

Meereswissenschaftliche Berichte
MARINE SCIENCE REPORTS

No. 72

Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2007

von

Günther Nausch, Rainer Feistel, Lars Umlauf, Klaus Nagel, Herbert Siegel

S. 1 - 93

Die Schwermetallsituation in der Ostsee im Jahre 2007

von

Christa Pohl, Ursula Hennings, Thomas Leipe

S. 95 - 129

Leibniz Institut für Ostseeforschung
Warnemünde
2008

NAUSCH, G.; FEISTEL, R.; UMLAUF, L.; NAGEL, K.; SIEGEL, H.:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2007

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Abstract	3
Kurzfassung	3
1. Einleitung	4
2. Meteorologische Bedingungen	7
3. Wasseraustausch durch die Ostseezugänge/ Beobachtungen an der Messplattform „Darßer Schwelle“	18
3.1 Wassertemperatur, Salzgehalt und Sauerstoffgehalt	18
3.2 Strömung	25
4. Beobachtungen an der Bojenstation „Arkonabecken“	28
5. Beobachtungen an der Bojenstation „Oder- Bank“	32
6. Hydrographisch- hydrochemische Bedingungen	36
6.1. Wassertemperatur	36
6.1.1 Wasseroberflächentemperatur	36
6.1.2 Vertikalverteilung der Wassertemperatur	43
6.2 Salzgehalt	49
6.3 Sauerstoff und Schwefelwasserstoff	54
6.4 Anorganische Nährstoffe	60
6.5 Natürliche organische Verbindungen	75
Zusammenfassung	85
Summary	86
Danksagung	88
Literaturverzeichnis	89

Abstract

The article summarizes the hydrographic-hydrochemical conditions in the western and central Baltic Sea in 2007. 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 2007, three barotropic inflow events carrying more than 200 km³ occurred in January, March and November, two additional events with less than 150 km³ took place in June/July and August/September. Additionally, effects of baroclinic inflows from summer 2006 could be seen. Especially the near-bottom layer region from the Bornholm Basin to the Gdansk Deep was ventilated repeatedly. The different inflow events could only shortly improve the oxygen situation in the eastern Gotland Basin. At the end of 2007 the water column of the Gotland Deep between 137 m and the bottom (239 m) was completely anoxic. The annual mean for phosphate at 200 m water depth of 4.03 µmol/l was in the same range as in 2006, nitrate was not existent under anoxic conditions and ammonium concentrations increased further from 1.7 µmol/l (2005) over 9.2 µmol/l (2006) to 11.1 µmol/l in 2007. In the western Gotland Basin the stagnation period prevailed throughout the whole year.

Noteworthy are also the high phosphate winter concentrations in all sea areas. Together with relatively low winter nitrate concentrations a shift took place in the N:P-ratio. In general, N:P-ratios in the mixed winter surface layer are far away from the classical Redfield ratio of 16:1. Over a longer period of time, a stable N:P- ratio of 7:1 - 9:1 had been established. In the last five years, a remarkable decrease was observed. In 2007, the N:P ratio ranged between 4.3:1 in the Bornholm Basin and 6.6:1 in the Landsort Deep area.

Kurzfassung

Die Arbeit beschreibt die hydrographisch-hydrochemischen Bedingungen in der westlichen und zentralen Ostsee für das Jahr 2007. 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 dargestellt.

2007 fanden drei barotrope Einstromereignisse mit geschätzten Volumen um 200 km³ in der Ostsee statt: Ende Januar, Anfang März und Anfang November, zwei weitere mit jeweils weniger als 150 km³ Volumen im Juni/July und im August/September. Zusätzlich konnten die Effekte barokliner Einströme vom Sommer 2006 beobachtet werden. Insbesondere wurde 2007 die bodennahe Schicht im Raum vom Bornholmbecken bis zum Danziger Tief mehrfach belüftet. Im östlichen Gotlandbecken konnten die verschiedenen Einströme die Sauerstoffsituation nur kurzzeitig beeinflussen. Ende 2007 war im Bereich des Gotlandtiefs die Wassersäule zwischen 137 m und dem Boden (239 m) anoxisch. Der Jahresmittelwert für Phosphat in 200 m Wassertiefe von 4,03 µmol/l lag nur wenig unter dem des Vorjahres, Nitrat war unter den anoxischen Bedingungen nicht vorhanden, die Ammoniumkonzentrationen stiegen allmählich an. Sie erhöhten sich von 1,7 µmol/l (2005) über 9,2 µmol/l (2006) auf 11,1 µmol/l im Jahr 2007. Im westlichen Gotlandbecken hielt die Stagnationsperiode durchgängig an.

Beachtenswert sind außerdem die hohen Winterphosphatkonzentrationen in allen Seegebieten. Verbunden mit niedrigen Winternitratkonzentrationen führt dies zu Verschiebungen des N:P-Verhältnisses. Generell sind die N:P - Verhältnisse in der winterlichen Oberflächenschicht weit entfernt vom klassischen Redfield- Verhältnis von 16:1. Über längere Zeiträume wurde ein recht stabiles N:P - Verhältnis von 7-9:1 ermittelt. In den letzten 5 Jahren kam es zu einer deutlichen Abnahme der N:P - Verhältnisse. Im Jahr 2007 wurden Werte zwischen 4,3:1 im Bornholmbecken und 6,6:1 im Bereich des Landsorttiefs ermittelt.

1. Einleitung

Die Einschätzung des hydrographisch-hydrochemischen Zustandes der Ostsee im Jahre 2007 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 2007 wurden fünf reguläre Monitoring-Fahrten durchgeführt, die alle vier Jahreszeiten sowie zusätzliche Beobachtungen im März/April umfassten. Die Zustandseinschätzung basiert auf den Daten, die im Rahmen dieser Überwachungsfahrten gewonnen wurden sowie auf Ergebnissen anderer Forschungsarbeiten des IOW. Ausgewählte Daten von Forschungseinrichtungen anderer Ostseeanliegerstaaten, insbesondere des *Schwedischen Meteorologischen und Hydrologischen Instituts* (SMHI) und der *Maritimen Abteilung des Polnischen Instituts für Meteorologie und Wasserwirtschaft* (IMGW) wurden 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. (2003) zusammengestellt.

Grundlage des hydrographisch-hydrochemischen Standard-Messprogramms, das mit den Forschungsschiffen „Alkor“ (Februar, Oktober/November) und „Professor Albrecht Penck“ (März/April, Mai, Juli/August) 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 Schwellen (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 sowie der Sauerstoffgehalt in verschiedenen Tiefen registriert:

DS: ab Aug. 2005	6 Horizonte T + S	+ 2 Horizonte O ₂
AB: ab Sep. 2006	8 Horizonte T + S	+ 2 Horizonte O ₂
OB: 2005-2007	2 Horizonte T + S	+ 2 Horizonte O ₂

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“ liefern jeweils ein selbst registrierender akustischer Doppler-Profil-Strömungsmesser (ADCP). Die ADCP an der DS und bei der AB befinden sich jeweils ca. 200 m von der Hauptstation entfernt am Boden, geschützt in einem „Trawl Resistant Bottom Mount“ (TRBM) mit Releaser. Sie werden im Echtzeitmodus betrieben, d.h. sie geben jede Stunde einmal ihre Messwerte an die Hauptstation zur Speicherung und Satellitenübertragung ab, an der DS über Kabel, bei der AB über eine akustische Datenverbindung. Die in den Geräten selbst registrierten Daten werden in der Regel zur Qualitätssicherung und für Servicezwecke bei den 1 - 2 mal im Jahr stattfindenden Wartungsmaßnahmen im Nachhinein ausgelesen.

Die Überwachung der Wasseroberflächentemperatur der gesamten Ostsee erfolgte anhand von Einzelszenen und mittleren monatlichen Verteilungen, ermittelt aus NOAA-AVHRR-Wettersatellitendaten. 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, 2006). Die Einschätzung des Jahres 2007 wurde im Vergleich zu den Mittelwerten des Untersuchungszeitraumes 1990-2006 und zu extremen Jahren vorgenommen.

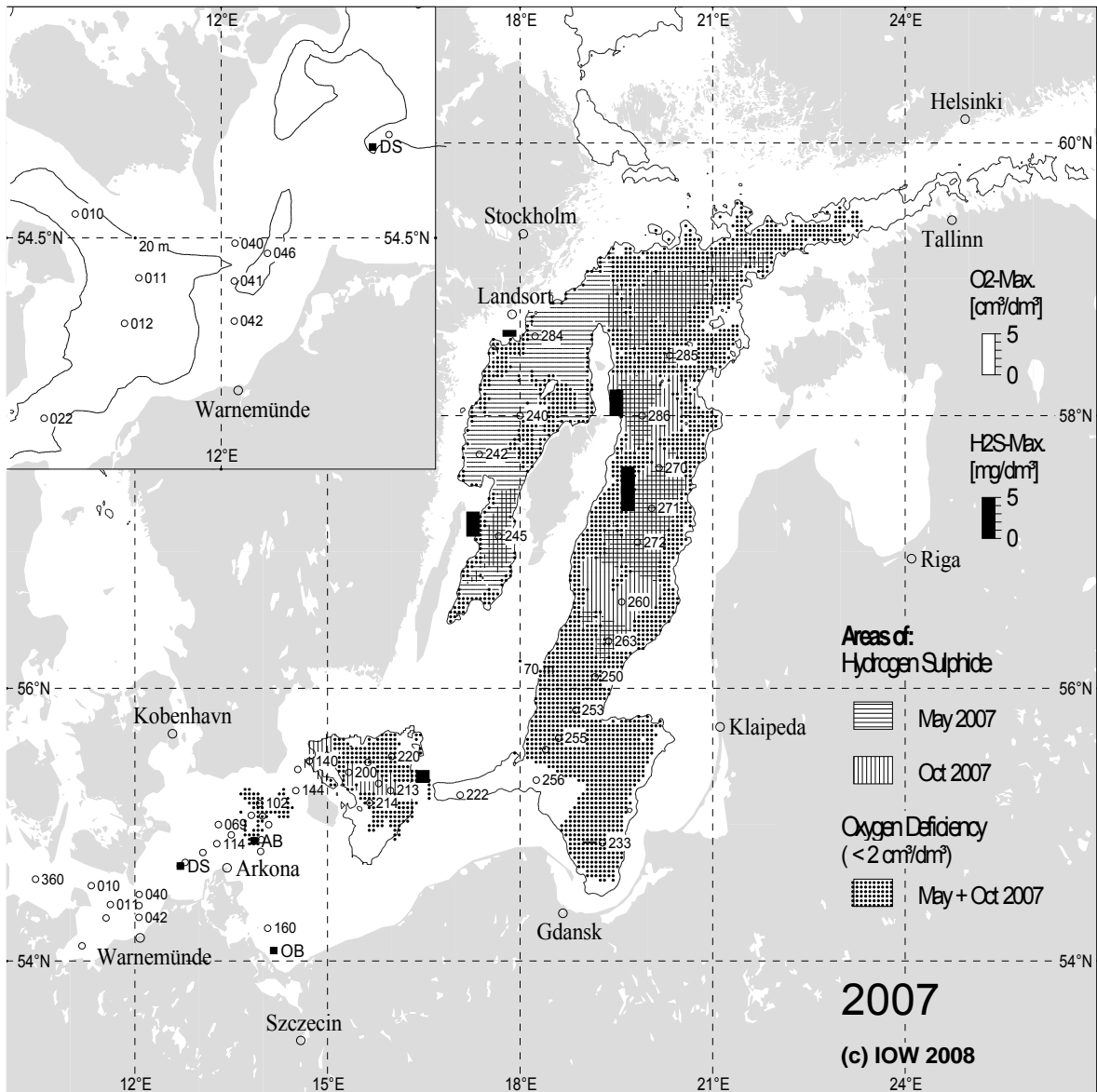


Abb. 1

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 2007; 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 2007. Bars show the maximum oxygen and hydrogen sulphide concentrations of this layer in 2007; the figure contains additionally the 70 m – depth line resp. 20 m – depth line (small picture)

2. Meteorologische Bedingungen

Der Witterungsverlauf des Jahres 2007 in der südlichen Ostsee kann durch Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD, 2008b) 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 2006/2007 war mild und kurz, mit der Kältesumme 10,3 K d von Warnemünde (Tab. 2) der mildeste seit Beginn der Vergleichsdaten im Jahr 1948, mit einem Wert von nur 10% des langjährigen Mittels über fast 60 Jahre. Damit rangiert er vor 1999/2000 als dem zweitmildesten Winter mit 10,7 K d, und 1989/1990 mit 15,0 K d. Er lag nach finnischen Angaben (FIMR, 2007) mit einer maximalen Eisbedeckung der Ostsee von 139 000 km² am 23. Februar (Abb. 18) bei 65% des langjährigen Mittelwerts von 214 000 km² seit 1720. Dieser Wert ist nicht so außergewöhnlich niedrig wie die Kältesumme in Warnemünde; allein von den letzten 10 Jahren wiesen 5 eine geringere Eisbedeckung auf, in den letzten 20 Jahren waren es 11. Die Eisbildung in der Bottenwiek begann normal im November, ging jedoch Ende November und Anfang Dezember wieder zurück. Erst Ende Januar wurde es dauerhaft kälter, Quark und Bottenwiek froren bis zum 8. Februar vollständig zu, fast einen Monat später als im Durchschnitt. Der 30-jährige Mittelwert der Eisbedeckung sinkt durch den Winter 2006/2007 weiter unter seinen sehr tiefen Wert der letzten Jahre (Abb. 2). Eine Bedeckung von etwa 33% der Gesamtfläche der Ostsee von 415 266 km² fällt in den Bereich 20% - 40%. Dieser Bedeckungsgrad wird im langfristigen Mittel mit etwa 43% der Winter am häufigsten 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, 2008).

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 war im Jahr 2007 gleich Null. Lediglich in der inneren Schlei und in Küstennähe einiger geschützt liegenden Bereiche der Vorpommerschen Boddengewässer bildete sich für einige wenige Tage Eis in unbedeutendem Umfang (SCHMELZER, 2007). Die Kältesummen von Warnemünde der Wintermonate 2006/2007 (Tab. 2) waren unterdurchschnittlich in allen Monaten. Die Eissaison der deutschen Ostseeküste war ungewöhnlich kurz, begann im Gegensatz zum mittleren Termin 28. November erst am 8. Januar 2007 (SCHMELZER, 2007).

Das Jahr 2007 war geprägt von häufigen Blockierungslagen über Deutschland und dem Ostseeraum, mit reduzierten Westwindlagen und häufigeren und anhaltenden Süd- oder Nordwinden, wobei aber die Westwinde stark und die meridionalen schwach ausfielen (Abb. 3a). So waren Januar, März und April extrem warm, nur der Oktober fiel geringfügig zu kalt aus. Die Niederschläge schwankten extrem zwischen dem außergewöhnlich trockenen April mit nur etwa 20% des normalen Niederschlags, und den nassen Monaten Juni und Juli mit fast 300%. Im Jahresmittel war das Jahr in Warnemünde in Bezug auf die Wärmesummen nur wenig wärmer als im langjährigen Durchschnitt, weil erhöhte Mitteltemperaturen unterhalb von 16°C durch dieses Maß nicht erfasst werden.. Deutschlandweit wurde das Jahr 2007 wegen des milden Winters und

warmen Frühjahrs das zweitwärmste Jahr seit Beginn des 20. Jahrhunderts, knapp hinter 2000 und vor 1994. 2007 war ein Jahr mit Orkan, Dürre, Wärme und viel Regen (DWD 2008b).

Im September wurde die Sahelzone in Ostafrika von Regen überschwemmt, vermutlich verbunden mit einem La-Nina-Ereignis im Pazifik, das sich ab Mitte 2007 entwickelte und seitdem verstärkte (NOAA, 2008). Zur gleichen Zeit zogen die Hurrikane vom Atlantik auffallend oft südlich über Yucatan nach Zentralmexiko, wie „Dean“, „Henriette“ oder „Lorenzo“ am 28.9.2007. Für die Eisschmelze von Grönland war 2007 mit 500 km³ Eisverlust ein „schockierendes“ Jahr, weit über dem bisherigen langjährigen Durchschnitt von 150-200 km³/Jahr (WITZE, 2008).

Nachdem am Jahresende 2006 nacheinander die Tiefs „Karla“ und „Lotte“ mit Winden bis 150 km/h über Deutschland gezogen waren, herrschte seit Jahresbeginn 2007 eine anhaltende Westwindlage (meist von SW) mit einzelnen Sturmtiefs, so z.B. am 10.-12.1. bis BF 12. Meteorologische Einzelheiten dieser ungewöhnlichen Sturmserie im Dezember 2006 und Januar 2007 wurden von TIESEL (2008) analysiert. Die Ostsee hatte einen mittleren Pegel von 30-50 cm über Normal, so kam es kaum zu Einstromvorgängen. Die Januar-Temperaturen waren sehr hoch und brachen historische Rekorde. Blumen und Bäume blühten, Pilze wurden gefunden.

Nach dem „Monstersturm Kyrill“ am 18.1. mit bis zu 203 km/h am Wendelstein und erheblichen Sachschäden (ein zwei Tonnen schwerer Stahlträger des neuen Berliner Bahnhofs war z.B. aus 40 Metern Höhe abgestürzt) und 49 Opfern in Europa folgte noch das Tief "Lancelot" am 20.1. Wenn die Ostsee nicht schon einen Füllstand > 70 cm gehabt hätte, wären erhebliche Einströme aus dem Kattegat zu erwarten gewesen. Am 22.1. stellte sich mit einem Tief über der Adria die Lage von Westwind um auf Blockierung. Nordwinde brachten den ersten Frost dieses Winters und etwas Schnee. In Warnemünde stieg der Pegel auf fast 1m und kräftiger Ausstrom setzte ein.

Nach dem Sturmtief „Orkun“ über Skandinavien am 18.3. bildete sich am 20.3. ein Adriatief und brachte Schneechaos nach Österreich. Es zog als Vb-Tief am 21.3. nach Norden mit mehr Schnee auch in den Mittelgebirgen und in Mecklenburg-Vorpommern. Danach sorgte ein stabiles Hoch über der Ostsee für starken Ausstrom. Der Landsort-Pegel sank schnell von +10 cm auf -10 cm, im Fehmarnbelt wurde gleichzeitig während der Monitoring-Messungen mit „Professor Albrecht Penck“ eine starke Strömung beobachtet. An der Darßer Schwelle sank der Salzgehalt bis in die bodennahe Schicht unter 9 psu. Das Hoch zog gegen die Regel westwärts nach Island ab, ein Hinweis auf eine neue Blockierungslage.

Am 11. April brachte das Hoch „Peggy“ den Sommer mit 30 °C. Ende April herrschten anhaltend schwache Luftdruckgegensätze über Mitteleuropa, Hochdruckwetter brachte sehr warmen Südwind. Am 25.4. stand der Raps in voller Blüte, ca 2-3 Wochen zu früh. Der April war der sonnigste, trockenste und wärmste „aller Zeiten“. Am erstem Mai dagegen herrschte eine Blockierungslage mit kaltem NO-Wind in Ostseeraum.

Über Pfingsten, ab 25.5., herrschten schwül-warme Bedingungen über Deutschland mit warmer Luft (22°C) im Osten und kalter (15°C) im Westen. Wiederholt zogen schwere Gewitterfronten mit Starkregen und Orkanböen von Süd nach Nord. Berlin hatte bereits 2 Mal den Ausnahmezustand erklärt. Der Mai war der nasseste in Deutschland seit 1901.

Anfang Juli hatte sich nach Durchzug von Orkantief „Uriah“ am 27.6., das die schwülen Wetterlagen von Mai und Juni beendete, seit vielen Jahren erstmals wieder eine typische Siebenschläfer-Westwindlage ausgebildet. Dabei herrschten sehr hohe Temperaturen im Mittelmeerraum (> 40 °C in Griechenland). Abwechselnde Warm- und Kaltfronten brachten viel Regen nach Deutschland, teilweise mit Gewittern und Unwettern. In der Nacht vom 1. zum 2.7. trat ein Tornado auf der Autobahn A1 auf.

Am 21.7. bildete sich plötzlich das Vb-Tief „Erdmann“ an der Adria und zog, sich verstärkend, rasch entlang der Oder nach Südschweden. In der Nacht zum 22.7. gab es unerwartete schwere Niederschläge in Nordbayern und Thüringen mit Überschwemmungen. Ab 23.7. erlebte der Süden Englands nach sintflutartigen Regenfällen die schlimmste Flutkatastrophe seit Jahrzehnten, die "Great Flood of July". Gleichzeitig traten schwere Waldbrände bei großer Hitze und Trockenheit in Griechenland und auf den Kanaren auf.

Am 9. August trat starker Regen mit Überschwemmungen entlang des Rheins auf. Am 12./13.8. fielen zwischen Ribnitz-Damgarten und Bad Doberan 88 bzw. 80 mm Niederschlag in 24 h mit Überschwemmungen bis Schleswig-Holstein, unter anderem 178 mm auf Fehmarn. Verantwortlich war das Tief „Leander“, das von der Biskaya nach Tschechien gezogen war und dort zusammen mit dem Tief „Karlheinz“ über der Norwegischen See eine stabile meridionale Warmfront vom Mittelmeer bis Skandinavien ausbildete. Am 20./21.8. brachte das Vb-Tief „Quirinus“ viel Regen, als es von der Adria über Berlin und Niedersachsen nach Belgien zog. In der Nacht zum 23.8. kam es erneut zu schweren Unwettern in Norddeutschland, dieses Mal durch das Vb-Tief „Paul“. Das Adria-Tief „Xaver“, das sich in der letzten Augustwoche gebildet hatte, als Extremniederschläge anhaltend den Alpenraum trafen und im Raum Bern zu starken Überschwemmungen führten, trat dann über Ungarn den Weg nach Norden an (6.9.) und brachte Starkregen nach Bayern und Österreich.

Am 28.9. erzeugte das Vb-Tief „Faysal“ nach längerer Westwindphase eine Blockierungslage und brachte mit starkem Ostwind ein frühherbstliches Ostsee-Hochwasser. Die Pegel waren um 9 Uhr in Travemünde 121 cm, in Warnemünde 101 cm, in Gedser 104 cm und in Hornbaek -10 cm (BOOS, 2007). Starker Ausstrom setzte ein. Gleichzeitig kam es zu Überschwemmungen und Erdbeben in Nordrhein-Westfalen und der Eifel. Das Tief hatte sich in der Nacht zum 27.9. im Raum Österreich ausgeprägt und teilte sich in der Folge auf, wobei zunächst der westliche Teil in den Benelux-Raum zog, der östliche sich dann verstärkte und über Sachsen-Anhalt langsam nordwärts nach Dänemark (30.9.) wanderte. Die Harztalsperren liefen voll, und Flüsse wie die Innerste traten über die Ufer, z.B. mit einem Pegel bis 667 cm in Heide, dem höchsten seit 50 Jahren.

Am 5.10 und 17.10. wüteten ungewöhnliche Unwetter über Mallorca mit Wind bis 109 km/h. Am 12.10 zog Tief „Lupus“ über Skandinavien in das Baltikum. An seiner Rückseite erreichte der Pegel in Warnemünde 102 cm. Ab 6.11. trat ein kleiner Einstrom in die Ostsee auf, verursacht durch Tief „Stefan“, gefolgt von Ex-Hurrikan „Noel“ mit 19 m/s an der Darßer Schwelle. Am 10. und 11.11. brachte das Orkantief „Tilo“ den ersten Wintereinbruch nach Deutschland mit bis zu 1 m Neuschnee. Bei einer Blockierungslage am 19./20. November zog Tief „Zebedäus“ westwärts von Deutschland nach Irland und kehrte später von dort zurück. Am 1. und 2.12. überquerte das Sturmtief „Eckhard“ Deutschland mit Windstärken über 100 km/h.

In Warnemünde war es 2007 in Bezug auf die monatlichen Wärmesummen nur im April, Juni und August zu warm (Tab. 2), Mai, September und Oktober fielen kälter aus als der langjährige Mittelwert. Die Jahreswärmesumme 2007 von 153 K d liegt etwas höher als der Mittelwert 145 K d der Beobachtungsreihe seit 1948, aber weit unter dem Rekordwert 355 K d des Vorjahrs 2006. Wie die Temperaturen an der Station Arkona zeigen (Tab. 1), war 2007 nur der Oktober geringfügig zu kalt, sonst herrschten positive Temperaturanomalien vor, insbesondere im Januar (+5,0 K). Die positiven Temperaturanomalien in Januar, März und April gingen mit größerer Sonnenscheindauer einher, die im Oktober/November keine vergleichbare Wirkung aufwies. Juni mit 279%, Juli mit 272% und Januar mit 214% waren die mit Abstand niederschlagsreichsten des Jahres 2007, auch im Vergleich mit dem hohen Jahresmaximum von 214% im Vorjahr 2006. Dagegen fielen der

April mit 18% and der August mit 46% deutlich zu trocken aus. Der Tiefstwert der Luftfeuchte von nur 77% im April in Warnemünde war eine markante Ausnahme, in allen anderen Monaten lag sie bei 82% oder höher.

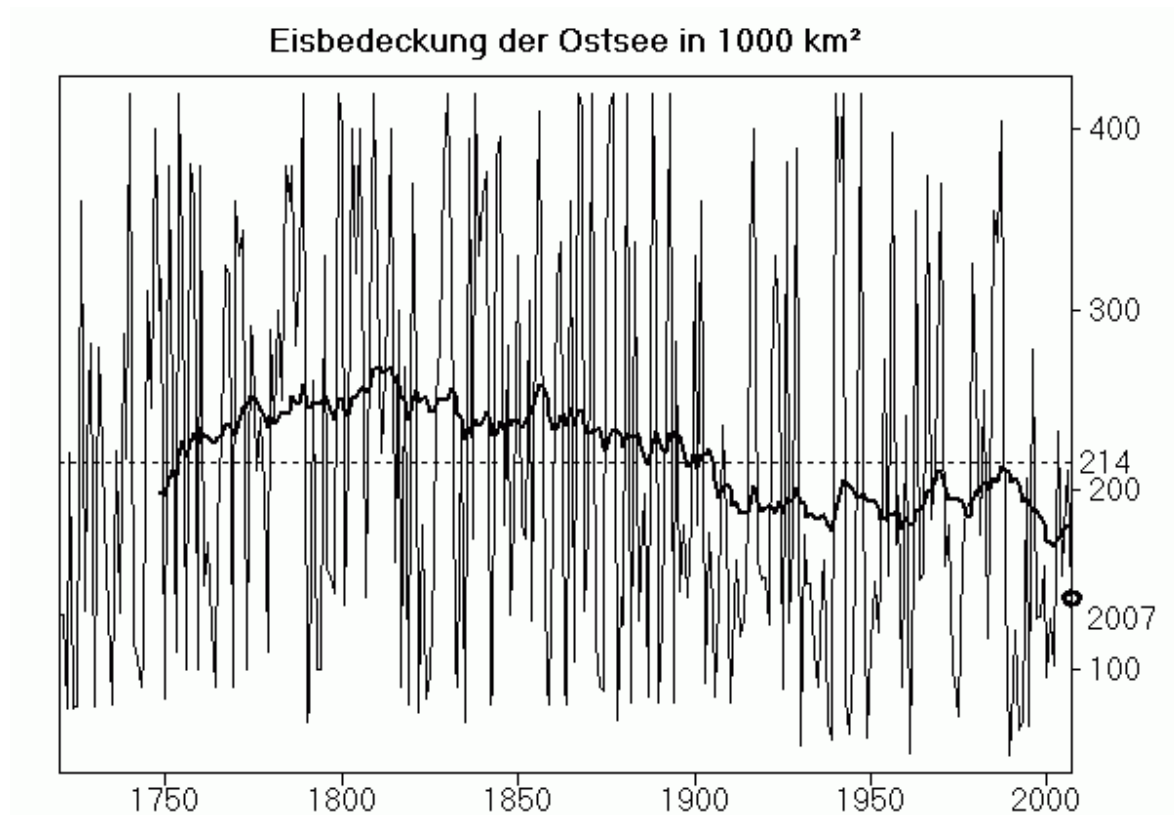


Abb. 2

Maximale Eisbedeckung der Ostsee in 1000 km² in den Jahren 1720 bis 2007 nach Daten des FIMR (FIMR, 2007). Der Langzeit-Mittelwert von 214 000 km² ist gestrichelt dargestellt. Die dicke Linie ist ein gleitender Mittelwert über die vorherigen 30 Jahre. Der Kreis zeigt die Eisbedeckung im Winter 2006/2007 mit 139 000 km²

Fig. 2

Maximum ice covered area in 1000 km² of the Baltic Sea in the years 1720 to 2007 from data of FIMR (FIMR, 2007). The long-term average of 214,000 km² is shown as dashed line. The bold line is a running mean value over the past 30 years. The ice coverage in winter 2006/2007 with 139,000 km² is encircled

Tab. 1

Monatliche gemittelte Wetterdaten der Station Arkona (Rügen, 42 m über NN) nach DWD (2008a). 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) from DWD (2008a). 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	$t/^\circ\text{C}$	$\Delta t / \text{K}$	$h/\%$	$s/\%$	$r/\%$	Frost	Eis
Jan	5,2	+5,0	85	156	214	6	1
Feb	2,4	+2,2	89	63	126	9	3
Mrz	5,5	+3,5	88	157	82	-	-
Apr	8,2	+3,2	77	164	18	-	-
Mai	11,9	+2,2	82	94	130	-	-
Jun	15,9	+1,8	84	87	279	-	-
Jul	16,6	+0,4	83	83	272	-	-
Aug	17,2	+0,7	84	88	46	-	-
Sep	13,6	0,0	83	96	114	-	-
Okt	9,8	-0,1	80	126	64	-	-
Nov	5,4	+0,1	84	119	96	1	-
Dez	3,5	+1,5	90	47	100	6	1

Tab. 2

Summen der Tagesmittel der Lufttemperatur an der Wetterstation Warnemünde. Die Kältesumme (KS) ist das Zeitintegral der Lufttemperatur unterhalb der Linie $t = 0$ °C, in K/d, die Wärmesumme (WS) das entsprechende Integral oberhalb der Linie $t = 16$ °C. Zum Vergleich sind die entsprechenden Mittelwerte 1948 bis 2007 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 $t = 0$ °C, in K · d, the 'heat sum' (WS) is the corresponding integral above the line $t = 16$ °C. For comparison, the corresponding mean values 1948 - 2007 are given

Monat	KS 2006/07	Mittelwert	Monat	WS 2007	Mittelwert
November	0,0	2,7 ± 6,5	April	2,2	1,0 ± 2,4
Dezember	0,0	21,5 ± 26,7	Mai	2,9	4,9 ± 5,7
Januar	3,6	39,9 ± 40,1	Juni	30,6	23,2 ± 14,9
Februar	6,7	32,4 ± 39,3	Juli	53,2	53,2 ± 34,1
März	0,0	8,7 ± 12,2	August	60,7	50,7 ± 32,4
April	0,0	0,0 ± 0,2	September	3,5	11,4 ± 12,4
			Oktober	0,0	0,4 ± 1,2
Σ 2006/2007	10,3	104,6 ± 80,3	Σ 2007	153,1	144,8 ± 68,9

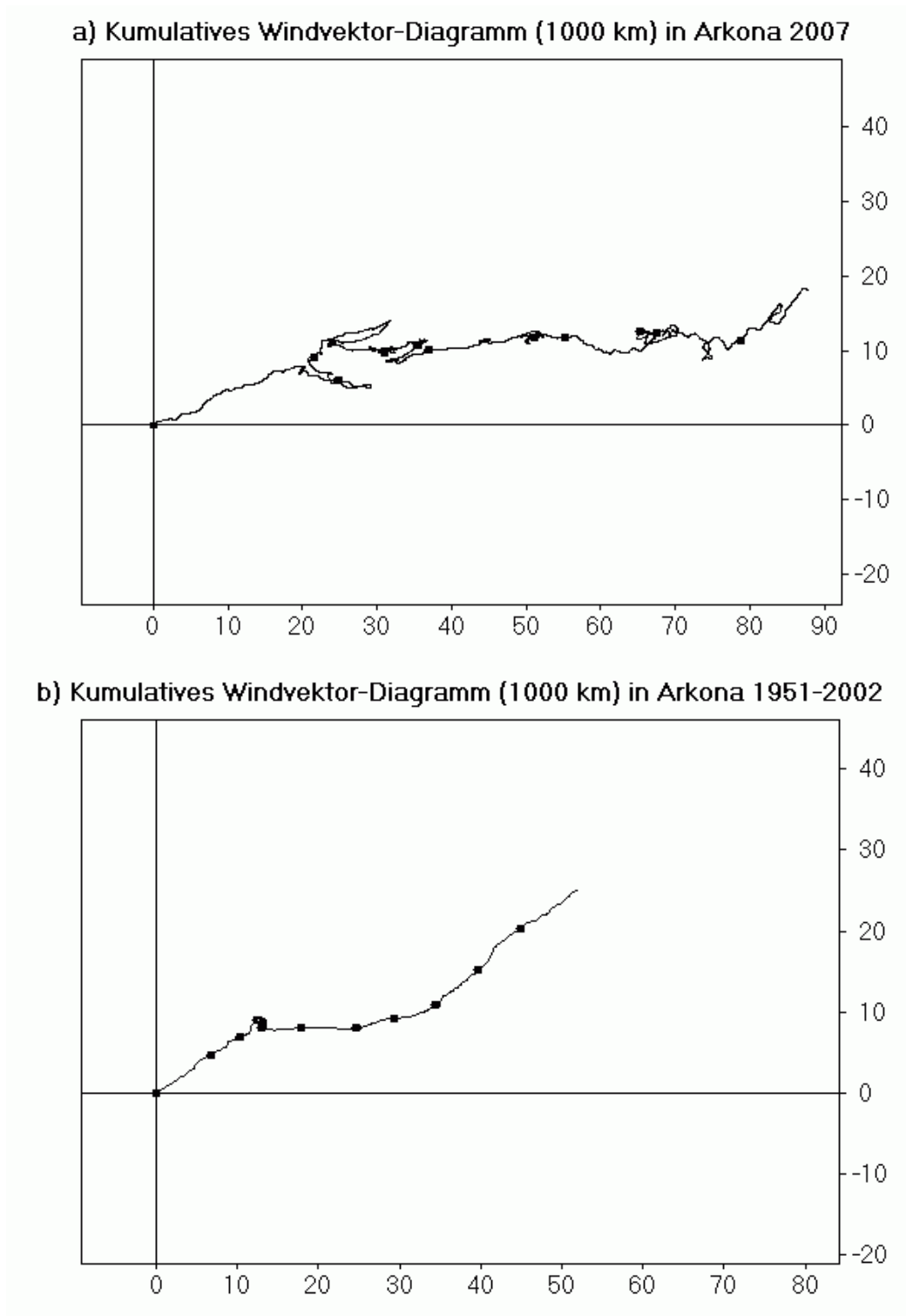


Abb. 3

Fortschreitende Vektordiagramme der Windgeschwindigkeit an der Wetterstation Arkona (nach Daten des DWD, 2008b), in 1000 km, positiv nach nördlichen und östlichen Richtungen. a) 2007, 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 (from data of DWD, 2008b), in 1000 km, positive in northerly and easterly directions. a) 2007, 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 2007 ist dargestellt im Vergleich mit dem klimatischen mittleren Wind der Jahre 1951 bis 2002. Die Kurve für 2007 (88 000 km nach Osten, 18 000 km nach Norden) weicht von der des klimatischen Mittelwerts (52 000 km nach Osten, 25 000 km nach Norden) erheblich ab. Insbesondere ist die Nordkomponente wesentlich geringer, die Westkomponente dagegen viel größer. Ausgeprägte Westwindlagen während der Stürme im Januar und des „Siebenschläfers“ im Juli waren dafür verantwortlich. Das typische Sommerplateau des klimatischen Diagramms findet sich 2007 von April bis November. Dabei ist der mittlere Betrag der Windgeschwindigkeit (7,8 m/s) größer als im Vorjahr, siehe Abb. 4, der Betrag des mittleren Windvektors ist 2,8 m/s. Beide Werte übersteigen die entsprechenden klimatologischen Mittel von 7,1 m/s und 1,9 m/s (HAGEN und FEISTEL, 2008). 2007 war also auch ein besonders windiges Jahr. Markante Stürme sind von Januar bis März, aber auch um Juni und September zu erkennen.

Barotrope Einstromereignisse mit geschätzten Volumen um 200 km³ fanden in der Ostsee 2007 drei Mal statt, Ende Januar, Anfang März und Anfang November, zwei weitere mit jeweils weniger als 150 km³ Volumen im Juni/Juli und im August/September. Warme Einstrom-Pulse über 6 °C wurden an einer Verankerung im Gotlandbecken außerdem bei 180 m Tiefe in der zweiten und dritten Januarwoche gemessen. Ein ähnlicher Puls wurde dort Ende März beobachtet, dieses Mal aber über alle Tiefenstufen von 180 bis 220 m. Im April wurde diese Verankerung eingeholt, für den Rest von 2007 liegen also keine Daten von dieser Position mehr vor. Eine andere Verankerung im Gotlandtief bei ca. 200 m Tiefe registrierte Mitte Mai einen Temperaturanstieg von ca. 5,9 °C auf fast 6,3 °C, vermutlich in Folge des März-Einstroms, der warmes Wasser des Bornholmtiefs über die Stolper Schwelle angehoben haben konnte.

Die Verhältnisse im zentralen Tiefenwasser waren einerseits 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, 2006a, b, c, d), vgl. Kapitel 6. Jedoch deuteten schon 2006 mehrere Indizien auf barokline Einströme hin, gefolgt von fünf kleinen barotropen Einstromereignissen 2007, die zum Teil in einzelnen Schüben mit unterschiedlichen Eigenschaften auch die zentrale Ostsee erreichten. Insbesondere wurde 2007 die bodennahe Schicht im Raum vom Bornholmbecken bis zum Danziger Tief mehrfach belüftet (Abb. 1), ein auch für barokline Einströme typischer Vorgang (FEISTEL et al., 2004a, b, 2006a, b, c, d). Nach dem jetzigen Kenntnisstand erfolgen die kleinen barotropen, also sturmgetriebenen Einstromprozesse hauptsächlich auf dem kurzen Weg durch den Öresund in das Arkonabecken, bleiben jedoch wegen ihres geringen Volumens und ihrer bevorzugten Ausbreitung entlang des Beckenrands der Registrierung durch die MARNET-Station „Arkonaboje“ weitgehend verborgen. Im Kapitel 6 gehen wir von der plausiblen Annahme aus, dass 2007 hauptsächlich fünf kleine barotrope Einströme die Tiefenwassereigenschaften veränderten, fast gleichmäßig über das Jahr verteilt. Nur einige dieser Ereignisse konnten durch gelegentlich vorhandene Verankerungen genauer registriert werden.

Als Folge aller dieser einzelnen kleineren Einstromvorgänge war im Gotlandbecken die gesamte Wassersäule unterhalb der Sprungschicht im Dezember 2007 deutlich wärmer als noch im Dezember 2006, wobei sich dadurch die Sauerstoffverhältnisse zwar zeitweilig in der südlichen, nicht aber in der zentralen Ostsee deutlich verbesserten.

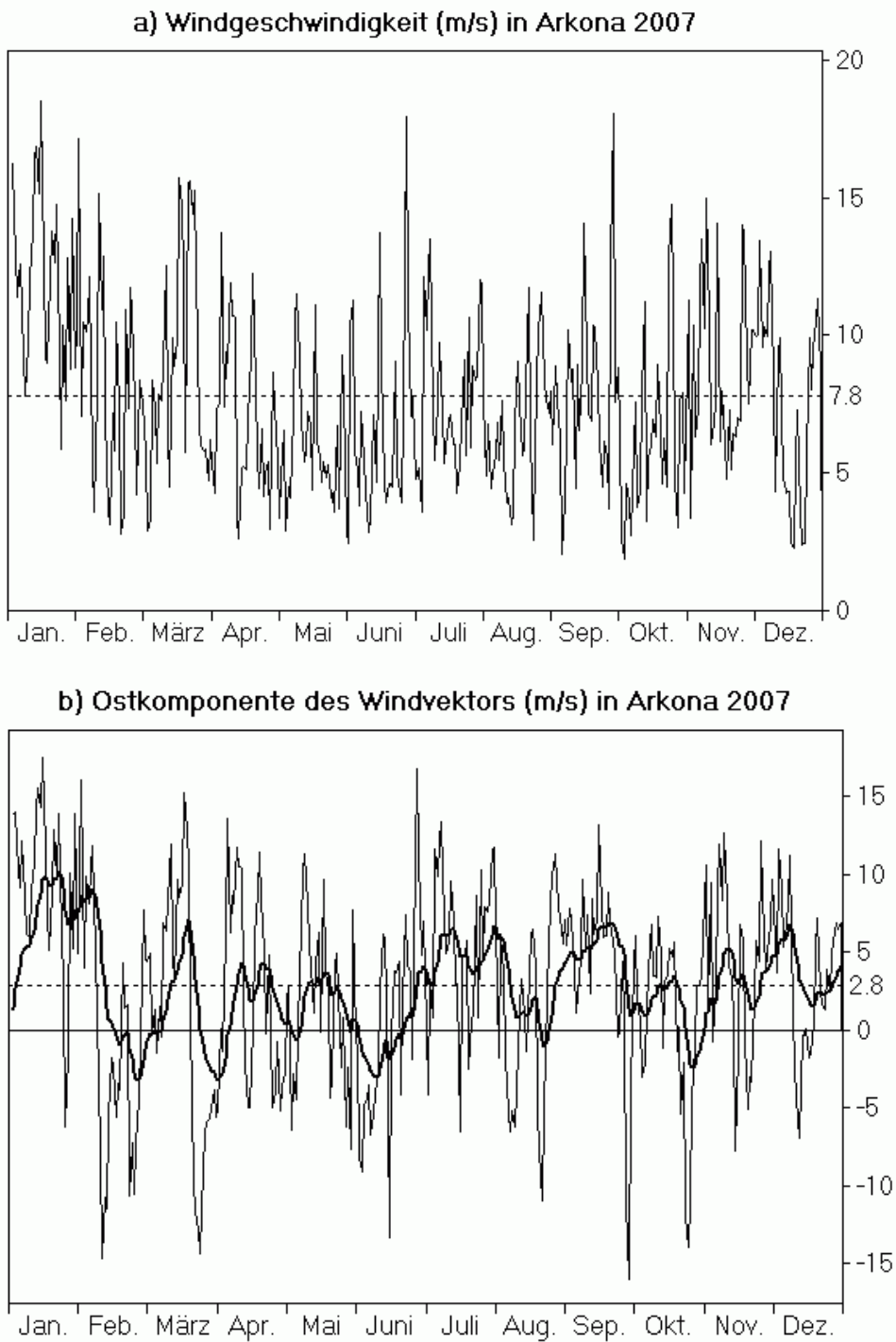


Abb. 4

Windmessungen an der Wetterstation Arkona (nach Daten des DWD, 2008b). a) Tagesmittelwerte der Windgeschwindigkeit in m/s, Jahresmittelwert 7,8 m/s gestrichelt. b) Tagesmittelwerte der Ostkomponente (Westwind positiv), Jahresmittelwert 2,8 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 (from data of DWD, 2008b). a) Daily means of wind speed, in m/s, the dashed line is the annual average of 7.8 m/s. b) Daily means of the eastern component (westerly wind positive), the dashed line is the annual average of 2.8 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 einzelner 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 auf nördliche und östliche Richtungen dreht und ein Umschalten von Winter auf Sommer markiert. Er tritt um den 12. Mai herum 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 7,8 m/s über den Werten der Vorjahre von 7,1 m/s im Jahr 2003 (NAUSCH et al., 2004a) und von 7,7 m/s im Jahr 2002 (NAUSCH et al., 2003a). In den Jahren 2004 und 2005 wurde ein Mittelwert von jeweils 7,4 m/s ermittelt, und 7,2 m/s im Vorjahr 2006. Als Windspitzen der Stundenwerte über 20 m/s traten auf: 25,4 m/s am 27. Juni aus West, 23,2 m/s am 21. März aus NO, 22,8 m/s am 14. Januar aus W, 22,7 m/s am 13. Januar aus W, 22,4 m/s am 12. Januar aus W, 22,1 m/s am 22. März aus NO, 21,4 m/s am 20. Januar aus W, 21,1 m/s am 31. Januar aus W, 20,9 m/s am 23. März aus NO, 20,7 m/s am 28. September aus NO und 20,3 m/s am Neujahrstag aus West. Trotz dieser auffälligen Anzahl von Sturmtagen wurden die Spitzenwerte von 2000 (30 m/s) und 2005 (26,6 m/s) 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, 2008). Im Gegensatz zu früheren Jahren handelt es sich jetzt um den neuen Pegel „Landsort Norra“ (58°46'N, 17°52'E). Der alte Pegel Landsort (58°45'N, 17°52'E) wurde im September 2006 außer Betrieb genommen, weil wegen der postglazialen Landhebung seine Lage im Haff bei Niedrigwasser die Verbindung zur offenen Ostsee nicht mehr sicherstellte (FEISTEL et al., 2008b). Beide Pegel wurden für mehr als zwei Jahre parallel betrieben und zeigen nahezu identische Werte. Ein Vergleich der 8760 stündlichen Werte beider Pegel von 2005 ergibt einen Korrelationskoeffizienten zwischen Landsort (L) und Landsort Norra (L_N) von 98,88 % und eine lineare Regressionsbeziehung $L + 500 \text{ cm} = 0,99815 * L_N + 0,898 \text{ cm}$ mit der mittleren quadratischen Abweichung (rms) von 3,0 cm und einer maximalen von 26 cm. Wir werden im Folgenden den Pegel weiter einfach „Landsort“ nennen, obwohl Landsort Norra damit gemeint ist.

Das markanteste Signal im Verlauf des Landsortpegels 2007 ist der hohe Anfangswert, der aus dem nahezu linearen Anstieg von Mitte März bis Ende Dezember 2006 folgte, wobei sich über mehrere Monate auch das eingetragene Flusswasser zurück staute und das Wasservolumen um ca. 300 km³ zunahm. Dieser hohe Füllungsgrad der Ostsee, der sich sogar noch bis Februar 2007 verstärkt fortsetzte, verhinderte die sonst möglichen effektiven barotropen Einströme während der wiederholten Weststürme von Oktober 2006 bis Februar 2007.

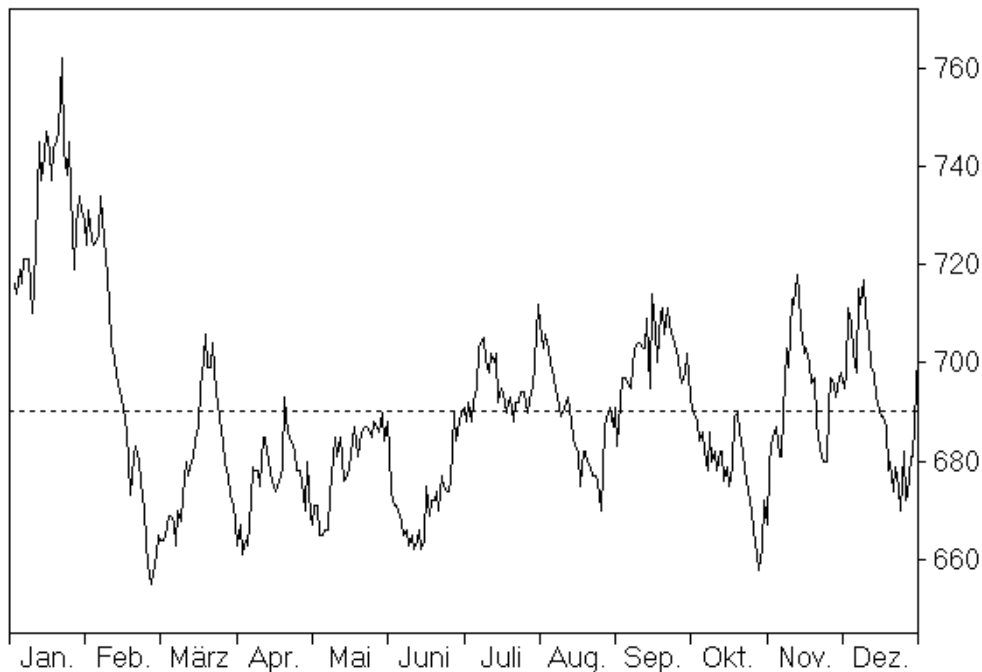
Der Spitzenpegel im Januar betrug 766 cm am 21. Januar nach Durchzug der Stürme „Kyrill“ und „Lancelot“, und lag damit deutlich über dem Maximalwert des Vorjahrs (726 cm). Anhaltende nordöstliche Winde bewirkten einen deutlich abgesenkten Pegel von 653 cm am 26. Februar. Zwischen dem Höchstpegel im Januar und dem Minimum im Februar betrug der Unterschied mehr als 1 m, entsprechend einem sehr intensiven Ausstrom von ca. 476 km³ im Zeitraum vom 21. Januar bis 26. Februar 2007. Bis Ende Juni herrschten niedrige Füllstände, ab dann schwankte der Pegel um mittlere Werte bei 690 cm. Von besonderem Interesse sind hier stets schnelle Pegelanstiege, die in der Regel nur durch einen Zustrom von Nordseewasser durch Sund und Belte

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 (LASS und MATTHÄUS, 2008, FEISTEL et al., 2008b). Kleinere barotrope Einstromereignisse sind 2007 zu erkennen an den Anstiegen um 64 cm in 11 Tagen vom 10. bis zum 21. Januar, um 63 cm in 21 Tagen vom 26. Februar bis 19. März, um 46 cm vom 16. Juni bis zum 8. Juli in 23 Tagen, um 45 cm vom 25. August bis zum 19. September in 26 Tagen, und um 60 cm in 13 Tagen vom 29. Oktober bis 11. November. Mit der empirischen Näherungsformel (NAUSCH et al., 2002, FEISTEL et al., 2008b) $\Delta V / km^3 = 3,8 \cdot \Delta L / cm - 1,3 \cdot \Delta t / d$ erhalten wir aus den Werten des Pegelunterschieds ΔL und der Einstromdauer Δt als Schätzungen für das eingeströmte Volumen $\Delta V = 229 km^3$ im Januar, $212 km^3$ im Februar/März, $145 km^3$ im Juni/Juli, $137 km^3$ im August/September und $211 km^3$ im Oktober/November. Die Volumina $> 200 km^3$ liegen deutlich über den Werten, die 2006 beobachtet wurden.

a) Pegel (cm) in Landsort Norra 2007



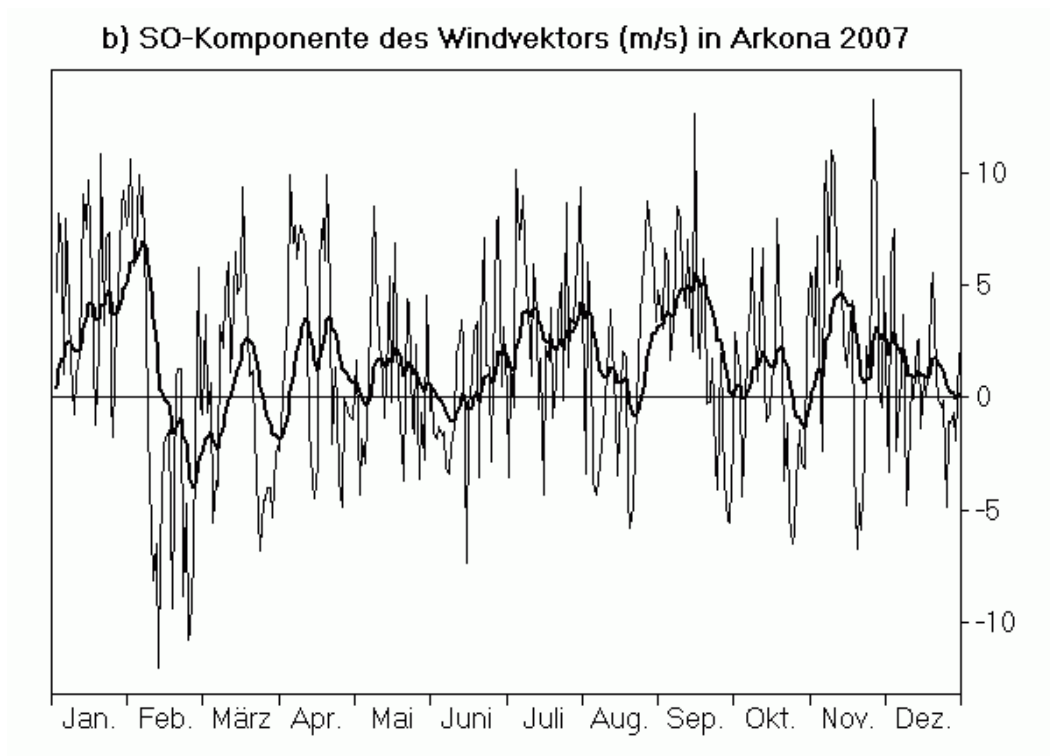


Abb. 5

a) Pegel bei Landsort als Maß für den Füllungsgrad der Ostsee (nach Daten des SMHI, 2008).
 b) Stärke des Nordwestwinds (positiv) an der Wetterstation Arkona (nach Daten des DWD, 2008b).
 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 (from data of SMHI, 2008).
 b) Strength of the north-west wind (positive) at the weather station Arkona (from data of DWD, 2008b).
 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 mit Sauerstoffsonden des Typs S-14 der Firma Züllig, Schweiz, im 7 m und 19 m Tiefenniveau am Messmast gemessen. Vereinzelt Vergleichsmessungen des Sauerstoffgehalts an Wasserproben aus der Messtiefe der Geräte wurden mit Hilfe der Winklermethode (vgl. GRASSHOFF et al., 1983) während der Wartungszyklen des Messmastes durchgeführt. Die Zeitreihenmessungen wiesen einen Trend in der Empfindlichkeit der Sauerstoffsensoren auf und wurden entsprechend korrigiert.

3.1 Wassertemperatur, Salzgehalt und Sauerstoffgehalt

Mittelwerte und Standardabweichung des in Abb. 6 gezeigten Temperaturverlaufs an der Darßer Schwelle sind in Tab. 4 aufgeführt und in Abb. 7 grafisch dargestellt. Auf allen Tiefenniveaus erreichen die Jahresmittel für 2007 die höchsten seit 1992 aufgezeichneten Werte, obwohl der Sommer 2007 mit Temperaturhöchstwerten von weniger als 18 °C an der Oberfläche relativ kühl war, insbesondere im Vergleich zum warmen Sommer 2006. Ein Vergleich mit der Temperaturentwicklung der letzten Jahre zeigt, dass die hohen Jahresmittelwerte des Jahres 2007 hauptsächlich ein Resultat der milden Winter 2006/2007 und 2007/2008 waren. Die Temperaturschichtung während des Sommers 2007 ist im Vergleich zum Vorjahr nur gering ausgeprägt, ein Effekt der im Wesentlichen auf eine deutlich geringere Stabilisierung der Wassersäule durch geringere Sonneneinstrahlung und geringere Advektion von bodennahem Salzwasser zurückzuführen ist. Die Umkehrung der Temperaturschichtung aufgrund des anwachsenden Wärmeverlustes zur Atmosphäre findet etwa Anfang September statt, führt aber aufgrund des hohen Bodensalzgehaltes nicht zu einer Destabilisierung der Wassersäule (Abb. 6).

Die milden Winter und der kühle Sommer des Jahres 2007 führen zu einer insgesamt geringen Amplitude des Jahresganges der Temperatur, wie aus den in Tab. 5 dargestellten Ergebnissen der Fourier-Analyse hervorgeht. Für den oberflächennahen Sensor in 7 m Tiefe entspricht die Amplitude sogar dem geringsten seit 1992 ermittelten Wert. Auch die Temperaturamplituden aus den Messwerten in 17 und 19 m Tiefe liegen nahe den niedrigsten Werten dieser Zeitspanne. Vergleichsweise niedrige Werte finden sich auch in den in Tab. 4 und Abb. 7 dargestellten Temperaturvarianzen. Da diese Varianzen von der Amplitude des Jahresganges dominiert werden, ist dieses Ergebnis allerdings kaum mehr als eine direkte Konsequenz des flachen Jahresganges. Die Phasen des Jahresverlaufes aus den Messungen in den drei in Tab. 5 aufgeführten Tiefen weisen Werte auf, die im oberen Bereich des Zeitraums 1992-2007 liegen. Im Gegensatz zum verzögerten Erreichen der Maximal- und Minimaltemperaturen im Vorjahr traten die sommer- und winterlichen Extrema des Jahresganges 2007 also vergleichsweise früh ein. Diese Verschiebung ist zum Teil auf den schnellen Anstieg der Lufttemperaturen im Frühjahr (mit Rekordtemperaturen im April) und auf die im Vergleich zum langjährigen Mittel kalten Herbstmonate September und Oktober zurückzuführen.

Während die in Tab. 4 und Abb. 8 dargestellten Jahresmittelwerte und Varianzen des Oberflächensalzgehaltes Werte aufweisen, die im Bereich der Messungen aus den Vorjahren liegen, sind bei den beiden bodennahen Sensoren Minimalwerte sowohl des Mittelwertes als auch der Varianz zu beobachten. Bemerkenswert ist hier insbesondere, dass die Salinitätsvarianz annähernd um den Faktor 2 niedriger liegt als alle seit 1992 gemessenen Werte. Da im Gegensatz zur Temperatur die Salinitätsvarianz nicht durch den Jahresgang bestimmt wird, ist dies ein

deutliches Indiz für eine reduzierte Salinität einströmender Wassermassen. In der Tat weisen die weiter unten beschriebenen Bodensalzgehalte während der Einstromereignisse geringere Salzgehalte auf als in den Vorjahren.

Tab. 4

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

Table 4

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

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 ± 5,69	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
2006	9,47 ± 6,34	8,99 ± 1,54	8,40 ± 5,06	14,26 ± 3,92	9,42 ± 4,71	16,05 ± 3,75
2007	9,99 ± 4,51	9,30 ± 1,19	9,66 ± 4,46	10,94 ± 1,23	9,63 ± 4,39	11,39 ± 1,28

Tab. 5

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

Table 5

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

Jahr	7 m Tiefe		17 m Tiefe		19 m Tiefe	
	Amplitude K	Phase Monat	Amplitude K	Phase Monat	Amplitude K	Phase Monat
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
2006	8,92	4,32	7,02	3,80	6,75	3,72
2007	6,01	4,69	5,53	4,40	5,51	4,36

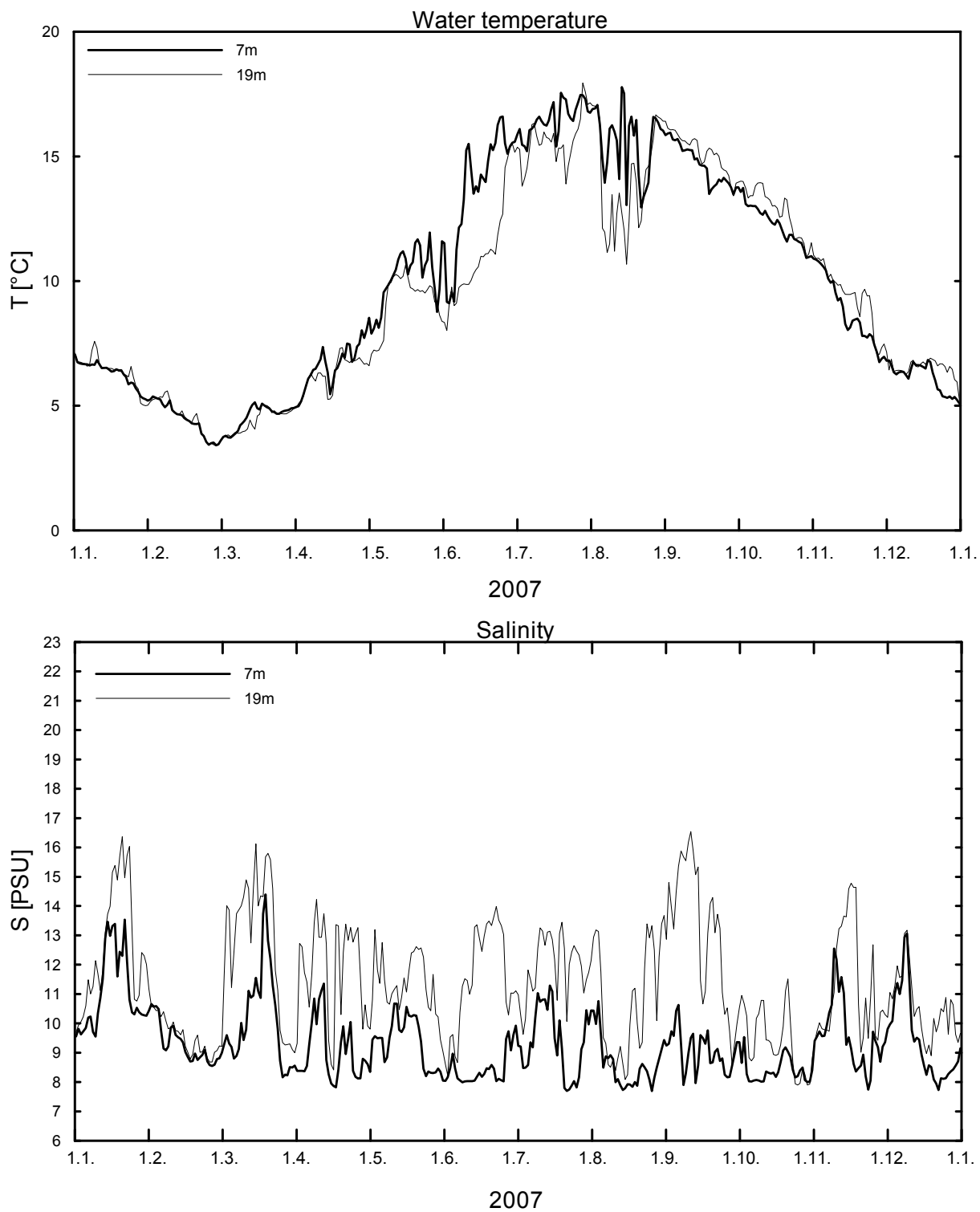


Abb. 6
Verlauf der Wassertemperatur (A) und des Salzgehaltes (B) in der Deck- und Bodenschicht auf der Darßer Schwelle (Stat. DS in Abb. 1) im Jahr 2007

Fig. 6
Water temperature (A) and salinity (B) measured in the surface layer and near the bottom at Stat. DS in 2007 at the Darss Sill

Der aktuelle Verlauf der Wassertemperatur des Jahres 2007 für die Deckschicht (7 m Tiefe) und die bodennahe Schicht (19 m Tiefe) ist in Abb. 6a dargestellt. Die Temperaturkurve verdeutlicht noch einmal den bereits oben erwähnten flachen Jahresgang mit einer im Vergleich zu den Vorjahren verfrühten Ausbildung der Maximal- und Minimalwerte. Die Minimaltemperatur wird in diesem Jahr Ende Februar erreicht und widerspiegelt mit Werten von über 3 °C den milden Winter 2006/2007. Aufgrund der hohen Lufttemperaturen im April erreichen die Oberflächentemperaturen sehr hohe Werte von über 7 °C und steigen bis Ende Mai kurzzeitig auf über 12 °C an. Eine signifikante Temperaturschichtung bildet sich im Jahr 2007 erst im Verlauf des Monats Juni aus, allerdings deutlich schwächer als im Jahr zuvor beobachtet. In den Sommermonaten werden mit Höchstwerten von 17-18 °C die Vorjahreswerte von 22-23 °C bei weitem nicht erreicht. Das ausgedehnte sommerliche Temperaturmaximum wird im August erreicht und von kurzzeitigen Temperaturabfällen von 3-4 K unterbrochen. Wie in den Vorjahren wird vermutet, dass das Auftreten dieser Temperatureinbrüche auf die laterale Advektion von kalten Filamenten aus den Auftriebsgebieten nahe Rügen und Hiddensee während der zwei starken Ostwindereignisse im August (siehe Abb. 4) zurückzuführen ist. Mit Beginn des Monats September kehrt sich die Temperaturschichtung aufgrund des Wärmeverlustes zur Atmosphäre und durch Einschichtung wärmeren Bodenwassers um und bleibt schwach ausgeprägt bei Temperaturen, die kontinuierlich bis auf Werte um 5 °C zum Ende des Jahres 2007 fallen.

Der in Abb. 6b dargestellte Verlauf des Oberflächen- und Bodensalzgehaltes an der Darßer Schwelle zeigt Manifestationen einiger Einstromereignisse, allerdings bleiben die maximalen Salzgehalte von 17 psu am Boden und 15 psu nahe der Oberfläche deutlich unter den in den Vorjahren üblichen Werten. Damit stehen aus den Einstromereignissen des Jahres 2007 über die Darßer Schwelle nur Wassermassen mit vergleichsweise geringer Dichte zur Belüftung der Halokline in den östlich gelegenen und tieferen Becken zur Verfügung, obwohl die in Abschnitt 2 geschilderte Analyse des Landsort-Pegels und die weiter unten diskutierten Strömungsmessungen an der Darßer Schwelle den Einstrom signifikanter Wasservolumen nahe legen, möglicherweise auch durch Transport durch den Sund. Während der kalten Jahreszeit finden sich mehrwöchige Perioden mit einem deutlichen Anstieg des Boden- und Deckschichtsalzgehaltes im Januar, März, November und Dezember, die sehr gut mit Westwindlagen und ansteigenden Pegelständen bei Landsort Norra korrelieren (Abb. 5a). Die Anstiege der Bodensalzgehalte während all dieser Ereignisse werden von etwas geringeren Anstiegen der Oberflächensalzgehalte begleitet. Einige kleinere und kurzzeitige Pegelanstiege in den Monaten April und Mai spiegeln sich ebenfalls in signifikanten Signalen des Boden- und Deckschichtsalzgehaltes wider, die allerdings weniger stark ausfallen als bei den vier Hauptereignissen.

Interessanterweise finden sich die höchsten Bodensalzgehalte dieses Jahres aber während keines der oben genannten Einstromereignisse zur kalten Jahreszeit, sondern während eines Einstromereignisses bei starker thermischer Schichtung in der ersten Hälfte des Monats September. Dieses Ereignis korreliert mit einem starken Anstieg im Landsorter Pegel um ca. 0.4 m, der zwar weniger schnell als bei den oben diskutierten Einströmen erfolgt, aber immer noch deutlich schneller als durch einen reinen Flusswasserrückstau zu erwarten wäre. Einige ganz ähnliche Ereignisse finden im Juni/Juli und Anfang August statt, zeigen aber trotz deutlicher Pegelanstiege etwas weniger ausgeprägte Erhöhungen des Bodensalzgehaltes als beim Einstrom im September. Alle Einstromereignisse sind mit westlichen Winden verbunden. Die Oberflächensalzgehalte während dieser Einstromperioden sind ebenfalls erhöht, aber relativ zum Bodensalzgehalt deutlich schwächer als bei den rein barotropen Einströmen während der kalten Jahreszeit, was als Indiz für einen zumindest teilweise baroklinen, also dichtegetriebenen, Charakter gewertet werden kann. Wie weiter unten ausgeführt, sind alle Ereignisse mit Perioden westlicher Strömung auf der Darßer

Schwelle korreliert und transportieren damit effektiv salzreiches Bodenwasser in die westliche Ostsee.

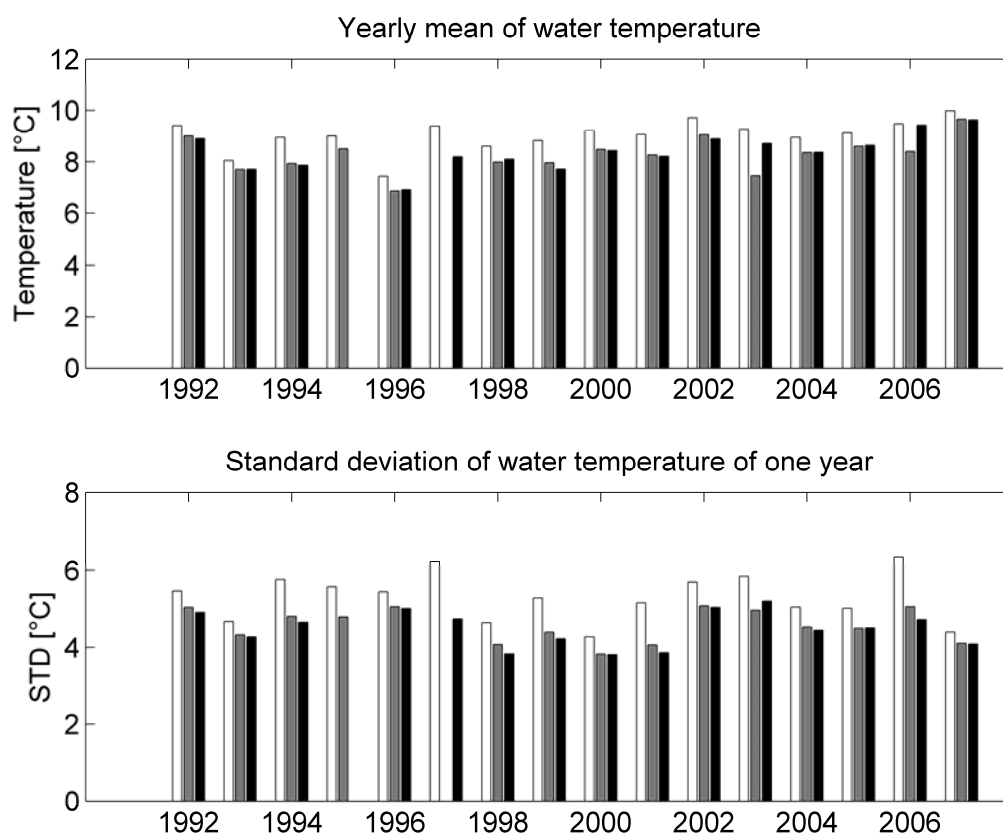


Abb. 7

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 2007 in 7 m und 19 m Tiefe durchgeführt worden, wobei es wegen einer Beschädigung der Stromversorgung zu mehrwöchigen Unterbrechungen in den ersten Monaten des Jahres kam. Die den Sauerstoffgehalt des Wassers regulierenden Prozesse sind in Kapitel 6.3 dargelegt.

Der Sauerstoffgehalt des Oberflächenwassers schwankt während des ganzen Jahres um die Sättigungskonzentration und weist damit einen vor allem durch die Wassertemperatur geprägten Jahresgang mit einem Minimum im Spätsommer auf. Während des ganzen Jahres werden die Sauerstoffzehrungsprozesse im flachen Arkonabecken durch den Sauerstoffbedarf des Sediments dominiert. Algenblüten und zunehmenden Bodentemperaturen während der warmen Jahreszeit

steigern diesen Sauerstoffbedarf und führen insbesondere während der Sommermonate zu reduzierten Sauerstoffkonzentration in der Bodenschicht. Im Jahr 2007 ist der Unterschied zwischen Boden- und Oberflächenkonzentration allerdings weniger stark ausgeprägt als in den vorigen Jahren, besonders im Vergleich mit dem Vorjahr, in dem bereits ab Februar deutliche Konzentrationsunterschiede auszumachen waren. Ausschlaggebend hierfür sind zahlreiche kleinere Einstromereignisse im Jahr 2007, welche sich entwickelnde hypoxische Zonen bereits nach kurzer Zeit wieder belüften. Am deutlichsten ist dieser Effekt Ende August zu beobachten, als während weniger Tage das sauerstoffarme Bodenwasser mit Konzentration unter 2 ml/l durch einen salz- und sauerstoffreichen Einstrom belüftet wurde und kurzfristig Konzentrationen nahe den Deckschichtwerten erreicht wurden. Simultan mit der ausgeprägten Temperaturschichtung im Juni bildet sich während dieses Monats das mit einer Dauer von ca. 3 Wochen stabilste Sauerstoffminimum aus, in dem die Bodenkonzentrationen nur wenig zwischen Werten um 4-5 ml/l schwankten. Erst Ende Juni wird das Bodenwasser an der Darßer Schwelle wieder durch einströmendes Wasser aus der Beltsee voll belüftet. Interessanterweise führen Einstromereignisse 2007 häufig zu Situationen, in denen die nahe dem Boden gemessenen Sauerstoffkonzentrationen die Oberflächenkonzentrationen überschreiten. Wie bereits im Jahr 2006 wird vermutet, dass das aus der Beltsee einströmende Bodenwasser seinen Ursprung in produktiven Gebieten mit starker Algenblüte hat und Wassermassen mit übersättigten Sauerstoffkonzentrationen mit sich führt.

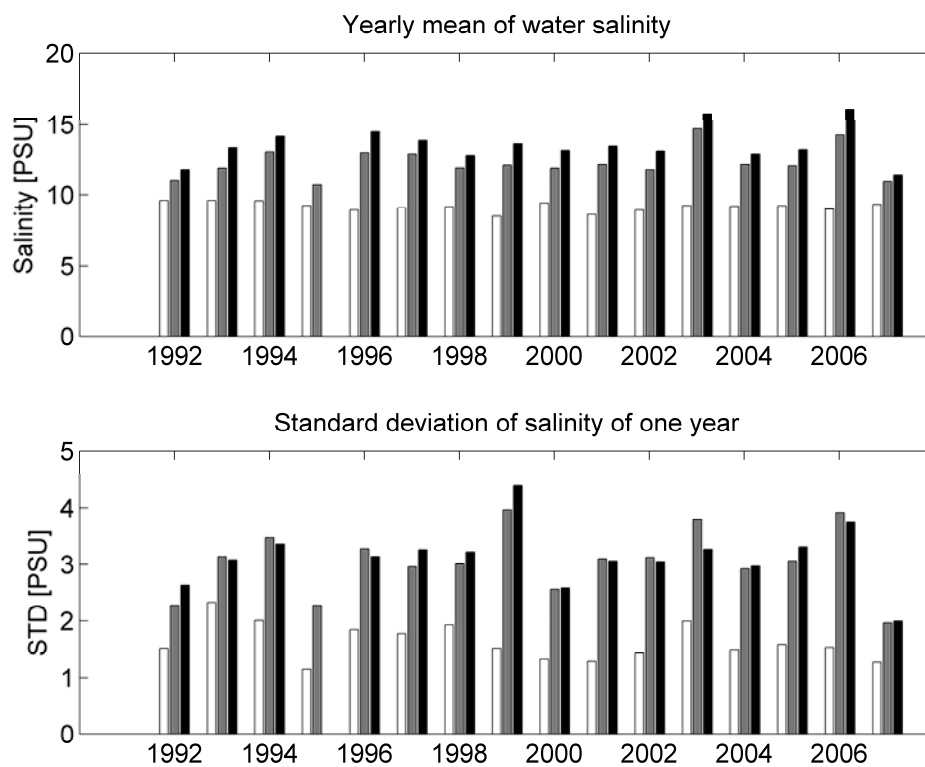


Abb. 8

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 auf der Darßer Schwelle sind innerhalb der Wassersäule sehr kohärent. Zur Charakterisierung des baroklinen Anteils der Strömung ist sie in 3 m und 17 m Messtiefe zeitlich integriert worden und als „fortschreitende Vektordiagramme“ (Pseudotrajektorien) in Abb. 10 dargestellt. Diese integrale Darstellungsweise filtert kurzzeitige Fluktuationen aus den Strömungsmessungen und lässt daher die langzeitigen Eigenschaften der Strömung besser erkennen. Gemäß dieser Definition entspricht die Strömungsgeschwindigkeit dann der Steigung der in Abb. 10 gezeigten Kurven, wobei eine positive Steigung Einstromgeschwindigkeiten widerspiegelt.

Die Ostkomponente der Pseudotrajektorien in Oberflächen- (3 m) und Grundnähe (17 m) sowie der vertikal gemittelten Strömung sind in Abb. 10 dargestellt. Im Gegensatz zum vorangegangenen Jahr weist die über das Jahr 2007 integrierte Geschwindigkeit auf allen gezeigten Niveaus negative, auf Ausstrom hindeutende, Werte auf. Diese Tendenz wird nur gelegentlich durch Einstromperioden (positive Steigung der Kurven) unterbrochen, die eine Dauer von 2-5 Wochen aufweisen und vertikal stark korreliert sind. Der Gesamtverlauf ist dem des Jahres 2005 überraschend ähnlich, wobei im Jahr 2007 Einstromperioden seltener, aber von deutlich längerer Dauer sind. Deutliche Unterschiede sind hingegen im Vergleich zum Jahr 2006 zu erkennen, in welchem insbesondere die bodennahen Strömungen eine dauerhafte Einstromtendenz aufwiesen.

Die mehrwöchigen Einstromsignale sind am deutlichsten in der bodennahen Tiefe von 17 m erkennbar (siehe Abb. 10), wobei die oben beschriebenen dominanten Einstromperioden während der kalten Jahreszeit im März, November und Dezember auch in den Strömungen identifiziert werden können. Lediglich der im Januar 2007 im Landsorter Pegelstand sichtbare Einstrom lässt sich anhand der Strömungsdaten an der Darßer Schwelle nur schwer nachweisen. Möglicherweise ist hier also der Einstromspfad aufgrund des hohen Füllungsgrades der Ostsee zu Jahresbeginn von der Darßer Schwelle auf den Sund verschoben worden. Die Geschwindigkeiten der Einstromereignisse sind auf allen Tiefenniveaus sehr ähnlich und unterstreichen damit deren barotropen, d.h. hauptsächlich durch Pegelunterschiede getriebenen Charakter. Es ist bemerkenswert, dass auch die oben erwähnten kleineren Einströme in den Monaten April und Mai deutlich identifizierbare Signale in den Geschwindigkeiten hinterlassen. Alle Ereignisse korrelieren mit den in Abb. 6 und 9 gezeigten Anstiegen des Bodensalzgehaltes und des Bodensauerstoffs, ebenso wie mit den Anstiegen der Pegelstände bei Landsort Norra (Abb. 5).

Auch die warmen Einströme während der sommerlichen Schichtungsperiode lassen sich in den Geschwindigkeitsmessungen an der Darßer Schwelle nachweisen. Am deutlichsten ist dies am Beispiel des Einstromereignisses im September zu erkennen, in dem über einen Zeitraum von etwa 4 Wochen ostwärts gerichtete Geschwindigkeiten auf allen Tiefenniveaus gemessen wurden. Die Geschwindigkeiten nahe dem Boden sind während dieses Einstroms nahezu konstant, während die Oberflächengeschwindigkeiten bereits nach etwa 1-2 Wochen einbrechen. Dies verdeutlicht die barokline Komponente dieses Einstroms, der sich in diesem Sinne ähnlich verhält wie einige während der vorangegangenen Jahre beobachtete warme Einströme. Steigende Pegelstände bei Landsort Norra im September (Abb. 5) und einströmendes Oberflächenwasser (Abb. 10) verdeutlichen allerdings auch, dass der Einstrom nicht rein baroklin ist und zumindest teilweise durch Pegelunterschiede angetrieben wird. Als Effekt des Einstroms im September zeigen sich die oben diskutierten deutlichen Erhöhungen des Bodensauerstoffgehalts und der Bodensalzkonzentrationen. Dieser Einstrom markiert durch die Advektion warmer, bodennaher Wassermassen auch den Zeitpunkt des Wechsels von stabiler zu instabiler thermischer Schichtung an der Darßer Schwelle.

In ihren Eigenschaften ähnlich dem Einstrom im September sind eine Reihe weiterer Einströme, entweder mehrere Wochen anhaltend (wie im Juni) oder nur mehrere Tage andauernd (wie Ende Juni und Ende Juli). Diese lassen sich in den Geschwindigkeitsmessungen als (teilweise nur Tage dauernde) Anstiege des östlichen Transportes identifizieren (Abb. 10) und sind wie oben beschrieben mit Anstiegen des Bodensalzgehaltes verknüpft. Die beiden kurzen Einströme hinterlassen auch ein deutliches Signal in den Sauerstoffkonzentrationen, während beim langen Einstrom im Juni die Sauerstoffkonzentration am Boden mit Werten zwischen 4-5 ml/l über mehrere Wochen lang niedrig bleibt. Es wird vermutet, dass aufgrund der nur moderaten Einstromgeschwindigkeiten während dieses Einstroms der von der Nordsee importierte Sauerstoff bereits auf dem Weg aufgezehrt wurde und somit für die Belüftung der weiter östlich gelegenen Becken nicht mehr zur Verfügung steht.

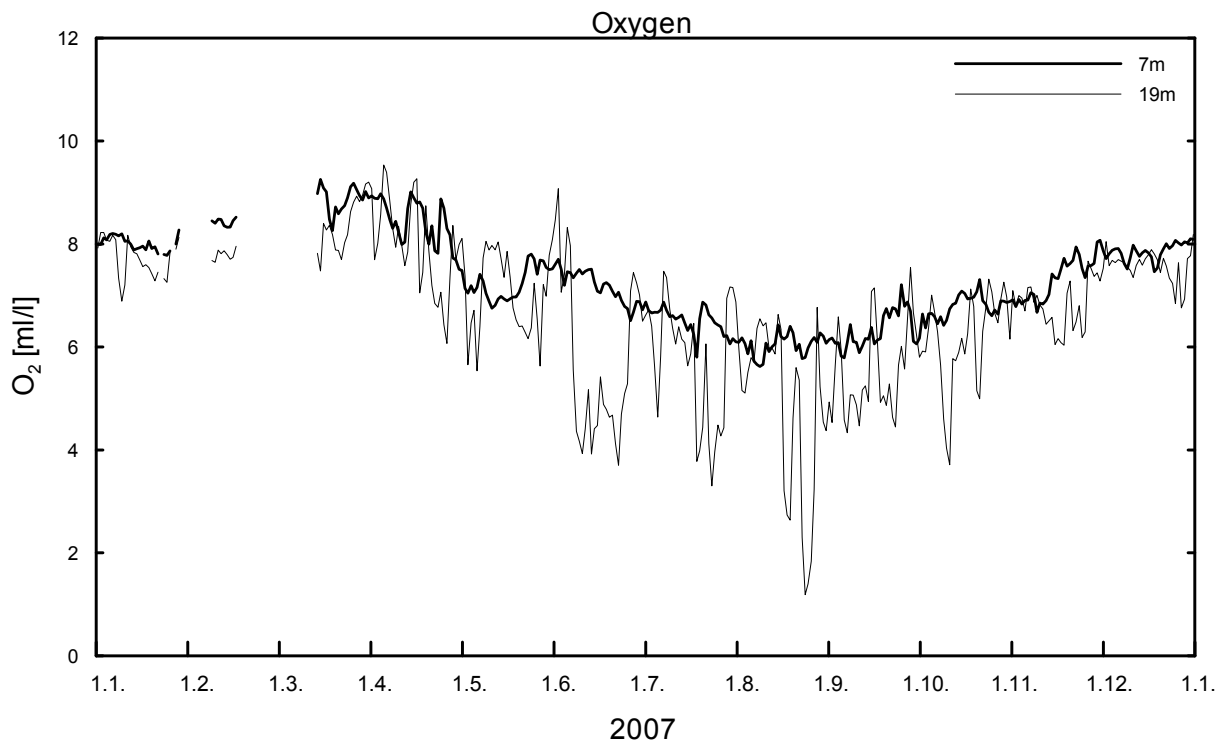


Abb. 9

Verlauf des Sauerstoffgehaltes in der Deck- und Bodenschicht auf der Darßer Schwelle im Jahre 2007

Fig. 9

Dissolved oxygen content measured in the surface and bottom water layer at the Darss Sill station in 2007

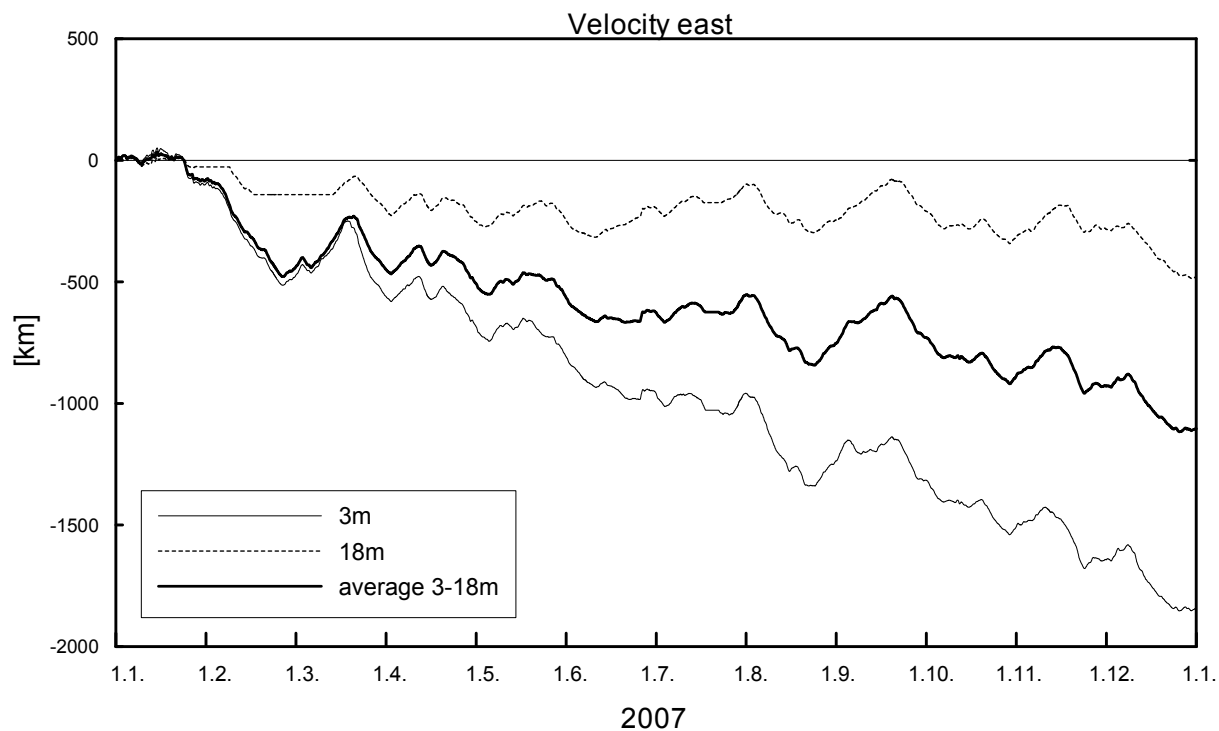


Abb. 10

Ostkomponente der progressiven Vektordiagramme der Strömung in 3 m Tiefe (ausgezogene Linie), der vertikal gemittelten Strömung (dicke Linie) und der Strömung in 17 m Tiefe (gestrichelte Linie) auf der Darßer Schwelle in 2007

Fig. 10

East component of progressive vector diagrams of the current in 3 m depth (solid line), the vertical averaged current (thick line) and the current in 17 m depth (dashed line) at the Darss Sill in 2007

4. Beobachtungen an der Bojenstation "Arkonabecken "

Zur Dynamik der salzreichen Bodenströmungen im Bereich des Arkonabeckens fanden in den letzten Jahren intensive Untersuchungen statt, die im Rahmen des von der DFG und dem BMU geförderten Projektes „QuantAS“ (Quantification of water mass transformation in the Arkona Sea) durchgeführt wurden. Die Ergebnisse beinhalten unter anderem die ersten direkten Turbulenzmessungen in dichtegetriebenen, salzreichen Bodenströmungen während einiger mittlerer Einstromereignisse (ARNEBORG et al., 2007; SELLSCHOPP et al., 2006; UMLAUF et al., 2007). Diese Daten haben – entgegen früheren Vermutungen – gezeigt, dass die stärkste vertikale Vermischung von einströmenden und darüber liegenden Wassermassen in den Zu- und Abflusskanälen des Arkonabeckens stattfindet. Direkt nachgewiesen wurde zum Beispiel, dass über die Drogenschwelle einströmendes salzhaltiges Bodenwasser zum größten Teil einen etwa 10 km breiten Kanal nördlich von „Kriegers Flak“ passiert, wobei Geschwindigkeiten von bis zu 1 m/s bei einer Bodenschichtdicke von 10-15 m erreicht werden können (UMLAUF et al., 2007). Die mit diesen hohen Strömungsgeschwindigkeiten verbundene Stromscherung führt zu starker Turbulenz und vertikaler Vermischung von ausströmendem Brackwasser und einströmendem Salzwasser. Im Kanal nördlich der Insel Bornholm, der den Ausstromkanal für den salzhaltigen Bodenwasserpool des Arkonabeckens darstellt, wurde eine ähnliche Situation mit ebenfalls starker vertikaler Vermischung beobachtet.

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 2007 operativ. Die Zeitreihen von Wassertemperatur und Salzgehalt in 7 m und 40 m Tiefe sind in Abb. 11 dargestellt. Die an dieser Station in der Deckschicht gemessene Wassertemperatur folgt in ihrem Jahresgang weitgehend dem auf der Darßer Schwelle gemessenen Verlauf (vgl. Abb. 6). Es gibt jedoch auch charakteristische Unterschiede, die besonders im Sommer ausgeprägt sind. Das Maximum der Oberflächentemperatur im Arkonabecken wird Ende August erreicht und liegt mit 18 °C etwas über den höchsten an der Darßer Schwelle gemessenen Temperaturen. Die thermische Schichtung ist im Arkonabecken insgesamt ausgeprägter und zwar sowohl bezüglich der stabilen thermischen Schichtung während der sommerlichen Erwärmungsphase als auch bezüglich der instabilen thermischen Schichtung während der kalten Jahreszeit bis Ende Februar und ab Anfang September. Beide Effekte lassen sich auf die im Arkonabecken insgesamt deutlich stärkere Dichteschichtung aufgrund des salzreichen Bodenwasserpools zurückführen. Diese unterdrückt die vertikale turbulente Vermischung und isoliert damit das Bodenwasser effektiv von den lokalen atmosphärischen Flüssen. Dieser Effekt ist in der Zeit von etwa Mitte Mai bis Ende Juni besonders evident, in der relativ konstante Bodenwassertemperaturen um 8 °C einem gleichzeitigen starken Anstieg der Deckschichttemperaturen auf ca. 16 °C gegenüberstehen.

Der an der Station "Arkonabecken" gemessene Sauerstoffgehalt ist ebenfalls in Abb. 11 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. In der Bodenschicht erzeugen die vier während der kalten Jahreszeit an der Darßer Schwelle gefundenen Einstromereignisse im Januar, März, November und Dezember auch im Arkonabecken deutliche Signale. Diese zeigen eindeutig die erwarteten Eigenschaften eines Einstroms von kalten, salz- und sauerstoffreichen Wassermassen. Der Einstrom im März z.B. bewirkt einen Anstieg der Salzkonzentrationen von 9 psu auf etwa 16 psu und markiert gleichzeitig durch die Advektion von kaltem Oberflächenwasser aus der Beltsee in die Bodenschicht des Arkonabeckens den Umschlag von instabiler auf stabile thermische Schichtung (Abb. 11). Auch der Bodensauerstoffgehalt (Abb. 11) erholt sich während dieses Einstroms nachhaltig und erreicht

bereits Anfang März Werte die den Deckschichtkonzentrationen vergleichbar sind. Ganz ähnliche Muster werden bei den beiden Einstromen in November und Dezember beobachtet, die jeweils zu einer stufenweisen Abkühlung des Bodenwasserpools führen und die Sauerstoffwerte auf die Deckschichtkonzentrationen ansteigen lassen. Lediglich der kurze Einstrom zu Anfang des Jahres, obwohl im Aufbau ähnlich, erzeugt eine Erholung des Bodensauerstoffs, die nur von kurzer Dauer ist und sich damit nicht nachhaltig auf die Belüftung der weiter östlich gelegenen Becken auswirken kann. Einige kleinere Einstromereignisse in den Monaten April und Mai, die sowohl im Pegel von Landsort Norra als auch auf der Darßer Schwelle identifiziert wurden, zeigen sich in ihrer Summe als leichte Anstiege der Bodensalzkonzentrationen und, besonders im Monat Mai, als vorübergehende leichte Anstiege des Bodensauerstoffgehaltes.

Etwas anders verhält sich das im September, also während der warmen Jahreszeit, einströmende Wasser, das bereits an der Darßer Schwelle identifiziert wurde. Dieses Einstromwasser wies an der Darßer Schwelle nur eine Sauerstoffkonzentration von unter 6 ml/l auf und hat damit nur ein sehr eingeschränktes Belüftungspotential (Abb. 6). Insofern ist es nicht überraschend, dass der in Abb. 11 gezeigte Anstieg des Bodensauerstoffgehaltes im September, obwohl nachweisbar, nur recht schwach ausfällt. Dieser leichte Anstieg ist von einem ebenfalls leichten Anstieg des Bodensalzgehaltes begleitet (Abb. 11). Am deutlichsten hingegen zeigt sich die Präsenz einer neuen Wassermasse im September in dem in Abb. 11 dargestellten Temperaturverlauf, der deutlich die durch diesen warmen Einstrom verursachte Temperaturerhöhung demonstriert. Umgekehrt zum Effekt des kalten Einstromes im März markiert der warme Einstrom im September die Umkehr von stabiler zu instabiler thermischer Schichtung.

Mit Ausnahme des warmen Einstromereignisses im September sind kurzfristige Änderungen der Bodenwassertemperaturen, wie sie während der warmen Jahreszeit 2007 häufig beobachtet werden, etwas schwerer zu interpretieren, da sie von zwei Prozessen gesteuert werden, die simultan auftreten können. Einerseits können sich die Bodenwassertemperaturen bei Westwindlagen durch den kurzzeitigen Einstrom von warmem, salzreichen Wasser aus der Beltsee erhöhen. Anzeichen für eine Reihe solch kurzzeitiger Einstromereignisse sind bereits an der Darßer Schwelle gefunden worden. Andererseits wird bei westlichen Winden aber auch warmes Oberflächenwasser durch den mit der Erdrotation verbundenen Ekmaneffekt an südlichen Hängen nach unten transportiert („Downwelling“). Dies kann an der Arkonastation ebenfalls lokal zu einer Erhöhung der Bodentemperaturen führen. Im ersten Fall sind Temperaturerhöhungen mit einem Anstieg, im zweiten Fall dagegen mit einem Abfall der Salzgehalte korreliert. In diesem Sinne sind die ausgeprägte Temperaturspitze Ende Juni ebenso wie fast alle anderen kurzfristigen Temperaturanstiege während der warmen Jahreszeit 2007 ein Resultat von Downwelling bei westlichen Winden und haben somit wahrscheinlich keinen nennenswerten Effekt auf die Belüftung der Halokline der tieferen Becken.

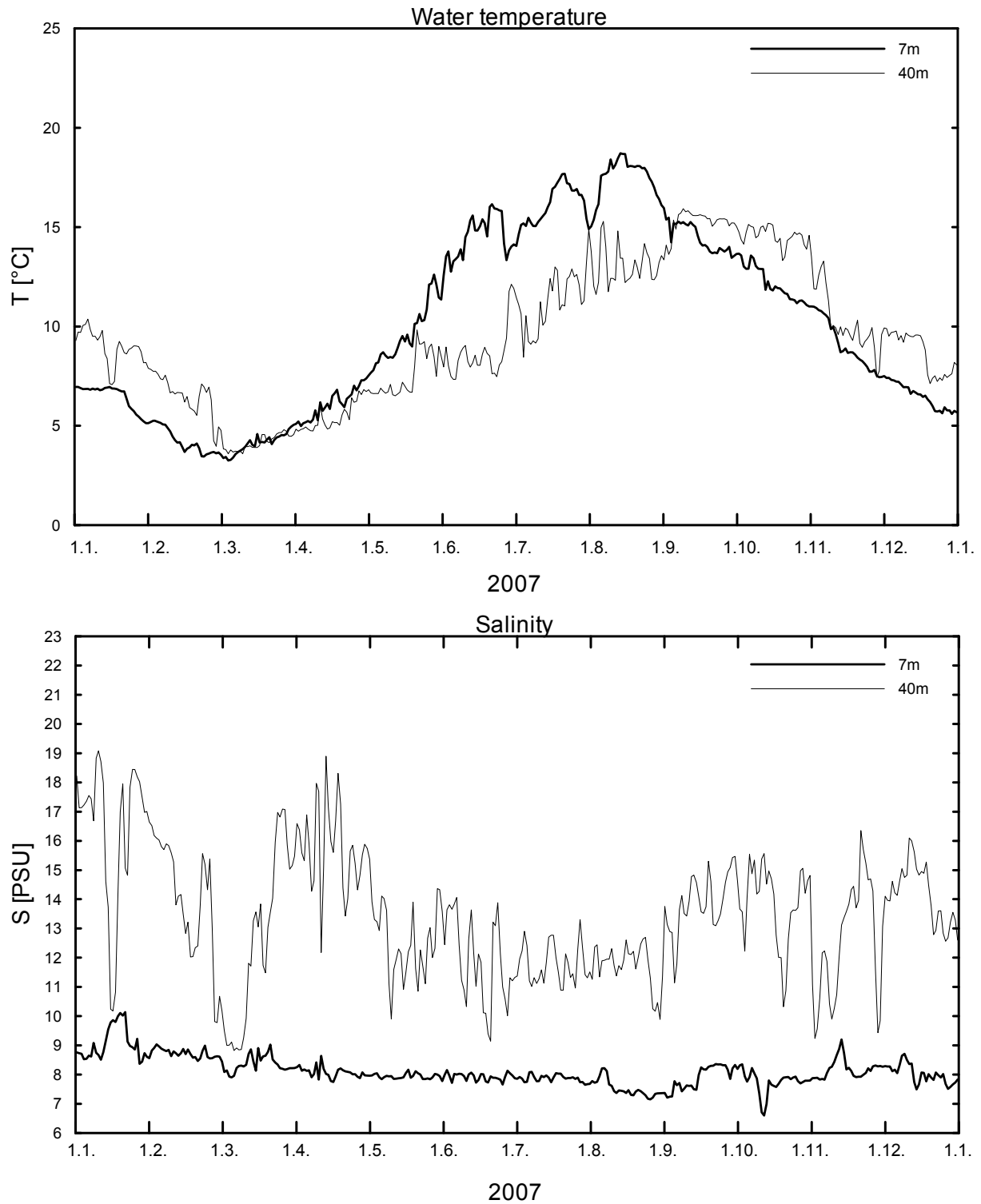


Abb. 11
Verlauf der Wassertemperatur (A) und des Salzgehaltes (B) in der Deck- und Bodenschicht im Arkonabecken (Station AB) im Jahr 2007

Fig. 11
Water temperature (A) and salinity (B) measured in the surface layer and near the bottom in 2007 at Station AB in the Arkona Basin

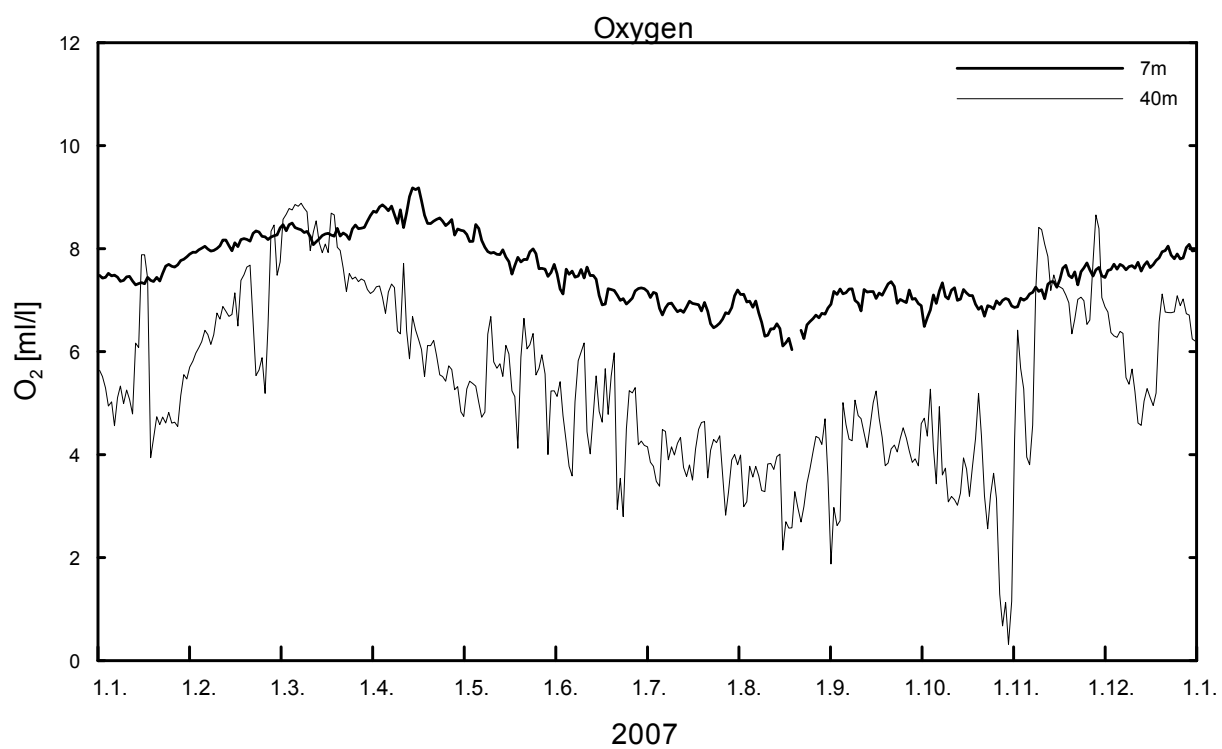


Abb. 11 Forts.

Verlauf der Sauerstoffgehaltes in der Deck- und Bodenschicht im Arkonabecken (Station AB) im Jahr 2007

Fig. 11 cont

Oxygen concentration measured in the surface layer and near the bottom in 2007 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, MOHRHOLZ and SEIFERT (2001) beschrieben worden. Bei Westwindlagen wird dort gut durchmisches 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). Im Jahr 2007 waren die Mitte 2006 neu eingesetzten Sauerstoffsensoren („Optode“ von „Aanderaa“) erstmalig ganzjährig in Betrieb. Im Vergleich zu den früheren Sensoren liefert die Optode eine bessere absolute Genauigkeit, die im Langzeitbetrieb auf besser als 0,1 ml/l geschätzt wird. Es ist geplant, mittelfristig auch die Stationen auf der Darßer Schwelle und im Arkonabecken mit Optoden auszustatten. Im Gegensatz zum Vorjahr wurde die Station 2007 ganzjährig betrieben (keine Eisefahr) und lieferte einen nahezu lückenlosen Datensatz für alle Parameter.

Die Zeitreihen von Wassertemperatur und Salzgehalt in 3 m und 13 m Tiefe sind in Abb. 12 dargestellt. Die an dieser Station gemessenen Wassertemperaturen folgen in ihrem Jahresgang weitgehend dem auf der Darßer Schwelle und im Arkonabecken gemessenen Verlauf (vgl. Abb. 6 und Abb. 11). Jedoch sind die Extremwerte in der Pommerschen Bucht aufgrund der geringen Wassertiefe kräftiger ausgebildet, so dass im Sommer die Maximaltemperaturen auf über 20 °C ansteigen, während Ende Februar die im Vergleich zu den anderen beiden Stationen geringen Minimaltemperaturen von etwa 2 °C erreicht werden. Im Jahr 2007 wurde im Bereich der Station „Oder Bank“ keine Eisbildung beobachtet. Im Gegensatz zum Arkonabecken ist eine stabile thermische Schichtung während der warmen Jahreszeit nicht durchgehend vorhanden, sondern beschränkt sich auf die Periode Mitte Mai bis Mitte Juni und jeweils einige Wochen im Juli und August.

Der in den gleichen Tiefen wie die Wassertemperatur gemessene Salzgehalt ist ebenfalls in Abb. 12 dargestellt. Die Salzgehalte schwanken stark zwischen etwa 5 und 9 psu, liegen aber noch im Bereich der üblicherweise beobachteten Grenzen. Markant sind zahlreiche Einbrüche des Salzgehaltes von mehreren psu, typischerweise über mehrere Tage andauernd. In diesen Phasen schichtet sich Mischwasser aus dem Oderhaff mit einem deutlich niedrigeren Salzgehalt über das Wasser der Pommerschen Bucht. Aufgrund der höheren Temperaturen des Haffwassers während der warmen Jahreszeit sind die niedrigen Oberflächensalzkonzentrationen während dieser Einschübe mit Temperaturspitzen korreliert.

Der in Abb. 13 gezeigte Oberflächensauerstoffgehalt in der Pommerschen Bucht schwankt zwischen Werten von 6-10 ml/l und zeigt damit eine im Vergleich zu den Vorjahren relativ breite Variabilität. Maximalwerte schwanken um 9 ml/l in den Monaten März und April. Die geringsten Werte um 6 ml/l werden in der Deckschicht während eines ausgedehnten Minimums von Juni bis Ende August erreicht. Ab September steigen die Sauerstoffkonzentrationen in der Deckschicht kontinuierlich bis auf 8 ml/l zum Ende des Jahres an (Abb. 13). Die geringe Dichteschichtung des Jahres 2007 und die damit verbundene Erleichterung vertikaler Durchmischung sorgt für vergleichbare Oberflächen- und Bodensalzgehalte während großer Teile des Jahres (Abb. 12). Stabile Schichtung isoliert die Bodenschicht vom atmosphärischen Sauerstoffeintrag während der

warmen Jahreszeit nur von etwa Mitte Mai bis Mitte Juni und für einige Wochen jeweils im Juli und August. Abb. 13 illustriert, dass dieser Isolierungseffekt unmittelbar zu einer Reduktion des Sauerstoffgehalts durch Zehrungsprozesse in der Bodenschicht führt. Während der stabil geschichteten Phase im Juni werden Minimalkonzentrationen von weniger als 3 ml/l erreicht. Mehrere kürzere Perioden mit stabiler Schichtung im Frühling ab etwa Mitte März bilden sich ebenfalls in reduzierten Bodensauerstoffgehalten ab, allerdings sind diese deutlich geringer ausgeprägt. Stabile Schichtung durch erhöhte Bodensalzgehalte wird auch von Februar bis Mitte März beobachtet, doch eine entsprechende Reduktion des Bodensauerstoffgehaltes ist nicht sichtbar. Da Zehrungsprozesse in der kalten Jahreszeit zwar reduziert, jedoch nicht aufgehoben sind, ist anzunehmen, dass dort ein lateraler Sauerstoffeintrag durch Advektion stattgefunden hat.

Interessanterweise sind die oben diskutierten kurzzeitigen Einbrüche des Salzgehaltes und die Temperaturspitzen aufgrund von Brackwasserfahnen aus dem Oderhaff mit erhöhten Sauerstoffkonzentrationen in der Deckschicht korreliert. Dies ist erstaunlich, da das wärmere Haffwasser eine geringere Sättigungskonzentration für Sauerstoff aufweist und daher niedrige Oberflächenkonzentrationen erwarten ließe. Es liegt nahe, dass hier die erhöhte Produktion im Oderhaff zu übersättigten Sauerstoffkonzentrationen führt, welche mit dem Haffwasser zur Station OB transportiert werden. Zusätzlich oder alternativ werden mit dem Haffwasser hohe Nährstoffkonzentrationen in der Deckschicht aus dem Haff exportiert, was an der Station OB lokal zu erhöhter Produktion und damit wiederum zu erhöhten – und möglicherweise übersättigten – Sauerstoffkonzentrationen an der Oberfläche führen kann.

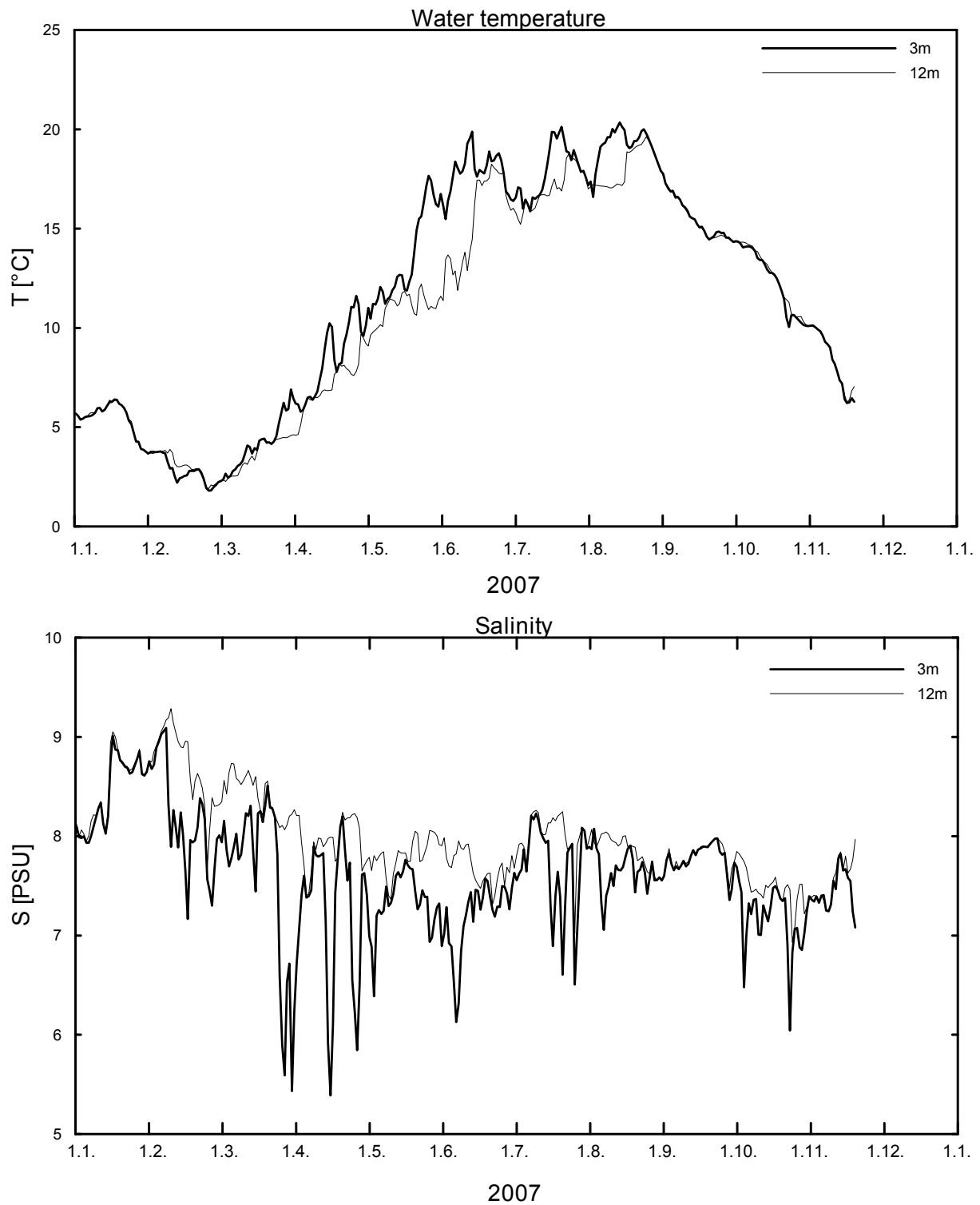


Abb. 12
Verlauf der Wassertemperatur (A) und des Salzgehaltes (B) in der Deck- und Bodenschicht in der Pommerschen Bucht (Stat. OB) im Jahr 2007

Fig. 12
Water temperature (A) and salinity (B) measured in the surface layer and near the bottom in 2007 at Stat. OB in the Pomeranian Bight

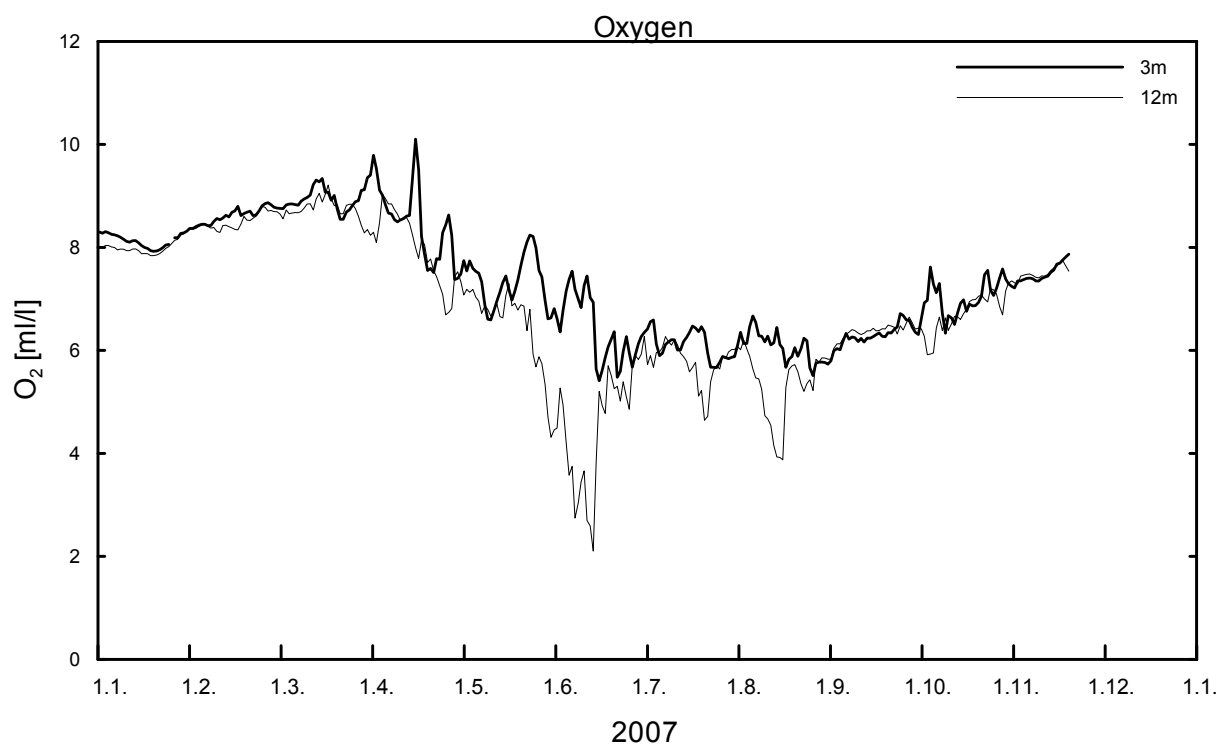


Abb. 13
Verlauf der Sauerstoffgehaltes in der Deck- und Bodenschicht in der Pommerschen Bucht (Stat. OB) im Jahr 2007

Fig. 13
Oxygen measured in the surface layer and near the bottom in 2007 at Stat. OB in the Pomeranian Bight

6. Hydrographisch-hydrochemische Bedingungen

Die nachfolgend dargestellten Beschreibungen der hydrographisch-chemischen Situation im Jahre 2007 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 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. 23) 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). Tendaussagen für Nährstoffe im Oberflächenwasser werden dagegen nur an Hand der Winterkonzentrationen vorgenommen (Tab. 8).

6.1 Wassertemperatur

Die thermische Entwicklung der Ostsee im Jahr 2007 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, 2006), 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 2007 wird auf der Grundlage von Satellitendaten des Advanced Very High Resolution Radiometers (AVHRR) der amerikanischen Wettersatelliten NOAA 17 und 18 dargestellt. Tagesmittelwerte werden für die detaillierte Beschreibung der thermischen Entwicklung 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 2007 war in der Wasseroberflächentemperatur durch ein vergleichsweise warmes erstes Halbjahr gekennzeichnet und war im Jahresmittel das wärmste Jahr im Untersuchungszeitraum. Dazu haben insbesondere die Monate Januar, Februar und Juni beigetragen, die in der südlichen und eigentlichen Ostsee die wärmsten im Untersuchungszeitraum 1990-2007 waren. Die Monate März- Mai waren vergleichbar mit dem Jahr 1990. Die maximale Eisbedeckung in der nördlichen Ostsee war bereits am 23.02.2007 erreicht und blieb in ähnlicher Weise bis 05.03.2007 erhalten. Nach dem warmen Juni lagen die Monate Juli, August und September unter dem langjährigen Mittel. Die höchsten Temperaturen waren am 14. August erreicht. Durch die niedrigen Temperaturen im Sommer war das Jahr auch nur durch sehr geringe Cyanobakterienaktivitäten gekennzeichnet. Einige regionale Besonderheiten traten speziell im September auf.

Anhand der Kältesummen der Lufttemperatur von Warnemünde (Tab. 2) zeigt sich, dass der Winter 2006/2007 der mildeste seit über 50 Jahren war. Die Wärmesumme des Sommers 2007 lag mit 153,1 K d im Bereich des langjährigen Mittelwertes (143,8 K d) aber weit unter den Werten der letzten warmen Jahre.

Diese Charakteristiken in der Lufttemperatur spiegeln sich auch in der Wasseroberflächentemperatur wider. Die Anomalien der Monatsmittel des Jahres 2007 sind in Abb. 14 dargestellt. Die Temperaturen lagen im Januar in der gesamten Ostsee mit 2-3 K über dem langjährigen Mittelwert und erreichten im Kattegat und in der Pommernbucht sogar Anomalien von + 4-5 K. In den Folgemonaten waren die Temperaturen dann in der nördlichen Ostsee im Bereich des langjährigen Mittelwertes. In den anderen Teilen waren die Anomalien etwas geringer als im Januar, blieben allerdings in der Tendenz erhalten. Im Mai waren nur noch geringe Abweichungen von den langjährigen Mittelwerten in der gesamten Ostsee zu verzeichnen. Das verstärkte sich dann im Juni wieder massiv, war aber regional sehr unterschiedlich. In der südlichen Gotlandsee traten verursacht durch eine Hochdrucklage über der zentralen Ostsee Anomalien bis zu + 5 K auf. Die damit im Zusammenhang stehenden Ostwinde führten zu anhaltenden Auftriebsereignissen an den Südküsten im Finnischen Meerbusen, in der westlichen Ostsee und entlang der polnischen Küste, was sich in negativen Anomalien äußerte. Dagegen waren die Monate Juli, August und September in weiten Teilen der Ostsee durch negative Anomalien gekennzeichnet. In den zentralen Bereichen wurden teilweise Anomalien bis -2 K erreicht. In den Monaten Oktober, November und Dezember dominierten dann wieder positive Anomalien bis + 2 K in weiten Teilen der gesamten Ostsee.

Die Besonderheiten des Jahres 2007 kommen auch sehr gut im saisonalen Verlauf der Monatsmitteltemperatur in der Arkonasee und in der Gotlandsee zum Ausdruck (Abb. 15). Die Monate Januar und Februar wichen mit +2 bis +3 K am stärksten von den langjährigen Mittelwerten ab, was sich im März und April nur leicht abschwächte. Im Mai näherten sich die Temperaturen dem langjährigen Mittelwert. Der warme Juni lag wieder mit +2 bis +3 K über dem Mittelwert, wogegen dann der Rest des Jahres nur geringfügig von den langjährigen Mittelwerten abwich. Bemerkenswert ist, dass nach den warmen Sommern der letzten Jahre 2007 die Mittelwerte für Juli und August in beiden Gebieten unter den langjährigen Mittelwerten lagen.

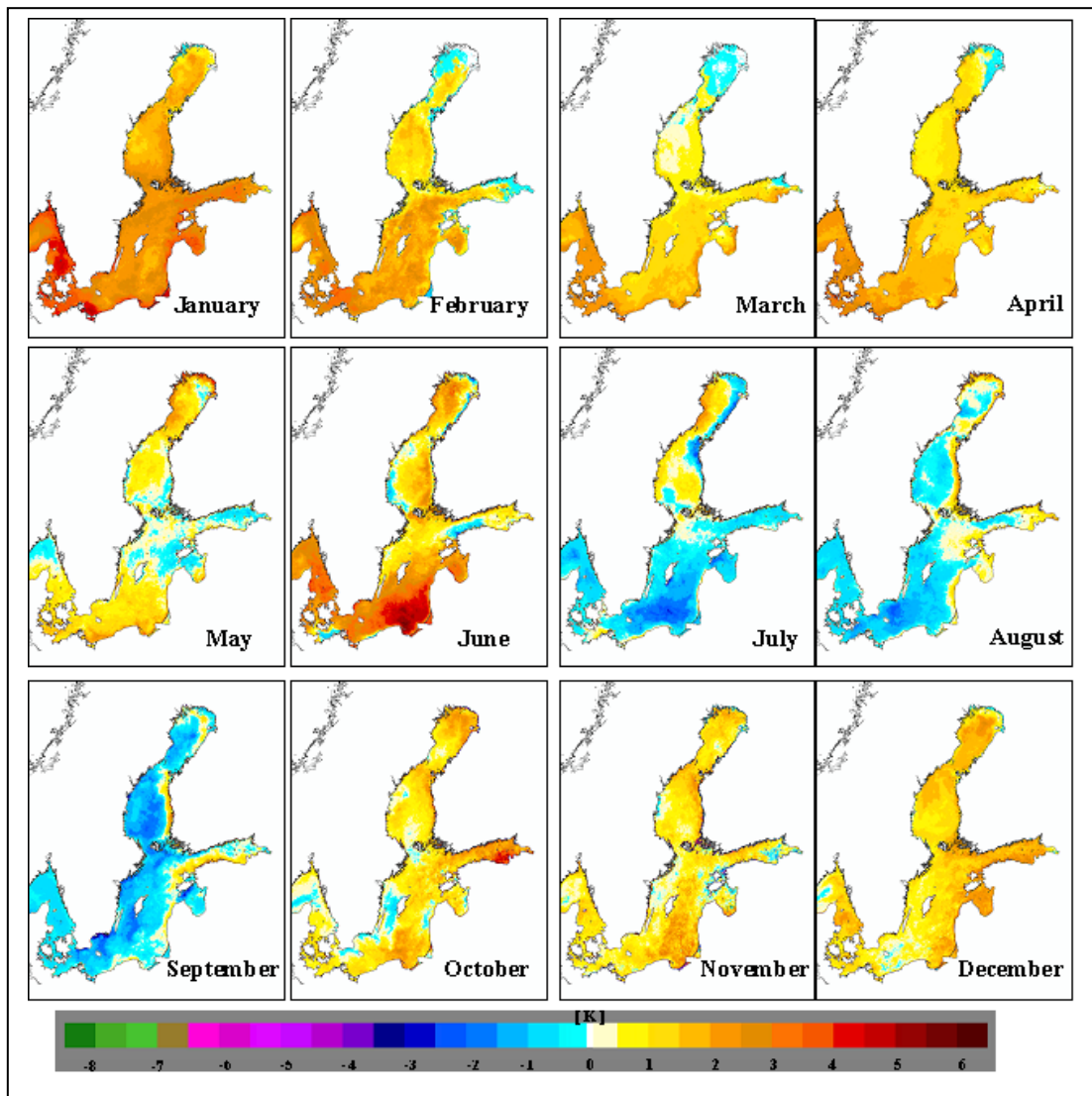


Abb. 14

Anomalien der Wasseroberflächentemperatur (SST) der Ostsee in den Monatsmittelwerten des Jahres 2007 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 2007 referring to the mean values of the years 1990 – 2004

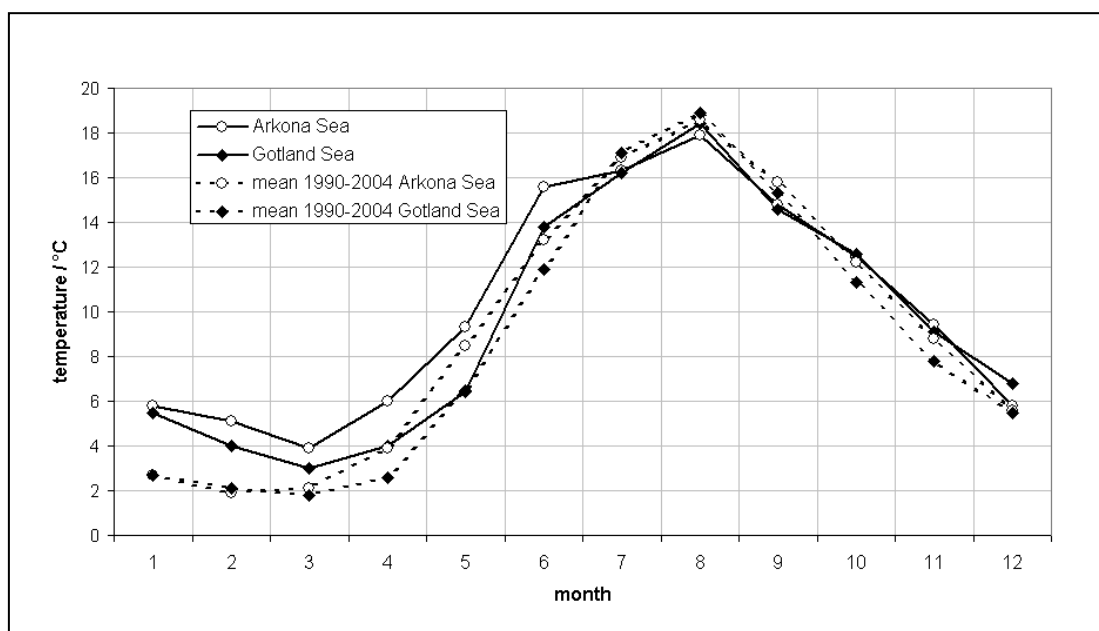


Abb. 15

Saisonaler Verlauf der Wasseroberflächentemperatur (NOAA-SST) in der zentralen Arkona- und Gotlandsee des Jahres 2007 im Vergleich zum jeweiligen 15-Jahresmittel (1990-2004)

Fig. 15

Seasonal course of sea surface temperature (NOAA-SST) in the central Arkona- and Gotland Sea in 2007 in comparison to the mean values of the last 15 years (1990-2004)

Im Folgenden wird detailliert die thermische Entwicklung im Jahr 2007 in der Ostsee dargestellt. Anfang Januar waren noch weite Teile der zentralen und westlichen Ostsee durch Temperaturen um 7 °C charakterisiert. Das reduzierte sich dann von Norden her ab Mitte Januar. Mitte Februar lagen die Temperaturen zwischen 3 und 5 °C. In der zweiten Hälfte des Februars waren kaum wolkenfreie Pixel vorhanden. In diesen Zeitraum fiel auch die maximale Eisausdehnung des Jahres (23.02.2007, Abb. 18). Der Finnische Eisdienst hat eine maximale Ausdehnung von 139.000 km² bestimmt. Eine ähnliche Eisbedeckung blieb bis zum 5. März erhalten. Die Temperaturverteilung entlang des Monitoringschnittes durch die zentralen Becken der Ostsee für den Monat Februar 2007 im Vergleich zum Mittel 1990 – 2004 und zum Februar des Vorjahres zeigt deutlich, dass die gesamte Ostsee außergewöhnlich warm war. Im Bereich westliche Ostsee bis Gotlandsee lagen die Temperaturen um 2-3 K über dem langjährigen Mittel (Abb. 16).

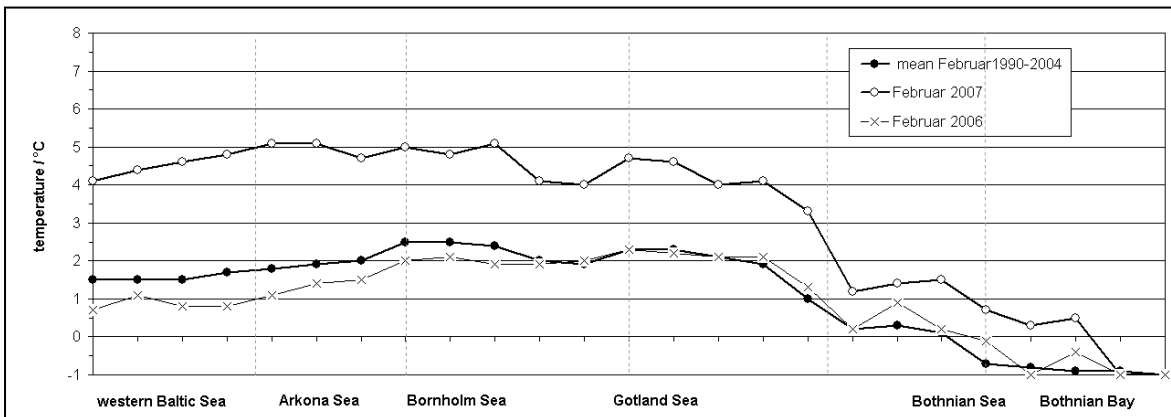


Abb. 16

Temperaturverteilung entlang des Monitoringschnittes durch die zentralen Becken der Ostsee für den Monat Februar 2007 im Vergleich zum Mittel 1990 – 2004 und zum Februar des Vorjahres

Fig. 16

Temperature distribution along the monitoring transect through the central basins of the Baltic Sea in February 2007 in comparison to the mean value of 1990 – 2004 and to February of the previous year

Bis etwa 10. März beherrschten Temperaturen um 3 °C die zentrale und westliche Ostsee. Die niedrigsten Temperaturen waren um den 5. März zu verzeichnen. Danach erfolgte von Westen her eine Erwärmung, so dass die Temperaturen Ende März in der südlichen Ostsee bei 5 °C und in der Bottensee bei maximal 2 °C lagen, die Bottonwiek war noch eisbedeckt. Im April erwärmte sich die Ostsee weiter von Südwesten. Am 27. April, dem wärmsten Tag des Monats, lagen die Temperaturen in der südlichen und westlichen Ostsee zwischen 8 und 10 °C. Zum Ende des Monats waren die Werte leicht niedriger. Diese Situation blieb bis ca. 10. Mai erhalten. Dann war das Eis in der nördlichen Ostsee geschmolzen, aber die Temperaturen lagen im gesamten Bottnischen Meerbusen noch weit unter 5 °C. Bis Ende Mai und weiter bis 5. Juni gab es nur eine geringfügige Erwärmung, die dann aber massiv während der genannten Hochdrucklage einsetzte. Bis zum wärmsten Tag in dieser Phase, dem 11. Juni, stiegen die Temperaturen in der südlichen Gotlandsee um teilweise mehr als 7 °C auf ca. 18-20 °C. Ausgenommen waren die Südküsten und die westliche Ostsee aufgrund des starken Auftriebes bei östlichen Winden. In der Gotlandsee blieben die Temperaturen in etwa die nächsten drei Tage erhalten. Danach nahm die Temperatur aufgrund von westlichen Winden und starker Wolkenbedeckung wieder stark ab. Ende des Monats lagen die Temperaturen in der gesamten Ostsee wieder zwischen 13 und 17 °C. Das Monatsmittel Juni war sehr stark durch die Phase vom 5. bis 15. geprägt. Diese Situation blieb in der eigentlichen Ostsee bis ca. 15. Juli erhalten. Die nördliche Ostsee war dagegen starken Schwankungen unterworfen. Vom 3.-5. Juli war die nördliche Ostsee mit 17-18 °C am wärmsten. Um den 12. Juli sorgte starker Auftrieb in der Bottensee für Temperaturen unter 10 °C. Ab 15. Juli erwärmte sich die Ostsee wieder auf 15-17 °C, was bis Ende des Monats in etwa erhalten blieb. In der ersten Augushälfte erwärmte sich die gesamte Ostsee weiter und erreicht am 14.8. die maximalen Temperaturen von 18-20 °C (Abb. 18). Bis ca. 25.8. verringerten sich die Temperatur von Norden nur geringfügig, bevor dann durch Windmischung eine massive Reduzierung auf ca. 15-17 °C bis Ende des Monats erfolgte. Abb. 17 zeigt die Temperaturverteilung entlang des Monitoringschnittes durch die zentralen Becken der Ostsee für den Monat August 2007 im Vergleich zum Mittel 1990 –

2004, zum warmen August 2006 und zum kältesten August 1998. Von der westlichen Ostsee bis in die Gotlandsee liegt die Temperatur unter dem langjährigen Mittelwert.

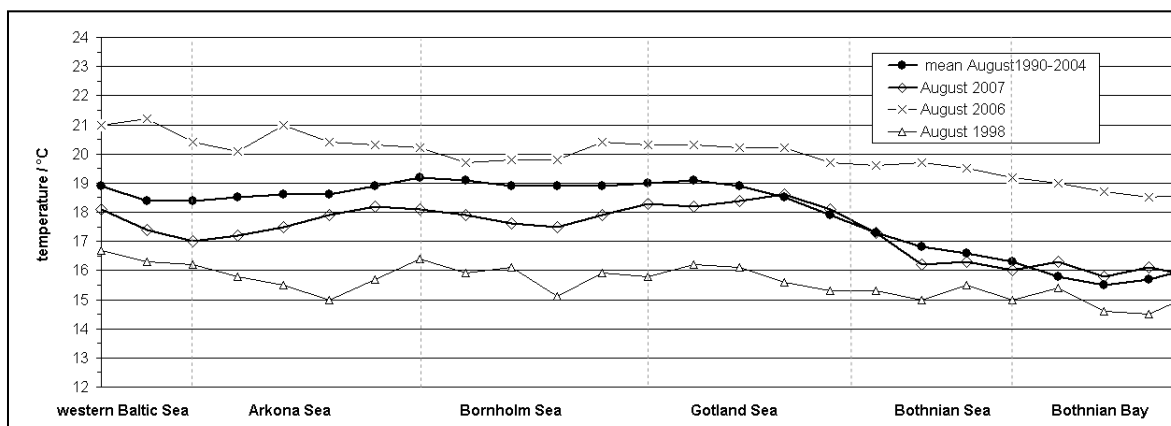


Abb. 17

Temperaturverteilung entlang des Monitoringschnittes durch die zentralen Becken der Ostsee für den Monat August 2007 im Vergleich zum Mittel 1990 – 2004, zum warmen August 2006 und zum kältesten August 1998

Fig. 17

Temperature distribution along the monitoring transect through the central basins of the Baltic Sea in August 2007 in comparison to the mean value of 1990 – 2004, to the warm August 2006 and to the coldest August 1998

Diese Situation blieb bis ca. 15. September erhalten. Danach kühlte die Ostsee weiter von Norden ab. Ende September lagen die Temperaturen in der nördlichen Ostsee unter 10 °C und in den anderen Regionen zwischen 12 und 15 °C. Diese Temperaturen waren bis 10. Oktober zu beobachten. Danach kühlte sich die Ostsee weiter ab. Ende Oktober lagen die Temperaturen der Ostsee im Norden bei 7 °C und sonst bei 10-12 °C. Das reduzierte sich bis Ende November auf 3-5 °C im Norden und auf 7 °C in den zentralen Teilen. Ende Dezember lagen die Temperaturen dann bei 3 °C im Norden und bei etwa 5 °C in der zentralen Ostsee.

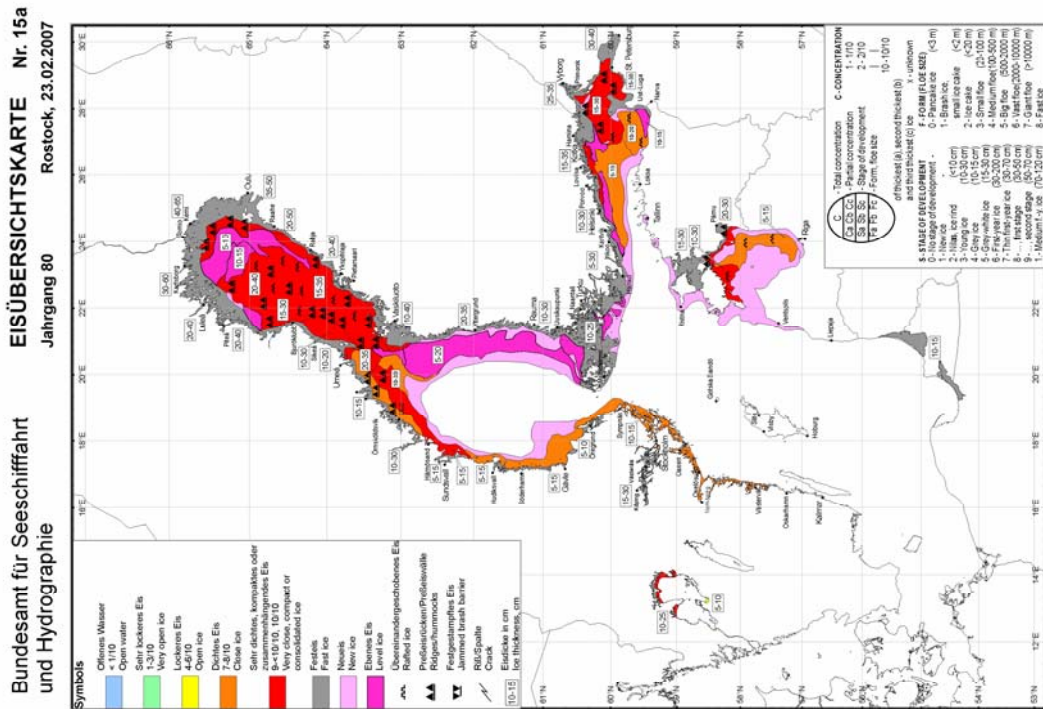
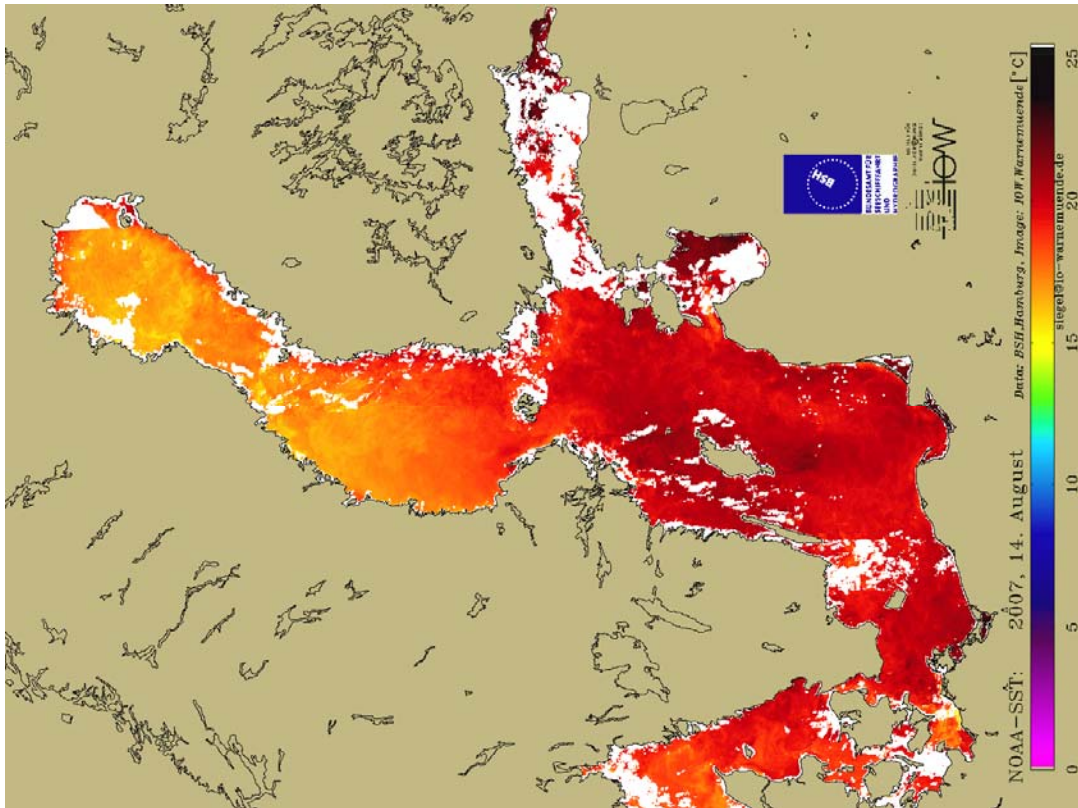


Abb. 18
 Maximale Eisbedeckung der Ostsee im Jahr 2007 am 23.02.2007 (SCHMELZER, 2007) und
 Temperaturverteilung der Ostsee am wärmsten Tag, dem 14. August 2007

Fig. 18
 Maximum ice coverage of the year 2007 on 23 February (SCHMELZER, 2007) and
 temperature distribution of the Baltic on the warmest day of the year (14 August 2007)

6.1.2 Vertikalverteilung der Wassertemperatur

Die vertikale Temperaturverteilung in der westlichen und zentralen Ostsee im Verlauf des Jahres 2007 ist anhand der Überwachungsfahrten des IOW in der Abb. 19 zusammengestellt. Starke barotrope Einstromereignisse aus dem Kattegat in die Ostsee waren 2007 nicht zu beobachten, jedoch gab es beim Landsortpegel und im Tiefenwasser des Bornholmbeckens Anzeichen für fünf kleine barotrope Einstromphasen über das ganze Jahr verteilt, deren zumeist indirekte Auswirkungen sich in Temperatur- und Salzgehaltssignalen bis zum Farötief verfolgen ließen.

Das wichtigste Temperaturmerkmal im Tiefenwasser der zentralen Ostsee war auch noch 2007 die Auswirkung des warmen baroklinen Einstroms 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 barotropen Einstrom vom Januar 2003 kurzzeitig dramatisch abgesenkt worden waren, 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 2005 und 2006 nur noch unwesentlich um 5,9 °C ($\pm 0,02$ °C bzw. $\pm 0,04$ °C, siehe Tab. 5). Die nach dem März 2004 beobachteten starken Fluktuationen um einen Durchschnitt von ca. 6 °C an einer Verankerung im östlichen Gotlandbecken klangen 2005 fast völlig ab. Das zeigt, dass es 2005 und 2006 zu keiner wesentlichen neuen Einstromaktivität gekommen war, und dass die dynamischen Prozesse, die im Gotlandbecken durch den Einstrom induziert wurden, 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., 2006a, b, c, d).

Im Bornholmbecken betrug die niedrigste 2007 gemessene Temperatur 3,8 °C in 10 m Tiefe am 21. März 2007, die höchste 17,5 °C am 8. August an der Oberfläche. Definiert man als Thermokline z. B. die Tiefe, bei der über 10 m eine Temperaturänderung von mehr als 1 °C auftritt, so bildete sich diese im April unterhalb von 10 m und vertiefte sich kontinuierlich auf 40 m im Oktober bis Dezember. Ein sommerliches Minimum dieser Tiefe trat nicht auf, die Windverhältnisse des „Siebenschläfer-Sommers“ verhinderten das. Bei 50 und 60 m Tiefe fanden drastische zeitliche Temperatursprünge statt, bedingt durch einen Wechsel zwischen ausströmendem kaltem Winterwasser und einströmendem warmem Wasser vom Arkonabecken, so z. B. von 4,2 °C bei 60 m im Dezember 2006 auf 9,0 °C im Januar 2007, oder von 7,4 °C im November auf 10,4 °C im Dezember 2007 bei 50 m. Entsprechend finden sich in diesem Tiefenbereich wechselnde Temperaturminima und –maxima der Wassersäule, die großräumige advektive Ursachen haben. Temperaturänderungen im Bornholmbecken unterhalb von 60 m Tiefe sind durch Vertikalaustausch bedingt oder durch Einstrom aus dem Arkonabecken, siehe Abschnitt 6.2. Markante Änderungen, die auf Einstromvorgänge hindeuten, fanden statt vom Dezember 2006 mit 8,7 °C zum Januar 2007 mit 9,5 °C in 70 m Tiefe, vom Juni mit 7,8 °C zum Juli mit 8,3 °C, von Ende August mit 7,5 °C zum Ende Oktober mit 8,1 °C, und vom November mit 7,6 °C zum Dezember 2007 mit 8,9 °C. Beim letzten Ereignis wurde eine Erwärmung der gesamten Wassersäule vom Boden bis 50 m beobachtet, ein Zeichen für einen stärkeren Einstrom, während bei den Ereignissen davor die tieferen Schichten kein ansteigendes Temperatursignal zeigten. So sank die bodennahe Temperatur von 9,5 °C im Dezember 2006 auf 8,5 °C im November 2007 fast gleichmäßig ab, wobei z.B. die leichten Abkühlungsschritte zum März und zum Juli auch durch Zustrom kälteren Wassers bedingt sein könnten. Das könnte nur durch Messungen mit höheren zeitlicher Auflösung belegt werden oder durch die gleichzeitige Analyse der Salz- und Sauerstoffbedingungen. Auf der Monitoring-Fahrt am 31. März 2007 wurde zwischen den Stationen 256 und 259 eine warme Einstromzunge (6,0 °C) mit hohem Sauerstoffgehalt (5,7 ml/l)

bei 67 m Tiefe, also oberhalb der Bodenschicht, zwischen der Stolper Rinne und dem östlichen Gotlandbecken beobachtet. Die Durchschnittstemperatur des Bodenwassers bei 80 m im Bornholmbecken lag mit 8,95 °C deutlich über allen Werten der Vorjahre seit mindestens 1992, es überwogen 2007 also warme Einstromvorgänge (Tab. 5). Die Temperaturvariabilität war mit 0,36 °C zwar größer als im „ruhigen“ Jahr 2005, lag aber deutlich unter der der „aktiven“ Jahre 2003, 2004 oder auch 2006.

Die sommerliche Thermokline am Gotlandtief (IOW 271) prägte sich im Mai aus zwischen 5 und 10 Metern und verlagerte sich systematisch bis zu 50 m Tiefe im November. Mit einer Ausnahme Anfang August, als eine zweite Temperatursprungschicht bei 10 m auftrat, war diese thermische Deckschicht das ganze Jahr hindurch gut vermischt. Vom Januar bis zum Dezember 2007 stiegen die Temperaturen der Wassersäule zwischen 80 m Tiefe und dem Boden um bis zu 0,6 °C an, zwischenzeitlich wurde in Bodennähe sogar 1 °C Erwärmung übertroffen. Warme Einstrom-Pulse über 6 °C wurden bei 180 m Tiefe in der zweiten und dritten Januarwoche durch eine Verankerung gemessen. Die vermutliche Ursache dafür war der warme barokline Einstrom im August/September 2006 (NAUSCH et al., 2007). Im April war die bodennahe Schicht mit 7,1 °C um 1,1 °C wärmer als im Vormonat, die Temperatur ging aber bis zum Jahresende wieder auf 6,6 °C zurück. Der zugehörige Einstrom wurde Ende März auch von einer Verankerung registriert; er resultiert offenbar aus dem warmen Tiefenwasser im Bornholmbecken, das im November 2006 dort eingeströmt war und im Januar 2007 über die Stolper Schwelle gehoben wurde und weiter nach Osten floss. Von Mai bis Juni 2007, in manchen Schichten sogar bis Anfang August, fand eine allmähliche Erwärmung aller Schichten von 200 m Tiefe bis zur Sprungschicht statt, bestätigt auch durch eine Verankerung, die Mitte Mai bei 200 m einen Temperaturanstieg von ca. 5,9 auf fast 6,3 °C registrierte. Diese großräumige, durch geringe Dichtegradienten sehr allmählich stattfindende Ersetzung des Tiefenwassers im Gotlandtief ist auch deutlich in der Abb. 19 zu erkennen. Das dabei eingedrungene Wasser wies keine auffälligen Unterschiede im Salzgehalt gegenüber dem bisherigen Wasserkörper auf, siehe Abschnitt 6.2. Als Folge mehrerer einzelner kleinerer Einstromvorgänge in das Gotlandbecken war dort die gesamte Wassersäule unterhalb der Sprungschicht im Dezember 2007 deutlich wärmer als noch im Januar. Ab Mai 2007 lagen unterhalb 125 m alle Temperaturen über 6 °C. Damit setzt sich die Warmphase des Tiefenwassers seit einer Dekade weiter fort, die im Herbst/Winter 1997 begonnen hatte und nur kurz vom starken barotropen Einstrom im Frühjahr 2003 unterbrochen worden war. Markante kalte Signale wurden 2007 nicht beobachtet. Entsprechend war die Durchschnittstemperatur bei 200 m Tiefe mit 6,2 °C die höchste nach 2002, und ihre Schwankungen waren größer als in den beiden Jahren davor.

Temperaturschwankungen traten 2007 im Farötief (IOW 286) von der Dichtesprungschicht bis zum Boden auf, oberhalb von 100 m ohne, darunter mit klar erkennbarer Systematik. Im November/Dezember 2006 hatte es in der gesamten tiefen Wassersäule eine deutliche Abkühlung gegeben. Beginnend im Februar 2007 in Bodennähe bei 195 m stieg die Temperatur Monat für Monat wieder an und erreichte immer höher gelegene Schichten. Der Prozess kam zum Erliegen, als im Oktober die Tiefe von 125 m erreicht war. Alle Indizien sprechen für ein Überströmen von warmem Wasser aus dem Gotlandbecken im Zuge der dort stattfindenden kleineren Einströme, wobei sich dieses Wasser im Farötief am Boden einschob und das zuvor angekommene in die Höhe hob. Die mittlere Temperatur 2007 bei 150 m von 6,02 liegt etwas niedriger als 2006. Die Schwankungen waren etwas geringer als 2006 und deutlich geringer als in den Einstromjahren 2003 und 2004.

Im Landsorttief scheinen die gemessenen Schwankungen unterhalb der Halokline eher auf der Zirkulation inhomogener Wassermassen als auf neuen Einströmen beruht zu haben, während unterhalb von 250 m Tiefe ein Trend zur Abkühlung um etwa 0,1 °C erkennbar ist, möglicherweise

durch das aus dem Farötief verdrängte kältere Wasser. Die mittlere Schwankungsbreite bei 400 m war geringer als in allen vier Jahren davor, der Mittelwert liegt leicht unter dem des Vorjahrs. Im Karlsötief trat bei der tiefen winterlichen Vermischung im Februar/März 2007, bedingt durch die schwache Halokline, eine Abkühlung um fast $0,3\text{ °C}$ bis in Bodennähe auf. Bis Dezember erwärmte sich das Wasser jedoch wieder auf Werte ähnlich denen im Januar 2007, wofür wiederum nur ein Überströmen aus den nördlicheren Becken verantwortlich sein konnte. Der Mittelwert der Temperatur war praktisch gleich denen der beiden Vorjahre, die Fluktuationen waren aber deutlich kleiner. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass in den letzten fünf Jahren sowohl das Bornholmbecken (von $4,0$ auf $8,0\text{ °C}$) wie das Gotlandbecken (von $5,4$ auf $6,2\text{ °C}$) einen klaren Trend zur Erwärmung des Tiefenwassers zeigen, verursacht durch verstärkte Einstromaktivität im Sommer/Herbst und verringerte im Winter/Frühjahr. In den weiter nördlich liegenden Becken ist dieser Trend so nicht oder noch nicht zu erkennen (Tab. 5). Jedoch gibt es deutliche Indizien, dass die aktuell gefundenen Einströme in das Gotlandbecken entsprechende Verschiebungen von vorhandenem wärmerem oder kälterem Wasser in das jeweils nachfolgende Becken verursacht haben.

Die Verhältnisse in der Stolper Rinne werden überwiegend durch die Wassermassen bestimmt, die von Westen her über die Stolpe Schwelle strömen. Je nach Dichte kann dieses Wasser direkt aus einem Einstrom vom Arkona-Becken stammen, oder aber altes, angehobenes Wasser aus dem Bornholmtief sein. Der Kontakt mit dem Winterwasser über der Halokline in gleicher Tiefe wie die Stolper Schwelle hat in der Vergangenheit immer dafür gesorgt, dass selbst in extremen Stagnationsperioden das Wasser in der Stolper Rinne nicht anoxisch wurde (FEISTEL et al., 2006a, b, c). Im Jahresverlauf 2007 änderte sich an der Station 222 die Temperatur in Bodennähe von $9,3\text{ °C}$ ($S = 14,3\text{ psu}$, $O_2 = 2,3\text{ ml/l}$) im Februar auf $8,0\text{ °C}$ ($S = 14,2\text{ psu}$, $O_2 = 2,0\text{ ml/l}$) im Mai, fiel weiter auf $7,0\text{ °C}$ ($S = 13,6\text{ psu}$, $O_2 = 1,5\text{ ml/l}$) im Juli und stieg wieder auf $7,5\text{ °C}$ ($S = 13,0\text{ psu}$, $O_2 = 1,9\text{ ml/l}$) im November. Dieser Temperaturverlauf mit sommerlichem Minimum ist dem saisonalen Zyklus an der Oberfläche genau entgegengesetzt und entspricht dem im Bornholmtief bei 60 m gemessenen. 2007 wurde also im Mittel das bodennahe Wasser nach seiner Bildung an der Kattegatfront über ein halbes Jahr vor und im Bornholmtief gespeichert, bevor es entsprechend verspätet durch nachfolgende Einströme die Stolper Schwelle überqueren konnte.

Der Schnitt in Abb. 19 von Anfang Februar 2007 zeigt, wie warmes Wasser mit über 9 °C das tiefe Bornholmbecken bis zur Halokline bei 60 m gefüllt hatte, über die Stolper Schwelle strömte und mit Temperaturen über 6 °C bis in das östliche Gotlandbeckens vordrang. Ein entsprechender Belüftungseffekt ist in Abb. 22 zu sehen, wobei sich das Wasser am Eingang zur zentralen Ostsee in einen Zweig unter der Halokline und einen in Bodennähe aufteilt. Nachdrängendes kaltes Wasser ($< 5\text{ °C}$) aus dem Arkonabecken, das wahrscheinlich aus einem kleineren barotropen Einstrom durch den Öresund entstammte, trieb diesen Prozess weiter voran und schichtete warmes Wasser ($> 6\text{ °C}$) bevorzugt weiter bei etwa 140 m Tiefe in das Gotlandbecken ein, wie im Schnitt vom März/April zu sehen ist. Im Mai war das Gotlandbecken bereits vom Boden bis 120 m Tiefe mit warmem Wasser aufgefüllt, gewöhnlich einer Mischung aus neu eingeströmtem und dort bereits vorhandenem Wasser, und ein Überströmen dieses Wassers mit $> 6\text{ °C}$ in das Farötief begann. Im Juli/August hatte das warme Wasser alle Schichten vom Boden bis etwa 110 m Tiefe ersetzt, und das Überströmen ins Farötief beschleunigte sich. Gleichzeitig drang neues, diesmal warmes Einstromwasser in das Arkonabecken ein. Der erneute Zustrom aus dem Arkona- in das Bornholmbecken im Oktober/November 2007 setzte ein neues Überströmen der Stolper Schwelle in Gang, während das Farötief inzwischen mit dem übergeströmten Wasser aus dem Gotlandtief angefüllt war und ebenfalls Temperaturen höher als 6 °C aufwies.

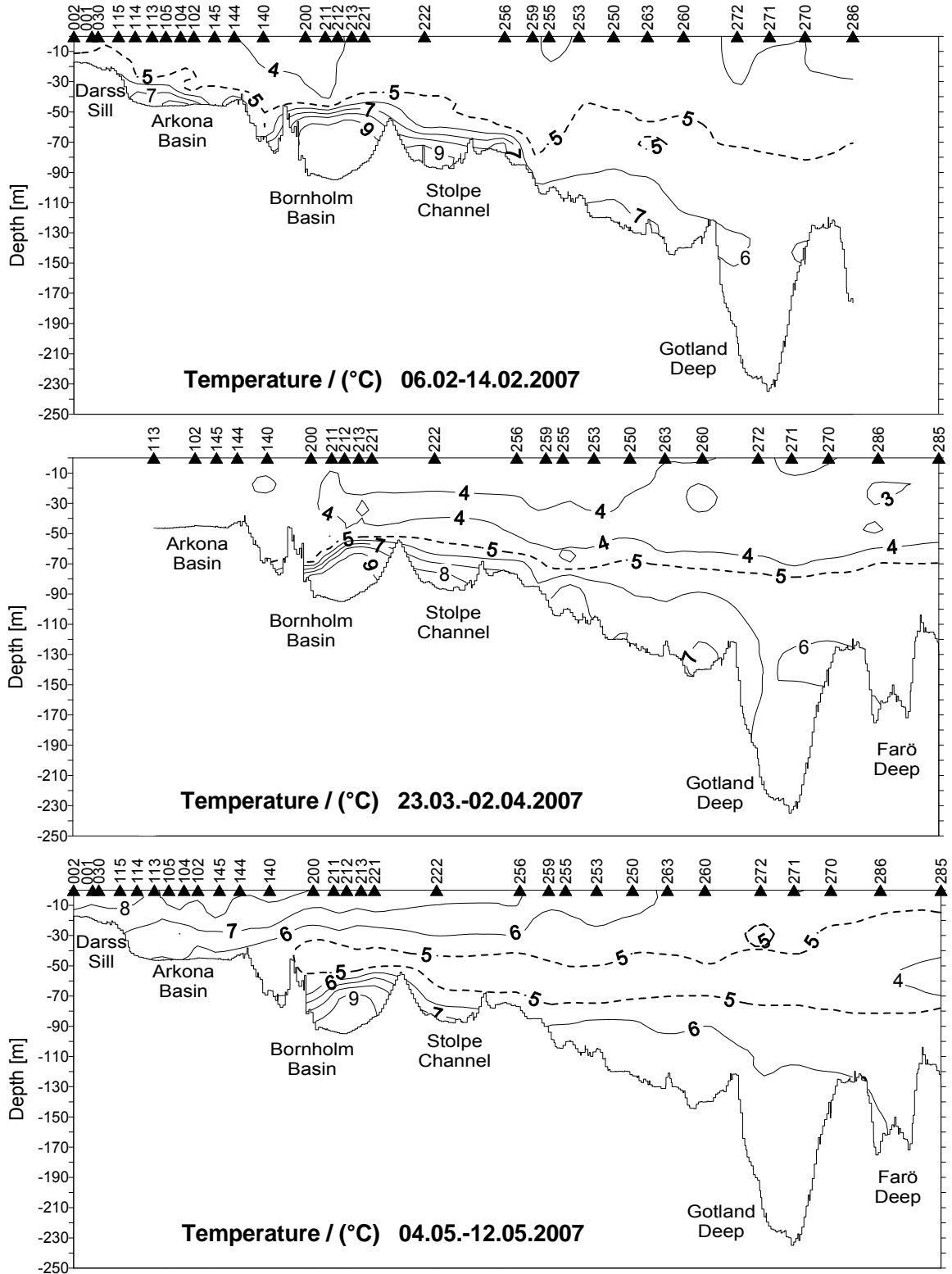


Abb. 19
Vertikale Verteilung der Wassertemperatur zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

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

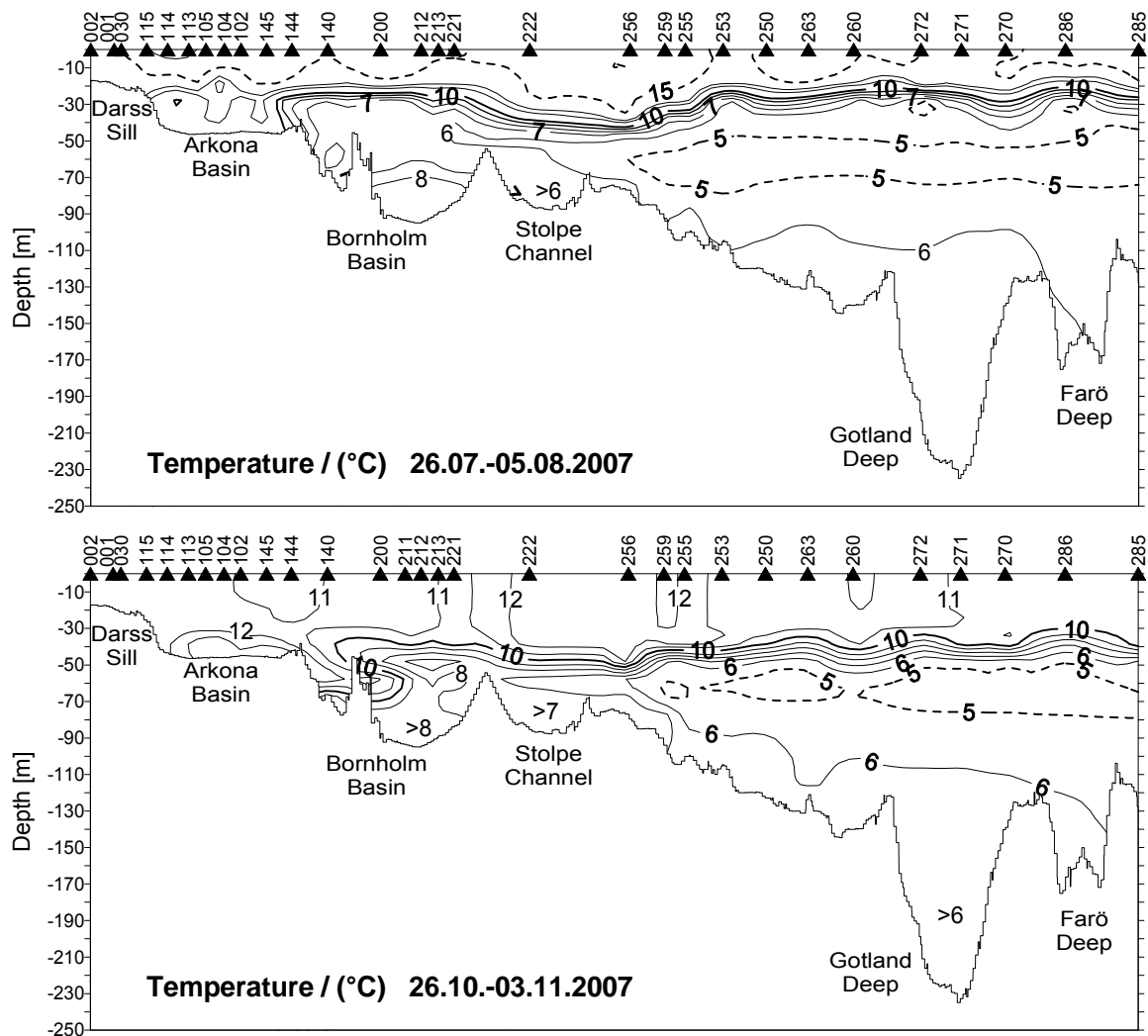


Abb. 19 Forts.

Vertikale Verteilung der Wassertemperatur zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 19 cont

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= 8-22)

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= 8-22)

Wassertemperatur (°C; Maximalwerte hervorgehoben)

Station	Tiefe/m	2003	2004	2005	2006	2007
213 (Bornholmtief)	80	4,02 ± 1,69	5,83 ± 1,18	7,20 ± 0,15	8,26 ± 0,80	8,95 ± 0,36
271 (Gotlandtief)	200	5,38 ± 0,80	5,75 ± 0,22	5,91 ± 0,02	5,95 ± 0,04	6,22 ± 0,21
286 (Färötief)	150	6,10 ± 0,34	5,75 ± 0,16	6,05 ± 0,03	6,15 ± 0,08	6,02 ± 0,05
284 (Landsortief)	400	5,65 ± 0,30	5,66 ± 0,08	5,74 ± 0,06	5,80 ± 0,08	5,71 ± 0,04
245 (Karlsötief)	100	4,87 ± 0,07	5,06 ± 0,15	5,18 ± 0,11	5,16 ± 0,15	5,17 ± 0,08

Salzgehalt (psu; Maximalwerte hervorgehoben)

Station	Tiefe/m	2003	2004	2005	2006	2007
213 (Bornholmtief)	80	17,83 ± 0,91	17,10 ± 0,48	16,02 ± 0,21	16,21 ± 0,43	16,07 ± 0,35
271 (Gotlandtief)	200	12,27 ± 0,32	12,74 ± 0,08	12,60 ± 0,04	12,52 ± 0,04	12,61 ± 0,06
286 (Färötief)	150	11,54 ± 0,25	12,10 ± 0,07	12,08 ± 0,05	12,01 ± 0,04	12,02 ± 0,04
284 (Landsortief)	400	10,44 ± 0,28	10,92 ± 0,31	11,06 ± 0,06	11,05 ± 0,05	11,05 ± 0,09
245 (Karlsötief)	100	9,53 ± 0,14	9,79 ± 0,30	10,09 ± 0,21	10,17 ± 0,22	10,20 ± 0,12

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

Station	Tiefe/m	2003	2004	2005	2006	2007
213 (Bornholmtief)	80	4,53 ± 2,16	0,87 ± 0,91	-0,67 ± 0,95	0,85 ± 0,49	0,46 ± 0,50
271 (Gotlandtief)	200	0,50 ± 2,96	0,88 ± 0,47	-0,23 ± 0,44	-1,58 ± 0,88	-1,46 ± 0,55
286 (Färötief)	150	-1,45 ± 0,90	0,52 ± 0,29	-0,24 ± 0,47	-1,20 ± 0,34	-0,72 ± 0,35
284 (Landsortief)	400	-1,01 ± 0,23	-0,29 ± 0,33	-0,26 ± 0,35	-0,71 ± 0,15	-0,81 ± 0,23
245 (Karlsötief)	100	-0,64 ± 0,49	-0,78 ± 0,39	-0,54 ± 0,73	-1,29 ± 0,53	-1,19 ± 0,72

6.2 Salzgehalt

Die Verteilung des Salzgehalts in der Ostsee 2007 ist in Abb. 20 sowie in den Tabellen 5 und 6 dargestellt.

Die Dichte, und damit im Wesentlichen auch der Salzgehalt, der Wasserschichten im Bornholmbecken unterhalb der Tiefe der Stolper Schwelle, also von 70 m bis 90 m Wassertiefe, wird praktisch nur durch zwei Prozesse dominiert, eine schnelle Zunahme durch Zustrom „neuen“ Wassers aus dem Arkonabecken, und eine langsame Abnahme durch vertikale Vermischung mit dem darüber liegenden Zwischenwasser. Ausstromvorgänge über die Stolper Schwelle mit ihrer zu geringen Wasserdichte beeinflussen die Schichten unterhalb 60 m normalerweise nicht. So werden alle größeren Einstromprozesse von diesem Wasserkörper nahezu modellhaft deutlich widerspiegelt (Feistel et al., 2008a). Im Jahr 2007 gab es solche Ereignisse nur in kleinerem Maßstab; ihr Ablauf war komplizierter und die Interpretation der gemessenen Daten ist weniger sicher. Gegenüber dem jeweiligen Vormonat erhöhte Dichte- und Salzgehaltswerte wurden bei 70 m Tiefe im Bornholmbecken (IOW 213) beobachtet im Januar (um 1,2 psu), im März (um 0,4 psu) im Juli (um 1,1 psu), im September (um 0,4 psu), im November (um 0,6 psu) und im Dezember (um 1,2 psu). Sie können den einzelnen barotropen Einstromvorgängen zugeordnet werden, die im Kapitel 2, Abb. 5, beschrieben wurden. Der jeweilige Anstieg des Sauerstoffgehalts in 70 m Tiefe gibt ein ähnliches Bild, Kapitel 6.4, Abb. 22.

Der Januar-Einstrom hob die Halokline von unter 60 m am 12. Dezember 2006 auf über 50 m am 17. Januar 2007 an. Die Wasserschichten ab 80 m Tiefe blieben unverändert. Die T-S-O₂-Charakteristik des Wassers, das die Stolper Schwelle ostwärts überströmte, entnehmen wir den Werten bei 60 m Tiefe im Januar: 9,0 °C, 15,4 psu, 1,9 ml/l. Es handelte sich dabei also um warmes und relativ sauerstoffarmes, also älteres Wasser, das über die Schwelle angehoben worden war, und kein Oberflächenwasser vom Januar.

Der Einstrom im März erfasste das gesamte Bornholmbecken vom Boden bis 60 m. Die T-S-O₂-Charakteristik bei 60 m war 9,4 °C, 14,8 psu, 2,4 ml/l, also ähnlich der im Januar.

Im Juli erfasste der Einstrom den Tiefenbereich zwischen 40 m und 80 m, die bodennahe Schicht jedoch nicht sichtbar. Die T-S-O₂-Charakteristik bei 60 m war 6,6 °C, 13,6 psu, 3,6 ml/l, es war also deutlich kälter und sauerstoffreicher als im Januar, und somit vermutlich Wasser, das sich mit dem Winterwasser darüber vermischt hatte.

Im September war der geringe Anstieg des Salzgehalts bei 70 m begleitet von einer Abnahme in den Schichten darüber und darunter, es handelt sich anscheinend um eine begrenzte Einschichtung ohne größere Folgen für die zentrale Ostsee.

Im November war die Wirkung des Einstroms ebenfalls auf das 70 m – Niveau fokussiert mit nur geringen Auswirkungen darunter, aber mit einem Heraufmischen von Salz aus der angehobenen Halokline bis hin zur Oberfläche durch die tiefgehende Konvektion. Die T-S-O₂-Charakteristik bei 60 m war 8,4 °C, 10,5 psu, 4,2 ml/l.

Im Dezember war der gesamte Tiefenbereich vom Boden bis zu 50 m vom einströmenden Wasser betroffen. Die T-S-O₂-Charakteristik bei 60 m war 9,0 °C, 14,9 psu, 3,3 ml/l, also ähnlich wie schon im März.

Der mittlere Salzgehalt des bodennahen Wassers im Bornholmbecken war mit 16,07 psu geringfügig höher als im einstromarmen Jahr 2005, lag aber klar unterhalb der Jahre 2003, 2004 und 2006 mit mehr Einstromaktivität. Die gleiche Aussage trifft zu auf die mittlere Schwankung des Salzgehalts in diesen Jahren.

Im Gotlandbecken ist die zeitliche Variabilität des Salzgehalts in einer bestimmten Tiefenstufe ein erster Indikator für das Auftreten von Einstromvorgängen. Neben der natürlich hohen Fluktuation im Bereich der Halokline zeigten drei Tiefen deutliche Schwankungen, 100 m, 150 m und 240 m. Die Schicht von 130 bis 145 m, also oberhalb des Beckenrands bei 150 m Tiefe, zeigte 2007 keinerlei Veränderungen im Salzgehalt. In 240 m Tiefe trat im April 2007 eine Erhöhung des Salzgehalts von 12,6 auf 12,9 psu auf. Bei einer angenommenen Laufzeit von ca. 3 Monaten (HAGEN und FEISTEL, 2001) könnte dieses Signal auf den Einstrom ins Bornholmbecken im Januar 2007 zurückzuführen sein. In 150 m Tiefe wird ein Salzmaximum von 12,6 psu im August erreicht, wobei der langsame Anstieg schon im Juni begann. Dieser Vorgang kann mit dem Einstrom in das Bornholmbecken im März zusammenhängen. Die tieferen Schichten zeigen kein so ausgeprägtes Signal. Bei 100 m Tiefe trat der markanteste Anstieg ebenfalls im August 2007 auf, ähnlich aber auch in den Schichten darunter. Hier kann es sich um ein Anheben der Wassersäule durch das Einschichten neuen Wassers bei 150 m gehandelt haben. Der mittlere Salzgehalt im Gotlandbecken bei 200 m Tiefe lag 2007 mit 12,6 psu leicht über denen der beiden Vorjahre, erreichte aber das Maximum aus dem Jahr 2004 noch nicht wieder, Tab. 5. Auch dessen Streuung lag 2007 leicht oberhalb der Werte von 2005 und 2006, aber niedriger als in den Einstromjahren 2003 und 2004, in Analogie zu gleichen Aussagen über die Temperatur.

Salzgehaltsschwankungen traten 2007 im Farötief (IOW 286) von der Dichtesprungschicht bis zum Boden auf, jedoch ohne erkennbare Systematik. Einerseits kann es sich dabei um die Zirkulation des inhomogenen Wasserkörpers innerhalb des Beckens handeln, andererseits um Einschichtungen von Wasser aus dem Gotlandbecken, das nur geringe Signatur im Salz besitzt. Der mittlere Salzgehalt 2007 bei 150 m von 12,02 liegt insignifikant höher als 2006, auch die Schwankungen in beiden Jahren waren vergleichbar und deutlich geringer als in den Einstromjahren 2003 und 2004. Die Situation im Landsorttief ist der im Farötief weitgehend analog.

Im Karlsötief trat bei der tiefen winterlichen Vermischung im Februar/März 2007, bedingt durch die schwache Halokline, eine Aussüßung um fast 0,4 psu in Bodennähe auf. Bis Dezember kehrte das Wasser jedoch wieder zurück auf Werte ähnlich denen im Januar 2007, wofür wiederum nur ein Überströmen aus den nördlicheren Becken verantwortlich sein konnte. Der Mittelwert des Salzgehalts war der höchste seit 2003, die Fluktuationen waren aber die kleinsten.

Die mittleren Oberflächensalzgehalte, Tab. 6, vom Bornholmtief bis zum Farötief liegen deutlich über den Werten des Vorjahrs und setzen damit den Gegentrend zur früheren Aussüßung, der von 1983 bis 2003 bestanden hatte, fort. Die Jahreswerte 2007 sind nahezu identisch mit den Langzeitmitteln 1952-2005, aber deutlich unter den Maximalwerten, die im Jahrzehnt um 1980 herum am Beginn der langen Stagnationsperiode gemessen worden waren. Die Werte der entfernteren Becken, Landsorttief und Karlsötief, scheinen diesem Trend erst mit einigen Jahren Verzug zu folgen, so wie auch das Tiefenwasser dieser Becken erst jüngst von Signalen erreicht wurde, die noch aus dem Einstromjahr 2003 stammen. Gleichzeitig mit den Mittelwerten finden wir 2007 erhöhte Fluktuationen der Oberflächensalzgehalte, die ebenfalls auf verstärkten Vertikaltransport von Salz, bedingt durch starken Wind, Erosion der Halokline, und die darunter erfolgte Einstromaktivität zurückgeführt werden können (FEISTEL et al., 2008a; REISSMANN et al. 2008).

Tab. 6

Jahresmittelwerte von 2003 bis 2007 und Standardabweichungen des Salzgehalts (in psu) im Oberflächenwasser der zentralen Ostsee (Maximalwerte hervorgehoben). Die Langzeitmittelwerte der Jahre 1952-2005 sind dem BALTIC-Klima-Atlas entnommen (FEISTEL et al., 2008a)

Table 6

Annual means of 2003 to 2007 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., 2008a)

Station	2003	2004	2005	2006	2007	1952-2005
213 (Bornholmtief)	7,30 ± 0,06	7,44 ± 0,10	7,59 ± 0,08	7,33 ± 0,10	7,58 ± 0,24	7,60 ± 0,29
271 (Gotlandtief)	6,93 ± 0,15	6,94 ± 0,36	7,20 ± 0,22	6,92 ± 0,38	7,15 ± 0,14	7,26 ± 0,32
286 (Farötief)	6,79 ± 0,14	6,78 ± 0,27	6,85 ± 0,26	6,62 ± 0,33	6,88 ± 0,22	6,92 ± 0,34
284 (Landsorttief)	6,52 ± 0,14	6,37 ± 0,37	6,60 ± 0,32	6,66 ± 0,18	6,54 ± 0,25	6,75 ± 0,35
245 (Karlsötief)	6,79 ± 0,13	6,96 ± 0,10	7,02 ± 0,22	6,96 ± 0,12	6,81 ± 0,27	6,99 ± 0,32

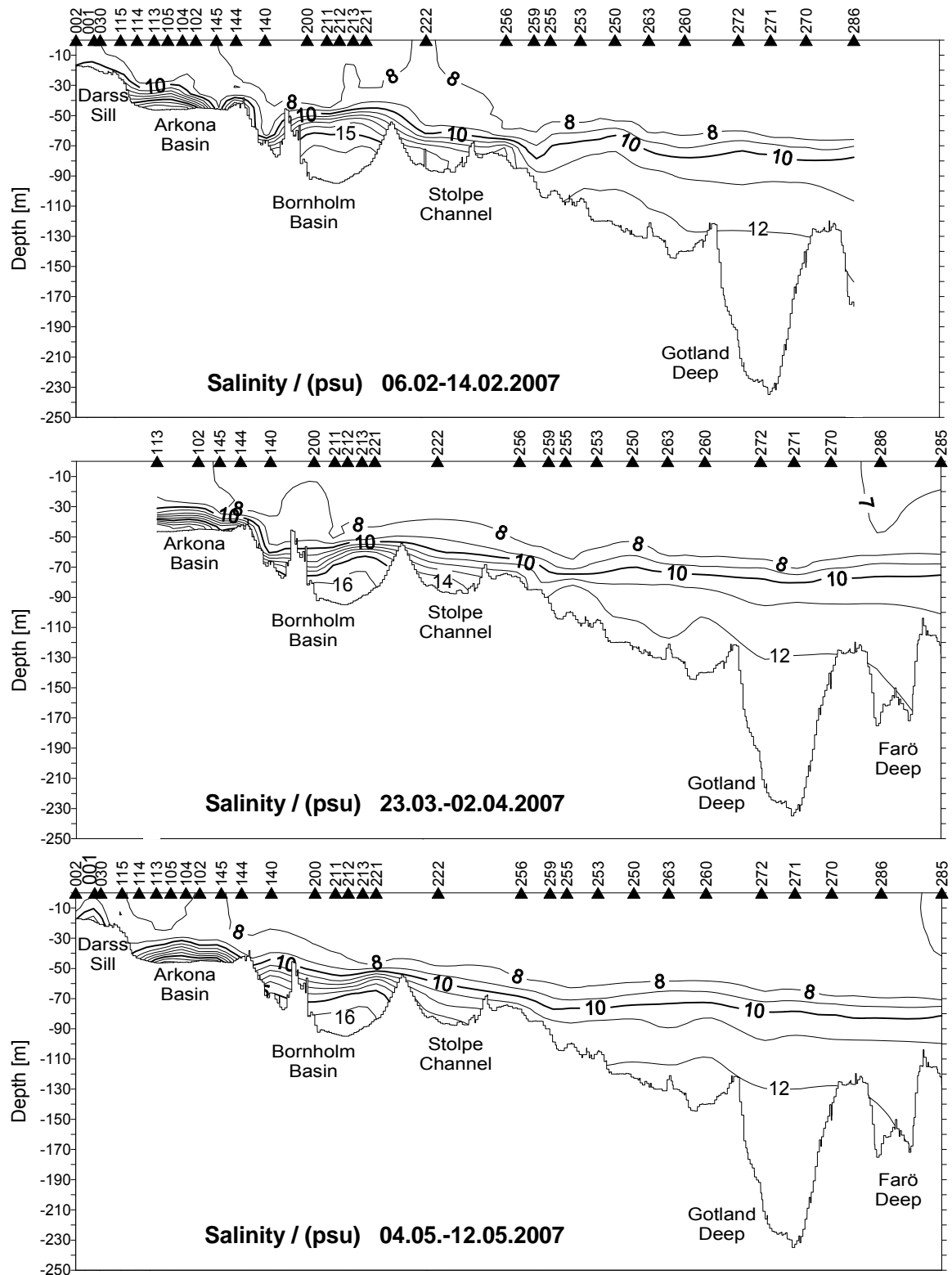


Abb. 20
 Vertikale Verteilung des Salzgehaltes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 20
 Vertical salinity distribution between Darss Sill and northern Gotland Basin

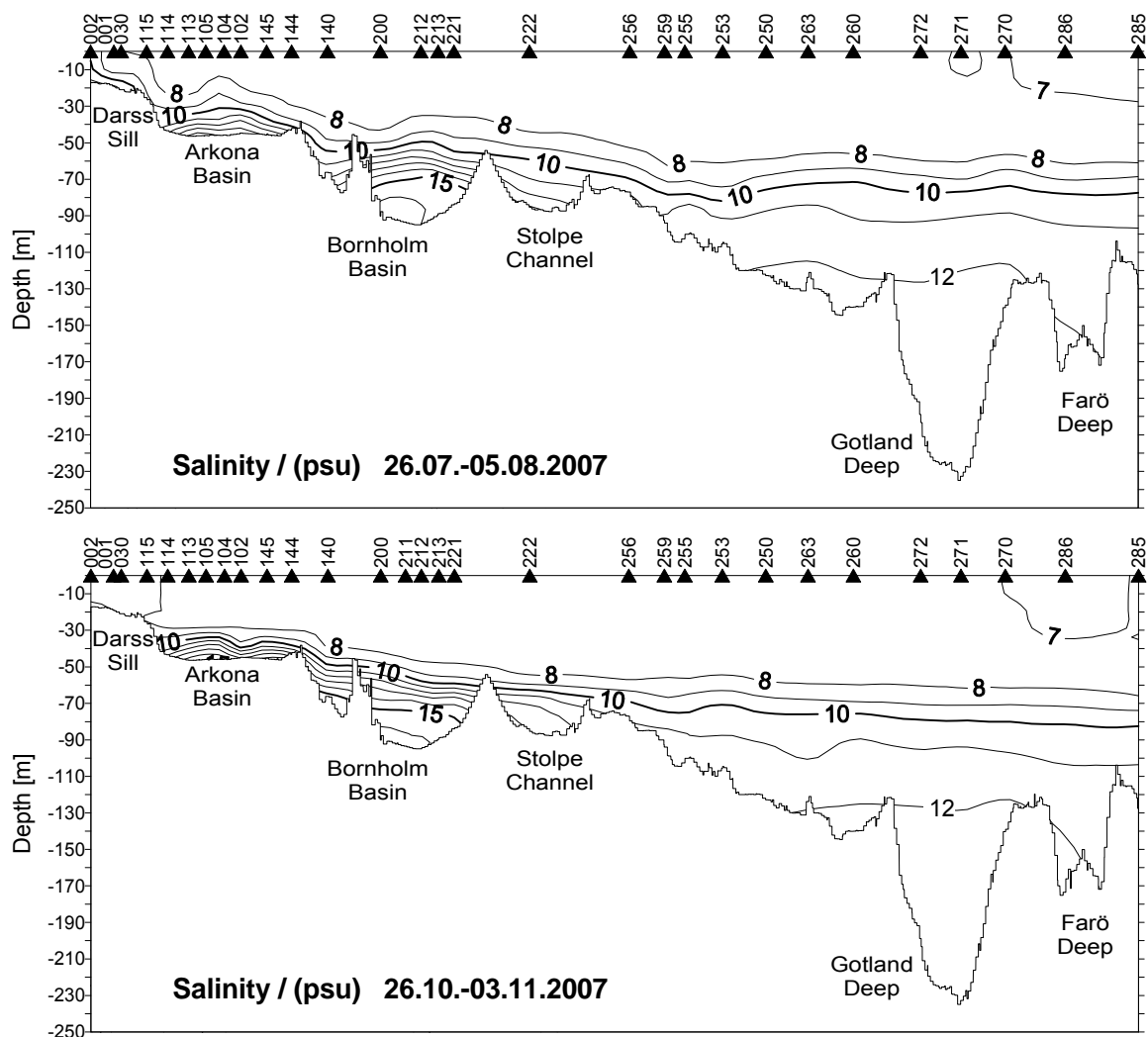


Abb. 20 Fort.

Vertikale Verteilung des Salzgehaltes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 20 cont

Vertical salinity distribution between Darss Sill and northern Gotland Basin

Die Salzgehaltsverteilungen in den Längsschnitten der Monitoringfahrten 2007, wie sie in Abb. 20 dargestellt sind, zeigten im Februar das Vordringen einer Salzfront in die Stolper Rinne und weiter von dieser in den Eingang zum südwestlichen Gotlandbecken. Im März/April hatte sich diese Front durch Abfließen in Richtung auf das Gotlandbecken deutlich abgeschwächt; diese Ausgleichsbewegung setzte sich bis zum Jahresende 2007 in ähnlicher Weise fort. So zeigten die Isohalinen von 8 bis 12 psu im Oktober/November einen weitgehend glatten und horizontalen Verlauf vom Bornholmbecken bis in das Gotlandbecken, wo zu Jahresbeginn noch wesentlich intensivere Prozesse aus den starken lateralen Salzgradienten abgelesen werden konnten.

6.3 Sauerstoff und Schwefelwasserstoff

Der Sauerstoffgehalt des Oberflächenwassers wird durch die Jahrgänge der Temperatur, des Salzgehaltes und die Entwicklung des Phytoplanktons sowie durch den Austausch mit der Atmosphäre bestimmt. Zusätzlich können hydrodynamische Prozesse eine Rolle spielen. Diese sauerstoffzuführenden Prozesse können den Verbrauch von Sauerstoff durch Zehrungsprozesse beim Abbau der organischen Substanz und durch Respiration in der Regel ausgleichen, so dass das Oberflächenwasser normalerweise gut mit Sauerstoff versorgt ist. Unterhalb permanenter Temperatur- und Salzgehaltssprungschichten überwiegen dagegen sauerstoffverbrauchende Prozesse, so dass es zu einer deutlichen Abnahme des Sauerstoffs bis hin zum Auftreten von Schwefelwasserstoff kommt. Dies ist aus Abb. 23 ersichtlich, die einen Schnitt von der Darßer Schwelle bis ins nördliche Gotlandbecken für die fünf durchgeführten Fahrten zeigt.

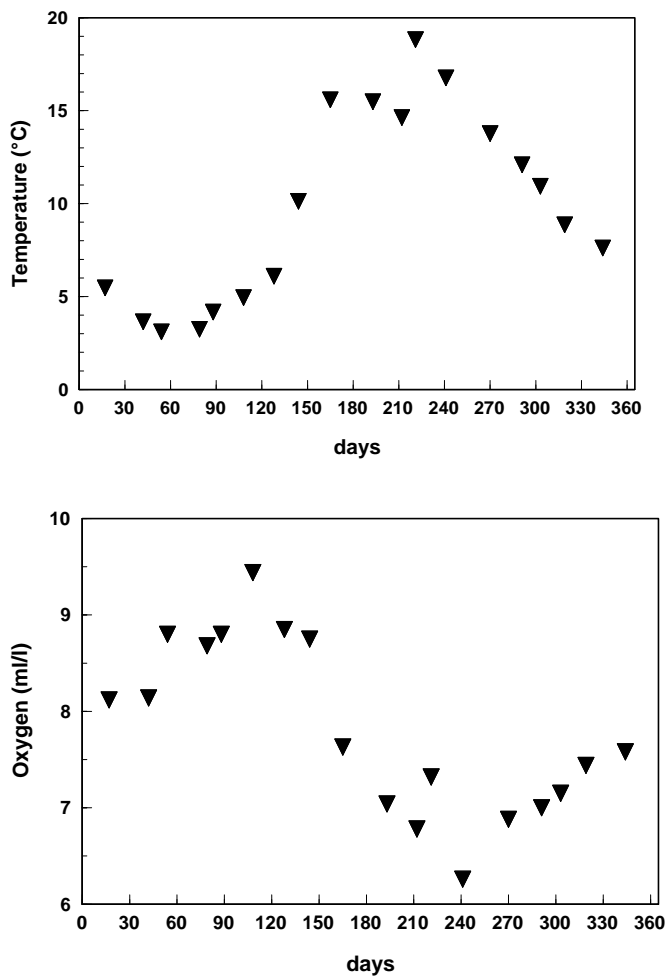


Abb. 21

Jahresgang von Temperatur und Sauerstoff im Oberflächenwasser (0 – 10 m) in der östlichen Gotlandsee im Jahr 2007 (nach Daten des IOW und des SMHI)

Fig. 21

Annual cycle of temperature and oxygen in the surface layer (0 – 10 m) in the eastern Gotland Sea in 2007 (based on IOW and SMHI data)

In der durchmischten Oberflächenschicht kann ein typischer Jahresgang des Sauerstoffgehaltes beobachtet werden (MATTHÄUS, 1978, NAUSCH et al., 2004a), wie er am Beispiel der Gotlandsee gezeigt werden kann (Abb. 21). Er wird primär durch die Temperatur und die Primärproduktion des Phytoplanktons geprägt. Die niedrigen Temperaturen im Winter ermöglichen eine hohe Sauerstofflöslichkeit, die Produktivität ist dagegen gering. Im Frühjahr verbleiben die Temperaturen noch auf niedrigem Niveau, die Frühjahrsblüte führt jedoch zu einem zusätzlichen Sauerstoffeintrag. Der rasche Temperaturanstieg ab Mitte Mai verringert die Sauerstofflöslichkeit deutlich, so dass im Sommer nur noch Konzentrationen zwischen 6 und 7 ml/l gemessen werden. Die herbstliche Abkühlung führt zu einer erneuten Zunahme des Sauerstoffgehaltes.

Der starke Einfluss der Temperatur und auch des Salzgehaltes auf die Sauerstofflöslichkeit erschwert jedoch die Vergleichbarkeit der Messwerte. Deshalb wird in der Regel der Sauerstoffsättigung zur Beschreibung des Sauerstoffstatus der Vorzug gegeben, da hierbei die genannten Einflüsse eliminiert sind. Abb. 22 fasst die Sauerstoffsättigungswerte des Oberflächenwassers im Jahr 2007 zusammen. Die Darstellung berücksichtigt 34 Stationen von der westlichen Ostsee bis zum östlichen Gotlandbecken. Es zeigt sich der typische Jahresgang (MATTHÄUS et al., 2001, NAUSCH et al., 2002, 2007). Im Februar und im Herbst ist die Sauerstoffsättigung im gesamten Untersuchungsgebiet recht einheitlich. Es wird eine leichte Untersättigung registriert, die ihre Ursache in der Dominanz sauerstoffzehrender Prozesse hat. Das wird auch durch nur wenig um den Mittelwert schwankende Werte verdeutlicht. Im Februar lag die Sauerstoffsättigung bei $94,1 \pm 1,8$ %, im Oktober/November wurde ein Wert von $95,3 \pm 1,0$ % ermittelt. Die Untersättigung entspricht den Messungen der Vorjahre (NAUSCH et al., 2006, 2007). Mit Beginn der Frühjahrsblüte kommt es zu einer Zunahme des Sauerstoffgehaltes des Oberflächenwassers, die Sättigung steigt über 100 %. Die Blüte beginnt zunächst in der westlichen Ostsee und kann, in Abhängigkeit von der Witterungssituation, zeitlich verzögert in der zentralen Ostsee beobachtet werden. So wurde im März/April in der westlichen Ostsee eine Sättigung von $107,3 + 2,4$ % gemessen während in der Bornholmsee und in der östlichen Gotlandsee lediglich 102 % registriert wurden. Anfang Mai ist die Frühjahrsblüte in der westlichen Ostsee bereits abgeschlossen ($103,7 + 0,7$ %) während sie in der Bornholmsee ($107,8 + 0,5$ %) und in der östlichen Gotlandsee ($107,4 + 4,0$ %) noch in vollem Gang ist. Auffällig ist, dass während beider Beprobungen nur relativ geringe Übersättigungen festgestellt wurden. So lag der Mittelwert für das gesamte Untersuchungsgebiet im Mai 2007 nur bei 105,4 % und damit ca. 5 % niedriger als in den beiden Vorjahren (NAUSCH et al., 2006, 2007). Auch der beobachtete Maximalwert der Sättigung von 113,8 % war deutlich geringer. In den Jahren 2006 und 2007 wurden jeweils 125 % berechnet. Noch deutlicher werden die Unterscheide im Sommer. Häufig kommt es in dieser Jahreszeit zur Massenentwicklung stickstofffixierender Cyanobakterien was mit einer erheblichen Sauerstoffzufuhr und damit verbundenen Übersättigungen einhergeht. So wurde im Sommer 2005 eine Sättigung von 109,4 %, berechnet über alle beprobten Seegebiete, gefunden (Maximalwert: 126,7 %), 2006 lag der Mittelwert bei 106,4 % mit einer maximalen Sättigung von 120,9 %. Der kühle Witterungsverlauf, verbunden mit zum Teil kräftigen Winden, (vgl. Kapitel 2) verhinderte im Jahr 2007 eine starke Cyanobakterienblüte, folglich lag die Sättigung nur wenig über 100 % (Abb. 22).

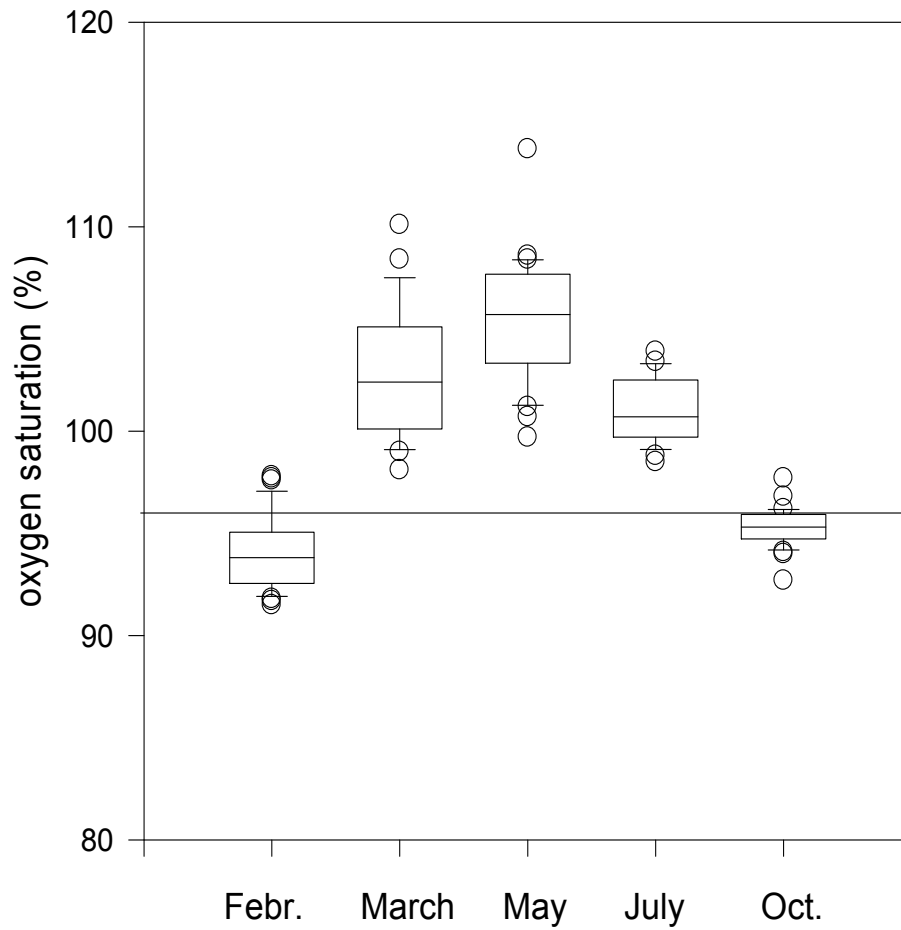


Abb. 22

Box- Whisker- Plots der Sauerstoffsättigung (%) im Jahr 2007 in der Oberflächenschicht (0 – 10 m) zwischen westlicher Ostsee und östlichem Gotlandbecken

Fig. 22

Box- Whisker- Plots of oxygen saturation (%) in 2007 in the surface layer (0 – 10 m) between western baltic Sea and eastern Gotland Basin

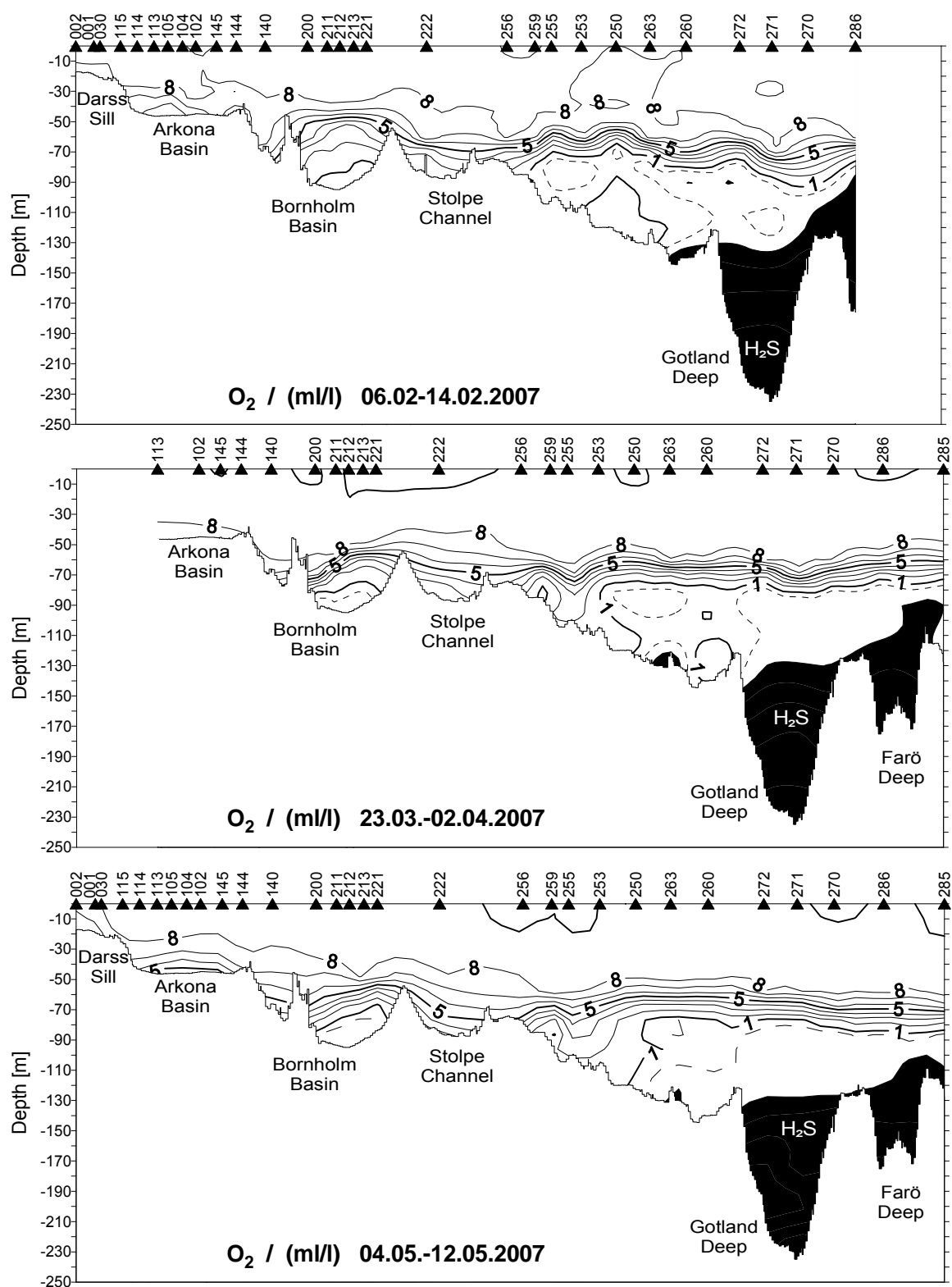


Abb. 23

Vertikale Verteilung des Sauerstoffgehaltes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 23

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

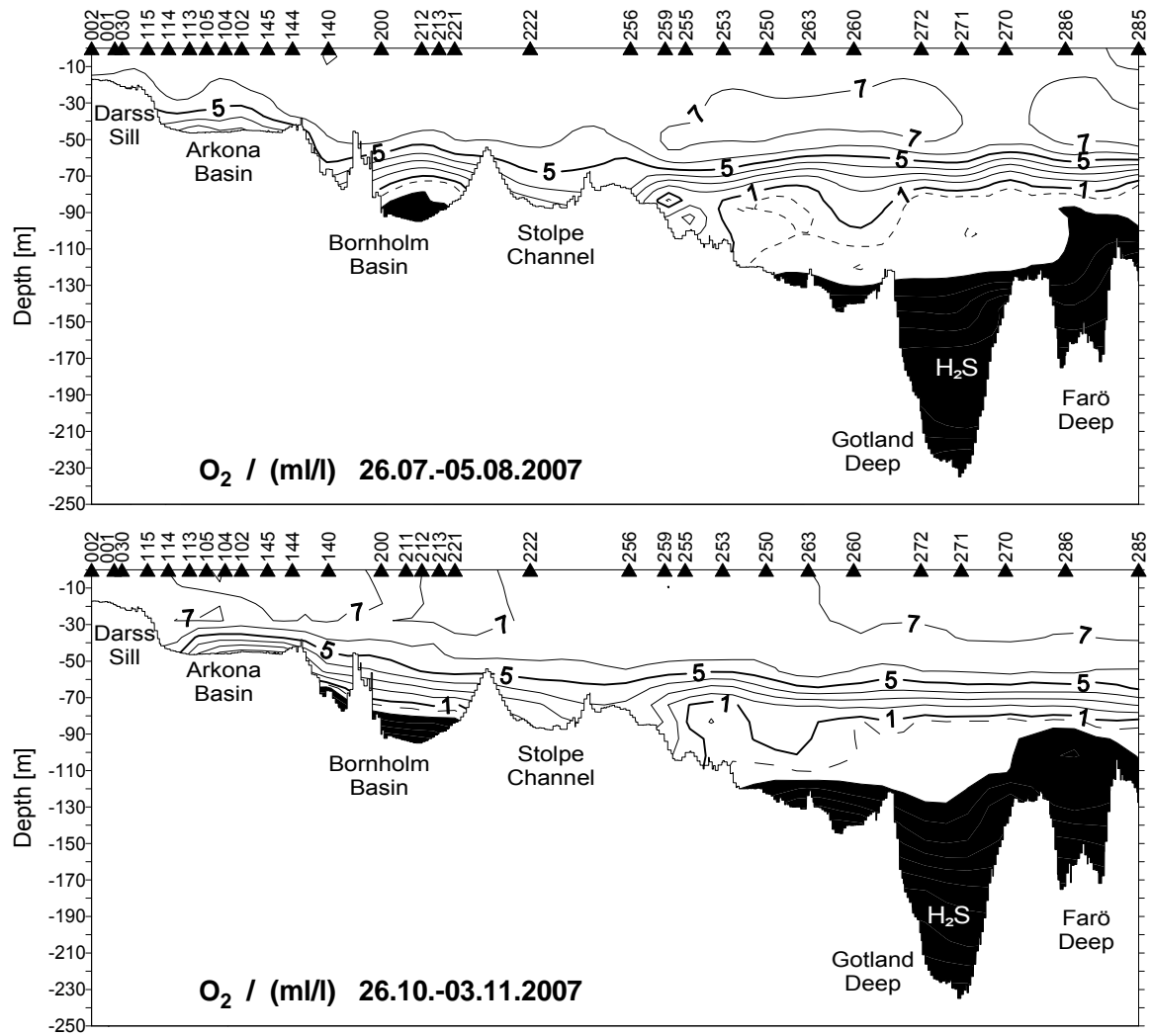


Abb. 23 Forts.

Vertikale Verteilung des Sauerstoffgehaltes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 23 cont

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

Der Salzwassereinbruch vom Januar 2003 war das letzte starke Einstromereignis in die Ostsee. Die tiefen Becken wurden zusätzlich von einem baroklinen warmen Sommereinstrom im Jahre 2003 beeinflusst. Die Effekte dieser Ereignisse waren ab 2005 kaum noch spürbar. Verstärkt durch den Abbau organischer Substanzen hatte dies zur Folge, dass die Konzentration von Schwefelwasserstoff in den Tiefenbecken östlich, nördlich und westlich Gotland seit 2005 immer weiter zunahm.

Während 2006 keine markanten barotropen Einstromereignisse beobachtet wurden (NAUSCH et al., 2007) fanden 2007 in der Ostsee barotrope Einstromereignisse mit geschätzten Volumen um 200 km³ drei Mal statt: Ende Januar, Anfang März und Anfang November, die aber nur geringe Wirkung zeigten. Zusätzlich beeinflussten warme barokline Einstrom-Pulse die Tiefenbecken. Ein solches Ereignis konnte zwischen Juni und August 2006 beobachtet werden. Die Möglichkeiten der Beobachtungen solcher barokliner Einstromereignisse sind jedoch mit dem herkömmlichen Messmethoden und -frequenzen begrenzt. Kontinuierlich registrierende Temperatursonden an geeigneten Positionen liefern wertvolle Hinweise. Eine Verankerung im Gotlandbecken zeigte in der zweiten und dritten Januarwoche 2007 Temperaturen über 6 °C bei 180 m Tiefe. Ein ähnlicher Puls wurde dort Ende März 2007 beobachtet, dieses Mal aber im gesamten Tiefenbereich von 180 m bis 220 m. Weiterhin wurde im Gotlandtief Mitte Mai ein Temperaturanstieg von ca. 5,9 °C auf fast 6,3 °C registriert (vgl. auch Kapitel 2 und 6.1.2). All diese Ereignisse zeigen leichte Auswirkungen auf den Sauerstoffgehalt in den Tiefenbecken. Da jedoch kontinuierliche Registrierungen für hydrochemische Parameter wie Sauerstoff/Schwefelwasserstoff oder auch Nährstoffe in den Tiefenbecken nicht zur Verfügung stehen, basieren Schlussfolgerungen auf diskreten Messungen mit denen man Gefahr läuft, kleinere lokale oder kurzfristige Einstromprozesse zu verpassen zumal die chemischen Parameter im Gegensatz zum konservativen Tracer Temperatur biogeochemischen Transformationen unterliegen.

Im Tiefenwasser des Bornholmbeckens wurden im Ergebnis des Salzwassereinstroms vom Januar 2003 im Februar des gleichen Jahres mit 7,66 ml/l extrem hohe Sauerstoffkonzentrationen gefunden (NAUSCH et al., 2004a). Fehlende Einstromimpulse führten zu einem kontinuierlichen Rückgang der Sauerstoffkonzentration bis zum Jahr 2005, wo in 80 m Wassertiefe ein Jahresmittelwert von -0,67 ml/l errechnet wurde (Tab. 5) was den Extremwert in der gesamten Beobachtungsreihe darstellt. Die o.g. baroklinen Einströme führten schon 2006 zu einer gewissen Verbesserung der Sauerstoffsituation, die auch 2007 anhielt. Die Wassersäule war mit wenigen Ausnahmen bis zum Boden belüftet. Eine Beobachtung die auch durch hohe Nitrat- und geringe Phosphatwerte gestützt wird. Trotzdem lag der Jahresmittelwert in 80 m Wassertiefe mit 0,46 ml/l unter dem des Vorjahres (0,85 ml/l) Insbesondere im Frühjahr konnte beobachtet werden, dass warmes, gewisse Mengen Sauerstoff enthaltendes Wasser die Stolper Schwelle überströmt und in die Stolper Rinne und die nachgeschalteten Becken fließt. Im Ergebnis wurden im März 2007 im südöstlichen Gotlandbecken (Station 256) mit 4 ml/l Sauerstoff in Bodennähe durchaus beträchtliche Konzentrationen gemessen.

Im östlichen Gotlandbecken wurden die günstigsten Sauerstoffbedingungen im Ergebnis des Salzwassereinbruchs von Januar 2003 Ende April/Anfang Mai des gleichen Jahres vorgefunden. Jedoch bereits Mitte Mai 2004 wurde in Bodennähe wieder Schwefelwasserstoff gemessen, was den Beginn einer neuen Stagnationsperiode markiert, eine Entwicklung, die sich 2005 und 2006 fortsetzte. Dies kann durch den Jahresmittelwert des 200 m- Horizonts dokumentiert werden. Dieser fiel von 0,88 ml/l (2004) über -0,23 ml/l (2005) auf -1,58 ml/l im Jahr 2006. 2007 konnte mit -1,46 ml/l ein etwas geringer Wert ermittelt werden. Dies ist den bereits mehrfach erwähnten kleinen baroklinen Einstromereignissen geschuldet. So konnten im Frühjahr 2007 im Gotlandtief

zurückgehende Schwefelwasserstoffkonzentrationen beobachtet werden. Im Mai konnten in 225 m Wassertiefe sogar Spuren von Sauerstoff (0,02 – 0,04 ml/l) gemessen werden. Bereits im Herbst wurden wieder hohe Schwefelwasserstoffwerte gefunden. Gegenwärtig ist im Bereich des Gotlandtiefs die Wassersäule zwischen 137 m und dem Boden (239 m) anoxisch, was den Fortgang der Stagnationsperiode dokumentiert. Es ist weiterhin erwähnenswert, dass die Wasserschicht zwischen Salzgehaltssprungschicht und Redoxkline stark sauerstoffverarmt ist. Dies hat deutliche Auswirkungen auf den Nährstoffgehalt dieser Schicht und kann gravierende Folgen für die Nährstoffversorgung der winterlichen Deckschicht haben (NAUSCH et al., 2008b, REISSMANN et al., 2008).

Im westlichen Gotlandbecken machen sich Salzwassereinströme deutlich verzögerter und in gedämpfter Form bemerkbar. Während des gesamten Jahres 2006 herrschte dort eine ausgeprägte Stagnationsphase. An dieser Situation änderte sich auch im Jahr 2007 nichts. Im Landsorttief (Station 284) wurde bereits in 80 m Wassertiefe durchgängig Schwefelwasserstoff gefunden. Die gesamte darunter liegende Wassersäule war während des gesamten Jahres anoxisch. Gleiches gilt für das südlicher gelegene Karlsötief. Auch hier war der Wasserkörper zwischen 80 m und dem Boden (ca. 110 m) frei von Sauerstoff. Auch die im Vergleich zum Vorjahr wenig variierenden Jahresmittelwerte (Tab. 5) stehen für das Andauern der Stagnationsperiode.

6.4 Anorganische Nährstoffe

Die Eutrophierung stellt weltweit eines der ernstesten Probleme der Belastung der Binnengewässer wie auch der Meere dar (GIWA, 2003). Man versteht darunter den Prozess der erhöhten biologischen Produktion des Gewässers als Ergebnis einer verstärkten Zufuhr von Nährstoffen, hauptsächlich verursacht durch anthropogene Aktivitäten in den Einzugsgebieten (EUTROSYM, 1976). Auch für die Ostsee wurde die Eutrophierung bereits sehr früh als eine der wesentlichsten Gefährdungen erkannt (HELCOM, 1980). Obwohl in den letzten Jahren zahlreiche Maßnahmen zur Reduktion der Nährstoffeinträge ergriffen wurden (HELCOM, 2003b, c), ist das Problem noch nicht gelöst, da die Nährstoffeinträge über Dekaden erfolgten und auf Grund der langen Verweilzeiten des Wassers der Ostsee noch lange nachwirken (HELCOM, 2003a). Folgerichtig stellt die Bekämpfung der Eutrophierung eines der Kernelemente des Ostseeaktionsplans der HELCOM (Baltic Sea Action Plan) dar, der im November 2007 beschlossen wurde (HELCOM, 2007).

Die Beschreibung der Nährstoffsituation gehört seit der Etablierung eines einheitlichen Überwachungsprogramms Ende der 1970er Jahr zu den Schlüsselementen des Messprogramms. In die Untersuchungen sind vor allem die anorganischen Nährstoffe Phosphat, Ammonium, Nitrit, Nitrat und Silikat einbezogen, aber auch die Summenparameter Gesamtphosphor und Gesamtstickstoff werden regelmäßig gemessen. Die 2007 beobachteten Vertikalverteilungen der beiden wichtigsten Nährstoffe Phosphat und Nitrat entlang des Hauptschnittes durch die Ostsee sind in Abb. 25 und 26 für die 5 untersuchten Zeiträume dargestellt. Es muss beachtet werden, dass Ammonium unter den anoxischen Bedingungen des Tiefenwassers (vgl. Kapitel 6.3) das Endprodukt der Mineralisation darstellt. Wegen des fehlenden Sauerstoffs kann keine Nitrifikation zum Nitrat erfolgen. Auf die Nährstoffe Nitrit und Silikat wird später gesondert eingegangen.

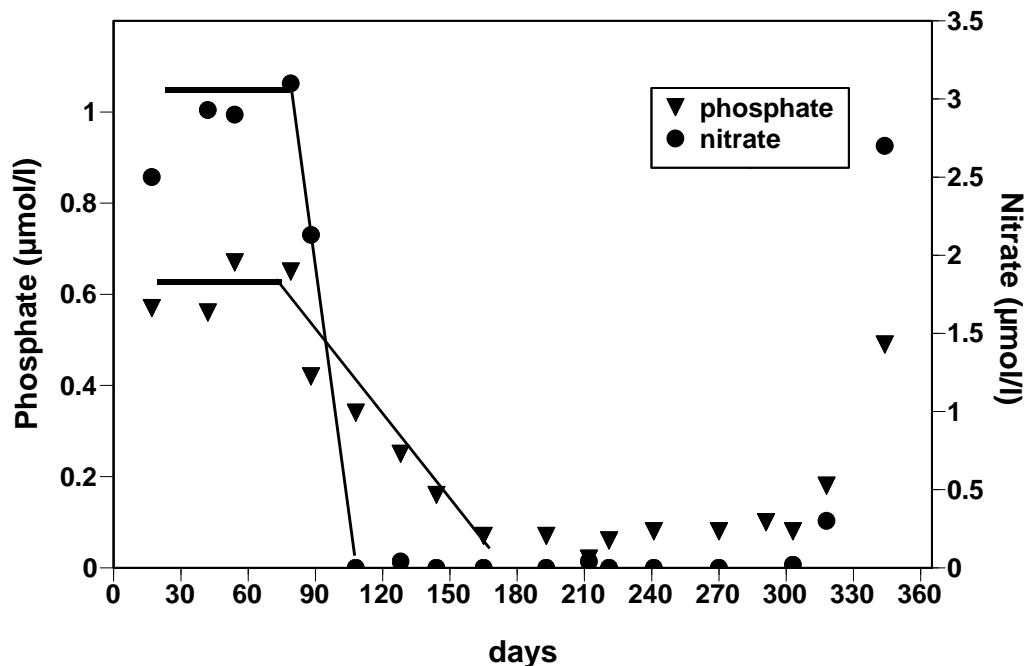


Abb. 24

Phosphat- und Nitratjahresgang 2007 im Oberflächenwasser (0 – 10 m) der östlichen Gotlandsee (Station 271) – nach Daten des IOW und des SMHI

Fig. 24

Annual phosphate and nitrate cycles 2007 in the surface layer (0 – 10 m) of the eastern Gotland Sea (station 271) – based on IOW and SMHI data

In der Oberflächenschicht weisen Phosphat und Nitrat den für die gemäßigten Breiten typischen Jahresgang auf (NEHRING und MATTHÄUS, 1991; NAUSCH und NEHRING, 1996). Am Beispiel der östlichen Gotlandsee kann dieser nochmals verdeutlicht werden (Abb. 24). Die im Herbst einsetzende Mineralisation führt zu einer Anreicherung von Phosphat und Nitrat. Dabei ist für den Bereich der zentralen Ostsee typisch, dass sich ab Ende Januar ein deutliches Plateau herausbildet, das im Bereich der Bornholmsee bis in den März bestehen bleibt. In Abhängigkeit von Witterungsverlauf kann dieses Plateau im östlichen Gotlandbecken bis Anfang April erhalten bleiben. Danach setzt eine rasche Abnahme der Nährstoffkonzentrationen ein, die durch die Frühjahrsblüte des Phytoplanktons verursacht wird. Wie schon mehrfach beschrieben (NAUSCH et al., 2003, 2004a), wird dabei Nitrat wesentlich rascher verbraucht als Phosphat. Bereits in der 2. Aprilhälfte ist der Nitratvorrat erschöpft, so dass die Frühjahrsblüte stickstofflimitiert ist. Die Nitratkonzentrationen bleiben bis in den Oktober hinein im Bereich der Nachweisgrenze (Abb. 24). Dagegen sind nach der Frühjahrsblüte noch erhebliche Phosphatmengen vorhanden, die erst allmählich abnehmen. Mit Einsetzen der Cyanobakterienblüte ab Ende Juni ist auch der Phosphatvorrat erschöpft. Ihren Stickstoffbedarf können die Cyanobakterien durch Fixierung aus der Luft decken, der Phosphatbedarf wird zunächst durch Verschiebungen im internen Phosphorpool der Algen und Intensivierung des kurzgeschlossenen Kreislaufs gedeckt. Häufig reichen diese Phosphatreserven nicht aus um die sommerliche Produktion zu erklären (NAUSCH et

al., 2004, 2008b). Zusätzliche Quellen wie physikalisch getriebener Auftrieb von phosphathaltigem Winterwasser sind notwendig. Solche intensiven Auftriebsprozesse konnten im Sommer 2007 an der Ostseeküste Gotlands dokumentiert werden (LASS, pers. Mittl.). Ursache für den unterschiedlichen Jahresgang von Nitrat und Phosphat ist ein deutlich vom Redfield-Verhältnis (REDFIELD et al., 1963) abweichendes N/P- Verhältnis (siehe nachstehend).

Ammonium und Nitritkonzentrationen sind ebenfalls durch typische saisonale Verteilungsmuster gekennzeichnet, die jedoch deutlich von denen des Phosphats und Nitrats abweichen. Beide Nährstoffe werden vom Phytoplankton in Phasen hoher biologischer Produktivität aufgenommen, so dass sehr niedrige Konzentrationen im Mai gemessen werden. Verursacht durch abnehmende Produktivität und unvollständige Mineralisation erhöhen sich die Ammonium- und Nitritkonzentrationen zunächst im kalten winterlichen Zwischenwasser und am oberen Rand der Salzgehaltssprungschicht bis zum August. Die einsetzende vertikale Durchmischung im Herbst führt zu einer gleichmäßigen Verteilung von der Oberfläche bis zur Halokline, so dass die höchsten Konzentrationen im November gemessen werden. Auch im Winter werden höhere Konzentrationen beobachtet (vgl. hierzu Abb. 12.2 in NAUSCH et al., 2008a).

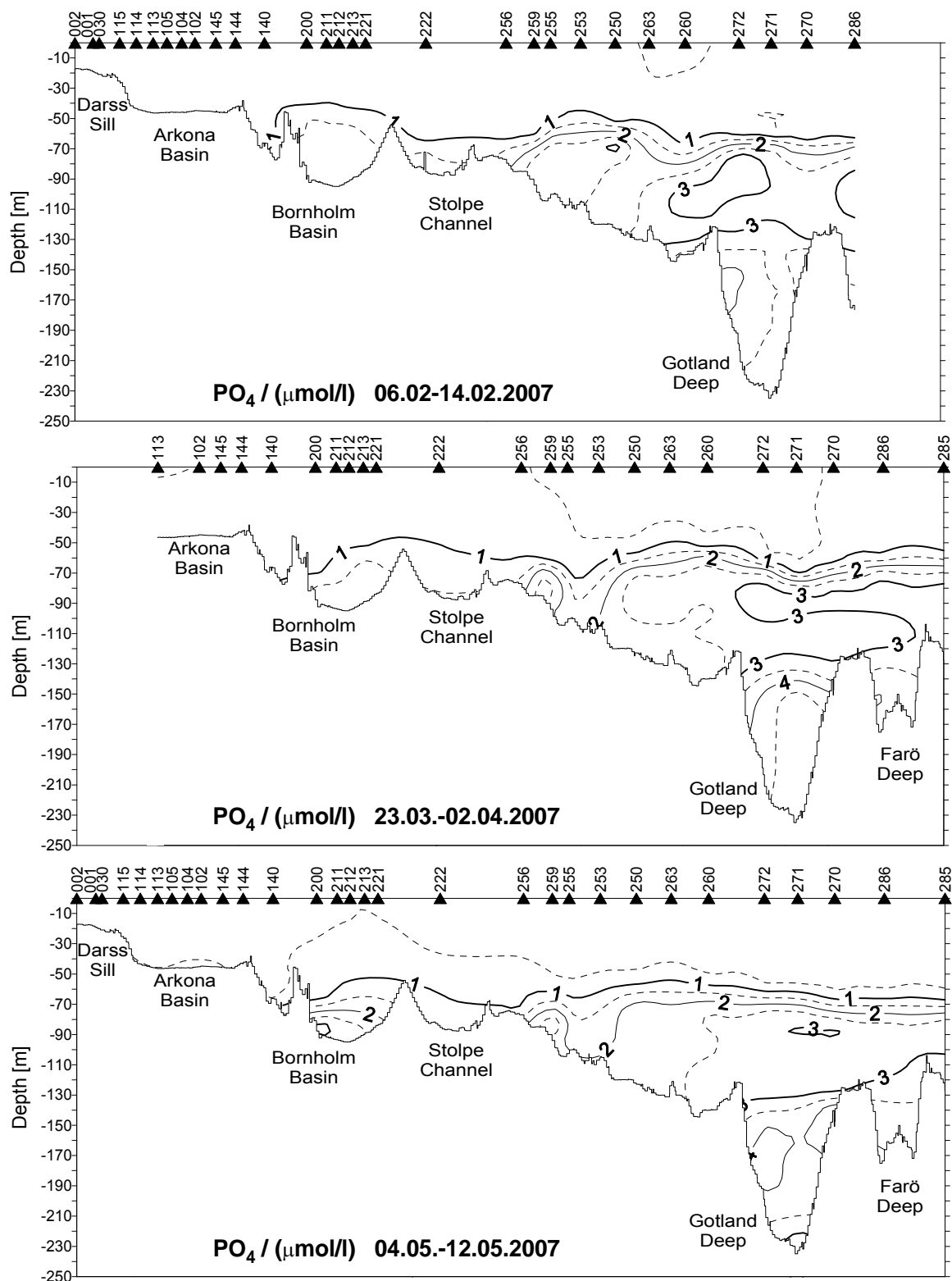


Abb. 25
Vertikale Verteilung des Phosphatgehaltes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 25
Vertical distribution of phosphate between Darß Sill and northern Gotland Basin

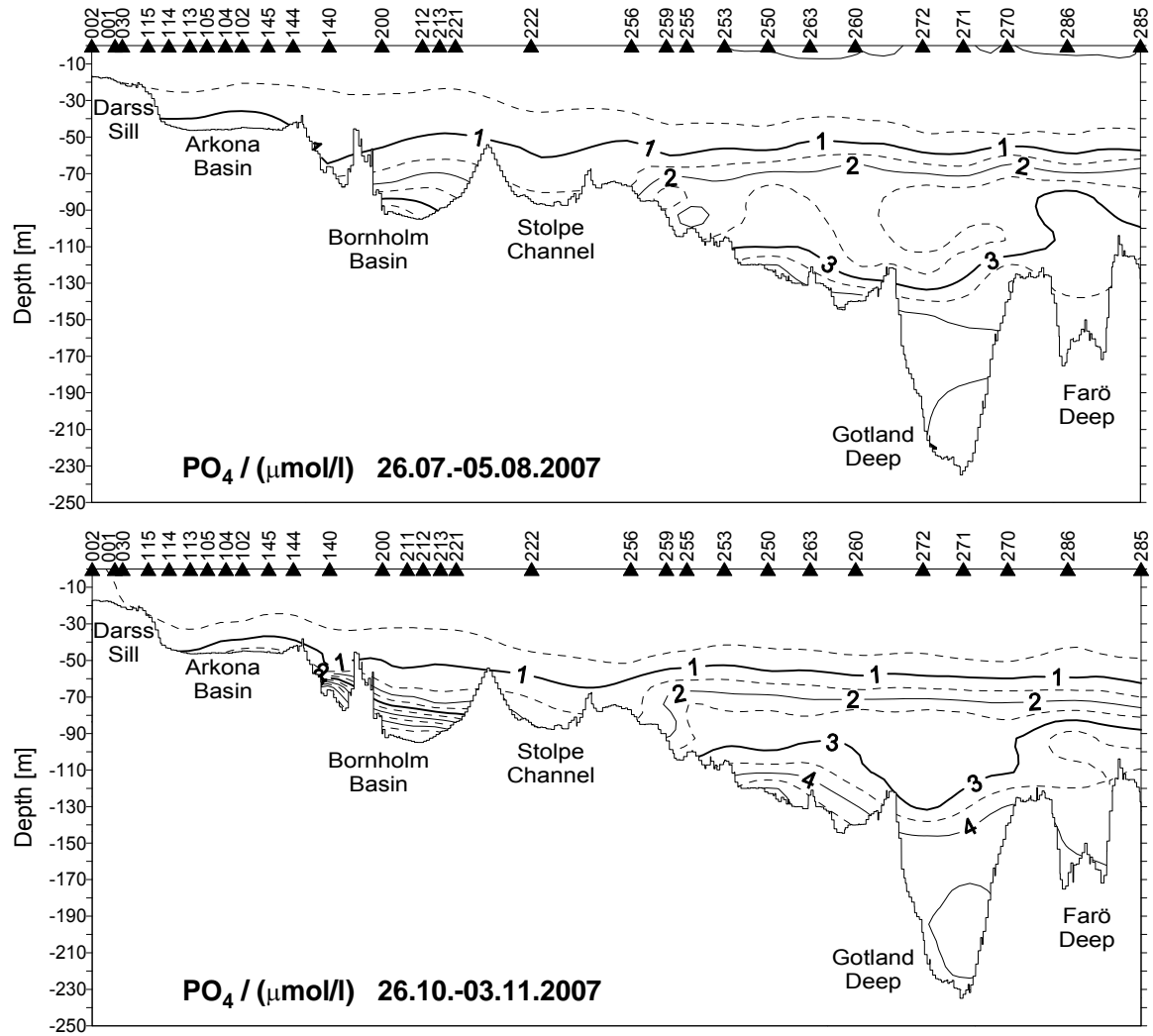


Abb. 25 Fort.

Vertikale Verteilung des Phosphatgehaltes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 25 cont

Vertical distribution of phosphate between Darß Sill and northern Gotland Basin

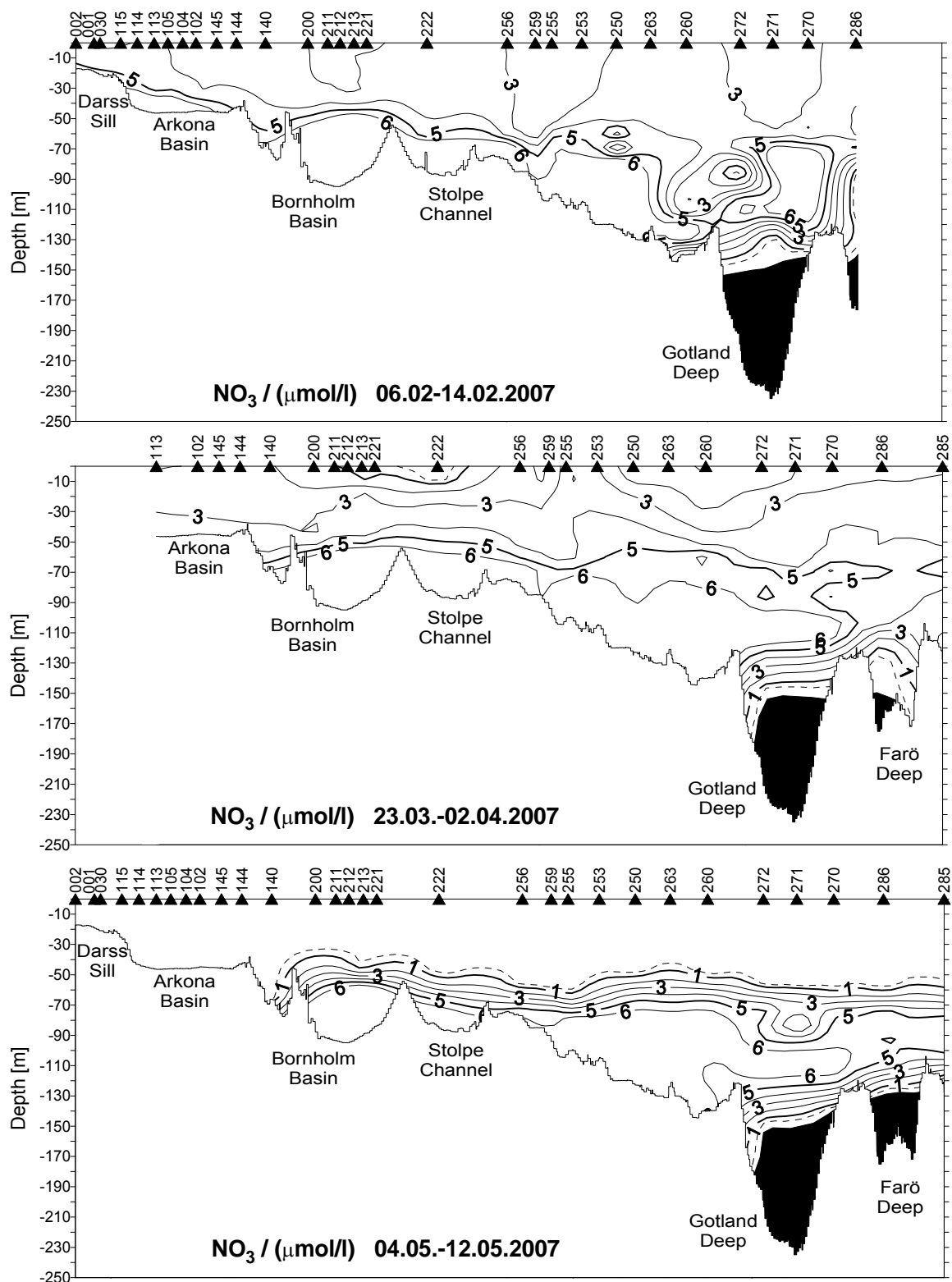


Abb. 26
Vertikale Verteilung des Nitratgehaltes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

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

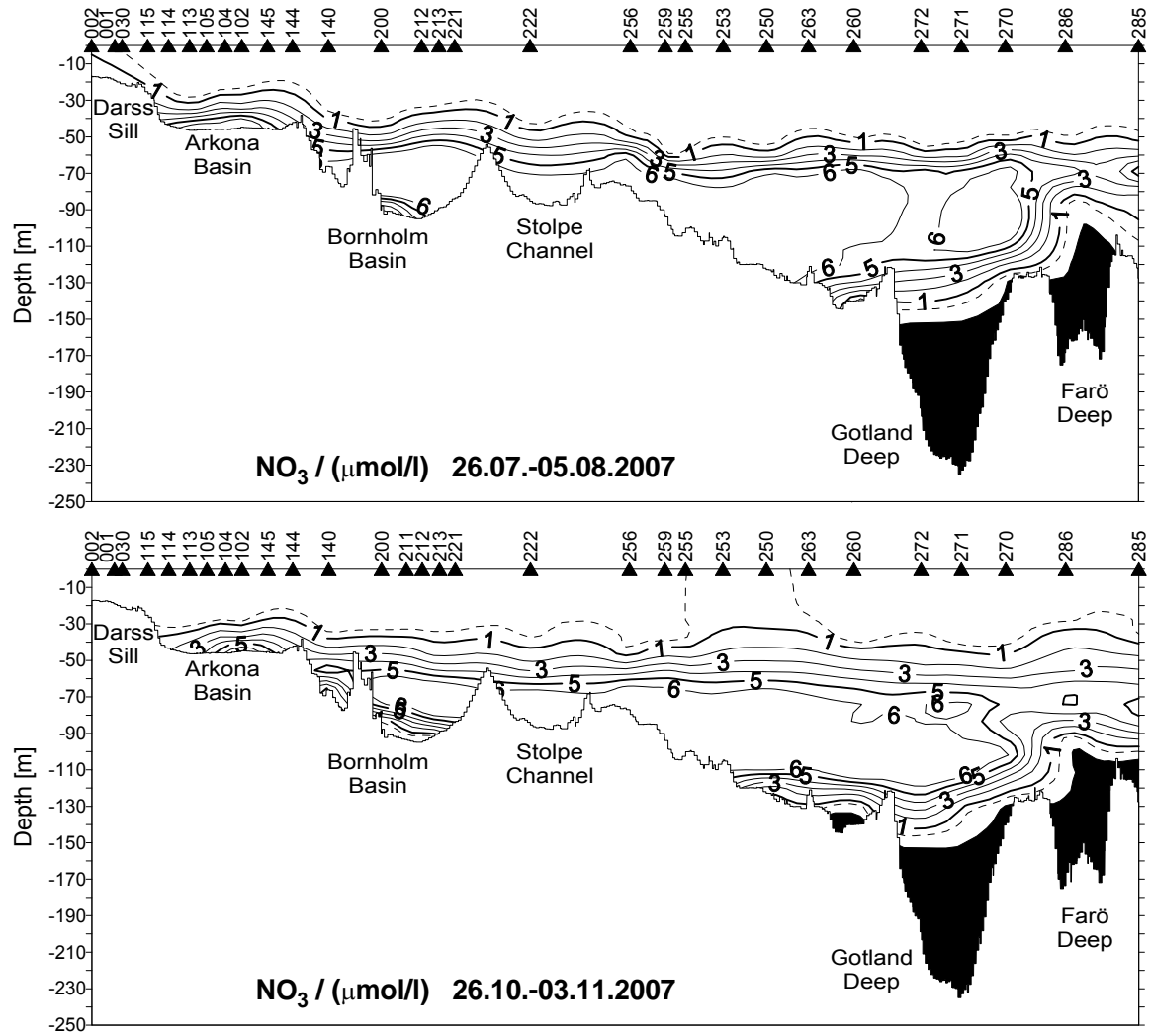


Abb. 26 Fort.

Vertikale Verteilung des Nitratgehaltes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 26 cont

Vertical distribution of nitrate between Darß Sill and northern Gotland Basin

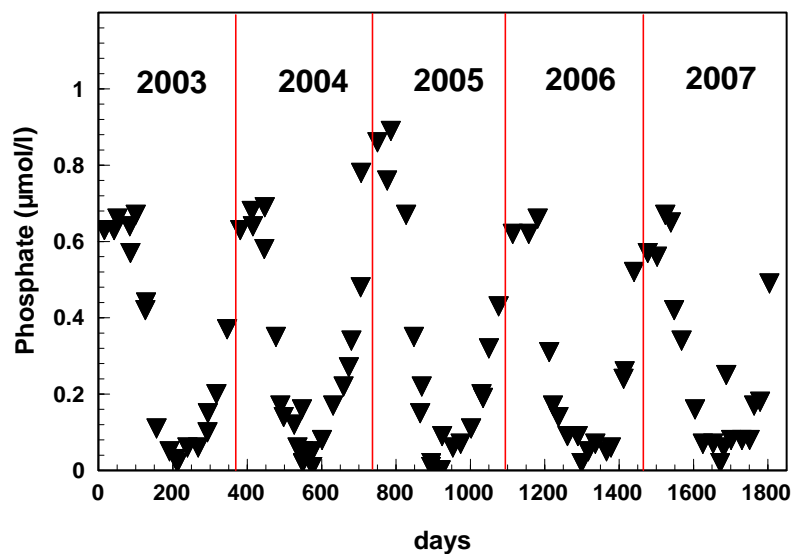


Abb. 27

Phosphatjahresgang im Oberflächenwasser (0 – 10 m) des östlichen Gotlandbeckens (Station 271) in den Jahren 2003 – 2007 – nach Daten des IOW und des SMHI

Fig. 27

Annual phosphate cycle 2003 – 2007 in the surface layer (0 – 10 m) of the eastern Gotland Basin (station 271) – based on IOW and SMHI data

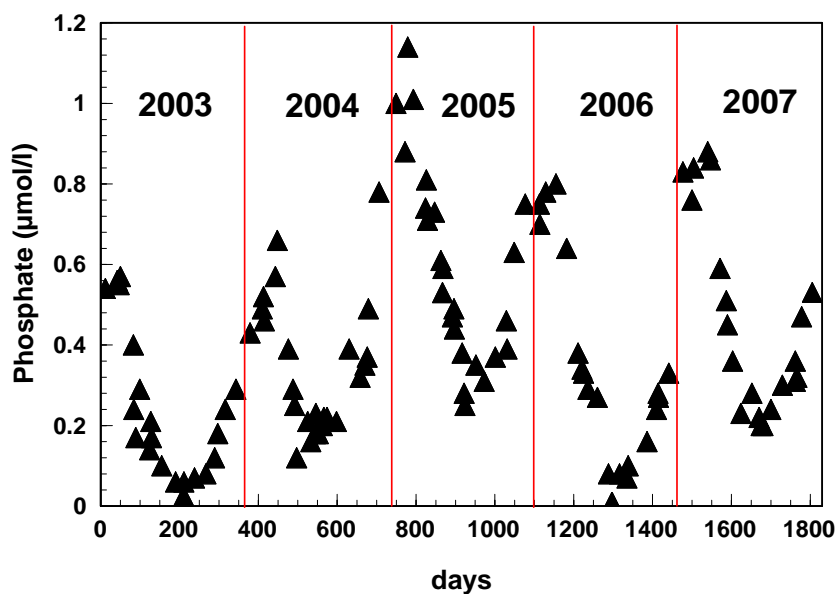


Abb. 28

Phosphatjahresgang im Oberflächenwasser (0 – 10 m) des Bornholmbeckens (Station 213) in den Jahren 2003 – 2007 – nach Daten des IOW und des SMHI

Fig. 28

Annual phosphate cycle 2003 – 2007 in the surface layer (0 – 10 m) of the Bornholm Basin (station 213) – based on IOW and SMHI data

Der typische Jahresgang im Oberflächenwasser wies in den letzten Jahren einige Besonderheiten auf. Der Nitratjahresgang entspricht in allen Seegebieten weitgehend dem gewohnten Verlauf (Abb. 24). Große regionale Unterschiede zeigen sich beim Phosphat. Im östlichen Gotlandbecken (Abb. 27) nehmen die Phosphatkonzentrationen nach der Frühjahrsblüte kontinuierlich ab und liegen im Sommer dann teilweise im Bereich der Nachweisgrenze. Dies entspricht dem seit langem bekannten Verlauf (vgl. auch Abb. 24). Im Bornholmbecken verlief die Entwicklung in den letzten Jahren anders. Bereits im Sommer 2003 wurden die Phosphatvorräte des Oberflächenwassers nicht vollständig aufgebraucht. In den beiden darauf folgenden Jahren nahm dieser „Sommerphosphatpool“ weiter zu. Im Jahr 2005 wurden keine Konzentrationen unter 0,20 µmol/l gemessen. Damit wären theoretisch ideale Bedingungen für eine Massenentwicklung von Cyanobakterien gegeben. Die Blaualgenblüten traten im Sommer 2005 jedoch in großer Intensität im östlichen und nördlichen Gotlandbecken bis in den Finnischen Meerbusen, nicht aber im Bornholmbecken auf. Dagegen entwickelten sich die Cyanobakterien im Jahr 2006 bereits Anfang Juli massiv im Bornholmbecken, im Arkonabecken und in der westlichen Ostsee und hielten bis Anfang September an. Der Bereich des Gotlandbeckens war deutlich weniger betroffen. Folgerichtig wurden im Sommer 2006 wieder Phosphatkonzentrationen nahe der Nachweisgrenze angetroffen (Abb. 28). Im Sommer 2007 gestalteten sich die meteorologischen Bedingungen für die Entwicklung von Cyanobakterien recht ungünstig (vgl. Kapitel 2), so dass es zu keinen ausgeprägten Massenentwicklungen von Blaualgen kam, was sich umgehend in der Herausbildung eines „Sommerphosphatpool“ im Bornholmbecken widerspiegelte während die Phosphatentwicklung im östlichen Gotlandbecken „normal“ verlief. Die Ursachen für dieses sehr unterschiedliche Verhalten wie auch die Frage nach den auslösenden und regulierenden Faktoren der Cyanobakterienentwicklung sind bei weitem noch nicht verstanden. Detaillierte Prozessstudien in Feld und Labor sind zur Klärung dieser Fragen notwendig.

Beachtenswert ist außerdem, dass das Winterplateau im Bornholmbecken wie auch in anderen Seegebieten (vgl. auch Tab. 7) auf recht hohem Niveau liegt. Ursache dürften sauerstoffarme und damit phosphatreiche Wassermassen unterhalb der Halokline sein, die im Winter teilweise in das Oberflächenwasser eingemischt werden (REISSMANN et al., 2008). Im Bornholmbecken wird das hohe Winterplateau zusätzlich durch die im Sommer nicht aufgebrauchten Phosphatmengen unterstützt. Die hohen Winterkonzentrationen des Phosphats, verbunden mit vergleichsweise niedrigen Nitratkonzentrationen (Tab. 7) führen zu Verschiebungen des N/P- Verhältnisses (Abb. 29). Generell sind die N/P- Verhältnisse in der winterlichen Oberflächenschicht weit entfernt vom klassischen Redfield- Verhältnis von 16 : 1 (REDFIELD et al., 1963). Über längere Zeiträume wurde ein recht stabiles N/P- Verhältnis von 7-9 : 1 ermittelt (NEHRING, 1981). Auch aus den ersten regulären Messungen Ende der 1950er Jahre lässt sich ein molares N/P- Verhältnis von 7-10 : 1 ableiten (NAUSCH et al., 2008a). Indirekte Hinweise deuten darauf hin, dass auch um 1900 ähnliche Verhältnisse angetroffen wurden, da sich das hydrographische Regime nicht wesentlich geändert hat. Auf Grund der oben beschriebenen Veränderungen in den winterlichen Nährstoffkonzentrationen, hohe Phosphatwerte und recht niedrige Nitratkonzentrationen kam es in den letzten 5 Jahren zu einer deutlichen Abnahme der N/P- Verhältnisse (Abb. 29). Teilweise wurden Werte unter 3 : 1 errechnet. Im Jahr 2007 kam es wieder zu einer leichten Zunahme der Verhältnisse. Es wurden Werte zwischen 4,3 : 1 im Bornholmbecken und 6,6 : 1 im Bereich des Landsorttiefs ermittelt. Es wird in den Folgejahren zu beobachten sein, ob die N/P- Verhältnisse auf einem sehr niedrigen Niveau verbleiben oder ob sie sich wieder den „normalen“ Werten annähern wie sie bis Ende der 1990er Jahre vorherrschten.

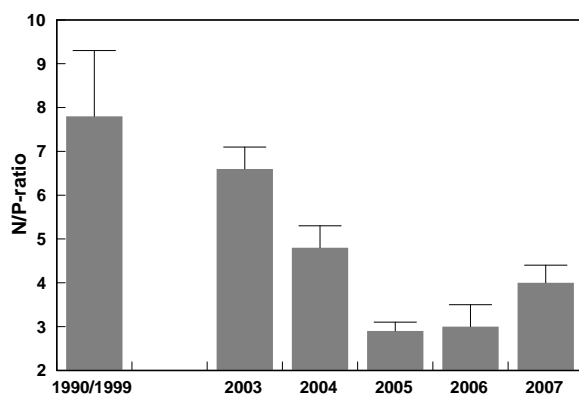


Abb. 29

Molares N/P- Verhältnis in der winterlich durchmischten Oberflächenschicht des Bornholmbeckens

Fig. 29

Molar N/P- ration in the mixed surface layer in winter in the Bornholm Basin

Tab. 7

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

Table 7

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	2003	2004	2005	2006	2007
023 / 022* (Lübecker Bucht)	Feb.	0,52 ± 0,07	0,52 ± 0,02	0,70 ± 0,02	0,93 ± 0,01	0,62 ± 0,00
012 (Meckl. Bucht)	Feb.	0,62 ± 0,01	0,52 ± 0,03	0,69 ± 0,01	0,82 ± 0,01	0,57 ± 0,00
162 (Pommersche Bucht)	Feb.	0,74 ± 0,01	0,84 ± 0,05	0,65 ± 0,00	---	---
113 (Arkonasee)	Feb.	0,54 ± 0,00	0,35 ± 0,01	0,81 ± 0,10	0,79 ± 0,00	0,81 ± 0,01
213 (Bornholmtief)	Feb.	0,56 ± 0,00	0,49 ± 0,02	1,01 ± 0,14	0,79 ± 0,01	0,80 ± 0,04
271 (Gotlandtief)	Feb.	0,63 ± 0,00	0,68 ± 0,01	0,76 ± 0,01	0,44 ± 0,00	0,56 ± 0,00
286 (Fårötief)	Feb.	0,60 ± 0,00	0,66 ± 0,01	0,74 ± 0,01	0,53 ± 0,00	0,56 ± 0,02
284 (Landsortief)	Feb.	0,64 ± 0,00	0,83 ± 0,01	0,77 ± 0,01	0,59 ± 0,00	0,70 ± 0,02
245 (Karlsötief)	Feb.	0,56 ± 0,00	0,80 ± 0,00	1,00 ± 0,01	0,60 ± 0,01	0,76 ± 0,00

* ab 2005

Tab. 7 Forts.

Table 7 cont.

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

Station	Monat	2003	2004	2005	2006	2007
023 / * 022 (Lübecker Bucht)	Feb.	8,2 \pm 1,3	9,6 \pm 0,3	3,7 \pm 0,0	4,2 \pm 0,1	9,6 \pm 0,5
012 (Meckl. Bucht)	Feb.	5,7 \pm 0,0	5,3 \pm 0,2	2,9 \pm 0,0	3,5 \pm 0,0	6,5 \pm 0,1
162 (Pommersche Bucht)	Feb.	23,5 \pm 0,1	23,2 \pm 0,1	9,2 \pm 0,8	---	---
113 (Arkonasee)	Feb.	4,5 \pm 0,0	2,4 \pm 0,0	2,8 \pm 0,4	3,3 \pm 0,0	4,0 \pm 0,2
213 (Bornholmtief)	Feb.	3,6 \pm 0,0	2,4 \pm 0,0	3,0 \pm 0,2	2,2 \pm 0,0	3,1 \pm 0,1
271 (Gotlandtief)	Feb.	3,6 \pm 0,0	2,8 \pm 0,0	3,2 \pm 0,0	2,8 \pm 0,0	2,9 \pm 0,0
286 (Färötief)	Feb.	3,6 \pm 0,0	3,0 \pm 0,0	3,8 \pm 0,0	3,6 \pm 0,0	3,3 \pm 0,1
284 (Landsortief)	Feb.	3,9 \pm 0,0	3,0 \pm 0,0	3,9 \pm 0,0	3,1 \pm 0,0	4,4 \pm 0,0
245 (Karlsötief)	Feb.	3,3 \pm 0,0	2,6 \pm 0,0	3,3 \pm 0,0	2,8 \pm 0,0	3,6 \pm 0,0

* ab 2005

Diatomeen (Kieselalgen) stellen ein bedeutendes Glied der aquatischen Nahrungskette dar und spielen eine wesentliche Rolle im marinen biogeochemischen Kreislauf. Das Vorhandensein von Silikat ist dabei eine essentielle Voraussetzung für ihr Wachstum. Silikat entstammt im Wesentlichen dem Flusswassereintrag, wobei die skandinavischen Flüsse einen höheren Silikatgehalt aufweisen als die Flüsse im übrigen Einzugsgebiet der Ostsee (GRASSHOFF, 1975).

In den zurückliegenden Jahrzehnten wurde für viele Seen und Küstenregionen der Ozeane ein Rückgang der Silikatkonzentrationen beobachtet. Als Ursache wird im Wesentlichen der erhöhte Verbrauch durch die Primärproduktion der Algen infolge der Eutrophierung gesehen (CONLEY et al., 1993), bei der es zwar zu einer verstärkten Versorgung der Gewässer mit Stickstoff- und Phosphorverbindungen, nicht aber zu einem erhöhten Silikateintrag kommt. Aber auch der Bau von Dämmen in Flüssen, verbunden mit der erhöhten Produktion und Sedimentation in den entstandenen Reservoiren, hat zu einem verringerten Silikateintrag und damit zu verringerten Silikatkonzentrationen in den Küstenmeeren geführt (HUMBORG et al., 1997, 2000, 2006b). Auch für die Ostsee wurden abnehmende Trends kalkuliert (WULFF and RAHM, 1988; SANDEN et al., 1991; TROZINSKA and LYSIK-PASTUSZAK, 1996; PAPUSH and DANIELSSON, 2006). Bis in die Mitte des vergangenen Jahrhunderts war ausreichend Silikat (20 – 30 $\mu\text{mol/l}$) in der Oberflächenschicht der zentralen Ostsee vorhanden. Ein signifikanter Rückgang konnte Ende der 1950er/ Anfang der 1960er Jahre beobachtet werden. (HUMBORG et al., 2006a). Ende der 1980er Jahre wurden in der Oberflächenschicht im Durchschnitt etwa 10 $\mu\text{mol/l}$ gemessen. Seitdem scheint sich in der westlichen und zentralen Ostsee ein neues Gleichgewicht herausgebildet zu

haben. So konnten MATTHÄUS et al. (2001) für die Jahresreihe 1993 – 2000 mittlere Silikatkonzentrationen zwischen $9,5 \mu\text{mol/l}$ in der östlichen Gotlandsee und $10,4 \mu\text{mol/l}$ in der Bornholmsee errechnen.

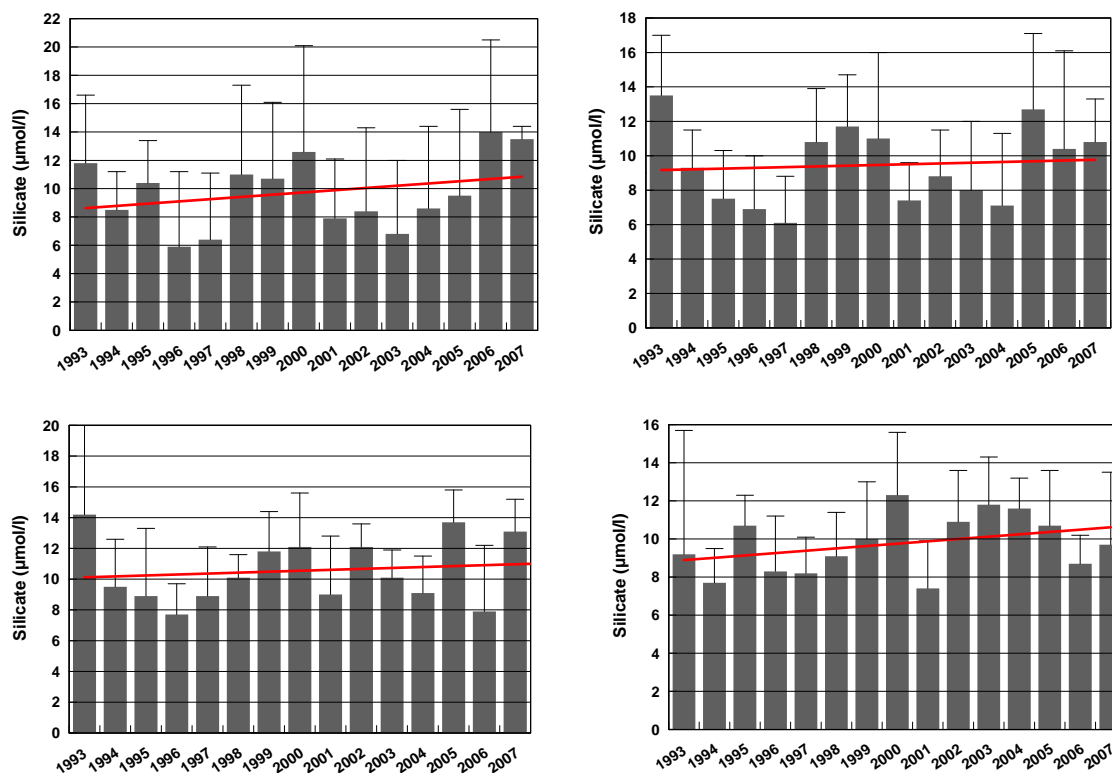


Abb. 30

Jahresmittelwerte der Silikatkonzentrationen in der Oberflächenschicht (0 – 10 m) in der Mecklenburger Bucht (links oben), der Arkonasee (rechts oben), der Bornholmsee (links unten) und der östlichen Gotlandsee (rechts unten)

Fig. 30

Annual mean silicate concentrations in the surface layer (0 – 10 m) in the Mecklenburg Bight (upper left), the Arkona Sea (upper right), the Bornholm Sea (lower left) and the eastern Gotland Sea (lower right)

Eine Fortführung der Datenreihe bis zum Jahr 2007 (Abb. 30) ergibt keine anderen Erkenntnisse. Die Mittelwerte für die 15-jährige Reihe 1993 – 2007 liegen zwischen $9,5 \mu\text{mol/l}$ in der Arkonasee und $10,6 \mu\text{mol/l}$ in der Bornholmsee. Damit lassen sich auch regional für den Bereich zwischen westlicher Ostsee und den zentralen Becken keine Unterschiede in den Jahresmittelwerten feststellen. Die in der Abbildung gezeigten Trendlinien bestätigen, dass keine weitere Abnahme der Silikatkonzentrationen zu beobachten ist. Das wird auch durch das Bestimmtheitsmaß r^2 unterstrichen. Für die Mecklenburger Bucht wurde $r^2 = 0,08$ ermittelt, die Werte für die Arkonasee (0,07), die Bornholmsee (0,02) und die östliche Gotlandsee (0,13) sind ebenfalls sehr niedrig.

Jedoch wurden im Untersuchungsgebiet in seltenen Fällen auch sehr niedrige Silikatkonzentrationen gefunden, was zu einer potentielle Limitation der Primärproduktion der Diatomeen führen kann (NEHRING, 1996). Dagegen wird eine potentielle Limitation der

Kieselalgen für den Finnischen und Rigaer Meerbusen von DANIELSSON et al. (2008) und OLLI et al. (2008) beschrieben.

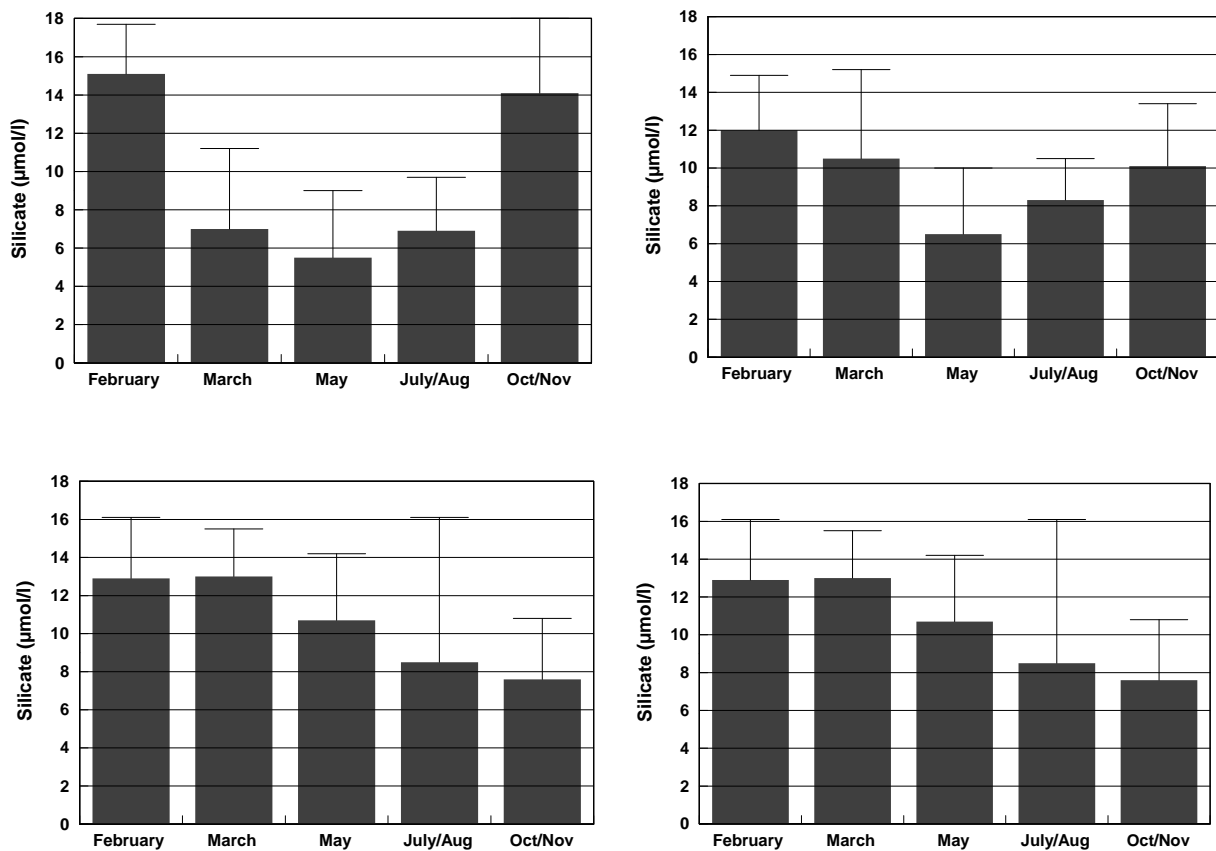


Abb. 31

Mittlerer Jahrgang der Silikatkonzentrationen in der Oberflächenschicht (0 – 10 m) in der Mecklenburger Bucht (links oben), der Arkonasee (rechts oben), der Bornholmsee (links unten) und der östlichen Gotlandsee (rechts unten)

Fig. 31

Mean annual cycle of silicate concentrations in the surface layer (0 – 10 m) in the Mecklenburg Bight (upper left), the Arkona Sea (upper right), the Bornholm Sea (lower left) and the eastern Gotland Sea (lower right)

Eine Betrachtung der gemittelten Jahrgänge des Silikats für die Zeitreihe 1993 – 2007 macht jedoch Unterschiede deutlich (Abb. 31). In der Mecklenburger Bucht findet in der Regel eine typische Frühjahrsblüte der Diatomeen statt, die zu einem deutlichen Silikatrückgang um ca. 10 $\mu\text{mol/l}$ vom Februar bis zum Mai führt. Zum Herbst steigen die Konzentrationen wieder an. Auch in der Arkonasee wird im Wesentlichen diese Entwicklung angetroffen, wenngleich nicht in der gleichen Deutlichkeit. In der Bornholmsee und der östlichen Gotlandsee ist der Silikatverbrauch vom Winter bis zum Mai nur gering. Dies kann durch eine Veränderung in der Artenzusammensetzung erklärt werden. In beiden Seegebieten ist der Anteil der Diatomeen zugunsten der Dionoflagellaten stark zurückgegangen. (WASMUND et al., 1998, 2000). Erst zum Herbst hin wird wieder ein leichter Rückgang des Silikatgehaltes beobachtet, der mit einer Herbstblüte in Zusammenhang gebracht werden kann.

Häufig wird ein molares $\text{Si:N} < 1$ als Indikator für eine Silikatlimitation angenommen. Im winterlichen Oberflächenwasser liegt dieser Wert in allen Seegebieten zwischen 3 und 4 (vgl. Tab. 7 und Abb. 31) und damit deutlich über dem angegebenen Grenzwert. Eine zu geringe Silikatverfügbarkeit kann also nicht die Ursache für die Veränderungen in der Artenzusammensetzung in der zentralen Ostsee sein. Als Ursache für den Populationswechsel kommt die Wassertemperatur des vorangegangenen Winters in Frage, die in den letzten Jahren deutlich über dem langjährigen Mittel liegt. Sollte diese Hypothese, die noch einer weiteren Prüfung bedarf, richtig sein, wären vor allem klimatisch-hydrographische Ursachen, nicht aber die Silikatverfügbarkeit oder Eutrophierungseffekte für die Veränderung der Artenzusammensetzung verantwortlich.

Die Nährstoffverteilung im Tiefenwasser kann ebenfalls aus den Abb. 25 und 26 entnommen werden. Die Auswirkungen des letzten großen Salzwassereinbruchs vom Januar 2003 (FEISTEL et al., 2003a) und der nachfolgenden baroklinen Einströme (FEISTEL et al., 2006a) waren ab 2005 kaum noch spürbar, so dass die Situation in den Tiefenbecken im Wesentlichen durch die seitdem herrschende Stagnationsperiode geprägt war. Während im Jahr 2006 eine sehr geringe Einstromaktivität beobachtet wurde, konnten 2007 barotrope Einstromereignisse mit geschätzten Volumen um 200 km^3 beobachtet werden (vgl. Kapitel 2 und 6.3). Zusätzlich wurden zwischen Juni und August 2006 barokline Einströme registriert, die in mehreren Pulsen erfolgten (NAUSCH et al., 2007). Diese Einstromereignisse zeigten leichte Auswirkungen auf die Nährstoffverhältnisse im Bornholmbecken und in abgeschwächter Form auch im östlichen Gotlandbecken.

Die fast durchgängige Belüftung des Tiefenwassers im Bornholmbecken im Jahr 2007 hatte zur Folge, dass Phosphat zum Teil ausgefällt wird. Im Ergebnis wurden niedrige Phosphatkonzentrationen gemessen. Der Jahresmittelwert von $2,73 \mu\text{mol/l}$ lag noch unter dem des Jahres 2006 (Tab. 8). Die Belüftung ermöglichte auch Nitrifikationsprozesse, so dass bis zum Boden recht hohe Nitratkonzentrationen angetroffen worden. Der Jahresmittelwert von $6,6 \mu\text{mol/l}$ lag nur wenig unter dem des Vorjahres (Tab. 8).

Im östlichen Gotlandbecken sind die o.g. Einstromprozesse nur in stark abgeschwächter Form sichtbar. Zwar konnten im Frühjahr 2007 zurückgehende Schwefelwasserstoffkonzentrationen beobachtet werden, aber nur ganz kurzzeitig wurden im Mai Spuren von Sauerstoff vorgefunden. Somit fehlte eine durchgreifende Belüftung, die eine merkbare Reaktion des Nährstoffregimes verursachen könnte. Der Jahresmittelwert für Phosphat von $4,03 \mu\text{mol/l}$ liegt nur wenig unter dem des Vorjahres, Nitrat ist unter den anoxischen Bedingungen wie 2006 nicht vorhanden, die Ammoniumkonzentrationen steigen allmählich an (Tab. 8). Wie schon in Kapitel 6.3 beschrieben, ist die Wassersäule zwischen Halokline und Thermokline sehr sauerstoffarm. Dies hat zur Folge, dass in dieser Wasserschicht vergleichsweise hohe Phosphatwerte bei niedrigen Nitratwerten gefunden werden. Während der winterlichen Konvektion können diese Nährstoffe teilweise bis an die Oberfläche transportiert werden und beeinflussen somit die Nährstoffverhältnisse der winterlichen Deckschicht (NAUSCH et al., 2008a, REISSMANN et al., 2008).

Im westlichen Gotlandbecken machen sich Salzwassereinströme noch deutlich verzögerter und gedämpfter bemerkbar. Während des gesamten Jahres 2006 herrschte dort eine ausgeprägte Stagnationsphase. An dieser Situation änderte sich auch im Jahr 2007 nichts. Folgerichtig sind keine signifikanten Veränderungen in den Nährstoffkonzentrationen bemerkbar, was durch Jahresmittelwerte dokumentiert werden kann, die nur wenig von denen des Vorjahres abweichen (Tab. 8).

Tab. 8

Jahresmittelwerte und Standardabweichungen für Phosphat, Nitrat und Ammonium im Tiefenwasser der zentralen Ostsee: IOW sowie SMHI Daten (n = 9 – 21)

Table 8

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 – 21)

Phosphat ($\mu\text{mol/l}$; Maximalwerte hervorgehoben)						
Station	Tiefe/m	2003	2004	2005	2006	2007
213 (Bornholmtief)	80	1,14 \pm 0,71	2,08 \pm 1,76	5,26 \pm 2,09	3,01 \pm 0,75	2,73 \pm 1,16
271 (Gotlandtief)	200	3,38 \pm 0,88	2,15 \pm 0,20	3,12 \pm 0,52	4,20 \pm 0,27	4,03 \pm 0,33
286 (Färötief)	150	4,69 \pm 0,77	2,52 \pm 0,07	3,27 \pm 0,53	4,02 \pm 0,19	3,84 \pm 0,19
284 (Landsortief)	400	4,05 \pm 0,22	3,51 \pm 0,38	3,37 \pm 0,23	3,57 \pm 0,12	3,70 \pm 0,17
245 (Karlsötief)	100	4,43 \pm 0,33	4,29 \pm 0,18	3,81 \pm 0,33	4,12 \pm 0,48	4,09 \pm 0,19

Nitrat ($\mu\text{mol/l}$; Minimalwerte hervorgehoben)						
Station	Tiefe/m	2003	2004	2005	2006	2007
213 (Bornholmtief)	80	9,6 \pm 2,4	6,5 \pm 4,0	2,3 \pm 3,2	7,7 \pm 2,5	6,6 \pm 3,75
271 (Gotlandtief)	200	6,0 \pm 4,8	10,1 \pm 1,1	2,6 \pm 3,6	0,0 \pm 0,0	0,0 \pm 0,0
286 (Färötief)	150	0,6 \pm 1,9	8,8 \pm 0,6	2,9 \pm 3,5	0,0 \pm 0,0	0,0 \pm 0,0
284 (Landsortief)	400	0,0 \pm 0,0	0,8 \pm 1,3	2,0 \pm 2,7	0,0 \pm 0,0	0,0 \pm 0,0
245 (Karlsötief)	100	0,0 \pm 0,0	0,0 \pm 0,0	0,7 \pm 1,2	0,0 \pm 0,1	0,0 \pm 0,0

Ammonium ($\mu\text{mol/l}$; Maximalwerte hervorgehoben)						
Station	Tiefe/m	2003	2004	2005	2006	2007
213 (Bornholmtief)	80	0,3 \pm 0,6	1,9 \pm 2,4	5,1 \pm 5,3	0,5 \pm 0,9	2,1 \pm 3,2
271 (Gotlandtief)	200	6,8 \pm 9,5	0,2 \pm 0,2	1,7 \pm 1,9	9,2 \pm 1,7	11,1 \pm 1,6
286 (Färötief)	150	11,0 \pm 4,4	0,2 \pm 0,2	2,0 \pm 2,0	6,9 \pm 1,3	5,5 \pm 1,2
284 (Landsortief)	400	7,3 \pm 1,0	3,2 \pm 2,0	2,4 \pm 1,8	4,8 \pm 0,9	5,8 \pm 1,1
245 (Karlsötief)	100	5,8 \pm 1,8	6,7 \pm 1,4	3,8 \pm 2,4	7,1 \pm 1,9	7,9 \pm 1,8

6.5 Natürliche organische Verbindungen

Für den Zeitraum von 1995 bis 2007 sind in den Tabellen 9 – 11 die Mittelwerte der Konzentrationen von DOC, DN, DON, POC und PON sowie die C/N - Verhältnisse in der partikulären (P - C/N) und der gelösten Fraktion (D - C/N) an ausgewählten Monitoringstationen zusammengestellt. Dabei wurden an den Stationen alle Tiefen (Tab. 9), nur die Oberflächenschicht (0 m bis 5 m, Tab. 10) bzw. die Bodenschicht (< 5 m über Grund, Tab. 11) für die Berechnung herangezogen. Neben dem Mittelwert ist auch die Standardabweichung, der kleinste bzw. größte gemessene Wert sowie die Gesamtzahl der berücksichtigten Werte angegeben. Im Beobachtungszeitraum wurden jährlich in der Regel 5 Fahrten zu verschiedenen Jahreszeiten durchgeführt, so dass für die Oberflächen- und die Bodenschicht bis zu 65 Werte zur Verfügung stehen. Auf einigen Reisen wurde einzelne Stationen auch mehrfach beprobt, z.B. jeweils auf der Hin- und Rückreise, so dass hier eine größere Anzahl von Messwerten vorliegt. Die Anzahl der berücksichtigten Messwerte in der gesamten Wassersäule hängt neben der Häufigkeit der Beprobung zudem von der Tiefe der Station ab.

Für die Berechnung ausgewählt wurden Stationen in den flachen Gebieten der westlichen Ostsee (TF361 – Kieler Bucht, TF012 – Mecklenburger Bucht, TF023 – Lübecker Bucht), in der Oderbucht (TFOB4), in den zentralen Becken der Ostsee (TF113 – Arkonabecken, TF213 – Bornholmbecken, TF259 – südliches Gotlandbecken, TF271 – zentrales östliches Gotlandbecken) sowie an der tiefsten Stelle der Ostsee, dem Landsorttief (TF284).

Da die Berechnungen nicht saisonal aufgelöst wurden, können saisonale Unterschiede nicht direkt aus den Mittelwerten abgeleitet werden. Eine grobe Abschätzung saisonaler Effekte ist jedoch über die Standardabweichung möglich. Parameter, die eine ausgeprägte Saisonalität aufweisen, haben Standardabweichungen, die 50 % bis fast 90 % des Mittelwertes ausmachen (z.B. POC, PON). Demgegenüber weisen Parameter, die nur eine schwach ausgeprägte Saisonalität zeigen, deutlich geringere Standardabweichungen auf, die häufig unter 10 % vom Mittelwert liegen (z.B. DOC, DON, DN). Bei dieser Betrachtung bleiben jedoch Variabilitäten, die durch die hydrodynamische Mischung verschiedener Wasserkörper mit unterschiedlichen Gehalten an Inhaltsstoffen verursacht werden, unberücksichtigt. Hinweise darauf, wie stark eine Station durch unterschiedliche Wassermassen beeinflusst wird, lassen sich jedoch aus der Standardabweichung des Salzgehalts grob abschätzen. So besitzen Stationen, die im Mischungsbereich von salzhaltigem Nordseewasser und salzärmeren Ostseewasser liegen, eine Standardabweichung im Salzgehalt, die oft bis zu 25 % des Mittelwertes ausmachen kann (z.B. TF361 oder andere Stationen in der westlichen Ostsee). Auch große Süßwassereinträge bewirken eine hohe Variabilität des Salzgehaltes (z. B. Station TFOB4, die stark durch die Einträge der Oder beeinflusst wird).

Sieht man einmal von der Station TFOB4 ab, ergibt sich für die DOC Konzentrationen sowohl in der oberflächennahen als auch in der bodennahen Schicht eine Zunahme der Konzentration von den westlichen Stationen zu den östlichen. Die Konzentrationen in der bodennahen Wasserschicht sind dabei immer niedriger als die in der Oberfläche. Für DON ergibt sich ein ähnliches Bild, wengleich die mittlere Konzentrationsdifferenz zwischen den westlichen und den östlichen Stationen deutlich geringer ausgeprägt ist. Abweichend davon nehmen die mittleren Konzentrationen von POC und PON in der Bodenschicht von West nach Ost deutlich ab, während sie im oberflächennahen Wasser um einen mittleren Wert von 20 - 30 $\mu\text{mol/l C}$ bzw. 3-5 $\mu\text{mol/l N}$ schwanken. Die Standardabweichungen sind dabei in der Oberflächenschicht größer als in der bodennahen Schicht, wobei besonders große Unterschiede an den tiefen Stationen in den zentralen Becken der östlichen Ostsee auftreten.

Eine Sonderstellung nimmt die Station TFOB4 ein, die dicht an der Odermündung liegt. Aufgrund der geringen Wassertiefe und den windinduzierten häufigen Strömungsveränderungen machen sich hier sowohl die direkten Einflüsse der Odereinträge als auch die von Wasserkörpern aus den nördlich gelegenen tieferen Gebieten der Ostsee bemerkbar (PASTUSZAK et al., 2003; MOHRHOLZ, 1998). Dies führt zu großen Schwankungen in den Konzentrationen aller Parameter.

Bedingt durch die Stratifizierung der Ostsee werden die Konzentrationen gelöster natürlicher organischer Verbindungen in der oberflächennahen und bodennahen Wasserschicht unterschiedlich beeinflusst. Frischwassereinträge aus Flüssen oder anderen landseitigen Quellen breiten sich aufgrund ihrer geringeren Dichte nahe der Oberfläche aus, während die salzhaltigeren und damit spezifisch dichteren Wassermassen, die aus der Nordsee einströmen, in Bodennähe verbleiben. In den flacheren Gebieten der Ostsee westlich von Bornholm wird der Wasserkörper durch kurzzeitige meteorologische Ereignisse vollständig durchmischt, wodurch sich die Konzentrationen in beiden Wasserkörpern teilweise angleichen. In den tieferen zentralen Becken östlich von Gotland sind die beiden Wasserkörper demgegenüber durch eine permanente Halokline getrennt, die in einer Tiefe von ca. 70 m liegt und für gelöste Verbindungen wie eine Barriere wirkt. Zu einem bedeutenderem Austausch gelöster Verbindungen zwischen beiden Wassermassen (abgesehen von diffusiven Prozessen an der Grenzschicht) kommt es hier nur in den flacheren Küstenzonen und nach größeren Salzwassereinträgen (MATTHÄUS et al., 2008). Neben der Halokline kann unter geeigneten Wetterbedingungen in der gesamten Ostsee in den Sommermonaten auch eine Thermokline auftreten, die für gelöste Verbindungen eine ähnliche Wirkung besitzt wie die (permanente) Halokline.

Die Menge des in die Ostsee einströmenden Wassers wird kompensiert durch den Ausstrom von Oberflächenwasser der Ostsee durch das Kattegat und das Skagerrak in die Nordsee. Die Konzentrationen natürlicher gelöster organischer Verbindungen in dem ausströmenden Wasser liegen dabei in einem Bereich, der den mittleren Konzentrationen in der Oberflächenschicht an den Stationen in der westlichen Ostsee entspricht.

Bei den gelösten natürlichen organischen Verbindungen wird diese Beeinflussung durch die hydrodynamischen Bedingungen besonders am DOC deutlich. Aufgrund einer mittleren DOC Konzentration von größenordnungsmäßig $100 \mu\text{mol/l C}$ in der Nordsee und einer mittleren Konzentration der Süßwassereinträge von $380 \mu\text{mol/l C}$ (NAUSCH et al., 2007, REINTHALER and HERNDL, 2005) liegen die mittleren DOC Konzentrationen in der westlichen Ostsee zwischen $250 \mu\text{mol/l C}$ und $300 \mu\text{mol/l C}$, während in der Oberflächenschicht (oberhalb der Halokline) in den östlichen Gebieten mittlere Konzentrationen von $300 \mu\text{mol/l C}$ bis $350 \mu\text{mol/l C}$ berechnet wurden. In Bodennähe unterhalb der Haloklinen liegt die mittlere DOC Konzentration um $300 \mu\text{mol/l C}$. Aufgrund der großen Wassermengen, die durch die Nordsee einströmen bzw. durch die Frischwassereinträge in die Ostsee gelangen und die durch den Ausstrom von Brackwasser kompensiert werden, wird die DOC Konzentration durch diesen Wassertransport wesentlich stärker beeinflusst als durch die internen, biologisch kontrollierten saisonalen Prozesse. Der Zuwachs an DOC, der durch diese Prozesse neu gebildet werden kann, ist maximal so groß wie die Menge des bei der Primärproduktion in organische Verbindungen überführten Kohlenstoffs. Diese Menge entspricht in erster Näherung der Zunahme an POC im saisonalen Zyklus und liegt in der euphotischen Zone der zentralen Ostsee bei ungefähr $50 \mu\text{mol/l C}$. Wie Untersuchungen in der Nordsee gezeigt haben, ist davon jedoch auszugehen, dass durch das Bakterioplankton nur eine Menge an DOC umgesetzt wird, die ungefähr 70 % des bei der Primärproduktion organisch gebunden partikulären Kohlenstoffs entspricht (REINTHALER and HERNDL, 2005).

Im Wesentlichen gelten die für DOC gemachten Ausführungen auch für DON. Wie jedoch anhand von Zeitreihenuntersuchungen während einer Stagnationsphase im Tiefenwasser der Station TF271 gezeigt werden konnte, erfolgt der Abbau des Kohlenstoff- und Stickstoffanteils der organischen Verbindungen unterschiedlich schnell. Dies führt zu einer deutlichen Erhöhung des C/N - Verhältnisses in der gelösten Fraktion organischer Verbindungen (NAUSCH et al., 2007; NAUSCH et al., 2008a). Ähnlich hohe C/N - Verhältnisse im gelösten organischen Material sind jedoch nicht auf anoxische Wasserkörper am Boden der tiefen Ostseebecken während Stagnationsphasen beschränkt, sondern treten auch an relativ flachen Stationen in den westlichen Teilen der Ostsee auf (z.B. TF012, TF361). Sie wurden besonders im Sommer oder Herbst beobachtet, wenn eine sehr ruhige Wetterlage zu einer stabilen Schichtung mit einem geringen vertikalen Austausch führt. Im Gegensatz zu den Vorgängen während einer Stagnationsphase am Boden des Gotlandbeckens lässt sich der Anstieg des C/N - Verhältnisses nur über einen Zeitraum von wenigen Tagen nachweisen und ist in der Regel nicht mit dem Auftreten anoxischer

Bedingungen verbunden. Diese Beobachtungen zeigen darüber hinaus, dass der Stickstoffanteil des natürlichen organischen Materials nicht 'inert' ist und zu einem großen Teil unter geeigneten Bedingungen remineralisiert werden kann.

Im Gegensatz zu den gelösten organischen Verbindungen unterliegt der partikulär gebundene organische Kohlenstoff und Stickstoff anderen Entstehungs- und Verteilungsmechanismen. Abgesehen von einer winterlichen 'Hintergrundkonzentration' und terrigenen Einträgen durch Flüsse (z.B. Station TFOB4), wird das partikuläre Material in den oberen Metern der gesamten Ostsee (euphotische Zone) durch die Photosyntheseleistung des Phytoplanktons neu gebildet. Die Menge des gebildeten POC bzw. PON ist dabei limitiert durch die zur Verfügung stehende Menge an anorganischen Nährstoffen. Das C/N - Verhältnis in der partikulären Fraktion in der euphotischen Zone entspricht dabei mit einem Wert um 7 dem Redfield Verhältnis (REDFIELD et al, 1963). Unterstellt man in erster Näherung, dass die gesamten anorganischen Nährstoffe, die während der Wintermonate in der euphotischen Zone akkumuliert wurden, im Rahmen der Primärproduktion in organisches Material überführt werden, würde man die Bildung von POC bzw. PON in der Größenordnung von 50 $\mu\text{mol/l C}$ bzw. 7 $\mu\text{mol/l N}$ erwarten. Dabei sind atmosphärische Einträge anorganischer Stickstoffverbindungen noch nicht berücksichtigt, die zu einer Erhöhung der verfügbaren Nährstoffe führen. Da die winterlichen Konzentrationen der Nährstoffe in den küstenferneren Gebieten in den verschiedenen Gebieten der Ostsee recht ähnlich sind, sind demzufolge auch die mittleren POC bzw. PON Mengen in der oberflächennahen Schicht ähnlich.

Im Gegensatz zu den gelösten Verbindungen, die vornehmlich durch hydrodynamische Prozesse innerhalb der Wassersäule transportiert und verteilt werden, unterliegt ein großer Teil des partikulären Materials der Sedimentation. Bei ausreichend großer (spezifischer) Dichte kann die Sedimentation auch durch Sprungschichten hindurch erfolgen und ist damit unabhängig von hydrodynamischen Prozessen.

Partikuläres organisches Material kann im Wesentlichen durch zwei Prozesse aus der Wassersäule entfernt werden: durch eine Sedimentation von Partikeln zum Meeresboden und die anschließende Einlagerung in die Sedimente, oder durch einen - in der Regel biologisch kontrollierten - Abbau des partikulären Materials in der Wassersäule. Bei diesem Abbau wird das partikuläre Material in der Regel zunächst in kleinere, häufig lösliche Bestandteile umgewandelt, bevor es endgültig remineralisiert, d.h. in anorganische Verbindungen überführt wird oder mit ausströmendem Wasser in andere Meeresgebiete transportiert wird.

Ähnlich wie bei den gelösten natürlichen organischen Verbindungen sind auch beim partikulären Material die mittleren Konzentrationen in Bodennähe geringer als in der Oberflächenschicht. Allerdings sind nicht unterschiedliche Wasserkörper die wesentliche Ursache für diese geringeren mittleren Konzentrationen, sondern der Abbau der Partikel in der Wassersäule während des Sedimentationsprozesses. Die Konzentrationsunterschiede zwischen der Oberflächen- und Bodenschicht treten dabei besonders deutlich an den tiefen Stationen hervor, an denen keine vollständige Durchmischung der gesamten Wassersäule stattfindet. Das relativ konstante C/N - Verhältnis der partikulären Fraktion in allen Gebieten der Ostsee und in allen Tiefen deutet darauf hin, dass der Abbau der kohlenstoff- und stickstoffhaltige Bestandteile des partikulären Materials mit annähernd gleicher Geschwindigkeit erfolgt.

Aus den bisherigen Beobachtungen lässt sich das Verhalten natürlicher organischer Verbindungen in einem stark vereinfachten Modell so beschreiben: In der Ostsee gibt es eine im Vergleich zu anderen Meeresgebieten hohe 'Hintergrundkonzentration' an gelöstem organischen Material (DOM), die sich aus der Verteilung bzw. Vermischung von Einträgen an salzreichem und DOM - armen Wasser, das aus der Nordsee einströmt, und landseitigen Frischwassereinträgen mit hohem DOM - Gehalt und dem Export von DOM mit dem in die Nordsee ausströmenden Wasser ergibt. Vor diesem Hintergrund wird durch eine Reihe verschiedener biologisch gesteuerter Prozesse im saisonalen Zyklus organisches Material sowohl durch die Primärproduktion aus anorganischen

Verbindungen neu aufgebaut als auch durch Remineralisationsprozesse und durch Respiration wieder in anorganische Verbindungen zurückverwandelt. Offenkundig sind dabei die Geschwindigkeiten, mit denen die Abbauprozesse erfolgen, für kohlenstoff- und stickstoffhaltige Bestandteile des DOM unterschiedlich.

Die beobachteten Verteilungsmuster natürlicher organischer Verbindungen ergeben sich durch eine Überlagerung der physikalisch kontrollierten Verteilungsprozesse und der biologisch gesteuerten Auf- und Abbauprozesse. Die bisherigen Ergebnisse reichen jedoch noch nicht dazu aus, diese beiden grundlegenden Prozesse so voneinander zu separieren, dass quantitative Raten für einzelne Teilschritte angegeben werden können. Hinzu kommt, dass bei dieser vereinfachten Betrachtung eine Reihe weiterer natürlicher und anthropogener Einflussgrößen nicht berücksichtigt sind (z.B. atmosphärische Einträge, Stickstofffixierung durch Cyanobakterien, Einflüsse durch veränderte Umweltbedingungen (Erderwärmung oder erhöhte atmosphärische CO₂ - Konzentrationen), Veränderungen in der Menge oder der Zusammensetzung landseitiger Einträge, durch Bauwerke verursachte Veränderungen in den Strömungsverhältnissen in der Ostsee). Da die bisher vorliegenden Zeitreihen über die Konzentrationen und die Verteilung natürlicher organischer Verbindungen in der Ostsee relativ kurz sind im Vergleich zu denen physikalischer Parameter oder denen der anorganischen Nährstoffe, sind Vorhersagen über die Folgen von Eingriffen in das Ökosystem auf Veränderungen im Pool der natürlichen organischen Verbindungen mit einigen Unsicherheiten behaftet.

Tab. 9

Mittelwerte und Standardabweichungen für DOC, DN, DON, POC, PON Konzentrationen und der C/N - Verhältnisse in der partikulären und gelösten Fraktion an ausgewählten Stationen in der Ostsee. Die Berechnung berücksichtigt alle Messungen im Zeitraum von 1995 bis 2007. Es sind die Werte der gesamten Wassersäule dargestellt. Zusätzlich ist der jeweils höchste und der niedrigste gemessene Wert angegeben sowie die Anzahl der berücksichtigten Messwerte angegeben

Table 9

Means and standard deviation for DOC, DN, DON, POC, PON concentrations and for C/N ratios in the particulate and dissolved fraction at selected stations in the Baltic Sea. All measurements performed from 1995 to 2007 are used for calculation. Data are shown for the whole water column. Additionally, highest and lowest concentrations measured and the numbers of values are given

Langzeit - Mittelwerte an ausgewählten Monitoring - Stationen								
Berechnungszeitraum : 1995 – 2007				- gesamte Wassersäule -				
	Salz- gehalt	DOC µmol/l C	DN µmol/l N	DON µmol/l N	POC µmol/l C	PON µmol/l N	P C/N ratio	D-C/N ratio
TF361 Wassersäule								
mean	17,48	244,49	17,40	13,55	26,71	3,53	7,7	19,4
s.dev	4,70	42,62	4,47	3,40	16,01	2,07	1,4	6,4
MIN - Val	8,41	161,24	7,91	3,65	8,58	1,02	2,4	8,0
MAX - Val	28,68	342,99	34,04	22,88	134,46	17,94	11,6	64,0
No values	175	167	151	135	173	173	173	135
TF012 Wassersäule								
mean	15,13	266,04	18,25	14,23	24,34	3,21	7,7	20,0
s.dev	4,72	41,37	4,23	3,36	13,49	1,65	1,3	9,9
MIN - Val	7,88	145,83	10,59	2,15	4,21	0,35	2,9	10,1
MAX - Val	28,85	378,10	35,88	26,56	133,10	14,59	12,0	107,8
No values	195	175	157	135	179	179	179	135
TF023 Wassersäule								
mean	15,28	264,58	20,91	15,34	27,87	3,61	7,8	18,1
s.dev	4,04	57,37	6,77	4,19	18,32	2,33	1,3	4,5
MIN - Val	7,23	167,49	9,59	5,56	6,49	0,70	3,7	9,7
MAX - Val	26,57	770,65	59,04	33,73	106,96	13,54	14,5	37,4
No values	158	131	124	110	146	146	146	110
TFOB4 Wassersäule								
mean	6,83	351,77	36,14	19,58	61,72	8,52	7,3	19,3
s.dev	0,88	34,14	20,06	5,40	35,52	4,93	1,0	5,2
MIN - Val	3,41	295,08	17,11	7,95	17,08	1,94	4,1	9,0
MAX - Val	8,49	486,23	127,08	40,52	202,77	29,52	10,2	37,9
No values	107	98	86	73	104	104	104	73

TF113 Wassersäule								
mean	10,38	294,60	19,07	15,63	19,21	2,67	7,4	19,2
s.dev	4,14	35,84	3,99	3,13	11,08	1,48	1,4	2,9
MIN - Val	6,76	195,90	11,30	8,75	3,39	0,51	1,6	8,7
MAX - Val	21,60	391,48	37,89	34,86	109,55	12,94	17,9	28,1
No values	337	305	278	204	314	313	313	204
TF213 Wassersäule								
mean	9,69	297,52	19,47	15,24	15,16	2,15	7,3	20,5
s.dev	3,94	34,87	4,38	3,27	9,25	1,30	1,3	6,1
MIN - Val	6,99	195,73	11,21	3,68	1,74	0,21	2,0	12,4
MAX - Val	19,43	437,48	34,87	25,63	81,22	10,13	17,8	77,3
No values	416	376	345	230	386	385	385	230
TF259 Wassersäule								
mean	7,99	311,81	19,14	15,98	17,44	2,29	7,8	20,1
s.dev	1,52	50,19	4,44	3,56	13,80	1,75	1,5	4,4
MIN - Val	6,77	159,99	11,03	10,31	2,59	0,15	3,7	6,7
MAX - Val	12,90	809,00	48,60	48,27	80,58	9,43	18,5	53,5
No values	300	258	232	211	260	260	260	211
TF271 Wassersäule								
mean	9,97	288,09	21,57	14,03	11,69	1,58	8,1	22,1
s.dev	2,34	40,66	5,96	3,72	10,18	1,86	2,1	7,9
MIN - Val	6,35	202,85	10,04	3,11	1,74	0,11	0,0	8,6
MAX - Val	13,23	815,50	52,68	34,78	92,85	42,75	28,2	94,6
No values	1074	958	883	553	943	936	936	553
TF284 Wassersäule								
mean	8,36	298,95	18,86	14,83	13,18	1,76	7,9	20,9
s.dev	1,90	30,93	4,76	3,46	12,31	1,57	2,1	3,9
MIN - Val	5,67	213,20	9,80	6,16	3,27	0,17	1,9	6,1
MAX - Val	11,36	455,82	55,20	43,40	88,96	11,94	25,8	46,8
No values	419	373	348	325	375	375	375	325

Tab. 10

Mittelwerte und Standardabweichungen für DOC, DN, DON, POC, PON Konzentrationen und der C/N - Verhältnisse in der partikulären und gelösten Fraktion in der Oberflächenschicht (0 – 5m) an ausgewählten Stationen in der Ostsee. Die Berechnung berücksichtigt alle Messungen im Zeitraum von 1995 bis 2007. Zusätzlich ist der jeweils höchste und der niedrigste gemessene Wert angegeben sowie die Anzahl der berücksichtigten Messwerte angegeben

Table 10

Means and standard deviation for DOC, DN, DON, POC, PON concentrations and for C/N ratios in the particulate and dissolved fraction in the surface layer (0 – 5m) at selected stations in the Baltic Sea. All measurements performed from 1995 to 2007 are used. Additionally, highest and lowest concentrations measured and the numbers of values are given

Langzeit - Mittelwerte an ausgewählten Monitoring - Stationen								
Berechnungszeitraum : 1995 – 2007					- Oberflächenschicht -			
	Salz- gehalt	DOC µmol/l C	DN µmol/l N	DON µmol/l N	POC µmol/l C	PON µmol/l N	P C/N ratio	D-C/N ratio
TF361 Oberflächenschicht								
mean	14,14	274,02	17,42	14,91	29,44	3,87	7,7	18,9
s.dev	3,46	29,27	3,80	2,60	18,85	2,47	1,3	3,2
MIN - Val	8,41	210,25	10,41	6,89	10,83	1,45	2,5	13,4
MAX - Val	21,59	342,99	30,98	20,33	134,46	17,94	10,7	32,6
No values	58	55	50	47	56	56	56	47
TF012 Oberflächenschicht								
mean	11,44	291,37	17,82	15,46	27,87	3,56	7,8	19,5
s.dev	2,78	27,68	4,29	3,11	18,21	1,99	1,2	4,2
MIN - Val	7,88	228,32	11,53	7,33	9,21	0,89	3,8	10,3
MAX - Val	19,39	374,32	35,88	26,56	133,10	14,59	11,6	41,7
No values	61	57	49	43	57	57	57	43
TF023 Oberflächenschicht								
mean	12,96	279,59	19,59	16,63	33,00	4,13	8,0	17,7
s.dev	2,63	27,62	5,74	4,15	19,54	2,33	1,4	3,4
MIN - Val	7,23	219,48	9,59	9,42	7,41	0,84	5,1	10,0
MAX - Val	17,89	338,32	33,98	33,73	92,62	13,54	14,5	28,1
No values	48	41	41	37	46	46	46	37
TFOB4 Oberflächenschicht								
mean	6,44	362,73	41,26	20,86	71,16	9,72	7,4	18,5
s.dev	1,00	37,46	24,51	5,66	39,53	5,60	0,9	4,7
MIN - Val	3,41	311,24	19,18	11,21	19,73	2,64	4,7	9,0
MAX - Val	8,49	486,23	127,08	40,52	202,77	29,52	10,2	32,1
No values	51	46	42	37	50	50	50	37

TF113 Oberflächenschicht								
mean	7,81	311,56	18,18	16,20	22,54	3,12	7,3	19,3
s.dev	0,43	23,49	3,07	1,83	11,65	1,53	1,6	2,4
MIN - Val	6,76	223,74	13,70	13,12	6,23	0,60	3,2	12,0
MAX - Val	9,15	374,99	27,40	22,16	60,00	7,40	17,9	23,7
No values	79	72	67	49	77	77	77	49
TF213Oberflächenschicht								
mean	7,37	314,60	18,50	16,51	19,72	2,75	7,3	19,4
s.dev	0,23	20,09	3,74	2,47	10,97	1,50	1,0	2,7
MIN - Val	6,99	286,66	12,08	12,60	2,77	0,29	3,6	13,1
MAX - Val	7,95	403,32	32,45	23,36	49,57	6,54	9,8	28,9
No values	80	73	67	46	74	74	74	46
TF259 Oberflächenschicht								
mean	7,25	320,39	18,56	16,85	24,83	3,27	7,6	19,7
s.dev	0,47	33,03	4,99	5,21	17,52	2,23	0,9	2,9
MIN - Val	6,77	262,07	13,31	12,41	3,46	0,43	4,3	6,7
MAX - Val	10,65	489,52	48,60	48,27	71,50	9,43	10,1	25,3
No values	62	53	48	43	54	54	54	43
TF271 Oberflächenschicht								
mean	7,05	318,06	17,46	15,73	22,30	2,83	7,7	20,4
s.dev	0,21	19,97	2,05	1,73	17,66	2,03	1,2	2,4
MIN - Val	6,35	261,20	11,62	11,33	3,58	0,41	3,9	16,1
MAX - Val	7,44	389,32	21,84	20,25	92,85	9,66	11,0	27,3
No values	94	82	78	47	84	84	84	47
TF284 Oberflächenschicht								
mean	6,46	321,70	17,55	15,72	25,53	3,34	7,6	20,9
s.dev	0,29	23,30	2,77	2,17	19,00	2,32	1,2	2,9
MIN - Val	5,83	283,13	11,82	10,50	3,54	0,46	3,0	14,4
MAX - Val	7,07	446,98	25,36	21,40	88,96	11,94	9,8	30,8
No values	56	50	48	45	51	51	51	45

Tab. 11

Mittelwerte und Standardabweichungen für DOC, DN, DON, POC, PON Konzentrationen und der C/N - Verhältnisse in der partikulären und gelösten Fraktion in der bodennahen Wasserschicht (bis ca. 5 m über Grund) an ausgewählten Stationen in der Ostsee. Die Berechnung berücksichtigt alle Messungen im Zeitraum von 1995 bis 2007. Zusätzlich ist der jeweils höchste und der niedrigste gemessene Wert angegeben sowie die Anzahl der berücksichtigten Messwerte angegeben

Table 11

Means and standard deviation for DOC, DN, DON, POC, PON concentrations and for C/N ratios in the particulate and dissolved fraction in the near bottom layer (up to 5 m above the ground) at selected stations in the Baltic Sea. All measurements performed from 1995 to 2007 are used. Additionally, highest and lowest concentrations measured and the numbers of values are given

Langzeit - Mittelwerte an ausgewählten Monitoring - Stationen								
Berechnungszeitraum : 1995 – 2007					- Bodenschicht -			
	Salz- gehalt	DOC µmol/l C	DN µmol/l N	DON µmol/l N	POC µmol/l C	PON µmol/l N	P C/N ratio	D-C/N ratio
TF361 Bodenschicht								
mean	22,13	206,67	18,16	12,02	21,29	2,75	7,9	19,9
s.dev	2,83	30,87	5,47	4,35	9,71	1,19	1,5	10,6
MIN - Val	16,02	161,24	7,91	3,65	8,58	1,02	2,4	8,0
MAX - Val	28,68	265,91	34,04	22,88	55,83	6,14	11,6	64,0
No values	55	54	48	42	56	56	56	42
TF012 Bodenschicht								
mean	20,13	227,79	18,86	12,27	20,50	2,60	8,0	19,9
s.dev	3,30	32,37	4,34	3,11	10,60	1,30	1,1	9,9
MIN - Val	14,68	145,83	11,80	3,65	5,89	0,67	6,3	12,4
MAX - Val	28,85	300,32	28,75	19,83	48,42	6,01	11,7	78,9
No values	55	49	46	40	51	51	51	40
TF023 Bodenschicht								
mean	19,11	241,99	23,50	13,14	21,97	2,95	7,6	18,6
s.dev	3,09	89,43	8,69	4,07	16,04	1,96	1,3	5,3
MIN - Val	11,46	167,49	10,52	7,12	7,50	0,87	3,7	9,7
MAX - Val	26,57	770,65	59,04	21,18	106,96	12,09	10,1	31,4
No values	49	40	36	30	43	43	43	30
TFOB4 Bodenschicht								
mean	7,18	341,77	30,71	17,94	53,33	7,48	7,2	20,5
s.dev	0,55	27,23	12,25	4,64	29,47	3,97	1,0	5,6
MIN - Val	5,87	298,05	17,11	7,95	17,08	1,94	4,1	13,0
MAX - Val	8,49	410,15	82,57	27,19	167,53	22,25	9,8	37,9
No values	51	47	41	34	49	49	49	34

TF113 Bodenschicht								
mean	16,91	250,72	20,78	13,36	17,00	2,17	8,1	19,2
s.dev	2,38	25,20	4,76	3,09	13,28	1,64	1,3	3,1
MIN - Val	8,55	195,90	13,04	8,75	4,47	0,66	3,1	9,4
MAX - Val	21,60	314,15	37,89	26,07	109,55	12,94	11,5	26,0
No values	81	77	67	49	75	74	74	49
TF213Bodenschicht								
mean	16,54	249,07	23,84	11,46	12,29	1,75	7,2	24,2
s.dev	0,85	24,64	4,79	3,76	5,54	0,75	1,3	12,3
MIN - Val	12,75	195,73	15,02	3,68	4,56	0,50	2,1	12,9
MAX - Val	19,43	331,30	34,87	25,63	38,11	4,87	13,7	77,3
No values	92	78	75	40	83	83	83	40
TF259 Bodenschicht								
mean	10,81	287,98	22,71	14,64	10,69	1,30	8,6	20,5
s.dev	0,83	64,87	5,33	3,98	6,90	0,94	1,7	6,2
MIN - Val	7,16	220,10	13,33	10,31	3,80	0,37	3,7	7,9
MAX - Val	12,90	736,35	46,05	34,85	37,17	5,01	14,1	53,5
No values	63	56	48	44	52	52	52	44
TF271 Bodenschicht								
mean	12,43	265,93	27,95	10,94	14,71	2,03	7,5	28,8
s.dev	0,42	18,33	8,25	3,54	6,71	1,00	1,4	16,0
MIN - Val	9,71	218,70	16,87	3,11	6,63	0,82	2,7	12,2
MAX - Val	13,23	322,99	52,68	21,69	54,03	7,53	14,9	94,6
No values	100	90	84	55	91	91	91	55
TF284 Bodenschicht								
mean	10,53	273,90	20,09	13,36	8,89	1,28	7,2	21,1
s.dev	0,46	17,80	5,15	2,89	1,86	0,36	1,4	4,4
MIN - Val	8,71	213,20	13,05	8,30	6,37	0,56	2,9	11,5
MAX - Val	11,36	329,40	36,56	23,21	14,18	2,61	11,7	35,6
No values	53	49	43	41	45	45	45	41

Zusammenfassung

Der Winter 2006/2007 war mild und kurz, mit der Kältesumme 10,3 K d von Warnemünde der mildeste seit Beginn der Vergleichsdaten im Jahr 1948, mit einem Wert von nur 10% des langjährigen Mittels über fast 60 Jahre. Damit rangierte er vor 1999/2000 als dem zweitmildesten Winter mit 10,7 K d, und 1989/1990 mit 15,0 K d. Die maximale Eisbedeckung der Ostsee lag mit 139 000 km² am 23. Februar bei 65% des langjährigen Mittelwerts von 214 000 km² seit 1720. Dieser Wert ist nicht so außergewöhnlich niedrig wie die Kältesumme in Warnemünde; allein von den letzten 10 Jahren wiesen 5 eine geringere Eisbedeckung auf, in den letzten 20 Jahren waren es 11. Der kälteste Winter der letzten Dekade war 2002/2003 mit einer Eisbedeckung von 232 000 km². Die reduzierte Eissumme an der deutschen Ostseeküste, ein Maß für die Bewertung der Stärke eines Eiswinters, war im Jahr 2007 gleich Null (langjähriges arithmetisches Mittel: 22 Tage). Lediglich in der inneren Schlei und in Küstennähe einiger geschützt liegenden Bereiche der Vorpommerschen Boddengewässer bildete sich für einige wenige Tage Eis in unbedeutendem Umfang. Die Monate Januar bis April waren extrem warm, nur der Oktober fiel geringfügig zu kalt aus. Die Niederschläge schwankten extrem zwischen dem außergewöhnlich trockenen April mit nur etwa 20% des normalen Niederschlags, und den nassen Monaten Juni und Juli mit fast 300%. Im Jahresmittel war das Jahr in Warnemünde in Bezug auf die Wärmesummen mit 153,1 K d nur wenig wärmer als im langjährigen Durchschnitt. Deutschlandweit wurde das Jahr 2007 wegen des milden Winters und warmen Frühjahrs das zweitwärmste Jahr seit Beginn des 20. Jahrhunderts, knapp hinter 2000 und vor 1994.

Das Jahr 2007 war in der Wasseroberflächentemperatur durch ein vergleichsweise warmes erstes Halbjahr gekennzeichnet und war im Jahresmittel das wärmste Jahr im Untersuchungszeitraum. Dazu haben insbesondere die Monate Januar, Februar und Juni beigetragen, die in der südlichen und eigentlichen Ostsee die wärmsten im Untersuchungszeitraum 1990-2007 waren. Nach dem warmen Juni lagen die Monate Juli, August und September unter dem langjährigen Mittel. Die höchsten Temperaturen wurden mit 18-20 °C am 14. August erreicht. Durch die niedrigen Temperaturen im Sommer war das Jahr auch durch nur sehr geringe Cyanobakterienaktivitäten gekennzeichnet.

Barotrope Einstromereignisse mit geschätzten Volumen um 200 km³ fanden in der Ostsee 2007 drei Mal statt, Ende Januar, Anfang März und Anfang November, zwei weitere mit jeweils weniger als 150 km³ Volumen im Juni/Juli und im August/September. Warme Einstrom-Pulse über 6 °C wurden im Gotlandbecken bei 180 m Tiefe in der zweiten und dritten Januarwoche gemessen. Ein ähnlicher Puls wurde dort Ende März beobachtet, dieses Mal aber über alle Tiefenstufen von 180 bis 220 m. So waren die Verhältnisse in den Tiefenbecken der Ostsee nach wie vor durch die warmen und kalten Einströme 2002 und 2003 und die danach einsetzende Stagnationsperiode geprägt. Jedoch deuteten schon 2006 mehrere Indizien auf barokline Einströme hin, die, gefolgt von den fünf kleinen barotropen Einstromereignissen 2007, mit unterschiedlichen Eigenschaften auch die zentrale Ostsee erreichten. Insbesondere wurde 2007 die bodennahe Schicht im Raum vom Bornholmbecken bis zum Danziger Tief mehrfach belüftet, ein normalerweise für barokline Einströme typischer Vorgang. Trotzdem lag der Jahresmittelwert des Sauerstoffs im Bornholmtief in 80 m Wassertiefe mit 0,46 ml/l unter dem des Vorjahres (0,85 ml/l), aber weit entfernt vom extremsten Wert von -0,67 ml/l im Jahr 2005. Die verschiedenen baroklinen Einströme konnten die Sauerstoffsituation im östlichen Gotlandbecken nur kurzzeitig beeinflussen. So konnten im Mai in 225 m Wassertiefe sogar Spuren von Sauerstoff (0,02 – 0,04 ml/l) gemessen werden. Bereits im Herbst wurden wieder hohe Schwefelwasserstoffwerte gefunden. Ende 2007 war im Bereich des Gotlandtiefs die Wassersäule zwischen 137 m und dem Boden (239 m) anoxisch, was den Fortgang der Stagnationsperiode dokumentiert. Der Jahresmittelwert 2007 in 200 m Wassertiefe

lag mit $-1,46$ ml/l nur wenig unter dem des Vorjahres von $-1,58$ ml/l. Im westlichen Gotlandbecken machen sich Salzwassereinströme deutlich verzögerter und in gedämpfter Form bemerkbar. Während des gesamten Jahres 2006 hatte dort eine ausgeprägte Stagnationsphase geherrscht. An dieser Situation änderte sich auch im Jahr 2007 nichts.

In der Oberflächenschicht wiesen Phosphat und Nitrat den für die gemäßigten Breiten typischen Jahresgang auf, jedoch wie schon in den letzten Jahren beim Phosphat mit einigen regionalen Besonderheiten. Im östlichen Gotlandbecken nahmen die Phosphatkonzentrationen nach der Frühjahrsblüte kontinuierlich ab und lagen im Sommer dann teilweise im Bereich der Nachweisgrenze. Dies entsprach dem seit langem bekannten Verlauf. Im Bornholmbecken wurden die Phosphatvorräte des Oberflächenwassers bereits im Sommer 2003 nicht vollständig aufgebraucht. In den beiden darauf folgenden Jahren nahm dieser „Sommerphosphatpool“ weiter zu. Im Jahr 2004 wurden keine Konzentrationen unter $0,20$ $\mu\text{mol/l}$ gemessen. Nachdem die Phosphatkonzentrationen im Sommer 2006 infolge einer intensiven Cyanobakterienblüte wieder nahe der Nachweisgrenze lagen, kam es 2007 wieder zur Herausbildung eines „Sommerphosphatpools“. Die Ursachen für dieses sehr unterschiedliche Verhalten wie auch die Frage nach den auslösenden und regulierenden Faktoren der Cyanobakterienentwicklung sind bei weitem noch nicht verstanden. Beachtenswert sind außerdem die hohen Phosphatwinterkonzentrationen in allen Seegebieten. Verbunden mit niedrigen Winternitratkonzentrationen führt dies zu Verschiebungen des N/P- Verhältnisses. Generell waren die N/P- Verhältnisse in der winterlichen Oberflächenschicht weit entfernt vom klassischen Redfield- Verhältnis von $16 : 1$. Über längere Zeiträume wurde ein recht stabiles N/P- Verhältnis von $7-9 : 1$ ermittelt. In den letzten 5 Jahren kam es zu einer deutlichen Abnahme der N/P- Verhältnisse. Im Jahr 2007 wurden Werte zwischen $4,3 : 1$ im Bornholmbecken und $6,6 : 1$ im Bereich des Landsorttiefs ermittelt. Es wird in den Folgejahren zu beobachten sein, ob die N/P- Verhältnisse auf einem sehr niedrigen Niveau verbleiben oder ob sie sich wieder den „normalen“ Werten annähern wie sie bis Ende der 1990er Jahre vorherrschten.

Die Nährstoffsituation im Tiefenwasser der Becken der zentralen Ostsee wird in starkem Maße durch Einstromereignisse geprägt. Die fast durchgängige Belüftung des Tiefenwassers im Bornholmbecken im Jahr 2007 hatte zur Folge, dass niedrige Phosphatkonzentrationen gemessen wurden. Der Jahresmittelwert von $2,73$ $\mu\text{mol/l}$ lag noch unter dem des Jahres 2006. Die Belüftung ermöglichte auch Nitrifikationsprozesse, so dass bis zum Boden recht hohe Nitratkonzentrationen angetroffen wurden. Der Jahresmittelwert von $6,6$ $\mu\text{mol/l}$ lag nur wenig unter dem des Vorjahres. Im östlichen Gotlandbecken kam es zu keiner durchgreifenden Belüftung des Tiefenwassers. Der Jahresmittelwert für Phosphat von $4,03$ $\mu\text{mol/l}$ lag nur wenig unter dem des Vorjahres, Nitrat war unter den anoxischen Bedingungen wie 2006 nicht vorhanden, die Ammoniumkonzentrationen stiegen allmählich an. Sie erhöhten sich von $1,7$ $\mu\text{mol/l}$ (2005) über $9,2$ $\mu\text{mol/l}$ (2006) auf $11,1$ $\mu\text{mol/l}$ im Jahr 2007. Auf Grund der anhaltenden Stagnation im Tiefenwasser des westlichen Gotlandbeckens waren keine signifikanten Veränderungen in den Nährstoffkonzentrationen bemerkbar.

Summary

The winter 2006/2007 was mild and short. According to the “cold sum” of 10.3 K d of the winter air temperatures in Warnemünde, it was the mildest one since the beginning of the record in 1948. This “cold sum” amounted to only 10% of the 60-years long-term mean, ranging before the second mildest winter 1999/2000 (10.7 K d) and 1989/1990 (15.0 K d). The maximum ice cover of the Baltic Sea of $139\,000$ km² at February 23rd amounted to 65% compared with the long-term mean of $214\,000$ km² since 1720. This value is not exceptionally low as compared to the extreme low “cold

sum” in Warnemünde. Already in the last 10 years, 5 winters had a lower ice coverage; during the last 20 years there were 11 such winters. The coldest winter during the last decade was in 2002/2003 with an ice coverage of 232 000 km². The reduced ice sum at the German Baltic Sea coast, as a measure to assess the intensity of the ice winter, was zero in 2007 (long-term arithmetic average: 22 days). Only in the inner part of the Schlei river and some protected areas near to the coast of the Bodden waters in Pomerania, some ice with minor extent was observed for a few days. The months of January to April were extremely warm, only the October was somewhat too cold. Precipitation varied extremely between the extraordinary dry April with only 20% of the normal rain and the wet months of June and July with around 300% of the average. The annual “heat sum” of 153.1 K d in Warnemünde was only slightly greater than the 60-years mean. However, due to the mild winter and warm spring, 2007 was the second warmest year in Germany since the beginning of the 20th century, after 2000 and before 1994.

Sea surface temperature in 2007 was characterized by a comparatively warm first half of the year and was, on the annual average, the warmest year of the observation period since 1990. Especially the months of January, February and June were responsible for this extremum. In the southern and central Baltic Sea, they belonged to the warmest years of the observation period 1990-2007. After the sea surface temperature in June was very high, its values of July, August and September were below the long-term mean. Maximum temperature was reached with 18-20 °C on August 14th. Due to the water temperature in summer and windy weather, the development of cyanobacteria was only minor.

In 2007, barotropic inflow events carrying more than 200 km³ water volume occurred three times: end of January, at the beginning of March, and at the beginning of November. Two additional events with less than 150 km³ took place in June/July and August/September. Pulses with warm water >6 °C did flow into the Gotland Basin at 180 m water depth in the second and third week of January. A similar pulse was observed at the end of March, covering however the whole water column between 180 and 220 m. The conditions in the deep basins were still coined by the after effects of the warm and cold inflow events in 2002 and 2003, and by the stagnation period which started afterwards. However, there were some hints of baroclinic inflow events already in 2006 which, followed by the five small barotropic inflow events in 2007, influenced the central Baltic Sea. Especially the near-bottom layer region from the Bornholm Basin to the Gdansk Deep was ventilated repeatedly, a process otherwise typical for baroclinic inflows. Despite these ventilations, the annual oxygen mean of 0.46 ml/l in 80 m water depth in the Bornholm Basin was lower than in the year before (0.85 ml/l), and by far off the extreme average of -0.67 ml/l in 2005. The different inflow events could only shortly improve the oxygen situation in the eastern Gotland Basin. Thus, traces of oxygen could be detected in 225 m water depth (0.02 – 0.04 ml/l) in May. But already in autumn, high hydrogen sulphide concentrations were found again. At the end of 2007, the water column of the Gotland Deep between 137 m and the bottom (239 m) was completely anoxic indicating the continuation of the stagnation period. The annual mean 2007 for 200 m water depth of -1.46 ml/l was only marginally lower than in 2006 with -1.58 ml/l. In the western Gotland Basin, throughout the whole year of 2006, a stagnation period prevailed. This situation continued in 2007.

In the surface layer of the Baltic Sea, the nutrients phosphate and nitrate showed an annual cycle typical for the temperate climate zone, although with some regional particularities during the last years with respect to phosphate. In the eastern Gotland Basin, phosphate concentrations decreased after the spring bloom and were near to the detection limit during the summer. This is in conformity to the typical course. In the Bornholm Basin, already in summer 2003 the phosphate reservoir of the surface layer was not consumed completely. During the two following years this

“summer phosphate pool” increased further. In 2005, no concentrations $< 0.20 \mu\text{mol/l}$ were measured. Whereas in the summer of 2006 an intensive cyanobacteria bloom consumed the phosphate reservoir completely, the “summer phosphate pool” was formed in 2007 again. The reasons for this different behaviour as well as the triggering and regulating factors of the cyanobacteria development are by far not well understood. Noteworthy are also the high phosphate winter concentrations in all sea areas. Together with relatively low winter nitrate concentrations a shift took place in the N:P-ratio. In general, N:P-ratios in the mixed winter surface layer are far away from the classical Redfield ratio of 16:1. Over a longer period of time, a stable N:P- ratio of 7:1 - 9:1 had established. In the last five years, a remarkable decrease was observed. In 2007, the N:P ratio ranged between 4.3:1 in the Bornholm Basin and 6.6:1 in the Landsort Deep area. In the coming years, we shall have to observe whether the N:P- ratios remain on this new low level or if they return to the “normal” values which were found until the end of the 1990s.

The nutrient situation in the deep basins of the central Baltic Sea is mainly coined by the occurrence or absence of inflow events. The ventilation of the Bornholm Basin nearly throughout the whole year of 2007 resulted in low phosphate concentrations. The annual mean of $2.73 \mu\text{mol/l}$ in 80 m water depth was below that of 2006. The ventilation allowed nitrification processes. Thus, high nitrate concentrations were found down to the bottom. The annual mean of $6.6 \mu\text{mol/l}$ was only slightly lower than in the year before. In the eastern Gotland Basin, the ventilation of the deep water was irrelevant and may just have served for some temporal lowering of the H_2S concentrations. The annual mean for phosphate in 200 m water depth of $4.03 \mu\text{mol/l}$ was in the same range as in 2006; nitrate was not existent under anoxic conditions and ammonium concentrations increased further from $1.7 \mu\text{mol/l}$ (2005) over $9.2 \mu\text{mol/l}$ (2006) to $11.1 \mu\text{mol/l}$ in 2007. The prevailing stagnation period in the deep water of the western Gotland Basin caused no significant changes in the nutrient concentrations compared to the year before.

Danksagung

Die Autoren danken den am Ostseeüberwachungsprogramm beteiligten Mitarbeitern des Instituts für Ostseeforschung Warnemünde für die Durchführung der Messungen sowie Kapitänen und Besatzungen der Forschungsschiffe „Professor Albrecht Penck“ und „Alkor“ für die Unterstützung und den Einsatz bei den Messfahrten des Jahres 2007. 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 Frau KRISTIN JUNGE 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

- ARNEBORG, L., FIEKAS, V., UMLAUF, L., AND BURCHARD, H. (2007): Gravity current dynamics and entrainment. A process study based on observations in the Arkona Basin, *J. Phys. Oceanogr.*, **37**, 2094-2113.
- 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 (2007): Baltic Operational Oceanographic System.: Waterlevel. <http://www.boos.org/index.php?id=29>
- BSH (2004): Reduzierte Eissumme. <http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Beobachtungen/Eis/1986.jsp>
- CONLEY, D., SCHELSKE, C. and E. STOERMER (1993): Modification of the biogeochemical cycle of silica with eutrophication. *Mar. Ecol.Prog. Ser.* **101**, 179-192.
- DANIELSSON, Å., PAPUSH, L. and L. RAHM (2008): Past, present and future state of the biogeochemical Si cycle in the Baltic Sea. – *J. mar. Syst.* in press - [doi:10.1016/j.jmarsys.2007.10.016](https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2007.10.016)
- DWD (2008a): Witterungsreport: express. 9, Nr. 1 - 13. Offenbach: Deutscher Wetterdienst.
- DWD (2008): unveröffentlichte Daten
- EUTROSYM (1976): UNEP-Symposium über Eutrophierung und Sanierung von Oberflächengewässern. – Larl-Marx-Stadt, 20. – 25.09.1976, Bd. 1, Teil 2.2.
- 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., und HAGEN E. (2006a): Unusual Inflow Activity 2002/3 and Varying Baltic Deep-Water Properties. – *Oceanologia*, 48(S), 2006, 21-35 http://www.iopan.gda.pl/oceanologia/48_S.html#A2
- FEISTEL, R., NAUSCH, G., und HAGEN E. (2006b): Water Exchange between the Baltic Sea and the North Sea, and conditions in the Deep Basins. HELCOM Indicator Fact Sheets 2006, Online 31 Aug 2006, http://www.helcom.fi/environment2/ifs/en_GB/cover/
- FEISTEL, R., NAUSCH, G., und HAGEN E. (2006c): Response of Baltic Water Properties to the Unusual Inflow Sequence since 2002. ICES CM 2006/C:09, ICES Annual Science Conference 2006. Maastricht, the Netherlands, 19–23 September 2006

- FEISTEL, R., NAUSCH, G., and HAGEN E. (2006d): Water Exchange between the Baltic Sea and the North Sea, and conditions in the Deep Basins. Indicator Report 2005 HELCOM
http://www.helcom.fi/environment2/ifs/ifs2005/en_GB/inflow/
- FEISTEL, R., FEISTEL, S., NAUSCH, G., SZARON, J., LYSIAK-PASTUSZAK, E., ÆRTEBJERG, G. (2008a): BALTIC: Monthly time series 1900 – 2005. In: FEISTEL, R., NAUSCH, G. and WASMUND, N. (Eds.), State and Evolution of the Baltic Sea 1952-2005. Wiley 2008, 311-336.
- FEISTEL, R. SEIFERT, T., FEISTEL, S., NAUSCH, G. BOGDANSKA, B. BROMAN, B. HANSEN, L. HOLFORT, J., MOHRHOLZ, V., SCHMAGER, G., HAGEN, E., PERLET, I., WASMUND, N. (2008b): Digital supplement. In: Feistel, R., Nausch, G. and Wasmund, N. (Eds.), State and Evolution of the Baltic Sea 1952-2005, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, p. 625-667.
- FIMR (2007): Ice winter 2006/2007. The ice winter 2006/2007 was mild and short.
<http://www.fimr.fi/en/palvelut/jaapalvelu/jaatalvi/2007.html>
- 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. (1975): The hydrochemistry of land-locked basins and fjords. In: RILEY, J.P. and G. SKIRROW. (Eds), Chemical Oceanography, Academic Press, New York, 455-497.
- GRASSHOFF, K., ERHARDT, M. and KREMLING, K. (1983): Methods of seawater analysis. – 2nd Ed., Verlag Chemie, Weinheim.
- HAGEN, E. und 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.borenv.net/BER/pdfs/ber10/ber10-211.pdf>
- HAGEN, E. und FEISTEL, R. (2008): Baltic climate change, in: Feistel, R., Nausch, G., and Wasmund, N. (Eds.), State and Evolution of the Baltic Sea 1952 – 2005, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, p. 93-120.
- HELCOM (1980): Assessment of the effects of pollution on natural resources of the Baltic Sea. – Balt. Sea Environ. Proc. **5B**, 1-425.
- 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 (2003a): The Baltic marine environment 1999 . 2002. Balt. Sea Environ. Proc. **87**, 1-46.
- HELCOM (2003b): The Baltic Sea joint comprehensive environmental action plan (JCP) – ten years of implementation. - Balt. Sea Environ. Proc. **88**, 1-68.
- HELCOM (2003c): The review of more specific targets to reach the goal set up in the 1988/1998 ministerial declarations regarding nutrients. - Balt. Sea Environ. Proc. **89**, 1-89.
- HELCOM (2007): HELCOM Baltic Sea Action Plan. – HELCOM, 1-103.
- HUMBORG, C., ITTEKOT, V., COCIASI, A. and B. V. BODUNGEN (1997): Effect of Danube river dam in Balck Sea biogeochemistry and ecosystem structure. Nature **386**, 385-388.
- HUMBORG, C., CONLEY, D., RAHM, L., WULFF, F., COCIASI, A. and V. ITTEKOT (2000): Silicate retention in river basins: far-reaching effects on biogeochemistry and aquatic food webs in coastal marine environments. Ambio **29**, 45-50.
- HUMBORG C., SMEDBERG, E., MÖRTH, C.-M., RAHM, L. and Å. DANIELSSON (2006a): Dissolved silica dynamics in boreal and arctic rivers: vegetation control over temperature? In: ITTEKOT, V., UNGER, D., HUMBORG, C., TAC AN, N. (Eds.), The Silicon Cycle. SCOPE 66, Island Press, Washington D.C., pp. 53-69.
- HUMBORG, C., PASTUSZAK, M., AIGARS, J., SIEGMUND, H., MÖRTH, C.-M. and V. ITTEKOT (2006b): Decreased silica land-sea fluxes through damming in the Baltic Sea catchment area – significance of particle trapping and hydrological alterations. Biogeochemistry **77**, 265-281.
- 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.
- LASS, H.U. UND MATTHÄUS, W. (2008): General Oceanography of the Baltic Sea, in: Feistel, R., Nausch, G., and Wasmund, N. (Eds.), *State and Evolution of the Baltic Sea 1952 – 2005*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, p. 5-43.
- 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., NAUSCH, G., LASS, H.-U., NAGEL, K. and SIEGEL, H. (2001): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2000. – *Meereswiss. Ber.* **45**, 27-88.
- MATTHÄUS, W., NEHRING, D., FEISTEL, R., NAUSCH, G., MOHRHOLZ, V. and LASS, H.-U. (2008): General Oceanography of the Baltic Sea, in: FEISTEL, R., NAUSCH, G., and WASMUND, N. (Eds.), *State and Evolution of the Baltic Sea 1952 – 2005*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, p. 265 – 309.
- MOHRHOLZ, V. (1998): Transport- und Vermischungsprozesse in der Pommerschen Bucht. – *Meereswiss. Ber.* **33**, 1-106.
- 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., FEISTEL, R., LASS, H.-U., NAGEL, K. and SIEGEL, H. (2003): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2002. – *Meereswiss. Ber.* **55**, 1-71.
- NAUSCH, G., FEISTEL, R., LASS, H.-U., NAGEL, K. and SIEGEL, H. (2004a): 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
- NAUSCH, G., FEISTEL, R., LASS, H.-U., NAGEL, K. and SIEGEL, H. (2006): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2005. – *Meereswiss. Ber.* **66**, 1-82. http://www.io-warnemuende.de/documents/mebe66_2005-zustand-hc-und-schwermetalle.pdf
- NAUSCH, G., FEISTEL, R., LASS, H.-U., NAGEL, K. and SIEGEL, H. (2007): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2006. – *Meereswiss. Ber.* **70**, 1-91. http://www.io-warnemuende.de/documents/mebe70_2006-zustand-hc.pdf
- NAUSCH, G., NEHRING, D. and K. NAGEL (2008a): Nutrient concentrations, trends and their relation to eutrophication. In: FEISTEL, R., NAUSCH, G. and WASMUND, N. (Eds.), *State and Evolution of the Baltic Sea 1952-2005*. Wiley 2008, 337-366.
- NAUSCH, M., NAUSCH, G. and N. WASMUND (2004b): Phosphorus dynamics during transition from nitrogen to phosphorus limitation in the central Baltic Sea. – *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **266**, 15-25.

- NAUSCH, M., NAUSCH, G., WASMUND, N., and K. NAGEL (2008b): Phosphorus pool variations and their relation to cyanobacteria development in the Baltic Sea. – *J. mar. Syst.* **77**, 99-111.
- NEHRING, D., 1981: Hydrographisch-chemische Untersuchungen in der Ostsee, 1969 – 1978. - Die chemischen Bedingungen und ihre Veränderungen unter besonderer Berücksichtigung des Nährstoffregimes. Geodät. Geophys. Veröff. R. IV, Heft 35, 39-220.
- NEHRING, D. (1996): Nährsalze. In: RHEINHEIMER, G. (Ed), Meereskunde der Ostsee, Springer-Verlag Berlin, 97-103.
- NEHRING, D. and MATTHÄUS, W. (1991): Current trends in hydrographic and chemical parameters and eutrophication in the Baltic Sea. – *Int. Revues ges. Hydrobiol.* **76**, 297-316.
- NEHRING, D., MATTHÄUS, W., and LASS, H.U. (1993): Die hydrographisch-chemischen Bedingungen in der westlichen und zentralen Ostsee im Jahre 1992. – *Dt. Hydrogr. Z.* **45**, 281-331.
- NEHRING, D., MATTHÄUS, W., LASS, H.U., NAUSCH, G. and NAGEL, K. (1995a): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1994. – *Meereswiss. Ber.* **9**, 1-71.
- NOAA (2008): Changes to the Oceanic Niño Index (ONI).
http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml
- OLLI, K., CLARKE, A., DANIELSSON, Å., AIGARS, J., CONLEY, D. and T. TAMMINEN (2008): Diatom stratigraphy and long-term dissolved silica concentrations in the Baltic Sea. – *J. mar. Syst.*, in press. - doi:10.1016/j.jmarsys.2007.04.009
- PAPUSH, L. and Å. DANIELSSON (2006): Silicon in the marine environment: dissolved silica trends in the Baltic Sea. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **67**, 53-66.
- PASTUSZAK, M., NAGEL, K., GRELOWSKI, A., MOHRHOLZ, V., ZALEWSKI, M (2003) : Nutrient dynamics in the Pomeranian Bay (Southern Baltic) : Impact of the Oder river outflow. - *Estuaries* **26** , 1238 – 1254.
- SANDEN, P., RAHM, L. and F. WULFF, F (1991): Non-parametric trend test of Baltic Sea data. *Environmetrics* **2**, 263-278.
- SELLSCHOPP, J., ARNEBORG, L., KNOLL, M., FIEKAS, V., GERDES, F., BURCHARD, H., LASS, H.-U., MOHRHOLZ, V., AND UMLAUF, L. (2006): Direct observations of a medium-intensity inflow into the Baltic Sea, *Cont. Shelf Res.* **26**, 2393-2414.
- 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.
- REINTHALER, T. and HERNDL, G. J. (2005) : Seasonal dynamics of bacterial growth efficiencies in relation to phytoplankton in the southern North sea. - *Aquat Microb Ecol* **39**, 7 – 16.
- REISSMANN, J.H., BURCHARD, H., FEISTEL, R., HAGEN, E., LASS, H.U., MOHRHOLZ, V., NAUSCH, G., UMLAUF, L., WIECZOREK, G. (2007): Vertical mixing in the Baltic Sea and consequences for eutrophication – a review. *Progr. Oceanogr.*, accepted.
- SCHMELZER, N. (2007): Der Eiswinter 2006/07 an den deutschen Nord- und Ostseeküsten. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg•Rostock.
<http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Beobachtungen/Eis/Winter200607.pdf>
- 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. (2006): Sea Surface Temperature development of the Baltic Sea in the period 1990-2004 – *Oceanologia* **48** (S), 119-131.
- SMHI (1982) *Climatological Ice Atlas*. – Sjöfartsverkets tryckeri, Norrköping. 220 pp.
- SMHI (2008) unveröffentlichte Daten.

- TIESEL, R. (2008): Weather of the Baltic Sea, in: Feistel, R., Nausch, G., and Wasmund, N. (Eds.), State and Evolution of the Baltic Sea 1952 – 2005, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, p. 65-91.
- TRZOSINSKA, A. and E. LYSIAK-PASTUSZAK (1996): Oxygen and nutrients in the southern Baltic Sea. *Oceanological Studies* 1-2, 41-76.
- TRUMP (1998): Transport- und Umsatzprozesse in der Pommerschen Bucht (TRUMP) 1994-1996. – Abschlussbericht, IOW Warnemünde, 1-32 (unveröffentlicht).
- UMLAUF, L., ARNEBORG, L., BURCHARD, H., FIEKAS, V., LASS, H.-U., MOHRHOLZ, V., AND PRANDKE, H. (2007): The transverse structure of turbulence in a rotating gravity current, *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L08601, doi:10.1029/2007GL029521.
- WASMUND, N., NAUSCH, G. and W. MATTHÄUS (1998): Phytoplankton spring blooms in the southern Baltic Sea – spatio-temporal development and long-term trends. *Journal Plankton Research* 20, 1099-1117.
- WASMUND, N., NAUSCH, G., POSTEL, L., WITEK, Z., ZALEWSKI, M., GROMISZ, S., LYSIAK-PASTUSZAK, E., OLENINA, I., KAVOLYTE, R., JASINSKEITE, A., MÜLLER-KARULIS, B., IKAUNIECE, A., OJAVEER, H., KALLISTE, K. AND A. JANNUS (2000): Trophic status of coastal and open areas of the south-eastern Baltic Sea based on nutrient and phytoplankton data from 1993 – 1997. – *Meereswiss. Ber.* **38**, 1-83.
- WITZE, A. (2008): Climate change: Losing Greenland. *Nature*, 16 April 2008, doi:10.1038/452798a
- WULFF, F. AND L. RAHM (1988): Long-term, seasonal and spatial variation of nitrogen, phosphorus and silicate in the Baltic. An overview. *Marine Environmental Research* 26, 19-37.

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

Die Schwermetall- Situation in der Ostsee im Jahre 2007

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenfassung	97
Summary	97
1. Einleitung	98
2. Probenahme	99
2.1 Probenaufarbeitung	101
2.2 Qualitätssicherung	102
3. Ergebnisse und Diskussion	105
3.1 Verteilungsmuster der Metallkonzentrationen in der gelösten und partikulären Phase an den in 2007 beprobten Stationen und Tiefen	105
Cadmium	105
Blei	106
Kupfer	106
Zink	107
Quecksilber	107
3.2 Spurenmetall-Trends zwischen den Jahren 1993-2007 an Stationen in der westlichen und zentralen Ostsee	118
3.3 Ergebnisse aus den Sedimentuntersuchungen	126
4. Schlussfolgerungen	127
Danksagung	127
Literaturverzeichnis	127

Zusammenfassung

Wie in den Vorjahren wies die Schwermetallverteilung im Ostseewasser im Jahr 2007 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 und in 2006 für die gelösten Kupferkonzentrationen beobachtet wurden, 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, die kurzzeitig durch den Salzwassereinbruch im Februar 2003 hervorgerufen wurden, spiegeln sich in den Langzeittrends kaum wieder. Unterhalb der Redoxklinen die 2007 bei ca. 130 m angetroffen wurde, wurde ein Rückgang der gelösten Metallkonzentrationen für Cddiss, Cudiss und Zndiss beobachtet. Bei den hohen Pbdiss Konzentrationen in der westlichen Ostsee kann eine Probenkontamination nicht ausgeschlossen werden. Weiterhin ist eine leichte Zunahme der CdSPM, CuSPM und ZnSPM mit der Tiefe zu verzeichnen, welches auf die Stabilisierung 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 BLMP-Stationen variieren innerhalb der bekannten Grenzen und unterscheiden sich für die untersuchten Regionen. Bisher kann jedoch noch kein gesicherter zeitlicher Trend für die einzelnen Stationen festgestellt werden (1998 bis 2007).

Summary

In general the 2007 results of heavy metal concentrations in the Baltic Sea revealed no pronounced changes compared to previous years. Regional and temporal limited variations as observed in 2006 for Cudiss, which have been observed periodically in the western Baltic also for the other metals, 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. Short-term changes induced during the main saltwater inflow event in February 2003 were only reflected in the trends "Below Halocline" for Cddiss, Cudiss, and Zndiss. Elevated Pbdiss levels in the Western Baltic are possibly a result of sample contamination. 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 ~ 140 m in the Gotland Deep and below 100 m in the Landsort Deep. For the contents of CdSPM, CuSPM and ZnSPM an increase was observed with depth in the central Baltic, a hint for the stabilisation of the 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 BLMP-stations varies in between the known ranges and differs for the investigated sub-areas, but still not show a significant temporal trend over the whole period (1998 to 2007).

1. Einleitung

Die Schwermetallüberwachung der Ostsee wurde im Jahr 2007 durch das Institut für Ostseeforschung zum sechzehnten Mal durchgeführt. Grundlage bildet die Verwaltungsvereinbarung mit dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) in Hamburg und Rostock.

Im Februar 2007 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 2007 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 2007 ergänzt. Mit diesem Datensatz wird eine Stagnationsperiode zwischen zwei Salzwassereintrüben 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 Teilnahme an der Quasimeme Performance Study zur Qualitätssicherung erfolgte für „Exercise 750, Runde 49“ (Quecksilber im Meerwasser). Seit 1. Januar 2008 wird im Rahmen des F+E-Monitorings eine Diplomarbeit angefertigt, die unsere Methode „Flüssig-Flüssig Anreicherung“ auf die BSH Methode „Flüssig-Festphasen Anreicherung“ umstellt.

Für das sedimentgeochemische Monitoring wurden im Jahr 2007, wie im Arbeitsplan festgelegt, folgende Arbeiten durchgeführt:

- Beprobung und Untersuchung der 5 BLMP Stationen (Siehe Karte).
- Teilnahme an Runde 48 (QUASIMEME) zur Qualitätssicherung für Schwermetalle in marinen Sedimenten (QTM 078/079 MS).

Für die jetzt im Programm befindlichen 5 BLMP-Stationen liegen einschließlich 2007 nunmehr Daten über 10 Jahre vor (1998-2007).

2. Probenahme

Die Monitoringbeobachtung der Wasserproben erfolgte im Jahr 2007 zwischen dem 6.02.-14.02.2007 mit FS "ALKOR". Angaben zu den Stationen sind in Abbildung 1 und Tabelle 1 zusammengefasst.

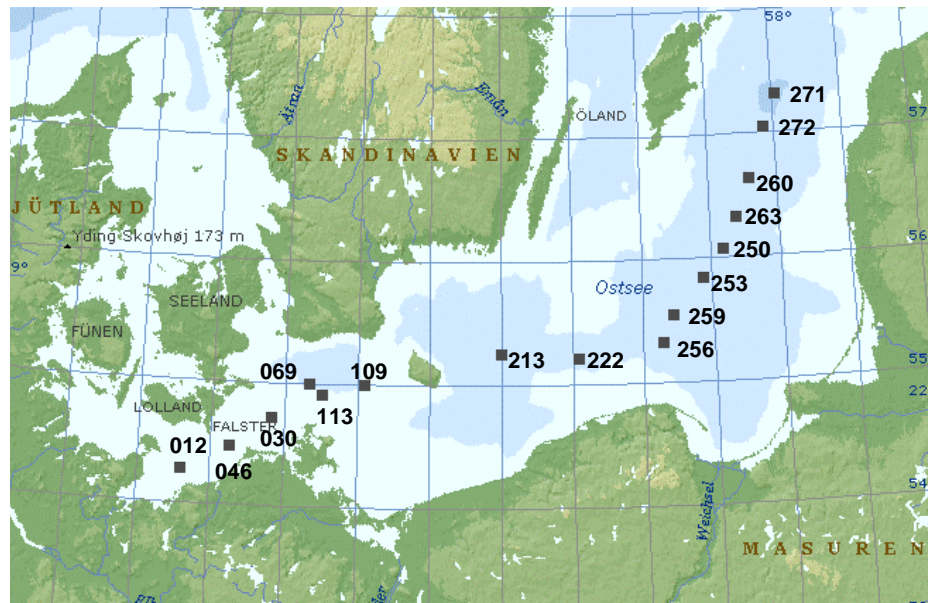


Abb. 1
Stationskarte: Probenahme von Wasserproben

Fig. 1
Station map: Sampling of water samples

Tab. 1

Stationen Schwermetalle im Ostseewasser, Februar 2007

Table 1

Trace metal stations in seawater from February 2007

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 (optional)	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-stations, heavy metals in sediments, 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 2007
M 2	54° 18.9	11° 33.0	24	Mecklenb. Bucht	Schlick	1998 bis 2007
K 8	54° 43.4	12° 47.0	23	NW Hiddensee	Sand	1998 bis 2007
K 7	55° 00.0	13° 18.0	47	Arkonabecken W	Schlick	1998 bis 2007
K 4	55° 00.0	14° 05.0	48	Arkonabecken O	Schlick	1998 bis 2007

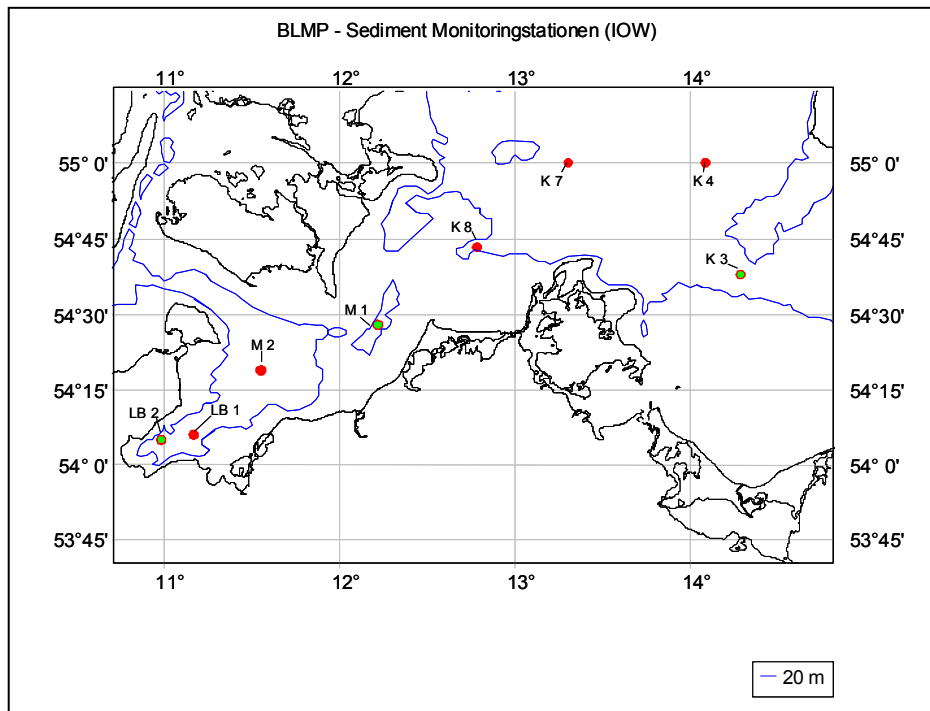


Abb. 2

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

Fig. 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 (Pohl et al. 2002; 2003, 2004, 2005, 2006, 2007) 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, sowie den ICES / HELCOM Guidelines (ICES 2004).

Tab. 3

Allgemeine Informationen und Metadaten zur Sedimentbeprobung 2007 mit dem Multi-Corer (MUC) und Kastengreifer (KG)

Table 3

General information and metadata of sediment sampling in 2007 by Multicorer (MUC) and box-corer (KG)

Datum	Zeit	Reise-Nr.	IOW Nr.	Nord	Ost	W.T.(m)	Gerät	Station	Gebiet	Sediment
01.06.07	05:37	PAP07/12	342850	54°05.99	11°09.94	23	MUC	LB 1	Lüb. Bucht	Schlick
01.06.07	15:15	PAP07/12	342880	54°18.92	11°32.97	24	MUC	M 2	Meckl. B.	Schlick
31.05.07	12:55	PAP07/12	342820	54°43.41	12°46.91	22	KG	K 8	Hiddensee	Sand
30.05.07	16:15	PAP07/12	342770	54°59.99	13°17.90	46	MUC	K 7	Arkona-B.	Schlick
30.05.07	05:50	PAP07/12	342740	54°57.22	13°58.37	47	MUC	K 4	Arkona-B.	Schlick

2.2 Qualitätssicherung

Wasser

In 2007 nahmen wir an der QUASIMEME Performance Study „Quecksilber im Meerwasser“, Round 49 teil (Ergebnisse im Anhang). 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 213/30m durchgeführt (Tab.:5). Die Qualitätssicherung in suspendiertem partikulären Material (SPM) wurde mit Hilfe des zertifizierten Referenzstandards MESS-3 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)
Soll	23+3	297+46	8+5	102+39
Sept.-Dez.2007	n=4	n=4	n=4	n=4
Mean	19	281	5,0	86,0
STDEV	1,5	42	1,63	10
%	7,9	14,9	32,86	11,6

Tab. 5

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

Table 5

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

Substandard	Cd (ng/kg)	Cu (ng/kg)	Pb (ng/kg)	Zn (ng/kg)
Sept.-Dez. 2007	n=12	n=12	n=12	n=12
Mean	8,79	486	110	850
STDEV	0,52	63	31	108
%	5,97	13	28	13

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
Mar-Jun.2007	n=16
Mean	1,96
Stdev	0,06
%	3,27

Sediment und Schwebstoffe (SPM)

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-3

Table 7

Quality assurance of metals in the particulate phases with CRM-MESS 3

MESS-3	Cd (µg/g)	Cu(µg/g)	Pb (µg/g)	Zn(µg/g)	Mn (µg/g)
Soll	0,24+-0,01	33,9+-1,6	21,1+-0,7	159+-8	324+-12
Sept.07-Jan.08	n=17	n=17	n=17	n=17	n=17
Mean	0,23	31,4	23,3	170	325
STDEV	0,01	2,1	1,2	12	18
%	4,9	6,7	5,2	7,0	5,7

Tab. 8

Überprüfung der Filterblanks nach Reinigung (Nucleopore; 47mm, 0,4µm). 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 (Nucleopore; 47mm, 0,4 µm). In relation to the sample, the error correction is considering with 0,5 - 4%

Filterblanks	Pb ng/Filter	Cd ng/Filter	Cu ng/Filter	Zn ng/Filter	Mn ng/Filter	As ng/Filter
1998 - 2006	n=70	n=70	n=70	n=70	n=70	n=70
Mean	0,83	0,05	2,26	7,94	1,56	0,22
2007	n=5	n=5	n=5	n=5	n=5	n=5
Mean	0,69	0,02	2,45	4,14	0,41	0,04
Stdev	0,18	0,03	0,94	2,48	0,66	0,10

Tab. 9

Qualitätskontrolle Metalle in marinen Sedimenten

Table 9

Quality control metals in marine sediments

QUASIMEME R. 48 Metals in Sediment Jan-Apr 2007				
	QTM 078 MS		QTM 079 MS	
	soll	ist (IOW)	soll	ist (IOW)
Al (%)	6.17	5.48	5.66	5.6
Cr (mg/kg)	195	188	131	134
Cu (mg/kg)	120	107	67	62
Fe (%)	3.88	3.26	3.8	3.46
Li (mg/kg)	66	66	47	47
Pb (mg/kg)	200	163	125	104
Mn (mg/kg)	1126	985	466	437
Hg (µg/kg)	2190	2124	1099	1013
Ni (mg/kg)	57	55	65	63
Zn (mg/kg)	1024	797	229	188
TOC (%)	4.2	4.52	5.42	5.49

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 ($\mu\text{g/g}$), und der volumenbezogenen Konzentrationsangabe (ng/dm^3 bzw. nmol/dm^3) 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 ($\mu\text{g/g}$) auch die volumenbezogenen Ergebnisse in (ng/dm^3).

3.1 Verteilungsmuster der Metallkonzentrationen in der gelösten und partikulären Phase an den im Jahre 2007 beprobten Stationen und Tiefen

Wie in den vorangegangenen Jahren konzentrierten sich auch 2007 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, 2006, 2007) zum Schwermetallmonitoring sowie in verschiedenen Publikationen (Pohl & Hennings 1999; Pohl et al. 2002; Neretin et al. 2003; Pohl et al. 2004; Dippner & Pohl 2004, Pohl et al. 2004, Pohl & Hennings 2005, Pohl et al. 2006, Strady et al. 2008) beschrieben. Im Jan. / Feb. 2007 variierte der Schwebstoffanteil in der westlichen und zentralen Ostsee vergleichbar zum Vorjahr zwischen 0,1-1,3 mg/dm^3 (Abb. 4). Der Schwebstoffanteil in der Wassersäule ist vor allem bei der Berechnung der "volumenbezogenen Schwermetallgehalte in suspendiertem partikulärem Material" (SPM) von Bedeutung.

Cadmium

2007 variieren die gelösten Cadmiumkonzentrationen (Cddiss) wie im Vorjahr zwischen 10-16 ng/kg in der westlichen Ostsee und gehen in der zentralen Ostsee geringfügig auf Werte um 9 ng/kg zurück (Abb. 3; Abb. 7). Im bodennahen Wasser des Bornholmbeckens, welches im Februar 2003 durch den Salzwassereinbruch ausgetauscht wurde, ist im Feb. 2007 ein Rückgang der gelösten Konzentrationen von 20 ng/kg (2004) auf $<8 \text{ ng / kg}$ unterhalb 50 m zu verzeichnen.

Während andauernder Stagnationsperioden, kommt es auch in den bodennahen Bereichen und Sedimenten des Bornholmbeckens (Abb. 10) zu stagnierenden 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. Seit 2005 haben sich die anoxischen Verhältnisse in den Sedimenten des Bornholmbeckens stabilisiert, so daß die Ausfällung

schwerlöslicher CdS-Spezies erfolgte. Ähnliche Verhältnisse wurden auch im Gotlandbecken (Abb. 11) beobachtet. Anoxische Bedingungen sind in 2007 bereits ab ~110 m zu beobachten (Vorjahr ~130m), welches mit einem Rückgang der gelösten Cd-konzentrationen auf ~2 ng/kg einhergeht. In 2006 wurden hier noch 4 ng/kg angetroffen. Auch im Landsorttief (Abb. 12) ist diese Tendenz unterhalb 70 m zu beobachten.

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. 7 Jahren werden auch im Landsorttief (Abb. 12) stabile anoxische Verhältnisse unterhalb 100 m angetroffen. Entsprechend gehen die Cddiss Werte auf <3 ng/kg unterhalb 100 m zurück, während die Cd-Gehalte in der Schwebstoffphase (CdSPM) ab 100 m von 0,3 ng/dm³ auf Werte um 1,4 ng/dm³ ansteigen.

Blei

Im Jahre 2007 variieren die gelösten Bleikonzentrationen (Pbdiss) (Abb. 3) in der westlichen Ostsee zwischen 40-150 ng/kg mit maximal Werten von bis zu 200 ng/kg an den Stationen 46 und 12. ***Da derart hohe Bleikonzentrationen in den letzten Jahren nicht mehr angetroffen wurden, vermuten wir hier eine Probenkontamination die wir allerdings nicht zuordnen können.***

Konzentrationen um 40 ng/kg wurden in der westlichen Ostsee in den vergangenen Jahren immer wieder beobachtet, welche auf einen erhöhten Anteil an Schwebstoffen <0,4µm in den filtrierten Proben zurückgeführt wurden.. Die partikulären (PbSPM) Bleikonzentrationen (Abb. 4) liegen zwischen 10-20 ng/dm³. ***Auch in der partikulären Phase treffen wir auf vergleichsweise hohe Konzentrationen an den gleichen Stationen und Tiefen wie in der gelösten Phase von bis zu 160 ng/dm³, welches die angenommene der Probenkontamination bestätigt.*** In der zentralen Ostsee gehen diese Konzentrationen auf Werte <10 ng/kg bzw. ng/dm³ zurück (Abb. 8). Am häufigsten werden die Konzentrationsbereiche zwischen 2-8 ng/kg frequentiert. Der schwebstoffgebundene volumenbezogene Bleianteil entspricht wie im letzten Jahr ca. 50% der Gesamtkonzentrationen in der Wassersäule.

Kupfer

Im Februar 2007 sind die gelösten und partikulären Kupferkonzentrationen (Cudiss), Cu(SPM) auf dem Niveau zum Vorjahr am häufigsten im Konzentrationsbereich zwischen 200-600 ng/kg und <10 ng/dm³ anzutreffen (Abb. 3-6). Im Bornholmbecken (Abb. 10) ist unterhalb 50 m 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 unterhalb 120 m und dem Landsorttief im anoxischen Tiefenhorizont unterhalb 100m anzutreffen. Hier im Tiefenbereich der Ostsee sind zwischenjährliche Fluktuationen von +/- ~100 ng/kg zu beobachten, die auf Wechselwirkungen mit den Sedimenten zurückgeführt werden.

Zink

2007 variieren die gelösten Zinkkonzentrationen (Zndiss) ähnlich dem Vorjahr zwischen 200-1000 ng/kg (Abb.3). Die Oberflächenkonzentrationen für (Zndiss) sind in der westlichen Ostsee um den Faktor 2 höher als in der zentralen Ostsee. Die volumenbezogenen partikulären Zinkgehalte (ZnSPM) sind im Jahre 2007 am häufigsten im Bereich zwischen 20-140 ng/dm³ anzutreffen (Abb. 6). Ähnlich wie bei Cadmium und Kupfer beobachten wir im Gotlandbecken sowie im Landsort Tief eine Abnahme der Zndiss und eine Zunahme der ZnSPM unterhalb der Redoxcline.

Quecksilber

Wie im Vorjahr wurden die Quecksilberkonzentrationen (gesamt) im niedrigeren Bereich zwischen 200-800 pg/dm³ am häufigsten angetroffen. Die Konzentrationen im Oberflächenwasser (Abb. 9) sind in 2007 in der westlichen Ostsee vergleichbar zum Vorjahr, während sie in der zentralen Ostsee mit Werten um 300 pg/ dm³ etwas niedriger sind. Auch in 2007 waren wieder außergewöhnlich hohe Hg-tot Konzentrationen im Bereich der partikulären Manganmaxima im Gotlandbecken und im Landsort Tief zu beobachten.

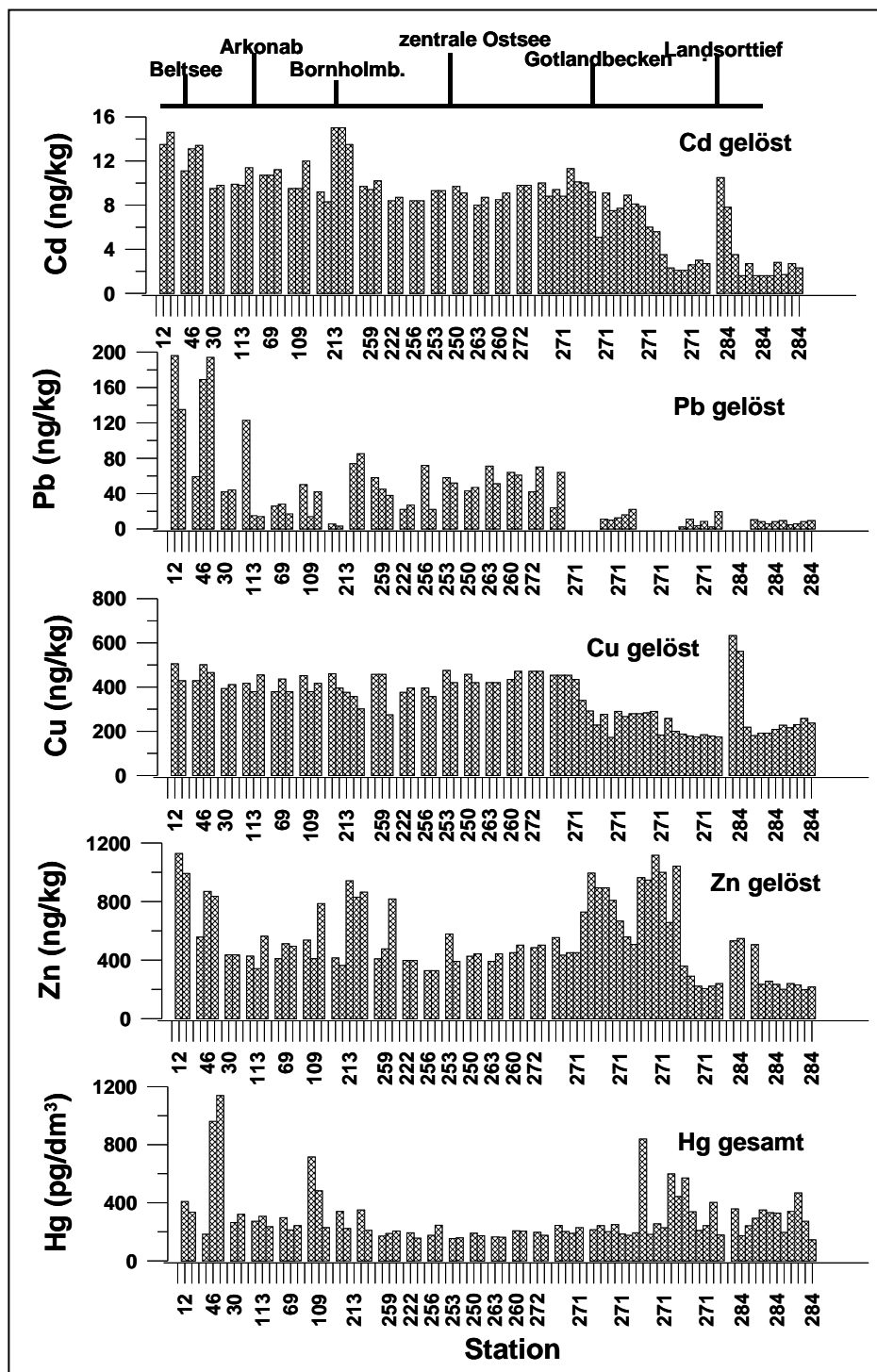


Abb. 3
Verteilungsmuster der gelösten Metallkonzentrationen an den 2007 beprobten Stationen und Tiefen in der Ostsee (siehe Datenanhang)

Fig. 3
Distribution of metal concentrations in the dissolved phases in 2007, at the different sampling stations and sampling depth in the Baltic

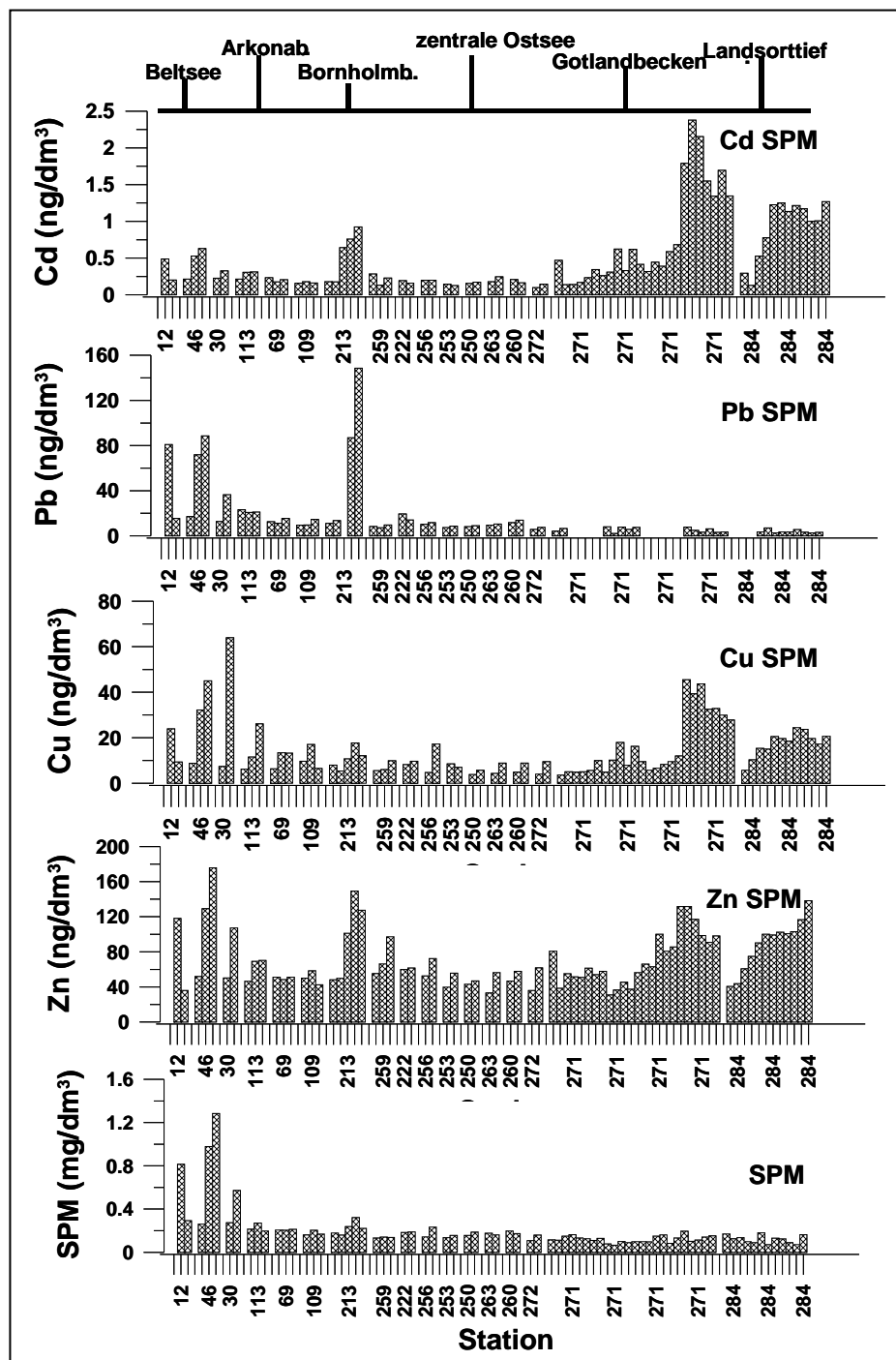


Abb. 4
Verteilungsmuster der Metallkonzentrationen in SPM (volumenbezogen) an den 2007 beprobten Stationen und Tiefen in der Ostsee (siehe Datenanhang)

Fig. 4
Distribution of metal concentrations in the particulate phases (related to the volume) in 2007, at the different sampling stations and sampling depth in the Baltic

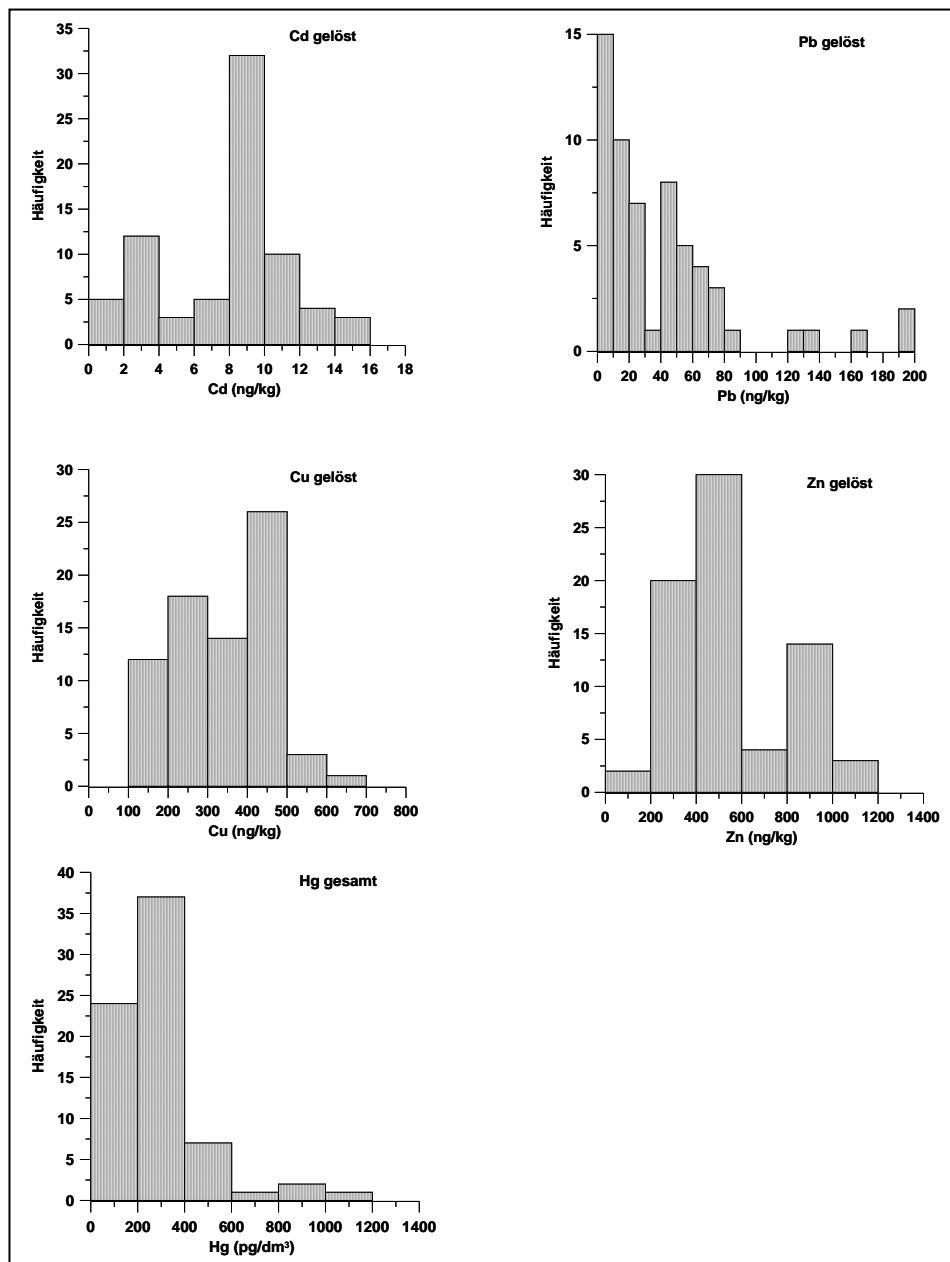


Abb. 5
Häufigkeitsverteilungen der gelösten Metallkonzentrationen in der Ostsee, im Februar 2007

Fig. 5
Frequency distribution of metal concentrations in the dissolved phases in the Baltic; February 2007

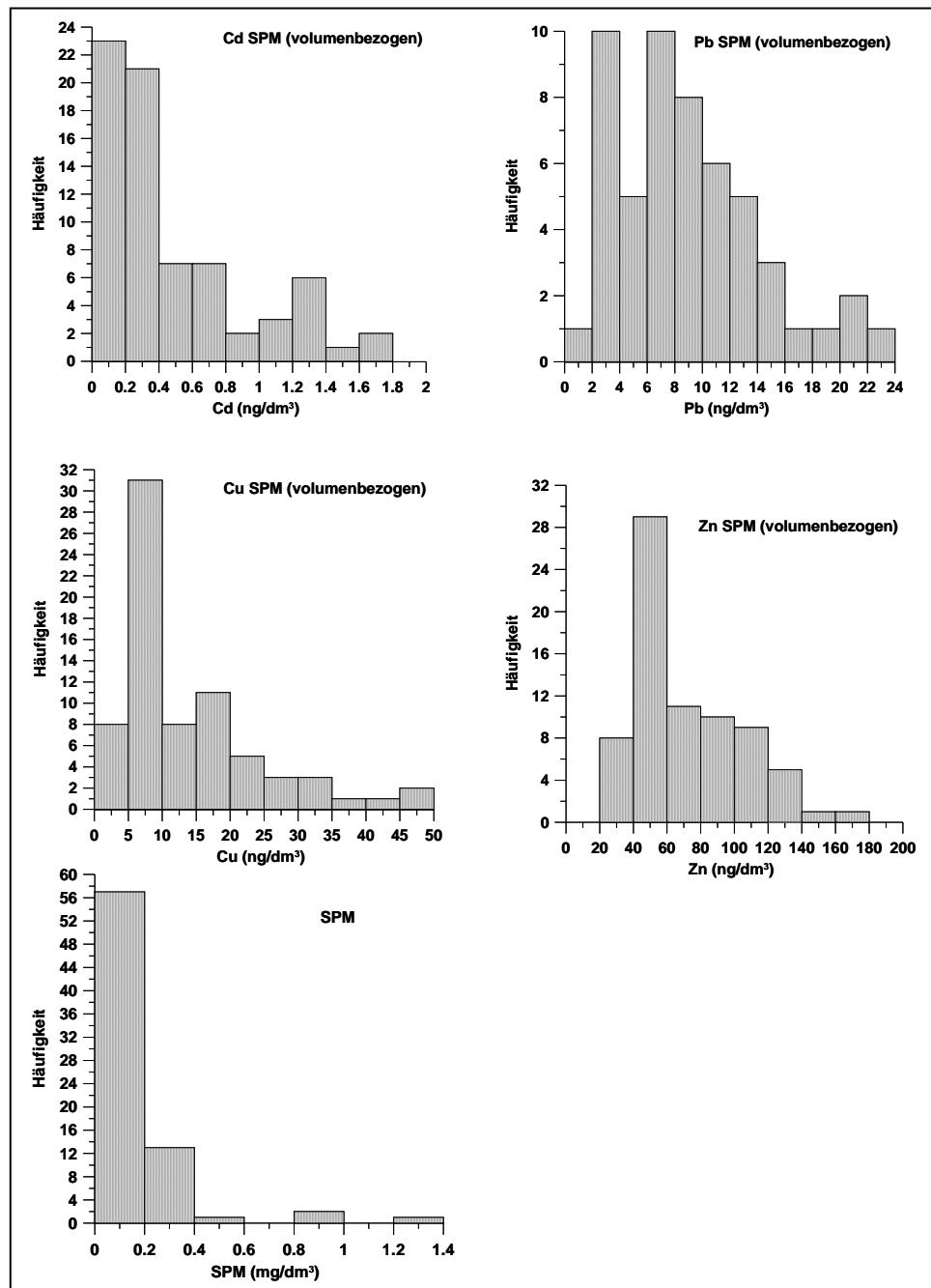


Abb. 6
Häufigkeitsverteilungen der Metallkonzentrationen in der Schwebstoffphase (volumenbezogen) in der Ostsee, Februar 2007

Fig. 6
Frequency distribution of metal concentrations in the particulate phases (related to the volume) in the Baltic; February 2007

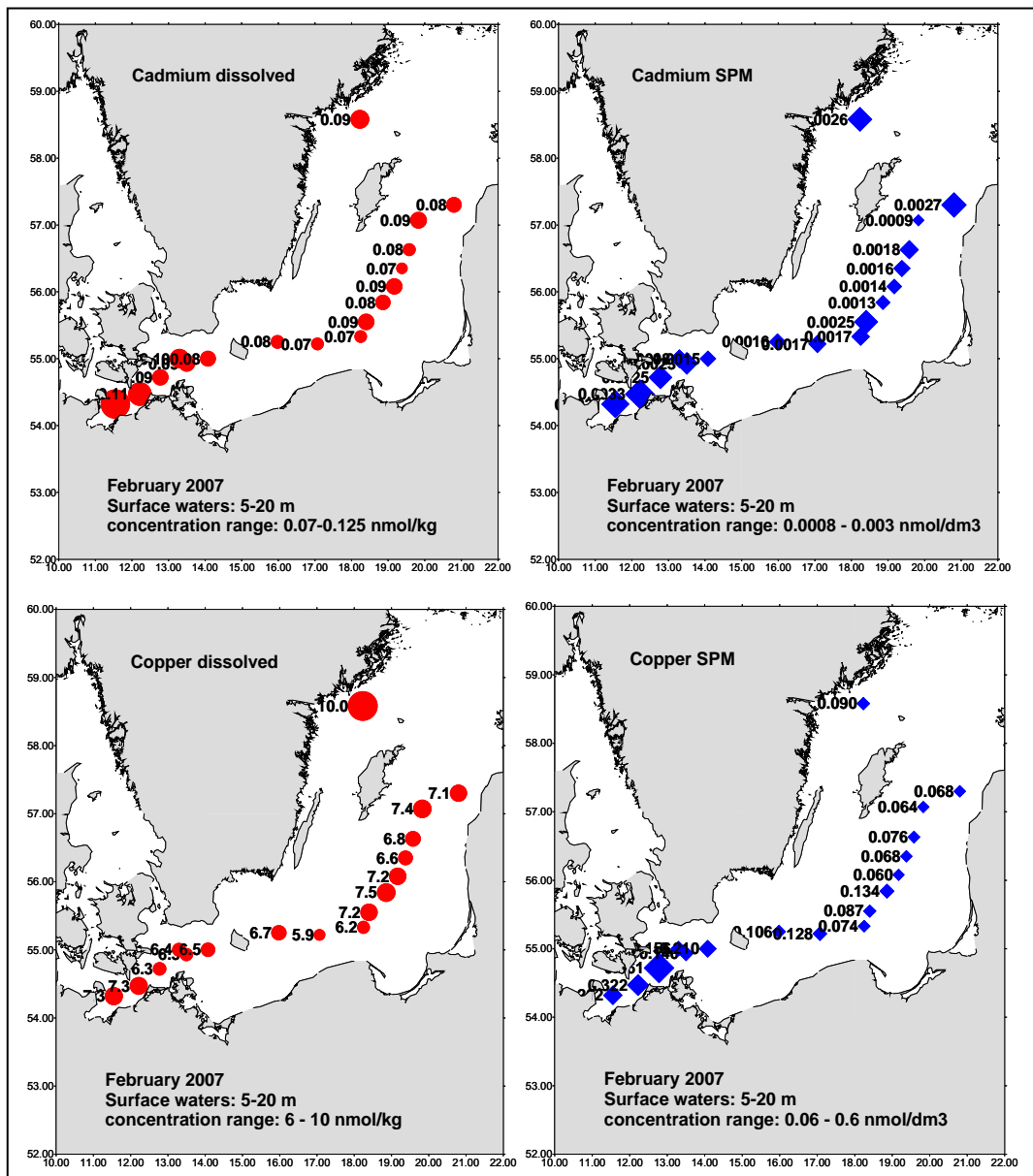


Abb. 7

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

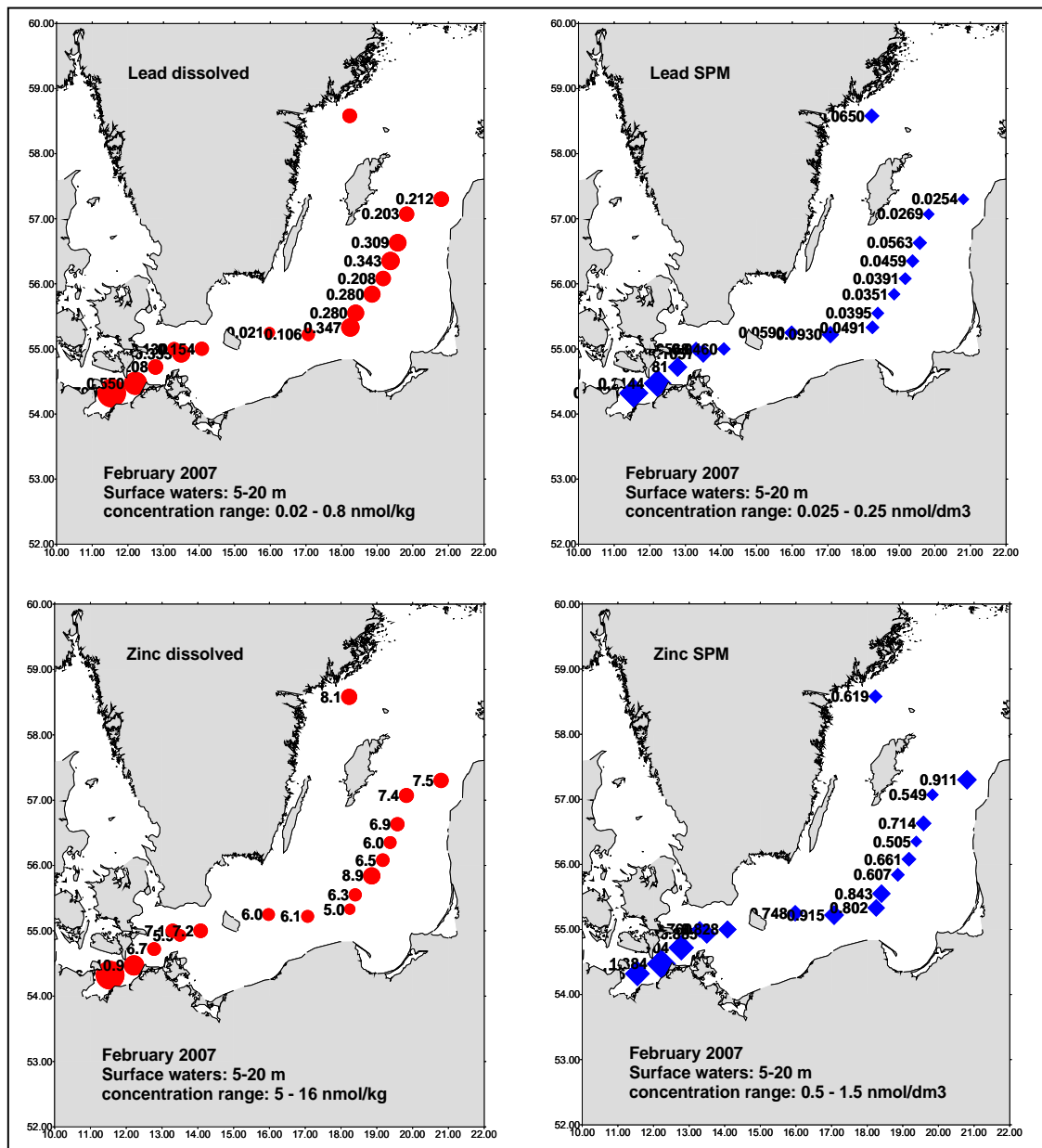


Abb. 8
Verteilung von Pb und Zn in der gelösten und partikulären Phase im Oberflächenwasser der Ostsee

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

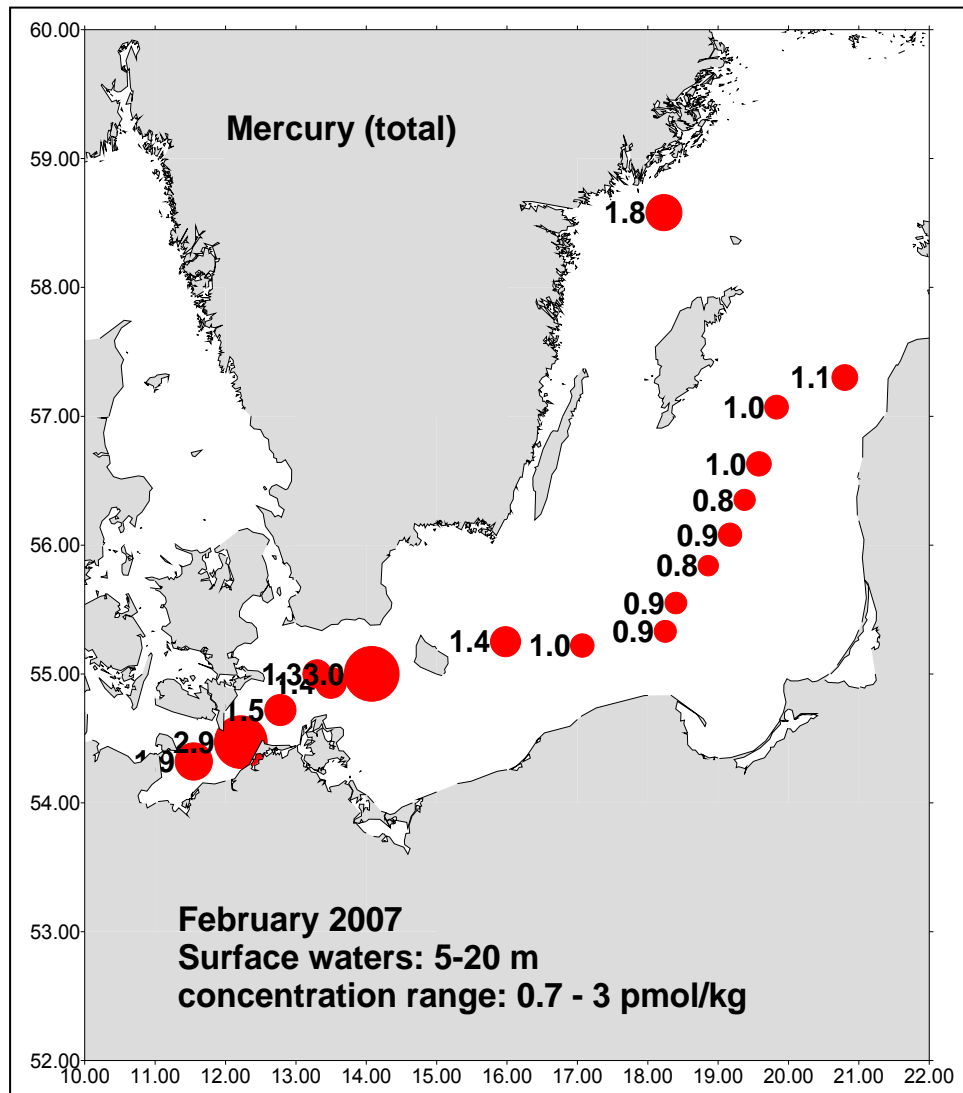
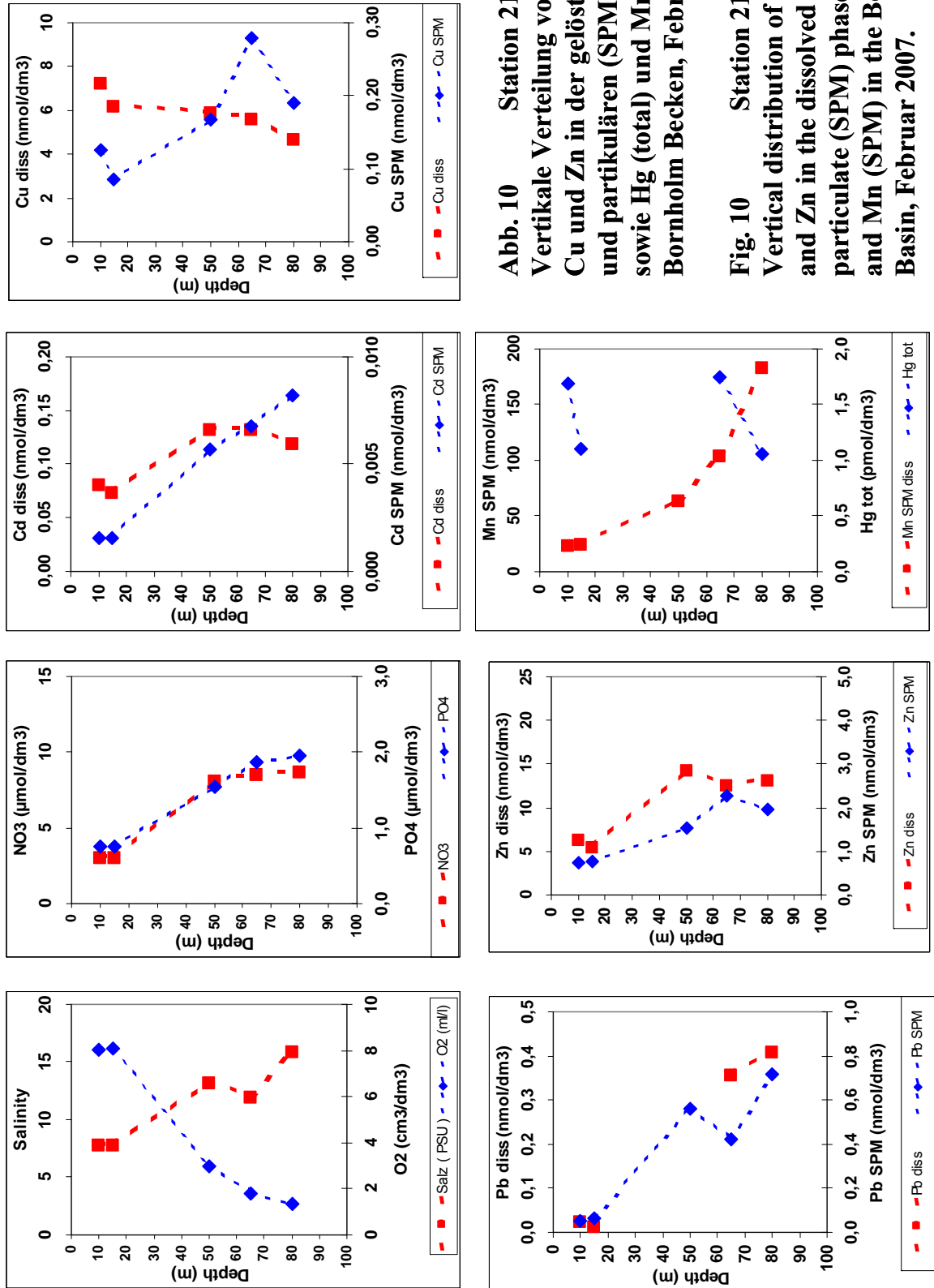


Abb. 9
 Verteilung von Quecksilber (gesamt) Hg (tot) im Oberflächenwasser der Ostsee

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



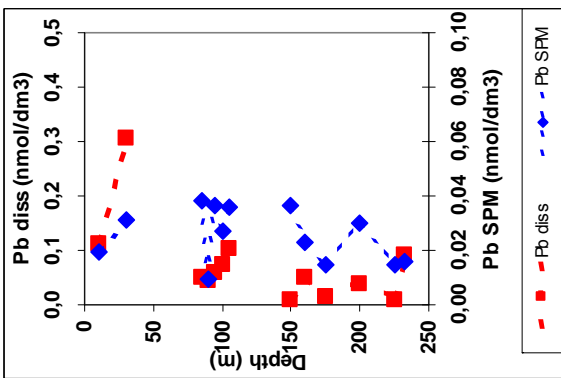
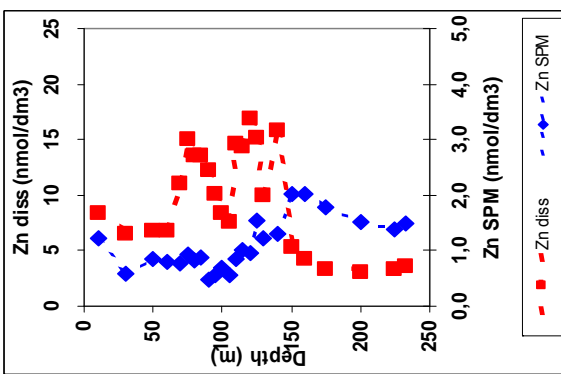
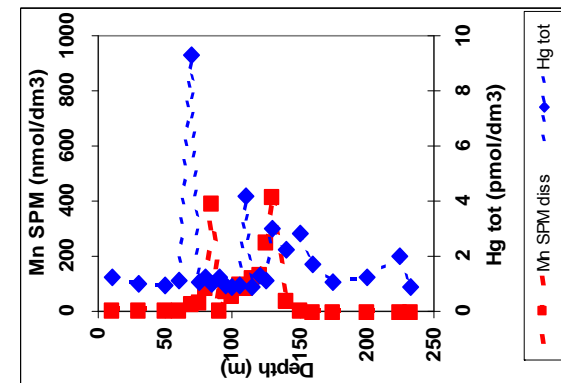
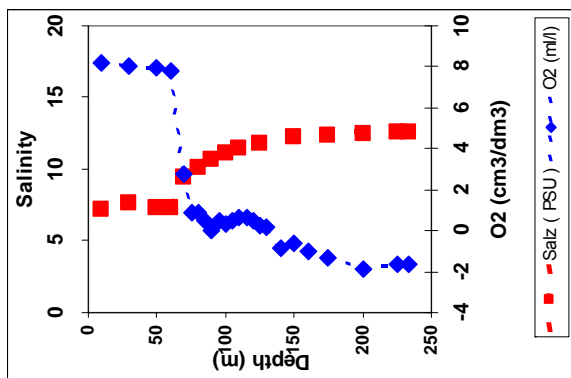
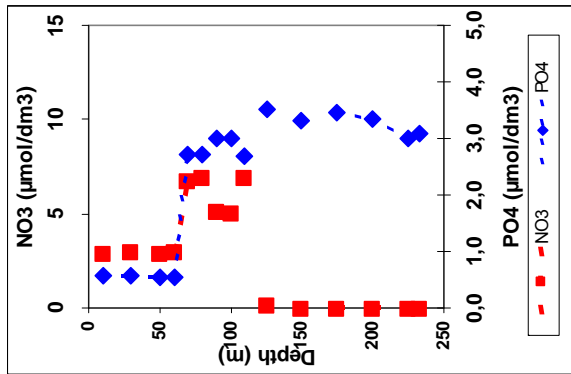
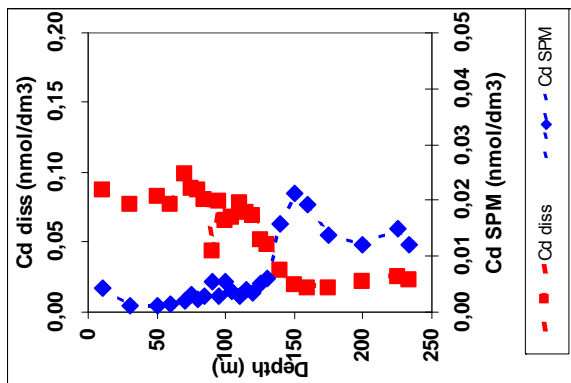
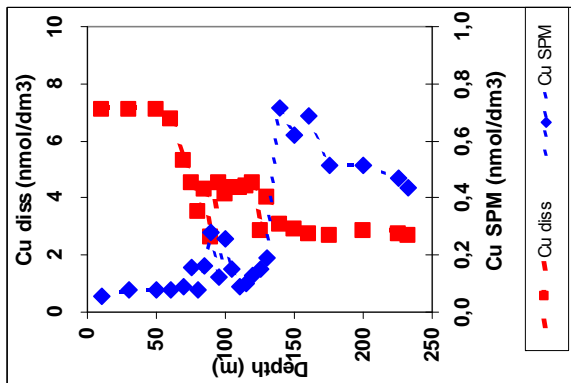


Abb. 11 Station 271:
Vertikale Verteilung von Cd, Pb, Cu und Zn in der gelösten (diss) und partikulären (SPM) Phase, sowie Hg (total) und Mn (SPM) im Gotland Becken, Februar 2007.

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, Februar 2007.

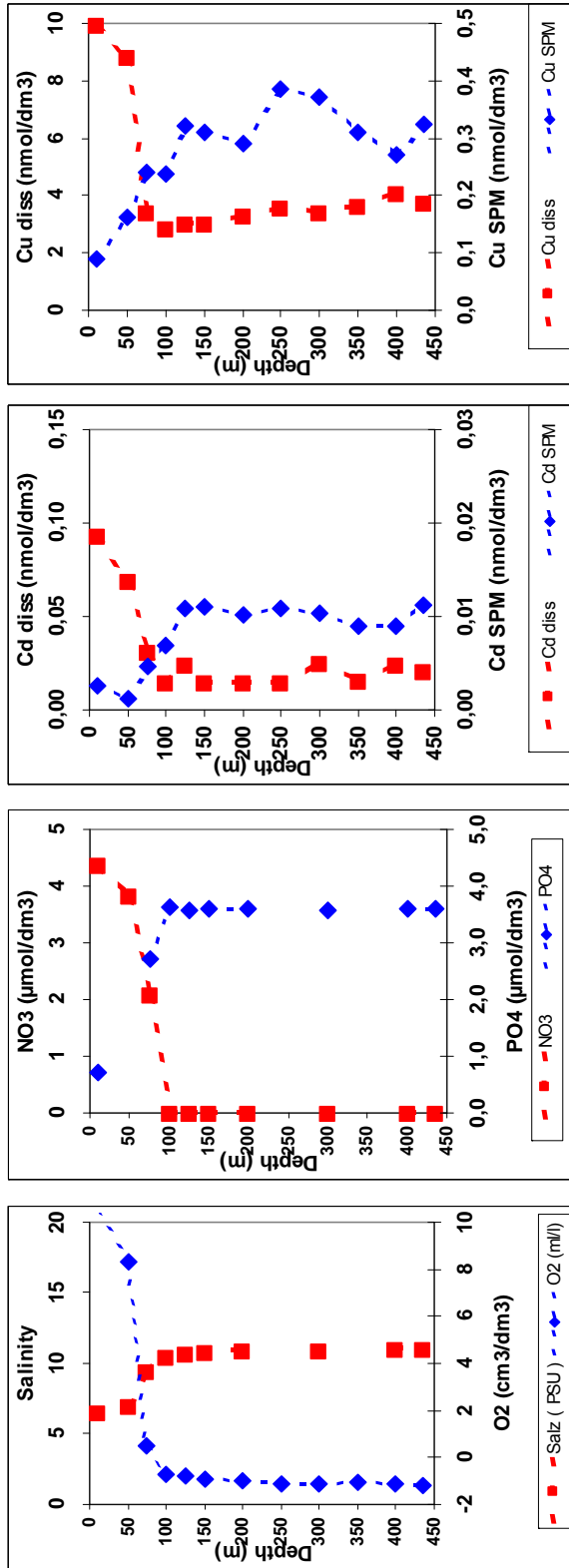


Abb. 12 Station 284:
 Vertikale Verteilung von Cd, Pb, Cu und Zn in der gelösten (diss) und partikulären (SPM) Phase, sowie Hg (total) und Mn (SPM) im Landsort Tief, February 2007.

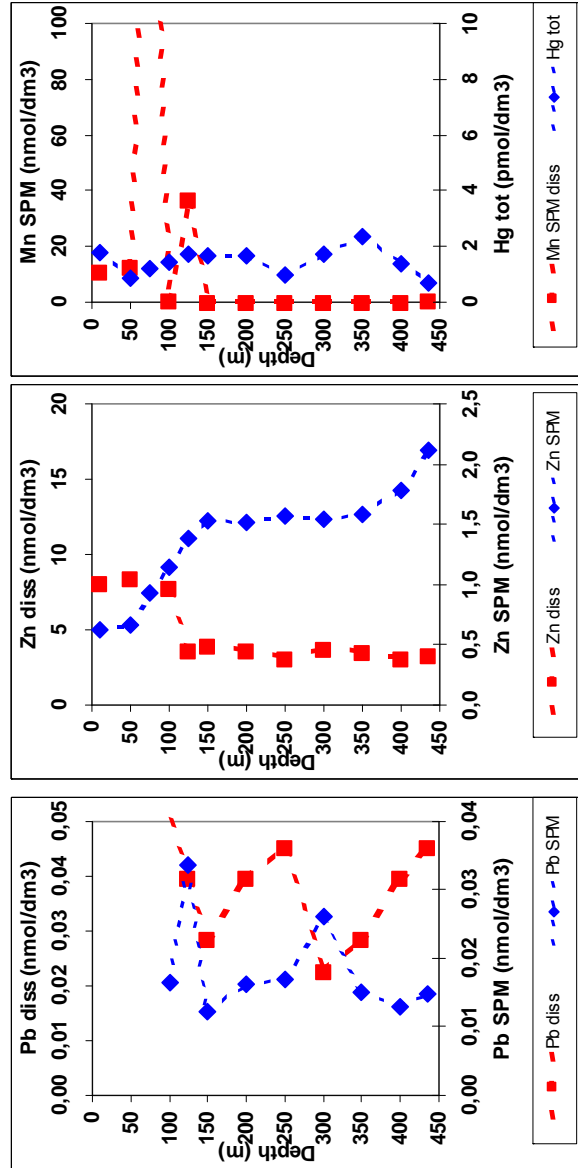


Fig. 12 Station 284:
 Vertical distribution of Cd, Pb, Cu and Zn in the dissolved (diss) and particulate (SPM) phases, Hg (total) and Mn (SPM) in the Landsort Deep, February 2007.

3.2 Spurenmetall – Trends zwischen den Jahren 1993-2007 an Stationen in der westlichen Ostsee und zentralen Ostsee (Abb.:13- Abb.:17)

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, die das 0,4µm Filter passieren. Somit unterliegen auch die Schwermetallkonzentrationen in der gelösten Phase einer höheren Variabilität. 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)

Arkonabecken: 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 Salzwassereintrich 1994 und dem Ausstrom von Cd-armem Tiefenwasser aus dem Gotlandbecken steht. Bis 1998 ist ein leichter Anstieg, und danach ist bis 2006 wieder eine tendenzielle Abnahme zu beobachten. Die Werte von 2007 passen sich diesem Trend an.

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 2006 zu erkennen. Der Salzwassereintrich 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 bis 2005 zu vermerken. In 2006 wird wieder ein tendenzieller Anstieg beobachtet der 2007 nicht bestätigt werden kann.

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 2007 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. 2007 sind die etwas höheren Konzentrationen um 0,7 nmol/kg möglicherweise auf eine Probenkontamination zurückzuführen.

In den **PbSPM** Gehalten spiegeln sich 1999 und 2000 Starkwindereignisse wider, die mit einer bodennahen Durchmischung der Wassersäule einhergehen. 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 zinkärmeren 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 2006 zu beobachten, die durch leicht erhöhte Werte in 2005 unterbrochen wird. Die Werte von 2007 sind wiederum auf dem gleichen niedrigeren Niveau wie 2006.

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 2007 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 I1 (245 in der westlichen Gotlandsee).

Die seit 1995 anhaltende Stagnationsperiode, und die damit verbundene Stabilisierung der anoxischen Verhältnisse in den tieferen Ostseebecken spiegelt sich vor allem in den abnehmenden Trends für 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. In 2007 passen sich die Werte für **Cddiss**, **Pbdiss** und **Zndiss** dem abnehmenden Trend an, während für **Cudiss** eine leicht ansteigende Tendenz im Tiefenwasser zu beobachten ist.

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 die Anreicherung der Schwermetalle in die Oberflächensedimente zurückgeführt wird. Auffällig ist allerdings, dass die Gehalte der partikulär fixierten Metalle im Tiefenwasser ca. um den Faktor 2 höher sind, eine Ausnahme bildet PbSPM.

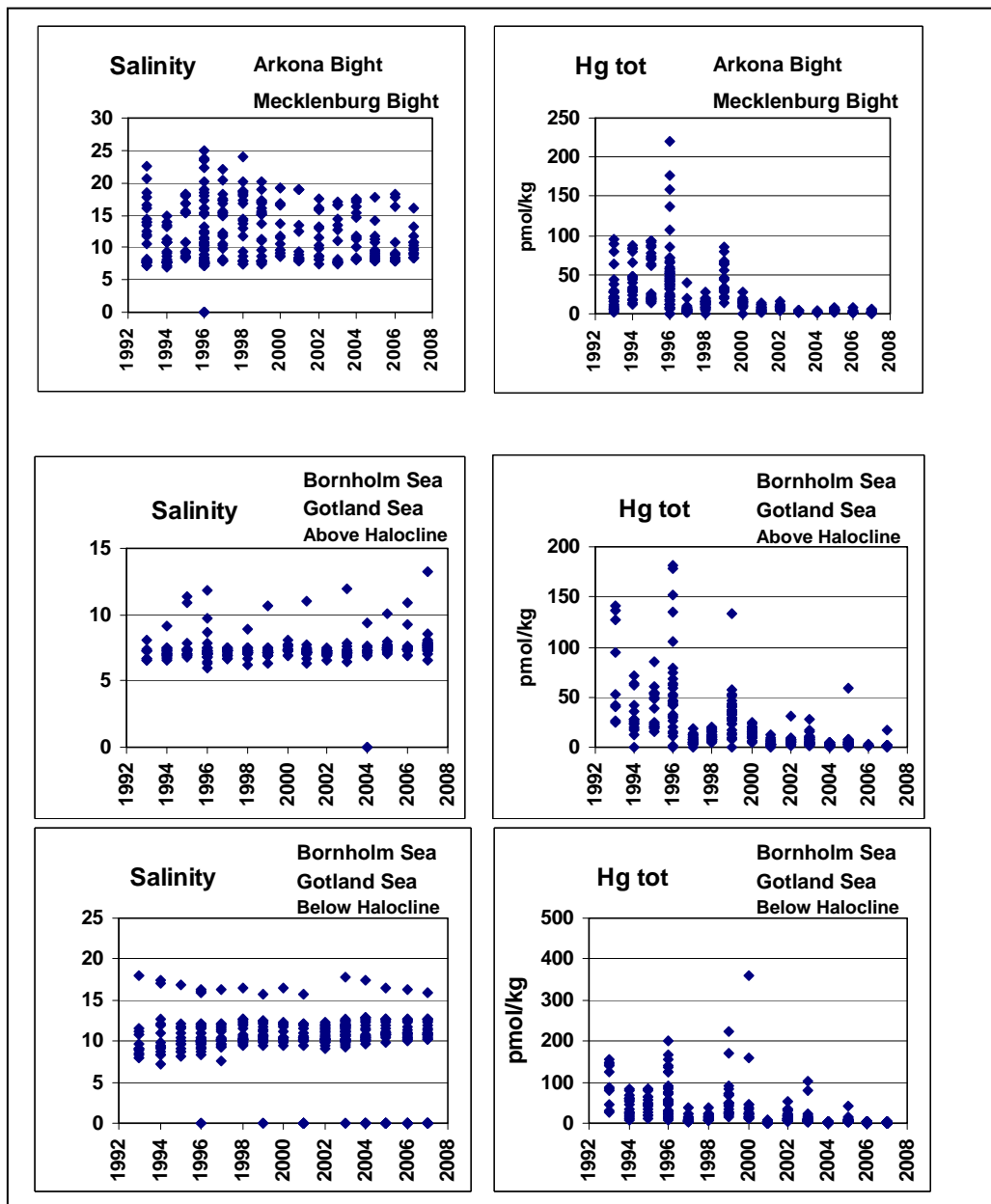


Abb. 13

Trends für Salzgehalt und Quecksilber gesamt (Hgtot), in der westlichen Ostsee, sowie oberhalb und unterhalb der Haloclinen in der zentralen Ostsee von 1993-2007

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- 2007

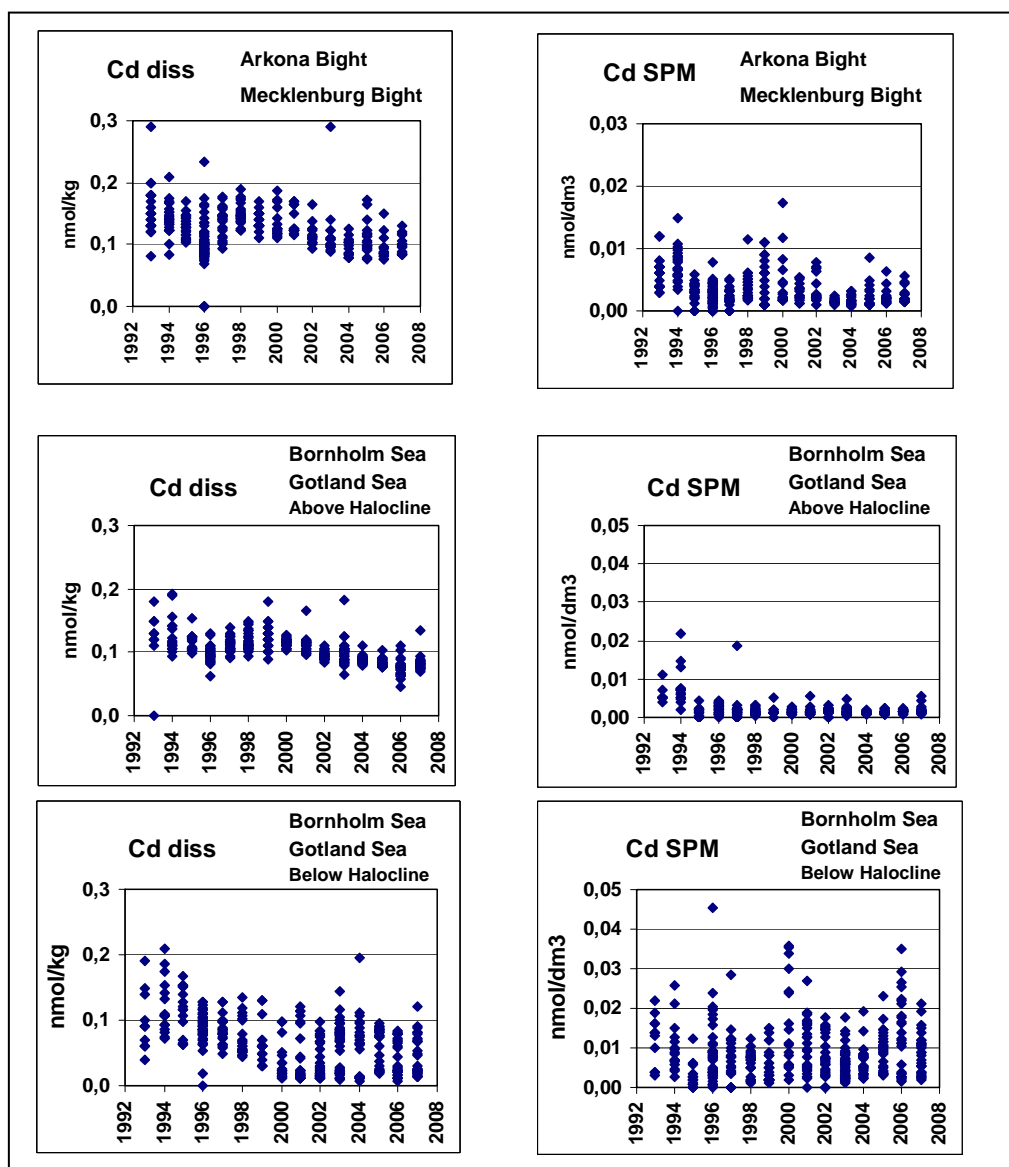


Abb. 14

Trends für gelöstes (diss) und partikuläres (SPM) Cadmium, in der westlichen Ostsee, sowie oberhalb und unterhalb der Haloclinen in der zentralen Ostsee von 1993-2007

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- 2007

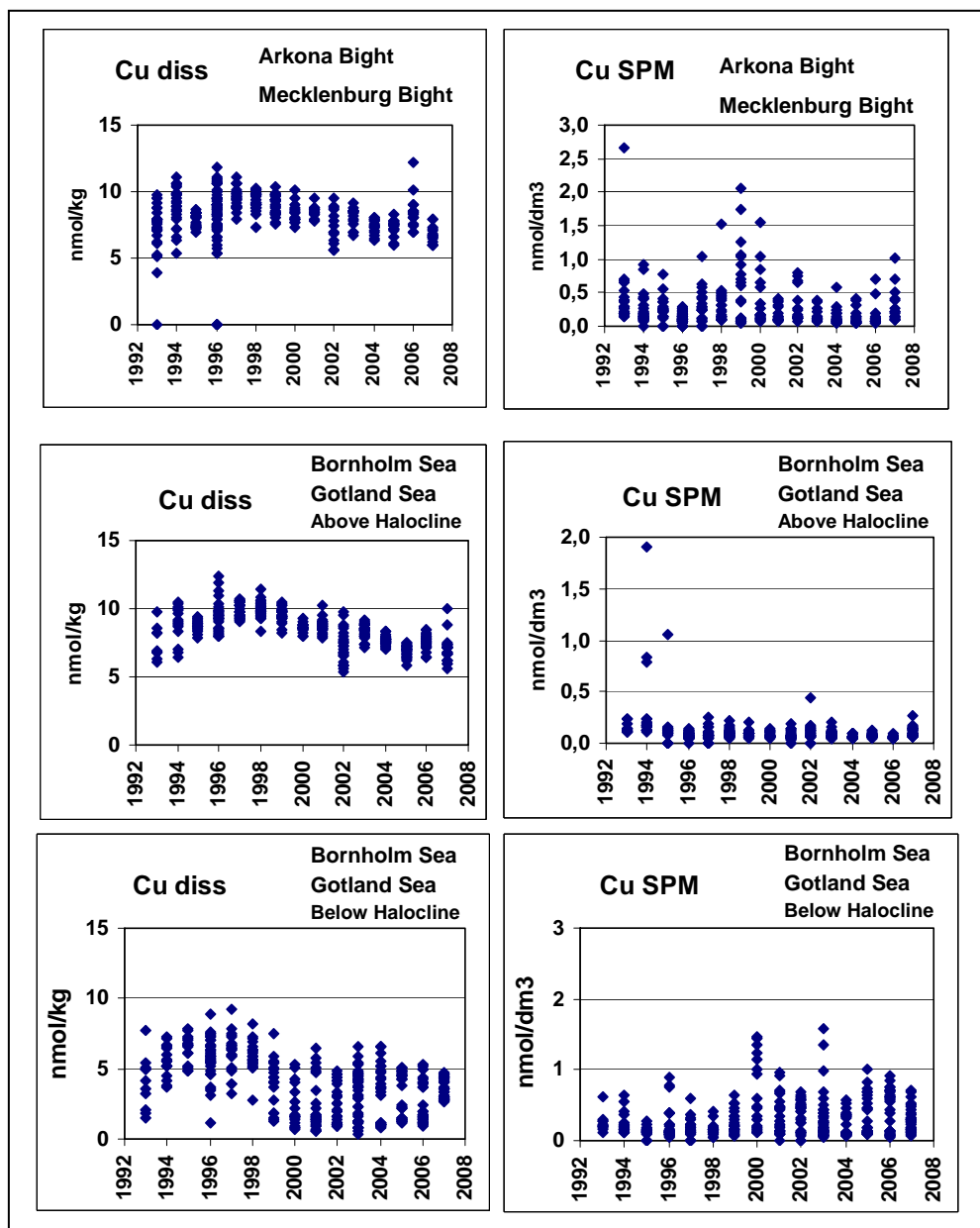


Abb. 15

Trends für gelöstes (diss) und partikuläres (SPM) Kupfer, in der westlichen Ostsee, sowie oberhalb und unterhalb der Haloclinen in der zentralen Ostsee von 1993-2007

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- 2007

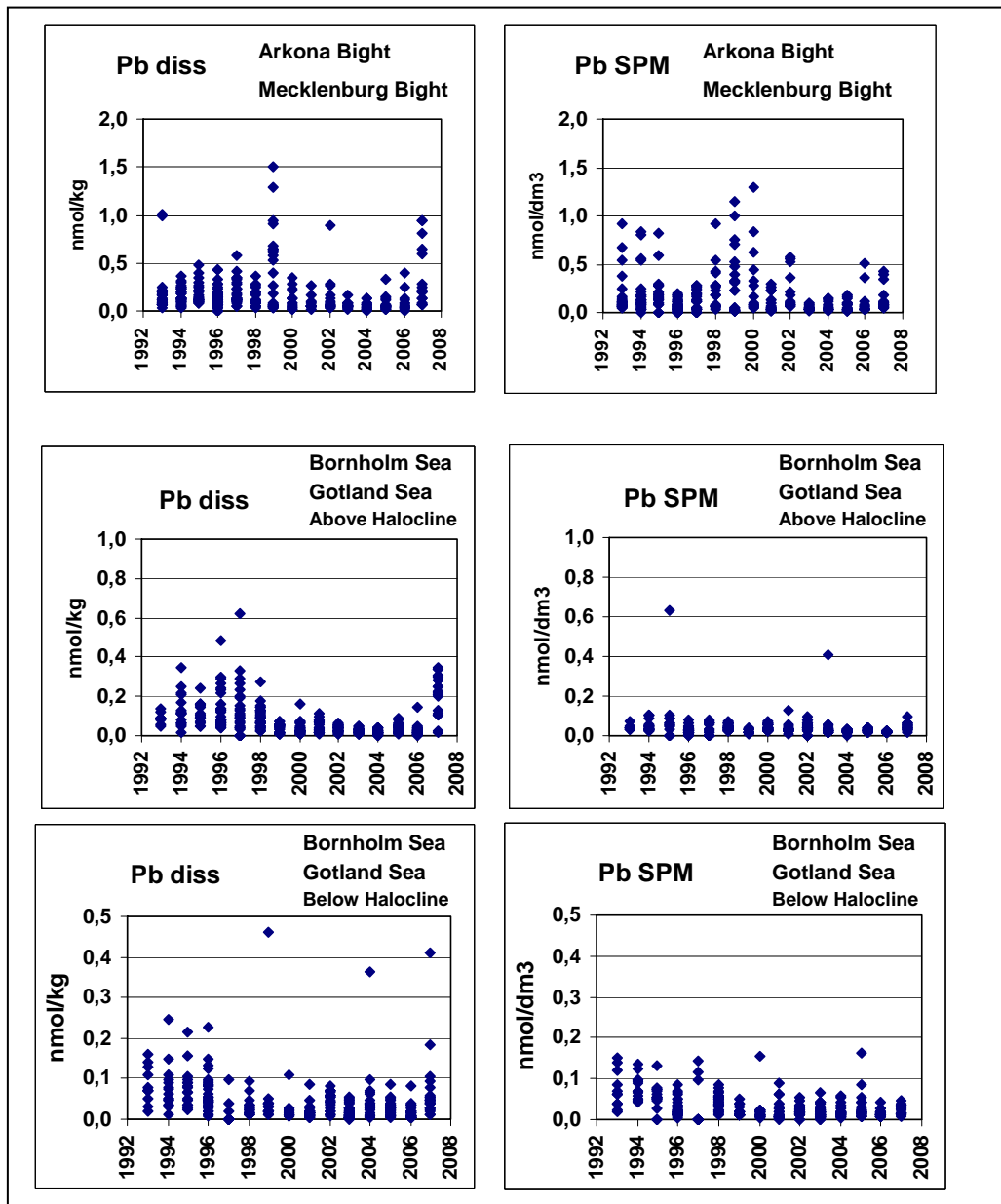


Abb. 16

Trends für gelöstes (diss) und partikuläres (SPM) Blei, in der westlichen Ostsee, sowie oberhalb und unterhalb der Haloclinen in der zentralen Ostsee von 1993-2007

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 1993-2007

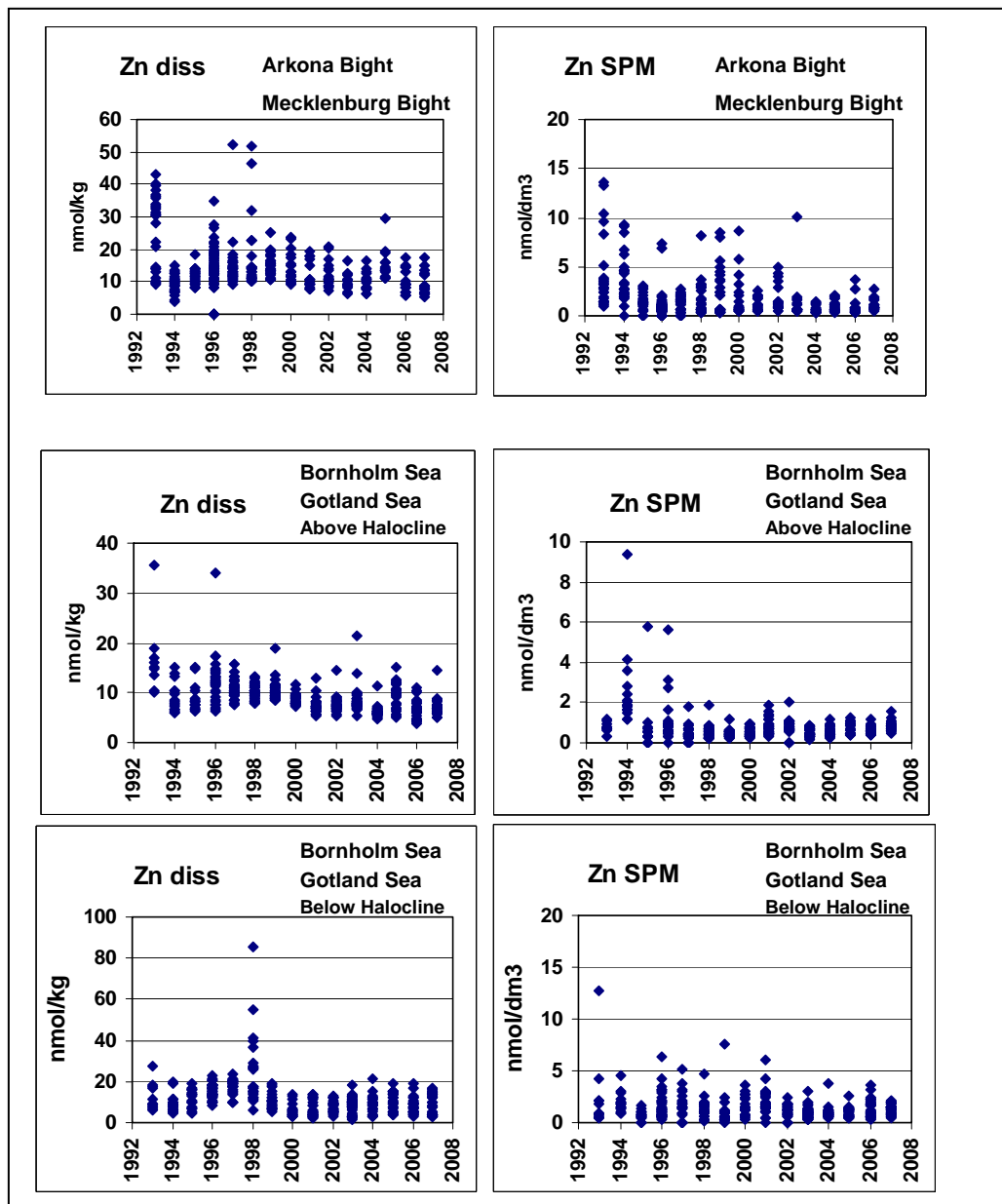


Abb. 17

Trends für gelöstes (diss) und partikuläres (SPM) Zink, in der westlichen Ostsee, sowie oberhalb und unterhalb der Haloclinen in der zentralen Ostsee von 1993-2007

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 1993-2007

3.3 Ergebnisse aus den Sedimentuntersuchungen

Tab. 10

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

Table 10

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

<i>Proben</i> IOW Nr.	<i>Frakt. < 20 µm</i>					
	< 20 µm (%)	C-org. (%)	C-anorg. (%)	CaCO ₃ (%)	N (%)	S (%)
342850	64	5,07	0,18	1,5	0,58	0,99
342880	66	4,43	0,23	1,9	0,48	1,46
342820	2,5	6,80	0,48	4,0	0,79	0,41
342770	56	5,89	0,22	1,8	0,66	0,79
342740	78	5,69	0,24	2,0	0,56	0,69

Tab. 11

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

Table 11

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

IOW Nr.	Al (%)	Li (ppm)	Fe (%)	Mn (ppm)	Ca (%)	P (ppm)
342850	5,31	37	3,48	361	0,71	1231
342880	4,84	32	3,41	443	0,89	905
342820	4,73	32	3,54	2184	1,73	1905
342770	5,06	34	3,12	384	0,97	1274
342740	5,40	36	3,83	564	0,87	1645

IOW Nr.	Cr (ppm)	Ni (ppm)	Co (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	Cd (ppm)	As (ppm)	Hg (ppb)
342850	77	34	19	79	224	36	1,05	19,2	131
342880	68	31	16	54	110	26	0,33	22,6	75
342820	75	41	19	85	159	42	0,55	25,1	99
342770	76	32	13	77	140	43	0,62	17,2	323
342740	75	34	13	51	129	34	0,37	22,0	125

Die Tabellen sind so aufgebaut, daß sie sich weitgehend selbst erklären. Die im Jahr 2007 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; # 342770) fällt wiederum durch die höchsten Hg Konzentrationen des gesamten Untersuchungsgebietes auf.

4. Schlussfolgerungen

Wie in den Vorjahren wies die Schwermetallverteilung im Ostseewasser im Jahr 2007 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 und in 2006 für die gelösten Kupferkonzentrationen beobachtet wurden, 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. Für Blei wurden vereinzelt sehr hohe Konzentrationen gemessen, die auf eine Probenkontamination schließen lassen.

Veränderungen, die kurzzeitig durch den Salzwassereinbruch im Februar 2003 hervorgerufen wurden, spiegeln sich in den Langzeittrends kaum wieder. Unterhalb der Redoxklinen die 2007 bei ca. 130 m angetroffen wurde, wurde ein Rückgang der gelösten Metallkonzentrationen für Cd_{diss}, Cu_{diss} und Zn_{diss} beobachtet. Weiterhin ist eine leichte Zunahme der Cd_{SPM}, Cu_{SPM} und Zn_{SPM} mit der Tiefe zu verzeichnen, welches auf die Stabilisierung 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 10 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.

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 „ALKOR“ und „Prof. A. Penck“.

Literaturverzeichnis

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-Probennahme, Anreicherung und Analytik. In: M. Stoeppler (ed.); *Probenahme und Aufschluß; Springer-Labormannual, 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.

POHL, C., LÖFFLER, A., SCHMIDT, M., SEIFERT, T. (2006): A trace metal (Pb, Cd, Zn, Cu) balance for surface waters in the eastern Gotland Sea, Baltic Sea. *J. Mar. Sys.*, 60, 381-395.

POHL, C.; HENNINGS, U.; LEIPE, T (2006): Die Schwermetallsituation in der Ostsee im Jahre 2005. *Marine Science Reports*, No. 66; Baltic Sea Research Institute, Warnemünde, Germany; 85-118.

POHL, C.; HENNINGS, U.; LEIPE, T (2007): Die Schwermetallsituation in der Ostsee im Jahre 2006. *Marine Science Reports*, No. 70; Baltic Sea Research Institute, Warnemünde, Germany; 95-126.

STRADY, E., POHL, C., YAKUSHEV, E. V., KRÜGER, S., HENNINGS, U. (2008): PUMP-CTD-system for trace metal sampling with a high vertical resolution. A test in the Gotland Basin, Baltic Sea. *Chemosphere*, 70, 1309-1319. doi:101016/j.chemosphere.2007.07.051.

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 Salzwassereintrüben in die Ostsee
- 13** (1996) Meyer-Harms, Bettina:
Ernährungsstrategie calanoider Copepoden in zwei unterschiedlich trophierten Seegebieten der Ostsee (Pommernbucht, Gotlandsee)
- 14** (1996) Reckermann, Marcus:
Ultraplankton and protozoan communities and their interactions in different marine pelagic ecosystems (Arabian Sea and Baltic Sea)
- 15** (1996) Kerstan, Eberhard:
Untersuchung der Verteilungsmuster von Kohlenhydraten in der Ostsee unter Berücksichtigung produktionsbiologischer Meßgrößen
- 16** (1996) Nehring, Dietwart; Matthäus, Wolfgang; Lass, Hans Ulrich; Nausch, Günther; Nagel, Klaus:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1995
- 17** (1996) Brosin, Hans-Jürgen:
Zur Geschichte der Meeresforschung in der DDR
- 18** (1996) Kube, Jan:
The ecology of macrozoobenthos and sea ducks in the Pomeranian Bay
- 19** (1996) Hagen, Eberhard (Editor):
GOBEX - Summary Report
- 20** (1996) Harms, Andreas:
Die bodennahe Trübezone der Mecklenburger Bucht unter besonderer Betrachtung der Stoffdynamik bei Schwermetallen
- 21** (1997) Zülicke, Christoph; Hagen, Eberhard:
GOBEX Report - Hydrographic Data at IOW
- 22** (1997) Lindow, Helma:
Experimentelle Simulationen windangeregter dynamischer Muster in hochauflösenden numerischen Modellen
- 23** (1997) Thomas, Helmuth:
Anorganischer Kohlenstoff im Oberflächenwasser der Ostsee
- 24** (1997) Matthäus, Wolfgang; Nehring, Dietwart; Lass, Hans Ulrich; Nausch, Günther; Nagel, Klaus; Siegel, Herbert:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1996
- 25** (1997) v. Bodungen, Bodo; Hentzsch, Barbara (Herausgeber):
Neue Forschungslandschaften und Perspektiven der Meeresforschung - Reden und Vorträge zum Festakt und Symposium am 3. März 1997.
- 26** (1997) Lakaschus, Sönke:
Konzentrationen und Depositionen atmosphärischer 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; Osadczyk, 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 Planktodynamik für die westliche Ostsee
- 31 (1998) Lemke, Wolfram:
Sedimentation und paläogeographische Entwicklung im westlichen Ostseeraum (Mecklenburger Bucht bis Arkonabecken) vom Ende der Weichselvereisung bis zur Litorinatransgression
- 32 (1998) Wasmund, Norbert; Alheit, Jürgen; Pollehne, Falk; Siegel, Herbert; Zettler, Michael L.:
Ergebnisse des Biologischen Monitorings der Ostsee im Jahre 1997 im Vergleich mit bisherigen Untersuchungen
- 33 (1998) Mohrholz, Volker:
Transport- und Vermischungsprozesse in der Pommerschen Bucht
- 34 (1998) Emeis, Kay-Christian; Struck, Ulrich (Editors):
Gotland Basin Experiment (GOBEX) - Status Report on Investigations concerning Benthic Processes, Sediment Formation and Accumulation
- 35 (1999) Matthäus, Wolfgang; Nausch, Günther; Lass, Hans Ulrich; Nagel, Klaus; Siegel, Herbert:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1998
- 36 (1999) Schernewski, Gerald:
Der Stoffhaushalt von Seen: Bedeutung zeitlicher Variabilität und räumlicher Heterogenität von Prozessen sowie des Betrachtungsmaßstabs - eine Analyse am Beispiel eines eutrophen, geschichteten Sees im Einzugsgebiet der Ostsee (Belauer See, Schleswig-Holstein)
- 37 (1999) Wasmund, Norbert; Alheit, Jürgen; Pollehne, Falk; Siegel, Herbert, Zettler, Michael L.:
Der biologische Zustand der Ostsee im Jahre 1998 auf der Basis von Phytoplankton-, Zooplankton- und Zoobenthosuntersuchungen
- 38 (2000) Wasmund, Norbert; Nausch, Günther; Postel, Lutz; Witek, Zbigniew; Zalewski, Mariusz; Gromisz, Sławomira; Łysiak-Pastuszek, Elżbieta; Olenina, Irina; Kavolyte, Rima; Jasinskaite, Aldona; Müller-Karulis, Bärbel; Ikauniece, Anda; Andrushaitis, Andris; Ojaveer, Henn; Kallaste, Kalle; Jaanus, Andres:
Trophic status of coastal and open areas of the south-eastern Baltic Sea based on nutrient and phytoplankton data from 1993 - 1997
- 39 (2000) Matthäus, Wolfgang; Nausch, Günther; Lass, Hans Ulrich; Nagel, Klaus; Siegel, Herbert:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1999
- 40 (2000) Schmidt, Martin; Mohrholz, Volker; Schmidt, Thomas; John, H.-Christian; Weinreben, Stefan; Diesterheft, Henry; Iita, Aina; Filipe, Vianda; Sangolay, Bomba-Bazik; Kreiner, Anja; Hashoongo, Victor; da Silva Neto, Domingos:
Data report of R/V "Poseidon" cruise 250 ANDEX'1999
- 41 (2000) v. Bodungen, Bodo; Dannowski, Ralf; Erbguth, Wilfried; Humborg, Christoph; Mahlburg, Stefan; Müller, Chris; Quast, Joachim; Rudolph, K.-U.; Schernewski, Gerald; Steidl, Jörg; Wallbaum, Volker:
Oder Basin - Baltic Sea Interactions (OBBSI): Endbericht
- 42 (2000) Zettler, Michael L.; Bönsch, Regine; Gosselck, Fritz:
Verbreitung des Makrozoobenthos in der Mecklenburger Bucht (südliche Ostsee) - rezent und im historischen Vergleich

- 43 (2000) Wasmund, Norbert; Alheit, Jürgen; Pollehne, Falk; Siegel, Herbert:
Der biologische Zustand der Ostsee im Jahre 1999 auf der Basis von Phytoplankton- und Zooplanktonuntersuchungen
- 44 (2001) Eichner, Christiane:
Mikrobielle Modifikation der Isotopensignatur des Stickstoffs in marinem 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:
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, Leipe, Thomas:
Die Schwermetall-Situation in der Ostsee im Jahre 2005
- 67 (2006) Rößler, Doreen:
Reconstruction of the Littorina Transgression in the Western Baltic Sea
- 68 (2006) Yakushev, Evgeniy V.; Pollehne, Falk; Jost, Günter; Kuznetsov, Ivan; Schneider, Bernd; Umlauf, Lars:
Redox Layer Model (ROLM): a tool for analysis of the water column oxic/anoxic interface processes
- 69 (2006) Wasmund, Norbert; Pollehne, Falk; Postel, Lutz; Siegel, Herbert; Zettler, Michael L.:
Biologische Zustandseinschätzung der Ostsee im Jahre 2005
- 70 (2007) Nausch, Günther; Feistel, Rainer; Lass, Hans Ulrich; Nagel, Klaus; Siegel, Herbert:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2006
Pohl, Christa; Hennings, Ursula; Leipe, Thomas:
Die Schwermetall-Situation in der Ostsee im Jahre 2006
- 71 (2007) Wasmund, Norbert; Pollehne, Falk; Postel, Lutz; Siegel, Herbert; Zettler, Michael L.:
Biologische Zustandseinschätzung der Ostsee im Jahre 2006
- 72 (2008) Nausch, Günther; Feistel, Rainer; Umlauf, Lars; Nagel, Klaus; Siegel, Herbert:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2007
Pohl, Christa; Hennings, Ursula; Leipe, Thomas:
Die Schwermetall-Situation in der Ostsee im Jahre 2007