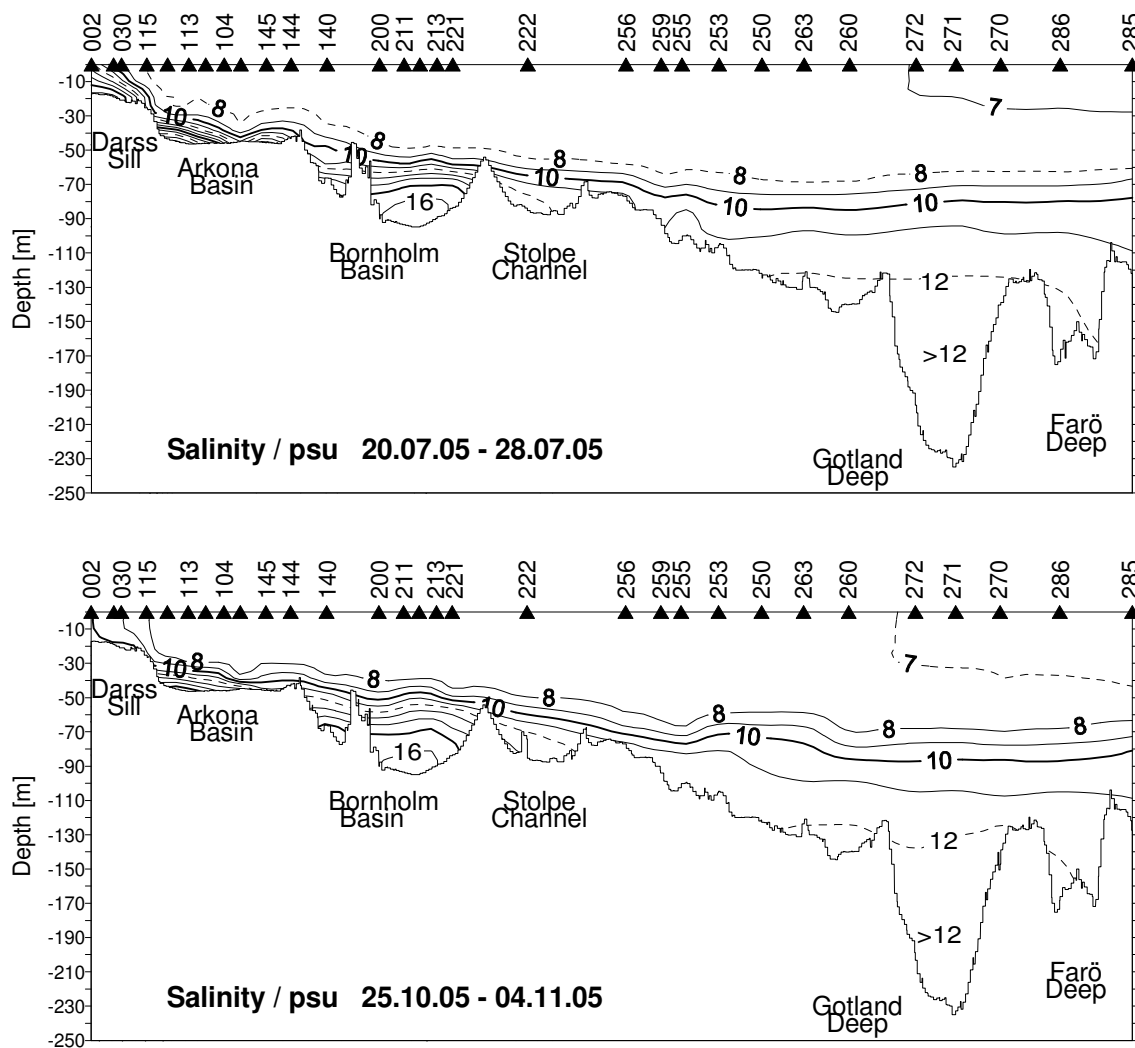


Abb. 20

Vertikale Verteilung des Salzgehaltes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 20

Vertical salinity distribution between Darss Sill and northern Gotland Basin

6.3 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. Veränderungen des Sauerstoffgehaltes werden im Wesentlichen durch die Jahresgänge von Temperatur und Salzgehalt und die jahreszeitlich unterschiedlich stark ausgeprägte Intensität der Produktions- und Zehrungsprozesse verursacht. Zusätzlich können hydrodynamische Prozesse eine Rolle spielen. Wesentlich problematischer ist die Sauerstoffzufuhr in die tieferen Wasserschichten. In den tieferen Becken der Ostsee verhindert die permanente Salzgehaltssprungschicht den vertikalen Austausch weitgehend. In den flacheren Gewässerteilen kann dieser Austausch durch temporäre haline und thermische Schichtungen ebenfalls stark begrenzt werden. Dies ist besonders im Spätsommer und Herbst der Fall. 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. 22 bestätigt werden, in der die Verteilung von Sauerstoff und Schwefelwasserstoff auf einem Schnitt von der Darßer Schwelle bis ins nördliche Gotlandbecken dargestellt ist.

In der durchmischten Oberflächenschicht kann ein typischer Jahresgang des Sauerstoffgehaltes beobachtet werden (MATTHÄUS, 1978, NAUSCH et al., 2004). Die hohe Gaslöslichkeit bei niedrigen Temperaturen verursacht hohe Sauerstoffkonzentrationen im Winter sowie während der Frühjahrsblüte des Phytoplanktons (Abb. 22). Im Sommer finden sich dagegen temperaturbedingt niedrigere Konzentrationen. Der starke Einfluss von Temperatur und auch Salzgehalt auf die Sauerstofflöslichkeit erschwert die Vergleichbarkeit der Messwerte. Deshalb wird in der Regel der Sauerstoffsättigung zur Beschreibung des Sauerstoffstatus des Oberflächenwassers der Vorzug gegeben, da hierbei die genannten Einflüsse eliminiert sind.

Abb. 21 fasst die Sauerstoffsättigungswerte des Oberflächenwassers im Jahr 2005 für 4 charakteristische Seegebiete zusammen. Im Februar wurde eine recht einheitliche Situation angetroffen. Geringe Standardabweichungen in den einzelnen Untersuchungsgebieten dokumentieren das. Charakteristisch für diese Jahreszeit ist das Überwiegen sauerstoffzehrender Prozesse, so dass eine leichte Untersättigung zu beobachten war. Sie war im Bornholmbecken und östlichen Gotlandbecken mit etwa 4% größer als in den anderen Gebieten (1 – 2%). Der Zeitraum März bis Mai war durch die von Westen nach Osten und Norden fortschreitende Frühjahrsblüte des Phytoplanktons gekennzeichnet (KAISER und SCHULZ, 1978). Mit den Monitoringfahrten gelingt es jedoch nicht immer, das Maximum der Blüte in allen Seegebieten zu erfassen. Die Beprobung im April zeigte deutlich, dass der Höhepunkt der Blüte in der westlichen Ostsee bereits vorüber war, eine Kulmination im Arkonabecken sichtbar wurde, während die Phytoplanktonentwicklung in der zentralen Ostsee erst am Anfang stand. Die hohen Standardabweichungen, besonders im Arkona- und Bornholmbecken sprechen für eine inhomogenere Entwicklung der Algen. Im Mai wurde deutlich, dass die Blüte in der westlichen und südlichen Ostsee weitgehend abgeschlossen gewesen war, im östlichen Gotlandbecken dagegen auf ihrem Höhepunkt angelangt war. Hier wurden auch die maximalen Sättigungswerte des Jahres 2005 mit 125% erreicht. Der Zeitpunkt des Einsetzens der Frühjahrsblüte und ihre Progression in die zentrale Ostsee ist in starkem Maße von der meteorologischen Situation des Beobachtungsjahres abhängig (vgl. auch Kapitel 2). Die hohen Temperaturen im Juli 2005 und eine ruhige Wetterlage (vgl. Kapitel 2 und 6.1.1) führten zu einer äußerst intensiven Cyanobakterienentwicklung in weiten Teilen der zentralen Ostsee, die ihre maximale Ausdehnung am 13. Juli 2005, dem wärmsten Tag, erreichte. Danach führte eine Wetterumstellung zu einer Abkühlung und zum Zusammenbruch der Cyanobakterienblüte. Die Beprobung in der 2. Julihälfte spiegelte diese Situation auch an Hand der Sauerstoffsättigung wider. Die Sättigung lag knapp unterhalb des 100%- Sättigungswertes. Im östlichen Gotlandbecken, dem

Gebiet mit der stärksten Cyanobakterienentwicklung, wurde eine Untersättigung von 2,6% beobachtet. Hiermit scheint sich eine Entwicklung fortzusetzen, die auch schon im Jahr 2004 (NAUSCH et al., 2005) festgestellt wurde. Während in den Vorjahren immer Übersättigungen (103 – 109%) gemessen wurden, war im Jahr 2004, gemittelt über alle Seegebiete, nur eine Sättigung von 93,4% ermittelt worden. Das Jahr 2004 war im Vergleich zu 2005 durch eine wesentlich geringere Cyanobakterienentwicklung gekennzeichnet. Für generelle Schlussfolgerungen reichen die Befunde noch nicht aus. Es muss in den Folgejahren geprüft werden, ob sich ähnliche Situationen wiederholen. Im Oktober/November wurde wiederum eine recht einheitliche Situation in der gesamten Ostsee angetroffen. Die Sättigungswerte schwankten nur gering. Eine Untersättigung zwischen 4 und 8% entspricht dem langjährigen Mittel (NAUSCH et al., 2005). Sie ist zurückzuführen auf die Dominanz von Abbauprozessen.

Das winterliche Zwischenwasser ist durch ein Temperaturminimum im vertikalen Profil gekennzeichnet (Abb. 19). Der Kern dieses Zwischenwassers befindet sich im Bornholmbecken wie erwartet in 40 m Tiefe, im östlichen und westlichen Gotlandbecken im Tiefenbereich 50 – 60 m. Ursache der niedrigen Temperaturen ist die tief reichende vertikale Durchmischung im Winter. Bei diesem Prozess wird gleichzeitig Wasser mit einem hohen Sauerstoffgehalt in diesen Tiefenbereich transportiert (Abb. 22). Die sich im Frühjahr ausbildende Temperatursprungschicht schließt diesen Wasserkörper vom weiteren Austausch aus, so dass die winterlichen Bedingungen weitgehend erhalten bleiben. Zehrungsprozesse laufen nur sehr langsam ab. Vergleicht man die Sauerstoffkonzentrationen im Februar mit denen des Sommers (Tab. 7), so können Aussagen über den Sauerstoffverbrauch in dieser Wasserschicht gezogen werden, wenn man Advektion ausschließt. Für das östliche Gotlandbecken wurden im Jahr 2005 nur 0,003 ml/l pro Tag ermittelt. Diese Abnahme liegt noch unter dem Wert, der für das Jahr 2002 ermittelt wurde (NAUSCH et al., 2003).

Tab. 7

Sauerstoffkonzentrationen (ml/l) im östlichen Gotlandbecken im Februar und im Zwischenwasser im Juli

Table 7

Oxygen concentrations (ml/l) in the eastern Gotland Basin in February and in the intermediate water in July

Station	February (0 – 40 m)	July (40 m)
253	8,55	8,03
250	8,57	7,92
263	8,55	8,12
260	8,50	8,24
272	8,61	8,26
271	8,59	8,27
270	8,69	8,18
Mittel	8,58 ± 0,06	8,14 ± 0,13

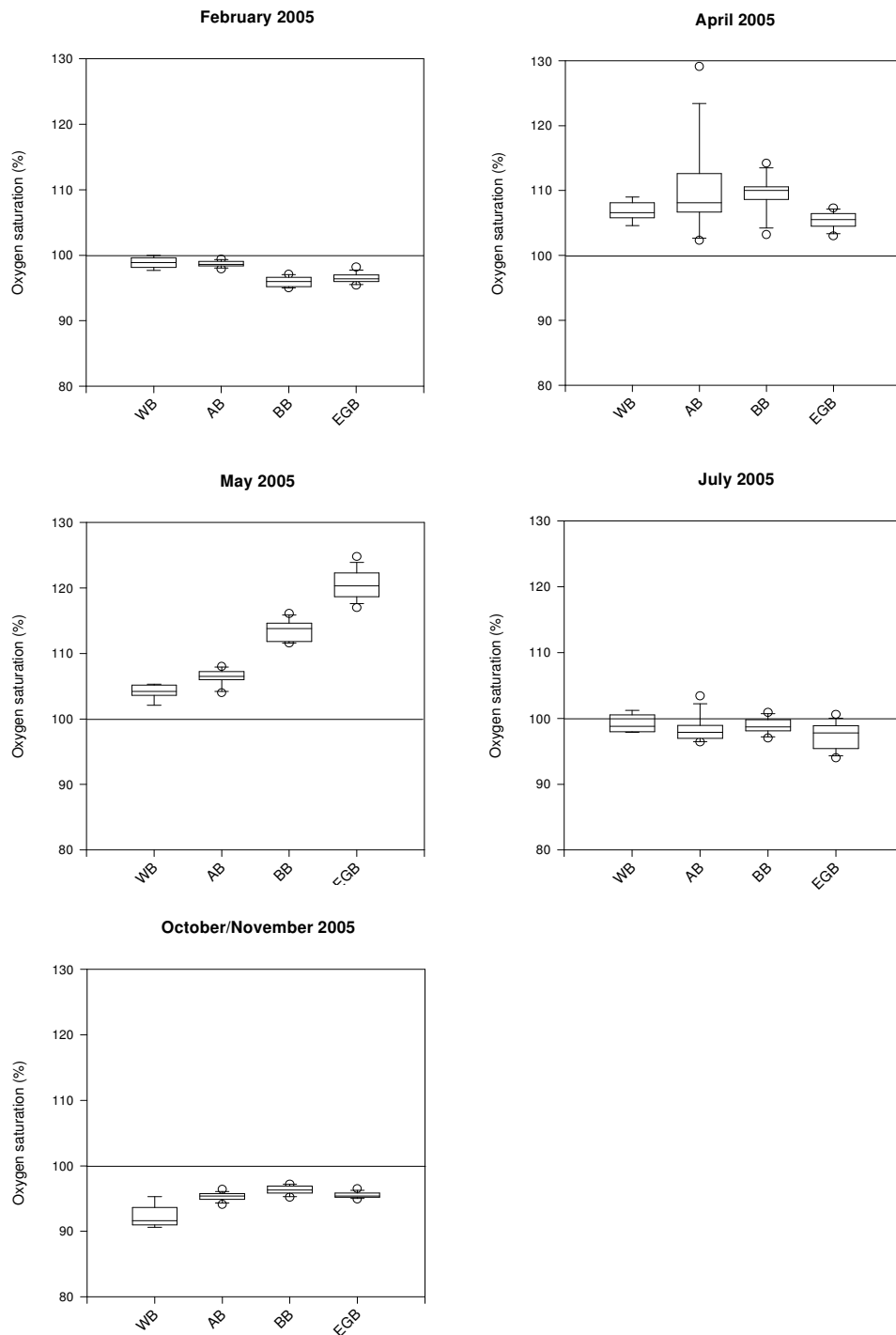
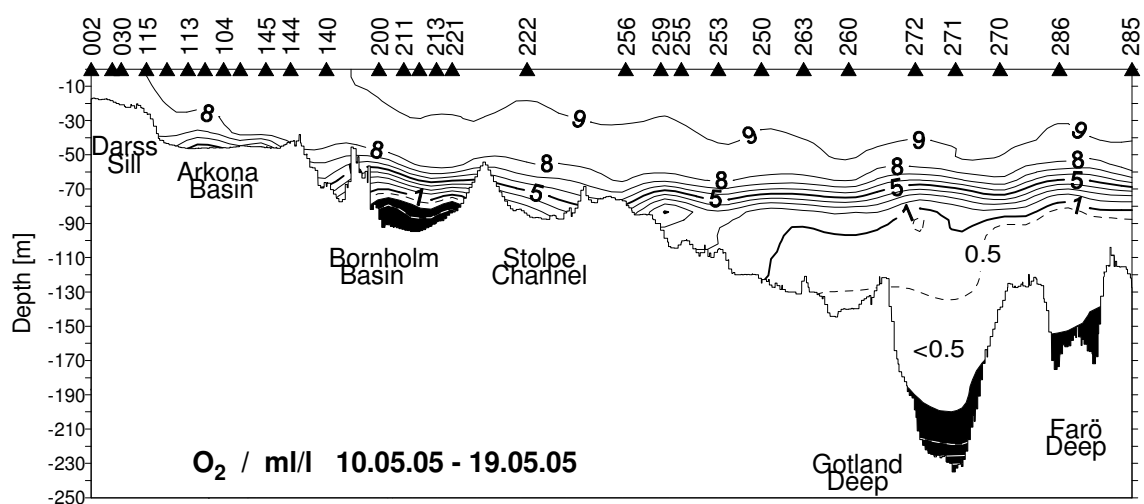
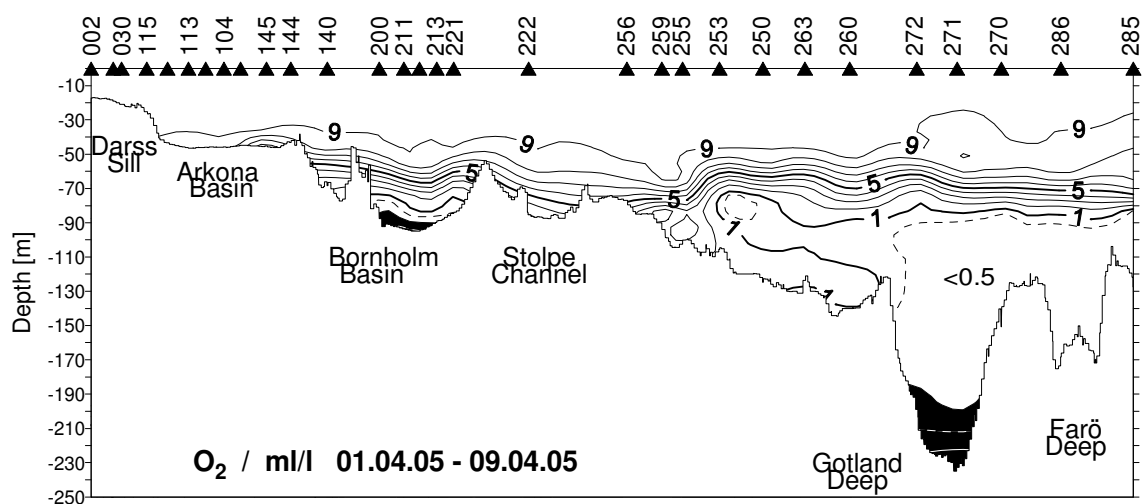
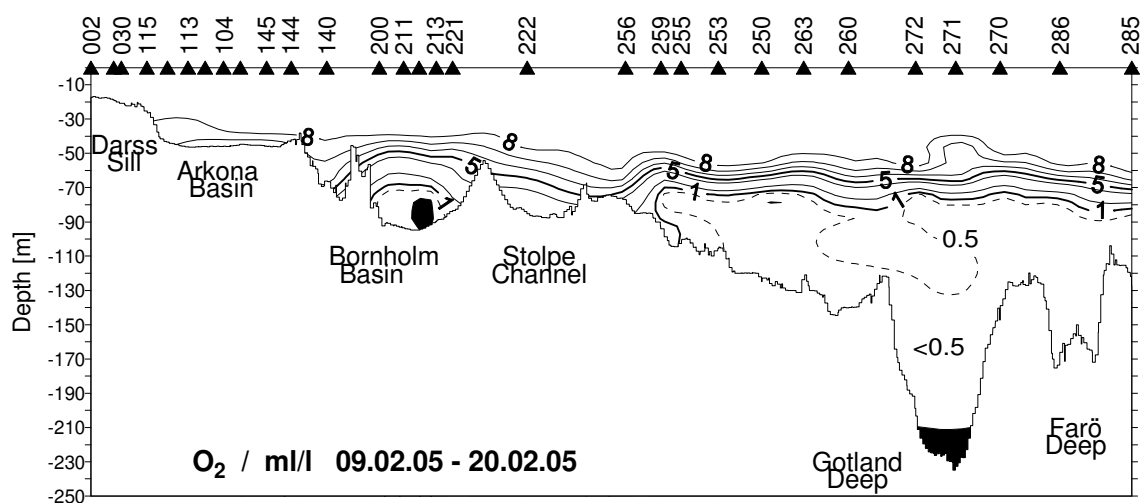


Abb. 21

Jahresgang der Sauerstoffsättigung 2005 (%) in der Oberflächenschicht (0 – 10 m) in der westlichen Ostsee (WB), dem Arkonabecken (AB), dem Bornholmbecken (BB) und dem östlichen Gotlandbecken (EGB)

Fig. 21

Annual cycle of oxygen saturation 2005 (%) in the surface layer (0 – 10 m) in the western Baltic Sea (WB), Arkona Basin (AB), Bornholm Basin (BB) and eastern Gotland Basin (EGB)



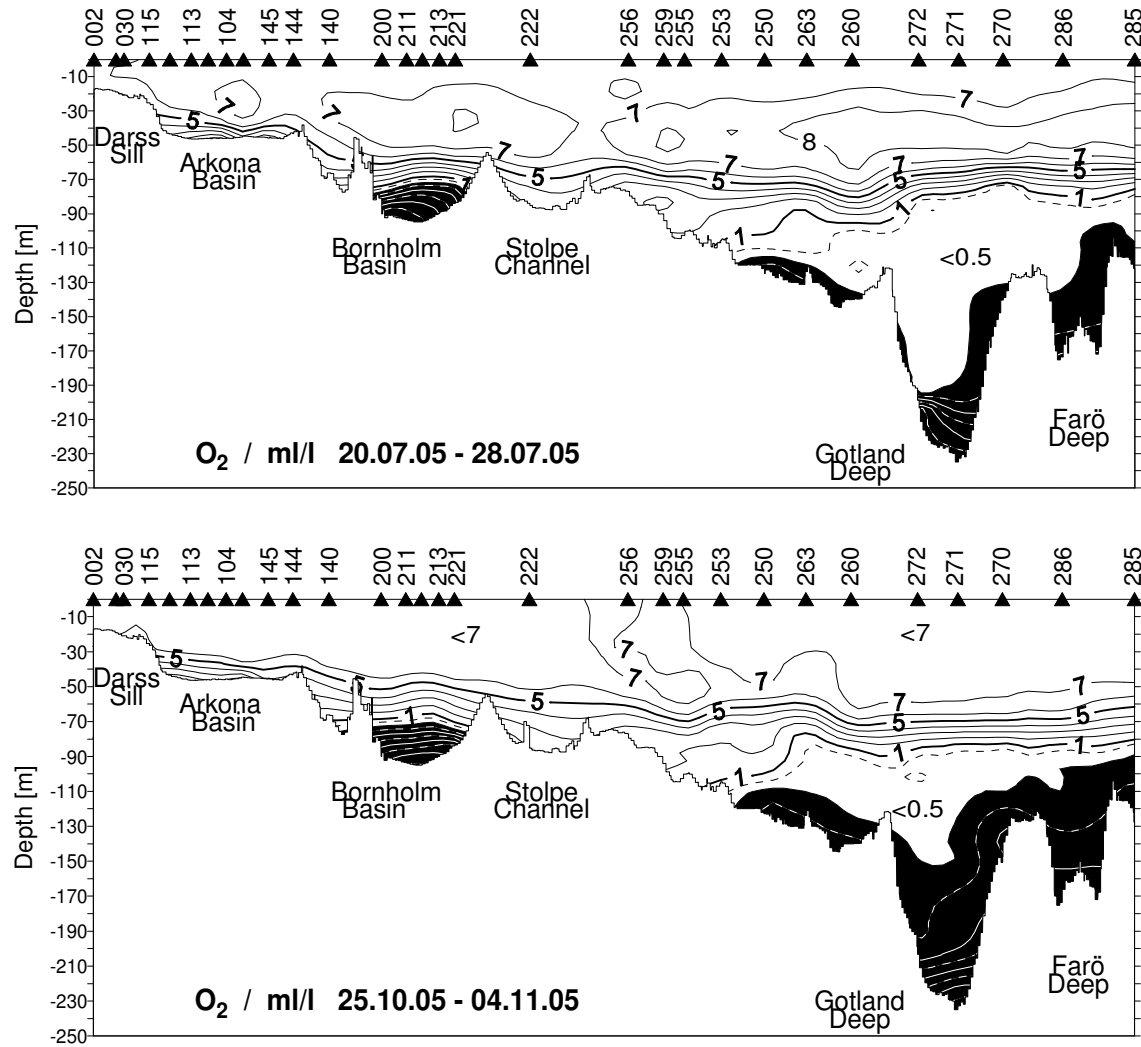


Abb. 22

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

Fig. 22

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

Die letzte große Wassererneuerung in den Tiefenbecken der Ostsee wurde durch den Salzwassereinbruch vom Januar 2003 eingeleitet (FEISTEL et al., 2003a, NAUSCH et al., 2004), mit dem 200 km³ kalten, sauerstoffreichen Wassers einströmten. Eine nachhaltige Verbesserung der Sauerstoffsituation, besonders im Bornholmbecken und im östlichen Gotlandbecken war die Folge. So wurden im Mai 2003 im Gotlandtief (Station 271) in Bodennähe 3,96 ml/l Sauerstoff gemessen. Ähnlich hohe Konzentrationen wurden bisher nur zweimal, in den 1930er Jahren und im Mai 1994 beobachtet (NEHRING et al., 1995b). Interessant war die Frage, wie nachhaltig diese Wassererneuerung war.

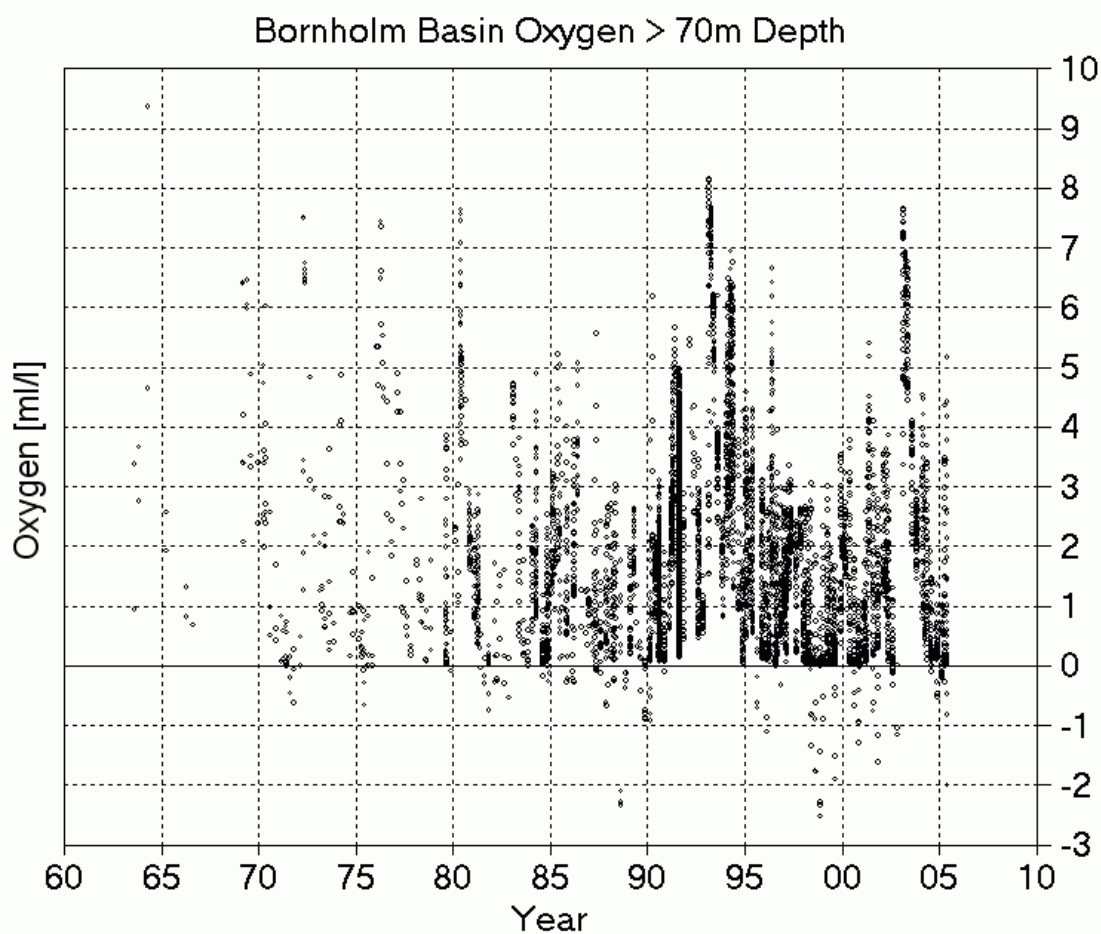


Abb. 23

Sauerstoff- und Schwefelwasserstoffkonzentrationen im Bornholmtief (Station 213) zwischen 70 m Wassertiefe und dem Boden von 1960 – 2005. Schwefelwasserstoffkonzentrationen werden als negative Sauerstoffäquivalente dargestellt

Fig. 23

Time series 1960 – 2005 of dissolved oxygen and hydrogen sulphide, shown as negative oxygen equivalents, at depths greater 70 m in the Bornholm Deep (station 213)

Im Tiefenwasser des Bornholmbeckens wurden im Ergebnis des Salzwassereintruchs vom Januar 2003 bereits im Februar mit 7,66 ml/l sehr hohe Sauerstoffkonzentrationen gefunden. Ähnlich hohe Werte wurden auch nach früheren Einstromereignissen gemessen, so im April 1964 mit 9,38 ml/l und im Februar 1993 mit 8,16 ml/l. Bis zum Jahresende 2003 war die Konzentration bereits wieder unter 2 ml/l gesunken (NAUSCH et al., 2004). Diese Abnahme setzte sich auch im Jahr 2004 fort, da keine nennenswerten Einstromvorgänge zu verzeichnen waren. Zum Jahresende 2004 lag der Sauerstoffgehalt in 80 m Wassertiefe nur noch bei 0,25 ml/l (NAUSCH et al., 2005). In Bodennähe waren gelegentlich geringe Mengen von Schwefelwasserstoff zu beobachten. Diese Entwicklung setzte sich auch im Jahr 2005 fort, da erneut signifikante Einstromvorgänge fehlten. Seit Mai 2005 wurde ab 80 m Wassertiefe durchweg Schwefelwasserstoff gefunden, was auch zu einem negativen Jahresmittelwert von $-0,67$ ml/l führte (Tab. 5). Bisher nur einmal wurde ein negativer Jahresmittelwert errechnet: $-0,20$ ml/l im Jahr 1998 (MATTHÄUS et al., 2000). Ende August wurden in Bodennähe $-3,12$ ml/l gemessen (ANEER and HÖGLANDER, 2005). Dies ist die höchste bisher berichtete Schwefelwasserstoffkonzentration für das Bornholmbecken. Die Extremwerte der IOW-Datenbank (Abb. 23) weisen im August 1988 $-2,32$ ml/l und im November 1998 $-2,51$ ml/l aus.

Im Gegensatz zu allen anderen Tiefenbecken war die Stolper Rinne, wie auch früher schon, von der einsetzenden Stagnation nicht betroffen. Die Sauerstoffwerte im Tiefenbereich 70 m – Boden sanken 2005 nicht unter 2 ml/l. Die IOW-Datenreihe seit 1967 zeigt zu keinem Zeitpunkt anoxische Bedingungen. Nur in 9 von 483 Fällen lag die Konzentration unter 1 ml/l.

Im östlichen Gotlandbecken konnten durchgreifende Auswirkungen des Salzwassereinstroms Ende April/Anfang Mai 2003 registriert werden (Abb. 24), als Sauerstoffwerte zwischen 3 und 4 ml/l gefunden wurden (siehe oben). Im als Vergleichsniveau dienenden 200 m – Horizont herrschten bis zum Jahresende 2004 oxische Verhältnisse. Der Sauerstoffgehalt nahm jedoch kontinuierlich von 1,78 ml/l im Januar 2004 auf 0,27 ml/l im Dezember 2004 ab (NAUSCH et al., 2005). In den darunter liegenden Wasserschichten trat ab Mitte 2004 jedoch bereits wieder Schwefelwasserstoff auf (Abb. 24). Diese Entwicklung setzte sich auch im Jahr 2005 fort. Zum Jahresende 2005 war bereits die gesamte Wassersäule unterhalb 150 m anoxisch. Im Herbst 2005 wurde in Bodennähe ein negativer Sauerstoffwert von $-3,75$ ml/l gemessen. Im Februar 2003, am Ende der vorhergehenden, lang anhaltenden Stagnationsperiode lag dieser Wert bei $-5,93$ ml/l. Diese Entwicklung spiegelt sich auch im negativen Jahresmittelwert von $-0,23$ ml/l wider (Tab. 5). Damit wird belegt, dass in der zentralen Ostsee eine neue Stagnationsperiode begonnen hat. Dies kann auch durch die hydrographischen Befunde belegt werden. Im Vergleich zu 2004 ist im Gotlandtief und auch im nördlicher gelegenen Farötief ein leichter Rückgang des Salzgehaltes beobachtet worden (Tab. 5). Auch die sehr geringe jährliche Variabilität spricht für ein Abklingen der Einstromvorgänge (vgl. Kapitel 6.2).

Das nördlicher gelegene Farötief spiegelt die Einstromvorgänge in weiter verzögerter Form wider. Erst im Februar 2004 machte sich die Wassererneuerung nachhaltig bemerkbar, als in 150 m Wassertiefe 1,02 ml/l Sauerstoff gemessen wurden (NAUSCH et al., 2005). Die anhaltende Zehrung führte dazu, dass der Sauerstoffgehalt Ende 2004 nur noch 0,28 ml/l betrug. Bis zum Juni 2005 wurden noch geringe Sauerstoffkonzentrationen gefunden. Danach trat ab 150 m Wassertiefe wieder Schwefelwasserstoff auf. Der nun wieder negative Jahresmittelwert von $-0,24$ ml/l wie auch sehr geringe Schwankungen im Salzgehalt (vgl. Kapitel 6.2) dokumentieren ein Abklingen der Austauschprozesse und den Beginn einer erneuten Stagnationsphase.

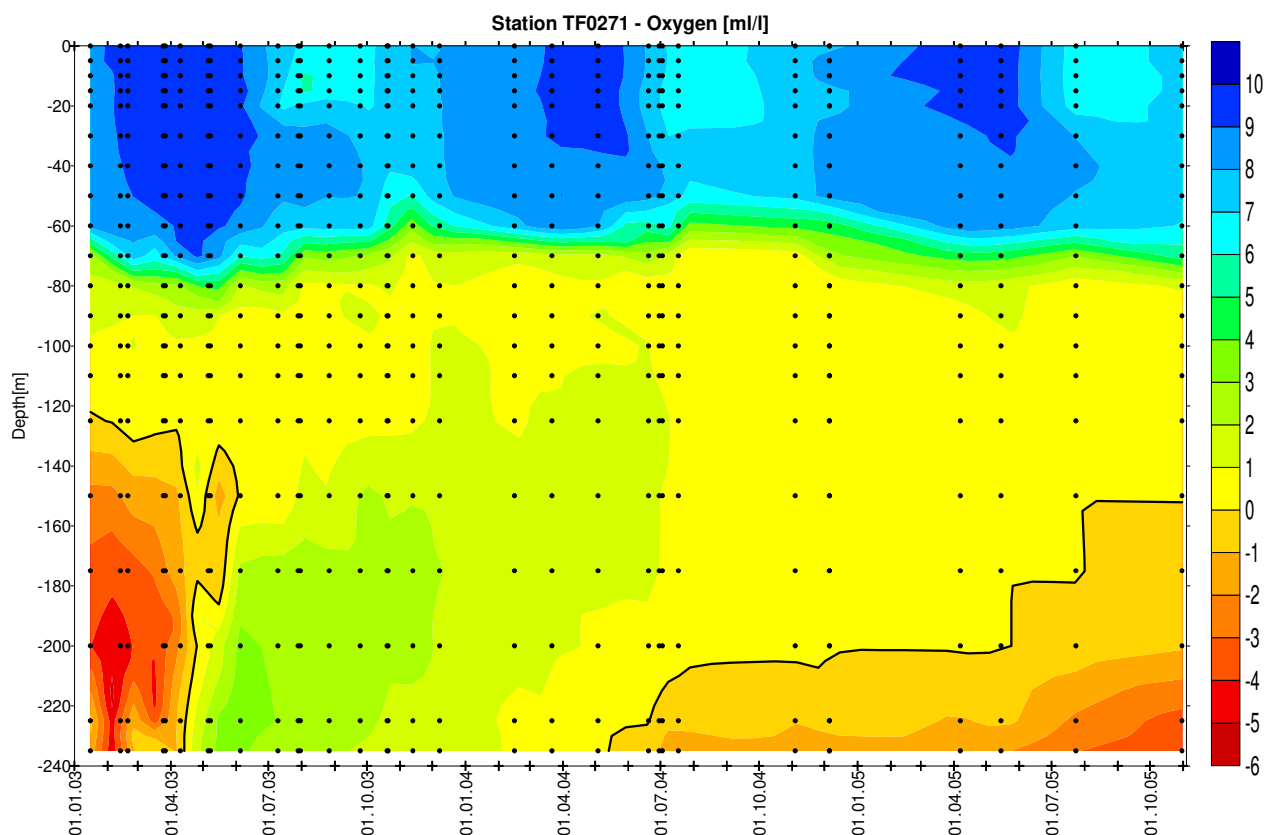


Abb. 24

Entwicklung der Sauerstoffkonzentration im östlichen Gotlandbecken (Station 271) zwischen Januar 2003 und Dezember 2005

Fig. 24

Development of oxygen concentrations in the eastern Gotland Basin (station 271) between January 2003 and December 2005

Im westlichen Gotlandbecken machen sich die Salzwassereinströme noch deutlich verzögerter und mit geringerer Wirkung bemerkbar. Eine Zunahme des Salzgehaltes im 400 m - Horizont im Jahr 2004 konnte als erstes Indiz für die Wassernerneuerung gewertet werden. Diesem Signal folgte mit zeitlicher Verzögerung eine Reaktion im Sauerstoffregime (NAUSCH et al., 2005), wahrscheinlich, weil das zuerst einströmende Wasser aus anderen Becken verdrängtes, stagnierendes war. In 400 m Wassertiefe war der Sauerstoff aber bereits in der 2. Jahreshälfte 2004 wieder aufgebraucht. Im Jahr 2005 nahm der Salzgehalt nicht weiter zu. Dies kann zusammen mit der geringen Schwankungsbreite als Ende des intensiven Wasseraustausches gewertet werden (vgl. Kapitel 6.2). Das Sauerstoffregime reagiert jedoch nicht in analoger Weise. Während im Februar 2005 ähnlich wie im Oktober 2004 zwischen 125 m und dem Boden Schwefelwasserstoff gefunden wurde, zeichnete sich im weiteren Jahresverlauf die Zufuhr von Wassermassen ab, die geringe Mengen Sauerstoff mit sich führten. Im Ergebnis dieser Prozesse konnte im Juli nur am Boden in 434 m Wassertiefe Schwefelwasserstoff gemessen werden. Aber schon im November 2005 herrschten zwischen 125 m und dem Boden wieder anoxische Verhältnisse vor.

Der Jahresmittelwert lag mit $-0,24$ ml/l in der gleichen Größenordnung wie im Vorjahr. Der Salzgehalt des Tiefenwassers (100 m) nahm im Karlsötief 2005 im Jahresmittel nochmals deutlich zu. Eine Zunahme wurde schon 2004 registriert. Eine positive Wirkung auf den Sauerstoffgehalt konnte 2004 jedoch nicht festgestellt werden. Im Gegenteil war der Jahresmittelwert von $-0,78$ ml/l der niedrigste Wert seit mindestens 1990 (MATTHÄUS et al., 2001a). In der 1. Jahreshälfte 2005 dagegen war die gesamte Wassersäule im Karlsötief frei von Schwefelwasserstoff. Dies kann möglicherweise auf die Zufuhr sauerstoffhaltiger Wassermassen zurückgeführt werden, die den zuerst einströmenden, stagnierenden Resten aus anderen Becken nachfolgen. Eine dem entsprechend zu erwartende Zunahme des Salzhalts wurde jedoch nicht beobachtet, im Gegenteil. Aber auch eine intensive Tiefenkonvektion im Oberflächenwasser im Winter 2004/2005 ist möglich (vgl. Kapitel 6.2), weil sich z. B. die Dichtefläche 1008 kg/m³ von ca. 70 m Tiefe im Januar auf 100 m im Februar 2005 abgesenkt hatte, denkbar z. B. durch Einmischen von salzarmem, kaltem, sauerstoffhaltigem Wasser aus den Schichten darüber. In der 2. Jahreshälfte wurden zwischen 90 m und dem Boden wieder anoxische Verhältnisse beobachtet. Der Jahresmittelwert in 100 m Wassertiefe ist mit $-0,54$ ml/l erneut sehr gering (Tab. 5). Zehrungsprozesse sind dafür die mögliche Ursache.

6.4 Anorganische Nährstoffe

Weltweit stellt die Eutrophierung nach wie vor eines der ernstesten Probleme der Umweltbelastung dar, wie eine jüngste Erhebung ergab (GIWA, 2003). Eutrophierungseffekte konnten entlang der Ostseeküste bereits in der 1. Hälfte des 20. Jahrhunderts nachgewiesen werden (ELMGREN and LARSSON, 2001). Für die offene See fanden sich in den 1960er Jahren erste Anzeichen der Eutrophierung (FONSELIUS, 1969), die bis Mitte der 1980er Jahre gravierende Ausmaße annahmen. Die jüngste „Pollution Load Compilation“ der HELCOM (HELCOM, 2004), die auf Messungen im Jahr 2000 basiert, geht von einem Phosphoreintrag in die Ostsee von $34\,489$ t/a und einem Stickstoffeintrag von $744\,867$ t/a aus. Beim Stickstoff muss noch mit einem zusätzlichen atmosphärischen Eintrag von $264\,100$ t/a gerechnet werden, so dass die Gesamtbelastung über 1 Million Tonnen liegt. Es wurden verschiedene Versuche unternommen, die gegenwärtige Nährstoffbelastung zum Nährstoffeintrag vor ca. 100 Jahren ins Verhältnis zu setzen. Damals war der anthropogene Einfluss noch gering. LARSSON et al., (1985) haben eine der ersten Abschätzungen vorgelegt. Danach hatte sich die Stickstoffbelastung zwischen 1900 und 1985 vervierfacht, der Phosphoreintrag nahm um den Faktor 8 zu. Modellsimulationen von SCHERNEWSKI and NEUMANN (2005) vergleichen ebenfalls den Trophiestatus um 1900 mit der Situation in den 1980er Jahren. Der Flusseintrag war für Stickstoff um 68% geringer, der des Phosphors um 76%. Die von HELCOM (2004) berechneten natürlichen Hintergrundwerte für den Eintrag über die Flüsse liegen in der gleichen Größenordnung. Sie betragen für Stickstoff 26% und für Phosphor 24%. Stellt man das Retentionsvermögen der Küstengewässer in Rechnung, muss die Belastung der offenen See als noch geringer eingeschätzt werden.

Im Ergebnis dieses erhöhten Eintrages nahmen die Konzentrationen der anorganischen Nährstoffe in der Ostsee signifikant zu (HELCOM, 1996, 2003). In die Untersuchungen sind vor allem die anorganischen Nährstoffe Phosphat, Ammonium, Nitrit, Nitrat und Silikat einbezogen, aber auch die Summenparameter Gesamtstickstoff und Gesamtphosphor werden regelmäßig gemessen (HELCOM, 1980). In den Abb. 25 und 26 sind die Verteilungen von Phosphat und Nitrat für das Jahr 2005 entlang des Hauptschnittes durch die Ostsee für die 5 untersuchten Zeiträume dargestellt. Beachtet werden muss, dass im anoxischen Tiefenwasser (Abb. 22) 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. In der Oberflächenschicht der Ostsee weisen die Nährstoffkonzentrationen den für die gemäßigten Breiten typischen Jahresgang auf (NAUSCH and NEHRING, 1996, NAUSCH and LYSIAK-PASTUSZAK, 2003). Für die zentrale Ostsee ist dabei ein stabiles Winterplateau auf hohem Niveau charakteristisch, welches durch ein Gleichgewicht aus mikrobieller Mineralisation, geringer Produktivität und tiefem vertikalen Austausch verursacht wird. Nur diese „Plateauphase“ kann für Trenduntersuchungen genutzt werden (NEHRING and MATTHÄUS, 1991). In der westlichen Ostsee ist diese Plateauphase häufig nicht eindeutig zu identifizieren, da die Frühjahrsblüte schon sehr zeitig beginnen kann. Tab. 8 fasst die winterlichen Oberflächenkonzentrationen für Phosphat und Nitrat für die Jahresreihe 2001 – 2005 zusammen. Die Werte stellen das Mittel der Messtiefen 1 m, 5 m und 10 m dar. Geringe Standardabweichungen stehen für eine homogene Deckschicht.

Tab. 8

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

Table 8

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

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

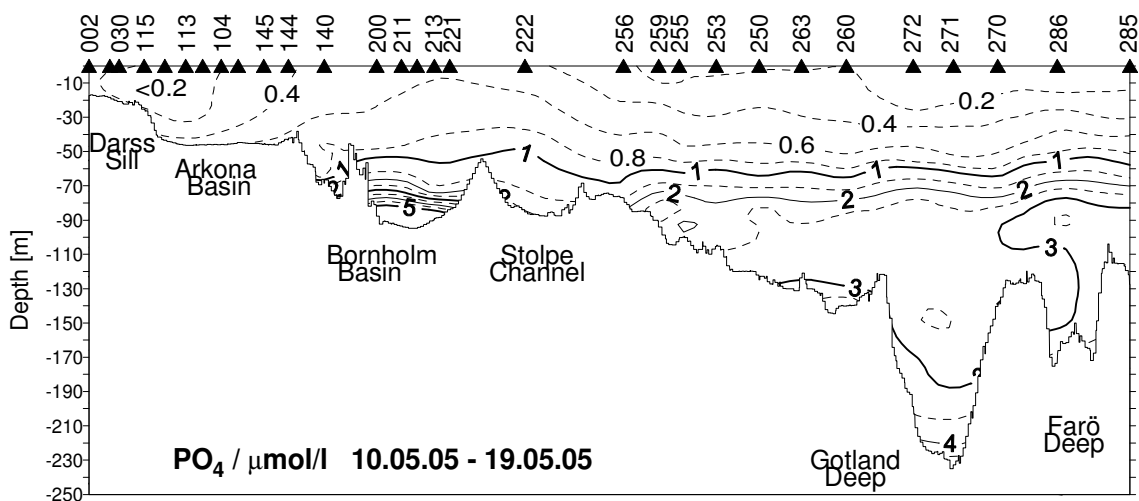
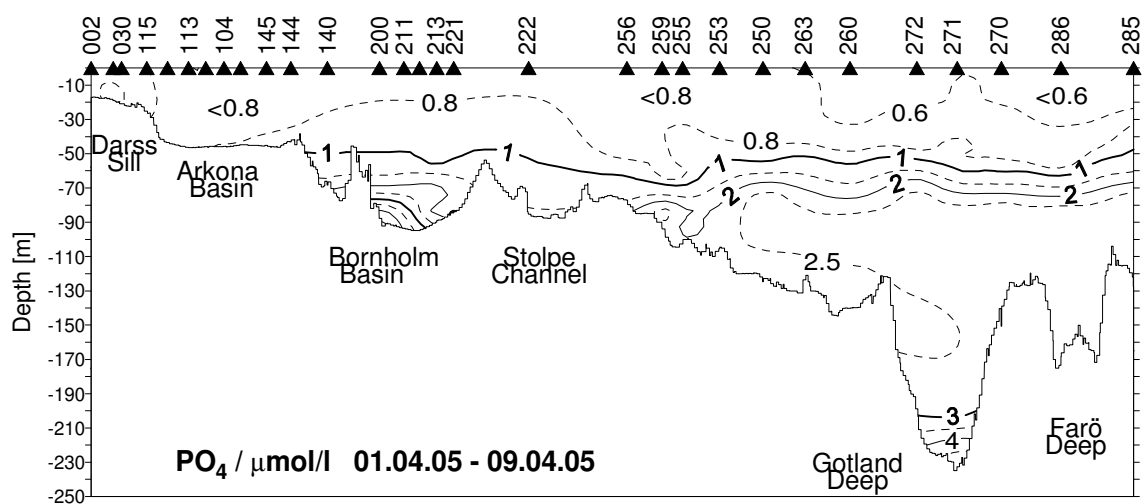
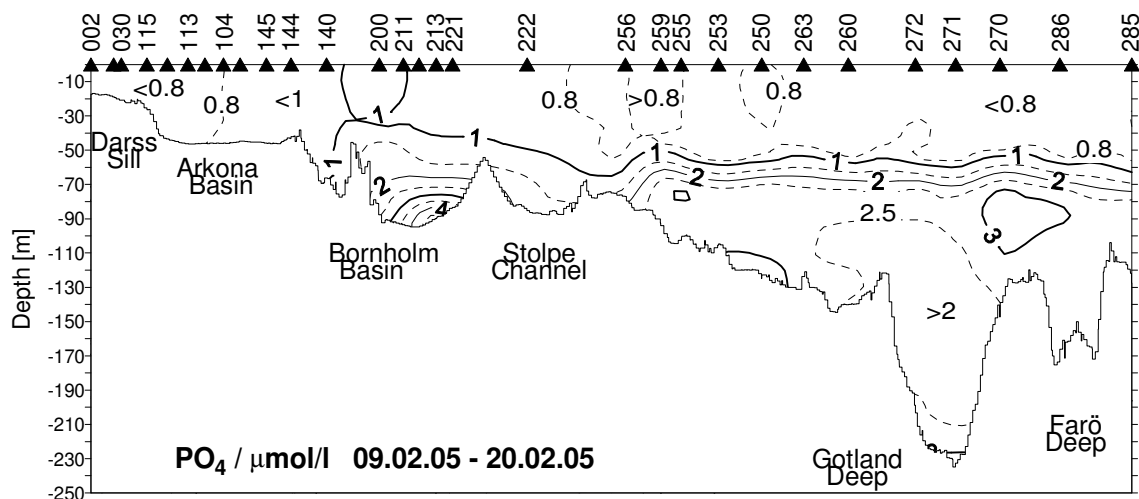
Station	Monat	2001	2002	2003	2004	2005
023 (Lübecker Bucht)	Feb.	0,63 \pm 0,02	0,64 \pm 0,04	0,52 \pm 0,07	0,52 \pm 0,02	---
012 (Meckl. Bucht)	Feb.	0,70 \pm 0,02	0,64 \pm 0,00	0,62 \pm 0,01	0,52 \pm 0,03	0,69 \pm 0,01
162 (Pommersche Bucht)	Feb.	0,76 \pm 0,02	0,52 \pm 0,00	0,74 \pm 0,01	0,84 \pm 0,05	0,65 \pm 0,00
113 (Arkonasee)	Feb.	0,54 \pm 0,02	0,50 \pm 0,00	0,54 \pm 0,00	0,35 \pm 0,01	0,81 \pm 0,10
213 (Bornholmtief)	Feb.	0,71 \pm 0,00	0,62 \pm 0,00	0,56 \pm 0,00	0,49 \pm 0,02	1,01 \pm 0,14
271 (Gotlandtief)	Feb.	0,40 \pm 0,01	0,60 \pm 0,01	0,63 \pm 0,00	0,68 \pm 0,01	0,76 \pm 0,01
286 (Färötief)	Feb.	0,39 \pm 0,01	0,60 \pm 0,01	0,60 \pm 0,00	0,66 \pm 0,01	0,74 \pm 0,01
284 (Landsortief)	Feb.	0,37 \pm 0,01	0,68 \pm 0,01	0,64 \pm 0,00	0,83 \pm 0,01	0,77 \pm 0,01
245 (Karlsötief)	Feb.	0,49 \pm 0,01	0,68 \pm 0,01	0,56 \pm 0,00	0,80 \pm 0,00	1,00 \pm 0,01

Tab. 8 Forts.

Table 8 cont.

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

Station	Monat	2001	2002	2003	2004	2005
023 (Lübecker Bucht)	Feb.	5,1 ± 0,2	5,3 ± 0,1	8,2 ± 1,3	9,6 ± 0,3	---
012 (Meckl. Bucht)	Feb.	4,6 ± 0,0	5,4 ± 0,1	5,7 ± 0,0	5,3 ± 0,2	2,9 ± 0,0
162 (Pommersche Bucht)	Feb.	8,2 ± 0,0	5,7 ± 0,0	23,5 ± 0,1	23,2 ± 0,1	9,2 ± 0,8
113 (Arkonasee)	Feb.	3,4 ± 0,0	3,3 ± 0,0	4,5 ± 0,0	2,4 ± 0,0	2,8 ± 0,4
213 (Bornholmtief)	Feb.	3,3 ± 0,0	3,2 ± 0,0	3,6 ± 0,0	2,4 ± 0,0	3,0 ± 0,2
271 (Gotlandtief)	Feb.	3,3 ± 0,0	3,4 ± 0,0	3,6 ± 0,0	2,8 ± 0,0	3,2 ± 0,0
286 (Färötief)	Feb.	3,3 ± 0,0	3,8 ± 0,0	3,6 ± 0,0	3,0 ± 0,0	3,8 ± 0,0
284 (Landsortief)	Feb.	4,0 ± 0,0	4,3 ± 0,0	3,9 ± 0,0	3,0 ± 0,0	3,9 ± 0,0
245 (Karlsötief)	Feb.	3,7 ± 0,0	3,1 ± 0,1	3,3 ± 0,0	2,6 ± 0,0	3,3 ± 0,0



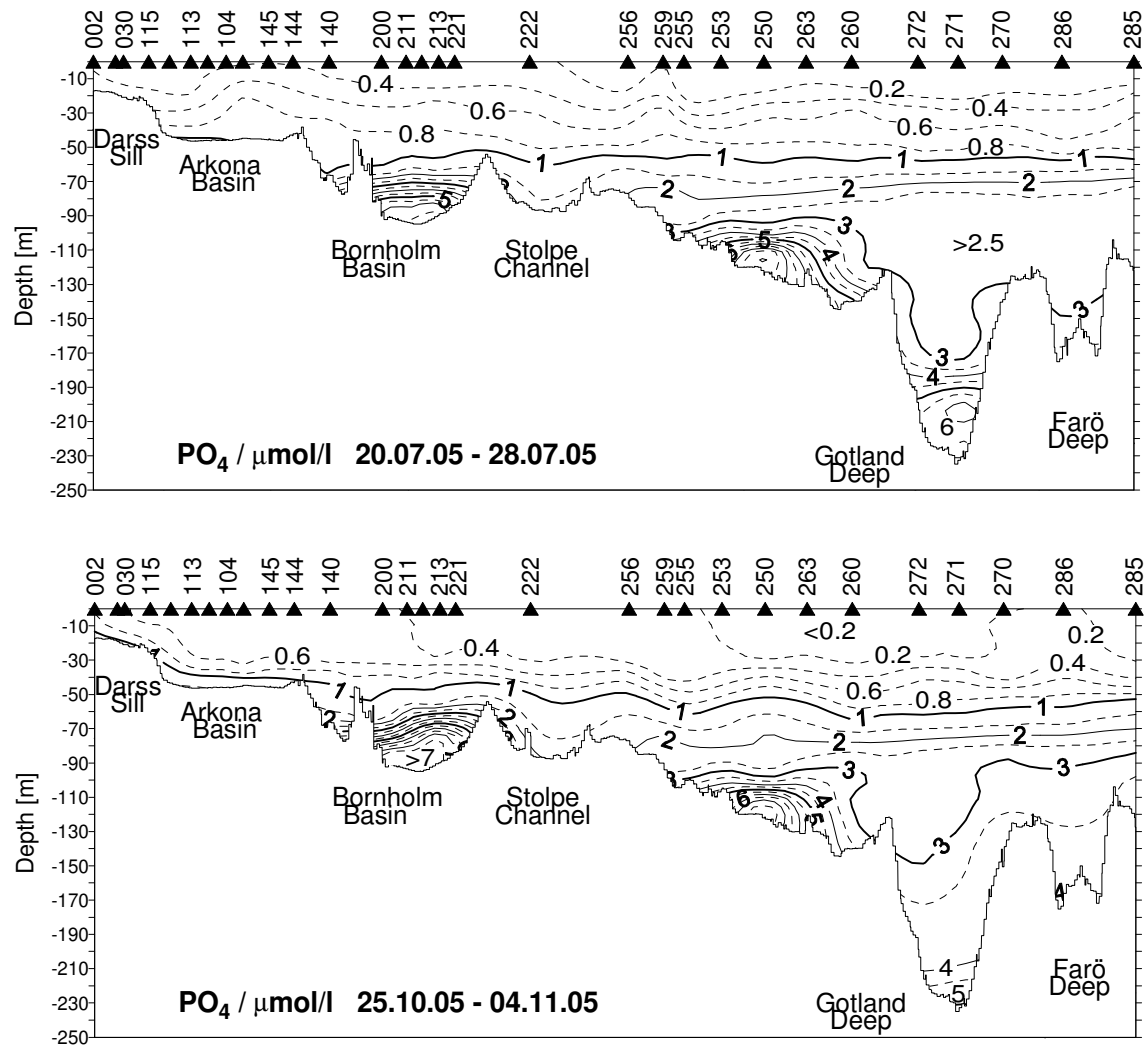
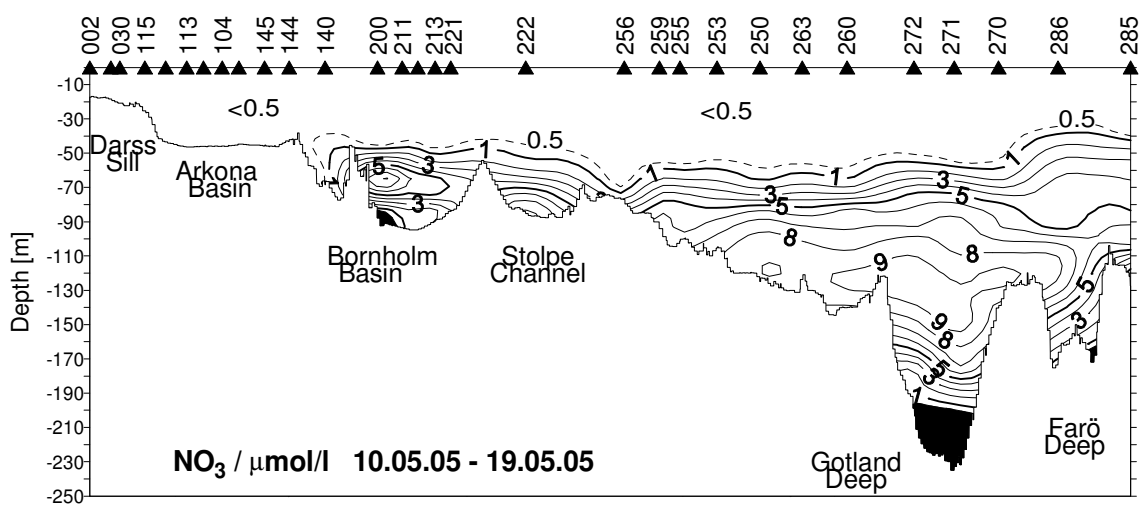
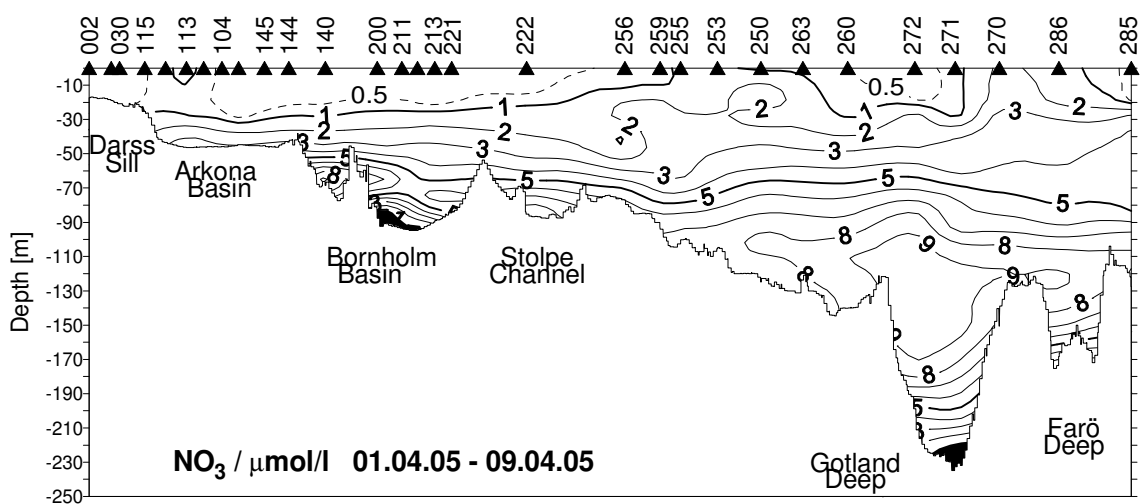
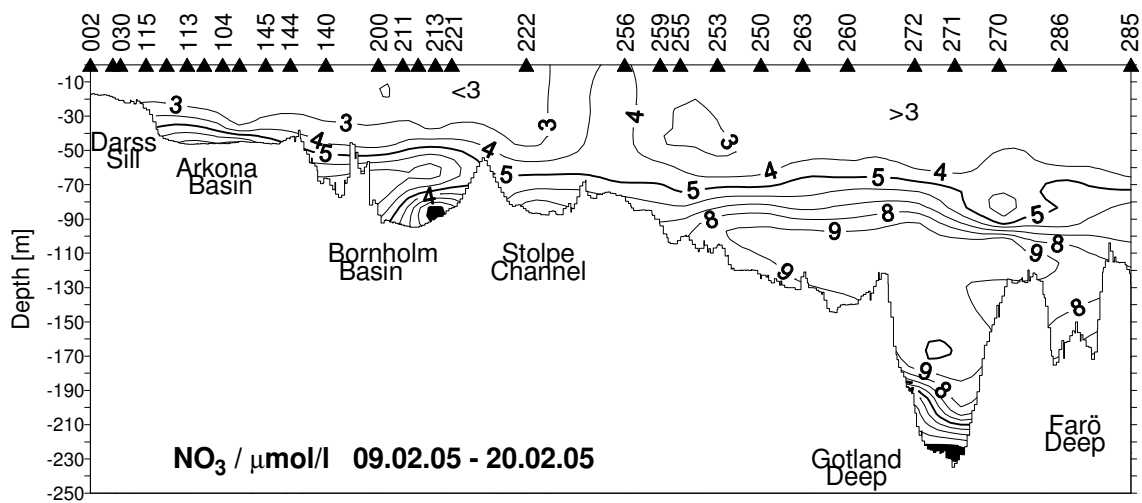


Abb. 25

Vertikale Verteilung des Phosphatgehaltes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 25

Vertical distribution of phosphate between Darss Sill and northern Gotland Basin



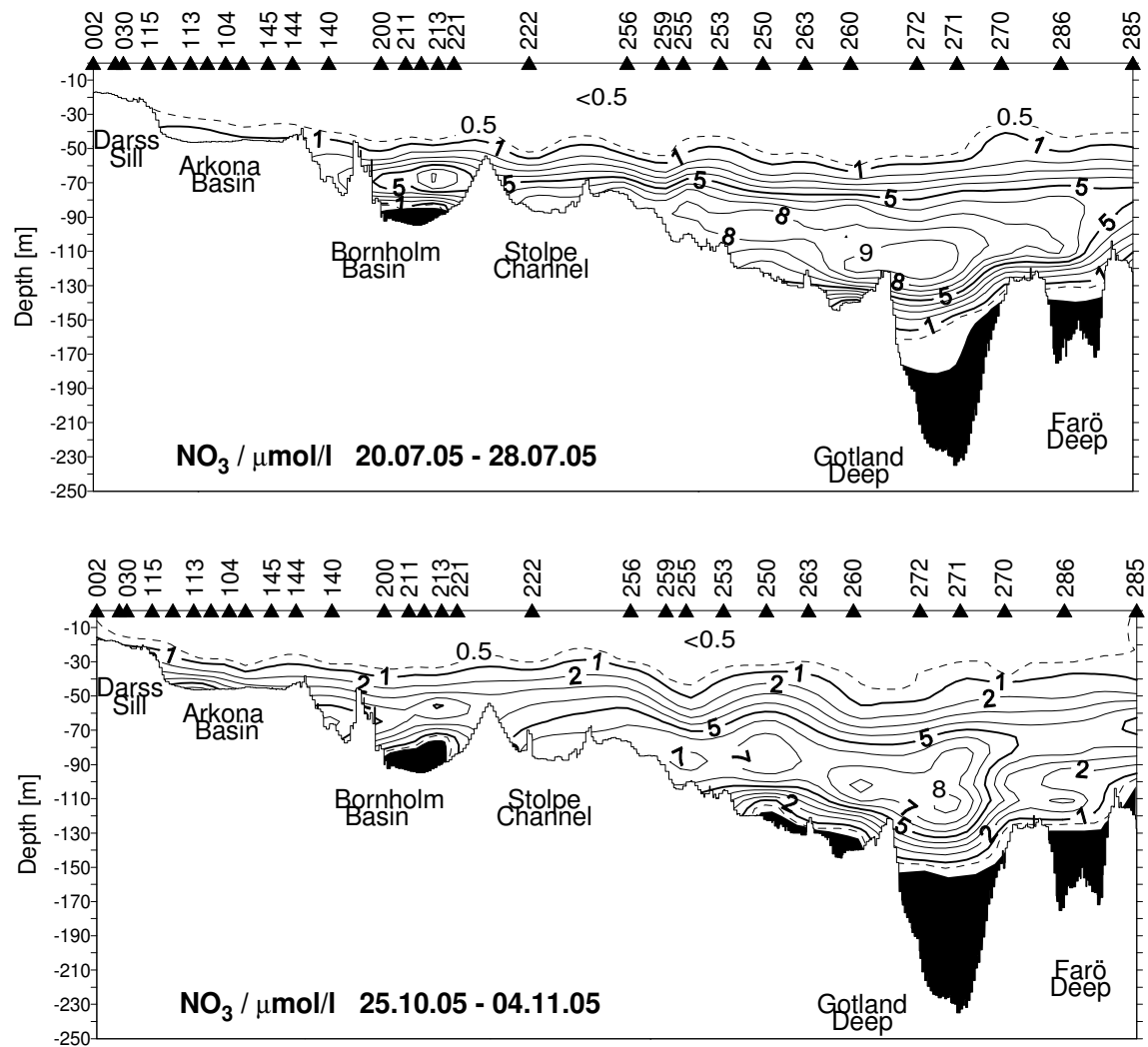


Abb. 26
Vertikale Verteilung des Nitratgehaltes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 26
Vertical distribution of nitrate between Darss Sill and northern Gotland Basin

Mit Beginn der Frühjahrsblüte des Phytoplanktons nehmen die Nährstoffe rasch ab. Das winterliche molare N/P-Verhältnis liegt in der zentralen Ostsee deutlich unter dem Redfield-Verhältnis (REDFIELD et al., 1963). MATTHÄUS et al., 2001b geben für die Jahresreihe 1991/2000 einen mittleren N/P-Wert von 7,9 für die Bornholmsee und von 8,1 für die östliche Gotlandsee an. Dadurch wird das Nitrat rasch verbraucht und ist zwischen Mai und September in der Oberflächenschicht kaum nachweisbar (Abb. 26). In den vergangenen Jahren (NAUSCH et al., 2003a, 2004) blieb dagegen am Ende der Frühjahrsblüte ein noch eindeutig messbarer Phosphatüberschuss von $0,10 \mu\text{mol/l}$ erhalten. Dies kann für die östliche Gotlandsee auch in den Jahren 2004 und 2005 bestätigt werden, wenngleich im Mai hier noch eine Restkonzentration von ca. $0,15 \mu\text{mol/l}$ gefunden wird (Abb. 27). Bis Mitte/Ende Juni 2005 nahmen die Phosphatkonzentrationen weiter ab und erreichten schließlich die Nachweisgrenze. Bemerkenswert ist, dass der Phosphatvorrat des Oberflächenwassers in der Regel erschöpft ist bevor die Massenentwicklung der Cyanobakterien einsetzt. So wurde im Jahr 2005 an der Station 271 im östlichen Gotlandbecken bereits Mitte Juni kein Phosphat mehr gemessen. Die Cyanobakterien erreichten den Höhepunkt ihrer Entwicklung aber erst am 13. Juli. Nach gegenwärtigem Kenntnisstand basiert die Blaualgenblüte im Wesentlichen auf regeneriertem Phosphat, Verschiebungen im internen Phosphatpool und möglicherweise auf Phosphateinträgen durch lokale Auftriebsprozesse. Aus Abb. 27 wird deutlich, dass im weiteren Jahresverlauf Abbauprozesse überwiegen, die zu einem allmählichen Anstieg der Phosphatkonzentrationen bis zur nächsten winterlichen Plateauphase führen.

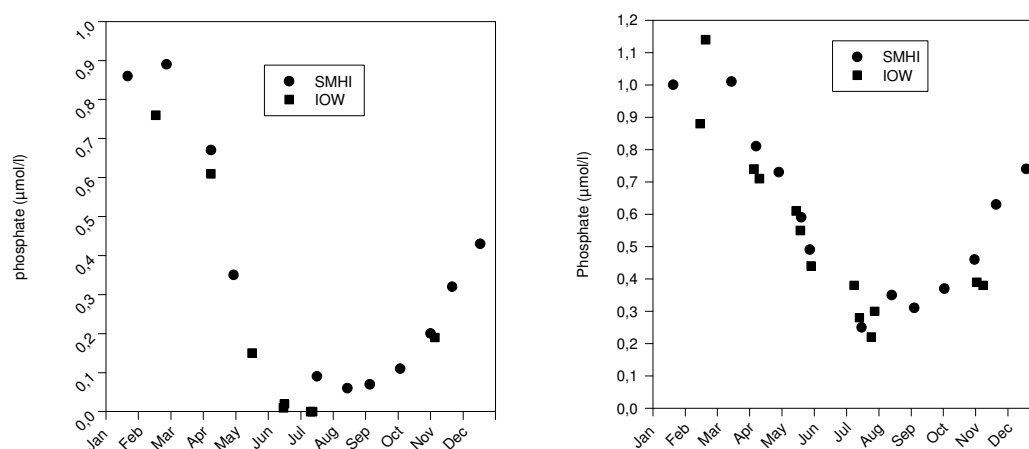


Abb. 27

Phosphatjahresgang 2005 im Oberflächenwasser (0 – 10 m); links: östliches Gotlandbecken (Station 271); rechts: Bornholmbecken (Station 213) – nach Daten des IOW und des SMHI

Fig. 27

Annual phosphate cycle 2005 in the surface layer (0 – 10 m); left: eastern Gotland Basin (station 271); right: Bornholm Basin (station 213) – from data of IOW and SMHI

Im Bornholmbecken verlief die Entwicklung, ähnlich wie bereits für das Jahr 2004 beschrieben (NAUSCH et al., 2005), anders. Der Nitratjahresgang entsprach im Wesentlichen dem oben beschriebenen Verlauf, jedoch war die Periode minimaler Konzentrationen besonders stark ausgeprägt. Bereits Anfang April war das Nitrat völlig verbraucht und erst Ende Oktober/Anfang November ließen sich nachweisbare Konzentrationen messen. Die Entwicklung des Phosphatgehaltes wich vom üblichen Verlauf ab. Schon im Sommer 2004 wurde das Phosphat nicht verbraucht. Es wurden durchweg Konzentrationen um $0,2 \mu\text{mol/l}$ gemessen (NAUSCH et al., 2005). Zusammen mit der herbstlichen Mineralisation hatte dies zur Folge, dass im winterlichen Oberflächenwasser extrem hohe Phosphatwerte gemessen wurden (Tab. 8, Abb. 27). Nach der Frühjahrsblüte wurden im Mai 2005 noch $0,5 - 0,6 \mu\text{mol/l}$ Phosphat gefunden. Bis zum Sommer war ein weiterer Phosphatrückgang zu beobachten, jedoch sanken die Werte nur in Ausnahmefällen unter $0,3 \mu\text{mol/l}$. Damit steht zu erwarten, dass die Winterkonzentrationen 2006 ebenfalls sehr hoch sein werden. Während im gesamten östlichen, nördlichen und westlichen Gotlandbecken, im Finnischen Meerbusen und auch in der südlichen Bottensee 2005 extrem starke Cyanobakterienblüten beobachtet wurden, kam es im Bornholmbecken zu keiner nennenswerten Entwicklung von Blaualgen. Deutliche Unterschiede in den meteorologischen Bedingungen waren nicht nachweisbar. Damit wiederholte sich die Situation des Jahres 2004 (NAUSCH et al., 2005). Das Nährstoffregime, Fehlen von Nitrat und reichliches Vorhandensein von Phosphat, bietet ideale Bedingungen für die Entwicklung der Cyanobakterien. Experimentelle Ansätze müssen prüfen, ob möglicherweise andere Faktoren die Entwicklung im Bornholmbecken limitieren.

Wie bereits erwähnt, wird die Winterphase zur Beschreibung von Nährstofftrends über längere Zeitskalen genutzt. Die spezielle Situation im Bornholmbecken im Sommer 2004 führte an der Station 213, aber auch an der Oberfläche des Karlsötiefs zu sehr hohen Winterkonzentrationen für Phosphat (Tab. 8). So wurde im Februar ein Maximalwert von $1,14 \mu\text{mol/l}$ gefunden (Abb. 28). Ähnlich hohe Konzentrationen wurden letztmals Mitte der 1980er Jahre gemessen. Auch in den anderen Seegebieten der zentralen Ostsee wurden hohe Phosphatwinterkonzentrationen beobachtet (Tab. 8). Sie sind vergleichbar mit den Befunden des Jahres 1993 (NEHRING et al., 1994). Die dazwischen liegenden Jahre wiesen geringere Konzentrationen auf. Die winterlichen Nitratkonzentrationen lagen dagegen im Bereich der letzten Jahre, nachdem 2004 die niedrigsten Werte seit 15 Jahren registriert wurden (Tab. 8). Für die hier dargestellte Entwicklung auf kürzeren Zeitskalen scheinen insbesondere interne Prozesse verantwortlich zu sein. Eine ausführliche Beschreibung findet sich in NAUSCH et al., (2003b, 2004).

Die gemessenen Winterkonzentrationen der Nährstoffe wirken sich auch auf die aktuellen molaren N/P-Verhältnisse aus. Diese lagen im winterlichen Oberflächenwasser des Landsorttiefs und des Farötiefs bei 5,1. Der niedrigste Wert wurde mit 3,0 im Bornholmbecken beobachtet. Sie befinden sich damit, ähnlich wie im Vorjahr, deutlich unter dem langjährigen Mittelwert (MATTHÄUS et al., 2001b) und weit entfernt vom klassischen Redfield-Verhältnis (REDFIELD et al., 1963).

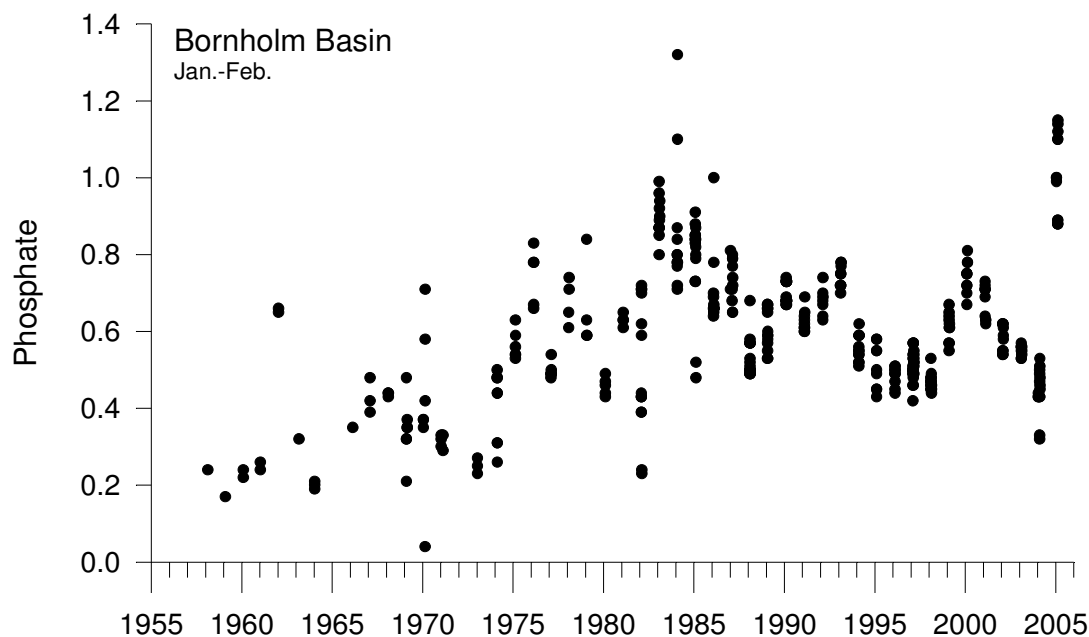


Abb. 28

Langzeitentwicklung des Phosphatgehaltes ($\mu\text{mol/l}$) in der winterlich durchmischten Oberflächenschicht (0 – 10 m) des Bornholmbeckens

Fig. 28

Long-term development of phosphate concentrations in the mixed surface layer (0 – 10 m) in winter in the Bornholm Basin

Die Nährstoffsituation im Tiefenwasser kann ebenfalls aus den Abb. 25 und 26 entnommen werden. Sie ist eng an das Wechselspiel zwischen Wassererneuerung und Stagnationsperioden geknüpft (vgl. Kapitel 6.3). Die letzte große Wassererneuerung in den Tiefenbecken der Ostsee wurde durch den Salzwassereintrich vom Januar 2003 eingeleitet (FEISTEL et al., 2003a, NAUSCH et al., 2004). Das Fehlen signifikanter Einstromvorgänge im Jahr 2005 führte im Bornholmbecken ab Mai zu permanenter Sauerstofffreiheit in der Tiefe. Die einsetzenden Denitrifikationsprozesse führten zu einer Abnahme des Nitratgehaltes. Ab Mai war kein Nitrat mehr vorhanden und die Ammoniumgehalte nahmen bis zum Jahresende zu. Die anoxischen Verhältnisse führten auch zu einer verstärkten Rücklösung von Phosphat aus dem Sediment. Der gefundene Maximalwert im 80 m – Horizont betrug im November $9,1 \mu\text{mol/l}$. Diese Entwicklung spiegelt sich auch in Tab. 9 wider, wobei erneut eine gute Übereinstimmung mit der Entwicklung der Sauerstoffsituation (Tab. 5) sichtbar wird. Der größte bisher ermittelte negative Jahresmittelwert für Sauerstoff/Schwefelwasserstoff von $-0,67 \text{ ml/l}$ führte dazu, dass im Jahr 2005 der niedrigste Mittelwert für Nitrat ($2,3 \mu\text{mol/l}$) zumindest in den letzten 15 Jahren errechnet wurde. Die im Jahr 2005 gefundenen Mittelwerte für Phosphat ($5,26 \mu\text{mol/l}$) und Ammonium ($5,1 \mu\text{mol/l}$) sind die zweithöchsten im selben Zeitraum. Nur 1996, am Beginn der vorhergehenden Stagnationsphase wurden höhere Werte ermittelt (MATTHÄUS et al., 1997).

Tab. 9

Jahresmittelwerte und Standardabweichungen für Phosphat, Nitrat und Ammonium im Tiefenwasser der zentralen Ostsee: IOW sowie SMHI Daten (n = 9 – 22)

Table 9

Annual means and standard deviations for phosphate, nitrate and ammonium in the deep water of the central Baltic Sea: IOW and SMHI data (n = 9 – 22)

Phosphat ($\mu\text{mol/l}$; Maximalwerte hervorgehoben)						
Station	Tiefe/m	2001	2002	2003	2004	2005
213 (Bornholmtief)	80	3,94 \pm 1,30	3,46 \pm 1,45	1,14 \pm 0,71	2,08 \pm 1,76	5,26 \pm 2,09
271 (Gotlandtief)	200	5,87 \pm 0,33	5,88 \pm 0,81	3,38 \pm 0,88	2,15 \pm 0,20	3,12 \pm 0,52
286 (Färötief)	150	5,06 \pm 0,22	4,86 \pm 0,37	4,69 \pm 0,77	2,52 \pm 0,07	3,27 \pm 0,53
284 (Landsorttief)	400	4,45 \pm 0,33	4,25 \pm 0,32	4,05 \pm 0,22	3,51 \pm 0,38	3,37 \pm 0,23
245 (Karlsötief)	100	4,16 \pm 0,46	4,02 \pm 0,34	4,43 \pm 0,33	4,29 \pm 0,18	3,81 \pm 0,33

Nitrat ($\mu\text{mol/l}$; Minimalwerte hervorgehoben)						
Station	Tiefe/m	2001	2002	2003	2004	2005
213 (Bornholmtief)	80	4,8 \pm 3,8	5,4 \pm 4,1	9,6 \pm 2,4	6,5 \pm 4,0	2,3 \pm 3,2
271 (Gotlandtief)	200	0,0 \pm 0,0	0,0 \pm 0,0	6,0 \pm 4,8	10,1 \pm 1,1	2,6 \pm 3,6
286 (Färötief)	150	0,0 \pm 0,0	0,0 \pm 0,0	0,6 \pm 1,9	8,8 \pm 0,6	2,9 \pm 3,5
284 (Landsorttief)	400	0,0 \pm 0,0	0,0 \pm 0,0	0,0 \pm 0,0	0,8 \pm 1,3	2,0 \pm 2,7
245 (Karlsötief)	100	1,0 \pm 1,8	1,0 \pm 1,8	0,0 \pm 0,0	0,0 \pm 0,0	0,7 \pm 1,2

Ammonium ($\mu\text{mol/l}$; Maximalwerte hervorgehoben)						
Station	Tiefe/m	2001	2002	2003	2004	2005
213 (Bornholmtief)	80	0,6 \pm 1,2	3,5 \pm 3,8	0,3 \pm 0,6	1,9 \pm 2,4	5,1 \pm 5,3
271 (Gotlandtief)	200	17,7 \pm 3,0	19,7 \pm 4,9	6,8 \pm 9,5	0,2 \pm 0,2	1,7 \pm 1,9
286 (Färötief)	150	10,4 \pm 2,5	9,8 \pm 2,2	11,0 \pm 4,4	0,2 \pm 0,2	2,0 \pm 2,0
284 (Landsorttief)	400	5,4 \pm 1,2	6,5 \pm 1,5	7,3 \pm 1,0	3,2 \pm 2,0	2,4 \pm 1,8
245 (Karlsötief)	100	3,8 \pm 2,8	4,0 \pm 1,5	5,8 \pm 1,8	6,7 \pm 1,4	3,8 \pm 2,4

Der Beginn der neuen Stagnationsphase kann auch für das östliche Gotlandbecken belegt werden (vgl. Kapitel 6.3). Die Mächtigkeit der anoxischen Schicht nahm im Jahresverlauf kontinuierlich zu und umfasste zum Jahresende die gesamte Wassersäule unterhalb 150 m (Abb. 24). Im 200 m – Horizont war Anfang des Jahres noch Sauerstoff vorhanden, so dass mit Werten um $9 \mu\text{mol/l}$ recht hohe Nitratkonzentrationen und vergleichsweise geringe Phosphatwerte um $2,5 \mu\text{mol/l}$ gemessen wurden. Die Ammoniumkonzentrationen lagen an der Nachweisgrenze. Ab Anfang Juni konnte kein Sauerstoff mehr beobachtet werden, das Nitrat verschwand und die Phosphat- und Ammoniumwerte nahmen zu. Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass die Wassererneuerung im Jahr 2003 das ehemals bodennahe Wasser mit hohen Phosphat- und geringen Nitratkonzentrationen bis in den Tiefenbereich unterhalb der Halokline angehoben hat, wo eine Erosion durch tief reichende winterliche Konvektion möglich wird, was wiederum die Winterkonzentrationen des Oberflächenwassers beeinflusst.

Die Entwicklung im nördlicher gelegenen Farötief verlief weitgehend analog. Der Vergleichshorizont in 150 m Wassertiefe wies ab Mitte Juni keinen Sauerstoff mehr auf. Die Nährstoffkonzentrationen reagierten auf diesen Wechsel vom oxischen zum anoxischen Milieu wie für das Gotlandtief detailliert beschrieben. Auch die Jahresmittelwerte (Tab. 9) zeigen diese Entwicklung.

Im Bereich des Landsortiefs deuteten die geringen Variationen im Salzgehalt bereits das Ende des intensiven Wasseraustausches an. Das Sauerstoffregime zeigte jedoch einen Wechsel zwischen anoxischen, oxischen und danach erneut anoxischen Bedingungen im 400 m – Horizont (vgl. Kapitel 6.3). Die Fluktuationen der Nährstoffe spiegeln diese Entwicklung wider. Die Jahresmittelwerte unterschieden sich von denen des Vorjahres nicht sehr (Tab. 9). Im Bereich des Karlsötiefs war die Wassersäule in der 1. Jahreshälfte 2005 frei von Schwefelwasserstoff, danach wurden zwischen 90 m und dem Boden wieder anoxische Verhältnisse beobachtet. Das kurzzeitige Auftreten von Sauerstoff in 100 m Wassertiefe führte zu einem im Vergleich zum Vorjahr niedrigen Jahresmittelwert für Phosphat ($3,81 \mu\text{mol/l}$) und Ammonium ($3,8 \mu\text{mol/l}$), die Nitratbildung blieb mit einem Maximalwert von $3,0 \mu\text{mol/l}$ gering. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die neue Stagnationsperiode auch im westlichen Gotlandbecken begonnen hat.

6.5 Natürliche organische Verbindungen

In der westlichen, südlichen und zentralen Ostsee ist in den letzten Jahren an 15 bis 20 Stationen, die charakteristisch für die verschiedenen Teilgebiete sind, die Menge natürlicher organischer Verbindungen auf jährlich fünf Fahrten untersucht worden. Zur Abschätzung der Gesamtmenge organischen Materials, das aufgrund seiner komplexen chemischen Zusammensetzung nicht in Form einzelner Verbindungen oder Verbindungsklassen erfasst werden kann, wurden hierzu die Konzentrationen an partikulär gebundenem organischen Kohlenstoff (POC) bzw. Stickstoff (PON) (Beginn der Messreihen 1993) sowie die Konzentrationen an gelöstem organisch gebundenem Kohlenstoff (DOC) bzw. gelöstem organisch gebundenem Stickstoff (DON) gemessen (Beginn der Messreihen 1995). Die Gesamtheit aller (natürlichen) organischen Verbindungen wird dabei gleichzeitig sowohl über ihren Kohlenstoff- als auch über ihren Stickstoffanteil erfasst. Unterschiedliche Veränderungen der Konzentrationen des organisch gebundenen Kohlenstoffs bzw. Stickstoffs in einem Wasserkörper sind deshalb gleichzeitig ein Indiz für eine Veränderung in der chemischen Zusammensetzung des organischen Materials.

Aus den vorliegenden Daten sind für ausgewählte Stationen die 10- Jahres- Mittelwerte für die Parameter DOC, DON, POC, PON und die C/N- Verhältnisse in der gelösten und in der partikulären Fraktion berechnet worden. Dabei wurden die Werte sowohl aus den Messergebnissen der Proben aus allen Tiefen ausgewertet als auch getrennt nach den Proben aus der oberflächennahen Wasserschicht (0 m bis 5 m Tiefe) bzw. aus dem bodennahen Wasserkörper (1 m bis 5 m über Grund). Die ausgewählten Stationen sind in Tab. 10 zusammengestellt und kurz charakterisiert.

Tab. 10

Zusammenstellung und kurze Charakterisierung ausgewählter Stationen, an denen in den letzten 10 Jahren natürliche organische Verbindungen untersucht wurden

Table 10

List and short characterization of selected stations which had been analyzed for natural organic compounds during the past ten years

Stationsbezeichnung			Tiefe (m)	Anzahl der Proben		
				gesamt	Oberfläche	Boden
TF0360	Kieler Bucht		20	154	52	51
TF0361	Südl. Großer Belt	max Salinität 28,68 psu	20	151	50	47
TF0012	Mecklenburger Bucht		25	167	52	46
TF0023	Lübecker Bucht		23	158	48	49
TF0113	Arkonabecken		47	298	70	71
TF0213	Bornholm Tief		91	367	70	82
TF0259	SO Gotlandbecken	max H ₂ S Konz.	90	255	53	54
TF0271	Gotlandtief		249	875	79	83
TF0286	Färötief		203	250	41	42
TF0284	Landsorttief	größte Tiefe 459 m	459	356	48	46
TF0245	Karlsötief		112	290	47	47
TFOB4	südliche Oderbucht	Min. Salinität 3,41 psu	12	107	51	51
TF0133	mittlere Oderbucht		10	99	46	45

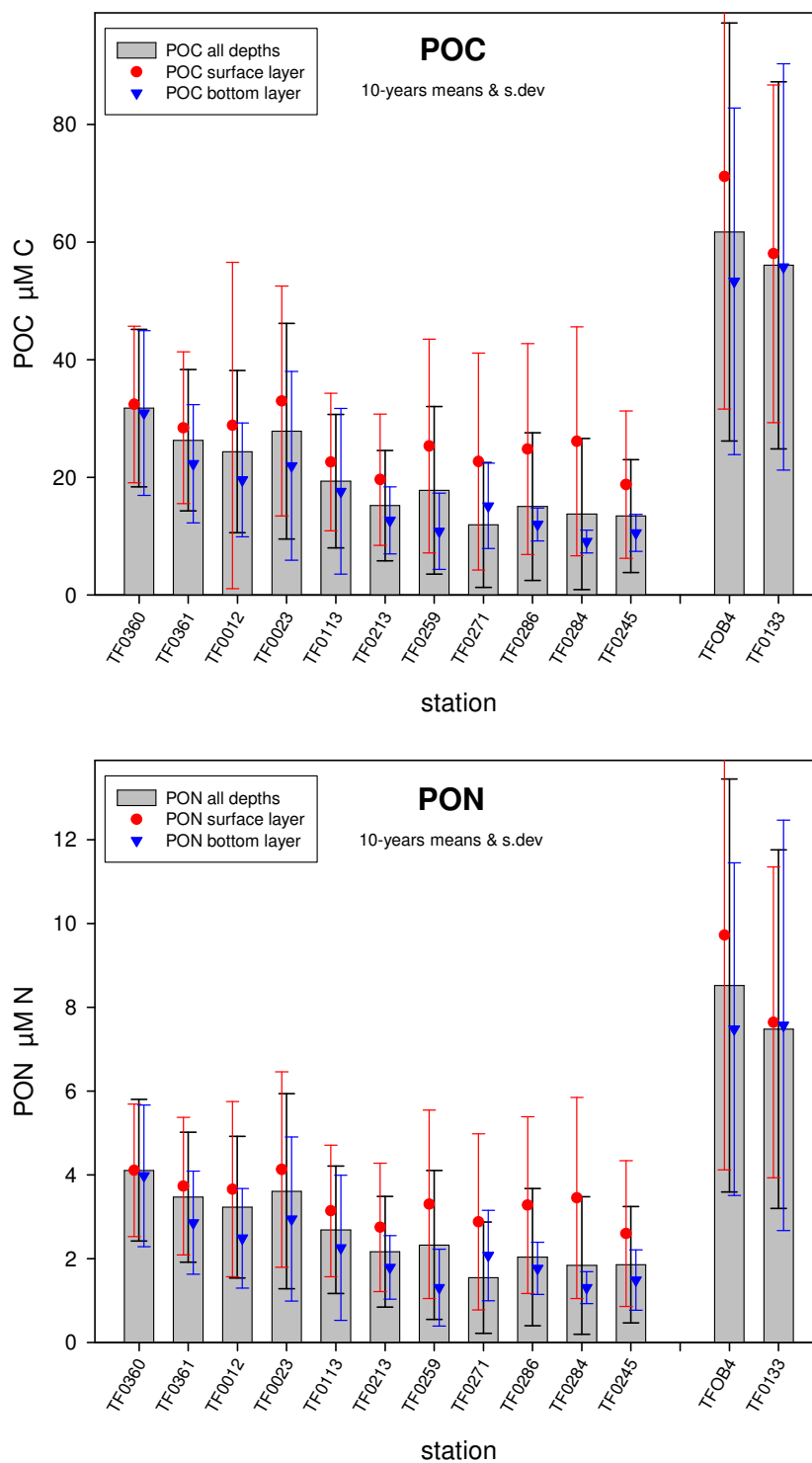


Abb. 29

10-Jahres- Mittelwerte und Standardabweichungen von POC (oben) und PON (unten) an ausgewählten Stationen. Angegeben sind die Mittelwerte und die Standardabweichungen berechnet aus allen Tiefen sowie für die Oberflächen- bzw. Bodenschicht

Fig. 29

10-years means and standard deviations of POC (top) and PON (bottom) at selected stations. Shown are means and standard deviations calculated for all depths and for surface and near bottom layer

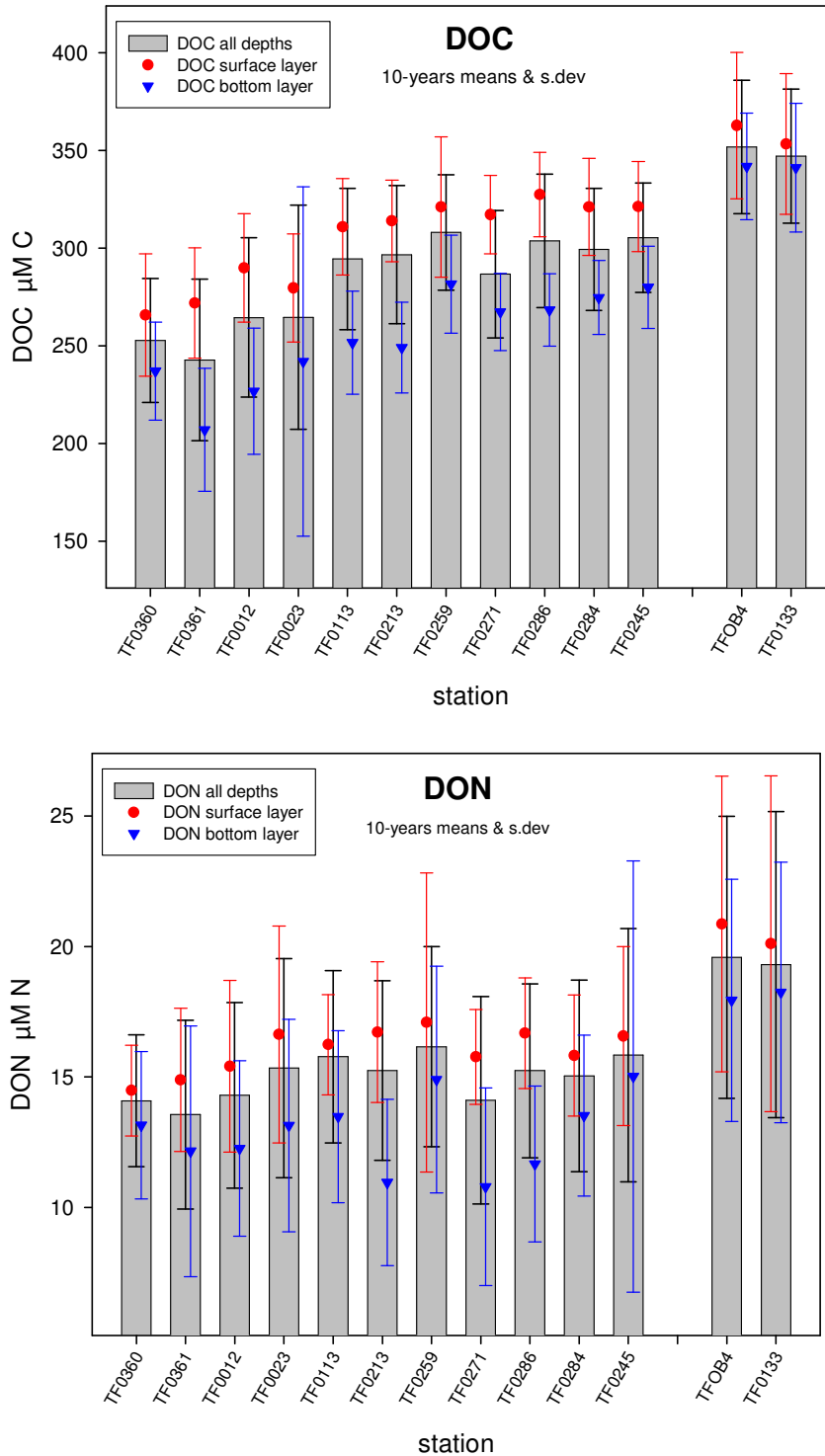


Abb. 30

10-Jahres- Mittelwerte und Standardabweichungen von DOC (oben) und DON (unten) an ausgewählten Stationen. Angegeben sind die Mittelwerte und die Standardabweichungen berechnet aus allen Tiefen sowie für die Oberflächen- bzw. Bodenschicht

Fig. 30

10-years means and standard deviations of POC (top) and PON (bottom) at selected stations. Shown are means and standard deviations calculated for all depths and for surface and near bottom layer

Die mittleren Konzentrationen partikulär gebundenen Kohlenstoffs und Stickstoffs nehmen von der westlichen Ostsee zu den zentralen Gebieten um ungefähr 30% ab (Abb. 29). In der Pommerschen Bucht (Stationen TFOB4 und TF0133), die sehr stark von den Einträgen aus der Oder und dem Stettiner Haff beeinflusst werden, finden sich sehr hohe Werte, die fast um den Faktor 3 höher sind als in den zentralen küstenfernen Gebieten. Gleichzeitig zeigen diese beiden Stationen eine sehr große Streuung der gemessenen Werte, die weit über der an den übrigen Stationen liegt. Die Ursachen hierfür sind zum einen ein durch den Eintrag anorganischer Nährstoffe bedingtes erhöhtes Wachstum des Planktons in den Sommermonaten und durch den Eintrag partikulären organischen Materials aus dem Oderästuar, zum anderen führen unterschiedliche hydrographische Verhältnisse zu großen Unterschieden bei der Vermischung des relativ salzarmen Wassers aus dem Oderaustrom mit salzreicheren Wasserkörpern, die aus den zentralen Gebieten der Ostsee stammen. Diese Unterschiede zeigen sich auch in den Salzgehalten der Proben, die für diese Messungen herangezogen wurden. So wurde im August 1997 in der oberflächennahen Wasserschicht an der Station TFOB4 mit 3,41 psu der niedrigste Salzgehalt aller bei dieser Auswertung berücksichtigten Wasserproben gemessen, wobei der Salzgehalt in der bodennahen Wasserschicht (10 m Tiefe) bei 6,70 psu lag. Diese ungewöhnliche Situation dürfte dabei in erster Linie eine Folge der Oderflut gewesen sein, die kurz vor der Probennahme ihren Höhepunkt hatte. Auch die höchsten Gehalte an POC (202 $\mu\text{M C}$), PON (29 $\mu\text{M N}$), DOC (486 $\mu\text{M C}$) und DON (40 $\mu\text{M N}$) finden sich in dieser Probe.

Die mittleren Konzentrationen von POC und PON sind in der oberflächennahen Wasserschicht höher als die Werte im bodennahen Wasserkörper, wobei die Unterschiede um so schwächer ausgeprägt sind, je geringer die Tiefe an der Station ist und damit eine effektivere Durchmischung des Wasserkörpers stattfinden kann. Die Standardabweichung der Werte, die neben hydrodynamischen Einflüssen beim partikulären Material auch die saisonal unterschiedlichen Mengen des im Wasser vorhandenen Planktons widerspiegelt, ist in der oberflächennahen Schicht größer als in Bodennähe. Insbesondere im bodennahen Wasser tiefer Stationen, an denen nur ein begrenzter Wasseraustausch stattfindet (z.B. die Stationen TF0286 und TF0284) ist die Streuung der Werte für partikuläres organisches Material relativ klein. Gleichzeitig treten hier auch deutliche Unterschiede zwischen den Mittelwerten im oberflächennahen und im bodennahen Wasserkörper auf, die einen groben Hinweis auf die Menge des partikulären Materials geben, das während der Sedimentation abgebaut oder dauerhaft im Sediment eingelagert wird.

Im Gegensatz zum POC nehmen die mittleren Konzentrationen von DOC von der westlichen Ostsee in Richtung der zentralen Gebieten der Ostsee deutlich zu (Abb. 30). Die höchsten mittleren Konzentrationen wurden auch hier an den beiden Stationen in der Pommerschen Bucht beobachtet, wobei die Unterschiede im Vergleich zu den Werten aus der zentralen Ostsee jedoch nicht so stark ausgeprägt sind wie z.B. beim partikulären Material. Die DOC- Konzentrationen an diesen beiden Stationen im Bereich der Odermündung liegen dabei in einem Bereich, der auch in den Mündungsgebieten anderer Flüsse beobachtet wird (CAUWET, 2002).

Mit Ausnahme der beiden Stationen in der Pommerschen Bucht und der Station in der Lübecker Bucht wurden in der bodennahen Wasserschicht durchweg niedrigere mittlere DOC- Konzentrationen gemessen als im oberflächennahen Wasserkörper. Außerdem ist die Streuung der bodennahen Werte geringer als die an der Oberfläche. Die Ursache für diese Beobachtung besteht darin, dass aus der Nordsee einströmendes, salzreiches Wasser in Bodennähe transportiert wird, während aus der Ostsee ausströmendes, salzärmeres Wasser in der oberflächennahen Schicht aus der Ostsee abfließt. Die DOC- Konzentration in der bodennahen Schicht hängt dabei wesentlich von der DOC- Konzentration in der Nordsee ab, die durchschnittlich bei knapp 100 $\mu\text{M C}$ liegt (NAUSCH et al., 2005). Im Gegensatz dazu liegt die mittlere DOC- Konzentration in der Oberflächenschicht der zentralen Ostsee (Station TF0271) bei 317 $\mu\text{M C} \pm 20 \mu\text{M C}$. Die Variabilität der DOC- Konzentration im Oberflächenwasser wird durch verschiedene Faktoren

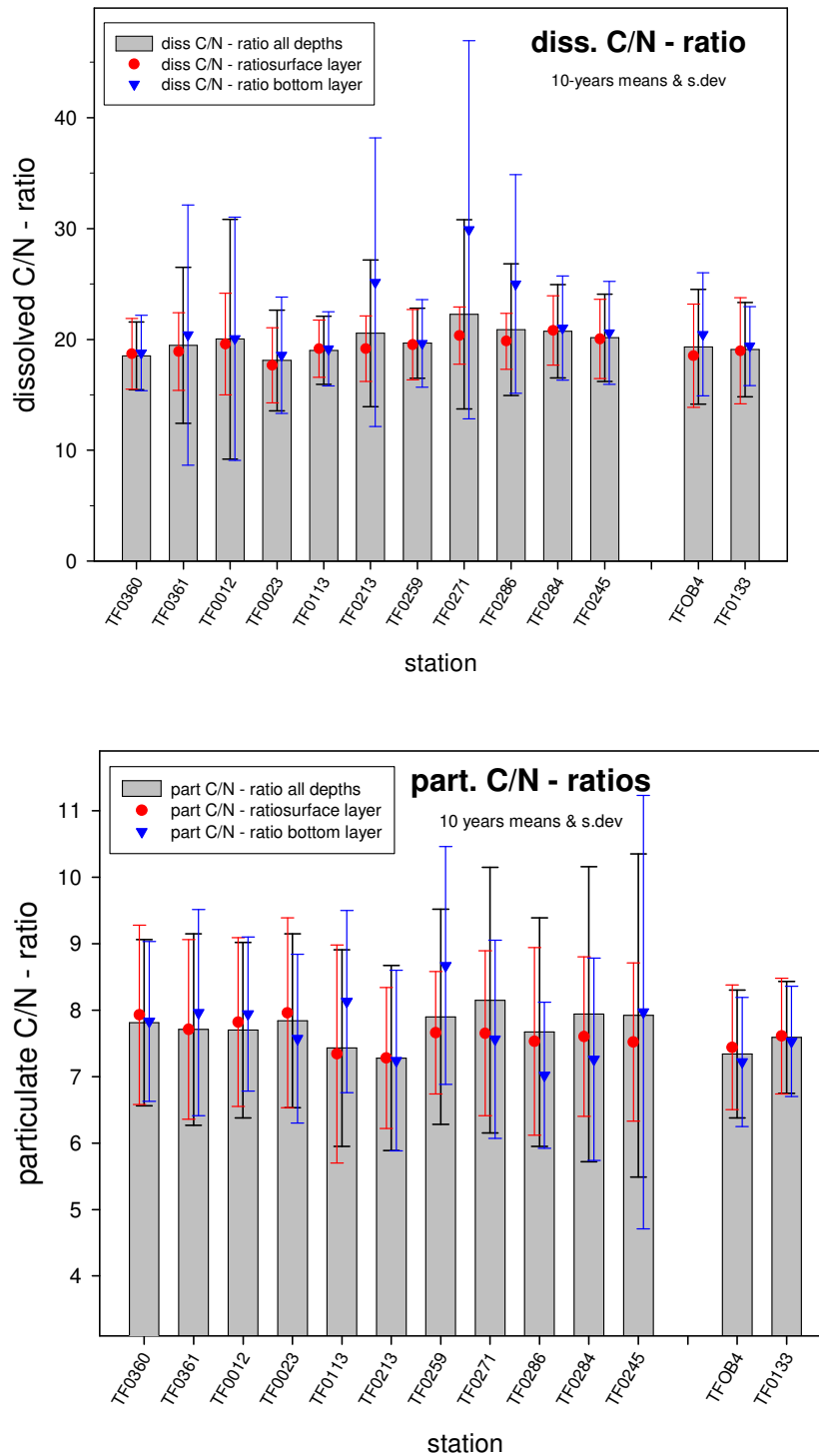


Abb. 31

10-Jahres- Mittelwerte und Standardabweichungen der C/N – Verhältnisse in der gelösten (oben) und der partikulären Fraktion des organischen Materials (unten) an ausgewählten Stationen. Angegeben sind die Mittelwerte und die Standardabweichungen berechnet aus allen Tiefen sowie für die Oberflächen- bzw. Bodenschicht

Fig. 31

10-years means and standard deviations of C/N ratios in the dissolved (top) and particulate fraction of the organic material (bottom) at selected stations. Shown are means and standard deviations calculated for all depths and for surface and near bottom layer

geprägt: durch die Menge des DOC, das aus den Flüssen in die Ostsee eingetragen wird, durch die hydrodynamisch kontrollierte Vermischung salzreicher, DOC armer und salzarmer, DOC reicher Wasserkörper und durch biologisch gesteuerte Prozesse, die für die Bildung bzw. den Abbau des DOC verantwortlich sind. Obwohl alle dieser Faktoren direkt oder indirekt saisonal beeinflusst werden, ergibt ihre Überlagerung keine ausgeprägte saisonale Abhängigkeit der DOC-Konzentration.

Die mittlere Verteilung von DON ist der des DOC sehr ähnlich, wobei jedoch die Standardabweichungen sowohl im oberflächennahen als auch im bodennahen Wasserkörper deutlich größer sind als beim DOC. Die Ursache für die größere Streuung dürfte darin bestehen, dass die Mechanismen zum Abbau des Kohlenstoff- bzw. Stickstoffanteils im organischen Material unterschiedlich sind und der Abbau mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten abläuft. Hinweise auf diese unterschiedlichen Mechanismen lassen sich zum Beispiel aus den Beobachtungen der Konzentrationen und der relativen Zusammensetzung des organischen Materials während der letzten Stagnationsperiode im Tiefenwasser des östlichen Gotlandbeckens ableiten (NAUSCH et al., 2005). Während dieser Zeit wurde einhergehend mit der Zunahme der H_2S – Konzentration eine leichte Zunahme der Menge an DOC und eine deutliche Abnahme des DON in diesem Wasserkörper beobachtet. Diese gegenläufige Tendenz der Konzentrationen von organisch gebundenem Kohlenstoff und Stickstoff führte zu sehr hohen C/N- Verhältnissen in der gelösten Fraktion des organischen Materials, die im Jahr 2002 gegen Ende der Stagnationsperiode Spitzenwerte zwischen 80 und 100 erreichten (Abb. 32). Diese Änderung im C/N- Verhältnis ist ein Indiz dafür, dass der Stickstoffanteil im organischen Material schneller abgebaut wird als der Kohlenstoffanteil. Die unterschiedlichen Abbauraten für den Kohlenstoff- bzw. den Stickstoffanteil des organischen Materials lassen sich auch aus der Beobachtung der Akkumulation von CO_2 während der Stagnationsperiode und den Veränderungen der Nährstoffkonzentrationen ableiten (SCHNEIDER et al., 2002). Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang, dass das mittlere C/N-Verhältnis in der partikulären Fraktion auch während der Stagnationsperiode weitgehend konstant ist und sich von den Werten in der Oberflächenschicht kaum unterscheidet und nahe bei dem Wert liegen, der nach dem Redfield – Ratio zu erwarten ist (REDFIELD et al., 1963). Dieser Unterschied zwischen der Entwicklung der C/N- Verhältnisse in der partikulären und der gelösten Fraktion des organischen Materials ist ein Hinweis darauf, dass die biologisch gesteuerten Remineralisationsprozesse vornehmlich am gelösten organischen Material angreifen.

Neben der Station TF0271 fallen deutlich höhere mittlere C/N- Verhältnisse auch in der Bodenschicht an den Stationen TF0213 (Bornholmtief) und TF0286 (Fårötief) auf, die ebenfalls verbunden sind mit einer auffallend großen Streuung der Werte (Abb. 31). Auch an diesen beiden Stationen sind während des Untersuchungszeitraumes Stagnationsphasen beobachtet worden, in denen sich stabile anoxische Bedingungen im bodennahen Wasserkörper ausbilden konnten, die allerdings nicht so lange andauerten wie an der Station TF0271 und nicht zu so hohen H_2S – Konzentrationen führten.

Auffallend große Streuungen im C/N- Verhältnis der gelösten Fraktion des organischen Materials finden sich auch an den Stationen TF0361 (Südausgang Großer Belt) und TF0012 (Mecklenburger Bucht) im Bereich der westlichen Ostsee. Obwohl diese beiden Stationen sehr flach sind und die Wasserkörper hier in der Regel gut durchmischt sind, wurden in den warmen Sommermonaten teilweise sehr geringe Sauerstoffkonzentrationen beobachtet ($< 0,6$ ml/l), die durch eine hohe biologische Aktivität und eine starke Erwärmung des Wassers bis in die bodennahen Schichten verursacht wurden. Obwohl der Abbau von organischem Material mit einer Sauerstoffzehrung (bei gleichzeitiger Bildung von CO_2) verbunden ist, erscheint es sehr unwahrscheinlich, dass die Veränderungen in der Zusammensetzung des organischen Materials, die in anoxischen Wasserkörpern bzw. bei sehr geringen Sauerstoffkonzentrationen beobachtet wurden, nur unter diesen Bedingungen ablaufen. Ausgeprägte Sauerstoff- bzw. H_2S – Gradienten treten in der Regel

dann auf, wenn die hydrodynamischen Mischungsprozesse über einen ausreichend langen Zeitraum stärker eingeschränkt sind (z.B. durch die Ausbildung von stabilen Sprungschichten oder durch stagnierende Wasserkörper). Aus den Beobachtungen der Veränderungen der Konzentrationen und der relativen Zusammensetzung des organischen Materials im Tiefenwasser des östlichen Gotlandbeckens während der letzten Stagnationsperiode wird deutlich, dass diese Vorgänge relativ langsam und mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung ablaufen. Unter den normalerweise in der Ostsee herrschenden hydrodynamischen Bedingungen ist deshalb zu erwarten, dass die Veränderungen im organischen Material durch die hydrodynamische Durchmischung des Wasserkörpers überlagert werden und zu relativ einheitlichen Konzentrationen natürlicher organischer Verbindungen führen.

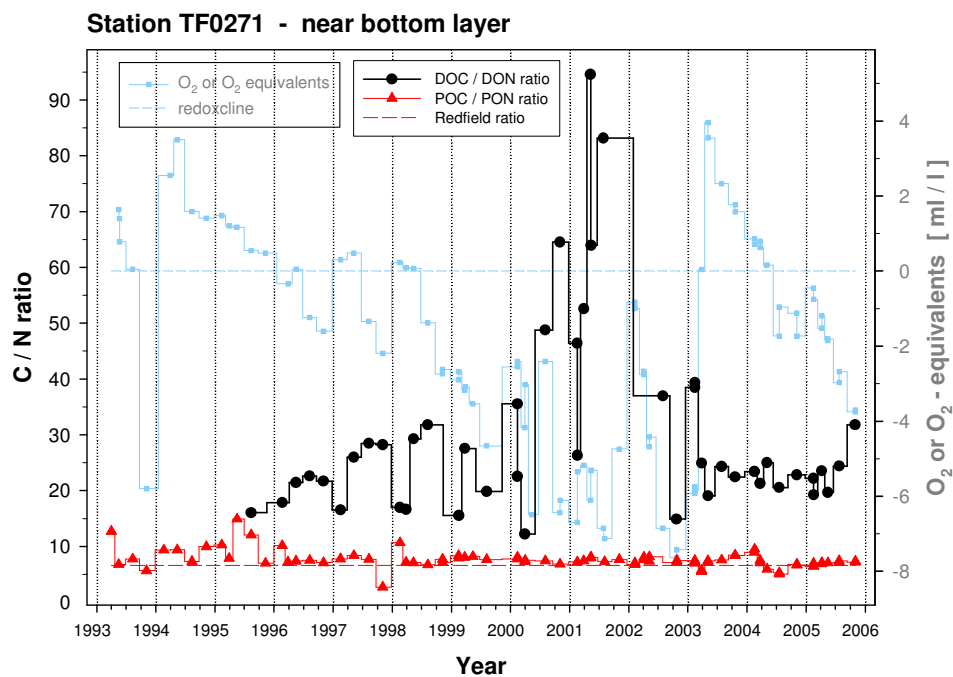


Abb. 32

Zeitreihe der C/N – Verhältnisse der gelösten und partikulären Fraktion des organischen Materials in der bodennahen Schicht an der Station TF0271 (östliches Gotlandbecken)

Fig. 32

Time series of C/N ratios in the dissolved and particulate fraction of the organic material in the near bottom layer at station TF0271 (eastern Gotland Basin)

Zusammenfassung

Der Winter 2004/2005 war, bezogen auf den gesamten Ostseeraum, ein mittelkalter Winter, und nach 1995/1996 und 2002/2003 der drittkälteste Winter der vergangenen Dekade. Die maximale Eisbedeckung der Ostsee lag mit 177 000 km² bei 82% des langjährigen Mittelwerts von 215 000 km² seit 1720. Der kälteste Winter der letzten Dekade 2002/2003 wies eine Eisbedeckung von 232 000 km² auf. An der deutschen Ostseeküste wurde dagegen nur ein schwacher Eiswinter registriert. Das zeigt auch die Kältesumme der Lufttemperatur des Winters für Warnemünde von 32, die deutlich unter dem langjährigen Mittel von 112 lag. Lediglich der März war zu kalt. Das Jahr 2005 war global gesehen das zweitwärmste seit Beginn der Aufzeichnungen 1861 und folgte direkt auf 1998. Getrennt nach Hemisphären war 2005 das wärmste Jahr bisher überhaupt auf der Nordhalbkugel und das viertwärmste auf der Südhalbkugel. Auch in Warnemünde lag die Wärmesumme des Sommers mit 188 über dem langjährigen Mittel von 143. Das ist Platz 13 in der Reihe seit 1947, wobei die beiden Spitzenreiter die Jahre 1997 und 2002 mit der jeweils gleichen Wärmesumme von 294 waren. Nur der August 2005 fiel deutlich zu kalt aus.

Die meteorologischen Bedingungen spiegeln sich auch in der Wasseroberflächentemperatur wider. Das Jahr 2005 war in der Wasseroberflächentemperatur gekennzeichnet durch vergleichsweise warme Monate Januar, Juli sowie Oktober, November und Dezember und war im Jahresmittel das wärmste Jahr des Untersuchungszeitraumes. Der Januar gehörte nahezu in der gesamten Ostsee nach 2001 zu den wärmsten seit 1990. Auch der Februar lag über dem Mittelwert der letzten 15 Jahre. Bereits im Juli wurden mit Werten um 20°C die höchsten Wasseroberflächentemperaturen im Jahresverlauf gemessen. Diese Beobachtung konnte seit 1990 nur noch im Jahre 2001 gemacht werden, ansonsten war immer der August der wärmste Monat des Jahres.

Während der Salzgehalt im Tiefenwasser der zentralen Ostsee seit 1993 mit Unterbrechungen (wie auch 2005) systematisch ansteigt, zeichnet sich eine Trendumkehr der Aussüßung des Oberflächenwassers erst seit 2002/2003 ab und hat sich 2005 wiederum fortgesetzt.

Herausragende Einstromereignisse fanden in der Ostsee 2005 nicht statt, weil die starken Winterstürme zu Beginn des Jahres jeweils nur zu kurz andauerten. Die Verhältnisse im Tiefenwasser der zentralen Ostsee waren noch immer geprägt durch die Nachwirkungen der warmen und kalten Einströme 2002 und 2003. Besonders der Salzwassereintrich vom Januar 2003 führte zu einer nachhaltigen Verbesserung der Sauerstoffsituation in den Tiefenbecken der Ostsee. Bereits 2004 musste jedoch ein deutlicher Rückgang der Sauerstoffkonzentrationen und der Beginn einer neuer Stagnationsperiode konstatiert werden. Diese Entwicklung setzte sich auch im Jahr 2005 fort. So wurde im Bornholmbecken Ende August in Bodennähe mit -3,12 ml/l die höchste bisher berichtete Schwefelwasserstoffkonzentration gemessen. Auch im östlichen Gotlandbecken nahm die Mächtigkeit der sauerstofffreien Schicht kontinuierlich zu. Zum Jahresende 2005 war bereits die gesamte Wassersäule unterhalb 150 m anoxisch. In Bodennähe wurde ein negativer Sauerstoffwert von -3,75 ml/l gemessen. Im westlichen Gotlandbecken machten sich die Salzwassereintröme noch deutlich verzögerter und mit geringerer Wirkung bemerkbar. Wenngleich im Tiefenwasser des Landsortiefs und des Karlsötief gelegentlich geringe Sauerstoffkonzentrationen gefunden wurden, konnte eine durchgreifende Verbesserung der Situation nicht beobachtet werden. Zum Jahresende zeigten beide Gebiete wieder anoxische Bedingungen.

Die Winterphase wird zur Beschreibung von Nährstofftrends im Oberflächenwasser genutzt. In allen Seegebieten der zentralen Ostsee wurden hohe Phosphatwinterkonzentrationen beobachtet. Sie sind vergleichbar mit den Befunden des Jahres 1993. Die dazwischen liegenden Jahre wiesen

geringere Konzentrationen auf. Die winterlichen Nitratkonzentrationen lagen dagegen im Bereich der letzten Jahre, nachdem 2004 die niedrigsten Werte seit 15 Jahren registriert wurden.

Besonders hohe Phosphatwerte wurden im Bornholmbecken, aber auch im Bereich des Karlsötiefs gemessen. So wurde im Februar ein Maximalwert von 1,14 $\mu\text{mol/l}$ gefunden. Ähnlich hohe Konzentrationen wurden letztmals Mitte der 1980er Jahre gemessen. Die Ursache ist darin zu sehen, dass das Phosphat, im Gegensatz zur normalen Entwicklung, im Sommer 2004 nicht verbraucht wurde. Zusammen mit der herbstlichen Mineralisation hatte dies zur Folge, dass im winterlichen Oberflächenwasser extrem hohe Phosphatwerte gemessen wurden. Nach der Frühjahrsblüte wurden im Mai 2005 noch 0,5 – 0,6 $\mu\text{mol/l}$ Phosphat gefunden. Bis zum Sommer war ein weiterer Phosphatrückgang zu beobachten, jedoch sanken die Werte nur in Ausnahmefällen unter 0,3 $\mu\text{mol/l}$. Damit steht zu erwarten, dass die Phosphatwinterkonzentrationen im Bornholmbecken im Jahr 2006 ebenfalls sehr hoch sein werden.

Die gemessenen Winterkonzentrationen wirken sich auch auf die molaren N/P – Verhältnisse aus. Diese lagen im winterlichen Oberflächenwasser des Landsorttiefs und des Farötiefs bei 5,1. Der niedrigste Wert wurde mit 3,0 im Bornholmbecken beobachtet. Sie befinden sich damit, ähnlich wie im Vorjahr, deutlich unter dem langjährigen Mittelwert und weit entfernt vom klassischen Redfield-Verhältnis. Somit waren ideale Bedingungen für die Entwicklung von Blaualgen im Sommer gegeben. Während im gesamten östlichen, nördlichen und westlichen Gotlandbecken, im Finnischen Meerbusen und auch in der südlichen Bottensee 2005 extrem starke Cyanobakterienblüten beobachtet wurden, kam es im Bornholmbecken zu keiner nennenswerten Entwicklung von Blaualgen, obwohl vergleichbare meteorologische Bedingungen herrschten. Die Ursachen für diese Entwicklung sind noch zu klären.

Summary

The winter 2004/2005 was an average-cold winter for the whole Baltic Sea area, however, the third coldest winter of the last decade after 1995/1996 and 2002/2003. The maximum ice cover in the Baltic Sea with 177 000 km^2 amounted to 82% compared with the long-term mean of 215 000 km^2 since 1720. The coldest winter of the last decade 2002/2003 had an ice coverage of 232 000 km^2 . At the German Baltic Sea coast, the ice winter was only weak. The 'cold sum' 32 of the air temperature in Warnemünde, which was lying clearly below the long-term mean of 112, showed this also. Only March was too cold. On a global scale, the year 2005 was the second warmest since registration started in 1861 and followed directly after 1998. Separating both hemispheres, 2005 was the warmest year on the northern one and the fourth warmest on the southern one. Also with 188 the summer 'heat sum' in Warnemünde was well above the long-term mean of 143. It ranks 13 in the record since 1947, whereby the years 1997 and 2002 were on top, both with a 'heat sum' of 294. Only the August 2005 was clearly too cold.

The meteorological conditions were reflected in the sea surface temperatures. The water temperature of the year 2005 was characterized by the relatively warm months January and July as well as October, November and December. As annual mean, 2005 was to the warmest one during the investigation period. January was the second warmest month in the whole Baltic Sea since 1990. Only January 2001 was warmer. Also February was lying over the average of the last 15 years. Already in July the maximum surface temperature with around 20°C was reached. This observation happened only once before, in 2001. Normally the August is the warmest month of the year.

The salt content in the deeper basins of the Baltic Sea increased, with some interruptions like in 2005, continuously already since 1993. However, the similar trend change in the surface layer took place not before 2002/2003 and is still continuing since then.

In 2005, no important inflow events occurred because the winter storms at the beginning of the year were always only of short duration. The conditions in the deeper basins of the central Baltic Sea were still coined by the aftereffects of the warm and cold inflow events in 2002 and 2003. Especially the salt water inflow in January 2003 resulted in a sustainable improvement of the oxygen situation. Already in 2004, a clear decrease of the oxygen concentrations was observed and the onset of a new stagnation period was stated. This development continued in 2005. Thus, at the end of August, with -3.12 ml/l the highest hydrogen sulphide concentration ever observed in the Bornholm Basin was detected near the bottom. In the eastern Gotland Basin, the layer free of oxygen increased continuously. At the end of 2005 the whole column between 150 m depth and the bottom was anoxic. Near the bottom a negative oxygen concentration of -3.75 ml/l was measured. In the western Gotland Basin the influence of the salt water inflow could be detected only delayed and with reduced intensity. Although in the deep water of the Landsort and Karlsö Deeps traces of oxygen were found occasionally, a definite improvement of the situation could not be stated. At the end of the year both deeps displayed again anoxic conditions.

Normally the winter period is used for the description of nutrient trends in the surface layer. The winter phosphate concentrations in the surface layer were high in all areas of the central Baltic Sea. They are comparable with values from 1993. The years in between showed lower phosphate concentrations. The winter nitrate concentrations were similar to the years before after having the lowest values for the last 15 years in 2004.

Extremely high concentrations were measured in the Bornholm Basin, but also in the Karlsö Deep area. Thus, in February a maximum of 1.14 $\mu\text{mol/l}$ was detected. Such high concentrations were found in the mid 1980s for the last time. The reason can be seen, in contrast to the normal development, in that the phosphate was not used up in summer 2004. This resulted, together with the autumnal mineralization, in extremely high phosphate values in the winter surface layer 2005. After the spring bloom still $0.5 - 0.6$ $\mu\text{mol/l}$ phosphate were measured in May 2005. Until summer, a further decrease could be detected. But, the concentrations did not fall below 0.3 $\mu\text{mol/l}$. Therefore, it can be expected that the phosphate surface winter concentration in the Bornholm Basin will be also high in 2006.

The measured winter nutrient concentrations affected also the molar N/P-ratios. These were lying at 5.1 in the winter surface layer of the Landsort and Farö Deep areas. The lowest value with 3.0 was found in the Bornholm Basin. They are well below the long-term mean and far away from the classical Redfield ratio. Consequently, ideal conditions for the development of cyanobacteria were given. Whereas in the whole eastern, northern and western Gotland Basin, the Gulf of Finland and the southern Bothnian Sea very intense cyanobacteria blooms were observed in 2005, no development of cyanobacteria worth to note occurred in the Bornholm Basin despite meteorological conditions were comparable. The reasons for this development have to be clarified still.

Danksagung

Die Autoren danken den am Ostseeüberwachungsprogramm beteiligten Mitarbeitern des Instituts für Ostseeforschung Warnemünde für die Durchführung der Messungen sowie Kapitänen und Besatzungen des Forschungsschiffs „Gauss“ für die Unterstützung und den Einsatz bei den Messfahrten des Jahres 2005. 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 und Rostock, dankbar. Wir danken Herrn THOMAS FADING vom Deutschen Wetterdienst (DWD), Offenbach, für die Bereitstellung der Winddaten von Arkona 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 LYSIK-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

- ANEER, G. and HÖGLANDER, H. (2005): Report on the conditions of the coastal and offshore waters of the Baltic Proper. – Information Office for the Baltic Proper, County Administrative Board of Stockholm, September 7th 2005, Information 9/05
<http://www2.ab.lst.se/infobalt/current.htm>
- BEZOLD, W.V. (1883): Die Kälterückfälle im Mai. – Abhandlungen der königlich Bayerischen Akademie der Wissenschaften. Bd. **14**, Nr. 6, 71-108.
- V.BODUNGEN, B., GRAEVE, M., KUBE, J., LASS, H.U., MEYER-HARMS, B., MUMM, N., NAGEL, K., POLLEHNE, F., POWILLEIT, M., RECKERMANN, M., SATTLER, C., SIEGEL, H. and WODARG, D. (1995): Stoff-Flüsse am Grenzfluss – Transport- und Umsatzprozesse im Übergangsbereich zwischen Oderästuar und Pommerscher Bucht (TRUMP). – *Geowiss.* **13**, 479-485.
- BOOS (2005): The Estonian National awareness meeting, The PAPA Consortium, Deliverable D7.1, Danish Meteorological Institute, Copenhagen, Denmark, September 2005.
http://www.boos.org/papa/doc/d7.1_report.doc
- BSH (2004): Reduzierte Eissumme.
<http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Beobachtungen/Eis/1986.jsp>
- BSH (2005): Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg•Rostock. Eiswinter 2004/2005
http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Beobachtungen/MURSYS-Umweltreportsystem/Mursys_031/seiten/oseis01.jsp#20042005
- CAUWET, G. (2002): DOM in the coastal zone. In: Biogeochemistry of marine dissolved organic matter (Eds. D.A. HANSELL and C.A. CARLSON), Academic Press, pp 579 – 609.
- DWD (2005): Witterungsreport: express. 7, Nr. 1 - 12. Offenbach: Deutscher Wetterdienst.
- DWD (2006): unveröffentlichte Daten
- ELMGREN, R. and LARSSON, U. (2001): Nitrogen and the Baltic Sea: managing nitrogen in relation to phosphorus. *The Scientific World* **1** (S2), 371-377.
- FEISTEL, R., NAUSCH, G., MATTHÄUS, W. and HAGEN E. (2003a): Temporal and spatial evolution of the Baltic deep water renewal in spring 2003. – *Oceanologia* **45** (4), 623-642.
<http://www.iopan.gda.pl/oceanologia/454feis2.pdf>
- FEISTEL, R., NAUSCH, G., MOHRHOLZ, V., LYSIK-PASTUSZAK, E., SEIFERT, T., MATTHÄUS, W., KRÜGER, S. and HANSEN, I.S. (2003b): Warm waters of summer 2002 in the deep Baltic Proper. – *Oceanologia* **45** (4), 571-592.
<http://www.iopan.gda.pl/oceanologia/454feis1.pdf>
- FEISTEL, R., NAUSCH, G., HEENE, T., PIECHURA, J., and HAGEN, E. (2004a): Evidence for a warm water inflow into the Baltic Proper in summer 2003. – *Oceanologia* **46** (4), 581-598.
<http://www.iopan.gda.pl/oceanologia/464feist.pdf>
- FEISTEL, R., NAUSCH, G., MATTHÄUS, W., LYSIK-PASTUSZAK, E., SEIFERT, T., SEHESTED HANSEN, I., MOHRHOLZ, V., KRÜGER, S., and BUCH, E. (2004b): Background data to the exceptionally warm inflow into the Baltic Sea in late summer of 2002. – *Meereswiss. Ber.* **58**, 1-58.
http://www.io-warnemuende.de/documents/mebe58_2004_paper.pdf
- FEISTEL, R., NAUSCH, G., and HAGEN E. (2006): Unusual Inflow Activity 2002/3 and Varying Baltic Deep-Water Properties. – *Oceanologia*, submitted
- FEISTEL, R., FEISTEL, S., NAUSCH, G., SZARON, J., LYSIK-PASTUSZAK, E. and ÆRTEBJERG, G. (2008): BALTIC: Monthly time series 1952 - 2005. In: FEISTEL, R., NAUSCH, G. and WASMUND, N. (Eds.) State and Evolution of the Baltic Sea 1952 - 2005. Wiley Interscience, in preparation
- FIMR (2005): Ice winter 2004/2005. The ice season 2004/2005 was average.

- <http://www.fimr.fi/en/palvelut/jaapalvelu/jaatalvi2004-2005.html>
- FONSELIUS, F.H. (1969): Hydrography of the Baltic deep basins. – III Fish. Board Swed. Ser. Hydrogr. **23**, 1-97.
- GIWA (2003): Newsletter 2, 2003. – [http://www.giwa.net/newsletter\(giwa_2-2003.pdf](http://www.giwa.net/newsletter(giwa_2-2003.pdf).
- GRASSHOFF, K., ERHARDT, M. and KREMLING, K. (1983): Methods of seawater analysis. – 2nd Ed., Verlag Chemie, Weinheim.
- HELCOM (1980): Assessment of the effects of pollution on natural resources of the Baltic Sea. – Balt. Sea Environ. Proc. **5B**, 1-425.
- HELCOM (1996): Third periodic assessment of the state of the marine environment of the Baltic Sea, 1989-1993; Background Document. – Balt. Sea Environ. Proc. **64B**, 1-252.
- 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
- HELCOM (2003): Environment of the Baltic Sea, 1994-1998; Background Document. – Balt. Sea Environ. Proc. **82B**, 1-215.
- HELCOM (2004): The Fourth Baltic Sea Pollution Load Compilation (PLC 4). – Balt. Sea Environ. Proc. **93**, 1-188.
- HAGEN, E. and FEISTEL, R. (2005): Climatic Turning Points and Regime Shifts in the Baltic Sea Region: The Baltic Winter Index (1659-2002). – Boreal Environment Research, **10**, 211-224. <http://www.borenav.net/BER/pdfs/ber10/ber10-211.pdf>
- KAISER, W. and SCHULZ, S. (1978): Zur Ursache der zeitlichen und räumlichen Differenzen des Beginns der Phytoplanktonblüte in der Ostsee. – Fischerei Forsch., Rostock **14** (2), 77-81.
- KRÜGER, S., ROEDER, W., WLOST, K.-P., KOCH, M., KÄMMERER, H. and KNUTZ, T., (1998): Autonomous instrumentation carrier (APIC) with acoustic transmission for shallow water profiling. – Oceanology International 98: The Global Ocean Conf. Proc. **2**, 149-158.
- KRÜGER, S. (2000a): Basic shipboard instrumentation and fixed autonomic stations for monitoring in the Baltic Sea. – In: EL-HAWARY, F. (Ed.): The Ocean Engineering Handbook, CRC Press, Boca Raton, USA, 52-61.
- KRÜGER, S. (2000b): Activities of the Institut für Ostseeforschung (IOW), Germany. – Proc. Int. Workshop on the “Coordinated Adriatic Observing System” CAOS, 21-22 October 1998, Trieste, Italy, 53-60.
- LARSSON, U., ELMGREN, R. and WULFF, F. (1985): Eutrophication and the Baltic Sea – causes and consequences. – Ambio **14**, 9-14.
- LASS, H. U., SCHWABE, R., MATTHÄUS W. and FRANCKE, E. (1987): On the dynamics of water exchange between Baltic and North Sea. – Beitr. Meereskd. **56**, 27-49.
- LASS, H.U., MOHRHOLZ, V. and SEIFERT, T. (2001): On the dynamics of the Pomeranian Bight. – Cont. Shelf. Res. **21**, 1237-1261.
- LASS, H.U. and MOHRHOLZ, V. (2003): On the dynamics and mixing of inflowing salt-water in the Arkona Sea.. – J. Geophys. Res. **108** No. C2, 3042, 10.1029/2002JC001465, 21 February 2003.
- LASS, H.U., MOHRHOLZ, V. and SEIFERT, T. (2005): On pathways and residence time of salt-water plumes in the Arkona Sea. – J. Geophys. Res. **110**, C11019, doi:10.1029/2004JC002848
- MATTHÄUS, W. (1978): Zur mittleren jahreszeitlichen Veränderlichkeit im Sauerstoffgehalt der offenen Ostsee. – Beitr. Meereskd., Berlin, **41**, 61-94.
- MATTHÄUS, W., NEHRING, D., NAUSCH, G., LASS, H.-U., NAGEL, K. and SIEGEL, H. (1997): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1996. – Meereswiss. Ber. **24**, 1-47.
- MATTHÄUS, W., NAUSCH, G., LASS, H.-U., NAGEL, K. and SIEGEL, H. (2000): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1999. – Meereswiss. Ber. **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.* **45**, 3-26.
- MATTHÄUS, W., NAUSCH, G., LASS, H.-U., NAGEL, K. and SIEGEL, H. (2001b): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2000. – *Meereswiss. Ber.* **45**, 27-88.
- MOHRHOLZ, V. (1998): Transport- und Vermischungsprozesse in der Pommerschen Bucht. – *Meereswiss. Ber.* **33**, 1-106.
- NAGEL, K. (2006): IOW Cruise Report 11/06/01.
<http://www.io-warnemuende.de/projects/monitoring/documents/cr110601.pdf>
- 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.* **64B**, 80-85.
- NAUSCH, G., FEISTEL, R., LASS, H.-U., NAGEL, K. and SIEGEL, H. (2002): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2001. – *Meereswiss. Ber.* **49**, 1-77.
- NAUSCH, G. AND LYSIK-PASTUSZAK, E. (2003): Eutrophication and related fields: Baltic Proper: Hydrochemistry. In: Environment of the Baltic Sea, 1994-1998. – *Balt. Sea Environ. Proc.* **85B**, 42-45.
- NAUSCH, G., FEISTEL, R., LASS, H.-U., NAGEL, K. and SIEGEL, H. (2003a): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2002. – *Meereswiss. Ber.* **55**, 1-71.
- NAUSCH, G., MATTHÄUS, W., and FEISTEL, R.: (2003b): Hydrographic and hydrochemical conditions in the Gotland Deep area between 1992 and 2003. – *Oceanologia* **45** (4), 557-569. <http://www.iopan.gda.pl/oceanologia/454nausc.pdf>
- NAUSCH, G., FEISTEL, R., LASS, H.-U., NAGEL, K. and SIEGEL, H. (2004): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2003. – *Meereswiss. Ber.* **59**, 1-80.
- NAUSCH, G., FEISTEL, R., LASS, H.-U., NAGEL, K. and SIEGEL, H. (2005): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2004. – *Meereswiss. Ber.* **62**, 1-80.
http://www.io-warnemuende.de/documents/mebe62_2004-zustand-hc.pdf
- NEHRING, D. (1990): Die hydrographisch-chemischen Bedingungen in der westlichen und zentralen Ostsee von 1979 bis 1988 – ein Vergleich. – *Meereswiss. Ber.* **2**, 3-45.
- NEHRING, D. and MATTHÄUS, W. (1990): Aktuelle Trends hydrographischer und chemischer Parameter in der Ostsee, 1958 – 1989. – *Meereswiss. Ber.* **2**, 47-79.
- NEHRING, D., MATTHÄUS, W., and LASS, H.U. (1993): Die hydrographisch-chemischen Bedingungen in der westlichen und zentralen Ostsee im Jahre 1992. – *Dt. Hydrogr. Z.* **45**, 281-331.
- NEHRING, D., MATTHÄUS, W., LASS, H.U. and NAUSCH, G. (1994): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1993. – *Meereswiss. Ber.* **7**, 1-68.
- NEHRING, D., MATTHÄUS, W., LASS, H.U., NAUSCH, G. and NAGEL, K. (1995a): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1994. – *Meereswiss. Ber.* **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.
- SCHERNEWSKI, G. and NEUMANN, T. (2005): The trophic state of the Baltic Sea a century ago: a model simulation study. – *J. Mar. Sys.* **53**, 109-124
- REDFIELD, A.C., KETCHUM, B.H. and 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.
- SCHNEIDER, B., NAUSCH, G., KUBSCH, H. AND PETERSOHN, I. (2002): Accumulation of total CO₂ 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**, 1793-1817.
- 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.
- SIEGEL, H., GERTH, M. and TSCHERSICH, G. (2005). 15 years satellite derived Sea Surface Temperature of the Baltic Sea. – *Oceanologia*, submitted
- SMHI (1982) Climatological Ice Atlas. – Sjöfartsverkets tryckeri, Norrköping. 220 pp.
- SMHI (2006) unveröffentlichte Daten.
- SOOMERE, T., BEHRENS, A., TUOMI, L. and NIELSEN, J.W. (2005): Unusual wave conditions in the Baltic Proper and the Gulf of Finland during windstorm Gudrun. – Paper presented at the 5th Baltic Sea Science Congress, The Baltic Sea Changing Ecosystems, Sopot, Poland, 20-24 June 2005
- SOOMERE, T., BEHRENS, A., TUOMI, L. and NIELSEN, J.W. (2006a): Unusual wave conditions in the Baltic Proper and in the Gulf of Finland during windstorm Erwin/Gudrun. – *Boreal Environment Research*, submitted
- SOOMERE, T., BEHRENS, A., TUOMI, L. and NIELSEN, J.W. (2006b): Unusual wave conditions in the northern Baltic Sea during windstorm Gudrun in January 2005. – *Geophysical Research Abstracts*, in press
- TRUMP (1998): Transport- und Umsatzprozesse in der Pommerschen Bucht (TRUMP) 1994-1996. – Abschlussbericht, IOW Warnemünde, 1-32 (unveröffentlicht).
- WMO (2005): WMO statement on the status of the global climate in 2005. – Press Release No. 743, Geneva. http://www.wmo.int/web/Press/Press743_E1.doc

POHL, C.; HENNINGS, U., LEIPE, T.:

Die Schwermetall- Situation in der Ostsee im Jahre 2005

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenfassung	85
Summary	85
1. Einleitung	86
2. Probenahme	87
2.1 Probenaufarbeitung	89
2.2 Qualitätssicherung	90
3 Ergebnisse und Diskussion	92
3.1 Verteilungsmuster der Metallkonzentrationen in der gelösten und partikulären Phase an den in 2005 beprobten Stationen und Tiefen	92
Cadmium	
Blei	
Kupfer	
Zink	
Quecksilber	
3.2 Spurenmetall-Trends zwischen den Jahren 1993-2005 an Stationen in der westlichen und zentralen Ostsee	105
3.3 Ergebnisse aus den Sedimentuntersuchungen	113
4. Schlussfolgerungen	116
Danksagung	117
Literaturverzeichnis	117

Zusammenfassung

Wie in den Vorjahren wies die Schwermetallverteilung im Ostseewasser im Jahr 2005 keine deutlichen oder gesundheitsgefährdenden Veränderungen auf. Regionale Konzentrationserhöhungen wie sie z. B. in den letzten Jahren immer wieder in der westlichen Ostsee zu beobachten sind, werden auf eine windinduzierte, bodennahe Durchmischung und den damit verbundenen sehr variablen Schwebstoffanteil in der Wassersäule zurückgeführt. Durch die Filtration der Proben werden Partikel $>0,4\mu\text{m}$ zurückgehalten, während Partikel $<0,4\mu\text{m}$ das Filter passieren.

Veränderungen, hervorgerufen durch den Salzwassereinbruch von Februar 2003 spiegeln sich vor allem in der vertikalen Schwermetallverteilung im Tiefenwasser des Bornholmbeckens und Gotlandbeckens wider, während im Landsorttief weiterhin stagnierende Bedingungen anzutreffen sind. Unterhalb der Redoxklinen, die 2005 bei ca. 200 m angetroffen wurde, wurde ein Rückgang der gelösten Metallkonzentrationen für Cddiss, Cudiss und Zndiss beobachtet. Weiterhin ist eine leichte Zunahme der CdSPM, CuSPM und ZnSPM mit der Tiefe zu verzeichnen, welches auf den Beginn einer weiteren Stagnationsperiode schließen lässt. Insgesamt gesehen hatte der Salzwassereinbruch 2003 vor allem einen Einfluss auf die Langzeittrends der Metallkonzentrationen im Tiefenwasser der zentralen Ostsee. Insofern bietet sich jetzt ähnlich wie 1995 die außergewöhnliche Chance, die Veränderung der Metallkonzentrationen während der Stabilisierung des anoxischen Tiefenwasserkörpers, sowie deren Rückkopplungsmechanismus auf das Oberflächenwasser während einer weiteren Stagnationsperiode zu beobachten.

Die Schwermetallkonzentrationen in den Oberflächensedimenten der westlichen Ostsee (BLMP-Stationen) lassen bisher noch keinen gesicherten zeitlichen Trend erkennen (1998 bis 2005). Im Gebiet des westlichen Arkonabeckens (Station K7) wurde ein Sedimentkern entnommen, datiert und analysiert, um eine zeitliche Rekonstruktion der Schwermetallbelastung des Gebietes vornehmen zu können. Es zeigte sich, daß insbesondere für Hg Ende der 50er Jahre des vorigen Jahrhunderts eine ungewöhnliche Kontamination vorliegt, deren mögliche Ursachen jedoch noch nicht geklärt werden konnten.

Summary

In general the 2005 results of heavy metal concentrations in the Baltic Sea revealed no pronounced changes compared to previous years. Regional and temporal limited variations of trace metal concentrations, which have been observed periodically in the western Baltic, have been attributed to the changing enrichment of suspended matter in the water column, released by wind induced mixing up to the ground level. During sample filtration only particles $<0.4\mu\text{m}$ were restrained, while particles $>0.4\mu\text{m}$ passed the filter.

Changes induced during the main saltwater inflow event in February 2003 were observed in the vertical trace metal distribution in the Bornholm- and Gotland Basin with nearly homogeneous concentrations for Cddiss, Cudiss and Zndiss in surface waters. Stagnant conditions with anoxia and decreasing dissolved trace metal conditions below the oxic-anoxic interface were noticed in the near bottom layer of the Bornholm Basin at 80 m depth, below 200 m in the Gotland Deep and below 100 m in the Landsort Deep.

For the contents of CdSPM, CuSPM and ZnSPM a slight increase was observed with depth in the central Baltic, a possible hint for the beginning of a new stagnation period. Altogether the saltwater inflow event in 2003 had influenced the trace metal long term trends in the deepwater of the central Baltic Sea. Now there is another chance to study changes in trace metal concentrations during the

stabilisation of an anoxic deep water body as well as the “feedback mechanism” on the trace metal concentrations in the surface water body.

Heavy metal concentrations in surface sediments of the western Baltic Sea (BLMP-stations) still not show a significant temporal trend (1998 to 2005). In the western Arkona-Basin (Stn. K7), a sediment core was taken, dated, and analyzed for temporal reconstruction of heavy metal pollution history. The results show that especially for Hg, at the end of the 50th of the past century, an exceptional contamination was found which causes still remain unknown.

1. Einleitung

Die Schwermetallüberwachung der Ostsee wurde im Jahr 2005 durch das Institut für Ostseeforschung zum vierzehnten Mal durchgeführt. Grundlage bildet die Verwaltungsvereinbarung mit dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) in Hamburg und Rostock. Das Jahr 2005 wurde durch keine außergewöhnlichen Ereignisse geprägt. Im Februar 2005 wurde die alljährliche flächendeckende Beprobung der westlichen und zentralen Ostsee, durchgeführt, um langfristige Änderungen der Schwermetallsituation im Ostseewasser zu dokumentieren. Neben den tabellarischen Darstellungen zur Qualitätskontrolle wurden die Ergebnisse vom Februar 2005 an den beprobten Stationen vergleichbar zu den Vorjahren graphisch dargestellt, und im Zusammenhang mit den Vorjahresergebnissen diskutiert. 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. Die Trendauswertungen für die westliche Ostsee, sowie für das Oberflächenwasser und das Tiefenwasser der zentralen Ostsee wurden mit den Daten von 2005 ergänzt. Mit diesem Datensatz wird eine Stagnationsperiode zwischen zwei Salzwassereinbrüchen 1993-2003 dokumentiert. Die Schwermetallverteilung an den Stationen im Bornholm Becken (213), Gotland Becken (271) und Landsortief (284) wurden als Tiefenprofile dargestellt. Im Anhang sind die Messwerte für das Schwermetallmonitoring im Wasser und in Schwebstoffen sowie Angaben zur Qualitätssicherung tabellarisch zusammengefasst. Die angemeldete Teilnahme an der Quasimeme Performance Study zur Qualitätssicherung von Quecksilber im Meerwasser konnte nicht durchgeführt werden, da unser Gerät massive technische Defekte aufwies, und die Beschaffung eines neuen Gerätes erst im Herbst 2005 realisiert wurde.

Für das sedimentgeochemische Monitoring wurden im Jahr 2005, wie im Arbeitsplan festgelegt, folgende Arbeiten durchgeführt:

- Beprobung und Untersuchung der 5 BLMP Stationen (Siehe Karte)
- Detailuntersuchung eines Sedimentkernes von der BLMP-Station K7 im westlichen Arkonabecken

Für die jetzt im Programm befindlichen 5 BLMP-Stationen liegen einschließlich 2005 nunmehr Daten über 8 Jahre vor (1998-2005). Die Untersuchung einiger für das Sedimentmonitoring ungeeigneter Stationen wurde in den zurückliegenden Jahren eingestellt (ursprünglich 8 Stationen). Die Detailuntersuchung eines Sedimentkernes aus dem westlichen Arkonabecken war deshalb in den Arbeitsplan aufgenommen worden, weil die Station K7 seit Beginn des Monitorings durch erhöhte Schwermetallkonzentrationen (insbesondere Cd, Hg) aufgefallen war. Mit der Analyse des Kernes soll eine Rekonstruktion des zeitlichen Verlaufes der Schwermetallkonzentrationen vorgenommen werden, um Hinweise auf mögliche Ursachen für diese „Anomalie“ zu erhalten.

2. Probenahme

Die Monitoringbeprobung der Wasserproben erfolgte im Jahr 2005 zwischen dem 10.2.-21.2.2005 mit FS "GAUSS". Angaben zu den Stationen sind in Abbildung 1 und Tabelle 1 zusammengefasst.

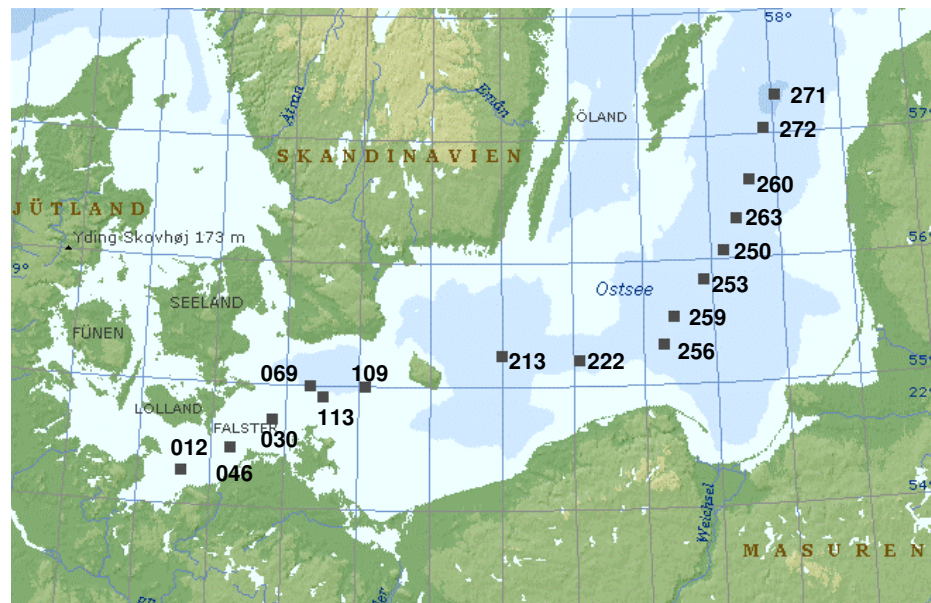


Abb. 1
Stationskarte: Probenahme von Wasserproben

Fig. 1
Stationmap: Sampling of water samples

Tab. 1
Stationen Schwermetalle im Ostseewasser, Februar 2005

Table 1
Trace metal stations in seawater from February 2005

Station	Grad Nord	Grad Ost	Stationstiefe (m)	Tiefenbeprobung (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°18,30'	20°04,60'	249	10,30,50,60,65,70,75,80,85, ,90,100,110,120,125, 130,135,140,150,160,170, 180,200,225,237
284	58°35,00'	18°14,00'	440	10,50,75,100,125,150, 200,250,300,350,400,440
272	57°04,30'	19°49,80'	212	5, 50

Tab. 2
BLMP-Stationen Schwermetalle im Sediment, Gesamtübersicht

Table 2
BLMP-trace metal stations in sediment, general overview

Station BLMP	Zielposition		Wassertiefe m	Gebiet	Sediment	Daten verfügbar
	Nord	Ost				
LB 1	54° 06.0	11° 10.0	23	Lübecker Bucht	Schlick	1998 bis 2005
M 2	54° 18.9	11° 33.0	24	Mecklenb. Bucht	Schlick	1998 bis 2005
K 8	54° 43.4	12° 47.0	23	NW Hiddensee	Sand	1998 bis 2005
K 7	55° 00.0	13° 18.0	47	Arkonabecken W	Schlick	1998 bis 2005
K 4	55° 00.0	14° 05.0	48	Arkonabecken O	Schlick	1998 bis 2005

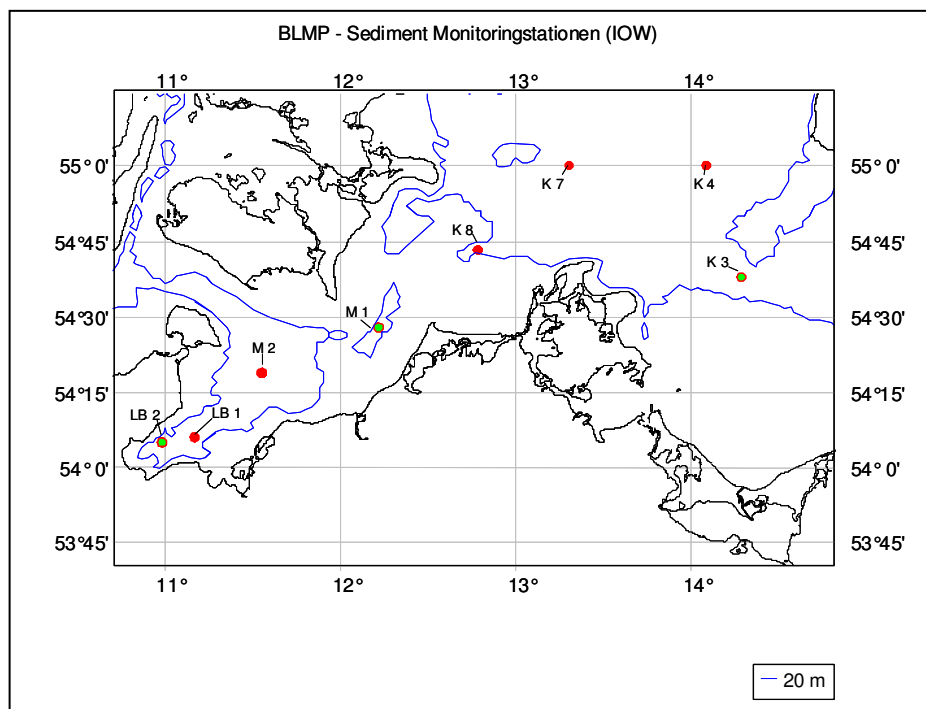


Abb. 2

Karte der Sediment Probenahmestationen des BLMP (Ostsee). Die Station LB2, M1, und K3 sind seit 2003 vom Programm gestrichen

Figure 2

Map of sediment stations in the frame of BLMP (Baltic Sea). The stations LB2, M1 and K3 are removed from the programme since 2003

2.1 Probenaufarbeitung

Bezüglich der Probenvorbereitung, Analytik und Messung von Schwermetallen in der „Matrix Wasser“ kamen die gleichen Methoden und Messgeräte wie in den letzten Berichtsjahren zum Einsatz. Detaillierte Beschreibungen dazu finden sich bei Pohl 1994, 1997, Pohl et al. 2001 sowie in den ICES / HELCOM Guidelines (ICES 2004).

Die Gewinnung, Vorbereitung und Analyse der Sedimentproben erfolgte entsprechend den im Arbeitsprogramm festgelegten Schritten und Verfahren, entsprechend den ICES / HELCOM Guidelines (ICES 2004).

Tab. 3

Allgemeine Informationen und Metadaten zur Sedimentbeprobung 2005 mit dem Multi-Corer (MUC). Der Kern 280 050 wurde bereits im Jahr 2004 entnommen

Table 3

General information and metadata of sediment sampling 2005 by Multicorer (MUC). The core 280 050 was already taken in year 2004

Datum	Zeit	Reise-Nr.	IOW Nr.	Nord	Ost	W.T.(m)	Gerät	Station	Gebiet	Sediment
31.05.2005	12:13	40/05/12	302 860	54°06.01	11°10.06	24	MUC	LB 1	Lüb. Bucht	Schlick
31.05.2005	15:58	40/05/12	302 870	54°18.89	11°33.17	25	MUC	M 2	Meckl. B.	Schlick
06.06.2005	16:40	40/05/12	303 440	54°43.39	12°47.02	23	MUC	K 8	Hiddensee	Sand
04.06.2005	05:56	40/05/12	303 180	54°59.97	13°17.98	48	MUC	K 7	Arkona-B.	Schlick
04.06.2005	12:20	40/05/12	303 240	55°00.03	14°04.90	49	MUC	K 4	Arkona-B.	Schlick
11.06.2004	10:20	40/04/14	280 050	54°59.98	13°18.01	47	MUC	K7	Arkona B.	Schlick

2.2 Qualitätssicherung

Wasser

Für 2005 war die Teilnahme an der QUASIMEME Performance Study 2005 Quecksilber im Meerwasser vorgesehen. Da die Empfindlichkeit und die Reproduzierbarkeit des alten Hg-Messgerätes in 2004/2005 erheblich nachgelassen hatte, sollte ein neues Gerät über das BSH beschafft werden. Leider wurde dieses Gerät erst im Januar 2006 geliefert, so dass wir an der Quasimeme - Interkalibrierung für Quecksilber im Meerwasser nicht teilnehmen konnten. Als zertifiziertes Referenzmaterial parallel zur Probenaufarbeitung wurde CRM-579 für Quecksilber und für Cd, Pb, Cu, Zn wurde NASS-5 eingesetzt (Tab.:4; Tab.:6).

Um Kosten zu sparen, wurde die interne analytische Qualitätssicherung für die gelösten Metallkonzentrationen zusätzlich mit Hilfe eines Substandards (unfiltriert) von der Station 259/30m durchgeführt (Tab.:5). Die Qualitätssicherung in suspendiertem partikulären Material (SPM) wurde mit Hilfe des zertifizierten Referenzstandards MESS-2 parallel zur Probenaufarbeitung durchgeführt (Tab.:7). Als Ergänzung sind auch in diesem Jahr in Tabelle 8 Filterblanks aufgeführt, die parallel zu den Probenaufarbeitungen des suspendierten Materials bearbeitet wurden. Die Nachweisgrenzen sowie Quasimeme Z-scores befinden sich in der vom BSH vorgegebenen Tabelle im Anhang. In Absprache mit dem BSH sollten, um weitere Kosten zu sparen, zukünftig die Quasimeme Proben des BSH gemeinsam vermessen werden.

Tab. 4

Qualitätssicherung von Metallen in der gelösten Phase mit zertifiziertem Referenzmaterial-NASS 5-

Table 4

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

NASS-5	Cd (ng/kg)	Cu (ng/kg)	Pb (ng/kg)	Zn (ng/kg)	CASS-3	Mn (ng/kg)
Soll	23+-3	297+-46	8+-5	102+-39	Soll	2510+-360
Apr.-Jul.2005	n=5	n=5	n=5	n=5	Aug. 2005	n=9
Mean	19,3	292	5,9	96,5	Mean	2848,0
STDEV	1,3	30,4	2,2	12,0	STDEV	333,1
%	6,8	10,4	36,7	12,5	%	11,7

Tab. 5

Qualitätssicherung von Metallen in der gelösten Phase mit Hilfe von Substandard; Station 259, 30m Tiefe

Table 5

Quality assurance of metals in the dissolved phases with substandard (Station 259, 30m depth)

Substandard	Cd (ng/kg)	Cu (ng/kg)	Pb (ng/kg)	Zn (ng/kg)
Apr.-Jul. 2005	n=11	n=11	n=11	n=11
Mean	9,4	479	14,6	713
STDEV	0,3	10,5	3,7	59,5
%	2,9	2,2	25,1	8,3

Tab. 6

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

Table 6

Quality assurance of mercury in seawater with CRM-579

CRM 579	Hg (ng/l)
Soll	1,85+-0,2
Feb.-Apr.2005	n=8
Mean	2,75
STDEV	0,1
%	3,5

Sediment

Die Qualität der in unseren Labors produzierten Daten wird durch regelmäßige Kontrollmessungen an zertifizierten Sediment-Standards überprüft.

Tab. 7

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

Table 7

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

MESS-2	Cd (µg/g)	Cu(µg/g)	Pb (µg/g)	Zn(µg/g)	Mn (µg/g)	As (µg/g)
Soll	0,24+-0,01	39,3+-2,0	21,9+-1,2	172+-16	365+-21	20,7+-0,8
Sep.-Dez.2005	n=9	n=9	n=9	n=9	n=9	n=9
Mean	0,24	32,8	22,1	161	360	25,5
STDEV	0,04	2,9	2,0	14,5	47,5	3,0
%	14,79	8,8	9,2	9,0	13,2	11,9

Tab. 8

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

Table 8

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

	Pb ng/Filter	Cd ng/Filter	Cu ng/Filter	Zn ng/Filter	Mn ng/Filter	As ng/Filter
Jan.-Dez. 2005	n=8	n=8	n=8	n=8	n=8	n=8
Mean	0,80	0,06	3,84	5,63	2,54	0,17
STDEV	0,30	0,07	2,05	2,51	2,95	0,10

3. Ergebnisse und Diskussion

Für die graphischen Darstellungen der Verteilungsmuster (Abb.3) wurde die Konzentrationsangabe ng/kg für gelöste Metalle beibehalten. Für die graphische Auswertung der Tiefenprofile (Abb. 10-12) und der Trends (Abb. 13-17) wurde die in der internationalen Literatur geforderte Konzentrationsangabe nmol/kg für die gelöste Phase gewählt. Bei den Konzentrationsangaben in SPM (suspendiertem partikulärem Material) wird zwischen der massenbezogenen Konzentrationsangabe (μ g/g), und der volumenbezogenen Konzentrationsangabe (ng/dm³ bzw. nmol/dm³) differenziert. 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 (μ g/g) auch die volumenbezogenen Ergebnisse in (ng/dm³).

3.1 Verteilungsmuster der Metallkonzentrationen in der gelösten und partikulären Phase an den im Jahre 2005 beprobten Stationen und Tiefen

Wie in den vorangegangenen Jahren konzentrierten sich auch 2005 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. 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, 2003, 2004, 2005) zum Schwermetallmonitoring sowie in verschiedenen Publikationen (Pohl & Hennings 1999; Pohl et al. 2002; Neretin et al. 2003; Pohl et al. 2004; Dippner & Pohl 2004) beschrieben. Im Februar 2005 variierte der Schwebstoffanteil in der westlichen und zentralen Ostsee vergleichbar zum Vorjahr zwischen 0,1-0,7 mg/dm³ (Abb. 4). Der Schwebstoffanteil in der Wassersäule ist vor allem bei der Berechnung

der "volumenbezogenen Schwermetallgehalte in suspendiertem partikulären Material" (SPM) von Bedeutung.

Cadmium

Die gelösten Cadmiumkonzentrationen (Cddiss) variieren 2005 zwischen 12-18 ng/kg in der westlichen Ostsee und gehen in der zentralen Ostsee geringfügig auf Werte um 10 ng/kg zurück (Abb. 3; Abb. 7). Im bodennahen Wasser des Bornholmbeckens welches im Februar 2003 durch den Salzwassereinbruch ausgetauscht wurde, ist im Februar 2005 ein Rückgang der gelösten Konzentrationen von 20 ng/kg (2004) auf 8 ng / kg zu verzeichnen.

Während andauernder Stagnationsperioden, kommt es auch in den bodennahen Bereichen und Sedimenten des Bornholmbeckens zu anoxischen Verhältnissen und es erfolgt eine Anreicherung schwerlöslicher Metallsulfide in den Oberflächensedimenten. Möglicherweise waren die erhöhten Cddiss (2004) im bodennahen Wasser des Bornholmbeckens auf Cd-Einträge aus den Porenwässern der Oberflächensedimente zurückzuführen. In 2005 hingegen haben sich die anoxischen Verhältnisse in den Sedimenten bereits stabilisiert, so daß mit einer Ausfällung schwerlöslicher CdS-Spezies zu rechnen ist. Ähnliche Verhältnisse wurden auch im bodennahen Wasser des Gotlandbeckens beobachtet.

Bezüglich der Cd-Gehalte in der Schwebstoffphase ist ein kontinuierlicher Anstieg von der Oberfläche zur Tiefe in allen 3 Becken zu verzeichnen, sehr deutlich wird dieses im Gotlandbecken. Durch den Salzwassereinstrom wurde das Tiefenwasser des Gotlandbeckens mit Sauerstoff versorgt, gleichzeitig fand eine Oxidation der gelösten Mn II Spezies zu partikulären Mn IV Spezies statt, die jetzt wiederum eine geeignete Adsorptionsoberfläche und ein geeignetes Transportmedium für andere Metalle darstellen, so auch für Cd.

Seit ca. 5 Jahren werden auch im Landsorttief (Abb. 12) mehr oder weniger stabile anoxische Verhältnisse unterhalb 100m angetroffen. Entsprechend gehen die Cddiss auf Werte <3 ng/kg unterhalb 100m zurück, während die Cd-Gehalte in der Schwebstoffphase ab 100m von 0,1 ng/dm³ auf Werte um 0,8 ng/dm³ im bodennahen Bereich ansteigen.

Blei

Im Jahre 2005 variieren die gelösten Bleikonzentrationen (Pbdiss) (Abb. 3) in der westlichen Ostsee zwischen 10-30 ng/kg und die partikulären (PbSPM) Bleikonzentrationen (Abb. 4) zwischen 10-40 ng/dm³. In der zentralen Ostsee gehen diese Konzentrationen auf Werte <10 ng/kg bzw. ng/dm³ zurück (Abb. 8). Ausnahmen sind maximale Werte im 200m Tiefenhorizont des Gotlandbeckens mit erhöhten Konzentrationen für PbSPM um 40 ng/dm³. Am häufigsten werden die Konzentrationsbereiche zwischen 2-10 ng/kg frequentiert. Der schwebstoffgebundene volumenbezogene Bleianteil entspricht wie im letzten Jahr ca. 50% der Gesamtkonzentrationen in der Wassersäule.

Kupfer

Im Februar 2005 sind die gelösten und partikulären Kupferkonzentrationen (Cudiss), Cu(SPM) auf einem etwas niedrigeren Niveau zum Vorjahr am häufigsten im Konzentrationsbereich zwischen 200-500 ng/kg und <10 ng/dm³ anzutreffen (Abb. 3-6). Im Bornholmbecken (Abb. 10) ist im Gegensatz zum Vorjahr eine Abnahme der Cudiss Konzentrationen von ~500 ng/kg im Oberflächenbereich auf ~200 ng/kg im bodennahen Bereich zu beobachten. Die niedrigsten Cudiss mit <200 ng/kg sind im Gotlandbecken in den Tiefenhorizonten zwischen 80m und 110m und dem Landsorttief im anoxischen Tiefenhorizont unterhalb 100m anzutreffen.

Zink

Die gelösten Zinkkonzentrationen (Zndiss) variieren ähnlich dem Vorjahr zwischen 400-1000 ng/kg (Abb. 3). Die Oberflächenkonzentrationen in der westlichen Ostsee sind um den Faktor 2 höher als in der zentralen Ostsee. Die volumenbezogenen partikulären Zinkgehalte (ZnSPM) sind im Jahre 2005 am häufigsten im Bereich zwischen 20-80 ng/dm³ anzutreffen (Abb. 6). Eine Ausnahme bildet der 200m Tiefenhorizont im Gotlandbecken, mit einem maximalen Gehalt von ~1800 ng/dm³.(Abb. 11), welches auf Austauschprozesse mit den Oberflächensedimenten zurückgeführt wird.

Quecksilber

Ähnlich dem Vorjahr wurde für die Quecksilberkonzentrationen (gesamt) der Bereich zwischen 400-1400 pg/dm³ am häufigsten angetroffen. Die Konzentrationen im Oberflächenwasser (Abb. 9) sind in 2005 vergleichbar zum Vorjahr mit maximalen Werten um 1500 pg/dm³ in der zentralen Ostsee. An den Stationen im Bornholmbecken, Gotlandbecken und Landsorttief ist eine kontinuierliche Zunahme der Hg-konzentrationen mit der Tiefe zu beobachten. Außergewöhnlich hohe Hg-tot Konzentrationen, wie sie in den letzten Jahren in unregelmäßigen Abständen immer wieder im Bereich der partikulären Manganmaxima auftraten, wurden in 2005 im 65m Tiefenhorizont des Bornholmbeckens, im 180m und 200m Tiefenhorizont des Gotlandbeckens sowie im 100 m Tiefenhorizont des Landsorttiefs beobachtet.

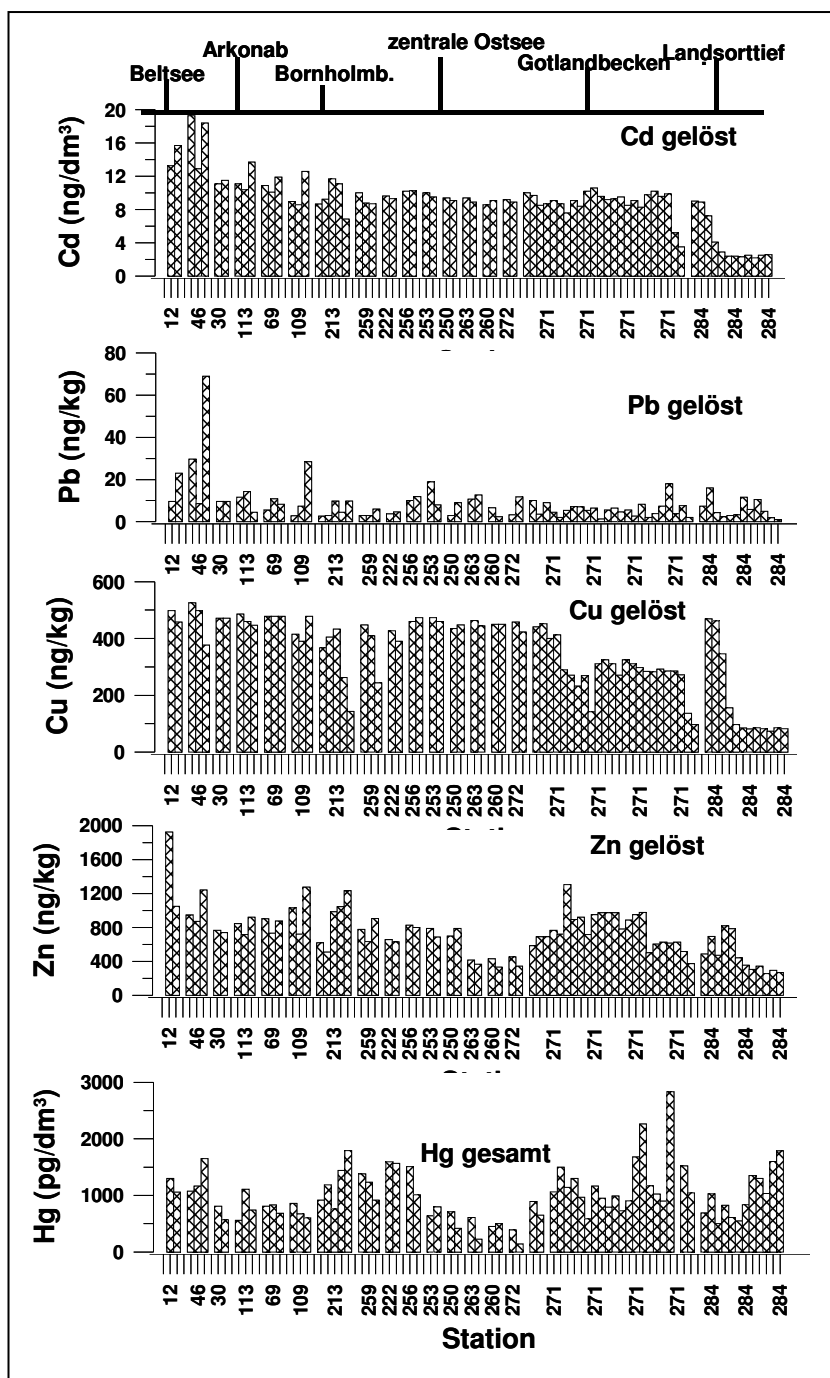


Abb.: 3
Verteilungsmuster der gelösten Metallkonzentrationen an den 2005 beprobten Stationen und Tiefen in der Ostsee (siehe Datenanhang)

Fig. 3
Distribution of metal concentrations in the dissolved phases in 2005, at the different sampling stations and sampling depth in the Baltic

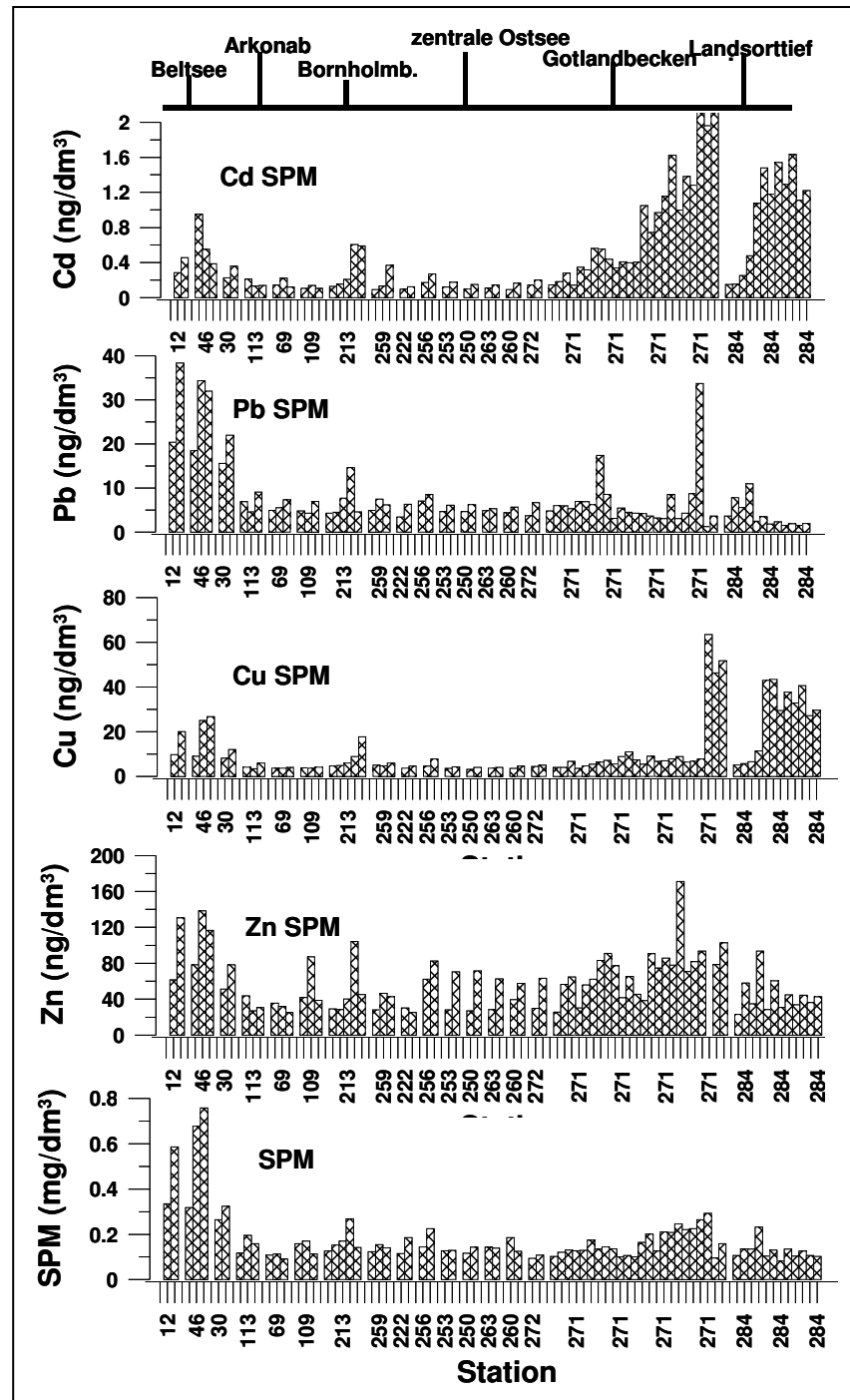


Abb. 4

Verteilungsmuster der Metallkonzentrationen in SPM (volumenbezogen) an den 2005 beprobten Stationen und Tiefen in der Ostsee (siehe Datenanhang)

Fig. 4

Distribution of metal concentrations in the particulate phases (related to the volume) in 2005, at the different sampling stations and sampling depth in the Baltic

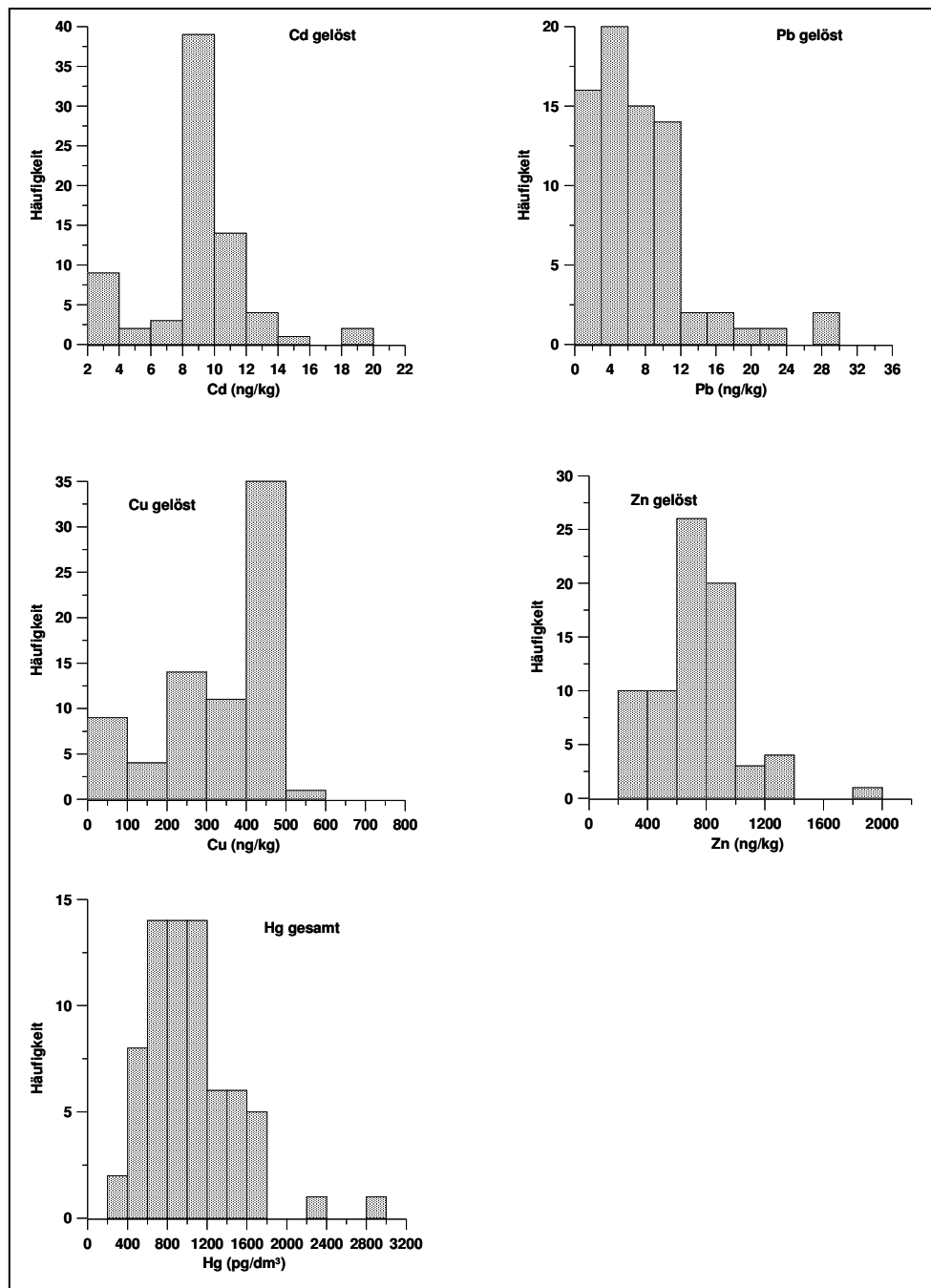


Abb. 5
Häufigkeitsverteilungen der gelösten Metallkonzentrationen in der Ostsee, im Februar 2005

Fig. 5
Frequency distribution of metal concentrations in the dissolved phases in the Baltic; February 2005

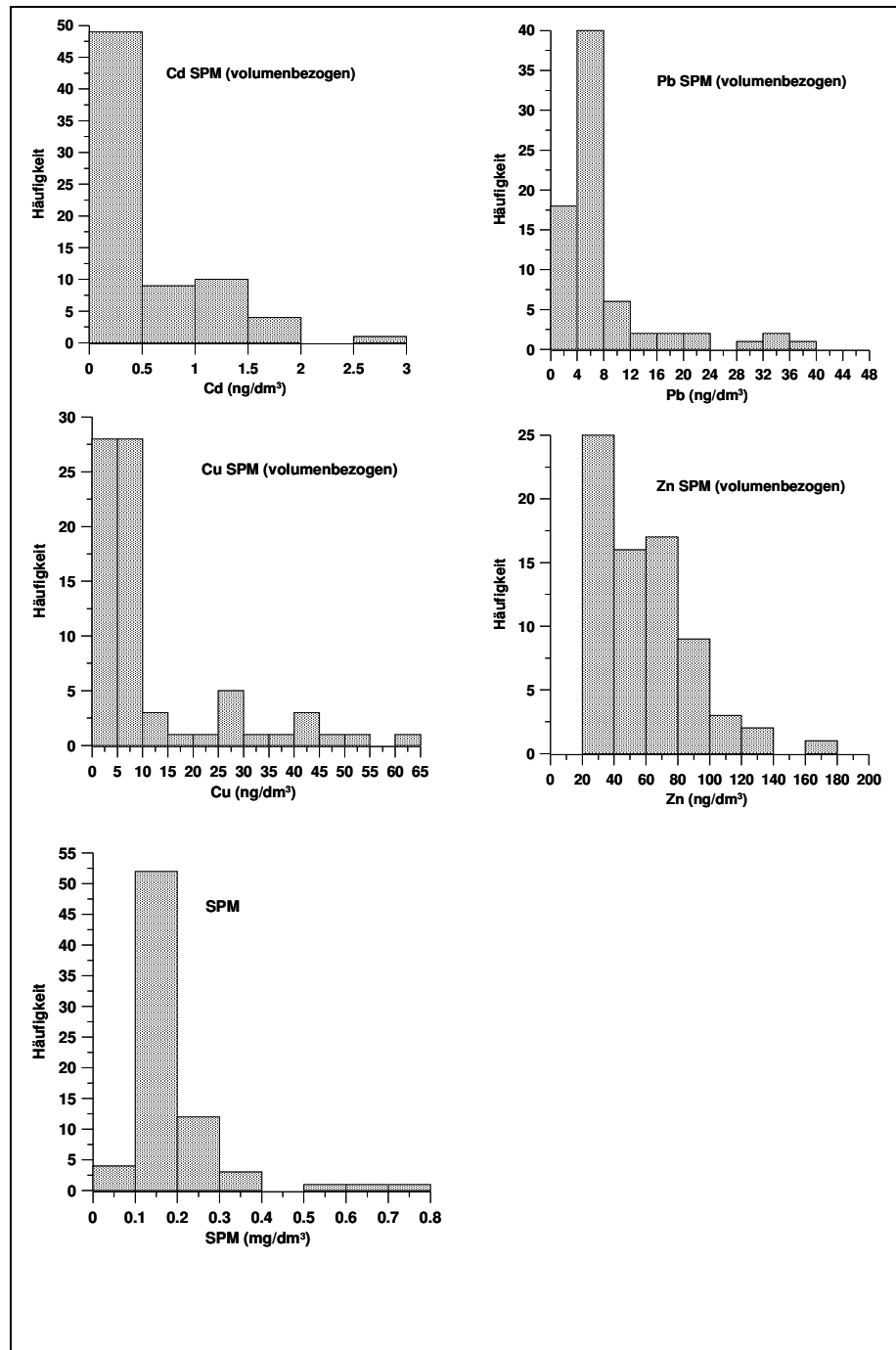


Abb. 6
Häufigkeitsverteilungen der Metallkonzentrationen in der Schwebstoffphase (volumenbezogen) in der Ostsee, Februar 2005.

Fig. 6
Frequency distribution of metal concentrations in the particulate phases (related to the volume) in the Baltic; February 2005.

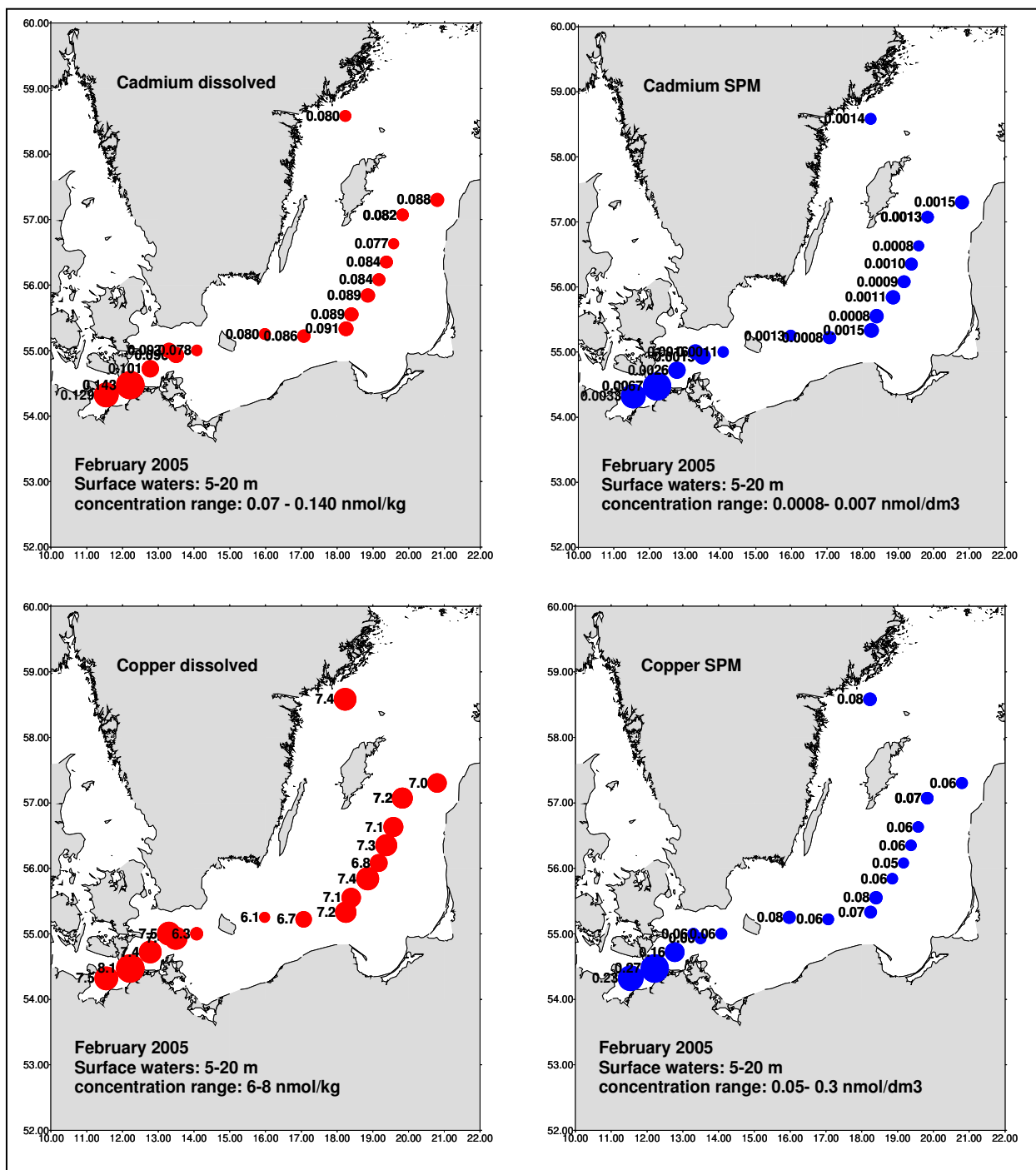


Abb. 7
Verteilung von Cd und Cu in der gelösten und partikulären Phase im Oberflächenwasser der Ostsee

Fig. 7
Distribution of Cd and Cu in the dissolved and particulate phases in surface waters of the Baltic

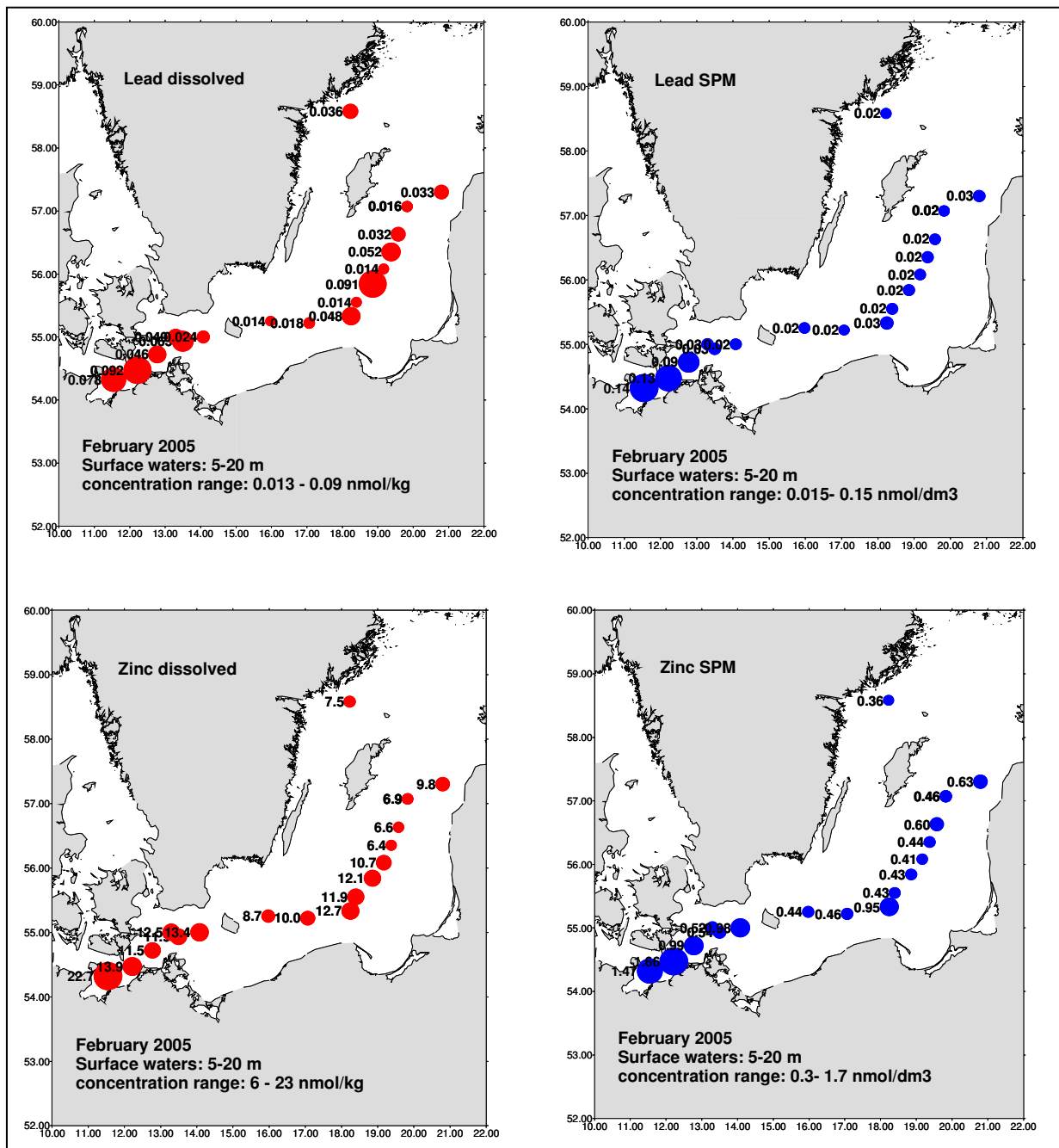


Abb. 8
Verteilung von Pb und Zn in der gelösten und partikulären Phase im Oberflächenwasser der Ostsee

Fig. 8
Distribution of Pb and Zn in the dissolved and particulate phases in surface waters of the Baltic

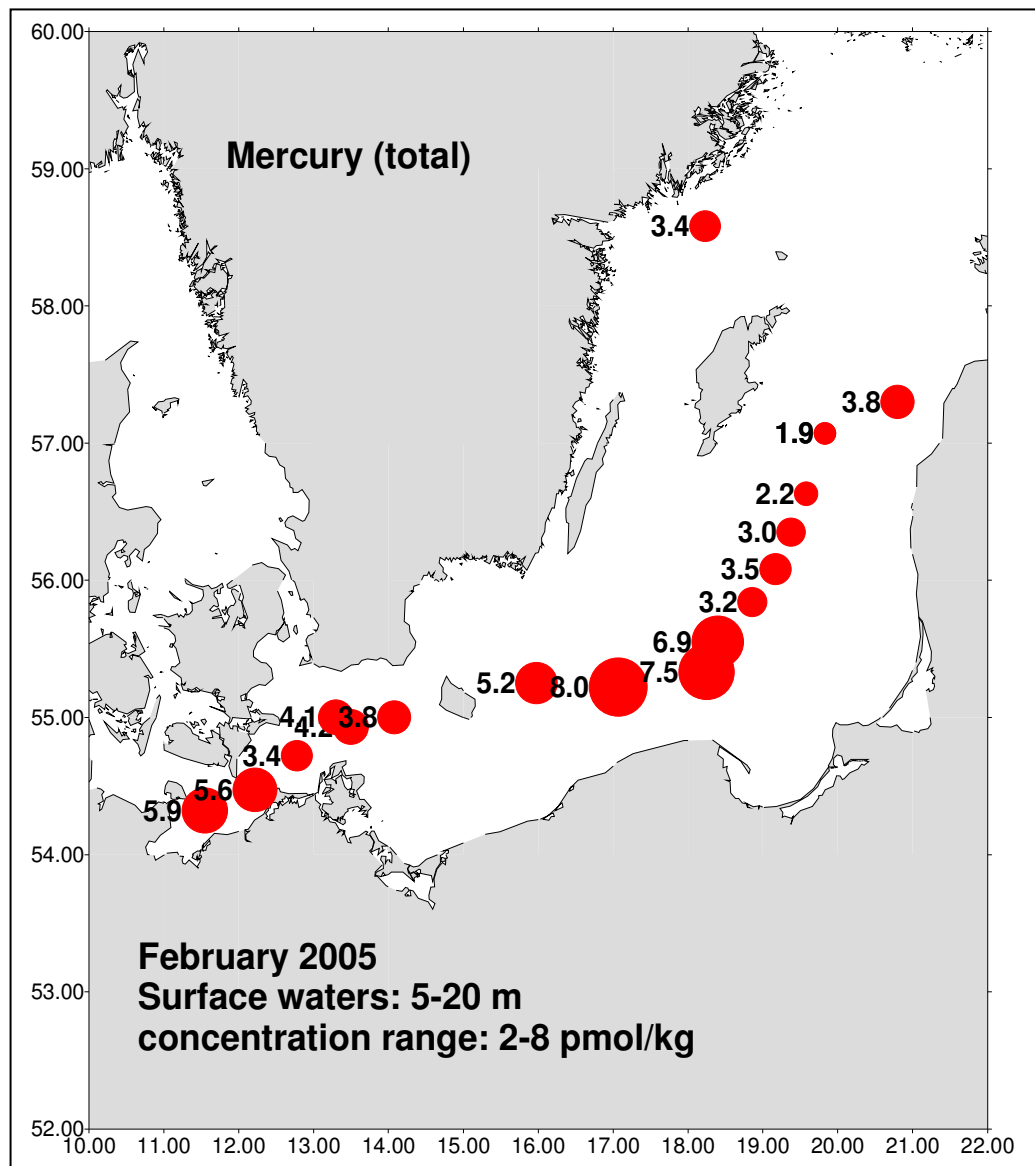


Abb. 9
 Verteilung von Quecksilber (gesamt) Hg (tot) im Oberflächenwasser der Ostsee.

Fig. 9
 Distribution of Hg (total) in surface waters of the Baltic

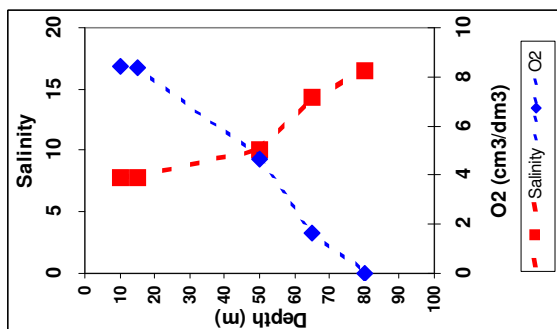
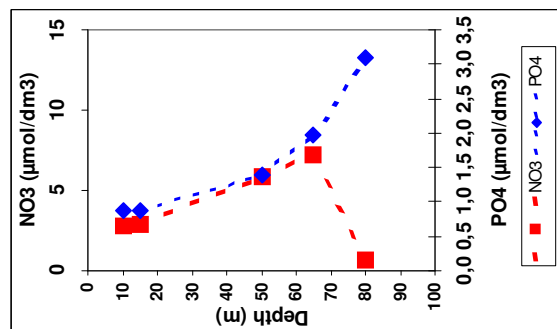
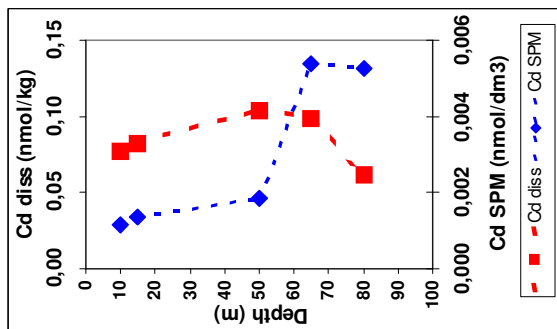
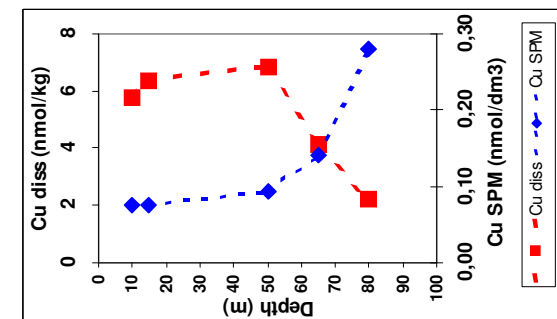


Abb. 10 Station 213:
Vertikale Verteilung von Cd, Pb, Cu und Zn in der gelösten (diss) und partikulären (SPM) Phase, sowie Hg (total) und Mn (SPM) im Bornholm Becken, Februar 2005.

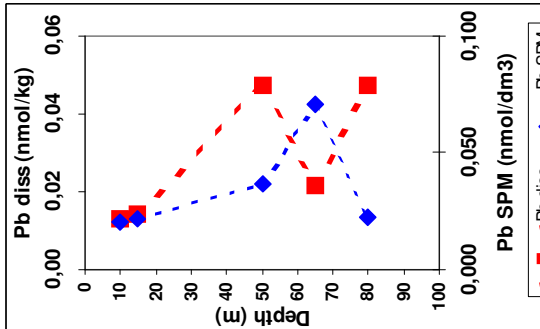
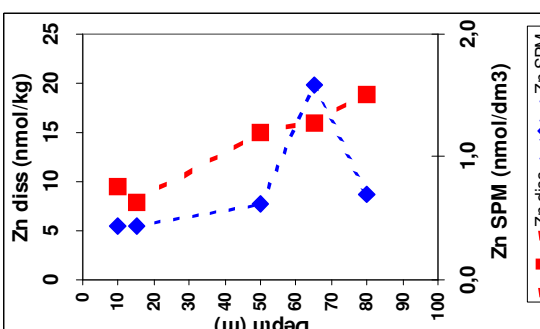
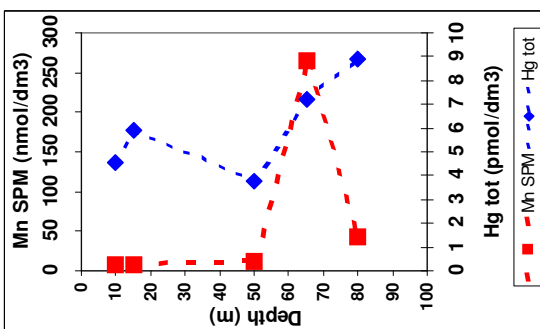


Fig. 10 Station 213:
Vertical distribution of Cd, Pb, Cu and Zn in the dissolved (diss) and particulate (SPM) phases, Hg (total) and Mn (SPM) in the Bornholm Basin, February 2005.

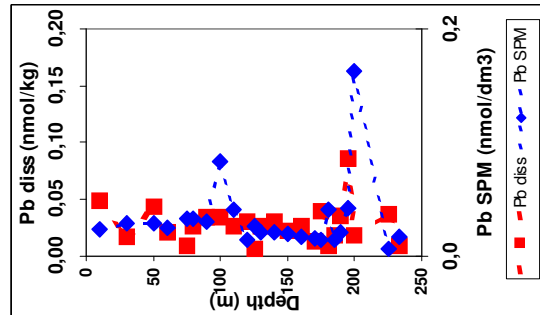
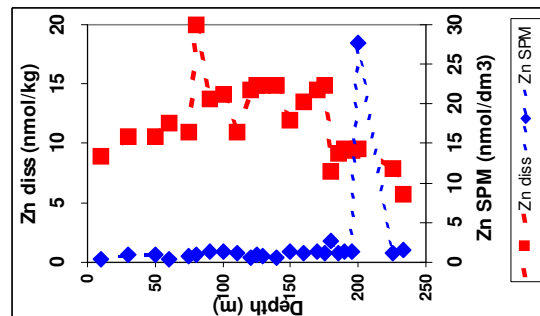
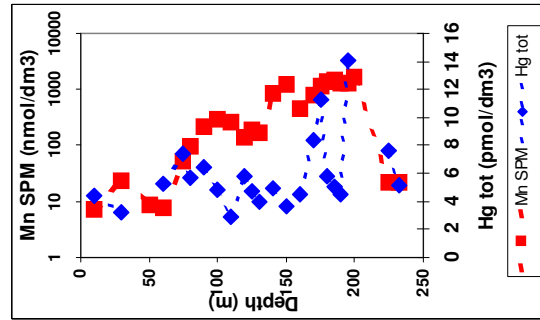
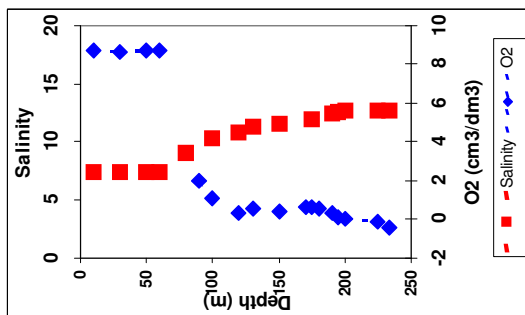
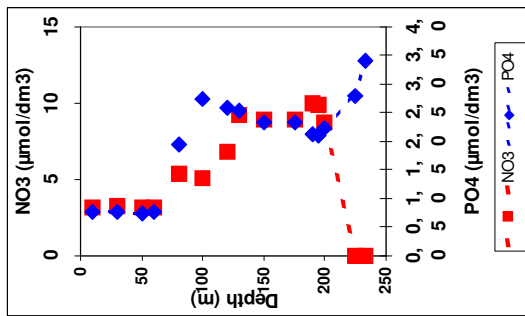
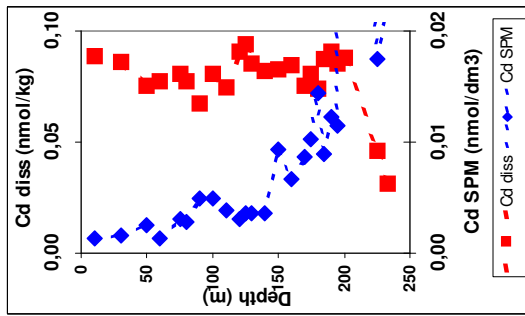
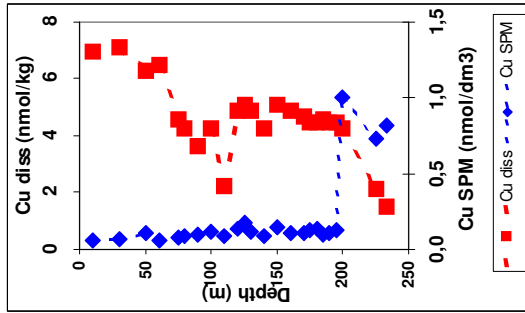


Abb. 11 Station 271:
Vertikale Verteilung von Cd, Pb, Cu und Zn in der gelösten (diss) und partikulären (SPM) Phase, sowie Hg (total) und Mn (SPM) im Gotland Becken, Februar 2005.

Fig. 11 Station 271:
Vertical distribution of Cd, Pb, Cu and Zn in the dissolved (diss) and particulate (SPM) phases, Hg (total) and Mn (SPM) in the Gotland Basin, February 2005.

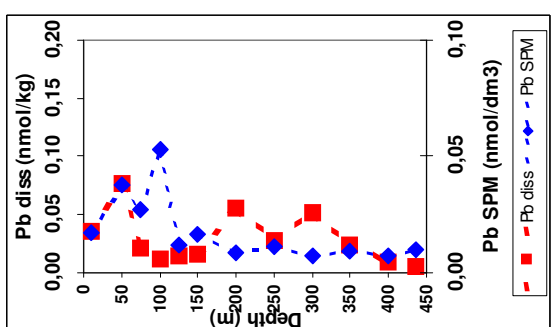
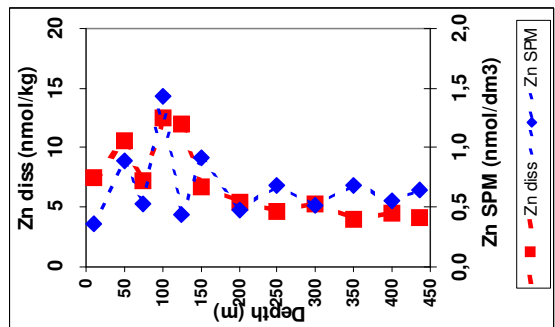
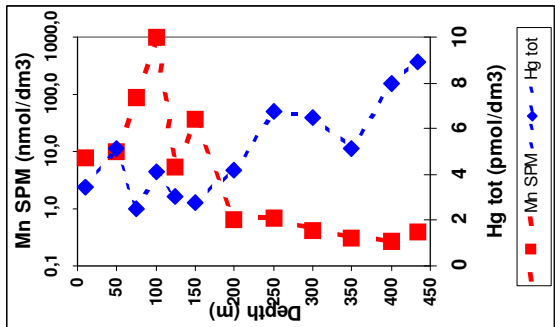
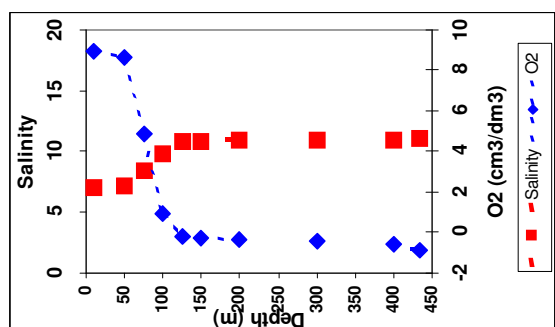
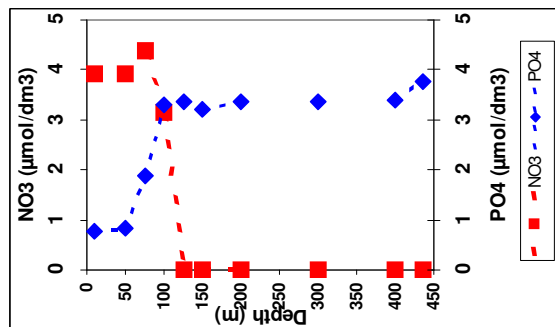
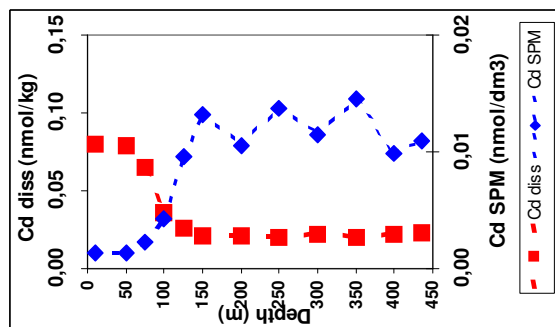
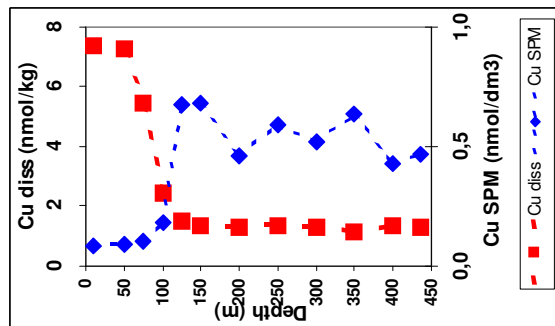


Abb. 12 Station 284:
 Vertikale Verteilung von Cd, Pb, Cu und Zn in der gelösten (diss) und partikulären (SPM) Phase, sowie Hg (total) und Mn (SPM) im Landsort Tief, Februar 2005.

Fig. 12 Station 284:
 Vertical distribution of Cd, Pb, Cu and Zn in the dissolved (diss) and particulate (SPM) phases, Hg (total) and Mn (SPM) in the Landsort Deep, February 2005.

3.2 Spurenmetall – Trends zwischen den Jahren 1993-2005 an Stationen in der westlichen Ostsee und zentralen Ostsee

Westliche Ostsee

In der Mecklenburger Bucht und im Arkonabecken wird in den Wintermonaten im allgemeinen eine völlig durchmischte Wassersäule angetroffen. Aufgrund der mehr oder weniger starken windbedingten bodennahen Durchmischung ist der Wasserkörper in der westlichen Ostsee häufig mit feinkörnigen Sedimenten angereichert. Für die Trendauswertung 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 und seit 2002 fluktuieren die Werte auf einem niedrigeren Niveau zwischen 7-17.

Für **Quecksilber gesamt (Hgtot)** 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. Seit 2001 fluktuieren die Hg gesamt Konzentrationen auf einem sehr niedrigen Niveau, ein Trend ist nicht zu erkennen.

Die Mehrzahl der **Cddiss** 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 Salzwassereinbruch 1994 und dem Ausstrom von Cd-armem Tiefenwasser aus dem Gotlandbecken steht. Bis 1998 ist ein leichter Anstieg, und danach bis 2005 wieder eine tendenzielle Abnahme zu beobachten.

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/dm³. Seit 1997 ist ein ansteigender Trend bis 2000 und dann wiederum eine Abnahme bis 2005 zu erkennen. Der Salzwassereinbruch von Februar 2003 wirkt sich auf die Langzeittrends kaum aus.

Für **Cudiss** wurden 1993 sehr niedrige Konzentrationen in der westlichen Ostsee angetroffen, welches auf den Salzwassereinstrom 1993 und dem damit verbundenen Einstrom von Nordseewasser mit niedrigeren Cudiss um 4,5 nmol/kg zurückgeführt wird. Danach ist bis 1996 wieder eine ansteigende Tendenz zu erkennen, und seit 1997 ist ein abnehmender Trend zu vermerken, dem sich die Konzentrationen von 2005 sehr gut anpassen.

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/dm³, ein Trend ist bis 2005 nicht zu erkennen.

Für **Pbdiss** ist seit 1995 kein Trend zu erkennen. Die „Ausreißer“ 1999 sind auf das Orkantief in der westlichen Ostsee zurückzuführen. Seit 2000 ist eine geringe Abnahme der Konzentrationen zu beobachten, die nicht signifikant ist. Dieses spiegelt sich auch in den **PbSPM** Gehalten 1999 wider, ein Trend ist nicht zu erkennen.

Die **Zndiss** Werte zeigen in den Jahren 1994 und 1995 nach dem Salzwassereinbruch niedrigere Konzentrationen zwischen 5-20 nmol/kg, welches auch hier auf eine Vermischung mit zinkärmerem Nordseewasser hinweist. Zwischen 1996-1998 bewegen sich die Konzentrationen dann auf einem höheren Niveau mit Konzentrationen von bis zu 50 nmol/kg. Seit 1999 ist eine leichte Abnahme bis 2004 zu beobachten, während in 2005 insgesamt eine leichte Zunahme zu verzeichnen ist.

Die **ZnSPM** Gehalte zeigen bis 1996 keine Tendenz. Ab 1996 nimmt der Streubereich der Einzelwerte zu. Die vereinzelt erhöhten Werte in den Jahren 1999 und 2000, die auch bei den Parametern PbSPM, CuSPM, CdSPM und Hgtot registriert wurden, sind auf die Anreicherung von Bodensedimenten in der Wassersäule zurückzuführen, und müssen deshalb als Ausreißer angesehen werden. Zwischen 2003 und 2005 bewegen sich die Konzentrationen auf einem sehr niedrigen Niveau.

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 die Schwermetalldaten nach Oberflächenwasser (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 II (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 Cddiss, Cudiss, Pbdiss und Zndiss und den ansteigenden Trends für gelöstes Mangan unterhalb der Haloclinen an den Stationen in der zentralen Ostsee wieder. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Änderung der Redoxverhältnisse im Tiefenwasser des Gotlandbeckens, und die damit verbundene Elimination der Metalle als schwerlösliche Sulfide einen Einfluß auf die Metallverteilung im Oberflächenwasser hat (Pohl & Hennings 2005).

Dieser „Rückkopplungsmechanismus“ mit abnehmenden Trend ist im Oberflächenwasser der zentralen Ostsee zeitlich versetzt seit 1996 für **Cudiss**, **Pbdiss** und **Zndiss** zu beobachten, während für **Cddiss** eine leicht ansteigende Tendenz bis 1999 und seitdem ein abnehmender Trend zu beobachten ist.

Der Salzwassereinbruch von 2003 wirkt sich in den Jahren 2004 und 2005 im Tiefenwasser des Gotlandbeckens nur geringfügig aus. Der gesamte Eindruck der Trenddarstellung wird in 2004/2005 durch die sehr niedrigen Konzentrationen im Tiefenwasser des Landsorttiefs geprägt, welches durch den Salzwassereinbruch 2003 nicht beeinflusst wurde.

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, sowie den Transport / Export und der Anreicherung in den Oberflächensedimenten zurückzuführen ist. Auffällig ist allerdings, dass die Gehalte der partikulär fixierten Metalle im Tiefenwasser ca. um den Faktor 2 höher sind, eine Ausnahme bildet **PbSPM**.

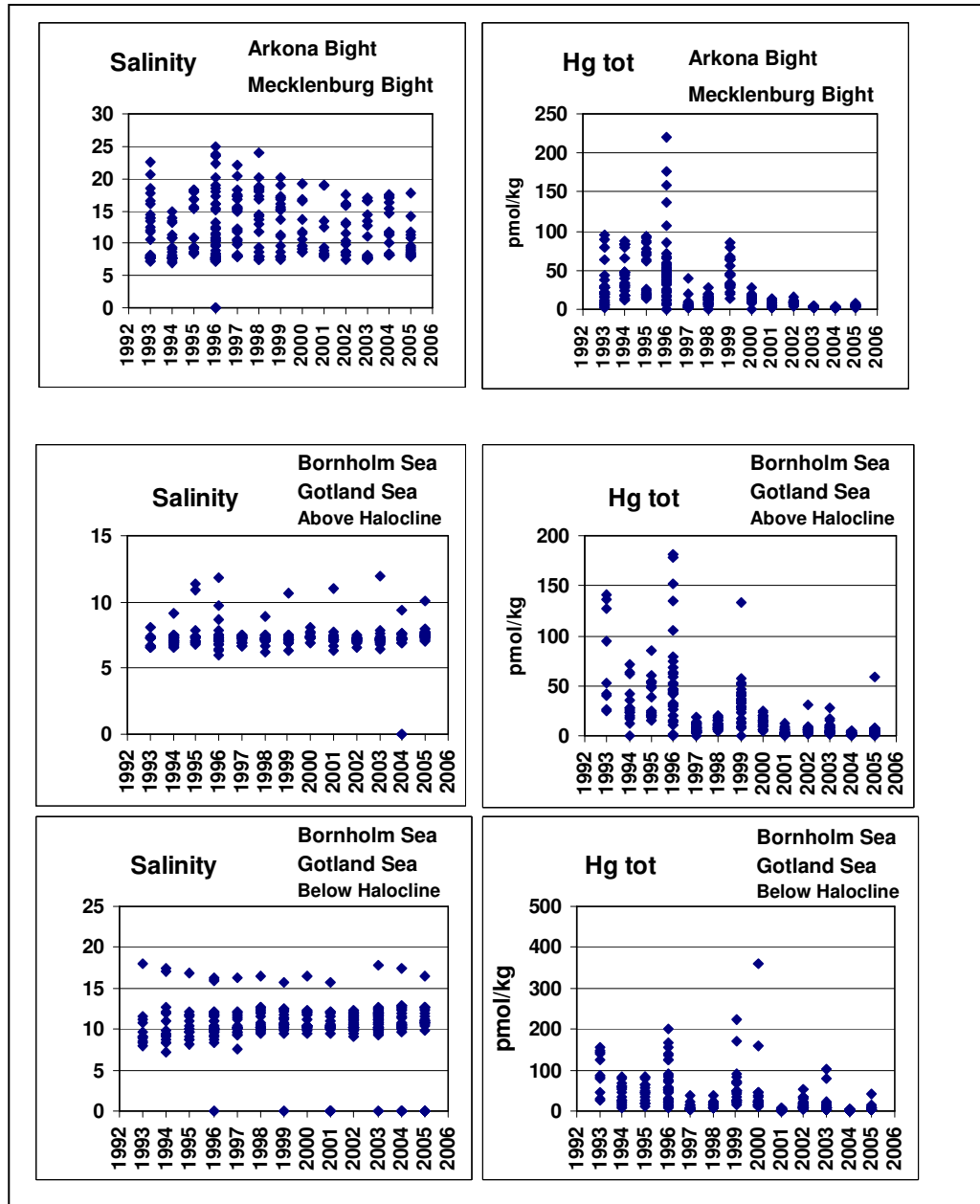


Abb.13

Trends für Salzgehalt und Quecksilber gesamt (Hgtot), in der westlichen Ostsee, sowie oberhalb und unterhalb der Haloclinen in der zentralen Ostsee von 1993-2005

Fig. 13

Analysis of trends for salinity and mercury (Hgtot) in the western Baltic as well as above and below the halocline in the central Baltic between 1993-2005

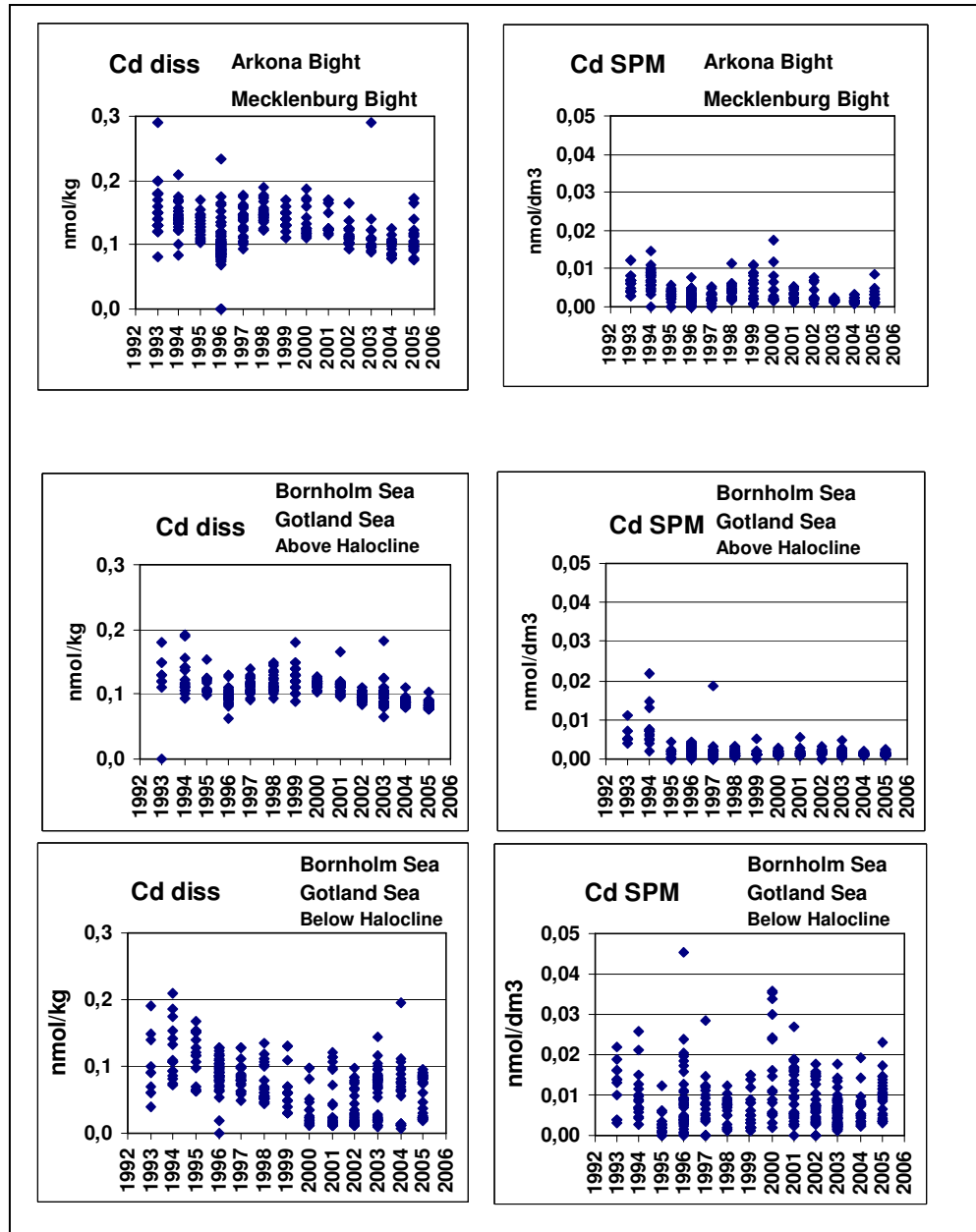


Abb.14

Trends für gelöstes (diss) und partikuläres (SPM) Cadmium, in der westlichen Ostsee, sowie oberhalb und unterhalb der Haloclinen in der zentralen Ostsee von 1993-2005

Fig. 14

Analysis of trends for dissolved (diss) and particulate (SPM) Cd in the western Baltic as well as above and below the halocline in the central Baltic between 1993-2005

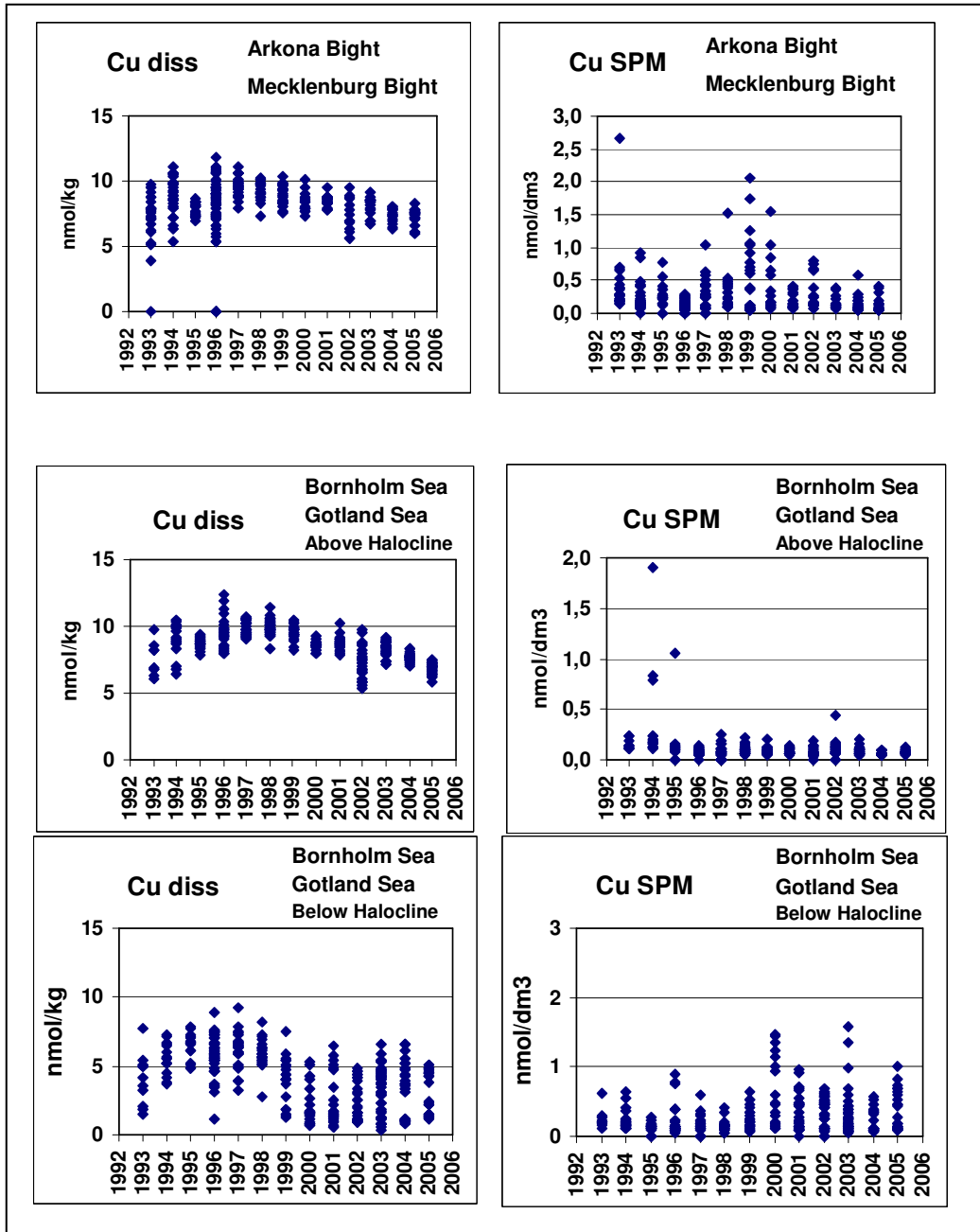


Abb. 15

Trends für gelöstes (diss) und partikuläres (SPM) Kupfer, in der westlichen Ostsee, sowie oberhalb und unterhalb der Haloclinen in der zentralen Ostsee von 1993-2005

Fig. 15

Analysis of trends for dissolved (diss) and particulate (SPM) Cu in the western Baltic as well as above and below the halocline in the central Baltic between 1993-2005

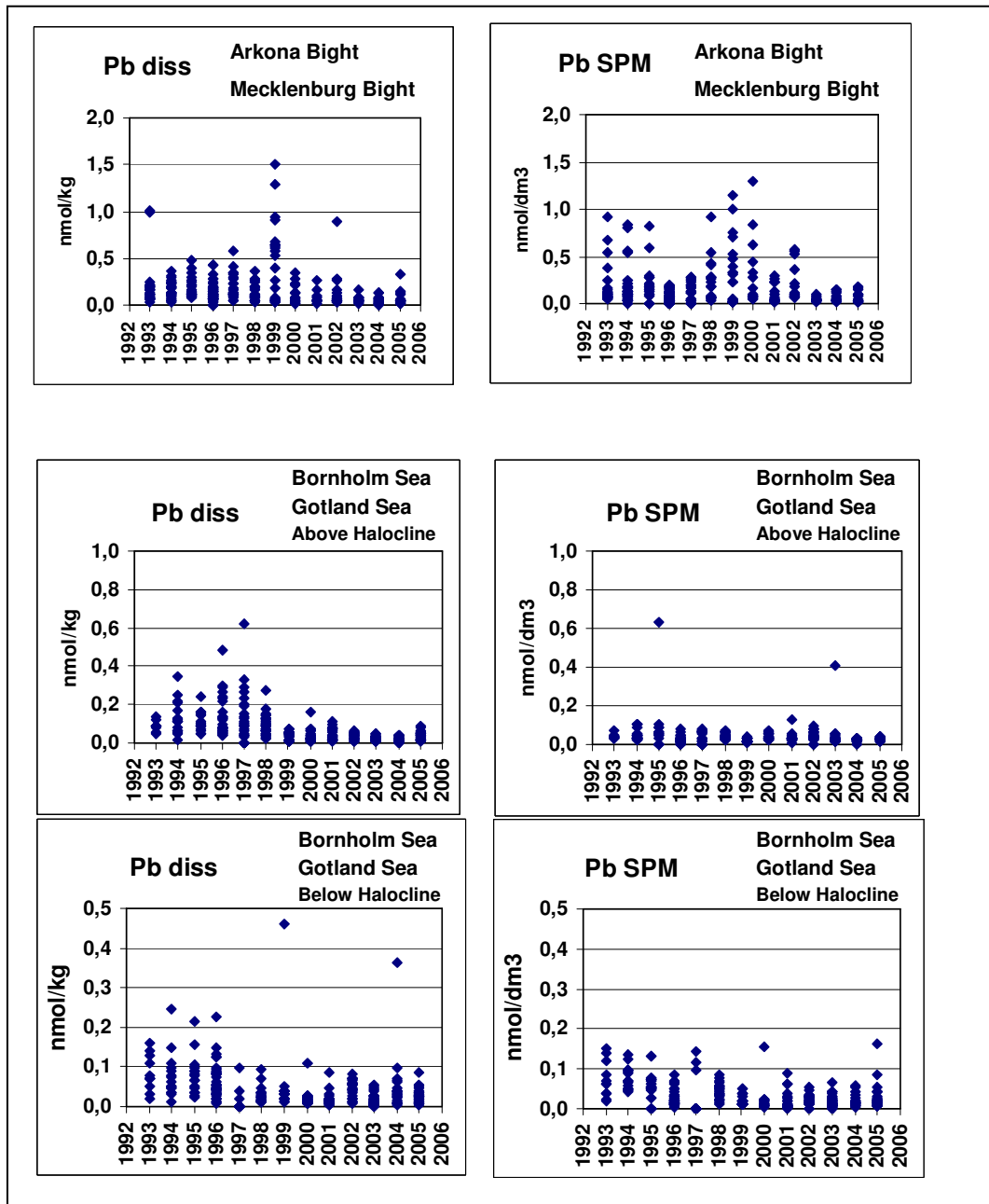


Abb.16

Trends für gelöstes (diss) und partikuläres (SPM) Blei, in der westlichen Ostsee, sowie oberhalb und unterhalb der Haloclinen in der zentralen Ostsee von 1993-2005

Fig. 16

Analysis of trends for dissolved (diss) and particulate (SPM) Pb in the western Baltic as well as above and below the halocline in the central Baltic between 1993-2005

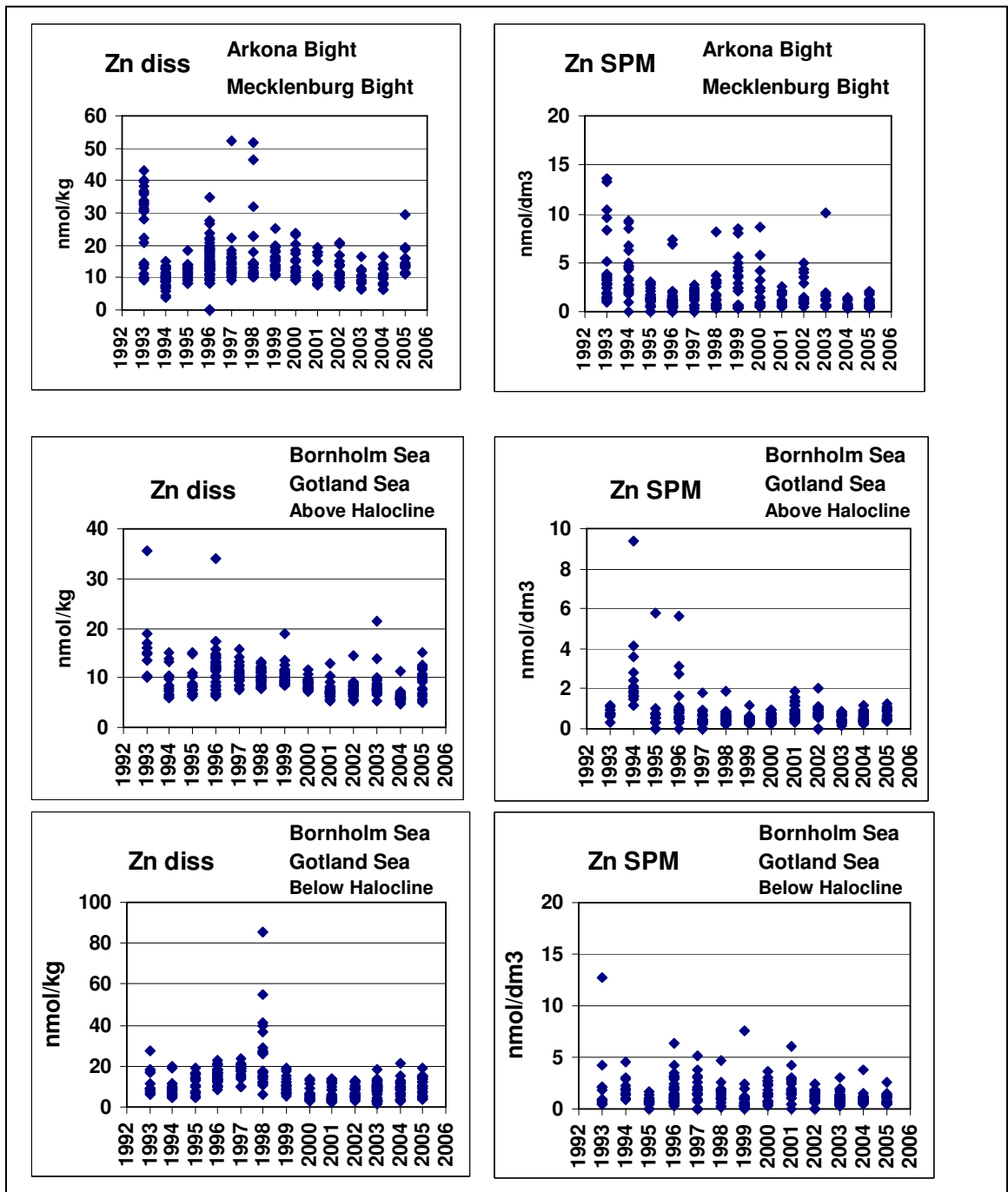


Abb.17

Trends für gelöstes (diss) und partikuläres (SPM) Zink, in der westlichen Ostsee, sowie oberhalb und unterhalb der Haloclinen in der zentralen Ostsee von 1993-2005

Fig. 17

Analysis of trends for dissolved (diss) and particulate (SPM) Zn in the western Baltic as well as above and below the halocline in the central Baltic between 1993-2005

3.3 Ergebnisse aus den Sedimentuntersuchungen

Tab. 9

Ergebnisse der Korngrößenfraktionierung und den Analysen von Kohlenstoff (C), Stickstoff (N) und Schwefel (S).

Table 9

Results of grain size and analyses of carbon (C), nitrogen (N) and sulphur (S)

Proben IOW Nr.	Frakt. < 20 µm					
	< 20 µm (%)	C-org. (%)	C-anorg. (%)	CaCO ₃ (%)	N (%)	S (%)
302 860	85,8	5,03	0,17	1,42	0,61	1,04
302 870	53,5	4,64	0,27	2,25	0,56	0,62
303 440	0,47	5,79	0,53	4,41	0,70	0,40
303 180	70,9	6,61	0,16	1,33	0,80	0,65
303 240	81,5	5,29	0,23	1,92	0,61	0,86

Tab. 10

Konzentrationen von Haupt- und Spurenelementen, einschließlich umweltrelevanter Schwermetalle in der Fraktion < 20 µm

Table 10

Concentrations of major- and trace elements including toxic heavy metals in the sediment fraction < 20 µm

IOW Nr.	Al (%)	Li (ppm)	Fe (%)	Mn (ppm)	Mg (%)	K (%)	Ca (%)	P (ppm)
302 860	5,78	41	3,26	474	1,09	2,14	0,83	1067
302 870	5,56	38	3,10	668	1,10	2,09	1,01	1146
303 440	5,22	34	2,56	803	1,09	2,00	1,53	1053
303 180	5,66	39	3,06	351	1,08	2,08	0,78	1349
303 240	5,73	40	3,57	384	1,20	2,20	0,82	1360

IOW Nr.	Cr (ppm)	Ni (ppm)	Co (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	Cd (ppm)	As (ppm)	Hg (ppb)
302 860	77	33	16	90	186	42	0,98	19	196
302 870	74	33	17	68	119	31	0,43	19	142
303 440	68	37	14	58	135	73	0,52	13	147
303 180	80	36	14	88	148	50	0,63	15	456
303 240	78	35	14	66	123	40	0,38	22	156

Die Tabellen sind so aufgebaut, dass sie sich weitgehend selbst erklären. Deshalb soll im folgenden nur auf einige Besonderheiten hingewiesen und ergänzende Erläuterungen gegeben werden. Die im Jahr 2005 auf den Stationen gemessenen Werte fügen sich generell in das Bild der bislang

vorliegenden Untersuchungen ein. Es sind keine Extremwerte oder unerwartete Abweichungen im Vergleich zu den Vorjahren zu verzeichnen. Die Station im westlichen Arkonabecken (Station K7; # 303 180) (Tab. 9 & 10) fällt wiederum durch die höchsten Hg Konzentrationen des gesamten Untersuchungsgebietes auf. Die folgenden Abbildungen zeigen den zeitlichen Verlauf aller bisher vorliegenden Meßergebnisse für die Schwermetalle auf der Station K7 und im Vergleich dazu auf der Station K4 im östlichen Arkonabecken.

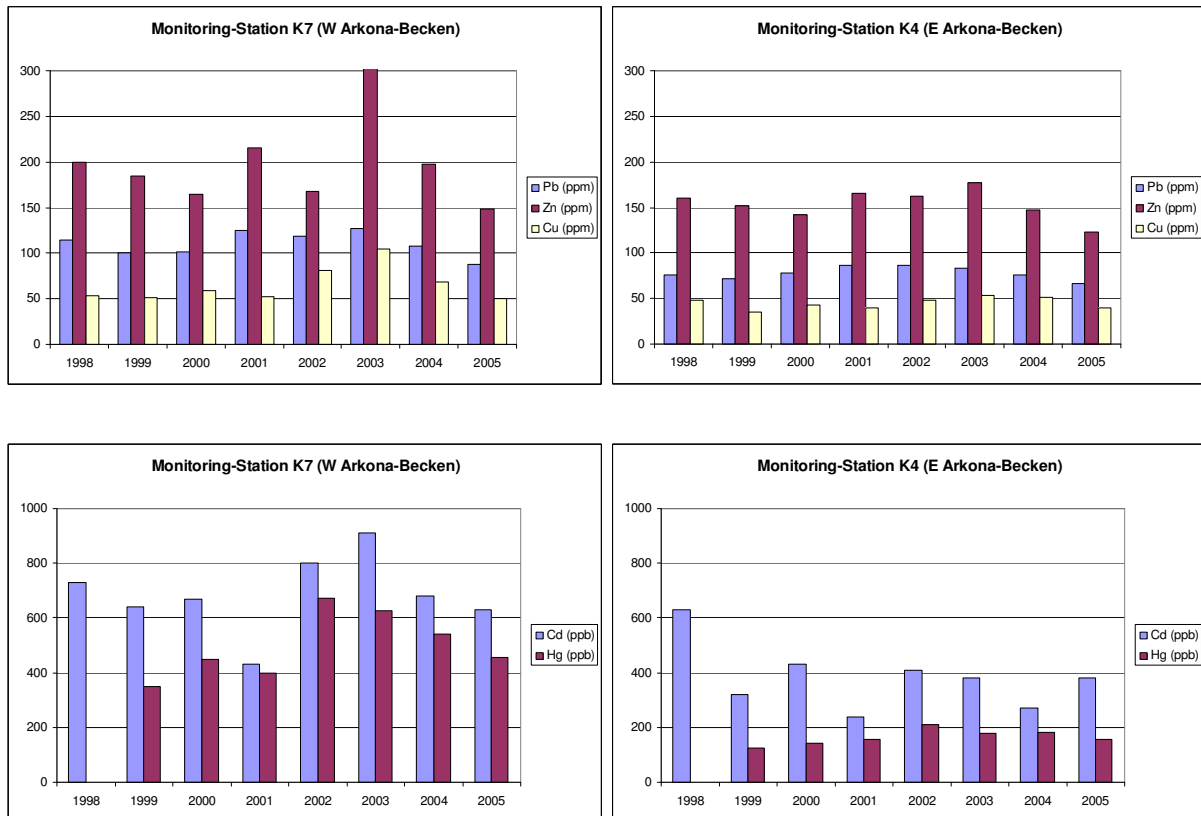
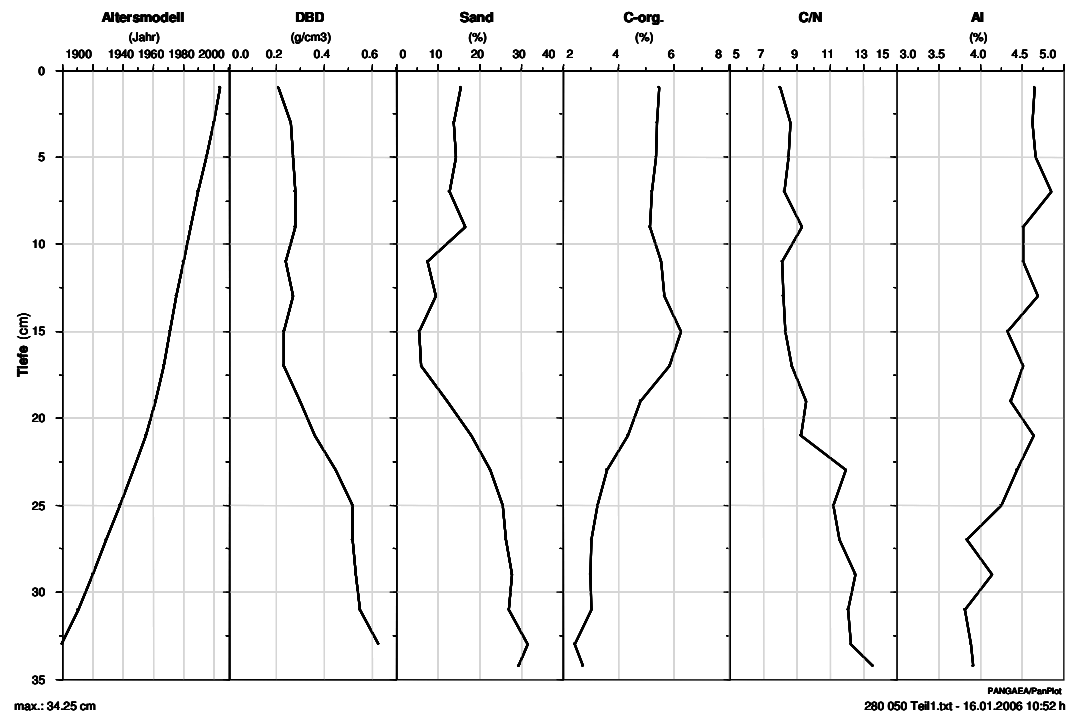


Abb. 18
Zeitlicher Verlauf der Schwermetallgehalte auf den Sediment-Monitoringstation K7 (links) und K4 (rechts) im Arkonabecken

Fig. 18
Time trend of heavy metal contents in the sediments at monitoring-station K7 (left) and K4 (right) in the Arkona Basin

Wie aus den Abbildungen zu ersehen, sind sowohl die zwischenjährlichen Variabilitäten als auch die gemessenen Konzentrationen auf der Station K7 im westlichen Arkonabecken deutlich höher, als auf der Station K4 im östlichen Arkonabecken. Dies fällt insbesondere für die Elemente Cd und Hg auf (unterer Teil der Abbildung). Aus diesem Grund wurde auf der Station K7 bereits im Jahr 2004 ein Sedimentkern entnommen und untersucht. Mit Hilfe der ^{210}Pb -Methode wurden Datierungen vorgenommen um ein Altersmodell zu erstellen, welches die zeitliche Rekonstruktion der Ablagerungen erlaubt. Die Ergebnisse der Untersuchungen des Kerns sind in der Abbildung 19 dargestellt.

Kern 280 050 westl. Arkonabecken, Strn. K7 (BLMP)



Kern 280 050 westl. Arkonabecken, Strn. K7 (BLMP)

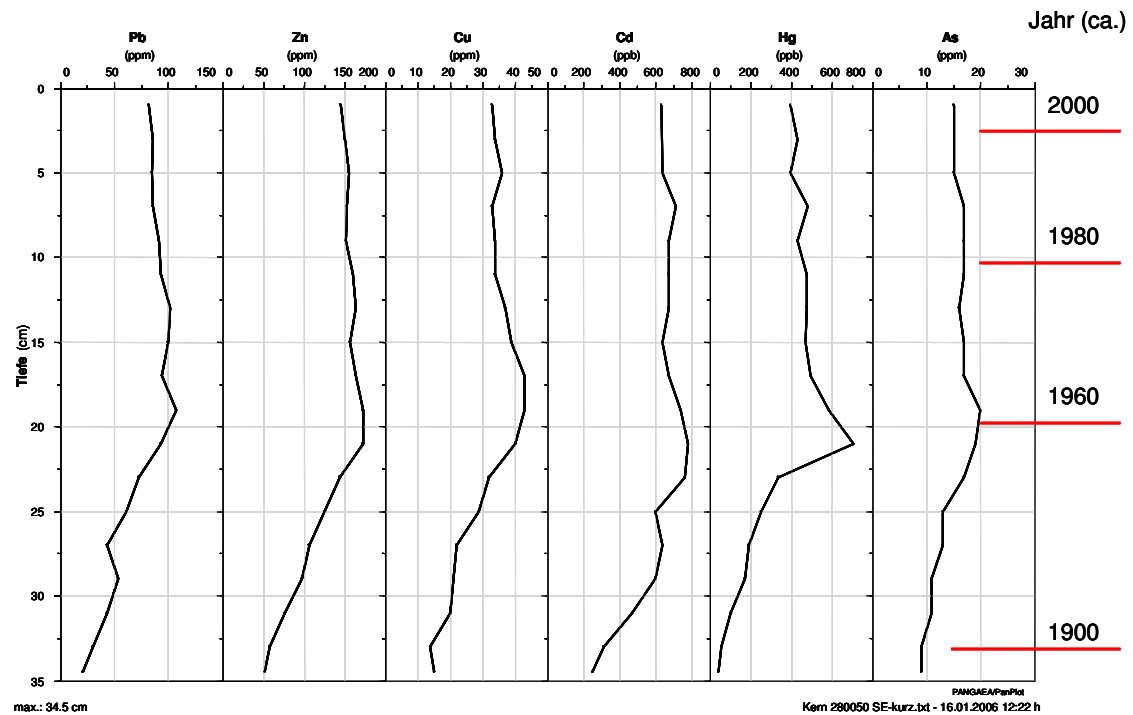


Abb. 19

Altersdatierung und Vertikalprofile sedimentologischer und geochemischer Parameter im Kern 280 050 vom westlichen Arkonabecken (Monitoring-Station K7)

Fig. 19

Age-model and vertical profiles of sedimentological and geochemical parameters in sediment core 280 050 from western Arkona-Basin (monitoring station K7)

Der untersuchte Sedimentkern reflektiert die sedimentologische und umweltgeochemische Entwicklung des Gebietes für eine Zeitspanne von ca. 110 Jahren. Auffällig sind zunächst die Veränderungen im Sandanteil des Kernes und die Zunahme des organischen Kohlenstoffs. Hierin kommen eine in der Tendenz verringerte Hydrodynamik am Boden und eine Zunahme der planktonischen Produktivität des Gebietes zum Ausdruck. Die Metallkurven zeigen den für viele Ostseebecken typischen Verlauf: Ausgehend von den natürlichen Hintergrundwerten ist für die erste Hälfte des 20. Jahrhunderts ein stetiger Anstieg zu verzeichnen. In den 50er und 60er Jahren wird das Maximum der Konzentrationen erreicht und verbleibt auf hohem Niveau mit schwach rückläufiger Tendenz in der jüngeren Vergangenheit. Insbesondere für Hg zeigt sich Ende der 50er Jahre jedoch ein „peak“ der eine nicht dem allgemeinen Trend entsprechende Kontamination vermuten lässt. Ob hier eine Verklappung bzw. Versenkung Hg-haltiger Abfallprodukte vorliegt, kann nicht eindeutig beantwortet werden. Dazu wäre eine noch höhere Kontamination in der betreffenden Sedimentschicht zu erwarten (siehe Lübecker Bucht, Leipe et al., 2005). Allerdings ist es möglich, dass mit der beprobten Kernstation nicht das Zentrum einer solchen Kontamination getroffen wurde.

4. Schlussfolgerungen

Wie in den Vorjahren wies die Schwermetallverteilung im Ostseewasser im Jahr 2005 keine deutlichen oder gesundheitsgefährdenden Veränderungen auf. Regionale Konzentrationserhöhungen wie sie z. B. in den letzten Jahren immer wieder in der westlichen Ostsee zu beobachten sind, werden auf eine windinduzierte, bodennahe Durchmischung und den damit verbundenen sehr variablen Schwebstoffanteil in der Wassersäule zurückgeführt. Durch die Filtration der Proben werden Partikel $>0,4\mu\text{m}$ zurückgehalten, während Partikel $<0,4\mu\text{m}$ das Filter passieren.

Veränderungen, hervorgerufen durch den Salzwassereinbruch von Februar 2003 spiegeln sich vor allem in der vertikalen Schwermetallverteilung im Tiefenwasser des Bornholmbeckens und Gotlandbeckens wieder, während im Landsorttief weiterhin stagnierende Bedingungen anzutreffen sind. Unterhalb der Redoxklinen die 2005 bei ca. 200 m angetroffen wurde, wurde ein Rückgang der gelösten Metallkonzentrationen für Cd_{diss}, Cu_{diss} und Zn_{diss} beobachtet. Weiterhin ist eine leichte Zunahme der CdSPM, CuSPM und ZnSPM mit der Tiefe zu verzeichnen, welches auf den Beginn einer weiteren Stagnationsperiode schließen lässt. Insgesamt gesehen hatte der Salzwassereinbruch 2003 vor allem einen Einfluss auf die Langzeittrends der Metallkonzentrationen im Tiefenwasser der zentralen Ostsee. Insofern bietet sich jetzt ähnlich wie 1995 die außergewöhnliche Chance, die Veränderung der Metallkonzentrationen während der Stabilisierung des anoxischen Tiefenwasserkörpers, sowie deren Rückkopplungsmechanismus auf das Oberflächenwasser während einer weiteren Stagnationsperiode zu beobachten.

Für die Schwermetallsituation in den Sedimenten der westlichen Ostsee (Mecklenburger Bucht bis Arkonabecken) läßt sich nach 8 Jahren Laufzeit des BLMP vorläufig feststellen, daß auf den einzelnen Stationen noch kein deutlicher zeitlicher Trend erkennbar ist. Bei der im BLMP festgelegten Strategie eines stationsbezogenen (punktuellen) Monitorings mit Beprobungsabständen von einem Jahr sind Trendaussagen erst nach längerer Laufzeit des Programms zu erwarten. Untersuchungen zur zeitlichen Rekonstruktion der Schwermetallbelastung an Hand eines datierten Sedimentkernes von der Station K7 im westlichen Arkonabecken haben ergeben, dass eine ungewöhnliche Kontamination, insbesondere für Hg im Zeitraum Ende der 50er Jahre des vorigen Jahrhunderts, vorliegt. Über die möglichen Ursachen dieses „Ereignisses“ können jedoch noch keine präziseren Aussagen getroffen werden.

Danksagung

Unser Dank geht an die Arbeitsgruppe „Allgemeine Chemie“, die uns die Nährstoffdaten zur Verfügung stellte, sowie an die Kapitäne und die Besatzungsmitglieder der Forschungsschiffe „GAUSS“ und „Prof. A. Penck“.

Literatur

DIPPNER, J. W.; POHL, C. (2004): Trends in heavy metal concentrations in the western and central Baltic Sea waters, detected by using empirical orthogonal functions analysis (EOF`s). *J. Mar. Sys.* In press

FEISTEL, R.; NAUSCH, G.; MATTHÄUS, W.; HAGEN, E. (2003b): Temporal and spatial evolution of the Baltic deep water renewal in spring 2003. *Oceanologia*, 45/4, 623-642.

HELCOM (1996): Third periodic assessment of the state of the marine environment of the Baltic Sea, 1989-1993, No. 64B, Background document, pp. 252.

HELCOM (2004): The Fourth Baltic Sea Pollution Load Compilation (PLC-4), *Balt. Sea Environ. Proc.* No. 93, pp. 188.

ICES (2004): Chemical measurements in the Baltic Sea: Guidelines on quality assurance. Ed. by E. Lysiak-Pastuszek and M. Krysell. *ICES Techniques in Marine Environmental Sciences*, No. 35. 149pp, ISBN 87-7482-021-4.

LASS, H. U., PRANDKE, H.; LILJEBLADH, B. (2003): Dissipation in the Baltic Proper during winter stratification. *J. Geophys. Res.* Vol. 108, No. C6, 3187, doi:10.1029/2002JC001401.

LEIPE, T., KERSTEN, M., HEISE, S., POHL, C., WITT, G., LIEHR, G., ZETTLER, M., TAUBER, F. (2005): Ecotoxicity assessment of natural attenuation effects at a historical dumping site in the western Baltic Sea. *Mar. Poll. Bull.* 50/4, 446-459.

NAUSCH, G.; MATTHÄUS, W.; FEISTEL, R. (2003): Hydrographic and hydrochemical conditions in the Gotland Deep area between 1992 and 2003. *Oceanologia*, 45/4, 557-569.

NERETIN, L.; POHL, C.; JOST, G. LEIPE, T.; POLLEHNE, F. (2003): Manganese cycling in the Gotland Deep, Baltic Sea. *Mar. Chem.* 82/3-4; 125-143.

POHL, C. (1994): Meerwasser-Probenahme, Anreicherung und Analytik. In: M. Stoeppler (ed.); *Probenahme und Aufschluß; Springer-Labormanual*, Heidelberg, 181pp.

POHL, C. (1997): Trace Metals (Cu, Pb, Zn, Cd, Al, Li, Fe, Mn, Ni, Co) in Marine Suspended Particulate Matter: An International ICES Intercomparison Exercise. *Accred. Qual. Assur.*; 2 / 1; 2-10.

POHL, C.; HENNINGS, U.; KOBUROK, B.; RICHTER, R. (1998): Ostsee-Monitoring; Die Schwermetall-Situation in der Ostsee im Jahre 1997 inclusive Oderflut. Institut für Ostseeforschung Warnemünde, an der Universität Rostock; 32pp.

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

POHL, C; HENNINGS, U. (1999): The effect of redox processes on the partitioning of Cd, Pb, Cu, and Mn between dissolved and particulate phases in the Baltic Sea. *Mar. Chem.*, 65, 41-53.

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.; SCHMIDT, D.; NAGEL, K.; FREIMANN, P.; HENNINGS, U; JACOBSEN, A.; MICHEL, U.; NEUBAUER-ZIEBARTH, A.; SCHULZ, A. (2001): An intercomparison exercise for trace metal monitoring in oxic and anoxic Baltic waters. *Accreditation and Quality Assurance*; 6; 459-465.

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.

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.

POHL, C.; LÖFFLER, A.; HENNINGS, U. (2004): A sediment trap flux-study for trace metals under seasonal aspects in the stratified Baltic Sea (Gotland Basin; 57°19,20`N; 20°03,00`E). *Mar. Chem.* 84/3-4, 143-160.

POHL, C.; HENNINGS, U. (2005): The coupling of long-term trace metal trends to seasonal diffusive trace metal fluxes at the oxic-anoxic interface in the Gotland Basin; (57°19,20`N; 20°03,00`E) Baltic Sea. *J. Mar. Sys.*, 56, 207-225.

POHL, C.; HENNINGS, U.; Leipe, T (2005) Die Schwermetallsituation in der Ostsee im Jahre 2004. *Marine Science Reports*, No. 62; Baltic Sea Research Institute, Warnemünde, Germany; pp. 117.

Meereswissenschaftliche Berichte

MARINE SCIENCE REPORTS

- 1 (1990) Postel, Lutz:
Die Reaktion des Mesozooplanktons, speziell der Biomasse, auf küstennahen Auftrieb vor Westafrika (The mesozooplankton response to coastal upwelling off West Africa with particular regard to biomass)
- 2 (1990) Nehring, Dietwart:
Die hydrographisch-chemischen Bedingungen in der westlichen und zentralen Ostsee von 1979 bis 1988 – ein Vergleich (Hydrographic and chemical conditions in the western and central Baltic Sea from 1979 to 1988 – a comparison)
Nehring, Dietwart; Matthäus, Wolfgang:
Aktuelle Trends hydrographischer und chemischer Parameter in der Ostsee, 1958 – 1989 (Topical trends of hydrographic and chemical parameters in the Baltic Sea, 1958 – 1989)
- 3 (1990) Zahn, Wolfgang:
Zur numerischen Vorticityanalyse mesoskaler Strom- und Massfelder im Ozean (On numerical vorticity analysis of mesoscale current and mass fields in the ocean)
- 4 (1992) Lemke, Wolfram; Lange, Dieter; Endler, Rudolf (Eds.):
Proceedings of the Second Marine Geological Conference – The Baltic, held in Rostock from October 21 to October 26, 1991
- 5 (1993) Endler, Rudolf; Lackschewitz, Klas (Eds.):
Cruise Report RV "Sonne" Cruise SO82, 1992
- 6 (1993) Kulik, Dmitri A.; Harff, Jan:
Physicochemical modeling of the Baltic Sea water-sediment column: I. Reference ion association models of normative seawater and of Baltic brackish waters at salinities 1–40 ‰, 1 bar total pressure and 0 to 30 C temperature
(system Na–Mg–Ca–K–Sr–Li–Rb–Cl–S–C–Br–F–B–N–Si–P–H–O)
- 7 (1994) Nehring, Dietwart; Matthäus, Wolfgang; Lass, Hans Ulrich; Nausch, Günther:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1993
- 8 (1995) Hagen, Eberhard; John, Hans-Christian:
Hydrographische Schnitte im Ostrandstromsystem vor Portugal und Marokko 1991 - 1992
- 9 (1995) Nehring, Dietwart; Matthäus, Wolfgang; Lass, Hans Ulrich; Nausch, Günther; Nagel, Klaus:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1994
Seifert, Torsten; Kayser, Bernd:
A high resolution spherical grid topography of the Baltic Sea
- 10 (1995) Schmidt, Martin:
Analytical theory and numerical experiments to the forcing of flow at isolated topographic features
- 11 (1995) Kaiser, Wolfgang; Nehring, Dietwart; Breuel, Günter; Wasmund, Norbert; Siegel, Herbert; Witt, Gesine; Kerstan, Eberhard; Sadkowiak, Birgit:
Zeitreihen hydrographischer, chemischer und biologischer Variablen an der Küstenstation Warnemünde (westliche Ostsee)
Schneider, Bernd; Pohl, Christa:

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

- 29 (1998) Matthäus, Wolfgang; Nausch, Günther; Lass, Hans Ulrich; Nagel, Klaus; Siegel, Herbert:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1997
- 30 (1998) Fennel, Katja:
Ein gekoppeltes, dreidimensionales Modell der Nährstoff- und Planktondynamik für die westliche Ostsee
- 31 (1998) Lemke, Wolfram:
Sedimentation und paläogeographische Entwicklung im westlichen Ostseeraum (Mecklenburger Bucht bis Arkonabecken) vom Ende der Weichselvereisung bis zur Litorinatrangression
- 32 (1998) Wasmund, Norbert; Alheit, Jürgen; Pollehne, Falk; Siegel, Herbert; Zettler, Michael L.:
Ergebnisse des Biologischen Monitorings der Ostsee im Jahre 1997 im Vergleich mit bisherigen Untersuchungen
- 33 (1998) Mohrholz, Volker:
Transport- und Vermischungsprozesse in der Pommerschen Bucht
- 34 (1998) Emeis, Kay-Christian; Struck, Ulrich (Editors):
Gotland Basin Experiment (GOBEX) - Status Report on Investigations concerning Benthic Processes, Sediment Formation and Accumulation
- 35 (1999) Matthäus, Wolfgang; Nausch, Günther; Lass, Hans Ulrich; Nagel, Klaus; Siegel, Herbert:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1998
- 36 (1999) Schernewski, Gerald:
Der Stoffhaushalt von Seen: Bedeutung zeitlicher Variabilität und räumlicher Heterogenität von Prozessen sowie des Betrachtungsmaßstabs - eine Analyse am Beispiel eines eutrophen, geschichteten Sees im Einzugsgebiet der Ostsee (Belauer See, Schleswig-Holstein)
- 37 (1999) Wasmund, Norbert; Alheit, Jürgen; Pollehne, Falk; Siegel, Herbert, Zettler, Michael L.:
Der biologische Zustand der Ostsee im Jahre 1998 auf der Basis von Phytoplankton-, Zooplankton- und Zoobenthosuntersuchungen
- 38 (2000) Wasmund, Norbert; Nausch, Günther; Postel, Lutz; Witek, Zbigniew; Zalewski, Mariusz; Gromisz, Sławomira; Łysiak-Pastuszak, Elżbieta; Olenina, Irina; Kavolyte, Rima; Jasinskaite, Aldona; Müller-Karulis, Bärbel; Ikauniece, Anda; Andrushaitis, Andris; Ojaveer, Henn; Kallaste, Kalle; Jaanus, Andres:
Trophic status of coastal and open areas of the south-eastern Baltic Sea based on nutrient and phytoplankton data from 1993 - 1997
- 39 (2000) Matthäus, Wolfgang; Nausch, Günther; Lass, Hans Ulrich; Nagel, Klaus; Siegel, Herbert:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1999
- 40 (2000) Schmidt, Martin; Mohrholz, Volker; Schmidt, Thomas; John, H.-Christian; Weinreben, Stefan; Diesterheft, Henry; Iita, Aina; Filipe, Vianda; Sangolay, Bomba-Bazik; Kreiner, Anja; Hashoongo, Victor; da Silva Neto, Domingos:
Data report of R/V "Poseidon" cruise 250 ANDEX'1999
- 41 (2000) v. Bodungen, Bodo; Dannowski, Ralf; Erbguth, Wilfried; Humborg, Christoph; Mahlburg, Stefan; Müller, Chris; Quast, Joachim; Rudolph, K.-U.; Schernewski, Gerald; Steidl, Jörg; Wallbaum, Volker:
Oder Basin - Baltic Sea Interactions (OBBSI): Endbericht
- 42 (2000) Zettler, Michael L.; Bönsch, Regine; Gosselck, Fritz:
Verbreitung des Makrozoobenthos in der Mecklenburger Bucht (südliche Ostsee) - rezent und im historischen Vergleich

- 43 (2000) Wasmund, Norbert; Alheit, Jürgen; Pollehne, Falk; Siegel, Herbert:
Der biologische Zustand der Ostsee im Jahre 1999 auf der Basis von Phytoplankton- und Zooplanktonuntersuchungen
- 44 (2001) Eichner, Christiane:
Mikrobielle Modifikation der Isotopensignatur des Stickstoffs in marinem partikulären Material
- 45 (2001) Matthäus, Wolfgang; Nausch, Günther (Editors):
The hydrographic-hydrochemical state of the western and central Baltic Sea in 1999/2000 and during the 1990s
- 46 (2001) Wasmund, Norbert; Pollehne, Falk; Postel, Lutz; Siegel, Herbert; Zettler, Michael L.:
Biologische Zustandseinschätzung der Ostsee im Jahre 2000
- 47 (2001) Lass, Hans Ulrich; Mohrholz, Volker; Nausch, Günther; Pohl, Christa; Postel, Lutz; Rüß, Dietmar; Schmidt, Martin; da Silva, Antonio; Wasmund, Norbert:
Data report of R/V "Meteor" cruise 48/3 ANBEN'2000
- 48 (2001) Schöner, Anne Charlotte:
Alkenone in Ostseesedimenten, -schwebstoffen und -algen: Indikatoren für das Paläomilieu?
- 49 (2002) Nausch, Günther; Feistel, Rainer; Lass, Hans Ulrich; Nagel, Klaus; Siegel, Herbert:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2001
Pohl, Christa; Hennings, Ursula:
Ostsee-Monitoring - Die Schwermetall-Situation in der Ostsee im Jahre 2001
- 50 (2002) Manasreh, Riyad:
The general circulation and water masses characteristics in the Gulf of Aqaba and northern Red Sea
- 51 (2002) Wasmund, Norbert; Pollehne, Falk; Postel, Lutz; Siegel, Herbert; Zettler, Michael L.:
Biologische Zustandseinschätzung der Ostsee im Jahre 2001
- 52 (2002) Reißmann, Jan Hinrich:
Integrale Eigenschaften von mesoskaligen Wirbelstrukturen in den tiefen Becken der Ostsee
- 53 (2002) Badewien, Thomas H.:
Horizontaler und vertikaler Sauerstoffaustausch in der Ostsee
- 54 (2003) Fennel, Wolfgang; Hentzsch, Barbara (Herausgeber):
Festschrift zum 65. Geburtstag von Wolfgang Matthäus
- 55 (2003) Nausch, Günther; Feistel, Rainer; Lass, Hans Ulrich; Nagel, Klaus; Siegel, Herbert:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2002
Pohl, Christa; Hennings, Ursula:
Die Schwermetall-Situation in der Ostsee im Jahre 2002
- 56 (2003) Wasmund, Norbert; Pollehne, Falk; Postel, Lutz; Siegel, Herbert; Zettler, Michael L.:
Biologische Zustandseinschätzung der Ostsee im Jahre 2002
- 57 (2004) Schernewski, Gerald; Dolch, Tobias (Editors):
The Oder estuary against the background of the European Water Framework Directive
- 58 (2004) Feistel, Rainer; Nausch, Günther; Matthäus, Wolfgang; Łysiak-Pastuszak, Elżbieta; Seifert, Torsten; Sehested Hansen, Ian; Mohrholz, Volker; Krüger, Siegfried; Buch, Erik; Hagen, Eberhard:
Background Data to the Exceptionally Warm Inflow into the Baltic Sea in late Summer of 2002

- 59 (2004) Nausch, Günther; Feistel, Rainer; Lass, Hans Ulrich; Nagel, Klaus; Siegel, Herbert:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2003
Pohl, Christa; Hennings, Ursula:
Die Schwermetall-Situation in der Ostsee im Jahre 2003
- 60 (2004) Wasmund, Norbert; Pollehne, Falk; Postel, Lutz; Siegel, Herbert; Zettler, Michael L.:
Biologische Zustandseinschätzung der Ostsee im Jahre 2003
- 61 (2004) Petry, Carolin:
Mikrobieller Abbau von partikulärem organischen Material in der tiefen Wassersäule
- 62 (2005) Nausch, Günther; Feistel, Rainer; Lass, Hans Ulrich; Nagel, Klaus; Siegel, Herbert:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2004
Pohl, Christa; Hennings, Ursula; Leipe, Thomas
Die Schwermetall-Situation in der Ostsee im Jahre 2004
- 63 (2005) Umlauf, Lars; Burchard, Hans; Bolding, Karsten:
GOTM – Scientific Documentation. Version 3.2
- 64 (2005) Wasmund, Norbert; Pollehne, Falk; Postel, Lutz; Siegel, Herbert; Zettler, Michael L.:
Biologische Zustandseinschätzung der Ostsee im Jahre 2004
- 65 (2006) Matthäus, Wolfgang:
The history of investigation of salt water inflows into the Baltic Sea
- from the early beginning to recent results
- 66 (2006) Nausch, Günther; Feistel, Rainer; Lass, Hans Ulrich; Nagel, Klaus; Siegel, Herbert:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2005
Pohl, Christa; Hennings, Ursula:
Die Schwermetall-Situation in der Ostsee im Jahre 2005