

Meereswissenschaftliche Berichte
MARINE SCIENCE REPORTS

No. 77

**Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee
2008**

von

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

**Die Schwermetall-Situation in der Ostsee
im Jahre 2008**

von

Christa Pohl, Ursula Hennings, Thomas Leipe

Leibniz- Institut für Ostseeforschung Warnemünde
2009

NAUSCH, G.; FEISTEL, R.; UMLAUF, L.; NAGEL, K.; SIEGEL, H.:

Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2008

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Abstract	3
Kurzfassung	3
1. Einleitung	4
2. Meteorologische Bedingungen	7
3. Wasseraustausch durch die Ostseezugänge/ Beobachtungen an der Messplattform „Darßer Schwelle“	23
3.1 Wassertemperatur, Salzgehalt und Sauerstoffgehalt	23
3.2 Strömung	33
4. Beobachtungen an der Bojenstation „Arkonabecken“	35
5. Beobachtungen an der Bojenstation „Oder- Bank“	38
6. Hydrographisch- hydrochemische Bedingungen	42
6.1. Wassertemperatur	42
6.1.1 Wasseroberflächentemperatur	42
6.1.2 Vertikalverteilung der Wassertemperatur	49
6.2 Salzgehalt	56
6.3 Sauerstoff und Schwefelwasserstoff	62
6.4 Anorganische Nährstoffe	70
6.5 Natürliche organische Verbindungen	82
Zusammenfassung	90
Summary	92
Danksagung	94
Literaturverzeichnis	95

Abstract

The article summarizes the hydrographic-hydrochemical conditions in the western and central Baltic Sea in 2008. Based on the meteorological situation, the horizontal and vertical distribution of temperature, salinity, oxygen/ hydrogen sulphide, inorganic and organic nutrients are described on a seasonal scale.

In Warnemünde, the year 2008 was too warm on average and continued the series of positive anomalies whereby the warmer winter was more pronounced than the summer. This is mirrored also in extremely high sea surface temperatures during the first half of the year. The maximum ice cover of the Baltic Sea of 49 000 km² was the smallest one since recording started in 1720.

In 2008, five minor barotropic inflow events into the Baltic Sea with approximately 200 km³ took place: in January, February/March, June, September/October and November. These barotropic events as well as four baroclinic inflows in January, May, August and September reached the central Baltic Sea only partly in the form of single pulses and with different features. The near-bottom layer from the Bornholm Basin to the Gdansk Deep was ventilated again. In contrast, conditions in the eastern and western Gotland Basin were coined by the lasting stagnation period. In the deep water of the Gotland and Landsort Deep the highest hydrogen sulphide concentrations of the stagnation period which started in 2005 were measured. As a result, phosphate and ammonium concentrations in both deeps as well as in the Farö Deep were highest for the last five years.

Kurzfassung

Die Arbeit beschreibt die hydrographisch-hydrochemischen Bedingungen in der westlichen und zentralen Ostsee für das Jahr 2008. 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 2008 war in Warnemünde im Mittel sehr warm und setzte die jüngste Folge von positiven Anomalien fort, wobei der zu warme Winter ausgeprägter war als der Sommer. Dies spiegelte sich auch in den sehr hohen Wasseroberflächentemperaturen des 1. Halbjahres wider. Mit der maximalen Eisbedeckung der Ostsee von 49 000 km² wurde der niedrigste Wert seit Beginn der Aufzeichnungen im Jahr 1720 erreicht.

2008 fanden fünf kleinere barotrope Einstromereignisse mit geschätzten Volumen um 200 km³ statt: Januar, Februar/März, Juni, September/Oktober und November. Diese barotropen sowie vier barokline Einströme im Januar, Mai, August und September erreichten nur zum Teil in einzelnen Schüben und mit unterschiedlichen Eigenschaften die zentrale Ostsee. Dabei wurde 2008 die bodennahe Schicht im Raum vom Bornholmbecken bis zum Danziger Tief erneut belüftet. Die Verhältnisse im östlichen und westlichen Gotlandbecken waren dagegen nach wie vor von der anhaltenden Stagnationsperiode bestimmt. Im Tiefenwasser des Gotlandtiefs und des Landsorttiefs wurden die höchsten Schwefelwasserstoffkonzentrationen der seit 2005 andauernden Stagnationsperiode gemessen. Im

Ergebnis wurden im Tiefenwasser der beiden Tiefs wie auch im Farötief die höchsten Phosphat- und Ammoniumkonzentrationen der letzten fünf Jahre gemessen.

1. Einleitung

Die Einschätzung des hydrographisch-hydrochemischen Zustandes der Ostsee im Jahre 2008 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 Bornholmstgat 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 in den zentralen Ostseebecken und deren zeitliche und räumliche Veränderungen sowie die Identifikation und Untersuchung von Langzeittrends.

Im Jahre 2008 wurden fünf Fahrten durchgeführt, die alle vier Jahreszeiten sowie zusätzliche Beobachtungen im März/April umfassten. Die Fahrt im November führte auf Grund widriger Witterungsverhältnisse nur bis ins Bornholmbecken. 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, November) und „Professor Albrecht Penck“ (März/April, April/Mai, Juli/August) durchgeführt wurde, sind die Richtlinien der HELCOM für die Überwachung der Ostsee im Rahmen des COMBINE-Programms (HELCOM, 2000). Angaben über die Gewinnung der Wasserproben und die untersuchten Parameter sowie über die verwendeten Messverfahren und ihre Genauigkeit sind bei NEHRING et al. (1993, 1995) enthalten.

Die schiffsgebundenen Untersuchungen wurden durch Messungen an drei autonomen Stationen des deutschen Umweltüberwachungs-Messnetzes MARNET ergänzt, die im Gebiet der Darßer Schwelle (Messplattform; Stat. DS), im Arkonabecken (Halbtaucher; Stat. AB) und in der Pommerschen Bucht (Messboje; Stat. OB „Oder-Bank“) liegen (vgl. Abb. 1). Neben meteorologischen Parametern wurden an diesen Stationen die Wassertemperatur und der Salzgehalt sowie der Sauerstoffgehalt in verschiedenen Tiefen registriert:

DS: ab Aug. 2005	6 Horizonte T + S	+ 2 Horizonte O ₂
AB: ab Sep. 2006	8 Horizonte T + S	+ 2 Horizonte O ₂
OB: 2005-2008	2 Horizonte T + S	+ 2 Horizonte O ₂

Alle Daten werden als Stundenmittel aus 6 Messungen telemetrisch via Wettersatellit (METEOSAT) an die Datenbank des BSH übertragen (KRÜGER et al., 1998; KRÜGER, 2000a, b). Angaben über die Strömungsverhältnisse im Bereich der Darßer Schwelle und der Station „Arkonabecken“ liefern jeweils ein selbst registrierender akustischer Doppler-Profil-Strömungsmesser (ADCP). Die ADCP an der DS und bei der AB befinden sich jeweils ca. 200 m von der Hauptstation entfernt am Boden, geschützt in einem „Trawl Resistant Bottom Mount“ (TRBM) mit Releaser. Sie werden im Echtzeitmodus betrieben, d.h. sie geben jede Stunde einmal ihre Messwerte an die Hauptstation zur Speicherung und Satellitenübertragung ab, an der DS über Kabel, bei der AB über eine akustische Datenverbindung. Die in den Geräten selbst registrierten Daten werden in der Regel zur Qualitätssicherung und für Servicezwecke bei den 1 - 2-mal im Jahr stattfindenden Wartungsmaßnahmen im Nachhinein ausgelesen.

Die Überwachung der Wasseroberflächentemperatur der gesamten Ostsee erfolgte anhand von Einzelszenen und mittleren monatlichen Verteilungen, ermittelt aus NOAA-AVHRR-Wettersatellitendaten. Dabei wurden alle wolken- und eisfreien Bildpunkte (Pixel 1 x 1 km) der Satellitenüberflüge eines Monats berücksichtigt und in Karten zusammengestellt (SIEGEL et al., 1999, 2006). Die Einschätzung des Jahres 2008 wurde im Vergleich zu den Mittelwerten des Untersuchungszeitraumes 1990-2006 und zu extremen Jahren vorgenommen.

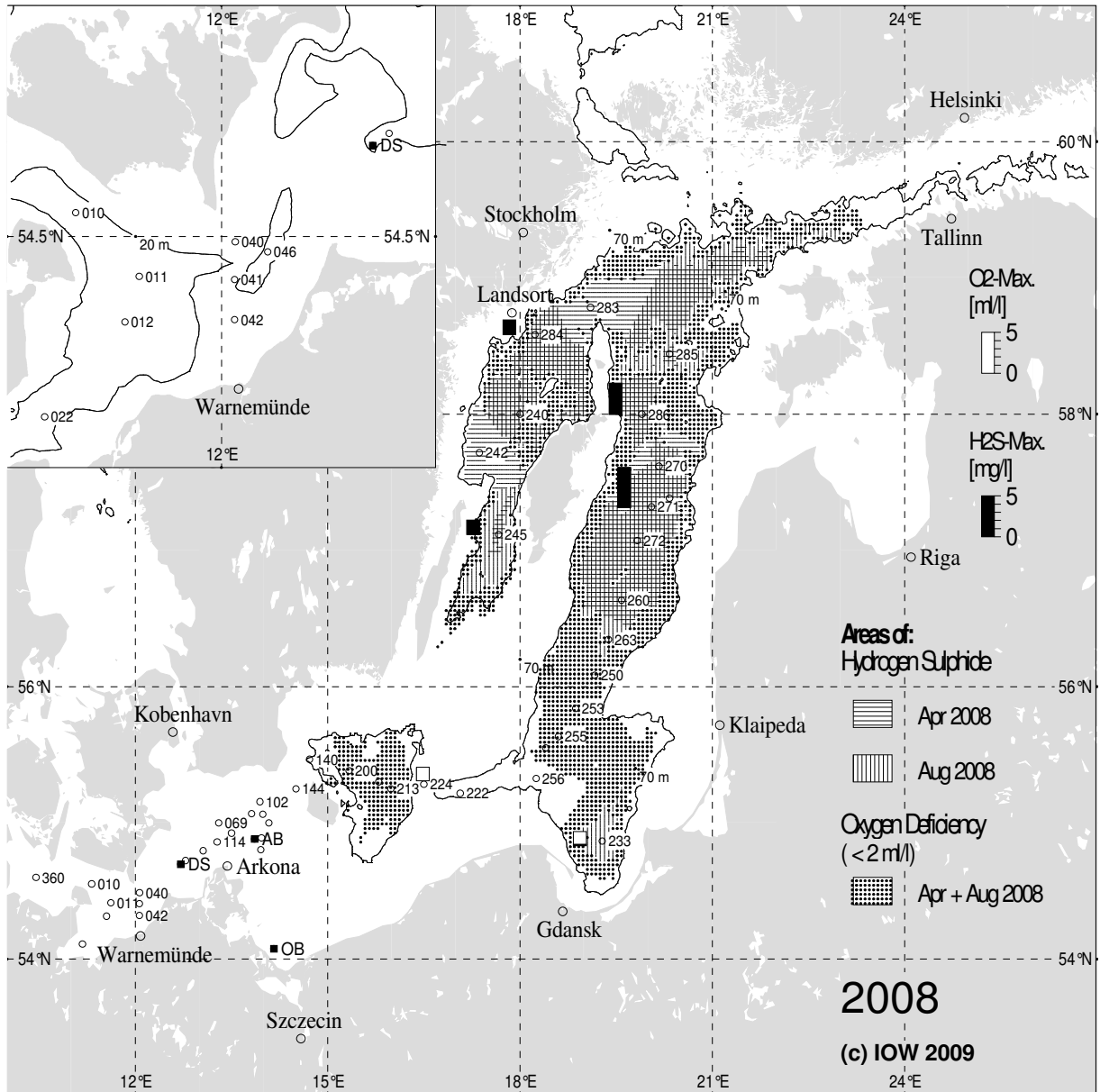


Abb. 1

Stationskarte (■ MARNET-Stationen) und Gebiete mit Sauerstoffmangel und Schwefelwasserstoff in der grundnahen Wasserschicht der Ostsee sowie maximale Sauerstoff- und Schwefelwasserstoffkonzentrationen an ausgewählten Stationen (Säulen) im Jahre 2008; 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 2008. Bars show the maximum oxygen and hydrogen sulphide concentrations of this layer in 2008; the figure contains additionally the 70 m – depth line resp. 20 m – depth line (small picture)

2. Meteorologische Bedingungen

Der Witterungsverlauf des Jahres 2008 in der südlichen Ostsee kann durch Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD, 2008) 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 2007/2008 war sehr ungewöhnlich. Er war mild und kurz, mit der Kältesumme 20,0 K d von Warnemünde (Tab. 2) auf Platz 8 der mildesten Winter seit Beginn der Vergleichsdaten im Jahr 1948, mit einem Wert von nur 20% des langjährigen Mittels über 60 Jahre. Damit ist er seit 2000 der zweite unter den mildesten 10 Wintern seit 1948, nach 2006/2007 mit 10,3 K d als dem mildesten. Er lag nach finnischen Angaben (FIMR, 2008) bei einer maximalen Eisbedeckung der Ostsee von 49 000 km², dem niedrigsten Wert seit Beginn der Aufzeichnungen im Jahr 1720. Die maximale Eisbedeckung am 24. März (Abb. 19) lag bei 23% des langjährigen Mittelwerts von 214 000 km² seit 1720. Ähnlich mild waren seit dem Zweiten Weltkrieg nur die Winter 1988/89 mit 52 000 km² und 1960/61 mit 53 000 km², deren Jahreszahlen gewöhnlich eher mit politischen Ereignissen der deutschen Teilung in Verbindung gebracht werden. Dieser außergewöhnlich niedrige Wert der Eisbedeckung ist noch extremer ausgefallen als die schon sehr geringe Kältesumme des Winters 2007/8 in Warnemünde. Wegen des warmen Oktobers 2007 begann die Eisbildung in der Bottenwiek und im Finnischen Meerbusen erst Mitte November, zwei Wochen später als normal. Während des ungewöhnlich warmen Dezembers 2007 bildete sich kein weiteres Eis. Anfang Januar 2008 wurde es kälter; im Bottnischen und Finnischen Meerbusen dehnte sich die Eisedecke aus. Die nächsten Wachstumsschübe folgten erst Mitte Februar und Anfang März. Nach einem letzten Kälteeinbruch gegen Ende März war die maximale Ausdehnung erreicht. Im April setzte schnell die Schmelze ein, Reste des küstennahen Eises hielten sich in der Bottenwiek bis Mitte Mai. Der 30-jährige Mittelwert der Eisbedeckung bleibt durch den Winter 2007/8 weiter bei seinem sehr tiefen Wert der letzten Jahre (Abb. 2). Eine Bedeckung von etwa 12% der Gesamtfläche der Ostsee von 415 266 km² fällt in den Bereich 0% - 20%. Dieser Bedeckungsgrad wird im langfristigen Mittel mit etwa 12% der Winter sehr selten 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).

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, 2009). 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 2008 gleich 0,01 m. Die Eisbildung beschränkte sich auf die flachen und geschützt liegenden Küstengewässer und Häfen, die offene See des deutschen Hoheitsgebiets blieb im Winter 2007/8 eisfrei. Nur acht Winter in der seit 1896/97 bestehenden Beobachtungsreihe waren in Deutschland noch schwächer als der Eiswinter 2007/8 (SCHMELZER, 2008). Die Kältesummen von Warnemünde der Wintermonate 2007/8 (Tab. 2) waren erheblich unterdurchschnittlich in allen Monaten. Die Eissaison der deutschen Ostseeküste war extrem kurz, begann am 4. Januar 2008 (im Gegensatz zum mittleren Termin 28. November) und endete schon wieder am 21. Januar (SCHMELZER, 2008).

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

Zwischen dem kräftigen Hoch „Evi“ am Weißen Meer und dem Tief „Anje“ über der Biskaya führte südöstlicher Wind am 3. und 4. Januar sehr kalte Luft heran (-6 °C in Warnemünde), die zu einer ersten Eisbildung im deutschen Ostseeraum führte und deren Stagnation in der nördlichen Ostsee überwand. Ein Pegelunterschied von ca 1 m zwischen Gedser und Hornbaek bewirkte starken Ausstrom von Ostseewasser in das Kattegat. Mit den nachfolgenden Tiefs „Brigitta“ und „Christine“ vom 5. – 7.1. bildete sich eine Tiefdruckrinne von Korsika bis Grönland. Am 8.1. setzte an der Darßer Schwelle barokliner Einstrom ein. Die zweite Januarhälfte war überwiegend stürmisch mit Orkanböen an den Küsten und in den Mittelgebirgen und bewirkte einen kleinen barotropen Einstrom, Abb. 5. So brachte am 16.1. das Tief „Jette“ Sturm von West, gefolgt von „Louisa“ am 19.1., „Paula“ am 26.1. und „Resi“ am 1.2.

Der Februar blieb in Deutschland fast immer und überall ohne Schnee; er war verbreitet deutlich zu warm, meist zu trocken und sonnig. Am 22. Februar begann mit dem Tief „Anette“ ein neuer kleiner barotroper Einstrom, gefolgt von „Birgit“, „Carmelita“ am 27.2. und „Emma“ am 1. März. Im Tiefenwasser des Bornholmbeckens wurde Ende März thermisch sehr inhomogenes Wasser (bis über 8 °C) mit Sauerstoff (bis 3 ml/l) gefunden, das offenbar in Folge der barotropen Ereignissen im Winter 2008 durch junge Einschichtung in vorhandenes warmes Wasser aus dem Vorjahr entstand. Das über die Stolper Schwelle

abfließende warme Wasser konnte bis hin zum südöstlichen Gotlandbecken beobachtet werden (FEISTEL, 2008). Von Juli bis Oktober 2008 bewirkte es eine allmähliche Erwärmung der Schicht um 125 m Tiefe im östlichen Gotlandbecken (Kapitel 6). Durch das Tief „Melli“ über der südlichen Ostsee am 22./23.3. traten auf Rügen Böen bis Stärke 11 auf; in Lübeck und Wismar erreichte das Hochwasser die Altstädte. Am 24.3. sorgte ein Zustrom von polarer Luft für starke Schneefälle und die kältesten Ostern seit 38 Jahren. Am 26.3. reichte die Neuschneedecke vom Ostseestrand bis an die Alpen (OZ, 2008a). Die damit beginnende Blockierungslage führte zu kräftigem Ausstrom und sinkendem Landsortpegel bis Mitte April.

Vom 6.4. zum 7.4. bildete sich ein schwaches Tief über Nordfrankreich, es zog ostwärts über Belgien in die Slowakei, wobei es sich mit einer Tiefdruckrinne von der Adria vereinte, und dann als Vb-Tief nach Norden über Polen zur Ostsee wanderte. Schnee fiel bis in das deutsche Flachland (DWD, 2008). Am 17.4. zog das Tief „Vera“ vom Schwarzen Meer westwärts (!) und brachte neuen Regen in den Oderraum. „Vera“ war zuvor von der Adria gekommen, war also zunächst ein Vc-Tief (VAN BEBBER, 1891; WIKIPEDIA, 2008). Am 18.4. sperrte der Landkreis Rügen den gesamten Hafenbereich und die Strände vor den Steilküsten. Auf der Insel herrschte wegen starker Regenfälle höchste Gefahr, dass weitere Teile der Kreideküste abrutschten. Bereits in der Woche davor waren Tausende Kubikmeter abgebrochen. Die Blockierungslage bestand weiterhin mit einem ausgedehnten Tief über Zentraleuropa, aber schwachen Druckgegensätzen. Kalte Luft strömte anhaltend von Norden nach Deutschland und traf dort auf Warmfronten von der Adria. Die Regenmengen z.B. in Göhren/Rügen lagen bis zu dieser Zeit schon bei knapp 300% des mittleren ganzen Aprils.

Der Mai 2008 lag bei den trockenen Monaten auf Platz 3 (nach 1919 und 1992), bei den sonnenscheinreichen auf Rang 4 seit Beginn deutschlandweiter Messungen (DWD, 2008). 404 Sonnenstunden auf Hiddensee (OZ, 2008b) waren ein neuer Rekord für Mai, ebenso 395,5 h in Warnemünde. Der Allzeitrekord ist 414 h im Juli 1994 am Kap Arkona. Tab. 1 zeigt im Mai das Jahresmaximum der Solarstrahlung in Gdynia, obwohl die astronomische und die über der Ostsee gemessene mittlere Einstrahlung erst im Juni ihren Höchstwert erreicht (HAGEN und FEISTEL, 2008). Ab Mitte Mai, unter den Hochs „Marco“ ab 5.5., „Nevio“ und „Otto“, bei anfänglicher Omega-Lage über der Mitteleuropa, registrierte der Mast an der Darßer Schwelle einen baroklinen Einstrom ab dem 17.5. Ein Indikator für die Blockierungslage war auch das Tief „Fei“, das am 27.5. entgegen der Regel westwärts von Frankreich auf die Biskaya zog. Während der Osten Deutschlands viel Sonne genoss, richteten am 30. und 31.5. heftige Hagelschauer im Westen schwere Schäden an. Westlich der Elbe zogen schwüle Luftmassen mit Unwettern nordwärts von Korsika und der Po-Ebene über Schwaben, Hessen und Rheinland-Pfalz nach Benelux und England und hinterließen großräumig Überschwemmungen. Heftiger Hagel, Gewitter und Sturm durch Tief „Hilal“ richteten in der Nacht zum 31.5. schwere Schäden in der Südhälfte Deutschlands an, die Bahn sperrte mehrere ICE-Strecken. Vom 2.6. bis 4.6. traten heftige Gewitter, sintflutartige Regenfälle und verheerende Überschwemmungen in Baden-Württemberg und Hamburg auf.

Nach anhaltendem Ostwind an der Darßer Schwelle seit dem 21. Mai leitete ab 8. Juni das Tief „Jordy“ den Übergang von der Blockierungs- zur Westwindlage ein. Am 10.6. endete der barokline Einstrom an der Darßer Schwelle; noch am 9.6. war dort unterhalb einer scharfen Halokline in 13 m Tiefe eine 5 m dicke homogene Schicht mit 18 g/kg und 7 °C beobachtet worden (ROEDER, 2008), die typisch für baroklinen Einstrom ist (FEISTEL et al., 2004a). Am 11.6. begann ein barotroper Zustrom bei kräftigem Westwind um 10 m/s und einem Pegelunterschied Hornbaek-Gedser von 74 cm. Durch die Windmischung stieg der Oberflächensalzgehalt an der Darßer Schwelle kurzzeitig auf über 12 g/kg. Der Landsortpegel stieg im Verlauf dieses barotropen Einstroms bis Ende Juni von seinem Jahresminimum auf einen mittleren Wert um 140 cm an, wo er bis Anfang September unter kleineren Schwankungen verblieb. Eine ähnliche Situation wie bei „Jordy“ wiederholte sich am 24.6. mit dem Tief „Naruporn“. Auch am Siebenschläfertag (27.6.) herrschte noch eine klare Westwindlage.

Das Zwischenhoch „Thomas“ am 1. Juli löste sich schnell wieder auf und machte einem ausgedehnten Tiefdrucksystem „Renate“ - „Sabine“ Platz, dessen nahezu ortsfeste Front von Island bis an die Alpen reichte und am 3. und 4.7. extreme Niederschläge im Elberaum verursachte. Sintflutartige Regenfälle, orkanartige Windböen, überflutete Straßen und Keller - in Teilen Deutschlands regnete es mehrere Tage ununterbrochen. Schwerpunkt der Regenfälle waren Schwaben und Niederbayern. In Schwaben registrierte der Deutsche Wetterdienst Niederschläge von bis zu 38 Litern pro Stunde. In der Region zwischen Hannover und Göttingen fielen innerhalb von zwei Stunden rund 85 Liter Regen pro Quadratmeter. Im äußersten Westen Deutschlands kletterte das Thermometer nicht einmal auf 20 Grad, im Osten hingegen erreichten die Temperaturen bis zu 35 Grad bei anhaltender Trockenheit (DWD, 2008). So fielen in Warnemünde mit 22 mm weniger als 50% (Tab. 1), auf Helgoland dagegen über das Doppelte der normalen Regenmenge.

Am 20./21.7. verursachte Tief „Yvonne“ Sturm an der Nordseeküste, bevor Hoch „Volker“ am 23.07. die ungewöhnliche Siebenschläferperiode 2008 scheinbar beendete. Der Kern von „Volker“ lag bei Lappland jedoch weiter nördlich als bei normalen Omega-Lagen im August und ließ am Südrand Tiefausläufer mit schwül-warmer feuchter Luft nach Deutschland und Mitteleuropa ziehen, die dort westlich der Elbe weitere Niederschläge bewirkten. Mit starken Regenschauern, schweren Sturmböen und Blitzen zogen heftige Unwetter des Tiefs „Christine“ am 6. August über Norddeutschland. Windgeschwindigkeiten über 100 km/h wurden in Hannover und am Bodensee gemessen. Heftiger Regen bis zu 30 mm fiel innerhalb von zwei Stunden auf der Nordseeinsel Wangerooge, 40 mm in nur einer Stunde in Schleswig. Unter der Wirkung von Hoch „Volker“ setzte ab 24. Juli starker Ausstrom ein, der an der Darßer Schwelle bis zum Boden zu geringem Salzgehalt führte. Am 30.07. begann dann plötzlich barokliner Einstrom am dortigen Mast, wobei der bodennahe Salzgehalt über 18 g/kg stieg und der Sauerstoff auf 5% Sättigung absank.

Wie schon 2007 waren die Hundstage Anfang August 2008 entgegen der Regel überwiegend verregnet (DWD, 2008). Hinter Tief „Elfriede“, das am 14.8. eine Folge von stürmischen

Westwindtiefs abschloss, fehlte ein nächstes Islandtief. In der Folge drang kalte Luft über Irland bis Südfrankreich vor und führt dort zur Entstehung des Vb-Tiefs „Friederike“, das am 15. bis 17.8. entlang der Oder nordwärts zog. Nachdem „Friederike“ weiter östlich über Polen viel Regen brachte, kehrte in der 2. Augushälfte über der Ostsee die Siebenschläferlage mit Schauern und Gewittern noch einmal zurück.

Am 17. September brachte das stabile Omega-Hoch „Dieter“ über Finnland erste Bodenfröste und einen sehr niedrigen Landsortpegel. Mit dem nachfolgenden Skandinavienhoch „Erich“ begann am 19. September wieder ein barokliner Einstrom an der Darßer Schwelle. Das nächste Hoch war „Fody“ am 25.9.; der barotrope Ausstrom und gleichzeitige barokline Einstrom setzten sich verstärkt fort.

Ende September/Anfang Oktober gab es einen kleinen barotropen Einstrom, als das Sturmtief „Quinta“ von Island weiter südlich zog. Die Ostsee war zu diesem Zeitpunkt sehr wenig gefüllt nach der vorhergehenden Phase mit Volumen-Ausstrom und baroklinem Einstrom. Der Landsortpegel stieg vom 28.9. bis zum 2.10. um fast 40 cm an. In einer anschließenden anhaltenden West- und Südwestlage durch Hoch „Hagen“ mit Spätsommerwetter kam es vom 12.10. zum 16.10. zu einem weiteren Anstieg bei Landsort um fast 20 cm. Am 17.10. folgt das Sturmtief „Tiffany“.

Ende Oktober bildete sich eine Blockierungslage, die die Hochdruckbrücke von den Azoren bis zur Ukraine aufbrach und den Westwind stoppte. Die Ostsee war mit 50 cm über Normal hoch gefüllt. Am 29.10. abends begann das Vb-Tief „Yulietta“ über Österreich seinen Weg nach Norden entlang der Oder (METEOMEDIA, 2008), begleitet von den ersten starken Schneefällen dieses Winters. Am 30.10. zog „Yulietta“ im Raum der Stolper Rinne von Polen auf die Ostsee hinaus und bewirkte Hochwasserpegel von 120 cm in Koserow und 102 cm in Warnemünde (BOOS, 2008).

Am 11.11. setzte mit dem Sturmtief „Chanel“ wieder barotroper Einstrom ein. Mit „Biergartenwetter“ bei Temperaturen von bis zu 15 °C war die Nacht bei Südwestwind die wärmste an einem 11. November seit Beginn der Aufzeichnungen in Süd- und Ostdeutschland. In Berlin wurde mit 15,2 °C eine neue November-Höchstmarke seit 1982 erreicht. Die Tiefs „Doreen“ am 16.11. und „Gabrijela“ am 20.11. setzten den barotropen Einstrom fort; am 21. und 22.11. fiel der erste Schnee bis in das Flachland (DWD, 2008).

Am 1. Dezember setzte sich mit „Phostine“ ein weiteres Vb-Tief von Norditalien entlang der Oder nach Rügen in Bewegung. Österreich und Thüringen erlebten einen ungewöhnlich starken Wintereinbruch; in Venedig stieg das „aqua alta“ auf 156 cm, die zehntschlimmste Flut der letzten 100 Jahre. Am 12.12. folgten weitere starke Schneefälle in den Alpen durch das Vb-Tief „Tine“ über Norditalien, das auf der klassischen Zugbahn von der Biskaya gekommen war. Als Vb-Tief löste es sich aber auf dem Weg nach Norden bereits südlich von Prag auf. Als Nachfolger nahm Tief „Verena“ am 14. und 15.12. die gleiche Route und verursachte Unwetter auf Mallorca und starke Schneefälle in Frankreich bis zur Cote d’Azur.

Sturmtief „Zimone“ beendete am 20.12. mit Weihnachtstauwetter die lange Blockierungslage, in der die Island-Tiefs über Spanien zum Mittelmeer gezogen und in Südfrankreich und Italien für Überschwemmung und Schneechaos gesorgt hatten, und bewirkte einen kleinen barotropen Ostsee-Einstrom, noch verstärkt durch „Antje“ am 23. Dezember. Nachdem das Tief „Britta“ entgegen den vorherigen Vb-Tiefs die Oder entlang von Nord nach Süd gezogen war, setzte sich am 28.12. mit „Quentin“ Hochdruck über Skandinavien durch mit Winterkälte und barotroper Ausstromlage zum Jahresende.

In Warnemünde war es 2008 in Bezug auf die monatlichen Wärmesummen nur im April und Oktober geringfügig zu kalt (Tab. 2), der Rest des Jahres fiel zum Teil erheblich wärmer aus als der langjährige Mittelwert. Die Jahreswärmesumme 2008 von 196 K d liegt deutlich höher als der Mittelwert 146 K d der Beobachtungsreihe seit 1948, aber noch 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 2008 kein Monat kälter als im langfristigen Mittel; bis auf den Oktober herrschten positive Temperaturanomalien vor, insbesondere im Februar (+4,0 K) und Januar (+3,1 K). Die positiven Temperaturanomalien von Februar bis Juli gingen mit größerer Sonnenscheindauer einher, die im Oktober keine vergleichbare Wirkung aufwies. Mit 241% war der April der mit Abstand niederschlagsreichste Monat des Jahres 2008, fast vergleichbar mit den hohen monatlichen Maxima über 270% im Juni/Juli 2007. Dagegen fielen Juni/Juli 2008 und der November mit weniger als 50% des normalen Durchschnitts deutlich zu trocken aus. Insgesamt war auch das Jahr 2008 in Warnemünde im Mittel sehr warm und setzte die jüngste Folge von positiven Anomalien fort, wobei der zu warme Winter ausgeprägter war als der Sommer. Dieses Verhalten entspricht dem beobachteten mittleren Trend der letzten 50 Jahre (HAGEN und FEISTEL, 2008). Die Niederschläge schwankten 2008 zwischen 44% im Juli und 241% im April. Der Extremwerte der Luftfeuchte waren 75% im Mai und 77% im Juni in Warnemünde sowie 89% im Januar und 90% im Dezember.

Weltweit war das Jahr zwar überdurchschnittlich warm, setzte aber mit nur 0,3 °C über dem Langzeitmittel und Platz 10 der wärmsten Jahre seit 1850 die Folge der Rekordjahre nicht fort (WMO, 2008). Verantwortlich war dafür anscheinend die Ausbildung einer La-Niña-Phase im Pazifik (TITZ, 2009), die bis Mai 2008 anhielt (WMO, 2008). Aufmerksamkeit hatte ein Wettangebot zwischen den Klimaforschern Stefan Rahmstorf und Mojib Latif zu ihren konträren Prognosen erregt (KEENLYSIDE et al., 2008). Die extrem geringe Eisbedeckung der Ostsee ging einher mit der zweitkleinsten Eisdecke der Arktis seit 1979. In Finnland, Norwegen und Schweden war der Winter der wärmste seit Beginn der Aufzeichnungen (WMO, 2008). Östlich von Spitzbergen und in der Barentssee traten Anomalien von +11 °C auf (ERDMANN, 2008). Auch Sibirien erlebte einen sehr milden Winter, während China, Afghanistan und die USA extreme Kälte registrierten. Im März litt Südastralien unter einer bisher einmaligen Hitze- und Dürreperiode. Dagegen brachte der Monsun südlich der Sahara starken Regen und Überschwemmungen, besonders in Simbabwe, und auch in Pakistan und Indien Hochwasser. Der Zyklon „Nargis“ im Indik bewirkte eine dramatische

Überschwemmungskatastrophe in Myanmar. Auf dem Atlantik bildeten sich 8 Hurrikane, darunter „Gustav“, „Ike“ und „Paloma“, die in der Karibik große Schäden und Opfer forderten. Sehr ungewöhnlich war dabei, dass „Paloma“ sich entgegen der üblichen Zugrichtung ostwärts nach Kuba verlagerte.

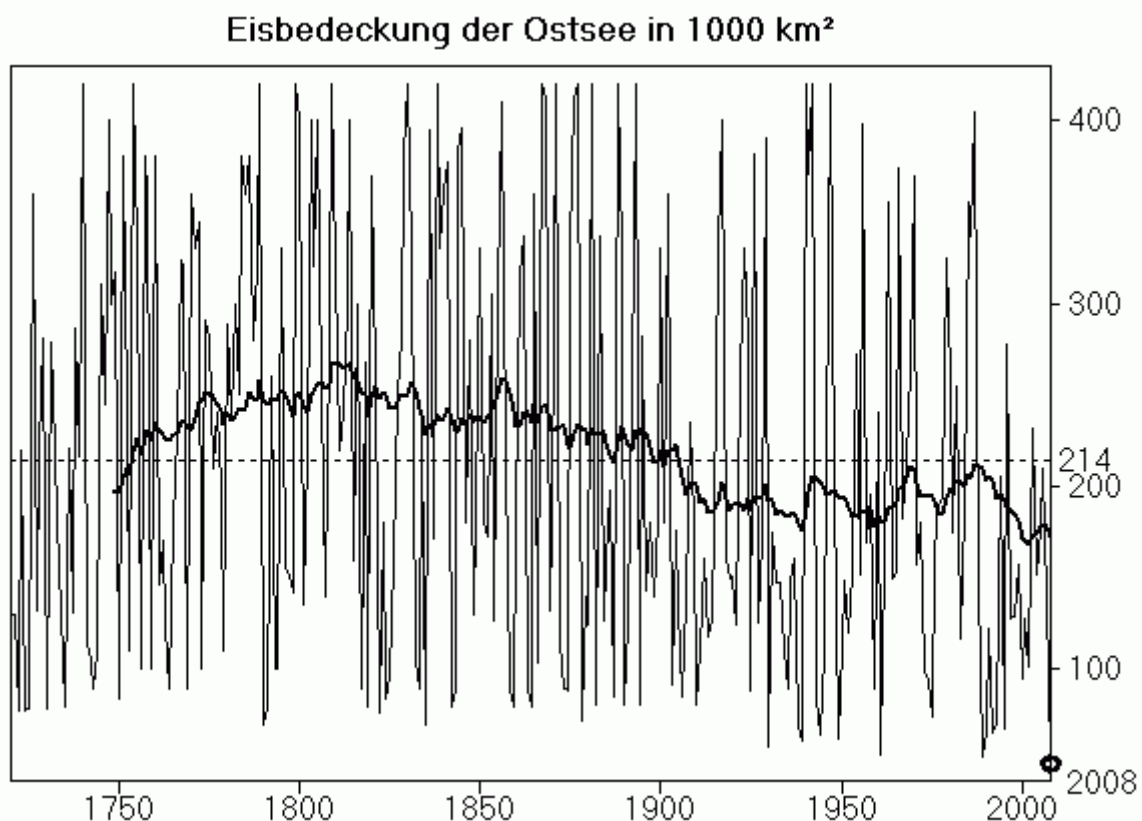


Abb. 2

Maximale Eisbedeckung der Ostsee in 1000 km² in den Jahren 1720 bis 2008 nach Daten des FIMR (FIMR, 2008). 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 2007/2008 mit 49 000 km², dem niedrigsten Wert der gesamten Reihe

Fig. 2

Maximum ice covered area in 1000 km² of the Baltic Sea in the years 1720 to 2008 from data of FIMR (FIMR, 2008). 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 2007/2008 with 49 000 km² is encircled, as the all-time lowest value

Tab. 1

Monatliche gemittelte Wetterdaten der Station Arkona (Rügen, 42 m über NN) nach DWD (2009a). 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 (2009). 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 (2009a). 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 (2009). 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	3,3	+3,1	89	76	74	4	2	6333
Feb	4,2	+4,0	85	144	70	4	-	10527
Mrz	3,9	+1,8	82	125	106	8	-	28086
Apr	6,4	+1,4	88	112	241	-	-	39069
Mai	12,0	+2,3	75	148	97	-	-	71975
Jun	14,9	+0,8	77	117	46	-	-	68896
Jul	17,5	+1,3	80	122	44	-	-	64565
Aug	17,5	+1,0	81	76	59	-	-	42010
Sep	14,3	+0,7	80	79	75	-	-	27907
Okt	9,9	0,0	88	105	150	-	-	19374
Nov	6,6	+1,3	86	72	47	1	-	7647
Dez	3,2	+1,2	90	97	88	6	-	4127

Tab. 2

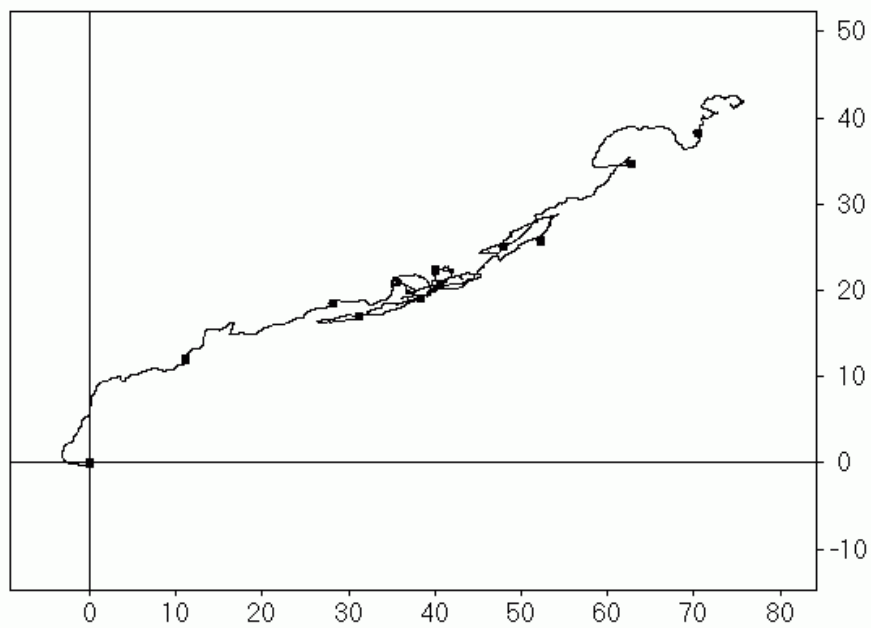
Summen der Tagesmittel der Lufttemperatur an der Wetterstation Warnemünde. Die Kältesumme (KS) ist das Zeitintegral der Lufttemperatur unterhalb der Linie $t = 0\text{ °C}$, in $\text{K} \cdot \text{d}$, die Wärmesumme (WS) das entsprechende Integral oberhalb der Linie $t = 16\text{ °C}$. Zum Vergleich sind die entsprechenden Mittelwerte 1948 bis 2008 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 - 2008 are given

Monat	KS 2007/08	Mittelwert	Monat	WS 2008	Mittelwert
November	0,0	2,6 ± 6,4	April	0,5	1,0 ± 2,4
Dezember	9,5	21,2 ± 26,6	Mai	7,6	5,0 ± 5,6
Januar	10,3	38,8 ± 40,0	Juni	31,0	23,3 ± 14,8
Februar	0,0	31,9 ± 39,2	Juli	83,9	53,7 ± 34,0
März	0,2	8,6 ± 12,2	August	59,9	50,9 ± 32,1
April	0,0	0,0 ± 0,2	September	12,6	11,4 ± 12,3
			Oktober	0,0	0,4 ± 1,2
Σ 2007/2008	20,0	103,2 ± 80,4	Σ 2008	195,5	145,6 ± 68,7

a) Kumulatives Windvektor-Diagramm (1000 km) in Arkona 2008



b) Kumulatives Windvektor-Diagramm (1000 km) in Arkona 1951-2002

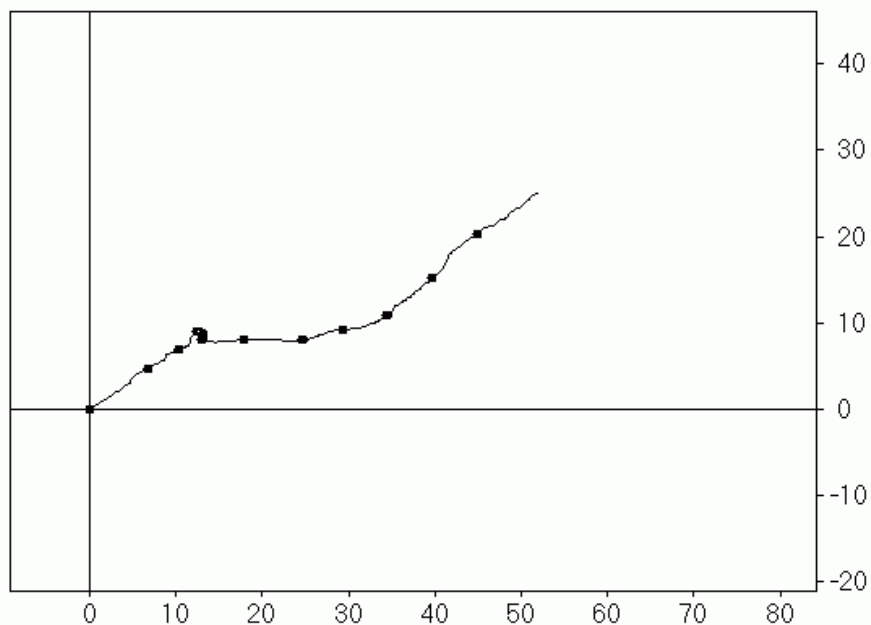


Abb. 3

Fortschreitende Vektordiagramme der Windgeschwindigkeit an der Wetterstation Arkona (nach Daten des DWD, 2009), in 1000 km, positiv nach nördlichen und östlichen Richtungen, a) 2008, 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, 2009), in 1000 km, positive in northerly and easterly directions. a) 2008, b) long-term average. The first day of each month is encircled

Abb. 3 zeigt die Windentwicklung mit Hilfe fortschreitender Vektordiagramme für die Station Arkona, wobei die Trajektorie durch zeitliche Integration des Windvektors am Ort entsteht. Das Jahr 2008 ist dargestellt im Vergleich mit dem klimatischen mittleren Wind der Jahre 1951 bis 2002. Die Kurve für 2008 (74 000 km nach Osten, 42 000 km nach Norden) weicht von der des klimatischen Mittelwerts (52 000 km nach Osten, 25 000 km nach Norden) erheblich ab. Beide Windkomponenten sind 2008 im Mittel viel stärker. Die häufigen Blockierungslagen zeigen sich in überdurchschnittlich vielen und langen Windsituationen aus Süd, Ost und Nord. So beginnt die PVD-Kurve mit dem Ostwind des ersten Wintereinbruchs Anfang Januar und geht dann in starken Südwind über. Das typische Sommerplateau des klimatischen Diagramms findet sich 2008 nur schwach ausgeprägt, stattdessen zeigen die Schleifen der Kurve anhaltende Ost- und Nordostwinde. Während der Windverlauf im Oktober normal ist, zeigen sich Blockierungslagen erneut im November und Dezember in Form von deutlich abweichenden Richtungen. Der mittlere Betrag der Windgeschwindigkeit ist 7,7 m/s, siehe Abb. 4, der Betrag des mittleren Windvektors ist 2,7 m/s. Beide Werte übersteigen die entsprechenden klimatologischen Mittel von 7,1 m/s und 1,9 m/s (HAGEN und FEISTEL, 2008). 2008 war also auch ein überdurchschnittlich windiges Jahr. Markante Stürme sind von Januar bis März, aber auch im September, November und Dezember zu erkennen, besonders ruhig war dagegen der sonnige, warme und trockene Mai (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 2008 fünf Mal statt, im Januar, im Februar/März, im Juni, im September/Okttober und November. Im Gotlandbecken zwischen 174 m und 219 m Tiefe wurde von einer Verankerung 2008 das thermische Abklingen des warmen Einstroms vom März 2007 registriert. Anfängliche Spitzenwerte von ca. 7 °C gingen im Laufe des Jahres 2008 unter ausklingenden Fluktuationen allmählich auf etwa 6,3 °C zurück. Beobachtungen von erneuten thermischen Einstromsignalen liegen nicht vor. Die seit Herbst 1997 registrierte „Warmzeit“ in diesem Tiefenwasser hält somit seit über 10 Jahren an.

Die Verhältnisse im zentralen Tiefenwasser waren 2008 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 mehrere Indizien auf erneute barokline Einströme geringer Stärke hin,

gefolgt von fünf kleinen barotropen Einstromereignissen 2007, und 2008 von einer weiteren Folge von fünf barotropen und vier baroklinen Ereignissen, die nur zum Teil in einzelnen Schüben und mit unterschiedlichen Eigenschaften auch die zentrale Ostsee erreichten. So können von den fünf barotropen Signalen im Landsortpegel 2008 noch drei im Tiefenwasser des Bornholmbeckens und nur noch eines im Gotlandbecken identifiziert werden. Dabei wurde 2008 die bodennahe Schicht im Raum vom Bornholmbecken bis zum Danziger Tief erneut belüftet (Abb. 1), ein auch für barokline Einströme typischer Vorgang (FEISTEL et al., 2004a, b, 2006a, b, c). Nach dem jetzigen Kenntnisstand erfolgen die kleinen barotropen, also sturmgetriebenen Einstromprozesse hauptsächlich auf dem kurzen Weg durch den Öresund in das Arkonabecken, bleiben jedoch wegen ihres geringen Volumens und ihrer bevorzugten Ausbreitung entlang des Beckenrands der Registrierung durch die MARNET-Station „Arkonaboje“ weitgehend verborgen. Keines der Ereignisse war 2008 jedoch stark genug, um durch Temperatursignale an der Verankerung im östlichen Gotlandbecken registriert zu werden und somit zu wesentlichen Veränderungen in der dort seit 1997 im Tiefenwasser bestehenden „Warmzeit“ zu führen.

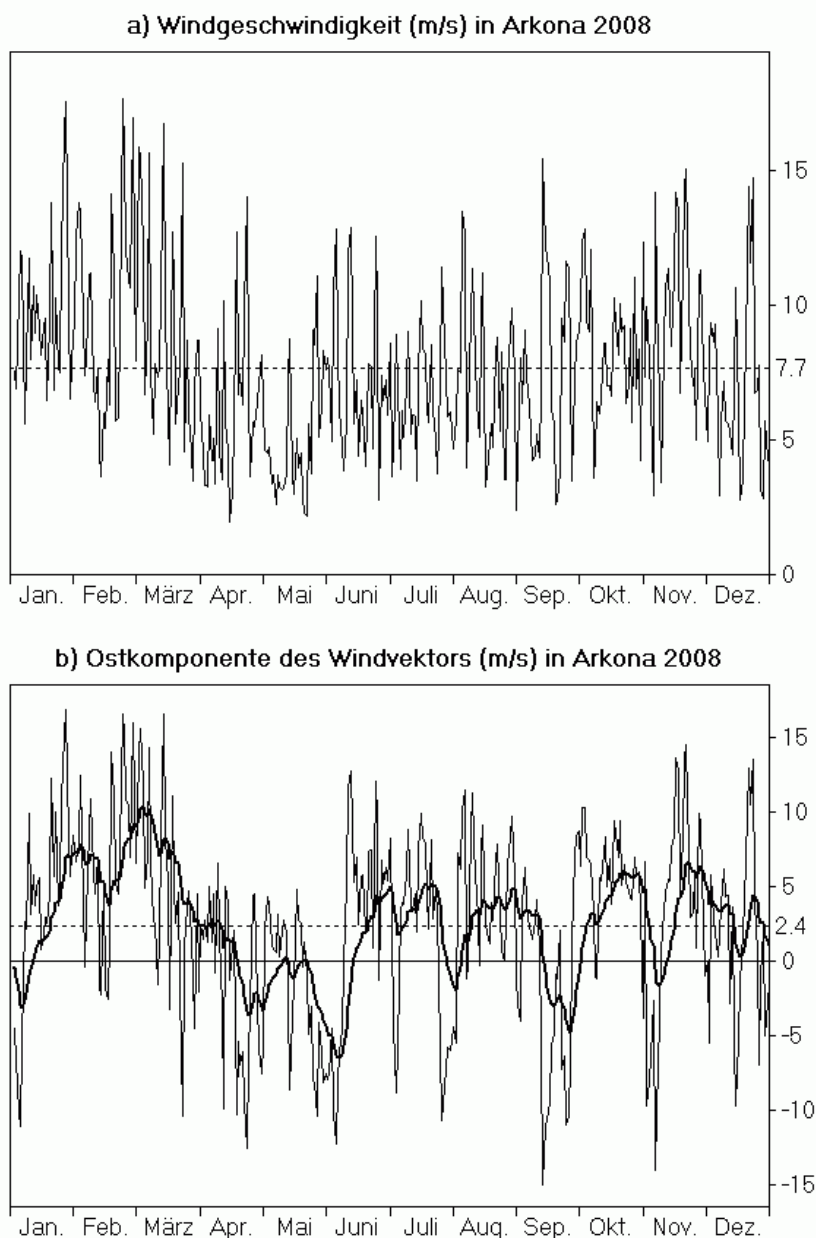


Abb. 4

Windmessungen an der Wetterstation Arkona (nach Daten des DWD, 2009)

- a) Tagesmittelwerte der Windgeschwindigkeit in m/s, Jahresmittelwert 7,7 m/s gestrichelt
 b) Tagesmittelwerte der Ostkomponente (Westwind positiv), Jahresmittelwert 2,4 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, 2009). a) Daily means of wind speed, in m/s, the dashed line is the annual average of 7.7 m/s. b) Daily means of the eastern component (westerly wind positive), the dashed line is the annual average of 2.4 m/s. The line in bold is filtered with a 10-days exponential memory

Die mittlere Windgeschwindigkeit an der Station Arkona lag mit 7,7 m/s knapp unter der des Vorjahrs (7,8 m/s), über dem Wert von 7,1 m/s im Jahr 2003 (NAUSCH et al., 2004) und gleich dem im Jahr 2002 (NAUSCH et al., 2003). In den Jahren 2004 und 2005 wurde ein Mittelwert von jeweils 7,4 m/s ermittelt, und 7,2 m/s im Jahr 2006. Als Windspitzen der Stundenwerte über 20 m/s traten 2008 auf 24,1 m/s am 22. März aus NO, 22,7 m/s am 26. Januar aus West, 21,8 m/s am 20. Dezember aus W, 21,3 m/s am 19. November aus W, 21,2 m/s am 22. Februar aus W, 20,4 m/s am 1. März aus W und 20,1 m/s am 4. August, ebenfalls aus West. Die Spitzenwerte von 2000 (30 m/s) und 2005 (26,6 m/s) wurden damit noch nicht wieder erreicht.

Der Füllungsgrad der Ostsee wird gut durch den Pegel an der schwedischen Station Landsort beschrieben (Abb. 5a, nach Daten des SMHI, 2009). Im Gegensatz zu früheren Jahren handelt es sich jetzt um den neuen Pegel „Landsort Norra“ (58°46'N, 17°52'E). Der alte Pegel Landsort (58°45'N, 17°52'E) wurde im September 2006 außer Betrieb genommen, weil wegen der postglazialen Landhebung seine Lage im Haff bei Niedrigwasser die Verbindung zur offenen Ostsee nicht mehr sicherstellte (FEISTEL et al., 2008b). Beide Pegel wurden für mehr als zwei Jahre parallel betrieben und zeigen nahezu identische 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 2008 sind der hohe Pegel bis Ende März, der nachfolgende Niedrigpegel bis Ende Juni, und noch einmal ein hoher Pegelstand von Mitte Oktober bis Mitte Dezember. Der Spitzenpegel im März betrug 193 cm am 6.3. nach Durchzug des Sturms „Gabi“. Die schwachen und östlichen Winde vor allem im Mai bewirkten einen deutlich abgesenkten Pegel bis zu 96 cm am 5. Juni. Zwischen dem Höchstpegel im März und dem Minimum im Juni betrug der Unterschied fast 1 m, entsprechend einem sehr intensiven Ausstrom in März und April. Von Ende Juni bis Anfang September herrschten niedrige Füllstände. Dem niedrigen Pegel im September folgte ein anhaltender Anstieg auf ein zweites Jahresmaximum von 193 cm am 30. Oktober, während die Sturmtiefs „Pelagia“ und „Quinta“ über Skandinavien nach Osten zogen.

Von besonderem Interesse sind hier stets schnelle Pegelanstiege, die in der Regel nur durch einen Zustrom von Nordseewasser durch Sund und Belte hervorgerufen werden können. Sie sind bedingt durch Stürme von West bis Nordwest, wie an der klaren Korrelation des Landsortpegels mit den gefilterten Kurven des Winds (Abb. 4b, 5b) zu erkennen ist. Die

Filterung erfolgt nach der Formel $\bar{v}(t) = \int_0^{\infty} d\tau v(t-\tau) \exp(-\tau/10d)$, wobei die Abklingzeit von

10 Tagen die sowohl theoretisch als auch durch Beobachtungen gut belegte Tiefpasswirkung von Sund und Belten in Bezug auf Pegelschwankungen bei Landsort im Vergleich zu denen im Kattegat beschreibt (LASS und MATTHÄUS, 2008; FEISTEL et al., 2008b).

Kleinere barotrope Einstromereignisse sind 2008 zu erkennen an den Anstiegen um 47 cm in 9 Tagen vom 17. bis zum 26. Januar, um 54 cm in 11 Tagen vom 22. Februar bis 4. März, um 46 cm vom 8. Juni bis zum 23. Juni in 15 Tagen, um 34 cm vom 28. September bis zum 1. Oktober in 3 Tagen, und um 68 cm in 13 Tagen vom 10. bis 23. November. Mit der empirischen Näherungsformel (NAUSCH et al., 2002; FEISTEL et al., 2008b) $\Delta V / \text{km}^3 = 3,8 \times \Delta L / \text{cm} - 1,3 \times \Delta t / \text{d}$ erhalten wir aus den Werten des Pegelunterschieds ΔL in cm und der Einstromdauer Δt in Tagen als Schätzungen für das eingeströmte Volumen $\Delta V = 167 \text{ km}^3$ im Januar, 191 km^3 im Februar/März, 155 km^3 im Juni, 125 km^3 im September/Oktober und 242 km^3 im November.

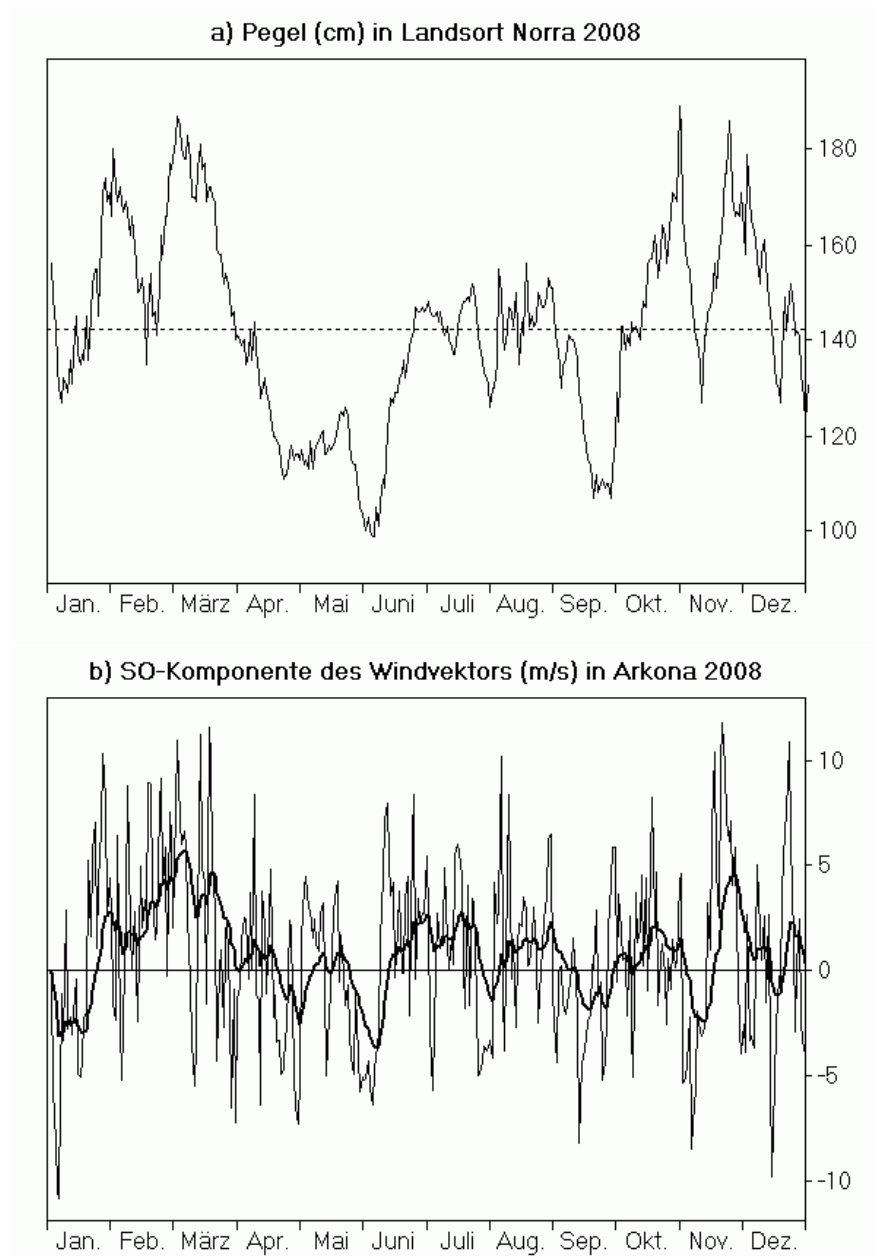


Abb. 5

a) Pegel bei Landsort als Maß für den Füllungsgrad der Ostsee (nach Daten des SMHI, 2009)
 b) Stärke des Nordwestwinds (positiv) an der Wetterstation Arkona (nach Daten des DWD, 2009). 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, 2009)
 b) Strength of the north-west wind (positive) at the weather station Arkona (from data of DWD, 2009). The bold curve appeared by filtering with an exponential 10-days memory

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

Die kontinuierlichen Messungen der Wassertemperatur und des Salzgehaltes sowie der Strömungsgeschwindigkeit wurden an der Station „Darßer Schwelle“ fortgesetzt. Der Sauerstoffgehalt des Wassers wurde mit Sauerstoffsonden des Typs S-14 der Firma Züllig, Schweiz, im 7 m und 19 m Tiefenniveau am Messmast gemessen. Vereinzelt Vergleichsmessungen des Sauerstoffgehalts an Wasserproben aus der Messtiefe der Geräte wurden mit Hilfe der Winklermethode (vgl. GRASSHOFF et al., 1983) während der Wartungszyklen des Messmastes durchgeführt. Die Zeitreihenmessungen wiesen einen Trend in der Empfindlichkeit der Sauerstoffsensoren auf und wurden entsprechend korrigiert.

3.1 Wassertemperatur, Salzgehalt und Sauerstoffgehalt

Mittelwerte und Standardabweichung des in Abb. 6 gezeigten Temperaturverlaufs an der Darßer Schwelle sind in Tab. 3 aufgeführt und in Abb. 7 grafisch dargestellt. Die hohen Jahresmittelwerte der in den verschiedenen Tiefen gemessenen Wassertemperaturen spiegeln das überdurchschnittlich warme Jahr 2008 wider. Nach den Rekordwerten im Vorjahr wurden im Jahr 2008 die zweithöchsten mittleren Temperaturen seit 1992 in 7 m und 17 m Tiefe gemessen, obwohl der Sommer 2008 mit maximalen Oberflächentemperaturen von wenig über 18 °C (Abb. 6) nicht überdurchschnittlich warm war. Wie im Vorjahr sind die hohen Jahresmittelwerte damit hauptsächlich auf den außerordentlich kurzen und milden Winter 2007/2008 zurückzuführen.

Der milde Winter und der moderate Sommer des Jahres 2008 führen zu einer insgesamt geringen Amplitude des Jahresganges der Oberflächentemperatur, wobei der extrem flache Jahresgang des Vorjahres allerdings nicht mehr erreicht wird, wie aus den in Tab. 4 dargestellten Ergebnissen der Fourier-Analyse hervorgeht. Vergleichsweise niedrige Werte finden sich auch in den in Tab. 3 und Abb. 7 dargestellten Standardabweichungen der oberflächennahen Wassertemperaturen. Da die Standardabweichungen von der Amplitude des Jahresganges dominiert werden, ist dieses Ergebnis allerdings kaum mehr als eine direkte Konsequenz des flachen Jahresganges. Die Standardabweichungen der bodennahen Sensoren werden ebenfalls vom Jahresgang dominiert, zeigen aber im Allgemeinen eine geringere Amplitude, da der vertikale Wärmeaustausch mit der Atmosphäre durch die stabile haline Schichtung unterdrückt wird. Die bodennahen Temperaturfluktuationen werden auch durch die Stärke, Art, und Häufigkeit von salzreichen Intrusionen bestimmt.

Eine vollständige Statistik des Salzgehaltes an der Darßer Schwelle steht für das Jahr 2008 nicht zur Verfügung, da die Leitfähigkeitssensoren in der Bodenschicht wegen übermäßigen Bewuchses für die Monate Oktober und November keine zuverlässigen Messwerte lieferten. Nach Austausch der Sensoren ist der volle Datensatz erst ab Dezember 2008 wieder

verfügbar. Die oberflächennahen Sensoren sind von diesem Problem nicht betroffen und liefern in 7 m Wassertiefe eine durchschnittliche Salinität von 9,53 psu, was einem der höchsten seit 1992 gemessenen Werte entspricht (Tab. 3). Dieser hohe Durchschnittswert sowie die überdurchschnittlich hohe Standardabweichung (Tab. 3, Abb. 7) weisen auf eine deutliche, stark fluktuierende Einstromaktivität an der Darßer Schwelle hin. Wie weiter unten ausgeführt, sind zahlreiche dieser Einstromereignisse baroklin geprägt (d.h. vornehmlich durch Dichteunterschiede getrieben), so dass die hier diskutierten Mittelwerte und Standardabweichungen der Deckschicht nicht für die gesamte Wassersäule repräsentativ sind.

Tab. 3

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

Table 3

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

Jahr	7 m Tiefe		17 m Tiefe		19 m Tiefe	
	T °C	S PSU	T °C	S PSU	T °C	S PSU
1992	9,41 ± 5,46	9,58 ± 1,52	9,01 ± 5,04	11,01 ± 2,27	8,90 ± 4,91	11,77 ± 2,63
1993	8,05 ± 4,66	9,58 ± 2,32	7,70 ± 4,32	11,88 ± 3,14	7,71 ± 4,27	13,36 ± 3,08
1994	8,95 ± 5,76	9,55 ± 2,01	7,94 ± 4,79	13,05 ± 3,48	7,87 ± 4,64	14,16 ± 3,36
1995	9,01 ± 5,57	9,21 ± 1,15	8,50 ± 4,78	10,71 ± 2,27	–	–
1996	7,44 ± 5,44	8,93 ± 1,85	6,86 ± 5,06	13,00 ± 3,28	6,90 ± 5,01	14,50 ± 3,14
1997	9,39 ± 6,23	9,05 ± 1,78	–	12,90 ± 2,96	8,20 ± 4,73	13,87 ± 3,26
1998	8,61 ± 4,63	9,14 ± 1,93	7,99 ± 4,07	11,90 ± 3,01	8,10 ± 3,83	12,80 ± 3,22
1999	8,83 ± 5,28	8,50 ± 1,52	7,96 ± 4,39	12,08 ± 3,97	7,72 ± 4,22	13,64 ± 4,39
2000	9,21 ± 4,27	9,40 ± 1,33	8,49 ± 3,82	11,87 ± 2,56	8,44 ± 3,81	13,16 ± 2,58
2001	9,06 ± 5,16	8,62 ± 1,29	8,27 ± 4,06	12,14 ± 3,10	8,22 ± 3,86	13,46 ± 3,06
2002	9,72 ± 5,69	8,93 ± 1,44	9,06 ± 5,08	11,76 ± 3,12	8,89 ± 5,04	13,11 ± 3,05
2003	9,27 ± 5,84	9,21 ± 2,00	7,46 ± 4,96	14,71 ± 3,80	8,72 ± 5,20	15,74 ± 3,27
2004	8,95 ± 5,05	9,17 ± 1,50	8,36 ± 4,52	12,13 ± 2,92	8,37 ± 4,44	12,90 ± 2,97
2005	9,13 ± 5,01	9,20 ± 1,59	8,60 ± 4,49	12,06 ± 3,06	8,65 ± 4,50	13,21 ± 3,31
2006	9,47 ± 6,34	8,99 ± 1,54	8,40 ± 5,06	14,26 ± 3,92	9,42 ± 4,71	16,05 ± 3,75
2007	9,99 ± 4,39	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	-

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

Table 4

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

Jahr	7 m Tiefe		17 m Tiefe		19 m Tiefe	
	Amplitude K	Phase Monat	Amplitude K	Phase Monat	Amplitude K	Phase Monat
1992	7,43	4,65	6,84	4,44	6,66	4,37
1993	6,48	4,79	5,88	4,54	5,84	4,41
1994	7,87	4,42	6,55	4,06	6,32	4,00
1995	7,46	4,36	6,36	4,12	–	–
1996	7,54	4,17	6,97	3,89	6,96	3,85
1997	8,60	4,83	–	–	6,42	3,95
1998	6,39	4,79	5,52	4,46	–	–
1999	7,19	4,52	5,93	4,00	5,70	3,83
2000	5,72	4,50	5,02	4,11	5,09	4,01
2001	6,96	4,46	5,35	4,01	5,11	3,94
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

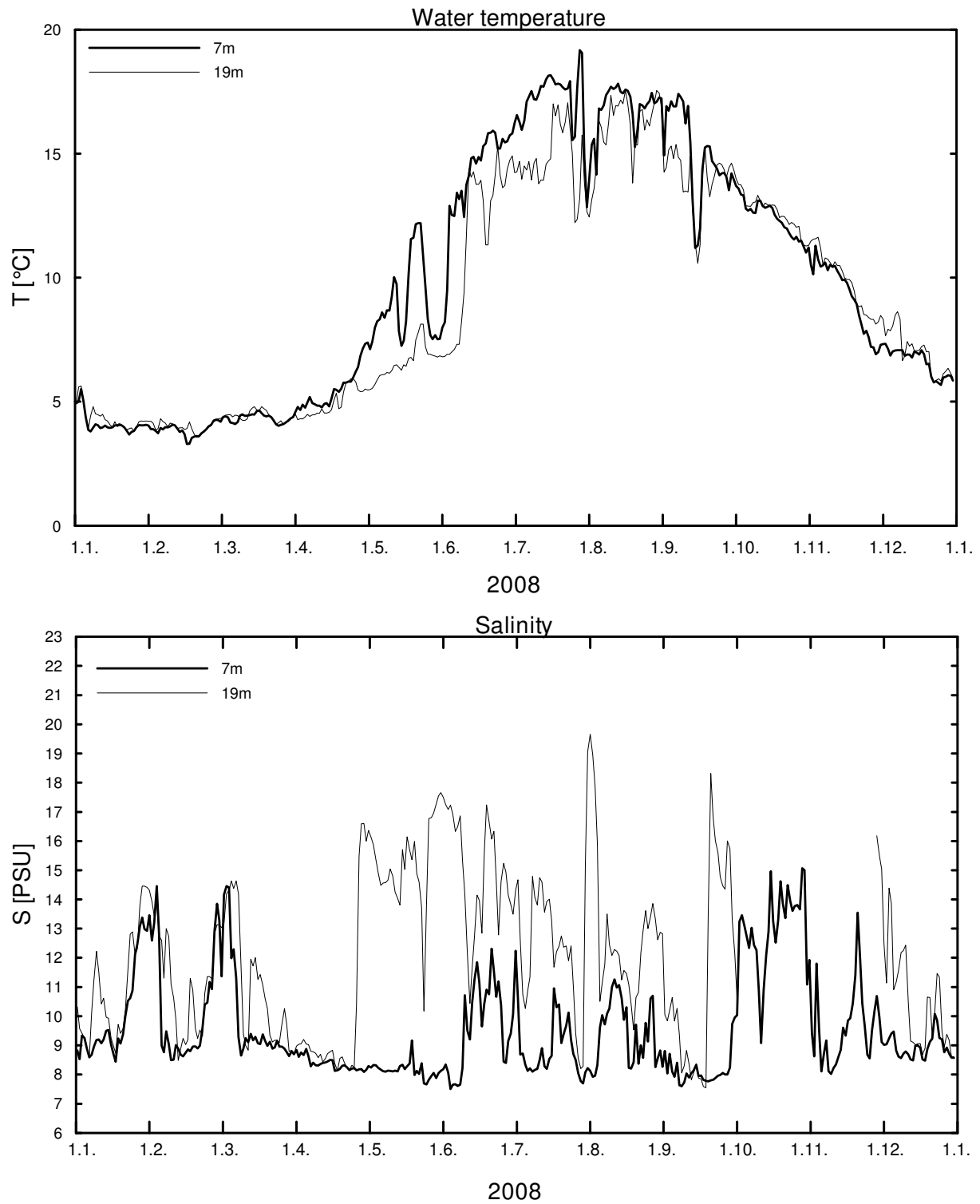


Abb. 6

Verlauf der Wassertemperatur (A) und des Salzgehaltes (B) in der Deck- und Bodenschicht auf der Darßer Schwelle im Jahre 2008

Fig. 6

Water temperature (A) and salinity (B) measured in the surface layer and near the bottom at Stat. DS in 2008 at the Darss Sill

Der Verlauf der Wassertemperatur des Jahres 2008 für die Deckschicht (7 m Tiefe) und die bodennahe Schicht (19 m Tiefe) ist in Abb. 6a dargestellt. Während des ersten Drittels des Jahres lagen die gemessenen Temperaturen in einem engen Bereich von ca. 3 – 5 °C und verdeutlichen damit den überaus milden Winter 2007/2008. Von April bis Juli fand ein kontinuierlicher Temperaturanstieg bis auf etwa 18 °C statt. Dieser Wert liegt nur knapp unter dem Jahreshöchstwert von 19 °C, der nur während einiger Tage Ende Juli erreicht wurde, und ist damit vergleichbar mit der Höchsttemperatur des kühlen Sommers 2007. Östliche Winde im Mai und Juni (Abb. 4b) korrelierten 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 waren auch in den vorangegangenen Jahren beobachtet worden, im Vorjahr zum Beispiel während zweier Ereignisse im August. Während der Erwärmungsphase war die vertikale Temperaturschichtung stabil und kehrte sich erst ab etwa Mitte September aufgrund des Wärmeverlustes zur Atmosphäre und durch Einschichtung wärmeren Bodenwassers um. Die Abkühlung bis auf ca. 6 °C zum Ende des Jahres war kontinuierlich bis auf einen kurzzeitigen Temperatureinbruch in der gesamten Wassersäule in der zweiten Septemberwoche. Dieser Einbruch wurde zeitgleich mit den stärksten östlichen Winden des Jahres (bis zu 15 m/s, siehe Abb. 4b) beobachtet und dürfte ebenfalls auf den oben geschilderten Mechanismus zurückzuführen sein.

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 psu am Boden) während eines kurzen baroklinen Einstroms Ende Juli / Anfang August beobachtet wurden. Das erste Drittel des Jahres wurde von zwei kleineren barotropen Einströmen mit Salzgehalten von etwas über 14 psu dominiert. Diese beiden Ereignisse waren das Ergebnis von starken westlichen Winden und resultierten im hohen Füllungsgrad der Ostsee während der ersten Monate des Jahres. Dieser hohe Füllungsgrad und eine Abschwächung bzw. Umkehr der Ostwindkomponente ab Anfang März (Abb. 4b) führten zu einem starken, nur zeitweilig unterbrochenen Ausstrom, der bis Anfang Juni beobachtet werden konnte. Im Zuge dieses Ausstroms sank der Oberflächensalzgehalt an der Darßer Schwelle auf Werte unter 8 psu zu Anfang Juni. Gleichzeitig setzte in der letzten Aprilwoche ein anhaltender barokliner Einstrom ein, der den oberflächennahen Ausstrom bis in die dritte Maiwoche hinein überkompensierte und damit sogar zu einem leichten Anstieg des Füllungsgrads der Ostsee führte (Abb. 5).

In der letzten Maiwoche schwenkten die Winde auf östliche Richtungen um (Abb. 4b). Das veränderte Windfeld war nicht stark genug um die Wassersäule zu durchmischen und so den oben beschriebenen, immer noch anhaltenden baroklinen Einstrom zu unterbrechen; es führte aber zu einer Umkehr von (Netto-)Einstrom auf Ausstrom und damit zu einem Absinken des Pegels bei Landsort auf den Tiefststand des Jahres 2008, der Anfang Juni erreicht wurde (Abb. 5). Mit einer erneuten Umkippen der Winde auf westliche Richtungen ab der zweiten Juniwoche (Abb. 4b) konnte die Windschubspannung den starken Druckabfall

über die Dänischen Straßen nicht mehr kompensieren, was unmittelbar zu barotropem Einstrom und damit zu einer raschen Erholung des Pegels bei Landsort bis Ende Juni führte (Abb. 5).

Während der Sommermonate bis etwa Anfang September waren die Pegelschwankungen dann vergleichsweise schwach und die stark schwankenden Salzgehalte (Abb. 6b) signalisierten den Wechsel von schwachem Ein- und Ausstrom, wobei der hohe Bodensalzgehalt auf einen fortwährenden baroklinen Einstromanteil hinweist. Interessant ist in dieser Periode insbesondere ein etwa einwöchiges Ostwindereignis Ende Juli (Abb. 4b), das zu einer fast völligen Durchmischung der Wassersäule (Abb. 6) und einem kurzfristigen Pegelabfall bei Landsort führte (Abb. 5). Damit wurden die Bedingungen für einen baroklinen Einstrom Ende Juli / Anfang August mit den höchsten im Jahr 2008 gemessenen Bodensalzwerten geschaffen (Abb. 6). Ein weiteres Ereignis dieser Art fand in der zweiten Septemberwoche statt, in der Ostwinde bis 15 m/s (Abb. 4b) die Wassersäule für etwa eine Woche komplett durchmischten und zunächst barotropen Ausstrom verursachten, welcher in der dritten September von einem starken baroklinen Einstrom kompensiert wurde (Abb. 6)

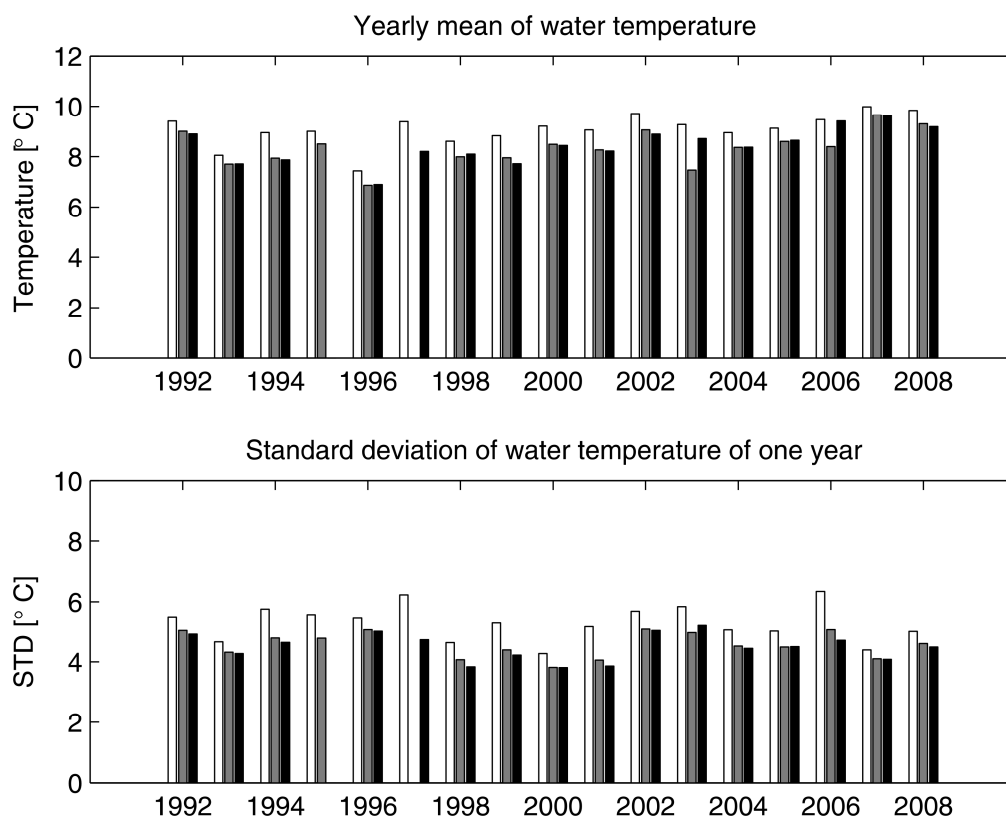


Abb. 7

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

Fig. 7

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

Im weiteren Verlauf war das Einstromverhalten an der Darßer Schwelle vom Rhythmus der Westwindkomponente (Abb. 4b) dominiert mit Einstrom im Oktober, kurzem Ausstrom Ende Oktober / Anfang November und Einstrom im November. Die Salzgehalte an der Oberfläche spiegeln diese barotropen Austauschprozesse wider, wobei die höchsten Werte während des starken Einstroms im Oktober beobachtet wurden (Abb. 6b). Wegen des oben erwähnten Geräteausfalls stehen für die Monate Oktober und November keine Messwerte in der bodennahen Schicht zur Verfügung.

Der Sauerstoffgehalt des Oberflächenwassers (Abb. 9) schwankte während des ganzen Jahres um die Sättigungskonzentration des Sauerstoffs und weist damit einen vor allem durch die Wassertemperatur aufgeprägten Jahresgang mit einem Minimum im Spätsommer auf. Während des ganzen Jahres werden die Sauerstoffzehrungsprozesse in der Beltsee und im Arkonabecken durch den Sauerstoffbedarf des Sediments gesteuert. Algenblüten und hohe Sedimenttemperaturen während der warmen Jahreszeit steigern diesen sedimentären Sauerstoffbedarf und führen zu reduzierten Sauerstoffkonzentrationen im unteren Bereich der Wassersäule. Die spezifische Sauerstoffzehrung in der Wassersäule nimmt mit dem Verhältnis von Sedimentfläche zu Wasservolumen zu und ist damit in flachen Gebieten stärker als in den tiefen Becken. Dieser Effekt ist vor allem in der flachen Beltsee sichtbar und manifestiert sich in einem starken Einbruch der an der Darßer Schwelle gemessenen Bodensauerstoffkonzentrationen während barokliner Einstromereignisse. Während solcher Einströme wird sauerstoffarmes Wasser aus den Bodenschichten der Beltsee über die Darßer Schwelle transportiert, wie zum Beispiel während der Einstromphase von Ende April bis Anfang Juni oder während der kurzen baroklinen Einströme Ende Juli / Anfang August und Ende September (Abb. 6b und 9). Während der letzten beiden Ereignisse sank die Bodensauerstoffkonzentration auf die geringsten Werte des Jahres mit einer fast sauerstofffreien Bodenschicht.

Im Gegensatz zu dem oben beschriebenen Prozess bringen barotrope Einströme sauerstoffreiches Wasser aus der Nordsee mit sich und sorgen für eine Erholung der Bodensauerstoffkonzentrationen an der Darßer Schwelle. Dies ist besonders dann sichtbar, wenn solche Einströme unmittelbar auf sauerstoffarme barokline Einströme folgen. Beispiele finden sich im Jahr 2008 in der zweiten Juniwoche, in der ersten Augustwoche und Anfang Oktober (Abb. 9). Die barotropen Einströme im ersten Drittel des Jahres und im November und Oktober haben hingegen nur einen vergleichsweise schwachen Effekt auf den Sauerstoffgehalt, da sie sich zu einer Zeit mit niedriger Sauerstoffzehrung und starker Vermischung ereigneten, in der die Sauerstoffwerte überall in der Wassersäule nahe der Sättigung lagen (die bodennahen Sauerstoffwerte von Oktober bis Dezember wurden aufgrund von Sensorbewuchs leicht überschätzt).

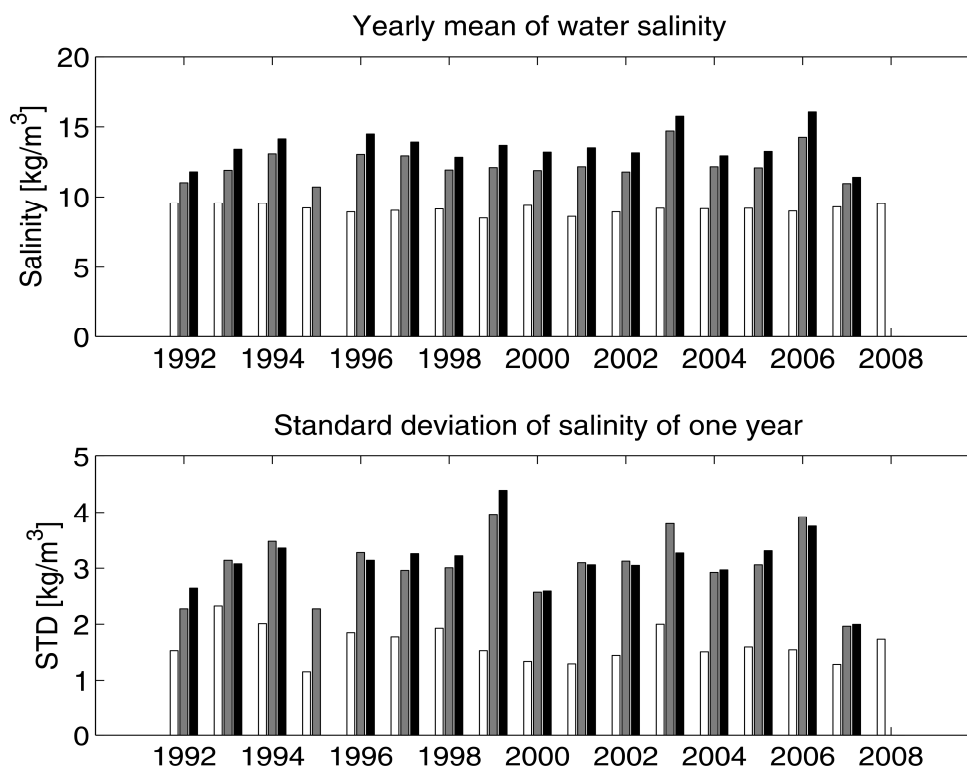


Abb. 8

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 on the surface layer (7 m, white bar) and in the bottom layer (17 m, grey bar and 19 m, black bar) at the Darss Sill

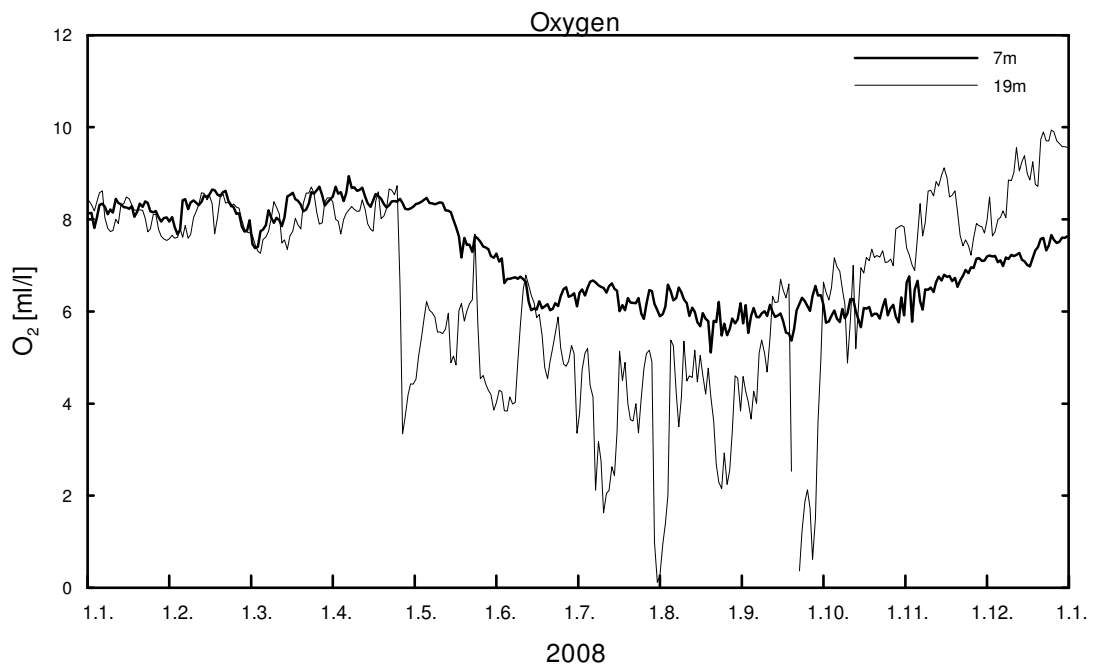


Abb. 9
Verlauf des Sauerstoffgehaltes in der Deck- und Bodenschicht auf der Darßer Schwell im Jahre 2008

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

3.2 Strömung

Aufgrund eines Speicherausfalls für den akustischen Strömungsmesser liegen Strömungsdaten an der Darßer Schwelle für das Jahr 2008 nur für die Monate Januar-Mai und ab Ende November vor. Während dieser Perioden 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 kurzzeitige 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.

Die beiden barotropen Einströme im Januar und Februar, deren Effekt sich wie oben erwähnt sowohl im Pegel als auch in den Salinitäten nachweisen lässt, hinterließen auch in den Strömungsdaten an der Darßer Schwelle deutlich sichtbare Signale (Abb. 10). Die zeitlich integrierten Strömungsgeschwindigkeiten in verschiedenen Tiefen zeigen einen fast identischen Verlauf und bestätigen somit den barotropen Charakter der beiden Ereignisse. Dies gilt auch für den ab der zweiten Märzwoche einsetzenden barotropen Ausstrom, der bis etwa Mitte April andauerte und sich unter anderem (siehe oben) in stark abfallenden Pegelwerten äußerte. Dieses Verhalten steht im Gegensatz zu der baroklinen Einstromphase, die sich ab der letzten Aprilwoche anschloss. Die, wie oben bereits diskutiert, ab diesem Zeitpunkt für einige Wochen leicht ansteigenden Pegelstände und die starken Salinitätsgegensätze zwischen der Deckschicht und der Bodenschicht (Abb. 6b) weisen auf die Überkompensation des barotropen Ausstroms durch einen bodennahen baroklinen Einstrom hin. Dieses Bild ist konsistent mit den Strömungsdaten, die ab der letzten Aprilwoche deutlich zwischen Ausstrom in 7 m und Einstrom in 17 m Tiefe unterscheiden lassen (Abb. 10).

Weitere Strömungsdaten liegen dann erst wieder ab der letzten Novemberwoche vor. Diese Daten sind in Einklang mit der ab diesem Zeitpunkt beobachteten Ausstromtendenz, die nur in der zweiten Hälfte des Monats Dezember durch eine mehrtägige Periode schwachen barotropen Einstroms unterbrochen wurde (Abb. 5, 6, 10).

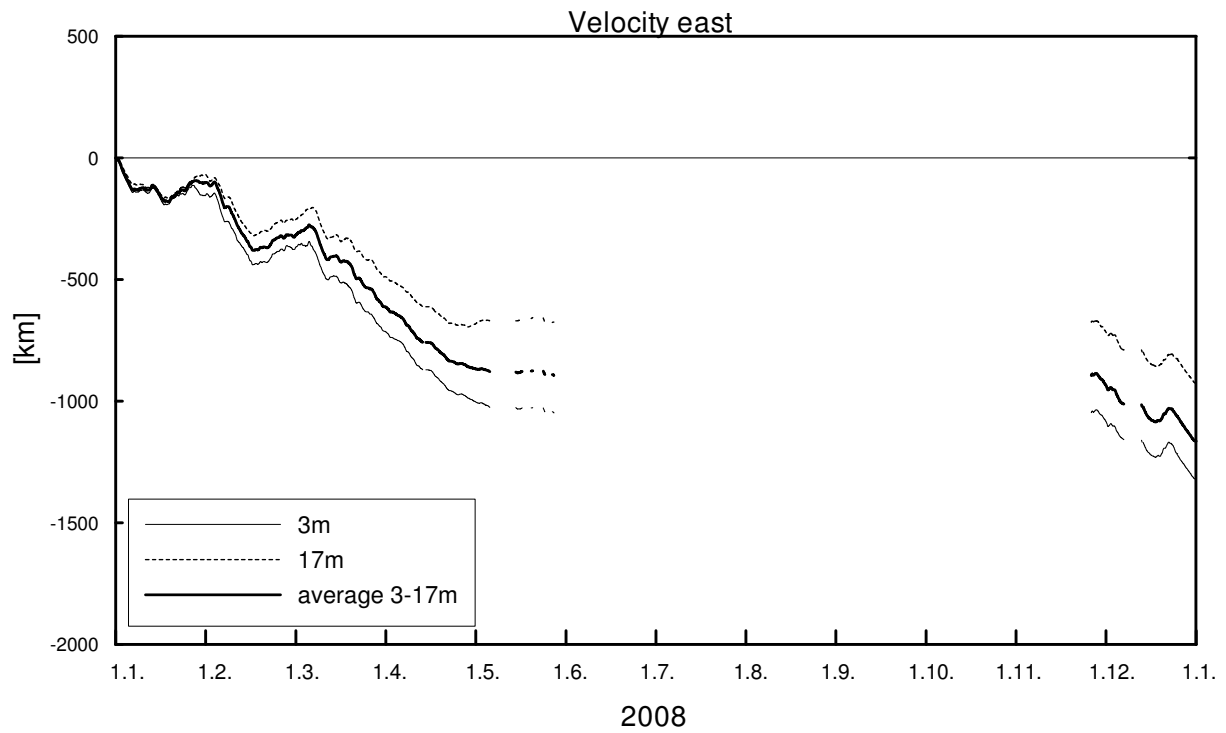


Abb. 10

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 2008

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 2008

4. Beobachtungen an der Bojenstation „Arkonabecken“

Zur Dynamik der salzreichen Bodenströmungen im Bereich des Arkonabeckens fanden in den letzten Jahren intensive Untersuchungen statt, die im Rahmen des von der DFG und dem BMU geförderten Projektes „QuantAS“ (Quantification of water mass transformation in the Arkona Sea) durchgeführt wurden. Die Ergebnisse beinhalten unter anderem die ersten 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 Bornholmsgat 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).

Die Bojenstation "Arkonabecken" befindet sich annähernd 20 m nordöstlich von Arkona auf 46 m Wassertiefe. Die Station war während des ganzen Jahres 2008 operativ (mit Ausnahme eines Sauerstoffsensors, siehe unten). Die Zeitreihen von Wassertemperatur und Salzgehalt in 7 m und 40 m Tiefe sind in Abb. 11 dargestellt. Die an dieser Station in der Deckschicht gemessene Wassertemperatur folgt in ihrem Jahresgang weitgehend dem auf der Darßer Schwelle gemessenen Verlauf (vgl. Abb. 6a). Es gibt jedoch auch charakteristische Unterschiede, die besonders im Sommer ausgeprägt sind. Das Maximum der Oberflächentemperatur im Arkonabecken wurde Ende August erreicht und lag mit 20 °C etwas über den höchsten an der Darßer Schwelle gemessenen Temperaturen (Abb. 6a) und den im Vorjahr ermittelten Höchsttemperaturen. Die thermische Schichtung war im Arkonabecken insgesamt ausgeprägter und zwar sowohl bezüglich der stabilen thermischen Schichtung während der sommerlichen Erwärmungsphase als auch bezüglich der instabilen thermischen Schichtung während der kalten Jahreszeit bis Ende März und ab Anfang Oktober. Beide Effekte lassen sich auf die im Arkonabecken insgesamt deutlich stärkere Dichteschichtung aufgrund des salzreichen Bodenwasserpools zurückführen. Diese unterdrückt die vertikale turbulente Vermischung und isoliert damit das Bodenwasser effektiv von den lokalen atmosphärischen Flüssen. Dieser Effekt ist besonders in den Monaten April und Mai erkennbar, wo relativ konstante Bodenwassertemperaturen um 5 °C einem gleichzeitigen starken Anstieg der Deckschichttemperaturen gegenüberstehen (Abb. 11). Bemerkenswert in diesem Jahr ist die bei hohen Werten zwischen 4-5 °C stagnierende Oberflächentemperatur in den Wintermonaten Januar bis März, die den sehr milden Winter 2007/2008 auch im Arkonabecken sichtbar werden lässt.

Die ebenfalls in Abb. 11 dargestellten Salzgehalte verdeutlichen den Effekt der an der Darßer Schwelle im ersten Viertel des Jahres beobachteten barotropen Einströme (Abb. 6, 10), die den Bodensalzgehalt im Arkonabecken in mehreren Schüben ansteigen ließen. Die höchsten Werte des Jahres wurden mit über 21 psu Anfang Februar gemessen und liegen damit deutlich über den höchsten an der Darßer Schwelle zu dieser Jahreszeit erkennbaren Werten (Abb. 6). Damit ist es wahrscheinlich, dass ein erheblicher Teil der Einströme über den Öresund erfolgt ist, wobei aufgrund der kürzeren Ausbreitungswege eine deutlich geringere Verdünnung der Bodensalzgehalte durch Mischung stattgefunden hat (siehe SELLSCHOPP et al, 2006, UMLAUF and ARNEBORG, 2009a, BURCHARD et al. 2009). Das Signal des Ende April an der Darßer Schwelle einsetzenden baroklinen Einstroms manifestiert sich im Arkonabecken in der Form von zwei Salinitätsspitzen Anfang und Ende Mai (Abb. 11), die zu einer kurzen – und beim ersten Ereignis deutlichen – Reduktion der Sauerstoffkonzentrationen führten (Abb. 12).

Die barotropen Einströme der Sommermonate (Abb. 5, 6) führten zu relativ hohen Salzkonzentrationen zwischen 13 und 17 psu im Bodenwasser des Arkonabeckens, die erst ab Mitte August langsam auf Werte um 9 psu zu Ende September abklagen. Der ab Mitte September an der Darßer Schwelle beobachtete barokline Einstrom (Abb. 6) hatte demnach nur einen geringen Effekt auf den Salz- und Sauerstoffgehalt im Arkonabecken. Die Salinitäten stiegen erst wieder rapide im Zuge des in zwei Schüben erfolgten barotropen Einstroms an, der von Ende September bis Anfang November andauerte (Abb. 6, 11). Gleichzeitig verursachte die laterale Advektion von Wärme mit diesen in der bodennahen Schicht einströmenden Wassermassen die Umkehr der thermischen Schichtung ab der ersten Oktoberwoche (Abb. 11). Dieser Effekt kehrte sich während des zweiten Einstromschubs, der an der Darßer Schwelle in der zweiten Novemberhälfte (Abb. 6) seinen Höhepunkt erreichte, nahezu um. Das nunmehr in der flachen Beltsee abgekühlte salzreiche Einstromwasser manifestierte sich an der Arkonastation in einer abrupten Abkühlung und einem Anstieg des Salinität des Bodenwassers (Abb. 11).

Der an der Station "Arkonabecken" gemessene Sauerstoffgehalt ist in Abb. 12 dargestellt. Aufgrund von Bewuchs des bodennahen Sauerstoffsensors haben die Messwerte in 40 m Tiefe die Qualitätskontrolle ab dem Monat August nicht passiert. Für den oberflächennahen Sensor stehen in Jahr 2008 durchgängige Messwerte zur Verfügung. Die Sauerstoffgehalte in der Deckschicht des Arkonabeckens und auf der Darßer Schwelle sind sehr ähnlich. Dies weist auf eine enge Korrelation mit der Löslichkeit und dem Gleichgewicht zwischen Produktion und Zehrung des Sauerstoffs im Deckschichtwasser auf der Darßer Schwelle und im Arkonabecken hin. Markant ist ein kurzer Einbruch der Temperatur Anfang Mai (Abb. 11), der mit einem kurzen Anstieg des Oberflächensauerstoffgehalts (Abb. 12) korreliert ist. Dieses Phänomen ereignete sich während einer Schwachwindphase nach einer Periode mit östlichen Winden Ende April (Abb. 4) und deutet damit auf die Präsenz eines kalten, sauerstoffreichen Filaments aus den Auftriebsgebieten am Südrand des Beckens hin.

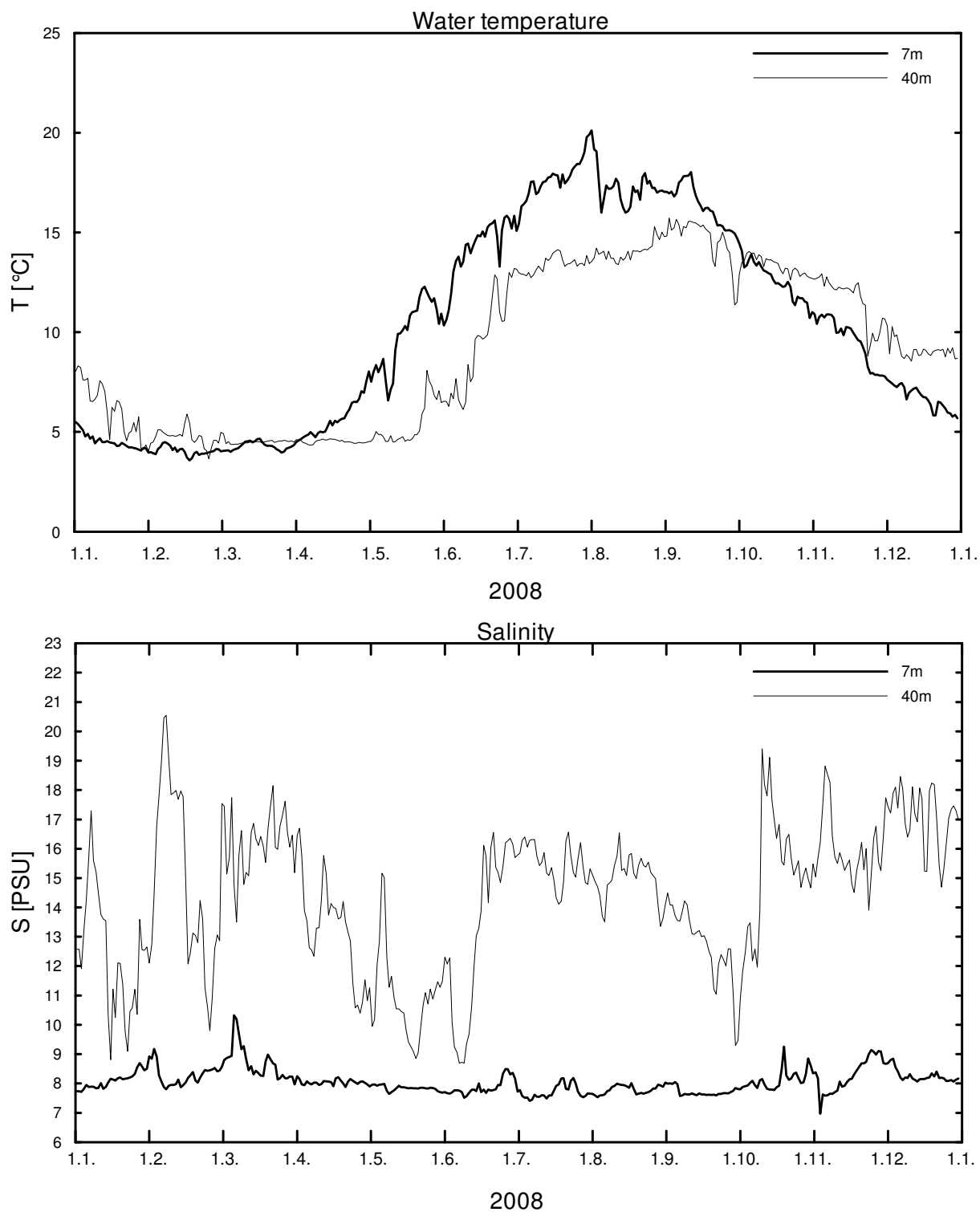


Abb. 11
Verlauf der Wassertemperatur (A) und des Salzgehaltes (B) in der Deck- und Bodenschicht im Arkonabecken (Station AB) im Jahr 2008

Fig. 11
Water temperature (A) and salinity (B) measured in the surface layer and near bottom layer in 2008 at station AB in the Arkona Basin

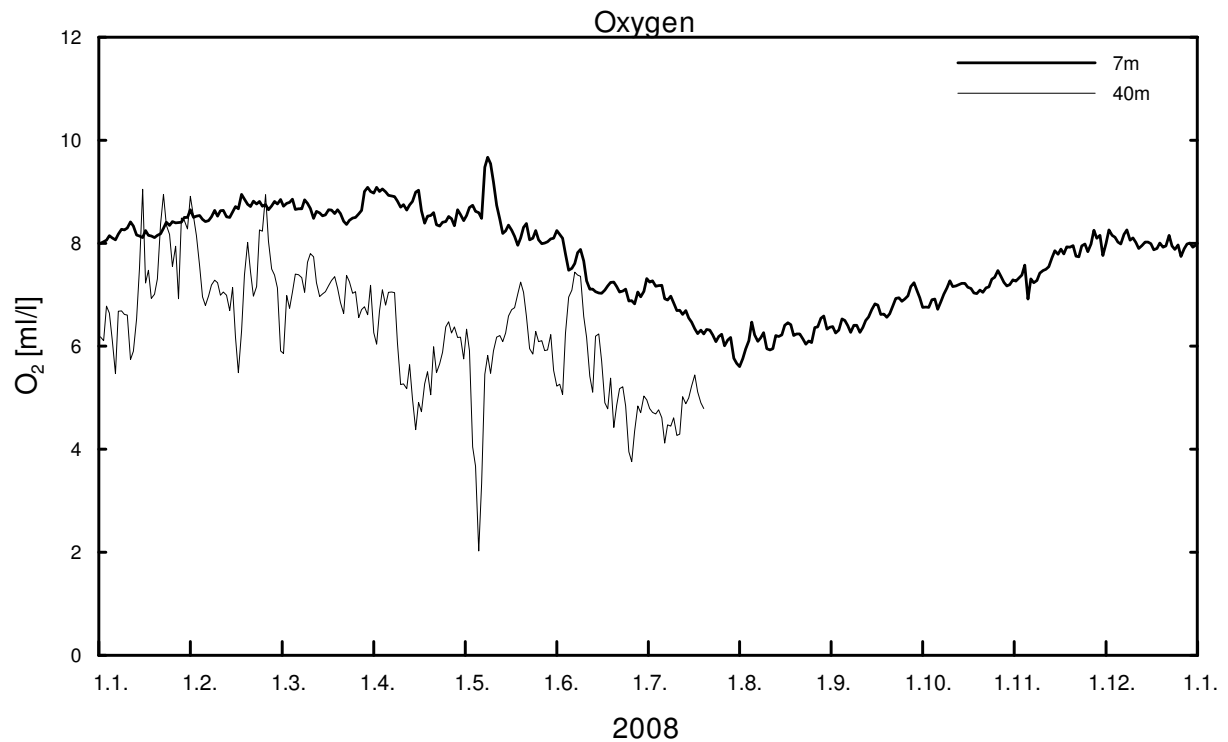


Abb. 12

Verlauf der Sauerstoffgehaltes in der Deck- und Bodenschicht im Arkonabecken (Station AB) im Jahr 2008

Fig. 12

Oxygen concentration measured in the surface layer and near the bottom in 2008 at station AB in the Arkona Basin

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, MOHRHOLZ and SEIFERT (2001) beschrieben worden. Bei Westwindlagen wird dort gut durchmischtes 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.

Die Bojenstation „Oder Bank“ befindet sich annähernd 5 m nordöstlich von Koserow/Usedom auf 15 m Wassertiefe. Im Gegensatz zum Vorjahr konnte die Station im Jahr 2008 aufgrund einer Werftzeit erst ab dem 19. Juli betrieben werden. Eine Aussage über

die Ausbildung der in den Vorjahren beobachteten sommerlichen Sauerstoffminima in der Bodenschicht ist daher nur eingeschränkt möglich.

Die Zeitreihen von Wassertemperatur und Salzgehalt in 3 m und 12 m Tiefe sind in Abb. 13 dargestellt. Die an dieser Station Ende Juli gemessenen sommerlichen Maximaltemperaturen von 20 °C sind mit den Oberflächentemperaturen im Arkonabecken vergleichbar (Abb. 11) und liegen leicht über den an der Darßer Schwelle beobachteten Werten (Abb. 6). Ab etwa der zweiten Septemberwoche setzte eine kontinuierliche und nahezu lineare Abkühlung von spätsommerlichen Werten um 18 °C auf Werte um 4 °C zum Ende des Jahres hin ein. Die in 3 und 12 m beobachteten Werte sind in ihrem Verlauf ähnlich, aber nicht identisch, was darauf hindeutet, dass die Wassersäule auch in diesem flachen Bereich nicht ständig durchmischt ist.

Dies wird bestätigt durch den in den gleichen Tiefen wie die Wassertemperatur gemessenen Salzgehalt, der ebenfalls in Abb. 13 dargestellt ist. Markant ist besonders ein Einbruch des Oberflächensalzgehaltes um den 10. Oktober herum, der vermutlich durch die Schichtung von Mischwasser aus dem Oderhaff über das Wasser der Pommerschen Bucht gesteuert wurde. Dieser Prozess wurde bereits in den Vorjahren beobachtet und stellt einen effektiven Mechanismus zur Schaffung von stabiler vertikaler Schichtung dar, welcher die Einmischung von Sauerstoff aus der Deckschicht in die Bodenschicht unterdrückt. Am 17.10. einsetzende Windmischung durch das Sturmtief „Tiffany“ zerstörte diese Episode stabiler Schichtung innerhalb kurzer Zeit. Ein zweites Ereignis dieser Art ließ sich während des Monats Dezember beobachten (Abb. 13), kurzfristig unterbrochen ab dem 20.12. durch starke Windmischung infolge eines weiteren Sturmtiefs.

Der Effekt dieser Ereignisse auf den Sauerstoffgehalt in der Pommerschen Bucht wird in Abb. 14 sichtbar, in welcher die Sauerstoffkonzentrationen in 3 und 12 m Tiefe aufgetragen sind. Die Unterbrechung der Sauerstoffeinmischung durch die oben erwähnte advective Erzeugung stabiler Schichtung im Oktober hinterließ ein deutliches Signal in den bodennahen Sauerstoffkonzentrationen, die um ca. 1 ml/l gegenüber den Oberflächenwerten einbrachen. Ein fast identisches Phänomen wurde im Jahr 2007 in der ersten Oktoberwoche beobachtet. Diese Reaktion der Bodensauerstoffgehalte wird durch die ausgedehnte Periode stabiler Schichtung im Dezember kontrastiert, die kein identifizierbares Signal in den Sauerstoffdaten aufweist. Dies ist konsistent mit der im Vergleich zum Oktober deutlich geringeren Bodenwassertemperatur und der vernachlässigbaren Primärproduktion, welche beide in direktem Zusammenhang mit dem Sauerstoffbedarf des Sediments stehen.

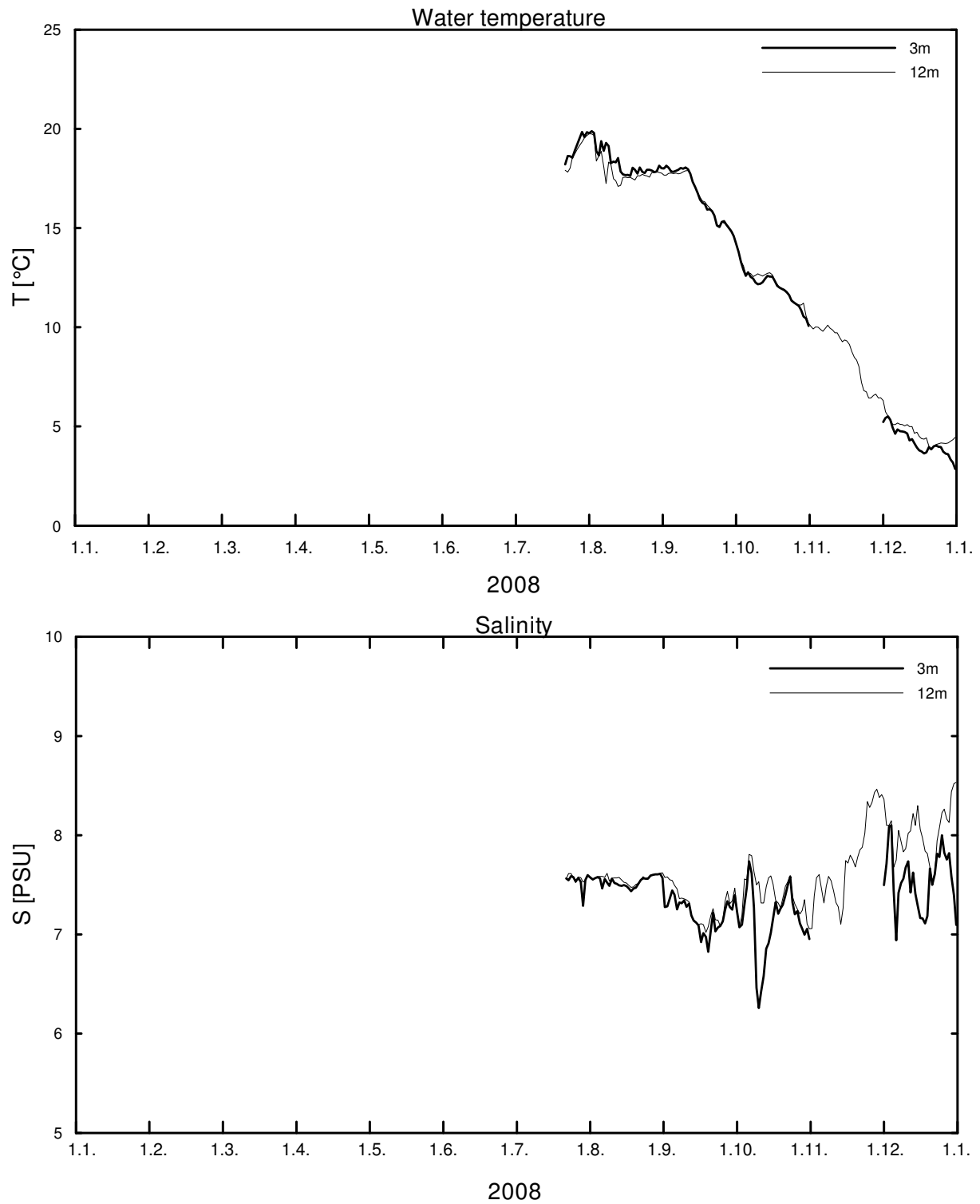


Abb. 13
Verlauf der Wassertemperatur (A) und des Salzgehaltes (B) in der Deck- und Bodenschicht in der Pommerschen Bucht (Stat. OB) im Jahr 2008

Fig. 13
Water temperature (A) and salinity (B) measured in the surface layer and near the bottom in 2008 at station OB in the Pomeranian Bight

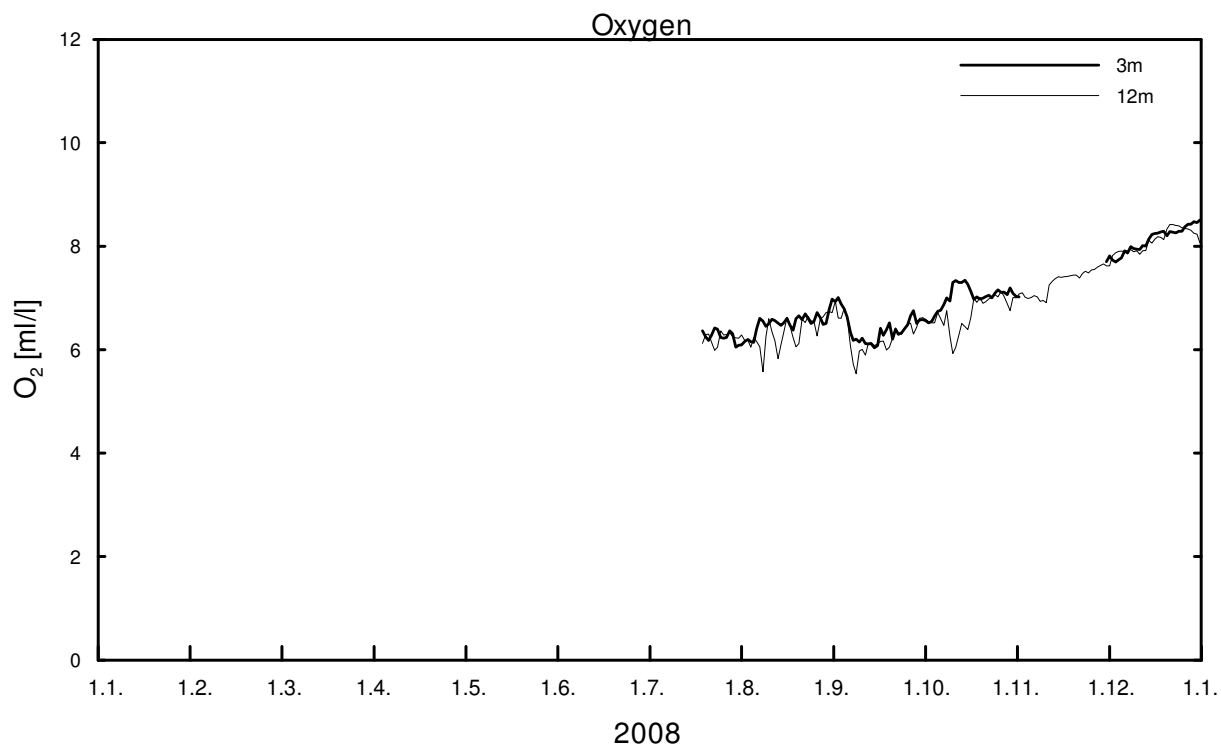


Abb. 14
Verlauf der Sauerstoffgehaltes in der Deck- und Bodenschicht in der Pommerschen Bucht (Stat. OB) im Jahr 2008

Fig. 14
Oxygen concentration measured in the surface layer and near the bottom at station OB in the Pomeranian Bight

Interessanterweise ist der kurzzeitige Einbruch des Oberflächensalzgehaltes im Oktober (sowie zahlreiche im Jahr 2007 beobachtete ähnliche Einbrüche) aufgrund von Brackwasserfahnen aus dem Oderhaff mit erhöhten Sauerstoffkonzentrationen an der Oberfläche korreliert. Dies ist erstaunlich, da das wärmere Haffwasser eine geringere Sättigungskonzentration für Sauerstoff aufweist und daher niedrige Oberflächenkonzentrationen erwarten ließe. Es liegt nahe, dass hier die erhöhte Produktion im Oderhaff zu übersättigten Sauerstoffkonzentrationen führt, welche mit dem Haffwasser zur Station OB transportiert werden. Zusätzlich oder alternativ werden mit dem Haffwasser hohe Nährstoffkonzentrationen in der Deckschicht aus dem Haff exportiert, was an der Station OB lokal zu erhöhter Produktion und damit wiederum zu erhöhten – und möglicherweise übersättigten – Sauerstoffkonzentrationen an der Oberfläche führen kann. Beide Effekte waren bei dem Ereignis im Dezember abwesend, da hier die Primärproduktion keine Rolle mehr spielen dürfte.

6. Hydrographisch-chemische Bedingungen

6.1. Wassertemperatur

6.1.1 Die Wasseroberflächentemperatur der Ostsee im Jahr 2008

Die Entwicklung der Wasseroberflächentemperatur der Ostsee im Jahr 2008 wird auf der Grundlage von Satellitendaten des Advanced Very High Resolution Radiometers (AVHRR) der amerikanischen Wettersatelliten NOAA 17 und 18 dargestellt. Tagesmittelwerte werden für die detaillierte Beschreibung der thermischen Entwicklung verwendet. Monatsmittel und Anomalien, bezogen auf die Periode 1990 – 2004, dienen zur Interpretation der saisonalen thermischen Entwicklung und zur Betrachtung von zwischenjährlichen Variationen.

Das Jahr 2008 war in der Wasseroberflächentemperatur wie 2007 durch ein sehr warmes erstes Halbjahr und einen warmen Spätherbst gekennzeichnet. Das trug dazu bei, dass die Jahresmitteltemperatur der gesamten Ostsee weiter stieg. Außer in den Monaten August und September lagen die Monatsmittelwerte in weiten Teilen der Ostsee über dem langjährigen Mittelwert. Insbesondere die Monate Januar bis Mai gehörten zu den wärmsten im Untersuchungszeitraum 1990-2008. Dadurch war die Eisbedeckung der Ostsee gering (vgl. Kapitel 2). Die maximale Eisbedeckung war am 24./25.03.2008 erreicht und beschränkte sich im Wesentlichen auf die Bottenwiek. Die höchsten Temperaturen des Jahres wurden am 31. Juli bestimmt, da ab 1. August schon von Norden eine Abkühlung erfolgte. Durch die thermische Entwicklung im Sommer 2008 waren die Cyanobakterienaktivitäten im Wesentlichen auf den Monat Juli beschränkt. Regionale Besonderheiten ergaben sich durch lang anhaltende Auftriebsprozesse, die sich teilweise auch in den Monatsmitteln und Anomalien durchpausten. Anhand der Kältesummen der Lufttemperatur von Warnemünde (Tab. 2) zeigt sich, dass der Winter 2007/2008 wie der des Vorjahres auch zu den mildesten seit über 50 Jahren zählt. Die Wärmesumme des Sommers 2008 lag mit 195,5 K über dem langjährigen Mittelwert (145,6), wozu insbesondere die Monate Mai – Juli beigetragen haben. Auch die Wärmesummen der Monate August und September waren geringfügig höher als die langjährigen Mittelwerte. Diese Charakteristiken in der Lufttemperatur spiegeln sich auch in der Wasseroberflächentemperatur wider. Die Anomalien der Monatsmittel des Jahres 2008 sind in Abb. 15 dargestellt. Die Temperaturen lagen im Januar - Mai in der gesamten Ostsee 2-3 K über dem langjährigen Mittelwert und erreichten im Mai im Südtteil der westlichen Gotlandsee und in der Bornholmsee sogar Anomalien von bis zu + 4 K. Speziell der Juni war durch starke räumliche Unterschiede in der südlichen Ostsee gekennzeichnet, die durch Auftriebsprozesse entlang der Küste Deutschlands, Polens und der Baltischen Staaten entstanden. Lagen die Anomalien im Juli noch bei +1-2 K, änderten sich die Verhältnisse im August und September drastisch und negative Anomalien waren in weiten Teilen vorherrschend. Im August wurden intensive Auftriebsprozesse in der nördlichen Ostsee durch östliche Winde und in der südlichen Ostsee durch westliche Winde erzeugt. In den Monaten Oktober, November und Dezember dominierten dann wieder positive Anomalien bis +2 K in weiten Teilen der gesamten Ostsee. Nur entlang der

schwedischen Küste befanden sich Zellen geringfügig negativer Anomalien, die von westlichen Winden verursacht worden waren. In der detaillierten Analyse wird darauf noch eingegangen.

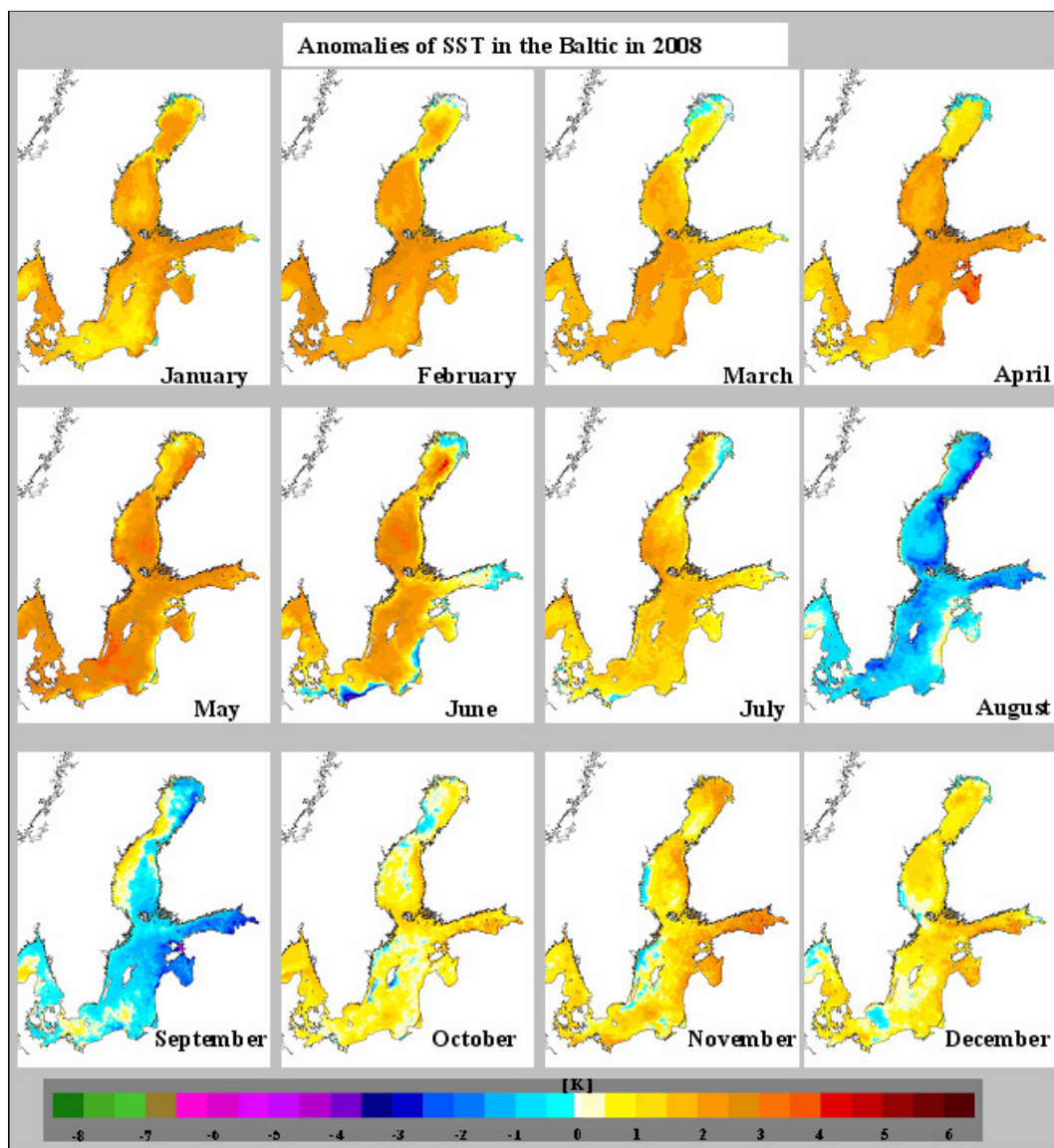


Abb. 15

SST- Anomalien der Monatsmitteltemperatur der Ostsee im Jahre 2008 bezogen auf die langjährigen Mittel 1990 – 2004

Fig. 15

SST- Anomalies of the monthly mean temperature of the Baltic Sea in 2008 referring to the long-term means 1990 - 2004

Die Besonderheiten des Jahres 2008 kommen auch sehr gut im saisonalen Verlauf der Monatsmitteltemperatur in der Arkonasee und in der Gotlandsee zum Ausdruck, die im Vergleich zu den langjährigen Monatsmittelwerten dargestellt sind (Abb.16). Die Maximaltemperaturen wurden in diesem Jahr in beiden Gebieten im Juli erreicht. Das Jahresminimum war um einen Monat verschoben, im Februar in der Arkonasee und im März in der Gotlandsee. Das liegt an der von Westen her erfolgten Erwärmung im Frühjahr, was sich auch in den Mittelwerten der Folgemonate und besonders im Mai ausdrückt. Lagen die Monate Januar bis Mai um +2 K über den langjährigen Mittelwerten, waren es im Mai in der Arkonasee sogar über +3 K. Der Unterschied von ca. +1-2 K setzte sich auch Juni und Juli fort, wobei das Juli- Mittel der Arkonasee unter dem der Gotlandsee lag, was sicher durch Auftriebsereignisse hervorgerufen worden ist.

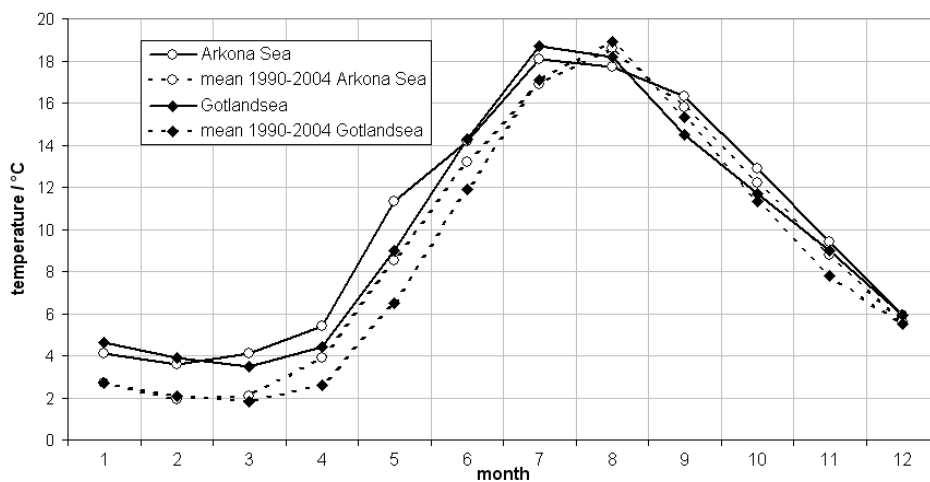


Abb. 16

Saisonaler Verlauf der Wasseroberflächentemperatur (NOAA-SST) in der zentralen Arkona- und Gotlandsee des Jahres 2008 im Vergleich zum jeweiligen 15-Jahresmittel (1990-2004)

Fig. 16

Seasonal course of sea surface temperature (NOAA-SST) in the central Arkona- and Gotland Sea in 2008 in comparison to the mean values of the last 15 years (1990-2004)

Im September waren die Temperaturen in der Arkonasee im Mittel um ca. 2 K höher als in der Gotlandsee. Das ist sicherlich ein Resultat der von Norden einsetzenden Abkühlung. In den restlichen Monaten des Jahres näherten sich die Temperaturen den langjährigen Mittelwerten an und lagen nur noch geringfügig darüber.

Die folgende detaillierte Beschreibung der thermischen Entwicklung der Ostsee im Jahr 2008 fasst die wichtigsten Phasen im Jahresverlauf zusammen. Im gesamten Januar lag die SST um 3-5 °C in den zentralen Bereichen und war in der nördlichen Ostsee und in der Pommernbucht niedriger. Das reduzierte sich im Februar nur geringfügig auf 3-4 °C und blieb

dann auch im März weitgehend erhalten. Die Temperaturverteilung entlang des Schnittes durch die zentralen Becken der Ostsee für den Monat Februar 2008 im Vergleich zum Mittel 1990 – 2004 und zum Februar der Vorjahre zeigt deutlich, dass die gesamte Ostsee außergewöhnlich warm war. Die Temperaturen lagen um bis zu 2 K über dem langjährigen Mittel (Abb. 17), überstiegen aber nur in der nördlichen Ostsee die maximalen Werte von 2007. Im März gab es kurzzeitige Phasen, in denen die Temperaturen von Westen her anstiegen, sich aber durch windbedingte Durchmischung jeweils wieder abkühlten. In der nördlichen Ostsee waren um den 25. März, dem Zeitpunkt der maximalen Eisbedeckung, die Temperaturen am niedrigsten (24./25.03.2008, Abb. 19). Ab Anfang April begann eine merkliche Erwärmung von Westen. Am 7. April lagen die Temperaturen vom Kattegat bis zur Bornholmsee bei 5-6 °C. Die nächsten Erwärmungsphasen fanden vom 14.-16. April und ab 25. April statt. Das führte Ende April im Kattegat zu Temperaturen um 10 °C, in den Buchten der südlichen und südöstlichen Ostsee um 8 °C und in der westlichen bis zur zentralen Ostsee um 5-7 °C. In der Bottensee lagen die Temperaturen bei 3-5 °C und in der Bottenwiek unter 2-3 °C. Die Erwärmung setzte sich Anfang Mai in der westlichen und südlichen Ostsee fort, wodurch am 11. Mai die maximalen Temperaturen des Monats mit 15-17 °C im Westteil und 12-15 °C in der südlichen Gotlandsee erreicht waren. Am 12. Mai erfolgte eine Windumstellung von West- auf Ostlage mit kurzzeitiger Erhöhung der Windgeschwindigkeit von durchgängig 5 m/s auf 12 m/s. Das führte wieder zu einer Abkühlung in der südlichen Ostsee.

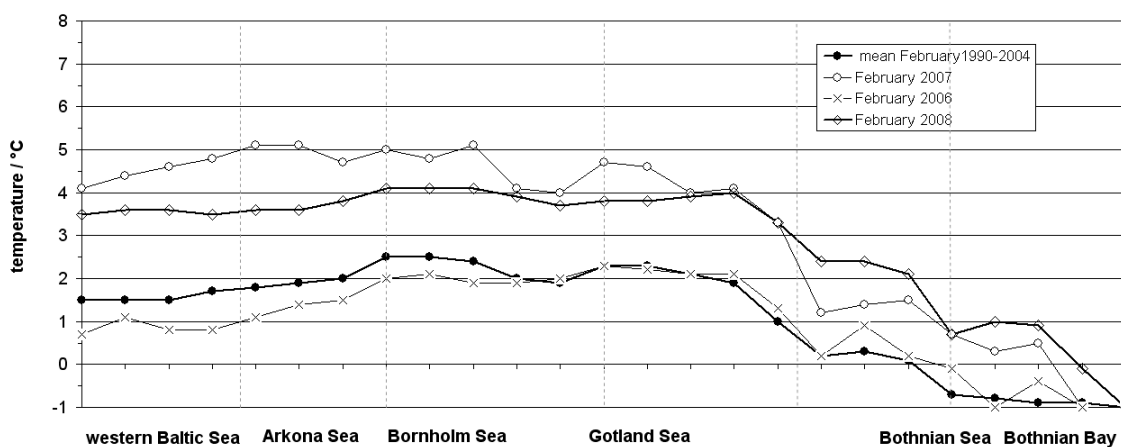


Abb. 17

Temperaturverteilung entlang des Schnittes durch die zentralen Becken der Ostsee für den Monat Februar 2008 im Vergleich zum langjährigen Mittel 1990 – 2004 und zu den Vorjahren

Fig. 17

Temperature distribution along the transect through the central basins of the Baltic Sea in February 2008 in comparison to the long-term mean value of 1990 – 2004 and to the previous years

Nach westlichen Winden vom 15. bis 21. Mai stellte sich wieder eine stabile Ostwindlage ein, die bis zum 8. Juni anhielt. Dadurch entwickelte sich Ende Mai intensiver Auftrieb entlang der Süd- und Ostküsten, der bis ca. 10. Juni die Wasseroberflächentemperatur in der westlichen Ostsee bestimmte. Dadurch gab es hier kaum Temperaturen über 15 °C, wogegen in der südlichen Gotlandsee 15-17 °C weit verbreitet waren. Ab Anfang Juni setzte dann auch die intensive Erwärmung der nördlichen Ostsee ein. Ende Juni hatten sich die nördlichen Teile angeglichen und die SST betrug in der gesamten Ostsee 13-17 °C. Bei den ab ca. 9. Juni dominierenden westlichen Winden entwickelte sich Auftrieb an den Westküsten Schwedens und an der Nordküste des Finnischen Meerbusens. Der Juli war durch eine erste Erwärmungsphase bis ca. 8. Juli, eine danach folgende Stagnationsphase bis ca. 20. Juli und eine weitere Erwärmung bis Ende Juli gekennzeichnet. Die Erwärmungsphase in der dritten Dekade des Monats und die weitere Entwicklung im August führten dazu, dass der 31. Juli der wärmste Tag des Jahres 2008 war (Abb. 18). In weiten Teilen der zentralen Ostsee waren Temperaturen zwischen 20 und 22 °C erreicht und in der nördlichen Ostsee lagen sie nur geringfügig darunter. In der westlichen Ostsee prägte Auftrieb, der sich bei Ostwind nach dem 24. Juli entwickelt hatte, das Bild. In den Kernen der Auftriebszellen vor Hiddensee und vor der polnischen Küste waren Temperaturen um 12 °C zu verzeichnen. Diese Entwicklung pauste sich auch in den Monatmitteln entlang des Schnittes durch die zentralen Becken der Ostsee durch (Abb. 18 oben). Die Monatsmittel der westlichen Ostsee lagen nur ca. +1 K über dem langjährigen Mittelwert, in der Arkona- bis Bornholmsee +2 K und in der nördlichen Gotlandsee bis ca. +3 K. In der nördlichen Ostsee waren die Differenzen dagegen wieder +1-2 K. Am 1. August war innerhalb eines Tages in der Bottenwiek die Temperatur von 18-20 °C auf 14-17 °C gesunken. An diesem Tag drehte in der westlichen Ostsee der Wind von Ost auf West. Die westlichen Winde blieben im gesamten Monat vorherrschend. Ein Starkwindereignis am 4./5. August mit Geschwindigkeiten bis über 20 m/s sorgte für eine Durchmischung und somit für eine Abkühlung in der gesamten Ostsee. Diese Situation blieb bis Ende August mit Temperaturen von 16-18 °C in der südlichen Ostsee, 15-17 °C in der Gotlandsee, und 12-15 °C in der nördlichen Ostsee erhalten.

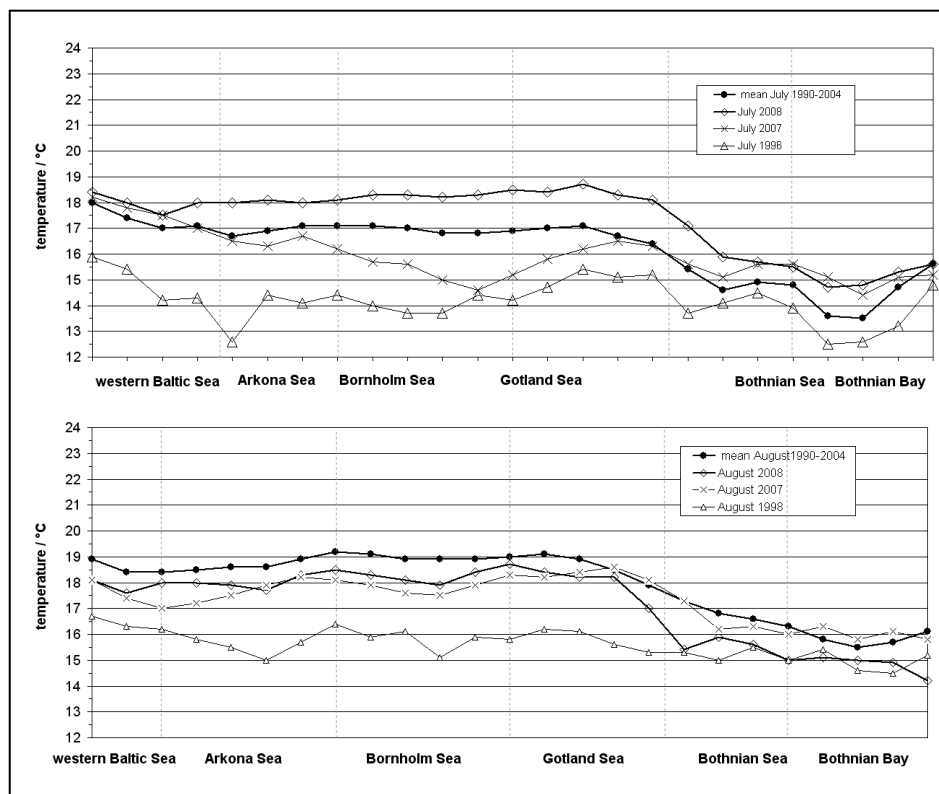


Abb. 18

Temperaturverteilung entlang des Schnittes durch die zentralen Becken der Ostsee für den Monat Juli (oben) und August 2008 (unten) im Vergleich zum langjährigen Mittel 1990 – 2004, zum Vorjahr und zu den jeweils kältesten Monaten Juli 1996 und August 1998

Fig. 18

Temperature distribution along the transect through the central basins of the Baltic Sea in July (upper panel) and August 2008 (lower panel) in comparison to the long-term mean value of 1990 – 2004, to the previous year and to the coldest months resp. July 1996 and August 1998

Die Abb. 18 zeigt die Temperaturverteilung entlang des Schnittes durch die zentralen Becken der Ostsee für den Monat August 2008 im Vergleich zum Mittel 1990 – 2004, zum Vorjahr und zum kältesten August 1998. In der gesamten Ostsee lagen die Temperaturen um ca. 1-2 K unter den langjährigen Mittelwerten. In der westlichen und zentralen Ostsee war das ähnlich wie im August des vorangegangenen Jahres. Diese Situation blieb bis ca. 11. September erhalten. Danach reduzierte sich die SST aufgrund einer Windumstellung weiter. Ende September lagen die Temperaturen in der nördlichen Ostsee weit unter 10 °C und in den anderen Regionen ähnlich wie im Vorjahr zwischen 12 und 15 °C. Im Oktober kühlt die Ostsee weiter von Norden kontinuierlich ab. Ende Oktober hatte die Ostsee im Norden ca. 7 °C und im Auftrieb entlang der schwedischen Küste teilweise weniger. In den anderen Regionen waren noch 10-13 °C vorhanden. Das reduzierte sich bis Ende November weiter auf Temperaturen unter 2-5 °C im gesamten Bottnischen Meerbusen und auf 7-10 °C in den zentralen und südlichen Teilen. Ende Dezember lagen die Temperaturen bei 0-3 °C im Norden und bei 3-7 °C in der zentralen und westlichen Ostsee.

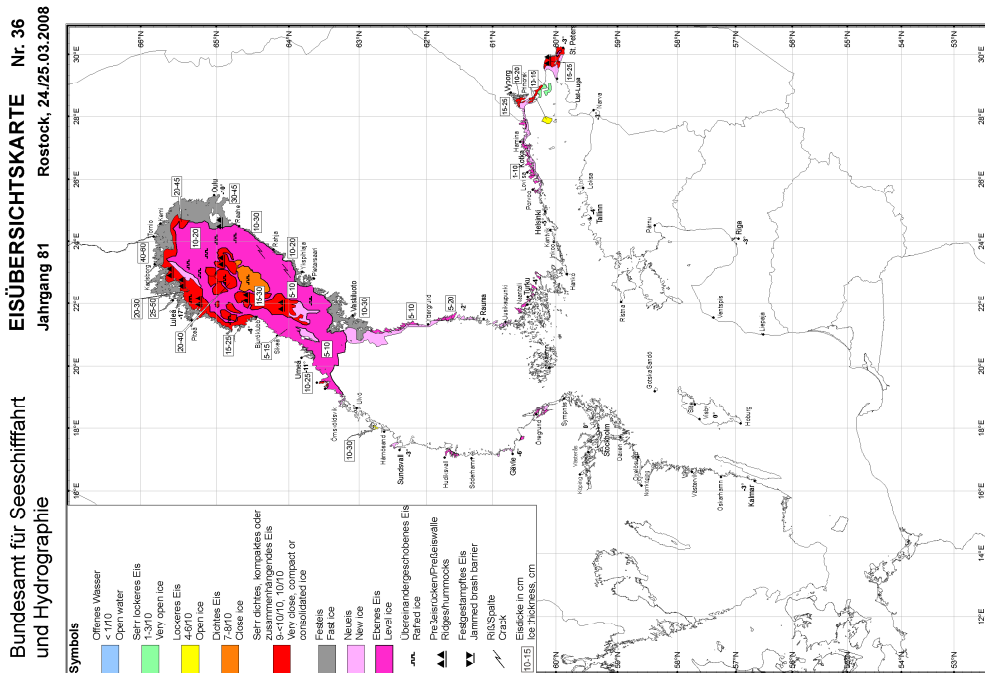
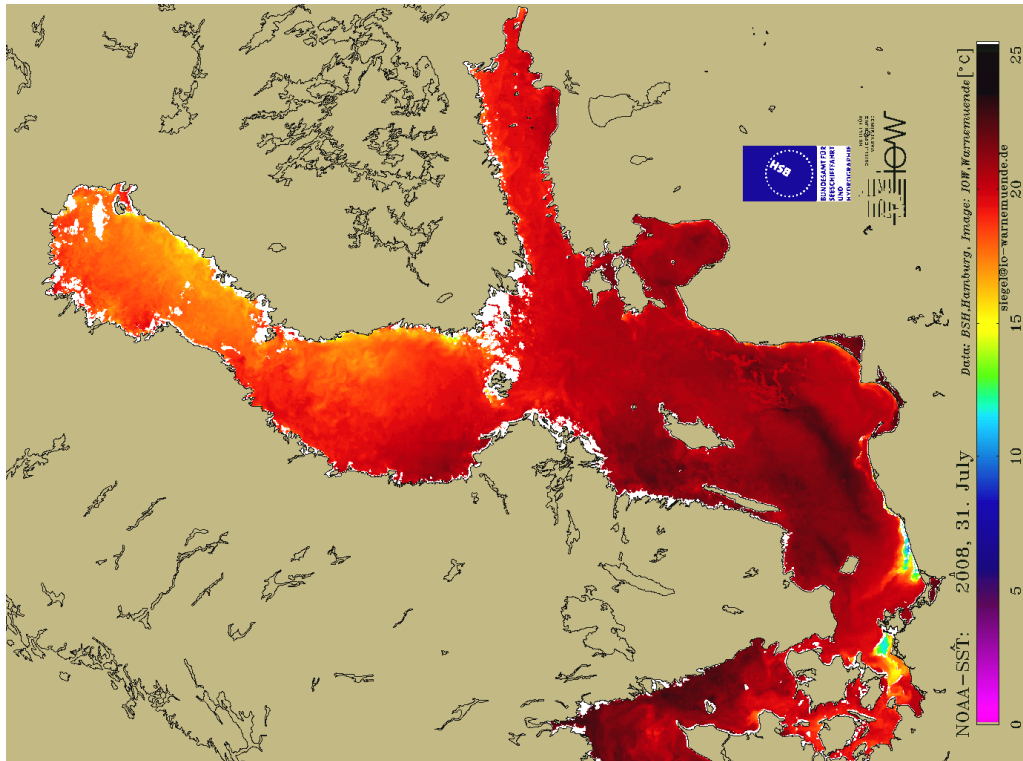


Abb. 19
 Maximale Eisbedeckung der Ostsee im Jahr 2008 am 24./25.03.2008 (Schmelzer, BSH) und Temperaturverteilung der Ostsee am wärmsten Tag, dem 31. Juli 2008

Fig. 19
 Maximum ice coverage of the year 2008 on 24/25 March (Schmelzer, BSH) and temperature distribution of the Baltic on the warmest day of the year (31 July 2008)

6.1.2 Vertikalverteilung der Wassertemperatur

Die vertikale Temperaturverteilung in der westlichen und zentralen Ostsee im Verlauf des Jahres 2008 ist anhand der Überwachungsfahrten des IOW in der Abb. 20 zusammengestellt. Starke barotrope Einstromereignisse aus dem Kattegat in die Ostsee waren 2008 nicht zu beobachten, jedoch gab es beim Landsortpegel und im Tiefenwasser des Bornholmbeckens Anzeichen für drei kleine barotrope Einstromsignale, im Februar/März (kalt), im August/September (warm) und im November/Dezember 2008 (warm), deren Auswirkungen sich in einem Fall in Temperatur- und Salzgehaltssignalen bis zum Gotlandtief verfolgen lassen. Der erste, kalte Zustrom in das Bornholmbecken war ausgelöst worden durch einen barotropen Einstrom von ca. 191 km³ Wasser aus dem Kattegat vom 22. Februar bis 4. März 2008 unter der Wirkung der Sturmtiefs „Anette“ „Birgit“, „Carmelita“ und „Emma“ (Kap. 2) und verdrängte vor allem im März das im Bornholmtief vorhandene warme Tiefenwasser. Dieses sekundäre warme Signal wurde Ende März schon in der Stolper Rinne und im südöstlichen Gotlandbecken beobachtet und schichtete sich zwischen Juli und Oktober 2008 in 125 m Tiefe im Gotlandtief ein. Der warme Einstrom von ca. 242 km³ Nordseewasser im November 2008 zeigte ein kräftiges warmes Signal im Bornholmbecken im November/Dezember, seine Auswirkung auf die zentrale Ostsee ist aber erst für 2009 zu erwarten, wie z.B. eine auffallend warme Schicht von 7,3 °C bei 129 m Tiefe, gemessen nahe der IOW-Station 271 am 6. März 2009 (JÜRGENS, 2009).

Das wichtigste Temperaturmerkmal im Tiefenwasser der zentralen Ostsee war auch noch 2008 die Auswirkung des warmen baroklinen Einstroms von Kattegatwasser vom Spätsommer 2003 (FEISTEL et al., 2004a, 2006a; NAUSCH et al., 2005), der die im Gotlandtief seit 1997 anhaltend hohen bodennahen Temperaturen, die durch den starken barotropen Einstrom vom Januar 2003 kurzzeitig dramatisch abgesenkt worden waren, unerwartet schnell wieder ansteigen lassen. Nach Spitzenwerten von 6,8 °C in ca. 200 m Tiefe im Februar 2004 (FEISTEL et al., 2004a; NAUSCH et al., 2005) schwankten die Werte in dieser Tiefe 2005 und 2006 nur noch unwesentlich um 5,9 °C ($\pm 0,02$ °C bzw. $\pm 0,04$ °C, siehe Tab. 5). Die nach dem März 2004 beobachteten starken Fluktuationen um einen Durchschnitt von ca. 6 °C an einer Verankerung im östlichen Gotlandbecken, 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, 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 markanten 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., 2008), folgte im Sommer 2008 ein nur schwaches warmes Signal in einer dünnen Schicht des Gotlandtiefs bei 125 m Tiefe.

Im Bornholmbecken betrug die niedrigste 2008 gemessene Temperatur 4,2 °C zwischen 50 m Tiefe und der Oberfläche am 20. März 2008, die höchste 19,9 °C am 30. Juli an der Oberfläche. Definiert man als Thermokline z. B. die Tiefe, bei der über 10 m eine vertikale Temperaturänderung von mehr als 1 °C auftritt, so bildete sich diese im Mai unterhalb von 20 m und verblieb dort bis Ende Juli, wobei sich zeitweilig noch weitere Thermoklinen darüber oder darunter ausprägten. Der Wind im August, Oktober und November vermischte die Deckschicht oberhalb von 40 m Tiefe, im September von 30 m Tiefe. Im Dezember verschwand die Thermokline, die Temperatur nahm von oben nach unten zu. Bei 50 und 60 m Tiefe fanden drastische zeitliche Temperatursprünge statt, bedingt durch einen Wechsel zwischen ausströmendem kaltem Winterwasser und einströmendem warmen Wasser vom Arkonabecken, so z. B. von 9,4 °C bei 50 m im Januar 2008 auf 4,2 °C im Februar, oder von 6,4 °C im Juli auf 8,2 °C im August 2008 bei 60 m. Entsprechend finden sich in diesem Tiefenbereich wechselnde Temperaturminima und -maxima der Wassersäule, die großräumige advective Ursachen haben.

Der Verlauf der Wassertemperatur während des Jahres 2008 zwischen 60 und 90 m Tiefe zeigt ein komplexes Verhalten. Die zeitliche und räumliche Auflösung der vorhandenen Messdaten reicht nicht aus, die aufgetretenen Prozesse im Detail zu analysieren. Schnelle Veränderungen der Temperatur sind in der Regel durch Zustrom neuen Wassers aus dem Arkonabecken zu erklären; unterhalb der neuen Einschichtung bleibt der Wasserkörper weitgehend erhalten, darüber wird das gesamte Profil angehoben, und die oberste Schicht bei 60 m kann über die Stolper Schwelle aus dem Becken abfließen. Langsame Veränderungen weisen dagegen auf vertikale Vermischung mit oder ohne geringfügigen Einstrom in das Becken hin. Ist das im Becken zirkulierende und pendelnde Wasser räumlich inhomogen, z.B. bedingt durch kürzlich erfolgte Einschichtungen, so können zufällige Abtastfehler der Einzelmessung bei der Interpretation scheinbar auch andere dynamische Prozesse vortäuschen.

Die hohe Variabilität der Temperatur von 0,8 °C (Tab. 5) des Tiefenwassers im Verlauf des Jahres 2008 weist auf relativ häufige, wenn auch nicht notwendig starke Einstromaktivität im Bornholmtief hin. Die im Januar vorhandene vergleichsweise hohe, aber homogene Temperatur von 8,66 - 8,68 °C zwischen 70 und 90 m Tiefe deutet auf Wasser von einem zurückliegenden warmen Einstrom hin, wahrscheinlich von dem baroklinen Einstrom aus dem letzten Spätsommer, der das Bornholmtief im November/Dezember 2007 erreichte (NAUSCH et al. 2008). Zum Februar nahm die Temperatur um 0,1 °C ab, in 90 m Tiefe sogar um 0,3 °C, was einen beginnenden bodennahen Einschub von kälterem Wasser andeutet. Im März schien dieses Bodenwasser auf 70 m angehoben worden und darunter kaltes Wasser von 7,0 bis 7,6 °C eingeströmt zu sein. Anzeichen für eine aktuell stattfindende Einschichtung kalten Wassers in vorhandenes warmes wurden während der Überwachungsfahrt im März gefunden (Kapitel 2, FEISTEL, 2008). Bodennah kühlte sich das Wasser im April noch etwas weiter auf 6,9 °C ab, gleichzeitig drang kaltes Oberflächenwasser durch Tiefenkonvektion und vertikale Vermischung bis 70 m Tiefe vor und kühlte das Wasser in 70 m Tiefe von 8,2 auf 6,8 °C ab. Damit verblieb als wärmste

Schicht der gesamten Wassersäule nur noch die bei 70 m mit 7,3 °C. Diese Situation blieb unter dem Schutz der entstehenden Sommerthermokline im Mai und Juni praktisch unverändert. Im Juli erschien die Wassersäule von 70 – 90 m dann um ca 0,3 °C wärmer als zuvor. Im August und September trat eine markante Erwärmung der Schicht bei 60 – 70 m bis zu 10,1 °C auf. Im November/Dezember erfasste eine weitere kräftige Erwärmung das gesamte Tiefenwasser von 9,9 °C am Boden bis sogar 11,4 °C bei 70 m. Die 60-m-Schicht war von August 2008 an zwischen 8,2 und 10,3 °C warm; ein anhaltendes Überströmen von sehr warmem Wasser in die Stolper Rinne war deshalb sehr wahrscheinlich. Dieses Wasser wies Salzgehalte zwischen 11,2 und 14,7 psu auf, der Sauerstoffgehalt lag zwischen 1,4 und 4,4 ml/l.

Die Durchschnittstemperatur 2008 des Bodenwassers bei 80 m im Bornholmbecken lag mit 7,92 °C vergleichsweise hoch, aber ein Grad tiefer als im Vorjahr; es traten warme und kalte Einstromvorgänge auf (Tab. 5). Die Temperaturvariabilität war mit 0,8 °C entsprechend hoch.

Die sommerliche Thermokline im Gotlandtief (IOW 271) prägte sich im Mai 2008 aus zwischen 20 und 30 m aus und blieb dort bis August bestehen, wobei weitere zusätzliche Sprungschichten darüber und darunter auftraten. Von August an war diese thermische Deckschicht gut vermischt und dehnte sich systematisch bis zu 50 m Tiefe im November aus. Vom Januar bis zum Dezember 2008 überwog in der Wassersäule zwischen 80 m Tiefe und dem Boden eine geringfügige Abkühlung, zwischenzeitlich wurden in 125 m Tiefe aber auch fast 0,4 °C Erwärmung gemessen. In der bodennahen Schicht bei 240 m Tiefe sank die Temperatur im Verlauf des Jahres 2008 allmählich von 6,55 auf 6,33 °C. Ähnlich war das Verhalten in allen Schichten ab 175 m Tiefe. In 150 m trat ab Juli eine sehr geringe Erwärmung ein, eine deutlichere aber bei 125 m von 6,05 °C in Juni auf 6,43 °C im Oktober 2008. Dieses Signal ist der einzige relevante Hinweis auf eine geringe Einstromaktivität 2008 im Gotlandtief. Das entsprechende warme Wasser wurde offenbar im März durch den kalten barotropen Einstrom vom Februar 2008 aus dem Bornholmbecken verdrängt. Markante kalte Signale wurden 2008 nicht beobachtet. Entsprechend war die Durchschnittstemperatur bei 200 m Tiefe mit 6,29 °C die höchste seit 2002, ihre Schwankungen waren aber die geringsten seit mindestens 1998.

Im Farötief waren alle Veränderungen der Temperatur des Tiefenwassers sehr gering. Am auffälligsten war ein geringer Anstieg in 150 m Tiefe in der zweiten Jahreshälfte. Ähnlich trat im Landsorttief eine Erwärmung um 0,1 – 0,2 °C der Wassersäule unterhalb von 125 m auf. Auch im Farö-Tief erscheinen die Temperaturen unterhalb 100 m nach dem Sommer leicht erhöht. Die mittlere Temperatur 2008 bei 150 m von 6,11 °C lag im Farötief höher als 2007, aber etwas niedriger als 2006. Die Schwankungen waren die geringsten seit 2001. Die mittlere Schwankungsbreite bei 400 m war im Landsorttief wieder so groß wie 2006 und 2004, der Mittelwert liegt fast bei dem des Vorjahrs. Der Mittelwert der Temperatur war im Karlsötief praktisch gleich dem des Vorjahrs, die Fluktuationen waren aber deutlich größer.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass in den letzten fünf Jahren sowohl das Bornholmbecken (von 5,8 auf 7,9 °C) wie das Gotlandbecken (von 5,8 auf 6,3 °C) einen klaren Trend zur Erwärmung des Tiefenwassers zeigen, verursacht durch verstärkte Einstromaktivität im Sommer/Herbst und verringerte im Winter/Frühjahr. In den weiter nördlich bzw. westlich von Gotland liegenden Becken ist dieser Trend in abgeschwächter Form auch zu erkennen (Tab. 5).

Die Verhältnisse im bodennahen Wasser der Stolper Rinne werden überwiegend durch die Wassermassen bestimmt, die von Westen her über die Stolper Schwelle strömen. Je nach Dichte kann dieses Wasser direkt aus einem Einstrom vom Arkona-Becken stammen oder aber „altes“, angehobenes Wasser aus dem Bornholmtief sein. Der Kontakt mit dem Winterwasser über der Halokline in gleicher Tiefe wie die Stolper Schwelle hat in der Vergangenheit immer dafür gesorgt, dass selbst in extremen Stagnationsperioden das Wasser in der Stolper Rinne nicht anoxisch wurde (FEISTEL et al., 2006a, b, c). Im Jahresverlauf 2008 änderte sich an der Station 222 die Temperatur in Bodennähe von 8,4 °C ($S = 12,9$ psu, $O_2 = 2,3$ ml/l) im Februar auf 7,3 °C ($S = 13,6$ psu, $O_2 = 2,7$ ml/l) im Mai und fiel weiter auf 6,7 °C ($S = 13,7$ psu, $O_2 = 2,1$ ml/l) im Juli. Eine Messung auf der IOW-Fahrt zur Langzeitbeobachtung im November konnte wegen Sturm nicht erfolgen. Wie im Vorjahr ist dieser Temperaturverlauf mit sommerlichem Minimum dem saisonalen Zyklus an der Oberfläche genau entgegengesetzt und entspricht dem im Bornholmtief bei 60 m gemessenen. 2008 wurde also im Mittel das bodennahe Wasser nach seiner Bildung an der Kattegatfront über ein halbes Jahr vor und im Bornholmtief gespeichert, bevor es entsprechend verspätet durch nachfolgende Einstrome die Stolper Schwelle überqueren konnte. Dieser bemerkenswerte komplementäre Temperaturgang zwischen Oberfläche und Tiefenwasser findet sich auch im klimatologischen Jahresgang des BALTIC-Atlas (FEISTEL et al., 2008a), er ist also weder spezifisch für das Berichtsjahr noch beschränkt auf die Zeit seit 1997, als häufigere warme Einstromvorgänge im Sommer und Herbst begannen, die Temperatur des Tiefenwassers der Ostsee dauerhaft zu erhöhen.

Der Schnitt in Abb. 20 von Anfang Februar 2008 zeigt, wie warmes Wasser mit über 9 °C, das das tiefe Bornholmbecken bis zur Halokline bei 60 m gefüllt hatte, über die Stolper Schwelle strömte. Nachdrängendes relativ kaltes Wasser (um 6 °C) aus dem Arkonabecken trieb diesen Prozess weiter voran und schichtete warmes Wasser (> 6 °C) unterhalb von etwa 110 m Tiefe in das Gotlandbecken ein, wie im Schnitt vom Februar zu sehen ist. Dieser Prozess setzte sich abgeschwächt noch im März/April fort und kam im Mai zum Erliegen. Im Juli/August drang neues, über 10 °C warmes Wasser in Bodennähe von der Darßer Schwelle bis zum Bornholmbecken vor; die kalte Winterwasserschicht im Arkonabecken wurde durch die Windereignisse Anfang August, also zwischen Beginn und Ende der Messfahrt, aufgelöst. Im November hatte das eingeströmte Sommerwasser mit bis zu 10 °C das tiefe Bornholmbecken vollständig gefüllt und das kalte Wasser vom Frühjahr verdrängt.

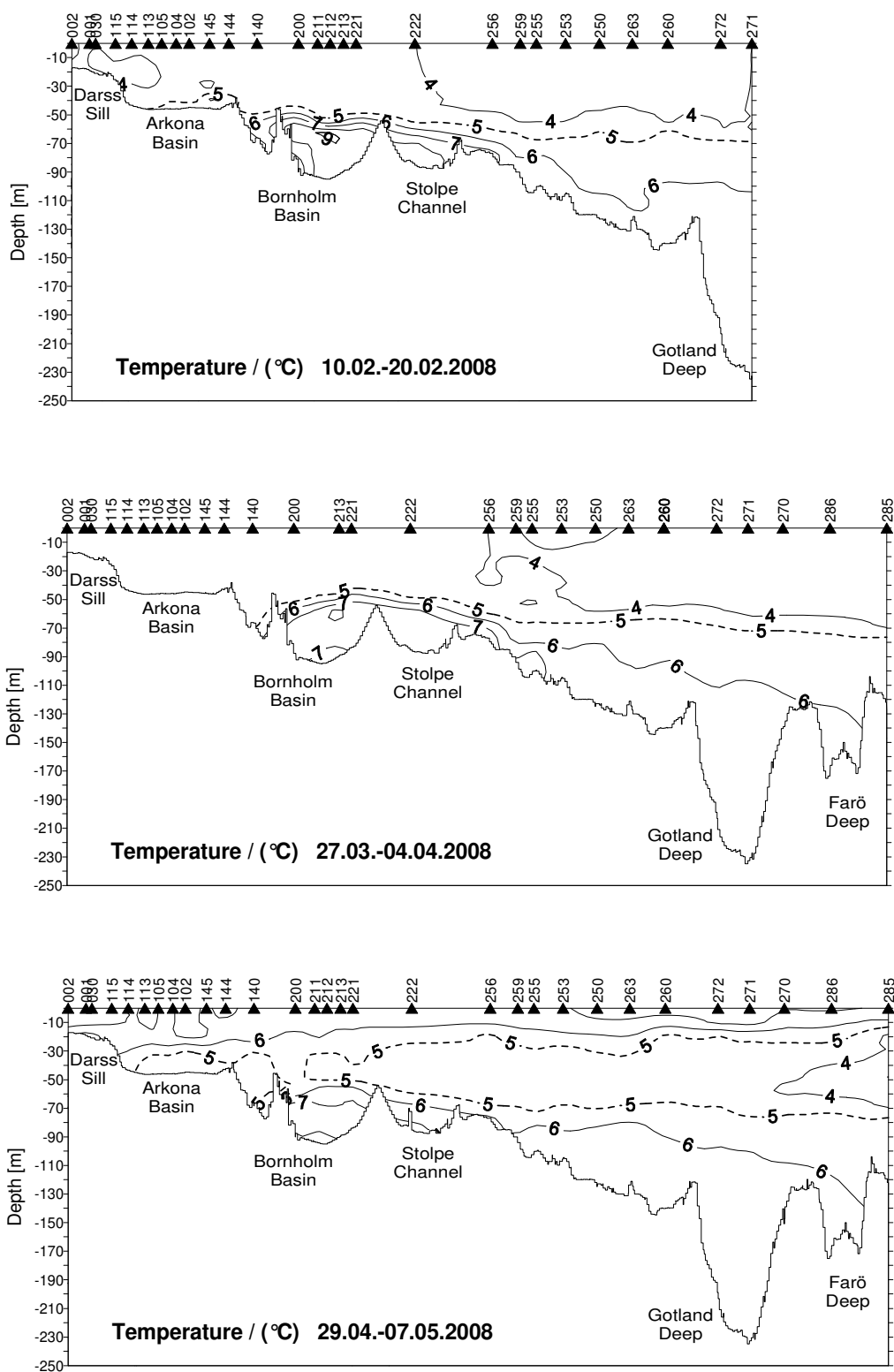


Abb. 20

Vertikale Verteilung der Wassertemperatur zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 20

Vertical water temperature distribution between Darss Sill and northern Gotland Basin

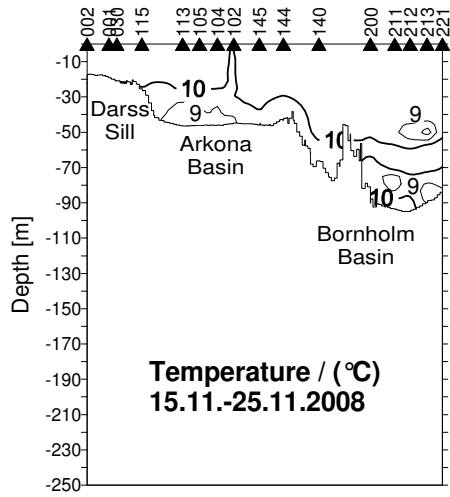
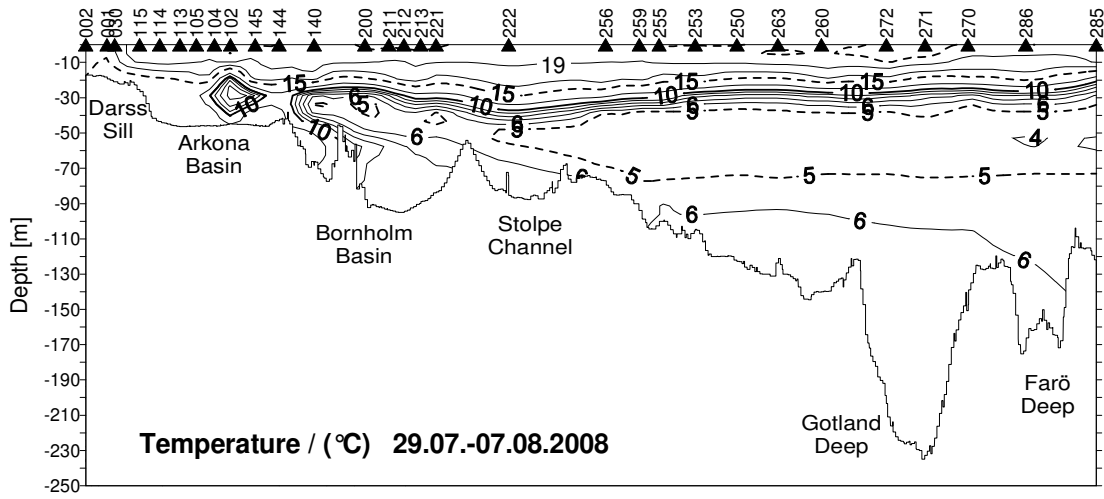


Abb. 20 Forts.

Vertikale Verteilung der Wassertemperatur zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 20 cont

Vertical water temperature distribution between Darss Sill and northern Gotland Basin

Tab. 5

Jahresmittelwerte und Standardabweichungen ausgewählter hydrographischer Parameter im Tiefenwasser der zentralen Ostsee: IOW sowie SMHI- Daten (n= 9-22)

Table 5

Annual means and standard deviations of selected hydrographic parameters in the deep water of the central Baltic Sea: IOW- and SMHI data (n= 9-22)

Wassertemperatur (°C; Maximalwerte hervorgehoben)

Station	Tiefe/m	2004	2005	2006	2007	2008
213 (Bornholmtief)	80	5,83 ± 1,18	7,20 ± 0,15	8,26 ± 0,80	8,95 ± 0,36	7,92 ± 0,80
271 (Gotlandtief)	200	5,75 ± 0,22	5,91 ± 0,02	5,95 ± 0,04	6,22 ± 0,21	6,29 ± 0,01
286 (Fårötief)	150	5,75 ± 0,16	6,05 ± 0,03	6,15 ± 0,08	6,02 ± 0,05	6,11 ± 0,02
284 (Landsorttief)	400	5,66 ± 0,08	5,74 ± 0,06	5,80 ± 0,08	5,71 ± 0,04	5,70 ± 0,08
245 (Karlsötief)	100	5,06 ± 0,15 2004	5,18 ± 0,11 2005	5,16 ± 0,15 2006	5,17 ± 0,08 2007	5,24 ± 0,08

Salzgehalt (psu; Maximalwerte hervorgehoben)

Station	Tiefe/m	2004	2005	2006	2007	2008
213 (Bornholmtief)	80	17,10 ± 0,48	16,02 ± 0,21	16,21 ± 0,43	16,07 ± 0,35	15,49 ± 0,24
271 (Gotlandtief)	200	12,74 ± 0,08	12,60 ± 0,04	12,52 ± 0,04	12,61 ± 0,06	12,54 ± 0,02
286 (Fårötief)	150	12,10 ± 0,07	12,08 ± 0,05	12,01 ± 0,04	12,02 ± 0,04	11,93 ± 0,08
284 (Landsorttief)	400	10,92 ± 0,31	11,06 ± 0,06	11,05 ± 0,05	11,05 ± 0,09	11,00 ± 0,05
245 (Karlsötief)	100	9,79 ± 0,30	10,09 ± 0,21	10,17 ± 0,22	10,20 ± 0,12	10,08 ± 0,18

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

Station	Tiefe/m	2004	2005	2006	2007	2008
213 (Bornholmtief)	80	0,87 ± 0,91	-0,67 ± 0,95	0,85 ± 0,49	0,46 ± 0,50	1.15 ± 0.89
271 (Gotlandtief)	200	0,88 ± 0,47	-0,23 ± 0,44	-1,58 ± 0,88	-1,46 ± 0,55	-2.22 ± 0.49
286 (Fårötief)	150	0,52 ± 0,29	-0,24 ± 0,47	-1,20 ± 0,34	-0,72 ± 0,35	-1.06 ± 0.33
284 (Landsortief)	400	-0,29 ± 0,33	-0,26 ± 0,35	-0,71 ± 0,15	-0,81 ± 0,23	-1.02 ± 0.29
245 (Karlsötief)	100	-0,78 ± 0,39	-0,54 ± 0,73	-1,29 ± 0,53	-1,19 ± 0,72	-0,63 ± 0,57

6.2 Salzgehalt

Die Verteilung des Salzgehalts in der Ostsee 2008 ist in Abb. 21 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). 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 Einströme 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 2008 gab es solche Ereignisse im Bornholmbecken anscheinend mehrfach; ihr Ablauf war jedoch nicht offensichtlich und die Interpretation der gemessenen Daten ist nicht sicher. Die Änderungen im Salzgehalt des Tiefenwassers waren undramatisch; die mittlere Schwankung um 0,2 psu während des Jahres fiel eher gering aus. Ein Maximalwert von 16,3 psu trat bodennah im März auf, parallel zu einer deutlichen Abkühlung, und weist auf einen kleinen Einstrom hin, wahrscheinlich der barotrope von Ende Februar (Kapitel 2, Abb. 5). Anschließend zeigte der Salzgehalt im Tiefenwasser eine generelle langsame Verringerung, bis im Dezember wieder ein Anstieg erfolgte, diesmal von einer Erwärmung begleitet und wahrscheinlich das Ergebnis des barotropen Einstroms im warmen November (Kapitel 2, Abb. 5).

Die weiteren gemessenen Schwankungen des Salzgehalts im Bornholmbecken erscheinen eher insignifikant und sind nur schwer von dynamischen Bewegungen in der Beckenschichtung unterscheidbar. Insbesondere wurde im November eine Aussüßung der gesamten Wassersäule an der Station 213 gemessen, die wahrscheinlich lediglich als Abtasteffekt der Messung gedeutet werden muss. Mehr Einzelheiten können aus der Änderung der Temperaturverteilung geschlossen werden, Kap. 6.1.2.

Gegenüber dem jeweiligen Vormonat erhöhte Dichte- und Salzgehaltswerte wurden bei 70 m Tiefe im Bornholmbecken (IOW 213) beobachtet im Februar (um 0,3 psu), im Juni (um 0,5 psu) im Juli (um 0,6 psu), im September (um 0,7 psu), im Oktober (um 0,2 psu) und im Dezember (um 0,6 psu). Von diesen Anstiegen können die größeren den einzelnen barotropen Einstromvorgängen zugeordnet werden, die im Kapitel 2, Abb. 5, beschrieben wurden; kleinere Werte sind eventuell durch Abtastfehler des inhomogenen Wasserkörpers bedingt. Der jeweilige Anstieg des Sauerstoffgehalts in 70 m Tiefe gibt ein zeitlich verschobenes Bild, Kapitel 6.4, Abb. 22, das vermutlich mit der geringen Stärke und Geschwindigkeit der einzelnen Ereignisse zusammenhängt. Einströme hoben die normale Halokline bei 60 m auf über 50 m im Januar und März an. Weniger ausgeprägt geschah das im September und Dezember 2008.

Der mittlere Salzgehalt des bodennahen Wassers im Bornholmbecken war 2008 mit 15,49 psu unterhalb der Jahre 2004 bis 2007 mit unterschiedlicher Einstromaktivität. Bis auf das einstromarme Jahr 2005 trifft die gleiche Aussage auch auf die mittlere Schwankung des Salzgehalts in diesen Jahren zu. 2008 war diesbezüglich dem Jahr 2005 ähnlich.

Im Gotlandbecken ist die zeitliche Variabilität des Salzgehalts in einer bestimmten Tiefenstufe ein erster Indikator für das Auftreten von Einstromvorgängen, die die zentrale Ostsee erreichen. Eine solche relativ hohe Varianz wurde um 100 m Tiefe herum gefunden, während das Wasser bei 200 m die geringste Streuung im Salzgehalt seit 2004 aufweist.

Salzgehaltsschwankungen traten 2008 im Farötief (IOW 286) bei 150 m auf, deren Amplitude von 0,08 psu die der Jahre seit 2004 übersteigt, im Gegensatz z.B. zum

Bornholmbecken. Im Jahresverlauf wurde ein Maximum von 12,03 psu im Juni erreicht, danach ging der Wert bis zum Minimum von 11,69 psu im November zurück.

Die Situation im Landsorttief bei 400 m ist der im Farötief wiederum entgegengesetzt, die Variabilität 2008 von 0,05 psu zählt zu den geringsten seit 2004. Wesentlich stärker sind dagegen die Schwankungen in geringerer Tiefe, etwa bei 100 m. Die Daten deuten also darauf hin, dass in ungefähr dieser Tiefe in einer begrenzten Schicht das Wasser aus dem Gotlandbecken verdrängt und in die nachgeordneten Becken verlagert wurde.

Im Karlsötief trat bei der tiefen winterlichen Vermischung im Mai 2008, bedingt durch die schwache Halokline, eine Aussüßung um fast 0,4 psu in Bodennähe auf. Bis Dezember kehrte das Wasser jedoch wieder zurück auf Werte ähnlich denen im Januar 2008, wofür wiederum nur ein Überströmen aus den nördlicheren Becken verantwortlich sein konnte. Der Mittelwert des Salzgehalts lag unter dem der Vorjahre, die Fluktuationen waren vergleichbar. Trotz anhaltenden langsamen Zustroms von Wasser in das Becken werden hier die Salzverluste durch Vertikalaustausch nicht vollständig kompensiert.

Die mittleren Oberflächensalzgehalte, Tab. 6, vom Bornholmtief bis zum Farötief liegen in der Nähe der Werte des Vorjahrs. Auffällig ist der hohe Wert im Karlsötief, der durch die starke Winterkonvektion entstand und im Juni seinen Höchstwert von 7,28 psu erreichte, im Vergleich zu 6,86 psu noch im Januar 2008. Die Jahreswerte 2007 sind nahezu identisch mit den Langzeitmitteln 1952-2005, aber deutlich unter den Maximalwerten, die im Jahrzehnt um 1980 herum am Beginn der langen Stagnationsperiode gemessen worden waren.

Tab. 6

Jahresmittelwerte von 2004 bis 2008 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 2004 to 2008 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	2004	2005	2006	2007	2008	1952-2005
213 (Bornholmtief)	7,44 ± 0,10	7,59 ± 0,08	7,33 ± 0,10	7,58 ± 0,24	7,58 ± 0,10	7,60 ± 0,29
271 (Gotlandtief)	6,94 ± 0,36	7,20 ± 0,22	6,92 ± 0,38	7,15 ± 0,14	7,19 ± 0,25	7,26 ± 0,32
286 (Farötief)	6,78 ± 0,27	6,85 ± 0,26	6,62 ± 0,33	6,88 ± 0,22	6,85 ± 0,39	6,92 ± 0,34
284 (Landsorttief)	6,37 ± 0,37	6,60 ± 0,32	6,66 ± 0,18	6,54 ± 0,25	6,49 ± 0,37	6,75 ± 0,35
245 (Karlsötief)	6,96 ± 0,10	7,02 ± 0,22	6,96 ± 0,12	6,81 ± 0,27	7,11 ± 0,16	6,99 ± 0,32

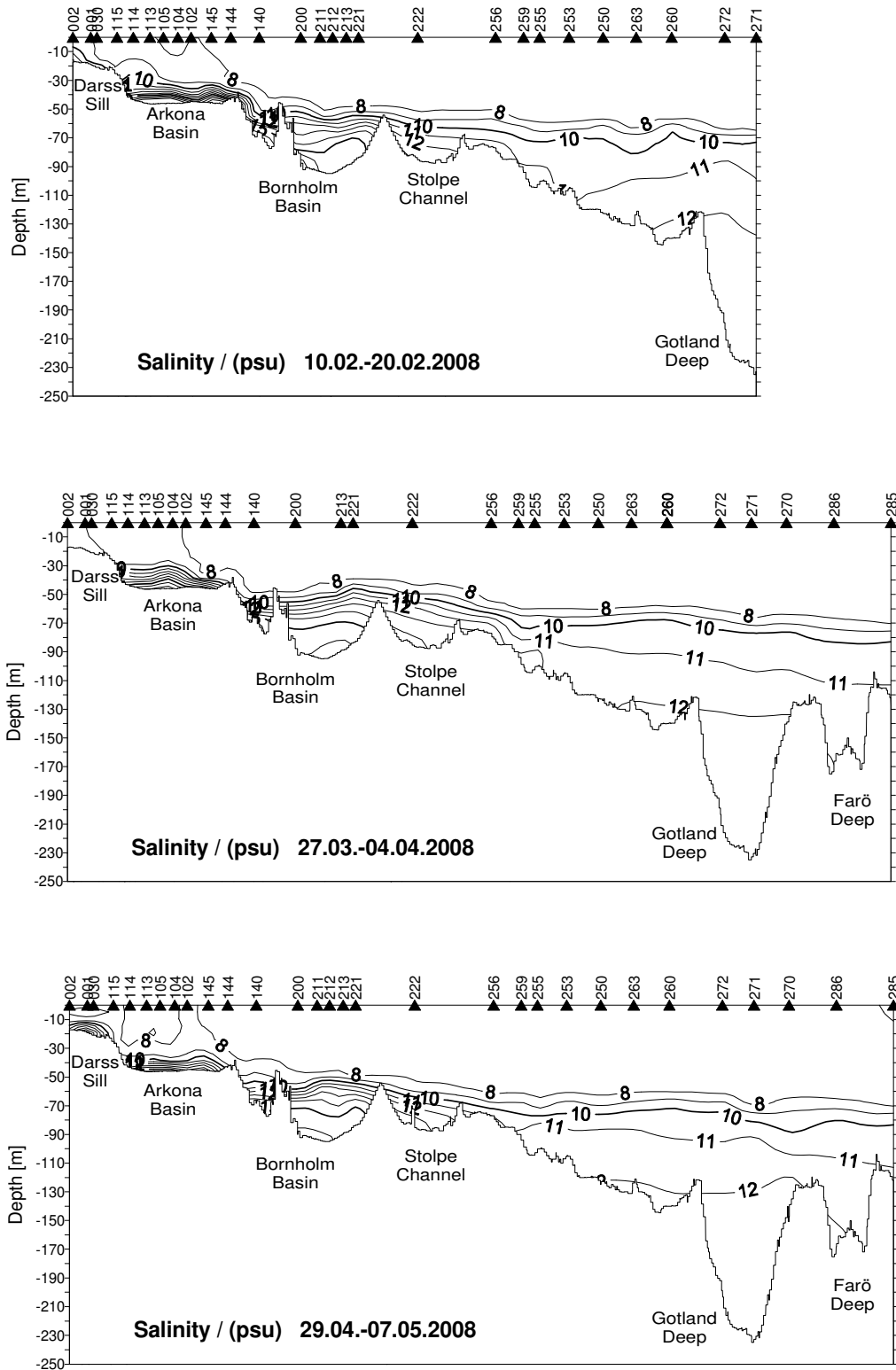


Abb. 21

Vertikale Verteilung des Salzgehaltes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 21

Vertical salinity distribution between Darss Sill and northern Gotland Basin

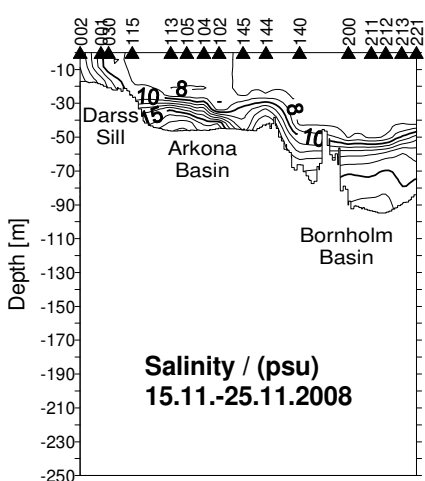
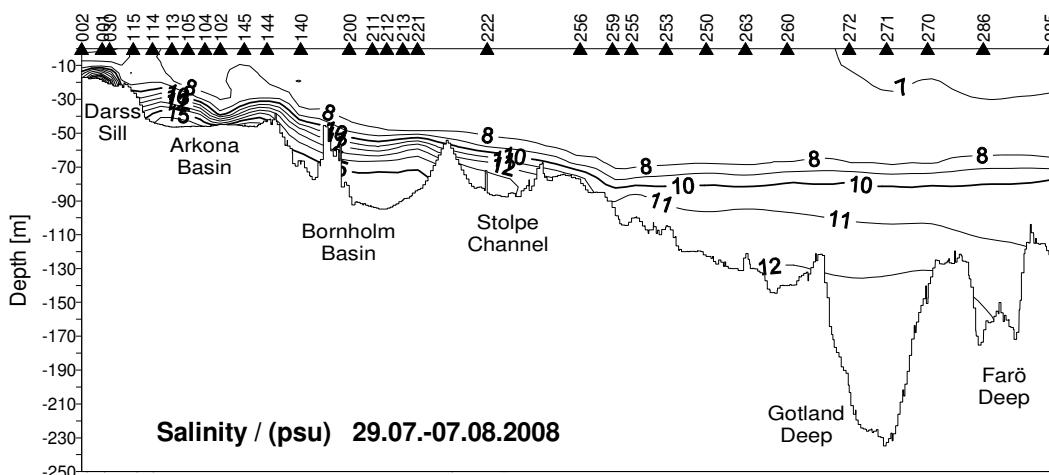


Abb. 21 Fort.

Vertikale Verteilung des Salzgehaltes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 21 cont

Vertical salinity distribution between Darss Sill and northern Gotland Basin

Die Salzgehaltsverteilungen in den Längsschnitten der Monitoringfahrten 2008, wie sie in Abb. 21 dargestellt sind, zeigten im Februar und März/April das Vordringen einer Salzfront in die Stolper Rinne und weiter von dieser in den Eingang zum südwestlichen Gotlandbecken. Im April/Mai hatte sich diese Front durch Abfließen in Richtung auf das Gotlandbecken deutlich abgeschwächt. Die Isohaline von 12 psu lag in der Stolper Rinne im März/April höher als davor und danach. Im Juli/August stieg der Salzgehalt am Boden des Arkonabeckens im Vergleich zum Frühjahr deutlich an. In der zentralen Ostsee waren im Salzgehalt des Tiefenwassers keine auffälligen Veränderungen zu beobachten. Der dortige Oberflächensalzgehalt war im Sommer verringert, was dem klimatologischen Jahresgang entspricht.

6.3 Sauerstoff und Schwefelwasserstoff

Die Sauerstoffversorgung des Oberflächenwassers kann in der Regel als gut angesehen werden. Dafür sorgen intensive Austauschvorgänge mit der Atmosphäre und die Primärproduktion in der euphotischen Zone. Die Veränderungen des Sauerstoffgehaltes werden im Wesentlichen durch die Jahrgänge von Temperatur und Salzgehalt (vgl. NAUSCH et al. 2008) und die jahreszeitlich unterschiedlich stark ausgeprägten Produktions- und Zehrungsprozesse verursacht. Im gesamten Untersuchungsgebiet, insbesondere jedoch in der westlichen Ostsee, können zusätzlich hydrodynamische Prozesse eine wesentliche Rolle spielen. Unterhalb permanenter oder temporärer Sprungschichten, die durch Temperatur- und/oder Salzgehaltgradienten entstehen, kann es dagegen zu einer erheblichen Sauerstoffzehrung kommen, da diese Wasserschichten nicht durchlichtet sind, folglich nur Zehrungsprozesse stattfinden. Dies wird aus Abb. 23 ersichtlich, die einen Schnitt von der Darßer Schwelle bis ins nördliche Gotlandbecken für die durchgeführten Fahrten zeigt.

In der durchmischten Oberflächenschicht kann ein typischer Jahrgang des Sauerstoffgehaltes beobachtet werden (MATTHÄUS, 1978, NAUSCH et al. 2008). Dies kann am Beispiel der Gotlandsee gezeigt werden (Abb. 22). Die hohe Sauerstofflöslichkeit bei niedrigen Temperaturen führt bis in den Mai hinein zu hohen Sauerstoffkonzentrationen. Die Frühjahrsblüte des Phytoplanktons führt zu einem zusätzlichen Sauerstoffeintrag. Der rasche Temperaturanstieg ab Mitte Mai verringert die Sauerstofflöslichkeit deutlich, so dass im Sommer nur noch Konzentrationen zwischen 6 und 7 ml/l gemessen werden. Die herbstliche Abkühlung führt zu einer erneuten Zunahme des Sauerstoffgehaltes (Abb. 22).

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. 22). Der typische Jahrgang wird deutlich. Im Februar verursachte die nur sehr geringe Produktion und die Dominanz von Zehrungsprozessen eine leichte Untersättigung. Die Frühjahrsblüte führte zu einer Zunahme des Sauerstoffgehaltes, die Sättigung stieg über 100 %. Die Blüte begann zunächst in der westlichen Ostsee und trat in Abhängigkeit von der Witterungssituation deutlich später in der zentralen Ostsee auf. So konnte am 3. Mai 2008 eine extreme Blüte im östlichen Gotlandbecken beobachtet werden. Der Sauerstoffgehalt lag bei 10,05 ml/l, die Sättigung bei 125,8 %.

Diese Befunde können durch biologische Untersuchungen bestätigt werden (WASMUND et al. 2009). Es wurde ein extrem hoher Chlorophyllgehalt von 16,13 mg/m³ gefunden, die Phytoplanktonbiomasse (Frischmasse) betrug 4440 mg/m³. Die Blüte wurde einerseits von den traditionellen Dinoflagellaten bestimmt (*Peridiniella catenata* – 1841 mg/m³) Daneben wurde eine starke Blüte von *Chrysochromulina* spp. mit Abundanzen von 15 Mill. Zellen/l und Biomassen von 2069 mg/m³ gefunden, die in dieser Intensität bisher nicht beobachtet wurde (WASMUND et al. 2009). Diese Blüten sind kurzfristige Ereignisse. So lag die Sauerstoffsättigung 12 Tage später bereits bei nur 111 %. Es ist hervorzuheben, dass in der Bornholmsee und Gotlandsee wiederum keine Frühjahrs-Kieselalgenblüte nachgewiesen werden konnte, obgleich ausreichende Silikatkonzentrationen vorhanden waren (NAUSCH et al. 2008). Die Blüte der Cyanobakterien Anfang Juli führt nochmals zu hohen Sauerstoffkonzentrationen (116.8 %). Mit abnehmender Temperatur stiegen die Sauerstoffkonzentrationen zu Herbst/Winter hin wieder an, die Sättigung fiel dann aber auf Grund der Dominanz sauerstoffzehrender Prozesse wieder unter 100 % (Abb. 22).

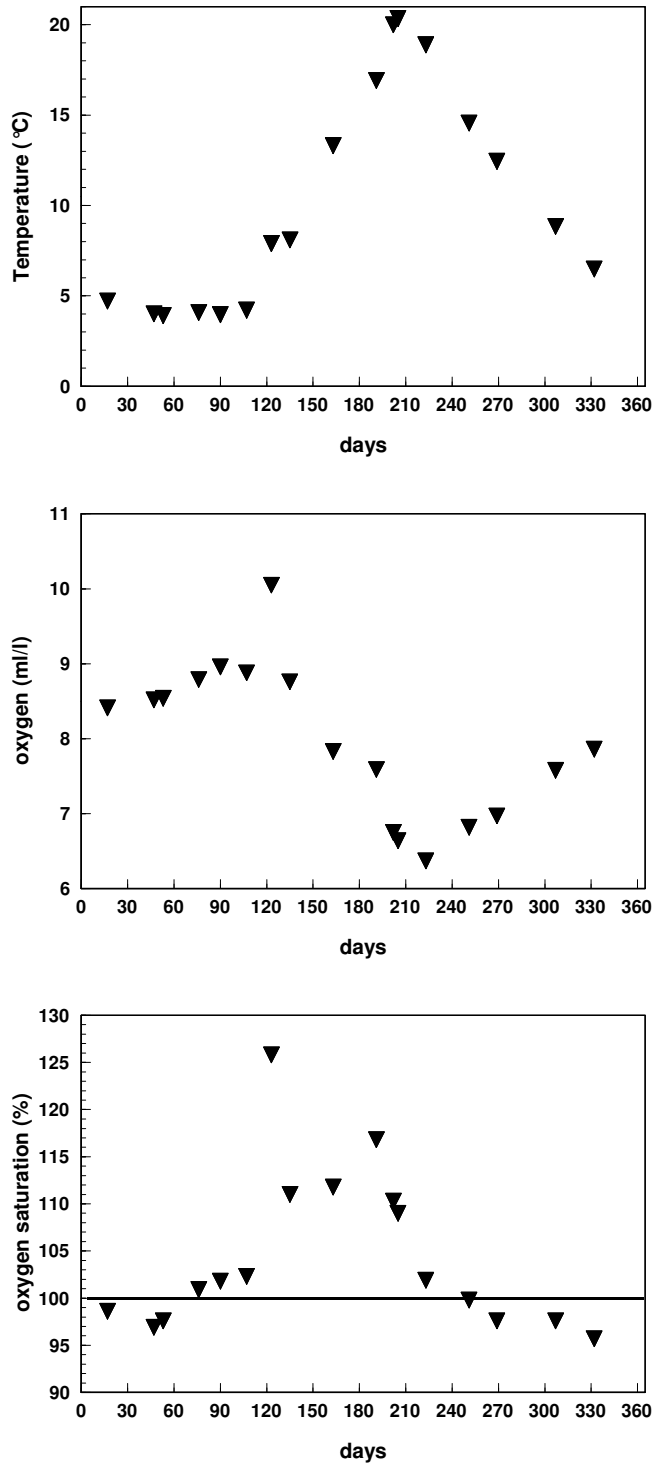


Abb. 22

Jahresgang von Temperatur, Sauerstoff und Sauerstoffsättigung im Oberflächenwasser (0 – 10m) im östlichen Gotlandbecken im Jahr 2008 (nach Daten des IOW und des SMHI)

Fig. 22

Annual cycle of temperature, oxygen and oxygen saturation in the surface layer (0 – 10 m) in the eastern Gotland Sea in 2008 (based on IOW and SMHI data)

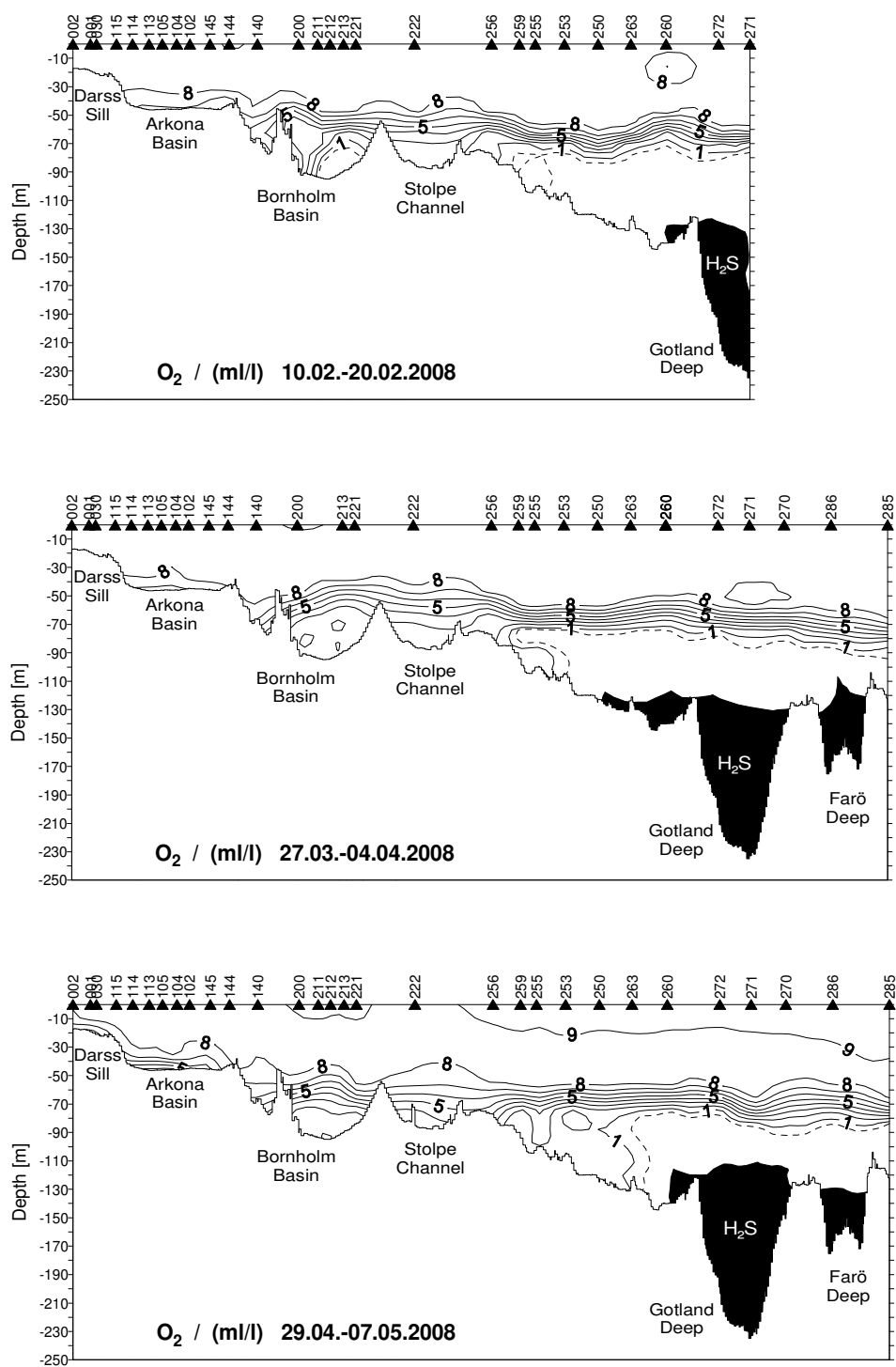


Abb. 23

Vertikale Verteilung des Sauerstoffgehaltes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 23

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

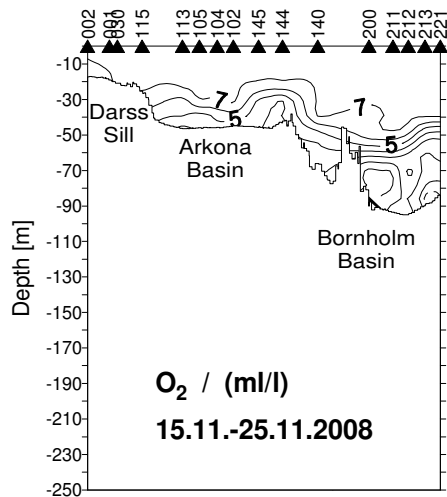
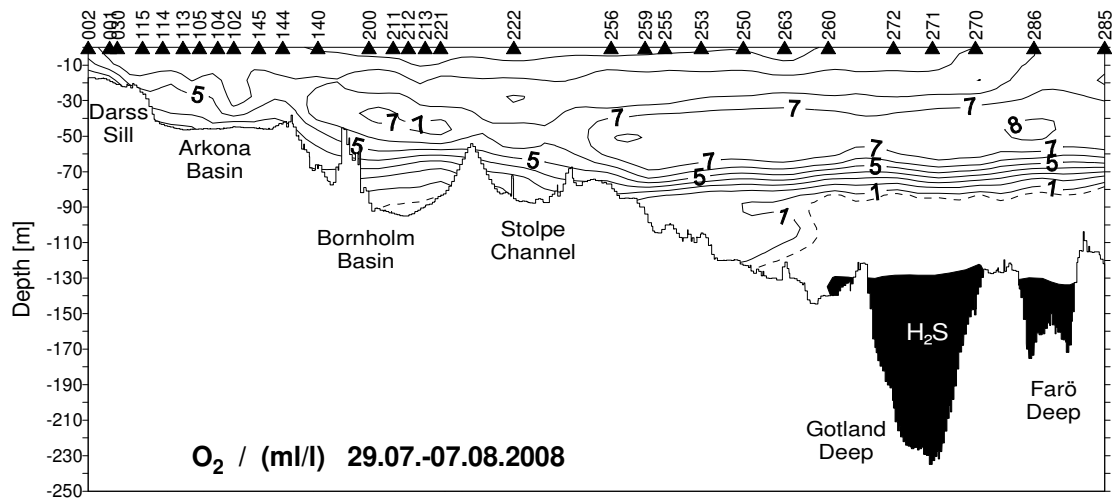


Abb. 23 Forts.

Vertikale Verteilung des Sauerstoffgehaltes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 23 cont

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

Der Salzwassereintrich vom Januar 2003 war das letzte starke Einstromereignis in die Ostsee. Die tiefen Becken wurden zusätzlich von einem baroklinen warmen Sommereinstrom im Jahr 2003 beeinflusst. Die Effekte dieser Ereignisse auf den Sauerstoffhaushalt waren ab 2005 kaum noch spürbar. In Verbindung mit dem Abbau organischer Substanzen führt dies zu einer Zunahme der Schwefelwasserstoffkonzentrationen im Tiefenwasser.

Ähnlich wie im Vorjahr (NAUSCH et al. 2008) konnten jedoch 3 kleinere barotrope Einstromsignale, im Februar/März (kalt), im August/September (warm) und im November/Dezember 2008 (warm) im Bornholmbecken festgestellt werden, deren Auswirkungen sich in einem Fall in Temperatur- und Salzgehaltssignalen bis zum Gotlandtief verfolgen ließ. Der Einstrom vom Februar/März schichtete sich zwischen Juli und Oktober 2008 in 125 m Tiefe im Gotlandtief ein. Der warme Einstrom vom November 2008 zeigte ein kräftiges warmes Signal im Bornholmbecken im November/Dezember, seine Auswirkung auf die zentrale Ostsee konnte erst im März 2009 beobachtet werden (JÜRGENS, 2009) (vgl. Kapitel 6.1.2). Die Dichte des einströmenden Wasser war jedoch zu gering, um eine Belüftung des Tiefenwassers in der zentralen Ostsee zu ermöglichen.

Anders stellt sich die Situation im Tiefenwasser des Bornholmbeckens dar. Fehlende Einstromimpulse nach den starken Einstromprozessen des Jahres 2003 führten zu einem kontinuierlichen Rückgang der Sauerstoffkonzentration bis zum Jahr 2005. In 80 m Wassertiefe betrug der Jahresmittelwert $-0,67$ ml/l (Tab. 5). Vorwiegend barokline Einstromereignisse konnten die Sauerstoffsituation im Bodenwasser in den folgenden Jahren wieder verbessern. So wurden auch 2008 fast durchweg oxische Verhältnisse gefunden. Nur bei einer von 21 Beprobungen (13. Februar) wurden kurzzeitig geringe Mengen von Schwefelwasserstoff gemessen. Der Jahresmittelwert des Sauerstoffgehaltes von $1,15$ ml/l ist der höchste nach 2003, dem Jahr des letzten großen Salzwassereinbruchs. Die hohe Standardabweichung des Jahresmittelwertes (Tab. 5) lässt jedoch auf ein sehr dynamisches Geschehen schließen, das mit dem diskreten Beprobungen im Detail nicht erfasst werden kann. Die gleiche hohe Variabilität wird für die Temperatur beschrieben.

Im Tiefenwasser des östlichen Gotlandbeckens hält die Stagnationsperiode an. So fiel der Jahresmittelwert der Schwefelwasserstoffkonzentration im 200 m - Horizont, ausgedrückt als negativer Sauerstoff von $-0,23$ ml/l (2005) kontinuierlich auf $-2,22$ ml/l (Tab. 5). Lediglich im Frühjahr 2007 konnte ein kleiner barokliner Einstrom das Tiefenwasser kurzzeitig mit geringen Mengen Sauerstoff ($0,02 - 0,04$ ml/l) versorgen. Dieses Einstromereignis hatte jedoch keine nachhaltige Wirkung, führte aber dazu, dass der Jahresmittelwert 2007 etwas geringer ausfiel (Tab. 5). Die oben erwähnten baroklinen Einströme des Jahres 2008 hatten eine zu geringe Dichte und konnten das Tiefenwasser nicht beeinflussen. Es ist weiterhin erwähnenswert, dass die Wasserschicht zwischen Halokline und Redoxcline nur sehr geringe Sauerstoffkonzentrationen aufweist. Dies hat deutliche Auswirkungen auf den Nährstoffgehalt dieser Schicht und kann gravierende Folgen für die Nährstoffversorgung der winterlichen Deckschicht haben (REISSMANN et al. 2009).

Im westlichen Gotlandbecken machen sich Salzwassereinbrüche deutlich verzögerter und in gedämpfter Form bemerkbar. Wie aus Tab. 5 ersichtlich, nahm die Schwefelwasserstoffkonzentration im Landsorttief in den letzten 5 Jahren kontinuierlich zu. Die niedrigen Standardabweichungen sprechen für eine geringe Dynamik. Die gesamte Wassersäule zwischen 100 m und dem Boden ist anoxisch.

Etwas anders stellt sich die Situation im südlicher gelegenen Karlsötief dar. Wenngleich das Tiefenwasser im Jahresverlauf weitgehend frei von Sauerstoff war, konnten im Winter/Frühjahr zwei bis zum Boden reichende Belüftungsereignisse gefunden werden. Ähnliches wurde bereits 2007 beobachtet. Starke vertikale Durchmischung während der Winterkonvektion kann für diese ungewöhnlichen und nicht erwarteten Beobachtungen verantwortlich gemacht werden (FEISTEL, 2008).

Auch in den flacheren Gewässern der westlichen Ostsee kommt es im Jahresverlauf häufig zu starken Untersättigungen in Bodennähe, die jedoch temporärer Natur sind. Im Winter, während der Beprobungen im Februar und März, findet häufig eine tief greifende vertikale Durchmischung statt, eine stabile Schichtung kann sich in der Regel nicht aufbauen. So liegt die Sättigung, besonders in der westlichen Ostsee, nur relativ wenig unter der des Oberflächenwassers. Mit der Entwicklung einer stabilen thermohalinen Schichtung ab dem Frühjahr wird das Tiefenwasser weitgehend von der vertikalen Konvektion ausgeschlossen und die Sauerstoffsättigung des Bodenwassers nimmt auf Grund des Abbaus der organischen Substanz ab. Die niedrigsten Sättigungswerte werden im Spätsommer/Frühherbst ermittelt (Tab. 7). Im Spätherbst führt die Abkühlung des Oberflächenwassers mit dem häufigeren Auftreten von Sturmereignissen schrittweise zu einer Durchmischung bis zum Boden, so dass die Sauerstoffsättigungswerte sich wieder dem Oberflächenwasser annähern. Genauere Aussagen zur jahreszeitlichen Entwicklung von Sauerstoffgehalt und -sättigung können den Registrierungen am Messmast „Darßer Schwelle“ (vgl. Kapitel 3) entnommen werden.

Tab. 7

Sauerstoffsättigung in Bodennähe in der westlichen Ostsee im Jahr 2008

Table 7

Oxygen saturation in the bottom near layer of the western Baltic Sea in 2008

	Tiefe (m)	Februar	März	Mai	August	November
westl. Ostsee						
Sättigung (%)	23.6	94.4	89.0	79.0	51.3	82.5
Stabw. (%)	3.4	1.9	3.6	10.7	7.2	9.3
n		4	5	5	5	5

Die Periode größter Sauerstoffverarmung in Bodennähe wird in der Regel im September beobachtet. Dieser Zeitraum wird durch unsere Probennahmen nicht abgedeckt. Zur Beschreibung dieses Zeitraums können jedoch Untersuchungen des Landesamtes für Natur und Umwelt Schleswig-Holstein (LANU) für die westliche Ostsee herangezogen werden. Das LANU führt seit 2001 flächenhafte Aufnahmen der Sauerstoffsituation im Spätherbst durch. Im Jahr 2008 fand diese Aufnahme vom 10. – 24. September statt, wobei 44 Stationen, davon 34 mit einer Wassertiefe von > 15 m untersucht wurden. Die Ergebnisse sind in Abb. 24 dargestellt. Im Tiefenwasser wiesen 62 % aller Messwerte einen Sauerstoffgehalt < 2 mg/l = 1.40 ml/l auf. Im Jahr 2007 war dieser Anteil mit 43 % deutlich geringer (LANU 2008). Der Sauerstoffmangel erweist sich aber insgesamt als nicht so weit verbreitet wie im Jahr 2002 (HELCOM 2003, NAUSCH et al. 2003).

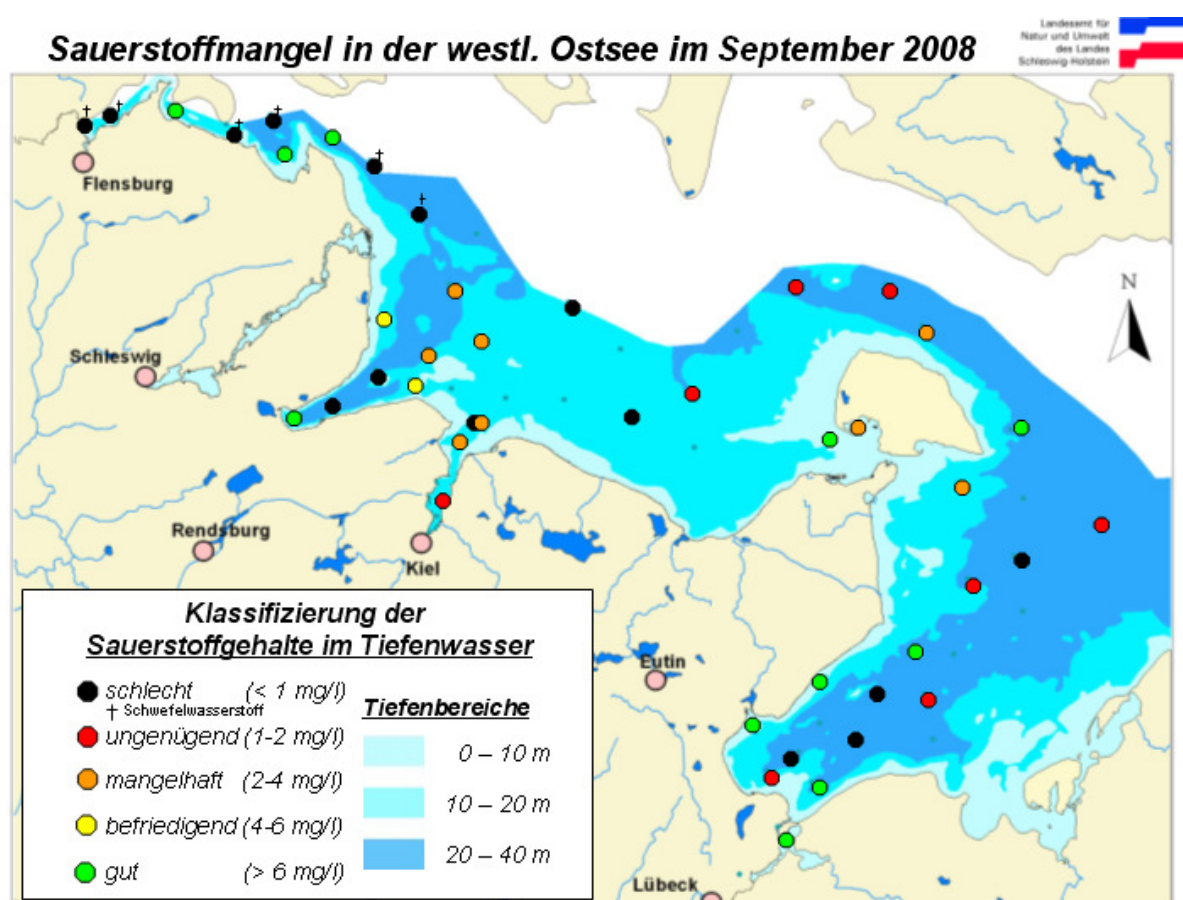


Abb. 24

Sauerstoffmangel in der westlichen Ostsee im September 2008 (LANU 2008) –
mg/l x 0.7005 = ml/l

Fig. 24

Oxygen deficiency in the western Baltic Sea in September 2008 (LANU 2008)
mg/l x 0.7005 = ml/l

6.4 Anorganische Nährstoffe

Weltweit stellt die Eutrophierung nach wie vor eines der ernstesten Probleme der Umweltbelastung dar (GIWA, 2003). Der Begriff Eutrophierung wird „als die erhöhte biologische Produktivität des Gewässers als Ergebnis der verstärkten Zufuhr von Pflanzennährstoffen (Phosphor- und Stickstoffverbindungen), hauptsächlich verursacht durch anthropogene Aktivitäten in den Einzugsgebieten“ definiert (EUTROSYM, 1976). In der jüngsten Einschätzung des Eutrophierungszustandes der Ostsee (HELCOM, 2009) wurden insgesamt 189 Gebiete bzw. Stationen klassifiziert, davon waren 17 offene Seegebiete und 172 Küsteareale. Von den offenen Seegebieten wurden lediglich die Bottenwiek und der schwedische Teil des nordöstlichen Kattegat als nicht von Eutrophierung betroffen klassifiziert. Die offenen Seegebiete aller anderen Ostseebecken sind eutrophiert. Von den 172 Küstenarealen befinden sich nur 11 in einem guten Zustand, d.h. nicht von Eutrophierung betroffen. Alle diese Gebiete befinden sich im Bottnischen Meerbusen. Die restlichen 161 Küstengebiete sind z.T. sehr stark von Eutrophierung beeinflusst. Auch die 9 in der deutschen AWZ klassifizierten offenen Seegebiete und Küstenzonen befinden sich in einem moderaten bis schlechten Eutrophierungszustand.

Die Beschreibung der Nährstoffsituation gehört 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 und NEHRING, 1996). Abb. 24 zeigt dies für das östliche Gotlandbecken. In der zentralen Ostsee bildet sich im Winter eine typische Plateauphase aus, die in Abhängigkeit vom Witterungsverlauf über 2-3 Monate anhalten sein kann (NAUSCH et al., 2008). In der westlichen Ostsee und im Arkonabecken setzt dagegen die Frühjahrsblüte des Phytoplanktons deutlich früher ein, so dass ein stabiles Winterplateau kaum sichtbar wird. Schon Mitte April 2008 war das Nitratreservoir vollständig erschöpft (Abb. 25), während noch ausreichend Phosphat vorhanden war. Nachdem Nitrat völlig aufgebraucht war, brach die Frühjahrsblüte auf Grund der Stickstofflimitation zusammen. Die Phosphatkonzentrationen gingen dagegen erst allmählich zurück und erreichten im Sommer die Nachweisgrenze, häufig verursacht durch eine intensive Cyanobakterienblüte. Die geringe Datendichte beschreibt diese Phase des Jahresganges nur ungenügend. Im Herbst kam es infolge der verstärkten Mineralisation der organischen Substanz zu einem langsamen Anstieg der Nährstoffkonzentrationen, wobei die Zunahme des Phosphatpools deutlich eher als die des Nitratpools erfolgte. Ende Februar des Folgejahres wurden wieder die Winterkonzentrationen erreicht. Bemerkenswert ist, dass die Nährstoffkonzentrationen des Oberflächenwassers im November in der westlichen Ostsee schon sehr hohe Werte erreichten. So lagen die Phosphatwerte schon zwischen 0.60 – 0.70 $\mu\text{mol/l}$, was typisch für die Wintersituation ist (vgl. Tab. 8). Ammoniumwerte um 1

$\mu\text{mol/l}$ deuten ebenfalls auf starke Abbauprozesse hin. In den übrigen Untersuchungsgebieten lagen sie im normalen Konzentrationsbereich.

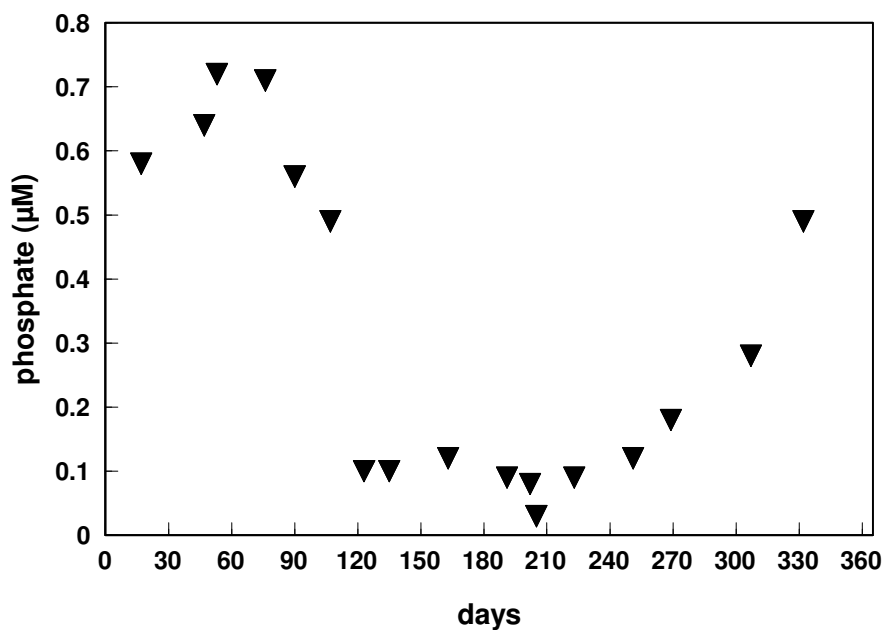
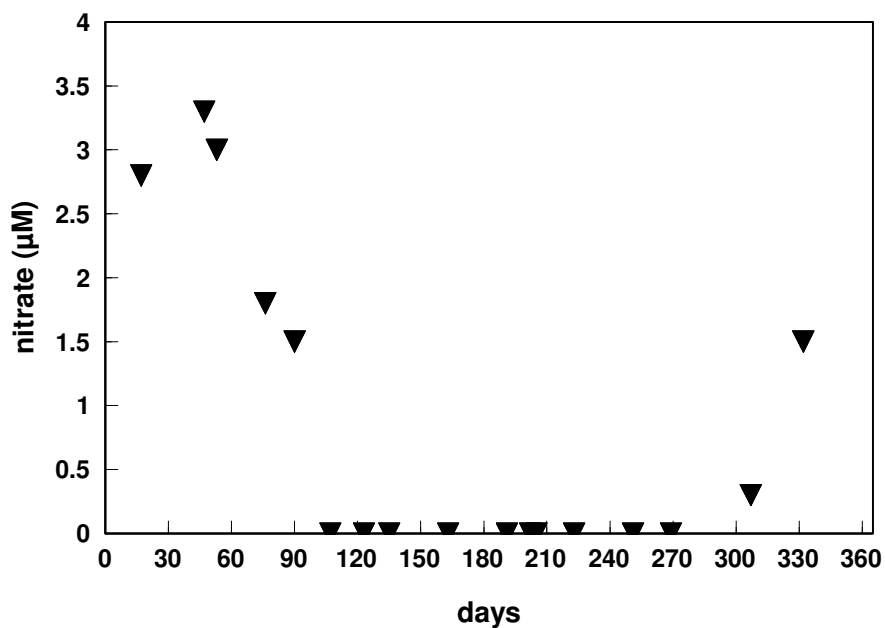


Abb. 25

Nitrat- und Phosphatjahresgang 2008 im Oberflächenwasser (0 – 10 m) der östlichen Gotlandsee (Station 271) – nach Daten des IOW und des SMHI

Fig. 25

Annual nitrate and phosphate cycles 2008 in the surface layer (0 – 10 m) of the eastern Gotland Sea (station 271) – based on IOW and SMHI data

Die fehlende typische winterliche Plateauphase erschwert in der westlichen Ostsee auch die Ableitung von langfristigen Nährstofftrends wie dies für die zentrale Ostsee möglich ist. Milde und sonnenreiche Winter können durchaus schon im Februar zum Einsetzen der Frühjahrsblüte führen. So können die in Tab. 8 zusammengefassten Nährstoffkonzentrationen für dieses Seegebiet auch nur einen groben Überblick über die Nährstoffsituation geben. So zeigen die in der Regel während der Februarfahrt doppelt beprobten Stationen teilweise starke Variationen im Nährstoffgehalt innerhalb weniger Tage. Auch die intensive Hydrodynamik dieses Seegebietes beeinflusst den Nährstoffstatus erheblich. Offensichtlich ist jedoch, dass die Phosphatkonzentrationen in der westlichen Ostsee (Stationen 360, 022, 012) 2008 deutlich über dem 5-Jahresmittel lagen, während sie im Bereich der Darßer Schwelle (Station 30) und in der Arkonasee (Station 113) im Durchschnitt lagen. Recht hohe Nitratwerte in der westlichen Ostsee stehen unterdurchschnittlichen Nitratwerten in der Arkonasee und im Durchschnitt liegenden Werten an den anderen Zentralstationen gegenüber. Deutlich sind auch die Unterschiede in den N/P-Verhältnissen. Die in Richtung Beltsee gelegene Station 360 und die von der Lübecker Bucht beeinflusste Station 022 wiesen vergleichsweise hohe N/P-Verhältnisse auf, wenn gleich sie noch deutlich unter dem Redfield-Verhältnis von 16:1 lagen (REDFIELD et al., 1963). Die Station 012 in der Mecklenburger Bucht stellt einen Übergang zu den Seegebieten östlich der Darßer Schwelle dar, wo die typischen sehr niedrigen N/P-Verhältnisse beobachtet wurden (NAUSCH et al., 2008).

Tab. 8

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

Table 8

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

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

Station	Monat	2004	2005	2006	2007	2008
360 (Fehmarnbelt)	Feb.	0,44 ± 0,01	0,50 ± 0,02	0,76 ± 0,00	0,70 ± 0,0	0,78 ± 0,00
023 / 022* (Lübecker Bucht)	Feb.	0,52 ± 0,02	0,70 ± 0,02	0,93 ± 0,01	0,62 ± 0,00	0,74 ± 0,01
012 (Meckl. Bucht)	Feb.	0,52 ± 0,03	0,69 ± 0,01	0,82 ± 0,01	0,57 ± 0,00	0,81 ± 0,00
113 (Arkonasee)	Feb.	0,35 ± 0,01	0,81 ± 0,10	0,79 ± 0,00	0,81 ± 0,01	0,62 ± 0,00
213 (Bornholmtief)	Feb.	0,49 ± 0,02	1,01 ± 0,14	0,79 ± 0,01	0,80 ± 0,04	0,74 ± 0,00
271 (Gotlandtief)	Feb.	0,68 ± 0,01	0,76 ± 0,01	0,44 ± 0,00	0,56 ± 0,00	0,64 ± 0,00
286 (Fårötief)	Feb.	0,66 ± 0,01	0,74 ± 0,01	0,53 ± 0,00	0,56 ± 0,02	**
284 (Landsortief)	Feb.	0,83 ± 0,01	0,77 ± 0,01	0,59 ± 0,00	0,70 ± 0,02	** -
245 (Karlsötief)	Feb.	0,80 ± 0,00	1,00 ± 0,01	0,60 ± 0,01	0,76 ± 0,00	**

* ab 2005 ** konnte wegen Schlechtwetter nicht angefahren werden

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

Station	Monat	2004	2005	2006	2007	2008
360 (Fehmarnbelt)	Feb.	5,1 \pm 0,01	3,9 \pm 0,1	3,1 \pm 0,0	8,6 \pm 0,0	6,5 \pm 0,0
023 / * 022 (Lübecker Bucht)	Feb.	9,6 \pm 0,3	3,7 \pm 0,0	4,2 \pm 0,1	9,6 \pm 0,5	6,6 \pm 0,0
012 (Meckl. Bucht)	Feb.	5,3 \pm 0,2	2,9 \pm 0,0	3,5 \pm 0,0	6,5 \pm 0,1	7,8 \pm 0,0
113 (Arkonasee)	Feb.	2,4 \pm 0,0	2,8 \pm 0,4	3,3 \pm 0,0	4,0 \pm 0,2	2,7 \pm 0,0
213 (Bornholmtief)	Feb.	2,4 \pm 0,0	3,0 \pm 0,2	2,2 \pm 0,0	3,1 \pm 0,1	3,5 \pm 0,0
271 (Gotlandtief)	Feb.	2,8 \pm 0,0	3,2 \pm 0,0	2,8 \pm 0,0	2,9 \pm 0,0	3,3 \pm 0,0
286 (Färötief)	Feb.	3,0 \pm 0,0	3,8 \pm 0,0	3,6 \pm 0,0	3,3 \pm 0,1	**
284 (Landsorttief)	Feb.	3,0 \pm 0,0	3,9 \pm 0,0	3,1 \pm 0,0	4,4 \pm 0,0	**
245 (Karlsötief)	Feb.	2,6 \pm 0,0	3,3 \pm 0,0	2,8 \pm 0,0	3,6 \pm 0,0	**

*** ab 2005 ** konnte wegen Schlechtwetter nicht angefahren werden**

Die für die Ostsee typische Vertikalverteilung der Nährstoffe kann erneut am Beispiel der östlichen Gotlandsee diskutiert werden (Abb. 26). Durch die winterliche Konvektion fanden sich zu dieser Jahreszeit von der Oberfläche bis zur Halokline recht einheitliche, hohe Konzentrationen für Phosphat und Nitrat. Auch die Temperatur zeigte keine wesentlichen Gradienten (Abb. 26A). Das Nitrat wurde durch die Frühjahrsblüte des Planktons sehr rasch verbraucht (siehe oben). Dadurch war die Wassersäule bis zur Halokline weitgehend nitratverarmt bevor sich eine stabile Temperaturschichtung aufbauen kann (Abb. 26B, C). Erst im Bereich der Halokline und darunter steigen die Konzentrationen stark an. Wenn sich im späteren Frühjahr eine stabile Thermokline bildet, ist Phosphat noch in höheren Konzentrationen vorhanden. Diese blieben im kalten winterlichen Zwischenwasser während des gesamten Sommers erhalten, da in dieser Wasserschicht nur eine geringe Produktivität herrschte (Abb. 26D). Episodische Auftriebsprozesse können dieses phosphatreiche, aber nitratarme Zwischenwasser bei entsprechenden Windverhältnissen an die Oberfläche transportieren und Planktonblüten, insbesondere von Cyanobakterien fördern (LASS et al. 2009, NAUSCH et al. 2009).

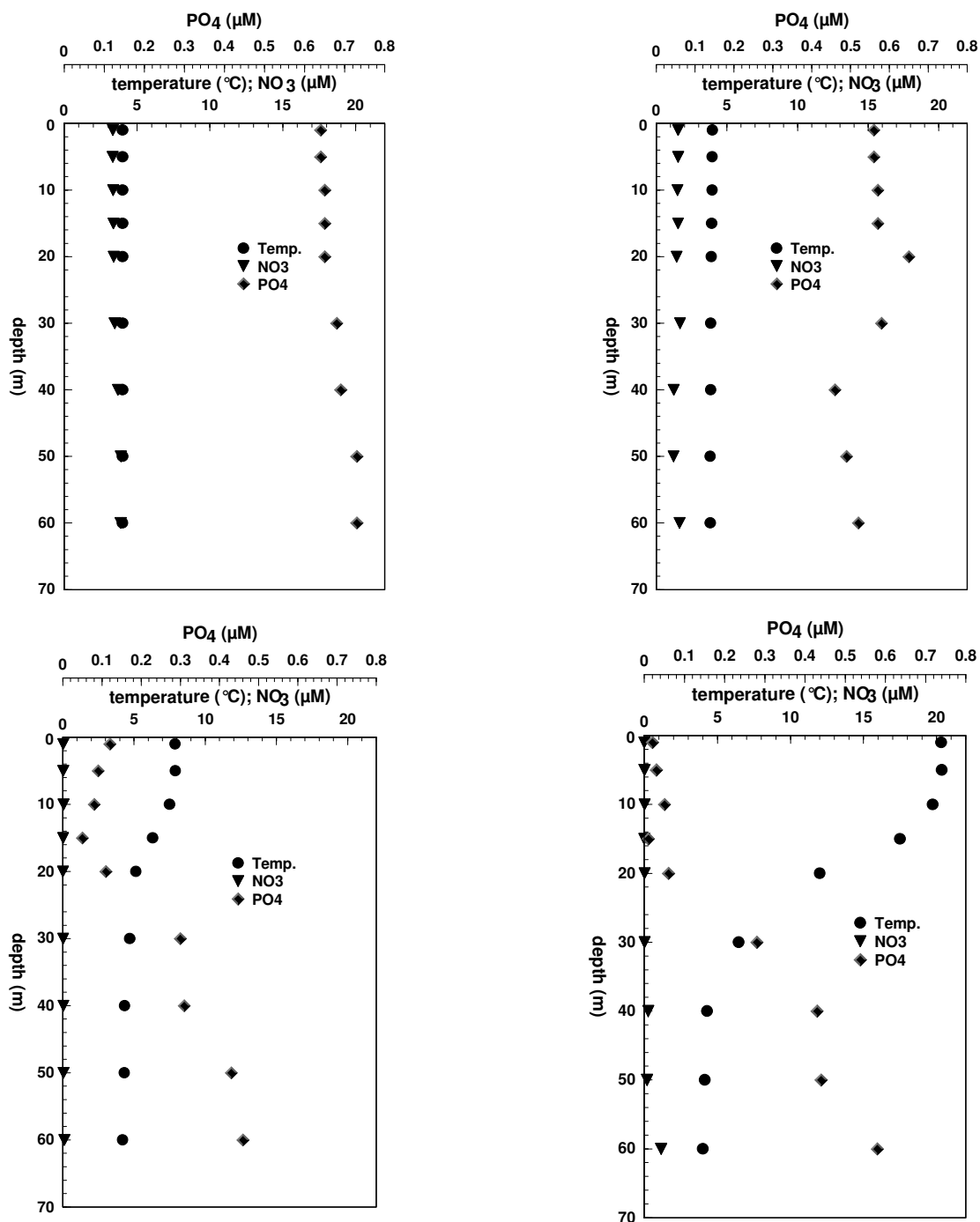


Abb. 26

Vertikalverteilung von Temperatur, Nitrat und Phosphat im östlichen Gotlandbecken (Station 271); links oben: Februar 2008; oben rechts: März 2008; links unten: Mai 2008; unten rechts: August 2008

Fig. 26

Vertical distribution of temperature, nitrate and phosphate in the eastern Gotland Basin (station 271), upper left: February 2008; upper right: March 2008; lower left: May 2008; lower right: August 2008

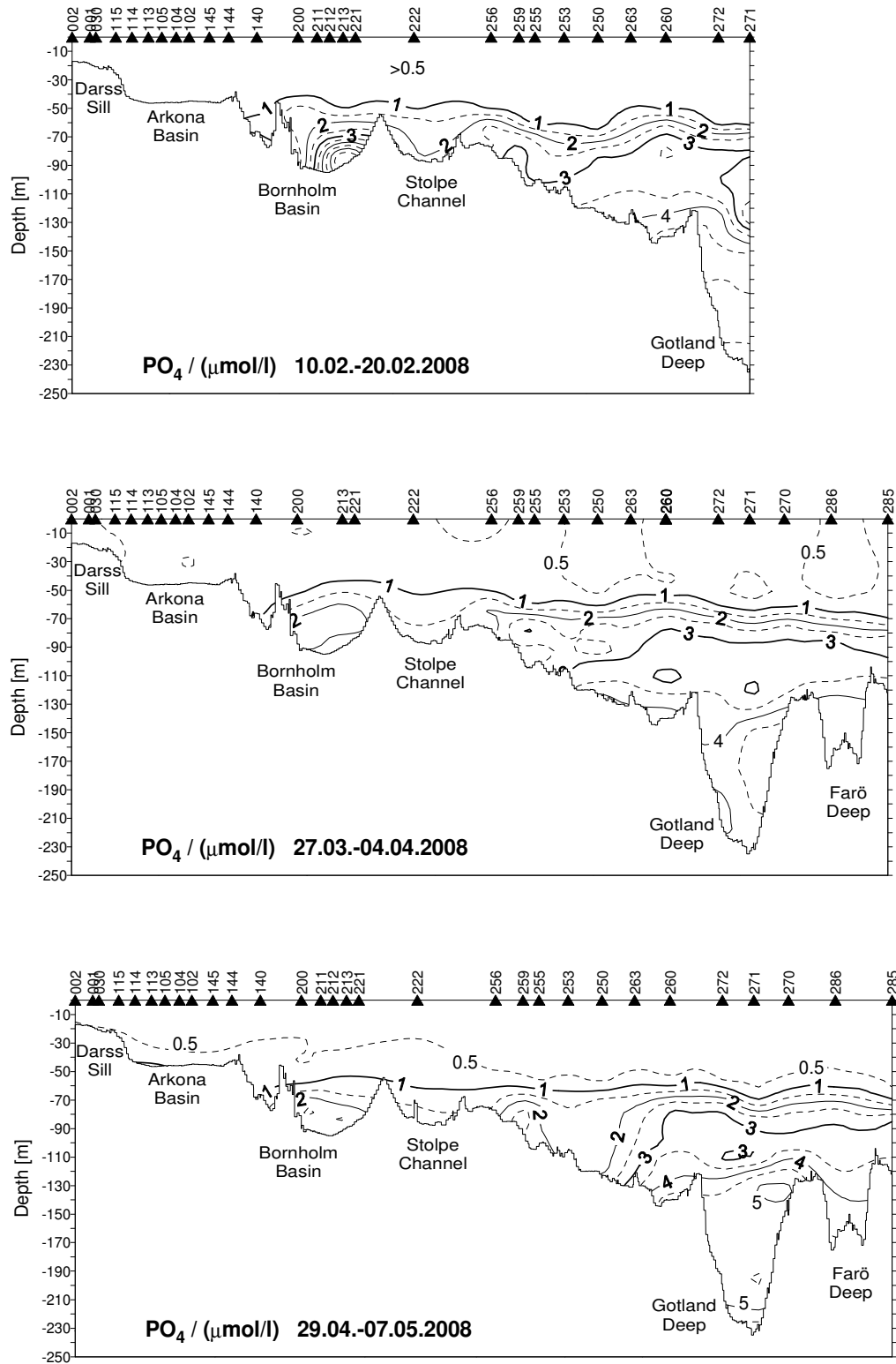


Abb. 27
Vertikale Verteilung des Phosphatgehaltes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 27
Vertical distribution of phosphate between Darss Sill and northern Gotland Basin

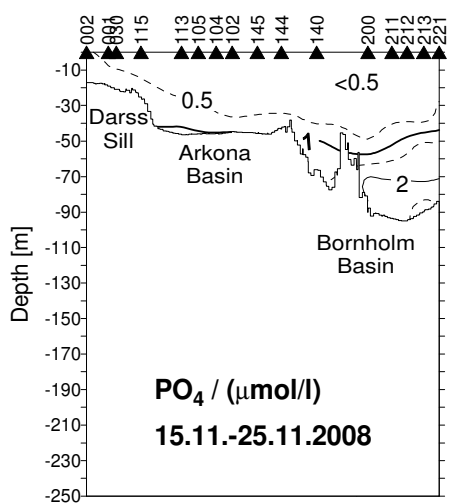
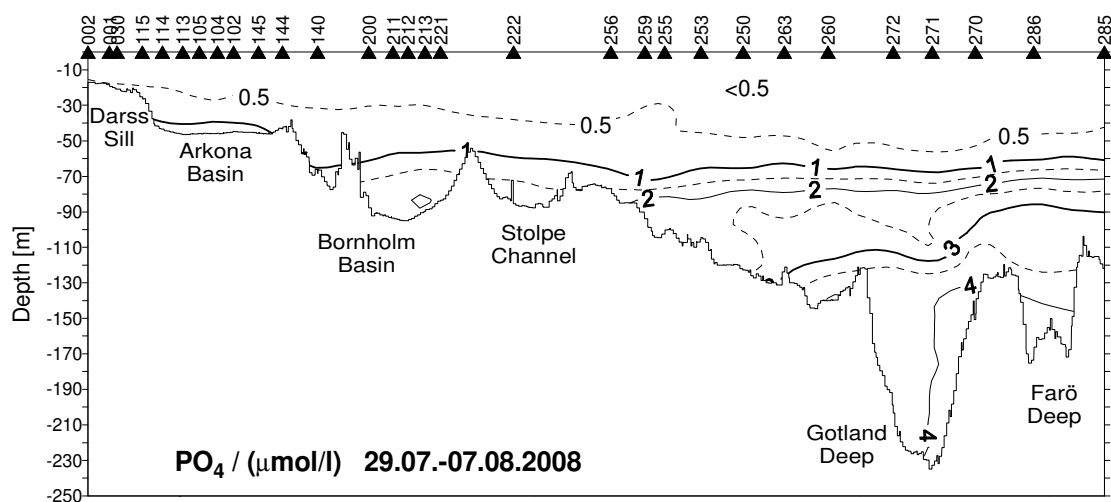


Abb. 27 Fort.

Vertikale Verteilung des Phosphatgehaltes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 27 cont

Vertical distribution of phosphate between Darss Sill and northern Gotland Basin

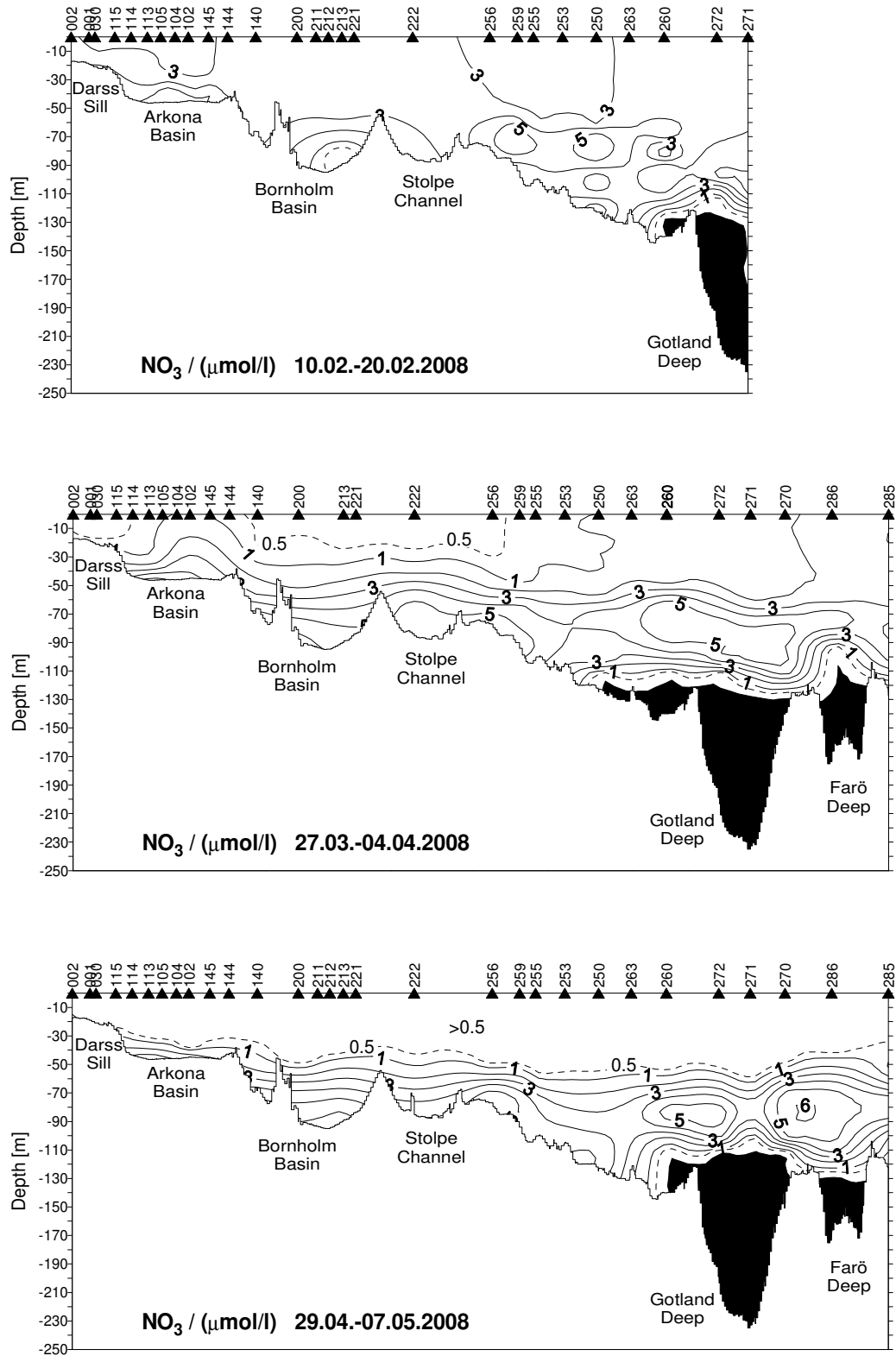


Abb. 28
Vertikale Verteilung des Nitratgehaltes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotland Becken

Fig. 28
Vertical distribution of nitrate between Darss Sill and northern Gotland Basin

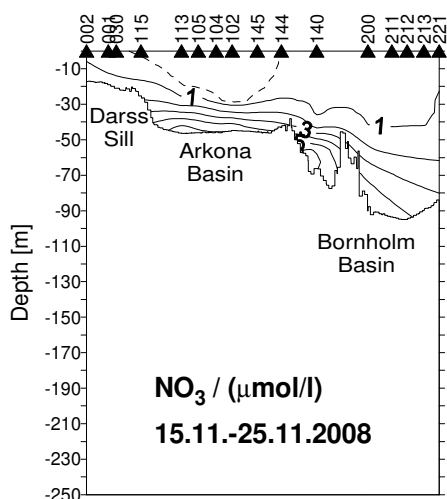
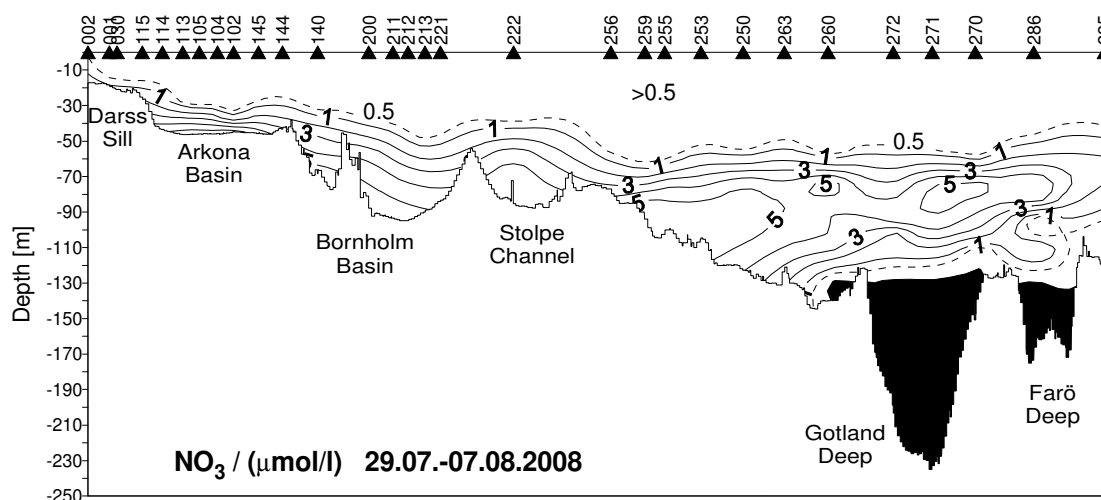


Abb. 28 Fort.

Vertikale Verteilung des Nitratgehaltes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 28 cont

Vertical distribution of nitrate between Darss Sill and northern Gotland Basin

Für die recht flachen Seegebiete der westlichen Ostsee lassen sich verallgemeinernde Aussagen zur vertikalen Nährstoffverteilung nur eingeschränkt ziehen. Nährstoffgradienten werden im Wesentlichen durch die variierenden Schichtungen von Salzgehalt und Temperatur geprägt.

Die hier beschriebenen Verteilungsmuster werden auch durch die Vertikalverteilungen der beiden wichtigsten Nährstoffe Phosphat und Nitrat entlang des Hauptschnittes durch die Ostsee für die 5 untersuchten Zeiträume deutlich (Abb. 27 und 28). Es muss beachtet

werden, dass Ammonium unter anoxischen Bedingungen im Tiefenwasser (vgl. Kapitel 6.3) das Endprodukt der Mineralisation darstellt.

Die Nährstoffverteilung im Tiefenwasser kann ebenfalls den Abb. 27 und 28 entnommen werden. Die Auswirkungen der warmen und kalten Einströme der Jahre 2002 und 2003 (FEISTEL et al., 2003a, b, NAUSCH et al., 2004, FEISTEL et al., 2004a, b, 2006a, b, c) waren ab 2005 kaum noch spürbar, so dass die Nährstoffsituation in den Tiefenbecken im Wesentlichen durch die seitdem herrschende Stagnationsperiode geprägt war. Die verschiedenen zwischen 2006 und 2008 beobachteten barotropen und baroklinen Einstromereignisse (vgl. Kapitel 3) konnten in ihren Auswirkungen häufig im Bornholmbecken beobachtet werden, erreichten aber nur in seltenen Fällen das östliche Gotlandbecken. Dort schichteten sie sich entsprechend ihrer Dichte in mittleren Tiefen ein und konnten das Tiefenwasser nicht belüften und hatten somit keine Auswirkungen auf die Nährstoffbedingungen im Tiefenwasser.

Wie schon für das Jahr 2007 beschrieben (NAUSCH et al. 2008), führten die kleineren Einstromereignisse zu einer fast durchgängigen Belüftung des Bornholmbeckens, die auch die bodennahe Schicht des Danziger Tiefs erfasste (Abb. 1). Folgerichtig wurden Phosphat- und Nitratkonzentrationen gefunden, die mit den beiden Vorjahren vergleichbar sind (Tab. 9). Die oxische Verhältnisse führten dazu, dass nur geringe Ammoniumwerte gemessen wurden.

Wie oben erwähnt, waren die kleinen Einströme nicht in der Lage die bodennahen Schichten des östlichen Gotlandbeckens zu beeinflussen. Die andauernde Anoxie führte sowohl im Gotlandtief als auch im Farötief zu einer weiteren Zunahme der Phosphatkonzentrationen. Nitrat konnte unter den permanent sauerstofffreien Bedingungen seit 2006 nicht mehr nachgewiesen werden. Mineralisierungsprozesse führten in beiden Tiefs zu einer weiteren Zunahme der Ammoniumwerte (Tab. 9). Ammonium stellt unter anoxischen Bedingungen das Endprodukt des Abbaus dar. Die geringen Standardabweichungen der untersuchten Parameter deuten ebenfalls auf stabile Verhältnisse und ein geringes Austauschgeschehen hin. Wie in den Vorjahren (NAUSCH et al. 2007, 2008) war die Wassersäule zwischen Halokline und Redoxkline äußerst sauerstoffarm. Dadurch besitzt diese Wasserschicht hohe Phosphatkonzentrationen und vergleichsweise niedrige Nitratwerte. Durch die winterliche Konvektion können diese Nährstoffe teilweise in die Oberfläche transportiert werden und können Auswirkungen auf die Produktion im Folgejahr haben (REISSMANN et al. 2009).

Auch die Situation im Bereich des Landsorttiefs zeigte sich im Vergleich zum Vorjahr wenig verändert. Zwischen 100 m Wassertiefe und dem Boden herrschten stabile anoxische Verhältnisse. Die Messwerte zeigten nur eine geringe Variabilität im Jahresverlauf. Nitrat wurde folgerichtig nicht gefunden. Die Phosphat- und Ammoniumjahresmittelwerte nehmen auf Grund der anhaltenden Stagnation im Vergleich zum Vorjahr weiter zu (Tab. 9). Die Verhältnisse im weiter südlich gelegenen Karlsötief waren etwas variabler. Hier wurden im Winter/Frühjahr zwei bis zum Boden reichende Belüftungsereignisse registriert. Dies führte

kurzzeitig zur Bildung von Nitrat, zum Rückgang der Ammoniumkonzentrationen und zur teilweisen Ausfällung von Phosphat. Generell konnten diese beiden kurzzeitigen Ereignisse die anhaltende Stagnation des Tiefenwassers nicht beeinflussen. Die Jahresmittelwerte der drei untersuchten Nährstoffe (Tab. 9) unterschieden sich nur wenig von denen des Vorjahres.

Tab. 9

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

Table 9

Annual means and standard deviations for phosphate, nitrate and ammonium in the deep water of the central Baltic Sea: IOW and SMHI data (n = 9 – 21)

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

Station	Tiefe/m	2004	2005	2006	2007	2008
213 (Bornholmtief)	80	2,08 ± 1,76	5,26 ± 2,09	3,01 ± 0,75	2,73 ± 1,16	2,81 ± 1,08
271 (Gotlandtief)	200	2,15 ± 0,20	3,12 ± 0,52	4,20 ± 0,27	4,03 ± 0,33	4,62 ± 0,23
286 (Fårötief)	150	2,52 ± 0,07	3,27 ± 0,53	4,02 ± 0,19	3,84 ± 0,19	4,33 ± 0,26
284 (Landsorttief)	400	3,51 ± 0,38	3,37 ± 0,23	3,57 ± 0,12	3,70 ± 0,17	3,97 ± 0,18
245 (Karlsötief)	100	4,29 ± 0,18	3,81 ± 0,33	4,12 ± 0,48	4,09 ± 0,19	4,00 ± 0,57

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

Station	Tiefe/m	2004	2005	2006	2007	2008
213 (Bornholmtief)	80	6,5 ± 4,0	2,3 ± 3,2	7,7 ± 2,5	6,6 ± 3,75	6,07 ± 2,36
271 (Gotlandtief)	200	10,1 ± 1,1	2,6 ± 3,6	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0
286 (Fårötief)	150	8,8 ± 0,6	2,9 ± 3,5	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0
284 (Landsorttief)	400	0,8 ± 1,3	2,0 ± 2,7	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0
245 (Karlsötief)	100	0,0 ± 0,0	0,7 ± 1,2	0,0 ± 0,1	0,0 ± 0,0	0,08 ± 0,32

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

Station	Tiefe/m	2004	2005	2006	2007	2008
213 (Bornholmtief)	80	1,9 \pm 2,4	5,1 \pm 5,3	0,5 \pm 0,9	2,1 \pm 3,2	0,9 \pm 1,86
271 (Gotlandtief)	200	0,2 \pm 0,2	1,7 \pm 1,9	9,2 \pm 1,7	11,1 \pm 1,6	15,5 \pm 1,7
286 (Fårötief)	150	0,2 \pm 0,2	2,0 \pm 2,0	6,9 \pm 1,3	5,5 \pm 1,2	8,3 \pm 1,7
284 (Landsorttief)	400	3,2 \pm 2,0	2,4 \pm 1,8	4,8 \pm 0,9	5,8 \pm 1,1	7,4 \pm 1,2
245 (Karlsötief)	100	6,7 \pm 1,4	3,8 \pm 2,4	7,1 \pm 1,9	7,9 \pm 1,8	7,8 \pm 1,4

6.5 Natürliche organische Verbindungen

In marinen Ökosystemen wird durch die Photosyntheseleistung des Phytoplanktons organisches Material gebildet, wobei CO_2 und in erster Linie anorganische Nährstoffe eingesetzt werden. Die zur Synthese der organischen Verbindungen notwendige Energie stammt letztlich aus dem Sonnenlicht. Gelöstes und partikuläres organisches Material ist die Quelle, aus der durch den Prozess der Remineralisation anorganische Nährstoffe regeneriert werden. Bei diesem Prozess wird Sauerstoff verbraucht und -neben anorganischen Nährstoffen - CO_2 freigesetzt. Der Auf- und Abbau organischen Materials in marinen Ökosystemen ist deshalb eng mit den Problemen der Eutrophierung und des Treibhauseffekts verknüpft.

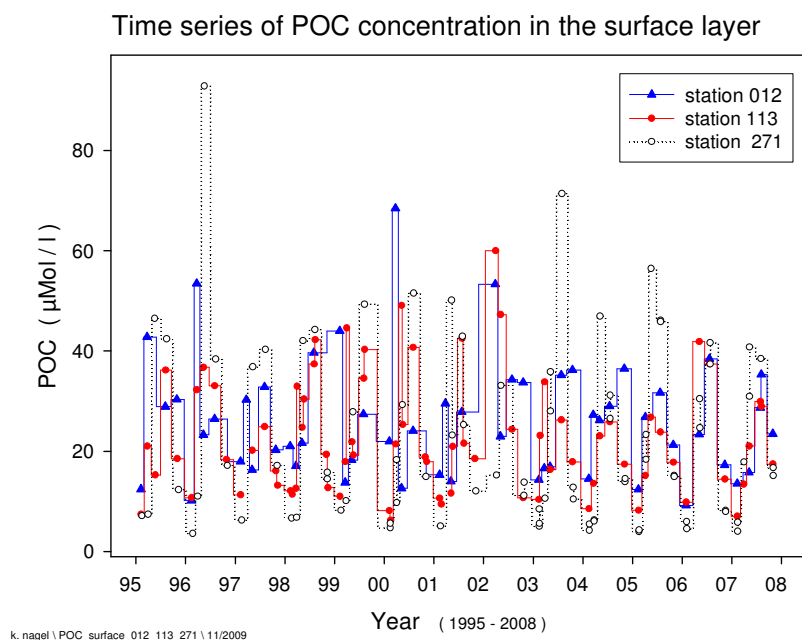


Abb. 29

Zeitreihe der POC -Konzentrationen in der Oberflächenschicht an der Stationen 012 (Mecklenburger Bucht) und Station 113 (Arkonasee) sowie zum Vergleich der Station 271 (östliches Gotlandbecken)

Fig. 29

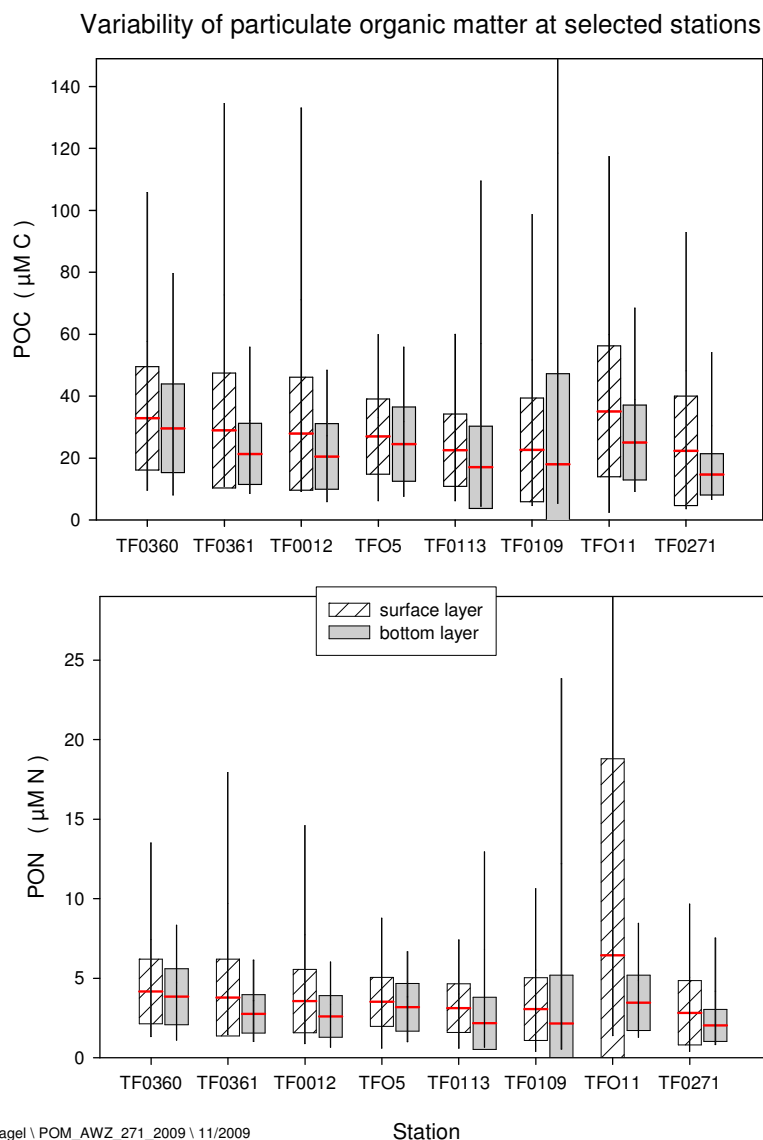
Time series of POC concentrations in the surface layer at station 012 (Mecklenburg Bight) and station 113 (Arkona Sea). Station 271 (eastern Gotland Basin) is added for comparison

In der westlichen Ostsee werden die Konzentrationen des organischen Materials im Wesentlichen durch drei Faktoren beeinflusst: die Umsatzraten des Materials im System, den Eintrag von organischem Material aus landseitigen Quellen und durch die hydrodynamisch kontrollierten Austauschprozesse zwischen Ostsee und Nordsee. Bedingt durch die relativ geringe Wassertiefe in der westlichen Ostsee und im Arkonabecken kommt es häufiger zu einer tiefen Durchmischung des Wasserkörpers. Über einen längeren Zeitraum stabile Schichtungen treten deshalb nur selten auf. Wie bereits bei der Darstellung der anorganischen Nährstoffe diskutiert sind saisonale Konzentrationsverläufe in diesem Seegebiet deutlich weniger stark ausgeprägt als in den zentralen Bereichen der Ostsee.

Die schwächer ausgeprägte Saisonalität organischer Verbindungen wird besonders deutlich anhand der POC – Konzentrationen (particulate organic carbon) in den Oberflächenschichten der Stationen in der westlichen Ostsee und der Arkonasee (z.B. Station 012 (Mecklenburger Bucht) und Station 113 (Arkonabecken), Abb. 29). Zum Vergleich für die Verhältnisse in der zentralen Ostsee ist zusätzlich der Verlauf an der Station 271 im östlichen Gotlandbecken dargestellt. Verglichen mit den Konzentrationsmustern in der zentralen Ostsee (NAUSCH et. al, 2007) fällt in der westlichen Ostsee das nur kurzzeitig auftretende Winterminimum und ein länger anhaltendes, inhomogenes Sommermaximum auf. Im Frühjahr und Sommer fallen dabei einzelne, zum Teil extrem hohe Werte auf, die mit den beobachteten raschen Veränderungen der anorganischen Nährstoffe in Zusammenhang stehen (vergl. 6.4). Auch die Ansammlung von Cyanobakterien in der Oberflächenschicht kann Ursache für kurzzeitige und zum Teil lokal begrenzte extreme Konzentrationen partikulären organischen Materials sein. Aufgrund der geringen Wassertiefe und der häufigeren Durchmischung unterscheiden sich die Konzentrationen partikulären organischen Materials in der Wassersäule nicht wesentlich. Allerdings sind die Extremwerte in den tieferen Wasserschichten weniger stark ausgeprägt.

In den Abbildungen 30 und 31 sind die mittleren Konzentrationen partikulären und gelösten organischen Materials in den oberflächennahen bzw. bodennahen Wasserschichten an ausgewählten Stationen in der westlichen Ostsee, in der Arkonasee und zum Vergleich im östlichen Gotlandbecken dargestellt. Die Mittelwerte, Standardabweichungen und Minimal- bzw. Maximalwerte wurden dabei aus den Ergebnissen der Messungen an den Stationen seit 1995 berechnet.

Bei den mittleren POC und PON Konzentrationen fallen zunächst wieder die sehr hohen Maximalwerte auf, deren Ursache bereits oben angesprochen wurde. Die mittleren Konzentrationen in der Oberflächenschicht und in der bodennahen Schicht stimmen dabei weitgehend überein. Abgesehen von den Stationen 113 und 109, die beide in etwas tieferen Bereichen der Arkonasee liegen, sind die geringfügig höheren Werte in der Oberfläche auf einzelne Extremwerte zurückzuführen. Ursache für die etwas niedrigeren Mittelwerte in der Bodenschicht der Stationen 113 und 109 dürften Abbauprozesse des partikulären Materials während der Sedimentation sein, die auch in den tieferen zentralen Bereichen der Ostsee zu beobachten sind. Dabei verschwindet in der bodennahen Schicht an der Station 271 das saisonale Signal der Oberflächenschicht (NAUSCH et. al, 2007).



<.Nagel \ POM_AWZ_271_2009 \ 11/2009

Abb. 30

Mittlere POC - PON - Konzentrationen 2008 in der Oberflächenschicht (weiße Boxen) und der bodennahen Schicht (graue Boxen) an ausgewählten Stationen in der westlichen Ostsee und der Arkonasee sowie zum Vergleich die Station 271 (östliches Gotlandbecken). Zur Berechnung des Mittelwertes, der Standardabweichung und der Spannweite zwischen minimalem und maximalem Wert (Linie) wurden die Messungen seit 1995 herangezogen

Fig. 30

Mean concentrations 2008 of POC and PON in the surface layer (white boxes) and near bottom layer of selected stations in the Western Baltic Sea and the Arkona Basin and at station 271 (eastern Gotland Basin) for comparison. Means, standard deviation and range between minimum and maximum values are calculated on the basis of the observations since 1995

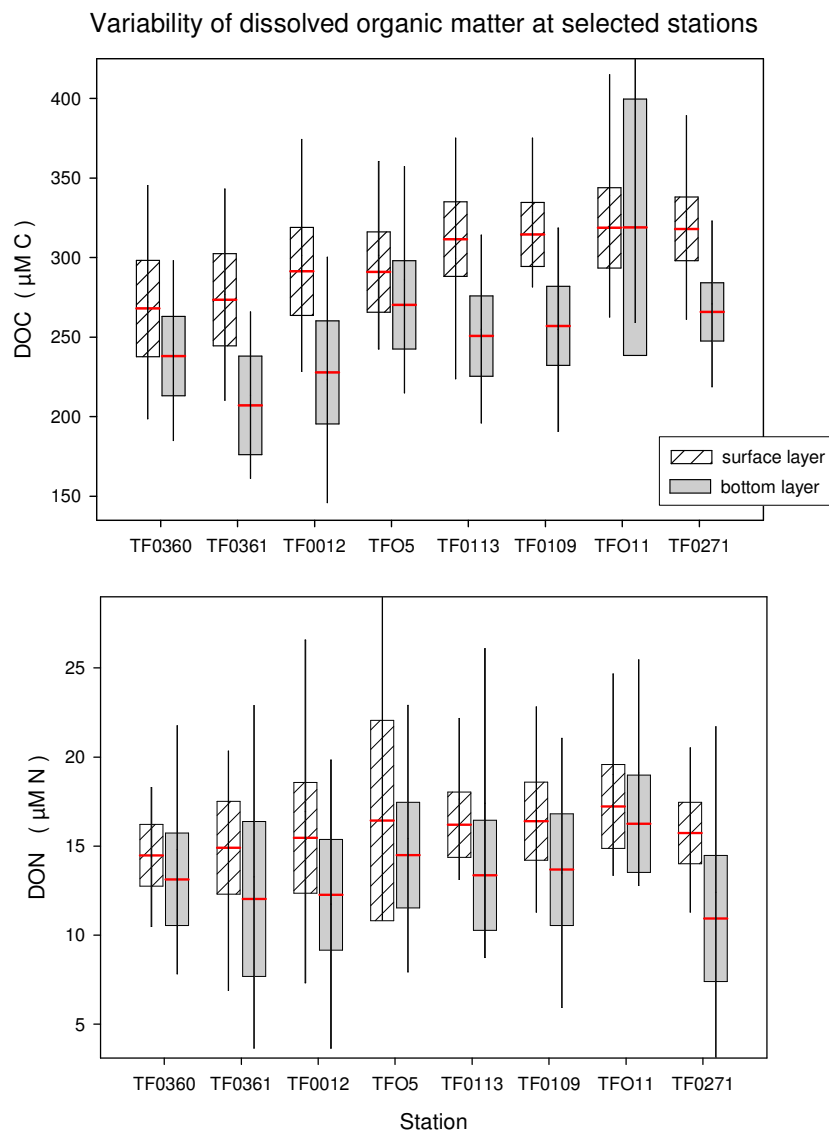


Abb. 31

Mittlere DOC - DON - Konzentrationen 2008 in der Oberflächenschicht (weiße Boxen) und der bodennahen Schicht (graue Boxen) an ausgewählten Stationen in der westlichen Ostsee und der Arkonasee sowie zum Vergleich die Station 271 (östliches Gotlandbecken). Zur Berechnung des Mittelwertes, der Standardabweichung und der Spannweite zwischen minimalen und maximalen Werten (Linie) wurden die Messungen seit 1995 herangezogen

Fig. 31

Mean concentrations 2008 of DOC and DON in the surface layer (white boxes) and near bottom layer of selected stations in the western Baltic Sea and the Arkona Basin and at station 271 (eastern Gotland Basin) for comparison. Means, standard deviation and range between minimum and maximum values are calculated on the basis of the observations since 1995

Ein etwas anderes Bild ergibt sich für die mittleren Konzentrationen des gelösten organischen Materials. Ein wesentlicher Unterschied zwischen den Verteilungsmustern partikulärer und gelöster organischer Verbindungen besteht darin, dass partikuläre Verbindungen in erster Linie durch Sedimentationsprozesse vertikal transportiert werden, während Transport gelöster Verbindungen mit den Wassermassen erfolgt, in denen sie gelöst sind. Besonders für DOC sind deshalb an den Stationen, die durch den Einstrom von Wassermassen aus der Nordsee beeinflusst sind, in der bodennahen Wasserschicht deutlich niedrigere Mittelwerte zu beobachten als in der Oberflächenschicht. Die geringeren DOC - Konzentrationen in Bodennähe sind darauf zurückzuführen, dass das einströmende Nordseewasser, das aufgrund des höheren Salzgehaltes eine höhere Dichte besitzt und sich deshalb vorzugsweise in Bodennähe ausbreitet, einen deutlich geringeren DOC - Gehalt besitzt als das salzärmere Oberflächenwasser, das aus den zentralen Bereichen der Ostsee kommt. Der Unterschied zwischen dem mittleren DOC - Gehalt in der Nordsee und den zentralen Bereichen der Ostsee ist dabei relativ groß. Während er in der Nordsee bei ca. $100 \mu\text{M C}$ liegt, beträgt er im östlichen Gotlandbecken ca. $320 \mu\text{M C}$ (TOPÇU and BROCKMANN, 2001, NAUSCH et. al, 2007). Der Konzentrationsunterschied ist damit 2 bis 4-mal so groß wie die Menge an partikulär gebundenem Kohlenstoff, der im saisonalen Zyklus durch photosynthetische Prozesse neu gebildet wird und auf diese Weise in das Ökosystem gelangt. Dementsprechend werden Konzentrationsunterschiede im DOC - Gehalt in der westlichen Ostsee und in der Arkonasee vornehmlich durch hydrodynamisch kontrollierte Austauschprozesse gesteuert. Biologische Prozesse spielen hier nur eine untergeordnete Rolle.

Ein vergleichbares Bild ergibt sich für den DON - Gehalt. Da jedoch die Unterschiede zwischen den Konzentrationen in der Nordsee und in den zentralen Bereichen der Ostsee deutlich weniger stark ausgeprägt sind, wirken sich die hydrodynamischen Austauschprozesse gegenüber den biologisch kontrollierten weniger deutlich aus.

Der Einfluss hydrodynamischer Prozesse wird auch deutlich, wenn man den Verlauf der DOC - Konzentration über mehrere Jahre betrachtet. Als ein Beispiel sind die Zeitreihen der DOC - Konzentrationen in der Oberflächenschicht der Stationen 012 und 113 in Abb. 31 dargestellt. Die Station 012 in der Mecklenburger Bucht ist dabei deutlich stärker von den Ein- und Ausstromereignissen betroffen als die Station 113, die in der zentralen Arkonasee liegt. Dabei zeigt sich an der Station 012 ein schwach ausgeprägtes jahreszeitliches Muster mit geringeren Konzentrationen in den Wintermonaten und höheren Konzentrationen im Sommer. Aufgrund der meteorologischen Bedingungen wird salzreiches und DOC - armes Wasser vorzugsweise in den Wintermonaten in die Ostsee transportiert und gelangt bei kleinen Einstromereignissen bis in die Oberflächenschicht der flachen Gebiete der westlichen Ostsee. In den Sommermonaten überwiegt demgegenüber der Ausstrom von salzarmen und DOC - reichem Ostseewasser. Die DOC - Konzentrationen in der Oberflächenschicht in der westlichen Ostsee und im östlichen Gotlandbecken zeigen einen vergleichbaren Verlauf, wobei die Konzentrationen an der Station 271 immer etwas denjenigen in der westlichen Ostsee liegen.

Bei der Betrachtung der DOC-Konzentrationen in der Oberflächenschicht an beiden Stationen fällt auch auf, dass im Zeitraum von 1995 bis in das Jahr 2000 tendenziell ein schwacher Anstieg zu beobachten ist. Dieser Zeitraum fällt zusammen mit der langen Stagnationsperiode nach dem größeren Salzwassereinbruch 1993. Nach dem Salzwassereinbruch sind die DOC-Konzentrationen in der westlichen Ostsee und in der Arkonasee durch das Einmischen von DOC-ärmerem und salzhaltigerem Wasser aus der Nordsee wieder zurückgegangen. Mehrere kleinere Einstromereignisse der letzten Jahre spiegeln sich in deutlichen Unterschieden in den DOC-Konzentrationen an beiden Stationen wieder.

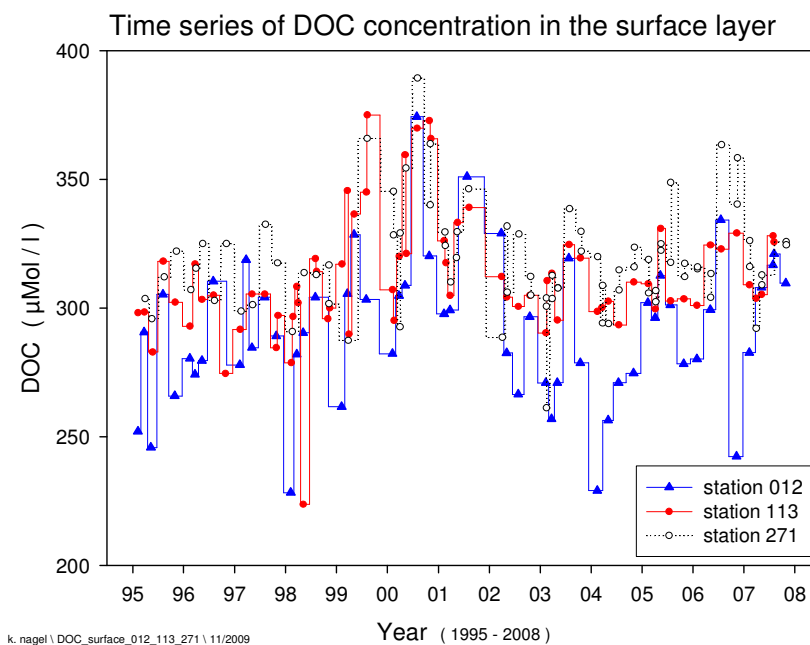


Abb. 32

Zeitreihe der DOC-Konzentrationen in der Oberflächenschicht an den Stationen 012 (Mecklenburger Bucht) und Station 113 (Arkonasee) sowie zum Vergleich der Station 271 (östliches Gotlandbecken)

Fig. 32

Time series of DOC concentrations in the surface layer at station 012 (Mecklenburg Bight) and station 113 (Arkona Sea). Station 271 (eastern Gotland Basin) is added for comparison

Wie bereits früher diskutiert, haben die hydrodynamisch kontrollierten Austauschprozesse zwischen den Wassermassen der Ostsee und der Nordsee einen Einfluss auf die Gesamtmenge des organischen Materials in der Ostsee (NAUSCH et al, 2007). Eine Verringerung der Menge des einströmenden Nordseewassers - die bei gleich bleibendem Wasserspiegel in der Ostsee - verbunden ist mit einem geringen Ausstrom, könnte langfristig zu einer Erhöhung der Gesamtmenge organischer Verbindungen in der Ostsee führen. Es ist nach derzeitigem Kenntnisstand nur schwer abzuschätzen, ob eine Erhöhung der Konzentration organischen Materials auch zu einer Erhöhung der Remineralisationsrate - mit den daraus folgenden Konsequenzen - führen würde.

Zusammenfassung

Der Winter 2007/2008 war sehr ungewöhnlich. Er war mild und kurz, mit der Kältesumme 20,0 K d von Warnemünde auf Platz 8 der mildesten Winter seit Beginn der Vergleichsdaten im Jahr 1948, mit einem Wert von nur 20% des langjährigen Mittels über 60 Jahre. Damit ist er seit 2000 der zweite unter den mildesten 10 Wintern seit 1948, nach 2006/2007 mit 10,3 K d als dem mildesten. Mit der maximalen Eisbedeckung der Ostsee von 49 000 km² am 24. März wurde der niedrigste Wert seit Beginn der Aufzeichnungen im Jahr 1720 erreicht. Sie lag bei nur 23% des langjährigen Mittelwerts von 214 000 km² seit 1720. Ähnlich mild waren seit dem Zweiten Weltkrieg nur die Winter 1988/89 mit 52 000 km² und 1960/61 mit 53 000 km². Dieser außergewöhnlich niedrige Wert der Eisbedeckung ist noch extremer ausgefallen als die schon sehr geringe Kältesumme des Winters 2007/8 in Warnemünde. Die flächenbezogene Eisvolumensumme, ein Maß für die Bewertung der Stärke des Eiswinters, war für die deutsche Ostseeküste im Jahr 2008 gleich 0,01 m. Die Eisbildung beschränkte sich auf die flachen und geschützt liegenden Küstengewässer und Häfen, die offene See des deutschen Hoheitsgebiets blieb im Winter 2007/8 eisfrei. Nur acht Winter in der seit 1896/97 bestehenden Beobachtungsreihe waren in Deutschland noch schwächer als der Eiswinter 2007/8. In Warnemünde war es 2008 in Bezug auf die monatlichen Wärmesummen nur im April und Oktober geringfügig zu kalt, der Rest des Jahres fiel zum Teil erheblich wärmer aus als der langjährige Mittelwert. Die Jahreswärmesumme 2008 von 196 K d liegt deutlich höher als der Mittelwert 146 K d der Beobachtungsreihe seit 1948, aber weit unter dem Rekordwert 355 K d des Jahres 2006. Die Temperaturen an der Station Arkona zeigen, dass 2008 kein Monat kälter als im langfristigen Mittel war; bis auf den Oktober herrschten positive Temperaturanomalien, insbesondere im Februar (+4,0 K) und Januar (+3,1 K). Insgesamt war auch das Jahr 2008 in Warnemünde im Mittel sehr warm und setzte die jüngste Folge von positiven Anomalien fort, wobei der zu warme Winter ausgeprägter war als der Sommer.

Das Jahr 2008 war in der Wasseroberflächentemperatur wie 2007 durch ein sehr warmes erstes Halbjahr und einen warmen Spätherbst gekennzeichnet. Das trug dazu bei, dass die Jahresmitteltemperatur der gesamten Ostsee weiter stieg. Außer in den Monaten August und September lagen die Monatsmittelwerte in weiten Teilen der Ostsee über dem langjährigen Mittelwert. Insbesondere die Monate Januar bis Mai gehörten zu den wärmsten im Untersuchungszeitraum 1990-2008. Die höchsten Temperaturen des Jahres wurden am 31. Juli bestimmt, da ab 1. August schon von Norden eine Abkühlung erfolgte. Durch die thermische Entwicklung im Sommer 2008 waren die Cyanobakterienaktivitäten im Wesentlichen auf den Monat Juli beschränkt.

Barotrope Einstromereignisse mit geschätzten Volumen um 200 km³ fanden in der Ostsee 2008 fünf Mal statt, im Januar, im Februar/März, im Juni, im September/Oktober und November. Diese barotropen sowie vier barokline Einströme im Januar, Mai, August und September erreichten nur zum Teil in einzelnen Schüben und mit unterschiedlichen Eigenschaften die zentrale Ostsee. Dabei wurde 2008 die bodennahe Schicht im Raum vom

Bornholmbecken bis zum Danziger Tief erneut belüftet. Die Verhältnisse im östlichen und westlichen Gotlandbecken waren dagegen nach wie vor von der anhaltenden Stagnationsperiode bestimmt. So fiel der Jahresmittelwert der Schwefelwasserstoffkonzentration im 200-m Horizont des Gotlandtiefs von $-0,23$ ml/l negativer Sauerstoff (2005) kontinuierlich auf $-2,22$ ml/l (2008). Die Schwefelwasserstoffkonzentration nahm im Landsorttief in den letzten 5 Jahren kontinuierlich zu. Die niedrigen Standardabweichungen sprechen für eine geringe Dynamik. Die gesamte Wassersäule ist hier zwischen 100 m und dem Boden anoxisch. Das Tiefenwasser des weiter südlich gelegenen Karlsötiefs war ebenfalls weitgehend frei von Sauerstoff, jedoch konnten im Winter/Frühjahr zwei bis zum Boden reichende Belüftungsereignisse beobachtet werden. Ähnliches wurde bereits 2007 registriert. Starke vertikale Durchmischung und labile Schichtung während der Winterkonvektion kann für diese ungewöhnlichen und nicht erwarteten Beobachtungen verantwortlich gemacht werden.

Die Nährstoffsituation im Tiefenwasser der Becken der zentralen Ostsee wird in starkem Maße durch das Auftreten bzw. Fehlen von Einstromereignissen geprägt. Durch die fast durchgängige Belüftung des Bornholmbeckens, die auch die bodennahe Schicht des Danziger Tiefs erfasste, wurden niedrige Phosphat- und hohe Nitratkonzentrationen gefunden, die mit den beiden Vorjahren vergleichbar sind. Die oxische Verhältnisse führten dazu, dass nur geringe Ammoniumwerte gemessen wurden. Die andauernde Anoxie führte sowohl im Gotlandtief als auch im Farötief zu einer weiteren Zunahme der Phosphatkonzentrationen. Nitrat konnte unter den permanent sauerstofffreien Bedingungen seit 2006 nicht mehr nachgewiesen werden. Mineralisierungsprozesse führten in beiden Tiefs zu einer weiteren Zunahme der Ammoniumwerte. Wie in den Vorjahren wies die Wasserschicht zwischen Halokline und Redoxkline nur sehr geringe Sauerstoffkonzentrationen auf. Dies hatte deutliche Auswirkungen auf den Nährstoffgehalt dieser Schicht und kann gravierende Folgen für die Nährstoffversorgung der winterlichen Deckschicht haben. Die Situation im Bereich des Landsorttiefs zeigte sich im Vergleich zum Vorjahr wenig verändert. Zwischen 100 m Wassertiefe und dem Boden herrschten stabile anoxische Verhältnisse. Die Messwerte zeigten nur eine geringe Variabilität im Jahresverlauf. Nitrat wurde folgerichtig nicht gemessen. Die Phosphat- und Ammoniumjahresmittelwerte ($3,97$ bzw. $8,3$ $\mu\text{mol/l}$) nahmen auf Grund der anhaltenden Stagnation im Vergleich zum Vorjahr weiter zu. Die kurzzeitige und geringe Belüftung des Karlsötiefs konnte die Nährstoffsituation nicht signifikant beeinflussen.

In der Oberflächenschicht wiesen Phosphat und Nitrat den für die gemäßigten Breiten typischen Jahresgang auf. Für Trenduntersuchungen werden jedoch die winterlichen Konzentrationen verwendet. Im Jahr 2008 lagen die Phosphatkonzentrationen in der westlichen Ostsee deutlich über Mittel der letzten 5 Jahre, während sie im zentralen Bereich der Ostsee im Durchschnitt lagen. Recht hohe Nitratwerte in der westlichen Ostsee standen unterdurchschnittliche Nitratwerte in der Arkonasee und im Durchschnitt liegende Werte an den anderen Zentralstationen gegenüber.

Summary

The winter 2007/2008 was mild and short with a “cold sum” of 20.0 K d of the winter air temperatures in Warnemünde. The winter was on place 8 of the mildest winters since the beginning of the record in 1948. The “cold sum” amounted to only 20% of the 60 years long-term mean. The maximum ice cover of the Baltic Sea of 49 000 km² on March 24th was the smallest one since recording started in 1720 and corresponds to 23% of the average of 214 000 km². After the 2nd World War, only the winters 1988/89 (52 000 km²) and 1960/61 (53 000 km²) were similarly mild. This small value of ice coverage is even more extreme than the “cold sum” of the winter 2007/8 in Warnemünde. As a measure to assess the intensity of the ice winter, the ice volume sum at the German Baltic Sea shore was only 0.01 m. Ice formation was restricted to shallow and protected areas near to the coast and harbours. The open waters of Germany’s exclusive economic zone were free of ice in the winter 2007/8. Since observations have started 1896/97, only 8 winters had a smaller ice volume sum.

In Warnemünde only April and October 2008 were somewhat too cold with respect to the monthly “heat sum”. The remaining part of the year was significantly warmer than the long-term mean. The annual “heat sum” of 196 K d was higher than the average of 146 K d for the 60 year period, but far away from the record value of 355 K d in 2006. Air temperature at the weather station Arkona showed that in 2008 no month was colder than the long-term mean. Until October positive temperature anomalies prevailed, especially in February (+4.0 K) and January (+3.1 K). All in all, the year in Warnemünde was too warm on average and continued the series of positive anomalies whereby the warmer winter was more pronounced than the summer.

Sea surface temperature in 2008 was characterised by an extremely warm first half-year and a warm late autumn. As a result, the annual mean temperature of the whole Baltic Sea increased further. With the exception of August and September, monthly means were lying above the long-term mean in wide areas of the Baltic Sea. Especially the months January to May were among the warmest of the investigation period 1990-2008. The highest temperature of the year was reached on July 31st as with August 1st cooling started from the north. The thermal development in summer 2008 restricted the formation of cyanobacteria mainly to July.

In 2008, smaller barotropic inflow events into the Baltic Sea with approximately 200 km³ took place five times: in January, February/March, June, September/October and November. These barotropic events as well as four baroclinic inflows in January, May, August and September reached the central Baltic Sea only partly in the form of single pulses and with different features. The near-bottom layer from the Bornholm Basin to the Gdansk Deep was ventilated again, similar to 2007. In contrast, conditions in the eastern and western Gotland Basin were coined by the lasting stagnation period. Thus, the annual mean of hydrogen sulphide concentration, expressed as negative oxygen, decreased continuously from -0.23 ml/l (2005) to -2.22 ml/l (2008). In the Landsort Deep, the hydrogen sulphide concentration

increased continuously during the last 5 years. Low standard deviations indicate only minor dynamics. In that area the whole water column between 100 m and the bottom was anoxic. Farther in the south, the deep water of the Karlsö Deep was also mostly free of oxygen. However, in winter/spring some ventilation took place down to the bottom. Similar events were also observed in 2007. Strong vertical convection and a labile stratification are considered responsible for these unusual and unexpected observations.

The nutrient situation in the deep basins of the central Baltic Sea is mainly coined by the occurrence or absence of inflow events. The nearly permanent ventilation of the Bornholm Basin throughout the year, which influenced the near-bottom layer up to the Gdansk Deep, resulted in low phosphate and high nitrate concentrations which are comparable with the year before. These oxic conditions caused also low ammonium values. The lasting anoxic conditions in the Gotland and Farö Deeps led to a further increase of phosphate. Since 2006 nitrate could not be found due to the absence of oxygen. In both deeps, mineralisation processes resulted in a further rise of ammonium concentrations. Similar to the years before, the water layer between the halocline and the redoxcline was supplied with oxygen only to a minor degree. This has clear implications on the nutrient content of this layer and can have serious follow-ups for the nutrient supply to the mixed surface layer in winter. The situation in the deep water of the Landsort Deep has changed only little compared to the year before. Between 100 m and the bottom stable anoxic conditions prevailed. The readings showed only small variability throughout the year. Consequently nitrate was not present. Compared to 2007, the annual means of phosphate and ammonium (3.97 and 83 $\mu\text{mol/l}$, respectively) increased due to the continuation of the stagnation period. The short and minor ventilation of the Karlsö Deep did not significantly influence the nutrient situation.

In the surface layer of the Baltic Sea, the nutrients phosphate and nitrate showed an annual cycle that is typical for the temperate climate zone. For the trend analysis, however, concentrations in winter are used. In 2008, phosphate values of the western Baltic Sea were clearly above the mean of the last 5 years whereas they were on average in the central parts of the Baltic Sea. Relatively high nitrate concentrations were found in the western Baltic Sea; they were below the mean in the Arkona Basin and on average at the more central stations.

Danksagung

Die Autoren danken den am Ostseeüberwachungsprogramm beteiligten Mitarbeitern des Instituts für Ostseeforschung Warnemünde für die Durchführung der Messungen sowie Kapitänen und Besatzungen der Forschungsschiffe „Professor Albrecht Penck“ und „Alkor“ für die Unterstützung und den Einsatz bei den Messfahrten des Jahres 2008. Für die Unterstützung bei der Beschreibung des Eiswinters, insbesondere durch Übermittlung einer Bedeckungskarte, sind wir Frau NATALIJA SCHMELZER vom Eisdienst des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Hamburg und Rostock, dankbar. Wir danken Frau KRISTIN JUNGE vom Deutschen Wetterdienst (DWD), Offenbach, für die Bereitstellung der Winddaten von Arkona und Frau GISELA TSCHERSICH vom BSH für die Bereitstellung der NOAA-Wettersatellitendaten. Die Autoren bedanken sich bei Herrn BARRY BROMAN, Schwedisches Meteorologisches Institut (SMHI), Norrköping, für die Überlassung der Pegeldata. Herr JAN SZARON, Ozeanographisches Labor des SMHI in Göteborg, stellte uns hydrographisch-chemische Beobachtungen ausgewählter Ostseestationen aus dem Schwedischen Ozean Archiv (SHARK) zur Verfügung, die im Rahmen des nationalen schwedischen Umweltüberwachungsprogramms gewonnen wurden. Frau ELZBIETA LYSIK-PASTUSZAK von der Maritimen Abteilung des Instituts für Meteorologie und Wasserwirtschaft in Gdynia (IMGW) stellte uns freundlicherweise Beobachtungsdaten für das „Danziger Tief“ zur Verfügung. Wir danken BARBARA BOGDANSKA, IMGW Warschau, für die freundliche Überlassung von Daten der Sonneneinstrahlung in Gdynia.

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.
- BEZOLD, W.V. (1883): Die Kälterückfälle im Mai. – *Abhandlungen der königlich Bayerischen Akademie der Wissenschaften*. Bd. **14**, Nr. 6, 71-108.
- V.BODUNGEN, B., GRAEVE, M., KUBE, J., LASS, H.U., MEYER-HARMS, B., MUMM, N., NAGEL, K., POLLEHNE, F., POWILLEIT, M., RECKERMANN, M., SATTLER, C., SIEGEL, H. and WODARG, D. (1995): Stoff-Flüsse am Grenzfluss – Transport- und Umsatzprozesse im Übergangsbereich zwischen Oderästuar und Pommerscher Bucht (TRUMP). – *Geowiss.* **13**, 479-485.
- BOOS (2008): Waterlevel. <http://www.boos.org/index.php?id=29>
- BSH (2009): Flächenbezogene Eisvolumensumme. <http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Beobachtungen/Eis/1977.jsp>
- 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 (2008): Witterungsreport: express. 9, Nr. 1 - 13. Offenbach: Deutscher Wetterdienst.
- DWD (2009): Klimadaten Deutschland, Daten im Standardformat, www.dwd.de
- ERDMANN, H. (2008): Atlantisch-Europäische Witterung im Januar 2008. – *Der Wetterlotse*, **60**, 17-22.
- EUTROSYM (1976): UNEP-Symposium über Eutrophierung und Sanierung von Oberflächengewässern. – *Larl-Marx-Stadt*, 20. – 25.09.1976, Bd. 1, Teil 2.2.
- FEISTEL, R. (2008): IOW Cruise Report 07PE/08/06, 27 March – 4 April 2008
- 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., ŁYSIAK-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., ŁYSIAK-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. 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. (2008): IOW Cruise Report 07PE/08/06, 27 March – 4 April, 2008. http://www.io-warnemuende.de/tl_files/forschung/pdf/cruise-reports/cro7peo8o6.pdf
- FIMR (2008): Ice winter 2007-2008. Ice winter 2007-2008 was short and very mild. http://www.fimr.fi/en/tietoa/jaa/jaatalvi/en_GB/2008/
- GIWA (2003): Newsletter 2, 2003. – [http://www.giwa.net/newsletter\(giwa_2-2003.pdf](http://www.giwa.net/newsletter(giwa_2-2003.pdf)
- FU-BERLIN (2008): Werden auch Sie Wetterpate! <http://www.met.fu-berlin.de/wetterpate/>
- GRASSHOFF, K., ERHARDT, M. and KREMLING, K. (1983): Methods of seawater analysis. – 2nd Ed., Verlag Chemie, Weinheim.
- 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 (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 (2009): Global Solar Radiation at GDYNIA station in 2008. – Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa, unveröffentlichte Daten.
- JÜRGENS, K: IOW Cruise Report AL332, 6.3.2009
- KEENLYSIDE, N.S., LATIF, M., JUNGCLAUS, J., KORNBUEH, L. and ROECKNER, E. (2008): Advancing decadal-scale climate prediction in the North Atlantic sector. – Nature **453**, 84-88.
- 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.
- LANU (2008): Sauerstoffmangel im bodennahen Wasser der westlichen Ostsee im September 2008.
http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Beobachtungen/MURSYS-Umweltreportsystem/Mursys_031/seiten/os027_01.jsp
- 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. (2009): On phosphate pumping into the surface layer of the eastern Gotland Basin by upwelling. – *J. Mar. Syst.*, in press.
- MATTHÄUS, W. (1978): Zur mittleren jahreszeitlichen Veränderlichkeit im Sauerstoffgehalt der offenen Ostsee. – *Beitr. Meereskd.*, Berlin **41**, 61-94.
- METEOMEDIA (2008): Luftdruck Stationsdaten Deutschland. <http://nachrichten.t-online.de/c/12/34/77/20/12347720.html>
- MOHRHOLZ, V. (1998): Transport- und Vermischungsprozesse in der Pommerschen Bucht. – *Meereswiss. Ber.* **33**, 1-106.
- NAUSCH, G. and NEHRING, D. (1996): Baltic proper, Hydrochemistry. In: *Third Periodic Assessment of the State of the Marine Environment of the Baltic Sea*. – *Balt. Sea Environ. Proc.* **64B**, 80-85.
- NAUSCH, G., FEISTEL, R., LASS, H.-U., NAGEL, K. and SIEGEL, H. (2002): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2001. – *Meereswiss. Ber.* **49**, 1-77.
- NAUSCH, G., FEISTEL, R., LASS, H.-U., NAGEL, K. and SIEGEL, H. (2003): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2002. – *Meereswiss. Ber.* **55**, 1-71.
- NAUSCH, G., FEISTEL, R., LASS, H.-U., NAGEL, K. and SIEGEL, H. (2004): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2003. – *Meereswiss. Ber.* **59**, 1-80.
- NAUSCH, G., FEISTEL, R., LASS, H.-U., NAGEL, K. and SIEGEL, H. (2005): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2004. – *Meereswiss. Ber.* **62**, 1-80. http://www.io-warnemuende.de/documents/mebe62_2004-zustand-hc.pdf
- NAUSCH, G., FEISTEL, R., UMLAUF, L., NAGEL, K. and SIEGEL, H. (2007): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2006.- *Meereswissenschaftliche Berichte Warnemünde 70* (2008) 1-93.

- NAUSCH, G., FEISTEL, R., UMLAUF, L., NAGEL, K. and SIEGEL, H. (2008): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2007.- Meereswissenschaftliche Berichte Warnemünde 72 (2008) 1-93.
- 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. and LASS, H.U. (1993): Die hydrographisch-chemischen Bedingungen in der westlichen und zentralen Ostsee im Jahre 1992. – *Dt. Hydrogr. Z.* **45**, 281-331.
- NEHRING, D., MATTHÄUS, W., LASS, H.U., NAUSCH, G. and NAGEL, K. (1995): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1994. – *Meereswiss. Ber.* **9**, 1-71.
- OZ (2008a): War das der Winter? – *Ostseezeitung* 27.3.2008
- OZ (2008b): MV hat die fünf sonnigsten Orte. – *Ostseezeitung* 3.6.2008
- 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.
- 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.
- ROEDER, W. (2008): IOW Cruise Report 07PE/08/13, 09 June -16 June 2008
- SCHMELZER, N. (2008): Der Eiswinter 2007/08 an den deutschen Nord- und Ostseeküsten. – Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg•Rostock. <http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Beobachtungen/Eis/Eiswinter0708.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.
- 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.
- SMHI (1982): *Climatological Ice Atlas*. – Sjöfartsverkets tryckeri, Norrköping. 220 pp.
- SMHI (2009): unveröffentlichte Daten.

- TITZ, S. (2009): Kalt erwischt. – Spektrum der Wissenschaft 02/2009, S. 21.
<http://www.spektrumverlag.de/artikel/979390>
- TOPCU, D. H. and BROCKMANN, U. (2001): Synthesis and new conception of North Sea research (SYCON), Working Group 5 : Fluxes of matter, Berichte aus dem Zentrum für Meeres- und Klimaforschung der Universität Hamburg. - www.rrz.uni-hamburg.de/SYKON/Library/FG5.pdf
- 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. 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
- VAN BEBBER, W. J. (1891): Die Zugstrassen der barometrischen Minima. – Meteorologische Zeitschrift **8**, 361–366.
- WASMUND, N., POLLEHNE, F., POSTEL, L., SIEGEL, H. and ZETTLER, M. (2009): Biologische Zustandseinschätzung der Ostsee im Jahre 2009. - Meereswiss. Ber., im Druck
- WIKIPEDIA (2008): Vb-Wetterlage. <http://de.wikipedia.org/wiki/Vb-Wetterlage>
- WMO (2008): 2008 Among the ten warmest years; marked by weather extremes and second-lowest level of Arctic ice cover. – Press Release No.835, World Meteorological Organization
http://www.wmo.int/pages/mediacentre/press_releases/pr_835_en.html

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

Die Schwermetall- Situation in der Ostsee im Jahre 2008

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenfassung	103
Summary	104
1. Einleitung	104
2. Probenahme	106
2.1 Probenaufarbeitung	109
2.2 Qualitätssicherung	109
3. Ergebnisse und Diskussion	112
3.1 Verteilungsmuster der Metallkonzentrationen in der gelösten und partikulären Phase an den in 2008 beprobten Stationen und Tiefen	113
Cadmium	113
Blei	114
Kupfer	114
Zink	114
Quecksilber	114
3.2 Spurenmetall-Trends zwischen den Jahren 1993-2008 an Stationen in der westlichen und zentralen Ostsee	124
3.3 Ergebnisse aus den Sedimentuntersuchungen	132
4. Schlussfolgerungen	135
Danksagung	135
Literaturverzeichnis	136

Zusammenfassung

Wie in den Vorjahren wies die Schwermetallverteilung im Ostseewasser im Jahr 2008 keine deutlichen oder gesundheitsgefährdenden Veränderungen auf. Regionale Konzentrationserhöhungen wie sie z. B. in den letzten Jahren immer wieder in der westlichen Ostsee zu beobachten sind und in 2006 für die gelösten Kupferkonzentrationen beobachtet wurden, werden auf eine windinduzierte, bodennahe Durchmischung und den damit verbundenen sehr variablen Schwebstoffanteil in der Wassersäule zurückgeführt. Durch die Filtration der Proben werden Partikel $>0,4\mu\text{m}$ zurückgehalten, während Partikel $<0,4\mu\text{m}$ das Filter passieren. Veränderungen, die kurzzeitig durch den Salzwassereinbruch im Februar 2003 hervorgerufen wurden, spiegeln sich in den Langzeittrends kaum wieder. Unterhalb der Redoxklinen die 2008 im 120-130m Tiefenhorizont angetroffen wurde, wurde ein Rückgang der gelösten Metallkonzentrationen für Cd_{diss}, Cu_{diss} und Zn_{diss} beobachtet. Weiterhin ist eine leichte Zunahme der CdSPM, CuSPM und ZnSPM mit der Tiefe zu verzeichnen, welches auf 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.

Im Rahmen einer Diplomarbeit „Methodenoptimierung zur Anreicherung von Spurenmetallen aus Meerwasser -Vergleichende Untersuchungen zwischen Flüssig-flüssig und Flüssig-Festphasen Extraktion im Meerwasser mit variablen Salz- und Sauerstoffverhältnissen-“ wurde eine Flüssig –Festphasen Extraktionsmethode optimiert, und statistisch ausgewertet.

Die Schwermetallkonzentrationen in den Oberflächensedimenten der BLMP-Stationen variieren innerhalb der bekannten Grenzen und unterscheiden sich für die untersuchten Regionen. Bisher kann jedoch noch kein gesicherter zeitlicher Trend für die einzelnen Stationen festgestellt werden (1998 bis 2008). Neben der bekannten Lokalität „Altlast Lübecker Bucht“, die 2008 nicht im Messprogramm enthalten war, fallen insbesondere die höheren Hg-Gehalte im westlichen Arkonabecken und vor der Odermündung auf. Beim Arkonabecken handelt es sich ebenfalls um ein „Altlasten-Problem“. Bei der Odermündung ist zu beachten, dass die hohen Schwermetallbelastungen im Sediment des Oderhaffs durch Resuspension und Austrag in die vorgelagerte Ostsee auf die Konzentrationen der Feinfraktion in der Pommernbucht „ausstrahlen“.

Summary

In general the 2008 results of heavy metal concentrations in the Baltic Sea revealed no pronounced changes compared to previous years. Regional and temporal limited variations as observed in 2006 for Cd_{diss}, which have been observed periodically in the western Baltic also for the other metals, have been attributed to the changing enrichment of suspended matter in the water column, released by wind induced mixing up to the ground level. During sample filtration only particles <0.4µm were restrained, while particles >0.4µm passed the filter. Short-term changes induced during the main saltwater inflow event in February 2003 were only reflected in the trends “Below Halocline” for Cd_{diss}, Cu_{diss}, and Zn_{diss}. Elevated Pb_{diss} levels in the Western Baltic are possibly a result of sample contamination. Stagnant conditions with anoxia and decreasing dissolved trace metal conditions below the oxic-anoxic interface were noticed in the near bottom layer of the Bornholm Basin at 80 m depth, below ~140 m in the Gotland Deep and below 100 m in the Landsort Deep. For the contents of CdSPM, CuSPM and ZnSPM an increase was observed with depth in the central Baltic, a hint for the stabilisation of the stagnation period. Altogether the saltwater inflow event in 2003 had influenced the trace metal long term trends in the deepwater of the central Baltic Sea. Now there is another chance to study changes in trace metal concentrations during the stabilisation of an anoxic deep water body as well as the “feedback mechanism” on the trace metal concentrations in the surface water body.

Heavy metal concentrations in surface sediments of the BLMP-stations varies in between the known ranges and differs for the investigated sub-areas, but still not show a significant temporal trend over the whole period (1998 to 2008). Besides the known historical dumping sites of industrial waste material from the 1960th in the Lübeck Bay (2008 not in the measurement program), higher concentrations of heavy metals (especially for Hg) in the western Arkona Basin and the southern Pommeranian Bay (Oder River mouth) are remarkable. The Arkona Basin “hot spot” is a historical dumping place as well (military material from World War II times), and the Pommeranian Bay is influenced by heavy metal rich suspended sediments from the Oder Lagoon, which arrives the Baltic Sea in this area.

1. Einleitung

Die Schwermetallüberwachung der Ostsee wurde im Jahr 2008 durch das Institut für Ostseeforschung zum siebzehnten Mal durchgeführt. Grundlage bildete die Verwaltungsvereinbarung mit dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) in Hamburg und Rostock. Dabei beschränkte sich 2008 die Probenahme im Rahmen des BSH-Monitorings auf die westliche Ostsee mit 3 zusätzlichen Stationen (Kieler Bucht (360), Fehmarnbelt (010), und Marnet / Oderbank. Die anderen Stationen in der zentralen Ostsee und im Gotlandbecken wurden im Rahmen eines Hausprojektes zur Aufrechterhaltung des Langzeitdatensatzes bearbeitet.

Im Februar 2008 wurde die alljährliche flächendeckende Beprobung der westlichen und zentralen Ostsee durchgeführt, um langfristige Änderungen der Schwermetallsituation im Ostseewasser zu dokumentieren. Neben den tabellarischen Darstellungen zur Qualitätskontrolle wurden die Ergebnisse vom Februar 2008 an den beprobten Stationen vergleichbar zu den Vorjahren graphisch dargestellt, und im Zusammenhang mit den Vorjahresergebnissen diskutiert. Die Häufigkeitsverteilungen geben einen Hinweis darauf, in welchem Konzentrationsbereich die verschiedenen Parameter am häufigsten anzutreffen sind, und ob sich eine Verschiebung des Konzentrationsbereiches zum Vorjahr ergeben hat. Die Trendauswertungen für die westliche Ostsee, sowie für das Oberflächenwasser und das Tiefenwasser der zentralen Ostsee wurden mit den Daten von 2008 ergänzt. Mit diesem Datensatz wird eine Stagnationsperiode zwischen zwei Salzwassereintrüben 1993-2003 dokumentiert. Die Schwermetallverteilung an den Stationen im Bornholm Becken (213) und Gotland Becken (271) wurden als Tiefenprofile dargestellt. Im Anhang sind die Messwerte für das Schwermetallmonitoring im Wasser und in Schwebstoffen sowie Angaben zur Qualitätssicherung tabellarisch zusammengefasst. Die Teilnahme an der Quasimeme Performance Study zur Qualitätssicherung erfolgte für „Exercise 792, Runde 53“ (Pb, Cd, Cu, Zn im Meerwasser).

Im Rahmen einer Diplomarbeit „Methodenoptimierung zur Anreicherung von Spurenmetallen aus Meerwasser -Vergleichende Untersuchungen zwischen Flüssig-flüssig und Flüssig-Festphasen Extraktion im Meerwasser mit variablen Salz- und Sauerstoffverhältnissen-“ wurde eine Flüssig –Festphasen Extraktionsmethode optimiert, und statistisch ausgewertet.

Für das sedimentgeochemische Monitoring wurden im Jahr 2008, wie im Arbeitsplan festgelegt, folgende Arbeiten durchgeführt:

- Beprobung und Untersuchung der neu festgelegten 15 BLMP Stationen (Siehe Karte).
- Teilnahme an Runde 54 (QUASIMEME) zur Qualitätssicherung für Schwermetalle in marinen Sedimenten (QTM 084/085 MS).

Die zurzeit im Programm befindlichen 15 BLMP-Stationen beinhalten die 5 Stationen der vergangenen Jahre sowie 10 weitere (neue) Stationen. Auf der Grundlage einer systematischen Auswertung der bislang durchgeführten Messungen (1998-2008), sowie unter Berücksichtigung der Ergebnisse der im Jahr 2008 zusätzlich untersuchten Stationen, soll im Jahr 2009 eine Strategie des weiteren Vorgehens erarbeitet werden.

2. Probenahme

Die Monitoring Beprobung der Wasserproben erfolgte im Jahr 2008 zwischen dem 10.02.-24.02.2008 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 DENEK“ Reise 88 im Zeitraum vom 17. - 26. Juni 2008, gemeinsam mit dem BSH-Programm Radioaktivitätsmessungen in der Ostsee. Die Stationsliste sowie die Lage der Stationen sind in Tabelle 2 und Abbildung 2 dargestellt.

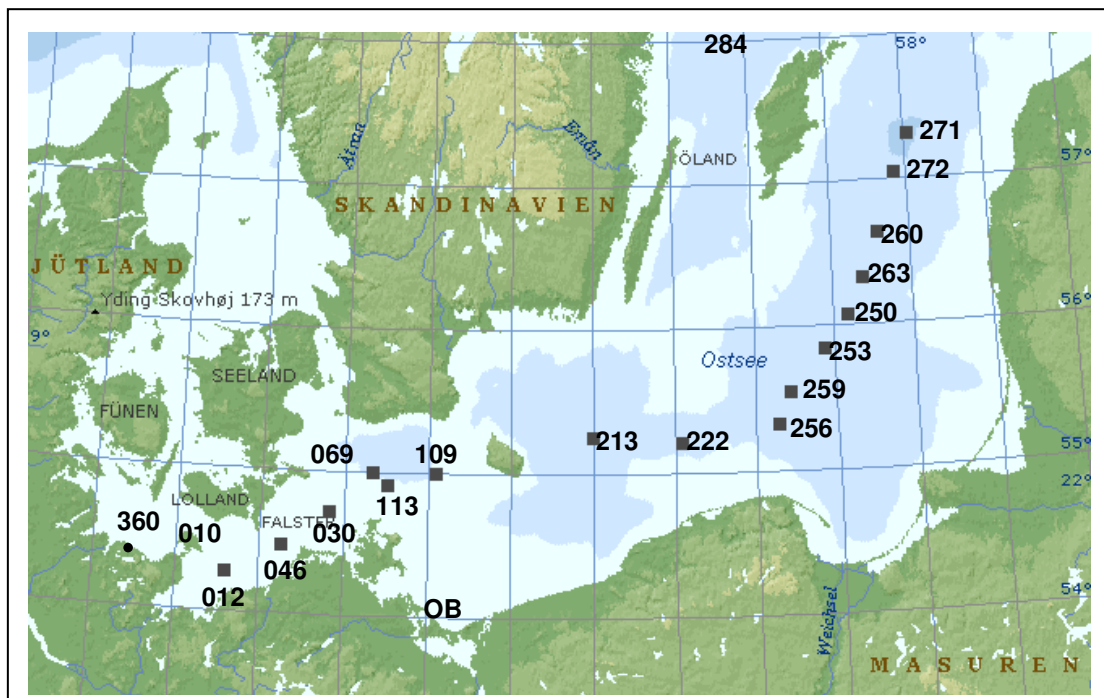


Abb. 1

Stationskarte: Probenahme von Wasserproben

Fig. 1

Station map: Sampling of water samples

Tab. 1

Stationen Schwermetalle im Ostseewasser, Februar 2008. Die fett gedruckten Stationen sind für das BSH –Monitoring obligatorisch

Table 1

Trace metal stations in seawater from February 2008. 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 2008

Table 2

BLMP-stations, heavy metals in sediments, sampling 2008

BSH ID	Lat (Nord)	Lon (Ost)	Wassert.(m)	IOW Geo-Nr.	Sediment
IOW 3	54°24.92	12°09.57	26	364100	Schlick
IOW 4	54°37.00	12°28.95	17	364110	Sand
K 8	54°43.40	12°47.03	22	364120	Sand
ARKO 3	54°40.03	13°45.08	31	364130	Schlick
IOW 8	54°20.39	13°54.67	19	364140	Sand
ODER	54°00.37	14°12.05	11	364150	Sand
K 4	54°57.17	13°58.39	47	364160	Schlick
IOW 6	54°59.04	13°39.93	46	364170	Schlick
K 7	55°00.01	13°17.95	46	364180	Schlick
IOW 5	54°52.64	13°03.90	42	364190	Schlick
M 2	54°19.00	11°33.03	24	364200	Schlick
IOW 2	54°26.62	11°32.71	25	364210	Schlick
N 1	54°33.05	11°19.17	28	364220	Schlick
N 3	54°36.03	10°27.02	18	364230	Sand
KIBU 2	54°34.98	10°51.52	20	364260	Steine, Restsed.

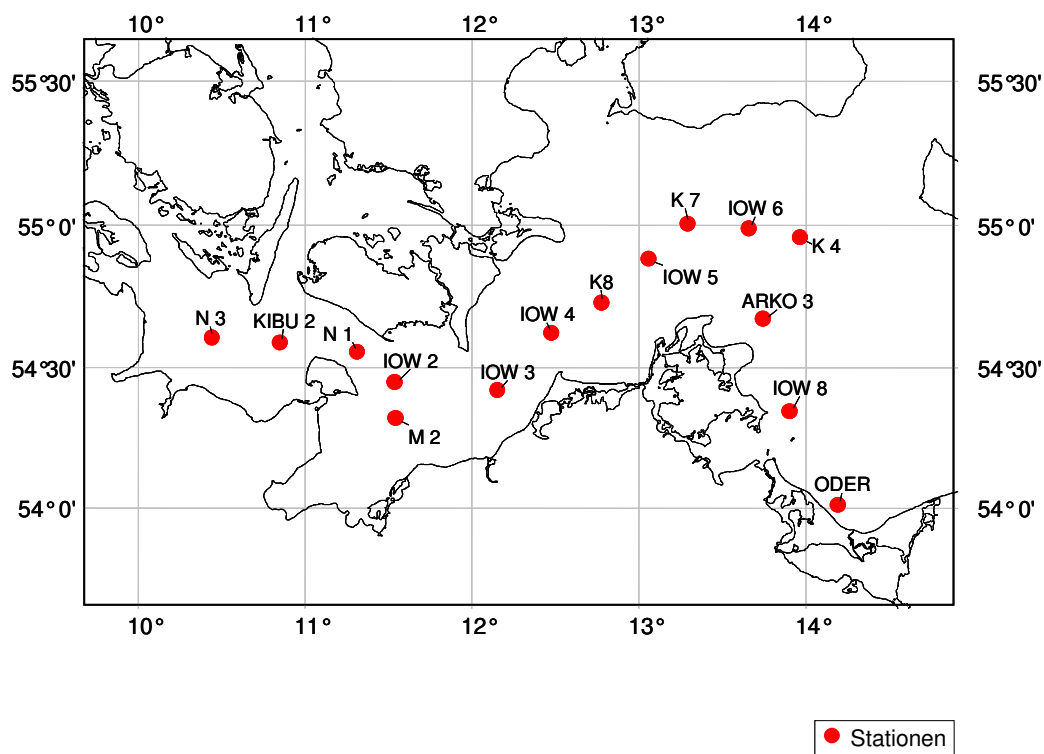


Abb. 2

Karte der Sediment Probenahmestationen des BLMP (Ostsee) 2008

Fig. 2

Map of sediment stations in the frame of BLMP (Baltic Sea) 2008

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) 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

In 2008 nahmen wir an der QUASIMEME Performance Study „Schwermetalle im Meerwasser“, Round 53 teil (Ergebnisse im Anhang). Als zertifiziertes Referenzmaterial parallel zur Probenaufarbeitung wurde CRM-579 für Quecksilber und für Cd, Pb, Cu, Zn wurde NASS-5 eingesetzt (Tab.: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 7 Filterblanks aufgeführt, die parallel zu den Probenaufarbeitungen des suspendierten Materials bearbeitet wurden. Die Nachweisgrenzen sowie Quasimeme Z-scores befinden sich in der vom BSH vorgegebenen Tabelle im Anhang.

In Absprache mit dem BSH sollten, um weitere Kosten zu sparen, zukünftig die Quasimeme Proben des BSH gemeinsam vermessen werden.

Tab. 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
Sept.- Dez.2008	n=4	n=4	n=4	n=4
Mean	19,25	277	3,65	204
STDEV	0,5	15,7	2,7	21,2
%	2,6	5,7	74,6	10,4

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
Mar-Jun.2008	n=7
Mean	1,821
Stdev	0,13
%	7,1

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
Okt.08-Jan.09	n=16	n=16	n=16	n=16	n=16
Mean	0,24	31,4	24,2	165	323
STDEV	0,02	3,3	2,1	20	14
%	6,90	10,5	8,6	12	4

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
1998-2007	n=78	n=78	n=78	n=78	n=78	n=78
Mean	0,79	0,045	2,15	3,76	0,73	0,39
2008	n=5	n=5	n=5	n=5	n=5	n=5
Mean	0,56	0,036	2,48	3,92	0,214	0
Stdev	0,055	0,009	0,356	2,621	0,171	0

Tab. 7
Qualitätskontrolle Metalle in marinen Sedimenten

Table 7
Quality control metals in marine sediments

QUASIMEME R. 54 Metals in Sediment Jul-Oct 2008				
	QTM 084 MS		QTM 085 MS	
	soll	ist (IOW)	soll	ist (IOW)
As (mg/kg)	17.7	18.6	13.8	19.4
Cd (µg/kg)	1977	2010	1075	1150
Cr (mg/kg)	318	349	131	170
Cu (mg/kg)	188	204	67	69
Fe (%)	4.82	4.80	3.81	4.13
Li (mg/kg)	46	44	46	48
Pb (mg/kg)	234	305	123	147
Mn (mg/kg)	737	792	459	513
Hg (µg/kg)	708	788	1103	1078
Ni (mg/kg)	54	60	65	77
Zn (mg/kg)	646	685	230	239
TOC (%)	6.63	6.99	5.29	5.62

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 (µg/g), und der volumenbezogenen Konzentrationsangabe (ng/dm³ bzw. nmol/dm³) differenziert. Während die massenbezogene Konzentrationsangabe die Beladung des SPM mit Metallen beschreibt, und somit einen direkten Vergleich zu den Konzentrationen im Sediment darstellt, ist die volumenbezogene Konzentrationsangabe abhängig vom Anteil des Schwebstoffs in einem Liter Meerwasser. Somit kann diese Konzentrationsangabe zum direkten Vergleich mit den gelösten Metallkonzentrationen im Wasser herangezogen werden. Es ist darauf zu achten, dass bei den Grafiken in diesem Bericht alle drei Konzentrationsangaben vorkommen können. Die zusammenfassenden Datentabellen im Anhang enthalten neben den massenbezogenen Ergebnissen für Schwermetalle in SPM (µg/g) auch die volumenbezogenen Ergebnisse in (ng/dm³).

3.1 Verteilungsmuster der Metallkonzentrationen in der gelösten und partikulären Phase an den im Jahre 2008 beprobten Stationen und Tiefen

Wie in den vorangegangenen Jahren konzentrierten sich auch 2008 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) 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. 2008 variierte der Schwebstoffanteil in der westlichen und zentralen Ostsee vergleichbar zum Vorjahr zwischen 0,2-0,8 mg/dm³ (Abb. 4). Der Schwebstoffanteil in der Wassersäule ist vor allem bei der Berechnung der "volumenbezogenen Schwermetallgehalte in suspendiertem partikulären Material" (SPM) von Bedeutung.

Cadmium

2008 variieren die gelösten Cadmiumkonzentrationen (C_{diss}) zwischen 14-18 ng/kg in der westlichen Ostsee und sind damit tendenziell etwas höher als im Vorjahr. Sie gehen in der zentralen Ostsee geringfügig auf Werte um 9 ng/kg zurück (Abb. 3; Abb. 7). Im bodennahen Wasser des Bornholmbeckens, welches im Februar 2003 durch den Salzwassereintrich ausgetauscht wurde, ist im Feb. 2008 ein Rückgang der gelösten Konzentrationen von 20 ng/kg (2004) auf <8 ng / kg unterhalb 50 m zu verzeichnen. Während andauernder Stagnationsperioden, kommt es auch in den bodennahen Bereichen und Sedimenten des Bornholmbeckens (Abb. 10) zu stagnierenden Verhältnissen und es erfolgt eine Anreicherung schwerlöslicher Metallsulfide in den Oberflächensedimenten. Möglicherweise waren die erhöhten C_{diss} (2004) im bodennahen Wasser des Bornholmbeckens auf Cd-Einträge aus den Porenwässern der Oberflächensedimente zurückzuführen. Seit 2005 haben sich die anoxischen Verhältnisse in den Sedimenten des Bornholmbeckens stabilisiert, so daß die Ausfällung schwerlöslicher CdS-Spezies erfolgte. Ähnliche Verhältnisse wurden auch im Gotlandbecken (Abb. 11) beobachtet. Anoxische Bedingungen sind in 2008 bereits ab ~110 m zu beobachten (Vorjahr ~120m), welches mit einem Rückgang der gelösten Cd-konzentrationen auf ~2 ng/kg einhergeht. In 2006 wurden hier noch 4 ng/kg angetroffen. 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 2008 variieren die gelösten Bleikonzentrationen (Pbdiss) (Abb. 3) in der westlichen Ostsee zwischen 10-20 ng/kg mit einem maximalen Werte von 77 ng/kg an der Station Marnet / Oderbank. Im Vergleich zum Vorjahr wurden hier wieder die „normalen“ Konzentrationen angetroffen. Somit ist davon auszugehen, dass die aussergewöhnlich hohen Konzentrationen aus dem Vorjahr auf Probenkontaminationen zurückzuführen sind.

Konzentrationen um 40 ng/kg wurden in der westlichen Ostsee in den vergangenen Jahren immer wieder beobachtet, welche auf einen erhöhten Anteil an Schwebstoffen $<0,4\mu\text{m}$ in den filtrierten Proben zurückgeführt wurden.. Die partikulären (PbSPM) Bleikonzentrationen (Abb. 4) liegen 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). Am häufigsten werden die Konzentrationsbereiche zwischen 2-8 ng/kg frequentiert. Der schwebstoffgebundene volumenbezogene Bleianteil entspricht wie im letzten Jahr ca. 50% der Gesamtkonzentrationen in der Wassersäule.

Kupfer

Im Februar 2008 sind die gelösten und partikulären Kupferkonzentrationen (Cudiss), Cu(SPM) auf dem Niveau zum Vorjahr am häufigsten im Konzentrationsbereich zwischen 200-600 ng/kg und <10 ng/dm³ anzutreffen (Abb. 3-6). Im Bornholmbecken (Abb. 10) ist unterhalb 50 m eine Abnahme der Cudiss Konzentrationen von ~500 ng/kg im Oberflächenbereich auf ~100 ng/kg im bodennahen Bereich zu beobachten. Die niedrigsten Cudiss mit <100 ng/kg sind im Gotlandbecken in den Tiefenhorizonten unterhalb 120 m im anoxischen Tiefenhorizont anzutreffen. Hier im Tiefenbereich der Ostsee sind zwischenjährige Fluktuationen von +/- ~100 ng/kg zu beobachten, die auf Wechselwirkungen mit den Sedimenten zurückgeführt werden.

Zink

2008 variieren die gelösten Zinkkonzentrationen (Zndiss) ähnlich dem Vorjahr zwischen 200-1000 ng/kg (Abb.3). Maximale Konzentrationen mit ~700 ng/dm³ wurden an der Station Marnet / Oderbank angetroffen. Die volumenbezogenen partikulären Zinkgehalte (ZnSPM) sind im Jahre 2008 am häufigsten im Bereich zwischen 20-140 ng/dm³ anzutreffen (Abb. 6). Ähnlich wie bei Cadmium und Kupfer beobachten wir im Gotlandbecken eine Abnahme der Zndiss und eine Zunahme der ZnSPM unterhalb der Redoxcline.

Quecksilber

Wie im Vorjahr wurden die Quecksilberkonzentrationen (gesamt) im niedrigeren Bereich zwischen 200-500 pg/dm³ am häufigsten angetroffen. Die Konzentrationen im Oberflächenwasser (Abb. 9) sind in 2008 in der westlichen Ostsee vergleichbar zum Vorjahr, während sie in der zentralen Ostsee mit Werten um 300 pg/ dm³ etwas niedriger sind. Auch in 2008 waren wieder außergewöhnliche Parallelen der Hg-tot Konzentrationen im Bereich der partikulären Manganmaxima im Gotlandbecken zu beobachten.

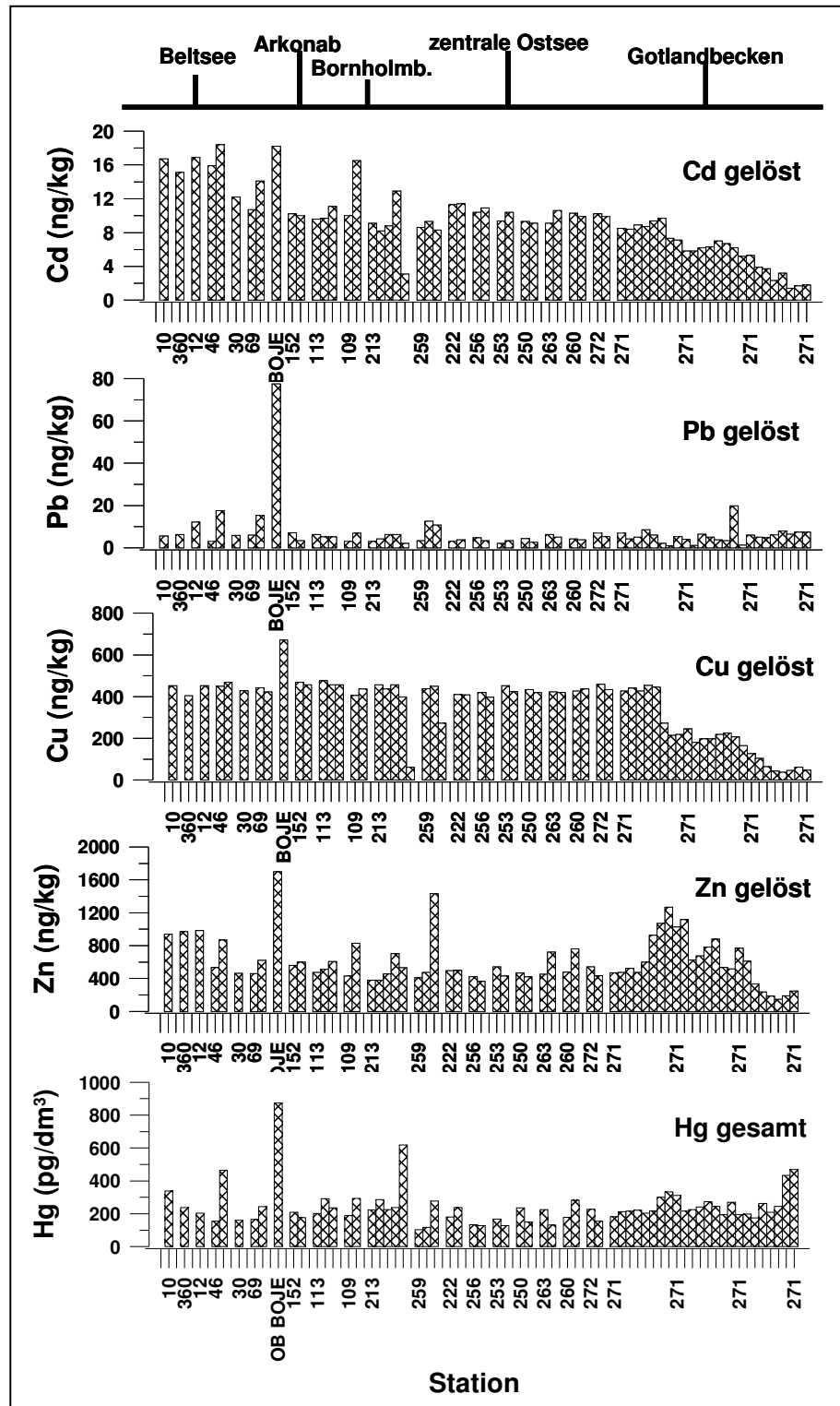


Abb. 3
Verteilungsmuster der gelösten Metallkonzentrationen an den 2008 beprobten Stationen und Tiefen in der Ostsee (siehe Datenanhang)

Fig. 3
Distribution of metal concentrations in the dissolved phases in 2008, at the different sampling stations and sampling depth in the Baltic

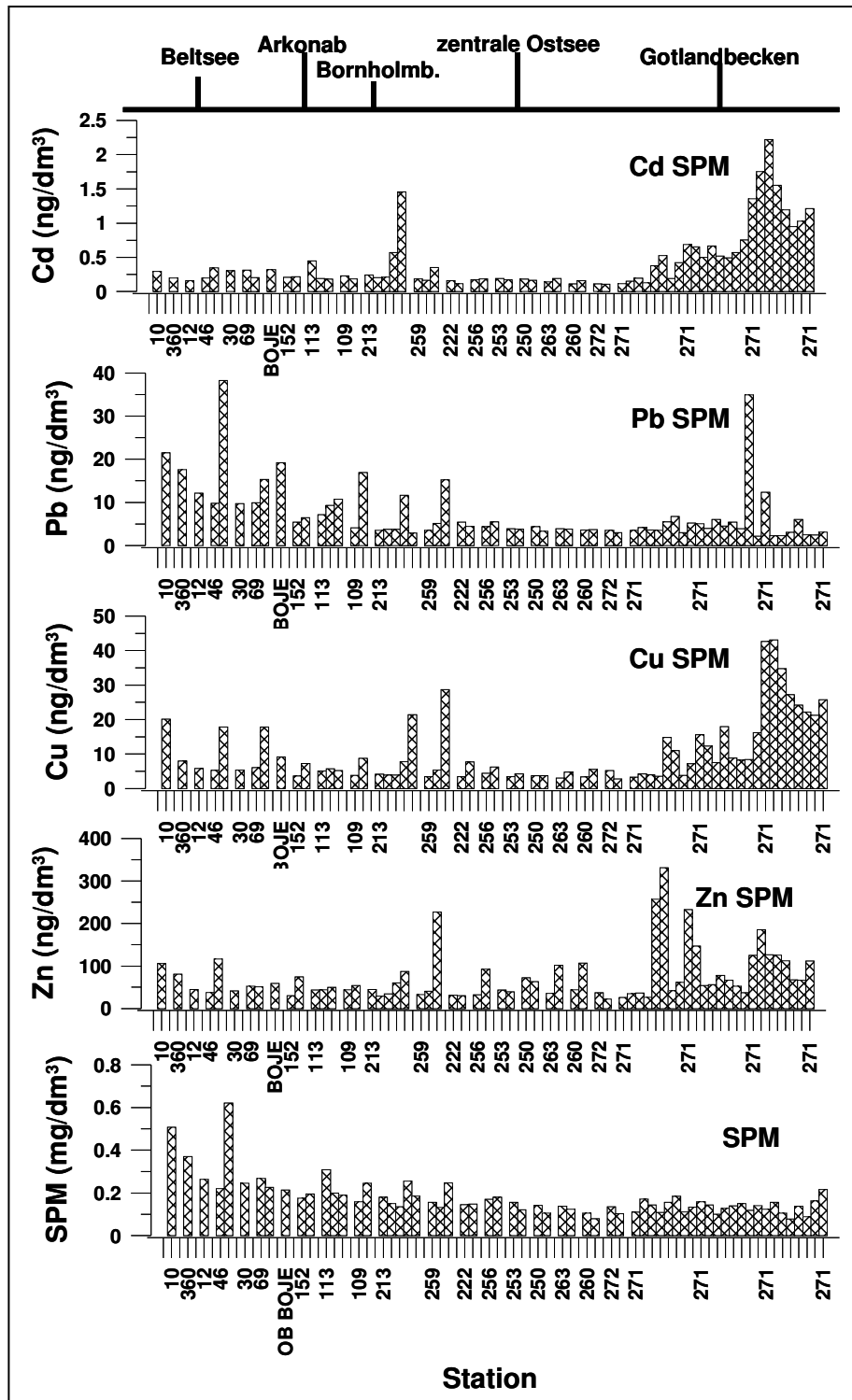


Abb. 4
Verteilungsmuster der Metallkonzentrationen in SPM (volumenbezogen) an den 2008 beprobten Stationen und Tiefen in der Ostsee (siehe Datenanhang)

Fig. 4
Distribution of metal concentrations in the particulate phases (related to the volume) in 2008, at the different sampling stations and sampling depth in the Baltic

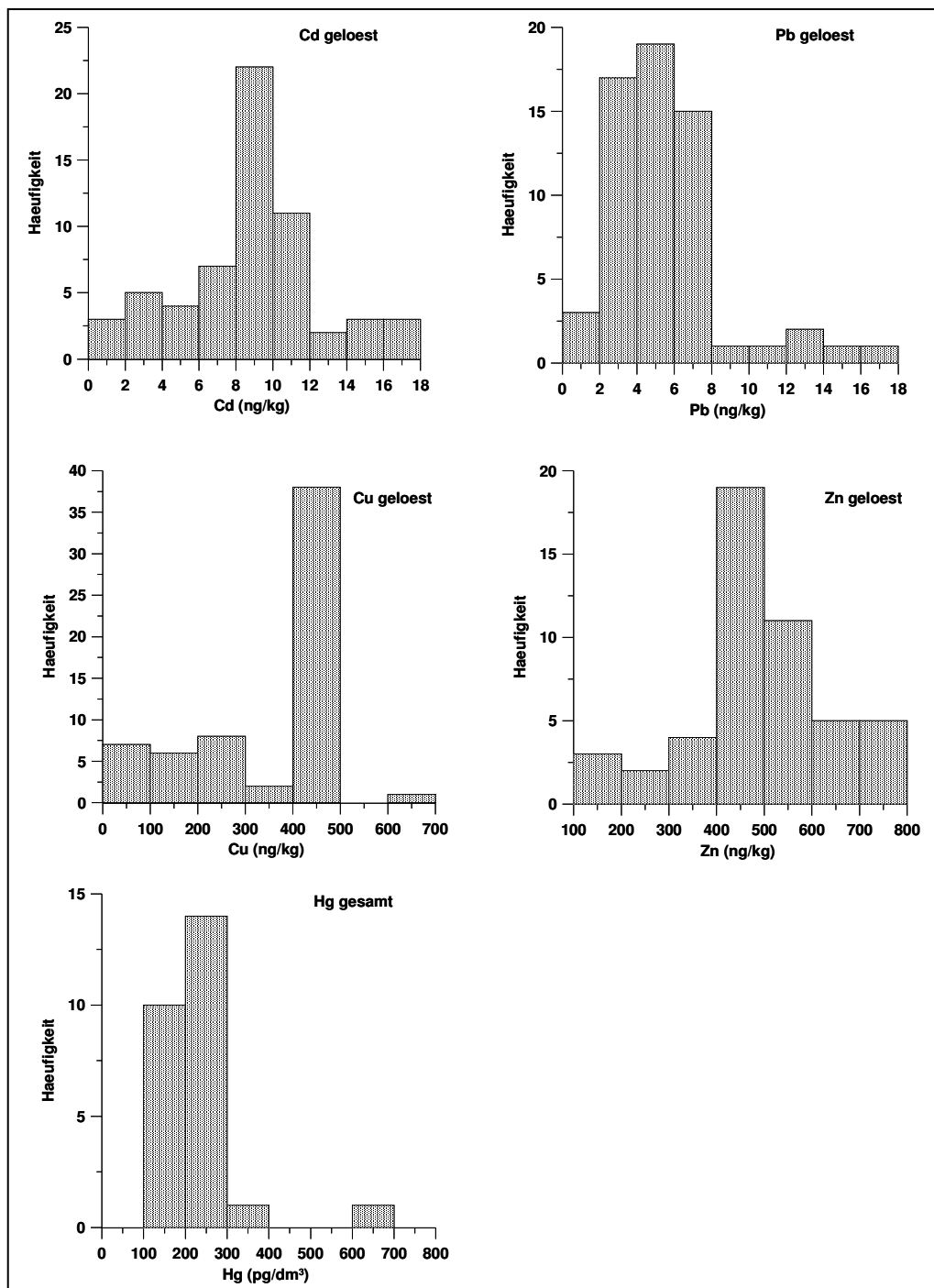


Abb. 5
Häufigkeitsverteilungen der gelösten Metallkonzentrationen in der Ostsee, im Februar 2008

Fig. 5
Frequency distribution of metal concentrations in the dissolved phases in the Baltic; February 2008

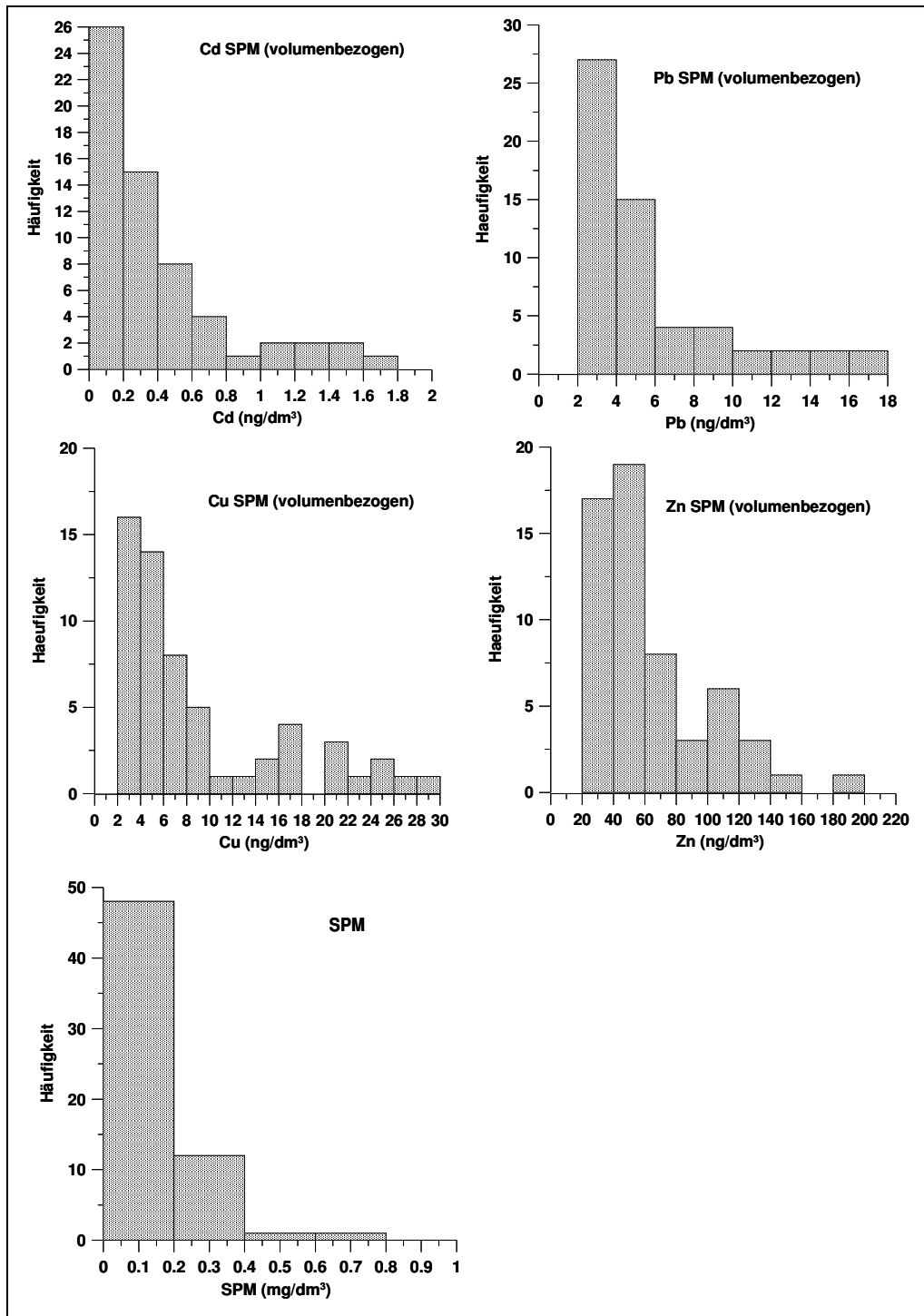


Abb. 6

Häufigkeitsverteilungen der Metallkonzentrationen in der Schwebstoffphase (volumenbezogen) in der Ostsee, Februar 2008

Fig. 6

Frequency distribution of metal concentrations in the particulate phases (related to the volume) in the Baltic; February 2008

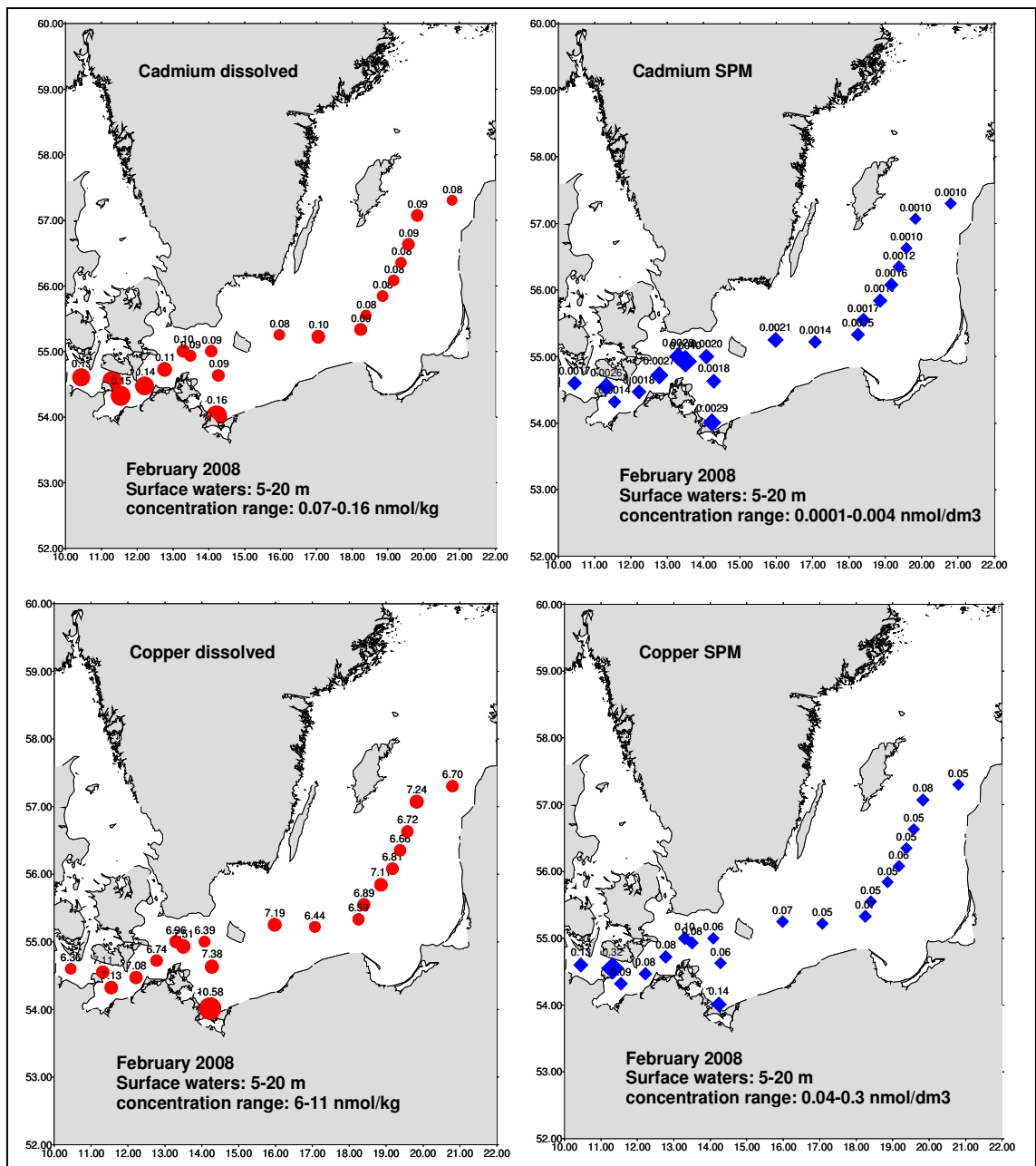


Abb. 7

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

Fig. 7

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

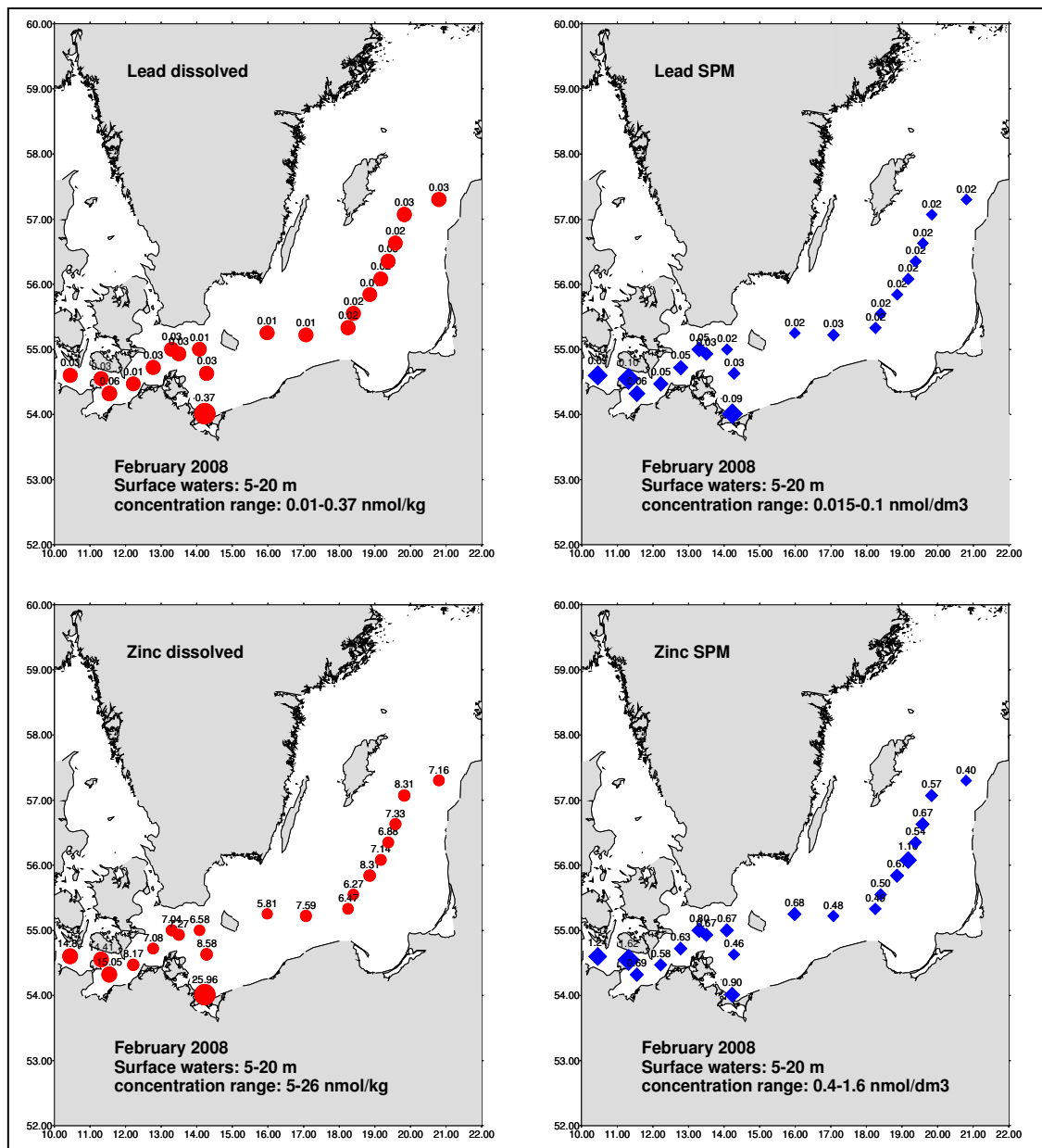


Abb. 8

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

Fig. 8

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

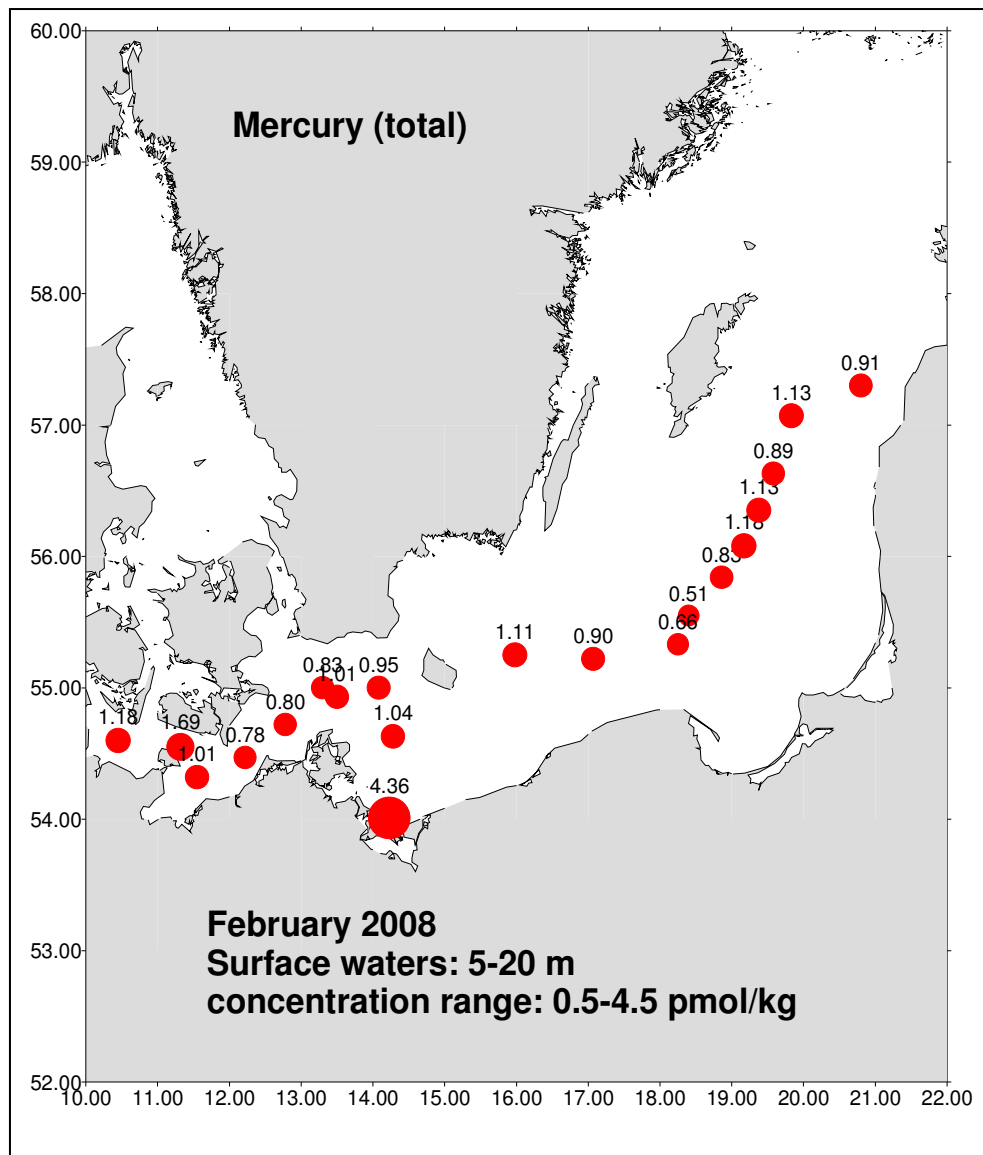


Abb. 9
 Verteilung von Quecksilber (gesamt) Hg (tot) im Oberflächenwasser der Ostsee

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

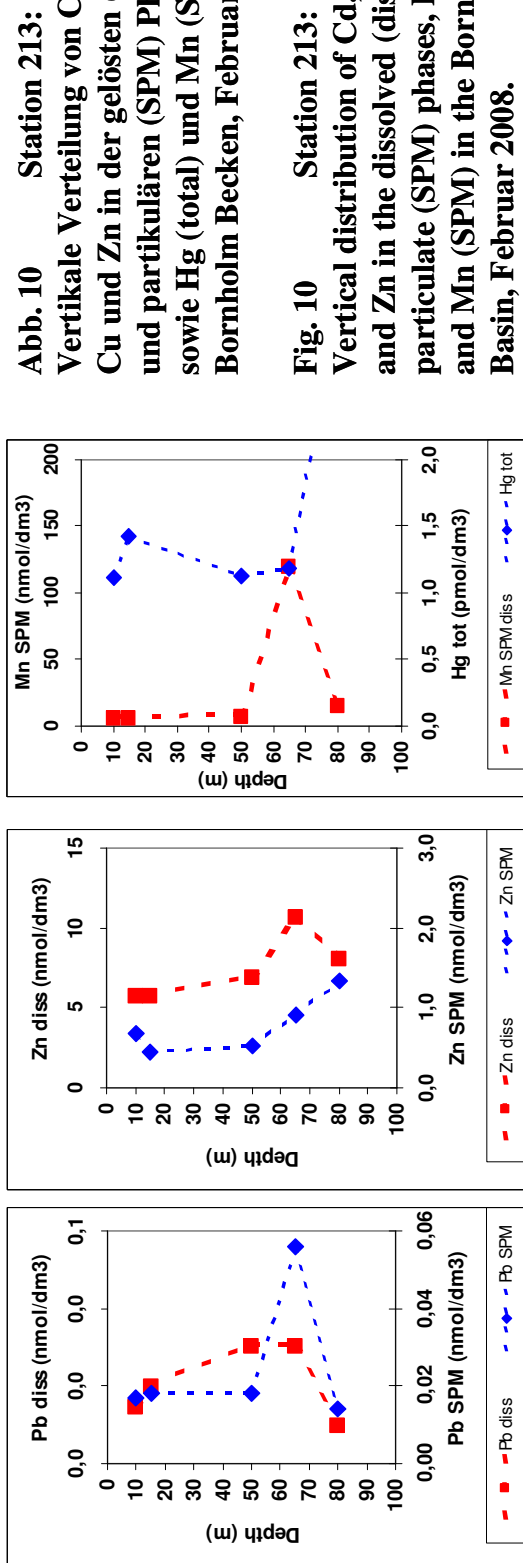
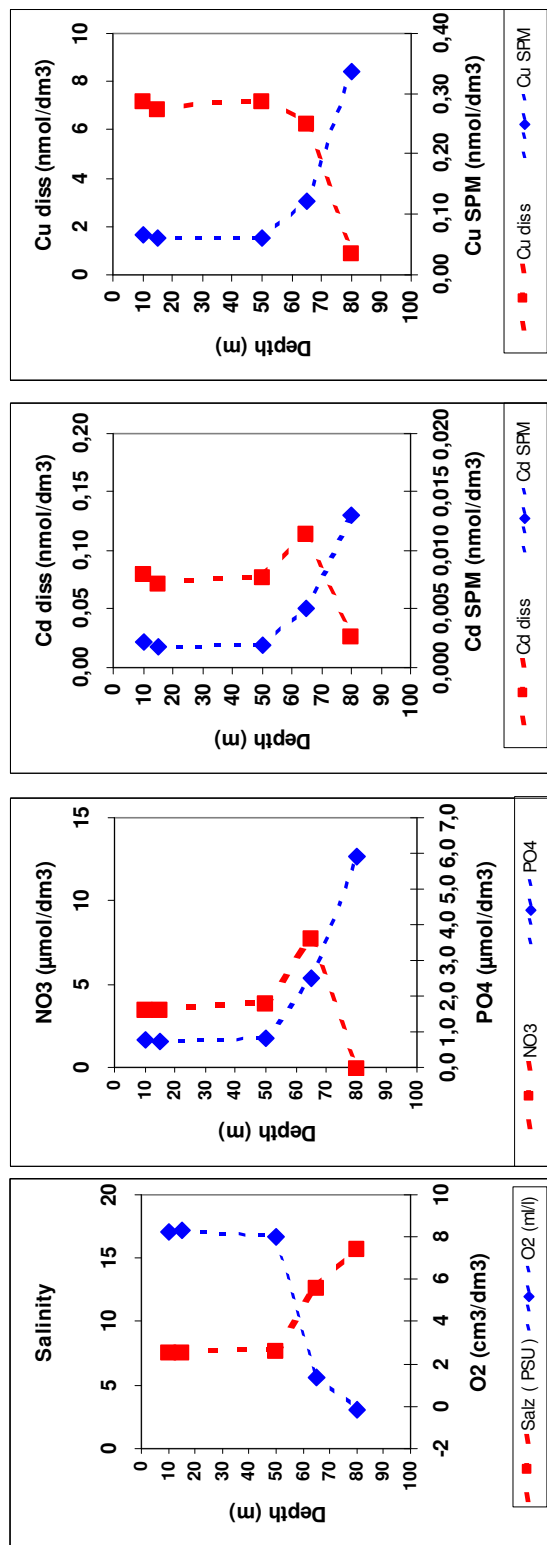


Abb. 10 Station 213:
 Vertikale Verteilung von Cd, Pb, Cu und Zn in der gelösten (diss) und partikulären (SPM) Phase, sowie Hg (total) und Mn (SPM) im Bornholm Becken, Februar 2008.

Fig. 10 Station 213:
 Vertical distribution of Cd, Pb, Cu and Zn in the dissolved (diss) and particulate (SPM) phases, Hg (total) and Mn (SPM) in the Bornholm Basin, Februar 2008.

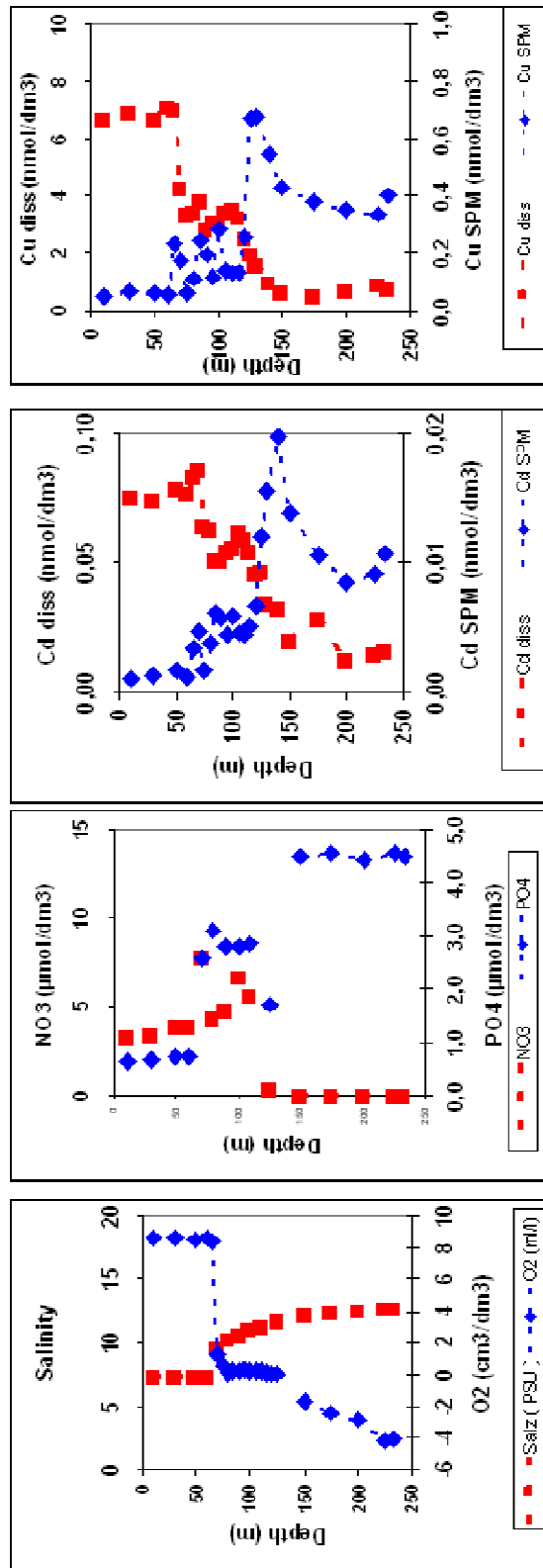


Abb. 11 Station 271:
Vertikale Verteilung von Cd, Pb, Cu und Zn in der gelösten (diss) und partikulären (SPM) Phase, sowie Hg (total) und Mn (SPM) im Gotland Becken, Februar 2008.

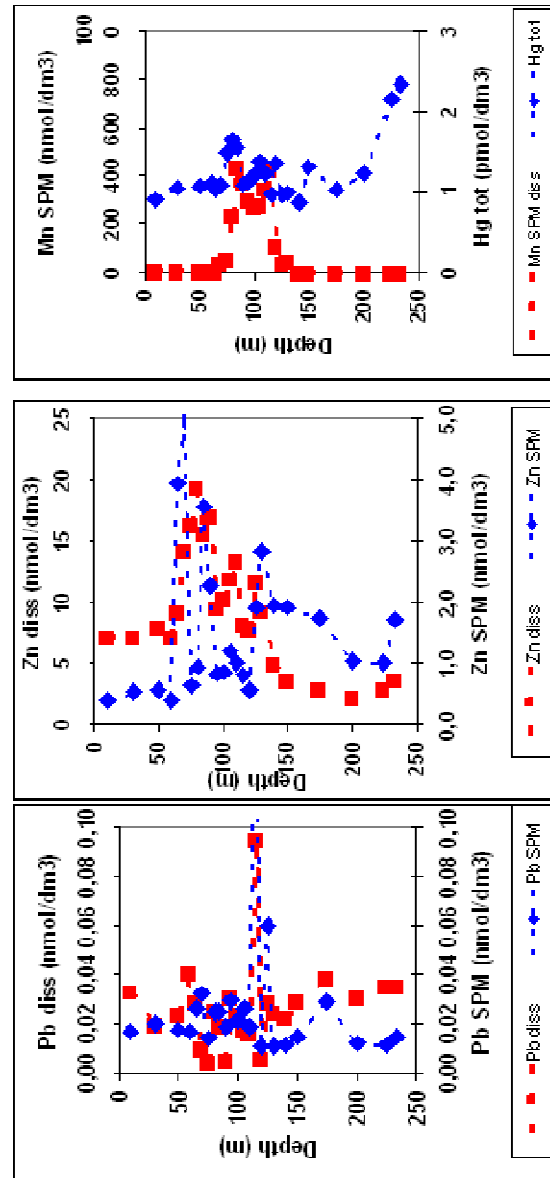


Fig. 11 Station 271:
Vertical distribution of Cd, Pb, Cu and Zn in the dissolved (diss) and particulate (SPM) phases, Hg (total) and Mn (SPM) in the Gotland Basin, February 2008.

3.2 Spurenmetall – Trends zwischen den Jahren 1993-2008 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), K7 (069), 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** an diesen Stationen ebenfalls dargestellt. Sie variieren in den letzten 10 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 7-17.

Für **Quecksilber gesamt (Hgtot)** konnte seit 1997 eine abnehmende Tendenz beobachtet werden, seit 1998 fluktuieren die Werte auf einem niedrigen Niveau, welches die Dynamik in der westlichen Ostsee widerspiegelt. Die erhöhten Konzentrationen 1999 sind auf das Orkantief, die damit verbundene bodennahe Durchmischung und den Eintrag von Oberflächensedimenten in die Wassersäule zurückzuführen. Da bei der Quecksilber (gesamt) Messung unfiltrierte Wasserproben aufgearbeitet werden, wirkt sich dieses auf die "Gesamtkonzentration" besonders stark aus. Seit 2001 fluktuieren die Hg gesamt Konzentrationen auf einem sehr niedrigen Niveau, ein Trend ist nicht zu erkennen.

Die Mehrzahl der **Cddiss** Konzentrationen variiert über den gesamten Zeitraum zwischen 0,1-0,2 nmol/kg. Eine tendenzielle Abnahme fällt bis 1996 auf, welches möglicherweise im Zusammenhang mit dem Salzwassereinbruch 1994 und dem Ausstrom von Cd-armem Tiefenwasser aus dem Gotlandbecken steht. Bis 1998 ist ein leichter Anstieg, und danach ist bis 2006 wieder eine tendenzielle Abnahme zu beobachten. Die Werte von 2008 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.

Für **Cudiss** wurden 1993 sehr niedrige Konzentrationen in der westlichen Ostsee angetroffen, welches auf den Salzwassereinstrom 1993 und dem damit verbundenen Einstrom von Nordseewasser mit niedrigeren Cudiss um 4,5 nmol/kg zurückgeführt wird. Danach ist bis 1996 wieder eine ansteigende Tendenz zu erkennen, und seit 1997 ist ein abnehmender Trend bis 2005 zu vermerken. Vernachlässigt man die Werte von 2006, so kann zwischen 1996-2008 ein abnehmender 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 2008 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 2008 passen sich die Werte 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 2008 sind wiederum auf dem gleichen niedrigeren Niveau wie in den Vorjahren.

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 2008 bewegen sich die Konzentrationen auf einem sehr niedrigen Niveau.

Zentrale Ostsee

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

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

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

Die seit 1995 anhaltende Stagnationsperiode, und die damit verbundene Stabilisierung der anoxischen Verhältnisse in den tieferen Ostseebecken spiegelt sich vor allem in den abnehmenden Trends für Cddiss, Cudiss, Pbdiss und Zndiss und den ansteigenden Trends für gelöstes Mangan unterhalb der Haloclinen an den Stationen in der zentralen Ostsee wieder. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Änderung der Redoxverhältnisse im Tiefenwasser des Gotlandbeckens, und die damit verbundene Elimination der Metalle als schwerlösliche Sulfide einen Einfluss auf die Metallverteilung im Oberflächenwasser hat (Pohl & Hennings 2005).

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

Der Salzwassereinbruch von 2003 wirkt sich in den Jahren 2004 und 2005 im Tiefenwasser des Gotlandbeckens nur geringfügig aus. Der gesamte Eindruck der Trenddarstellung wird in 2004/2005 durch die sehr niedrigen Konzentrationen im Tiefenwasser des Landsorttiefs geprägt, welches durch den Salzwassereinbruch 2003 nicht beeinflusst wurde. In 2008 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.

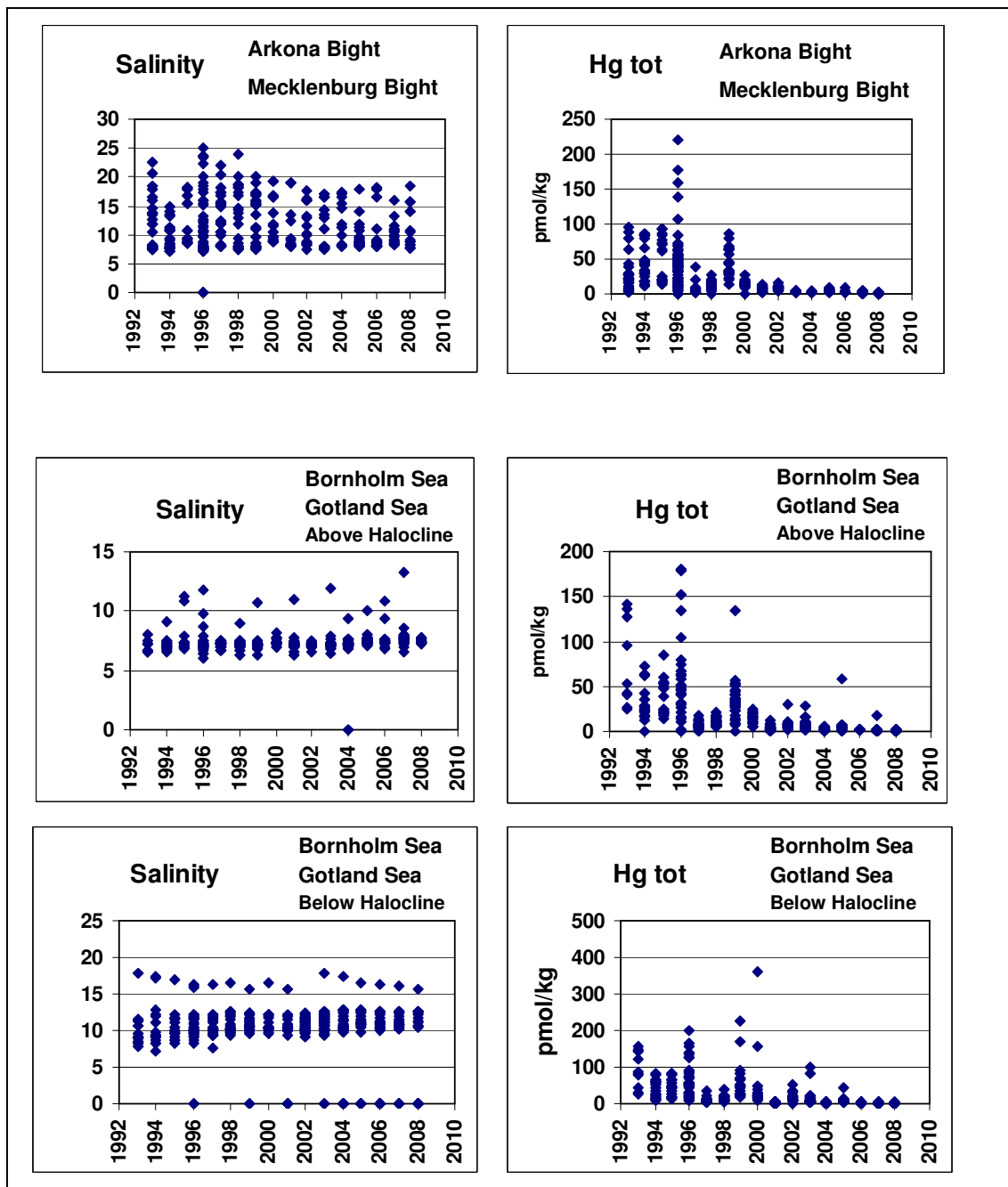


Abb. 12

Trends für Salzgehalt und Quecksilber gesamt (Hg tot), in der westlichen Ostsee, sowie oberhalb und unterhalb der Haloclinen in der zentralen Ostsee von 1993-2008

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- 2008

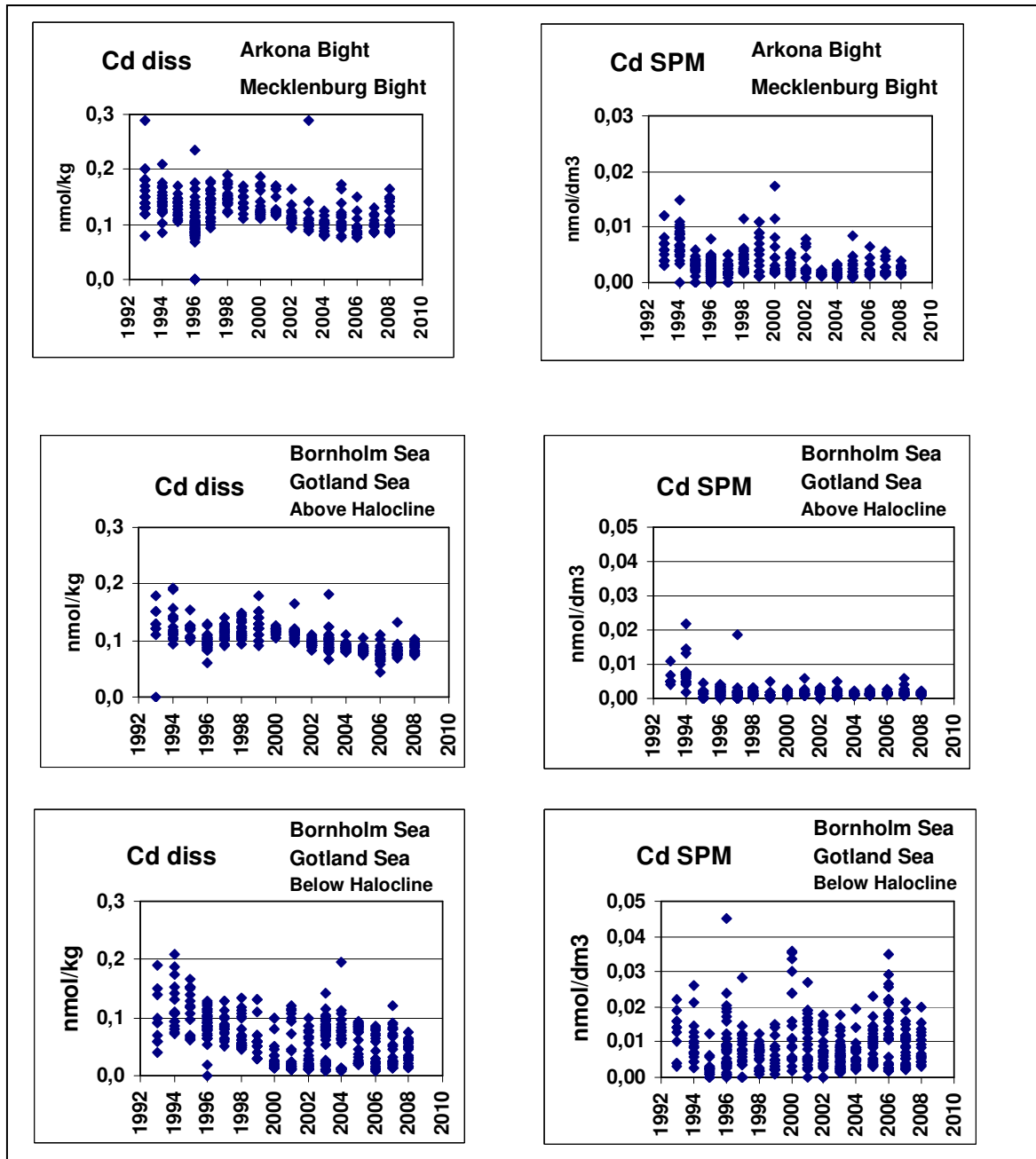


Abb. 13

Trends für gelöstes (diss) und partikuläres (SPM) Cadmium, in der westlichen Ostsee, sowie oberhalb und unterhalb der Haloclinen in der zentralen Ostsee von 1993-2008

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- 2008

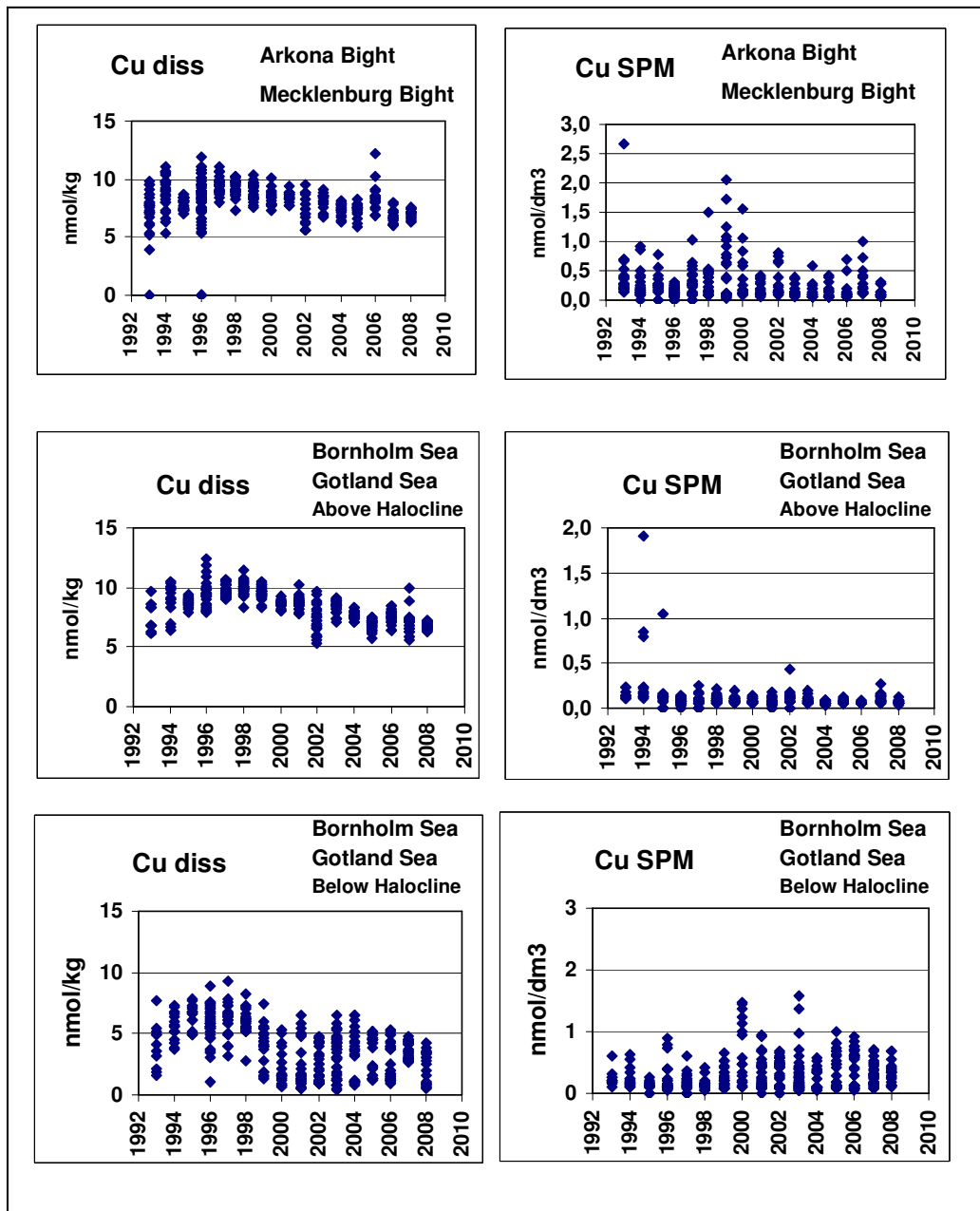


Abb. 14

Trends für gelöstes (diss) und partikuläres (SPM) Kupfer, in der westlichen Ostsee, sowie oberhalb und unterhalb der Haloclinen in der zentralen Ostsee von 1993-2008

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- 2008

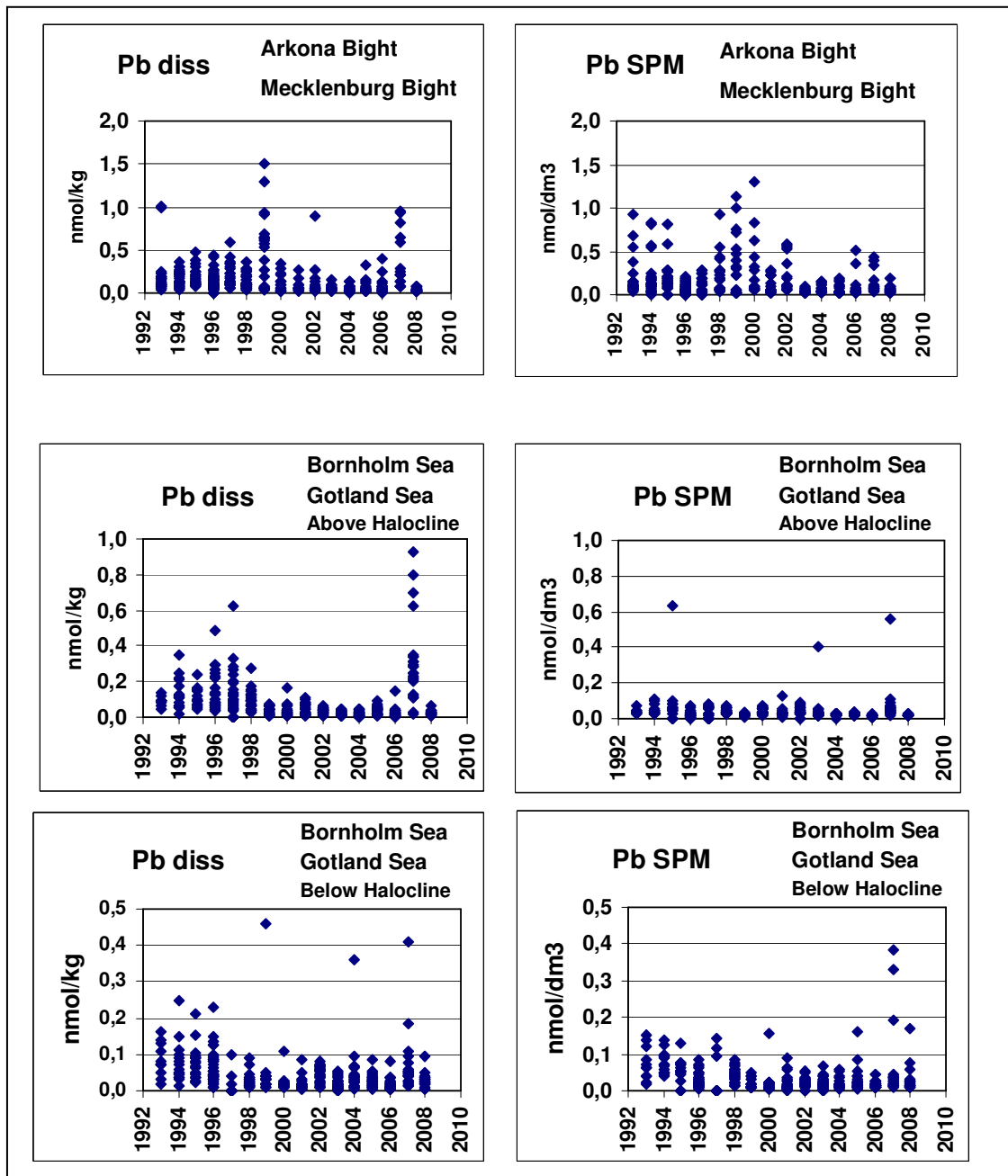


Abb. 15

Trends für gelöstes (diss) und partikuläres (SPM) Blei, in der westlichen Ostsee, sowie oberhalb und unterhalb der Haloclinen in der zentralen Ostsee von 1993-2008

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- 2008

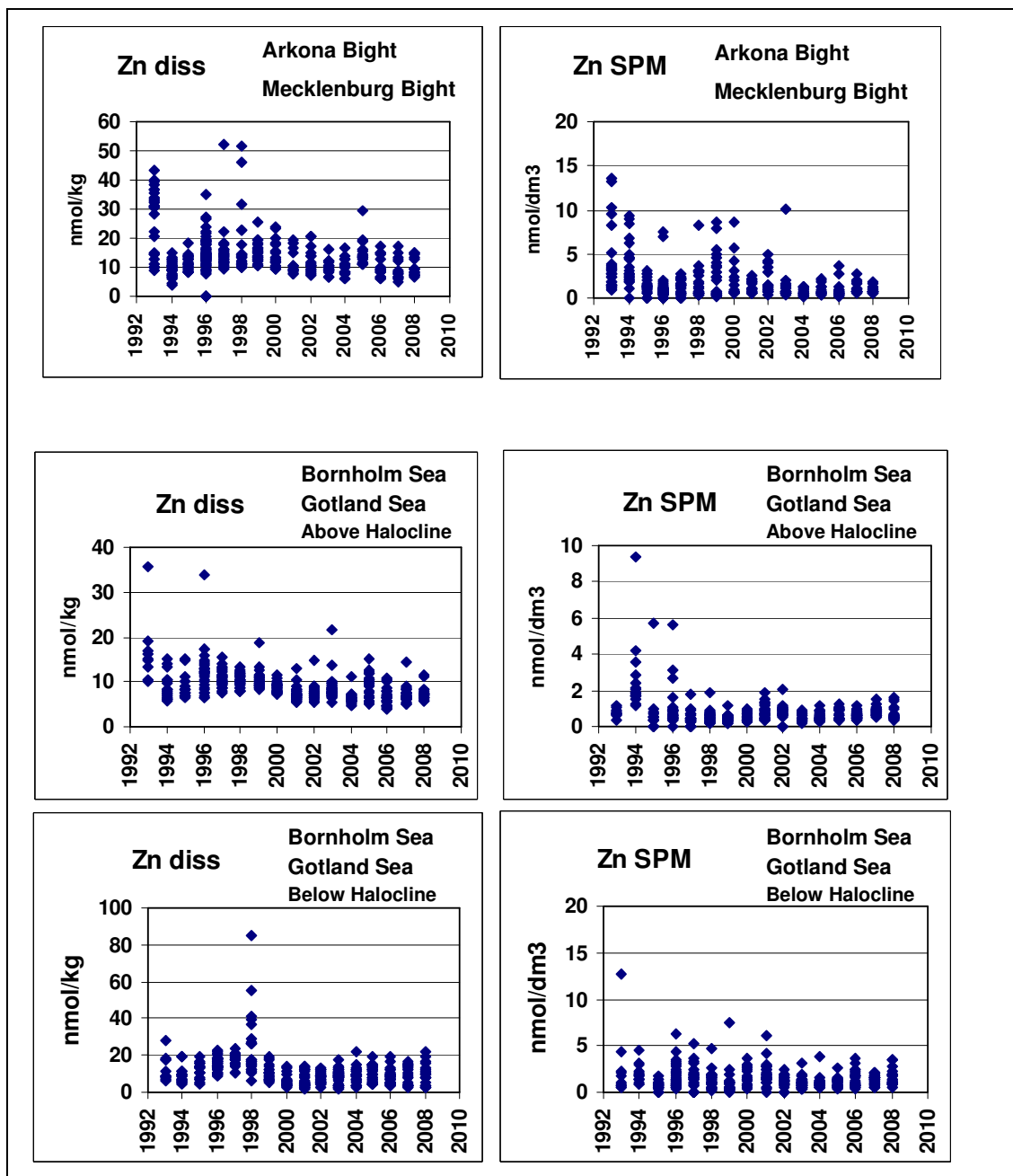


Abb. 16

Trends für gelöstes (diss) und partikuläres (SPM) Zink, in der westlichen Ostsee, sowie oberhalb und unterhalb der Haloclinen in der zentralen Ostsee von 1993-2008

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- 2008

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 2008 sind in den Tabellen 8, 9 und 10 dargestellt.

Tab. 8

Ergebnisse der Korngrößenfraktionierung (<20 µm) und Analysen von Kohlenstoff (C), Stickstoff (N), und Schwefel (S) an der Feinfraktion

Table 8

Results of grain size fractionation (<20 µm) and analyses of carbon (C), nitrogen (N) and sulphur (S) at the fine fraction

BSH ID	IOW Geo-Nr.	<20 µm (%)	C-org. (%)	TIC (%)	Ca CO3 (%)	N (%)	S (%)	C/N
IOW 3	364100	18.7	5.74	0.60	5.01	0.76	0.81	7.5
IOW 4	364110	2.0	7.06	2.01	16.74	1.03	0.75	6.9
K 8	364120	1.7	7.72	0.19	1.59	1.03	0.51	7.5
ARKO 3	364130	15.2	4.90	0.30	2.46	0.54	0.66	9.1
IOW 8	364140	10.2	8.86	0.09	0.77	1.14	1.16	7.8
ODER	364150	2.7	12.67	0.41	3.38	1.71	1.00	7.4
K 4	364160	70.9	5.61	0.24	1.96	0.59	1.17	9.5
IOW 6	364170	65.3	6.07	0.11	0.96	0.72	0.66	8.4
K 7	364180	64.3	6.95	0.02	0.14	0.84	1.22	8.3
IOW 5	364190	34.9	5.33	0.20	1.66	0.65	0.61	8.2
M 2	364200	57.8	5.21	0.19	1.58	0.58	1.00	9.0
IOW 2	364210	43.7	5.25	0.81	6.75	0.61	0.54	8.6
N 1	364220	19.2	5.32	0.81	6.76	0.64	0.70	8.3
N 3	364230	4.6	6.90	0.37	3.12	0.88	0.69	7.8

Tab. 9

Konzentrationen von Haupt- und Spurenelementen (Begleitparameter) in der Fraktion < 20 μm

Table 9

Concentrations of major- and trace elements (accompanying parameters) in the fraction < 20 μm

IOW Geo-Nr.	AL (%)	Li (mg/kg)	Fe (%)	Mn (mg/kg)	Ca (%)	P (%)
364100	3.19	39	3.25	601	2.10	0.181
364110	3.69	37	3.50	1540	6.89	0.266
364120	3.41	40	4.10	2828	2.02	0.291
364130	2.66	28	2.52	329	1.11	0.126
364140	2.19	31	3.12	345	0.65	0.194
364150	2.66	32	4.56	4391	1.74	0.363
364160	2.56	37	3.75	463	0.90	0.163
364170	2.64	40	3.60	362	0.70	0.193
364180	2.53	37	3.73	327	0.53	0.164
364190	2.39	27	2.60	353	1.08	0.133
364200	2.69	38	3.52	383	0.88	0.125
364210	3.64	35	3.78	1605	2.78	0.204
364220	3.62	36	3.41	720	2.84	0.145
364230	2.83	35	3.68	1882	1.51	0.234

Tab. 10

Konzentrationen von Spurenmetallen in der Fraktion < 20 μm

Table 10

Concentrations of trace metals in the fraction < 20 μm

IOW Geo-Nr.	Cr (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Co (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Cd (mg/kg)	As (mg/kg)	Hg ($\mu\text{g/kg}$)
364100	74	38	14	66	158	31	0.73	15	133
364110	76	38	14	103	208	58	0.81	28	128
364120	82	47	19	127	233	55	0.96	30	159
364130	76	39	9	66	133	35	0.87	11	127
364140	81	41	12	93	242	53	2.09	18	246
364150	94	53	18	173	499	80	2.93	29	521
364160	82	50	13	85	168	42	0.79	22	190
364170	87	43	13	94	179	48	0.76	17	246
364180	92	47	14	119	215	60	1.16	21	466
364190	73	43	11	73	154	34	0.87	10	218
364200	87	38	16	87	187	39	0.88	20	172
364210	80	41	15	68	170	32	0.67	22	133
364220	82	41	16	77	189	35	0.78	15	147
364230	82	43	16	85	195	40	0.74	23	169

Die im Jahr 2008 auf den Stationen gemessenen Werte fügen sich generell in das Bild der bislang vorliegenden Untersuchungen ein. Es sind keine Extremwerte oder unerwartete Abweichungen im Vergleich zu den Vorjahren zu verzeichnen. Zur Veranschaulichung der regionalen „Belastungssituation“ wird in Abbildung 17 als Beispiel die Verteilung des Hg ($\mu\text{g}/\text{kg}$) dargestellt.

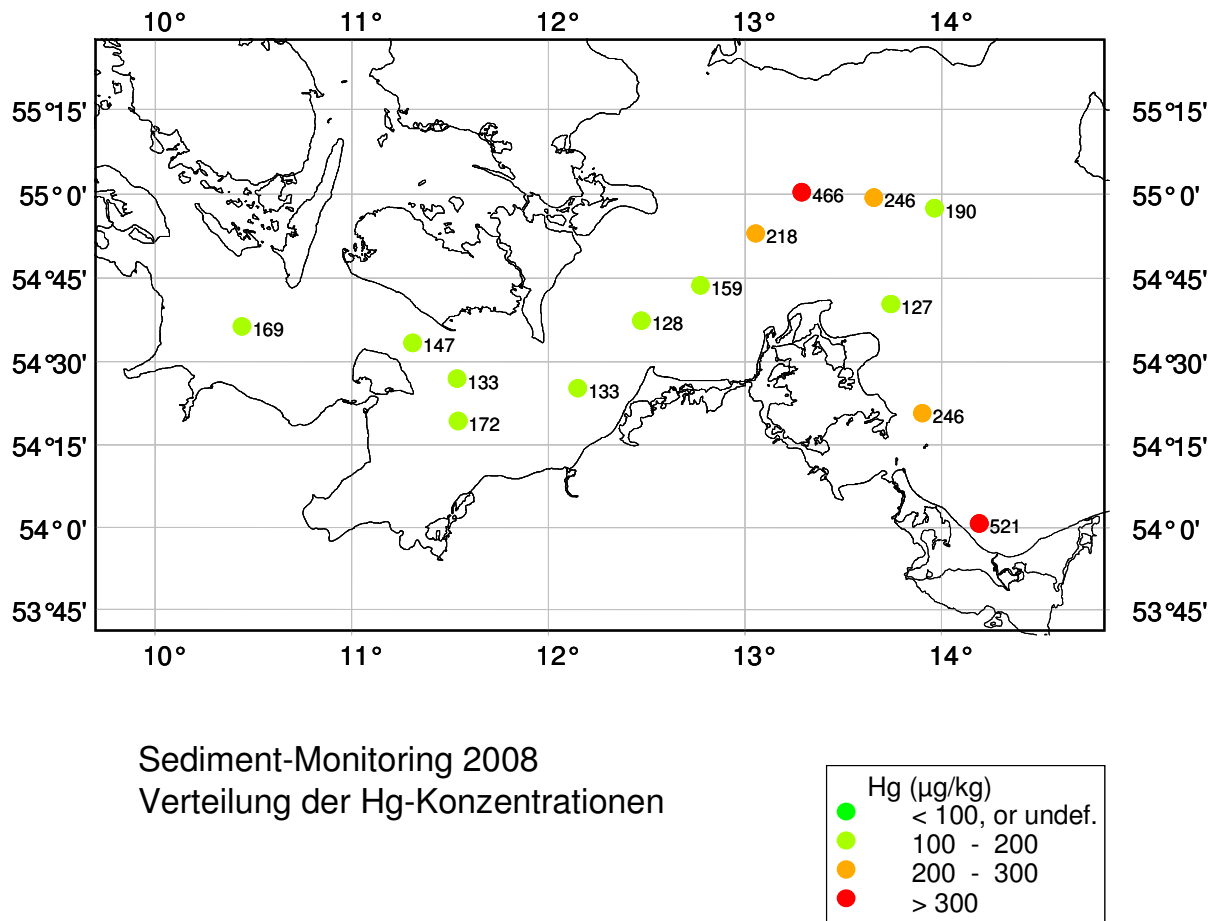


Abb. 17

Regionale Verteilung der Hg-Konzentrationen in Oberflächensedimenten der Monitoring-Stationen 2008

Fig. 17

Regional distribution of Hg-concentrations in surface sediments of the monitoring stations 2008

Neben der bekannten Lokalität „Altlast Lübecker Bucht“ (Leipe et al., 2005), die jetzt nicht mehr im Meßprogramm enthalten ist, fallen insbesondere die höheren Hg-Gehalte im westlichen Arkonabecken und vor der Odermündung auf. Beim Arkonabecken handelt es sich ebenfalls um ein „Altlasten-Problem“ wie in den Arbeiten von Kowalski (2007) und Leipe et al., (2008, S.431 ff) dargelegt ist. Bei der Odermündung ist zu beachten, daß die hohen Schwermetallbelastungen im Sediment des Oderhaffs (Bachor, 2005) durch

Resuspension und Austrag in die vorgelagerte Ostsee auf die Konzentrationen der Feinfraktion in der Pommernbucht „ausstrahlen“.

4. Schlussfolgerungen

Wie in den Vorjahren wies die Schwermetallverteilung im Ostseewasser im Jahr 2008 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 2008 bei ca. 120 m angetroffen wurde, wurde ein Rückgang der gelösten Metallkonzentrationen für Cd_{diss}, Cu_{diss} und Zn_{diss} beobachtet. Weiterhin ist eine leichte Zunahme der CdSPM, CuSPM und ZnSPM mit der Tiefe zu verzeichnen, welches auf die Stabilisierung einer weiteren Stagnationsperiode schließen lässt. Insgesamt gesehen hatte der Salzwassereinbruch 2003 vor allem einen Einfluss auf die Langzeittrends der Metallkonzentrationen im Tiefenwasser der zentralen Ostsee. Insofern bietet sich jetzt ähnlich wie 1995 die außergewöhnliche Chance, die Veränderung der Metallkonzentrationen während der Stabilisierung des anoxischen Tiefenwasserkörpers, sowie deren Rückkopplungsmechanismus auf das Oberflächenwasser während einer weiteren Stagnationsperiode zu beobachten.

Für die Schwermetallsituation in den Sedimenten der westlichen Ostsee (Kieler Bucht bis Pommernbucht (Odermündung) lassen sich drei regionale Belastungs-Schwerpunkte mit erhöhten Konzentrationen einzelner Metalle aushalten: 1. Die Altlast Lübecker Bucht (zurzeit nicht mehr im Messprogramm), die auf eine Verklappung von Industrieabfallprodukten in den 1960er Jahren zurückgeht. 2. Das Gebiet des westlichen Arkonabeckens, wo im Zeitraum des 2. Weltkrieges militärische Altlasten verbracht wurden. Und 3. das Gebiet der südlichen Pommernbucht (Odermündung), was durch Austrag schwermetallbelasteter Schwebstoffe (resuspendierte Sedimente) aus dem Oderhaff beeinflusst wird.

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-Pastuszak 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. Stoepler (ed.); Probenahme und Aufschluß; Springer-Labormannual, Heidelberg, 181pp.

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

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

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

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

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

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

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

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

POHL, C.; HENNINGS, U.; SIEGEL, H.; BACHOR, A. (2002): Trace metal impact into the Baltic Sea during the exceptional Oder flood in summer 1997. Mar. Chem., 79, 101-111.

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

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

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

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

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

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

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

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 mesoskaliger Strom- und Massfelder im Ozean (On numerical vorticity analysis of mesoscale current and mass fields in the ocean)
- 4 (1992) Lemke, Wolfram; Lange, Dieter; Endler, Rudolf (Eds.):
Proceedings of the Second Marine Geological Conference – The Baltic, held in Rostock from October 21 to October 26, 1991
- 5 (1993) Endler, Rudolf; Lackschewitz, Klas (Eds.):
Cruise Report RV "Sonne" Cruise SO82, 1992
- 6 (1993) Kulik, Dmitri A.; Harff, Jan:
Physicochemical modeling of the Baltic Sea water-sediment column: I. Reference ion association models of normative seawater and of Baltic brackish waters at salinities 1–40 ‰, 1 bar total pressure and 0 to 30 °C temperature
(system Na–Mg–Ca–K–Sr–Li–Rb–Cl–S–C–Br–F–B–N–Si–P–H–O)
- 7 (1994) Nehring, Dietwart; Matthäus, Wolfgang; Lass, Hans Ulrich; Nausch, Günther:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1993
- 8 (1995) Hagen, Eberhard; John, Hans-Christian:
Hydrographische Schnitte im Ostrandstromsystem vor Portugal und Marokko 1991 - 1992
- 9 (1995) Nehring, Dietwart; Matthäus, Wolfgang; Lass, Hans Ulrich; Nausch, Günther; Nagel, Klaus:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1994
Seifert, Torsten; Kayser, Bernd:
A high resolution spherical grid topography of the Baltic Sea

- 10** (1995) Schmidt, Martin:
Analytical theory and numerical experiments to the forcing of flow at isolated topographic features
- 11** (1995) Kaiser, Wolfgang; Nehring, Dietwart; Breuel, Günter; Wasmund, Norbert; Siegel, Herbert; Witt, Gesine; Kerstan, Eberhard; Sadkowiak, Birgit:
Zeitreihen hydrographischer, chemischer und biologischer Variablen an der Küstenstation Warnemünde (westliche Ostsee)
Schneider, Bernd; Pohl, Christa:
Spurenmittelkonzentrationen vor der Küste Mecklenburg-Vorpommerns
- 12** (1996) Schinke, Holger:
Zu den Ursachen von Salzwassereinbrüchen in die Ostsee
- 13** (1996) Meyer-Harms, Bettina:
Ernährungsstrategie calanoider Copepoden in zwei unterschiedlich trophierten Seegebieten der Ostsee (Pommernbucht, Gotlandsee)
- 14** (1996) Reckermann, Marcus:
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, Annekatriin:
Die Bedeutung von Partikeln für die Spurenmetallverteilung in der Ostsee, insbesondere unter dem Einfluß sich ändernder Redoxbedingungen in den zentralen Tiefenbecken
- 28** (1998) Leipe, Thomas; Eidam, Jürgen; Lampe, Reinhard; Meyer, Hinrich; Neumann, Thomas; Osadczuk, Andrzej; Janke, Wolfgang; Puff, Thomas; Blanz, Thomas; Gingele, Franz Xaver; Dannenberger, Dirk; Witt, Gesine:
Das Oderhaff. Beiträge zur Rekonstruktion der holozänen geologischen Entwicklung und anthropogenen Beeinflussung des Oder-Ästuars.
- 29** (1998) Matthäus, Wolfgang; Nausch, Günther; Lass, Hans Ulrich; Nagel, Klaus; Siegel, Herbert:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1997
- 30** (1998) Fennel, Katja:
Ein gekoppeltes, dreidimensionales Modell der Nährstoff- und 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-Pastuszak, Elżbieta; Olenina, Irina; Kavolyte, Rima; Jasinskaite, Aldona; Müller-Karulis, Bärbel; Ikauniece, Anda; Andrushaitis, Andris; Ojaveer, Henn; Kallaste, Kalle; Jaanus, Andres:
Trophic status of coastal and open areas of the south-eastern Baltic Sea based on nutrient and phytoplankton data from 1993 - 1997
- 39 (2000) Matthäus, Wolfgang; Nausch, Günther; Lass, Hans Ulrich; Nagel, Klaus; Siegel, Herbert:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1999
- 40 (2000) Schmidt, Martin; Mohrholz, Volker; Schmidt, Thomas; John, H.-Christian; Weinreben, Stefan; Diesterheft, Henry; Iita, Aina; Filipe, Vianda; Sangolay, Bomba-Bazik; Kreiner, Anja; Hashoongo, Victor; da Silva Neto, Domingos:
Data report of R/V "Poseidon" cruise 250 ANDEX'1999
- 41 (2000) v. Bodungen, Bodo; Dannowski, Ralf; Erbguth, Wilfried; Humborg, Christoph; Mahlburg, Stefan; Müller, Chris; Quast, Joachim; Rudolph, K.-U.; Schernewski, Gerald; Steidl, Jörg; Wallbaum, Volker:
Oder Basin - Baltic Sea Interactions (OBBSI): Endbericht
- 42 (2000) Zettler, Michael L.; Bönsch, Regine; Gosselck, Fritz:
Verbreitung des Makrozoobenthos in der Mecklenburger Bucht (südliche Ostsee) - rezent und im historischen Vergleich
- 43 (2000) Wasmund, Norbert; Alheit, Jürgen; Pollehne, Falk; Siegel, Herbert:
Der biologische Zustand der Ostsee im Jahre 1999 auf der Basis von Phytoplankton- und Zooplanktonuntersuchungen
- 44 (2001) Eichner, Christiane:
Mikrobielle Modifikation der Isotopensignatur des Stickstoffs in marinem partikulären Material
- 45 (2001) Matthäus, Wolfgang; Nausch, Günther (Editors):
The hydrographic-hydrochemical state of the western and central Baltic Sea in 1999/2000 and during the 1990s
- 46 (2001) Wasmund, Norbert; Pollehne, Falk; Postel, Lutz; Siegel, Herbert; Zettler, Michael L.:
Biologische Zustandseinschätzung der Ostsee im Jahre 2000
- 47 (2001) Lass, Hans Ulrich; Mohrholz, Volker; Nausch, Günther; Pohl, Christa; Postel, Lutz; Rüß, Dietmar; Schmidt, Martin; da Silva, Antonio; Wasmund, Norbert:
Data report of R/V "Meteor" cruise 48/3 ANBEN'2000
- 48 (2001) Schöner, Anne Charlotte:
Alkenone in Ostseesedimenten, -schwebstoffen und -algen: Indikatoren für das Paläomilieu?

- 49 (2002) Nausch, Günther; Feistel, Rainer; Lass, Hans Ulrich; Nagel, Klaus; Siegel, Herbert:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2001
Pohl, Christa; Hennings, Ursula:
Ostsee-Monitoring - Die Schwermetall-Situation in der Ostsee im Jahre 2001
- 50 (2002) Manasreh, Riyad:
The general circulation and water masses characteristics in the Gulf of Aqaba and northern Red Sea
- 51 (2002) Wasmund, Norbert; Pollehne, Falk; Postel, Lutz; Siegel, Herbert; Zettler, Michael L.:
Biologische Zustandseinschätzung der Ostsee im Jahre 2001
- 52 (2002) Reißmann, Jan Hinrich:
Integrale Eigenschaften von mesoskaligen Wirbelstrukturen in den tiefen Becken der Ostsee
- 53 (2002) Badewien, Thomas H.:
Horizontaler und vertikaler Sauerstoffaustausch in der Ostsee
- 54 (2003) Fennel, Wolfgang; Hentzsch, Barbara (Herausgeber):
Festschrift zum 65. Geburtstag von Wolfgang Matthäus
- 55 (2003) Nausch, Günther; Feistel, Rainer; Lass, Hans Ulrich; Nagel, Klaus; Siegel, Herbert:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2002
Pohl, Christa; Hennings, Ursula:
Die Schwermetall-Situation in der Ostsee im Jahre 2002
- 56 (2003) Wasmund, Norbert; Pollehne, Falk; Postel, Lutz; Siegel, Herbert; Zettler, Michael L.:
Biologische Zustandseinschätzung der Ostsee im Jahre 2002
- 57 (2004) Schernewski, Gerald; Dolch, Tobias (Editors):
The Oder estuary against the background of the European Water Framework Directive
- 58 (2004) Feistel, Rainer; Nausch, Günther; Matthäus, Wolfgang; Łysiak-Pastuszak, Elżbieta; Seifert, Torsten; Sehested Hansen, Ian; Mohrholz, Volker; Krüger, Siegfried; Buch, Erik; Hagen, Eberhard:
Background Data to the Exceptionally Warm Inflow into the Baltic Sea in late Summer of 2002
- 59 (2004) Nausch, Günther; Feistel, Rainer; Lass, Hans Ulrich; Nagel, Klaus; Siegel, Herbert:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2003
Pohl, Christa; Hennings, Ursula:
Die Schwermetall-Situation in der Ostsee im Jahre 2003
- 60 (2004) Wasmund, Norbert; Pollehne, Falk; Postel, Lutz; Siegel, Herbert; Zettler, Michael L.:
Biologische Zustandseinschätzung der Ostsee im Jahre 2003

- 61** (2004) Petry, Carolin:
Mikrobieller Abbau von partikulärem organischen Material in der tiefen Wassersäule
- 62** (2005) Nausch, Günther; Feistel, Rainer; Lass, Hans Ulrich; Nagel, Klaus; Siegel, Herbert:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2004
Pohl, Christa; Hennings, Ursula:
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.:
Assessment of the biological state of the Baltic Sea in 2007
- 75** (2009) Hagen, Eberhard; Plüscke, 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:
Die Schwermetall-Situation in der Ostsee im Jahre 2008