

Meereswissenschaftliche Berichte
MARINE SCIENCE REPORTS

No. 80

Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee
2009

von

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

Die Schwermetall-Situation in der Ostsee
im Jahre 2009

von

Christa Pohl, Ursula Hennings, Thomas Leipe

Leibniz- Institut für Ostseeforschung Warnemünde
2010

NAUSCH, G.; FEISTEL, R.; UMLAUF, L.; NAGEL, K.; SIEGEL, H.:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2009

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Abstract	3
Kurzfassung	3
1. Einleitung	4
2. Meteorologische Bedingungen	7
3. Wasseraustausch durch die Ostseezugänge/ Beobachtungen an der Messplattform „Darßer Schwelle“	24
3.1 Wassertemperatur, Salzgehalt und Sauerstoffgehalt	24
3.2 Strömung	34
4. Beobachtungen an der Bojenstation „Arkonabecken“	35
5. Beobachtungen an der Bojenstation „Oder- Bank“	40
6. Hydrographisch- hydrochemische Bedingungen	44
6.1. Wassertemperatur	44
6.1.1 Wasseroberflächentemperatur	44
6.1.2 Vertikalverteilung der Wassertemperatur	53
6.2 Salzgehalt	61
6.3 Sauerstoffverteilung	65
6.4 Anorganische Nährstoffe	73
6.5 Natürliche organische Verbindungen	83
6.5.1 Westliche Ostsee und Arkonabecken	85
6.6.2 Bornholmbecken und Zentrale Ostsee	
Zusammenfassung	98
Summary	100
Danksagung	101
Literaturverzeichnis	102

Abstract

The article summarizes the hydrographic-hydrochemical conditions in the western and central Baltic Sea in 2009. Based on the meteorological conditions, the horizontal and vertical distribution of temperature, salinity, oxygen/hydrogen sulphide, inorganic and organic nutrients are described on a seasonal scale.

In Warnemünde, the year 2009 was too warm on average and continued the series of positive anomalies. This is also reflected in the water temperature. All in all, the year 2009 was, after the last four years, the fifth warmest in the investigation period since 1990.

In 2009, two larger barotropic inflow events were observed, in September/October and in November. The last one could be seen in the Bornholm Basin only in January 2010. Whereas the deep water of the Bornholm Basin remained oxic throughout the whole year, the stagnation period in the Gotland Basin was intensified. Hydrogen sulphide concentrations as well as ammonium and phosphate concentrations of the deep water were in the same range as observed at the end of the last stagnation period in 2002/2003.

Kurzfassung

Die Arbeit beschreibt die hydrographisch-hydrochemischen Bedingungen in der westlichen und zentralen Ostsee für das Jahr 2009. 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.

Das Jahr 2009 war überdurchschnittlich warm und setzte die jüngste Folge von positiven Anomalien fort. Das spiegelte sich auch in den Wassertemperaturen wider. Insgesamt war das Jahr 2009 nach den letzten vier Jahren das fünftwärmste des Untersuchungszeitraumes seit 1990.

2009 fanden zwei größere barotrope Einstromereignisse in der Ostsee statt, im September/Oktober und im November. Letzteres wurde erst im Januar 2010 im Bornholmbecken nachgewiesen. Während das Tiefenwasser des Bornholmbeckens ganzjährig oxisch blieb, intensivierte sich die Stagnationsperiode im Gotlandbecken. Sowohl die Schwefelwasserstoff- als auch die Ammonium- und Phosphatkonzentrationen des Tiefenwassers lagen 2009 in der gleichen Größenordnung wie sie 2002/2003, d.h. am Ende der letzten Stagnationsperiode, gemessen wurden.

1. Einleitung

Die Einschätzung des hydrographisch-hydrochemischen Zustandes der Ostsee im Jahre 2009 erfolgte einerseits 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. Beginnend mit dem Jahr 2008 wurde das Untersuchungsgebiet neu definiert. Es erstreckt sich von der Kieler Bucht bis zum Bornholmsgat und umfasst damit im Wesentlichen die Ausschließliche Wirtschaftszone Deutschlands (AWZ). Zur Absicherung und Fortführung der Langzeitmessungen wird dieses Messprogramm ab 2008 durch einen IOW-finanzierten Anteil ergänzt, um auch die Situation in den Becken der zentralen Ostsee, die ausschlaggebend für den Zustand der gesamten Ostsee sind, beschreiben zu können. Zu den Aufgaben des Gesamtprogramms gehört die Beschreibung des Wasseraustausches zwischen Ost- und Nordsee, der hydrographisch-chemischen Bedingungen im Untersuchungsgebiet und deren zeitliche und räumliche Veränderungen sowie die Identifikation und Untersuchung von Langzeittrends.

Im Jahre 2009 wurden fünf Fahrten durchgeführt, die alle vier Jahreszeiten sowie zusätzliche Beobachtungen im März/April umfassten. Die Fahrten im Juli und Oktober/November konnten nur das in der Verwaltungsvereinbarung mit dem BSH vorgegebene Seegebiet beproben. 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, Juli) und „Professor Albrecht Penck“ (März/April, April/Mai) sowie „Heincke“ (Oktober/November) 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 vier autonomen Stationen des deutschen Umweltüberwachungs-Messnetzes MARNET ergänzt, die im Gebiet der Darßer Schwelle (Messplattform; Stat. DS), im Arkonabecken (Halbtaucher; Stat. AB), in

der Pommerschen Bucht (Messboje; Stat. OB „Oder-Bank“) sowie im Fehmarnbelt (FB) 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: ab 2005	2 Horizonte T + S	+ 2 Horizonte O ₂

Die MARNET-Stationen arbeiteten auch im Jahr 2009 im Wesentlichen mit der bisher bekannten, hohen Zuverlässigkeit. Die MARNET-Station „Oder-Bank“ wurde im November 2009 planmäßig wegen Wartungsarbeiten außer Betrieb genommen und soll im Frühjahr 2010 den Betrieb wieder aufnehmen. Die wichtigste instrumentelle Verbesserung an den Stationen DS und AB war der Ersatz der Sauerstoffsensoren der Firma Züllig durch die deutlich zuverlässigeren optischen Sensoren der Firma Aanderaa ab Ende April 2009 (die Station OB ist bereits mit diesen Sensoren ausgestattet).

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 2009 wurde im Vergleich zu den Mittelwerten des Untersuchungszeitraumes 1990-2008 und zu extremen Jahren vorgenommen und konzentriert sich auf das neu definierte Untersuchungsgebiet.

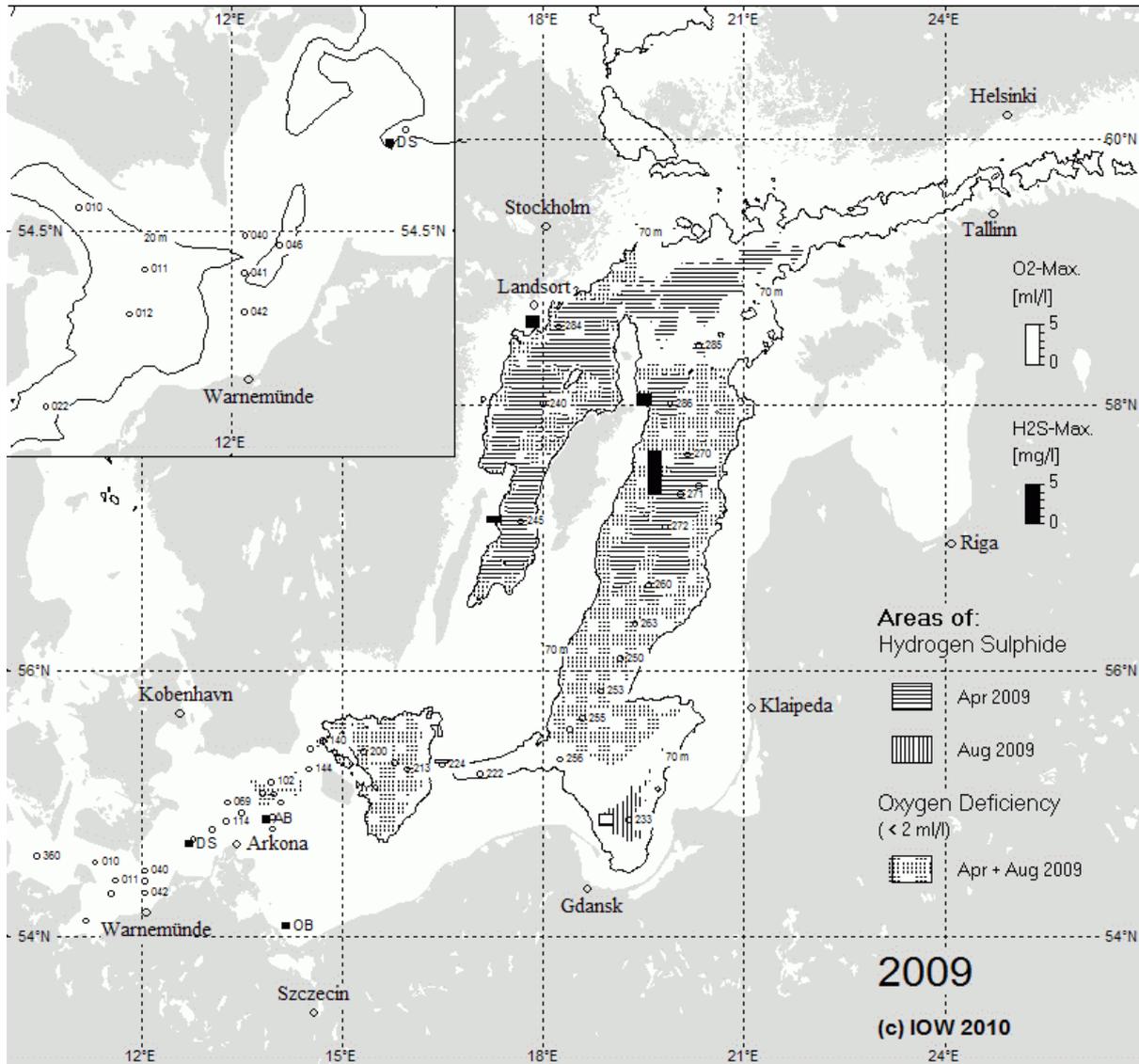


Abb. 1

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 2009; 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 2009. Bars show the maximum oxygen and hydrogen sulphide concentrations of this layer in 2009; the figure contains additionally the 70 m – depth line resp. 20 m – depth line (small picture)

2. Meteorologische Bedingungen

Der Witterungsverlauf des Jahres 2009 in der südlichen Ostsee kann durch Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD, 2009, 2010a) 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 sowie die Strahlungswerte der Station Gdynia. Tab. 2 enthält die Kälte- und Wärmesummen der Wetterstation Warnemünde zusammen mit dem langjährigen Mittel.

Der Winter 2008/2009 war der dritte milde und kurze Winter in Folge, mit der Kältesumme 32,8 K d von Warnemünde (Tab. 2) liegt er auf Platz 14 der mildesten Winter seit Beginn der Vergleichsdaten im Jahr 1948. Er führte nach BSH- Angaben (SCHMELZER, 2009) zu einer maximalen Eisbedeckung der Ostsee von 112 000 km² am 19. Februar (Abb. 19), die bei 52% des langjährigen Mittelwerts von 214 000 km² seit 1720 lag. Wegen des warmen Herbstes begann die Eisbildung in der Bottenwiek Ende November 2008, zwei Wochen später als normal, und im Finnischen Meerbusen erst Mitte Dezember, 3 Wochen später als gewöhnlich. Bis Ende Dezember 2008 bildete sich kein weiteres Eis. Vom 30. Dezember bis 11. Januar 2009 wurde es an der deutschen Küste kälter und Eis entstand in geschützteren Lagen; im Bottnischen, Finnischen und Rigaischen Meerbusen wuchs das Eis kontinuierlich bis Anfang Februar. Der sich verschärfende Frost führte zur maximalen Eisbedeckung am 19. Februar, als die Bottenwiek vollständig zufror. Die Eissaison endete normal etwa Ende Mai. An der deutschen Küste wurde die größte Eisdicke mit 15-20 cm bei Ueckermünde am Stettiner Haff gemessen; dort dauerte die Eissaison auch am längsten mit 61 Tagen vom 2. Januar bei 3. März, ebenso wie an der Brücke von Zecherin am Peenestrom.

Neben verschiedenen anderen Indices zur Beschreibung des Ausmaßes der Ostseevereisungen (SCHMELZER et al., 2008) wurde 1989 die flächenbezogene Eisvolumensumme für die Bewertung der Stärke eines Eiswinters in den deutschen Küstengebieten eingeführt (KOSLOWSKI, 1989; BSH, 2009a). Zusätzlich zur Dauer der Vereisung werden der Bedeckungsgrad und die Eisdicke zur Bestimmung hinzugezogen, um den häufig unterbrochenen Vereisungsperioden in den einzelnen Wintern besser gerecht zu werden. Die täglichen Werte der flächenbezogenen Eismenge an den 13 deutschen Eisklimastationen werden zeitlich aufsummiert. Die flächenbezogene Eisvolumensumme ergibt sich daraus als Durchschnittswert dieser 13 Stationen. Der Mittelwert für die Winter von 1896/97 bis 1986/87 liegt mit $3,06 \pm 5,80$ m in einem ganz schwach besetzten Intervall, das die Übergangsstelle der bimodalen Verteilung zwischen mäßigen und starken Wintern bildet. Die höchsten registrierten Werte waren 26,83 m (1942), 26,71 m (1940), 25,26 m (1947) und 23,07 m (1963); alle anderen Winter lagen weit unter 20 m (KOSLOWSKI, 1989). Die flächenbezogene Eisvolumensumme für die deutsche Ostseeküste war im Jahr 2009 gleich 0,13 m, die reduzierte Eisumme betrug 4,7.

Der 30-jährige Mittelwert der Eisbedeckung bleibt durch den Winter 2008/9 weiter bei den tiefen Werten der letzten Jahre (Abb. 2). Eine Bedeckung von etwa 27% der Gesamtfläche der Ostsee von 415 266 km² fällt in den Bereich 20% - 40%. Dieser Bedeckungsgrad wird im langfristigen Mittel mit etwa 40% 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).

Das Jahr 2009 war geprägt von häufigen Blockierungslagen über Deutschland und dem Ostseeraum, mit häufigeren und anhaltenden Süd-, Ost- oder Nordwinden (Abb. 3a). Die hier angegebenen Namen der Hochs und Tiefs wurden 2009 von der Freien Universität Berlin vergeben, in guter Tradition seit 1954, und seit 2002 auch über so genannte „Wetterpatenschaften“ (FU-BERLIN, 2008).

Am 3. **Januar** 2009 bildete sich ein kleines Schneetief „Akai“ über Mecklenburg und zog nach Südosten. Glatte Straßen und bis zu 15 cm Neuschnee führten in ganz Norddeutschland zu erheblichen Verkehrsproblemen. In der Folge von „Akai“ zog das Hoch „Angelika“ von Spitzbergen mit polarer Luft nach Mitteleuropa. Der Landsortpegel sank auf -20 cm. Rund um die Ostsee fielen am 5.1. die Temperaturen bis auf -18 °C. Am 6.1. wurden diese Werte dann auch im Raum Halle-Leipzig gemessen, in Delitsch -26 °C, in Brandenburg -25 °C, in Dippoldiswalde am 7.1. sogar -28 °C und am 8.1. in Berchtesgaden -33 °C. Die Müritz froh zu mit 4-10 cm Eis.

Trotz eines ausgeprägten NAO mit Azorenhoch und Sturmtief „Dominik“ bei Island sorgten am 12. Januar Hoch „Angelika“ über Spanien und Hoch „Beeke“ über der Ukraine weiterhin für den Zustrom kalter Luft von Osten, die mit Frost und Schnee auch Spanien, die Kanaren und Norditalien erreichte, während im gesamten Ostseeraum Tauwetter begann. Der Westwind verursachte langsamen Einstrom; der Pegel bei Landsort stieg auf +12 cm am 14. Januar.

Am 17. Januar gegen 20 Uhr sorgte ein Meteorit für Aufregung, dessen Lichtblitz und nachfolgendes explosionsartiges Donnern auch im Rostocker Raum deutlich wahrzunehmen war. Der subjektive erste Eindruck eines Gewitters passte aber nicht zum aktuellen Wetterbild. Im März wurden 30 g der Reste des Meteoriten auf Lolland entdeckt.

Am 23.1.2009 zog das Orkantief „Joris“ von England nach Holland mit stürmischem Südwind über Deutschland, wo es sich am 24.1. über der südlichen Ostsee abschwächte. Auf dem Feldberg wurden 176 km/h gemessen. Das Tief „Klaus“ am 24. Januar zählt als der weltweit schwerste extra-tropische Sturm der Dekade (WMO, 2009, 2010). Mit Windstärken bis 190 km/h, vergleichbar einem Hurrikan der Kategorie 3, und Schneestürmen richtete er insbesondere in Spanien und Frankreich schwere Schäden an und unterbrach Verkehrs- und Versorgungssysteme. Hoch „Elfriede“ über der Ostsee am 29.1. und 30.1. sorgte für eine anhaltende Blockierungslage und Winterkälte bis Norditalien und Korsika. Am 2. und 3.

Februar wurde es durch das Hoch „Friederike“ über dem Baltikum verstärkt. Gleichzeitig zog das Tief „Nicolas“ von Spanien nach Norden und verursachte starke Schneestürme, Blizzards und Tornados in Spanien, Frankreich und England. Am 9. und 10.2. folgte das Sturmtief „Quinten“, dessen Kern unter Abschwächung vom englischen Kanal (976 hPa) nördlich von Berlin (985 hPa) nach Polen zog. Dieses Mal waren Frankreich und Deutschland von den Schneefällen besonders stark betroffen; auch im Raum Rostock fielen ca 10 cm.

Bei weiterhin niedrigem Landsortpegel und Ausstromlage begann barokliner Einstrom. Bodennah stieg am 13.2. der Salzgehalt an der Darßer Schwelle von 9 auf 12 g/kg und die Temperatur von 2,3 auf 2,9 °C. Am 16.2. überstieg der Salzgehalt am Boden 13 g/kg, während ein Schneetief in Deutschland und Österreich einen weiteren Wintereinbruch bewirkte. Verantwortlich für die heftigen Niederschläge und den Temperatursturz war das von der Nordsee zur Adria ziehende Tief "Ture". Es machte Platz für arktische Kaltluft, die von dem über Schweden und Finnland liegenden Hoch "Heike" nach Deutschland geschickt wurde. Danach setzte sich der barokline Einstrom bis zum 24. Februar 2009 fort mit maximal 14 g/kg Salzgehalt am Darßer Mast am 21.2. Mit den Tiefs „Xiang“ am 25.2. und „Vann“ am 26.2. stellte sich das Wetter vorübergehend auf Westwindlage um; die Windmischung beendete den baroklinen Einstrom.

Anfang **März** bildete sich erneut eine Blockierungslage aus. Am 5.3. bildete sich ein kleines Vb-Tief aus, das in Süddeutschland zu Extremniederschlag führte. Danach setzte am 10.3. wieder schwacher barokliner Einstrom ein mit ca. 12 g/kg Salzgehalt am Messmast Darßer Schwelle. Am 12.3. folgte mit Tief „Eckhard“ schwacher barotroper Einstrom, der danach noch fortgesetzt wurde durch das Sturmtief „Franjo“ am 17.3. Trotz dieser Stürme setzte am 19.3. wieder ein baroklines Einstromsignal ein mit ca 12 g/kg, 3 °C und 115% Sauerstoffsättigung. Mit Hoch „Moema“ entstand eine Omega-Lage zum Frühlingsanfang am 20.3., ruhig, kalt und sonnig, die am 22.3. durch Tief „Herbert“ wieder in Sturm und barotropen Einstrom übergang.

Mit Hoch „Nives“ entstand am 2. **April** 2009 eine Omega-Lage und der Frühling kam nach 2 Tagen Nebel und Ostwind an die Ostseeküste. Die Blockierungslage setzte sich mit Hoch „Ottilia“ fort und leitete am 8.4. schwül-warme Luft nach Deutschland. Ein erstes Gewitter trat in Rostock auf. An der Darßer Schwelle zeigte sich vom 31.3. bis 7.4. kurzzeitig wieder barokliner Einstrom. Temperaturen in Deutschland lagen verbreitet über 20 °C. Das schöne Wetter, das mit Hoch „Peggy“ bis Ostern (12./13.4.) so anhielt, lockte Tausende Urlauber an die Ostseestrände. Die Ostertage vom 10. bis zum 13. April gehörten laut DWD zu den wärmsten seit dem Beginn der Aufzeichnungen 1891.

Im Raum Brandenburg bestand bereits Waldbrandgefahr. Am 17. April zog Tief „Quirin“ von Frankreich nach Tschechien. Nördlich von ihm blieb es anhaltend trocken und sonnig. Bei kräftigem Ostwind herrschte starker Ausstrom, aber barokliner Einstrom hatte noch nicht wieder begonnen. Die nachfolgenden Ostsee-Hochs „Quinta“, „Reinhild“ und „Steffi“ wurden nur vom kleinen Höhentief „Sasa“ gestört, das am 22.4. von Skandinavien nach Süden zog, aber nur wenig Regen nach Mecklenburg brachte. Unmittelbar darauf begann

kräftiger barokliner Einstrom am 23. April mit einem Salzgehalt über 17 g/kg an der Darßer Schwelle, der bis zum 6. Mai anhielt. Die Temperatur des eingeströmten Wassers lag bei 5 °C, die Sauerstoffsättigung bei 80%.

Östlich der Elbe herrschte weiterhin anhaltend Wärme und Trockenheit. Bis 28 °C wurde am 30.4. an der Oder gemessen, während westlich der Elbe nur ca. 10 °C erreicht wurden. Zu den höchsten April-Temperaturen seit 120 Jahren kamen Sonnenschein-Rekorde im Norden und Osten. Auf der Greifswalder Oie registrierten die Meteorologen insgesamt 343 Sonnenstunden. Laut DWD gab es im Schnitt in Deutschland 246 Stunden Sonnenschein, 62 Prozent über dem langjährigen Mittelwert. 2007 hatte es allerdings sogar 289 Stunden Sonne im April gegeben.

Mit den Tiefs „Wilfried“ am 3. **Mai** und „Xaver“ am 4. Mai endete die seit Anfang April anhaltende Omega-Lage, die Rekordwärme, -trockenheit und -sonnenstunden für den Nordosten brachte, sowie einen kräftigen baroklinen Einstrom über die Darßer Schwelle. Heftige Stürme und eine plötzlich entstandene Gewitterfront durch Tief „Adheld“ richteten am 8. und 9. Mai 2009 im Süden, Norden und Osten Deutschlands Schäden an. Der dadurch ausgelöste barotrope Einstrom erreichte am 14.5. mit 16 g/kg am Darßer Mast seinen Höhepunkt. Bodennah lag die Temperatur bei 9 °C, die Sauerstoffsättigung bei 90%. An der Arkonaboje überstieg der Salzgehalt in 40 m Tiefe 16 g/kg am 18. Mai; das Wasser war ebenfalls ca. 9 °C warm. Der durch den Volumeneinstrom bedingte Anstieg des Landsortpegels hatte bereits am 11. Mai wieder aufgehört. Seit dem 10.5. lag eine stabile Front über Deutschland, die trockenes, sonniges Wetter mit kalten Eiseheiligen im Norden von warmer, feuchter Luft im Süden trennte. Am 13.5. zog ein Tornado durch die Eifel.

Am 21. Mai löste das kleine lokale Tief „Erich“ einen Tornado in Plate bei Schwerin aus, der erhebliche Schäden verursachte. Bei schwachen Luftdruckgegensätzen und überwiegend West- oder Südwestwind erreichte immer wieder schwül-warme Luft mit kräftigen Gewitterfronten Deutschland. Mit dem kleinen Tief „Felix“ zog am 25.5. eine schwere Gewitter- und Sturmfront über Holland und Westdeutschland. Kleinere barokline und barotrope Einstromsignale wechselten einander in der zweiten Maihälfte ab; am 22. und 26. Mai wurden am Messmast Salzgehalte von 17 g/kg gemessen. Am 29.5. zog das Tief „Grant“ von Dänemark zur Adria, entgegen der Vb-Route, während das Hoch „Zsuzsanna“ nördlich von Berlin für schönes Pfingstwetter sorgte. In einer nachfolgenden kurzen baroklinen Einstromphase stieg der Salzgehalt an der Darßer Schwelle in 19 m Tiefe zwischen dem 31. Mai und dem 3. **Juni** 2009 sogar auf über 18 g/kg an.

Eine Blockierungslage mit „Islandhoch“ und „Azorentief“ leitete am 3. **Juni** gemeinsam mit dem Tief „Isaak“ über dem Baltikum nördlichen Wind und die Schafskälte nach Deutschland. Mit dem Durchzug des Vb-artigen Tiefs „Jürgen“ von Südfrankreich nach Polen, das am 7.6. in Köln-Roggendorf von einem Tornado begleitet war, stellte sich die Lage um auf kühlen, wechselhaften Westwind mit Tiefs wie an einer Perlenkette von den Azoren über Norddeutschland bis zum Weißen Meer. Die Hochs über Island und Skandinavien lagen

zu weit nördlich für eine Omega-Lage, so dass die Tiefs südlich davon über Mitteleuropa wanderten. Das Tief „Martin“ entwickelte sich am 11.6. auf dem Weg von Frankreich zur Ostsee zu einem Orkantief, ein sehr ungewöhnlicher Vorgang für diese Jahreszeit. Zwischen Lübeck und Rostock entstand eine Luftdruck-Differenz von 5 hPa auf eine Entfernung von ca. 100 km, was einem mittleren geostrophischen Wind von 50 m/s entspricht. Auf Hiddensee wurden Sturmböen bis 126 km/h gemessen, am Darßer Mast über 20 m/s, begleitet von einem abrupten Temperatursturz von 13 auf 10 °C. In Warnemünde lagen am 12.6. morgens viele armdicke abgebrochene Äste und ein Teppich aus abgerissenen Zweigen und Laub. Die Wassersäule in der südlichen Ostsee wurde vollständig vermischt und damit die seit Mai sporadisch auftretende barokline Einstromtätigkeit beendet, die am 7., 9. und 10.-12. Juni zu Salzgehalten von 16-17 g/kg an der Darßer Schwelle geführt hatte. Zahlreiche Seesterne wurden in Warnemünde an den Strand gespült. Ohne einen entsprechenden Ostseesturm folgte Tief „Odin“ einem ähnlichem Weg wie Tief „Martin“, das seinerseits über Spitzbergen zurück nach Island wanderte. Am 17.6. stellte sich seit längerem erstmalig wieder ein Azorenhoch gemeinsam mit einem Islandtief „Peter“ ein. In der Schönwetterlage wurden nach dem 20.6. bereits größere Ansammlungen von Cyanobakterien in der zentralen Ostsee gefunden.

Das Tief „Rainer“ am 7. **Juli** unterbrach die seit dem Siebenschläfer bestehende Südostlage, die vor allem südlich Berlin viele Gewitter, Unwetter und Überschwemmungen brachte, insbesondere auch in Österreich und Tschechien. Im Nordosten war es noch immer zu trocken. Es setzte Westwind ein, der kühlere Luft mitbrachte, zunächst aber nur einzelne neue Gewitterfronten. Die seit dem Siebenschläfer herrschende relativ stabile Wetterlage mit einem Tief über Irland und einem Hoch über Italien setzte sich fort mit schwül-warmen Südwestwinden in Deutschland, immer neuen Gewitterfronten, und Hitzewellen bis 40° in Griechenland und Rumänien. Am 23. Juli verwüstete ein Unwetter Zentraleuropa, auch in Mecklenburg gab es Überschwemmungen. In Italien, Frankreich und Spanien, auf Korsika und Sardinien traten großflächige Waldbrände auf. Ende Juli erlebte Norddeutschland eine Invasion von Marienkäfern, die aber nicht so massiv wie die von 1988 ausfiel.

Am 7. **August** entstand mit Hoch „Juliane“ eine Omega-Lage mit bestem Sommerwetter. Mit kleinen Unterbrechungen blieb jedoch die wechselhafte Westwindlage seit dem Siebenschläfer erhalten, mit Hochs nördlich des Mittelmeers und Tiefs über Skandinavien. Ausläufer streiften den Westen und Norden Deutschlands. Zuweilen war es windig bis Bf6, meist aus West. Die Ostsee war durchschnittlich gefüllt; es gab kurze und schwache barokline oder barotrope Einstromepisoden. So überstieg am 19.8. der Salzgehalt am Darßer Mast 16 g/kg bei relativ stark vermischter Wassersäule, während das Hoch „Lina“ über der Ostsee wieder eine Omega-Lage herstellte. Ähnliche minimale Einstromschübe wiederholten sich am 23., 27. und 29.8. mit Salzgehalten über 16 g/kg, Wassertemperaturen um 16 °C und Sauerstoffsättigung um 50%.

Am 13. **September** zog das Tief „Kunibert“ vom Nordkap nach Süden und bog dann von Thüringen aus westwärts nach Frankreich ab. Am 15.9. bildete das Hoch „Petra“ über der Ostsee eine stabile Altweibersommerlage aus.

Am 3. **Oktober** erreichte das Sturmtief „Sören“ die Ostsee mit Windstärken 10-11. Zwischen dem 1.10. und dem 11.10. fand schwacher barotroper Einstrom statt mit Salzgehalten um 18 g/kg und fallenden Wassertemperaturen um 15 °C bei 19 m Tiefe an der Darßer Schwelle. Es war anscheinend dieses relativ warme Wasser, das noch Anfang November auf der Messfahrt im Arkonabecken beobachtet wurde (SCHMIDT, 2009). Ein weiterer Meteorit war am 13.10. in Norddeutschland zu beobachten, diesmal im Raum Bremen-Hamburg. Vom 13. bis 15.10. traten zwischen hohem Druck über Skandinavien („Wiebke“) und niedrigem im Baltikum („Wimar“) kräftige Nordostwinde auf, die in Warnemünde bis 117 cm Hochwasser verursachten und in Deutschland zu einem ersten Wintereinbruch führten. Im Raum Rügen/Usedom wurden durch die Dauer des Hochwassers Deiche beschädigt. Die Höchstwasserstände wurden in Koserow mit 1,39 Meter und in Lübeck mit 1,32 Meter über dem mittleren Wasserstand registriert (BSH, 2009b).

Anfang **November** entstand eine Blockierungslage mit Südwind über der Ostsee zwischen dem russischen Hoch „Antonia“ und den Tiefs „Berti“ und „Cassen“ über Island und der Norwegischen See. Ausstrom ließ den Landsortpegel stark absinken. Mit Tief „Hans“ wechselte die Lage am 16.11. auf Westwind, gefolgt vom Orkantief „Jürgen“ am 18.11. Der Salzgehalt an der Darßer Schwelle, der während der Ausstromphase unter 9 g/kg gelegen hatte, stieg auf 17 g/kg an. Dem kurzen baroklinen Einstrom-Schub folgte ein barotroper, das von „Jürgen“ aufgemischte Wasser der Beltsee floss ein, und die Ostsee füllte sich rasch. Weiter im Westen, in England, Irland und auf den Kanarischen Inseln kam es zu schweren Überschwemmungen („Jahrtausendhochwasser“ in Cumbria) um den 20.11. herum, während der „Martinssommer“ sich mit Rekordwärme von 20 °C in Freiburg zeigte. Mit Sturmtief „Ludwig“ setzte sich der Einstrom am 23.11. fort; an der Darßer Schwelle stieg der Salzgehalt in der durchmischten Wassersäule über 15 g/kg, am Arkonamast in Bodennähe sogar auf über 22 g/kg am 25.11., offenbar bedingt durch Zustrom durch den Sund. Die Tiefs „Max“ und „Nico“ verstärkten den Einstrom weiter am 26. - 29.11. Auch im Fehmarnbelt stieg der Salzgehalt in 23 m Tiefe auf über 22 g/kg, und an der Darßer Schwelle auf über 16 g/kg in der ganzen homogenen Wassersäule, bei einer Sauerstoffsättigung über 90% und Temperaturen von knapp 9 °C. Am Darßer Ort wurden Feuerquallen an den Strand gespült.

Bis zum 3. **Dezember** stieg der Landsortpegel noch leicht an auf + 21 cm, dann endete der Einstrom und der Salzgehalt an der Darßer Schwelle fiel auf typische Ausstromwerte. Gleichzeitig stieg der Salzgehalt an der Arkonaboje sogar in 25 m Tiefe über 17 g/kg, während er bei 40 und 43 m Tiefe bis zum 7.12. zwischen 20 und 22 g/kg schwankte. Im Fehmarnbelt wurden am 3. und 5.12. in 23 m Tiefe bis 28 g/kg gemessen, in 6 m Tiefe noch 16 - 18 g/kg. Mit dem Hoch „Dorothea“ am 11. - 13.12. setzte sich die Blockierungslage fort, nun aber mit polaren statt südlichen Winden über Deutschland und dem ersten Frost in

Deutschland. Das kleine Tief „Uwe“ zog von der Ostsee nach Südwesten und brachte am 17.12. der Nordseeküste Schneefälle. Der Frost nahm zu und erfasste ganz Mitteleuropa zwischen den Pyrenäen, dem Weißen und dem Schwarzen Meer. Mit dem Tief „Vincent“ am 20.12. kehrte die Westwindlage zurück und das Weihnachtstauwetter kündigte sich an, aber noch herrschte Frost sogar in Irland, Portugal und Norditalien, und in Deutschland wurden am 4. Advent bis -33 °C gemessen. Die Züge im Ärmelkanaltunnel blieben wegen der Kälte stecken. Am 22.12. traten zahlreiche Schneeverwehungen in Deutschland auf. Im Frontbereich der Warmluft von Süden bildeten sich Nebentiefs, Tief „Uwe“ kehrte zur Ostsee zurück. Die bodennahe Kaltluft östlich der Elbe lag stabil unter der warmen Luft von Süden, so auch in der Po-Ebene.

Ab dem 16.12. fand wieder schwacher barokliner Einstrom statt, aber nur mit Salzgehalten zwischen 14 und 15 g/kg, während die Oberflächentemperatur rasch sank. Am 26. Dezember begann mit kräftigem Westwind des Tiefs „Yann“ auch schwacher barotroper Einstrom, der in 40 m Tiefe der Arkonasee zu einem Anstieg auf 16 g/kg führte, höher als an der Darßer Schwelle gemessen. Tief „Angelos“ sorgte am 30. Dezember 2009 südlich einer Front von Amsterdam bis Zittau für mildes Regenwetter mit Föhn und Südwestwind. An der Front gab es Regen, Eisregen und Schneefall. Im Norden herrschte kräftiger Ostwind bei Frost mit Schnee und Verwehungen. An der Ostsee setzte Ausstrom ein. Die Lage war stabil und sollte bis 2010 anhalten. Rund um die Ostsee herrschte am Jahresende wieder Frost.

Tab. 1 zeigt im Mai das Jahresmaximum der Solarstrahlung in Gdynia, wie schon 2008, obwohl die astronomische und die über der Ostsee gemessene mittlere Einstrahlung erst im Juni ihren Höchstwert erreicht (HAGEN und FEISTEL, 2008). Das Maximum fiel 2009 mit ca 60 kJ/m² aber deutlich geringer aus als 2008 mit 72 kJ/m².

Im Vergleich zum Vorjahr fielen 2009 die negativen und die positiven Temperaturanomalien in Warnemünde stärker aus (Tab. 2). Das Jahr war überdurchschnittlich warm; die Jahreswärmesumme 2009 von 208 K d war noch geringfügig höher als im Vorjahr und lag deutlich höher als der Mittelwert 146 K d der Beobachtungsreihe seit 1948, aber noch knapp innerhalb der statistischen Streuung und weit unter dem Rekordwert 355 K d des Jahrs 2006. Wie die Temperaturen an der Station Arkona zeigen (Tab. 1), war es 2009 in vier Monaten kälter als im langfristigen Mittel; im Januar, Juni, Oktober und Dezember war es zwischen 0,4 und 1,1 °C zu kalt, deutlich zu warm waren dagegen April, Juli, August, September und November mit Werten zwischen 1,9 und 2,7 °C über dem langjährigen Mittel. Die positiven Temperaturanomalien von April/Mai und August/September gingen mit größerer Sonnenscheindauer einher. Mit 175% Sonnenschein und 12% Niederschlag war der April extrem sonnig und trocken, der Mai mit den höchsten Niederschlägen des Jahres hatte trotzdem noch überdurchschnittlich viel Sonnenschein. Insgesamt war auch das Jahr 2009 in Warnemünde im Mittel sehr warm und setzte die jüngste Folge von positiven Anomalien fort, wobei der zu milde Winter etwas ausgeprägter war als der zu warme Sommer. Dieses Verhalten entspricht dem beobachteten mittleren Trend der letzten 50 Jahre (HAGEN und

FEISTEL, 2008). Der Extremwerte der Luftfeuchte waren 76% im August und September in Warnemünde sowie 90% im Februar und Dezember.

Das Jahr 2009 gehört nach vorläufigen Angaben zu den zehn wärmsten seit Beginn der instrumentellen Klimareihen im Jahr 1850 (WMO, 2009, 2010). Die globale kombinierte Land- und Meeresoberflächentemperatur lag 2009 (Januar-Oktober) um $0,44 \text{ °C} \pm 0,11 \text{ °C}$ über dem Jahresdurchschnitt 1961-1990 von $14,00 \text{ °C}$. Formal ist 2009 damit das fünftwärmste Jahr seit 1850. Die Dekade der 2000er Jahre (2000-2009) war wärmer als die 1990er und diese wiederum als die 1980er Dekade. Der europäische Sommer 2009 war wärmer als im langfristigen Durchschnitt, insbesondere in den südlichen Teilen. Die geringste Eisbedeckung der Arktis wurde am 12. September 2009 mit $5\,100\,000 \text{ km}^2$ beobachtet, nach 2007 mit $4\,100\,000 \text{ km}^2$ und 2008 mit $4\,500\,000 \text{ km}^2$ der drittniedrigste Wert seit 1979. Im September 2009 kam es zu extremen Niederschlägen im Gebiet von Namibia, Angola, Sambia und Botswana, wobei der Sambesi den höchsten Pegel seit 40 Jahren erreichte, verursacht durch sehr warmes Wasser im Indischen Ozean. Dieses kann als Vorbote des El-Nino-Ereignisses betrachtet werden, das im Juni 2009 begann und dann Ende 2009/Anfang 2010 im Ostpazifik an der süd- und nordamerikanischen Küste ausgeprägt auftrat. Andererseits trat 2009 eine massive Dürre in Ostafrika auf, insbesondere in Kenia. Australien registrierte den drittwärmsten Sommer der Aufzeichnung mit Hitzewellen bis $48,8 \text{ °C}$, ein neuer lokaler Rekord. Wahrscheinlich als Folge des El-Nino fiel die Hurrikan-Saison in der Karibik mit nur 3 Hurrikanen der Kategorie 3 als schwächste seit 1997 aus; trotzdem forderte „Ida“ mit Überschwemmungen und Erdbeben 192 Opfer in Nicaragua im November.

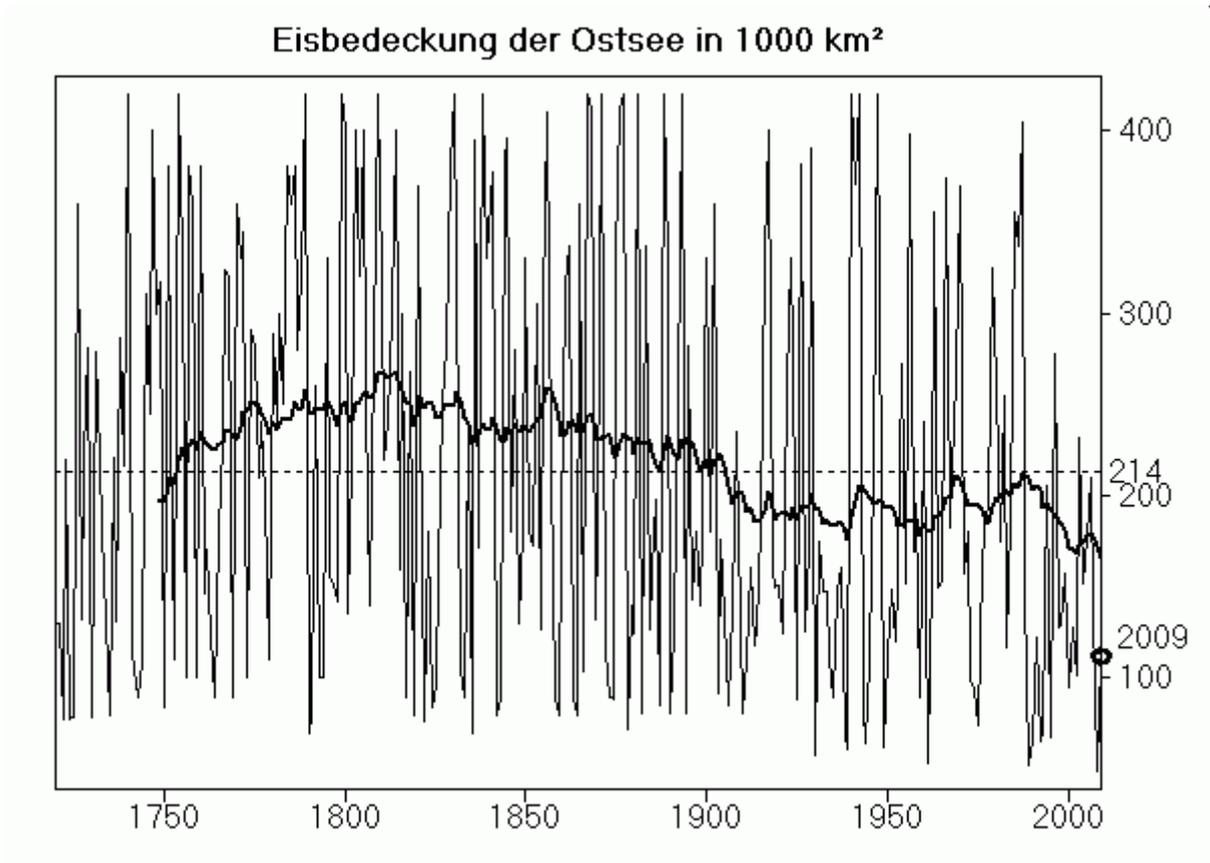


Abb. 2

Maximale Eisbedeckung der Ostsee in 1000 km² in den Jahren 1720 bis 2009 (SCHMELZER et al., 2008; SCHMELZER, 2009). 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 2008/2009 mit 112 000 km²

Fig. 2

Maximum ice covered area in 1000 km² of the Baltic Sea in the years 1720 to 2009 (SCHMELZER et al., 2008; SCHMELZER, 2009). 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 2008/2009 with 112 000 km² is encircled

Tab. 1

Monatliche gemittelte Wetterdaten der Station Arkona (Rügen, 42 m über NN) nach DWD (2010b). 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. Solar: Sonnenstrahlung in J/m² an der Station Gdynia, 54°31' N, 18°33' O, 22 m über NN, von IMGW (2010). 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 (20010b). 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. Solar: Solar Radiation in J/m² at Gdynia station, 54°31' N, 18°33' E, 22 m above sea level from IMGW (2010). 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	Solar
Jan	0,7	-0,4	87	103	31	22	3	5838
Feb	0,5	+0,3	90	56	104	21	3	10052
Mrz	3,2	+1,1	88	89	132	4	-	21364
Apr	7,7	+2,7	81	175	12	-	-	58471
Mai	11,1	+1,4	81	111	170	-	-	59828
Jun	13,4	-0,7	82	101	88	-	-	53189
Jul	18,1	+1,9	79	102	89	-	-	59133
Aug	18,5	+2,0	76	119	40	-	-	59259
Sep	15,6	+2,0	76	132	55	-	-	35895
Okt	8,8	-1,1	78	78	125	-	-	15520
Nov	7,2	+1,9	89	64	143	1	-	7189
Dez	1,3	-0,7	90	74	84	12	4	3460

Tab. 2

Summen der Tagesmittel der Lufttemperatur an der Wetterstation Warnemünde. Die Kältesumme (KS) ist das Zeitintegral der Lufttemperatur unterhalb der Linie $t = 0\text{ °C}$, in $\text{K} \cdot \text{d}$, die Wärmesumme (WS) das entsprechende Integral oberhalb der Linie $t = 16\text{ °C}$. Zum Vergleich sind die entsprechenden Mittelwerte 1948 bis 2009 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 $t = 0\text{ °C}$, in $\text{K} \cdot \text{d}$, the 'heat sum' (WS) is the corresponding integral above the line $t = 16\text{ °C}$. For comparison, the corresponding mean values 1948 - 2009 are given

Monat	KS 2008/09	Mittelwert	Monat	WS 2009	Mittelwert
November	0,0	2,6 ± 6,4	April	1,2	1,0 ± 2,4
Dezember	6,3	21,5 ± 26,5	Mai	2,0	4,9 ± 5,6
Januar	20,3	38,5 ± 39,7	Juni	6,0	23,0 ± 14,8
Februar	6,2	31,5 ± 39,0	Juli	76,1	54,1 ± 33,9
März	0,0	8,4 ± 12,1	August	104,7	51,7 ± 32,6
April	0,0	0,0 ± 0,2	September	18,4	11,5 ± 12,3
			Oktober	0,0	0,4 ± 1,2
Σ 2008/2009	32,8	102,6 ± 79,9	Σ 2009	208,4	146,6 ± 68,6

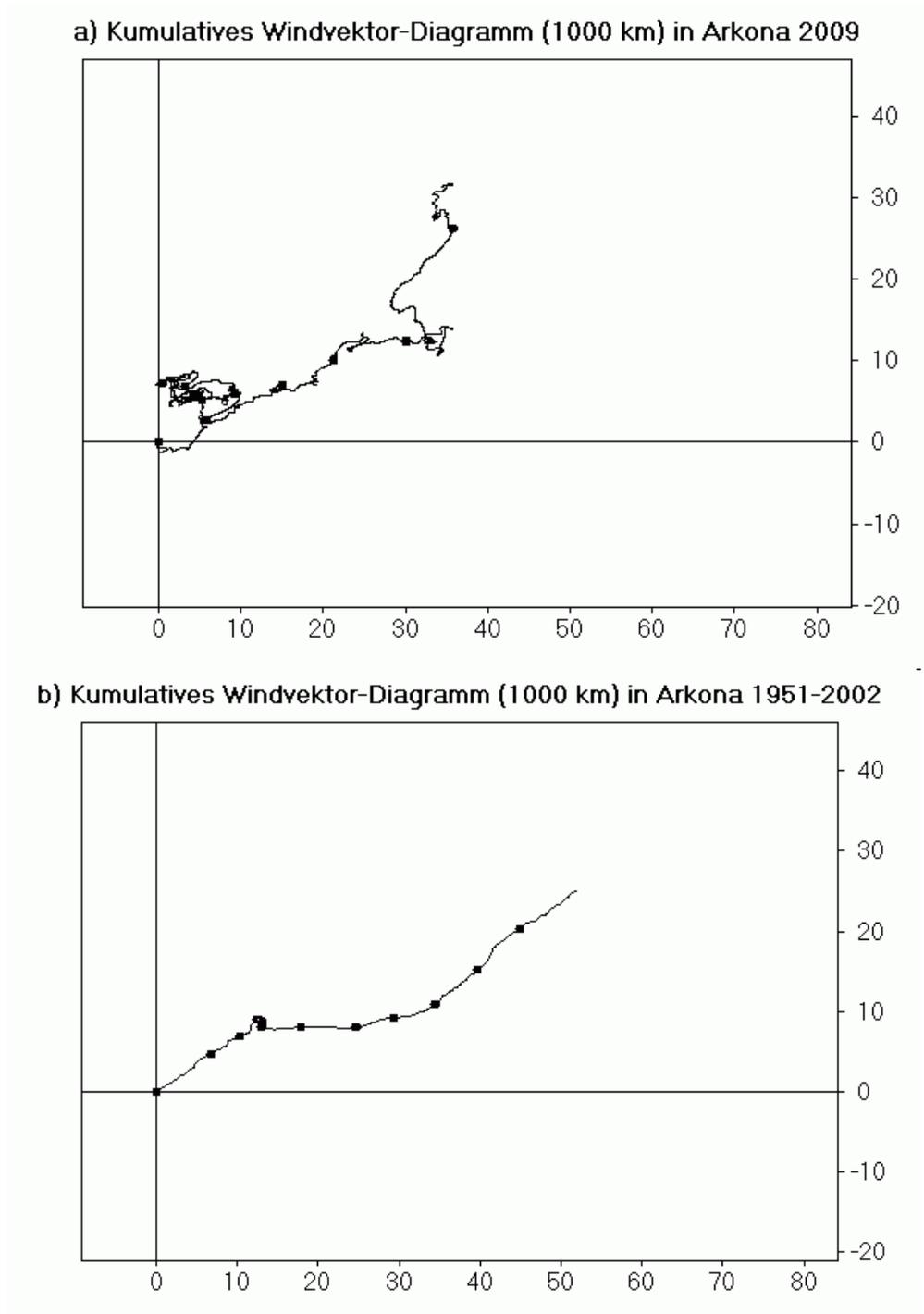


Abb. 3

Fortschreitende Vektordiagramme der Windgeschwindigkeit an der Wetterstation Arkona (nach Daten des DWD, 2010b), in 1000 km, positiv nach nördlichen und östlichen Richtungen. a) 2009, 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, 2010b), in 1000 km, positive in northerly and easterly directions. a) 2009, b) long-term average. The first day of each month is encircled

Abb. 3 zeigt die Windentwicklung mit Hilfe fortschreitender Vektordiagramme (PVD) für die Station Arkona, wobei die Trajektorie durch zeitliche Integration des Windvektors am Ort entsteht. Das Jahr 2009 ist dargestellt im Vergleich mit dem klimatischen mittleren Wind der Jahre 1951 bis 2002. Die Kurve für 2009 (34 000 km nach Osten, 31 000 km nach Norden) weicht von der des klimatischen Mittelwerts (52 000 km nach Osten, 25 000 km nach Norden) erheblich ab. Die meridionale Windkomponente war 2009 im Mittel stärker, die zonale viel schwächer als im Langzeitmittel. Die häufigen Blockierungslagen zeigen sich in überdurchschnittlich vielen und langen Windsituationen aus Süd, Ost und Nord. So beginnt die PVD-Kurve mit einem fast durchschnittlichen Januar. Der mittlere Windvektor für den Zeitraum Februar bis Juli war dagegen praktisch Null. Dieser Verlauf ist typisch für Blockierungslagen wie sonst während der Eisheiligen, aber ganz ohne das klimatologische Sommerplateau mit Westwind. Ab Anfang Oktober überwogen wieder Blockierungslagen, mit dominierenden Südkomponenten im November und Dezember. Der mittlere Betrag der Windgeschwindigkeit ist 6,9 m/s, siehe Abb. 4, der Betrag des mittleren Windvektors ist 1,5 m/s. Beide Werte sind geringer als die entsprechenden klimatologischen Mittel von 7,1 m/s und 1,9 m/s (HAGEN und FEISTEL, 2008). 2009 war also auch ein unterdurchschnittlich windiges Jahr. Markante Stürme sind nur im Juni, Oktober und November zu erkennen, besonders ruhig waren dagegen der Mai und August (Abb. 4a).

Die klimatische Windkurve in Abb. 3b ist erwartungsgemäß glatter als die der einzelnen Jahre. Sie besteht aus einer Winterphase mit Südwestwind, die im Mai endet und im September langsam neu wieder einsetzt. Die Sommerphase dagegen besitzt keine meridionale Komponente und verläuft deshalb parallel zur x-Achse. Die auffälligste Struktur jedoch ist der kleine Knick, bei dem der Wind 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).

Barotrope Einstromereignisse mit geschätzten Volumen um 200 km³ fanden in der Ostsee 2009 zwei Mal statt, im September/Oktober und im November. Im Gotlandbecken zwischen 174 m und 219 m Tiefe wurde von einer Verankerung 2009 das thermische Abklingen des warmen Einstroms vom März 2007 registriert. Anfängliche Spitzenwerte von ca. 7 °C gingen im Laufe der Jahre 2008 und 2009 unter ausklingenden Fluktuationen allmählich auf etwa 6,3 °C zurück. Beobachtungen von erneuten thermischen Einstromsignalen liegen nicht vor. Die seit Herbst 1997 registrierte „Warmzeit“ der sogenannten „Hagen-Kurve“ hält somit in diesem Tiefenwasser seit über 10 Jahren an, vgl. Kapitel 6, Abb. 21.

Die Verhältnisse im zentralen Tiefenwasser waren 2009 einerseits noch immer geprägt durch die Nachwirkungen der warmen und kalten Einströme 2002 und 2003 (FEISTEL et al., 2003a, b; NAUSCH et al., 2004; FEISTEL et al., 2004a, b, 2006a, b, c), vgl. Kapitel 6. Jedoch deuteten schon 2006 – 2008 mehrere Indizien auf erneute barokline und barotrope

Einströme geringer Stärke hin, die nur zum Teil in einzelnen Schüben und mit unterschiedlichen Eigenschaften auch die zentrale Ostsee erreichten. So konnte von den vier barotropen Signalen im Landsortpegel 2009 keines im Tiefenwasser des Bornholmbeckens oder im Gotlandbecken identifiziert werden. Das relativ starke Einstromsignal von Ende November 2009 wurde erst in Januar 2010 im Bornholmbecken nachgewiesen. Nach dem jetzigen Kenntnisstand erfolgen die kleinen barotropen, also sturmgetriebenen Einstromprozesse hauptsächlich auf dem kurzen Weg durch den Sund in das Arkonabecken. Die baroklinen Ereignisse dagegen erfolgen bevorzugt über die Darßer Schwelle wegen der zu geringen Tiefe der Drogdenschwelle im Sund. Der relativ starke barokline Einstrom im April/Mai 2009 hat ebenfalls keine wesentliche Signatur im Bornholmbecken hinterlassen.

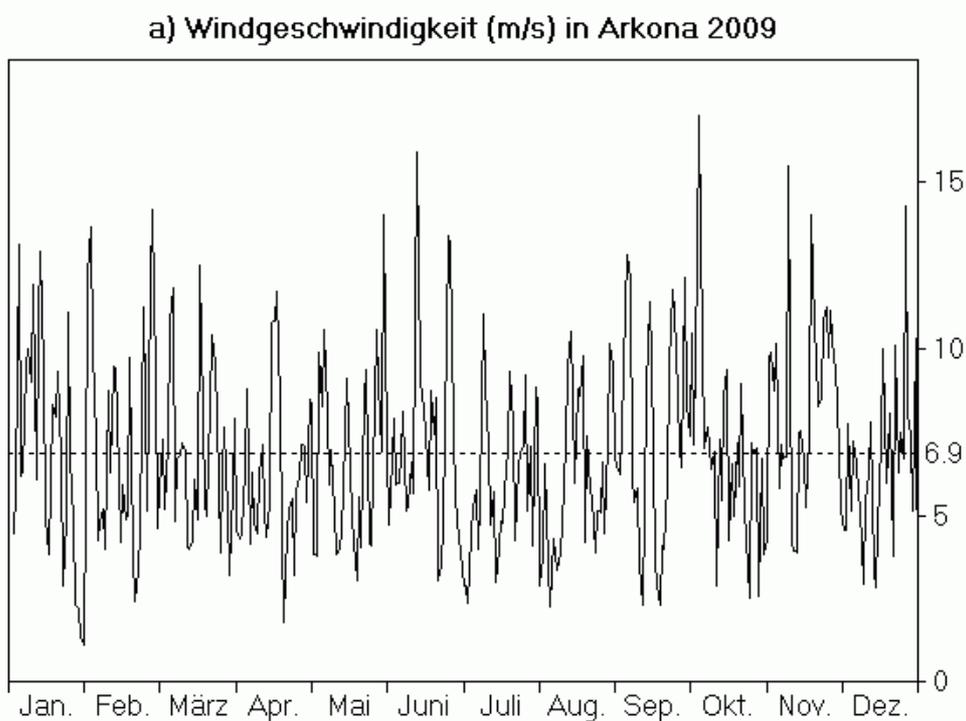


Abb. 4

Windmessungen an der Wetterstation Arkona (nach Daten des DWD, 2010b). a) Tagesmittelwerte der Windgeschwindigkeit in m/s, Jahresmittelwert 6,9 m/s gestrichelt. b) Tagesmittelwerte der Ostkomponente (Westwind positiv), Jahresmittelwert 1,1 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, 2010b). a) Daily means of wind speed, in m/s, the dashed line is the annual average of 6.9 m/s. b) Daily means of the eastern component (westerly wind positive), the dashed line is the annual average of 1.1 m/s. The line in bold is filtered with a 10-days exponential memory

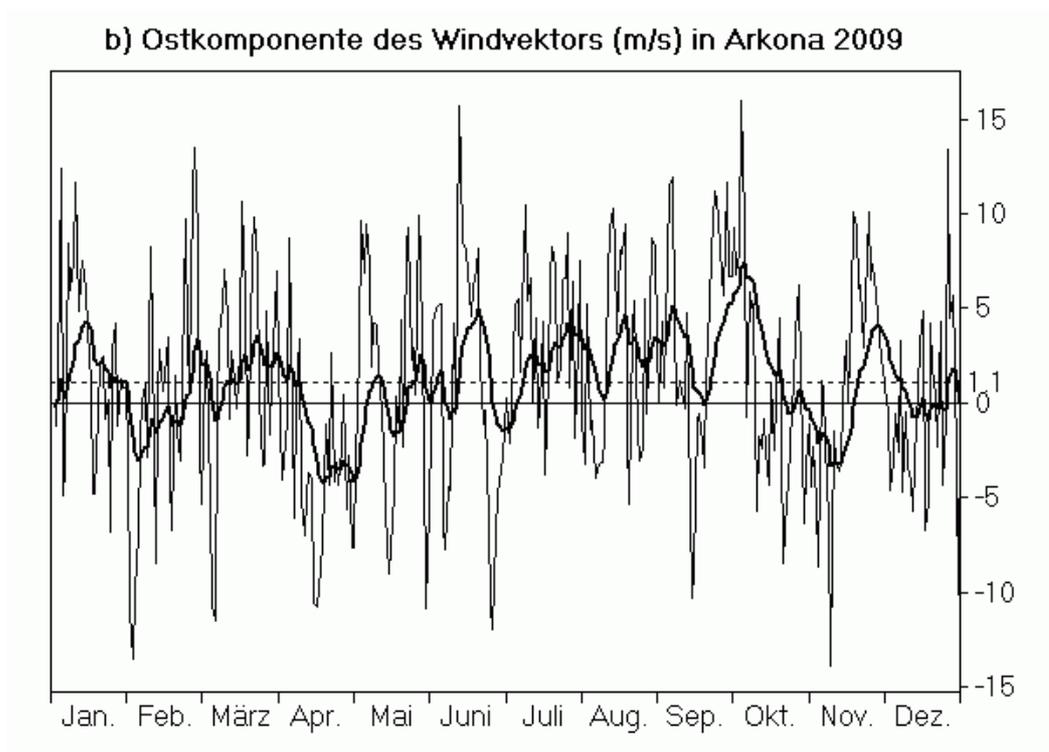


Abb. 4 Forts.

Windmessungen an der Wetterstation Arkona (nach Daten des DWD, 2010). a) Tagesmittelwerte der Windgeschwindigkeit in m/s, Jahresmittelwert 6,9 m/s gestrichelt. b) Tagesmittelwerte der Ostkomponente (Westwind positiv), Jahresmittelwert 1,1 m/s gestrichelt. Die fett gezeichnete Linie ist mit einem exponentiellen Gedächtnis von 10 Tagen gefiltert

Fig. 4 cont

Wind measurements at the weather station Arkona (from data of DWD, 2010). a) Daily means of wind speed, in m/s, the dashed line is the annual average of 6.9 m/s. b) Daily means of the eastern component (westerly wind positive), the dashed line is the annual average of 1.1 m/s. The line in bold is filtered with a 10-days exponential memory

Die mittlere Windgeschwindigkeit an der Station Arkona lag 2009 mit 6,9 m/s unter denen der Vorjahre zwischen 7,1 m/s im Jahr 2003 (NAUSCH et al., 2004) und 7,8 m/s im Jahr 2008 (NAUSCH et al., 2009). Als Windspitzen der Stundenwerte über 20 m/s traten 2009 auf 20,5 m/s am 18.11. aus SSW (Tief „Jürgen“) und 22,5 m/s am 26.12. aus W (Tief „Yann“). Die Spitzenwerte von 2000 (30 m/s) und 2005 (26,6 m/s) wurden damit deutlich verfehlt.

Der Füllungsgrad der Ostsee wird gut durch den Pegel an der schwedischen Station Landsort beschrieben (Abb. 5a, nach Daten des SMHI, 2010). 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., 2008). Beide Pegel wurden für mehr als zwei Jahre parallel betrieben und zeigen nahezu identische Mittelwerte bei natürlichen Abweichungen auf kurzen Zeitskalen (Wellen, Seiches). 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 $L + 500 \text{ cm} = 0,99815 \times L_N + 0,898 \text{ cm}$ 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.

Die markantesten Signale im Verlauf des Landsortpegels 2009 sind der hohe Pegel Anfang Oktober und die beiden Niedrigpegel Ende April und Anfang November, und dazwischen der kräftige anhaltende Ausstrom im Oktober, bei dem der Pegel um 83 cm fiel. Der Spitzenpegel im Oktober betrug 723 cm am 5.10. nach Durchzug des Sturms „Sören“.

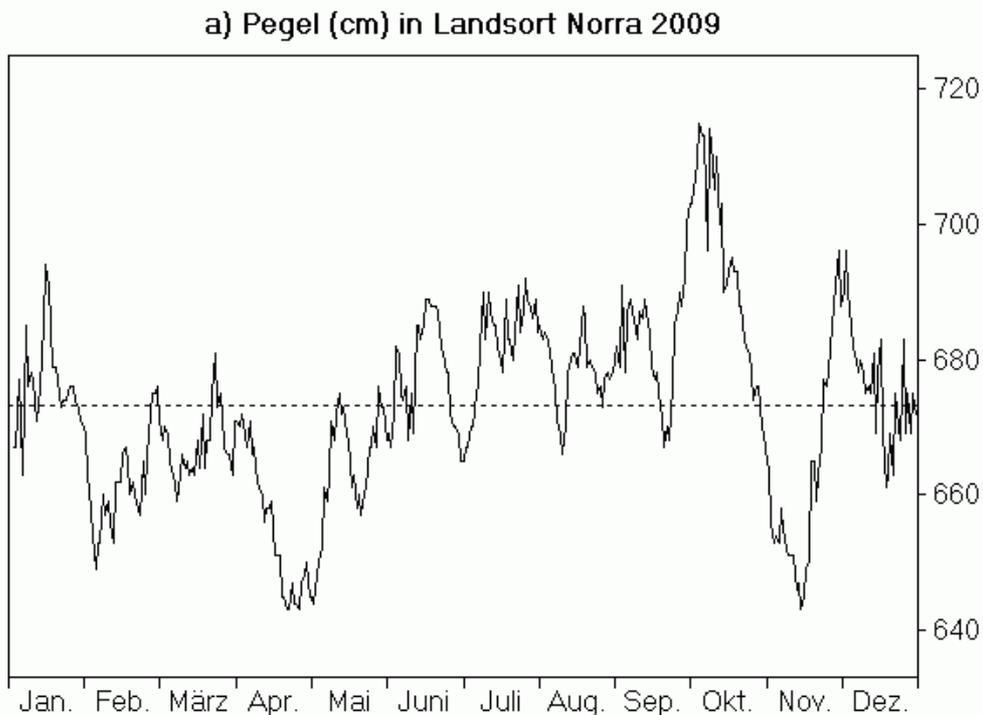


Abb. 5

a) Pegel bei Landsort als Maß für den Füllungsgrad der Ostsee (nach Daten des SMHI, 2010).
 b) Stärke des Nordwestwinds (positiv) an der Wetterstation Arkona (nach Daten des DWD, 2010b). 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, 2010).
 b) Strength of the north-west wind (positive) at the weather station Arkona (from data of DWD, 2010b). The bold curve appeared by filtering with an exponential 10-days memory

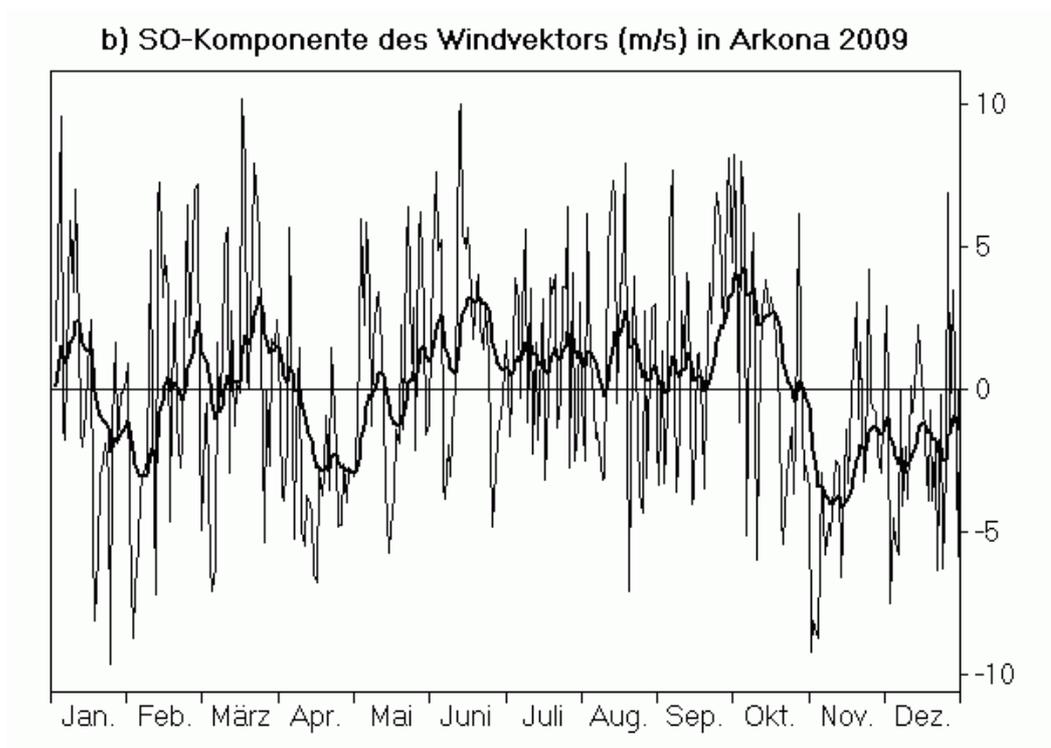


Abb. 5 Forts.

a) Pegel bei Landsort als Maß für den Füllungsgrad der Ostsee (nach Daten des SMHI, 2010).
 b) Stärke des Nordwestwinds (positiv) an der Wetterstation Arkona (nach Daten des DWD, 2010b). Die fett gezeichnete Kurve entstand durch Filterung mit einem exponentiellen 10-Tage-Gedächtnis

Fig. 5 cont

a) Sea level at Landsort as a measure of the Baltic Sea fill factor (from data of SMHI, 2010).
 b) Strength of the north-west wind (positive) at the weather station Arkona (from data of DWD, 2010b). The bold curve appeared by filtering with an exponential 10-days memory

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., 2008).

Kleinere barotrope Einstromereignisse sind 2009 zu erkennen an den Anstiegen um 34 cm in 8 Tagen vom 3. bis 11. Mai, um 25 cm in 5 Tagen vom 4. bis 9. Juli, um 55 cm vom 23.

September bis zum 3. Oktober in 10 Tagen, und um 58 cm in 15 Tagen vom 15. bis 30. November. Mit der empirischen Näherungsformel (NAUSCH et al., 2002; FEISTEL et al., 2008) $\Delta V / \text{km}^3 = 3,8 \times \Delta L / \text{cm} - 1,3 \times \Delta t / \text{d}$ erhalten wir aus den Werten des Pegelunterschieds ΔL in cm und der Einstromdauer Δt in Tagen als Schätzungen für das eingeströmte Volumen $\Delta V = 120 \text{ km}^3$ im Mai, 89 km^3 im Juli, 196 km^3 im September/Oktober und 201 km^3 im November. Obwohl sich der Einstrom im November weder von der Dauer noch vom Volumen her wesentlich von vorhergehenden ähnlichen Ereignissen abhebt, kann er doch als das wichtigste Einstromereignis seit dem großen Einstrom vom Januar 2003 eingeschätzt werden. Insbesondere durch den Sund drang schnell eine größere Menge sehr salzreichen Wassers aus dem Kattegat in das Arkonabecken vor. Die MARNET-Boje im Arkonabecken registrierte die höchsten Salzgehalte (über 22 g/kg) in Bodennähe seit ihrer Inbetriebnahme im Spätsommer 2003. Mit maximal etwa 17 g/kg wurden am Messmast der Darßer Schwelle in diesem Zeitraum jedoch keine vergleichbar hohen Werte beobachtet.

3. Wasseraustausch durch die Ostseezugänge/ Beobachtungen an der Messplattform "Darßer Schwelle"

Die kontinuierlichen Messungen der Wassertemperatur und des Salzgehaltes sowie der Strömungsgeschwindigkeit wurden an der Station „Darßer Schwelle“ fortgesetzt. Die Sauerstoffsonden des Typs S-14 der Firma Züllig (Schweiz) wurden Ende April durch Sauerstoff-Optoden der Firma Aanderaa (Norwegen) ersetzt, da diese sich aufgrund des optischen Messprinzips bereits an der Station „Oderbank“ als zuverlässiger und stabiler erwiesen haben. Die Messungen finden nach wie vor in 7 m und 19 m Tiefe am Messmast statt. 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. 6a gezeigten Temperaturverlaufs an der Darßer Schwelle sind in Tab. 3 aufgeführt und in Abb. 7 grafisch dargestellt. Die hohen Jahresmittelwerte der in den verschiedenen Tiefen ermittelten Wassertemperaturen für 2009 spiegeln ein weiteres überdurchschnittlich warmes Jahr wider, obwohl die Rekordwerte des Jahres 2007 nicht ganz erreicht wurden. Damit fallen die an der Oberfläche und am Boden gemessenen Höchsttemperaturen an der Darßer Schwelle (mit einer Ausnahme im Jahr 2002) alle in den Zeitraum 2006-2009. Im Unterschied zu den Vorjahren sanken die Wintertemperaturen bis auf Werte um 2 °C zu Ende Februar, so dass der hohe Mittelwert des

Jahres 2009 vor allem als ein Resultat des ausgeprägten sommerlichen Temperaturplateaus, das sich aufgrund des durch das Hoch „Petra“ verursachten Altweibersommers bis zum Ende des Monats September erstreckt, interpretiert werden kann (Abb. 6a).

Wie aus den in Tab. 4 dargestellten Ergebnissen der Fourier-Analyse hervorgeht, führen die aufgrund von Durchmischung auf allen Tiefenniveaus niedrigen Wintertemperaturen zu einer ausgeprägten Amplitude des Jahresganges, wobei in 17 m Tiefe die höchsten und in 19 m die zweithöchsten Amplitudenwerte seit Beginn der Statistik im Jahr 1992 erreicht werden. Die Amplitude der Oberflächentemperatur bleibt allerdings deutlich unter dem Rekordwert des Jahres 2006 zurück, welches durch einen außergewöhnlich starken Kontrast von warmen Sommer- und kalten Wintertemperaturen geprägt war. Vergleichsweise hohe Werte finden sich auch in den in Tab. 3 und Abb. 7 dargestellten Standardabweichungen der oberflächennahen Wassertemperaturen, wobei in 17 m Tiefe der Rekordwert erreicht wird. Da die Standardabweichungen von der Amplitude des Jahresganges dominiert werden, ist dieses Ergebnis allerdings kaum mehr als eine direkte Konsequenz des ausgeprägten Jahresganges im Jahr 2009. Die Standardabweichungen der bodennahen Sensoren werden ebenfalls vom Jahresgang dominiert, zeigen aber im Allgemeinen eine geringere Amplitude, was auf die Filterung der atmosphärischen Wärmeflüsse durch zwei physikalische Effekte zurückgeführt werden kann: (a) einer Dämpfung des lokalen atmosphärischen Signals durch die Dichteschichtung der Wassersäule und (b) einer Dämpfung des Temperatursignals von lateral durch Einströme herangeführtem Nordseewasser durch Vermischung mit dem Brackwasser der Ostsee. Der Transport von Nordseewasser durch die Beltsee führt neben einer Dämpfung des Temperatursignals auch zu einer zeitlichen Verzögerung.

Nach den Bewuchsproblemen, die im Vorjahr zu einem erheblichen Datenverlust bei den Salinitäten geführt hatten, steht für das Jahr 2009 nun wieder ein vollständiger Datensatz zur Verfügung. Die Deckschichtsalinität und ihre Standardabweichung liegen im oberen Bereich der in Tab. 3 und Abb. 8 dargestellten Werte und weisen somit auf eine deutliche Einstromaktivität an der Darßer Schwelle hin. Obwohl zahlreiche dieser Einstromereignisse baroklin geprägt waren (d.h. durch Dichteunterschiede getrieben), zeigen die bodennahen Sensoren im Jahresvergleich nur durchschnittliche Salinitäten und Standardabweichungen (Tab. 3 und Abb. 8). Wie weiter unten ausgeführt, zeigt eine genauere Analyse allerdings, dass daraus nicht geschlossen werden darf, dass im Jahr 2009 keine wichtigen Einströme stattgefunden haben, da die Station DS die besonders salzreichen Einströme über den Sund nicht erfasst.

Tab. 3

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

Tab. 3

Annual mean values and standard deviations of temperature (T) and salinity (S) at the Darss Sill – Maxima in bold

Jahr	7 m Tiefe		17 m Tiefe		19 m Tiefe	
	T °C	S g/kg	T °C	S g/kg	T °C	S g/kg
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 ± 4,39	9,30 ± 1,28	9,66 ± 4,10	10,94 ± 1,97	9,63 ± 4,08	11,39 ± 2,00
2008	9,85 ± 5,00	9,53 ± 1,74	9,30 ± 4,60	-	9,19 ± 4,48	-
2009	9,65 ± 5,43	9,39 ± 1,67	9,38 ± 5,09	11,82 ± 2,47	9,35 ± 5,04	12,77 ± 2,52

Tab. 4

Amplituden (in K) und Phasen (umgerechnet in Monate) des Jahresganges der Temperatur in verschiedenen Tiefen auf der Darßer Schwelle. Die Phase entspricht hier der Zeitverschiebung zwischen dem sommerlichen Temperaturmaximum und dem Jahresende

Tab. 4

Amplitude (K) and phase (converted into months) of the yearly cycle of temperature measured at the Darss Sill in different depths. Phase corresponds to the time lag between temperature maximum in summer and the end of the year

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
2008	6,84	4,60	6,23	4,31	6,08	4,24
2009	7,55	4,57	7,09	4,37	7,03	4,32

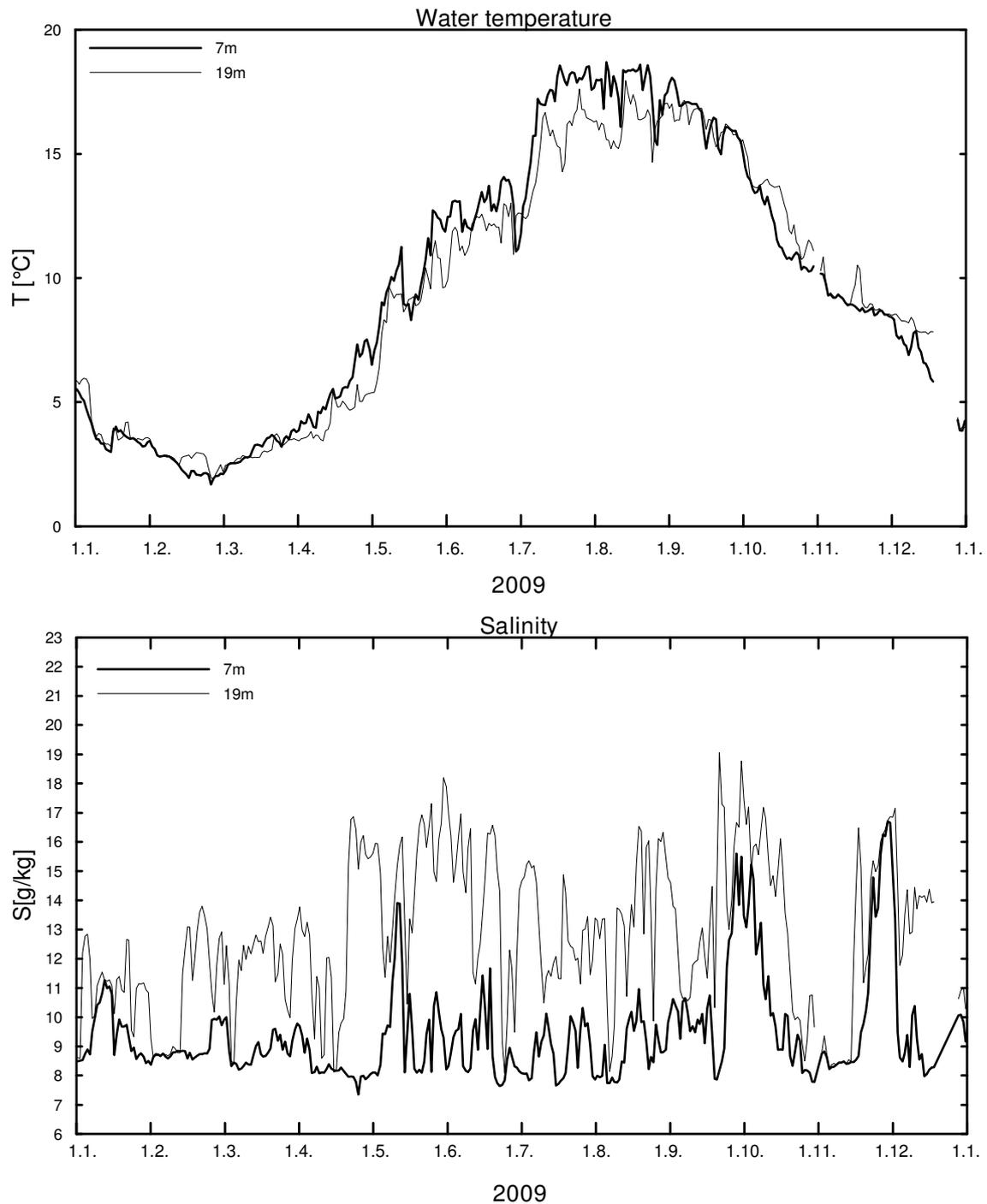


Abb. 6

Verlauf der Wassertemperatur (a) und des Salzgehaltes (b) in der Deck- und Bodenschicht auf der Darßer Schwelle im Jahre 2009

Fig. 6

Water temperature (a) and salinity (b) measured in the surface layer and near bottom layer at the Darss Sill in 2009

Der Verlauf der Wassertemperatur des Jahres 2009 für die Deckschicht (7 m Tiefe) und die bodennahe Schicht (19 m Tiefe) ist in Abb. 6a dargestellt. Ende Februar sanken die Temperaturen bis auf Werte um 2 °C, was deutlich unterhalb der Tiefstwerte der beiden Vorjahre, aber nur knapp oberhalb der Temperaturen des kalten Winters 2005/2006 liegt. Obwohl der Winter 2008/2009 in der in Kapitel 2 vorgestellten meteorologischen Analyse als relativ mild eingestuft wurde, kam es zu Anfang des Jahres mehrmals zum Transport von arktischer Kaltluft über die Ostsee während sogenannter Blockierungswetterlagen, was im Resultat zu einer ungewöhnlich starken Abkühlung der Wassersäule im Januar und Februar beigetragen hat.

Von März bis Juli fand ein kontinuierlicher Temperaturanstieg statt, wobei aufgrund des kühlen Frühsommers bis Anfang Juli die Marke von 15 °C nicht erreicht wurde. Der dann einsetzende Wetterumschwung ließ die Temperaturen in der Folge allerdings sprunghaft bis auf Werte um 18 °C ansteigen. Dieser Plateauwert für den Sommer 2009 wurde dann im Tagesmittel nicht mehr überschritten bis gegen Ende September die herbstliche Abkühlung zu einem kontinuierlichen Absinken der Temperaturen führte.

Östliche Winde im Mai und Juni (Abb. 3b) korrelieren mit zwei kurzzeitigen Temperatureinbrüchen um bis zu 5 °C, was auf die laterale Advektion von kalten Filamenten aus den Auftriebsgebieten nahe Rügen und Hiddensee schließen lässt. Temperatureinbrüche dieser Art sind auch in den vorangegangenen Jahren beobachtet worden, im Vorjahr zum Beispiel während zweier Ereignisse im August. Ab Ende September führte der Wärmeverlust der Atmosphäre zu einer zügigen Abkühlung bis auf Werte unter 5 °C zum Ende des Jahres. Die unten besprochenen Einstromereignisse im Oktober und November brachten älteres (und damit wärmeres) Wasser aus der Nordsee mit sich und führten an der Station DS zu einer leichten Inversion der Temperaturschichtung.

Der in Abb. 6b dargestellte Verlauf des Oberflächen- und Bodensalzgehaltes an der Darßer Schwelle zeigt Manifestationen zahlreicher Einstromereignisse, wobei die höchsten Salzgehalte des Jahres (mehr als 19 g/kg am Boden) während eines barotropen Einstroms Anfang Oktober beobachtet wurden. Ausgeprägte barotrope Einstromereignisse wurden in diesem Jahr auch Anfang Januar, Anfang Mai und Mitte November beobachtet, wobei die beiden Ereignisse in der zweiten Jahreshälfte deutlich intensiver waren als die vorhergehenden. Alle Ereignisse korrelieren mit starken Westwindlagen (Abb. 4) und schnellen Pegelanstiegen bei Landsort (Abb. 5).

Von zahlreichen, teilweise starken Windereignissen unterbrochen, war der Zeitraum von Mitte Februar bis Anfang April von kleineren baroklinen und barotropen Einströmen geprägt. Während dieser Periode erholte sich der Pegel bei Landsort intermittierend bis auf den Durchschnittswert. Der Umbruch auf östliche Winde ab etwa Anfang April (Abb. 4b) führte dann aber zu Ausstrom, einem rapiden Pegelabfall (Abb. 5a) und zu einer Unterbrechung des baroklinen Einstromsignals an der Darßer Schwelle. Mit Abnahme des Ostwindes setzte sich der barokline Einstrom von Mitte April bis Anfang Mai mit erhöhter Intensität fort und

fürte schließlich sogar zu einer Kompensation des oberflächennahen Ausstroms: Der Pegel bei Landsort stagnierte (Abb. 5a).

Getrieben durch das mit dem Tief „Adheld“ verbundene Umschlagen der Winde auf westliche Richtungen, mischte sich dem Einstrom ab Anfang Mai eine starke barotrope Komponente bei, sodass sich der Pegel bei Landsort in der ersten Maihälfte kurzfristig bis auf den Neutralwert erhöhte.

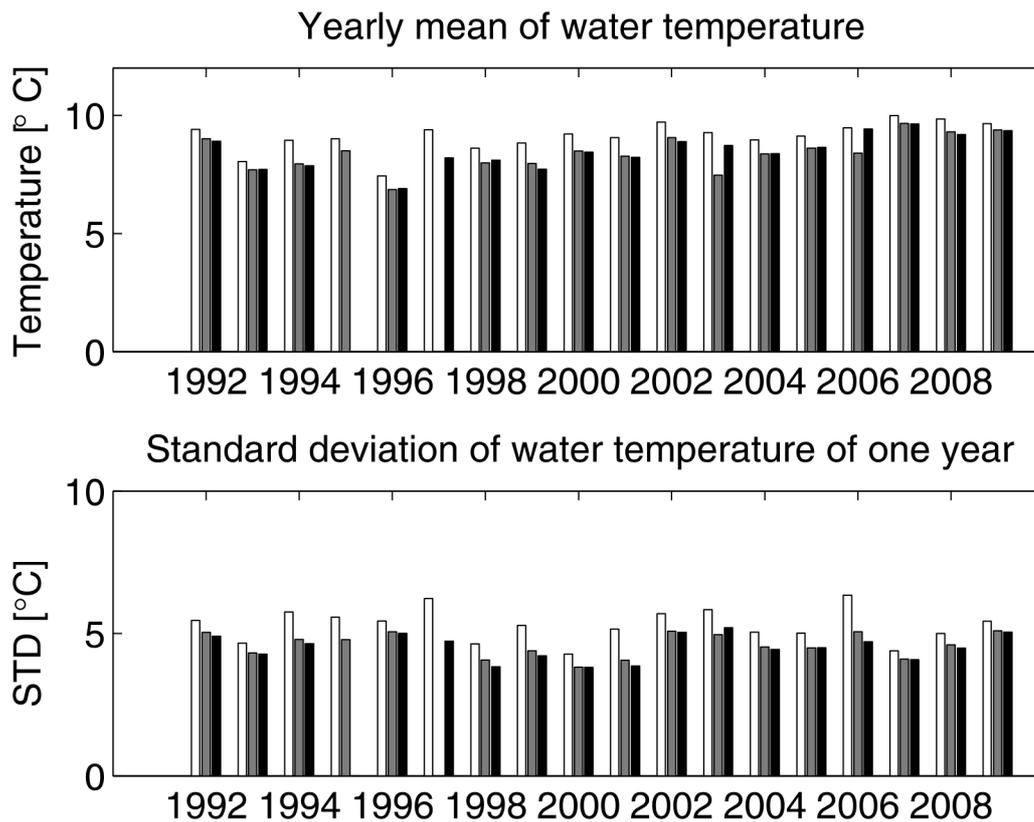


Abb. 7

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 the bottom layer (17 m, grey bar and 19 m, black bar) at the Darss Sill

Die nachfolgenden Sommermonate von Mitte Mai bis Mitte September waren von kurzfristigen Pegelfluktuationen um den Mittelwert geprägt, die mit zahlreichen kleineren Einströmen einhergingen. Die persistenten Salinitätsunterschiede zwischen Boden und Deckschicht weisen dabei auf den Einfluss barokliner Effekte hin, wobei die höchsten Bodenwerte um 16 g/kg Ende Mai / Anfang Juni gemessen werden. Bemerkenswert im Juni war eine fast vollständig durchgreifende Vermischung der Wassersäule, die mit den für sommerliche Verhältnisse extremen Windgeschwindigkeiten des Orkantiefs „Martin“ verbunden war. Die durch diese Vermischung aufgebauten baroklinen Druckgradienten führten aber innerhalb weniger Tage zu einer Restratifizierung durch bodennahen Einstrom. Der stagnierende Pegel im Monat Juli wurde Anfang August durch vergleichsweise schwache, aber stabile Ostwinde abgesenkt, was in der Folge zu einem kurzfristigen Abbruch der baroklinen Einstromaktivität führte (Abb. 6b). Danach wurden bis etwa Mitte September wieder hohe Bodensalzgehalte um 16 g/kg gemessen.

Ein weiteres durch eine kurze und kräftige Ostwindlage verursachtes Absinken des Pegels bei Landsort unterbrach ab etwa Mitte September diese barokline Einstromperiode und schaffte die Ausgangslage für eines der stärksten barotropen Einstromereignisse des Jahres. Das Umschlagen der Winde auf westliche Richtungen (Abb. 4b) führte Anfang Oktober zu den höchsten Pegelständen des Jahres (Abb. 5a) und den höchsten Bodensalzkonzentrationen an der Darßer Schwelle (Abb. 6b). Mit dem Abklingen der Windgeschwindigkeiten bekam das Einstromereignis bis Mitte Oktober einen zunehmend baroklinen Charakter, wobei die kurzfristig stagnierenden Pegelstände auf eine Kompensation von barotropem Ausstrom und baroklinem Einstrom hinweisen. Ab Mitte Oktober fiel mit dem Wechsel der Windrichtung der Ostseepegel rapide ab und erreichte in der zweiten Novemberwoche Werte, die mit den Tiefstwerten des Jahres Ende April vergleichbar sind. Infolge des mit der Pegelabsenkung verbundenen Ausstroms brach die barokline Einstromaktivität völlig zusammen. Dies war die Ausgangssituation für den nun folgenden wichtigsten Einstrom des Jahres 2009.

Ab Mitte November drehen die Winde bei stark anwachsenden Windgeschwindigkeiten wieder auf westliche Richtungen und verursachen in Kombination mit dem starken Pegelgefälle einen ausgeprägten barotropen Einstrom. Die Salzkonzentrationen an der Darßer Schwelle lagen zwar etwas unter den Anfang Oktober beobachteten Werten, aber die weiter unten besprochenen Daten der MARNET-Station im Arkonabecken (Kapitel 4) legen nahe, dass zeitgleich Wasser mit deutlich höherer Salinität und Dichte durch den Sund eingeströmt war.

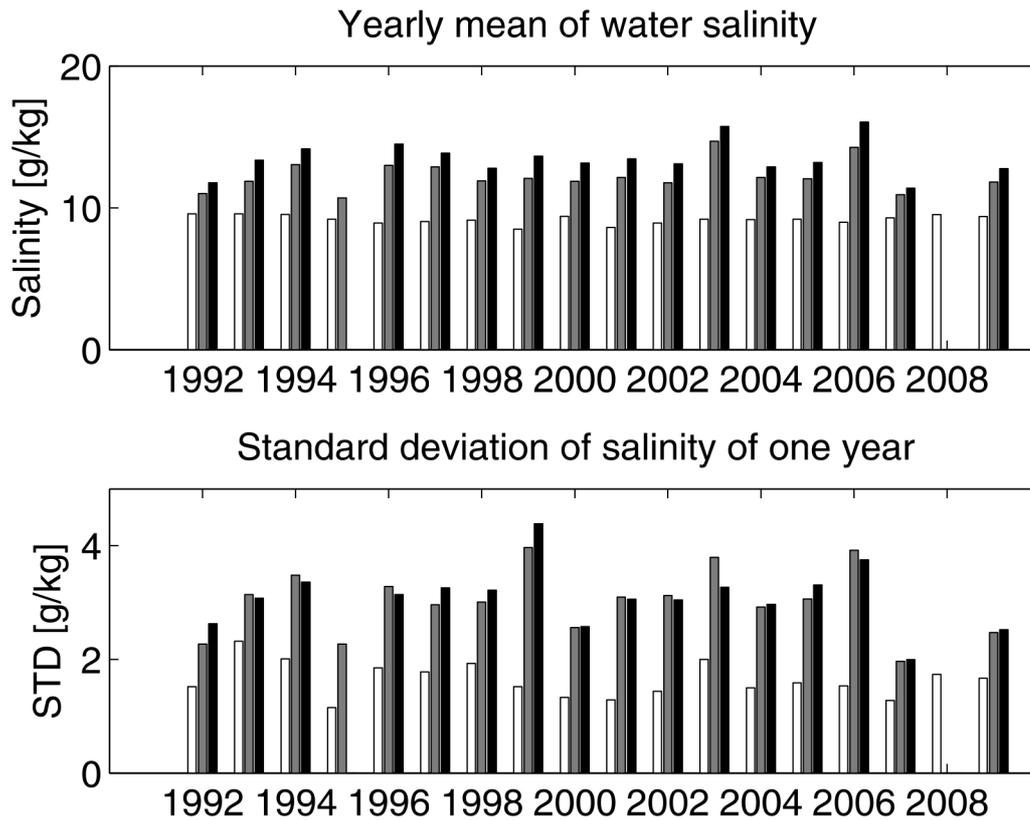


Abb. 8

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 the bottom layer (17 m, grey bar and 19 m, black bar) at the Darss Sill

Der Sauerstoffgehalt des Oberflächenwassers (Abb. 9) schwankte während des ganzen Jahres um die Sättigungskonzentration und wies damit einen vor allem durch die Wassertemperatur aufgeprägten Jahresgang mit einem Minimum im Spätsommer auf. Hingegen werden die Sauerstoffkonzentrationen der tieferen Wasserschichten vor allem durch Sauerstoffzehrungsprozesse in den Sedimenten der Beltsee und des Arkonabeckens gesteuert, wobei Algenblüten und hohe Sedimenttemperaturen während der warmen Jahreszeit den sedimentären Sauerstoffbedarf erhöhen. Das durch diesen Prozess verursachte Sauerstoffdefizit wurde durch die starken barotropen Einströme im Oktober und November und durch den baroklinen Einstrom im Mai soweit kompensiert, dass sich oberflächen- und bodennahe Sauerstoffkonzentrationen nahezu angleichen (Abb. 9).

Kurzfristige Einbrüche in der Sauerstoffkonzentration an der Darßer Schwelle lassen sich darauf zurückführen, dass die spezifische Sauerstoffzehrung in der Wassersäule mit dem

Verhältnis von Sedimentfläche zu Wasservolumen zunimmt und damit in den flachen Gebieten der Beltsee stärker ausgeprägt ist als in den tieferen Becken. Bei kurzen Einstromereignissen und in der ersten Phase starker Einströme wird durch diesen Effekt sauerstoffarmes Bodenwasser aus dem Belt zur Messstation an der Darßer Schwelle transportiert und dort als ein lokaler Einbruch des Sauerstoffgehalts registriert. Typische Signale solcher kurzfristiger Sauerstoffeinbrüche finden sich in der ersten Phase des baroklinen Einstroms im April und jeweils vor den barotropen Einströmen Ende September und Mitte November, wobei im letzten Fall ein dem Haupteinstrom vorangehender, kurzer barokliner Einstrom (sichtbar in Abb. 6b als Spitze im Bodensalzgehalt) maßgeblich ist. Die niedrigsten Bodensauerstoffgehalte des Jahres 2009 mit Werten von unter 2 ml/l wurden zu Anfang des Monats August gemessen.

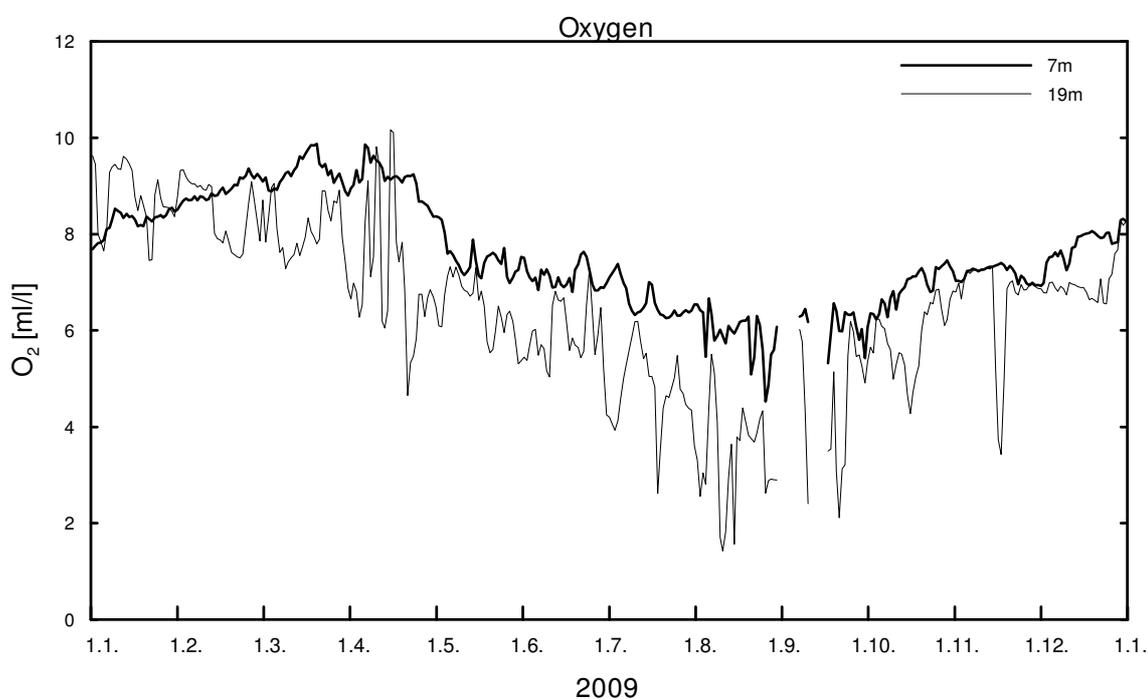


Abb. 9
Verlauf des Sauerstoffgehaltes in der Deck- und Bodenschicht auf der Darßer Schwelle im Jahre 2009

Fig. 9
Dissolved oxygen content measured in the surface and bottom layer at the Darss Sill in 2009

3.2 Strömung

Im Gegensatz zum Vorjahr lieferte das akustische Strömungsmessgerät an der Darßer Schwelle im Jahr 2009 durchgehend Geschwindigkeitsprofile in hoher Qualität. Während des ganzen Jahres waren die mittlere Strömung und ihre Fluktuationen auf der Darßer Schwelle innerhalb der Wassersäule stark kohärent. Zur Charakterisierung des tiefenvariablen, baroklinen Anteils ist die Strömung in 3 m und 17 m Messtiefe zeitlich integriert als „fortschreitendes Vektordiagramm“ (Pseudotrajektorie) in Abb. 10 dargestellt. Diese integrale Darstellungsweise filtert kurzzeitigen Fluktuationen aus den Strömungsmessungen und lässt daher langfristige Periodizitäten in der Strömung besser erkennen. Gemäß dieser Definition entspricht die Strömungsgeschwindigkeit dann der Steigung der in Abb. 10 gezeigten Kurven, wobei eine positive Steigung Einstromsituationen widerspiegelt. Während in der Deckschicht und im Mittel über die komplette Wassersäule ein deutlicher Netto-Ausstrom beobachtet wurde, hielten sich Ein- und Ausstrom in der bodennahen Schicht im Jahr 2009 nahezu die Waage. Letzteres weist auf den wichtigen Beitrag barokliner Druckgradienten für die bodennahen Strömungen über der Darßer Schwelle hin.

Die anhand der in Abb. 6b dargestellten Salzgehalte als besonders markant eingestuften barotropen Einstromereignisse zeigen ihrer Definition entsprechend auch ein deutliches Signal in den Strömungsmesswerten auf allen Tiefenniveaus: Anfang Januar, Anfang Mai, Mitte September und Mitte November kippten die Strömungen jeweils von Ausstrom auf Einstrom um, wobei ein Vergleich mit Abb. 6b den Zeitverzug vom Kentern der Strömung bis zum Erreichen des maximalen Salzgehaltes verdeutlicht, der mit der Vorstellung von lateraler Advektion salzhaltigen Nordseewassers konsistent ist. Die barotropen Drucksignale dieser Einströme breiten sich mit hoher Geschwindigkeit über die gesamte Ostsee aus (bei 50 m Wassertiefe zum Beispiel mit mehr als 20 m/s) und manifestieren sich daher nahezu zeitgleich in den bei Landsort gemessenen Pegelanstiegen (Abb. 5).

Barokline Einstromereignisse hingegen äußern sich vor allem in einer Spreizung der in Abb. 10 dargestellten Kurven für die Deckschicht- und Bodenströmungen. Besonders ausgeprägte Beispiele hierfür sind die baroklinen Einströme Mitte Mai und Anfang Juni, bei denen starker bodennaher Einstrom simultan mit stagnierenden oder sogar auswärts gerichteten Strömungen in der Deckschicht beobachtet wurden. Das generelle Auseinanderdriften der Messreihen der boden- und oberflächennahen Geschwindigkeiten in den Sommermonaten verdeutlicht dabei den wichtigen Beitrag der zahlreichen kleinen baroklinen Einströme, die hier nicht individuell diskutiert werden.

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass Abb. 10 deutliche Anzeichen für eine Abschwächung der bodennahen Strömungen bei den als überwiegend barotrop eingestuften Einströmen aufweist. Die nahezu durchmischte Wassersäule des Einstromereignisses im November legt nahe, dass hier Bodenreibungseffekte – und nicht barokline Effekte – die maßgebliche Rolle spielen.

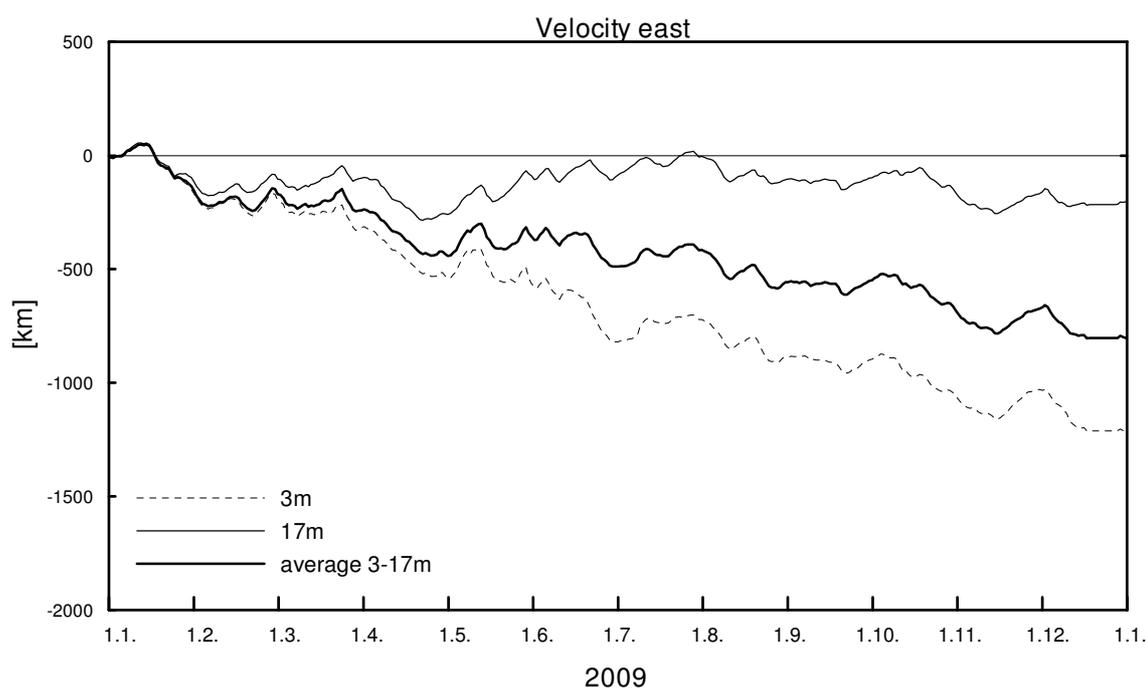


Abb. 10

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 2009

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 2009

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 der von der DFG und dem BMU geförderten Projekte „QuantAS-Nat“ und „QuantAS-Off“ (Quantification of water mass transformation in the Arkona Sea) durchgeführt wurden. Die Ergebnisse beinhalten unter anderem die ersten detaillierten Turbulenz- und Geschwindigkeitsschnitte durch dichtegetriebene Bodenströmungen, die während einiger mittlerer Einstromereignisse in einem Kanal nördlich von Kriegers Flak beobachtet wurden (ARNEBORG et al., 2007; UMLAUF et al., 2007; SELLSCHOPP et al., 2006). In einer kürzlich veröffentlichten Modellstudie haben BURCHARD et al. (2009) die Ausbreitungswege mittlerer Einstromereignisse in den Jahren

2003 und 2004 im Arkonabecken untersucht und die Kanäle nördlich von Kriegers Flak und im Bornholmshgat als Zonen stark erhöhter Vermischung identifiziert. Zur Validierung der Modelldaten wurden unter anderem die in dieser Reihe jährlich vorgestellten Daten aus dem MARNET-Messnetz verwendet. Weitergehende theoretische Untersuchungen, die auf den in QuantAS gewonnenen Daten basieren, haben einen überraschend starken Einfluss der Erdrotation auf die turbulenten Einmischungsprozesse in dichten Bodenströmungen sichtbar gemacht und zu neuen theoretischen Modellen für solche Strömungen geführt (UMLAUF and ARNEBORG 2009 a,b; UMLAUF et al., 2010).

Die Bojenstation "Arkonabecken" befindet sich annähernd 20 sm nordöstlich von Arkona auf 46 m Wassertiefe. Bis auf einige Einschränkungen bei den Sauerstoffmessungen war die Station während des ganzen Jahres 2009 operativ. Ähnlich wie an der Station DS wurden auch hier die alten Sauerstoffsensoren der Firma Züllig Ende April durch Optoden der Firma Aanderaa ersetzt. Aufgrund von unerwartet schwerer Korrosion an den neuen Steckverbindungen beider Optoden liegen für den Zeitraum vom 18. August bis 1. Dezember keine Sauerstoffdaten vor.

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 folgte in ihrem Jahresgang weitgehend dem auf der Darßer Schwelle gemessenen Verlauf (vgl. Abb. 6a). Es gab jedoch auch charakteristische Unterschiede, die besonders im Sommer ausgeprägt waren. Das Maximum der Oberflächentemperatur im Arkonabecken wurde Ende August erreicht. Es liegt mit ca. 20 °C etwas über den höchsten an der Darßer Schwelle gemessenen Temperaturen (Abb. 6a) und gleicht damit den im Vorjahr ermittelten Höchsttemperaturen. Die thermische Schichtung war im Arkonabecken insgesamt ausgeprägter als an der Darßer Schwelle und wechselte von thermisch stabil während der sommerlichen Erwärmungsphase zu thermisch instabil während der kalten Jahreszeit bis Ende März und ab Anfang Oktober.

Nach Erreichen des winterlichen Temperaturminimums Mitte Februar erwärmte sich die Deckschicht zunächst langsam, ab April dann beschleunigt aufgrund der ungewöhnlich hohen im Jahr 2009 für diesen Monat gemessenen Lufttemperaturen. Durch die stabile Dichteschichtung abgekoppelt, stagnierten die bodennahen Temperaturen bis Ende April in der Nähe der Minimaltemperaturen von Mitte Februar. Der vorangegangene starke Anstieg des Salzgehaltes im Januar und Anfang Februar (Abb. 11b) legt nahe, dass die Tiefenwassereigenschaften in den ersten 4 Monaten des Jahres durch das oben beschriebene Einstromereignis im Januar bestimmt wurden. Da sich ab Mitte Mai die Salz- und Dichteschichtung im Arkonabecken weiter verstärkte (Abb. 11b), ist der ab Anfang Mai einsetzende rapide Anstieg der Bodenwassertemperaturen aber mit großer Wahrscheinlichkeit nicht durch eine lokale Erwärmung der Wassersäule zu erklären. Vielmehr kann davon ausgegangen werden, dass die Ankunft einer Serie von gemischt barotrop-baroklinen Einströmen, die von Mitte Mai bis Anfang Juni an der Darßer Schwelle

beobachtet wurden, sich nun in einem Anstieg des Bodensalzgehalts und der Bodenwassertemperatur im Arkonabecken manifestieren.

Nachdem sich die Deckschicht- und Oberflächentemperaturen durch diesen Prozess nahezu angeglichen hatten, setzte das Orkantief „Martin“ Mitte Juni einen Schlusstrich unter diese fröhsommerliche Phase der Tiefenwassererwärmung. Der weitere Verlauf der sommerlichen Temperaturentwicklung spiegelt eine kontinuierliche, lokal durch den atmosphärischen Wärmefluss getriebene Erwärmung der Deckschicht bis zum Anfang August beobachteten Temperaturmaximum wider. Die Bodenschicht konnte der raschen Temperaturentwicklung nicht folgen, da die stabile Schichtung einerseits zu einer starken Unterdrückung des lokalen vertikalen Wärmeaustausches durch turbulente Mischung führte und andererseits das permanent durch kleinere Einströme über die Darßer Schwelle (siehe oben) ins Arkonabecken transportierte Bodenwasser eine zu geringe Temperatur aufwies (Abb. 6a).

Mit Beginn der spätsommerlichen Abkühlung ab etwa Mitte August setzten sich diese Prozesse mit umgekehrten Vorzeichen fort. Der direkte Wärmeverlust führte in der Deckschicht nun zu einem schnellen Temperaturabfall, so dass sich Deckschicht- und Bodenwassertemperaturen bereits Anfang September wieder angeglichen. Während die Deckschichttemperatur in den Monaten September und Oktober weiter bis auf unter 10 °C abfiel, wurde das bodennahe Wasser des Arkonabeckens durch einen starken Zustrom ca. 15 °C warmen Einstromwassers im November erwärmt (siehe Abb. 6a). Diese Wärmequelle sorgte bis in die erste Novemberwoche hinein für die ungewöhnlich hohen Bodenwassertemperaturen von knapp unter 15 °C.

Im weiteren Verlauf des Monats November wurde in kurzer zeitlicher Abfolge zweimal eine Kombination aus starkem Einbruch von Temperatur und Salzgehalt beobachtet, der jeweils gefolgt ist von einer kurzfristigen Erholung (Abb. 11). Da die Oberflächentemperaturen und -salzgehalte keine signifikante Korrelation mit diesen Ereignissen aufweisen, kann dieses interessante Phänomen nicht durch lokale vertikale Vermischung erklärt werden. Eine genauere Analyse legt nahe, dass zwei jeweils mit den Einbrüchen von Temperatur und Salzgehalt zeitgleich auftretende Westwindereignisse (Abb. 4b) zu sogenanntem „Downwelling“ von bereits abgekühltem und salzarmem Oberflächenwasser geführt hatten. Westliche Winde verursachen bei diesem stark durch die Erdrotation beeinflussten Prozess einen südwärts gerichteten „Ekman“-Transport von Deckschichtwasser, das am Südrand des Arkonabeckens durch ein Abkippen der Salz- und Temperaturschichtung kompensiert wird. Dieser Prozess ist zum Großteil reversibel, was mit der beobachteten raschen Erholung von Temperatur und Salinität jeweils nach den beiden Downwelling-Ereignissen konsistent ist.

Ein weiterer durch die starken Westwindlagen im November ausgelöster Effekt ist das oben beschriebene barotrope Einstromereignis, das sich ab etwa Mitte November mit einer Erhöhung des Salzgehaltes zunächst an der Darßer Schwelle (siehe Abb. 6b) und mit leichter Verzögerung dann auch im Arkonabecken manifestierte. Die Temperatur dieses

Einstromwassers unterschritt die Marke von 10 °C an der Darßer Schwelle (Abb. 6a) und führte somit im Arkonabecken zu einer nachhaltigen Abkühlung des Tiefenwassers. Während die maximalen Salinitäten an der Darßer Schwelle während dieses Ereignisses bei 17 g/kg lagen, überschritten die Bodensalzgehalte im Arkonabecken nun die Marke von 21 g/kg. Dies ist ein eindeutiger Hinweis darauf, dass eine erhebliche Menge des Einstromwassers das Arkonabecken durch den Sund erreicht hatte, wo aufgrund des kürzeren Einstromweges eine geringere Vermischung und somit eine höhere Salzkonzentration erreicht wurde.

Obwohl der Einstrom gemäß den Messungen an der Darßer Schwelle, sowie den in Kapitel 2 diskutierten Volumenabschätzungen nur als durchschnittlich eingestuft werden kann, weisen die hohen Salzgehalte (und damit das hohe Potential zur Tiefenwasserbelüftung) an der Station „Arkonabecken“ dieses Ereignis als eines der wichtigsten der letzten Jahre aus.

Sauerstoffmessungen für das Tiefenwasser im Arkonabecken stehen für das Jahr 2009 nur für die frühen Sommermonate von etwa Mitte April bis Mitte Juli zur Verfügung (und für einen kurzen Zeitraum zum Ende des Jahres). Sauerstoffmessungen für die Deckschicht hingegen sind nach Einsatz der neu implementierten Optoden-Sensoren ab Mitte April durchgängig für das ganze Jahr verfügbar (Abb. 12).

Wie bereits für die Darßer Schwelle diskutiert, folgen die Messwerte in der Deckschicht weitgehend den durch den Jahresgang der Deckschichttemperatur aufgeprägten Sättigungskonzentrationen. Die ersten verfügbaren Sauerstoffkonzentrationen für das Bodenwasser in der zweiten Aprilhälfte zeigten hohe Werte um 6 ml/l und waren damit wahrscheinlich bereits durch die Zufuhr von sauerstoffreichem Einstromwasser durch den zeitgleichen Einstrom über die Darßer Schwelle geprägt. Danach sanken die Bodenkonzentrationen kontinuierlich, ohne jedoch suboxische Werte zu erreichen. Dies weist auf die effektive Belüftung der unteren Wassersäule durch die oben beschriebenen zahlreichen kleineren Einstromereignisse der Sommermonate hin. Das ungewöhnliche Sturmereignis am 11.6. führte zu einer kurzfristigen Erhöhung der Bodenkonzentrationen durch Einmischung von sauerstoffreichem Deckschichtwasser. In Abwesenheit von solchen Extremereignissen ist aber davon auszugehen, dass die vertikale Vermischung auch im flachen Arkonabecken in den Sommermonaten keinen wesentlichen Beitrag zur Tiefenwasserbelüftung leistet.

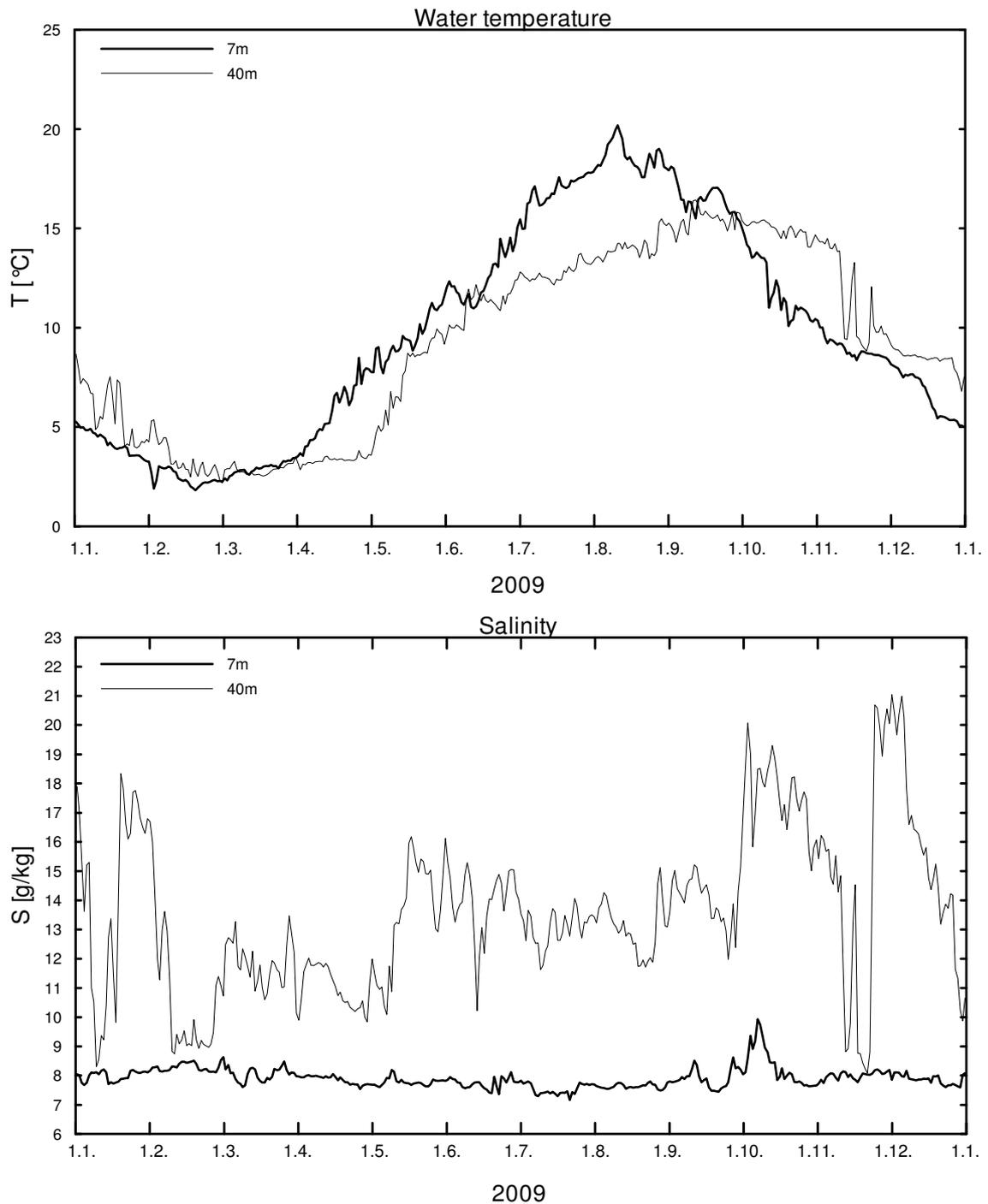


Abb. 11
Verlauf der Wassertemperatur (a) und des Salzgehaltes (b) in der Deck- und Bodenschicht im Arkonabecken (Station AB) im Jahr 2009

Fig. 11
Water temperature (a) and salinity (b) measured in the surface layer and near bottom layer at station AB in the Arkona Basin in 2009

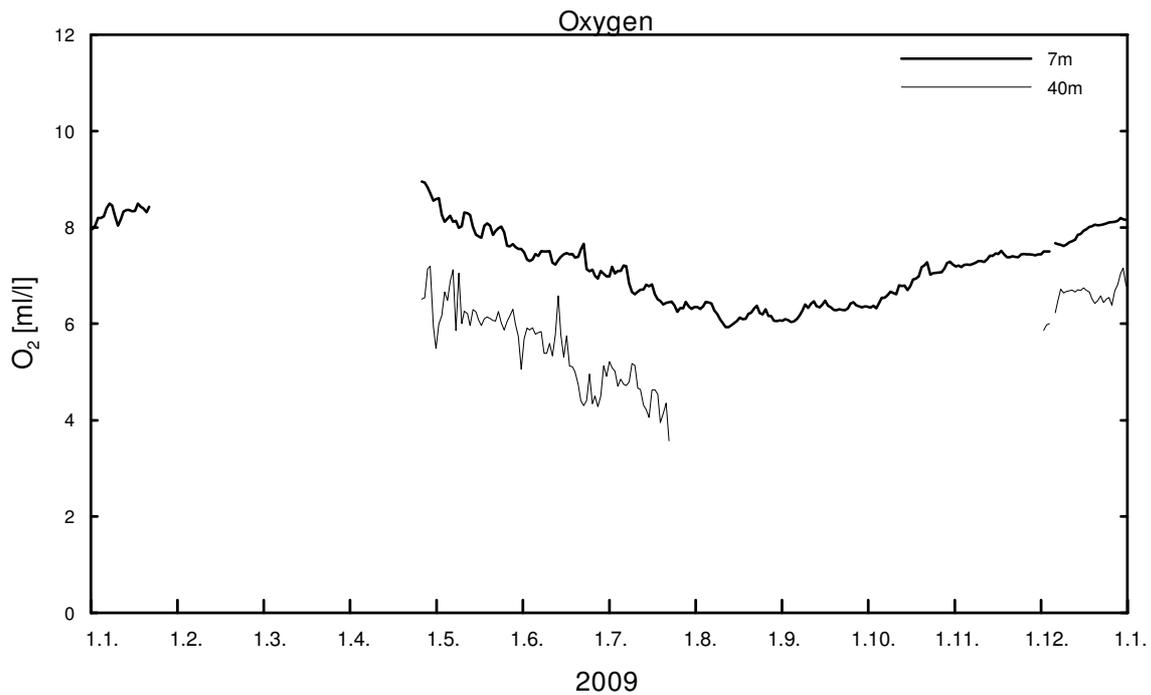


Abb. 12

Verlauf der Sauerstoffgehaltes in der Deck- und Bodenschicht im Arkonabecken (Station AB) im Jahr 2009

Fig. 12

Dissolved oxygen content measured in the surface and bottom layer at the station AB in the Arkona Basin in 2009

5. Beobachtungen an der Bojenstation „Oderbank“

Die Verteilung von Wassermassen und die Zirkulation in der Pommerschen Bucht sind im Rahmen des TRUMP-Projektes (*TR*ansport und *UM*satzprozesse in der *P*ommerschen Bucht) untersucht (v. BODUNGEN et al., 1995; TRUMP, 1998) sowie durch SIEGEL et al. (1996), MOHRHOLZ (1998) und LASS et al. (2001) beschrieben worden. Bei Westwindlagen wird dort gut durchmisches Wasser aus 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. Wie unten dargestellt, haben diese Prozesse einen wichtigen Einfluss auf die Primärproduktion und den Sauerstoffhaushalt in der Pommerschen Bucht.

Die Bojenstation „Oder Bank“ befindet sich annähernd 5 sm nordöstlich von Koserow/Usedom auf 15 m Wassertiefe. Die Messdaten umfassen Temperatur, Salzgehalt und Sauerstoff in 3 und 12 m Tiefe. Bis zum 13. November 2009, als der Betrieb der Station

planungsgemäß für eine Wertzeit unterbrochen wurde, liegen durchgehend Messdaten aller Parameter vor mit Ausnahme der Sauerstoffdaten in 3 m Tiefe. Aufgrund von Bewuchsproblemen hielten die Messwerte des entsprechenden Sensors ab dem 24. August 2009 der Qualitätskontrolle nicht mehr stand und werden im Folgenden daher nicht diskutiert.

Die Zeitreihen von Wassertemperatur und Salzgehalt in 3 m und 12 m Tiefe sind in Abb. 13 dargestellt. Aufgrund der geringen Wassertiefe lagen die an dieser Station Anfang August gemessenen sommerlichen Maximaltemperaturen mit ca. 21 °C knapp über den im Arkonabecken gemessenen Werten (Abb. 11) und deutlich über den Werten an der Darßer Schwelle (Abb. 6). Bereits ab Ende August setzte eine kontinuierliche Abkühlung von spätsommerlichen Werten um 20 °C auf Werte unter 8 °C zum Ende der Messperiode hin ein. Wesentlich niedriger als in den Vorjahren waren die winterlichen Minimaltemperaturen, die in der zweiten Februarhälfte nur noch knapp über 0 °C (aber aufgrund des Salzgehaltes immer noch deutlich über dem Gefrierpunkt) lagen. Die Temperaturen in Deckschicht und bodennaher Schicht zeigten eine starke Ähnlichkeit im Verlauf, wobei aber die während aller Jahreszeiten auftretenden Perioden mit signifikanter Temperaturschichtung (mit unterschiedlichem Vorzeichen in der warmen und kalten Jahreszeit) darauf hinweisen, dass die Wassersäule nicht immer voll durchmischt war.

Der dynamische Grund für die sporadische Unterdrückung von Mischung liegt in der Aufsichtung weniger salzreichen - und daher weniger dichten - Mischwassers aus dem Oderhaff über das Wasser der Pommerschen Bucht. Die daraus resultierende Stabilisierung der Wassersäule führt zu einer Abschwächung des vertikalen turbulenten Austausches, die sich deutlich im Temperaturverlauf manifestiert: Während der Erwärmungsperiode von März bis August führten die oben beschriebenen Schichtungsereignisse jeweils zu einer Abkopplung der bodennahen Schicht vom atmosphärischen Wärmefluss, was sich in einer Stagnation der bodennahen Temperaturen äußerte (Abb. 13a). Diese Stagnationsphasen werden in der Regel durch Windereignisse beendet, bei denen sich die Deckschicht- und Bodentemperaturen durch Durchmischung der Wassersäule wieder angleichen. Die markantesten Schichtungsereignisse dieser Art wurden im Jahr 2009 im April, Juli, August und Ende Oktober beobachtet, wobei die Temperaturschichtung während des letzten Ereignisses aufgrund der Umkehrung des atmosphärischen Wärmeflusses invertiert war. Das Ende März beginnende und durch ein Windereignis Mitte April (siehe Abb. 4a) beendete Ereignis stellt sowohl bezüglich der Dauer als auch der Stärke eine Besonderheit dar, die in den Vorjahren nicht beobachtet wurde.

Der Effekt dieser Ereignisse auf den Sauerstoffhaushalt der Pommerschen Bucht wird in Abb. 14 sichtbar, in welcher die Sauerstoffkonzentrationen in 3 und 12 m Tiefe aufgetragen sind. Während aller Schichtungsereignisse findet sich eine klare negative Korrelation zwischen ansteigenden Sauerstoffkonzentrationen in der Deckschicht und einer Abnahme in der bodennahen Schicht. Es liegt nahe, dass die erhöhte Primärproduktion von Biomasse 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 Sauerstoffkonzentrationen an der Oberfläche führen kann. Die Korrelation dieser Ereignisse mit einer Reduktion in der bodennahen Schicht weist auf eine erhöhte Sauerstoffzehrung durch absinkende Biomasse hin. Ähnlich wie beim oben diskutierten Temperaturverlauf führen Windereignisse jeweils zu einer Auflösung der Sauerstoffunterschiede und damit auch zu einem kurzzeitigen Einbruch der oberflächennahen Sauerstoffkonzentrationen durch Einmischung sauerstoffarmen Bodenwassers.

Bemerkenswert ist die extreme Sauerstoffübersättigung mit Werten von bis zu 14 ml/l O₂(= 166% Sättigung), die während des Ereignisses im April beobachtet wurde. Die zufällige Überlagerung einer Periode mit hoher solarer Einstrahlung und anhaltender Einschichtung von nährstoffreichem Wasser geringer Dichte aus dem Oderhaff führte hier offensichtlich zu einer effektiveren Produktion von Biomasse als während der Ereignisse in den Monaten Juli und August. Die Bedeutung der Synchronisation von Schichtung und Frühjahrsblüte wird auch im Vergleich mit dem Jahr 2007 deutlich. Dort führte ein starkes Schichtungsereignis Ende März zu geringeren Sauerstoffkonzentrationen als ein deutlich kürzeres Ereignis zwei Wochen später, als die Frühjahrsblüte bereits ausgeprägter war (siehe NAUSCH et al., 2008). Beide Ereignisse von 2007 sind aber in ihrer Intensität nicht mit der Situation im April 2009 vergleichbar.

Trotz ihrer geringeren Dauer ist die Sauerstoffzehrung in der Bodenschicht bei den Sommerereignissen stärker, was als direkter Hinweis auf den Einfluss der Wassertemperatur auf die Intensität mikrobiologischen Abbauprozesse gedeutet werden kann. Diese Interpretation ist auch konsistent mit dem vergleichsweise geringen Einbruch des Bodensauerstoffs während des Schichtungsereignisses im November, das zwar ausgeprägt und dauerhaft war, aber bereits mit stark reduzierten Bodenwassertemperaturen zusammenfiel.

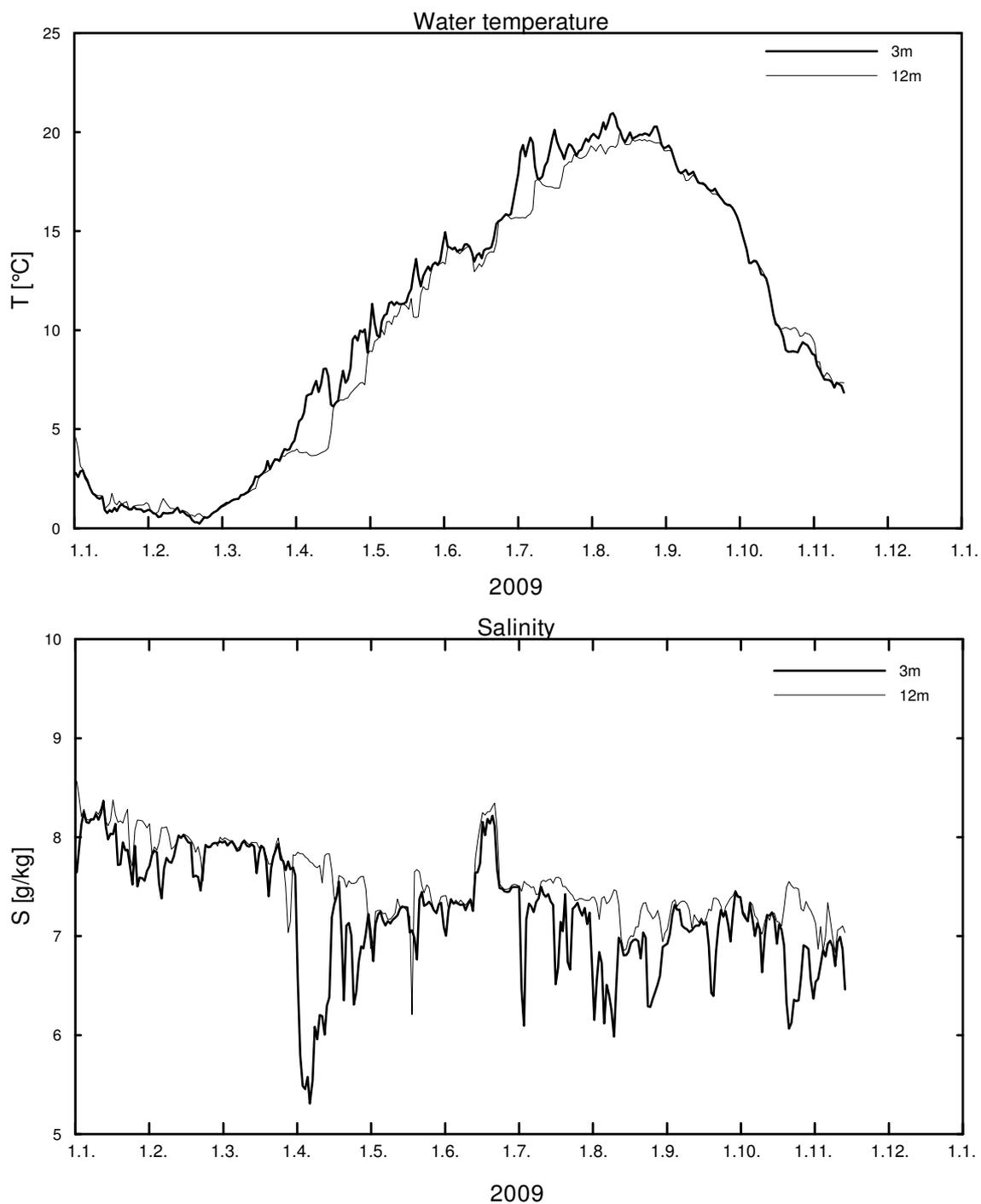


Abb. 13

Verlauf der Wassertemperatur (a) und des Salzgehaltes (b) in der Deck- und Bodenschicht in der Pommerschen Bucht (Stat. OB) im Jahr 2009

Fig. 13

Water temperature (a) and salinity (b) measured in the surface layer and near bottom layer at station OB in the Pomeranian Bight in 2009

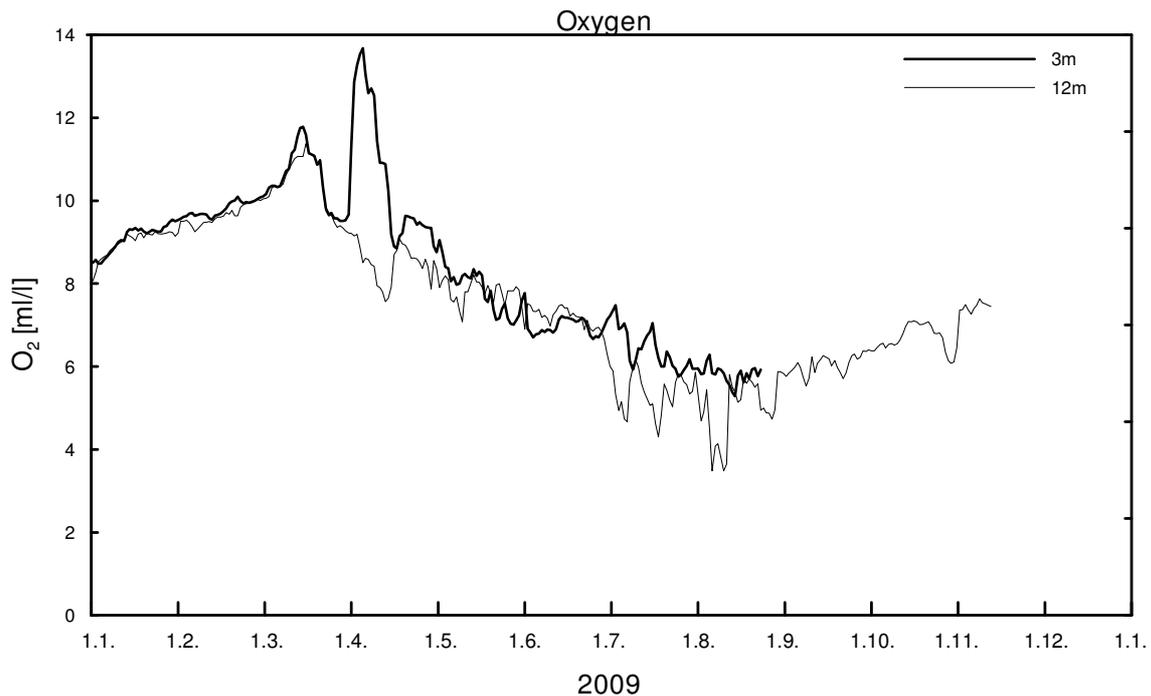


Abb. 14

Verlauf der Sauerstoffgehaltes in der Deck- und Bodenschicht in der Pommerschen Bucht (Stat. OB) im Jahr 2009

Fig. 14

Dissolved oxygen content measured in the surface and bottom layer at the station OB in the Pomeranian Bight in 2009

6. Hydrographisch-chemische Bedingungen

6.1. Wassertemperatur

6.1.1 Die Wasseroberflächentemperatur der Ostsee im Jahr 2009

Die Entwicklung der Wasseroberflächentemperatur der Ostsee im Jahr 2009 wurde auf der Grundlage von Satellitendaten des Advanced Very High Resolution Radiometers (AVHRR) der amerikanischen Wettersatelliten NOAA 17, 18 und 19 erarbeitet. Die Satellitendaten wurden täglich durch das BSH Hamburg bereitgestellt. Die Auswerteverfahren und methodische Untersuchungen sind ausführlich bei SIEGEL et al. (2008) diskutiert. Die jährliche Einschätzung der Entwicklung der Wasseroberflächentemperatur der Ostsee ist in den HELCOM Indicator Fact Sheets (SIEGEL and GERTH, 2008, 2009) zusammengefasst. Betrachtungen zur Langzeitentwicklung der Wasseroberflächentemperatur in der Periode seit 1990 sind bei SIEGEL et al. (1999, 2006, 2009) und SIEGEL und GERTH (2010) dargestellt.

Die Entwicklung der Wasseroberflächentemperatur war wie in den beiden Vorjahren durch vergleichsweise warme Monate Januar bis Mai in weiten Teilen der Ostsee gekennzeichnet. Allerdings lagen die Temperaturen unter denen der beiden Vorjahre. Im Juni blieb die in vielen Jahren beobachtete Erwärmung der südlichen und zentralen Ostsee aus und der Bottnische Meerbusen war vergleichsweise warm. Dadurch ergab sich in den Anomalien ein starkes Nord-Süd-Gefälle. 2009 war der August der wärmste Monat und der 08.08.2009 der wärmste Tag. Lang anhaltende Westwinde im September führten zu starkem Auftrieb kalten Wassers entlang der schwedischen Ostküste. Das Oberflächenwasser in der östlichen Ostsee kühlte nur langsam ab und führte dazu, dass der September 2009 der viertwärmste seit 1990 war. Der im Oktober weiter vorhandene Kaltwasserauftrieb wirkte sich auch auf die zentralen Teile aus. Im Dezember kühlte die Ostsee von Westen her ab, wogegen die Temperaturen in der nördlichen Ostsee über den langjährigen Mittelwerten lagen. Im Jahresmittel gab es keine weitere Temperaturerhöhung. Das Jahr 2009 war nach den letzten vier Jahren das fünfwärmste Jahr seit 1990.

Die Kältesummen der Lufttemperatur von Warnemünde (Tab. 2) zeigen, dass der Winter 2008/2009 mit 32,5 K d (Mittel 102,6 K d) zu den milden zählte. Die Wärmesumme des Sommers 2009 lag mit 208,4 K d über dem langjährigen Mittelwert (146,6 K d) und auch über den Werten des Vorjahres. Dazu haben insbesondere die Monate August, Juli und September beigetragen, deren Wärmesummen klar über den langjährigen Mittelwerten lagen. Im Gegensatz zum Vorjahr und zum langjährigen Mittelwert war 2009 der August der wärmste Monat des Jahres. Der Dezember 2009 sorgt mit einer Kältesumme von 41,5 K d für einen kalten Beginn des Winters 2009/2010. Dieser Wert war doppelt so hoch wie der langjährige Mittelwert und schon höher als die Kältesummen des gesamten Winters 2008/2009.

Die Anomalien der Monatsmittel der SST des Jahres 2009 für die gesamte Ostsee sind in Abb. 15 dargestellt. Der saisonale Verlauf der Monatsmitteltemperatur in den zentralen Bereichen der Arkonasee, Gotlandsee und Bottensee sind im Vergleich zu den langjährigen Monatsmittelwerten in Abb. 16 zusammengefasst. Durch den vergleichsweise warmen Dezember 2008 (NAUSCH et al., 2009) lagen die Temperaturen auch zu Jahresbeginn in den drei Seegebieten über den langjährigen Mittelwerten. Die Temperaturen lagen im Januar - Mai in der gesamten Ostsee über dem langjährigen Mittelwert und erreichten im Januar, April und Mai Anomalien von bis zu 1,5 K.

Die Monate Januar und Februar waren nach 2008 und 2007 die drittwärmsten im Untersuchungszeitraum. Im Januar und Februar sind die Temperaturen in der Arkonasee als Ergebnis der Abkühlung von Westen niedriger als in der Gotlandsee und im April kommt die schnellere Erwärmung von Westen her zum Ausdruck.

Bei den Monaten März und April waren zusätzlich die Monate im Jahr 1990 wärmer als 2009. In den drei Gebieten ist das Jahresminimum im März zu beobachten. Im Juni war die Ostsee

in 2 Bereiche bzgl. der SST-Anomalien geteilt. Der gesamte Südteil von der Beltsee über Arkona- und Bornholmsee bis zur östlichen Gotlandsee und den Estnischen Inseln war durch negative Anomalien bis -2 K gekennzeichnet und der Nordteil durch positive Anomalien bis $+2$ K. Im Südteil war die typische Erwärmung im Juni nicht so ausgeprägt und im Norden stärker als im langjährigen Mittel. Dadurch war eine stärkere Annäherung der SST in den drei Gebieten zu beobachten (Abb. 16).

Im Juli kehrten sich die Verhältnisse in den Anomalien um. In Nordteil dominierten negative Anomalien mit bis $-1,4$ K und im Südteil leicht positive. Der August war der wärmste Monat des Jahres, aber weitgehend in dem Bereich der langjährigen Mittelwerte. Im September kühlte die Ostsee nur langsam ab, was in der Gotlandsee zu den größten Abweichungen von den Mittelwerten führte. Lang anhaltende Westwinde erzeugten einen starken Auftrieb kalten Wassers entlang der schwedischen Ostküste. Dadurch ergaben sich im küstennahen Bereich negative Anomalien bis -4 K. Das warme Oberflächenwasser wurde in die östlichen Teile transportiert und erreichte dort Anomalien von bis zu $+2$ K.

Der September 2009 war nach 2002, 1999 und 2006 der viertwärmste im Untersuchungszeitraum. Der Westwind und damit der Auftrieb setzten sich auch im Oktober etwas nach Süden verlagert im Bereich der eigentlichen Ostsee fort. In den Auftriebskernzonen im Bereich der westlichen Gotlandsee und in der nördlichen Bornholmsee wurden auch Anomalien bis $-3,5$ K erreicht. Dadurch waren weite Teile durch negative Anomalien gekennzeichnet.

Das setzte sich abgeschwächt im November fort. Ähnlich wie im Januar sind auch im Dezember die positiven Abweichungen vom Mittelwert in der Bottensee besonders ausgeprägt. Die Abkühlung im Spätherbst bis zum beginnenden Winter erfolgte nicht so stark wie im langjährigen Mittel. Die im November/Dezember von Westen her einsetzende Abkühlung hat zu geringeren Monatsmittelwerten im Dezember in der Arkonasee im Vergleich zur Gotlandsee geführt.

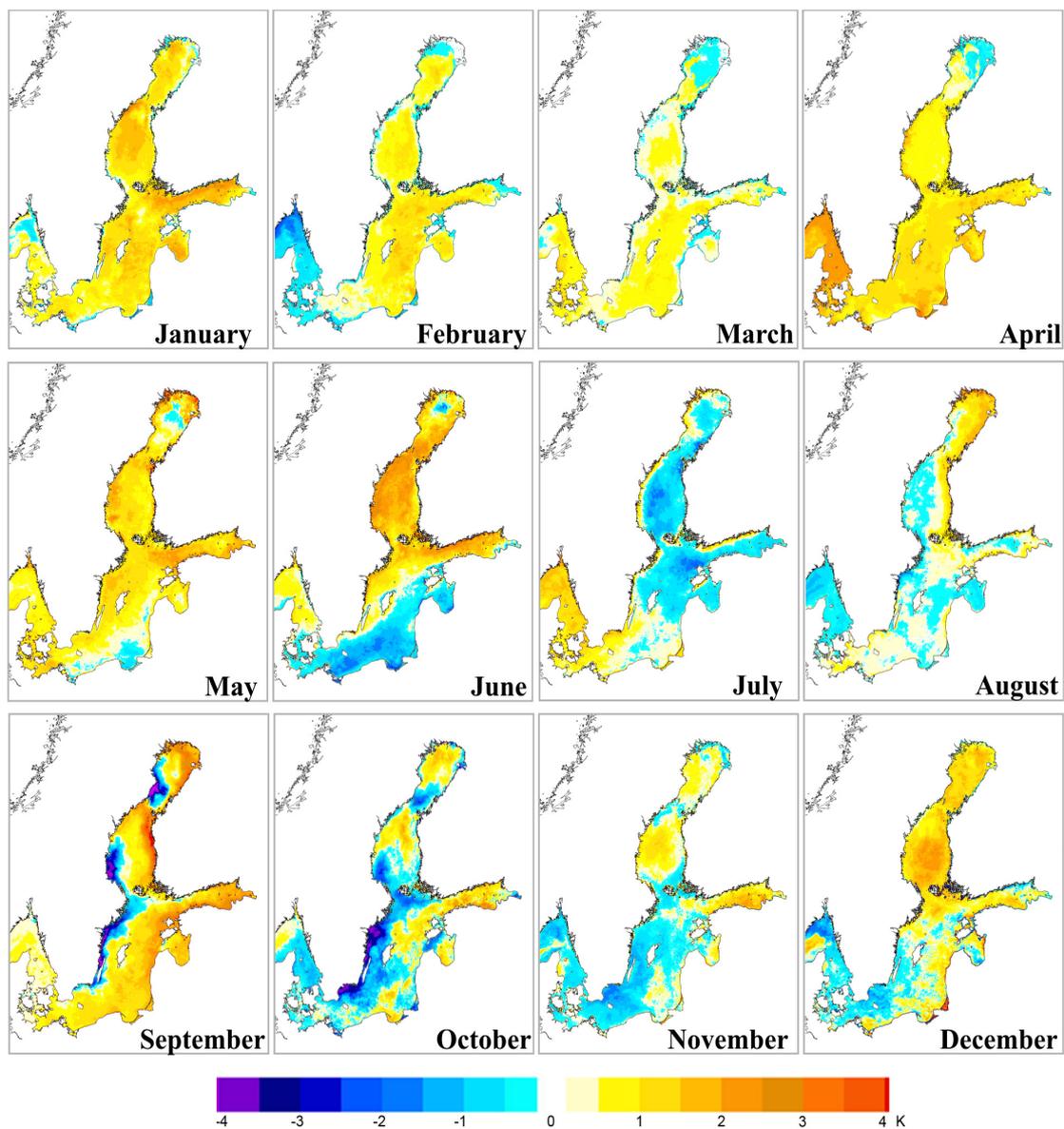


Abb. 15

SST- Anomalien der Monatsmitteltemperatur der Ostsee im Jahre 2009 bezogen auf die langjährigen Mittel 1990 – 2008

Fig. 15

SST- Anomalies of the monthly mean temperature of the Baltic Sea in 2009 referring to the long-term means 1990 – 2008

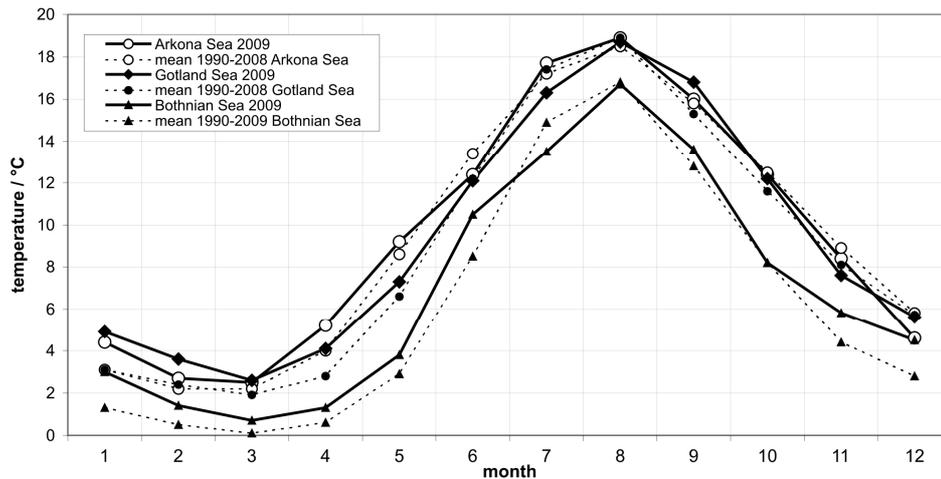


Abb. 16

Saisonalen Verlauf der Wasseroberflächentemperatur (NOAA-SST) in der zentralen Arkona-, Gotland- und Bottensee des Jahres 2009 im Vergleich zum jeweiligen 20-Jahresmittel (1990-2008)

Fig. 16

Seasonal course of sea surface temperature (NOAA-SST) in the central Arkona- Bothnian- and Gotland Sea in 2009 in comparison to the mean values of the last 20 years (1990-2008)

Die folgende detaillierte Beschreibung der thermischen Entwicklung der Ostsee im Jahr 2009 fasst die wichtigsten Phasen im Jahresverlauf zusammen. Anfang Januar lag die SST um 3-5 °C in den zentralen Bereichen, und war in der nördlichen Ostsee und in der Pommernbucht niedriger. Das blieb auch weitgehend bis Ende Januar erhalten. Die Temperaturen reduzierten sich im Februar auf 2-4 °C. Die Temperaturverteilung entlang des Schnittes durch die zentralen Becken der Ostsee für den Monat Februar 2009 im Vergleich zum Mittel 1990 – 2009 und zum Februar der Vorjahre zeigt, dass die Gebiete nördlich der zentralen östlichen Gotlandsee deutlich wärmer als im langjährige Mittel waren, aber unter den Werten des Vorjahres lagen (Abb. 17). Die westliche Ostsee war kälter als die zentralen Bereiche, weil im November/Dezember die Abkühlung von Westen in dem relativ flachen Meeresgebiet stattfand. In diese Periode vergleichsweise früh im Jahr fiel auch der Zeitpunkt maximaler Eisbedeckung in der nördlichen Ostsee (19.02.2009, Abb.19). Die Temperatur sank weiter bis ca. 10. März auf 2-3 °C in den zentralen Teilen und lag ca. 17. März um -1 bis 1 °C in der Bottensee. Nach dem 10. März begann in der zentralen und westlichen Ostsee die Erwärmungsphase und erreichte ca. 3-4 °C am 18. März, was dann bis Ende März annähernd so blieb.

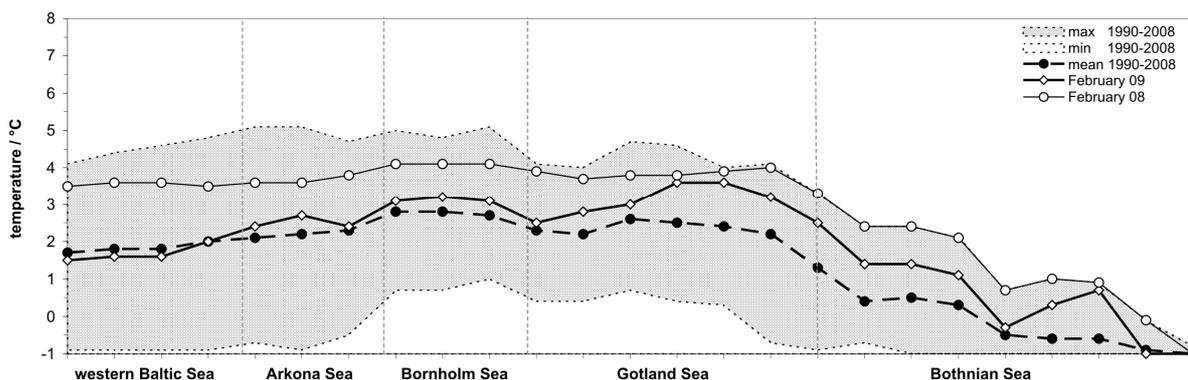


Abb. 17

Temperaturverteilung entlang des Schnittes durch die zentralen Becken der Ostsee für den Monat Februar 2009 im Vergleich zum langjährigen Mittel 1990 – 2008, dem Vorjahr und der Schwankungsbreite

Fig. 17

Temperature distribution along the transect through the central basins of the Baltic Sea in February 2009 in comparison to the long-term mean value of 1990 – 2008, to the previous year and to the variation range

Ab Anfang April begann eine merkliche kontinuierliche Erwärmung des Oberflächenwassers einerseits von Westen, aber auch von den großen Zuflüssen in der südlichen Ostsee wie Oder, Weichsel und Memel in ähnlicher Größenordnung. Während der Ostwindlage vom 10.-20. April breitete sich das Flusswasser in nordöstliche Richtung aus und erreichte die maximale Ausdehnung am 18. April. Das Oderwasser reichte bis in die zentrale Arkonasee, und das Weichsel- und Memelwasser bedeckte weite Teile der südlichen Gotlandsee. Danach wurde das Flusswasser immer mal durch Windrichtungswechsel vermischt. Das führte Ende April in der Mecklenburger Bucht und in den Flussmündungsgebieten zu Temperaturen um 7-10 °C, in der nördlichen Gotlandsee um 3-5 °C und in der zentralen Bottensee 2-3°C und in den eisfreien Teilen der Bottenwiek um 0 °C.

Im Mai setzte sich die Erwärmung gleichmäßig weiter fort. Ende Mai waren westlich der Darßer Schwelle, in den Mündungsgebieten und im Finnischen Meerbusen Temperaturen von 13-15 °C erreicht. In der zentralen Gotlandsee lagen sie um 10 °C, in der Bottensee bei 7 °C und in der Bottenwiek bei 0-2 °C. Bis ca. 15. Juni stagnierte die thermische Entwicklung. Danach stiegen die Temperaturen an, vor allem hatten sich die Bottensee und Bottenwiek bereits am 20. Juni mit Temperaturen von 8-10 °C angeglichen. Bis zum 27. Juni hatten sich die Bottensee und der Finnische Meerbusen auf Temperaturen um 15-18 °C erwärmt, wogegen die eigentliche Ostsee und der Westteil bei 12-15 °C geblieben sind, was

zu der Zweiteilung in den Anomalien geführt hat. Bis Ende des Monats hatte sich dann die gesamte Ostsee mit Ausnahme der Bottenwieck auf 15-17 °C erwärmt. Bis 3. Juli wurden in diesen Gebieten Temperaturen von 16-18 °C erreicht. In der Folge reduzierte sich die Temperatur aufgrund von Windereignissen bis 10. Juli auf 13-17 °C in der zentralen und westlichen Ostsee und im Nordteil auf 9-12 °C. Bis Ende des Monats erwärmte sich die gesamte Ostsee wieder. In Norden lagen die Temperaturen zwischen 16 und 17 °C und sonst zwischen 17 und 20 °C. Die Abb. 18 (oben) zeigt die Temperaturverteilung entlang des Schnittes durch die zentralen Becken der Ostsee für den Monat Juli 2009 im Vergleich zum Mittel 1990 – 2009 und zum Vorjahr sowie die Schwankungsbreite im Untersuchungszeitraum. Die Monatsmittel der westlichen Ostsee und der Arkonasee lagen ähnlich wie im Vorjahr ca. +1 K über dem langjährigen Mittelwert, von der Bornholmsee bis zur zentralen Gotlandsee im Bereich des langjährigen Mittelwertes. In der nördlichen Gotlandsee und in der Bottensee waren die Temperaturen bis 1 K unter und nördlich davon im Bereich des Mittelwertes. In einer anhaltenden Ostwindphase Anfang August nahm die Temperatur in der gesamten Ostsee weiter zu und erreichte am 8. August die maximalen Temperaturen zwischen 19 und 22 °C (Abb. 19). Nach der Windumstellung am 11. August nahmen die Temperaturen bis Ende des Monats auf Werte um 17-18 °C in der zentralen und westlichen Ostsee ab. In der nördlichen Ostsee erfolgte die Abkühlung wesentlich schneller. Ende des Monats lagen dort die Temperaturen zwischen 13 und 16 °C. Die Abb. 18 (unten) zeigt die Monatsmittel der SST entlang des Schnittes durch die zentralen Becken der Ostsee für den Monat August 2009 im Vergleich zum Mittel 1990 – 2008 und zum Vorjahr sowie die Schwankungsbreite im Untersuchungszeitraum. In der gesamten Ostsee lagen die Temperaturen im Bereich des langjährigen Mittelwertes, nur in der westlichen Ostsee und in der Bottenwieck waren sie bis 1 K höher. Der Ende August an der schwedischen Ostküste sich herausbildende Auftrieb blieb weiter erhalten und intensivierte sich teilweise speziell in der nördlichen Ostsee. Bis zum 6. September reduzierten sich die Temperaturen auf 16-17 °C. Diese Situation blieb bis ca. 20. September erhalten, um dann bis Ende September weiter auf ca. 15 °C abzunehmen. Bis ca. 12. Oktober nahmen die Temperaturen nur langsam auf 13-14 °C ab. Eine Windumstellung auf Nord bewirkte eine schnelle Abnahme der Temperaturen auf Werte um 10-11 °C.

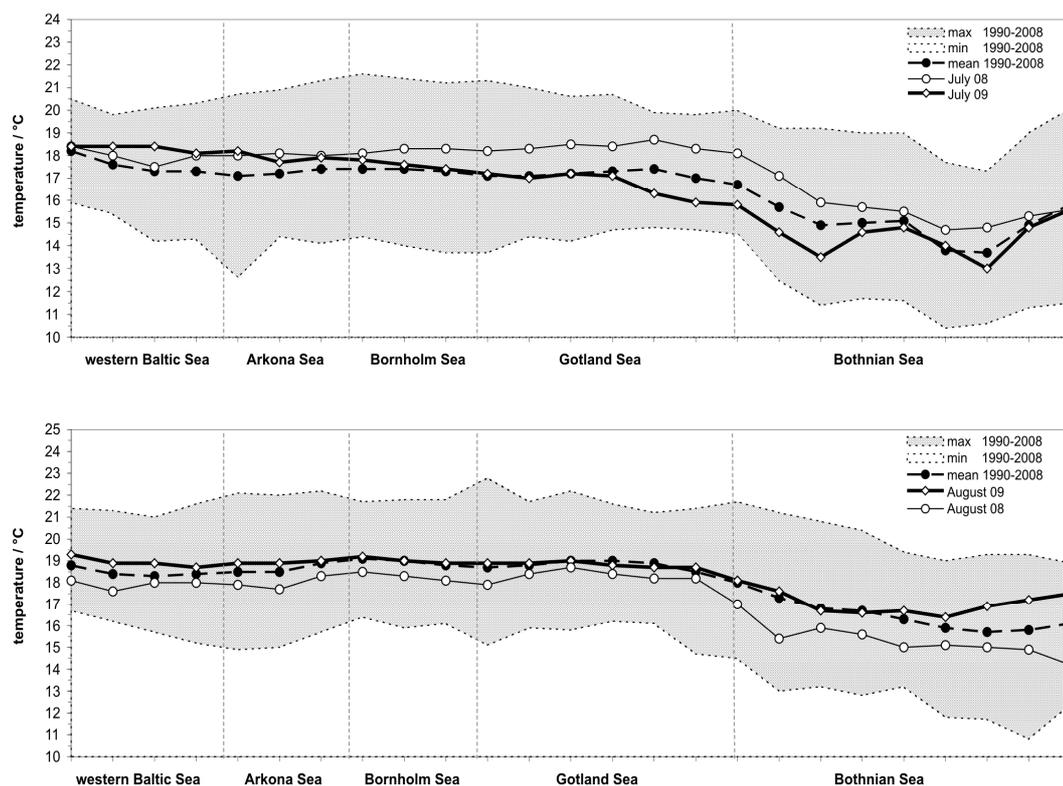


Abb. 18

Temperaturverteilung entlang des Schnittes durch die zentralen Becken der Ostsee für den Monat Juli (oben) und August 2009 (unten) im Vergleich zum langjährigen Mittel 1990 – 2008, zum Vorjahr und zur Schwankungsbreite im Untersuchungszeitraum.

Fig. 18

Temperature distribution along the transect through the central basins of the Baltic Sea in July (upper panel) and August 2009 (lower panel) in comparison to the long-term mean value of 1990 – 2008, to the previous year and to the variation range of the investigation period.

Im sehr stark bewölkten November kühlte sich die westliche Ostsee weiter kontinuierlich auf 7-9 °C ab. Ende Dezember waren dann 3-5°C in der westlichen Ostsee, 0-1 °C in der Pommerschen Bucht und Werte <0 °C im Greifswalder Bodden vorhanden. Die SST lag ca. 2 K unter den Werten des Vorjahres, was auf die starke atmosphärische Abkühlung zurückzuführen ist, die in den hohen Kältesummen der Lufttemperatur im Monat Dezember zum Ausdruck kommen. Die nördliche Ostsee blieb im Dezember mit Temperaturen von 4-5 °C etwa 1-1,5 K über dem langjährigen Mittelwert.

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
EISÜBERSICHTSKARTE Nr. 19
 Rostock, 19.02.2009
 Jahrgang 82

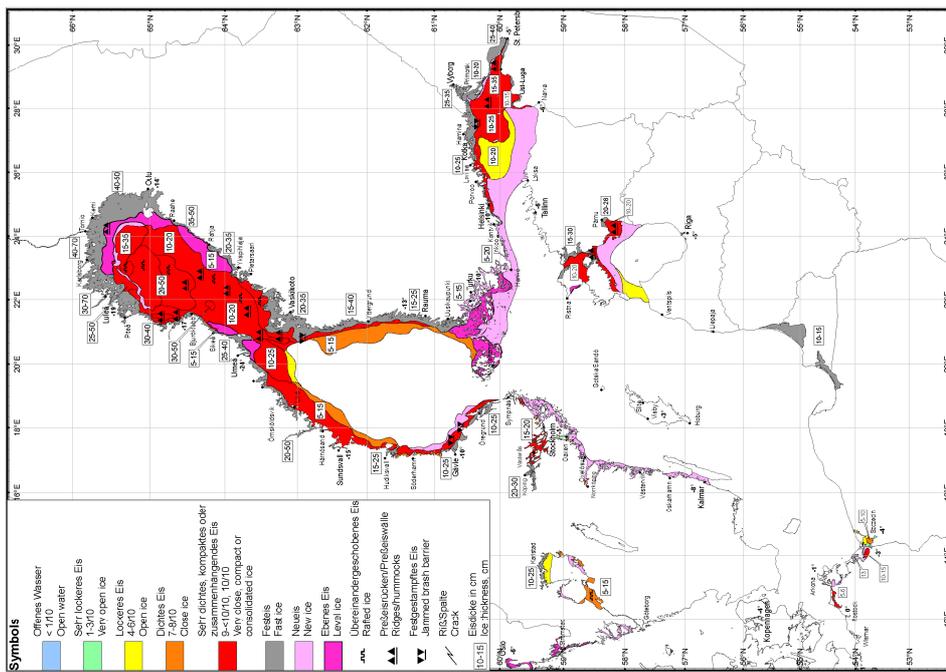
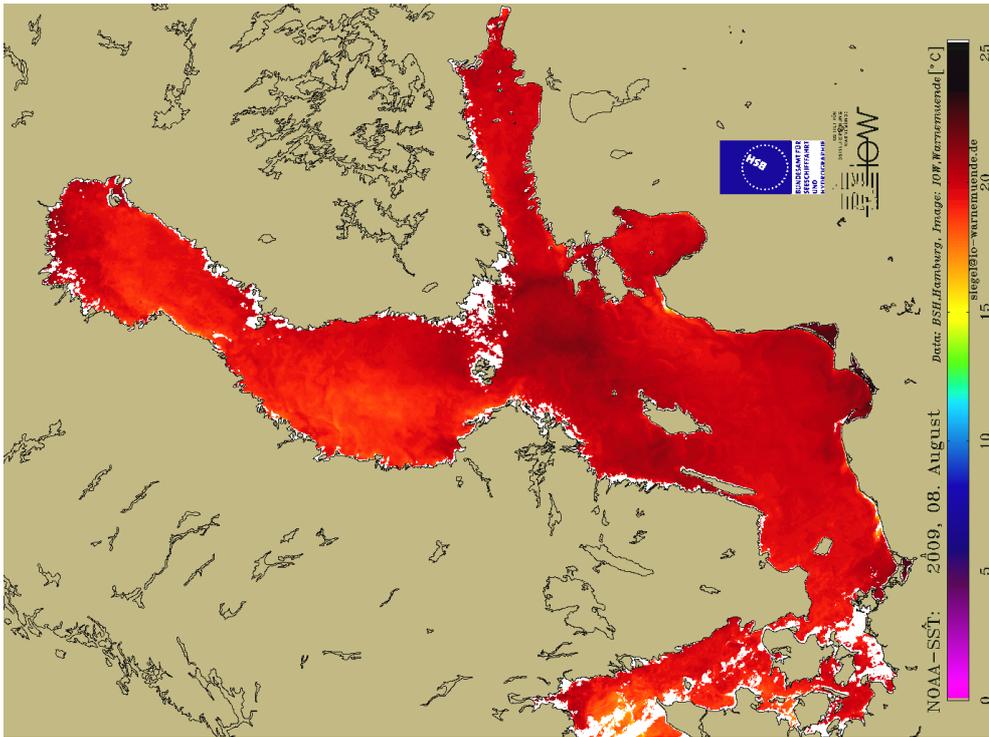


Abb. 19

Maximale Eisbedeckung der Ostsee im Jahr 2009 am 19.02.2009 (SCHMELZER, 2009) und Temperaturverteilung der Ostsee am wärmsten Tag, dem 8. August 2009

Fig. 19

Maximum ice coverage of the year 2009 on 19 February (SCHMELZER, 2009) and temperature distribution of the Baltic on the warmest day of the year (8 August 2009)



6.1.2 Vertikalverteilung der Wassertemperatur

Die vertikale Temperaturverteilung in der westlichen und zentralen Ostsee im Verlauf des Jahres 2009 ist anhand der Überwachungsfahrten des IOW in der Abb. 23 zusammengestellt. Starke Einstromereignisse aus dem Kattegat in die Ostsee waren 2009 nicht zu beobachten. Jedoch gab es beim Landsortpegel, an den MARNET-Stationen DS und AB sowie im Tiefenwasser des Bornholmbeckens Anzeichen für vier schwache Einstromsignale, ein baroklines im Februar (kalt), ein weiteres baroklines im April/Mai (kalt, aber wärmer als das vorhergehende), ein barotropes im September/Oktober (warm) und ein weiteres barotropes im November (warm, aber kälter als das zuvor), deren Auswirkungen sich aber im Verlauf des Jahres 2009 in keinem der Fälle in Temperatur- und Salzgehaltssignalen bis zum Gotlandtief verfolgen ließen. Das November-Ereignis kann als der wichtigste Einstromvorgang seit dem großen Einstrom vom Januar 2003 eingeschätzt werden. Die MARNET-Station im Arkonabecken registrierte am 24.11.2009 in 40 m Tiefe die höchsten Salzgehalte (über 22 g/kg) seit ihrer Inbetriebnahme im Spätsommer 2003. Das entsprechende Einstromsignal konnte aber erst im Januar 2010 im Bornholmbecken nachgewiesen werden (NAGEL, 2010). Zu beachten ist außerdem der im November 2008 erfolgte warme Einstrom von ca. 242 km³ Nordseewasser, der ein kräftiges warmes Signal im Bornholmbecken im November/Dezember 2008 bewirkte, dessen mögliche Auswirkungen auf die zentrale Ostsee aber erst für 2009 zu erwarten waren. So wurde nahe der IOW-Station 271 am 6. März 2009 eine auffallend warme Schicht von 7,3 °C bei 129 m Tiefe gemessen (JÜRGENS, 2009).

Bedingt durch den vorjährigen Einstrom waren die Temperaturen im Tiefenwasser des Bornholmbeckens zu Jahresbeginn 2009 vergleichsweise hoch, am 14. Januar in 60 m Tiefe 10,5 °C und in 90 m Tiefe noch 9,8 °C. Ein entsprechendes warmes Einstromsignal wurde Anfang Februar bodennah von der Stolper Rinne bis hin zur Station 260 beobachtet (Abb. 23; NAGEL, 2009). In der Folge des baroklinen Einstroms vom 13.2. bis 24.2.2009 (siehe Kapitel 2) drang kälteres Wasser in das Bornholmtief, die Temperatur fiel auf 8,8 °C unterhalb von 80 m Tiefe am 18.3., und sogar auf 8,5 °C (16.4.) und 8,6 °C (13.5.). Der entsprechende Wasseraustausch und das Anheben des älteren warmen Wassers über die Stolper Schwelle wurde durch Messungen im März bestätigt (Abb. 23; FEISTEL, 2009). Von Juni bis Oktober 2009 waren die Temperaturen mit ca. 8,7 °C wieder etwas höher. Eine weitere Abkühlung in der Folge des baroklinen Einstroms vom 23.4. bis 6.5. von nur 5 °C warmem Wasser ist in den tieferen Schichten der Bornholmsee nicht erkennbar, jedoch wurde entsprechend kaltes Wasser im Mai und Juni in 60 m Tiefe beobachtet (Abb. 23; NAUSCH, 2009). Ein kräftiger Temperaturanstieg der Schichten von 60 m bis zum Boden folgte dann wieder im November und Dezember, mit gemessenen Maximalwerten von 11,9 °C bei 89 m am 11.11. und 11,2 °C bei 60 m am 8.12.2009. Dafür verantwortlich war der barotrope Einstrom vom 1.10. bis zum 11.10. in der Folge des Sturmtiefs „Sören“, sowie teilweise vermutlich auch schon der noch kräftigere sturmgetriebene Einstrom vom 18.11. bis zum 3.12.2009 bei Durchzug der Tiefs „Jürgen“, „Ludwig“, „Max“ und „Nico“ (Kapitel 2).

In der zentralen Gotlandsee erschienen diese Einstromsignale, wenn überhaupt, dann nur kurzfristig und auf dünne eingeschobene Schichten beschränkt. So war z.B. ein Temperaturmaximum von 7,7 °C an der Station 271 in 150 m Tiefe auffällig, während in der zeitlichen und räumlichen Umgebung Temperaturen von unter 7 °C vorherrschten. Eine ähnliche Erwärmung auf 6,9 °C konnte am 17.9. in 225 m Tiefe gemessen werden. Tabelle 5 zeigt, dass die Fluktuationen im Gotlandtief 2009 generell gering waren. Daraus kann auf eine ebenfalls geringe Einstromaktivität in diesem Becken geschlossen werden.

Das aus dem Gotlandbecken gegebenenfalls verdrängte Wasser führte in den nachfolgenden Becken zu sekundären Austauschvorgängen, die als Erklärung für die relativ starke Fluktuation im Farötief (Tab. 5) dienen. So stieg dort bei 150 m Tiefe in Jahresverlauf 2009 die Temperatur von 6,2 °C auf 6,6 °C an. Bei der gleichen Tiefe stieg in ähnlicher Weise im Landsorttief der Anfangswert von 5,4 °C auf 5,8 °C am Jahresende 2009. Im Karlsötief ist dieser Prozess noch deutlich schwächer ausgeprägt.

Das wichtigste Temperaturmerkmal im Tiefenwasser der zentralen Ostsee war auch noch 2009 die Auswirkung des warmen baroklinen Einstroms von Kattegatwasser vom Spätsommer 2003 (FEISTEL et al., 2004a, 2006a; NAUSCH et al., 2005). Dieser Einstrom hatte 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 (Abb. 21), der „Hagen-Kurve“ 1997-2008, 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, wahrscheinlich 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). Dem auffälligen warmen Signal über 7 °C im April und Mai 2007, gemessen von einer Verankerung in 219 m Tiefe und Überwachungsfahrten des IOW und SMHI, das von einer Erwärmung der gesamten Wassersäule unter der Halokline begleitet war (NAUSCH et al., 2008a), folgte im Sommer 2008 ein nur schwaches warmes Signal in einer dünnen Schicht des Gotlandtiefs bei 125 m Tiefe. Im Jahr 2009 klangen diese Fluktuationen noch weiter ab.

Natürlich kann mittels einer Zeitreihe der Temperatur, gemessen an einem festen Punkt, nicht eindeutig entschieden werden, ob das Abklingen eines registrierten Signals durch Dissipation, oder räumliche Verlagerung, oder beides verursacht wurde. Die thermische Unruhe, die man in CTD-Profilen der tiefen Becken stets unmittelbar nach einem Einstrom beobachtet, ist in aller Regel nach einer Stagnationsphase von mehreren Monaten bis zu einem Jahr einem stark geglätteten Verlauf gewichen. Andererseits findet durch langsamen,

anhaltenden Zustrom in Bodennähe und Vermischung am Beckenrand auch ein ständiger Vertikaltransport des Wasserkörpers statt (HAGEN und FEISTEL, 2001; REISSMANN et al., 2009). Räumlich verteilte Messungen gestatteten 2009 einen wesentlich genaueren Einblick in das Wechselspiel dieser Prozesse.

Die Abklingperiode nach dem warmen Einstrom im Frühjahr 2007 überschneidet sich mit einer Phase intensiver Messungen im östlichen Gotlandbecken, die im Rahmen des Baltic Sea Tracer Release Experiments (BaTRE) durchgeführt wurden. Im September 2007 wurde ein inertes Tracergas in ca. 200 m Tiefe injiziert (UMLAUF et al., 2008), dessen Ausbreitung Aufschluss über die beckenweite vertikale Vermischung geben soll. Das Tracerexperiment wurde von Langzeitverankerungen in der Beckenmitte und am Rand begleitet, deren Positionen in Abb. 20 dargestellt sind. In Ergänzung zu dem in Abb. 21 dargestellten Temperaturverlauf an der Station NE umfassen die Messungen an den Station NW, SW und C1 erstmalig auch Langzeitmessungen des Salzgehalts, der die Dichte in diesem Teil der Ostsee bestimmt und damit die dynamisch relevante Größe ist.

Der in Abb. 22 dargestellte Temperaturverlauf zeigt, völlig analog zu dem in Abb. 21 dargestellten Verlauf an der Station NE, ein langsames Abklingen der Temperaturfluktuationen. Obwohl naheliegend, kann es manchmal voreilig sein, ohne Kenntnis der räumlichen Verhältnisse aus diesem Zeitverlauf Rückschlüsse auf die typische Abklingzeit von durch den Einstrom verursachter „Unruhe“ im Temperaturfeld zu schließen, wie folgendes einfache Argument deutlich macht: Die durch das warme Einstromwasser verursachte leichte Erhöhung der bodennahen Temperaturen führte zur Ausbildung eines Temperaturminimums im untern Teil der Wassersäule, das sich durch Vermischung langsam nach unten verlagerte. Wie aus der Konvergenz der Temperaturverläufe in 189 und 211 m (Abb. 22) deutlich wird, lag dieses Minimum zu Anfang des Jahres 2009 etwa bei 200 m. Da kleine dynamische vertikale Bewegungen des Wasserkörpers im Bereich des Temperaturminimums per Definition keine Temperaturfluktuationen hervorrufen, ist das in Abb. 21 und 22 beobachtete Abklingen von Fluktuationen anscheinend auf eine vertikale Verlagerung des Temperaturminimums zurückzuführen, das dynamisch nicht mit dem Einstrom im April/Mai 2007 in Zusammenhang stand.

Dieses Argument wird durch den Verlauf der in Abb. 22 ebenfalls dargestellten Salinitäten (d.h. der Dichten) unterstrichen, deren Varianz in Frühsommer einbrach, aber im Herbst wieder anwuchs, im Gegensatz zu der weiterhin abklingenden Varianz der Temperaturfluktuationen. Eine im Rahmen von BaTRE durchgeführte genauere Untersuchung dieses Phänomens hat gezeigt, dass sowohl Temperatur- als auch Salinitätsfluktuationen direkt an lokale Windereignisse gekoppelt waren, die in den Sommermonaten seltener und schwächer sind - und nicht an die zurückliegende Dynamik des Einstromereignisses. Daraus folgt, zumindest in dem hier vorliegenden Fall, dass die durch Einstromereignisse verursachten dynamischen Prozesse im Tiefenwasser wesentlich schneller abklingen als bisher angenommen.

Insgesamt zeigt Tab. 5, dass sich die seit Herbst 1997 herrschende „Warmzeit“ im Tiefenwasser der zentralen Ostsee auch im Jahr 2009 fortgesetzt und sogar noch verstärkt hatte. Alle zentralen Becken zeigten im Jahresdurchschnitt 2009 bei den angegebenen Tiefen ihre Höchstwerte der letzten 5 Jahre, mit Ausnahme des Landsorttiefs, wo aber der aktuelle Temperaturwert nur um unwesentliche $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ unter dem Maximum von 2006 lag. Als Ursache für diese seit 12 Jahren anhaltende Warmzeit muss das fortgesetzte und klimatisch bedingte Ausbleiben häufiger starker winterlicher Einstromereignisse angesehen werden. Barokline und schwache barotrope Ereignisse im Sommer und Herbst, die in unregelmäßiger Folge meist mehrfach im Jahr zu beobachten sind, haben dadurch einen prägenden Einfluss auf die hydrophysikalischen Verhältnisse in der zentralen Ostsee gewonnen.

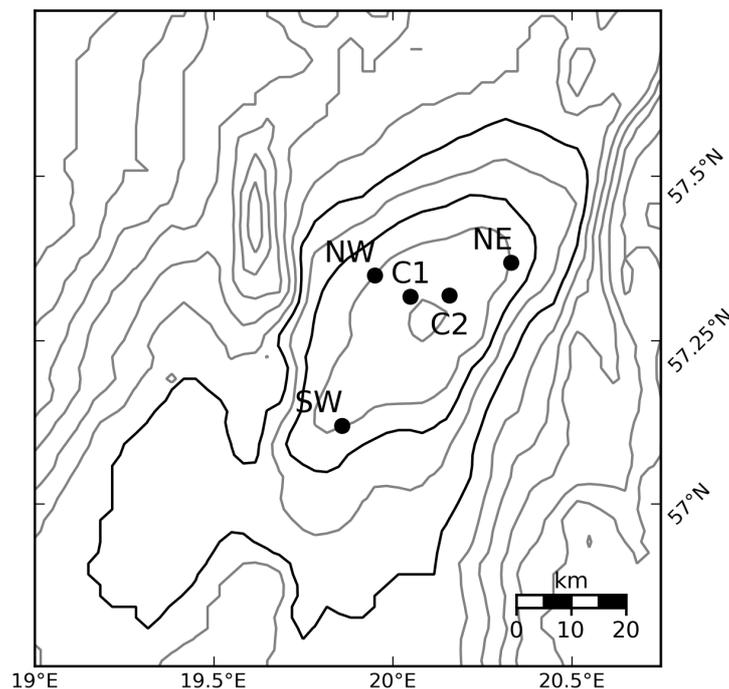


Abb. 20

Topographie des östlichen Gotlandbeckens mit Verankerungspositionen während des Baltic Sea Tracer Release Experiments (BaTRE); die Isobathen 160 m und 200 m sind fett dargestellt. Die Verankerung NE nimmt Strömungs- und Geschwindigkeitsdaten in verschiedenen Tiefen auf, an den Randstationen NW und SW wird zusätzlich die Salinität gemessen. Die zentralen Stationen messen Geschwindigkeitsprofile, Temperatur und Salinität in verschiedenen Tiefen (C₁) bzw. Temperatur und Geschwindigkeit in einer Tiefe (C₂)

Fig. 20

Topography of eastern Gotland Basin with mooring positions during the Baltic Sea Tracer Release Experiment (BaTRE); the isobaths 160 m and 200 m are shown in bold. Mooring NE records currents and temperature at different levels, boundary stations NW and SW measure in addition salinity. The central station measures velocity profiles, temperature and salinity at different levels (C₁), as well temperature and velocity at one level (C₂)

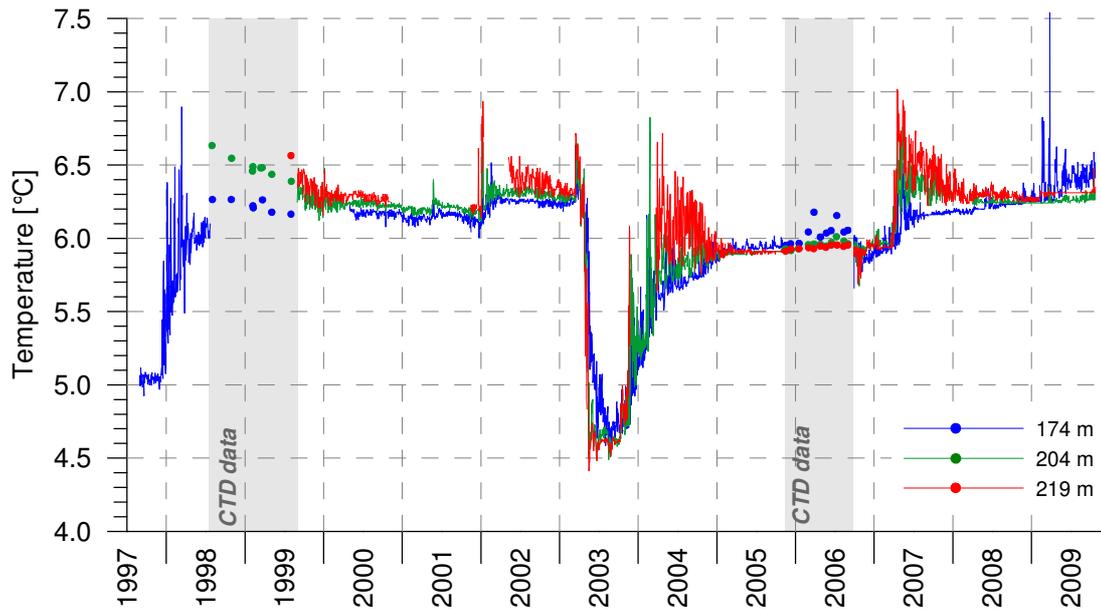


Abb. 21

Die „Hagen-Kurve“ zeigt den Temperaturverlauf des Tiefenwassers im östlichen Gotlandbecken (EGB) von September 1997 bis September 2009 an 3 Tiefenniveaus einer Verankerung bei 224 m Wassertiefe (HAGEN und FEISTEL, 2001, 2004). Abrupte Änderungen zeigen Einstromprozesse an, insbesondere die von 1997, 2001, 2002, 2003 und 2007

Fig. 21

The „Hagen curve“ shows the temperature signal of the deep water in the eastern Gotland Basin (EGB) between September 1997 and September 2009 at three depth levels of a mooring at 224 m bathymetric depth (HAGEN and FEISTEL, 2001, 2004). Abrupt changes indicate inflow processes, in particular those of 1997, 2001, 2002, 2003 and 2007

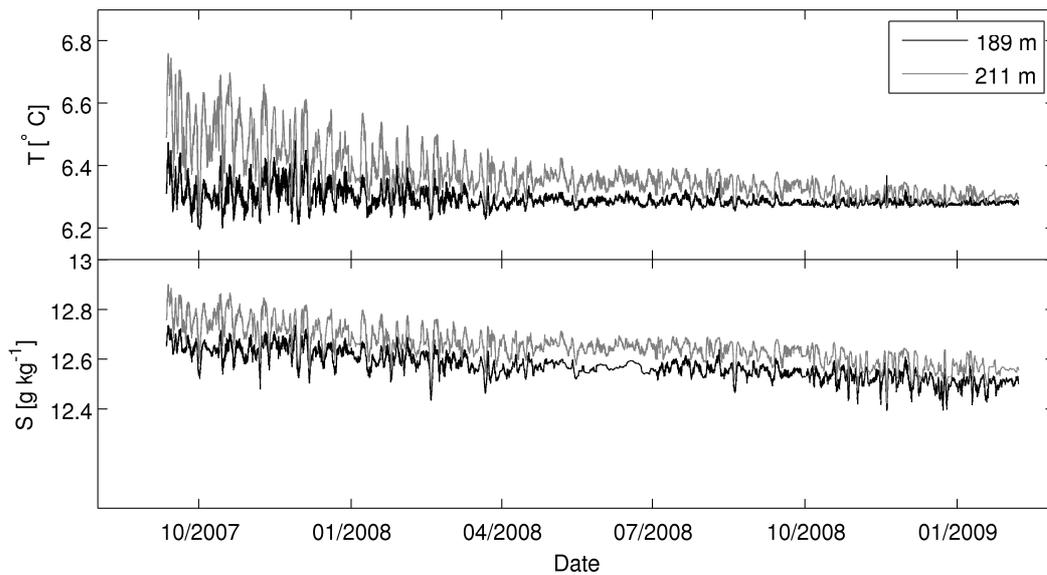


Abb. 22

Temperatur (oben) und Salzgehalt an der Station NW (siehe Abb. 20) nach dem Einstrom im Frühjahr 2007

Fig. 22

Temperature (top) and salinity measured at station NW (see Fig. 20) after the inflow event in spring 2007

Der erste in dieser langen Folge von ungewöhnlich warmen und in dieser Form zuvor selten beobachteten Einstromen aus der Nordsee war barotrop und fand im September 1997 statt (Abb. 21; HAGEN und FEISTEL, 2001; MATTHÄUS et al., 2008), gefolgt von einem ähnlichen, aber schwächeren barotropen Einstrom im Oktober/November 2001 (FEISTEL et al., 2003b). Obwohl barokline Austauschvorgänge seit langem bekannt sind, bei denen anhaltend brackiges, salzarmes Wasser an der Oberfläche ausströmt und am Boden gleichzeitig salzreiches Wasser über die Darßer Schwelle einströmt („Kompensationsstrom“), war die große Reichweite und Wirkung auf den Wasseraustausch der tiefen Becken jenseits des Bornholmtiefs, die durch die baroklinen Einstrome 2002 und 2003 verursacht wurde, sowohl für beobachtende wie auch modellierende Ostseeforscher überraschend und neuartig (FEISTEL et al. 2003a, b, 2004a, b; NAUSCH et al. 2003, 2004; MATTHÄUS et al., 2008). Seither werden in unregelmäßiger Abfolge kleine barotrope und barokline Einstromereignisse registriert, die zum Auftreten auffällig warmer Zwischenschichten von typischerweise 5 – 10 m Dicke in Tiefen zwischen 100 und 150 m in der zentralen Ostsee führen. Das Jahr 2009 ordnet sich systematisch in dieses seit 2003 verstärkt beobachtete charakteristische Verhalten ein.

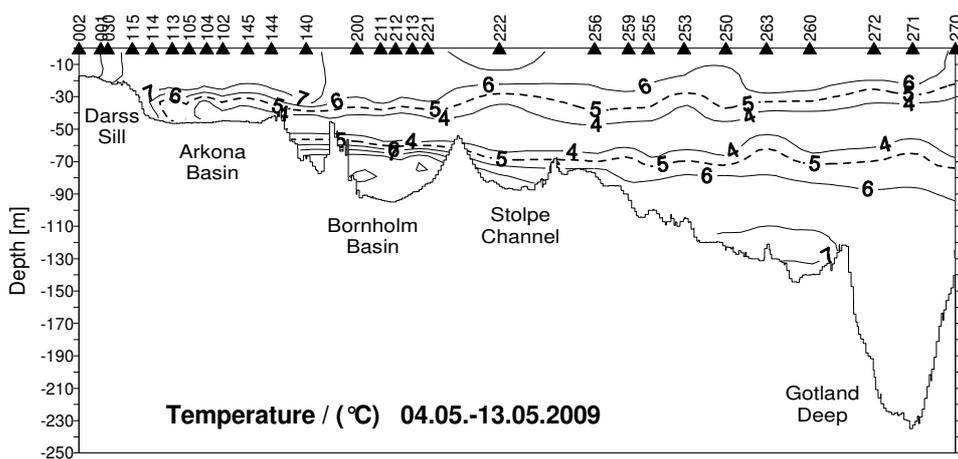
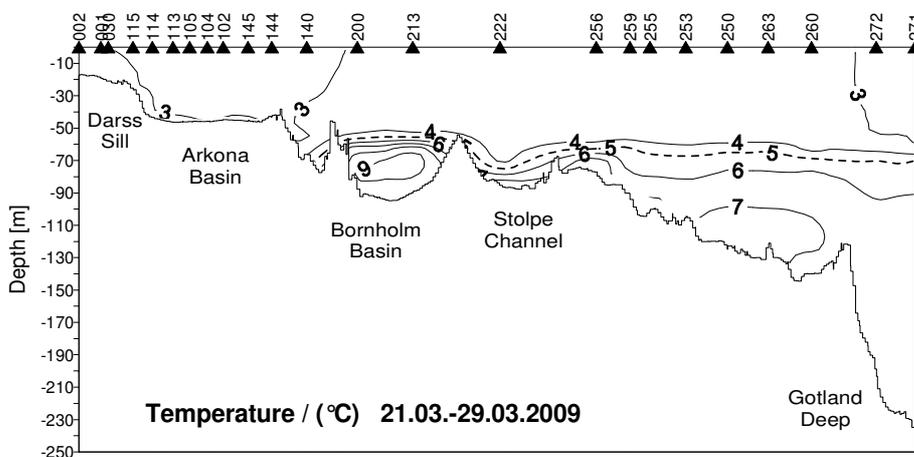
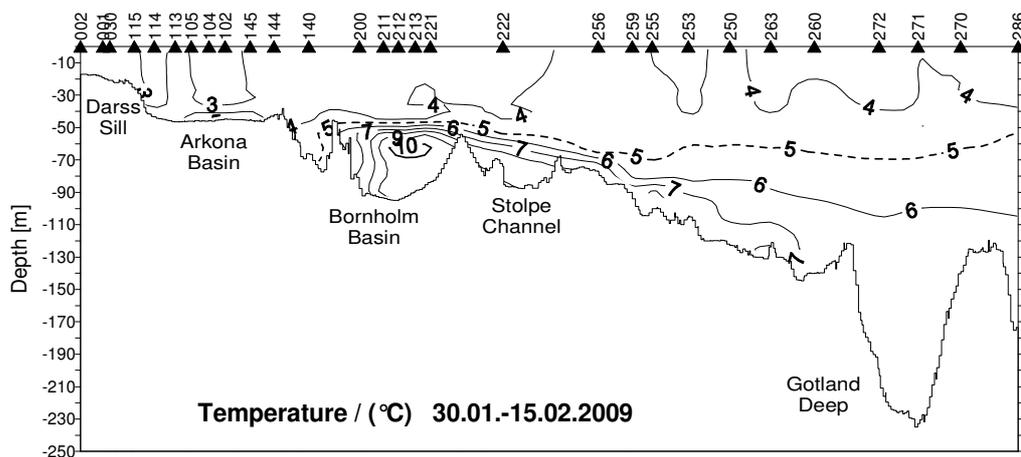


Abb. 23

Vertikale Verteilung der Wassertemperatur zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 23

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= 8-16)

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= 8-16)

Wassertemperatur (°C; Maximalwerte hervorgehoben)

Station	Tiefe/m	2005	2006	2007	2008	2009
213 (Bornholmtief)	80	7,20 ± 0,15	8,26 ± 0,80	8,95 ± 0,36	7,92 ± 0,80	9,04 ± 0,54
271 (Gotlandtief)	200	5,91 ± 0,02	5,95 ± 0,04	6,22 ± 0,21	6,29 ± 0,01	6,29 ± 0,01
286 (Fårötief)	150	6,05 ± 0,03	6,15 ± 0,08	6,02 ± 0,05	6,11 ± 0,02	6,43 ± 0,17
284 (Landsortief)	400	5,74 ± 0,06	5,80 ± 0,08	5,71 ± 0,04	5,70 ± 0,08	5,79 ± 0,06
245 (Karlsötief)	100	5,18 ± 0,11	5,16 ± 0,15	5,17 ± 0,08	5,24 ± 0,08	5,31 ± 0,09

Salzgehalt (psu; Maximalwerte hervorgehoben)

Station	Tiefe/m	2005	2006	2007	2008	2009
213 (Bornholmtief)	80	16,02 ± 0,21	16,21 ± 0,43	16,07 ± 0,35	15,49 ± 0,24	15,59 ± 0,17
271 (Gotlandtief)	200	12,60 ± 0,04	12,52 ± 0,04	12,61 ± 0,06	12,54 ± 0,02	12,43 ± 0,03
286 (Fårötief)	150	12,08 ± 0,05	12,01 ± 0,04	12,02 ± 0,04	11,93 ± 0,08	11,84 ± 0,04
284 (Landsortief)	400	11,06 ± 0,06	11,05 ± 0,05	11,05 ± 0,09	11,00 ± 0,05	10,86 ± 0,06
245 (Karlsötief)	100	10,09 ± 0,21	10,17 ± 0,22	10,20 ± 0,12	10,08 ± 0,18	9,98 ± 0,09

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

Station	Tiefe/m	2005	2006	2007	2008	2009
213 (Bornholmtief)	80	-0,67 ± 0,95	0,85 ± 0,49	0,46 ± 0,50	1,15 ± 0,89	1,13 ± 0,74
271 (Gotlandtief)	200	0,23 ± 0,44	-1,58 ± 0,88	-1,46 ± 0,55	2,22 ± 0,49	-3,09 ± 0,47
286 (Fårötief)	150	-0,24 ± 0,47	-1,20 ± 0,34	-0,72 ± 0,35	-1,06 ± 0,33	-1,25 ± 0,78
284 (Landsorttief)	400	-0,26 ± 0,35	-0,71 ± 0,15	-0,81 ± 0,23	-1,02 ± 0,29	-1,17 ± 0,17
245 (Karlsötief)	100	-0,54 ± 0,73	-1,29 ± 0,53	-1,19 ± 0,72	-0,63 ± 0,57	-0,61 ± 0,42

6.2 Salzgehalt

Die Verteilung des Salzgehalts in der Ostsee 2009 ist in Abb. 24 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 durch nur 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 beeinflussen wegen ihrer zu geringen Wasserdichte die Schichten im Bornholmbecken unterhalb 60 m normalerweise kaum. So werden alle größeren Einstromprozesse von diesem Wasserkörper im Bornholmtief nahezu modellhaft deutlich widergespiegelt (FEISTEL et al., 2008a, b). Hat neu einströmendes Wasser eine sehr große Dichte, so lagert es sich am Boden des Bornholmbeckens ab und hebt das alte Wasser dort an. Dieser Vorgang ist durch die zeitliche Erhöhung des bodennahen Salzgehalts in den Daten gewöhnlich leicht zu erkennen. Bei Einstrom mit einer geringeren als bereits am Boden vorhandenen Dichte schiebt sich das neue Wasser jedoch in das passende ursprüngliche „Dichtestockwerk“ ein, also genau dort, wo diese Dichte und damit ein sehr ähnlicher Salzgehalt bereits vorher vorhanden war. Dieser Umstand macht kleinere Einstrome bei der gegebenen groben räumlichen und zeitlichen Abtastung trotz der hohen Messgenauigkeit in der Salzverteilung nahezu unsichtbar. Bessere Indikatoren sind in solchen Fällen „passive Tracer“ wie Temperatur oder Sauerstoffgehalt. Ähnlich sind die Verhältnisse auch bei allen anderen Ostseebecken.

Im Jahr 2009 trat im Bornholmtief bodennah ein deutlicher Anstieg des Salzgehalts nur zwischen dem 6. Oktober mit 15,4 g/kg und dem 11. November mit 16,6 g/kg auf. Dieser Sprung ist begleitet von einem ähnlich drastischen Temperaturanstieg (Kapitel 6.1.2) und deutet somit auf ein Einstromereignis mit warmen Wassermassen hin. Solch ein kleiner Einstrom wurde in der ersten Oktoberhälfte beobachtet (Kapitel 2), als das durch Sturmtief „Sören“ am 3.10. vertikal vermischte Wasser der westlichen Ostsee in das Arkonabecken vordrang (SCHMIDT, 2009). Ein Profil vom 6.11. im Bornholmbecken zeigt, dass der Salzgehalt in der Deckschicht deutlich erhöht war gegenüber dem Vormonat, der Salzgehalt bei 60 m Tiefe mit 10,0 g/kg und in der gesamten Wassersäule darunter aber die mit Abstand niedrigsten Werte des ganzen Jahres aufwies, so etwa 12,2 g/kg bei 70 m. Dieser Befund deutet darauf hin, dass die Windmischung durch „Sören“ alle Schichten bis zum Boden des Bornholmbeckens beeinflusst hatte. Die weiteren gemessenen Schwankungen des Salzgehalts im Bornholmbecken erscheinen eher insignifikant und sind nur schwer von dynamischen Bewegungen in der Beckenschichtung unterscheidbar. Mehr Einzelheiten können aus der Änderung der Temperaturverteilung geschlossen werden, Kap. 6.1.2.

In den Messwerten der Deckschicht des Gotlandbeckens zeigte sich 2009 der typische Jahresgang mit einem Maximum von 7,4 g/kg an der Oberfläche im April und einem Minimum von 6,8 g/kg im August. In den Wintermonaten ist die Salz- und Temperaturschichtung oberhalb der Halokline wenig ausgeprägt (REISSMANN et al., 2009); so war es auch 2009. Das Sturmtief „Sören“ sorgte im Oktober für eine nahezu perfekte Vermischung bis 40 m Tiefe; darunter erscheint bis 100 m der Salzgehalt z.T. deutlich höher als im Vormonat. Ähnlich wie in der Bornholmsee scheint der Sturm bis in diese Tiefe eine verstärkte turbulente Vermischung bewirkt zu haben. In Bodennähe des Gotlandtiefs fiel der Salzgehalt langsam von 12,6 g/kg im Januar auf 12,5 g/kg im Dezember; ein typischer Vorgang für Stagnationsphasen. In bestimmten Zwischenschichten traten Erhöhungen des Salzgehalts auf, so etwa von 11,2 g/kg im Januar auf 11,7 g/kg im April in etwa 125 m Tiefe. Da dieses Signal mit einem entsprechenden Temperaturanstieg einherging (JÜRGENS, 2009), kann hier von einer Einschichtung des kleinen Einstroms Ende 2008 als Ursache ausgegangen werden.

Im Farö- und im Landsorttief waren 2009 außer dem Jahresgang in der Deckschicht keine auffälligen Änderungen in der Salzverteilung zu beobachten. Im Karlsötief ist die Salzschichtung generell schwächer und die 2009 vorgefundenen Änderungen des Bodensalzgehalts scheinen durch vertikale Vermischung verursacht worden zu sein, entweder durch Winterkonvektion oder durch turbulente Windmischung. So trat ein Minimum von 9,9 g/kg im März und eines von 9,7 g/kg im November 2009 in Bodennähe auf, im Vergleich zum Maximalwert von 10,3 g/kg im Oktober 2009. Die dann jeweils nachfolgende Erhöhung des Salzgehalts kann nur durch lateralen Zustrom aus anderen, benachbarten Regionen erklärt werden. Insofern zeigte das Karlsötief 2009 eine stärkere Dynamik als die anderen Tiefs des westlichen Gotlandbeckens.

Die mittleren Oberflächensalzgehalte, Tab. 6, lagen 2009 in allen zentralen Becken der Ostsee deutlich unter den Maximalwerten, die im Jahrzehnt um 1980 herum vor Beginn der langen Stagnationsperiode gemessen worden waren, aber nur leicht unter den Langzeitmitteln 1952-2005 (FEISTEL et al., 2008a) und im Bereich der Streuung der letzteren. Ein systematischer Trend zur Aussüßung oder Versalzung der Oberfläche war im letzten Jahrfünft nicht zu erkennen; der Salzverlust der Ostsee durch das Ausbleiben großer Einströme wird in den mittleren und oberen Schichten offenbar relativ gut durch die häufigeren kleinen Ereignisse kompensiert.

Tab. 6

Jahresmittelwerte von 2005 bis 2009 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 2005 to 2009 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	2005	2006	2007	2008	2009	1952-2005
213 (Bornholmtief)	7,59 ± 0,08	7,33 ± 0,10	7,58 ± 0,24	7,58 ± 0,10	7,54 ± 0,15	7,60 ± 0,29
271 (Gotlandtief)	7,20 ± 0,22	6,92 ± 0,38	7,15 ± 0,14	7,19 ± 0,25	7,15 ± 0,16	7,26 ± 0,32
286 (Farötief)	6,85 ± 0,26	6,62 ± 0,33	6,88 ± 0,22	6,85 ± 0,39	6,80 ± 0,28	6,92 ± 0,34
284 (Landsorttief)	6,60 ± 0,32	6,66 ± 0,18	6,54 ± 0,25	6,49 ± 0,37	6,63 ± 0,14	6,75 ± 0,35
245 (Karlsötief)	7,02 ± 0,22	6,96 ± 0,12	6,81 ± 0,27	7,11 ± 0,16	6,84 ± 0,25	6,99 ± 0,32

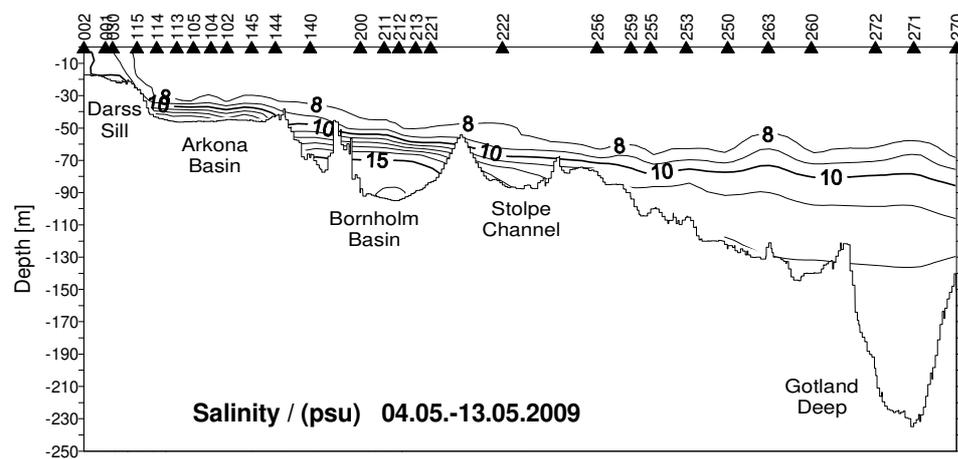
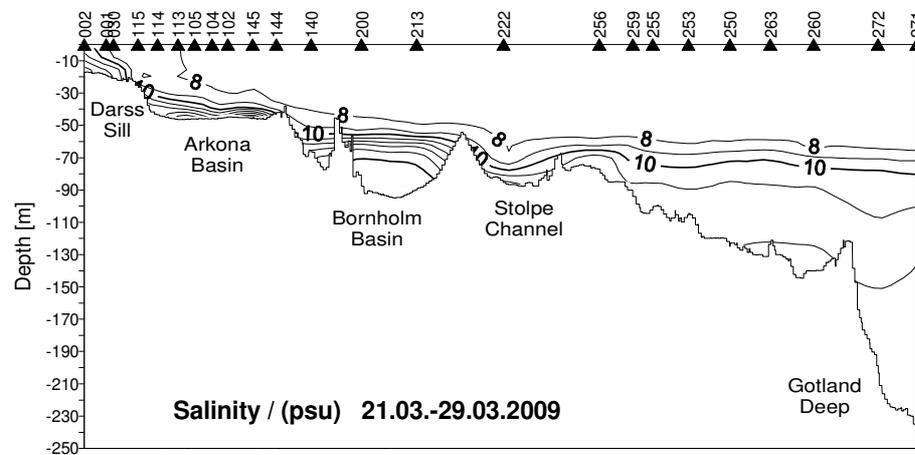
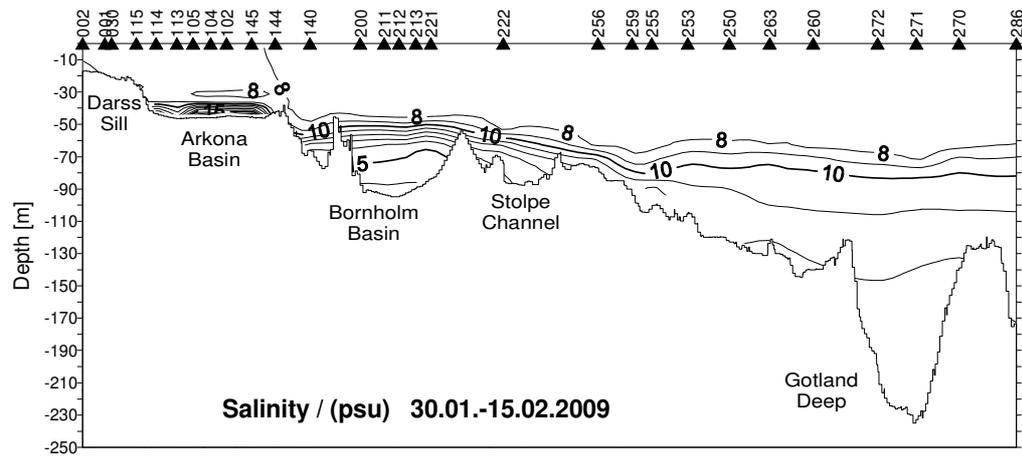


Abb. 24
Vertikale Verteilung des Salzgehaltes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 24
Vertical salinity distribution between Darss Sill and northern Gotland Basin

6.3 Sauerstoffverteilung

Die Komponenten der Sauerstoffbilanz eines Gewässers sind durch Zufuhr aus der Atmosphäre und durch die Primärproduktion sowie Verbrauch durch Atmung, Abbau und Mineralisation organischer Stoffe und Verlust an die Atmosphäre gekennzeichnet. Demnach ist die Sauerstoffbilanz eines Gewässers umso schlechter je geringer der Eintrag an Sauerstoff durch die Oberfläche und die Photosyntheseaktivität und je intensiver die Stoffwechsellleistungen heterotropher Organismen sind (SCHWOERBEL, 1984).

Der Sauerstoffgehalt wird auch durch temperatur- und salzgehaltsbedingte Schichtungen, vertikale Zirkulation, Advektion und Konvektion beeinflusst. Demzufolge kann die Sauerstoffversorgung des Oberflächenwassers in der Regel als gut angesehen werden. Die Veränderungen des Sauerstoffgehaltes werden im Wesentlichen durch die Jahresgänge von Temperatur und Salzgehalt (vgl. NAUSCH et al., 2008a, 2009) und die jahreszeitlich unterschiedlich stark ausgeprägten Produktions- und Zehrungsprozesse verursacht. Unterhalb permanenter oder temporärer Sprungschichten kann es dagegen zu einer erheblichen Sauerstoffzehrung kommen, da diese Wasserschichten nicht durchlichtet sind, folglich nur Zehrungsprozesse stattfinden. Dies wird auch aus Abb. 26 ersichtlich, die einen Schnitt von der Darßer Schwelle bis ins nördliche Gotlandbecken für die durchgeführten Fahrten zeigt.

In der durchmischten Oberflächenschicht kann ein typischer Jahresgang des Sauerstoffgehaltes beobachtet werden (MATTHÄUS, 1978, NAUSCH et al., 2008a). Auf Grund der hohen Gaslöslichkeit bei geringeren Temperaturen finden sich hohe Sauerstoffkonzentrationen im Winter sowie während der Frühjahrsblüte des Phytoplanktons. Im Sommer finden sich dagegen temperaturbedingt niedrigere Konzentrationen. Die herbstliche Abkühlung führt zu einer erneuten Zunahme des Sauerstoffgehaltes (Tab. 7).

Tab. 7

Jahresgang des Sauerstoffgehaltes in der durchmischten Oberflächenschicht (0 – 10 m) im Jahr 2009

Tab. 7

Annual oxygen cycle in the mixed surface layer (0 – 10 m) in 2009

	Februar	März	Mai	August	November
westl. Ostsee					
O₂ (ml/l)	8.52	8.44	7.42	6.20	7.21
Stabw. (ml/l)	0.05	0.16	0.22	0.07	0.17
n	5	5	5	4	5
Arkonabecken					
O₂ (ml/l)	8.79	9.14	8.25	6.51	7.45
Stabw. (ml/l)	0.14	0.11	0.07	0.08	0.11
n	13	11	12	7	13
Bornholmbecken					
O₂ (ml/l)	8.42	8.79	8.68		
Stabw. (ml/l)	0.04	0.10	0.10		
n	4	3	4		
östl. Gotlandbecken					
O₂ (ml/l)	8.37	8.57	9.13		
Stabw. (ml/l)	0.06	0.07	0.10		
n	9	9	9		

Um den Einfluss von Temperatur und Salzgehalt auf die Sauerstofflöslichkeit zu eliminieren, wird häufig der Sauerstoffsättigung gegenüber der Sauerstoffkonzentration der Vorrang gegeben. Dadurch wird die Vergleichbarkeit der Messwerte deutlich erhöht. Abb. 25 fasst die Sauerstoffsättigungswerte des Oberflächenwassers für das Jahr 2009 zusammen. Der typische Jahresgang wird deutlich. Im Ergebnis der Dominanz sauerstoffzehrender Prozesse und geringer Produktion ist das Oberflächenwasser im Winter mit etwa 95 - 97% leicht untersättigt. Mit Beginn der Frühjahrsblüte des Phytoplanktons steigt die Sättigung an. In der westlichen Ostsee ist das Maximum der Blüte im März bereits überschritten während sie im Arkonabecken noch stattfindet. Nur leicht höhere Sättigungswerte deuten im Bornholmbecken erst den Beginn der Phytoplanktonblüte an. Das östliche Gotlandbecken ist dagegen noch durch eine typische Wintersituation gekennzeichnet. In beiden letztgenannten Becken finden sich die höchsten Sättigungswerte erst im Mai. Während des Sommers herrscht durchgehend eine leichte Übersättigung durch die Aktivität der Algen vor. Im Herbst führen verstärkte Abbauprozesse erneut zu einer Untersättigung. Die Sättigungswerte liegen bei 98 %. Generell muss festgestellt werden, dass die jährliche

Schwankungsbreite der Sättigung wie schon in den Vorjahren relativ gering ist. Dies spricht für eine gesunde Sauerstoffbilanz des Oberflächenwassers. Extreme Übersättigungen zwischen 140 und 160%, wie sie z.B. von NEHRING et al. (1995a) für das Jahr 1994 beschrieben wurden, treten nicht mehr auf.

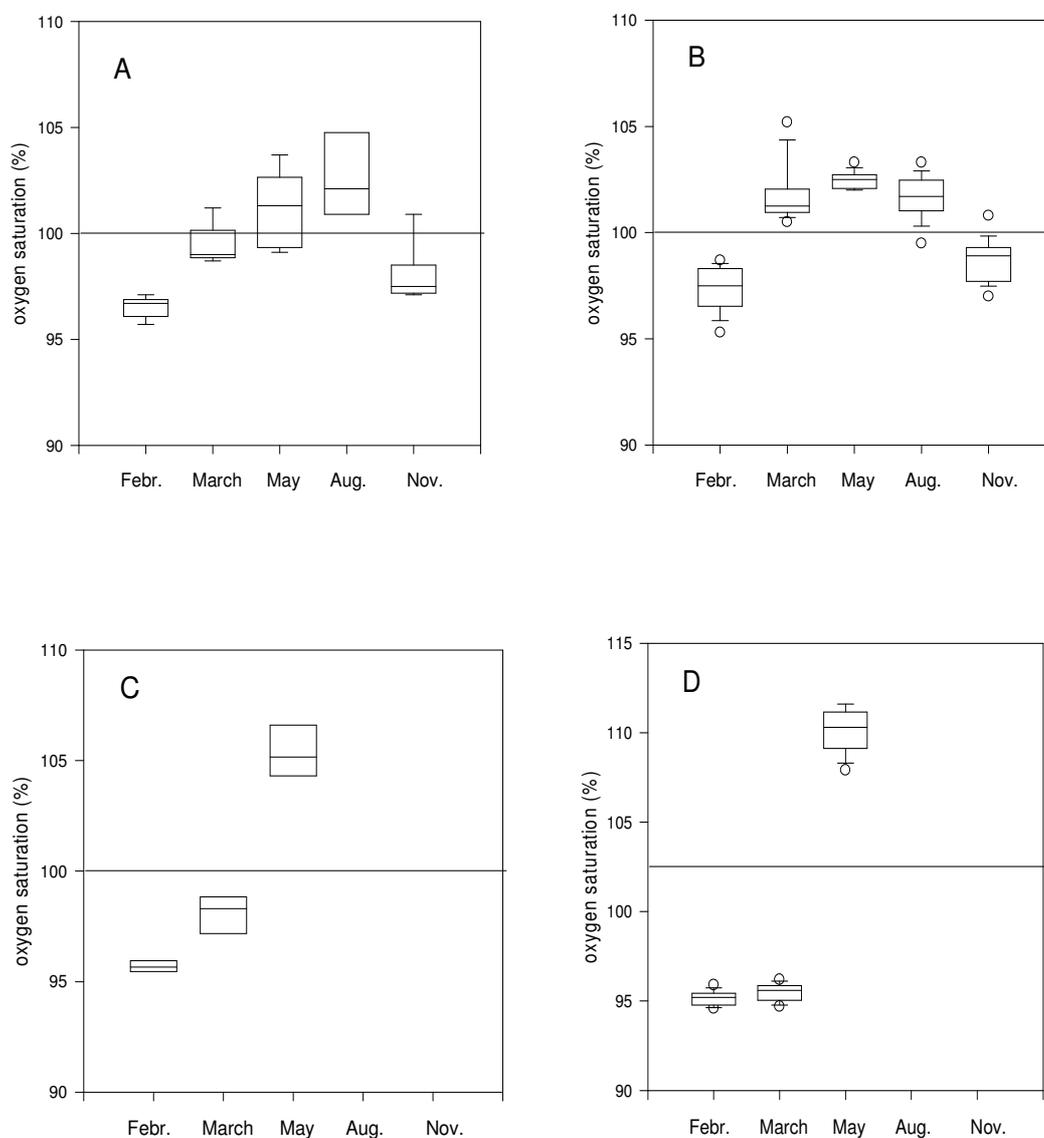


Abb. 25

Box-Whisker-Plots der Sauerstoffsättigung (%) im Jahr 2009 in der Oberflächenschicht (0 – 10 m) in der westlichen Ostsee (A), im Arkonabecken (B), im Bornholmbecken (C) und im östlichen Gotlandbecken (D)

Fig. 25

Box-Whisker-Plots of oxygen saturation (%) 2009 in the mixed surface layer (0 – 10 m) of the western Baltic (A), the Arkona Basin (B), the Bornholm Basin (C) and the eastern Gotland Basin (D)

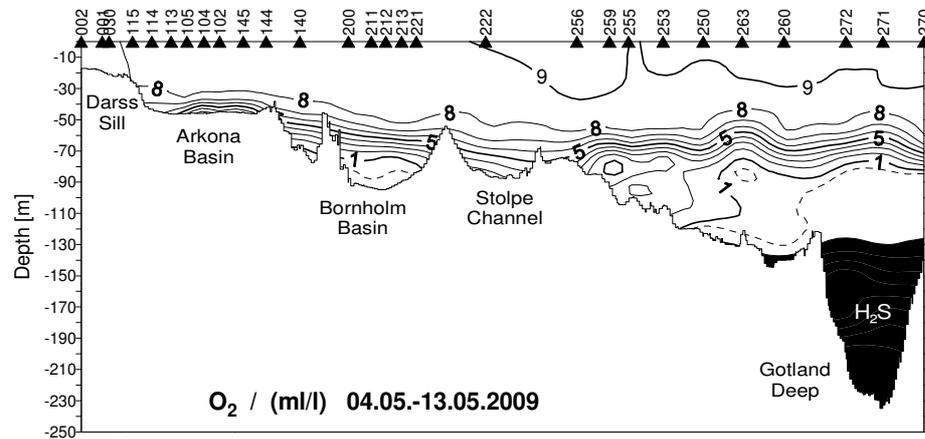
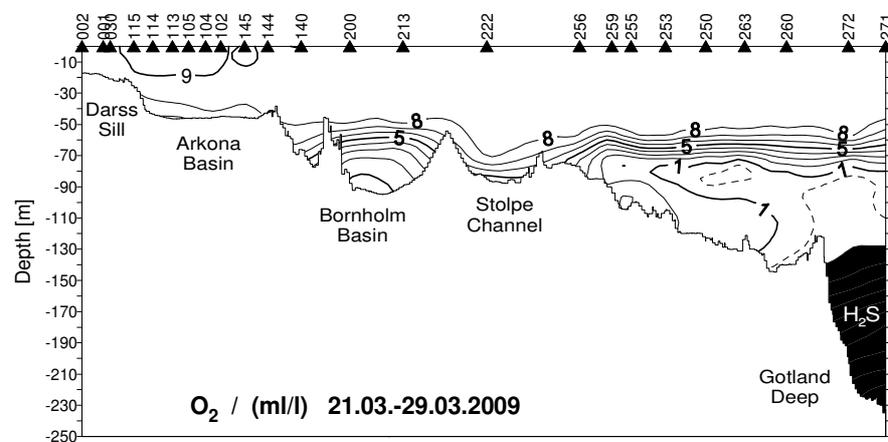
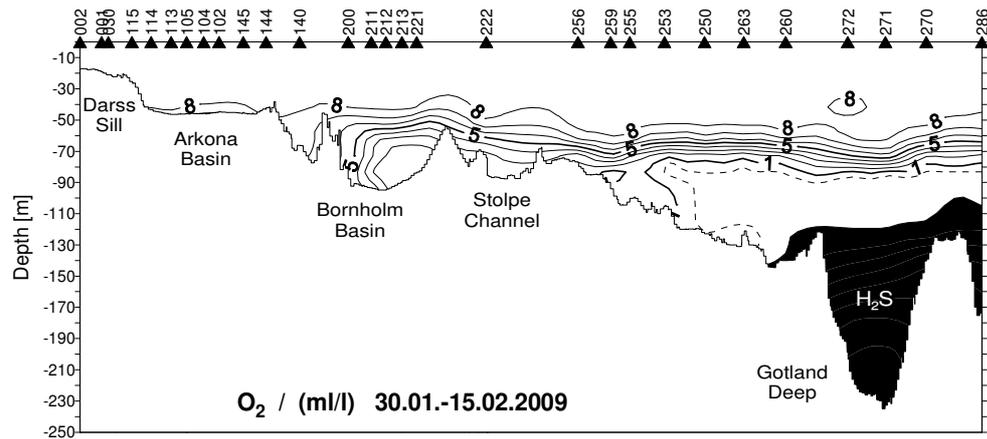


Abb. 26

Vertikale Verteilung des Sauerstoffgehaltes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 26

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

In der flachen westlichen Ostsee und im Arkonabecken ist auch in Bodennähe ein ausgeprägter Jahresgang zu beobachten. Im Winterhalbjahr kommt es zu einer vertikalen Durchmischung bis zum Grund. Zusätzlich führen Einstromprozesse wiederholt zur Wassererneuerung, so dass im Winter und Frühjahr eine recht gute Sauerstoffversorgung bis zum Grund vorherrscht. Die Ausbildung der thermischen Schichtung und der verstärkte Abbau der organischen Substanz führen im Sommer zu einem Rückgang der Sauerstoffsättigung in den bodennahen Schichten beider Seegebiete (Abb. 27). Der Vergleich der Jahre 2008 und 2009 zeigt einen weitgehend identischen Verlauf. Lediglich im Herbst liegen die Sättigungswerte 2009 deutlich unter denen des Vorjahres. Der Wasserkörper ist noch deutlich geschichtet. Eine Durchmischung bis zum Boden hat noch nicht stattgefunden. Genauere Aussagen zur jahreszeitlichen Entwicklung von Sauerstoffgehalt und -sättigung können den Registrierungen am Messmast „Darßer Schwelle“ (vgl. Kapitel 3) und an der Bojenstation „Arkonabecken“ (vgl. Kapitel 4) entnommen werden.

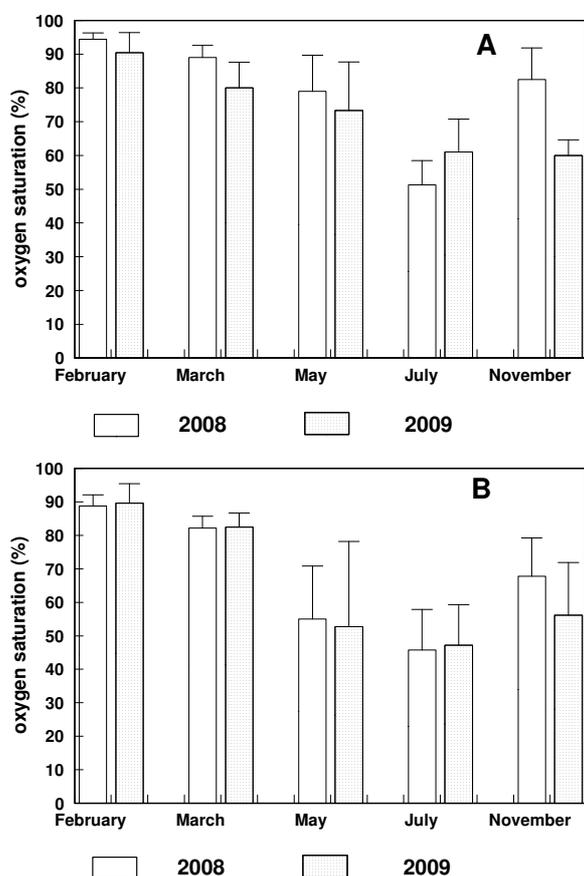


Abb. 27

Sauerstoffsättigung in Bodennähe in der westlichen Ostsee (A) und im Arkonabecken (B) in den Jahren 2008 und 2009

Fig. 27

Oxygen saturation in the bottom near layer of the western Baltic (A) and the Arkona Basin (B) in 2008 and 2009

Die Periode der größten Sauerstoffverarmung in der westlichen Ostsee wird in der Regel im Spätsommer/Frühherbst beobachtet. Die Messfrequenz der Überwachungsfahrten reicht nicht aus, diesen Zeitraum zu erfassen. Jedoch führt das Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (LLUR) mit dem Mess- und Laborschiff "Haithabu" in diesem Zeitraum seit mehreren Jahren intensive Untersuchungen zum Sauerstoffgehalt in Bodennähe durch. Die Beprobung 2009 erfolgte vom 8. – 29. September, insgesamt wurden 49 Stationen, davon 34 mit einer Wassertiefe von > 15 m untersucht. Die Ergebnisse sind in Abb. 28 zusammen gefasst.

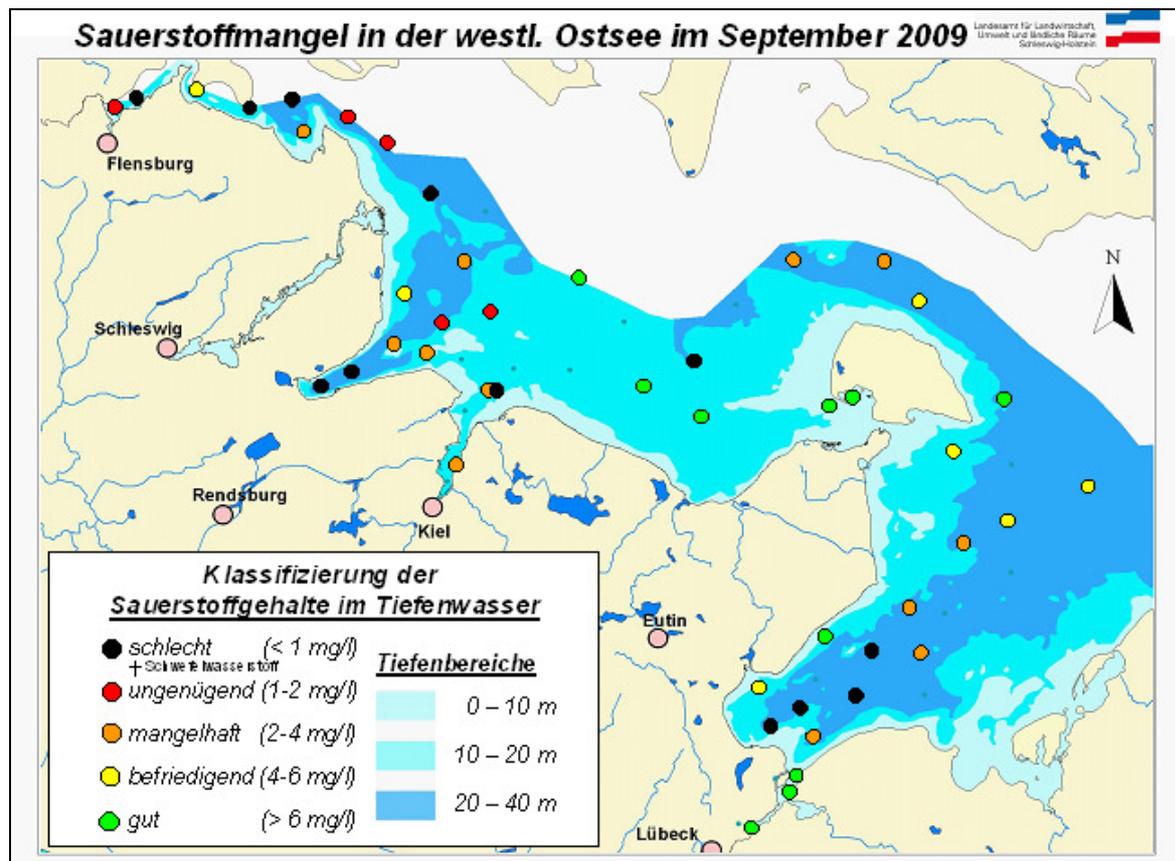


Abb. 28

Sauerstoffmangel in der westlichen Ostsee im September 2009 (LLUR, 2009) –
 $\text{mg/l} \times 0.7005 = \text{ml/l}$

Fig. 28

Oxygen deficiency in the western Baltic Sea in September 2009 (LLUR, 2009)
 $\text{mg/l} \times 0.7005 = \text{ml/l}$

Eine Auswertung der Sauerstoffmessungen 2009 zeigt, dass 50% aller Messwerte im Tiefenwasser auf die Klasse *schlecht* oder *ungenügend* (kleiner 2 Milligramm pro Liter) entfallen. Im Jahr 2008 war dieser Anteil mit 62% dagegen deutlich höher und im Jahr 2002 lag der Anteil sogar bei 92%. Grund für das bessere Ergebnis in Jahr 2009 sind stürmische Winde, die Ende August und Anfang September in der westlichen Ostsee vorherrschten und zwar jeweils aus unterschiedlichen Richtungen: zunächst aus Südwest und in der Woche darauf aus Nordost. Dies hat zu einer Verbesserung der Durchmischung geführt. Der Anteil an Messwerten mit *mangelhaften* Sauerstoffgehalten (größer 2 und kleiner 4 Milligramm pro Liter) liegt im September 2009 bei 29% (2008:18%, 2002: 4%).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass im Vergleich zum Vorjahr an weniger Stationen schlechte oder sehr schlechte Sauerstoffgehalte gemessen worden. Der Sauerstoffschwund ist somit nicht so weit verbreitet wie 2008 und den Jahren davor (LLUR, 2009). Das bisher größte Ausmaß an Sauerstoffschwund gab es im Jahr 2002 (HELCOM, 2003, NAUSCH et al., 2003). Das wird auch aus Abb. 29 deutlich.

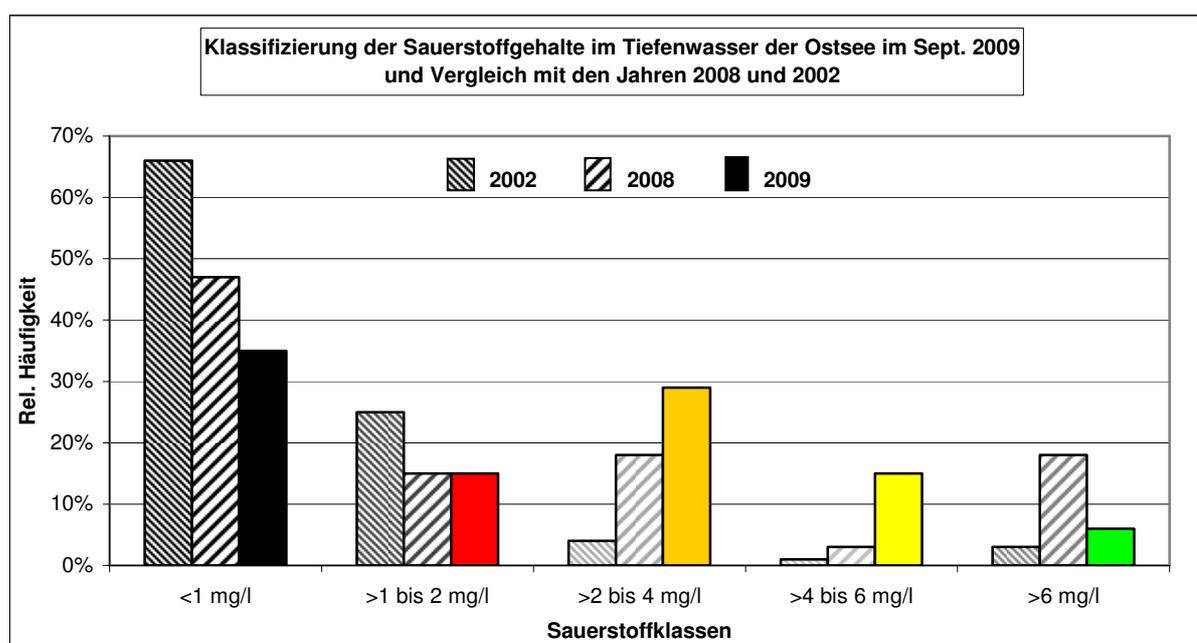


Abb. 29

Vergleich der gemessenen Sauerstoffgehalte im Tiefenwasser der westlichen Ostsee für die Jahre 2002, 2008 und 2009 (LLUR 2009) - $\text{mg/l} \times 0.7005 = \text{ml/l}$

Fig. 29

Comparison of the oxygen content in the bottom near layer of the western Baltic Sea in 2002, 2008 and 2009 (LLUR, 2009) - $\text{mg/l} \times 0.7005 = \text{ml/l}$

In den weiter östlich gelegenen, tieferen Becken der Ostsee wird die Situation im Tiefenwasser dagegen vorwiegend durch das Auftreten bzw. Ausbleiben von starken barotropen oder baroklinen Einstromprozessen geprägt. Der Salzwassereinbruch vom Januar 2003 war das letzte starke Einstromereignis in die Ostsee. Die Effekte dieses Ereignisses auf den Sauerstoffhaushalt waren ab 2005 kaum noch spürbar. Wie in den Vorjahren, konnten auch 2009 kleinere barotrope und barokline Einstromprozesse beobachtet werden (vgl. Kapitel 2), die sich jedoch nicht auf den Sauerstoffhaushalt des Bodenwassers der Tiefenbecken auswirkten. Das relativ starke Einstromsignal von Ende November 2009 konnte erst in Januar 2010 in Bornholmbecken nachgewiesen werden.

Generell können Einströme am ehesten das Tiefenwasser des Bornholmbeckens beeinflussen. Der Salzwassereinbruch vom Januar 2003 führte zu einer intensiven Belüftung in diesem Jahr. In 80 m Wassertiefe betrug der Jahresmittelwert 4,53 ml/l. Danach kam es auf Grund fehlender Einstromimpulse zu einem kontinuierlichen Rückgang des Sauerstoffgehaltes. Im Jahr 2005 wurde in 80 m Tiefe ein Jahresmittelwert von -0,67 ml/l ermittelt. In den Folgejahren konnten vorwiegend barokline Einströme die Sauerstoffsituation wieder verbessern. Auch im Jahr 2009 wurden durchweg oxische Verhältnisse angetroffen. Der Jahresmittelwert von 1,13 ml/l ist dem des Vorjahres vergleichbar (Tab. 5).

Im Tiefenwasser des östlichen Gotlandbeckens hält die Stagnationsperiode nach wie vor an. Im Vergleich zum Vorjahr nahm die Schwefelwasserstoffkonzentration, dargestellt als negative Sauerstoffkonzentration, weiter zu (Tab. 5). Die -3,09 ml/l des Jahres 2009 liegen mittlerweile in der gleichen Größenordnung wie sie am Ende der letzten großen Stagnationsperiode im Jahr 2009 angetroffen wurden (-3,82 ml/l). Ähnliche Aussagen wie für das Gotlandtief können auch für das nördlicher gelegene Farötief getroffen werden. Betrug der Jahresmittelwert in 150 m Wassertiefe 2002 -1,56 ml/l, wurde für 2009 ein Wert von -1,25 ml/l errechnet.

Im westlichen Gotlandbecken machen sich Salzwassereinbrüche deutlich verzögerter und gedämpfter Form bemerkbar. So konnte der Salzwassereinbruch vom Januar 2003 das Tiefenwasser des Landsorttiefs nicht nachhaltig belüften, da zunächst stagnierendes Wasser aus der vorgelagerten Becken verdrängt wird. Eine geringe Menge Sauerstoff in 400 m Wassertiefe, die im 1. Halbjahr 2004 zugeführt wurde, war bereits in der 2. Jahreshälfte wieder verbraucht (NAUSCH et al., 2005). Der Mittelwert für die Jahre 2004 und 2005 betrug -0,29 ml/l bzw. -0,26 ml/l und steigt seit dem kontinuierlich an (Tab. 5). Mittlerweile ist er höher als am Ende der letzten langen Stagnationsperiode 2003 (-1,01 ml/l).

Im südlicher gelegenen Karlsötief ist die Situation nicht so stabil. Wenngleich der 100 m Vergleichshorizont weitgehend frei von Sauerstoff ist, kann es kurzzeitig zu einer bis zum Boden reichenden Konvektion kommen. Dies wurde bereits in den Jahren 2007 und 2008 beobachtet.

6.4 Anorganische Nährstoffe

Weltweit stellt die Eutrophierung nach wie vor eines der ernstesten Probleme der Umweltbelastung dar (GIWA, 2003). Eutrophierungseffekte konnten im Bereich großer Städte entlang der Ostseeküste bereits in der 1. Hälfte des 20. Jahrhunderts nachgewiesen werden (ELMGREN und LARSSON, 2001). In der offenen Ostsee fanden sich in den 1960er Jahren erste Anzeichen der Eutrophierung (FONSELIUS, 1969), die bis Mitte der 1980er Jahre ernsthafte Ausmaße annahmen. Obwohl in den zurückliegenden Jahrzehnten umfangreiche Maßnahmen zur Nährstoffreduktion eingeleitet wurden, sind weite Gebiete der Ostsee weiterhin von Eutrophierung betroffen. Die erste einheitliche Bewertung des Eutrophierungszustandes der Ostsee (HELCOM, 2009) zeigte, dass sich nur 11 von 172 bewerteten Küstenarealen in einem guten Zustand befinden. Sie befinden sich ausnahmslos im Bottnischen Meerbusen. Die restlichen 161 Küstengebiete sind z.T. sehr stark von Eutrophierung beeinflusst. Auch die 9 in der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) klassifizierten offenen Seegebiete und Küstenzonen befinden sich in einem moderaten bis schlechten Eutrophierungszustand. Von den offenen Seegebieten wurden lediglich die Bottenwiek und der schwedische Teil des nordöstlichen Kattegat als nicht von Eutrophierung betroffen klassifiziert. Konsequenterweise stellt die Bekämpfung der Eutrophierung auch eines der wesentlichsten Elemente des „Baltic Sea Action Plans“ der HELCOM dar (HELCOM, 2007).

Exzessive Einträge von Stickstoff- und Phosphorverbindungen aus dem Einzugsgebiet der Ostsee sind die Hauptursache der Eutrophierung. 75% der Stickstoffbelastung und 95% des Phosphoreintrags gelangen über die Flüsse und aus direkten Quellen in die Ostsee. Über die Atmosphäre werden zusätzlich 25% der Stickstoffverbindungen eingetragen. Die Beschreibung der Nährstoffsituation gehört deshalb seit der Etablierung eines einheitlichen Überwachungsprogramms der HELCOM 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.

In der Oberflächenschicht weisen Phosphat und Nitrat den für die gemäßigten Breiten typischen Jahresgang auf (NEHRING und MATTHÄUS, 1991; NAUSCH et al., 2008b). Abb. 30 zeigt dies für die Arkonasee. Auf Grund der Dominanz von Abbauprozessen und nur geringer biologischer Aktivität finden wir im Winter die höchsten Konzentrationen von Phosphat und Nitrat. Der länger anhaltende Winter in der zentralen Ostsee führt hierbei zur Ausbildung eines typischen Nährstoffwinterplateaus, das für Trenduntersuchungen genutzt werden kann (NAUSCH und NEHRING, 1996). Da die Frühjahrsblüte in der westlichen Ostsee und im Arkonabecken deutlich früher einsetzt, häufig schon Anfang März oder Ende Februar, stellt sich dieses Plateau eher als Peak dar. In den Jahren 2008 und 2009 waren die winterlichen Phosphat- ($0,60 \mu\text{mol/l}$) und Nitratkonzentrationen ($2,7 - 2,8 \mu\text{mol/l}$) auf ähnlichem Niveau (Abb. 30, Tab. 8). In beiden Jahren wird deutlich, dass das Nitratreservoir bereits Mitte März vollständig verbraucht ist. Diese Stickstofflimitation führt zum Zusammenbruch der

Frühjahrsblüte des Phytoplanktons. Dagegen sind Ende April noch etwa $0,20 \mu\text{mol/l}$ Phosphat vorhanden. Im weiteren Jahresverlauf gehen auch die Phosphatkonzentrationen weiter zurück und können die Nachweisgrenze erreichen, wenn sich starke Blaualgenblüten entwickeln. Im Herbst nehmen die Phosphat- und später auch die Nitratkonzentrationen auf Grund stärkerer Abbauprozesse wieder zu und erreichen im Januar/Februar des Folgejahres wieder typische Winterwerte.

Dieser Jahresgang ist auch für die Gebiete der zentralen Ostsee charakteristisch, da auch hier die winterlichen N/P-Verhältnisse deutlich unter dem klassischen Redfield-Verhältnis liegen (REDFIELD et al., 1963, NAUSCH et al., 2008a, b). Allerdings, ist, wie bereits erwähnt, das winterliche Plateau wesentlich stabiler ausgeprägt, was sich auch durch die Sauerstoffsättigungswerte belegen lässt (vgl. Kapitel 6.3). Die winterlichen Phosphat- und Nitratwerte lagen in der Bornholmsee und im östlichen Gotlandbecken in den Jahren 2008 und 2009 ebenfalls auf vergleichbarem Niveau (Tab. 8).

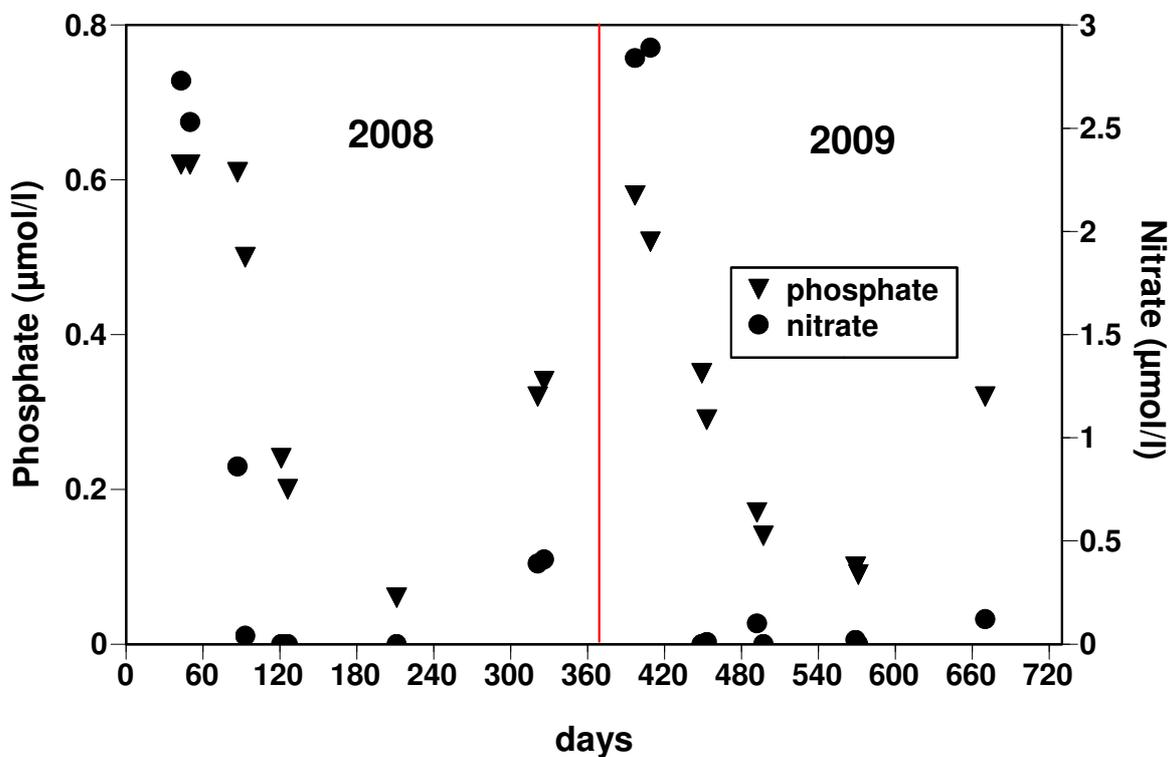


Abb. 30

Phosphat- und Nitratjahresgang 2008 und 2009 im Oberflächenwasser (0 – 5 m) der zentralen Arkonasee (Station 113)

Fig. 30

Annual cycle of phosphate and nitrate 2008 and 2009 in the surface layer (0 – 5 m) in the Arkona Sea (station 113)

Tab. 8

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

Table 8

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

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

Station	Monat	2005	2006	2007	2008	2009
360 (Fehmarnbelt)	Feb.	0,50 ± 0,02	0,76 ± 0,00	0,70 ± 0,0	0,78 ± 0,00	0,63 ± 0,04
022 (Lübecker Bucht)	Feb.	0,70 ± 0,02	0,93 ± 0,01	0,62 ± 0,00	0,74 ± 0,01	0,70 ± 0,00
012 (Meckl. Bucht)	Feb.	0,69 ± 0,01	0,82 ± 0,01	0,57 ± 0,00	0,81 ± 0,00	0,67 ± 0,02
113 (Arkonasee)	Feb.	0,81 ± 0,10	0,79 ± 0,00	0,81 ± 0,01	0,62 ± 0,00	0,58 ± 0,00
213 (Bornholmtief)	Feb.	1,01 ± 0,14	0,79 ± 0,01	0,80 ± 0,04	0,74 ± 0,00	0,70 ± 0,00
271 (Gotlandtief)	Feb.	0,76 ± 0,01	0,44 ± 0,00	0,56 ± 0,00	0,64 ± 0,00	0,59 ± 0,01
286 (Fårötief)	Feb.	0,74 ± 0,01	0,53 ± 0,00	0,56 ± 0,02	*	0,64 ± 0,02
284 (Landsorttief)	Feb.	0,77 ± 0,01	0,59 ± 0,00	0,70 ± 0,02	* -	0,55 ± 0,01
245 (Karlsötief)	Feb.	1,00 ± 0,01	0,60 ± 0,01	0,76 ± 0,00	*	0,67 ± 0,01

* konnte wegen Schlechtwetter nicht angefahren werden

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

Station	Monat	2005	2006	2007	2008	2009
360 (Fehmarnbelt)	Feb.	3,9 \pm 0,1	3,1 \pm 0,0	8,6 \pm 0,0	6,5 \pm 0,0	3,6 \pm 0,3
022 (Lübecker Bucht)	Feb.	3,7 \pm 0,0	4,2 \pm 0,1	9,6 \pm 0,5	6,6 \pm 0,0	3,8 \pm 0,0
012 (Meckl. Bucht)	Feb.	2,9 \pm 0,0	3,5 \pm 0,0	6,5 \pm 0,1	7,8 \pm 0,0	3,7 \pm 0,3
113 (Arkonasee)	Feb.	2,8 \pm 0,4	3,3 \pm 0,0	4,0 \pm 0,2	2,7 \pm 0,0	2,8 \pm 0,0
213 (Bornholmtief)	Feb.	3,0 \pm 0,2	2,2 \pm 0,0	3,1 \pm 0,1	3,5 \pm 0,0	3,1 \pm 0,0
271 (Gotlandtief)	Feb.	3,2 \pm 0,0	2,8 \pm 0,0	2,9 \pm 0,0	3,3 \pm 0,0	3,6 \pm 0,0
286 (Fårötief)	Feb.	3,8 \pm 0,0	3,6 \pm 0,0	3,3 \pm 0,1	*	3,8 \pm 0,0
284 (Landsorttief)	Feb.	3,9 \pm 0,0	3,1 \pm 0,0	4,4 \pm 0,0	*	3,6 \pm 0,0
245 (Karlsötief)	Feb.	3,3 \pm 0,0	2,8 \pm 0,0	3,6 \pm 0,0	*	3,5 \pm 0,0

Verallgemeinernde Aussagen zur vertikalen Nährstoffverteilung lassen sich für die recht flachen Seegebiete der westlichen Ostsee nur eingeschränkt ziehen. Nährstoffgradienten werden im Wesentlichen durch die variierenden Schichtungen von Salzgehalt und Temperatur geprägt. Deshalb soll hier eine für die Ostsee typische Vertikalverteilung für die Arkonasee diskutiert werden (Abb. 31).

Im Winter ist die Wassersäule weitgehend durchmischt. So finden sich bis 35 m Wassertiefe sehr einheitliche, hohe Phosphat- und Nitratkonzentrationen. Ehe sich im Frühjahr eine stabile thermische Schichtung aufbaut, sind die Nitratvorräte von der Oberfläche bis etwa 40 m verbraucht. Erst in der bodennahen, salzreichen Schicht steigen die Nitratwerte an. Dagegen verbraucht die Frühjahrsblüte nicht den gesamten Phosphatvorrat (siehe oben). Es verbleiben sowohl ober- als unterhalb der Thermokline nennenswerte Phosphatmengen. Während die Phosphatkonzentrationen oberhalb der Thermokline im Verlauf des Sommers abnehmen, bleiben diese im kalten winterlichen Zwischenwasser erhalten. Episodische Auftriebsprozesse können dieses phosphatreiche, aber nitratarme Zwischenwasser bei entsprechenden Windverhältnissen an die Oberfläche transportieren und Planktonblüten, insbesondere von Cyanobakterien fördern (NAUSCH et al., 2009, LASS et al., 2010). Die hier

beschriebene Vertikalverteilung ist in den tieferen Becken der zentralen Ostsee noch deutlich stärker ausgeprägt. Im November beobachten wir bereits wieder eine deutliche Zunahme der Phosphatkonzentrationen während die Nitratwerte bis zur Halokline weiterhin im Bereich der Nachweisgrenze liegen.

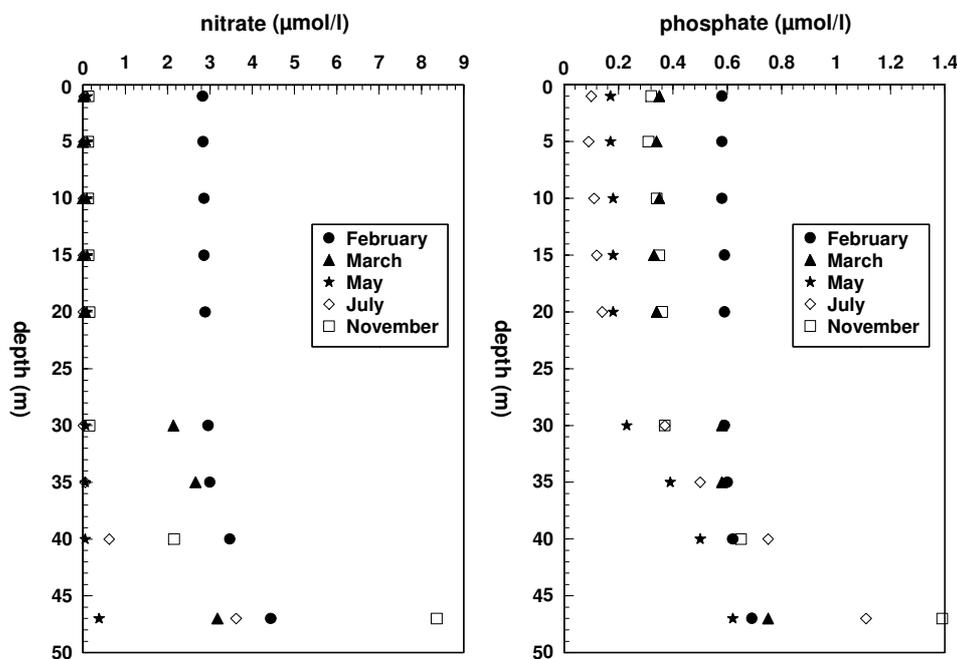


Abb. 31

Vertikalverteilung für Phosphat und Nitrat im Arkonabecken (Station 113) im Jahresverlauf 2009

Fig. 31

Vertical distribution of nitrate and phosphate in the Arkona Basin during 2009

Die hier beschriebenen Verteilungsmuster werden auch durch die Vertikalverteilungen der beiden wichtigsten Nährstoffe Phosphat und Nitrat entlang des Hauptschnittes durch die Ostsee deutlich (Abb. 32 und Abb. 33). Es muss beachtet werden, dass Ammonium unter anoxischen Bedingungen im Tiefenwasser (vgl. Kapitel 6.3) das Endprodukt der Mineralisation darstellt. Leider konnten im Jahr 2009 die Untersuchungen im Sommer und im Herbst nicht bis in die zentrale Ostsee durchgeführt werden, so dass nur die Schnitte für Februar, März und Mai gezeigt werden können.

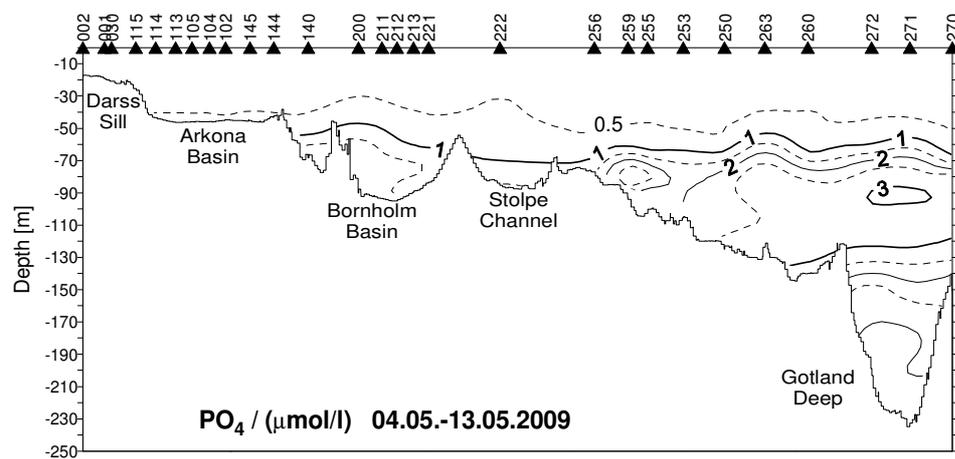
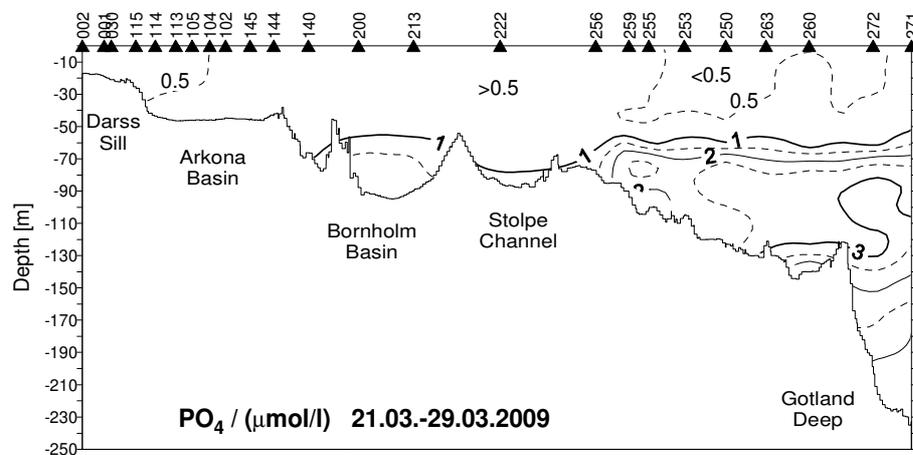
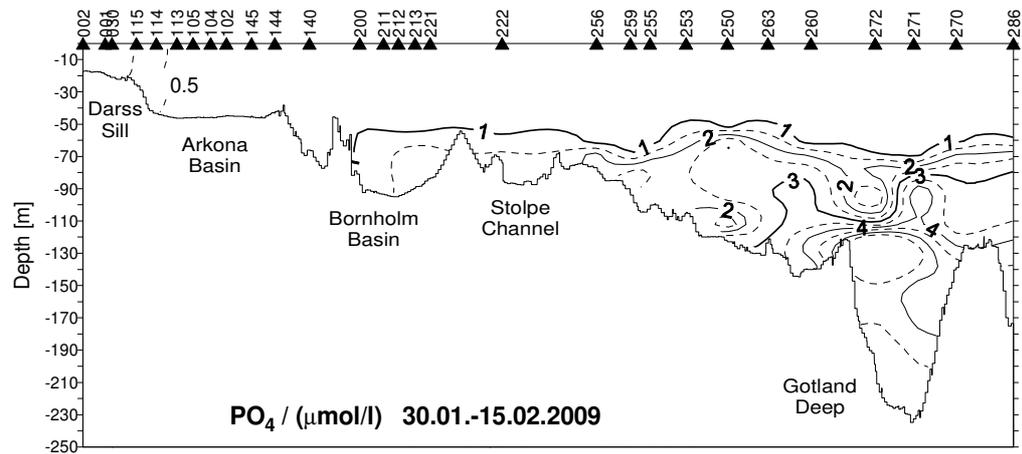


Abb. 32

Vertikale Verteilung des Phosphatgehaltes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 32

Vertical distribution of phosphate between Darss Sill and northern Gotland Basin

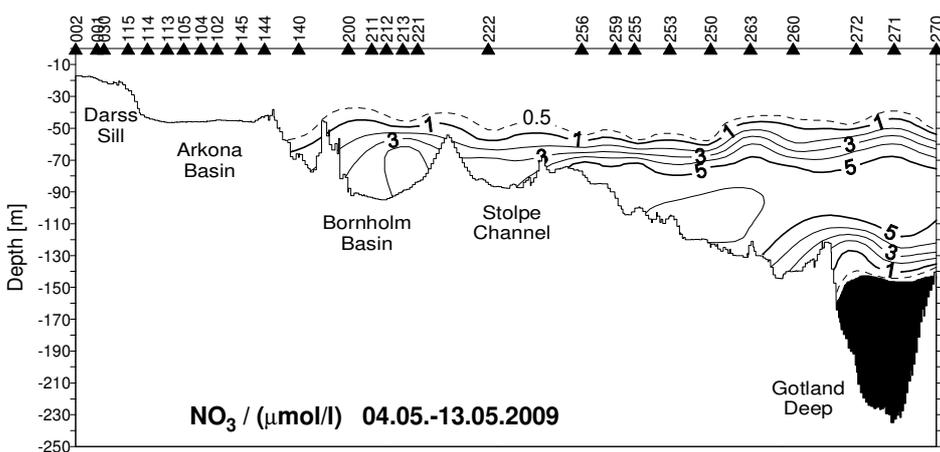
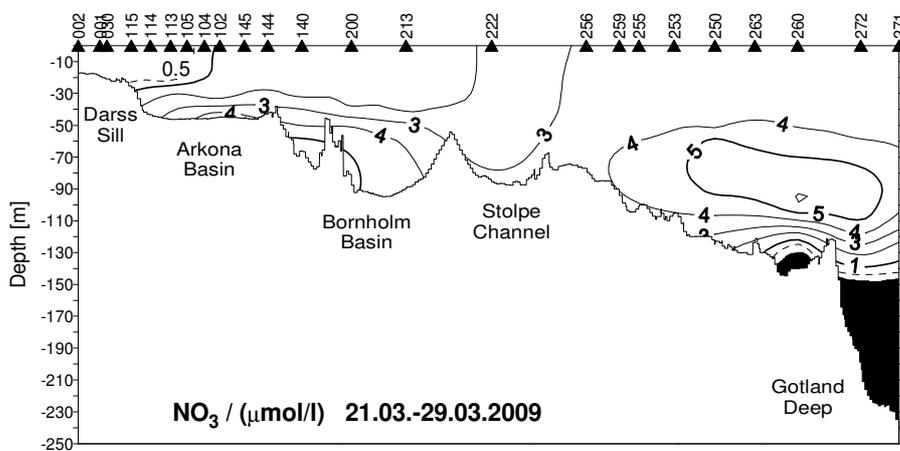
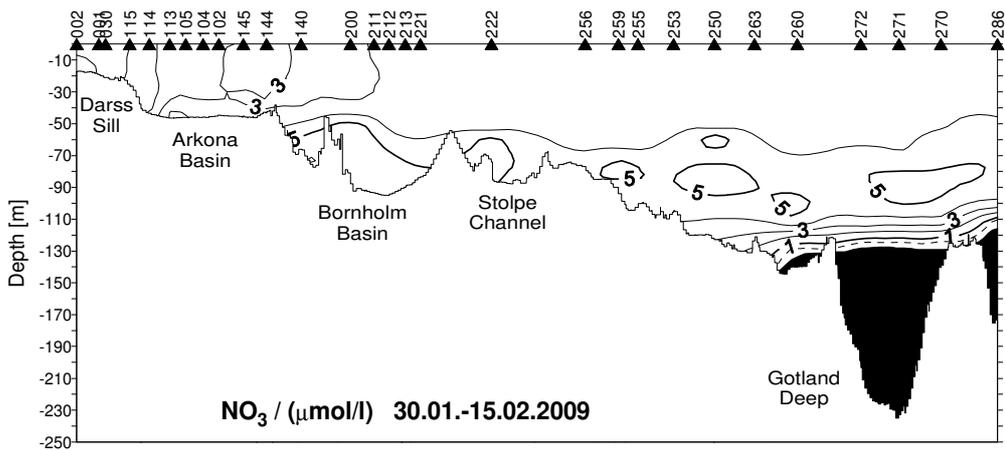


Abb. 33
Vertikale Verteilung des Nitratgehaltes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 33
Vertical distribution of nitrate between Darss Sill and northern Gotland Basin

Die Nährstoffverteilung im Tiefenwasser kann ebenfalls den Abb. 32 und 33 entnommen werden. Für die flache westliche Ostsee und das Arkonabecken wurde die jahreszeitliche Entwicklung der Nährstoffverteilung oben beschrieben (Abb. 31). In den weiter östlich gelegenen, tieferen Becken der Ostsee wird die Situation im Tiefenwasser dagegen vorwiegend durch das Auftreten bzw. Ausbleiben von starken barotropen oder baroklinen Einstromprozessen geprägt. Der Salzwassereinbruch vom Januar 2003 war das letzte starke Einstromereignis in die Ostsee. Die Effekte dieses Einstrom sind seit 2005 kaum noch nachweisbar, so dass die Nährstoffverhältnisse im Tiefenwasser durch die seitdem andauernde Stagnationsphase bestimmt werden.

Generell können sich kleinere barotrope und barokline Einströme, wie sie auch 2009 beobachtet wurden (vgl. Kapitel 2), am ehesten im Bornholmbecken bemerkbar machen. Nach der intensiven Belüftung des Tiefenwassers in Folge des Salzwassereinbruch 2003 nahmen die Sauerstoffkonzentrationen auf Grund fehlender Einstromimpulse kontinuierlich ab, so dass im Jahr 2005 ein negativer Jahresmittelwert von $-0,67 \text{ ml/l}$ in 80 m Wassertiefe ermittelt wurde (vgl. Kapitel 2). Dies spiegelt sich in den Nährstoffverhältnissen wider. Unter anoxischen Bedingungen kommt es zu einer Freisetzung von Phosphat und einer Anreicherung von Ammonium. Denitrifikation führt zum Rückgang der Nitratkonzentrationen (Tab. 9). In den Folgejahren verbesserte sich die Sauerstoffsituation im Tiefenwasser wieder. Dadurch nehmen die Phosphatkonzentrationen ab, Ammonium ist nur in Spuren vorhanden und hohe Nitratkonzentrationen sind die Folge (Tab. 9).

Im Tiefenwasser des östlichen und nördlichen Gotlandbeckens (Gotlandtief und Farötief) hält die Stagnationsperiode nach wie vor an. Nitrat kann unter den permanent anoxischen Bedingungen seit 2006 nicht mehr nachgewiesen werden. Im Vergleich zum Vorjahr nahmen die Phosphat- und Ammoniumkonzentrationen weiter zu (Tab. 9). Vergleicht man die Phosphatwerte des Gotlandtiefs und des Farötiefs des Jahres 2009 ($5,22$ bzw. $4,40 \text{ } \mu\text{mol/l}$), mit denen des Jahres 2002, dem Ende der letzten Stagnationsperiode, sind bereits wieder vergleichbare Konzentrationen zu finden. Die entsprechenden Konzentrationen betragen 2002 $5,88 \text{ } \mu\text{mol/l}$ (Gotlandtief) bzw. $4,86 \text{ } \mu\text{mol/l}$ (Farötief). Gleiches gilt für die Ammoniumkonzentrationen:

	2002	2009
Gotlandtief	$19,7 \text{ } \mu\text{mol/l}$	$19,6 \text{ } \mu\text{mol/l}$
Farötief	$9,8 \text{ mmol/l}$	$9,1 \text{ } \mu\text{mol/l}$

Ähnliche Aussagen können auch für den Bereich des Landsorttiefs getroffen werden. Die Wassererneuerung nach dem Salzwassereinbruch 2003 war hier weniger stark ausgeprägt (vgl. Kapitel 6.3). Folglich sind auch die Fluktuationen im Nährstoffregime deutlich geringer. Vergleicht man die Nährstoffsituation in 400 m Wassertiefe im Jahr 2003, das hier als Ende

der letzten langen Stagnationsphase angesehen werden muss, mit dem Jahr 2009, wird die Intensität der gegenwärtigen Stagnationsphase deutlich:

	2003	2009
Phosphat	4,05 µmol/l	4,07 µmol/l
Ammonium	7,3 mmol/l	8,2 µmol/l

Im südlicher gelegenen Karlsötief ist die Situation nicht so stabil. Wenngleich der 100 m Vergleichshorizont weitgehend frei von Sauerstoff ist, kann es kurzzeitig zu einer bis zum Boden reichenden Konvektion kommen. Gelegentlich auftretende Spuren von Nitrat belegen das. Dennoch dominieren anoxische Verhältnisse mit den entsprechenden oben beschriebenen Reaktionen des Nährstoffhaushalts. Auch hier soll ein Vergleich des Jahres 2009 mit den Jahren 2003 und 2004 vorgenommen werden:

	2003	2004	2009
Phosphat	4,43 µmol/L	4,29 µmol/l	4,05 µmol/l
Ammonium	5,8 µmol/l	6,7 µmol/l	6,8 µmol/l

Tab. 9

Jahresmittelwerte und Standardabweichungen für Phosphat, Nitrat und Ammonium im Tiefenwasser der zentralen Ostsee: IOW sowie SMHI Daten (n = 8 – 16)

Table 9

Annual means and standard deviations for phosphate, nitrate and ammonium in the deep water of the central Baltic Sea: IOW and SMHI data (n = 8 – 16)

Phosphat (µmol/l; Maximalwerte hervorgehoben)

Station	Tiefe/m	2005	2006	2007	2008	2009
213 (Bornholmtief)	80	5,26 ± 2,09	3,01 ± 0,75	2,73 ± 1,16	2,81 ± 1,08	2,13 ± 0,79
271 (Gotlandtief)	200	3,12 ± 0,52	4,20 ± 0,27	4,03 ± 0,33	4,62 ± 0,23	5,22 ± 0,15
286 (Färötief)	150	3,27 ± 0,53	4,02 ± 0,19	3,84 ± 0,19	4,33 ± 0,26	4,40 ± 0,23
284 (Landsorttief)	400	3,37 ± 0,23	3,57 ± 0,12	3,70 ± 0,17	3,97 ± 0,18	4,07 ± 0,19
245 (Karlsötief)	100	3,81 ± 0,33	4,12 ± 0,48	4,09 ± 0,19	4,00 ± 0,57	4,05 ± 0,26

Tab. 9 Forts.

Jahresmittelwerte und Standardabweichungen für Phosphat, Nitrat und Ammonium im Tiefenwasser der zentralen Ostsee: IOW sowie SMHI Daten (n = 8 – 16)

Table 9 cont

Annual means and standard deviations for phosphate, nitrate and ammonium in the deep water of the central Baltic Sea: IOW and SMHI data (n = 8 – 16)

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

Station	Tiefe/m	2005	2006	2007	2008	2009
213 (Bornholmtief)	80	2,3 ± 3,2	7,7 ± 2,5	6,6 ± 3,75	6,1 ± 2,4	6,4 ± 2,1
271 (Gotlandtief)	200	2,6 ± 3,6	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0
286 (Fårötief)	150	2,9 ± 3,5	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0
284 (Landsortief)	400	2,0 ± 2,7	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0
245 (Karlsötief)	100	0,7 ± 1,2	0,0 ± 0,1	0,0 ± 0,0	0,1 ± 0,3	0,01 ± 0,05

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

Station	Tiefe/m	2005	2006	2007	2008	2009
213 (Bornholmtief)	80	5,1 ± 5,3	0,5 ± 0,9	2,1 ± 3,2	0,9 ± 1,9	0,4 ± 0,8
271 (Gotlandtief)	200	1,7 ± 1,9	9,2 ± 1,7	11,1 ± 1,6	15,5 ± 1,7	19,6 ± 1,4
286 (Fårötief)	150	2,0 ± 2,0	6,9 ± 1,3	5,5 ± 1,2	8,3 ± 1,7	9,1 ± 1,5
284 (Landsortief)	400	2,4 ± 1,8	4,8 ± 0,9	5,8 ± 1,1	7,4 ± 1,2	8,2 ± 1,2
245 (Karlsötief)	100	3,8 ± 2,4	7,1 ± 1,9	7,9 ± 1,8	7,8 ± 1,4	6,8 ± 2,0±

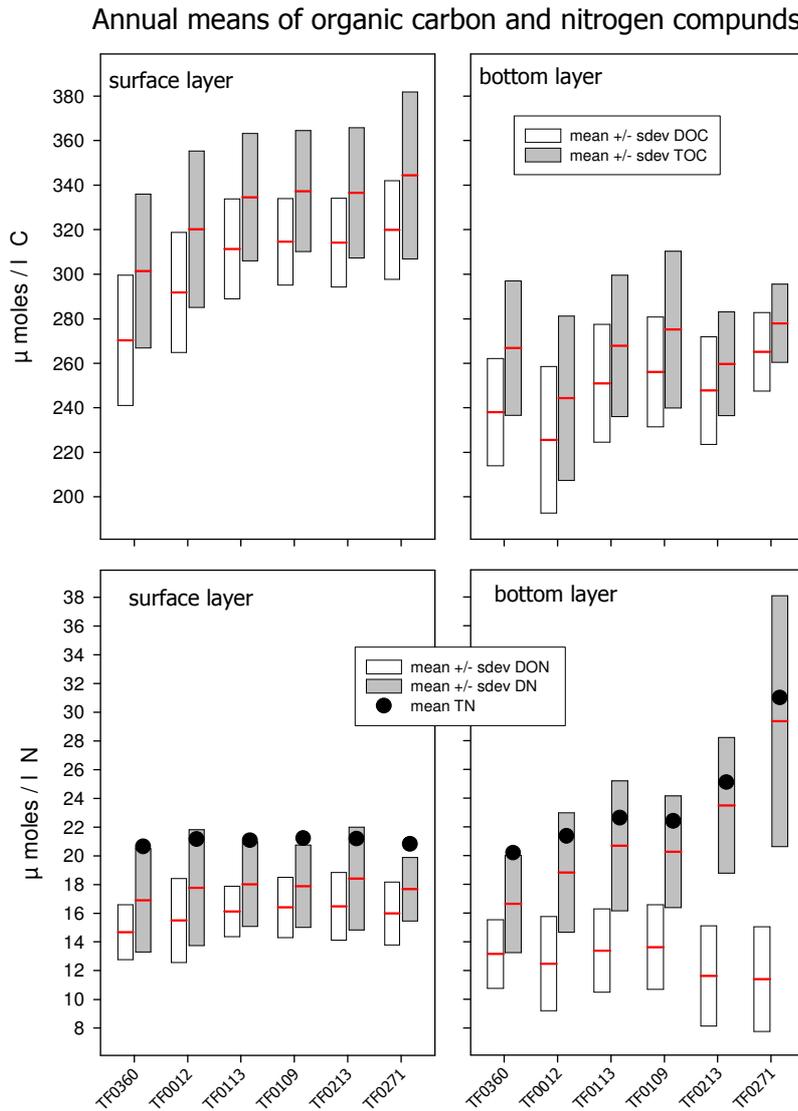
6.5 Natürliche organische Verbindungen

In marinen Ökosystemen spielen Auf- und Abbauprozesse des natürlichen organischen Materials eine wichtige Rolle bei verschiedenen aktuellen Umweltproblemen. Zu nennen sind hier unter anderem Eutrophierungseffekte, Fragen im Zusammenhang mit den Veränderungen des CO₂-Gehalts in der Atmosphäre und im Wasser (Treibhauseffekt, Versauerung des Seewassers) oder die Sauerstoffverarmung in bestimmten Seegebieten. Das natürliche organische Material, das in marinen Ökosystemen umgesetzt wird, wird dabei entweder im System selbst neu aufgebaut oder es stammt aus landseitigen Einträgen. Atmosphärische Einträge werden allgemein als vernachlässigbar angesehen.

In marinen Ökosystemen wird organisches Material durch die Photosyntheseleistung des Phytoplanktons unter Nutzung der Sonnenenergie neu aufgebaut. Neben verschiedenen Spurenelementen sind CO₂ und anorganische Nährstoffe die zur Synthese erforderlichen Ausgangsverbindungen. Abgesehen von Kohlenstoff, Sauerstoff und Wasserstoff sind im organischen Material noch weitere Elemente gebunden, wobei Stickstoff und Phosphor den größten Anteil ausmachen. (molares Verhältnis C : N : P : 106 : 16 : 1, REDFIELD et al., 1963) Das organische Material kann sowohl in partikulärer Form (POM, Particulate Organic Matter) als auch gelöst (DOM, Dissolved Organic Matter) vorliegen. Durch verschiedene, vornehmlich biologisch kontrollierte Prozesse sind beide Formen ineinander überführbar. Da ein großer Anteil des POM aufgrund seiner Dichte im Wasserkörper sedimentieren kann, erfolgt der vertikale Transport organischen Materials - unabhängig von hydrodynamischen Prozessen - hauptsächlich durch partikuläres Material. Gelöste organische Verbindungen werden demgegenüber durch hydrodynamische Prozesse in dem Wasserkörper transportiert, in dem sie gelöst sind. Der Abbau organischen Materials ('Remineralisation') in marinen Ökosystemen erfolgt in erster Linie durch Mikroorganismen. Bei diesem Prozess wird Sauerstoff verbraucht und - neben anorganischen Nährstoffen- CO₂ freigesetzt. Aus landseitigen Quellen kann organisches Material sowohl in partikulärer als auch in gelöster Form eingetragen werden. Während partikuläres Material in der Regel küstennah abgelagert wird, kann gelöstes organisches Material - abhängig von seiner Stabilität und Abbaubarkeit - über lange Zeiträume in marinen Ökosystemen verbleiben, durch Strömungen über weite Strecken transportiert und unter Umständen in einigen Gebieten angereichert werden.

In der Ostsee liegt der organisch gebundene Kohlenstoff (TOC, Total Organic Carbon) an allen untersuchten Stationen zum größten Teil in gelöster Form als DOC (Dissolved Organic Carbon) vor. Im langjährigen Mittel macht der partikuläre Anteil (POC, Particulate Organic Carbon) nur ungefähr 10% des TOC aus (Abb. 34). In den untersuchten Gebieten der Ostsee sind die mittleren DOC - bzw. TOC - Konzentrationen in der oberflächennahen Schicht dabei immer höher als in Bodennähe. Bezogen auf die aus den Messungen im Zeitraum 1995 bis 2009 berechneten Mittelwerte liegt die Streuung der DOC - bzw. TOC - Werte in der gleichen Größenordnung wie die mittlere POC - Konzentration. Die Konzentration anorganischer

Kohlenstoffverbindungen (CO_2 , Carbonate) ist um einen Faktor 5-8 größer als die DOC - Konzentration.



k.nagel \ ze09_SelStat_sumCN \ 29/03/2010

Abb. 34

Mittlere Konzentrationen von DOC und TOC (oben) sowie DON, DN und TN (unten) an ausgewählten Stationen im Gebiet zwischen der westlichen Ostsee und dem östlichen Gotlandbecken. Angegeben sind die mittleren Konzentrationen und Standardabweichungen in der oberflächennahen und bodennahen Wasserschicht aus den Messungen der Jahre 1995 bis 2009

Fig. 34

Mean concentrations of DOC and TOC (top) and DON, DN and TN (bottom) at selected stations in the area between western Baltic sea and the eastern Gotland Basin. Shown are the mean concentrations and standard deviations in the near surface and near bottom layer calculated from measurements during the years 1995 to 2009

Die mengenmäßig größte Fraktion der Stickstoffverbindungen in der Ostsee ist - zumindest in der oberflächennahen Schicht - der gelöste organische gebundene Stickstoff (DON, Dissolved Organic Nitrogen). Er macht zwischen 50% und 90% des Gesamtstickstoffs (TN, Total Nitrogen) aus. Gelöste anorganische Stickstoffverbindungen (DIN, Dissolved Inorganic Nitrogen, Summe der Konzentrationen von Nitrat, Nitrit und Ammonium) und partikuläre Stickstoffverbindungen (PON, Particulate Organic Nitrogen) erreichen zusammen häufig weniger als 10% des TN. Die mittlere PON-Konzentration liegt in der gleichen Größenordnung wie die zwischen 1995 und 2009 beobachteten Schwankungen der mittleren DON- bzw. DN-Konzentration (Abb. 34).

In der bodennahen Wasserschicht ist der mittlere Anteil des DIN am gelösten Gesamtstickstoff (DN, Dissolved Nitrogen) größer als an der Oberfläche. Jedoch liegt an den Stationen, an denen keine permanente Halokline ausgebildet ist (d.h. das der Wasserkörper zumindest gelegentlich vollständig durchmischt wird), der Anteil des DON über 50% des TN. DIN-Anteile von über 50% am TN finden sich nur in der Bodenschicht in den tiefen Becken der zentralen Ostsee, die während länger andauernder Stagnationsphasen anoxisch werden können. Die erhöhten DIN-Konzentrationen sind dabei sowohl auf die Freisetzung von DIN durch Remineralisierungsprozesse im Sediment zurückzuführen als auch darauf, dass in Bodennähe aufgrund der Lichtverhältnisse keine Produktion neuer organischer Verbindungen durch photosynthetische Prozesse stattfindet. Unter Stagnationsbedingungen konnte außerdem gezeigt werden, dass der Stickstoffanteil im DOM abnahm (NAUSCH et al., 2007).

6.5.1 Westliche Ostsee und Arkonabecken

Die Konzentrationen des organischen Materials in der westlichen Ostsee und im Arkonabecken werden im Wesentlichen durch drei Faktoren beeinflusst: die Umsatzraten des organischen Materials im System, die Einträge aus landseitigen Quellen und durch die hydrodynamisch kontrollierten Austauschprozesse zwischen Ostsee und Nordsee. Bedingt durch die relativ geringe Wassertiefe in diesem Seegebiet kommt es häufiger zu einer tiefen, oft bis zum Boden reichenden Durchmischung des Wasserkörpers. Über einen längeren Zeitraum stabile Schichtungen treten deshalb nur selten auf.

Für die Stationen TF0360 (Kieler Bucht), TF0012 (Mecklenburger Bucht), TF0113 (zentrales Arkonabecken) und TF0109 (östliches Arkonabecken) sind die auf den 2009 durchgeführten fünf Messfahrten gemessenen Konzentrationen von DOC, DON und DN in der Abb. 35 dargestellt. Angegeben sind die jeweiligen Konzentrationen in der oberflächennahen und der bodennahen Wasserschicht sowie für DOC und DON die aus den Messungen der Jahre 1995 bis 2009 berechneten langjährigen Mittelwerte und Standardabweichungen. Abb. 36 zeigt in analoger Weise zusätzlich den Salzgehalt und den Sauerstoffgehalt für die Stationen TF0012 und TF0113.

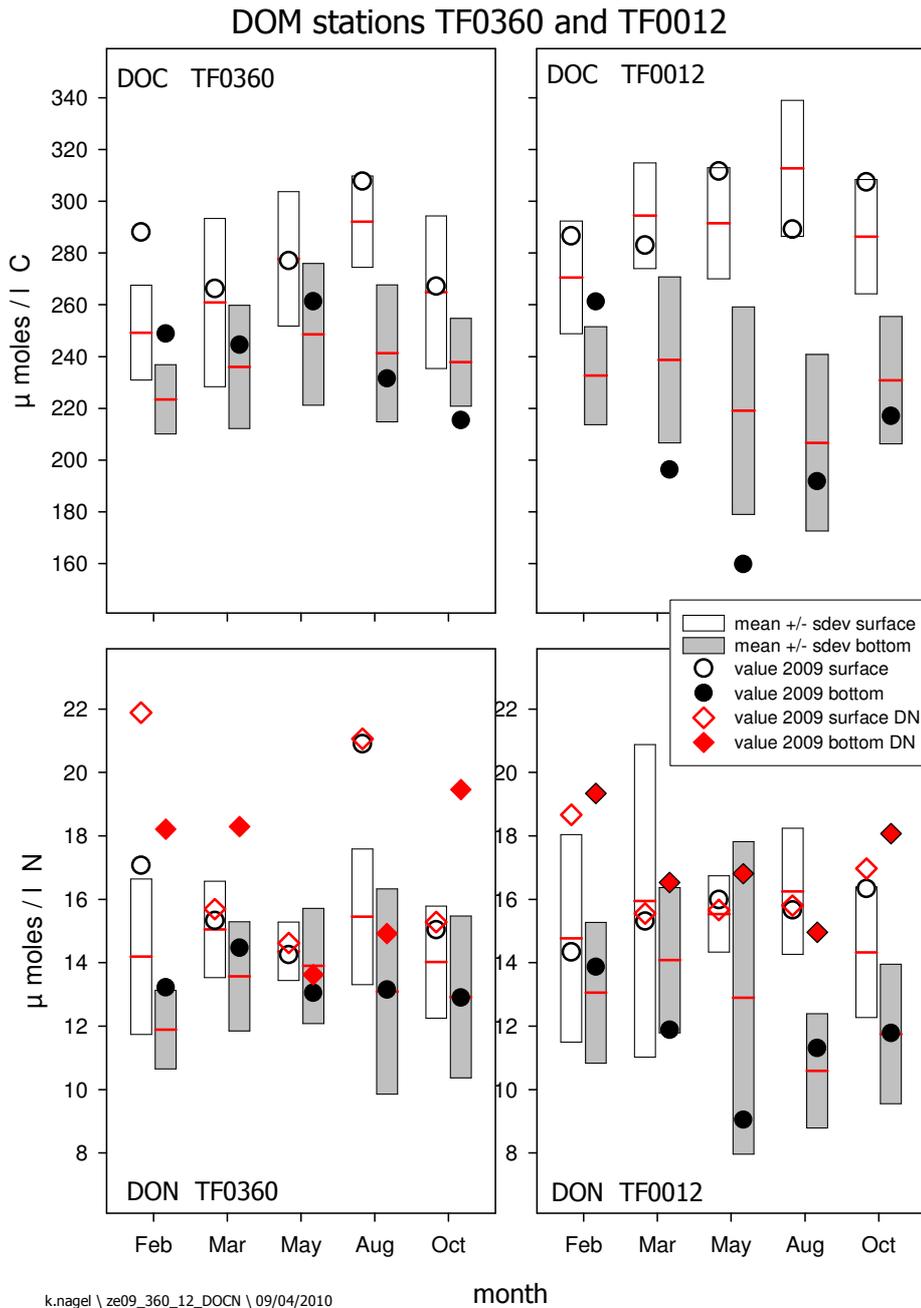
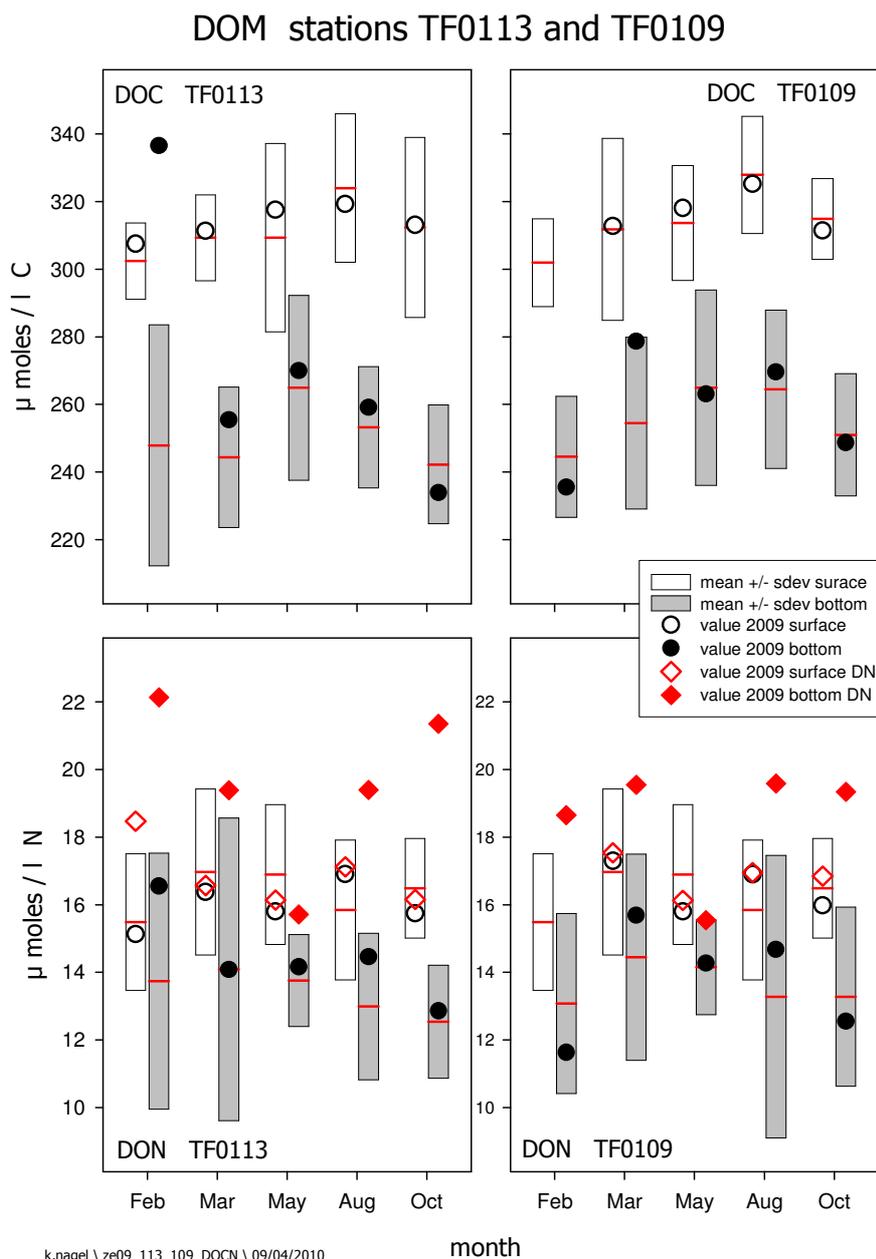


Abb. 35

Konzentrationen der verschiedenen DOM - Klassen in der Oberflächen - und Bodenschicht an den Stationen TF0360 und TF0012. Angegeben sind die 2009 auf den fünf Fahrten gemessenen Werte sowie die Mittelwerte und Standardabweichungen, die während der Fahrten zu den entsprechenden Zeiten der Jahre 1995 – 2009 gemessen wurden

Fig. 35

Concentrations of different types of DOM in the near surface and near bottom layer at stations TF0360 and TF0012. Shown are the results obtained during the five cruises performed in 2009 and the long term means and standard deviations calculated from the measurements during the years 1995 to 2009 at the same time of the season



k.nagel \ ze09_113_109_DOCN \ 09/04/2010

month

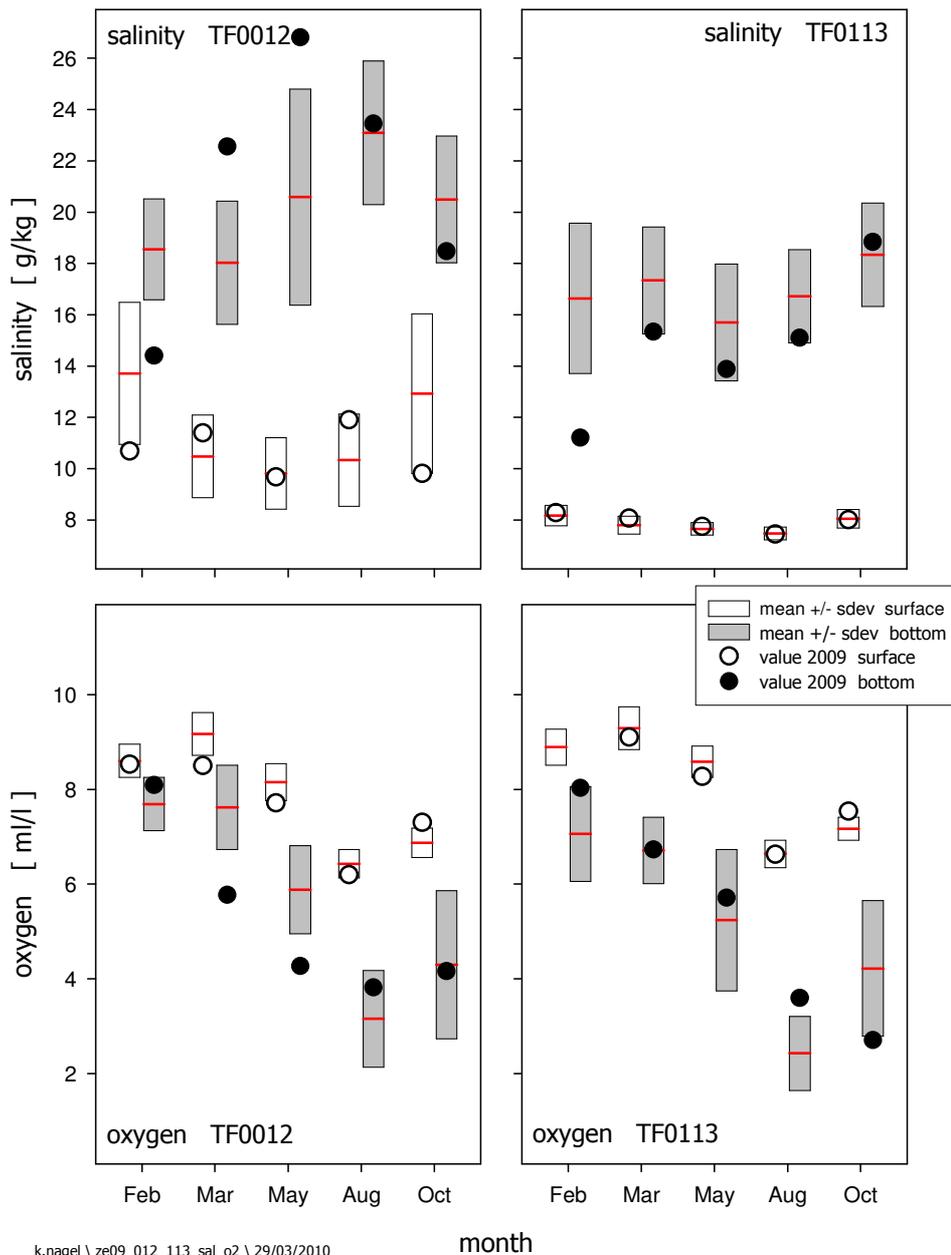
Abb. 35 Forts.

Konzentrationen der verschiedenen DOM - Klassen in der Oberflächen - und Bodenschicht an den Stationen TF0113 und TF0109. Angegeben sind die 2009 auf den fünf Fahrten gemessenen Werte sowie die Mittelwerte und Standardabweichungen, die während der Fahrten zu den entsprechenden Zeiten der Jahre 1995 – 2009 gemessen wurden

Fig. 35 cont

Concentrations of different types of DOM in the near surface and near bottom layer at stations TF0113 and TF0109. Shown are the results obtained during the five cruises performed in 2009 and the long term means and standard deviations calculated from the measurements during the years 1995 to 2009 at the same time of the season

salinity and oxygen stations TF0012 and TF0113



k.nagel \ ze09_012_113_sal_o2 \ 29/03/2010

month

Abb. 36

Salzgehalt und Sauerstoffgehalt an in der Oberflächen - und Bodenschicht an den Stationen TF0012 und TF0113. Angegeben sind die 2009 auf den fünf Fahrten gemessenen Werte sowie die Mittelwerte und Standardabweichungen, die während der Fahrten zu den entsprechenden Zeiten der Jahre 1995 – 2009 gemessen wurden

Fig. 36

Salinity and oxygen concentration in the near surface and near bottom layer at stations TF0012 and TF0113. Shown are the results obtained during the five cruises performed in 2009 and the long term means and standard deviations calculated from the measurements during the years 1995 to 2009 at the same time of the season

Die langjährigen Mittelwerte der DOC - Konzentrationen an den Stationen in der westlichen Ostsee und im Arkonabecken zeigen zu allen Jahreszeiten eine relativ große Streuung. Saisonale Maxima, die in den zentralen Bereichen der Ostsee im Herbst und Winter beobachtet wurden (NAUSCH et al., 2007), werden in der Oberflächenschicht auch an den Stationen in der westlichen Ostsee und im Arkonabecken deutlich. Allerdings unterscheiden sich die Mechanismen, die zu einer höheren DOC - Konzentration führen, in den westlichen Gebieten und den zentralen Bereichen der Ostsee. Während in den zentralen Bereichen interne, biologisch kontrollierte Prozesse für die Ausbildung der saisonalen Maxima verantwortlich sind, dominieren in den westlichen Gebieten überwiegend hydrodynamische Vorgänge. Bedingt durch die häufiger ruhigen Wetterlagen in den Sommermonaten und der damit verbundenen geringeren vertikalen Durchmischung des Wasserkörpers steigt die DOC - Konzentration in der Oberflächenschicht leicht an, während gleichzeitig der Salzgehalt durch ausströmende Wassermassen aus der zentralen Ostsee etwas zurückgeht. Entsprechend sinkt die DOC - Konzentration in der Bodenschicht bei gleichzeitigem Anstieg des Salzgehalts durch einströmendes Wasser aus der Nordsee. In den westlichen Gebieten der Ostsee wird die DOC - Konzentration deshalb im Wesentlichen durch die Intensität der Mischung von salzarmen, DOC - reichen Wassermassen aus den zentralen Gebieten der Ostsee und salzreichen, DOC - armen Wassermassen aus der Nordsee kontrolliert. Neben der durch Wettereinflüsse beeinflussten vertikalen Durchmischungstiefe der Wassersäule hat auch die Wassertiefe und die Bodentopographie an den verschiedenen Stationen einen Einfluss auf die DOC - Konzentration. An sehr flachen Stationen (z.B. TF0360) sind die DOC - Konzentrationsunterschiede zwischen oberflächennahem und bodennahem Wasserkörper relativ gering, während an den tieferen Stationen im Arkonabecken deutlichere Unterschiede zwischen den Konzentrationen in der Oberfläche und am Boden sichtbar werden.

Angesichts der Veränderungen der DOC - Konzentration, die durch hydrodynamische Mischungsprozesse verursacht werden, kann man nicht erwarten, dass biologisch kontrollierte Prozesse einen deutlich erkennbaren Einfluss besitzen. Geht man von den maximalen winterlichen Konzentrationen der anorganischen Nährstoffe Phosphat und Nitrat aus ($0,7 \mu\text{mol/l}$ bzw. $4 \mu\text{mol/l}$, vgl. Tab. 8) und unterstellt, dass diese Nährstoffe vollständig in organische Verbindungen überführt werden, kann man höchstens eine Änderung der Konzentration organischen Materials in einer Größenordnung von ungefähr $50 \mu\text{mol/l C}$ erwarten (Abschätzung abgeleitet aus dem Redfield - Verhältnis). Die Konzentrationsänderungen, die durch eine Mischung von salzarmen Wassermassen aus den zentralen Bereichen der Ostsee mit einer DOC - Konzentration von über $300 \mu\text{mol/l C}$ mit salzreichem Wasser aus der Nordsee mit DOC - Konzentrationen in der Größenordnung von $100 \mu\text{mol/l C}$ (REINTHALER and HERNDL, 2005, SURATMAN et al., 2009) verursacht werden, sind jedoch um ein Mehrfaches größer. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass bei der Neubildung organischen Materials zunächst partikuläres Material gebildet wird, das erst in Folgeschritten und nicht quantitativ in gelöste Verbindungen überführt wird.

Die langjährigen Mittelwerte der DON - Konzentrationen an den ausgewählten Stationen in der westlichen Ostsee und dem Arkonabecken zeigen geringere Unterschiede als die der entsprechenden DOC - Konzentrationen (Abb. 35). Da die Konzentrationen in beiden Meeresgebieten ähnlich sind (TOPCU and BROCKMANN, 2001), haben hydrodynamisch kontrollierte Mischungsprozesse zwischen salzhaltigerem Nordseewasser und salzärmerem Ostseewasser deshalb keinen so großen Einfluss auf die Konzentration gelöster Stickstoffverbindungen.

Die 2009 gemessenen Werte für DON und DN liegen in der westlichen Ostsee und im Arkonabecken in dem aus den langjährigen Beobachtungen erwarteten Konzentrationsbereich. Abgesehen von den Wintermonaten besteht der gelöste Gesamtstickstoff im Oberflächenwasser nahezu ausschließlich aus DON, da während der Wachstumsphasen im Frühjahr und Sommer praktisch alle verfügbaren anorganischen Stickstoffverbindungen vollständig zum Aufbau von Plankton - Biomasse genutzt werden und dadurch in die Fraktion partikulärer organischer Stickstoffverbindungen (PON) übergehen. Da die photosynthetische Aktivität des Planktons im Winter nur eine untergeordnete Rolle spielt, dominieren während dieser Zeit Remineralisierungsprozesse und führen zu einer Anreicherung anorganischer Stickstoffverbindungen und damit zu einem Anstieg des DIN - Anteils am DN.

In der westlichen Ostsee und dem Arkonabecken liegt in der bodennahen Wasserschicht während des ganzen Jahres ein signifikanter Anteil des Stickstoffs in Form anorganischer Verbindungen vor. Bezogen auf die DON - Konzentration ist dabei der Anteil des DIN in der Regel in den Sommermonaten am geringsten, d.h. das DON / DIN Verhältnis ist am größten. Die Ursachen für diese jahreszeitliche Veränderung des DON / DIN Verhältnisses ist anhand der verfügbaren Daten nicht sicher nachzuweisen. Die Abnahme des Sauerstoffgehalts in den Sommermonaten (Abb. 36) deutet auf eine erhöhte mikrobielle Aktivität hin, die einen Einfluss auf das DON / DIN Verhältnis haben könnte. Wie oben anhand der DOC - Konzentration erläutert wurde, ist die Durchmischung des Wasserkörpers in diesem Seegebiet in den Sommermonaten weniger stark ausgeprägt. Es ist deshalb auch nicht auszuschließen, dass die Veränderung der DON / DIN Verhältnisse auf eine saisonal unterschiedliche Zusammensetzung des salzreicheren Wassers aus der Nordsee zurückzuführen sein könnte.

6.5.2 Bornholmbecken und Zentrale Ostsee

Während in der westlichen Ostsee und im Arkonabecken hydrodynamische gesteuerte Mischungsprozesse und landseitige Einträge einen größeren Einfluss auf die Konzentration und Verteilung organischen Materials besitzen, gewinnen in den tieferen Becken der Bornholm - See und den zentralen Bereichen der östlichen Ostsee biologisch kontrollierte Prozesse an Bedeutung. Aufgrund der relativ großen Entfernung zu den Festlandsküsten spielen hier lokal begrenzte Konzentrationsgradienten wie z.B. Ausstromfahnen von Flüssen praktisch keine Rolle. Die permanente Halokline in dem Tiefenbereich zwischen 60 m und 80 m bildet darüber hinaus eine Grenzschicht für Austauschprozesse zwischen den oberflächen - und bodennahen Wasserkörpern. Als Beispiele für die Variabilität des organischen Materials in dem Seegebiet östlich von Bornholm sind hier die Beobachtungen an den Stationen Tfo213 im Bornholmbecken und Tfo271 an der tiefsten Stelle des östlichen Gotlandbeckens dargestellt. Die 2009 gemessenen DOC - , DON - und DN - Konzentrationen in der Oberflächen - und Bodenschicht sind - zusammen mit den aus den Messungen der Jahre 1995 bis 2009 berechneten Mittelwerten und Standardabweichungen - in der Abbildung Abb. 37 zusammengefasst.

In analoger Weise sind für beide Stationen auch der Salzgehalt und die Sauerstoffkonzentration in Abb. 38 dargestellt. Generell lässt sich dabei feststellen, dass mit Ausnahme der H_2S - Konzentrationen (hier angegeben als negative Sauerstoffäquivalente) am Boden der Station Tfo271, die 2009 gemessenen Werte im Erwartungsbereich der Langzeitbeobachtungen liegen.

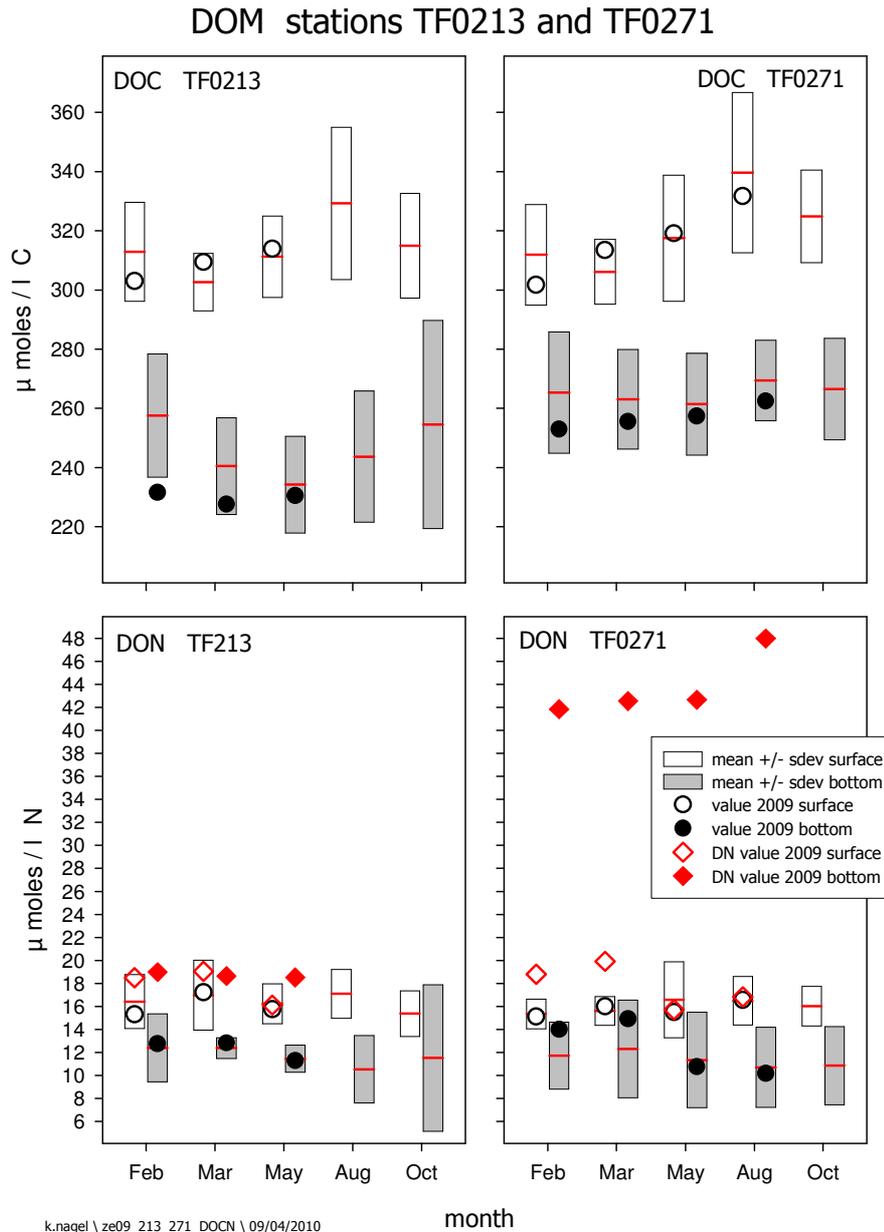


Abb. 37

Konzentrationen der verschiedenen DOM - Klassen in der Oberflächen - und Bodenschicht an den Stationen TF0213 und TF0271. Angegeben sind die 2009 gemessenen Konzentrationen sowie die Mittelwerte und Standardabweichungen der Jahre 1995 – 2009 in den entsprechenden Zeiträumen

Fig. 37

Concentrations of different types of DOM in the near surface and near bottom layer at stations TF0213, and TF0271. Shown are the results obtained during the cruises performed in 2009 and the long term means and standard deviations calculated from the measurements during the years 1995 to 2009 at the same time of the season

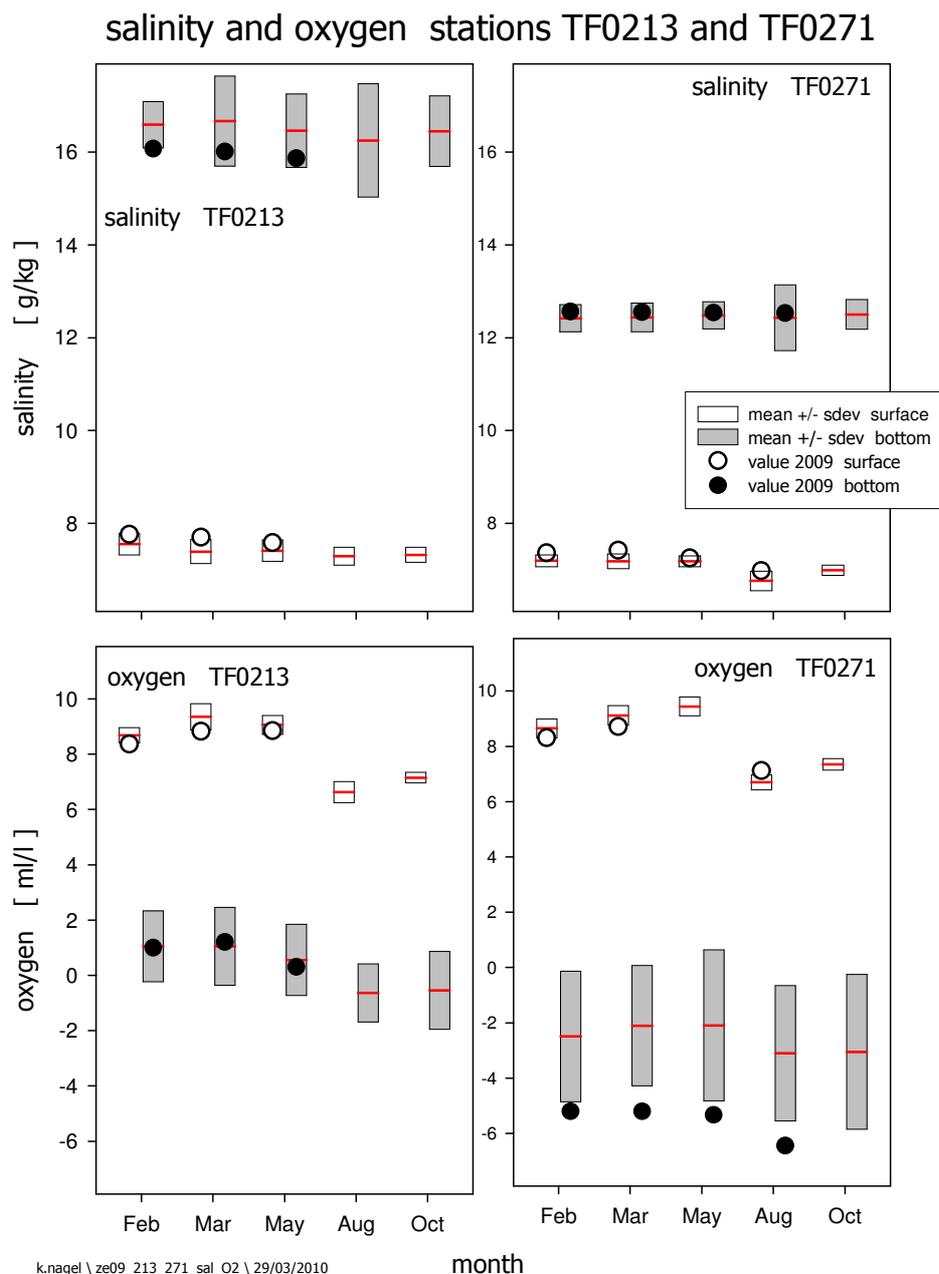


Abb. 38

Salzgehalt und Sauerstoffgehalt in der Oberflächen- und Bodenschicht an den Stationen TF0213 und TF0271. Angegeben sind die 2009 gemessenen Werte sowie die Mittelwerte und Standardabweichungen der Jahre 1995 – 2009 in den entsprechenden Zeiträumen

Fig. 38

Salinity and oxygen concentration in the near surface and near bottom layer at stations TF0213 and TF0271. Shown are the results obtained during the cruises performed in 2009 and the long term means and standard deviations calculated from the measurements during the years 1995 to 2009 at the same time of the season

Die DOC - Konzentrationen in der Oberflächenschicht an beiden Stationen sind ebenso wie die Salzgehalte ähnlich groß. Die DOC - Werte zeigen den typischen Jahresgang mit einem Minimum im Frühjahr und einem Maximum im Herbst (NAUSCH et al., 2007). Bezogen auf die Mittelwerte aus den Langzeitbeobachtungen liegt die Differenz zwischen den minimalen und maximalen Werten in der Größenordnung, die man unter der Annahme erwarten würde, dass die im Winter in der Oberflächenschicht akkumulierten anorganischen Nährstoffe vollständig in organischen Verbindungen festgelegt werden. Die größere Streuung der Werte in Sommer und Herbst kann zum einen auf eine unzureichende saisonale Auflösung der Messungen zurückzuführen sein, sodass bereits geringe zeitliche Verschiebungen im Auftreten der Maximalkonzentration zu einer Erhöhung der Streuung beitragen. Zum anderen kann auch die beobachtete inhomogene Verteilung des Planktons zu inhomogeneren DOC - Werte beitragen. Da die Salzgehalte deutlich geringere Schwankungen und kaum saisonale Veränderungen aufweisen, sind hydrodynamische Mischungsprozesse als Ursache für den Jahresgang der DOC - Konzentrationen unwahrscheinlich.

Im bodennahen Wasserkörper sind die mittleren DOC - Konzentrationen im Bornholmbecken etwas geringer als im östlichen Gotlandbecken. Da sich auch die entsprechenden Salzgehalte um ungefähr 4 g/kg unterscheiden, dürften hydrodynamische Mischungsprozesse zwischen aus der Nordsee eingeströmtem Wasser mit Wasser aus der zentralen Ostsee für diese Unterschiede verantwortlich sein. Auch das Minimum im Sommer an der Station Tfo213 hat wahrscheinlich hydrodynamische Ursachen, da die Halokline an dieser Station, die eine Wassertiefe von ca. 90 m hat, fast den Boden erreicht und deshalb eine gelegentliche Durchmischung des Wasserkörpers am Boden nicht auszuschließen ist, besonders in den Wintermonaten, in denen die wetterbedingte Durchmischung tiefer reicht.

Die DON - Konzentrationen im Bornholmbecken und in der zentralen Ostsee unterscheiden sich nicht wesentlich von denen in den westlichen Gebieten. Sie liegen in der Oberfläche bei ungefähr 16 $\mu\text{mol/l N}$ und in Bodennähe bei ungefähr 12 $\mu\text{mol/l N}$. Zur Zeit des Planktonwachstums liegt der gelöste Gesamtstickstoff im Oberflächenwasser praktisch ausschließlich als DON vor, während sein Anteil in den Wintermonaten auf 60% bis 90% absinkt.

In der Bodenschicht fällt der 2009 gemessene sehr hohe Anteil gelöster anorganischer Stickstoffverbindungen an der Station Tfo271 auf, deutlich über dem langjährigen Mittel von ca. 18 $\mu\text{mol/l N}$ liegt. DON machte 2009 hier nur noch ca. 10% bis 30% des gelösten Gesamtstickstoffs aus. Gleichzeitig zeigen die über dem langjährigen Durchschnitt liegenden H_2S - Konzentrationen - hier angegeben als negative Sauerstoffäquivalente - die Auswirkungen der ausgeprägten Stagnation des Wasserkörpers an. Bereits während der lang anhaltenden Stagnationsperiode von 1994 bis 2002 konnte im Bodenwasserkörper an dieser Station gezeigt werden, dass die DON - Konzentration während dieser Zeit abnahm, während die Konzentrationen von DIN (als Ammonium) deutlich und die von DOC leicht zunahm (NAUSCH et al., 2007)). Diese Veränderungen waren verbunden mit einer

Erhöhung des DOC / DON Verhältnisses auf fast 100. Das C/N - Verhältnis in der partikulären Fraktion (POC / PON- ratio) blieb während dieser Zeit nahezu unverändert und lag mit ungefähr 7 nahe dem Erwartungswert aus dem Redfield - Verhältnis.

In Abb. 39 sind die C / N - Verhältnisse in der gelösten Fraktion (DOC / DON - ratio) für die Stationen TFO012 und TFO113 sowie TFO1213 und TFO271 dargestellt, wobei neben den im Jahr 2009 ermittelten Werten auch die langjährigen Mittelwerte und Standardabweichungen in der Oberflächen - und Bodenschicht angegeben sind. Für alle untersuchten Seegebiete liegt das mittlere DOC / DON - Verhältnis in der oberflächennahen Schicht bei ungefähr 20. Die Streuung der Werte ist relativ gering. Vergleichbare Verhältnisse wurden auch im Bodenwasserkörper an den flacheren Stationen beobachtet, an denen der Wasserkörper häufiger bis zum Boden durchmischt wird. Demgegenüber finden sich deutlich größere DOC / DON - Verhältnisse an den Stationen, an denen im langjährigen Mittel zumindest zeitweise anoxische Bedingungen herrschen. Die größeren DOC / DON - Verhältnisse sind dabei immer mit einer deutlich erhöhten Streuung der Werte gekoppelt. Besonders deutlich wird dies in der Bodenschicht an der Station TFO213, an der im langjährigen Mittel nur im Sommer und Herbst mit dem Auftreten von H_2S zu rechnen ist. Zu diesen Zeiten zeigen die Streuungen des DOC / DON - Verhältnisses eine ähnliche Größenordnung wie an der Station TFO271, die trotz kurzzeitiger Unterbrechungen durch Salzwassereinbrüche im langjährigen Mittel ständig anoxisch ist. Die großen Schwankungen im DOC / DON - Verhältnis sind dadurch zu erklären, dass bei Salzwassereinbrüchen zusammen mit dem im Wasser gelösten Sauerstoff auch andere im Wasser gelöste Stoffe (wie z.B. DOM) in den anoxischen Wasserkörper eingemischt werden. Dadurch kommt es zu einer kurzfristigen Angleichung der DOC / DON - Verhältnisse an die in durchmischten oberflächennäheren Wassermassen ermittelten Werte.

Ein ähnliches Phänomen wurde auch an der flachen Station TFO012 in der Mecklenburger Bucht beobachtet. Obwohl die Wassersäule an dieser Station meist gut durchmischt ist, kann es unter bestimmten Wetterlagen in den Sommermonaten zu einer kurzzeitigen, vergleichsweise stabilen Schichtung kommen, die sowohl durch einen hohen Salzgehaltsunterschied zwischen der Oberflächen - und Bodenschicht als auch durch eine über mehrere Tage bestehende thermische Sprungschicht stabilisiert wird. Unter diesen Bedingungen ist in den letzten Jahren einige Male eine sehr starke Abnahme des Sauerstoffgehalts beobachtet worden, die jedoch im Wasserkörper nicht zu anoxischen Bedingungen führte. Auch hier war eine deutliche Abnahme des DON - Gehalts und eine deutliche Zunahme der DOC / DON - Verhältnisse zu beobachten, die sich in der auffallend hohen Streuung der langjährigen Mittelwerte in der Bodenschicht der Station TFO012 im Sommer ausdrückten (Abb. 39).

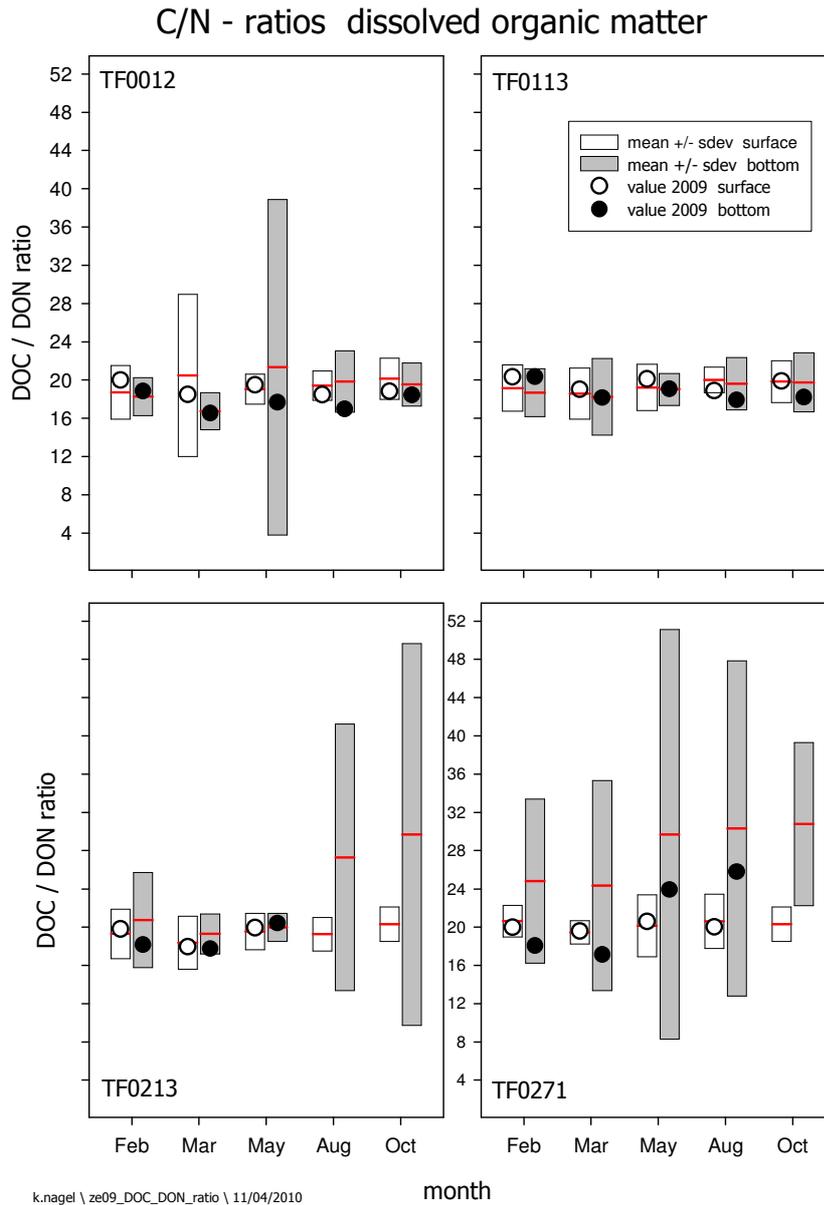


Abb. 39

C/N - Verhältnisse im gelösten organischen Material (DOC / DON - ratio) in der Oberflächen - und Bodenschicht an den Stationen ZFo012, TF0113, TF0213 und TF0271. Angegeben sind die 2009 gemessenen Werte sowie die Mittelwerte und Standardabweichungen der Jahre 1995 – 2009 in den entsprechenden Zeiträumen

Fig. 39

C/N - ratios in the dissolved organic matter (DOC / DON - ratio) in the near surface and near bottom layer at stations TF0012, TF0113, TF0213, and TF0271. Shown are the results obtained during the cruises performed in 2009 and the long term means and standard deviations calculated from the measurements during the years 1995 to 2009 at the same time of the season

Der Grund, warum unter anoxischen Bedingungen eine Abnahme des DON - Gehalts und eine Zunahme des DOC / DON - Verhältnisses zu beobachten ist, kann mit den vorliegenden Daten nicht abschließend geklärt werden. Die Annahme, dass diese Vorgänge nur unter anoxischen Bedingungen oder bei sehr geringen Sauerstoffkonzentrationen ablaufen, ist nicht eindeutig zu belegen. Die beobachtete Abnahme des Sauerstoffgehalts mit zunehmender Tiefe an allen untersuchten Stationen ist ein Hinweis darauf, dass heterotrophe Organismen in allen Wassertiefen organisches Material abbauen. Zu anoxischen Bedingungen kommt es dabei nur dann, wenn der Sauerstoffverbrauch durch den Abbau organischen Materials schneller abläuft als die Zufuhr von Sauerstoff. Da in tieferen Wasserschichten sowohl die Diffusion von Sauerstoff aus der Atmosphäre als auch die Freisetzung von Sauerstoff durch photosynthetische Prozesse vernachlässigbar gering ist, ist der Zustrom von sauerstoffreicherem Wasser aus oberflächennahen Wasserschichten die einzige Möglichkeit, langfristig oxische Bedingungen zu stabilisieren. Das Auftreten anoxischer Bedingungen ist deshalb auch immer ein Zeichen dafür, dass der Zustrom von sauerstoffreicherem Wasser aus oberflächennahen Schichten nicht oder nicht in ausreichendem Maße stattfindet. Eine 'Anreicherung' von H_2S in einem Wasserkörper ist deshalb auch ein Indiz dafür, dass die zur H_2S - Bildung führenden Prozesse deutlich schneller ablaufen als die (hydrodynamischen) Prozesse, die zu seiner Entfernung aus dem Wasserkörper führen. Eine Anreicherung von (gelöstem) H_2S ist notwendigerweise damit verbunden, dass auch alle anderen im Wasser gelösten organischen und anorganischen Verbindungen, die bei diesen Prozessen eine Rolle spielen, 'angereichert' werden (wobei eine Konzentrationsabnahme einer Verbindung als eine negative Anreicherung angesehen werden kann).

Anhand der vorliegenden Daten ist es nicht möglich zu klären, ob der im Vergleich zum DOC vermehrte Abbau von DON - erkennbar an einem erhöhten DOC / DON - Verhältnis - bevorzugt unter anoxischen Bedingungen stattfindet oder ob es sich um eine Anreicherung von Stoffwechselprodukten heterotropher Organismen handelt, die nur durch einen fehlenden oder einen zu geringen Wasseraustausch augenfällig wird. Obwohl die Konzentrationen organischen Materials - gemessen als organisch gebundener Kohlenstoff oder Stickstoff - keinen so auffälligen saisonalen Konzentrationsänderungen unterworfen sind wie z.B. die anorganischen Nährstoffe, liegen ihre Umsatzraten wenigstens in der Größenordnung derjenigen der anorganischen Nährstoffe oder der von Sauerstoff oder CO_2 .

Da außerdem verschiedene Gruppen gelöster organischer Verbindungen (z.B. Aminosäuren) auch direkt von Organismen aufgenommen werden können (BRONK 2002, BERMAN and BRONK, 2003), laufen im DOM - Pool weitere Prozesse ab, die nicht notwendigerweise mit Änderungen der DOC - oder DON - Konzentrationen verbunden sind, jedoch Einfluss auf die Umsatzraten von CO_2 oder O_2 haben können. Auch durch die Fixierung von Stickstoff aus der Luft können zusätzliche organische Stickstoffverbindungen in das System eingeschleust werden und durch spätere Remineralisierungsprozesse den Gesamtstickstoffgehalt erhöhen (WASMUND et al., 2005).

Angesichts der hohen 'Hintergrundkonzentrationen' gelöster organischer Verbindungen ist ein besseres Verständnis der Prozesse und Mechanismen nötig, die den Auf- und Abbau dieser Verbindungen steuern und kontrollieren, um langfristige Abschätzungen über die Auswirkungen anthropogener Eingriffen zuverlässig vornehmen zu können.

Zusammenfassung

Der Winter 2008/2009 war der dritte milde und kurze Winter in Folge, mit der Kältesumme 32,8 K d von Warnemünde liegt er auf Platz 14 der mildesten Winter seit Beginn der Vergleichsdaten im Jahr 1948. Das Jahr war überdurchschnittlich warm; die Jahreswärmesumme 2009 von 208 K d war noch geringfügig höher als im Vorjahr (196 K d) und lag deutlich höher als der Mittelwert 146 K d der Beobachtungsreihe seit 1948, aber noch knapp innerhalb der statistischen Streuung und weit unter dem Rekordwert von 355 K d des Jahres 2006. Die maximale Eisbedeckung der Ostsee von 112 000 km² wurde am 19. Februar erreicht. Sie lag bei nur 52% des langjährigen Mittelwerts von 214 000 km² seit 1720, war allerdings deutlich höher als im Winter zuvor, als mit 52 000 km² die niedrigste bisher registrierte Eisbedeckung beobachtet wurde.

Die Entwicklung der Wasseroberflächentemperatur war wie in den beiden Vorjahren durch vergleichsweise warme Monate Januar bis Mai in weiten Teilen der Ostsee gekennzeichnet. Allerdings lagen die Temperaturen unter denen der beiden Vorjahre. 2009 war der August der wärmste Monat und der 08.08.2009 der wärmste Tag. Durch die nur langsam einsetzende Abkühlung wurde der September 2009 zum viertwärmsten seit 1990. Westwind im September und Oktober prägte die horizontale Temperaturverteilung mit negativen Anomalien entlang der schwedischen Küste. Insgesamt war das Jahr 2009 nach den letzten vier Jahren das fünftwärmste des Untersuchungszeitraumes seit 1990.

Barotrope Einstromereignisse mit geschätzten Volumen um 200 km³ fanden in der Ostsee 2009 zwei Mal statt, im September/Oktober und im November. Von vier kleineren barotropen Signalen, die im Landsortpegel sichtbar waren, konnte keines im Tiefenwasser des Bornholm- oder Gotlandbeckens identifiziert werden. Das relativ starke Einstromsignal von Ende November 2009 wurde erst im Januar 2010 im Bornholmbecken nachgewiesen. Nach dem jetzigen Erkenntnisstand erfolgen die kleinen barotropen, also sturmgetriebenen Einstromprozesse hauptsächlich auf dem kurzen Weg durch den Sund in das Arkonabecken. Die baroklinen Ereignisse dagegen erfolgen wegen der geringen Tiefe der Drogenschwelle im Sund bevorzugt über die Darßer Schwelle.

Der relativ starke barokline Einstrom im April/Mai 2009 hat ebenfalls keine wesentliche Signatur im Bornholmbecken hinterlassen. Allerdings reichten die Einstromprozesse aus, um im Tiefenwasser des Bornholmbeckens auch 2009 durchweg oxische Verhältnisse zu erhalten. Der Jahresmittelwert von 1,13 ml/l ist dem des Vorjahres vergleichbar. Im Tiefenwasser des östlichen Gotlandbeckens hält die Stagnationsperiode nach wie vor an. Im

Vergleich zum Vorjahr nahm die Schwefelwasserstoffkonzentration, dargestellt als negative Sauerstoffkonzentration, weiter zu. Die $-3,09$ ml/l des Jahres 2009 liegen mittlerweile in der gleichen Größenordnung wie sie am Ende der letzten großen Stagnationsperiode im Jahr 2002 angetroffen wurde ($-3,82$ ml/l). Ähnliche Aussagen wie für das Gotlandtief können auch für das nördlicher gelegene Farötief getroffen werden. Betrag der Jahresmittelwert in 150 m Wassertiefe 2002 $-1,56$ ml/l, wurde für 2009 ein Wert von $-1,25$ ml/l errechnet. Im westlichen Gotlandbecken machen sich Salzwassereinbrüche deutlich verzögerter und gedämpfter Form bemerkbar. So konnte der Salzwassereinbruch vom Januar 2003 das Tiefenwasser des Landsorttiefs nicht nachhaltig belüften, da zunächst stagnierendes Wasser aus den vorgelagerten Becken verdrängt wurde. Eine geringe Menge Sauerstoff in 400 m Wassertiefe, die im 1. Halbjahr 2004 zugeführt wurde, war bereits in der 2. Jahreshälfte wieder verbraucht. Der Mittelwert für die Jahre 2004 und 2005 betrug $-0,29$ ml/l bzw. $-0,26$ ml/l und steigt seitdem kontinuierlich an. Mittlerweile ist er höher als am Ende der letzten langen Stagnationsperiode 2003 ($-1,01$ ml/l).

Die Nährstoffsituation im Tiefenwasser der Becken der zentralen Ostsee wird vorwiegend durch das Auftreten bzw. Ausbleiben von starken barotropen oder baroklinen Einstromprozessen geprägt. Der Salzwassereinbruch vom Januar 2003 war das letzte starke Einstromereignis in die Ostsee. Die Effekte dieses Einstroms sind seit 2005 kaum noch nachweisbar, so dass die Nährstoffverhältnisse im Tiefenwasser durch die seitdem andauernde Stagnationsphase bestimmt werden. So nahmen die Phosphat- und Ammoniumkonzentrationen im Tiefenwasser des östlichen und nördlichen Gotlandbeckens (Gotlandtief und Farötief) weiter zu. Vergleicht man die Phosphatwerte des Gotlandtiefs und des Farötiefs des Jahres 2009 ($5,22$ bzw. $4,40$ $\mu\text{mol/l}$), mit denen des Jahres 2002, dem Ende der letzten Stagnationsperiode, sind bereits wieder vergleichbare Konzentrationen zu finden. Die entsprechenden Konzentrationen betragen 2002 $5,88$ $\mu\text{mol/l}$ (Gotlandtief) bzw. $4,86$ $\mu\text{mol/l}$ (Farötief). Der Jahresmittelwert der Ammoniumkonzentrationen betrug in 200 m Wassertiefe im Gotlandtief im Jahr 2002 $19,7$ $\mu\text{mol/l}$, im Jahr 2009 $19,6$ $\mu\text{mol/l}$. Die entsprechenden Werte für das Farötief (150 m Wassertiefe) betragen $9,8$ $\mu\text{mol/l}$ (2002) bzw. $9,1$ $\mu\text{mol/l}$ (2009). Ähnliche Aussagen können auch für den Bereich des Landsorttiefs getroffen werden. Die Wassererneuerung nach dem Salzwassereinbruch 2003 war hier weniger stark ausgeprägt. Folglich sind auch die Fluktuationen im Nährstoffregime deutlich geringer. Vergleicht man die Nährstoffsituation in 400 m Wassertiefe im Jahr 2003, das hier als Ende der letzten langen Stagnationsphase angesehen werden muss, mit dem Jahr 2009, ergeben sich ähnliche Werte.

In der Oberflächenschicht weisen Phosphat und Nitrat den für die gemäßigten Breiten typischen Jahresgang auf. Für Trenduntersuchungen werden jedoch die winterlichen Konzentrationen verwendet. Der länger anhaltende Winter in der zentralen Ostsee führt hierbei zur Ausbildung eines typischen Nährstoffwinterplateaus, während die früher einsetzende Frühjahrsblüte in der westlichen Ostsee und im Arkonabecken dieses Plateau eher als Peak erscheinen lässt. In der Arkonasee waren die winterlichen Phosphat- ($0,60$ $\mu\text{mol/l}$) und Nitratkonzentrationen ($2,7 - 2,8$ $\mu\text{mol/l}$) in den Jahren 2008 und 2009 auf

ähnlichem Niveau. Auch im Bornholmbecken und im östlichen Gotlandbecken wurden durchschnittliche Winterwerte erreicht.

Summary

The winter 2008/2009 was the third mild and short one in a row. With a „cold sum“ of the winter air temperature of 32.8 K d it was on place 14 of the mildest winters since the beginning of the record in 1948. The maximum ice cover of the Baltic Sea of 112 000 km² was reached on February 19th and corresponds to 52% of the average of 214 000 km² since 1720. But, ice coverage was higher than in the winter before when the lowest ever recorded value of 52 000 km² was registered. In Warnemünde, the year 2009 was too warm on average. The annual „heat sum“ of 208 K d was only slightly higher than in the year before (196 K d) and was well above the long term mean of 146 K d for the observation period since 1948, but still within the statistical deviation, and far away from the record value of 355 K d in 2006.

The development of the sea surface temperature was characterized, as in the year before, by comparatively warm months January to May in large areas of the Baltic Sea. But temperatures were below those of the years 2007 and 2008. In 2009, August was the warmest month with August 8th as the warmest day. Due to only slow cooling, September became the fourth warmest since 1990. Westerly winds in September and October coined the horizontal temperature distribution with negative anomalies along the Swedish coast. All in all, the year 2009 was the fifth warmest since 1990 after the years 2005-2008.

In 2009, two barotropic inflow events into the Baltic Sea with approximately 200 km³ took place, in September/October and in November. The last one could be seen in the Bornholm Basin only in January 2010. Of the four smaller barotropic signals visible at the Landsort gauge, none could be observed in the deep water of the Bornholm or Gotland Basin. Based on present knowledge, small barotropic inflows driven by storms are passing the Sound and penetrating into the Arkona Basin. Due to the shallow depth of the Drogden Sill in the Sound, baroclinic inflows take place mainly across the Darss Sill. The relatively intensive baroclinic inflow of April/May 2009 also caused only minor effects in the Bornholm Basin. However, inflows were sufficient to maintain oxic conditions in the deep water of the Bornholm Basin. The annual mean of 1.13 ml/l oxygen is in the same range as in the year before. By contrast, the stagnation period continues in the eastern Gotland Basin. Compared to 2008, hydrogen sulphide concentrations, expressed as negative oxygen equivalents, increased further. The value of -3.09 ml/l is in the same range as at the end of the last stagnation period in 2002 (-3.82 ml/l).

Similar observations are valid for the more northerly situated Farö Deep. The annual mean 2002 in 150 m water depth was -1.56 ml/l while in 2009 -1.25 ml/l were measured. In the western Gotland Basin, the effects of salt water inflows are delayed and smoothed. Thus, the Major Baltic Inflow of January 2003 was unable to ventilate the Landsort Deep effectively because stagnating water from the upstream basins was displaced. A low amount of oxygen

in 400 m water depth in the 1st half of 2004 disappeared already in the 2nd half of the same year. The annual mean for the years 2004 and 2005 was -0.29 ml/l and -0.26 ml/l, respectively, and is increasing continuously since that time. Meanwhile, hydrogen sulphide concentrations are in the same range as at the end of the last stagnation period in 2003 (-1.01 ml/l).

The nutrient situation in the deep basins of the central Baltic Sea is mainly coined by the occurrence or absence of intensive barotropic or baroclinic inflow events. The Major Baltic Inflow of January 2003 was the last such strong event. The effects are no longer visible since 2005. Thus, the nutrient situation in the deep water is determined by the stagnation period. Phosphate and ammonium concentrations increased further in the eastern and northern Gotland Basin (Gotland and Farö Deep) in 2009. Comparing the phosphate values for both deeps in 2009 (5.22 resp. 4.40 $\mu\text{mol/l}$), with the year 2002, the end of the last stagnation period, comparable values of 5.88 $\mu\text{mol/l}$ (Gotland Deep) and 4.86 $\mu\text{mol/l}$ (Farö Deep) were found. The annual mean of ammonium concentrations amounted in 200 m water depth in the Gotland Deep in 2002 to 19.7 $\mu\text{mol/l}$ and to 19.6 $\mu\text{mol/l}$ in 2009. The corresponding values for the Farö Deep (150 m water depth) were 9.8 $\mu\text{mol/l}$ (2002) and 9.1 $\mu\text{mol/l}$ (2009). Similar conclusions can be drawn for the western Gotland Basin. The water renewing after 2003 was less pronounced. Consequently, fluctuations in the nutrient regime were clearly less. Comparing again the end of the last stagnation period, here in 2003, with the present situation, similar nutrient concentrations can be found.

In the surface layer of the Baltic Sea, the nutrients phosphate and nitrate show an annual cycle typical for the temperate climate zone. For trend analysis, however, concentrations in winter are used. The long lasting winter in the central Baltic Sea causes the formation of a typical winter nutrient plateau. In the western Baltic Sea and in the Arkona Basin spring bloom starts earlier and the plateau is more peak like. In the Arkona Sea, winter phosphate (0.60 $\mu\text{mol/l}$) and nitrate concentrations (2.7 - 2.8 $\mu\text{mol/l}$) were on the same level as in 2008. Also in the Bornholm and Gotland Sea, winter values were on average.

Danksagung

Die Autoren danken den am Ostseeüberwachungsprogramm beteiligten Mitarbeitern des Leibniz Instituts für Ostseeforschung Warnemünde für die Durchführung der Messungen sowie den Kapitänen und Besatzungen der Forschungsschiffe „Professor Albrecht Penck“, „Alkor“ und „Heincke“ für die Unterstützung und den Einsatz bei den Messfahrten des Jahres 2009. 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-Wetterstatellitendaten. Die Autoren bedanken sich bei Herrn BARRY BROMAN, Schwedisches Meteorologisches und Hydrologisches Institut (SMHI), Norrköpping, für die Überlassung der Pegel­daten. Herr JAN SZARON, Ozeanographisches Labor des SMHI in Göteborg, stellte uns hydrographisch-chemische Beobachtungen ausgewählter Ostseestationen aus dem Schwedischen Ozean Archiv (SHARK) zur Verfügung, die im Rahmen des nationalen schwedischen Umweltüberwachungsprogrammes gewonnen wurden. Frau ELZBIETA LYSI­AK-PASTUSZAK von der Maritimen Abteilung des Instituts für Meteorologie und Wasserwirtschaft in Gdynia (IMGW) stellte uns freundlicher­weise Beobachtungsdaten für das „Danziger Tief“ zur Verfügung. Wir danken Frau BARBARA BOGDANSKA, IMGW Warschau, für die freundliche Überlassung von Daten der Sonneneinstrahlung in Gdynia. Herrn EBERHARD HAGEN und Herrn VOLKER MOHRHOLZ, beide IOW, danken wir für die Bereitstellung und Aktualisierung der „Hagen-Kurve“. Für die technische Fertigstellung des Manuskripts sei insbesondere Frau IRINA GOLDSCHMIDT herzlich gedankt.

Literatur

- 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.
- BERMAN, T. and BRONK, D. A. (2003): Dissolved organic nitrogen: a dynamic participant in aquatic ecosystems. – Aquat. Microb. Ecol. **31**, 279-305.
- BEZOLD, W.V. (1883): Die Kälterückfälle im Mai. – Abhandlungen der königlich Bayerischen Akademie der Wissenschaften. Bd. **14**, Nr. 6, 71-108.
- BRONK, D. A. (2002): Dynamics of DON. In : Biogeochemistry of marine dissolved organic matter. HANSELL, D.A. and CARLSON, C.A. (eds). Academic Press, New York, pp 153-247.
- 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 Übergangsgebiet zwischen Oderästuar und Pommerscher Bucht (TRUMP). – Geowiss. **13**, 479-485.
- BSH (2009a): Flächenbezogene Eisvolumensumme.
<http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Beobachtungen/Eis/Kuesten.jsp>
- BSH (2009b): Sturmflut vom 14./15.10.2009.
http://www.bsh.de/aktdat/wvd/sturmflut_infos/sturmflut_14_10_09.pdf
- BURCHARD, H., JANSSEN, F., BOLDING, K., UMLAUF, L. and RENNAU, H. (2009): Model simulations of dense bottom currents in the Western Baltic Sea.- Cont. Shelf Res., **29**, 205-220.
- DWD (2009): Witterungsreport: express. 11, Nr. 1 - 13. Deutscher Wetterdienst.
- DWD (2010a): Klimadaten Deutschland, Daten im Standardformat, www.dwd.de
- DWD (2010b): unveröffentlichte Daten

- ELMGREN, R. and LARSSON, U. (2001): Nitrogen in the Baltic Sea: Managing nitrogen in relation to phosphorus. – *The Scientific World* **1** (S2), 371-377.
- FEISTEL, R., NAUSCH, G., MATTHÄUS, W. and HAGEN E. (2003a): Temporal and spatial evolution of the Baltic deep water renewal in spring 2003. – *Oceanologia* **45** (4), 623-642.
<http://www.iopan.gda.pl/oceanologia/454feis2.pdf>
- FEISTEL, R., NAUSCH, G., MOHRHOLZ, V., LYSIAK-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., PIECHURE, J. and HAGEN, E. (2004a): Evidence for a warm water inflow into the Baltic Proper in summer 2003. – *Oceanologia* **46**, 581-598.
http://www.iopan.gda.pl/oceanologia/46_4.html
- FEISTEL, R., NAUSCH, G., MATTHÄUS, W., LYSIAK-PASTUSZAK, E., SEIFERT, T., SEHESTED HANSEN, I., MOHRHOLZ, V., KRÜGER, S., and BUCH, E. (2004b): Background data to the exceptionally warm inflow into the Baltic Sea in late summer of 2002. – *Meereswiss. Ber.* **58**, 1-58.
http://www.io-warnemuende.de/documents/mebe58_2004_paper.pdf
- FEISTEL, R., NAUSCH, G., and HAGEN E. (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., and 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., and 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., FEISTEL, S., NAUSCH, G., SZARON, J., LYSIAK-PASTUSZAK, E., AERTEBERG, G. (2008a): BALTIC: Monthly time series 1900-2005. In: FEISTEL, R., NAUSCH, G., WASMUND, N. (Eds.) (2008): State and evolution of the Baltic Sea, 1952-2005. – John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, 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. and 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.
- FEISTEL, R. (2009): IOW CRUISE REPORT 07PE/09/07, MÄRZ 2009.
- FONSELIUS, S. (1969); Hydrography of the Baltic deep basins. – III. Fish. Board Swed. Ser. Hydrogr. **23**, 1-97.
- FU-BERLIN (2008): Werden auch Sie Wetterpate! <http://www.met.fu-berlin.de/wetterpate/>
- GIWA (2003): Newsletter 2, 2003. – [http://www.giwa.net/newsletter\(giwa_2-2003.pdf](http://www.giwa.net/newsletter(giwa_2-2003.pdf)
- GRASSHOFF, K., ERHARDT, M. and KREMLING, K. (1983): Methods of seawater analysis. – 2nd Ed., Verlag Chemie, Weinheim.

- HAGEN, E. and FEISTEL, R. (2001): Spreading of Baltic deep water: A case study for the winter 1997/1998. – *Meereswiss. Ber.* **45**, 47-48.
- HAGEN, E. and FEISTEL, R. (2004): Observations of low frequency current fluctuations in deep water of the eastern Gotland Basin. – *Journal Geophysical Research* **109**, C03044, doi: 10.1029/2003JC002017
- HAGEN, E. and FEISTEL, R. (2005): Climatic Turning Points and Regime Shifts in the Baltic Sea Region: The Baltic Winter Index (1659-2002). – *Boreal Environment Research*, **10**, 211-224. <http://www.borenv.net/BER/pdfs/ber10/ber10-211.pdf>
- HAGEN, E. and 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 (2000): Manual of marine monitoring in the COMBINE programme of HELCOM. – Baltic Marine Environment Protection Commission, Helsinki, Updated 2002: www.helcom.fi/Monas/CombineManual2/CombineHome.htm
- HELCOM (2003): The 2002 oxygen depletion event in the Kattegat, Belt Sea and western Baltic. - *Balt. Sea Environ. Proc.* **90**, 1-59.
- HELCOM (2007): Baltic Sea Action Plan. - http://www.helcom.fi/BSAP/en_GB/intro/
- HELCOM (2009): Eutrophication in the Baltic Sea – An integrated assessment of the effects of nutrient enrichment in the Baltic Sea region. - *Balt. Sea Environ. Proc.* **115B**, 1-148.
- IMGW (2010): Global Solar Radiation at GDYNIA station in 20098. – Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa, unveröffentlichte Daten.
- JÜRGENS, K (2009): IOW Cruise Report AL332, März 2009.
- KOSLOWSKI, G. (1989): Die flächenbezogene Eisvolumensumme, eine neue Maßzahl für die Bewertung des Eiswinters an der Ostseeküste Schleswig-Holsteins und ihr Zusammenhang mit dem Charakter des meteorologischen Winters. – *Dt. hydrogr. Z.* **42**, 61-80. <http://www.baltic.vtt.fi/pdfs/dhz422koslowski.pdf>
- 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.
- LLUR (2009): Sauerstoffmangel im bodennahen Wasser der westlichen Ostsee im September 2008.
- 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 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., NAUSCH, G. and SIEGEL, H. (2010): On phosphate pumping into the surface layer of the eastern Gotland Basin by upwelling. – *J. Mar. Syst.* **92**, 47-80.
- MATTHÄUS, W. (1978): Zur mittleren jahreszeitlichen Veränderlichkeit im Sauerstoffgehalt der offenen Ostsee. – *Beitr. Meereskd.*, Berlin **41**, 61-94.
- MATTHÄUS, W., NEHRING, D., FEISTEL, R., NAUSCH, G., MOHRHOLZ, V. and H.U. LASS (2008): The inflow of highly saline water into the Baltic Sea. In: FEISTEL, R., NAUSCH, G., WASMUND, N. (Eds.) (2008): *State and evolution of the Baltic Sea, 1952-2005*. – John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, 265-309.
- MOHRHOLZ, V. (1998): Transport- und Vermischungsprozesse in der Pommerschen Bucht. – *Meereswiss. Ber.* **33**, 1-106.
- NAGEL, K. (2009): IOW Cruise Report AL331, Februar 2009.
- NAGEL, K. (2010): IOW Cruise Report HE316, Februar 2010.
- 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. (2004): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2003. – *Meereswiss. Ber.* **59**, 1-80.
- NAUSCH, G., FEISTEL, R., LASS, H.U., NAGEL, K. und Siegel, H. (2005): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2004. – *Meereswiss. Ber. Warnemünde* **62**, 1-78.
- NAUSCH, G., FEISTEL, R., LASS, H.-U., NAGEL, K. and SIEGEL, H. (2007): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2006. – *Meereswiss. Ber.* **70**, 1-91.
- NAUSCH, G., FEISTEL, R., UMLAUF, L., NAGEL, K. and SIEGEL, H. (2008a): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2007.- *Meereswiss. Ber.* **72**, 1-93
- NAUSCH, G., NEHRING, D. and K. NAGEL (2008b): Nutrient concentrations, trends and their relation to eutrophication. In: FEISTEL, R., NAUSCH, G., WASMUND, N. (Eds.) (2008b): *State and evolution of the Baltic Sea, 1952-2005*. – John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, 337-366.
- NAUSCH, G., FEISTEL, R., UMLAUF, L., NAGEL, K. and SIEGEL, H. (2009): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2008.- *Meereswissenschaftliche Berichte Warnemünde* **77**, 1-99.
- Nausch, G. (2009): IOW Cruise Report, 07PE/09/12, Mai 2009.
- NAUSCH, M., NAUSCH, G., LASS, H.-U., MOHRHOLZ, V., NAGEL, K., SIEGEL, H. and WASMUND, N. (2009): Phosphorus input by upwelling in the eastern Gotland Basin (Baltic Sea) in summer and its effects on filamentous cyanobacteria. – *Est., Coast. Shelf Science* **83**, 434-442.
- 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. und 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.
- NEHRING, D., MATTHÄUS, W., LASS, H.U., NAUSCH, G. and NAGEL, K. (1995b): The Baltic Sea 1994 – consequences of the hot summer and inflow events. – Dt. Hydrogr. Z. **47**, 131-144.
- 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.
- REISSMAN, J., BURCHARD, H., FEISTEL, R., HAGEN, E., LASS, H.U., MOHRHOLZ, V., NAUSCH, G., UMLAUF, L. and U. WIECZOREK (2009): Vertical mixing in the Baltic Sea and consequences for eutrophication – A review. – Progress in Oceanography **82**, 47-80.
- SCHMELZER, N. (2009): The Ice Winter of 2008/09 on the German North and Baltic Sea Coasts – Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg•Rostock. <http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Beobachtungen/Eis/Winter200809.pdf>
- SCHMELZER, N., SEINÄ, A., LUNDQUIST, J.-E. and SZTOBRYN, M. (2008): Ice, 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. 199-240.
- SCHMIDT, M. (2009): IOW Cruise Report 06HE0901, 30. Oct. - 03.Nov.2009
- SCHWOERBEL, J. (1984): Einführung in die Limnologie. – VEB Gustav Fischer Verlag Jena, 1-233.
- 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.
- 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.
- SIEGEL, H. and GERTH, M. (2008): Development of Sea Surface Temperature in the Baltic Sea in 2007. HELCOM Indicator Report. http://www.helcom.fi/environment2/ifs/ifs2008/en_GB/sst/
- SIEGEL, H. and GERTH, M. (2009): Development of Sea Surface Temperature in the Baltic Sea in 2008. HELCOM Indicator Report. http://www.helcom.fi/environment2/ifs/ifs2008/en_GB/SeaSurfaceTemperature
- SIEGEL, H., GERTH, M. and TSCHERSICH, G. (2009): Sea Surface Temperature trends in the western Baltic Sea since 1990. Boreal Environment Research, submitted.

- SIEGEL, H. and GERTH, M. (2010): Satellite Based Process Studies in the Baltic Sea. Proceedings Conference "Ocean from Space" Venice 26-30 April 2010
- SMHI (1982): Climatological Ice Atlas. – Sjöfartsverkets tryckeri, Norrköping. 220 pp.
- SMHI (2010): unveröffentlichte Daten.
- SURATMAN, S., WESTON, K., JICKELLS, T. and FERNAND, L. (2009): Spatial and seasonal changes of dissolved and particulate organic C in the North Sea. – *Hydrobiol.* **628**, 13 -25.
- TOPCU, D. and BROCKMANN, U. (2001): Synthesis and new conception of North Sea Research , Working Group 5 : Fluxes of matter; in : Berichte aus dem Zentrum für Meeres-und Klimaforschung, Reihe Z : Interdisziplinäre Zentrumsberichte ; <http://www1.uni-hamburg.de/SYKON//>
- 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.
- UMLAUF, L., TANHUA, T., WANIEK, J., SCHMALE, O., HOLTERMANN, P. and REHDER, G. (2008): Hunting a new ocean tracer.- *EOS*, **89**, 43.
- UMLAUF, L. and ARNEBORG, L. (2009a): Dynamics of rotating shallow gravity currents passing through a channel. Part I: Observation of transverse structure.- *J. Phys. Oceanogr.*, **39**, 2385-2401.
- UMLAUF, L. and ARNEBORG, L. (2009b). Dynamics of rotating shallow gravity currents passing through a channel. - Part II: Analysis. *J. Phys. Oceanogr.*, **39**, 2402-2416
- UMLAUF, L., ARNEBORG, L., HOFMEISTER, R., AND BURCHARD, H. (2010). Entrainment in shallow rotating gravity currents: A modeling study. *J. Phys. Oceanogr.*, accepted.
- VAN BEBBER, W. J. (1891): Die Zugstrassen der barometrischen Minima. – *Meteorologische Zeitschrift* **8**, 361–366.
- WASMUND, N., NAUSCH, G., SCHNEIDER, B., NAGEL, K. and VOSS, M. (2005): Comparison of nitrogen fixation rates determined with different methods: A study in the Baltic Proper. – *Mar. Ecol. Progr. Ser.* **297**, 23-31.
- WMO (2009): 2000–2009, THE WARMEST DECADE. – Press Release No.869, World Meteorological Organization
http://www.wmo.int/pages/mediacentre/press_releases/pr_869_en.html
- WMO (2010): WMO statement on the status of the global climate in 2009. WMO-No. 1055, World Meteorological Organization

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

Die Schwermetall- Situation in der Ostsee im Jahre 2009

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenfassung	111
Summary	112
1. Einleitung	112
2. Probenahme	114
2.1 Probenaufarbeitung	117
2.2 Qualitätssicherung	117
3. Ergebnisse und Diskussion	121
3.1 Verteilungsmuster der Metallkonzentrationen in der gelösten und partikulären Phase an den in 2009 beprobten Stationen und Tiefen	121
Cadmium	122
Blei	122
Kupfer	123
Zink	123
Quecksilber	123
3.2 Spurenmetall-Trends zwischen den Jahren 1993-2009 an Stationen in der westlichen und zentralen Ostsee	133
3.3 Ergebnisse aus den Sedimentuntersuchungen	141
4. Schlussfolgerungen	143
Danksagung	144
Literaturverzeichnis	144

Zusammenfassung

Im Jahre 2009 wurden wie im Vorjahr die Stationen in der westlichen Ostsee berücksichtigt, allerdings wurden diese Stationen im Februar und im Juli beprobt. Zum Vorjahr wies die Schwermetallverteilung in der westlichen Ostsee im Jahr 2009 keine deutlichen oder gesundheitsgefährdenden Veränderungen auf. Regionale Konzentrationserhöhungen wie sie z. B. an der Station OB Boje in der Pommerschen Bucht auftreten, sind auf die Einträge mit der Oder zurückzuführen.

Veränderungen, die kurzzeitig durch den Salzwassereinbruch im Februar 2003 hervorgerufen wurden, spiegeln sich in den Langzeittrends kaum wieder. Unterhalb der Redoxklinen die 2009 im 100-110m Tiefenhorizont angetroffen wurde, wurde ein Rückgang der gelösten Metallkonzentrationen für Cd_{diss}, Cu_{diss} und Zn_{diss} beobachtet. Weiterhin ist eine starke 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.

Regionale Konzentrationserhöhungen wie sie z. B. in den letzten 2 Jahren an der Station Oderboje / Marnet zu beobachten sind, werden auf die Einträge durch die Oder zurückgeführt, die entsprechend der vorherrschenden Windrichtung, beeinflusst wird. Vergleichbar den Quecksilberkonzentrationen im Sediment, wurden an dieser Station auch im Wasser die höchsten Konzentrationen beobachtet.

Die im Jahr 2009 gemessenen Schwermetallkonzentrationen in den Oberflächensedimenten der BLMP-Stationen komplettieren die nun vorliegende Zeitreihe von 12 Jahren (1998 bis 2009). Ein statistisch gesicherter zeitlicher Trend für die einzelnen Stationen und Elemente kann immer noch nicht festgestellt werden. Schwerpunkte der „Belastung“ sind neben der bekannten Lokalität „Altlast Lübecker Bucht“ (nicht mehr im Messprogramm), das westliche Arkonabecken und die Pommernbucht vor der Odermündung.

Summary

In general the 2009 results of heavy metal concentrations in the Baltic Sea revealed no pronounced changes compared to previous years. Regional and temporal increase of concentrations was observed at the station OB Boje in the Pomeranian Bay, reflecting the higher trace metal input by the Odra river.

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 measured in 2009 fit in and complete the time series of now 12 years (1998 to 2009). But, a statistically safe trend of the elements (heavy metals) at the different stations can still not be established. Hot spots of contamination are besides the well known historical dumping site in the Lübeck-Bay (no more in the programme) the western Arkona-Basin and the Pommeranian Bay in front of the Oder River estuary.

1. Einleitung

Die Schwermetallüberwachung der Ostsee wurde im Jahr 2009 durch das Institut für Ostseeforschung zum achtzehnten Mal durchgeführt. Grundlage bildet die Verwaltungsvereinbarung mit dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) in Hamburg und Rostock. Dabei beschränkte sich 2009 die Probenahme im Rahmen des BSH-Monitorings auf die westliche Ostsee mit 3 zusätzlichen Stationen (Kieler Bucht (360), Fehmarnbelt (010), und Marnet / Oderbank. Im Jahre 2009 wurde die Beprobung im Februar (Wintersituation) und im Juli (Sommersituation) durchgeführt.

Neben den tabellarischen Darstellungen zur Qualitätskontrolle wurden die Ergebnisse vom Februar und Juli 2009 an den beprobten Stationen als Verteilungen graphisch dargestellt. Die Trendauswertungen für die westliche Ostsee wurden mit den Daten von 2009 ergänzt. Mit diesem Datensatz wird eine Stagnationsperiode zwischen zwei Salzwassereinbrüchen

1993-2003 dokumentiert. Die Teilnahme an der Quasimeme Performance Study zur Qualitätssicherung erfolgte für „Runde 58“ (Pb, Cd, Cu, Zn im Sediment).

Die Probennahme für die Spurenmetallmessungen wird seit 17 Jahren von der selben Arbeitsgruppe durchgeführt, und auch für die Spurenmetallmessungen in der Ostsee werden seit 17 Jahren die gleichen Methoden angewendet. Diese Langzeit – Daten wurden mit parallel Messungen von zertifizierten Referenzmaterial und der regelmäßigen Teilnahme an Quasimeme abgesichert. Die Daten sind untereinander somit direkt vergleichbar und der gesamte Langzeitdatensatz dürfte in Europa einzigartig sein

Für das sedimentgeochemische Monitoring wurden im Jahr 2009, wie im Arbeitsplan festgelegt, folgende Arbeiten durchgeführt:

- Beprobung und Untersuchung der 7 BLMP Stationen (Siehe Karte).
- Teilnahme an Runde 58 (QUASIMEME) zur Qualitätssicherung für Schwermetalle in marinen Sedimenten (QTM 088/089 MS).

2. Probenahme

Die Beprobung der Wasserproben erfolgte im Jahr 2009 zwischen dem 28.01.-14.02.2009 mit FS "ALKOR". Angaben zu den Stationen sind in Abbildung 1 und Tabelle 1 zusammengefasst.

Die Beprobung der Sedimentstationen erfolgte während der Fahrt mit dem „VWFS DENE“ Reise 96 im Juni 2009. Die Stationsliste sowie die Lage der Stationen sind in Tabelle 2 und Abbildung 2 dargestellt.

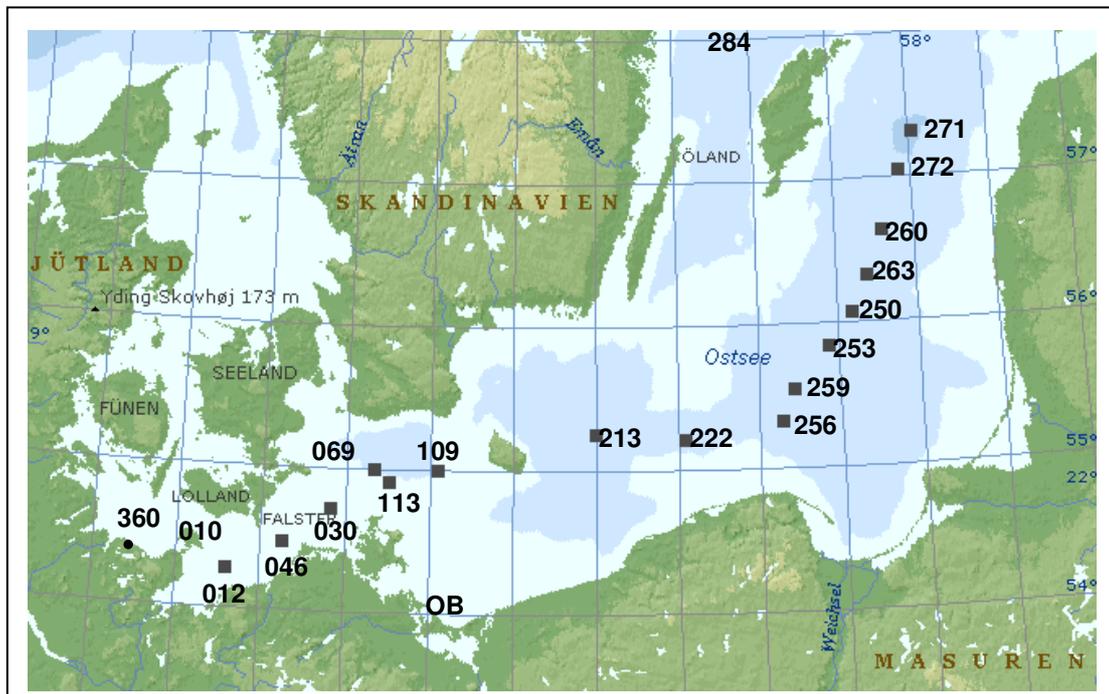


Abb. 1
Stationskarte: Probenahme von Wasserproben

Fig. 1
Station map: Sampling of water samples

Tab. 1

Stationen Schwermetalle im Ostseewasser, Februar 2009. Die fett gedruckten Stationen sind für das BSH –Monitoring obligatorisch

Table 1

Trace metal stations in seawater from February 2009. Stations for BSH-Monitoring are printed bold

Station	Grad Nord	Grad Ost	Stationstiefe (m)	Tiefenbeprobung (m)
360 / Kieler B. / N3	54°36,00'	10°27,00'	20	5
010 / Fehmarnb. / N1	54°33,10	11°19,20'	28	5
012 / M2	54°18,90'	11°33,00'	25	5
046 / M1	54°28,00'	12°13,00'	27	5, 20
030 / K8	54°43,40'	12°47,00'	22	5
113 / K5	54°55,50'	13°30,00'	47	5, 15, 35
109 / K4	55°00,00'	14°05,00'	47	5, 35
152 / K3	54°38,00'	14°17,00'	28	5, 20
Marnet / Oderbank				5
069 / K7	55°00,00'	13°18,00'	46	5, 35
213 / K2	55°15,00'	15°59,00'	91	10, 15, 50, 65, 80
222	55°13,00'	17°04,00'	93	5, 50
250	56°05,00'	19°10,00'	124	5, 50
253	55°50,40'	18°52,00'	99	5, 50
256	55°19,60'	18°15,10'	79	5, 50
259 / K1	55°33,00'	18°24,00'	90	10, 50, 80
260	56°38,00'	19°35,00'	148	5, 50
263	56°20,80'	19°22,70'	136	5, 50
271 / J1	57°19,20'	20°03,00'	249	10,30,50,60,65,70,75,80,85,90,100,110,120,125,130,135,140,150, 160 170, 180 200,225,237
284 Beprob.wenn möglich			440	10,50,75,100,125,150,200,250,300,350,400,440
272	57°04,30'	19°49,80'	212	5, 50

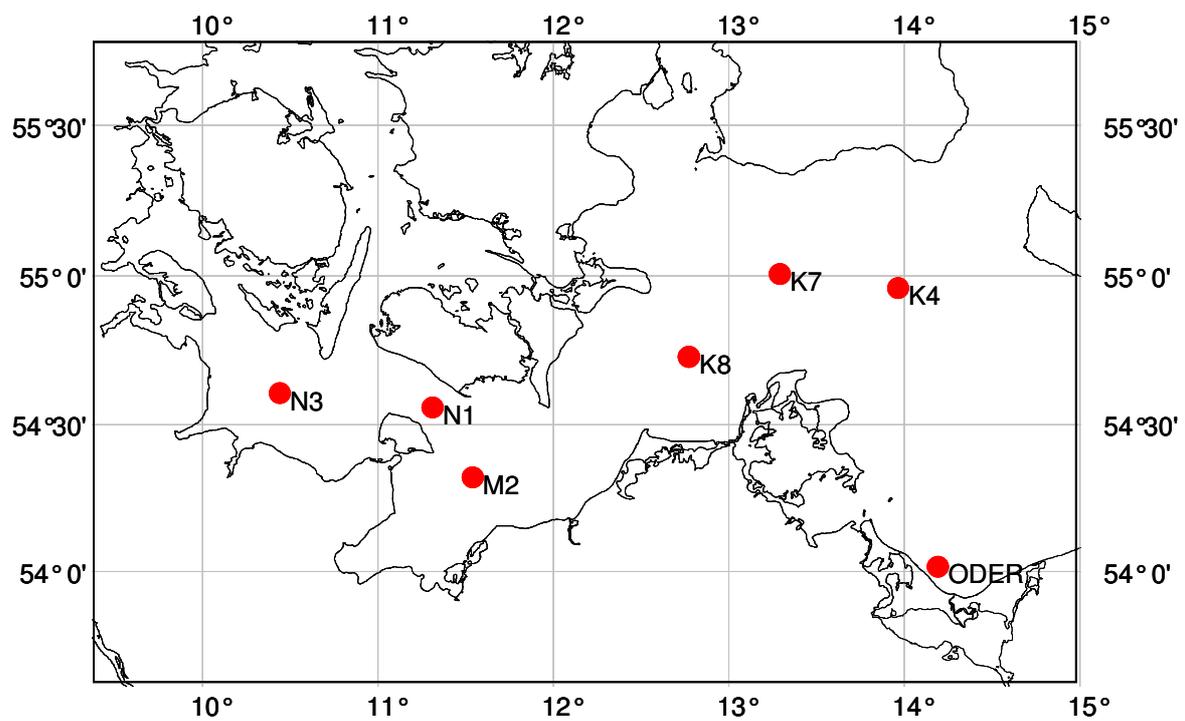
Tab. 2

BLMP-Stationen, Schwermetalle im Sediment, Beprobung 2009

Table 2

BLMP-stations, heavy metals in sediments, sampling 2009

IOW-Geo-Nr.	DENEb	Name	Date	Time	Lat	Lon	depth	IOW
	Stn.			UTC	GG.MMmm	GG.MMmm	m	sed
373960	3	K8	17.06.09	15:40	54.4337	12.4693	23	Sand
373970	7	ODER	18.06.09	15:00	54.0064	14.1202	9	Sand
373980	11	K4	19.06.09	15:40	54.5718	13.5846	47	Schlick
373990	13	K7	20.06.09	10:35	55.0002	13.1798	46	Schlick
374000	18	N1	21.06.09	09:10	54.3311	11.1927	28	Schlick
374010	22	N3	22.06.09	07:00	54.3600	10.2700	18	Sand
374020	16	M2	23.06.09	15:30	54.1890	11.3300	25	Schlick



DENEb-Reise 96; Juni 2009

● BLMP-Stationen

Abb. 2

Karte der Sediment Probenahmestationen des BLMP (Ostsee) 2009

Fig. 2

Map of sediment stations in the frame of BLMP (Baltic Sea) 2009

2.1 Probenaufarbeitung

Für den diesjährigen Bericht wurden trotz Methodenumstellung wie in den Vorjahren die Messwerte aus der Flüssig-flüssig Extraktion berücksichtigt. Bezüglich der Filtration 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, 2008) 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).

2.2 Qualitätssicherung

Wasser

Als zertifiziertes Referenzmaterial parallel zur Probenaufarbeitung wurde CRM-579 für Quecksilber und für Cd, Pb, Cu, Zn wurde NASS-5 eingesetzt (Tab.:3; Tab.:4).

Die Qualitätssicherung in suspendiertem partikulären Material (SPM) wurde mit Hilfe des zertifizierten Referenzstandards MESS-3 parallel zur Probenaufarbeitung durchgeführt (Tab.:5). Als Ergänzung sind auch in diesem Jahr in Tabelle 6 Filterblanks aufgeführt, die parallel zu den Probenaufarbeitungen des suspendierten Materials bearbeitet wurden.

In 2009 nahmen wir an der QUASIMEME Performance Study „Schwermetalle im Sediment“, Round 58 teil (Tab.:7).

Tab. 3

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

Table 3

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
2009	n=8	n=8	n=8	n=8
Mean	20	271	4	127
STDEV	1	26	2	71
%	7	10	62	56

Tab. 4

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

Table 4

Quality assurance of mercury in seawater with CRM-579

CRM 579	Hg (ng/l)
Soll	1,85+-0,2
Mai-Aug.2009	n=7
Mean	1,892
Stdev	0,12
%	6,5

Sediment und Schwebstoffe (SPM)

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

Tab. 5

Qualitätssicherung von Metallen in der partikulären Phase mit zertifiziertem Referenzmaterial -MESS-3

Table 5

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
2009	n=25	n=25	n=25	n=25	n=25
MEAN	0,25	32	25	164	318
STABW	0,02	4	3	20	27
%	7,41	12	12	12	8

Tab. 6

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

Table 6

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

Filterblanks	Pb ng/Filter	Cd ng/Filter	Cu ng/Filter	Zn ng/Filter	Mn ng/Filter	As ng/Filter
2009	n=7	n=7	n=7	n=7	n=7	n=7
Mean	0,93	0,07	2,08	4,86	0,36	0,02
STDEV	0,43	0,02	1,29	1,63	0,17	0,04
%	46,09	34,13	62,02	33,49	46,66	223,6

Tab. 7

Qualitätskontrolle Metalle in marinen Sedimenten Quasimeme R58, Jul-Oct 2009

Table 7

Quality control metals in marine sediments Quasimeme R58, Jul-Oct 2009

<i>Matrix</i>	<i>Determinand</i>	<i>Mean</i>	<i>Units</i>	<i>Assigned Value</i>	<i>Total Error</i>	<i>Z Score</i>	<i>z</i>	<i>Total Dupl.</i>
QTM088MS	Aluminium	4.320	%	5.517	0.740	-1.6	S	1
QTM088MS	Arsenic	18.76	mg/kg	17.75	2.719	0.4	S	1
QTM088MS	Cadmium	2000	µg/kg	1978	257.3	0.1	S	1
QTM088MS	Chromium	341.0	µg/kg	325.5	41.69	0.4	S	1
QTM088MS	Copper	200.0	mg/kg	189.3	24.16	0.4	S	1
QTM088MS	Iron	5.270	%	4.786	0.648	0.7	S	1
QTM088MS	Lithium	44.50	mg/kg	45.29	5.711	-0.1	S	1
QTM088MS	Lead	239.0	mg/kg	242.3	31.29	-0.1	S	1
QTM088MS	Manganese	689.0	mg/kg	745.7	93.26	-0.6	S	1
QTM088MS	Mercury	755.0	µg/kg	676.2	89.53	0.9	S	1
QTM088MS	Nickel	59.00	mg/kg	55.18	7.397	0.5	S	1
QTM088MS	Zinc	690.0	mg/kg	656.5	83.32	0.4	S	1
QTM088MS	TOC	7.050	%	6.762	0.895	0.3	S	1
QTM088MS	Carbonate	0.130	%	0.146	0.043	-0.4	S	1
QTM089MS	Aluminium	4.010	%	3.786	0.523	0.4	S	1
QTM089MS	Arsenic	19.10	mg/kg	17.27	2.659	0.7	S	1
QTM089MS	Cadmium	460.0	µg/kg	443.3	65.42	0.3	S	1
QTM089MS	Chromium	76.00	mg/kg	57.00	8.125	2.3	Q	1
QTM089MS	Copper	15.00	mg/kg	15.29	2.411	-0.1	S	1
QTM089MS	Iron	2.280	%	2.227	0.328	0.2	S	1
QTM089MS	Lithium	33.00	mg/kg	33.26	4.207	-0.1	S	1
QTM089MS	Lead	43.00	mg/kg	41.60	6.200	0.2	S	1
QTM089MS	Manganese	695.0	mg/kg	699.5	87.49	-0.1	S	1
QTM089MS	Mercury	460.0	µg/kg	453.8	61.72	0.1	S	1
QTM089MS	Nickel	21.00	mg/kg	19.93	2.991	0.4	S	1
QTM089MS	Zinc	148.0	mg/kg	143.0	19.13	0.3	S	1
QTM089MS	TOC	1.710	%	1.701	0.263	0.0	S	1
QTM089MS	Carbonate	1.300	%	1.282	0.185	0.1	S	1

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. 10-11) und der Trends (Abb. 12-16) 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 2009 beprobten Stationen und Tiefen

Wie in den vorangegangenen Jahren konzentrierten sich auch 2009 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, 2008, 2009) 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, Pohl & Hennings 2008) beschrieben. Im Jan. / Feb. 2009 variierte der Schwebstoffanteil in der westlichen und zentralen Ostsee vergleichbar zum Vorjahr zwischen 0,2-0,6 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

2009 variieren die gelösten Cadmiumkonzentrationen (Cd_{diss}) zwischen 8-18 ng/kg in der westlichen Ostsee und sind damit tendenziell etwas niedriger als im Vorjahr. Sie variieren in der zentralen Ostsee um 9 ng/kg (Abb. 3; Abb. 7). Im Gotlandbecken (Abb. 10) wird unterhalb von 110m ein deutlicher Rückgang der gelösten Cd-konzentrationen auf ~2 ng/kg beobachtet. In 2006 wurden hier noch 4 ng/kg angetroffen. Anoxische Bedingungen sind in 2009 bereits ab ~110 m zu beobachten (Vorjahr ~120m). Im Landsorttief (Abb. 11) wurden bereits unterhalb 80m anoxische Verhältnisse registriert, deshalb nehmen die gelösten Cd-konzentrationen bereits ab diesem Tiefenhorizont ab.

Bezüglich der Cd-Gehalte in der Schwebstoffphase ist ein kontinuierlicher Anstieg von der Oberfläche zur Tiefe in beiden 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.

Blei

Im Jahre 2009 variieren die gelösten Bleikonzentrationen (Pb_{diss}) (Abb. 3) in der westlichen Ostsee zwischen 5-30 ng/kg. Am häufigsten wurde der Bereich zwischen 2-10ng/kg frequentiert. Konzentrationen um 40 ng/kg wurden in der westlichen Ostsee in den vergangenen Jahren immer wieder beobachtet, welche auf einen erhöhten Anteil an Schwebstoffen $<0,4\mu m$ in den filtrierten Proben zurückgeführt wurden.

Die partikulären (PbSPM) Bleikonzentrationen (Abb. 4) liegen wie im Vorjahr zwischen 10-20 ng/dm³ mit maximalen Werten von 40 ng/dm³ an der Station Marnet / Oderbank im Einflussbereich des Oderausstromes. In der zentralen Ostsee gehen diese Konzentrationen auf Werte <10 ng/kg bzw. ng/dm³ zurück (Abb. 8, 9). Am häufigsten werden die Konzentrationsbereiche für PbSPM zwischen 2-8 ng/kg angetroffen. Der schwebstoffgebundene volumenbezogene Bleianteil entspricht wie im letzten Jahr ca. 50% der Gesamtkonzentrationen in der Wassersäule.

Kupfer

Im Februar 2009 sind die gelösten und partikulären Kupferkonzentrationen (Cu_{diss}), Cu(SPM) auf dem Niveau zum Vorjahr am häufigsten im Konzentrationsbereich zwischen 400-500 ng/kg und <10 ng/dm³ anzutreffen (Abb. 3-6). Die niedrigsten Cu_{diss} mit <100 ng/kg sind im Gotlandbecken und im Landsorttief (Abb 10, 11) in den Tiefenhorizonten unterhalb 110 m im anoxischen Tiefenhorizont zu beobachten.

Zink

2009 variieren die gelösten Zinkkonzentrationen (Zn_{diss}) ähnlich dem Vorjahr zwischen 200-1000 ng/kg (Abb.3). Konzentrationen mit ~800 ng/dm³ wurden an der Station Marnet / Oderbank angetroffen. Die volumenbezogenen partikulären Zinkgehalte (ZnSPM) sind im Jahre 2009 am häufigsten im Bereich zwischen 20-150 ng/dm³ anzutreffen (Abb. 6). Ähnlich wie bei Cadmium und Kupfer beobachten wir im Gotlandbecken eine Abnahme der Zn_{diss} und eine Zunahme der ZnSPM unterhalb der Redoxcline.

Quecksilber

Im Vergleich zum Vorjahr wurden die Quecksilberkonzentrationen (gesamt) im niedrigeren Bereich zwischen 100-400 pg/dm³ am häufigsten angetroffen. Die Konzentrationen im Oberflächenwasser (Abb. 9) sind in 2009 in der westlichen und zentralen Ostsee mit Werten um 300 pg/ dm³ vergleichbar zum Vorjahr. Auch in 2009 waren wieder außergewöhnliche Parallelen der Hg-tot Konzentrationen im Bereich der partikulären Manganmaxima im Gotlandbecken zu beobachten.

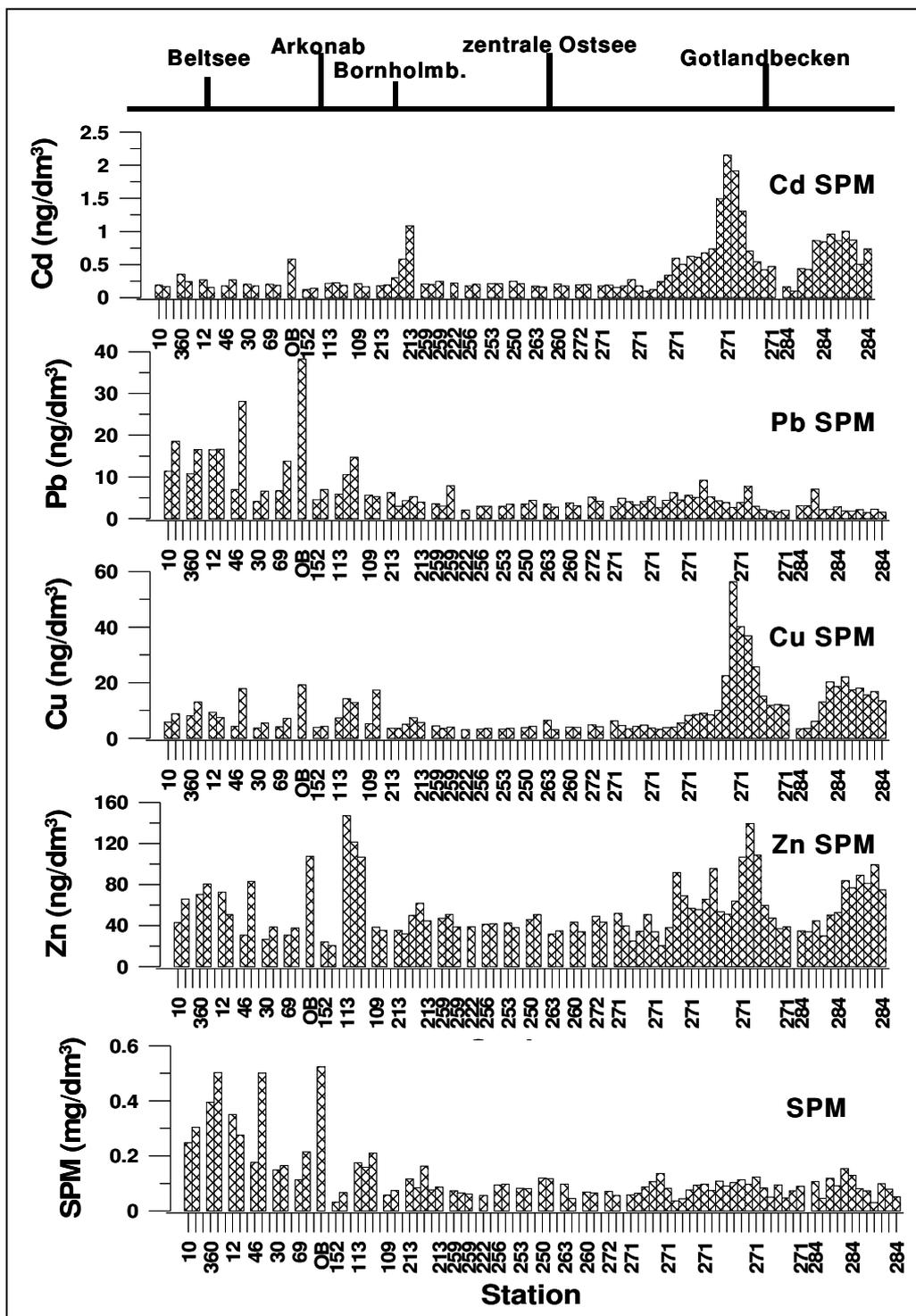


Abb. 4
Verteilungsmuster der Metallkonzentrationen in SPM (volumenbezogen) an den 2009 beprobten Stationen und Tiefen in der Ostsee (siehe Datenanhang)

Fig. 4
Distribution of metal concentrations in the particulate phases (related to the volume) in 2009, at the different sampling stations and sampling depth in the Baltic

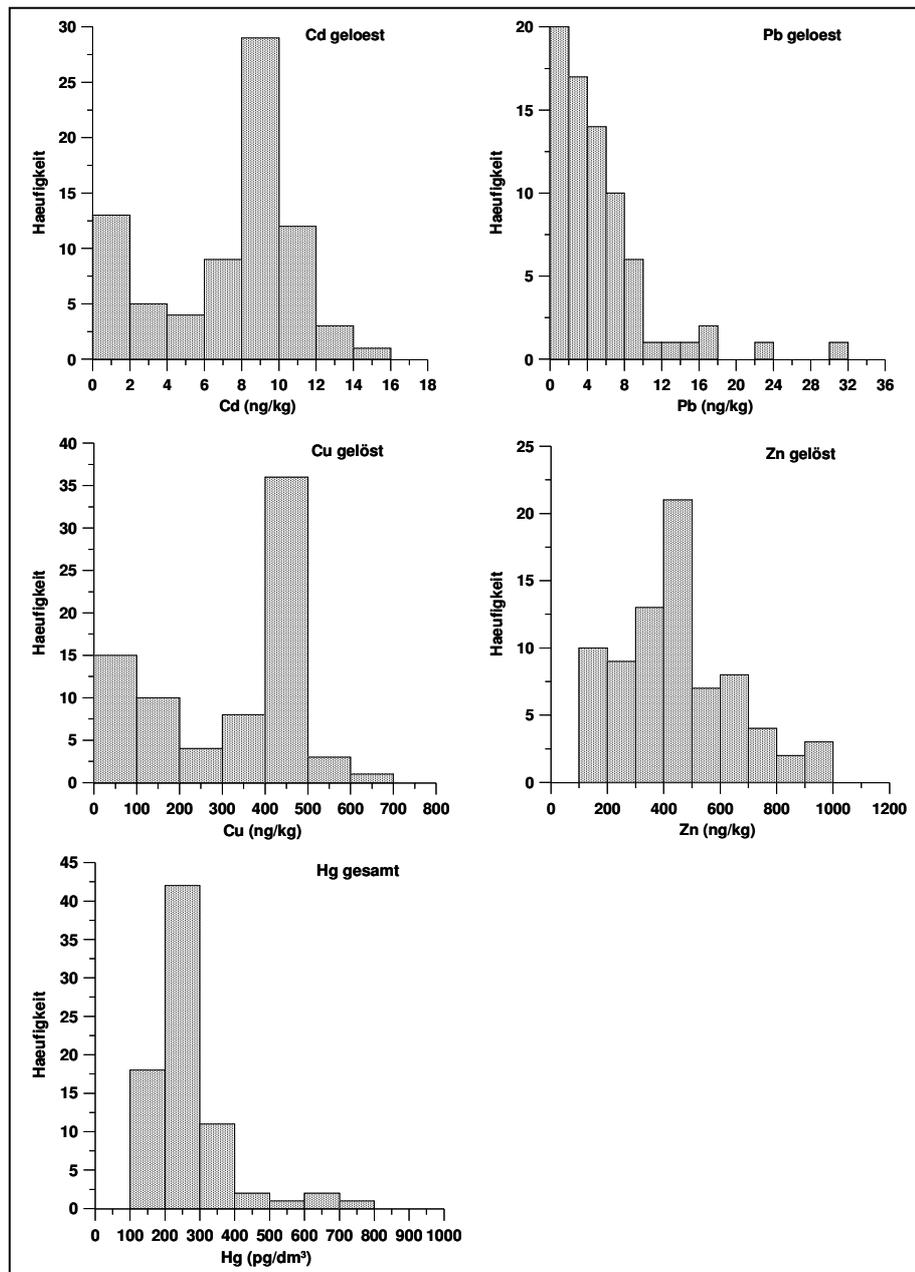


Abb. 5
Häufigkeitsverteilungen der gelösten Metallkonzentrationen in der Ostsee, im Februar 2009

Fig. 5
Frequency distribution of metal concentrations in the dissolved phases in the Baltic; February 2009

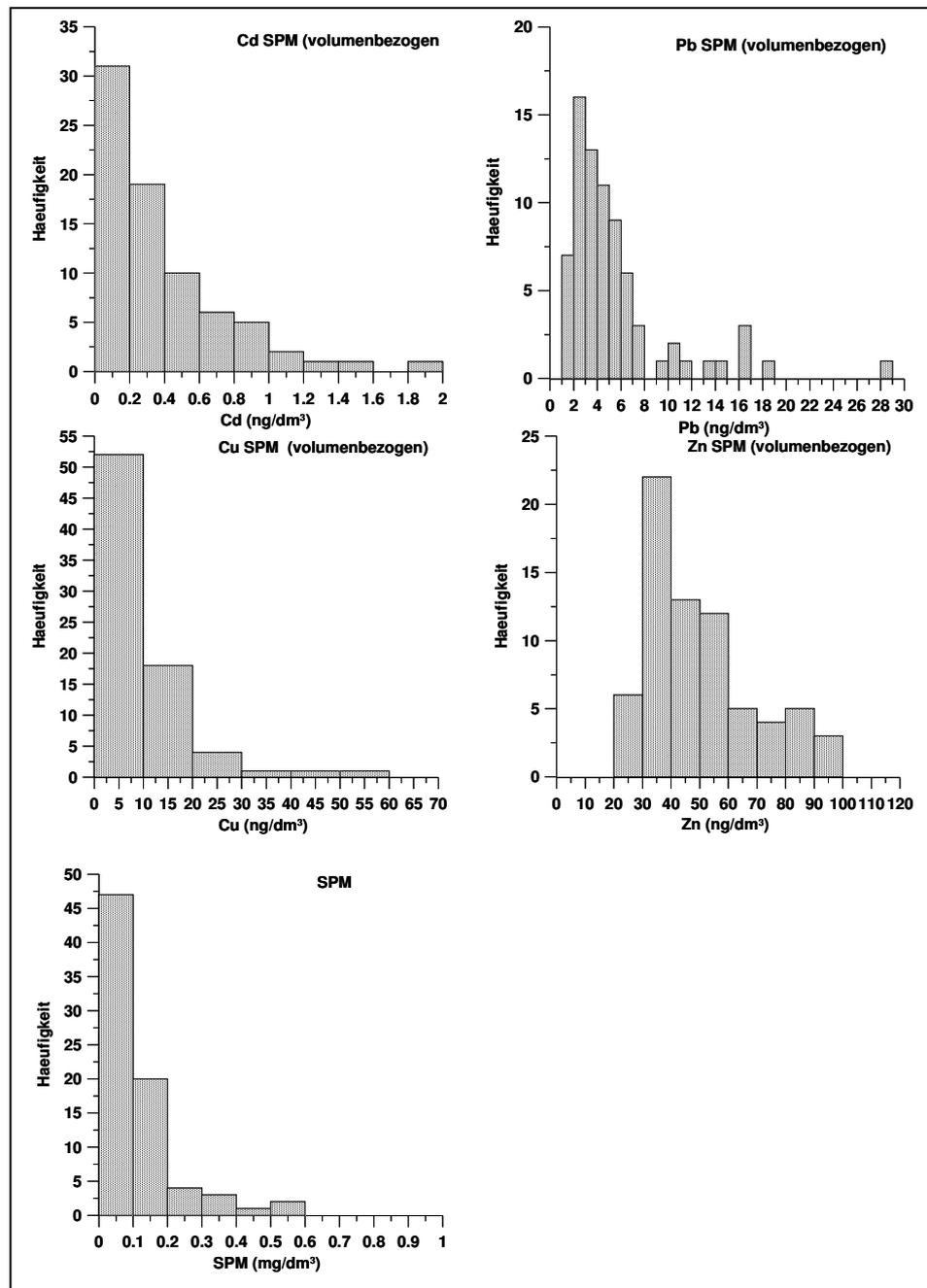


Abb. 6
Häufigkeitsverteilungen der Metallkonzentrationen in der Schwebstoffphase (volumenbezogen) in der Ostsee, Februar 2009

Fig. 6
Frequency distribution of metal concentrations in the particulate phases (related to the volume) in the Baltic; February 2009

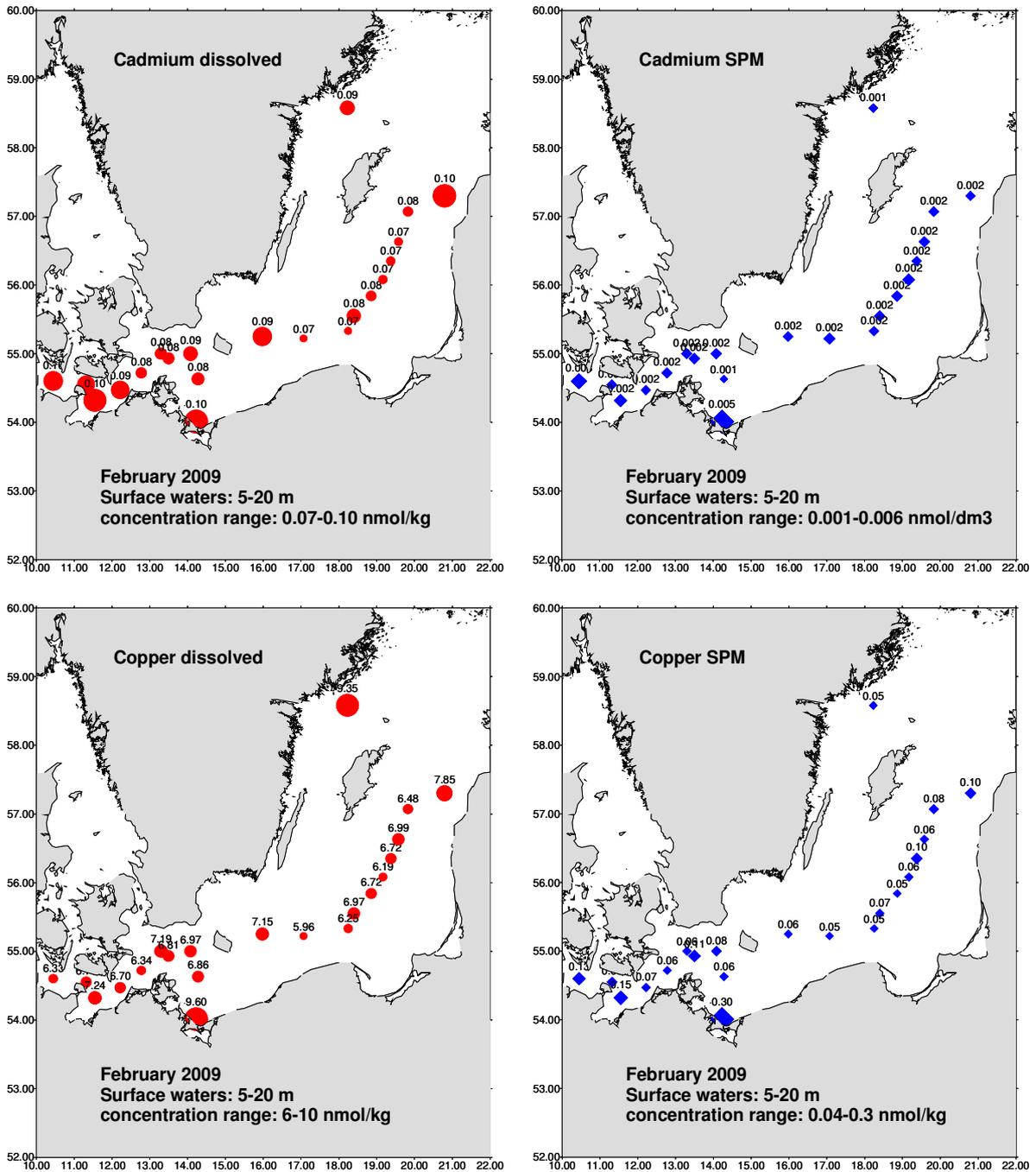


Abb. 7

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

Fig. 7

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

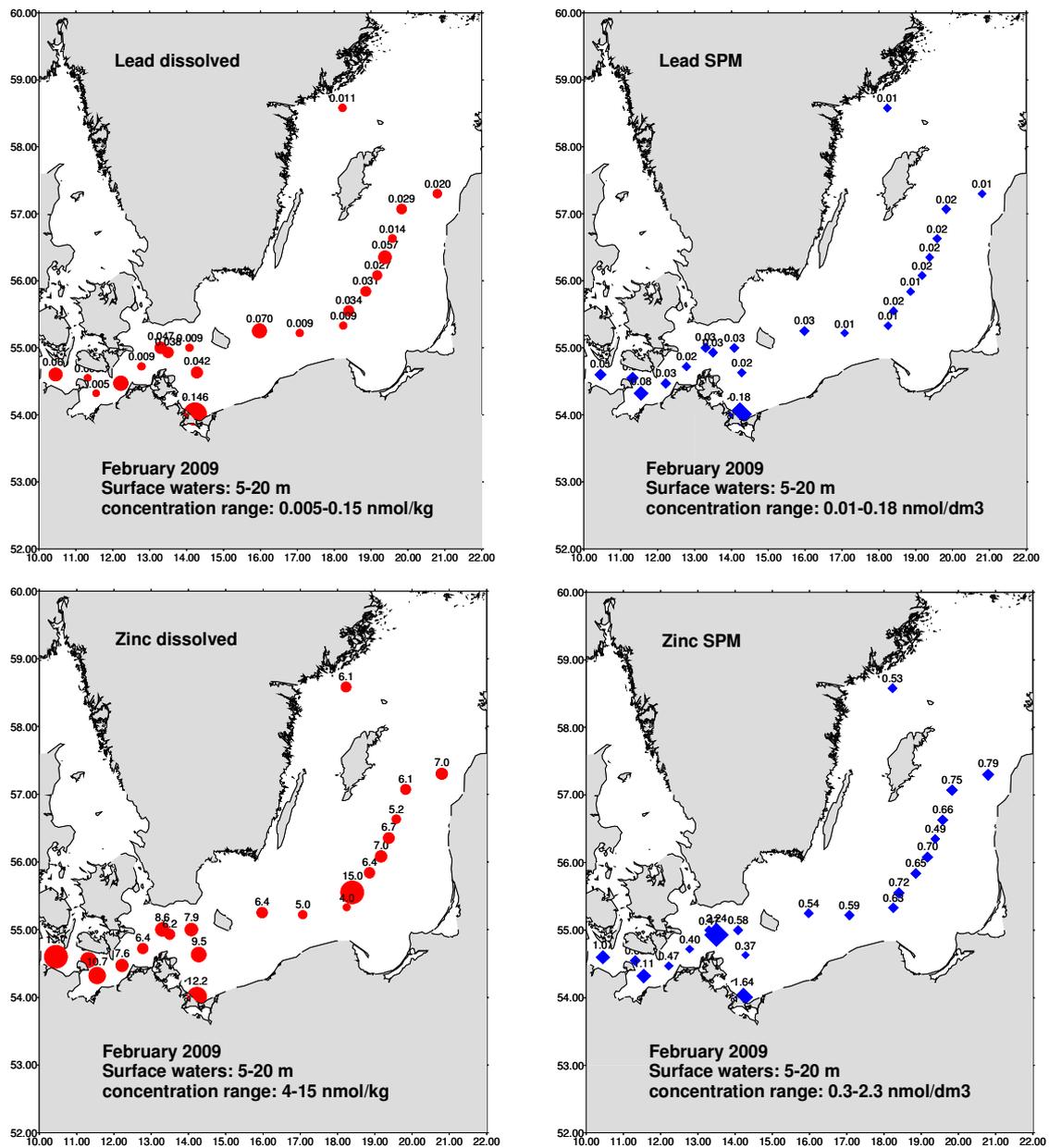


Abb. 8

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

Fig. 8

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

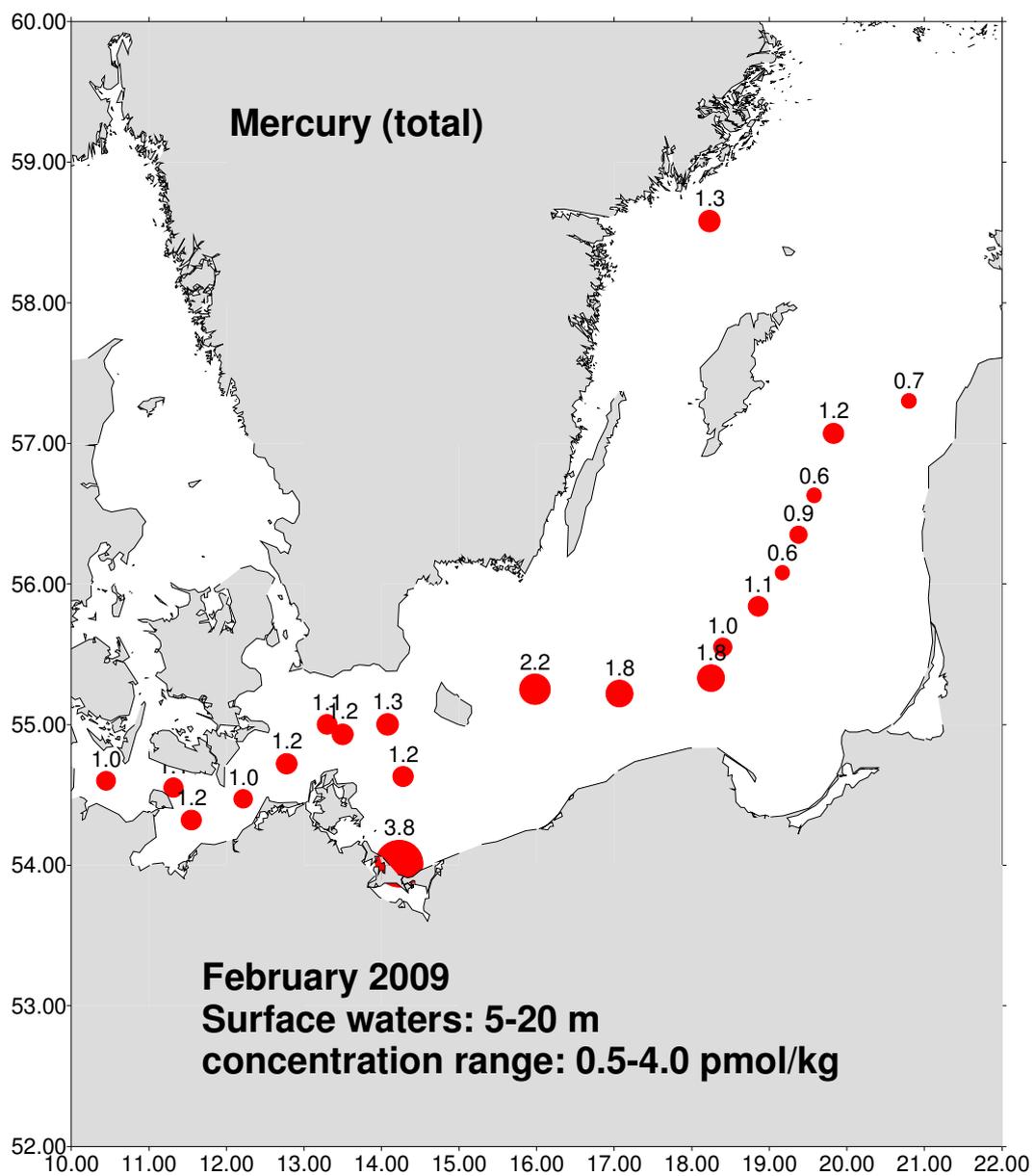


Abb. 9

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

Fig. 9

Distribution of Hg (total) in surface waters of the Baltic

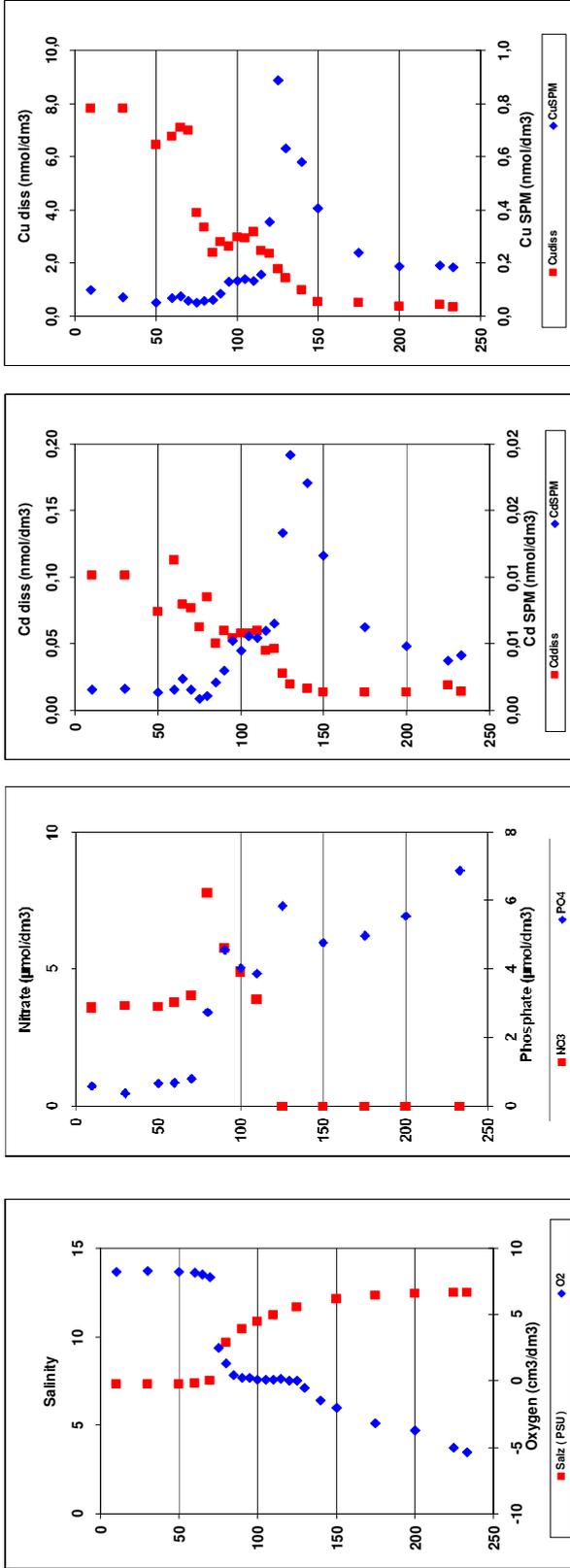


Abb. 10 Station 271:
Vertikale Verteilung von Cd, Pb,
Cu und Zn in der gelösten (diss)
und partikulären (SPM) Phase,
sowie Hg (total) und Mn (SPM) im
Gotland Becken, Februar 2009

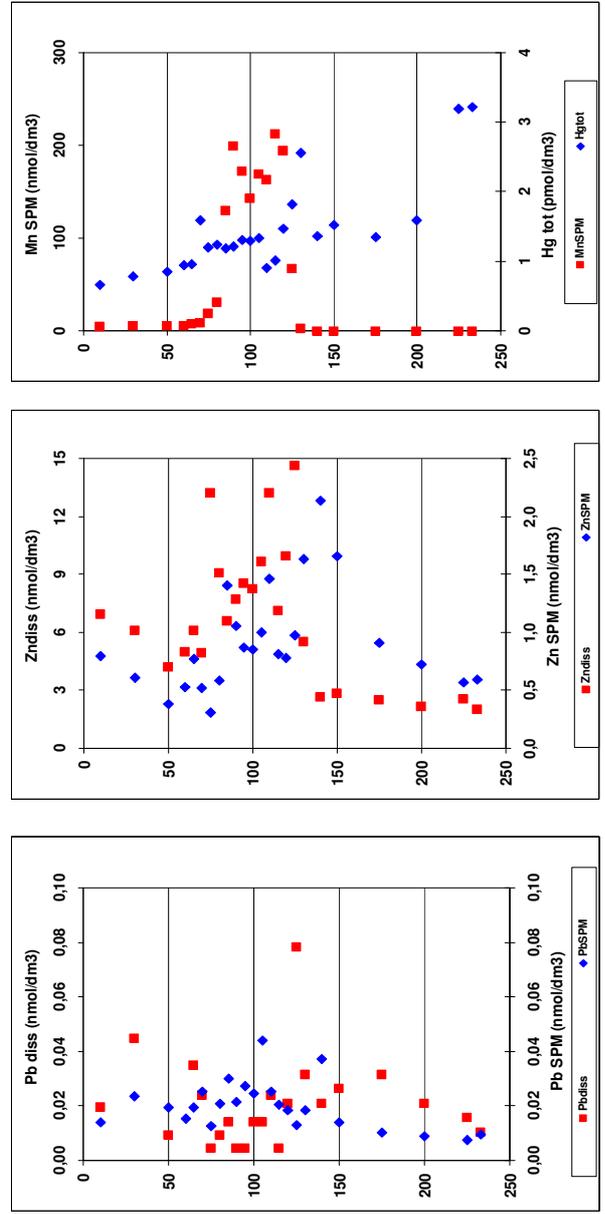


Fig. 10 Station 271:
Vertical distribution of Cd, Pb, Cu
and Zn in the dissolved (diss) and
Particulate (SPM) phases, Hg (total) and Mn
(SPM) in the Gotland Basin, Februar 2009

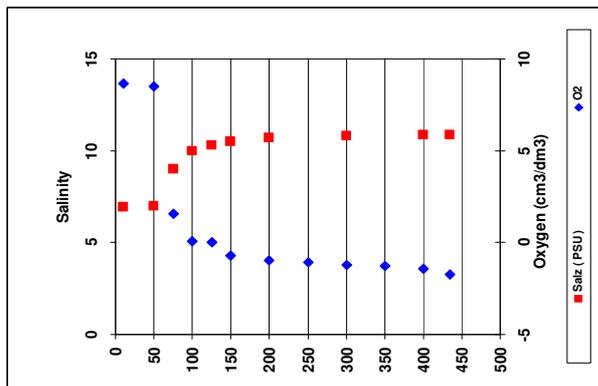
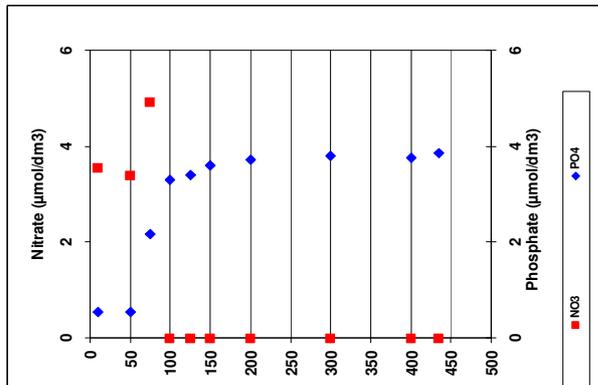
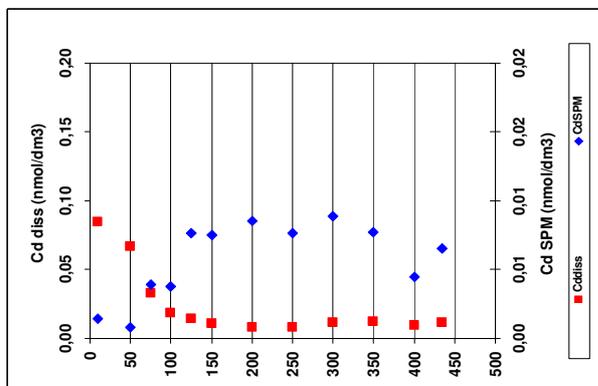
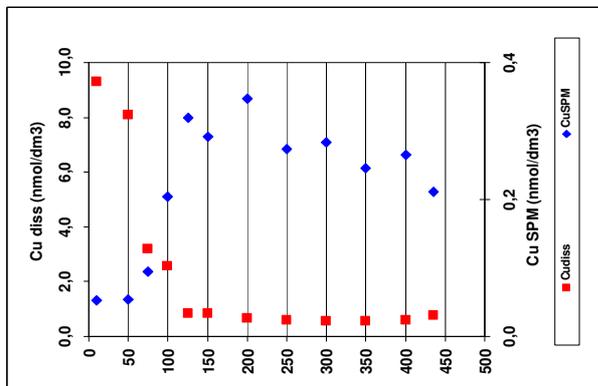


Abb. 11 Station 284:
Vertikale Verteilung von Cd, Pb, Cu und Zn in der gelösten (diss) und partikulären (SPM) Phase, sowie Hg (total) und Mn (SPM) im Landsort Tief, Februar 2009

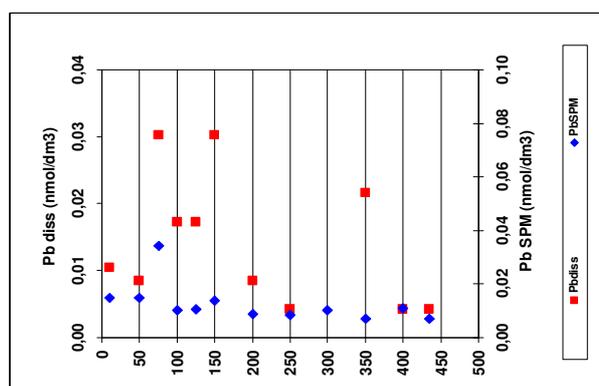
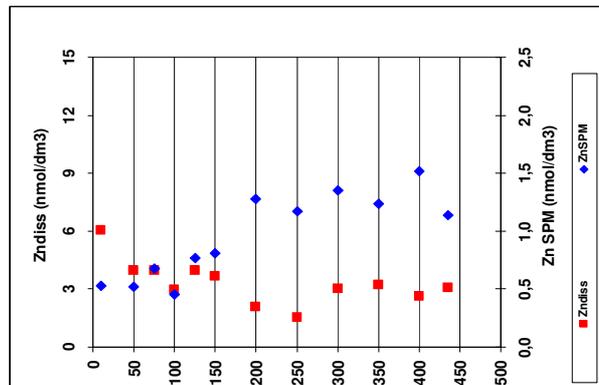
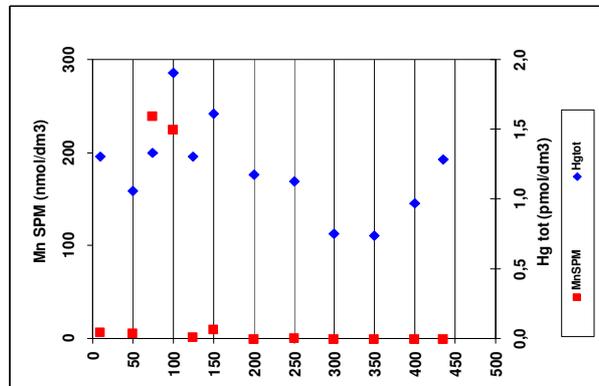


Fig. 11 Station 284:
Vertical distribution of Cd, Pb, Cu and Zn in the dissolved (diss) and particulate (SPM) phases, Hg (total) and Mn (SPM) in the Landsort Deep, Februar 2009

3.2 Spurenmetall – Trends zwischen den Jahren 1993-2009 an Stationen in der westlichen Ostsee und zentralen Ostsee (Abb.:12- Abb.:16)

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: Fehmarnbelt (010); Kieler Bucht (360), M1 (012), M2 (046)

Arkonabecken: K4 (109), K5 (113), K8 (030), 152, Marnet/Oderbank

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** (Abb.8) an diesen Stationen ebenfalls dargestellt. Sie variieren in den letzten 15 Jahren zwischen 7-20 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 7-20.

Für **Quecksilber gesamt (Hgtot)** (Abb. 8) 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 etwas niedrigeren Konzentrationen von 2009 passen sich diesem sinusartigen Kurvenverlauf 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 Salzwassereinbruch von Februar 2003 wirkt sich auf die Langzeittrends kaum aus. Die Werte für die Winter und Sommersituation 2009 fügen sich auf einem niedrigen Niveau ein. Ein Trend ist nicht zu erkennen.

Für **Cudiss** wurden 1993 sehr niedrige Konzentrationen in der westlichen Ostsee angetroffen, welches auf den Salzwassereinbruch 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. Vernachlässigt man die Werte von 2006, so kann ab 2004 ein gleichbleibender Trend beobachtet werden.

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 2009 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 und in 2009 passen sich die Werte ähnlich dem Vorjahr wieder dem niedrigen Niveau an.

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 zinkärmerem Nordseewasser hinweist. Zwischen 1996-1998 bewegen sich die Konzentrationen dann auf einem höheren Niveau mit Konzentrationen von bis zu 50 nmol/kg. Seit 1999 ist eine leichte Abnahme bis 2006 zu beobachten, die durch leicht erhöhte Werte in 2005 unterbrochen wird. Die Werte von 2009 sind wiederum auf dem gleichen niedrigeren Niveau wie in den Vorjahren und zeigen eine abnehmende Tendenz.

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 2009 bewegen sich die Konzentrationen auf einem sehr niedrigen Niveau.

Zentrale Ostsee

Im Gotlandbecken und im Landsorttief, welches in 2009 ebenfalls beprobt wurde (Abb. 11) 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 2004 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. Im Februar und Juli 2009 passen sich die Werte für **Cddiss**, **Pbdiss** und **Zndiss** dem abnehmenden Trend an.

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.

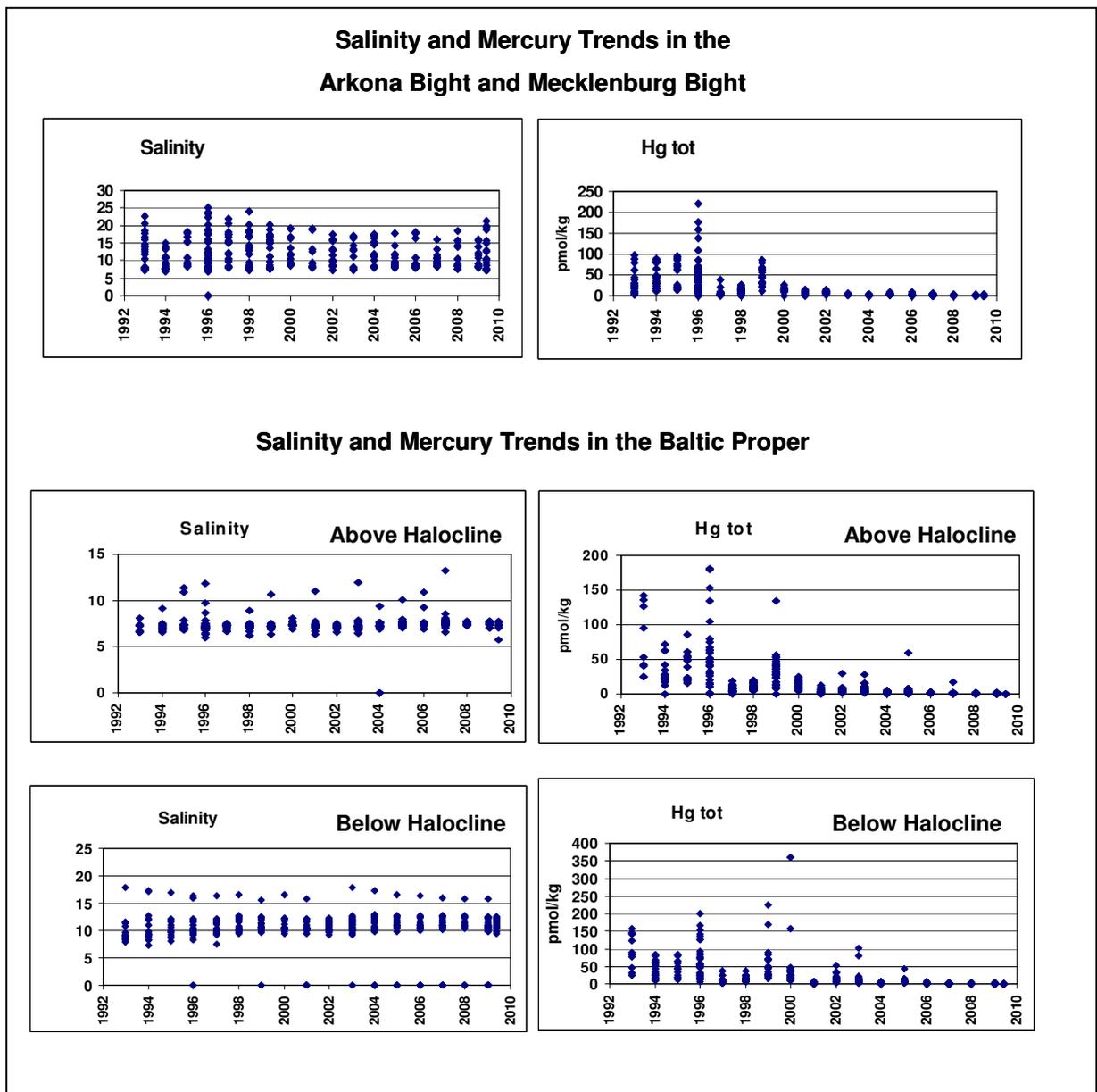


Abb. 12

Trends für Salzgehalt und Quecksilber gesamt (Hg tot), in der westlichen Ostsee, sowie oberhalb und unterhalb der Haloclinen in der zentralen Ostsee von 1993-2009

Fig. 12

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- 2009

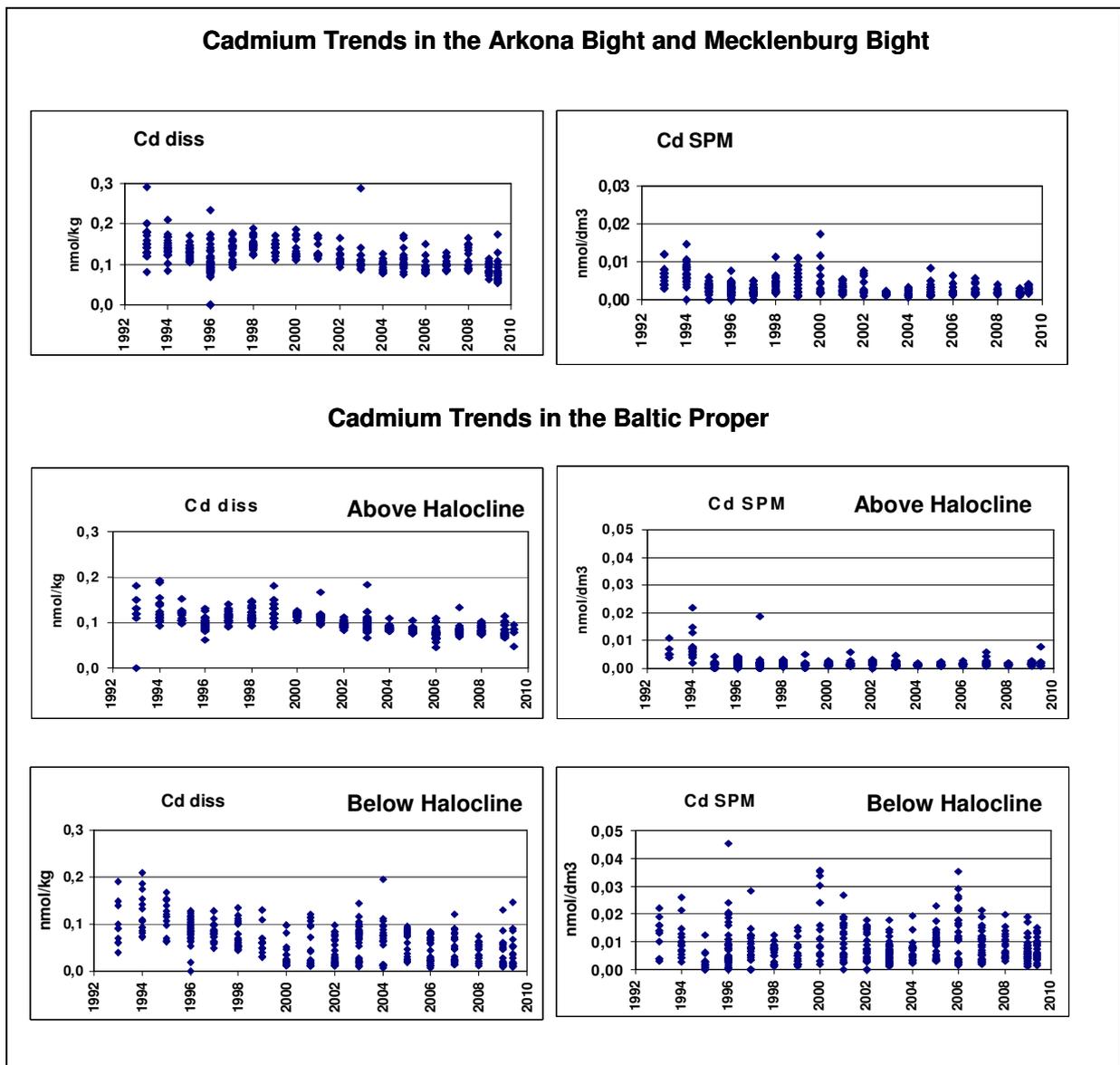


Abb. 13

Trends für gelöstes (diss) und partikuläres (SPM) Cadmium, in der westlichen Ostsee, sowie oberhalb und unterhalb der Haloclinen in der zentralen Ostsee von 1993-2009

Fig. 13

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- 2009

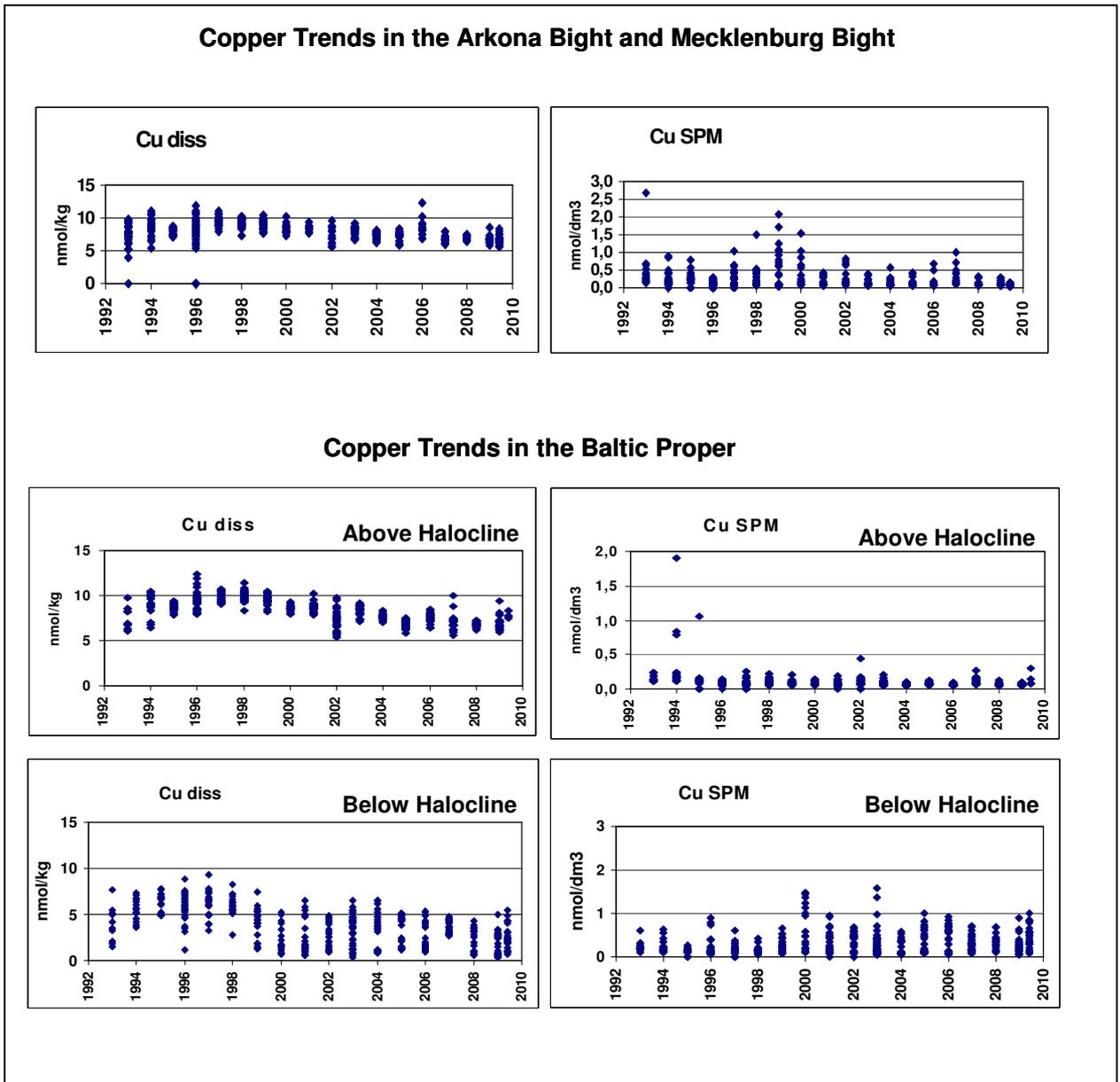


Abb. 14

Trends für gelöstes (diss) und partikuläres (SPM) Kupfer, in der westlichen Ostsee, sowie oberhalb und unterhalb der Haloclinen in der zentralen Ostsee von 1993-2009

Fig. 14

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 1993-2009

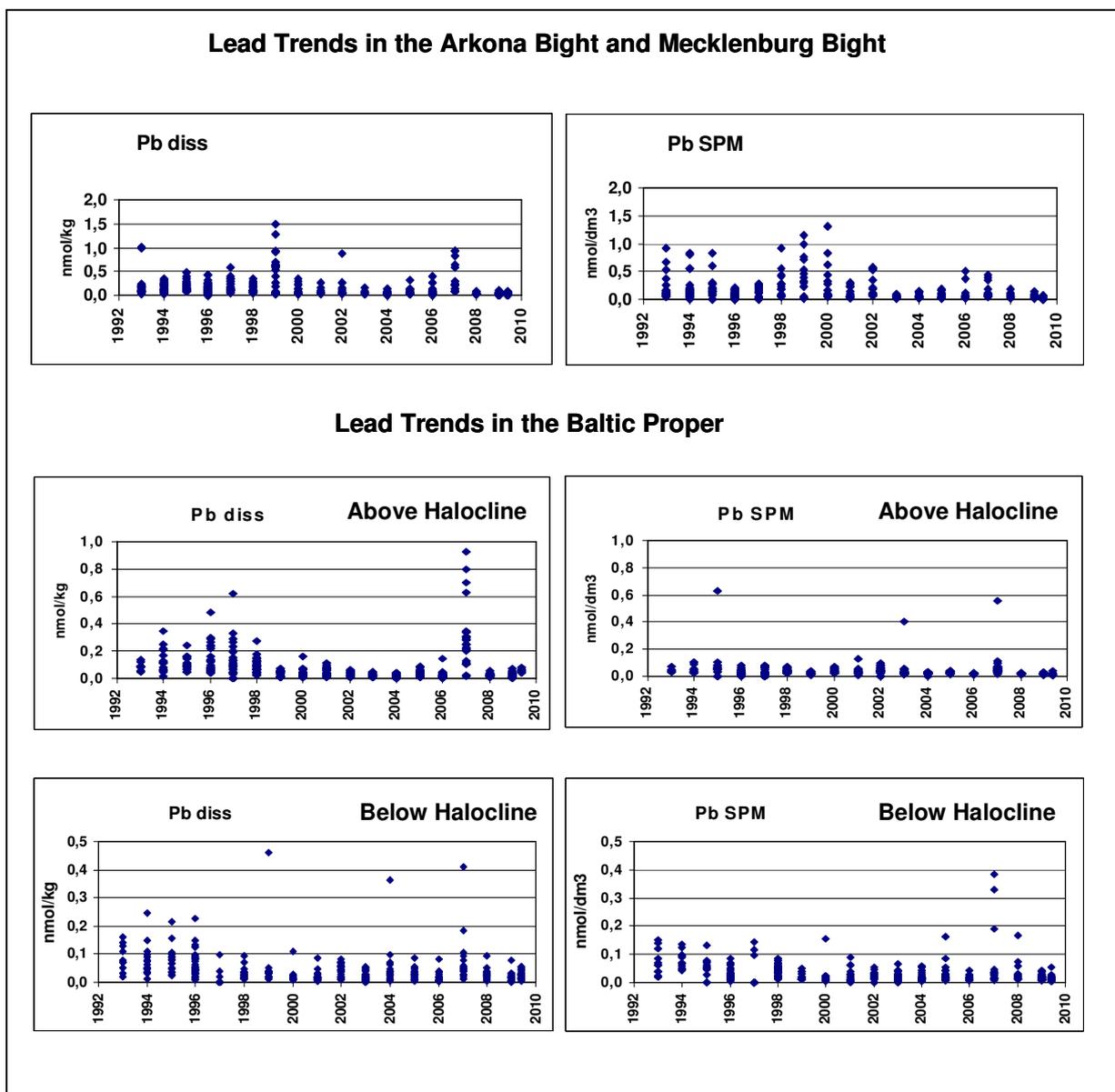


Abb. 15

Trends für gelöstes (diss) und partikuläres (SPM) Blei, in der westlichen Ostsee, sowie oberhalb und unterhalb der Haloclinen in der zentralen Ostsee von 1993-2009

Fig. 15

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 1993-2009

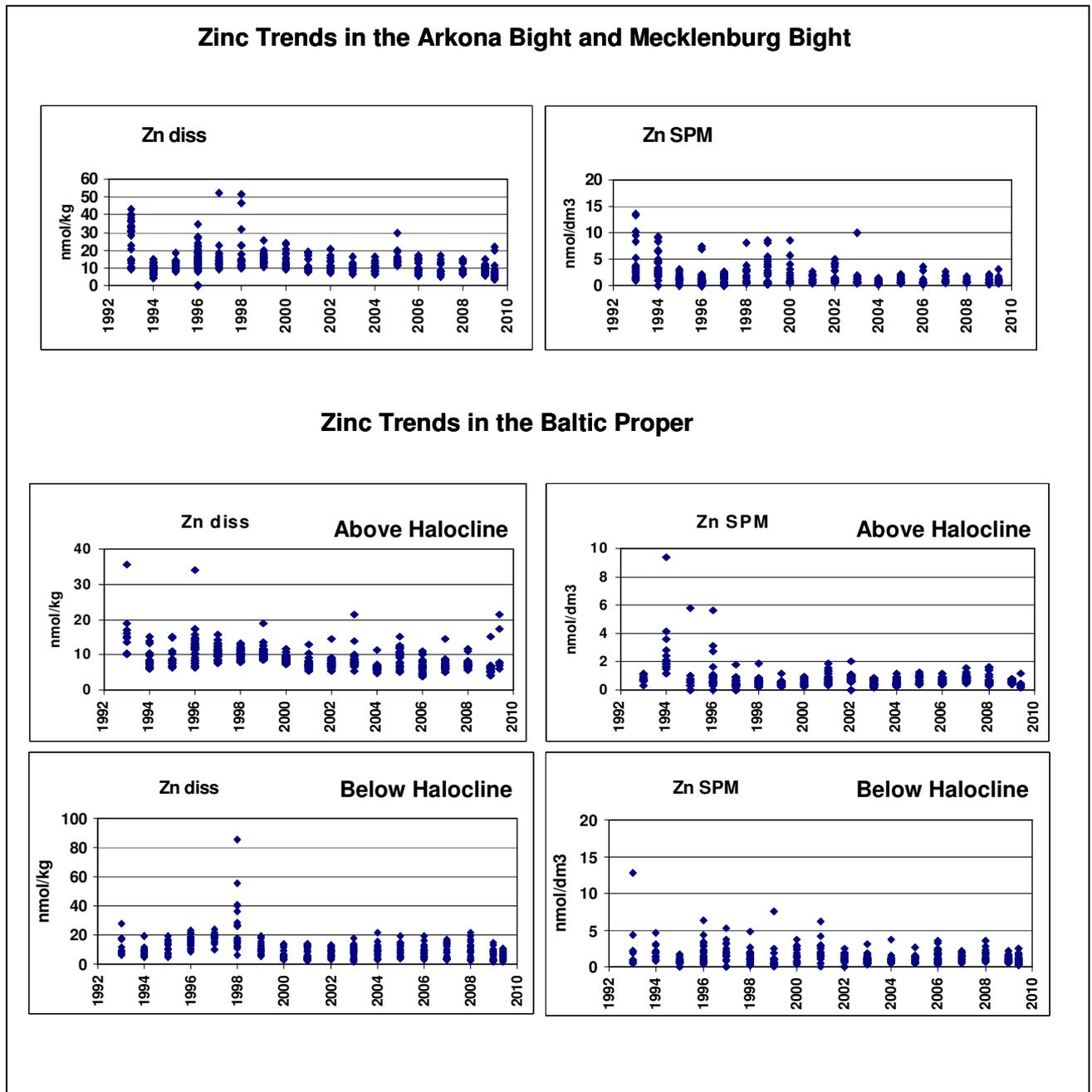


Abb. 16

Trends für gelöstes (diss) und partikuläres (SPM) Zink, in der westlichen Ostsee, sowie oberhalb und unterhalb der Haloclinen in der zentralen Ostsee von 1993-2009

Fig. 16

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 and 2009

3.3 Ergebnisse aus den Sedimentuntersuchungen

Zu beachten ist, dass die Sedimente auf der Station KIBU 2 (siehe Tabelle 2), welche aus Steinen und Restsediment (Geschiebemergel) bestanden, nicht für eine chemische Analyse geeignet waren und somit keine Messergebnisse für diese Station vorliegen. Die Messergebnisse für 2009 sind in den Tabellen 8 und 9 dargestellt.

Tab. 8

Ergebnisse der Korngrößenfraktionierung (<20 µm) und Analysen von Hauptelementen an der Feinfraktion

Table 8

Results of grain size fractionation (<20 µm) and analyses of major elements at the fine fraction

IOW-Nr.	<20 µm (%)	Al (%)	Fe (%)	TIC (%)	TOC (%)	TN (%)	S (%)	P (%)
373960	15	4.92	3.16	0.91	5.89	0.71	0.30	0.16
373970	13	2.85	3.73	0.26	12.21	1.53	0.83	0.29
373980	65	3.27	3.23	0.22	4.95	0.53	0.45	0.20
373990	53	3.07	3.11	0.26	5.42	0.63	0.40	0.21
374000	79	4.80	3.28	0.84	4.61	0.53	0.47	0.14
374010	87	3.35	3.34	0.29	5.96	0.70	0.36	0.20
374020	67	3.77	2.73	0.44	3.12	0.37	0.30	0.13

Tab. 9

Konzentrationen von Spurenelementen (Schwermetallen) in der Fraktion < 20 µm

Table 9

Concentrations of trace elements (heavy metals) in the fraction < 20 µm

IOW-Nr.	As (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Co (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Hg (µg/kg)	Mn (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)
373960	13.44	0.378	14	79	62	160	1358	44	97	205
373970	17.75	2.446	15	79	73	504	4040	52	122	417
373980	14.43	0.360	11	75	33	165	445	35	71	138
373990	17.81	0.482	11	75	39	317	546	37	74	137
374000	14.61	0.478	15	78	33	136	1012	40	69	146
374010	18.04	0.369	14	77	38	172	828	39	68	153
374020	8.83	0.286	10	71	26	84	472	29	49	105

Die Analyseergebnisse fügen sich in das bekannte Bild ein. Erhöhte Schwermetallkonzentrationen finden sich im Bereich der Oderbucht vor der Mündung der Oder und für Quecksilber (Hg) auch im westlichen Arkona- Becken. Zur Veranschaulichung zeitlicher Veränderungen (Trends) werden für ausgewählte Stationen einige Metalle in ihrem Kurvenverlauf dargestellt.

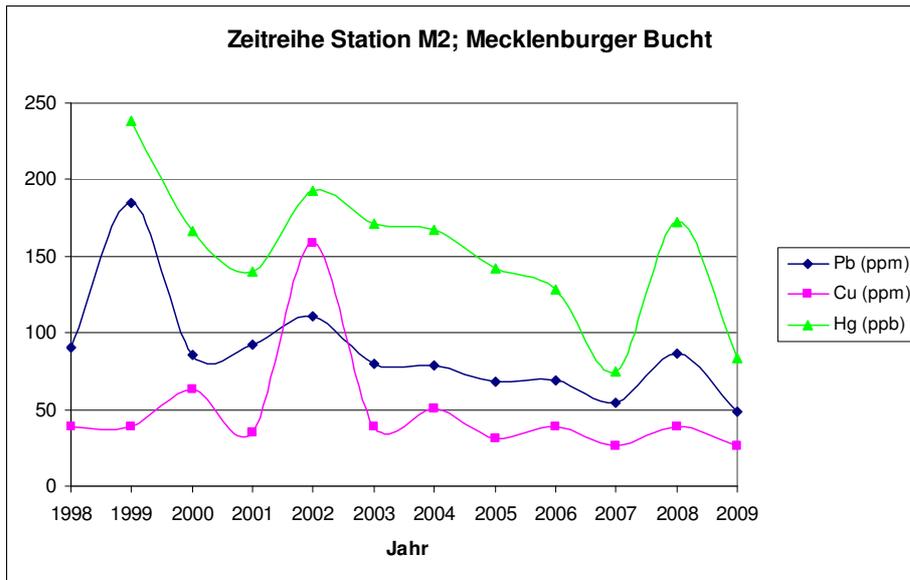


Abb. 13

Zeitreihe ausgewählter Schwermetalle auf Station M2 in der Mecklenburger Bucht 1998-2009

Fig. 13

Time trend of selected heavy metals at station M2 (Mecklenburg Bay) 1998-2009

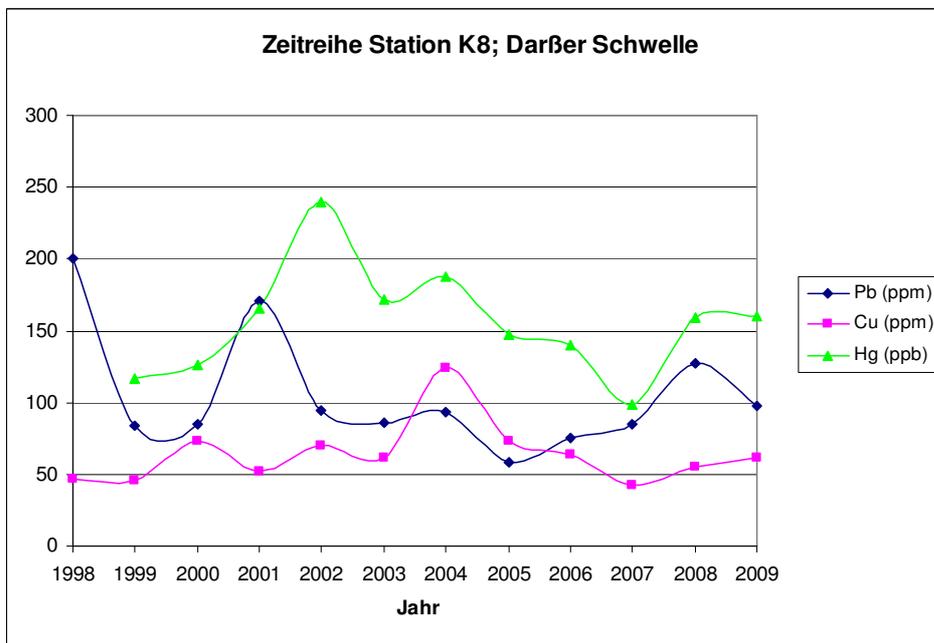


Abb. 14

Zeitreihe ausgewählter Schwermetalle auf Station K8 (Darßer Schwelle) 1998-2009

Fig. 14

Time trend of selected heavy metals at station K8 (Darss-Sill) 1998-2009

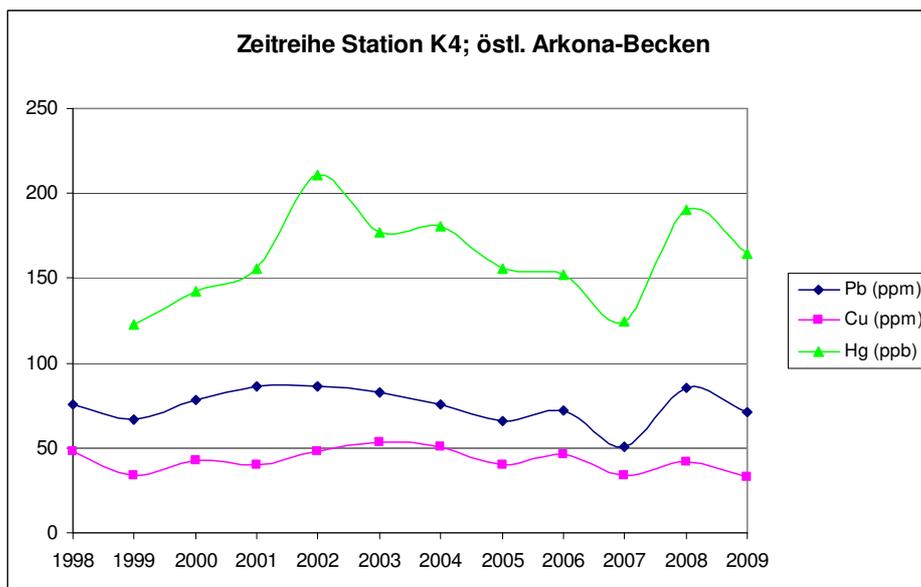


Abb. 15

Zeitreihe ausgewählter Schwermetalle auf Station K4 (östl. Arkonabecken) 1998-2009

Fig. 15

Time trend of selected heavy metals at station K4 (east Arkona Basin) 1998-2009

4. Schlussfolgerungen

Wie in den Vorjahren wies die Schwermetallverteilung im Ostseewasser im Jahr 2009 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 2009 bei ca. 110 m angetroffen wurde, wurde ein Rückgang der gelösten Metallkonzentrationen für Cd_{diss}, Cu_{diss} und Zn_{diss} beobachtet. Weiterhin ist eine starke Zunahme der CdSPM, CuSPM und ZnSPM mit der Tiefe zu verzeichnen, welches auf die Stabilisierung einer weiteren Stagnationsperiode zurückzuführen ist. 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.

Aus den dargestellten Kurven des zeitlichen Verlaufes der Schwermetallkonzentrationen im Sediment wird ersichtlich wie schwierig es ist, auch nach 12 Jahren Laufzeit des Programms, zuverlässige Trendaussagen zu machen. Für Cu zum Beispiel, läßt sich in allen drei Fällen kein Trend erkennen. Die einmalig erhöhten Werte für die Stationen M2 (2002) und K8 (2004) lassen sich nur als Extremwerte interpretieren, welche auf eine lokale Kontamination am Meeresboden zurückgeführt werden können. Zumindest für Pb und Hg läßt sich für die Stationen M2 und K8 eventuell eine generell abnehmende Tendenz erkennen, wobei starke Schwankungen zu verzeichnen sind, die dieses Bild zeitweilig stören. Für die Station K4 im Arkona-Becken läßt sich auch für die Elemente Pb und Hg noch keine Trendaussage treffen. Aber auch das ist ja ein verwertbares Ergebnis des Untersuchungsprogramms.

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“, „DENEK“ und „Prof. A. Penck“.

Literaturverzeichnis

Bachor, A. (2005): Nährstoff- und Schwermetallbilanzen der Küstengewässer Mecklenburg-Vorpommerns unter besonderer Berücksichtigung ihrer Sedimente. Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern, Heft 2/2005.

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.

KOWALSKI, N. (2007): Umweltgeochemische raum-zeitliche Veränderungen in Sedimenten des Arkonabeckens. Diplomarbeit; Institut für Geographie und Geologie, Universität Greifswald, 97 S., 43 Abb., 3 Tab., 58 Lit., Anhänge: 5 Tab., 9 Abb.

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.

LEIPE, T., HARFF, J., MEYER, M., HILLE, S., POLLEHNE, F., SCHNEIDER, R., KOWALSKI, N., BRÜGMANN, L. (2008): Sedimentary records of environmental changes and anthropogenic impacts during the past decades. In: Feistel, R., Nausch, G., Wasmund, N. (Eds.): State and Evolution of the Baltic Sea, 1952-2005: A detailed 50-year survey of meteorology and climate, physics, chemistry, biology, and marine environment. (Chap. 14) Wiley.

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. Stoeppeler (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.; KOßBUROK, 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:10.1016/j.chemosphere.2007.07.051.

POHL, C., HENNINGS, U. (2008): TRACE METALS IN BALTIC SEAWATER. IN: R. FEISTEL, G. NAUSCH, AND N. WASMUND (EDS): STATE AND EVOLUTION OF THE BALTIC SEA 1952-2005. JOHN WILEY & SONS, 367-393.

Meereswissenschaftliche Berichte

MARINE SCIENCE REPORTS

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

- 10** (1995) Schmidt, Martin:
Analytical theory and numerical experiments to the forcing of flow at isolated topographic features
- 11** (1995) Kaiser, Wolfgang; Nehring, Dietwart; Breuel, Günter; Wasmund, Norbert; Siegel, Herbert; Witt, Gesine; Kerstan, Eberhard; Sadkowiak, Birgit:
Zeitreihen hydrographischer, chemischer und biologischer Variablen an der Küstenstation Warnemünde (westliche Ostsee)
Schneider, Bernd; Pohl, Christa:
Spurenmittelkonzentrationen vor der Küste Mecklenburg-Vorpommerns
- 12** (1996) Schinke, Holger:
Zu den Ursachen von Salzwassereintritten in die Ostsee
- 13** (1996) Meyer-Harms, Bettina:
Ernährungsstrategie calanoider Copepoden in zwei unterschiedlich trophierten Seegebieten der Ostsee (Pommernbucht, Gotlandsee)
- 14** (1996) Reckermann, Marcus:
Ultraplankton and protozoan communities and their interactions in different marine pelagic ecosystems (Arabian Sea and Baltic Sea)
- 15** (1996) Kerstan, Eberhard:
Untersuchung der Verteilungsmuster von Kohlenhydraten in der Ostsee unter Berücksichtigung produktionsbiologischer Meßgrößen
- 16** (1996) Nehring, Dietwart; Matthäus, Wolfgang; Lass, Hans Ulrich; Nausch, Günther; Nagel, Klaus:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1995
- 17** (1996) Brosin, Hans-Jürgen:
Zur Geschichte der Meeresforschung in der DDR
- 18** (1996) Kube, Jan:
The ecology of macrozoobenthos and sea ducks in the Pomeranian Bay
- 19** (1996) Hagen, Eberhard (Editor):
GOBEX - Summary Report
- 20** (1996) Harms, Andreas:
Die bodennahe Trübezone der Mecklenburger Bucht unter besonderer Betrachtung der Stoffdynamik bei Schwermetallen
- 21** (1997) Zülicke, Christoph; Hagen, Eberhard:
GOBEX Report - Hydrographic Data at IOW
- 22** (1997) Lindow, Helma:
Experimentelle Simulationen windangeregter dynamischer Muster in hochauflösenden numerischen Modellen
- 23** (1997) Thomas, Helmuth:
Anorganischer Kohlenstoff im Oberflächenwasser der Ostsee
- 24** (1997) Matthäus, Wolfgang; Nehring, Dietwart; Lass, Hans Ulrich; Nausch, Günther; Nagel, Klaus; Siegel, Herbert:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1996

- 25 (1997) v. Bodungen, Bodo; Hentzsch, Barbara (Herausgeber):
Neue Forschungslandschaften und Perspektiven der Meeresforschung - Reden und Vorträge zum Festakt und Symposium am 3. März 1997.
- 26 (1997) Lakaschus, Sönke:
Konzentrationen und Depositionen atmosphärischer Spurenmetalle an der Küstenstation Arkona
- 27 (1997) Löffler, Annekatrin:
Die Bedeutung von Partikeln für die Spurenmetallverteilung in der Ostsee, insbesondere unter dem Einfluß sich ändernder Redoxbedingungen in den zentralen Tiefenbecken
- 28 (1998) Leipe, Thomas; Eidam, Jürgen; Lampe, Reinhard; Meyer, Hinrich; Neumann, Thomas; 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:
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:
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:
Die Schwermetall-Situation in der Ostsee im Jahre 2007
- 73** (2008) Telesh, Irena; Postel, Lutz; Heerkloss, Reinhard; Mironova, Ekaterina;
Skarlato, Sergey:
Zooplankton of the Open Baltic Sea: Atlas
- 74** (2008) Wasmund, Norbert; Pollehne, Falk; Postel, Lutz; Siegel, Herbert; Zettler, Michael L.:
Biologische Zustandseinschätzung der Ostsee im Jahre 2007

- 75 (2009) Hagen, Eberhard; Plüschke, Günter:
Daily Current Series in the Deep Eastern Gotland Basin (1993 – 2008)
- 76 (2009) Telesh, Irena; Postel, Lutz; Heerkloss, Reinhard; Mironova, Ekaterina;
Skarlato, Sergey:
Zooplankton of the Open Baltic Sea: Extended Atlas
- 77 (2009) Nausch, Günther; Feistel, Rainer; Umlauf, Lars; Nagel, Klaus; Siegel,
Herbert:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2008
Pohl, Christa; Hennings, Ursula; Leipe, Thomas:
Die Schwermetall-Situation in der Ostsee im Jahre 2008
- 78 (2009) Wasmund, Norbert; Pollehne, Falk; Postel, Lutz; Siegel, Herbert; Zettler,
Michael L.:
Biologische Zustandseinschätzung der Ostsee im Jahre 2008
- 79 (2009) Wasmund, Norbert; Postel, Lutz; Zettler, Michael L.:
Biologische Bedingungen in der deutschen ausschließlichen
Wirtschaftszone der Nordsee im Jahre 2008
- 80 (2010) Nausch, Günther; Feistel, Rainer; Umlauf, Lars; Nagel, Klaus; Siegel,
Herbert:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2009
Pohl, Christa; Hennings, Ursula; Leipe, Thomas:
Die Schwermetall-Situation in der Ostsee im Jahre 2009