

Meereswissenschaftliche Berichte
MARINE SCIENCE REPORTS

No. 86

**Hydrographisch-hydrochemische Zustandseinschätzung der
Ostsee 2011**

von

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

Leibniz- Institut für Ostseeforschung Warnemünde
2012

NAUSCH, G.; FEISTEL, R.; UMLAUF, L.; MOHRHOLZ, V.; NAGEL, K., SIEGEL, H.:
Hydrographisch-hydrochemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2011

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Kurzfassung/ Abstract	3
1. Einleitung	4
2. Meteorologische Bedingungen	7
3. Wasseraustausch durch die Ostseezugänge/ Beobachtungen an der Messplattform „Darßer Schwelle“	29
3.1. Statistische Analyse	29
3.2. Die Wintermonate und der Einstrom im März	34
3.3. Erwärmungsphase und die Sommermonate	37
3.4. Abkühlungsphase und der größere Einstrom 2011	38
4. Beobachtungen an der Bojenstation „Arkonabecken“	41
5. Beobachtungen an der Bojenstation „Oder- Bank“	47
6. Hydrographisch-hydrochemische Bedingungen	52
6.1. Wassertemperatur	52
6.1.1. Wasseroberflächentemperatur abgeleitet aus Satellitendaten	52
6.1.2. Vertikalverteilung der Wassertemperatur	60
6.2. Salzgehalt	68
6.3. Sauerstoff- und Schwefelwasserstoffverteilung	73
6.4. Anorganische Nährstoffe	84
6.5. Natürliche organische Verbindungen	97
Zusammenfassung	110
Summary	112
Danksagung	115
Literaturverzeichnis	116

Kurzfassung

Die Arbeit beschreibt die hydrographisch-hydrochemischen Bedingungen in der westlichen und zentralen Ostsee für das Jahr 2011. 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.

Nach dem mäßigen bis starken, auffällig langen und kalten Winter 2009/2010 folgte unmittelbar danach ein ähnlich strenger 2010/11. Mit einer Kältesumme 177,7 K d von Warnemünde liegt er auf Platz 13 der kältesten Winter seit Beginn der Vergleichsdaten im Jahr 1948. Die Jahreswärmesumme 2011 von 174,5 K d war geringer als in den Vorjahren und lag nur wenig höher als der langjährige Mittelwert 148 K d. Die Wasseroberflächentemperatur der gesamten Ostsee erreichte Platz 7 der wärmsten Jahre seit 1990.

Barotrope Einstromereignisse mit geschätzten Volumina zwischen 100 und 300 km³ fanden in der Ostsee 2011 vier Mal statt, im Januar/Februar, im März/April, im Mai und im November/Dezember. Das relativ starke Einstromsignal von November/Dezember 2011 transportierte etwa eine Milliarde Tonnen (1 Gt) Salz in die Ostsee und bleibt damit deutlich hinter den letzten großen Salzwassereinbrüchen in den Wintern 2003 (2,0 Gt) und 1993 (3,4 Gt) zurück. Die Auswirkungen können erst im Jahr 2012 dokumentiert werden.

Im Tiefenwasser des östlichen und westlichen Gotlandbeckens hielt die Stagnationsperiode unvermindert an. Nitrat konnte dort letztmalig im Jahr 2005 nachgewiesen werden. Ammonium- und Phosphatwerte stabilisierten sich auf dem Niveau des Vorjahres und sind vergleichbar mit den Konzentrationen, die am Ende der letzten langen Stagnationsphase 2002 gemessen wurden.

Abstract

The article summarizes the hydrographic-hydrochemical conditions in the western and central Baltic Sea in 2011. Based on meteorological conditions, the horizontal and vertical distribution of temperature, salinity, oxygen/hydrogen sulphide and inorganic and organic nutrients are described on a seasonal scale.

The moderate to severe, long and cold winter 2009/2010 was immediately followed by a similarly strong winter 2010/2011. With the "cold sum" of the air temperature in Warnemünde of 177.7 K d it ranks on place 13 of the coldest winters since the beginning of the record in 1948. The summer "heat sum" 2011 in Warnemünde of 174.5 K d was lower than in the years before and was lying only slightly above the average of 148 K d. The satellite derived sea surface temperature of the entire Baltic Sea reached place 7 of the warmest years since 1990.

In 2011, barotropic inflow events with estimated volumes between 100 and 300 km³ took place four times: in January/February, in March/April, in May and in November/December. The relatively strong inflow signal of November/December 2011 transported about one

billion tons (1 Gt) of salt into the Baltic Sea; it remains clearly behind the Major Baltic Inflows in the winter of 2003 (2.0 Gt) and the winter of 1993 (3.4 Gt). Subsequent effects can be documented only in 2012.

In the deep water of the eastern and western Gotland Basin, the stagnation period was continuing undiminished. Nitrate was detected in 2005 for the last time. Phosphate and ammonium stabilized at the previous year's level and were comparable with those at the end of the last stagnation period in 2002.

1. Einleitung

Die Einschätzung des hydrographisch-hydrochemischen Zustandes der Ostsee im Jahre 2011 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-hydrochemischen Bedingungen im Untersuchungsgebiet und deren zeitliche und räumliche Veränderungen sowie die Identifikation und Untersuchung von Langzeittrends.

Im Jahre 2011 wurden fünf Fahrten durchgeführt, die alle vier Jahreszeiten sowie zusätzliche Beobachtungen im März/April umfassten. Die Zustandseinschätzung basiert auf den Daten, die im Rahmen dieser Überwachungsfahrten gewonnen wurden sowie auf Ergebnissen anderer Forschungsarbeiten des IOW. Ausgewählte Daten von Forschungseinrichtungen anderer Ostseeanliegerstaaten, insbesondere des *Schwedischen Meteorologischen und Hydrologischen Instituts* (SMHI) und der *Maritimen Abteilung des Polnischen Instituts für Meteorologie und Wasserwirtschaft* (IMGW) wurden in die Auswertung einbezogen. Die Lage der wesentlichsten Stationen, die in die nachfolgenden Auswertungen einbezogen wurden, ist aus Abb. 1 zu entnehmen. Die internationale Zuordnung dieser Stationen ist bei NAUSCH et al. (2003) zusammengestellt.

Grundlage des hydrographisch-hydrochemischen Standard-Messprogramms, das mit den Forschungsschiffen „Alkor“ (Februar, März/April), „Deneb“ (Mai) sowie „Elisabeth Mann Borgese“ (August, Oktober) und „Meteor“ (November) durchgeführt wurde, sind die Richtlinien der HELCOM für die Überwachung der Ostsee im Rahmen des COMBINE-

Programms (HELCOM, 2000). Angaben über die Gewinnung der Wasserproben und die untersuchten Parameter sowie über die verwendeten Messverfahren und ihre Genauigkeit sind bei NEHRING et al. (1993, 1995a) enthalten.

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

DS: ab Aug. 2005	6 Horizonte T + S + 2 Horizonte O ₂
AB: ab Sep. 2006	8 Horizonte T + S (2011: 7 Horizonte) + 2 Horizonte O ₂
OB: ab 2005	2 Horizonte T + S + 2 Horizonte O ₂

Die MARNET-Stationen konnten 2011 aus unterschiedlichen Gründen nicht durchgängig betrieben werden. Details sind den Kapiteln 3 – 5 zu entnehmen.

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, 2008). Die Einschätzung des Jahres 2011 wurde im Vergleich zu den Mittelwerten des Untersuchungszeitraumes 1990-2009 und zu extremen Jahren vorgenommen.

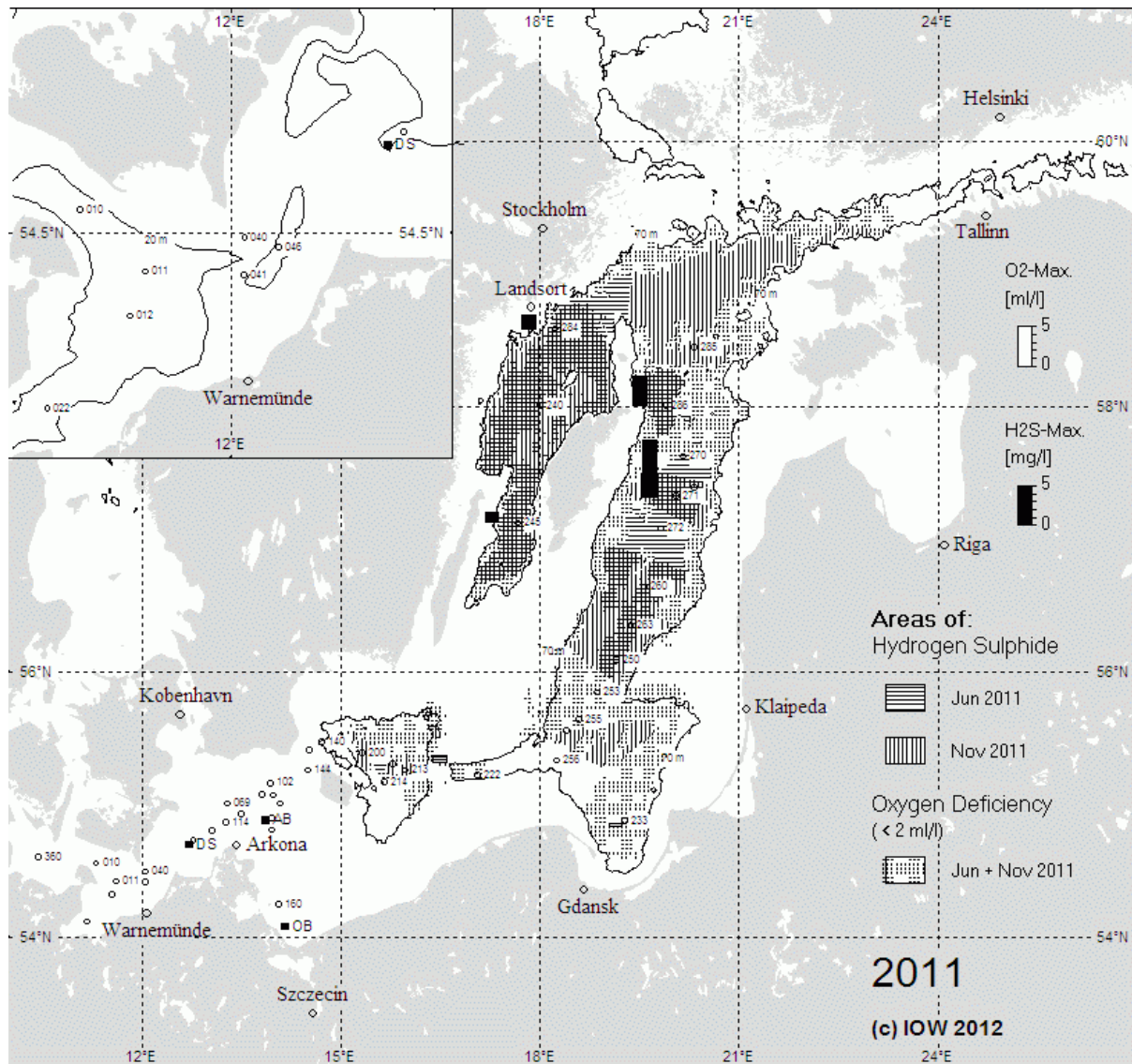


Abb. 1

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 2011; 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 2011. Bars show the maximum oxygen and hydrogen sulphide concentrations of this layer in 2011; the figure contains additionally the 70 m – depth line resp. 20 m – depth line (small picture)

2. Meteorologische Bedingungen

Der Witterungsverlauf des Jahres 2011 in der südlichen Ostsee kann durch Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD, 2011, 2012a) 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.

Nach dem mäßigen bis starken, auffällig langen und kalten Winter 2009/2010 folgte unmittelbar danach ein ähnlich strenger 2010/11. Mit einer Kältesumme 177,7 K d von Warnemünde (Tab. 2) liegt er auf Platz 13 der kältesten Winter seit Beginn der Vergleichsdaten im Jahr 1948, gleich hinter dem des Vorjahrs mit 203,7 K d. Der kälteste war der von 1962/63 mit 395,2 K d. Der Winter 2010/2011 führte nach Angaben des Finnish Meteorological Institute (FTA, 2011) zu einer maximalen Eisbedeckung der Ostsee von 309 000 km² am 25. Februar, die bei 144% des langjährigen Mittelwerts von 214 000 km² seit 1720 lag. Von der Bedeckung her übertraf dieser Winter sogar den von 1995/96 mit 278 000 km²; größere Werte wurden in den letzten 30 Jahren nur während der drei Winter 1985/86/87/88 in Folge festgestellt. An den deutschen Küsten zählte er als mäßiger Eiswinter.

Das erste Eis bildete sich in der Bottenwiek Anfang November und im Finnischen Meerbusen Ende November 2010, d.h. zu einem normalen Zeitpunkt. Bis Mitte Dezember setzte sich die Vereisung wegen wiederholten Zustroms milder Luft nur zögernd fort. In der nachfolgenden Kältewelle froren Bottenwiek und Finnischer Meerbusen bis Anfang Januar komplett zu. Bis Ende Februar fand weitere kräftige Eisbildung statt und erreichte die Nordspitze Gotlands. Mit Eisdicken bis 70 cm wurde die Schifffahrt im nördlichen Ostseeraum erschwert. Ende März begann sich das Eis zurückzuziehen; Ende Mai löste sich das letzte Treibeis in der Bottenwiek zu einem durchschnittlichen Endpunkt der Eissaison auf.

Der Winter 2010/11 war vor allem im Dezember in Deutschland ungewöhnlich schneereich und kalt, während die folgenden Monate Januar und Februar 2011 vergleichsweise mild ausfielen (SCHMELZER & HOLFORT, 2011). Die Eisbildung begann in den Boddengewässern Ende November oder Anfang Dezember, knapp einen Monat früher als normal. Ende Dezember entstand auch an den Außenküsten Neueis, das aber nur wenige Tage Bestand hatte. Insbesondere um Rügen herum wurde eine Eisdecke von ca. 20 cm Dicke beobachtet.

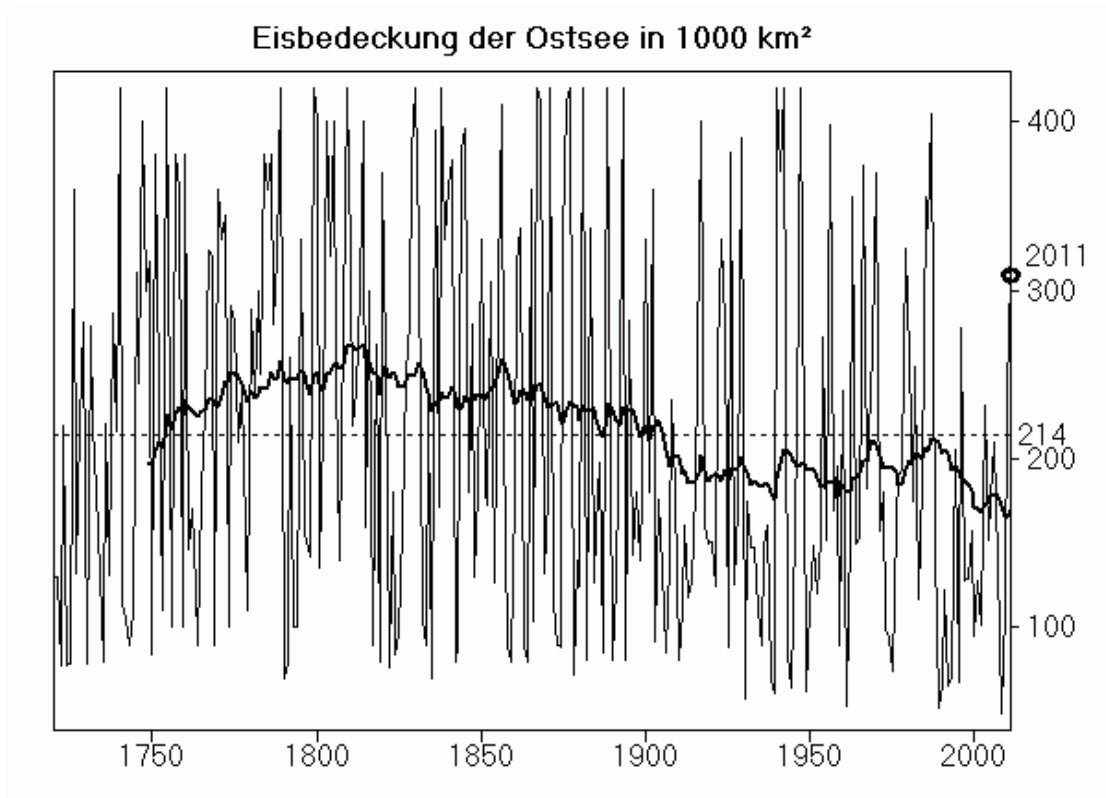


Abb. 2

Maximale Eisbedeckung der Ostsee in 1000 km² in den Jahren 1720 bis 2011 (SCHMELZER et al., 2008; SCHMELZER & HOLFORT, 2011). 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 2010/2011 mit 309 000 km²

Fig. 2

Maximum ice covered area in 1000 km² of the Baltic Sea in the years 1720 to 2011 (SCHMELZER et al., 2008; SCHMELZER & HOLFORT, 2011). 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 the winter 2010/2011 with 309 000 km² is encircled

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; SCHMELZER & HOLFORT, 2011). 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 2011 gleich 2,45 m (2010 dagegen sogar 4,22 m).

1947/1948 wurde die reduzierte Eisumme für die Bewertung der Stärke eines Eiswinters in den deutschen Küstengebieten eingeführt (BSH, 2011). Es handelt sich dabei um den arithmetischen Mittelwert der Zahl der Tage mit Eisvorkommen an den 13 Eisklimastationen, durch den Umfang und Dauer der Vereisung charakterisiert wird. Seit 1897 schwankte die reduzierte Eisumme für die deutsche Ostseeküste zwischen Null und maximal 87 Tagen. Das arithmetische Mittel beträgt 17 d, der Medianwert 11 d. 2010/11 betrug die reduzierte Eisumme 35,5 d (2009/10 waren es sogar 45,8 d).

Der 30-jährige Mittelwert der Eisbedeckung bleibt trotz der beiden überdurchschnittlich strengen Winter 2009/10 und 2010/11 weiter bei den tiefen Werten der letzten Jahre (Abb. 2). Eine Bedeckung von etwa 74% der Gesamtfläche der Ostsee von 415 266 km² fällt in die Nähe der Obergrenze des Bereich 60% - 80%. Dieser Bedeckungsgrad wird im langfristigen Mittel nur etwa in 12% der Winter 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 & FEISTEL, 2005, 2008).

Das Jahr 2011 war geprägt von vorherrschendem Südwestwind mit relativ wenig Blockierungslagen über Deutschland und dem Ostseeraum (Abb. 3a). Die hier angegebenen Namen der Hochs und Tiefs wurden 2011 von der Freien Universität Berlin vergeben, in guter Tradition seit 1954, und seit 2002 auch über so genannte „Wetterpatenschaften“ (FU-BERLIN, 2011).

Nachdem am Silvestertag unter dem Einfluss von Tief „Vesna“ im Norden Deutschlands und über der Ostsee der schneereiche und frostige Wintermonat Dezember 2010 in Tauwetter umgeschlagen war, blieb der **Januar** 2011 vergleichsweise mild. Stürmischer Westwind von Tief "Waltraut" bewirkte Niedrigwasser in der westlichen Ostsee und leichten Einstrom. Durch Eisbildung trat Hochwasser in der Oder auf. Die nachfolgenden Tiefs "Arno" (6.1.), "Benjamin" (7.1.), "Christian" (12.1.), "Dieter" (13.1.), "Evangelos" (16.1.) und "Frank" (18.1.) verstärkten mit Westwind Tauwetter und Hochwasser durch Regen und Schneeschmelze an mehreren deutschen Flüssen. Bei Mukran auf Rügen fand am 17.1. der stärkste Küstenabbruch seit 1954 statt. Nördlich von Sassnitz rutschten durch die Nässe ca. 1000 m³ Kreide in die See, am 23.1. lösten sich weitere 2000 m³ von der Kreideküste. Am 24.1. erreichte die Elbe bei Lauenburg ein Rekordhochwasser. Ab 19.1. sorgte eine Blockierungslage mit Hoch "Barbara" für eine Rückkehr winterlicher Fröste, bis sich nach dem 29.1. wieder eine Westwindlage durchsetzte.

Der **Februar** begann durch die Sturmtiefs "Johannes", "Klaus", "Lukas" und "Marc" mit mildem Westwind. Bei Einstrom am 5.2. mit bis zu 1,3 m Pegeldifferenz zwischen Gedser und Hornbaek stieg der Salzgehalt an der Oberfläche vor Fehmarn auf 18 g/kg. Da die Ostsee aber schon gut gefüllt war, waren größere Effekte östlich der Darßer Schwelle kaum zu beobachten. Mit dem Sturmtief "Nicolas" fielen am 7.2. Starkniederschläge bis über 50 mm in Norddeutschland; Windstärken über 100 km/h verursachten zahlreiche Schäden. Ab 9.2. blockierten die Hochs "Eva", "Friederike", "Gabriela" und "Heike" den Westwind und ermöglichten so die Rückkehr von Frösten und eine Entspannung des sehr hohen Landsortpegels (über +30 cm am 11.2., unter -30 cm am 26.2.) durch Ausstrom. Vom 10.2. bis 25.2.2011 strömten mehr als 60 km³ Wasser allein durch den Sund in das Kattegat. Trotz fehlender Windmischung waren die vertikalen Salz- und Temperaturprofile an der Darßer Schwelle vom 14.2. bis 22.2. auffallend homogen, bei rasch absinkender Temperatur und niedrigem Salzgehalt. Dafür verantwortlich war vermutlich der kräftige Ausstrom. Etwa gleichzeitig, vom 16.2. bis 19.2., maß die Arkonaboje in 40 m Tiefe markant hohe Salzgehalte zwischen 17 und 18 g/kg; diese Werte wurden in Wirklichkeit wegen der Eislast der Boje bei etwa 42 m Tiefe gemessen und sind mit früheren nicht vergleichbar. Am 25.2. erreichte die Vereisung der Ostsee ihre maximale Ausdehnung. Am 26.2. wurde die Arkonaboje wegen Treibeis eingeholt, auch die Geräte am Darßer Mast wurden wegen Eisefahr abgebaut.

Anfang **März** übernahm das Hoch "Isabella" die Kontrolle über den Ostseeraum. Ab 4.3. stellt sich unter dem Einfluss der Tiefs "Ulfert", "Volker" (9.3.) und "Wilfried" (11.3.) die Lage auf Westwind und schwachen Einstrom um. Am 11.3. lösten Erdbeben und Tsunami die Fukushima-Katastrophe in Japan aus. Ab 15.3. bildete sich über der Ostsee wieder eine Omega-Lage mit Hoch "Linda". Bei kräftigem Ostwind und Ausstrom machte sich am 17.3. das Vb-Tief "Yvan" vom Mittelmeer nach Norden auf den Weg, schaffte es aber nicht bis zur Ostsee und drehte beim Vogtland nach Südosten ab. Am 18.3. rutschten nahe der Wissower Klinken mehrere Tausend Kubikmeter Kreide auf einer Breite von 80 m aus der Steilküste in das Wasser. Das Hoch "Marieluise" löste "Linda" am 20.3. über Deutschland ab, während Tief "Andreas" ab 21.3. mit Westwind auf die Ostsee übergriff. Am 26.3. beruhigte sich die Lage zeitweilig unter dem Einfluss von Hoch "Ortrud", dann jedoch gefolgt von den Tiefs "Bernhard" am 28.3. und "Dietmar" am 30.3. Am 31.3. nahm der Darßer Mast seinen Betrieb wieder auf; die Arkonaboje blieb wegen notwendiger Reparaturen an Land.

Am 2. **April** kam es unter dem Einfluss von Hoch "Peggy" zu einem ersten Sommertag mit Temperaturen bis zu 25 °C, dem über der Ostsee Regenfronten mit Gewittern folgten. Am 4.4. ging der Windpark Baltic 1 nördlich Darß/Zingst in den Probetrieb. Während Hoch „Quirina“ dem Süden Deutschlands weiterhin Sommerwetter bescherte, wurde im Norden der Westwind stürmisch bis zu Orkanstärke durch die Tiefs "Hugo", "Ingo" (7.4.) und „Joachim“ (8.4.). Der Füllstand der Ostsee ließ keinen signifikanten barotropen Einstrom zu. Außer vielen Windschäden auf Rügen und in Vorpommern kam es bei Rostock zu einem Sandsturm auf der Autobahn A19, der eine katastrophale Massenkarambolage auslöste.

Unter dem Einfluss von Hoch „Ruth“ über der Nordsee beruhigte sich das Wetter in Norddeutschland am 9.4. wieder und bewirkte einen schönen Frühsommertag am 11.4., dem Tief "Karl" mit Dauerregen und Sturm aus NW folgte. Am 14.4. wechselte das Wetter mit Hoch "Stephanie" wieder zu "schön". Die Phase der Sauerstoffübersättigung an der Darßer Schwelle endete nun. Am 20.4. wurde Hoch „Stephanie“ schwächer und zog langsam ostwärts, dabei strömte frühlommerlich-warme Luft von Süden in den Ostseeraum. Ab 18.4. ging der barotrope Ausstrom weiter mit gut vermishtem Wasser an der Darßer Schwelle; kaltes, O₂-übersättigtes Algenblütenwasser bis 120% wurde hinausgespült, sogar bodennah um 110% am 21.4. Die Ostertage präsentierten Sommerwetter bis 25 °C mit Hoch "Tijen" über Norwegen. Während am 26.4. Hoch „Tijen“ ersetzt wurde durch Hoch „Uta“ über den britischen Inseln, begann an der Darßer Schwelle barokliner Einstrom. Am 28.3. zog ein "Kaltlufttropfen" zur Nordsee und verursachte einen starken Tornado bei Goslar.

Hoher Luftdruck herrschte Anfang **Mai** über ganz Europa und dem Nordatlantik, mit diversen flachen Tiefs und Fronten eingelagert. Ostwind, Trockenheit und Sommerwetter hielten über der Ostsee weiter an, aber mit nächtlicher Frostgefahr bei klarem Himmel. Am 2.5. wurde der Windpark Baltic 1 offiziell in Betrieb genommen, während Tief "Manfred" eine kurze Episode mit Sturm aus Nordost auslöste. Anhaltend trockenes Wetter hatte Waldbrandgefahr östlich der Elbe zur Folge. Der Salzgehalt des baroklinen Einstroms überstieg an der Darßer Schwelle ab 5.5. Werte von 16 g/kg. Am 8.5. zog Hoch "Uta" nach Sizilien; ein neues Hoch „Victoria“ bildete sich über der Ostsee und setzte die trockene Omega-Lage fort mit Ausstrom und kaltem Eiseiligen-Wind von NO. Der neu verstärkte Ausstrom behinderte den baroklinen Einstrom. Tief "Norbert", das seit Anfang Mai ortsfest auf dem Atlantik lag und bei uns anhaltenden Südwind verursachte, rückte am 12.5. nach Osten vor und beendete die Blockierungslage. Mit dem schwachen Westwind versiegte der Ausstrom, und der barokline Einstrom verstärkte sich. Mit Tief "Paul" am 15.5., gefolgt von den Tiefs "Quiriakus" (17.5.) und "Richard" (19.5.), kam kühler Westwind mit Regen, der barokline Einstrom klang ab, die Ostsee füllte sich wieder. Am 21.5. leitete Hoch "Yasmina" schwül-warmes Sommerwetter ein. Eine Unwetterfront von Tief "Tronje" überquerte Deutschland am 22.5. Am 24.5. ging das privatisierte und überholte alte Forschungsschiff "Prof. A. Penck" vor Wismar auf Probefahrt. Bei stürmischem Westwind von Tief "Udo" begann kräftiger barotroper Einstrom, wobei die starke Schichtung erhalten blieb. Die Wolke des isländischen Vulkans Grimsvötn, der am 21.5. ausgebrochen war, traf über der Ostsee ein und bewirkte die Schließung vieler Flughäfen. Auf eine kurze Ausstromphase mit Ostwind folgte am 26.5. das Tief "Viktor" mit schwüler Wärme von Südwest und nachfolgender Gewitterfront. Diese Lage setzte sich bis Ende Mai mit den Tiefs "Xan" und "Yves" ähnlich fort. Am 31.5. zog ein spektakulärer Sandsturm durch das südöstliche Mecklenburg-Vorpommern, gefolgt von Gewittern und Starkregen, so z.B. mit 39 mm in Neubrandenburg und 18 mm in Warnemünde. Damit ging eine viermonatige Trockenphase zu Ende, die im Frühling das Getreide und andere Pflanzen auf den Feldern hatte verdorren lassen.

Am 1. **Juni** kam die Unwetterfront entlang einer Tiefdruckrinne von Spitzbergen bis Tunesien an der Oder zum Stehen. Westlich davon wehte kalter, trockener Nordwind um das Hoch

„Christiane“ über der Biskaya, östlich davon warmer, feuchter Südwind um das Hoch „Birgit“ bei St. Petersburg. Barokliner Einstrom setzte sich ab dem 2.6. wieder verstärkt fort, während „Christiane“ sich zum Ostseeraum verlagerte. Vom 4.6. auf den 5.6. stieg laut DWD die Lufttemperatur in Rostock-Warnemünde sprunghaft um 10,4 K. Am 6.6. strömte an der Westflanke von Hoch "Christiane" mit dem Südwind weiter sehr warme Luft nach Norden, begleitet von schwüler Hitze und Gewittern über ganz Deutschland. Auch in Rostock wurde es wärmer als 30 °C. Weitere Gewitter und Starkregen folgten nach mit den Tiefs „Aram“ (7.6.) von Frankreich und „Christian“ (8.6.) vom Mittelmeer. Die Luft mit über 30 °C zog nordwärts bis Finnland. Danach kam eine ruhigere sommerliche Westwindlage mit Schauern durch „Christian“ über Skandinavien, die am 16.6. durch eine Kaltfront mit weiteren Unwettern beendet wurde. Am 12.6. brach in Eritrea der Vulkan Nabro zum ersten Mal seit Menschengedenken aus, die Asche stieg bis 15 km Höhe. Gleichzeitig lähmte der bereits am 4.6. erfolgte Ausbruch des Puyehu in Chile den Flugverkehr in Australien. Am 17.6. transportierte Tief "Emil" kühle, feuchte Atlantikluft nach Deutschland. Mit dem schwachen barotropen Einstrom nahm auch der Salztransport über die Darßer Schwelle zu. Das kühle, regnerische Westwindwetter blieb auch bei den Tiefs "Fabian" (19.6.) und "Gunnar" (22.6.) erhalten, wobei die zunehmende Windmischung den baroklinen Einstrom stoppte. Vielerorts traten Gewitter mit Sturm und Hagel auf, in Seiffen sogar ein Tornado. Örtlich fielen bis zu 45 mm Regen. Ein seltener Meteo-Tsunami trat am 27.6. im Südwesten Englands auf. Am 29.6. transportierten eine Hochdruckbrücke von Libyen bis Hoch „Gertraud“ am Weißen Meer und eine Tiefdruckrinne vom Nordkap bis Spanien mit Südwind sehr warme Luft nach Deutschland und in den Ostseeraum. Deutschland erlebte die bis dahin heißesten Tage des Jahres. Da der Siebenschläfer in diese wechselhafte Wetterlage fiel, war mit deren Anhalten auch im Juli zu rechnen. Am 30.6. überfluteten heftige Regenfälle von Tief "Janto" München.

Über der Ostsee hielt die Blockierungslage am 1. Juli weiter an mit Temperaturen um 30 °C in Finnland und Lappland. In Deutschland wehte kühler, frischer Westwind mit Schauern. Am 2.7. drückte das Tief "Jörg" über Ukraine/Weißrussland die warme, feuchte Luft über der Ostsee von Nordosten nach Dänemark und zur deutschen Ostseeküste, begleitet von Dauerregen und kräftigem Nordwestwind. Die 75000 Besucher des Roskilde-Festivals erlebten wolkenbruchartigen Regen, der unter anderem die Autobahnverbindung ins 30 Kilometer entfernte Kopenhagen unterbrach. Der ausgelöste kleine Einstrom ließ den Salzgehalt an der Darßer Schwelle wieder ansteigen. Bemerkenswert war ein Pegelunterschied Ventspils-Landsort von ca. 10 cm. Am 3.7. folgte eine "tropische Waschküche": warm-feuchte Nebel mit kräftigen Schauern zogen von der Ostsee nach Süden und Gewitter setzten Straßen unter Wasser, so auch in weiten Teilen Rostocks. Es war eine Vb-ähnliche Lage, bei der warm-feuchte Mittelmeerluft von Nordosten auf kalte Luft aus Westen traf. Das verantwortliche Tief „Jörg“ zog vom Schwarzen Meer/Kaukasus zur Ostsee und blieb dort ortsfest unter Abschwächung bis zum 6.7. liegen. Über der Ostsee führte dann ein Zwischenhoch zu schönem, warmem Sommerwetter mit wenig Wind, aber gelegentlichen Schauern durch Fronten von Islandtief „Kurt“, die von Westen hereinzogen. Das Tief bewegte sich ebenfalls nur sehr langsam, ähnlich dem Tief "Balthasar" in der ersten Junihälfte. Der barokline Einstrom verstärkte sich. Am 7.7. bildete sich in der okkludierten

Warmfront von "Kurt" das Genua-Tief "Leon", das nordwärts zog. Der verstärkte Ausstrom aus der Ostsee stoppte den baroklinen Einstrom. Am 8.7. zog Tief "Leon" nach Polen und löste in ganz Deutschland anhaltende Niederschläge und Gewitter aus. Deutschland lag in der warmen, feuchten Luftströmung aus Südwest, die von Tief "Kurt" über Irland angetrieben wurde. Tief "Jörg" bei Moskau zog langsam weiter nach Osten. Trotz windschwachen Wetters blockierte der verstärkte Ausstrom (über 40 cm Pegeldifferenz Gedser-Hornbaek) auch weiterhin den baroklinen Einstrom. Bei kaum veränderter Wetterlage zog Tief "Kurt" am 10.7. nach Norwegen mit einer Fronten-"Schleppe" bis ins Baskenland. Nachdem am 11.7. ein kleines Regentief Deutschland überquert hatte, folgte ein Zwischenhoch „Ila“ mit trockenem Sommerwetter bis 12.7. Weiterhin blieb der Westwind blockiert, es traten nur schwache Winde auf, der barokline Einstrom setzte zögernd wieder ein. Tief "Meikel" überquerte am 13.7. Deutschland von SW nach NO mit kräftigen Regenfällen und Gewitterfronten, in der Wirkung ähnlich wie ein Vb-Tief. An der Rückseite traten am 14.7. Orkanböen und schwere Unwetter auf. Kräftiger Ausstrom fand statt und unterdrückte den baroklinen Einstrom. Während ein Teilzentrum von "Meikel" zum Baltikum gezogen war und sich auflöste, ein weiteres nach Ostpolen, lag das andere am 15.7. weiterhin über Norddeutschland. Der abnehmende Ostwind erlaubte erneuten baroklinen Zustrom. Das Wetter blieb wechselhaft. Bevor eine neue Regenfront von Tief „Nemo“ aus Westen eintraf, gewährte Zwischenhocheinfluss am 16.7. einen trockenen Sommertag. Vom 17.7. bis 19.7. bestimmte das Tief "Nemo" über der Nordsee das Wetter mit dicken Wolken, schwachem Wind und leichtem Regen. Auf der Vb-Route zog am 20. und 21.7. das Tief "Otto" von der Biskaya über Norditalien zur Ostsee; starker Regen fiel entlang der Oder. Die Stärke des baroklinen Einstroms nahm langsam wieder zu. Auch am Magdalenenstag, dem 22.7., setzten sich Dauerregen und Sturm entlang der Oder/Neiße, Elbe und der Ostseeküste fort, während "Otto" über der Odermündung lag. Am 22./23.7. wurde in Warnemünde die Rekordregenmenge seit 1947 von 111,4 mm gemessen. Am 23.7. war Tief "Otto" sehr langsam von Nordpolen nach Südschweden gezogen. Der Dauerregen in Mecklenburg-Vorpommern ging weiter, wenn auch schwächer. Es war windig und kühl wie im Oktober. Der barokline Einstrom erfolgte nun in einer dickeren homogenen Schicht mit geringerem Salzgehalt. Tief „Otto“ kehrte am 24.7. zurück zur Nordsee, wo es am 19.7. entstanden war, und blieb ortsfest bei Dänemark bis zum 25.7. liegen. Warnemünde meldete 140 mm Regen in 5 Tagen; viele Straßen, Felder und Gärten blieben für Tage oder Wochen unter Wasser. Bis zum 28.7. war die Wetterlage unverändert wechselhaft mit schweren Gewittern im Westen und Landregen im Osten. Schwach ausgeprägte Tiefs zogen zwischen Nordsee, Adria und Ostsee zyklonal im Kreis herum. Am 29.7. folgten neue Wolkenbrüche mit örtlich mehr als 50 mm Regen und Gewittern. Tief "Quentin" verhielt sich ähnlich wie das vorige Vb-Tief „Otto“; die Regenfronten zogen von Nordost über die Ostsee an die deutsche Küste, besonders betroffen war der Raum von Rostock bis zur Oder. Am 28.7. und am 29.7. fielen in Warnemünde wieder über 50 mm Regen. Es lagen also 3 Tage im Juli über diesem magischen Wert, der im Beobachtungszeitraum seit 1947 nur an 5 Tagen übertroffen wurde. Bis zum 31.7. lag Tief "Quentin" weiter über Nordwest-Polen und schickte Ausläufer mit kräftigen Regenfällen, so etwa 60 mm in Berlin. Der barokline Einstrom verstärkte sich weiter mit fast 17 g/kg Salzgehalt in einer dicken Schicht am Boden der Darßer Schwelle. Zu dieser Zeit

herrschte in Russland, ähnlich wie im Vorjahr, extreme Hitze mit Waldbränden. Mit einer Regenmenge von 343,9 mm brach der Juli den bestehenden Rekord in der Monatssumme.

Am 1. **August** näherte sich Hoch „Janet“ von Süden. Tief „Quentin“ war nach Dänemark gezogen, seine Warmfront überquerte aber noch einmal die Ostseeküste von Nordost. An der Kreideküste gab es zwei sehr große und mehrere kleine Abbrüche. Der barokline Einstrom scheint größere Volumina transportiert zu haben mit 60-70% Sauerstoff und ca. 13 °C. Am 2.8. vereinigten sich die Hochs „Janet“ über Deutschland und „Karin“ über Skandinavien und bildeten kurzfristig eine Omega-Lage, aber schon am 4.8. setzten sich wieder schwüle Gewitterfronten von Westen durch. In Bremen wurden Unterführungen überflutet. Aus den Ausläufern von Tief „Rene“ fielen am 5.8. auch in Rostock mit etwa 50 mm wieder erhebliche Regenmengen. Die Freizeitschiffahrt nördlich Berlins wurde auf der Havel wegen des Hochwassers lahmgelegt. Am 7.8. stand die Pferderennbahn bei Bad Doberan unter Wasser wie die Autobahn A20 bei Lüdersdorf. Tief „Sven“ mit den verantwortlichen Regenfronten zog erst am 10.8. nach Norden ab, an seiner Rückseite fand mit frischem Nordwestwind barotroper Einstrom statt (bis 90 cm Pegelunterschied Hornbaek-Gedser). Neuer Dauerregen folgte bei Westwindlage am 11.8. mit Tief „Timo“. Am 12.8. ließ der Westwind nach. Vor St. Petersburg wurde der 25 km lange Kronstadt-Damm eingeweiht, der die Stadt künftig von Hochwasser aus dem Finnischen Meerbusen schützen soll. Auf dem Höhepunkt der Hanse-Sail am 13.8. lag „Timo“ mit seinem „Auge“ über Mecklenburg und erlaubte einen fast regenfreien Tag. Rostock und Umgebung kämpfte mit unterspülten Straßen und gefluteten Kellern. Überall standen Seen auf Feldern und in Gräben, pumpten Wasserschläuche gegen das Grundwasser in Kellern und Senken an. Auch ein Keller des IOW erlitt einen Grundwassereinbruch. Die Straße Diedrichshagen-Elmenhorst war gesperrt. Warnemünde hielt den deutschen Regenrekord. Am 15.8. hatte sich ein kleines Tief „Volker“ über Norddeutschland gebildet und in der Nacht für erneuten ergiebigen Regen gesorgt. In der Folge rutschte zwischen Sassnitz und dem Königsstuhl ein 40 m breites und 70 m hohes Kreidestück mit 120 000 m³ Volumen in die Ostsee ab. Am 16.8. baute das Zwischenhoch „Liane“ eine Omega-Lage auf und sorgte für einige trockene, warme, windarme Sommertage. Der barokline Einstrom kam allmählich wieder in Gang. Aber schon am 18. und 19.8. drangen erneut Fronten der Tiefs „Wilfried“ und „Xaver“ von Nordwest und Südwest mit Gewitterfronten nach Deutschland vor. Im belgischen Hasselt brachten die Unwetter die Bühne eines Popfestivals zum Einsturz, von Hamburg bis ins Ruhrgebiet kam es zu Überschwemmungen und Unwetterschäden. An den Steilküsten westlich von Rostock traten starke Abbrüche auf. Nach dem Sturm an der Rückseite von „Xaver“ kam es am 20.8. durch das nächste Zwischenhoch „Morven“ zu einem schönen und trockenen Sommertag. Schon am nächsten Tag formte sich ein neues Unwettertief bei der Biskaya und drang mit seinen Fronten von Südwest nach Deutschland vor, während vor der Front warme schwüle Luft an der Westseite von Hoch „Morven“ nach Norden auf die Ostsee strömte. Am 22.8. blockierte Hoch „Morven“ weiter eine schwache Westwindlage, obwohl ein kleines Tief über Dänemark kräftigen Wind an der Ostseeküste und barotropen Einstrom verursachte. Am 23.8. rückte die Subtropenfront von Tief „Zion“ über der Biskaya mit Unwettern langsam über Deutschland nach Norden vor. Am 25.8. und 26.8. traten in schwül-warmer Luft

schwere Gewitter auf, diesmal besonders in Hessen und Niedersachsen. Mit den Ausläufern von Tief „Bert“ überquerte am 27.8. eine weitere schwere Gewitterfront Deutschland von West nach Ost und verdrängte die schwüle Hitze der Tage zuvor (sogar in Warnemünde waren es 28 °C). Die warme Luft erstreckte sich bis zum Weißen Meer, wie schon mehrfach zuvor in diesem Sommer. Der extrem große Hurrikan „Irene“ traf im Nordatlantik auf die US-Ostküste und zog an ihr entlang bis Kanada. Tief „Bert“ hatte sich am 28.8. zu einem Sturmtief bei Schottland entwickelt. Mit seinem Westwind begann barotroper Einstrom. Der August 2011 erreichte in der Monatssumme des Niederschlags einen Wert von 192,9 mm.

Mit dem Abzug von Tief „Bert“ aus dem Ostseeraum endete am 1. **September** die kalte, regnerische Westwindlage und machte unter dem Einfluss von Hoch „Nina“ einem sonnigen Spätsommer Platz. Am 3.9. griff Ex-Hurrikan „Irene“ auf Deutschland über und transportierte an seiner Vorderseite sehr warme Luft nach Norden. Am Tag darauf erreichten Unwetter und Dauerregen Deutschland; im Südharz wurde bei Sangerhausen ein Dorf von einer Schlammlawine überspült. Es folgte kühles Westwindwetter durch die Tiefs „Dieter“ und „Erich“. Nach dem Zwischenhoch „Oldenburgia“ kam es am 11.9. wieder zu Unwettern durch Tief „Frank“. Im Salzlandkreis südlich von Magdeburg verwüstete eine Windhose mehrere Orte. Hagel, groß wie Tennisbälle, fiel. Am 12.9. erreichte Ex-Hurrikan „Katia“ als Orkantief Europa. Schon der Wirbelsturm "Irene" war eine Rarität, weil sich der Sturm die ganze Ostküste der USA hinauf bis nach Kanada bewegt hatte. Die Überreste von "Katia" schafften es nun sogar bis nach Europa. So weit drangen zuletzt die Hurrikane "Bill" 2009 und "Gordon" 2006 vor. Am 13. und 14.9. zog „Katia“ stürmisch über die Nord- und Ostsee, gefolgt von wunderbarem Spätsommer unter der Wirkung von Hoch „Paula“ am 16. und 17.9. Gleich 2 Ausläufer von Tief „George“ drehten sich am 18.9. langsam über Deutschland hinweg, und die Schneegrenze in den Alpen fiel auf 1000 m. Aber schon am 21.9. setzte sich mit Hoch „Queenie“ wieder Spätsommerwetter durch, nur wenig gestört durch den mäßigen Westwind von Ex-Hurrikan „Maria“ am 22. und 23.9. Mit den Hochs „Renee“ und „Sepideh“ kehrte danach bis Ende September schnell eine stabile Omega-Lage mit Ausstrom zurück, wie sie normalerweise für den September typisch ist.

Der 1. **Oktober** war in Mecklenburg-Vorpommern der wärmste seit Beginn der Aufzeichnungen, an der Küste um 20 °C, weiter im Süden bis 25 °C, in der englischen Grafschaft Kent sogar bis 30 °C warm. An der Nordflanke von Hoch "Sepideh" drangen am 4.10. Ausläufer von Islandtief "Immanuel" in den Ostseeraum vor, am 6.10. folgte Ex-Hurrikan "Ophelia" mit dem ersten Herbststurm des Jahres. Die eingeströmte Polarluft ließ ersten Schnee im Harz und Schwarzwald fallen. Wegen des hohen Füllstands der Ostsee gab es keinen nennenswerten Einstromeffekt. Nach kurzem Zwischenhocheinfluss folgte am 10.10. Tief "Jörn" mit neuem Wind und Regen von West. Die Luft hinter der Warmfront kam von Spanien über den Kanal und war sehr mild. Bis zum 12.10. wurde der Westwind noch stürmischer. Ein fast ortsfestes Regenband erstreckte sich von Osnabrück nach Dresden. Am 13.10. blockierte über den britischen Inseln das Hoch "Tessina" den Westwind und das Islandtief. Es setzte kräftiger Ausstrom ein, und bei Nordwind über der Ostsee kam der erste Frost. Wegen der Omega-Lage zog Ex-Hurrikan "Philippe" am 16.10. weit nördlich über

Spitzbergen vorbei. Bis zum 17.10. war das Hoch „Tessina“ über die Ostsee in Richtung Schwarzes Meer abgezogen und die Westwindlage kehrte zurück. Trotz des noch bestehenden Ausstroms war die Ostsee weiterhin sehr voll (Landsort bei +20 cm). Am 18.10. erreichte uns Tief "Klaus" mit Tiefausläufern und beendete vorerst den „goldenen Oktober“. Einstrom setzte ein. Am 20.10. wich "Klaus" nach Norden aus und machte Platz für ein neues Spätsommerhoch "Ulla". Bis 22.10. verstärkte sich "Ulla" und zog ostwärts. An der Westflanke kamen südliche Winde zu uns. Das Wetter blieb tagsüber mild (um die 15 °C) und nachts zum Teil frostig, vor allem im Alpenraum. Am 24.10. blockierten Hoch "Ulla" über Weißrussland und eine Tiefdruckrinne von Portugal bis Spitzbergen den Westwind. Bei Südostwind setzte kräftiger Ausstrom ein. Am 25.10. hatte sich der Kern von Hoch „Ulla“ weiter verstärkt und nach Russland (Moskau) verlagert. Mit seinem starken Ausläufer zur Ostsee bestimmte es weiter unser Wetter. An seiner Ostflanke drang Polarluft bis zum Schwarzen Meer vor, die von dort mit dem kräftigen Südostwind über Polen auch zu uns gelangte, wobei in den Alpen Föhn auftrat. An der Westflanke des Hochs stauten sich die Isobaren mit viel Regen, z.B. mit Überschwemmungen in Irland, wo warme Luft von den Azoren herangeführt wurde. Der kräftige Ausstrom ging weiter. Am 26.10. erreichte der Regen auch Norditalien mit Überschwemmungen und Erdrutschen. Am 29.10. wechselte die Wetterlage zu Westwind, aber noch hielt Hoch „Ulla“ mit schwachem südlichem Wind das Wetter in Deutschland unter seiner Kontrolle. Es herrschte trübe, neblige oder hoch-neblige Luft vor mit milden Temperaturen bis ca. 14 °C und ohne Nachtfröste. Während sich am 31.10. über der Ostsee das Westwindband von Tief "Meeno" am Nordkap stabilisierte, lag Deutschland unter Hochdruckeinfluss von "Ulla" über Rumänien und Hoch "Viola" über Spanien mit sehr milder feuchter Luft; ein letzter "goldener" Oktobertag. Barokliner Einstrom begann wieder.

Der **November** begann freundlich mit Hochdruckwetter von "Viola"; der Westwind wurde nach Norden abgedrängt. Bis 5.11. verstärkte sich die Blockierungslage. Entlang einer Tiefdruckrinne von Algerien bis Norwegen strömte milde feuchte Luft nach Norden und führte zu Überschwemmungen an der Alpensüdseite, vor allem in Genua, sowie zu Föhn nördlich davon. Ausstrom ging weiter, der barokline Einstrom versiegte. Während das Genua-Tief „Rolf“ südlich der Alpen weiter für starken Regen sorgte, löste sich das Hoch „Xenia“ am 6.11. nordwärts vom Azorenhoch und verstärkte die Blockierungslage. Beim vorherrschenden schwachen Südwind setzte sich der Ausstrom fort. Am 8.11. wurde die Erdgas-Ostseepipeline in Lubmin offiziell in Betrieb genommen. Am 10.11. bestand eine Lehrbuch-Omega-Lage. Mit dem nun mehr östlichen Wind kam kältere und trockenere aus Nordost in den Ostseeraum. Der Ausstrom ging weiter, der Landsortpegel war bereits unter null gefallen. Der andauernde Nebel und Hochnebel der letzten Tage verschwand, die Nächte wurden frostig. Über der Adria drehte sich ein ausgedehnter subtropischer Sturm mit schweren Unwettern, der in den USA sogar als erster "Tropensturm 01M" in dieser Region klassifiziert wurde (DWD, 2011). Während "Xenia" nach Osten zog, rückte Hoch "Yana" am 14.11. von der Nordsee nach und verlängerte die Ausstromphase. Von Tief "Sükrü" über dem Weißen Meer drang am 15.11. polare Luft bis weit nach Süden vor. Barokliner Einstrom schaltete sich abrupt ein. Während "Yana" sich am 17.11. ostwärts verlagerte, wurde der

Messmast an der Darßer Schwelle für dringende Wartungsarbeiten an Land abgebaut. Ein neues Hoch "Zoey" am 20.11. über der Bottensee setzte die Omega-Lage und den Ausstrom fort. Am 25.11. drangen erste Ausläufer des Orkantiefs "Xaver" bei Island bis zur Ostsee vor. **Am 26.11. begann mit dem Sturm von West kräftiger Einstrom**, vor allem durch den Öresund. Zwischen Hornbaek und Gedser trat bis zu 1,25 m Pegeldifferenz auf, die am Abend des 27.11. bei Durchzug der nachfolgenden Orkantiefs "Yoda I" und "Yoda II" auf über 2,20 m anstieg, während in Gedser $-1,38$ m Niedrigwasser gemessen wurde. In Norwegen, Schweden und Dänemark kam es zu erheblichen Sturmschäden. Am 29.11. stagnierte der Einstrom unter Zwischenhocheinfluss von "Belice" über Ungarn bei südlichem und südwestlichem Wind. Am 30.11. erfasste das Sturmtief "Arno" die gesamte Ostsee; der Einstrom ging abgeschwächt weiter. Mit Schneemangel, Sonne und Trockenheit war 2011 der trockenste "Jahrhundert"-November in Deutschland seit 1881, dem Beginn der Aufzeichnungen.

Am 1. **Dezember** folgte auf „Arno“ das Sturmtief „Zafir“, wobei der barotrope Einstrom unter dem Einfluss von Hoch "Belice" jedoch bei einem Landsortpegel von +10 cm zeitweilig stagnierte. Für das IOW waren die Forschungsschiffe "Elisabeth Mann Borgese" und "Meteor" im Einstromgebiet unterwegs und konnten vor Ort erste direkte Untersuchungen vornehmen (MOHRHOLZ et al., 2011; HINZ, 2011). Am 4.12. löste Tief „Bob“ mit Kerndruck 955 hPa über der Norwegischen See noch einen Einstromschub aus (bis 90 cm Differenz Hornbaek – Gedser). Bei Durchzug der Tiefs "Christoph" (5.12.) und "Danilo" (7.12.) war der Einstrom weniger stark. Westlich der Darßer Schwelle wurde am 6.12. ein Salzgehalt von 19 g/kg an der Oberfläche gemessen (MOHRHOLZ et al., 2011), vor Gedser sogar 21 g/kg (SCHMAGER, 2011). Ebenfalls am 6.12. wurde an der Station Landskrona im Öresund an der Oberfläche ein ungewöhnlich hoher Salzgehalt von knapp 25 g/kg beobachtet (ANDERSSON, 2011). Vom 8. bis 11.12. verursachte das Orkantief "Friedhelm" extremes Niedrigwasser in Warnemünde (bis -92 cm) und Hochwasser in Hornbaek (bis +152 cm) und damit einen weiteren Einstromschub, wobei der Landsortpegel auf +60 cm stieg. Am 12. und 13.12. hielt Tief "Günther" den Westwind aufrecht bei abwechselndem schwachem Ein- und Ausstrom. Das riesige Orkantief „Hergen“ folgte am 14.12. mit 945 hPa Kerndruck. Vor der irischen Küste von Donegal wurde eine Monsterwelle von 20,4 m Höhe gemessen. Das Orkantief "Joachim" erreichte Deutschland am 16.12. mit Sturm und Schnee. Straßen wurden überflutet, die Bahn sperrte Strecken. In der Nacht folgte über 1 m Hochwasser in Gedser und Warnemünde, weil "Joachim" über Berlin nach Südosten zog. Am 18.12. baute sich kurzzeitig eine Blockierungslage auf mit den Tiefs "Klausdieter" bei Genua, "Joachim" über der zentralen Ostsee und "Hergen" über der Norwegischen See. Am 19.12. nahm der Westwind noch einmal zu; "Joachim" und "Hergen" hatten sich über Skandinavien vereint. Die Fronten von Tief „Louis“ verursachten am 20. und 21.12. in ganz Deutschland Schneefälle, besonders in den Gebirgen. Der Frankfurter Flughafen musste Flüge streichen. In den Tagen vor Heiligabend bildete sich im Roten Meer eine neue vulkanische Insel als ein weiteres Zeichen erhöhter geologischer Aktivität im afrikanischen Grabenbruch, wie schon Mitte Juni 2011. Zwischenhoch-Einfluss über der Ostsee bewirkte leichten Ausstrom. Am 23.12. gelangte an der Vorderfront von Tief "Norbert" feuchte, milde Luft bis 9 °C in den

Ostseeraum. Ein kleines Höhentief verursachte am 24.12. anhaltenden Dauerregen. Bei mäßigem West- bis Südwind ging schwacher Ausstrom weiter. Auch am 25.12. blieb es unter Zwischenhoch-Einfluss von „Cora“ über der Biskaya im Ostseeraum mild bis +6 °C und feucht. Am 26.12. kam es zu einem großen Abbruch der Steilküste am Kap Arkona. Am 29.12. zog Hoch „Cora“ zum Schwarzen Meer und die ausgeprägte Westwindlage stellte sich wieder ein. Das Orkantief „Robert“ streifte Norddeutschland mit viel Regen, Wind und milder Atlantikluft sowie Schneefällen in den Gebirgen. Ein neuer Einstromschub fand statt bei über 1 m Pegeldifferenz zwischen Hornbaek und Gedser. Am 30.12. zog das Orkantief „Sebastian“ etwas weiter südlich als "Robert" über Deutschland hinweg. Schnee und Schneeverwehungen traten in den Gebirgen auf, besonders in Schwarzwald und Alpen. Der Einstrom hörte auf. Am Silvestertag 2011 bewirkte zum Jahresende der Zwischenhocheinfluss von "Daliah" über den Alpen eine kurze Blockierungslage mit ruhigem, mildem, sonnigem Wetter bei Südwind.

Ende 2011 teilten die Fischereibiologen des Thünen-Instituts in Rostock der Presse mit, dass sich der Dorschbestand östlichen von Bornholm vollständig erholt habe (ICES, 2011). Die Größe der Population mit fast 400 000 Tonnen entspräche der von vor 20 Jahren. Als Ursachen werden politische Maßnahmen und eine verbesserte Rekrutierung angesehen. Dieses Ergebnis steht im Einklang mit den Befunden des IOW, dass in der Bornholmsee und in der Stolper Rinne in den letzten Jahren durch die wiederholten kleinen barotropen und baroklinen Einströme kaum anoxische Situationen angetroffen wurden, steht aber im Gegensatz zu Aussagen, dass die sogenannten "Todeszonen" in der Ostsee durch Eutrophierung in den letzten 20 Jahren systematisch angewachsen seien.

Tab. 1 zeigt das Jahresmaximum der Solarstrahlung in Gdynia im Mai und Juni, während im Juni und Juli die astronomische und die über der Ostsee gemessene mittlere Einstrahlung ihren Höchstwert erreichen (HAGEN & FEISTEL, 2008). Der gemessene Wert im Juli 2011 lag wesentlich unter dem langjährigen Mittel.

Im Vergleich zum langjährigen Mittel fielen 2011 die negativen und die positiven Temperaturanomalien in Warnemünde im Dezember (2010) und im Mai, Juni und August extrem aus (Tab. 2). Das Jahr war insgesamt überdurchschnittlich warm. Die Jahreswärmesumme 2011 von 174,5 K d war geringer als in den Vorjahren und lag nur wenig höher als der Mittelwert 148 K d der Beobachtungsreihe seit 1948, deutlich innerhalb der statistischen Streuung und nur halb so groß wie Rekordwert 355 K d des Jahres 2006. In der Liste der letzten 64 Jahreswärmesummen belegt 2011 den Platz 20. Die Kältesumme des Winters 2010/11 war ebenfalls innerhalb der statischen Schwankungsbreite, aber deutlich größer als der langjährige Mittelwert. Wie die Temperaturen an der Station Arkona zeigen (Tab. 1), war es 2011 in nur zwei Monaten etwas kälter als im langfristigen Mittel; im Februar und August waren die Monatsmittelwerte um -0,8 °C bzw. -0,1 °C geringfügig zu niedrig; deutlich zu warm waren dagegen April und Dezember mit Werten von 3,1 °C und 4,1 °C über dem langjährigen Mittel. Extreme Sonnenscheindauer gepaart mit extremer Trockenheit trat im März, April, Oktober und November auf, im Gegenzug waren Sonnenstunden gering und

Niederschläge außergewöhnlich hoch im Juli, August und Dezember. Besonders in Bezug auf die Niederschlagsmengen fielen die Anomalien 2011 in beiden Richtungen außerordentlich groß aus, ohne dass sich diese auch in vergleichbarer Stärke in den Temperaturen zeigten.

Insgesamt war das Jahr 2011 in Arkona im Mittel etwas zu warm, ungeachtet des verregneten Sommers und der Fröste im Februar. Dieses Verhalten folgt dem beobachteten mittleren Trend der letzten 50 Jahre (HAGEN & FEISTEL, 2008). Der Extremwerte der Luftfeuchte in Arkona waren 78% im Mai sowie 95% im Januar. Aufgrund des feuchten Sommers überstieg der Niederschlag in Warnemünde mit einer Jahressumme von 954,6 mm die langjährige Rekordmarke aus dem Jahr 1960 um ca. 70 mm (DWD Warnemünde).

Weltweit verdrängte 2011 das Jahr 1997 vom 11. Platz der wärmsten Jahre seit 1880 (NOAA, 2012). Es ist seit 1976 das 35. Jahr in Folge, dessen globaler Mittelwert über dem klimatischen Mittel liegt. Die bisher wärmsten Jahre der Zeitreihe waren 2010 und 2005. Im 21. Jahrhundert war 2011 ebenfalls auf Platz 11 der höchsten mittleren Meerestemperaturen, und sogar Platz 8 unter den Landtemperaturen. Alle 11 Jahre des 21. Jahrhunderts, einschließlich 2011, sind unter den 13 wärmsten der letzten 132 Jahre. 2011 war ein starkes La-Nina-Jahr im Pazifik mit Auswirkungen auf das globale Wettergeschehen, darunter die extreme Dürre in Ostafrika und die Rekordniederschläge in Thailand und Australien. Nach 2010 war 2011 das Jahr mit den weltweit stärksten Niederschlägen über Land seit Beginn der Aufzeichnung, insbesondere waren auch das Horn von Afrika und Australien davon betroffen. Die mittlere monatliche Ausdehnung des arktischen Eises ist seit Juni 2000 geringer als im langjährigen Mittel, alle Monate von 2011 inklusive. Sowohl die maximale Ausdehnung am 7. März wie auch die minimale am 9. September 2011 waren die zweitkleinsten seit Beginn der Satellitenmessungen. Die Atlantische Hurrikansaison war durchschnittlich. Dagegen war die Tornadosaison in Nordamerika mit über 1700 Tornados und fast 600 Opfern außergewöhnlich stark und destruktiv; im Mittel werden pro Jahr nur etwa 1300 Tornados registriert. Der Arktische Oszillationsindex, der im Februar 2010 mit $-4,27$ den stärksten negativen Wert seit 1950 besessen hatte, ging im Winter 2010/11 auf normale Werte zurück.

Tab. 1

Monatliche gemittelte Wetterdaten der Station Arkona (Rügen, 42 m über NN) nach DWD (2011). 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 (2012). 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 (2011). 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 (2012). Percentages are given with respect to the long-term mean. Maxima and minima are shown in bold

Monat	$t/^\circ\text{C}$	$\Delta t/\text{K}$	$h/\%$	$s/\%$	$r/\%$	Frost	Eis	Solar
Jan	0,5	+0,3	95	121	100	18	6	6313
Feb	-0,6	-0,8	83	95	111	20	16	13125
Mrz	2,4	+0,3	85	137	74	13	2	29157
Apr	8,1	+3,1	81	149	50	-	-	46724
Mai	11,4	+1,7	78	119	108	-	-	61269
Jun	15,4	+1,3	81	117	125	-	-	70034
Jul	16,6	+0,4	86	66	360	-	-	45666
Aug	16,4	-0,1	88	71	252	-	-	47697
Sep	15,0	+1,4	82	113	80	-	-	36458
Okt	10,4	+0,5	85	133	68	-	-	20943
Nov	6,3	+1,0	91	147	4	-	-	8449
Dez	4,2	+4,1	91	84	191	2	-	5542

Tab. 2

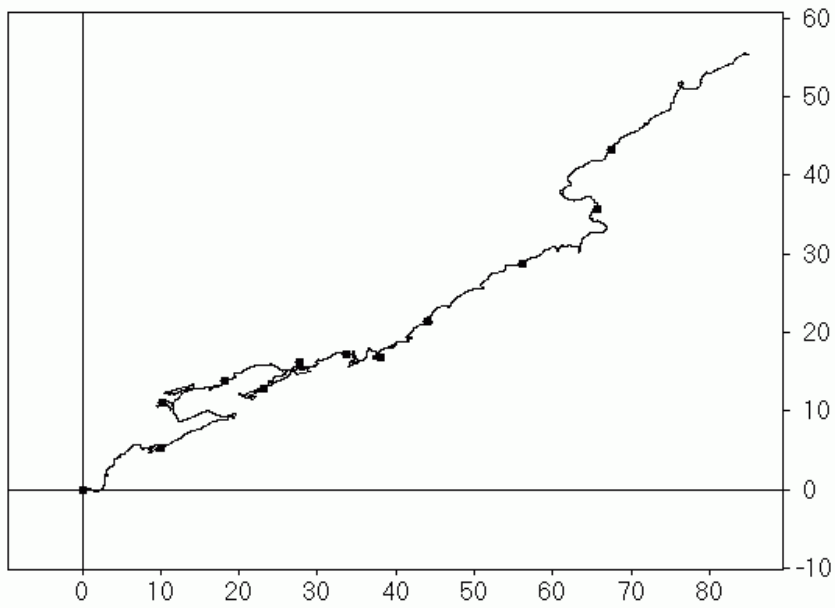
Summen der Tagesmittel der Lufttemperatur an der Wetterstation Warnemünde. Die Kältesumme (KS) ist das Zeitintegral der Lufttemperatur unterhalb der Linie $t = 0\text{ °C}$, in $\text{K} \cdot \text{d}$, die Wärmesumme (WS) das entsprechende Integral oberhalb der Linie $t = 16\text{ °C}$. Zum Vergleich sind die entsprechenden Mittelwerte 1948 bis 2011 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 - 2011 are given

Monat	KS 2010/11	Mittelwert	Monat	WS 2011	Mittelwert
November	5,5	2,6 ± 6,3	April	7,4	1,0 ± 2,4
Dezember	109,2	22,6 ± 28,4	Mai	36,4	4,9 ± 5,6
Januar	17,8	39,7 ± 40,5	Juni	46,2	23,1 ± 14,7
Februar	38,7	31,7 ± 38,4	Juli	57,9	55,7 ± 36,1
März	6,5	8,4 ± 11,9	August	21,7	52,1 ± 32,2
April	0,0	0,0 ± 0,2	September	4,9	11,5 ± 12,2
			Oktober	0,0	0,5 ± 1,3
Σ 2010/2011	177,7	105,4 ± 87,9	Σ 2011	174,5	148,8 ± 69,0

a) Kumulatives Windvektor-Diagramm (1000 km) in Arkona 2011



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

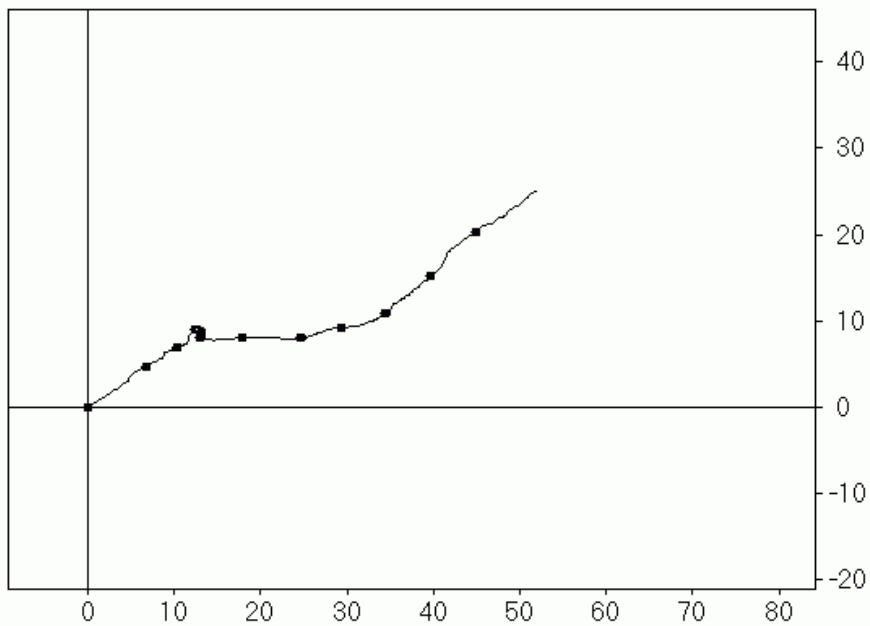


Abb. 3

Fortschreitende Vektordiagramme der Windgeschwindigkeit an der Wetterstation Arkona (nach Daten des DWD, 2012b), in 1000 km, positiv nach nördlichen und östlichen Richtungen. a) 2011, 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, 2012b), in 1000 km, positive in northerly and easterly directions. a) 2011, b) long-term average. The first day of each month is encircled

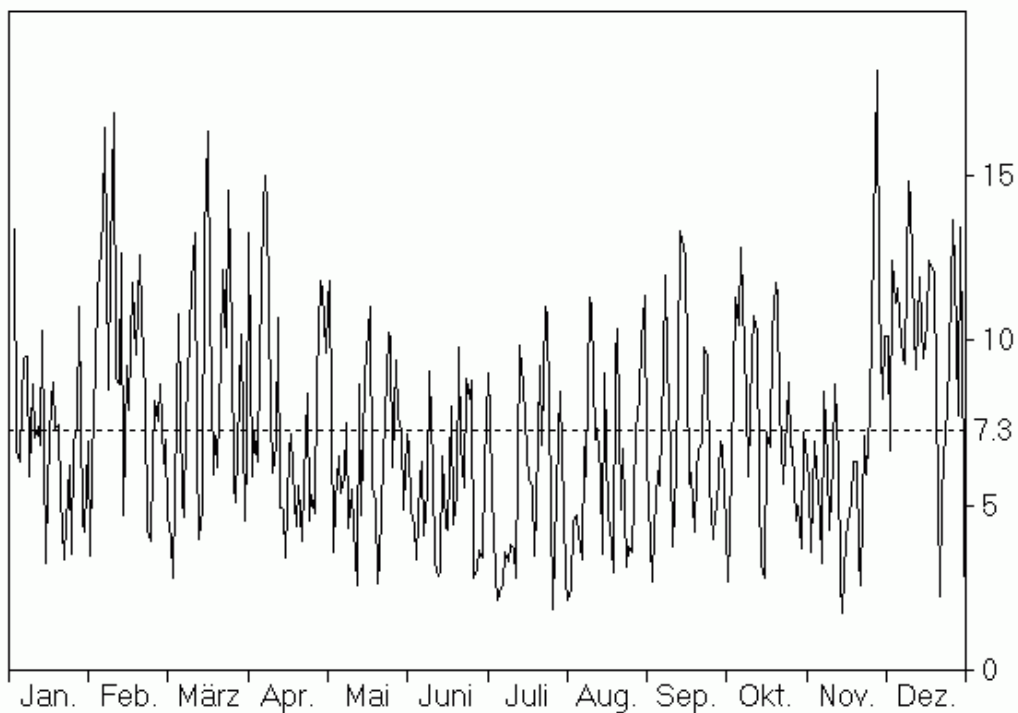
Abb. 3 zeigt die Windentwicklung mit Hilfe fortschreitender Vektordiagramme für die Station Arkona, wobei die Trajektorie durch zeitliche Integration des Windvektors am Ort entsteht. Das Jahr 2011 ist dargestellt im Vergleich mit dem klimatischen mittleren Wind der Jahre 1951 bis 2002. Die Kurve für 2011 (85 000 km nach Osten, 56 000 km nach Norden) weicht von der des klimatischen Mittelwerts (52 000 km nach Osten, 25 000 km nach Norden) ganz erheblich ab. Beide Windkomponenten waren 2011 im Mittel deutlich ausgeprägter als im Langzeitmittel. Der mittlere Betrag der Windgeschwindigkeit ist 7,3 m/s, siehe Abb. 4, der Betrag des mittleren Windvektors ist 3,2 m/s. Beide Werte sind höher als die entsprechenden klimatologischen Mittel von 7,1 m/s und 1,9 m/s (HAGEN & FEISTEL, 2008). Die gegenüber dem Mittel nahezu verdoppelten Komponenten des Winds über das Jahr sind weniger auf eine generelle Zunahme der Windstärke zurückzuführen als auf eine relativ konstante mittlere Windrichtung, so dass die oft vorhandene vektorielle Kompensation bei der Mittelwertbildung im Jahr 2011 wenig ausgeprägt war. Das sonst typische "Sommerplateau" Juni-Juli-August im klimatologischen Verlauf ist 2011 nur andeutungsweise zu erkennen. Auffällig und wichtig ist die Form der Kurve am Jahresende, als eine Phase von mäßigem Südostwind zwischen Mitte Oktober und Mitte November abgelöst wurde von Sturm aus Südwest, der bis zum Jahresende anhielt. Dieses Szenario der Windbedingungen war für das jüngste Einstromereignis verantwortlich. Markante Stürme sind außerdem im Februar und März 2011 zu erkennen (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 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 Volumina zwischen 100 und 300 km³ fanden in der Ostsee 2011 vier Mal statt, im Januar/Februar, im März/April, im Mai und im November/Dezember. Keiner dieser Einströme wirkte sich bis Anfang Dezember 2011 auf das Tiefenwasser im Gotlandbecken zwischen 174 m und 219 m Tiefe aus. Die Verankerung Gotland Nordost (vgl. Kapitel 6, Abb. 21) registrierte über das gesamte Jahr unterhalb von 174 m eine nahezu konstante Temperatur von 6,43 °C. Diese uniforme Temperaturverteilung wurde auch durch die CTD Messungen im Gotlandtief (Station 271) bestätigt. Eine ähnliche Konstanz der Tiefenwassertemperatur ist in der Hagenkurve seit Beginn der Messungen 1997 noch nicht beobachtet worden. Generell waren die Tiefenwassertemperaturen in der zentralen Ostsee 2011 geringfügig niedriger als 2010, verblieben jedoch auf einem relativ hohen Niveau.

Die Verhältnisse im zentralen Tiefenwasser waren 2011 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 seit 2006 mehrere Indizien auf erneute barokline und barotrope Einströme geringer Stärke hin, die nur zum Teil in einzelnen Schüben und mit unterschiedlichen Eigenschaften auch die zentrale Ostsee erreichten. Das relativ starke Einstromsignal von November/Dezember 2011 wurde erst in Januar 2012 in Bornholmbecken nachgewiesen. Nach dem jetzigen Kenntnisstand erfolgen die kleinen barotropen, also sturmgetriebenen Einstromprozesse hauptsächlich auf dem kurzen Weg durch den Sund in das Arkonabecken. Die baroklinen Ereignisse dagegen erfolgen bevorzugt über die Darßer Schwelle wegen der zu geringen Tiefe der Drogdenschwelle im Sund.

a) Windgeschwindigkeit (m/s) in Arkona 2011



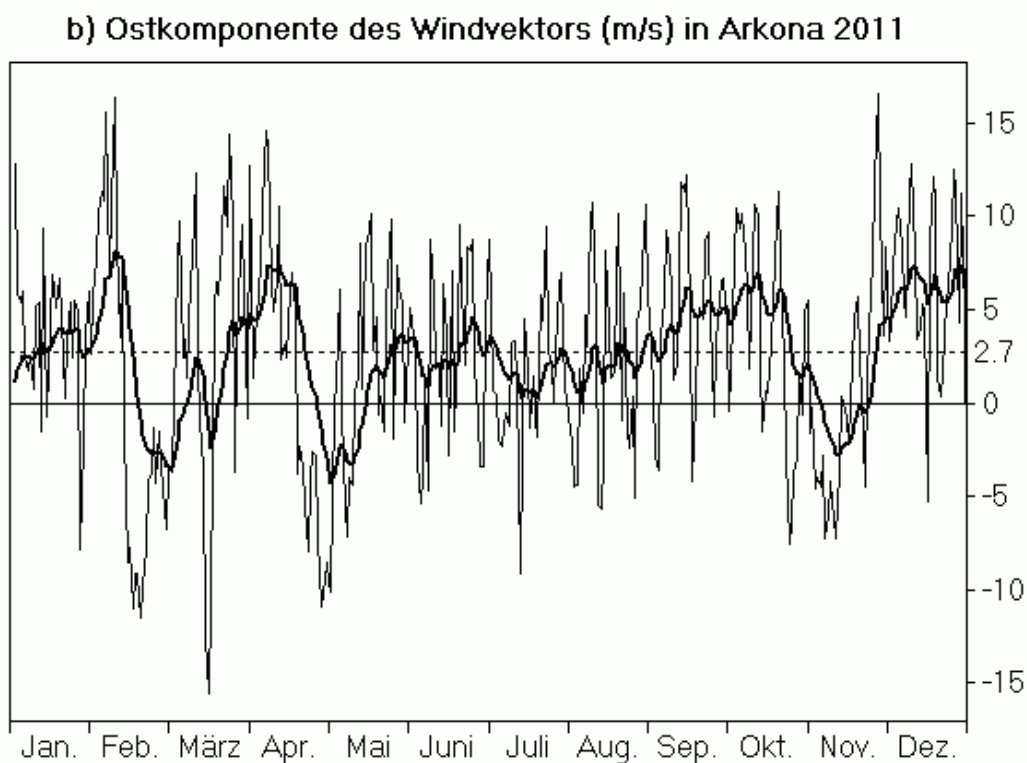


Abb. 4

Windmessungen an der Wetterstation Arkona (nach Daten des DWD, 2012b). a) Tagesmittelwerte der Windgeschwindigkeit in m/s, Jahresmittelwert 7,3 m/s gestrichelt. b) Tagesmittelwerte der Ostkomponente (Westwind positiv), Jahresmittelwert 2,7 m/s gestrichelt. Die fett gezeichnete Linie ist mit einem exponentiellen Gedächtnis von 10 Tagen gefiltert

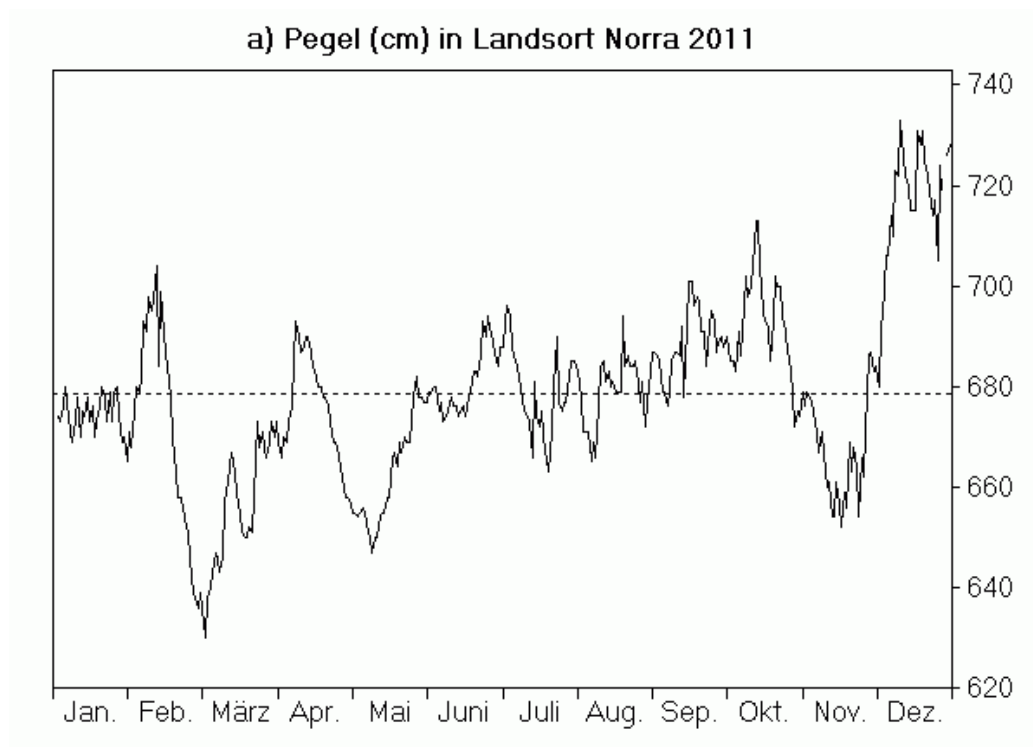
Fig. 4

Wind measurements at the weather station Arkona (from data of DWD, 2012b). a) Daily means of wind speed, in m/s, the dashed line is the annual average of 7.3 m/s. b) Daily means of the eastern component (westerly wind positive), the dashed line is the annual average of 2.7 m/s. The line in bold is filtered with a 10-days exponential memory

Die mittlere Windgeschwindigkeit an der Station Arkona lag 2011 mit 7,3 m/s zwischen denen der Vorjahre: 7,0 m/s im Jahr 2010 (NAUSCH et al., 2011) und 7,9 m/s im Jahr 2009 (NAUSCH et al., 2010). Als Windspitzen der Stundenwerte über 20 m/s traten 2011 auf 21,5 m/s am 1.1. aus WSW (Tief „Vesna“), 21,0 m/s am 8.2. aus WSW (Tief „Nicolas“) und 24,1 m/s am 27.11. aus W (Tief „Yoda“). Die Spitzenwerte von 2000 (30 m/s) und 2005 (26,6 m/s) wurden damit verfehlt.

Der Füllungsgrad der Ostsee wird gut durch den Pegel an der schwedischen Station Landsort beschrieben (Abb. 5a, nach Daten des SMHI, 2012). 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 2011 sind der hohe Pegel Anfang Dezember und der extreme Niedrigpegel Anfang März, sowie der kräftige Ausstrom im Februar und der starke Einstrom im November/Dezember. Die Spitzenpegel 2011 betragen 629 cm am 3.3. und 739 cm am 9.12.



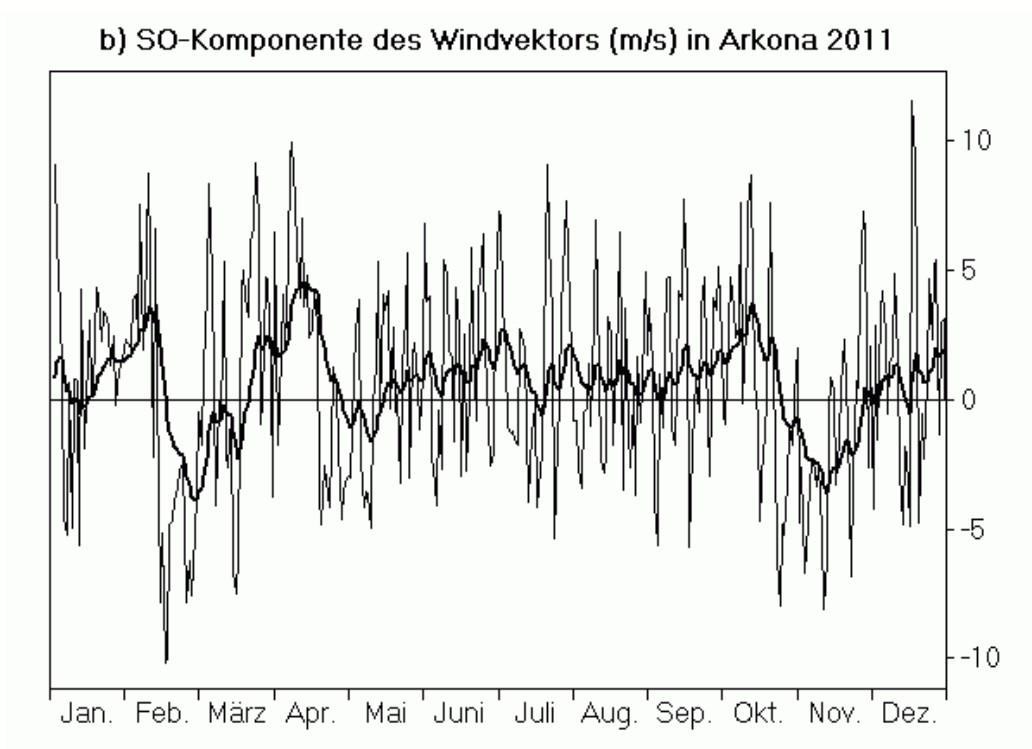


Abb. 5

a) Pegel bei Landsort als Maß für den Füllungsgrad der Ostsee (nach Daten des SMHI, 2012).
 b) Stärke des Nordwestwinds (positiv) an der Wetterstation Arkona (nach Daten des DWD, 2012b). 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, 2012).
 b) Strength of the north-west wind (positive) at the weather station Arkona (from data of DWD, 2012b). The bold curve appeared by filtering with an exponential 10-days memory

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

$$\bar{v}(t) = \int_0^{\infty} d\tau v(t - \tau) \exp(-\tau / 10d)$$

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

Außer einem auffällig starken Einstrom mit einem Anstieg um 82 cm in 14 Tagen vom 25. November bis 9. Dezember (Tiefs „Xaver“ bis „Friedhelm“) sind 2011 drei kleinere barotrope Einstromereignisse zu erkennen an schnellen Anstiegen um mindestens 30 cm, so um 51 cm in 9 Tagen vom 31. Januar bis 8. Februar (Tiefs „Johannes“ bis „Nicolas“), um 60 cm in 36 Tagen vom 3. März bis 7. April (Tiefs „Ulfert“ bis „Joachim“), und um 40 cm vom 12. bis 27. Mai in 16 Tagen (Tiefs „Norbert“ bis „Udo“). 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 $\Delta V = 182 \text{ km}^3$ im Januar/Februar, 181 km^3 im März/April, 131 km^3 im Mai und 293 km^3 im November/Dezember. Volumina unter 200 km^3 sind in der Regel von nur geringer Bedeutung, 2011 überstieg ein Einstrom diese Grenze und erreichte nahezu geschätzte 300 km^3 . Durch den Öresund wurden davon etwa 50 km^3 transportiert (SMHI, 2011), deutlich mehr als im Januar 2003 (30 km^3), vergleichbar viel wie beim Einstrom im Oktober/November 2001 (42 km^3) und dem im September 1997 (45 km^3), aber deutlich weniger als bei dem vom Januar 1993 (80 km^3).

Das wichtigste Einstromereignis des Jahres 2011 war der barotroper Einstrom vom 25.11. bis 9.12.2011, dessen Auswirkungen auf das Tiefenwasser erst im weiteren Verlauf von 2012 untersucht werden können. Dazu ist es erforderlich, das BSH-Monitoring bis zum Eingang der Stolper Rinne auszudehnen, wie für besondere Einstromsituationen vorgesehen, um die Auswirkung auf die zentrale Ostsee genauer einschätzen zu können. Der Einstrom stellte sich nach ersten Einschätzungen als groß genug heraus, um als „Major Baltic Inflow“, MBI, nach Matthäus klassifiziert zu werden. Wahrscheinlich wird die genauere Analyse der Beobachtungen im Jahr 2012 diesen als den ersten MBI seit dem von 2003 ergeben.

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

Die kontinuierlichen Messungen der Wassertemperatur und des Salzgehalts sowie der Strömungsgeschwindigkeit wurden an der Station „Darßer Schwelle“ (DS) fortgesetzt. Zur automatisierten Messung des Sauerstoffgehalts werden an dieser sowie an allen anderen Stationen nun ausschließlich Optoden der Firma Aanderaa (Norwegen) eingesetzt, da sich diese nach umfangreichen in den letzten Jahren durchgeführten Tests als zuverlässiger und stabiler als das Vorgängermodell erwiesen haben. Korrosionsprobleme bei den Steckverbindungen der Optoden, die in den letzten beiden Jahren die Messungen teilweise beeinträchtigt hatten, sind behoben und traten im Jahr 2011 nicht mehr auf. Die Messungen finden nach wie vor in 7 m und 19 m Tiefe am Messmast statt, wobei vereinzelte Vergleichsmessungen des Sauerstoffgehalts durch Wasserproben aus der Messtiefe der Geräte mit Hilfe der Winklermethode (vgl. GRASSHOFF et al., 1983) während der Wartungszyklen des Messmastes durchgeführt wurden. Die Zeitreihenmessungen wiesen einen Trend in der Empfindlichkeit der Sauerstoffsensoren auf und wurden entsprechend korrigiert. Die Sauerstoffmessungen an den Stationen „Arkonabecken“ (AB) und „Oder Bank“ (OB) wurden ebenfalls nach dieser Methode korrigiert.

An der Station „Darßer Schwelle“ wurden wegen Beschädigungsgefahr durch Eisgang die Messgeräte vom 02.03. bis 29.03.2011 eingeholt (Messungen des akustischen Strömungsmessers liegen allerdings auch während dieser Periode vor). Ferner wurden nach umfangreichen Vorerkundungen ernsthafte Beschädigungen am Kreuzgelenk des Mastes festgestellt, die eine vorgezogene Werftüberholung unvermeidbar gemacht haben. Ab dem 18.11. bis Ende des Jahres 2011 liegen aus diesem Grund keine Daten des Messmastes mehr vor. Diese erhebliche Datenlücke, die den Zeitraum des wichtigsten Einstromereignisses der letzten Jahre einschließt, konnte allerdings durch den kurzfristigen Einsatz einer provisorischen Verankerung mit Messgeräten auf den Standardtiefen verringert werden. Mit Ausnahme der Geschwindigkeitsmessungen durch den akustischen Strömungsmesser stand dadurch ab dem 06.12.2011 wieder ein fast kompletter Datensatz zur Verfügung.

3.1. Statistische Analyse

Mittelwerte und Standardabweichung des in Abb. 8a gezeigten Temperaturverlaufs an der Darßer Schwelle sind in Tab. 3 aufgeführt und in Abb. 6 grafisch dargestellt. Wie oben erwähnt, liegen aufgrund von Treibeisbildung und der notwendig gewordenen Werftzeit vom 02.03. bis 29.03.2011 und vom 18.11. bis 5.12.2011 keine Temperaturmessdaten vor. Für diese beiden Zeiträume beruht die statistische Auswertung der Temperaturzeitreihen daher auf einer Interpolation der Daten. Im Gegensatz zum vergleichsweise glatten Jahresgang der Temperatur sind die Zeitreihen des Salzgehaltes durch intermittierende Einstromereignisse geprägt, die zu großen Unsicherheiten bei der Interpolation führen würden. Aus diesem

Grund wird für das Jahr 2011 auf eine statistische Auswertung der Salzgehalte verzichtet, nicht aber auf eine Diskussion der Salzgehaltszeitreihen.

Die mittleren Temperaturen des Jahres 2011 (Tab. 3) lagen in allen Tiefenniveaus im Bereich der 3-4 kältesten Jahre seit Beginn der Analyse im Jahr 1992. Damit unterbrachen die Jahre 2010 und 2011 eine längere Periode von Jahren mit überdurchschnittlich hohen Jahresmittelwerten. Im Vergleich zum Rekordjahr 2007 zum Beispiel lagen die Temperaturen 2011 auf allen Messniveaus um ca. 1,5-2,0 K tiefer. Wie im Vorjahr sind die Zeitreihen und damit die Mittelwerte durch den kalten und schneereichen Winter geprägt, der sich im Bereich der Darßer Schwelle durch Wassertemperaturen nur knapp über 0 °C in den ersten Monaten des Jahres widerspiegelt (Abb. 8). Hinzu kam im Jahr 2011 ein weitgehend kühler und verregneter Sommer, in dem die Tagesmittelwerte in der Deckschicht an der Darßer Schwelle die Marke von 17 °C nur an wenigen Tagen überschritten. Trotz dieser Kombination aus strengem Winter und kühlem Sommer lagen die Durchschnittstemperaturen deutlich über denen des Vorjahrs (Tab. 3), obwohl dieses durch sommerliche Höchsttemperaturen von bis zu 20 °C geprägt war. Maßgeblich für diesen Unterschied war die in Abschnitt 3.3 diskutierte ungewöhnlich starke Erwärmungsphase im Frühsommer 2011 (Abb. 8).

Wie zu erwarten führten die niedrigen Sommertemperaturen des Jahres 2011, trotz des markanten Temperaturminimums im Januar und Februar, nur zu einer moderaten Amplitude des Jahresgangs (Tab. 4). Wie in den Vorjahren wurde diese aus einer entsprechenden Fourieranalyse bestimmt, die auch die in Tab. 4 aufgeführte Phasenverschiebung des sommerlichen Temperaturmaximums ergab. Im Gegensatz zum gedämpften Jahresgang des Oberflächenwassers, liegen die Amplituden der bodennahen Temperaturen auf Platz 2 (in 19 m Tiefe) und Platz 4 (in 17 m Tiefe) der nunmehr 20-jährigen Messreihe seit 1992. Dies kann als erster Hinweis auf den Einfluss warmer, baroklin getriebener Einströme in den Sommermonaten verstanden werden. Der besonders ausgeprägte Jahresgang spiegelt sich übrigens auch in den in Tab. 3 und Abb. 6 erkennbaren hohen Temperatur-Standardabweichungen der bodennahen Sensoren wider (die Messreihe in 17 m Tiefe zeigt sogar den höchsten Wert seit Beginn der Messungen). Der Transport von Nordseewasser durch die Beltsee führte neben dieser Beeinflussung der Temperaturamplituden im bodennahen Bereich auch zu einer zeitlichen Verzögerung des sommerlichen Temperaturmaximums. Letzteres lässt sich besonders klar in den Phasenbeziehungen der Fourieranalyse nachweisen, die in Tab. 4 als Zeitabstand zwischen dem sommerlichen Temperaturmaximum und dem Jahresende dargestellt sind: In ausnahmslos allen Jahren des Beobachtungszeitraums ist der Zeitpunkt des Temperaturmaximums mit der Tiefe nach hinten verschoben, typischerweise um etwa 2 Wochen bezogen auf die Deckschicht.

Wie oben angemerkt, liegen aufgrund von Datenlücken keine entsprechenden Statistiken für die Salzgehaltszeitreihen aus dem Jahr 2011 vor.

Tab. 3

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

Table 3

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

Jahr	7 m Tiefe		17 m Tiefe		19 m Tiefe	
	T °C	S g/kg	T °C	S g/kg	T °C	S g/kg
1992	9,41 ± 5,46	9,58 ± 1,52	9,01 ± 5,04	11,01 ± 2,27	8,90 ± 4,91	11,77 ± 2,63
1993	8,05 ± 4,66	9,58 ± 2,32	7,70 ± 4,32	11,88 ± 3,14	7,71 ± 4,27	13,36 ± 3,08
1994	8,95 ± 5,76	9,55 ± 2,01	7,94 ± 4,79	13,05 ± 3,48	7,87 ± 4,64	14,16 ± 3,36
1995	9,01 ± 5,57	9,21 ± 1,15	8,50 ± 4,78	10,71 ± 2,27	-	-
1996	7,44 ± 5,44	8,93 ± 1,85	6,86 ± 5,06	13,00 ± 3,28	6,90 ± 5,01	14,50 ± 3,14
1997	9,39 ± 6,23	9,05 ± 1,78	-	12,90 ± 2,96	8,20 ± 4,73	13,87 ± 3,26
1998	8,61 ± 4,63	9,14 ± 1,93	7,99 ± 4,07	11,90 ± 3,01	8,10 ± 3,83	12,80 ± 3,22
1999	8,83 ± 5,28	8,50 ± 1,52	7,96 ± 4,39	12,08 ± 3,97	7,72 ± 4,22	13,64 ± 4,39
2000	9,21 ± 4,27	9,40 ± 1,33	8,49 ± 3,82	11,87 ± 2,56	8,44 ± 3,81	13,16 ± 2,58
2001	9,06 ± 5,16	8,62 ± 1,29	8,27 ± 4,06	12,14 ± 3,10	8,22 ± 3,86	13,46 ± 3,06
2002	9,72 ± 5,69	8,93 ± 1,44	9,06 ± 5,08	11,76 ± 3,12	8,89 ± 5,04	13,11 ± 3,05
2003	9,27 ± 5,84	9,21 ± 2,00	7,46 ± 4,96	14,71 ± 3,80	8,72 ± 5,20	15,74 ± 3,27
2004	8,95 ± 5,05	9,17 ± 1,50	8,36 ± 4,52	12,13 ± 2,92	8,37 ± 4,44	12,90 ± 2,97
2005	9,13 ± 5,01	9,20 ± 1,59	8,60 ± 4,49	12,06 ± 3,06	8,65 ± 4,50	13,21 ± 3,31
2006	9,47 ± 6,34	8,99 ± 1,54	8,40 ± 5,06	14,26 ± 3,92	<i>9,42 ± 4,71</i>	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	-	<i>9,19 ± 4,48</i>	-
2009	9,65 ± 5,43	9,39 ± 1,67	9,38 ± 5,09	11,82 ± 2,47	9,35 ± 5,04	12,77 ± 2,52
2010	8,16 ± 5,98	8,61 ± 1,58	7,14 ± 4,82	11,48 ± 3,21	6,92 ± 4,56	13,20 ± 3,31
2011	8,46 ± 5,62	-	7,76 ± 5,18	-	7,69 ± 5,17	-

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 – Maximalwerte hervorgehoben

Table 4

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

Jahr	7 m Tiefe		17 m Tiefe		19 m Tiefe	
	Amplitude K	Phase Monat	Amplitude K	Phase Monat	Amplitude K	Phase Monat
1992	7,43	4,65	6,84	4,44	6,66	4,37
1993	6,48	4,79	5,88	4,54	5,84	4,41
1994	7,87	4,42	6,55	4,06	6,32	4,00
1995	7,46	4,36	6,36	4,12	–	–
1996	7,54	4,17	6,97	3,89	6,96	3,85
1997	8,60	4,83	–	–	6,42	3,95
1998	6,39	4,79	5,52	4,46	–	–
1999	7,19	4,52	5,93	4,00	5,70	3,83
2000	5,72	4,50	5,02	4,11	5,09	4,01
2001	6,96	4,46	5,35	4,01	5,11	3,94
2002	7,87	4,53	6,91	4,32	6,80	4,27
2003	8,09	4,56	7,06	4,30	7,24	4,19
2004	7,11	4,48	6,01	4,21	5,90	4,18
2005	6,94	4,40	6,23	4,03	6,21	3,93
2006	8,92	4,32	7,02	3,80	6,75	3,72
2007	6,01	4,69	5,53	4,40	5,51	4,36
2008	6,84	4,60	6,23	4,31	6,08	4,24
2009	7,55	4,57	7,09	4,37	7,03	4,32
2010	8,20	4,52	6,54	4,20	6,19	4,08
2011	7,70	4,64	6,98	4,21	7,04	4,14

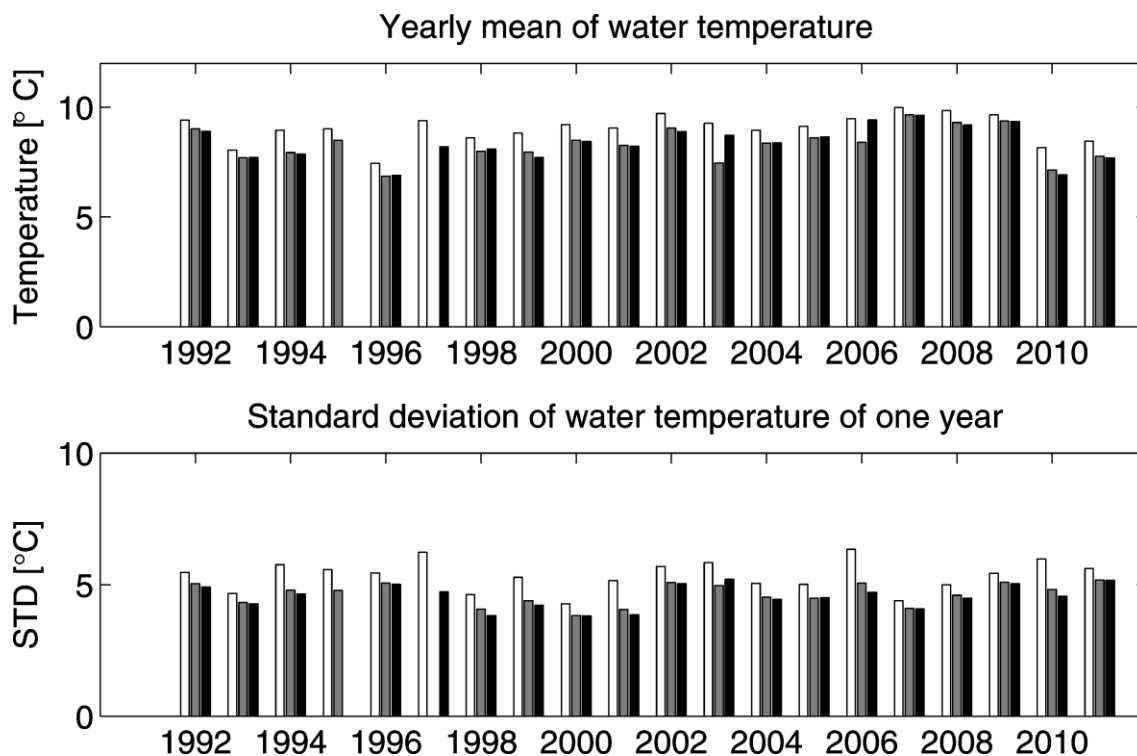


Abb. 6

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. 6

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

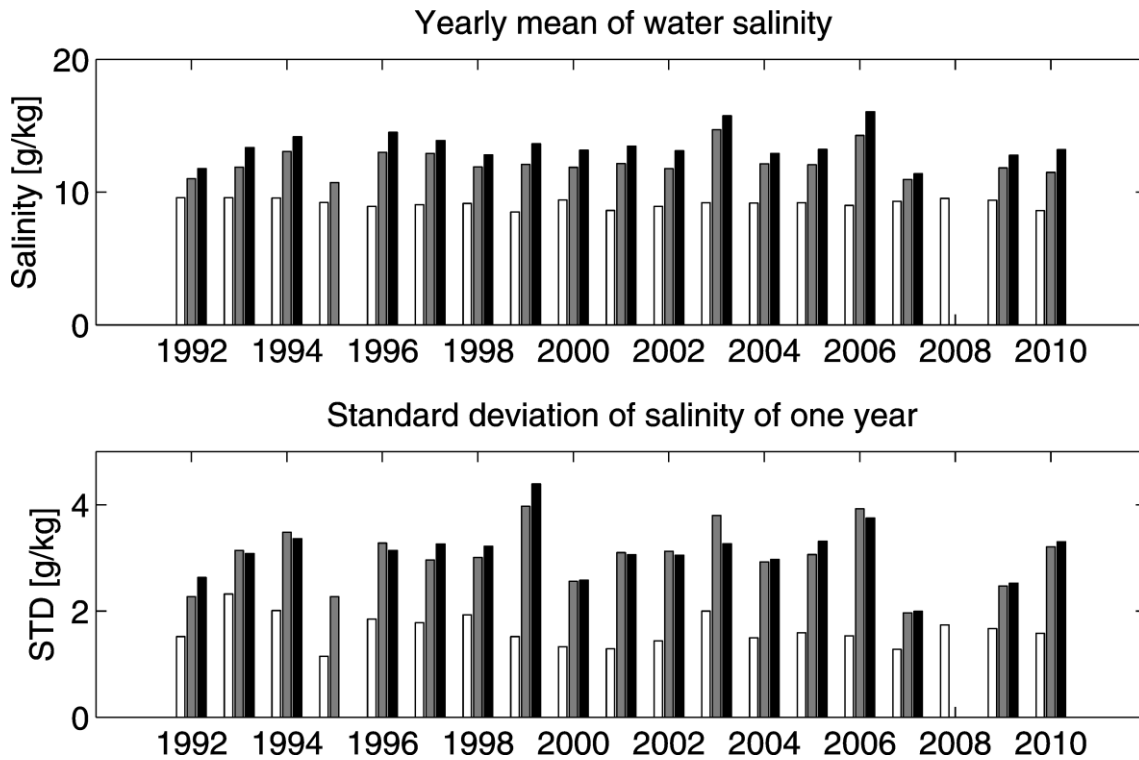


Abb. 7

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. 7

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

3.2. Die Wintermonate und der Einstrom im März

Der Verlauf der Wassertemperatur und des Salzgehalts für das Jahr 2011 ist für die Deckschicht (7 m Tiefe) und die bodennahe Schicht (19 m Tiefe) in Abb. 8 dargestellt. Abb. 9 zeigt den Sauerstoffgehalt, der wegen der besseren Interpretierbarkeit seit dem Vorjahr als Sättigungsgrad ausgedrückt wird. Wie in den letzten Jahren wurden die in Abb. 10 dargestellten Strömungen zur Charakterisierung des tiefenvariablen, baroklinen Anteils zeitlich integriert und als „fortschreitendes Vektordiagramm“ (Pseudotrajektorie) aufgetragen. Diese integrale Darstellungsweise filtert kurzzeitige Fluktuationen aus den Strömungsmessungen und lässt langfristige Phänomene, wie zum Beispiel

Einstromsituationen, besser erkennen. Gemäß dieser Definition entspricht die Strömungsgeschwindigkeit dann der Steigung der in Abb. 10 gezeigten Kurven, wobei eine positive Steigung Einstromsituationen widerspiegelt.

Nach einem von nur moderaten Winden geprägten Januar (im Tagesmittel wurde an der Darßer Schwelle die Marke von 10 m/s nur einmal, am Neujahrstag, überschritten), wiesen die Bodensalzgehalte (Abb. 8) erstmalig in der ersten Februarwoche auf nennenswerte Einstromaktivität hin. Ausgelöst durch starke Südwestwinde (Abb. 4), stieg der Pegel bei Landsort auf einen Höchststand (Abb. 5), der erst im Oktober wieder übertroffen wurde. Windmischung verhinderte die Ausbildung von Schichtung in der Wassersäule, so dass dieser Einstrom als barotrop einzustufen ist und weder in der Temperatur (Abb. 8) noch im nahezu gesättigtem Sauerstoffgehalt (Abb. 9) deutliche Signale zeigte. Der barotrope Charakter wird durch die in Abb. 10 dargestellten Strömungsmessungen unterstrichen, die zeigen, dass die Deckschicht mit größerer (weil zusätzlich windgetriebener) Geschwindigkeit als die Bodenschicht einströmte, exakt im Gegensatz zur Situation bei baroklinen Einströmen. Ab etwa dem 13. Februar drehten die Winde dann auf östliche Richtungen, blieben aber kräftig und führten somit zu kontinuierlichem Ausstrom. Der kalte Ostwind (in der zweiten Februarhälfte lagen die Lufttemperaturen durchgehend unter null) kühlte die Wassersäule an der Darßer Schwelle bis auf Temperaturen knapp über 0 °C zum Monatsende ab (Abb. 8). Der Pegel bei Landsort erreichte zu diesem Zeitpunkt den niedrigsten Stand des Jahres (Abb. 5). Die vertikale Struktur der Salzgehalte zeigte Durchmischung an, wobei die Messwerte bei den für starken Ausstrom typischen Werten von 8 g/kg stagnierten (Abb. 8). Die Sauerstoffgehalte blieben durch ständige atmosphärische Belüftung in allen Messtiefen im Sättigungsbereich (Abb. 9).

Wie oben geschildert, liegen aufgrund der Vereisung der Station für den Monat März nahezu keine Messdaten vor. Weitgehend westliche Winde und eine fast durchgehende Erholung des Pegelstands (Abb. 5) lassen aber auf signifikanten Einstrom während dieser Periode schließen. Lediglich ein mehrtägiges Ostwindereignis an den „Iden des März“ mit Windgeschwindigkeiten von bis zu 14 m/s an der Darßer Schwelle führte zu einem kurzem Einbruch des Pegels, der auf kurzen, aber kräftigen Ausstrom schließen lässt. Der nicht von Vereisung betroffene Strömungsmesser an der Darßer Schwelle bestätigt die durchgehende Einstromtendenz im März (Abb. 10). Die starke Spreizung der Kurven mit Einstrom am Boden bei gleichzeitig (im mehrwöchigen Mittel) vernachlässigbaren Deckschichtgeschwindigkeiten legt eine starke barokline Komponente dieses Einstroms nahe. Dies ist auch konsistent mit den relativ hohen Bodensalzgehalten (über 14 g/kg), die Ende März, kurz nach Wiederinbetriebnahme der Station, gemessen wurden (Abb. 8).

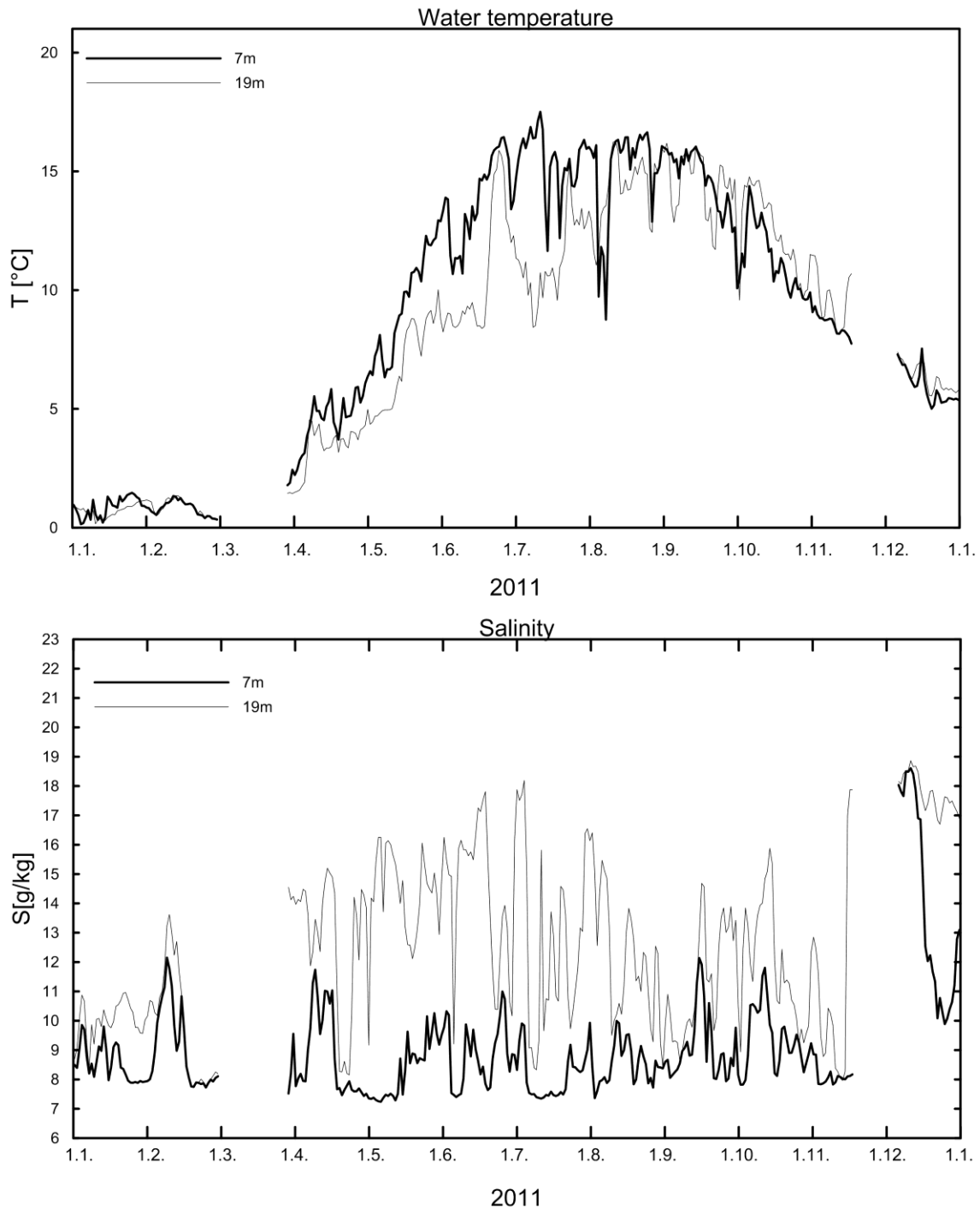


Abb. 8

Verlauf der Wassertemperatur (oben) und des Salzgehaltes (unten) in der Deck- und Bodenschicht auf der Darßer Schwelle im Jahre 2011

Fig. 8

Water temperature (above) and salinity (below) measured in the surface layer and the near bottom layer at the Darss Sill in 2011

3.3. Erwärmungsphase und die Sommermonate

Die erste Aprilwoche war durch konstanten, kräftigen Wind aus westlichen Richtungen geprägt. Am Nachmittag des 8. April wurden an der Darßer Schwelle stürmische 18 m/s aus West gemessen. Der Pegel bei Landsort (Abb. 5) zeigte aufgrund des bereits hohen Füllstands der Ostsee stagnierende Werte, so dass keine starke Einstromaktivität zu erwarten war. Trotzdem fanden sich zu diesem Zeitpunkt deutlich erhöhte Salinitäten in der Deckschicht, die auf einen moderaten barotropen Einstrom hinweisen (Abb. 8). Gemischt barotrop-barokliner Einstrom während der ersten Aprilwoche zeigt sich auch in den in Abb. 10 gezeigten Geschwindigkeitsmessungen.

Die seit Ende März andauernde rasche Erwärmung der Deckschicht wurde durch dieses Windereignis nur kurz unterbrochen und setzte sich ab der Monatsmitte kontinuierlich bis etwa Ende Mai fort (Abb. 8). Die zweite Aprilhälfte war von schwachen Ostwinden geprägt (Abb. 4), die mit einem starken Pegelabfall bei Landsort einher gingen (Abb. 5). Sowohl die Salzkonzentrationen (Abb. 8) als auch die Geschwindigkeitsmessungen (Abb. 10) zeigen aber, dass Ausstrom über die komplette Wassersäule nur für einen kurzen Zeitraum kurz nach Mitte des Monats herrschte. Barokliner Einstrom sorgte für eine teilweise Kompensation des Ausstroms und damit zu kontinuierlich hohen Bodensalzgehalten an der Messstation. Durch Zehrungsprozesse in der Beltsee waren diese am Boden einströmenden Wassermassen durch niedrige Sauerstoffkonzentrationen geprägt, was sich an der Darßer Schwelle in einem rapiden Abfall der Sättigungswerte auf ca. 50 % äußerte (Abb. 9). Ab Mitte Mai drehte der Wind wieder auf westliche Richtungen, blieb aber moderat. Barotroper Einstrom setzte ein (Abb. 10), der Pegelstand bei Landsort erreichte ausgeglichene Werte (Abb. 5), und die Deckschichtsalzgehalte zeigten einen deutlichen Anstieg auf ca. 10 g/kg. Das frische Einstromwasser führte zu einer kräftigen und auch nachhaltigen Erholung der Sauerstoffkonzentrationen in der Bodenschicht (Abb. 9).

Die ungewöhnlich schnelle Erwärmung der Wassersäule während der langen Trockenphase des Frühlings und Frühsommers (siehe Kapitel 2) wird durch die Temperaturkurven in Abb. 8 verdeutlicht. Anfang Juni, zum Ende der Trockenphase, betrug die Deckschichttemperatur bereits 14 °C, was bei Berücksichtigung der kalten Ausgangstemperaturen im Februar ein erstaunlich hoher Wert ist (die Vorjahrestemperatur lag, bei ähnlichen Ausgangstemperaturen im Februar, nur bei unter 10 °C zum gleichen Zeitpunkt). Die nachfolgenden Sommermonate waren allerdings, wie in Kapitel 2 beschrieben, von wechselhaftem und kühlem Wetter bestimmt. Immer wieder von Temperatureinbrüchen unterbrochen, stiegen die Temperaturen in der Deckschicht nur langsam. Am 12. Juli wurde mit 18 °C im Tagesmittel der Höchstwert des Jahres 2011 gemessen – doch schon 3 Tage später war dieser Wert auf etwa 13 °C gefallen: Tief „Meikel“ hatte mit Windgeschwindigkeiten von bis zu 12 m/s die Darßer Schwelle überquert. Das bemerkenswerteste Einzelereignis des Sommers 2011 war der rapide Temperatureinbruch Anfang August (Abb. 8), der gleichzeitig mit einer Homogenisierung der Wassersäule verbunden war, wie aus den Salz- und Sauerstoffmessungen in Abb. 8 und 9 ersichtlich ist.

Ursache war der Durchgang des Tiefdruckgebiets „Timo“ (Kapitel 2), das am 9. und 10. August mit Windgeschwindigkeiten von 11-12 m/s im Tagesmittel die Darßer Schwelle passierte. Die rasche Erholung der Struktur der Wassersäule durch lateralen Ausgleich lässt vermuten, dass „Timo“ weitgehend lokale Wirkung hatte (an der Messstation im Arkonabecken wurden keine vergleichbaren Effekte gemessen).

Abgesehen von diesen Variationen der Deckschichttemperaturen, führte die Passage einer Kette von Tiefdruckgebieten zu einer Serie von kleinen barotropen und baroklinen Einströmen in den Sommermonaten (Abb. 10). Ständig wechselnde Winde ließen den Füllstand der Ostsee allerdings nur marginal vom Neutralwert abweichen (Abb. 5), was kräftigere Einstromereignisse ausschließen lässt (auch in den Strömungsdaten in Abb. 10 gibt es keine Hinweise hierfür). Trotzdem führte die Summe dieser kleineren Einströme zu einer ständigen Belüftung der Bodenschicht an der Darßer Schwelle, so dass die extrem niedrigen Bodensauerstoffgehalte des vorangegangenen Jahres nicht wiederholt wurden. Die niedrigste Sauerstoffsättigung des Jahres 2011 betrug ca. 35 % im Tagesmittel und wurde am 20. Juli in 19 m Tiefe gemessen. Noch niedrigere Werte von bis zu 25 % wurden jeweils nur für kurze Zeiträume von einigen Stunden beobachtet.

3.4. Abkühlungsphase und der größere Einstrom 2011

Bei Temperaturen um 15 °C begann etwa Mitte September die herbstliche Abkühlungsphase, deren Auftakt das Sturmtief „Katja“ mit Windgeschwindigkeiten von bis zu 15 m/s an der Darßer Schwelle gegeben hatte. Mit kurzer Unterbrechung durch einen außergewöhnlich warmen Oktoberbeginn (siehe Kapitel 2), fielen die Temperaturen bis Ende des Jahres kontinuierlich auf Werte um 5 °C zum Jahresende. Dieser Wert liegt aufgrund des milden Dezembers deutlich über dem des Vorjahrs, als beim Jahreswechsel 2010/2011 Temperaturen um 0 °C als Resultat des ungewöhnlich harten Wintereinbruchs im Dezember gemessen wurden.

Die letzte Phase des Jahres 2011 war durch ein starkes Einstromereignis geprägt, das sich aller Voraussicht nach in einer signifikanten Veränderung des Wasserkörpers der zentralen Ostsee niederschlagen wird. Vornehmlich westliche Winde hatten bis etwa Mitte Oktober den Pegel bei Landsort auf den bis dahin höchsten Stand getrieben (Abb. 5) und damit stärkeren Einstrom unmöglich gemacht. Ein kurzfristiger Einbruch der Windgeschwindigkeiten zur Mitte des Monats Oktober führte nur zu einer kurzfristiger Absenkung des Pegels, die aber durch erneutes Auffrischen westlicher Winde in der folgenden Woche wieder, zumindest teilweise, kompensiert wurde. Erst in der letzten Oktoberwoche drehten der Wind zunächst auf südliche und Anfang November dann, bei stabiler Blockierungswetterlage, auf östliche Richtungen. Starker, nur kurzzeitig unterbrochener Ausstrom setzte ein und schuf damit die Voraussetzungen für den großen Einstrom.

Am Morgen des 13. November brachen die Windgeschwindigkeiten an der Darßer Schwelle für einige Tage auf Werte unter 5 m/s ein. Der Pegel bei Landsort hatte den niedrigsten Stand seit Mai erreicht. Bei ruhigem, kaltem Herbstwetter setzte am Abend des 14. November kräftiger barokliner Einstrom ein. Am 16. November wurden in der Bodenschicht der Darßer Schwelle bereits Salzkonzentrationen von etwa 18 g/kg beobachtet, während die Oberflächensalzgehalte bei 8 g/kg stagnierten und damit den zunächst rein baroklinen Charakter dieses Einstroms unterstrichen (Abb. 8). Der Sauerstoffsensoren in 19 m Tiefe dokumentierte mit einem rapiden Einbruch der Konzentrationen den Transport von vergleichsweise sauerstoffarmem Wasser aus der Beltsee in dieser ersten baroklinen Phase des Einstroms. Mit diesen letzten Messungen musste der Messmast aus logistischen Gründen für die wegen Beschädigung notwendig gewordene Wertzeit außer Betrieb genommen werden (der Strömungsmesser wurde bereits einige Zeit früher eingeholt). Der weitere Verlauf des Einstroms bis zum Einsatz einer provisorischen Messkette am 6. Dezember muss daher aus den Wind- und Pegeldata rekonstruiert werden; zusätzliche Daten einer Messfahrt des Forschungsschiffes „Elisabeth Mann Borgese“ wurden kurz in Kapitel 2 besprochen.

Bei Sturm aus West mit den höchsten Windgeschwindigkeiten des Jahres (Abb. 4) verursachte das Orkantief „Xaver“ ab dem 25. November einen raschen Pegelanstieg bei Landsort (Abb. 5), der mit einem starken barotropen Einstromschub verbunden gewesen sein muss. Nur kurz unterbrochen durch ein Zwischenhoch Ende November und ein zwischenzeitliches Umkippen der Windrichtung Anfang Dezember erfolgte ein rapider Pegelanstieg bis zum Erreichen des Jahreshöchststandes in der zweiten Dezemberwoche. Die ersten Werte der gerade neu installierten Messkette zeigten Salzgehalte von bis zu 19 g/kg über die gesamte Wassersäule. Danach sanken während einer Phase mit wechselndem Ein- und Ausstrom die Oberflächensalzgehalte ab, während die Bodensalzgehalte bei Werten über 17 g/kg stagnierten und damit auf die Möglichkeit baroklinen Einstroms hinwiesen (direkte Strömungsmessungen zur Bestätigung dieser Vermutung lagen zu diesem Zeitpunkt nicht mehr vor). Orkantief „Robert“ verursachte erst in den letzten Tagen des Jahres einen erneuten, schwächeren und rein barotropen Einstromschub. Die Abschätzung des Einstromvolumens der Einströme im November und Dezember aufgrund von Pegeldata (siehe Kapitel 2) legt einen der nur selten beobachteten „Major Baltic Inflows“ nahe, über dessen Ausbreitung in den östlich gelegenen Becken ein erweitertes Monitoring im Folgejahr Aufschluss geben wird.

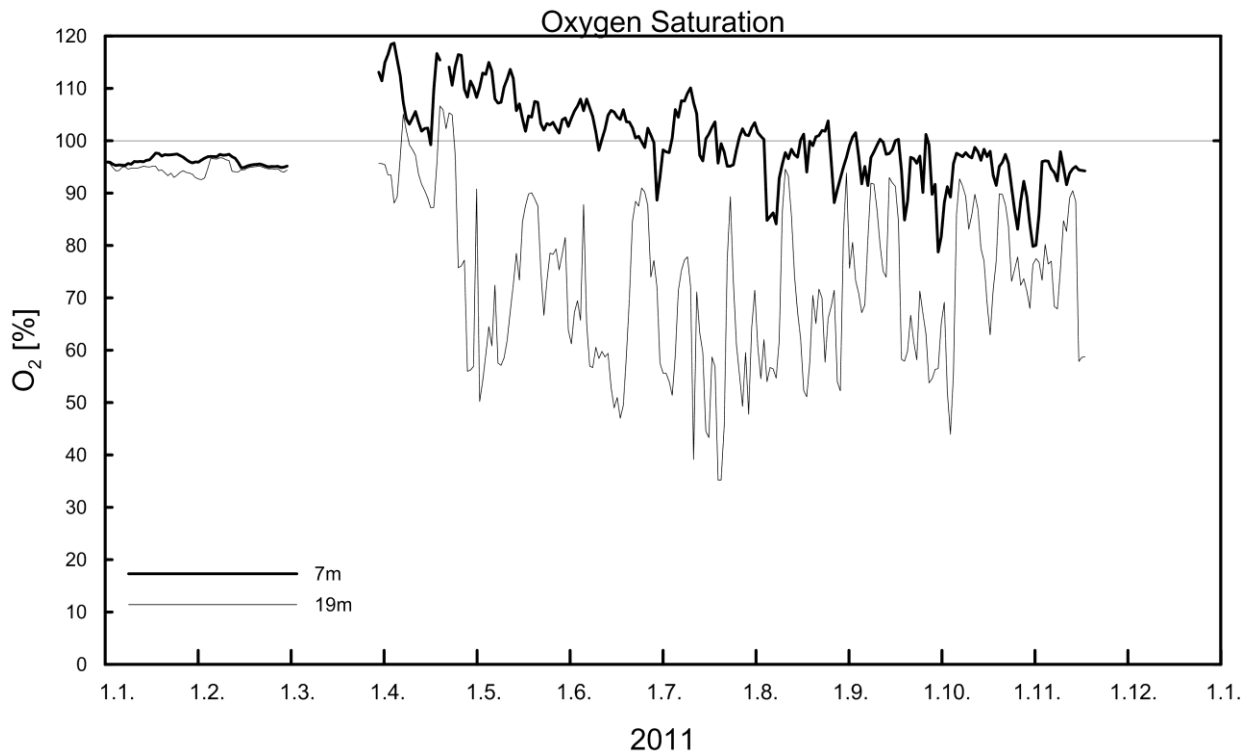


Abb. 9
Verlauf der Sauerstoffsättigung in der Deck- und Bodenschicht auf der Darßer Schwelle im Jahre 2011

Fig. 9
Oxygen saturation measured in the surface and bottom layer at the Darss Sill in 2011

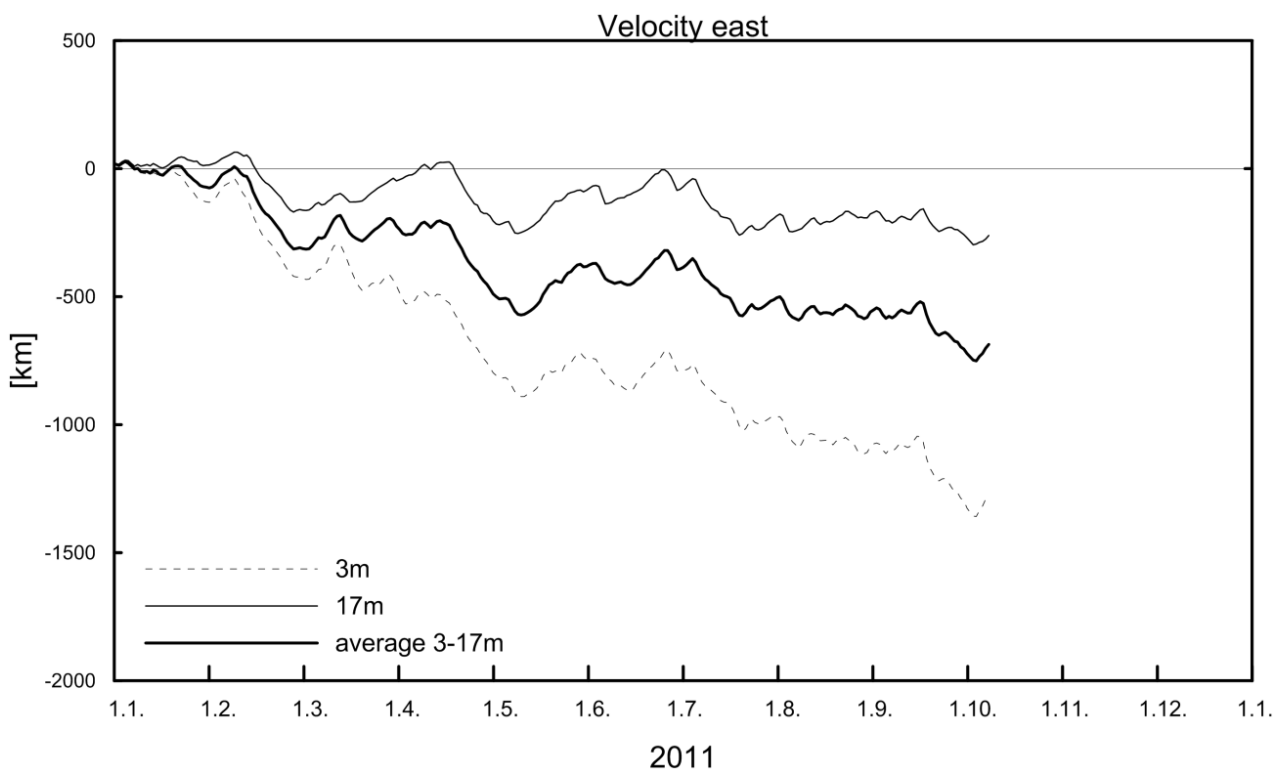


Abb. 10

Ostkomponekte 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 2011

Fig. 10

East component of the 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 2011

4. Beobachtungen an der Bojenstation „Arkonabecken“

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

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

Die Sollposition der Bojenstation "Arkonabecken" befindet sich annähernd 20 m nordöstlich von Arkona auf 46 m Wassertiefe. Im Februar 2011 wurde die Station allerdings von einem Eisfeld aus den Verankerungen gerissen und konnte erst 9 m nördlich dieser Position am 26. Februar wieder geborgen werden. Messungen liegen bis zu diesem Datum vor; es ist aber bereits ab dem 14. Februar nur noch eine eingeschränkte Interpretation dieser Daten möglich, da aufgrund von Absinken durch Vereisen und Drift die genauen Sensorpositionen fraglich sind. Eine ersatzweise an der Sollposition verankerte Messkette lieferte aber bereits ab dem 30. März wieder Daten auf allen Messniveaus, wobei sich die Sauerstoffmessungen mit provisorisch angebrachten Sensoren wegen Bewuchs- und Speicherproblemen als durchgehend unbrauchbar erwiesen (mit Ausnahme eines kurzen Zeitraums in den Monaten Juni und Juli, in denen der bodennahe Sensor brauchbare und validierte Daten lieferte).

Die Zeitreihen von Wassertemperatur und Salzgehalt in 7 m und 40 m Tiefe sind in Abb. 11 dargestellt, die entsprechenden Sauerstoffkonzentrationen, sofern vorhanden, in Abb. 12. Die Temperaturen zum Jahreswechsel lagen im Arkonabecken etwa 2 °C höher als an der flacheren Darßer Schwelle, die Messkurven verliefen aber ansonsten an beiden Stationen analog. Ende Februar sanken die Oberflächentemperaturen im Arkonabecken auf den Gefrierpunkt, was zur oben beschriebenen Eisbildung und zum Ausfall der Station geführt hat. Das Signal des kleinen Einstroms über die Darßer Schwelle im Februar (Abb. 8) ist als deutlicher Ausschlag im Bodensalzgehalt auch im Arkonabecken zu erkennen (Abb. 11). Dort wurden am 15. Februar Werte von 20 g/kg gemessen, deutlich höher als an der Darßer Schwelle und damit auf Einstrom von salzreichem Wasser durch den Öresund hinweisend. Bei der quantitativen Interpretation der Signale ab dem 15. Februar sollte allerdings bedacht werden, dass sich die Sensortiefen durch Vereisung um bis zu 2 m abgesenkt hatten. Die Sauerstoffkonzentrationen in diesen ersten beiden Monaten des Jahres waren konstant nahe der Sättigungsgrenze (Abb. 12).

Das wichtigste Ereignis des ersten Drittels des Jahres 2011 war der Einstrom im März, der aufgrund von eisbedingtem Stationsausfall sowohl an der Darßer Schwelle als auch im Arkonabecken nur schlecht dokumentiert ist (siehe Kapitel 2). Die ersten Messungen nach Installation der provisorischen Messkette an der Station AB Ende März zeigten allerdings einen starker Anstieg der bodennahen Salzgehalte auf 14-15 g/kg als unmittelbares Resultat dieses Ereignisses (Abb. 11). Barokliner Einstrom im April (Kapitel 3) hielt den Boden-

salzgehalt dann auf diesem konstant hohen Niveau, bis etwa zur Monatsmitte, als nach anhaltendem Ausstrom die Salzgehalte auf allen Tiefenhorizonten stark einbrachen. Selbst auf dem in Abb. 11 nicht dargestellten tiefsten Messniveau in 43 m Tiefe fielen die Werte auf unter 11 g/kg im Tagesmittel.

In der letzten Maiwoche erreichte dann der bereits Mitte des Monats an der Darßer Schwelle verzeichnete Einstrom von salzreichen und zunehmend wärmeren Wassermassen (Abb. 8, 10) die Messstation im Arkonabecken, führte dort zu einer raschen Erholung der Bodensalzgehalte und vor allem zu einem sprunghaftem Anstieg der bodennahen Temperaturen. Ende des Monats lagen diese dort bei 8-9 °C, Anfang des Monats waren es noch 3 °C. Vertikale Vermischung kann in Anbetracht der durchgehend starken Dichteschichtung als Ursache für diese Erwärmung ausgeschlossen werden. Der Wechsel von kleineren Einstromereignissen und kürzeren Ausstromperioden in den Folgemonaten des wechselhaften Sommers führte dann nur noch zu einer schwachen weiteren Erhöhung der Bodentemperaturen durch sporadische kleinere Einstromereignisse. Die Bodensauerstoffgehalte im Juni und Juli (die Messungen in allen anderen Monaten hielten der Validierungsprozedur nicht stand) sanken auf Sättigungswerte von unter 30 % und lagen damit deutlich unter den Vergleichswerten des Vorjahres (Abb. 12). Dies legt nahe, dass die kleineren Einstromereignisse der Sommermonate selbst in ihrer Summe nicht für eine ausreichende Belüftung des Tiefenwassers sorgen konnten. Die sommerlichen Oberflächentemperaturen blieben niedrig (die Marke von 18 °C wurde nur einmal am 12. Juli knapp überschritten), lagen aber in der wärmsten Phase des Jahres um etwa 1-2 °C über denen an der Darßer Schwelle (Abb. 8, 11).

Ein besonders interessantes Phänomen am Ende des Sommers stellte der drastische Einbruch der oberflächennahen Temperaturen in der ersten Oktoberwoche dar (Abb. 11). Nachdem die Temperaturen aufgrund des sommerlich warmen Oktoberanfangs (Kapitel 2) zunächst auf über 15 °C am 3. Oktober gestiegen waren, stürzten sie innerhalb von nur 5 Tagen auf 8-9 °C ab und erholten sich über die folgenden Wochen nur noch geringfügig. Zusätzliche Temperatursensoren (in Abb. 11 nicht dargestellt) zeigten, dass sich dieser Temperatureinbruch nahezu simultan über eine Deckschichtstärke von mindestens 16 m Dicke ereignete. Trotz des Durchzugs von Herbststurm „Ophelia“ in dieser Periode (siehe Kapitel 2), lässt sich eine derart starke Abkühlung nicht allein durch Wärmeverlust an die Atmosphäre erklären. Aufschluss über einen alternativen oder zumindest zusätzlichen Abkühlungsmechanismus gaben die Messwerte weiterer (und in Abb. 11 ebenfalls nicht dargestellter) Temperatursensoren in 16 m, 25 m und 33 m Tiefe. In diesen mittleren Tiefen, unterhalb der deutlich wärmeren Deckschicht, wurde etwa eine Woche vor der oben erwähnten Deckschichtabkühlung ein drastischer Temperaturrückgang beobachtet. Minimalwerte erreichten dort 5,5 °C im Tagesmittel, gemessen am 29. September in 25 m Tiefe. Da derart niedrige Temperaturen seit dem vorangegangenen Winter im gesamten Arkonabecken nicht mehr beobachtet wurden, und da Deck- und Bodengrenzschicht nicht von dieser Abkühlung betroffen waren, kann deren Ursache nur in lateraler Advektion von kaltem Winterwasser aus dem Bornholmbecken liegen. VAN DER LEE & UMLAUF (2011) haben

dort im Jahr 2008, ebenfalls in der zweiten Septemberwoche, direkt unterhalb der Deckschicht einen solchen Wasserkörper mit Temperaturen von nur 5-7 °C und einer Dicke von ca. 20 m beobachtet. Die Messungen aus dem Jahr 2011 an der Station Arkonabecken legen daher nahe, dass diese kalte Wasserschicht bei fallendem Pegel in der letzten Septemberhälfte (Abb. 5) in das Arkonabecken geströmt ist, dort zunächst als negative Temperaturanomale in mittleren Tiefen auffiel und schließlich durch das oben erwähnte Sturmereignis in die Deckschicht eingemischt wurde. Diese etwas ungewöhnliche Deckschichtabkühlung „von unten“ erscheint als der plausibelste Mechanismus für den rapiden und nachhaltigen Temperatureinbruch in der ersten Oktoberwoche.

Der Effekt des in Kapitel 2 und 3 beschriebenen größeren Einstroms im November und Dezember 2011 zeichnete sich auch an der Station Arkonabecken ab, und zwar vor allem durch einen deutlichen Anstieg der bodennahen Salzgehalte ab dem 29. November. Die Höchstwerte der Tagesmittel erreichten am 12. Dezember 19,5 g/kg in 40 m Tiefe; in 43 m Tiefe wurden bereits am 4. Dezember Werte von bis zu 22 g/kg beobachtet. Beide Werte waren höher als die höchsten an der Darßer Schwelle gemessenen Werte (Abb. 8), was auf signifikanten Einstrom durch den Öresund hinweist (allerdings ist die Datenreihe an der Darßer Schwelle während der Haupteinstromperiode unvollständig). Im weiteren Verlauf des Monats fluktuierten die Messwerte der bodennahen Sensoren leicht, blieben aber auf durchgehend hohem Niveau und erreichten noch einige Male die oben erwähnten Spitzenwerte. Das bereits in Kapitel 2 abgeschätzte hohe Einstromvolumen spiegelte sich im Arkonabecken auch in einem deutlichen Anstieg der Halokline wieder, der sich durch die dichte Sensorbestückung der Messkette besonders gut nachvollziehen lässt. In 33 m Tiefe wurden Salinitäten von über 17 g/kg im Tagesmittel erreicht, in 25 m Tiefe von über 14 g/kg. Dies waren die höchsten Werte des Jahres auf diesen Messhorizonten.

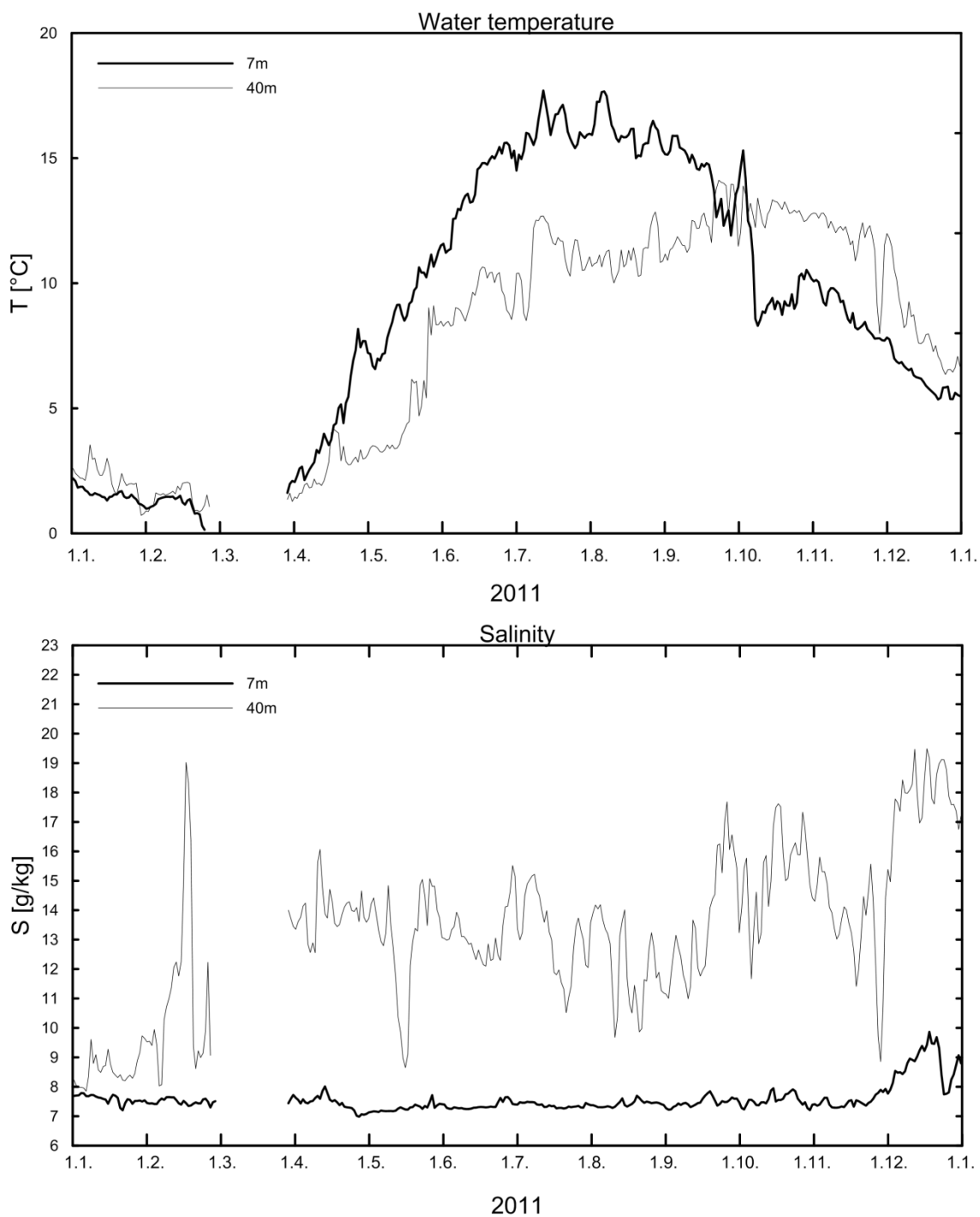


Abb. 11
Verlauf der Wassertemperatur (oben) und des Salzgehaltes (unten) in der Deck- und Bodenschicht im Arkonabecken (Station AB) im Jahr 2011

Fig. 11
Water temperature (above) and salinity (below) measured in the surface layer and the near bottom layer at the station AB in the Arkona Basin in 2011

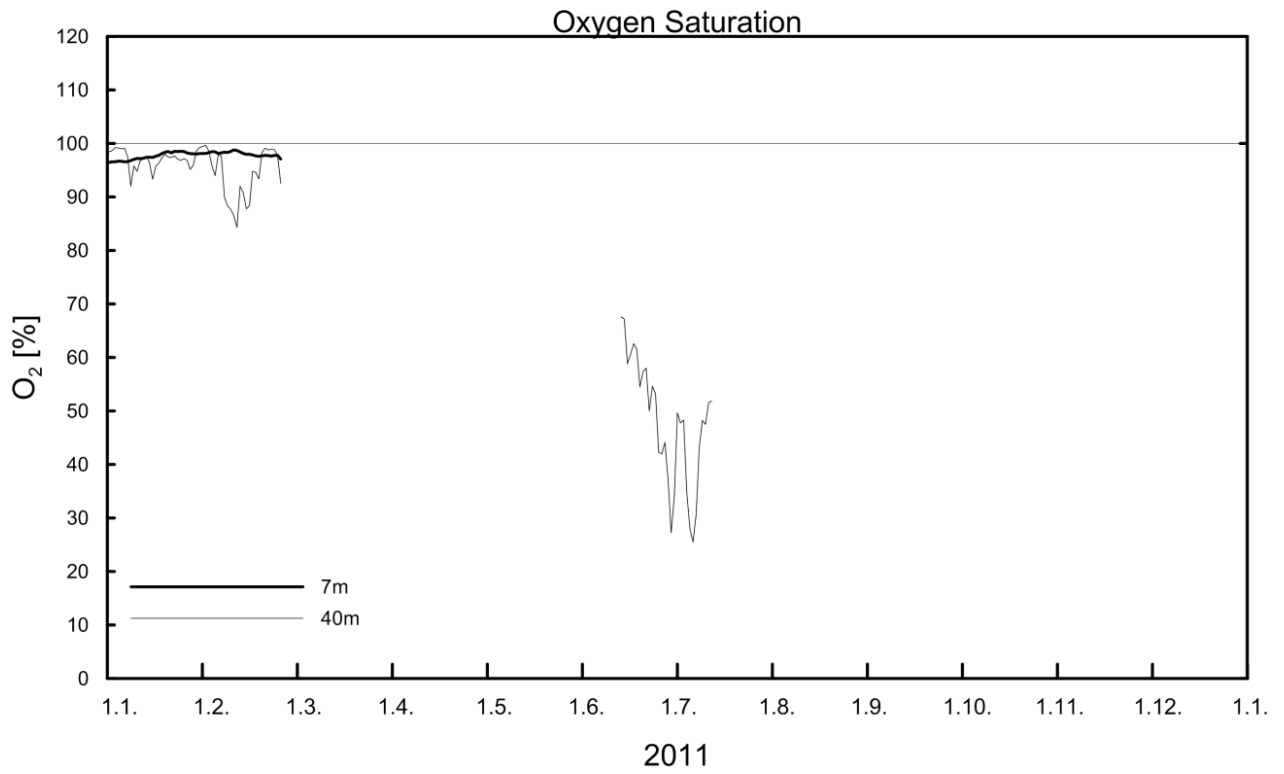


Abb. 12
Verlauf der Sauerstoffsättigung in der Deck- und Bodenschicht im Arkonabecken (Station AB) im Jahr 2011

Fig. 12
Oxygen saturation measured in the surface and bottom layer at the station AB in the Arkona Basin in 2011

5. Beobachtungen an der Bojenstation „Oder-Bank“

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

Die Bojenstation „Oder Bank“ befindet sich annähernd 5 m nordöstlich von Koserow/Usedom auf 15 m Wassertiefe. Die Messdaten umfassen Temperatur, Salzgehalt und Sauerstoff in 3 m und 12 m Tiefe. Nach der schrittweisen Umstellung der Sauerstoffsensoren an allen Messstationen werden auch an der Station „Oder Bank“ die Sauerstoffmessungen seit dem Jahr 2010 durchgehend mit den neuen Optoden der Firma Aanderaa (Norwegen) durchgeführt. Die Station war am 29.12. des Vorjahres wegen starken Eisganges eingezogen worden, ging aber nach kleinerer Wertzeit zur Reparatur der Eisschäden am 03.05.2011 wieder vollständig in Betrieb und arbeitete bis zum Jahresende ohne wesentliche Lücken.

Die Zeitreihen von Wassertemperatur und Salzgehalt in 3 m und 12 m Tiefe sind in Abb. 13 dargestellt. Auch in der Oderbucht schlug sich der kühle Sommer 2011 in den Oberflächentemperaturen nieder. Obwohl die Messwerte hier deutlich über denen im Arkonabecken (Abb. 11) und an der Darßer Schwelle (Abb. 8) lagen, wurde die Marke von 20 °C bei den Tagesmittelwerten nur an zwei Tagen (4. und 5. August) leicht überschritten. Dieser Spitzenwert zu Anfang des Monats war die Folge einer kurzzeitig stabilen Hochdrucklage in den ansonsten ungewöhnlich wechselhaften Sommermonaten (siehe Kapitel 2). Die mediterranen Werte des Vorjahres von bis zu 23 °C im Oberflächenwasser wurden bei weitem nicht mehr erreicht. Weitere Konsequenz der im Vergleich zum Vorjahr schwächeren Erwärmung der Mischungsschicht war das Ausbleiben von lang anhaltenden Perioden mit starker Dichteschichtung durch vertikale Temperaturgradienten. In den Jahren 2007 und 2010 hatten solche Ereignisse zu einer starken Reduktion der bodennahen Sauerstoffgehalte geführt.

Ein wichtiger dynamischer Grund für die Unterdrückung von Mischung im Bereich der Messstation liegt in der Übersichtung weniger salzreichen (also weniger dichten) Mischwassers aus dem Oderhaff über das Wasser der Pommerschen Bucht. Solche Ereignisse korrelieren während der Sommermonate hervorragend mit kürzeren Perioden ausgeprägter Temperaturschichtung (Abb. 13). Positive Temperaturanomalien in der Deckschicht werden hauptsächlich während dieser Perioden beobachtet, was als Ursache

lateralen Transport von warmen Wasserschichten aus dem Oderhaff vermuten lässt (und nicht lokale Erwärmung durch solare Einstrahlung).

Die Dauer dieser Ereignisse, die jeweils durch stärkere Winde aufgelöst werden, lag im Jahr 2011 im Bereich von 1-2 Wochen; länger andauernde Schichtungsperioden wie in den Vorjahren wurden nicht beobachtet. Die aus positiven Temperatur- und negativen Salzanomalien in der Deckschicht resultierende vertikale Stabilisierung der Wassersäule während der Schichtungsereignisse führt zu einer Abschwächung des vertikalen turbulenten Austausches. Diese spiegelte sich jeweils in einer kurzen Stagnation der bodennahen Temperaturen mit einer anschließenden sprunghaften Temperaturerhöhung durch Vermischung mit warmem Deckschichtwasser am Ende des Ereignisses wider. Die weitaus wichtigere Konsequenz aus der Unterdrückung turbulenter Vermischung während der Ereignisse war allerdings die weiter unten diskutierte Abnahme der bodennahen Sauerstoffgehalte durch Abkopplung der Bodenschicht von direkter atmosphärischer Belüftung.

Ab Ende August setzte eine kontinuierliche, nur sporadisch durch kurze Erwärmungsphasen unterbrochene Abkühlung von spätsommerlichen Werten um 19 °C bis auf Werte knapp über 4 °C zum Ende der Messperiode ein. Die Temperaturen in Deckschicht und bodennaher Schicht folgten einem nahezu identischen Verlauf, was aber nicht als Indiz für die dauerhafte Vermischung der Wassersäule interpretiert werden darf. Die Bodensalzgehalte lagen während der Abkühlungsphase zum Teil deutlich über den Oberflächenwerten (z.B. im November) und wiesen damit auf durchgehend stabile Schichtung hin, die nur gelegentlich durch Vermischung aufgrund von Starkwindereignissen unterbrochen wurde. Die extreme Kältewelle im Dezember 2010, die zum Ende des Jahres zu Temperaturen nahe dem Gefrierpunkt und Eisbildung geführt hatte, wiederholte sich im Jahr 2011 nicht.

Der Effekt der oben beschriebenen Schichtungsereignisse auf den Sauerstoffhaushalt der Pommerschen Bucht wird in Abb. 14 sichtbar, in welcher die Sauerstoffkonzentrationen in 3 m und 12 m Tiefe aufgetragen sind. Während aller Schichtungsereignisse zeigte sich eine klare negative Korrelation zwischen ansteigenden Sauerstoffkonzentrationen in der Deckschicht und einer Abnahme in der bodennahen Schicht, wobei besonders klare Beispiele für solche Perioden in der ersten Juliwoche und Anfang August beobachtet wurden (Abb. 14). Beiden ging eine Durchmischung der Wassersäule voran, die jeweils durch starke Windereignisse ausgelöst wurde: Am 2. Juli wurde Volldurchmischung bei bis zu 12 m/s Windgeschwindigkeit beobachtet, am 29. Juli bei etwa 11 m/s. Nach diesen Durchmischungsphasen fand bei jeweils ruhigen Wetterverhältnissen mit leichten östlichen Winden die oben beschriebene Überschichtung von sauerstoffreichem, warmem und wenig salzigem Brackwasser aus dem Oderhaff statt. Die Sauerstoffkonzentration im bodennahen Bereich sank innerhalb weniger Tage auf weniger als 50 % des Sättigungswertes, was die extreme Sauerstoffzehrung in dieser besonders produktiven Region verdeutlicht. Ab dem 12. Juli nahmen die Windgeschwindigkeiten wieder stetig zu (Tief „Meikel“ war im Anzug, siehe Kapitel 2), erreichten am 15. Juli knapp die Marke von 10 m/s und beendeten durch

Vermischung das erste Ereignis. Tief „Timo“ setzte mit Winden von mehr als 12 m/s am 12. August auf ähnliche Weise einen Schlusstrich unter das zweite Ereignis. Im restlichen Verlauf der Monats August und im September wurden ähnliche, aber insgesamt schwächer ausgeprägte Ereignisse dieses Typs in fast rhythmischer Folge nahezu im Wochentakt beobachtet. Auslöser war die in Kapitel 2 beschriebene Serie von Tiefdruckgebieten, die die instabile Wetterlage des norddeutschen Sommers 2011 prägten.

Es liegt nahe, dass die erhöhte Primärproduktion von Biomasse im Oderhaff zu den während aller Ereignisse beobachteten übersättigten Sauerstoffkonzentrationen in der Deckschicht führte, und zwar durch lateralen Transport von Haffwasser zur Station OB. Zusätzlich oder alternativ wurden 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 Sauerstoffkonzentration an der Oberfläche geführt haben mag. Die Korrelation dieser Ereignisse mit einer Sauerstoffreduktion in der bodennahen Schicht weist auf eine erhöhte Sauerstoffzehrung durch den Abbau absinkender oder bereits abgesunkener Biomasse hin, wobei die entsprechenden mikrobiellen Prozesse bei den beobachteten hohen Wassertemperaturen beschleunigt ablaufen.

Diese Korrelation von Sauerstoffzehrung und Wassertemperatur lässt sich im Jahr 2011 hervorragend anhand des Schichtungsereignisses Mitte November belegen. Wie aus dem in Abb. 13 dargestellten Salzgehalt ersichtlich, gehörte dieses Ereignis in Bezug auf Dauer und Stärke der Dichteschichtung zu den ausgeprägtesten des Jahres. Mit 7-8 °C lagen die bodennahen Temperaturen allerdings deutlich unter den sommerlichen Werten, so dass reduzierte Abbauraten und damit ein geringerer Sauerstoffbedarf erwartet werden darf. Diese Hypothese ist konsistent mit den Sauerstoffmessreihen in Abb. 14, die zwar einen signifikanten, aber im Vergleich mit den Monaten Juli und August deutlich reduzierten Einbruch der bodennahen Sauerstoffgehalte zeigen (trotz längerer Dauer des Novemberereignisses). Südwestwind von über 14 m/s zerstörte am 27. November jede Art von Schichtung und setzte damit den Schlusspunkt hinter das Auftreten von Schichtungsereignissen in der Oderbucht. Nahezu zeitgleich gab dieses Windereignis den Auftakt für den stärksten Einstrom der letzten Jahre, wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben.

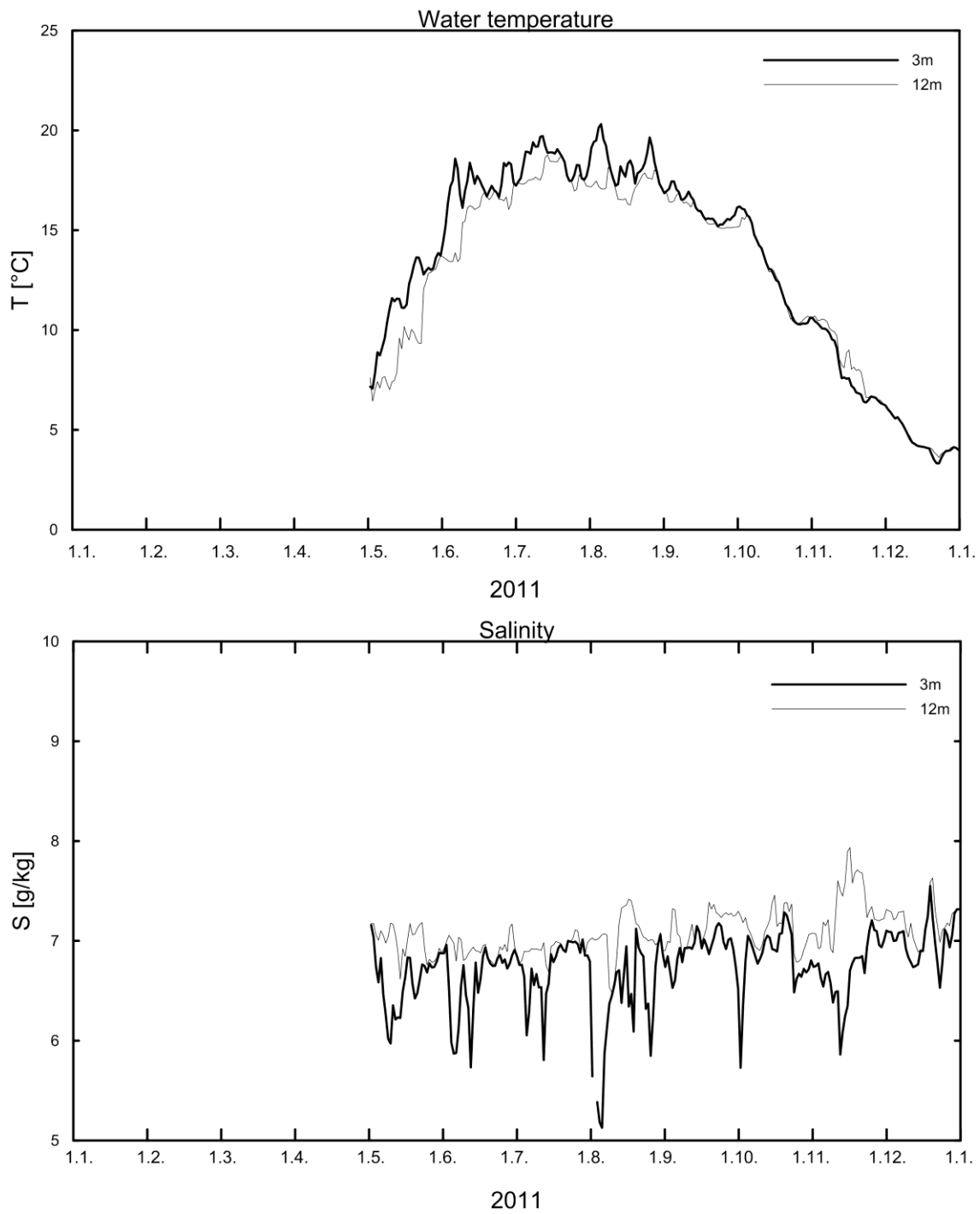


Abb. 13

Verlauf der Wassertemperatur (oben) und des Salzgehaltes (unten) in der Deck- und Bodenschicht in der Pommerschen Bucht (Stat. OB) im Jahr 2011

Fig. 13

Water temperature (above) and salinity (below) measured in the surface layer and the near bottom layer at the station OB in the Pomeranian Bight in 2011

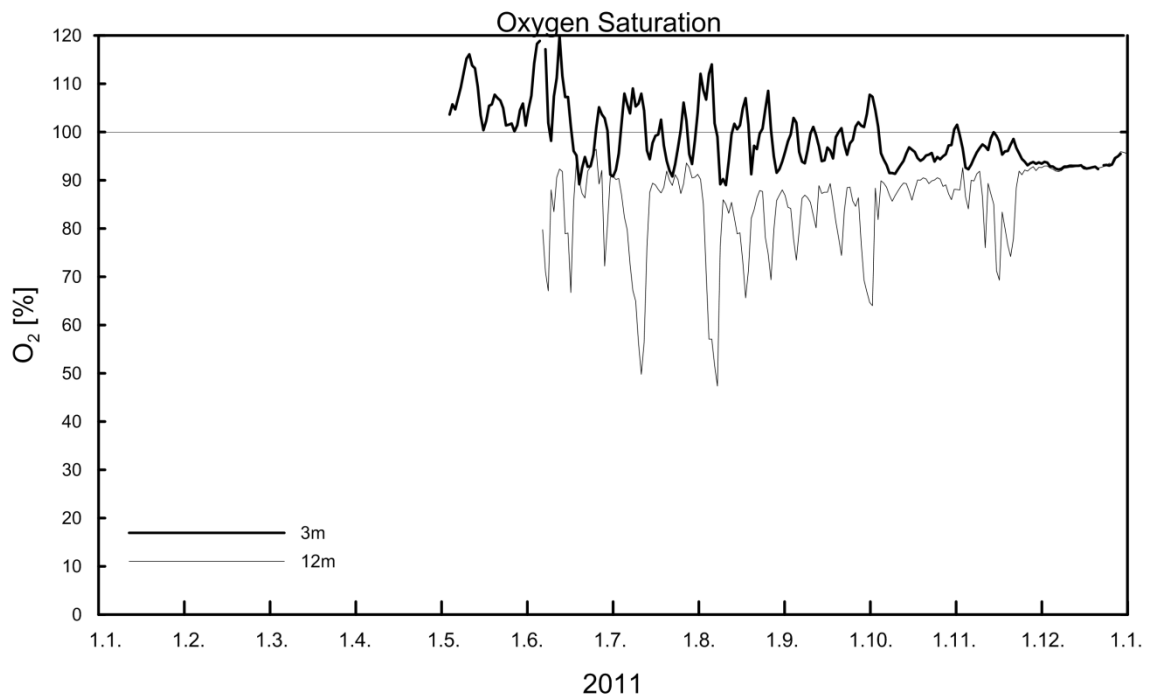


Abb. 14

Verlauf der Sauerstoffsättigung in der Deck- und Bodenschicht in der Pommerschen Bucht (Stat. OB) im Jahr 2011

Fig. 14

Oxygen saturation measured in the surface and bottom layer at the station OB in the Pomeranian Bight in 2011

6. Hydrographisch-chemische Bedingungen

6.1. Wassertemperatur

6.1.1. Wasseroberflächentemperatur abgeleitet aus Satellitendaten

Die Entwicklung der Wasseroberflächentemperatur (SST) der Ostsee wurde im Jahr 2011 auf der Grundlage von Satellitendaten des Advanced Very High Resolution Radiometers (AVHRR) der amerikanischen Wettersatelliten NOAA 17 und 19 und des europäischen Wettersatelliten MetOp-2 erarbeitet. Die Satellitendaten wurden täglich durch das BSH Hamburg bereitgestellt. Die Auswerteverfahren und methodische Untersuchungen sind ausführlich bei SIEGEL et al. (2008) diskutiert. Betrachtungen zur Langzeitentwicklung der Wasseroberflächentemperatur in der Periode seit 1990 sind bei SIEGEL et al. (1999, 2006, 2009) und SIEGEL & GERTH (2010) dargestellt. Zur Interpretation der thermischen Entwicklung wurden die Wärme- und Kältesummen der Lufttemperatur von Warnemünde (Tab. 2), die Beschreibung der Wetterentwicklung (Kapitel 2) und Daten der MARNET-Stationen (BSH/IOW) herangezogen.

Das Jahr 2011 war in der SST durch vergleichsweise kalte Monate Januar bis März und einen warmen Juni gekennzeichnet. Die starke Abkühlung im Dezember 2010 setzte sich im Januar fort und die Temperaturen blieben im Februar und März mit bis zu 2 K unter dem langjährigen Mittelwert. Im Monatsmittel war der Februar der kälteste Monat des Jahres in der westlichen Ostsee und der März in der zentralen Ostsee. Die maximale Eisbedeckung war am 24. Februar erreicht. Die höchsten positiven Anomalien traten im Juni auf, bevor der Durchzug von Tiefdruckwetterlagen mit extremen Niederschlägen das Wetter im Juli und August 2011 in der südlichen Ostsee bestimmte. Da die nördliche Ostsee in beiden Monaten relativ warm war, waren die Monatsmittel in der gesamten Ostsee in beiden Monaten ziemlich ähnlich und homogen. Die Maximaltemperaturen wurden Anfang August mit 20-22 °C in der zentralen Ostsee und mit 18-19 °C in der westlichen Ostsee erreicht. Markant waren in den Monaten September und Oktober die durch lang anhaltende Westwinde entstandenen Auftriebsgebiete entlang der schwedischen Küste von der Arkonasee bis nördlich Gotland, die zu starken Temperaturgradienten führten.

Die Besonderheiten in der Entwicklung der Lufttemperatur spiegeln sich in den Kälte- und Wärmesummen von Warnemünde wider (Kapitel 2). Die Kältesummen des Winters 20010/2011 lagen mit 177,7 K d (Mittel 105,4 K d) nach dem Winter 2009/2010 auf Platz dreizehn der kältesten Winter seit 1948. Zu dieser Kältesumme hatte der Dezember 2010 mit 109,2 Kd wesentlich beigetragen. Die Wärmesumme des Sommers 2011 lag mit 174,5 K d zwar über dem langjährigen Mittelwert (148,8), liegt aber im Ranking der wärmsten Sommer nur auf Platz 20 seit 1948.

Die Anomalien der Monatsmittel der SST des Jahres 2011 sind für die gesamte Ostsee in Abb. 15 dargestellt. Der saisonale Verlauf der Monatsmitteltemperatur in den zentralen Bereichen der Arkona-, Gotland- und Bottensee ist im Vergleich zu den langjährigen

Monatsmittelwerten in Abb. 16 zusammengefasst. Im Dezember 2010 herrschte starker Frost in ganz Europa, der auch für die Ostsee eine starke Abkühlung mit sich brachte. Das setzte sich von Januar bis März fort, wodurch der Februar der kälteste Monat in der Arkonasee und der März in der Gotlandsee war. Das führte zu negativen Anomalien von bis zu -2 K von Januar bis März in weiten Teilen der Ostsee. Durch die einsetzende Erwärmung im März von Westen lag das Monatsmittel März der Arkonasee bereits geringfügig über dem aus der Gotlandsee. Im April und Mai lagen die Monatsmittel in allen Gebieten im Bereich der bzw. geringfügig unter den Mittelwerten. Im Juni waren die Anomalien positiv in der gesamten Ostsee mit Ausnahme des Finnischen und Teilen des Bottnischen Meerbusens.

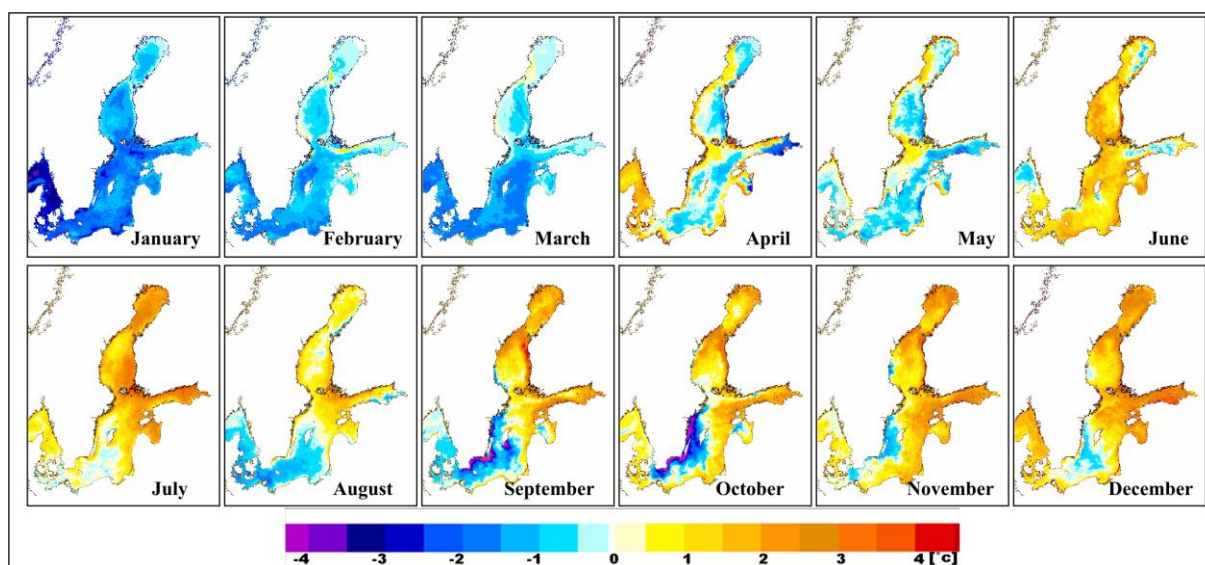


Abb. 15

SST- Anomalien der Monatsmitteltemperatur der Ostsee im Jahre 2011 bezogen auf die langjährigen Mittel 1990 – 2008

Fig. 15

SST- Anomalies of the monthly mean temperature of the Baltic Sea in 2011 referring to the long-term means 1990 - 2008

Tiefdruckwetterlagen mit extremen Niederschlägen bestimmten das Wetter im Juli und August 2011 in der südlichen Ostsee. Im Juli lagen die Monatsmittel der SST noch im Bereich der langjährigen Mittelwerte, im August mit bis zu -1,5 K darunter. In beiden Monaten waren in der nördlichen Ostsee die Anomalien positiv. Daraus ergab sich in beiden Monaten für die gesamte Ostsee eine sehr homogene Temperaturverteilung zwischen 16-19 °C im Gegensatz zu anderen Jahren. Unterschiedliche meteorologische Einflüsse bewirkten, dass der Monat

Juli der wärmste Monat des Jahres in der westlichen Ostsee war, wohingegen in der Gotlandsee und in der nördlichen Ostsee der August im Mittel der wärmste Monat des Jahres war. September und Oktober waren durch anhaltende Westwinde gekennzeichnet, die zu starkem Auftrieb entlang der schwedischen Küste von der Arkonasee bis nördlich Gotland führten. Dadurch entstanden teilweise negative Anomalien von bis zu -4 K. Da der Auftrieb des kalten Wassers nur die zentralen Gebiete in der Arkonasee erreichte, zeigt sich sein Einfluss in Abb. 16 auch nur in der Arkonasee. Vom September bis zum Dezember waren weite Teile der nördlichen und östlichen Ostsee durch positive Anomalien gekennzeichnet. Im Dezember lagen die SST in der Arkonasee im Bereich der langjährigen Mittelwerte und in der Gotland – und Bottensee ca. 1 K darüber.

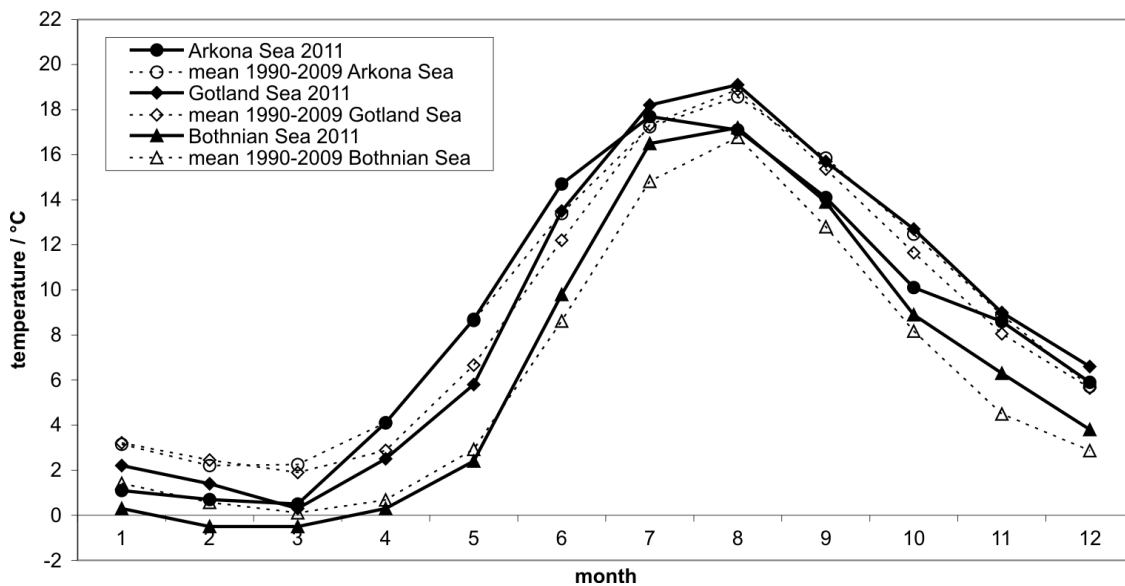


Abb. 16

Saisonalen Verlauf der Wasseroberflächentemperatur (NOAA-SST) in der zentralen Arkona-, Gotland- und Bottensee des Jahres 2011 im Vergleich zum jeweiligen 20-Jahresmittel (1990-2009)

Fig. 16

Seasonal course of sea surface temperature (NOAA-SST) in the central Arkona- and Gotland Sea in 2011 in comparison to the mean values of the last 20 years (1990-2009)

Die folgende detaillierte Beschreibung der thermischen Entwicklung der Ostsee im Jahr 2011 charakterisiert die wichtigsten Phasen im Jahresverlauf. Nach der starken Abkühlung Ende Dezember 2010 erreichten die SST Anfang Januar Werte zwischen 0 °C in der westlichen Ostsee (WO), 2 °C in der Arkonasee (AS) und 3 °C in der Gotlandsee. Bereits Ende Dezember kam es zur ersten Eisbildung in der westlichen Ostsee (SCHMELZER & HOLFORT, 2011). Bis Ende

Januar reduzierte sich die SST auf Werte bis $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ in der Mecklenburger (MB) und in der Pommernbucht (PB), auf $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ in der AS und $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ in der zentralen Gotlandsee. Danach stagnierte die Eisbildung bis Mitte Februar. Im Februar kühlte die Ostsee weiter ab und erreichte vom 24.02. bis 27.02.2011 die maximale Eisbedeckung, wie in Abb. 19 dargestellt. Weite Teile der nördlichen und der östlichen Ostsee waren mit Eis bedeckt und auch in der WO war Eis vorhanden. Vor allem in der Pommernbucht reichte das Eis bis in die zentrale AS und auch entlang der Küsten von Mecklenburg und Vorpommern war Eis zu beobachten. So schnell wie sich das Eis gebildet hatte, so schnell war es in der WO auch wieder verschwunden. Das Monatsmittel Februar entlang des Schnittes durch die zentralen Becken der Ostsee von der Mecklenburger Bucht bis zur Bottenwiek ist im Vergleich zum Vorjahr, zum langjährigen Mittelwert 1990 – 2009 und dessen Schwankungsbreite in Abb. 17 dargestellt. Die SST lag in der gesamten Ostsee unter dem langjährigen Mittelwert. Speziell in der westlichen Ostsee konnten die niedrigen Werte des Vorjahres nicht erreicht werden. Um den 05.03. waren die Außenküsten weitgehend eisfrei und bis Mitte März alle Küstengewässer von Mecklenburg-Vorpommern.

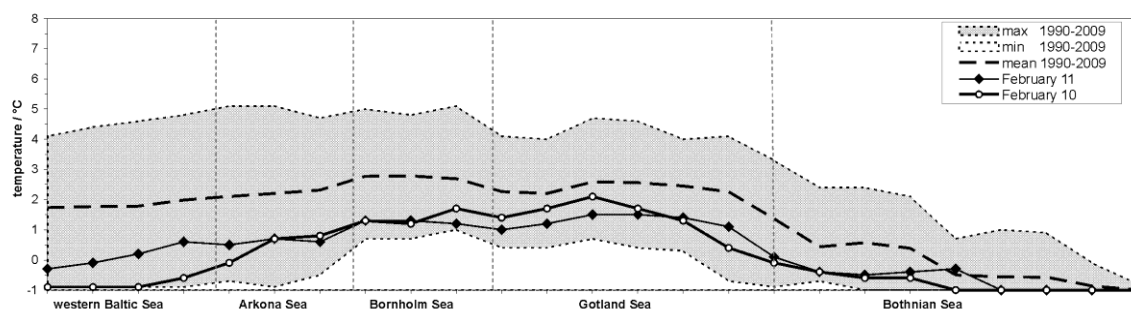


Abb. 17

Temperaturverteilung entlang des Schnittes durch die zentralen Becken der Ostsee für den Monat Februar 2011 im Vergleich zum langjährigen Mittel 1990 – 2009, dem Vorjahr und der Schwankungsbreite

Fig. 17

Temperature distribution along the transect through the central basins of the Baltic Sea in February 2011 in comparison to the previous year, to the long-term mean value of 1990 – 2009, and to the variation range

Ab Anfang März hatte in der westlichen Ostsee eine leichte Erwärmung eingesetzt, die die SST am 7.03. in der Bornholmsee auf 2 °C ansteigen ließ. Am 15.03. begann eine starke Erwärmungsphase, in der die SST dann auch in der gesamten westlichen und südlichen Ostsee auf bis zu 2 °C stieg. Die nächsten 10 Tage stagnierte die Entwicklung im südlichen Teil. Ab 25.03. stieg die SST dann weiter, so dass an der Südspitze Gotlands etwa 2 °C und in der flachen MB 3 °C erreicht wurden. Das setzte sich fort, am 10.04. wurden in der MB und PB SST von 4-5 °C und in der AS um 2-3 °C beobachtet und bis 20.04. zeigten die SST bei schwachen westlichen Winden in der MB und PB 8-10 °C, bis Gotland 3-5 °C und in der nördlichen Ostsee noch 0-2 °C. Nachfolgende östliche Winde lösten das Transportband entlang der polnischen Küste auf und vermischten auch das warme Wasser in der MB. Die SST sank Ende des Monats dort wieder auf 5-8 °C und in der eigentlichen Ostsee waren durchgängig 3-6 °C erreicht. Bis 20.05 stieg die SST dann auf 10-12 °C in der gesamten WO, auf bis 14 °C in der PB und 7-12 °C in der zentralen Ostsee. Damit lagen die SST um 3-5 °C höher als zur gleichen Zeit des Vorjahres. Bis 28.05. stagnierten die Temperaturen und stiegen dann bis Ende Mai hauptsächlich in weiten Teilen der WO auf 13-14 °C. Eine Ausnahme stellte die schwedische Küste dar, an der aufgrund westlicher Winde Kaltwasserauftrieb entstand. Der Einstrom schwüler Luft aus dem Süden sorgte am 6. Juni für einen sprunghaften Anstieg der SST westlich der Darßer Schwelle und in der PB auf 17-18 °C. Nachfolgende Tiefausläufer sorgten für wechselhaftes Wetter und relativ konstante Temperaturen von der westlichen Ostsee bis zur nördlichen Gotlandsee von 13-16 °C. Am 29.6. transportierten südliche Winde sehr warme Luft nach Deutschland und in den Ostseeraum. Deutschland erlebte die bis dahin heißesten Tage des Jahres. In der Ostsee führte das zu 15-18 °C, ausgenommen war nur die Bottenwiek mit 9-16 °C. Wie in der Meteorologie-Sektion dargestellt, war der gesamte Juli in der südlichen Ostsee durch Tiefdruckeinfluss geprägt. Es gab nur sehr wenige windschwache und wolkenarme Hochdruckphasen. Dadurch stagnierten die SST zu Beginn des Monats. Nur in der nördlichen Ostsee sowie im Finnischen Meerbusen und in der Rigaer Bucht war nach dem 6.07. ein markanter Anstieg der SST zu verzeichnen. In der gesamten Ostsee waren die SST am 8.07. im Bereich von 17-21 °C, was bis ca. 12.07. erhalten blieb. Danach kühlte die Ostsee wieder leicht ab, besonders in der nördlichen Ostsee sanken die Temperaturen am 14.07. teilweise bis auf 13-14 °C ab. Am 19.07. stand die eigentliche Ostsee unter Hochdruckeinfluss, wodurch die SST ziemlich homogen zwischen 17 und 20 °C verteilt war. Insbesondere in der östlichen Ostsee hielt in den nächsten Tagen diese Erwärmung an, die dort zu SST von 20-23 °C führte. Die westliche Ostsee war durch Tiefdruckgebiete beeinflusst, die starke Wolkenbildung, Wind und Rekordregen brachten (siehe Kapitel 2). Ende des Monats waren die Temperaturen wieder recht einheitlich auf 17-19 °C gesunken. Die Mittelwerte des Juli in Abb. 18 zeigen deutlich die beschriebenen Unterschiede zwischen dem Nord- und Südteil. Sie sind im Vergleich zum Mittelwert des Juli 2010, zum langjährigen Mittel 1990–2009 und zur Schwankungsbreite im Untersuchungszeitraum auf dem Längsschnitt durch die Ostsee dargestellt. In der gesamten westlichen und südlichen Ostsee bis zur zentralen Gotlandsee liegen die SST im Bereich der langjährigen Mittelwerte und nördlich davon um bis zu 3 °C darüber.

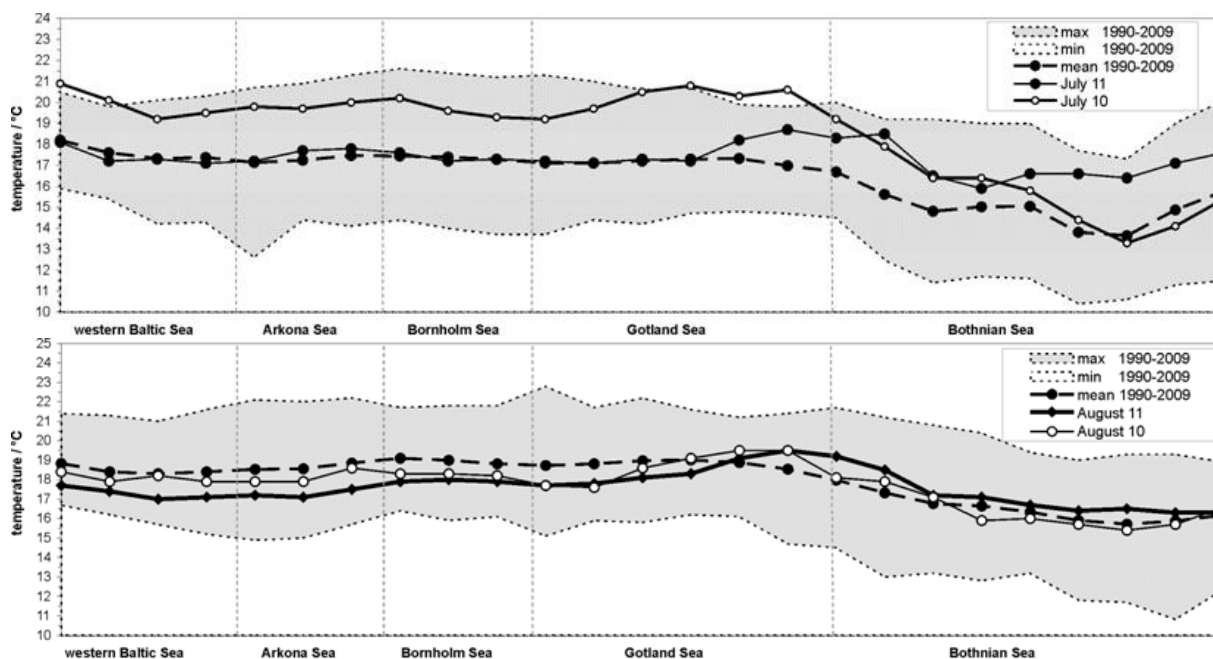


Abb. 18

Temperaturverteilung entlang des Schnittes durch die zentralen Becken der Ostsee für den Monat Juli 2011 im Vergleich zum Vorjahr, zum langjährigen Mittel 1990 – 2009 und zur Schwankungsbreite im Untersuchungszeitraum.

Fig. 18

Temperature distribution along the transect through the central basins of the Baltic Sea in July 2011 in comparison to the previous year, to the long-term mean value of 1990 – 2009, and to the variation range of the investigation period.

Als Folge einer kurzen Wetterberuhigung erreichten die SST am 2.08. in der westlichen Ostsee die maximalen Werte des Sommers 2011 von 18-20 °C. Da das Hoch langsam ostwärts über die Ostsee zog und das folgende Tief wieder für Abkühlung sorgte, waren die maximalen Temperaturen des Jahres in der zentralen Ostsee am 4.08. mit 18-21 °C erreicht. Danach sorgten wechselnde Bewölkung und Wind für eine Durchmischung und Temperaturen bis ca. 22.08. von 15-18 °C. Am 25. und 26.08 strömte schwülwarme Luft in den Ostseeraum, einhergehend mit einer Beruhigung und zwischenzeitlichen Erwärmung auf 16-20 °C. Bis Ende des Monats sank die Temperatur bereits wieder auf 15-18 °C. Ab ca. 5.09. sorgten SW- und W-Winde für Auftrieb an der schwedischen Küste von der Arkonasee bis zur nördlichen Gotlandsee. Die Offshore-Ausdehnung reichte mindestens bis zur Mitte der vorgelagerten Seegebiete. Im Kern des Auftriebs lagen die SST bei 5-8 °C und an den Süd- und Ostküsten Ende des Monats noch bei bis zu 16 °C. Die Bottenwiek war im zentralen

Teil schon auf 8-10 °C abgekühlt. Auch im gesamten Oktober war dieser Auftrieb an der schwedischen Küste dann auch bis in die nördliche Ostsee erhalten. Lagen die SST Anfang Oktober in weiten Teilen noch bei 13-15 °C und nur im Auftrieb bei 8-10 °C, vergrößerte sich das Gebiet ab ca. 15.10. und erfasste die gesamte AS und dann ab 17.10. die gesamte westliche Ostsee. Ende des Monats war SST in der gesamten nördlichen Ostsee auf 6-9 °C reduziert. Die Temperatur in den Auftriebskernen lag bei 4-5 °C und in der östlichen Ostsee bei 12-13 °C. Die Abkühlung setzte sich Anfang November weiter fort und erreichte Ende des Monats in der WO 6-8 °C, in der zentralen Ostsee 4 °C im Westen und maximal 10 °C im Osten. Im Dezember kühlt die Ostsee weiter von Westen und Norden her langsam ab. Ende des Monats hatte die westliche Ostsee ca. 5 °C was dem langjährigen Mittel entsprach. In den nördlichen und östlichen Teilen der zentralen Ostsee lagen mit 6-7 °C die SST leicht über den langjährigen Mittelwerten. In der westlichen und nördlichen Ostsee konnten noch Auftriebszellen beobachtet werden. Die Temperaturen lagen dort bei 2-5 °C und ebenfalls über den langjährigen Mittelwerten. Das bedeutet keine besonderen Voraussetzungen für den Winter 2011/2012.

Insgesamt war das Jahr trotz der kühlen ersten Monate und des verregneten Sommers relativ warm. Im Ranking der Jahresmitteltemperatur lag das Jahr 2011 auf Platz 7 der wärmsten Jahre seit 1990.

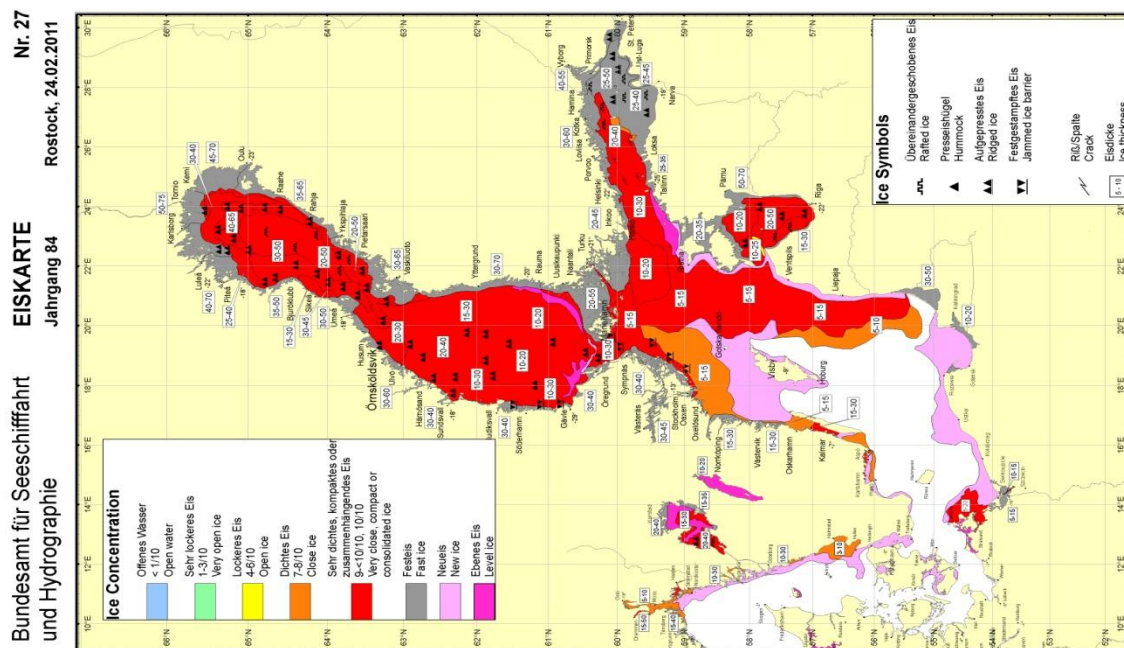
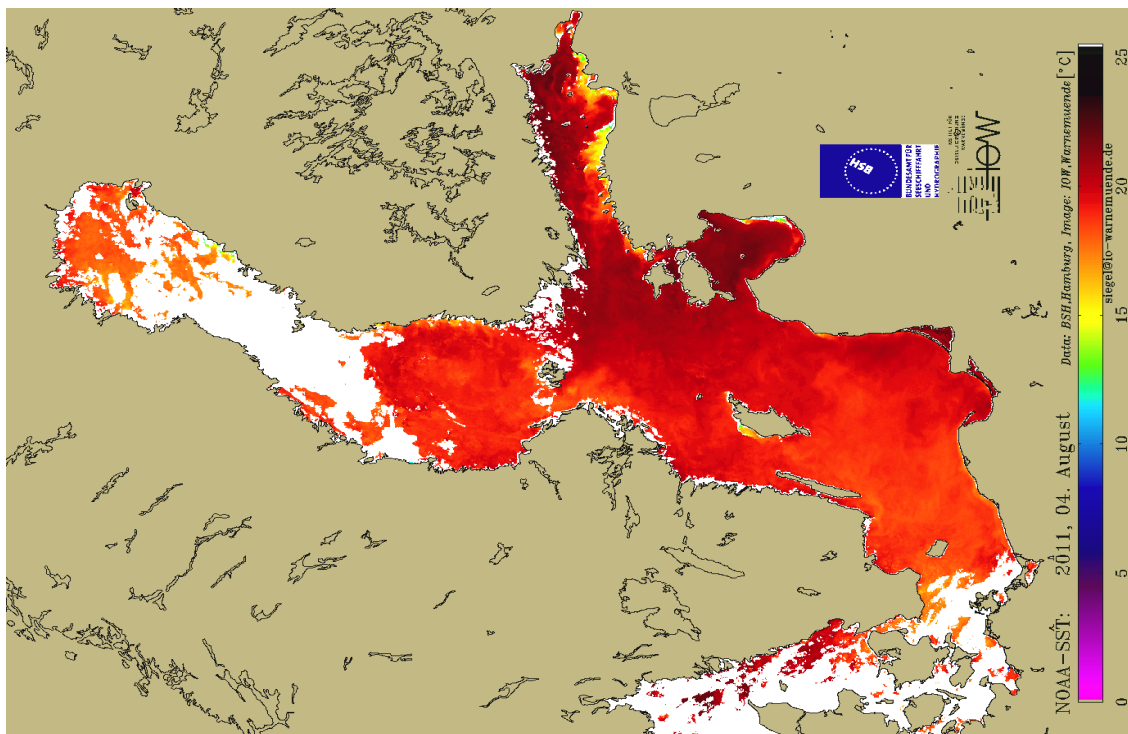


Abb. 19
 Maximale Eisbedeckung der Ostsee im Jahr 2011 am 24.02.2011 (SCHMELZER & HOLFORT, 2011)
 und Temperaturverteilung der Ostsee am wärmsten Tag, dem 04. August 2011

Fig. 19
 Maximum ice coverage of the year 2011 on 24 February (SCHMELZER & HOLFORT, 2011) and
 temperature distribution of the Baltic on the warmest day of the year (04 August 2011)

6.1.2. Vertikalverteilung der Wassertemperatur

Die regelmäßigen Überwachungsfahrten des IOW liefern die grundlegende Datenbasis für die Beurteilung der hydrographischen Verhältnisse in der westlichen und zentralen Ostsee. Diese Überwachungsfahrten wurden im Februar, März/April, Mai, August und Oktober/November durchgeführt. Abb. 21 zeigt die Momentaufnahmen der vertikalen Temperaturverteilung die auf den jeweiligen Expeditionen gewonnen wurden. Zusätzlich fließen in die Beurteilung der hydrographischen Verhältnisse in der zentralen Ostsee Daten aus dem nationalen Schwedischen Monitoring Programm des SMHI ein, die monatlich an den zentralen Stationen der einzelnen Ostseebecken erhoben werden. Auf einer Expedition Anfang Dezember 2011 (MEDOS) wurde durch das IOW der Monitoring-Transekt mit einer geschleppten undulierenden CTD beprobt, um die Vorteile dieses Systems gegenüber Standard-CTD Messungen zu testen. Die Ergebnisse dieser Messung sind ebenfalls in Abb. 21 und 22 dargestellt.

Die Oberflächentemperatur der Ostsee wird durch die lokalen Wärmeflüsse zwischen Ozean und Atmosphäre bestimmt. Im Gegensatz dazu ist das Temperatursignal unterhalb der Halokline von der Deckschicht entkoppelt und spiegelt die lateralen Wärmeflüsse in Folge von Salzwasser-Einstromereignissen aus der Nordsee wider.

In Jahresverlauf 2011 wurde nur ein größeres Einstromereignis im November/Dezember beobachtet (vgl. Kapitel 2, 3 und 4). Das übrige Einstromgeschehen war wie in den vorangegangenen Jahren geprägt von einer Serie kleiner barokliner und barotroper Einströme. Die Wirkung dieser Einströme blieb im Jahresverlauf 2011 auf die westliche Ostsee begrenzt. Gleiches gilt auch für den stärkeren Einstrom vom November 2010, von dem Auswirkungen auf die zentrale Ostsee erwartet wurden. Jedoch war dessen Einstromvolumen nicht groß genug um signifikante Veränderungen in der zentralen Ostsee hervorzurufen.

Die Entwicklung der vertikalen Temperaturverteilung in der zentralen Ostsee wurde im Jahr 2011 hauptsächlich durch den kalten Winter und den kühlen Sommer geprägt (vgl. Kapitel 2). Der Winter 2010/2011 war der zweite kalte Winter in Folge, mit einer frühen Kälteperiode im Dezember 2010. Einstromereignisse hatten im Jahr 2011 auf die vertikale Temperaturverteilung in der zentralen Ostsee nur einen geringen Einfluss. Ihre Auswirkungen blieben auf die westliche Ostsee und das Bornholmbecken begrenzt. Ungewöhnlich waren die extrem konstanten Verhältnisse im Tiefenwasser des östlichen Gotlandbeckens seit November 2010.

Die Temperaturverteilung Anfang Februar 2011 zeigt die starke saisonale Abkühlung der Deckschicht. Die oberen 50-60 m sind durch tiefe Konvektion vollständig homogenisiert. Die Oberflächentemperaturen lagen in der Arkonasee bereits unter 1,5 °C während im östlichen Gotlandbecken noch Temperaturen um 3 °C gemessen wurden. Damit war in der westlichen Ostsee das Dichtemaximum im Oberflächenwasser schon deutlich unterschritten, so dass die Schichtung in der Deckschicht durch die weitere Abkühlung stabilisiert wurde. Diese schwache Schichtung wurde durch eine Folge von Sturmtiefs

Anfang Februar wieder aufgebrochen und die Eisbildung damit gebremst. In der Gotlandsee lag die Temperatur noch über dem Dichtemaximum und die weitere Abkühlung der Deckschicht verursachte tiefe Vertikalkonvektion, verbunden mit einer stetigen Vertiefung und Abkühlung der gesamten Deckschicht.

Die Temperaturverteilung in Abb. 21 zeigt Anfang Februar eine nahezu gleichmäßige Schichtung von der Bornholmsee bis in die zentrale Ostsee. Im Gegensatz dazu ist im Arkonabecken nahezu keine Temperaturschichtung mehr vorhanden. Im Temperatursignal der tieferen Schichten gibt es keine Hinweise auf ältere Einstromwasserkörper. Die Maximaltemperatur wird im Tiefenwasser des Bornholmbeckens mit $7,93\text{ °C}$ registriert. Der vertikale Temperaturgradient in der Halokline nimmt von West nach Ost kontinuierlich ab.

Bis Ende März hatte sich die Oberflächentemperatur in der Ostsee weiter abgekühlt und lag nun in der gesamten Ostsee deutlich unterhalb des Dichte-Maximums. Extrem niedrige Oberflächentemperaturen wurden nach 2010 auch 2011 wieder in der westlichen und nördlichen Gotlandsee mit $-0,01\text{ °C}$ im Karlsötief, $0,04\text{ °C}$ im Landsorttief und $0,32\text{ °C}$ im Farötief gemessen. In der östlichen Gotlandsee lagen die Oberflächentemperaturen mit $0,54\text{ °C}$ im Gotlandtief leicht darüber. Die Oberflächentemperaturen in der zentralen Ostsee lagen damit etwa $0,5\text{ K}$ unter den schon extrem niedrigen Werten des Jahres 2010, obwohl der Winter 2010/11 im Mittel etwas wärmer ausfiel als der vorangegangene Winter.

Die Temperaturverteilung in der Arkonasee zeigte Ende März erste Auswirkungen des Einstromereignisses, das am 3. März begann und mit kurzen Unterbrechungen bis zum 7. April 2011 andauerte (vgl. Kapitel 2). Unterhalb von 30 bis 35 m Tiefe füllte der Einstromwasserkörper mit Temperaturen unter 1 °C das gesamte Becken aus. Die Spitze des Einstromwassers hatte bereits das Bornholmgat passiert und das westliche Bornholmbecken erreicht, wo es sich in 50 bis 60 m Tiefe in die Halokline einschichtete. Die im Bornholmbecken im März 2011 beobachtete Abkühlung im Tiefenwasser unterhalb von 60 m war wahrscheinlich das Ergebnis des Einstromes, der Anfang bis Mitte Februar 2011 an den Stationen Darßer Schwelle und Arkona Boje beobachtet wurde (vgl. Kapitel 3, Abb. 8 und 11). Das Volumen dieses Einstroms war jedoch zu klein um signifikante Wassermengen über die Stolper Rinne weiter in die zentrale Ostsee zu transportieren.

Bis Mai hatte sich das Oberflächenwasser der Ostsee deutlich erwärmt. Mit Temperaturen zwischen 6 und 9 °C lag es klar oberhalb des Dichtemaximums und bis zu 3 K über den Temperaturen des Vorjahres. Die beginnende sommerliche Temperaturschichtung führte zum Abkoppeln der Zwischenschicht (30-60 m Tiefe) von der direkten Wechselwirkung mit der Atmosphäre. Diese Zwischenschicht, winterliches Zwischenwasser, war 2011 verglichen mit den Jahren 2007 bis 2009 extrem kalt. In der östlichen Gotlandsee betrug die Minimaltemperatur des winterlichen Zwischenwassers im Mai 2011 nur $1,49\text{ °C}$ und lag damit noch $0,1\text{ K}$ unter dem Wert des Vorjahres. Ähnliche Verhältnisse wurden in der gesamten Ostsee beobachtet. Im Bornholmbecken waren die Auswirkungen des Einstroms vom März 2011 spürbar. Das kalte Einstromwasser hatte sich in der Halokline eingeschichtet und den Temperaturgradienten zwischen Oberflächen und Tiefenwasser abgeschwächt. Die Tiefenlage der 6 °C Isotherme war von 61 m Ende März auf 77 m abgesunken.

Bis Anfang August 2011 hatte sich in der gesamten Ostsee die typische sommerliche Temperaturschichtung aufgebaut. Die saisonale Thermokline in etwa 30 m Tiefe trennte das stark erwärmte Oberflächenwasser vom kalten winterlichen Zwischenwasser. Die Minimaltemperaturen im Zwischenwasser lagen in der Bornholmsee bei 4 °C und sanken in der zentralen Ostseebecken bis unter 2 °C ab (Gotlandtief 1,8 °C).

In der Arkonasee wurde im August ein warmer Bodenwasserkörper mit Maximaltemperaturen von 11,3 °C beobachtet, der durch barokline Einstromprozesse über die Darßer Schwelle verursacht wurde. Er hatte im zentralen Arkonabecken eine vertikale Ausdehnung von 8 bis 10 m. Teile dieses Wasserkörpers hatten bereits das westliche Bornholmbecken erreicht und schichteten sich in der Halokline ein. An der Station 140 wurde das Temperaturmaximum von 10 °C in 62 m Tiefe beobachtet. Der Sauerstoffgehalt dieses Einstromwassers war mit 4 bis 4,5 ml/l relativ hoch. Am östlichen Rand des Bornholmbeckens wurde in der Halokline ein weiterer lokaler Warmwasserkörper beobachtet, der vermutlich aus einem kleinen Einstrom zu Beginn des Sommers stammte (evtl. Mitte Juni, vgl. Abb. 5a). Seine Maximaltemperatur lag bei 8 °C.

In der Bodenschicht am Eingang des östlichen Gotlandbeckens (80 bis 110 m Tiefe) zeigte die vertikale Temperaturverteilung einen Kaltwasserkörper. Die Quelle dieses Kaltwasserkörpers ist mit hoher Wahrscheinlichkeit der Einstrom im März und Mai 2011. Die Dichte dieses Wassers war jedoch zu gering um die tieferen Schichten des Gotlandbeckens zu erreichen.

Die Temperaturverteilung Ende Oktober 2011 zeigte die herbstliche Erosion der Thermokline. Die Temperatur in der etwa 35 bis 45 m dicken Deckschicht betrug noch 7 bis 9 °C. Das winterliche Zwischenwasser war noch als dünne Schicht von 10 bis 20 m Dicke in der gesamten Ostsee zu beobachten. Bemerkenswert ist ein Einstrom von Winterwasser aus dem Bornholmbecken in die östliche Arkonasee. Die Temperaturschichtung in der westlichen Ostsee wurde durch den kleinen Einstrom von Anfang Oktober bestimmt, der im westlichen Arkonabecken eine warme Bodenschicht von 10 bis 20 m Mächtigkeit bildete. Die Halokline des Bornholmbeckens war in Folge der Sommer- und Herbsteströme noch deutlich erwärmt. Der im August beobachtete Kaltwasserkörper am Eingang des östlichen Gotlandbeckens hatte sich mit dem alten Haloklinenwasser vermischt und war in der Temperaturverteilung Ende Oktober nicht mehr als eigenständiger Wasserkörper erkennbar. Jedoch hatte sich in Folge dieses Prozesses die Tiefenlage der 6 °C Isotherme in der östlichen Gotlandsee von 109 m im August auf 123 m Anfang Dezember verlagert.

Von Mitte November bis Anfang Dezember fand das stärkste Einstromereignis des Jahres 2011 statt. Dieser Zeitraum wurde nicht mehr durch die regulären Überwachungsfahrten des IOW abgedeckt. Jedoch fand Anfang Dezember eine weitere Fahrt des IOW statt, auf welcher der Monitoring-Transekt mit einer geschleppten CTD erneut beprobt wurde. Die beobachtete Temperaturverteilung entsprach den typischen Bedingungen im Spätherbst. Die Deckschichttiefe war gegenüber Oktober 2011 weiter angewachsen und betrug 45 bis 65 m. Die Deckschicht zeigte entlang des gesamten Transekts horizontale Temperaturunterschiede von 1 bis 3 K mit starken lokalen Gradienten. Die horizontale Skala dieser Temperaturfluktuationen betrug etwa 3 bis 20 km und lässt auf ausgeprägte

mesoskale Prozesse schließen. Die Temperaturfluktuationen in der Deckschicht sind mit vertikalen Auslenkungen der Thermokline von 5 bis 20 m Höhe korreliert. Vom Winterwasser waren nur noch Reste in einer bis zu 10 m dicken Schicht in der Stolper Rinne und im Gotlandbecken zu beobachten.

Am Boden des Arkonabeckens lag ein Warmwasserkörper der aus einem kleinen Einstromereignis von Ende Oktober stammte. Auf der Darßer Schwelle war ein weiterer Warmwasserkörper mit Temperaturen um 8 °C zu beobachten. Dieses Wasser stellte die Spitze des starken Einstromereignisses vom November/Dezember 2011 dar. Die Auswirkungen dieses Einstromes werden erst zu Beginn des Jahres 2012 beobachtbar sein. Eine Besonderheit in der vertikalen Temperaturschichtung der zentralen Ostsee stellte die im Jahresverlauf 2011 nahezu konstante Temperatur im Tiefenwasser des östlichen Gotlandbeckens dar. Die Temperaturentwicklung im Tiefenwasser des Gotlandbeckens kann mit Hilfe der „Hagen-Kurve“ in hoher zeitlicher Auflösung beschrieben werden. Die Zeitreihe stellt deshalb eine wertvolle Ergänzung zum schiffsgestützten Überwachungsprogramm dar. Abbildung 21 zeigt die „Hagen-Kurve“ für den Zeitraum von 2007 bis Dezember 2011. Durch die Einstromereignisse des Jahres 2007 stellte sich im Tiefenwasser des östlichen Gotlandbeckens ein stärkerer positiver Temperaturgradient ein. Nach Abklingen der Einstromaktivität blieb die Temperatur in Bodennähe für die folgenden zwei Jahre nahezu konstant bei 6,25 °C. In den darüber liegenden Schichten setzte jedoch eine Erwärmung ein, die als Folge kleiner Einstromereignisse mit geringeren Salzgehalten zu verstehen ist. Von Januar 2008 bis Dezember 2009 stieg die Temperatur von 6,2 °C auf 6,5 °C und führte zu einer Umkehr des vertikalen Temperaturgradienten. Ab Februar 2010 kam es zu einer weiteren Erwärmung des Tiefenwassers in der Gotlandsee, die ihren Höhepunkt im Mai 2010 erreichte. Bis Dezember 2010 kühlt sich das Tiefenwasser wieder leicht ab. Dabei wurde auch der vertikale Temperaturgradient bis Dezember 2010 fast vollständig abgebaut.

Seit Beginn des Jahres 2011 wies das Tiefenwasser des östlichen Gotlandbeckens zwischen 170 und 220 m Tiefe eine fast konstante Temperatur um 6,43 °C auf. Der vertikale Gradient lag im Bereich der Messunsicherheit der eingesetzten Temperatursensoren und war praktisch nicht vorhanden. Auch kurzzeitige Temperaturfluktuationen waren extrem gering. Eine langandauernde Periode mit derart konstanten Temperaturen und geringen Temperaturfluktuationen ist in der „Hagen-Kurve“ bisher ohne Beispiel. Die Ursache für den Abbau des Temperaturgradienten ist gegenwärtig noch unklar. Um den unwahrscheinlichen Fall auszuschließen, dass alle drei Temperatursensoren der Verankerung gleiche fehlerhafte Daten liefern, wurden die CTD-Vertikalprofile der Station 271 ausgewertet (Abb. 20).

Auch in diesen Messungen zeigt sich das gleiche Bild. Unterhalb von 160 m war die Temperatur praktisch tiefenunabhängig konstant bei 6,43 °C und zeigte im Jahresverlauf keine Temperaturänderungen. Zwischen 100 und 160 m Tiefe zeigte das Temperaturprofil von Januar bis Oktober 2011 ebenfalls keine Änderungen. Erst mit dem Einmischen des Kaltwasserkörpers aus den Frühjahrseinströmen kam es zu einer leichten Abkühlung in dieser Tiefenschicht. Es bleibt abzuwarten wie sich die Situation im Tiefenwasser mit dem Eintreffen des November/Dezember Einstromes 2011 verändern wird. Gegenwärtig ist unklar ob die Dichte des Einstromwassers hoch genug ist, um zu einer Erneuerung des Tiefenwassers im östlichen Gotlandbecken beizutragen.

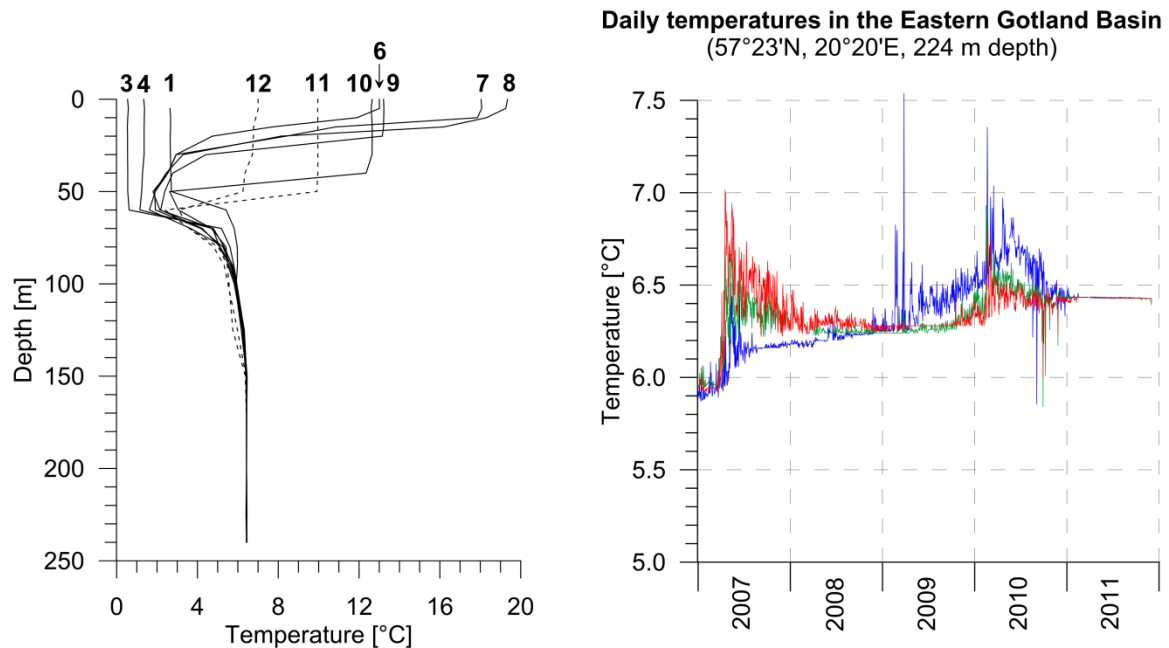


Abb. 20

Entwicklung des Temperatur-Vertikalprofils im östlichen Gotlandbecken (Station 271) im Jahresverlauf 2011 (links). Die Zahlen an den einzelnen Profilen indizieren den Monat der Messung. Der Ausschnitt der „Hagen-Kurve“ (rechts) zeigt den Temperaturverlauf des Tiefenwassers im östlichen Gotlandbecken (EGB) von Januar 2007 bis Dezember 2011 an 3 Tiefenniveaus einer Verankerung bei 224 m Wassertiefe (HAGEN & FEISTEL, 2001, 2004). Abrupte Änderungen zeigen Einstromprozesse an (z.B. im März 2007). Bisher einmalig ist die nahezu konstante Temperatur im Jahr 2011.

Fig. 20

Evolution of the vertical temperature profile in the eastern Gotlandbasin (Station 271) in the year 2011 (left). The numbers on top of the single profiles indicate the month of measurement. The depicted section of the „Hagen curve“ shows the temperature signal of the deep water in the eastern Gotland Basin (EGB) between January 2007 and December 2011 at three depth levels of a mooring at 224 m bathymetric depth (HAGEN & FEISTEL, 2001, 2004). Abrupt changes indicate inflow processes, in particular those of 1997, 2001, 2002, 2003 and 2007. The constant temperature during the year 2011 is unique in the entire time series.

Die Jahresmittelwerte und Standardabweichungen der Temperatur im Tiefenwasser der zentralen Ostsee sind in Tabelle 5 für die zurückliegenden fünf Jahre auf Basis der CTD Messungen zusammengestellt. Im Jahr 2011 waren die Tiefenwassertemperaturen etwas geringer als 2010, dem Jahr mit den höchsten Temperaturen der letzten fünf Jahre. Lediglich im Bornholmbecken kam es im Ergebnis der Einströme von März und Mai 2011 zu einer deutlichen Reduzierung der Tiefenwassertemperatur um fast 2 K. Die Standardabweichungen der Temperaturfluktuationen waren deutlich geringer als im Jahr 2010. Das ist vor allem darauf zurück zu führen, dass die häufigen kleinen Einströme nicht salzreich genug waren um das Tiefenwasser der einzelnen Becken zu erreichen.

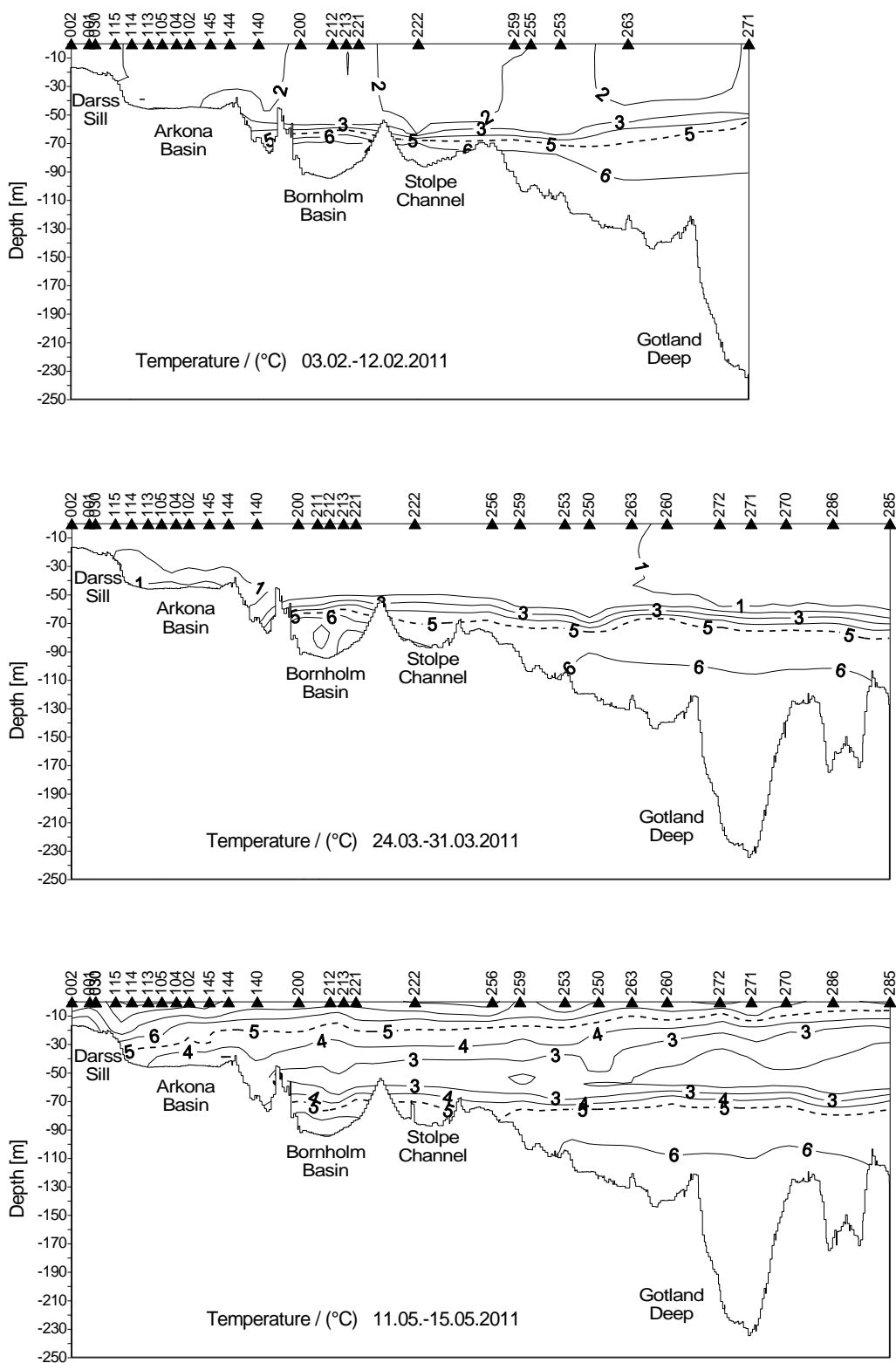


Abb. 21
Vertikale Verteilung der Wassertemperatur zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 21
Vertical water temperature distribution between Darss Sill and northern Gotland Basin

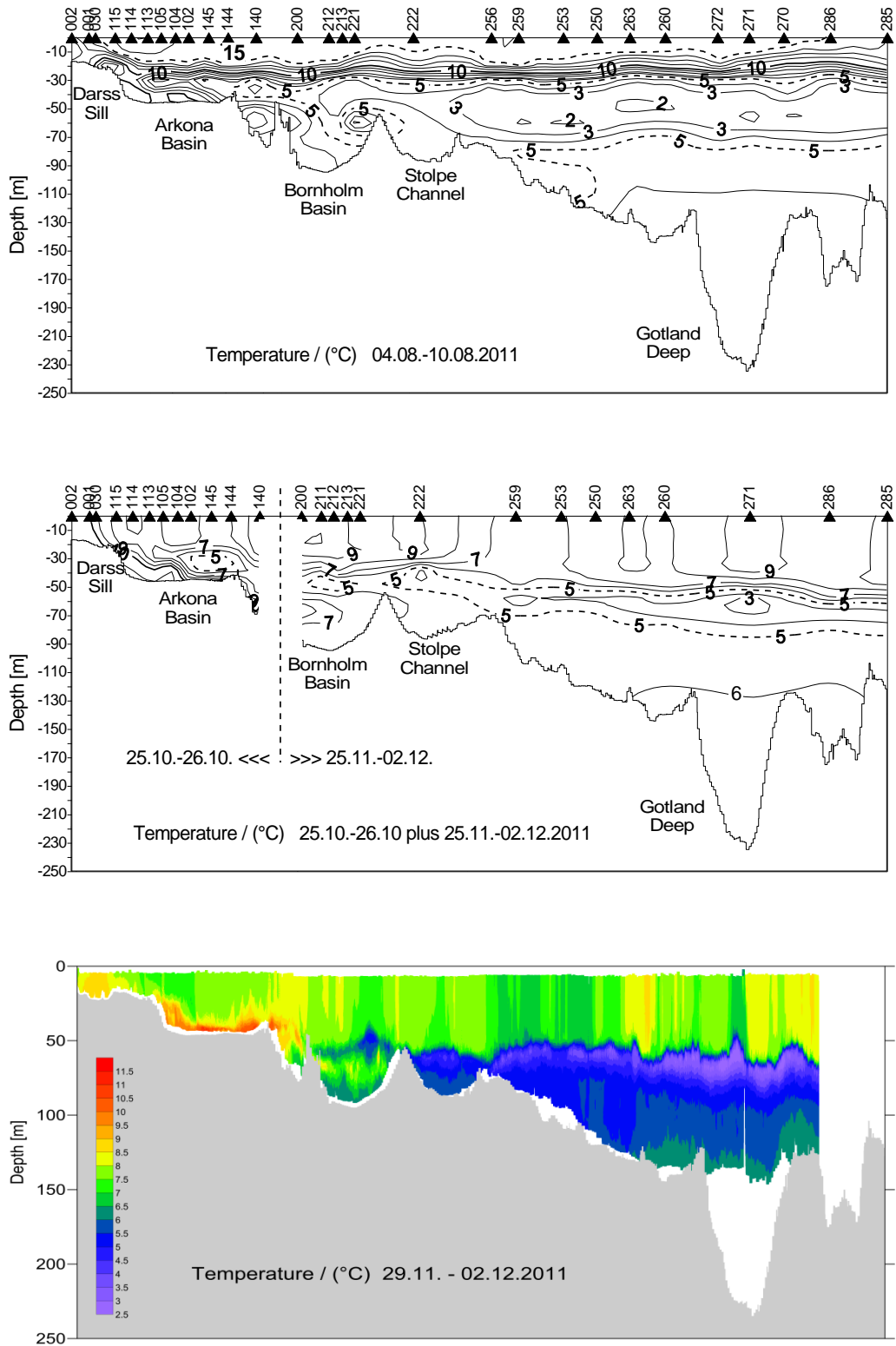


Abb. 21
Vertikale Verteilung der Wassertemperatur zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 21
Vertical water temperature distribution between Darss Sill and northern Gotland Basin

Tab. 5

Jahresmittelwerte und Standardabweichungen ausgewählter hydrographischer Parameter im Tiefenwasser der zentralen Ostsee: IOW sowie SMHI- Daten (n= 8-17)

Table 5

Annual means and standard deviations of selected hydrographic parameters in the deep water of the central Baltic Sea: IOW- and SMHI data (n= 8-17)

Wassertemperatur (°C; Maximalwerte hervorgehoben)

Station	Tiefe/m	2007	2008	2009	2010	2011
213 (Bornholmtief)	80	8,95 ± 0,36	7,92 ± 0,80	9,04 ± 0,54	8,29 ± 1,06	6,48 ± 0,69
271 (Gotlandtief)	200	6,22 ± 0,21	6,29 ± 0,01	6,29 ± 0,01	6,46 ± 0,07	6,43 ± 0,00
286 (Fårötief)	150	6,02 ± 0,05	6,11 ± 0,02	6,43 ± 0,17	6,74 ± 0,12	6,42 ± 0,07
284 (Landsorttief)	400	5,71 ± 0,04	5,70 ± 0,08	5,79 ± 0,06	6,09 ± 0,15	5,95 ± 0,09
245 (Karlsötief)	100	5,17 ± 0,08	5,24 ± 0,08	5,31 ± 0,09	5,43 ± 0,10	5,44 ± 0,07

Salzgehalt (g/kg; Maximalwerte hervorgehoben)

Station	Tiefe/m	2007	2008	2009	2010	2011
213 (Bornholmtief)	80	16,07 ± 0,35	15,49 ± 0,24	15,59 ± 0,17	15,85 ± 0,33	14,68 ± 0,45
271 (Gotlandtief)	200	12,61 ± 0,06	12,54 ± 0,02	12,43 ± 0,03	12,33 ± 0,03	12,20 ± 0,03
286 (Fårötief)	150	12,02 ± 0,04	11,93 ± 0,08	11,84 ± 0,04	11,77 ± 0,04	11,69 ± 0,16
284 (Landsorttief)	400	11,05 ± 0,09	11,00 ± 0,05	10,86 ± 0,06	10,76 ± 0,03	10,65 ± 0,02
245 (Karlsötief)	100	10,20 ± 0,12	10,08 ± 0,18	9,98 ± 0,09	10,01 ± 0,17	9,98 ± 0,11

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

Station	Tiefe/m	2007	2008	2009	2010	2011
213 (Bornholmtief)	80	0,46 ± 0,50	1,15 ± 0,89	1,13 ± 0,74	1,28 ± 0,88	0,78 ± 0,83
271 (Gotlandtief)	200	-1,46 ± 0,55	-2,22 ± 0,49	-3,09 ± 0,47	-4,29 ± 0,69	-3,98 ± 0,51
286 (Fårötief)	150	-0,72 ± 0,35	-1,06 ± 0,33	-1,25 ± 0,78	-1,97 ± 0,34	-1,57 ± 0,30
284 (Landsortief)	400	-0,81 ± 0,23	-1,02 ± 0,29	-1,17 ± 0,17	-1,15 ± 0,26	-1,06 ± 0,31
245 (Karlsötief)	100	-1,19 ± 0,72	-0,63 ± 0,57	-0,61 ± 0,42	-1,49 ± 0,83	-1,36 ± 0,58

6.2. Salzgehalt

Die vertikale Verteilung des Salzgehaltes in der westlichen und zentralen Ostsee ist in Abbildung 22 für die fünf Überwachungsfahrten des IOW, sowie für die MEDOS-Expedition zusammengestellt. Die Salzgehaltsverteilung zeigte eine deutlich geringere Variabilität als die Temperatur. Typisch ist der West-Ost Gradient im Bodenwasser. Größere Schwankungen des Salzgehaltes sind besonders in der westlichen Ostsee zu beobachten, wo der Salzgehalt durch die Einstromereignisse von salzhaltigem Nordseewasser am stärksten beeinflusst wird. Die Dauer und der Einfluss kleiner Einstromereignisse sind meist zu gering, um sich in der generellen Salzgehaltsverteilung niederzuschlagen. Lediglich in der Summe können sie zu langsamen langfristigen Änderungen des Salzgehaltes führen. Die in Abb. 22 dargestellten Salzgehaltsverteilungen stellen lediglich „Schnappschüsse“ dar, die nicht geeignet sind ein vollständiges Bild der Einstromaktivität nachzuzeichnen. 2011 waren nur die Einströme von März und Oktober kräftig genug um mit diesem Messregime erfasst zu werden.

Anfang Februar wurde in der Arkonasee nur eine sehr dünne salzreiche Schicht am Boden beobachtet. Die Serie kleiner Einströme im März 2011 füllte die Bodenschicht des Arkonabeckens mit salzreichem kaltem Wasser auf. Die Halokline stieg auf 30 bis 35 m Tiefe an. Der Bodensalzgehalt an der Station 113 lag zu dieser Zeit bei 17,1 g/kg gegenüber 12,1 g/kg Anfang Februar 2011. Dieses Salzwasser wurde Anfang Mai durch einen erneuten Einstrom mit vergleichbaren Salzgehalten ersetzt. Dadurch stieg die Temperatur am Boden des Arkonabeckens auf 4 °C an. Das kalte Einstromwasser vom März floss über das Bornholmgat ins Bornholmbecken ab und verdrängte dort das wärmere Tiefenwasser. Anfang August war das Tiefenwasser des Arkonabeckens durch die baroklinen

Sommereinströme erneut ausgetauscht. Das Volumen des Bodenwasserkörpers hatte sich dabei kaum verändert. Mit dem kleinen Einstrom im Oktober 2011 erhöhte sich das Volumen des salzreichen Bodenwassers im Arkonabecken deutlich. Im westlichen Arkonabecken stieg die Halokline auf ca. 30 m Tiefe an. Im ScanFish Transekt von Anfang Dezember zeichnete sich der beginnende Einstrom in einem erhöhten Salzgehalt auf der Darßer Schwelle ab. Geringe Mengen salzreichen Wassers hatten bereits das westliche Arkonabecken erreicht.

Den generellen Trend des Salzgehaltes im Tiefenwasser der Ostsee für die zurückliegenden fünf Jahre zeigt Tabelle 5. Dabei zeigt sich ein relativ einheitliches Bild für die gesamte Ostsee. Generell ist eine Abnahme der Salzgehalte über die vergangenen fünf Jahre zu beobachten. Die Verringerung des Salzgehaltes im Tiefenwasser ist auf das Andauern der seit 2004 anhaltenden Stagnationsperiode zurückzuführen. Die seitdem beobachteten kleinen Einstromereignisse haben das Tiefenwasser des Gotlandbeckens nur in geringem Umfang erreicht, da sich die Masse dieser Einströme in der Halokline einschichtet. Die Tiefenlage der Halokline hat sich seit dem großen Salzwassereinstrom von 2003 kaum verändert, weil der vertikale Salztransport in die Deckschicht durch die kleinen Einstromereignisse weitgehend kompensiert wird.

Für den Oberflächensalzgehalt der Ostsee ergibt sich über die letzten fünf Jahre kein eindeutiger Trend. Tabelle 6 fasst die Änderungen des Oberflächensalzgehaltes zusammen. Gegenüber den Minimalwerten des Jahres 2010 haben sich die Oberflächensalzgehalte 2011, mit Ausnahme des Gotlandbeckens, leicht erhöht. Die Standardabweichungen des Oberflächensalzgehaltes liegen auf dem Niveau des Vorjahres. Betrachtet man den Jahresgang im Oberflächenwasser so fallen die Salzgehaltsminima im September auf, die durch die feuchte Witterungsperiode im August verursacht wurden.

Tab. 6

Jahresmittelwerte von 2007 bis 2011 und Standardabweichungen der Salinität im Oberflächenwasser der zentralen Ostsee (Minimalwerte hervorgehoben). Die Langzeitmittelwerte der Jahre 1952-2005 sind dem BALTIC-Klima-Atlas entnommen (FEISTEL et al., 2008)

Table 6

Annual means of 2007 to 2011 and standard deviations of surface water salinity in the central Baltic Sea (minimum values in bold). The long-term averages of the years 1952-2005 are taken from the BALTIC climate atlas (FEISTEL et al., 2008)

Station	1952- 2005	2007	2008	2009	2010	2011
213 (Bornholmtief)	7,60 ±0,29	7,58 ±0,24	7,58 ±0,10	7,54 ±0,15	7,17 ±0,17	7,23 ±0,11
271 (Gotlandtief)	7,26 ±0,32	7,15 ±0,14	7,19 ±0,25	7,15 ±0,16	7,20 ±0,20	7,15 ±0,19
286 (Fårötief)	6,92 ±0,34	6,88 ±0,22	6,85 ±0,39	6,80 ±0,28	6,74 ±0,41	6,96 ±0,24
284 (Landsortief)	6,75 ±0,35	6,54 ±0,25	6,49 ±0,37	6,63 ±0,14	6,37 ±0,40	6,68 ±0,40
245 (Karlsötief)	6,99 ±0,32	6,81 ±0,27	7,11 ±0,16	6,84 ±0,25	6,60 ±0,22	6,81 ±0,24

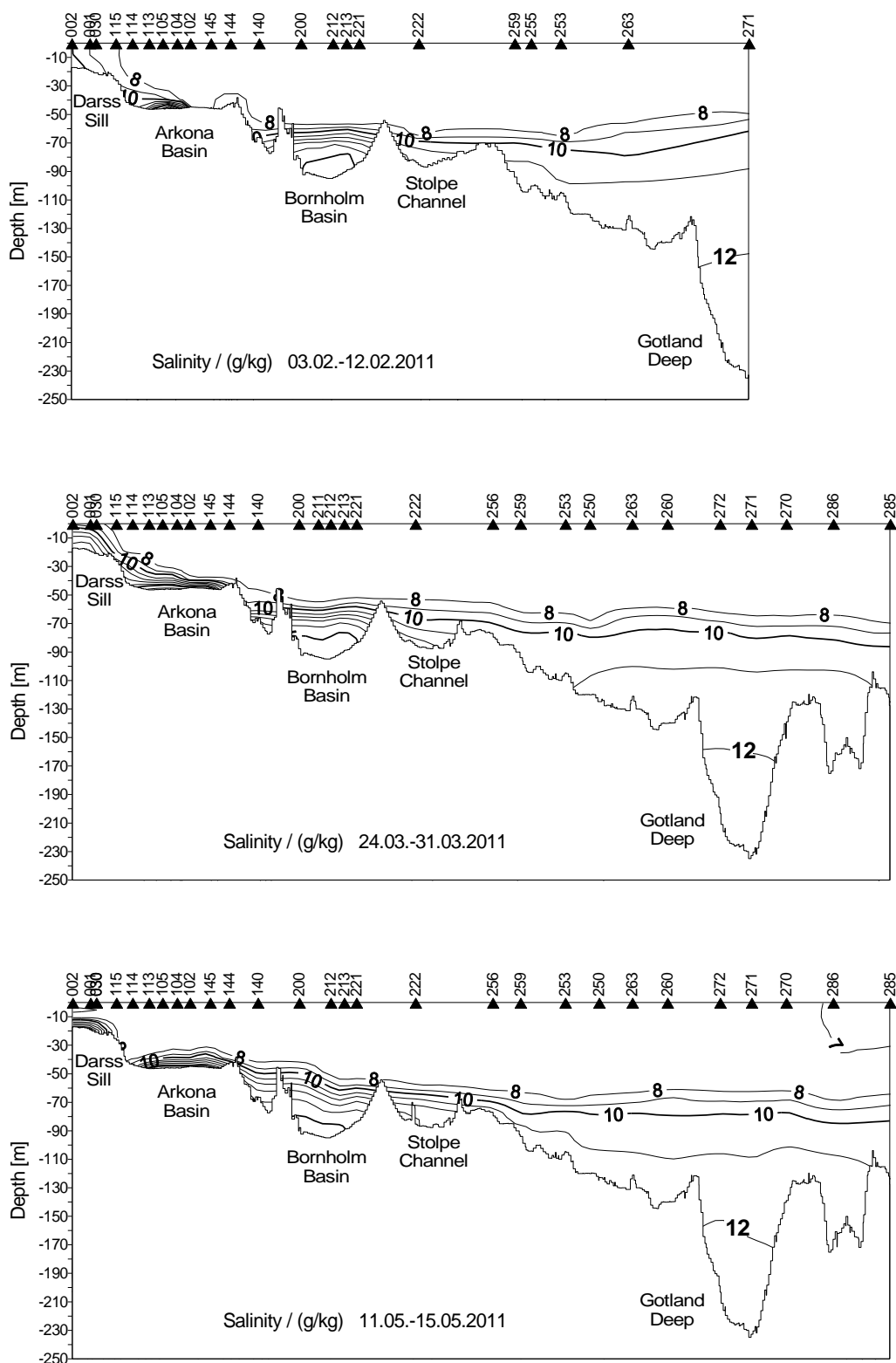


Abb. 22

Vertikale Verteilung des Salzgehaltes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 22

Vertical salinity distribution between Darss Sill and northern Gotland Basin

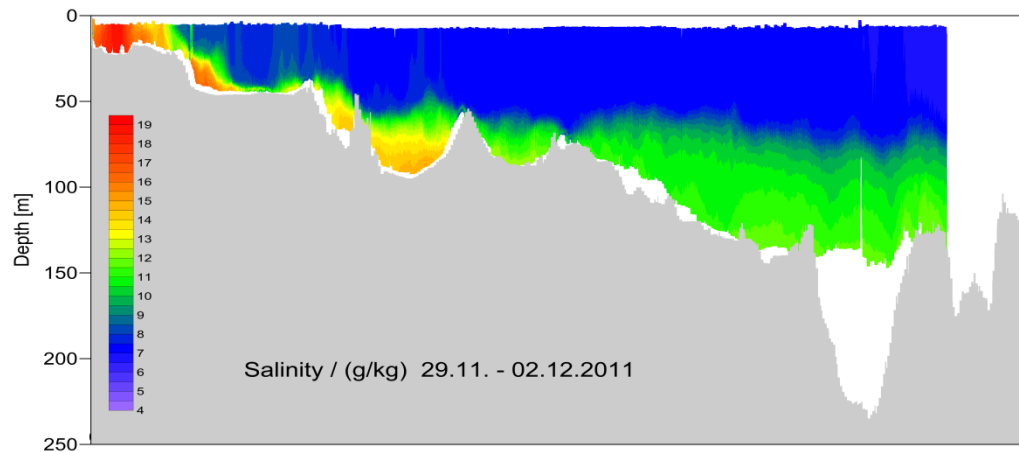
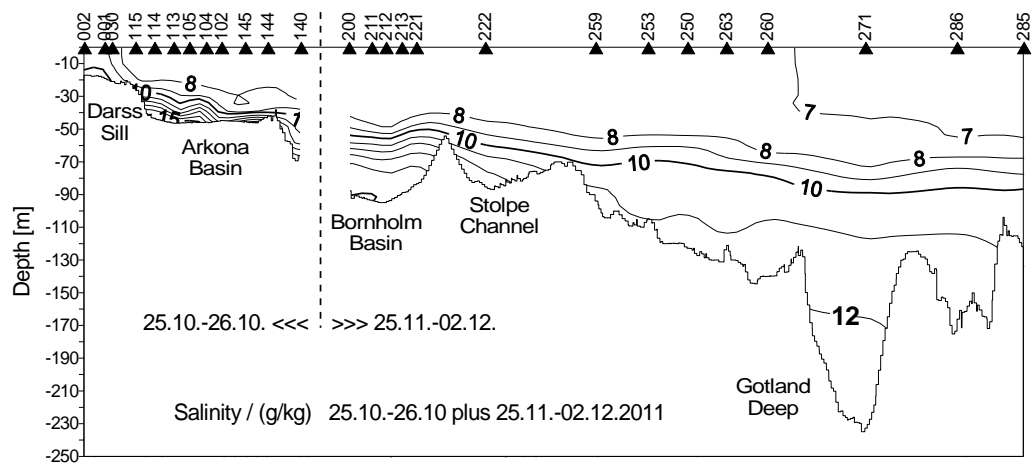
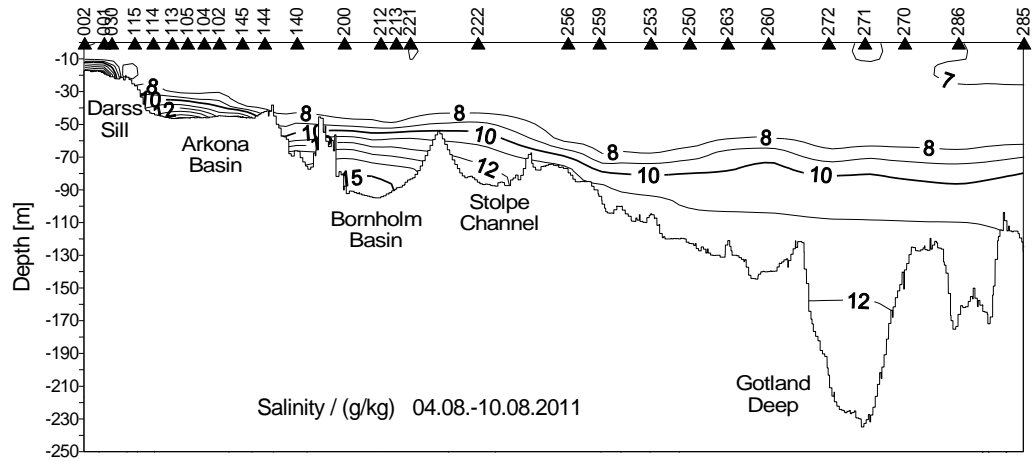


Abb. 22 Forts.

Vertikale Verteilung des Salzgehaltes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken.

Fig. 22 cont.

Vertical salinity distribution between Darss Sill and northern Gotland Basin

6.3. Sauerstoff- und Schwefelwasserstoffverteilung

Die Sauerstoffbilanz eines Seegebietes wird positiv durch die Zufuhr aus der Atmosphäre und durch die Primärproduktion sowie negativ durch den Verbrauch durch Atmung, Abbau und Mineralisation organischer Stoffe und Verlust an die Atmosphäre geprägt. Demnach ist die Sauerstoffbilanz eines Gewässers umso schlechter je geringer der Eintrag an Sauerstoff durch die Oberfläche und die Photosyntheseaktivität und je intensiver die Stoffwechselleistungen heterotropher Organismen sind (SCHWOERBEL, 1984). Auch starke diurnale und saisonale Schwankungen deuten auf einen schlechten, durch Eutrophierung beeinflussten, Gewässerzustand hin. Der Sauerstoffgehalt wird auch durch temperatur- und salzgehaltsbedingte Schichtungen, vertikale Zirkulation, Advektion und Konvektion beeinflusst.

Daraus resultierend, kann die Sauerstoffversorgung des Oberflächenwassers in der Regel als gut angesehen werden. Die Veränderungen des Sauerstoffgehaltes werden im Wesentlichen durch die Jahrgänge von Temperatur und Salzgehalt (vgl. NAUSCH et al., 2008a, 2009) und die jahreszeitlich unterschiedlich stark ausgeprägten Produktions- und Zehrungsprozesse bestimmt. Unterhalb permanenter oder temporärer Dichtesprungschichten kann es dagegen zu einer erheblichen Sauerstoffzehrung kommen, da diese Wasserschichten nicht durchlichtet sind, folglich nur Zehrungsprozesse stattfinden.

In der durchmischten Oberflächenschicht kann ein typischer Jahrgang des Sauerstoffgehaltes beobachtet werden (MATTHÄUS, 1978, NAUSCH et al., 2008a). Die hohe Sauerstofflöslichkeit bei niedrigen Temperaturen führt im Winter und Frühjahr zu hohen Sauerstoffkonzentrationen. Die Frühjahrsblüte des Phytoplanktons setzte im Jahr 2011 auf Grund des lang anhaltenden Winters (vgl. Kapitel 2) relativ spät ein und führte im März zu einem zusätzlichen Sauerstoffeintrag (Tab. 8). Die Sauerstoffkonzentrationen lagen in diesem Seegebiet sowohl im März (Vorjahr 9,60 ml/l) als auch im Mai (Vorjahr 8,42 ml/l) deutlich höher als im Jahr 2010. Die hohe Standardabweichung deutet auf eine sehr heterogene Entwicklung der Blüte hin. Der danach folgende rasche Temperaturanstieg verringerte die Sauerstofflöslichkeit deutlich, was in der flacheren westlichen Ostsee rascher zu sehen ist als im Arkonabecken. Im Sommer lagen die Sauerstoffgehalte dann in der Regel unter 7 ml/l. Im Herbst verursachte die Abkühlung wieder eine Zunahme der Sauerstoffkonzentrationen (Tab. 8).

Tab. 7

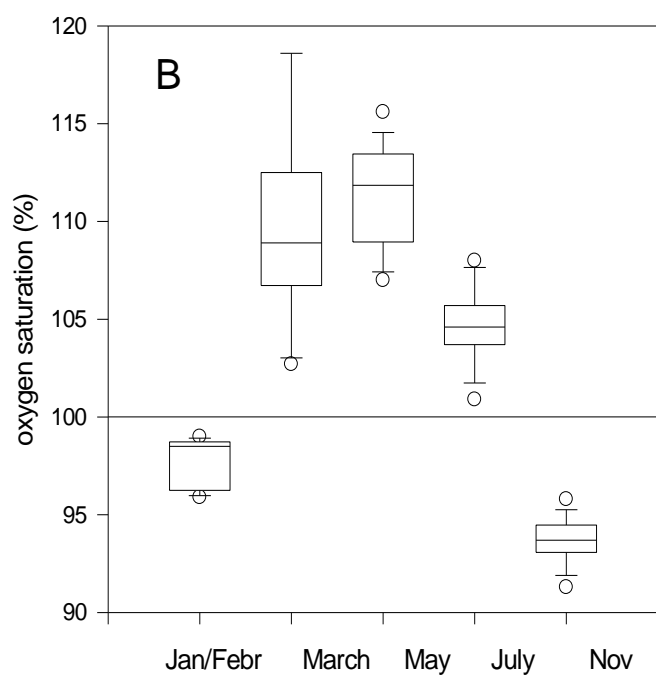
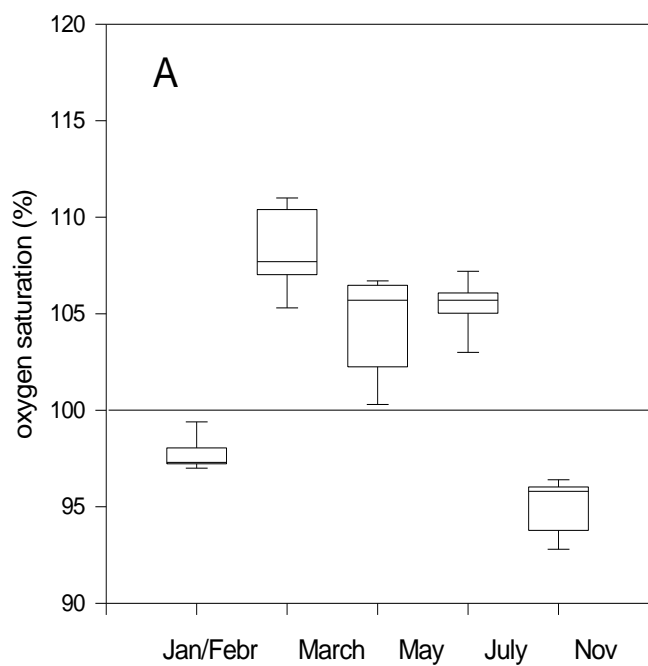
Jahresgang des Sauerstoffgehaltes in der durchmischten Oberflächenschicht (0 – 10 m) im Jahr 2011

Table 7

Annual oxygen cycle in the mixed surface layer (0 – 10 m) in 2011

	Februar	März/April	Mai	Juli	November
westl. Ostsee					
O₂ (ml/l)	9,18	9,52	7,97	6,55	6,62
Stabw. (ml/l)	0,22	0,11	0,49	0,11	0,22
n	5	5	5	5	5
Arkonabecken					
O₂ (ml/l)	9,21	9,96	8,83	6,73	7,32
Stabw. (ml/l)	0,15	1,48	0,25	0,,10	0,,14
n	13	13	12	12	12
Bornholmbecken					
O₂ (ml/l)	8,81	9,54	10,60	6,63	7,40
Stabw. (ml/l)	0,07	0,07	0,64	0,06	0,02
n	4	5	4	4	3
östl. Gotlandbecken					
O₂ (ml/l)	8,99	9,30	10,62	6,55	7,57
Stabw. (ml/l)	0,07	0,30	0,21	0,15	0,13
n	5	9	9	9	7

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. 23 fasst die Sauerstoffsättigungswerte des Oberflächenwassers für das Jahr 2011 für die westliche Ostsee, das Arkonabecken, das Bornholmbecken und das östliche Gotlandbecken zusammen. Nachdem der Jahresgang 2010 einige Besonderheiten aufwies (NAUSCH et al., 2011a), zeigte das Jahr 2011 wieder ein typisches Muster. Im Ergebnis der Dominanz sauerstoffzehrender Prozesse und geringer Produktion war das Oberflächenwasser im Winter in allen vier Seegebieten mit etwa 97-98 % leicht untersättigt (Abb. 23). Die Frühjahrsblüte des Phytoplanktons führte in der westlichen Ostsee besonders im März zu einer Übersättigung des Oberflächenwassers. Im Arkonabecken setzte die Blüte auf Grund des langen Winters verspätet ein und dauerte bis in den Mai fort. Wie bei den Sauerstoffkonzentrationen dokumentiert die große Spannweite der Werte einen unterschiedlichen Entwicklungsstand der Phytoplanktonblüte. Der lang anhaltende Winter führte auch im Bornholmbecken und im östlichen Gotlandbecken zu einem recht späten Blütenbeginn. Die Untersuchungen im Mai dokumentieren dies. In beiden Seegebieten wurde eine mittlere Sättigung von 128 % errechnet.



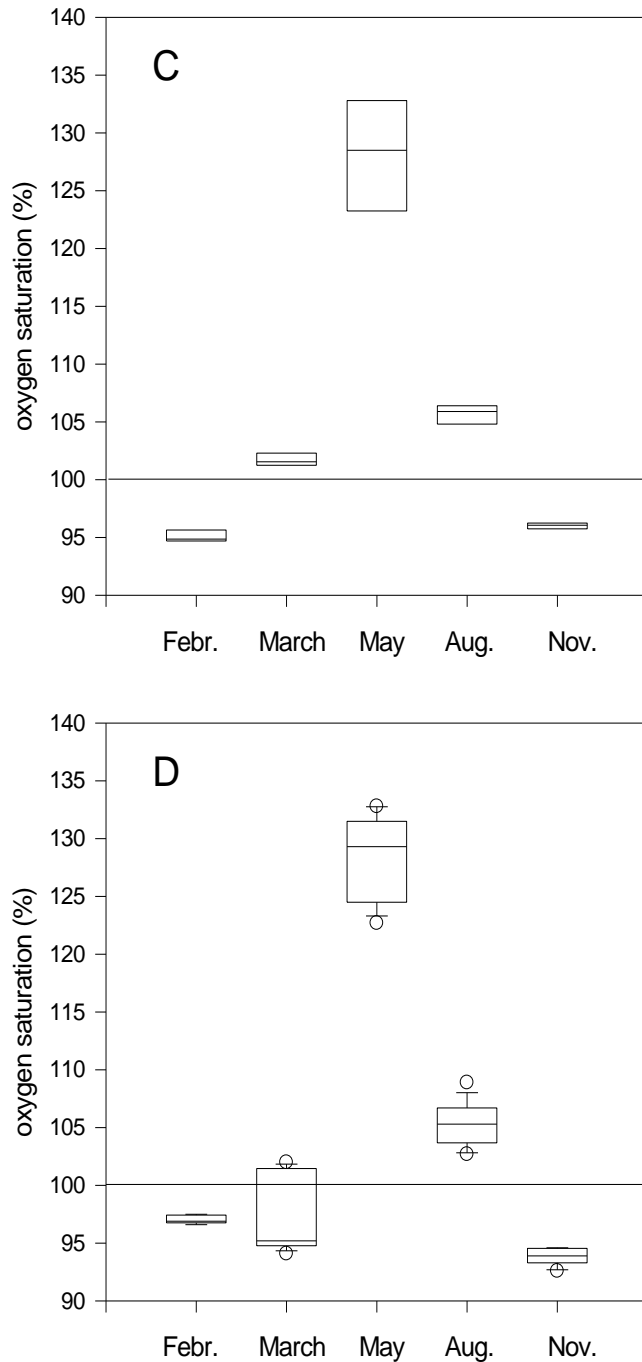


Abb. 23

Box-Whisker-Plots der Sauerstoffsättigung (%) im Jahr 2011 in der Oberflächenschicht (0 – 10 m) in der westlichen Ostsee (A), im Arkonabecken (B), im Bornholmbecken (C) und im östlichen Gotlandbecken (D)

Fig. 23

Box Whisker-Plots of oxygen saturation (%) in 2011 in the mixed surface layer (0 – 10 m) of the western Baltic (A), the Arkona Basin (B), the Bornholm Basin (C) and the eastern Gotland Basin (D)

Auch in der westlichen Ostsee und im Arkonabecken war in Bodennähe ein ausgeprägter Jahresgang zu beobachten (Abb. 24). Im Winter findet während der Beprobungen im Januar/Februar und März häufig eine tief greifende vertikale Durchmischung statt, die bis in Bodennähe reichen kann. Eine stabile Schichtung kann sich in der Regel nicht aufbauen. So liegt die Sättigung nur relativ wenig unter der des Oberflächenwassers. Mit der Entwicklung einer stabilen thermohalinen Schichtung im Frühjahr wird das Tiefenwasser weitgehend von der vertikalen Konvektion ausgeschlossen und die Sauerstoffsättigung des Bodenwassers nimmt auf Grund des Abbaus organischer Substanz ab. Die niedrigsten Werte wurden im Spätsommer/Frühherbst erreicht. Besonders auffällig war der niedrige Mittelwert (23 % Sättigung) im bodennahen Wasser des Arkonabeckens im Sommer. In den zentralen Bereichen des Beckens lag die Sättigung sogar nur zwischen 9,7 % und 13 %. Möglicherweise ist die Sedimentation der sehr späten Frühjahrsblüte (siehe oben), die einher geht mit einer raschen Schichtungsabildung, die Ursache für diese niedrigen Werte. Für die benthische Besiedlung stellen diese niedrigen Werte ein erhebliches Gefahrenpotential dar. Während die Herbststürme die Situation in der westlichen Ostsee im November bereits wieder erheblich verbessert hatten, hatte die Durchmischung im Arkonabecken den Boden noch nicht erreicht. Die Sättigung lag im Mittel bei 55 % (Abb. 24).

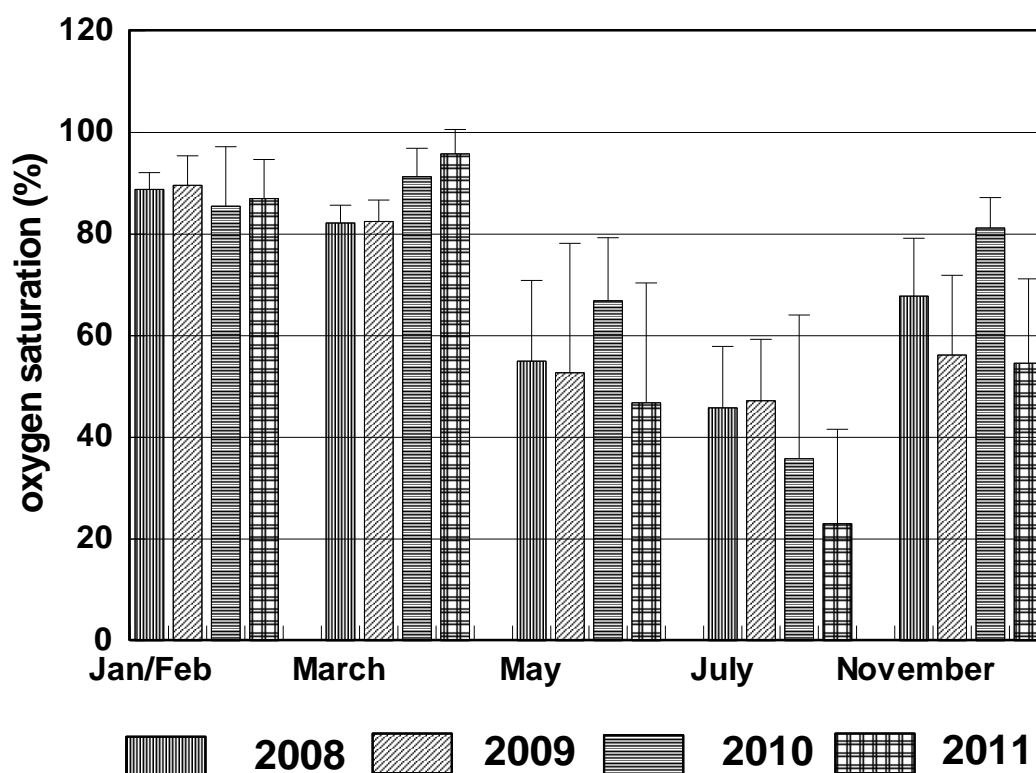


Abb. 24

Sauerstoffsättigung in Bodennähe im Arkonabecken in den Jahren 2008 bis 2011

Fig. 24

Oxygen saturation in the near bottom layer of the Arkona Basin between 2008 and 2011

Die Periode der größten Sauerstoffverarmung wird in der Regel im Spätsommer/Frühherbst beobachtet. Die Messfrequenz der Überwachungsfahrten reicht nicht aus, diesen Zeitraum zu erfassen. Jedoch führt das Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (LLUR) mit dem Mess- und Laborschiff "Haithabu" in diesem Zeitraum seit mehreren Jahren intensive Untersuchungen zum Sauerstoffgehalt in Bodennähe durch. Vom 5. bis 21. September 2011 wurde an 49 Stationen, davon 34 mit einer Wassertiefe größer 15 m, der Sauerstoffgehalt in Bodennähe gemessen (Abb. 25).

Eine Auswertung der Sauerstoffmessungen im September 2011 zeigte, dass 70 % aller Messwerte an Stationen mit Wassertiefen >15 m auf die Klasse *schlecht* oder *ungenügend* (*kleiner 2* Milligramm pro Liter) entfielen (2009: 50 %, 2002: 91 %). Ein Vergleich mit den Daten aus 2010 ist nur eingeschränkt möglich, da in diesem Jahr die Bereisung auf Grund fehlender Schiffskapazitäten 3 Wochen später als üblich stattfand, so dass bereits eine teilweise Vermischung eingetreten war. Der Anteil an Messwerten mit *mangelhaften* Sauerstoffgehalten (größer 2 und kleiner 4 Milligramm pro Liter) lag bei 9 % (2009: 29 %, 2002: 4 %). Der Anteil mit *befriedigenden* bis *guten* Sauerstoffgehalten (größer 4 Milligramm pro Liter) lag bei 21 % (2009: 21 %, 2002: 4 %). Das bisher größte Ausmaß an Sauerstoffschwund gab es im Jahr 2002 (HELCOM, 2003, NAUSCH et al., 2003). Abb. 26 zeigt einen Vergleich des September 2011 mit der Situation im Herbst 2002. Ein Vergleich mit 2010, ebenfalls dargestellt, kann aus o.g. Gründen nur eingeschränkt erfolgen.

Nach den Untersuchungen des LLUR ist der spätsommerliche bzw. frühherbstliche Sauerstoffmangel in der westlichen Ostsee ein Phänomen, das bis in die 1970er Jahre nur gelegentlich zu beobachten war, seitdem aber fast alljährlich in den tieferen Meeresbereichen und den tiefen, austauscharmen Förden beobachtet wird.

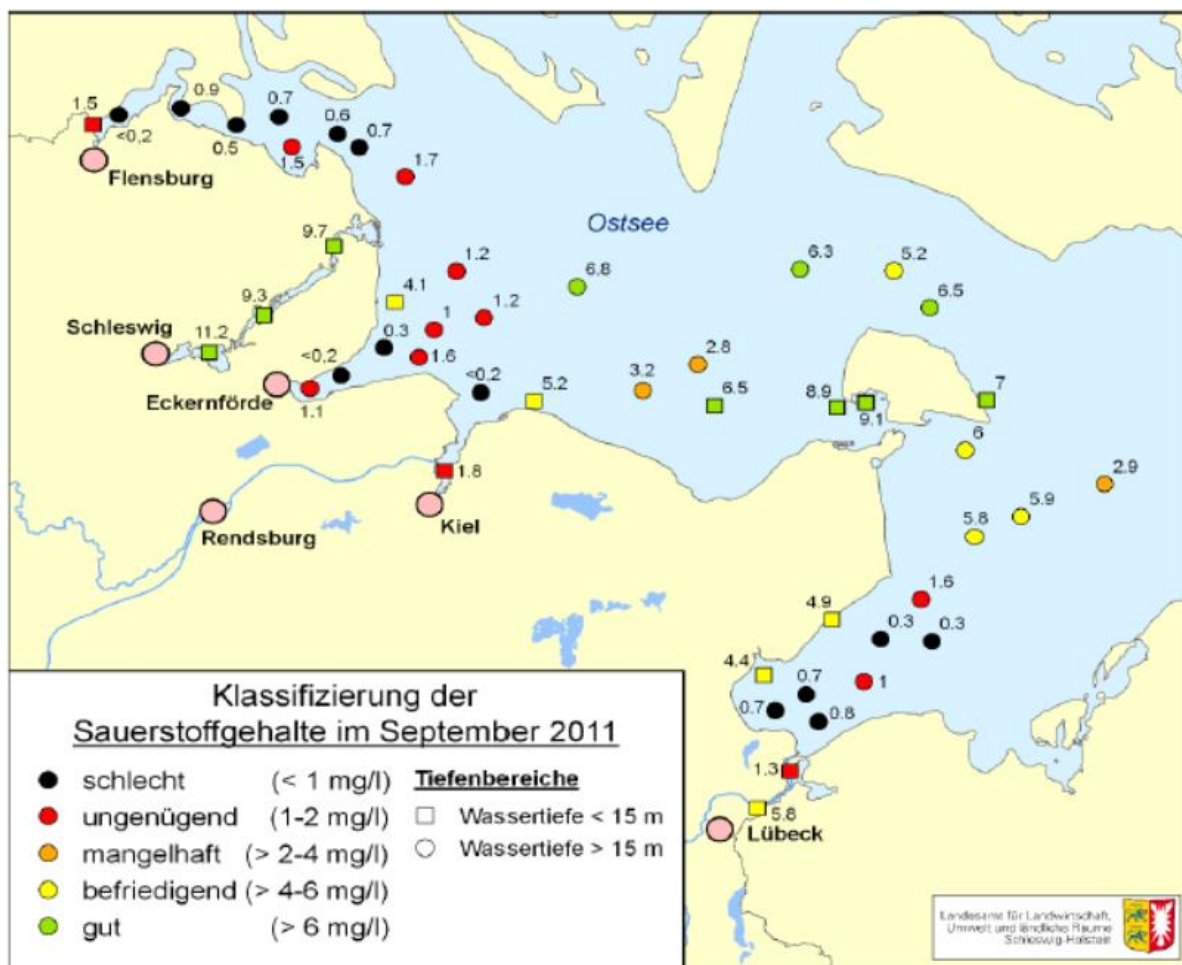


Abb. 25

Sauerstoffmangel in der westlichen Ostsee im September 2011 (LLUR 2011) –
 $\text{mg/l} \times 0.7005 = \text{ml/l}$

Fig. 25

Oxygen deficiency in the western Baltic Sea in 2011 (LLUR 2011) –
 $\text{mg/l} \times 0.7005 = \text{ml/l}$

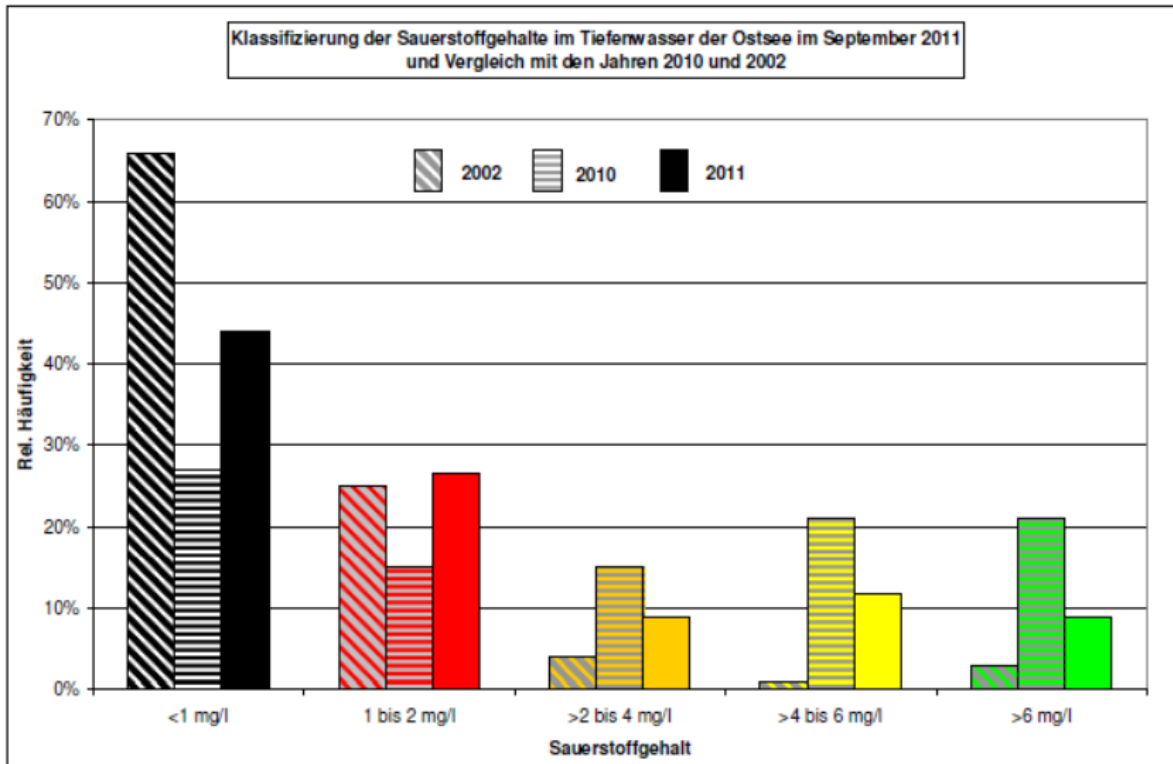


Abb.26

Klassifizierung der gemessenen Sauerstoffgehalte im Tiefenwasser der westlichen Ostsee (Stationen mit einer Wassertiefe >15 m) – LLUR, 2011

Fig. 26

Classification of the oxygen content in the deep water (water depth >15 m) in the western Baltic Sea – LLUR, 2011

Genauere Aussagen zur jahreszeitlichen Entwicklung der Sauerstoffsättigung können den Registrierungen am Messmast „Darßer Schwelle“ entnommen werden. Die Sauerstoffregistrierungen an der Bojenstation „Arkonabecken“ war 2011 leider aus technischen Gründen weitgehend nicht nutzbar (vgl. Kapitel 3).

In den weiter östlich gelegenen, tieferen Becken der Ostsee wird die Situation im Tiefenwasser dagegen vorwiegend durch das Auftreten oder Ausbleiben von starken barotropen und/oder baroklinen Einstromereignissen geprägt. Abb. 27 zeigt die Sauerstoffverhältnisse entlang eines Längsschnittes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken für die 5 durchgeführten Messfahrten. Im Tiefenwasser des Bornholmbeckens setzte nach dem letzten großen Salzwassereinbruch 2003 ein kontinuierlicher Rückgang der Sauerstoffkonzentration bis zum Jahr 2005 ein. In 80 m Wassertiefe betrug der Jahresmittelwert 2005 nur $-0,67$ ml/l, d.h. es kam zum Auftreten von Schwefelwasserstoff. Vorwiegend barokline Einströme konnten die Sauerstoffsituation im Bodenwasser in den Folgejahren wieder verbessern. So wurden auch 2011 fast durchweg oxische Verhältnisse angetroffen. Nur bei einer der 17 Beprobungen (16. Oktober) wurden kurzzeitig geringe Mengen Schwefelwasserstoff gemessen. Der Jahresmittelwert von $0,78$ ml/l liegt jedoch unter dem der Vorjahre (Tab. 5). Die hohe Standardabweichung des Jahresmittelwertes lässt auf ein sehr dynamisches Geschehen schließen. Ähnlich hohe Standardabweichungen finden sich für die Temperatur und den Salzgehalt (Tab. 5) sowie für die Nährstoffe ((Tab. 9). Das wichtigste Einstromereignis 2011 war ein barotroper Einstrom Ende November/Anfang Dezember, dessen Auswirkungen aber erst Anfang des Jahres 2012 im Bornholmbecken beobachtet werden konnten.

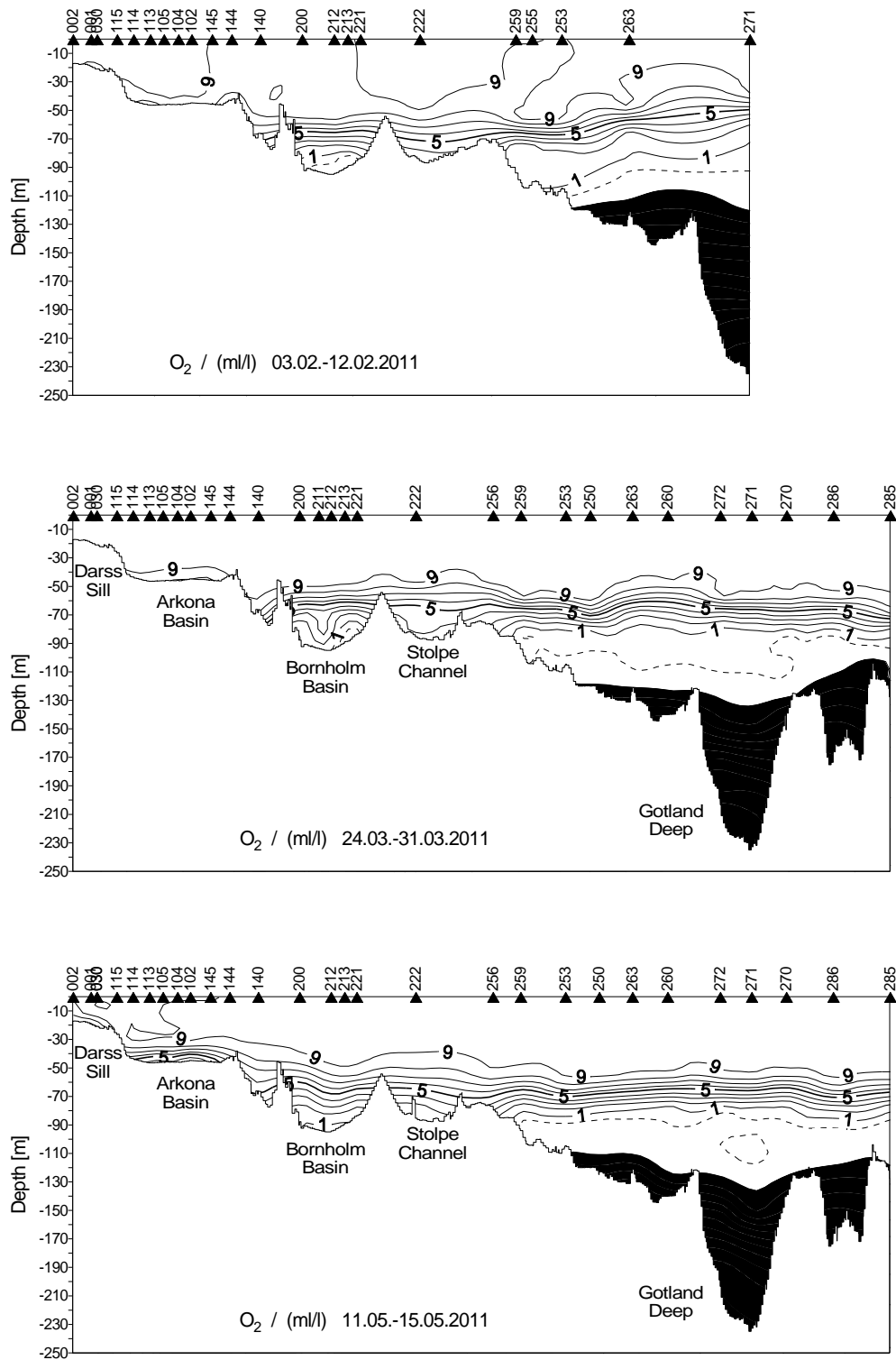


Abb. 27

Vertikale Verteilung des Sauerstoff/Schwefelwasserstoffgehaltes 2011 zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 27

Vertical distribution of oxygen resp. hydrogen sulphide in 2011 between Darss Sill and northern Gotland Basin

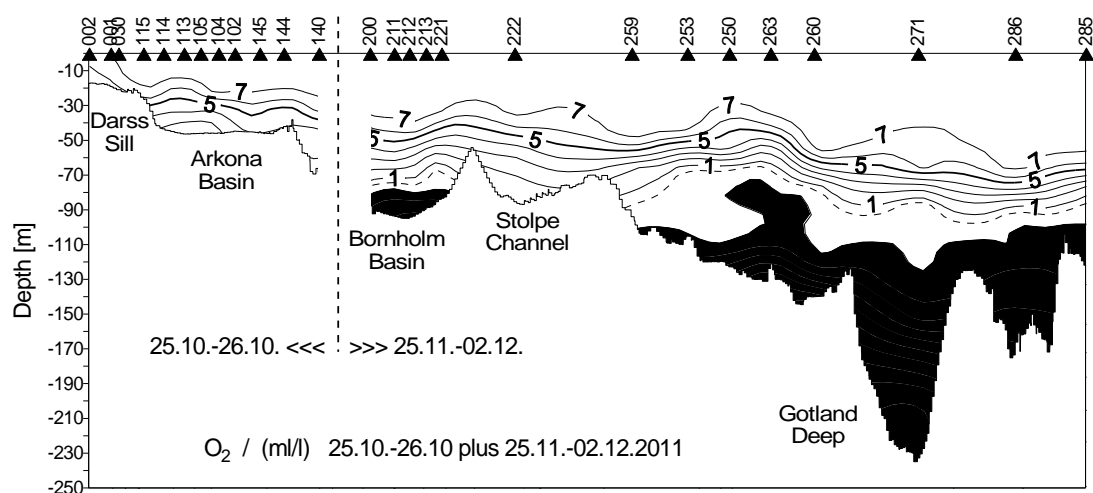
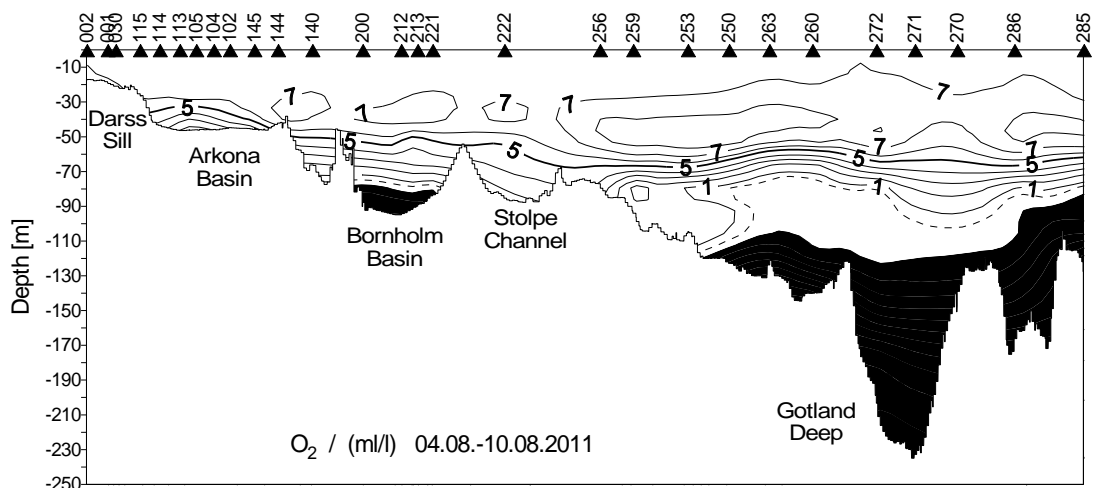


Abb. 27 Forts.

Vertikale Verteilung des Sauerstoff/Schwefelwasserstoffgehaltes 2011 zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 27 cont.

Vertical distribution of oxygen resp. hydrogen sulphide in 2011 between Darss Sill and northern Gotland Basin

Im Tiefenwasser des östlichen Gotlandbeckens hielt 2011 die Stagnationsperiode unvermindert an. Die Temperatur und der Salzgehalt gingen in 200 m Wassertiefe im Vergleich zum Vorjahr weiter zurück (Tab. 5, vgl. auch Kapitel 6.1.1 und 6.2). Die extrem geringen Standardabweichungen beider Parameter verdeutlichen die große Stabilität des Systems im Jahresverlauf. Dies spiegelt sich auch im Sauerstoff/Schwefelwasserstoffhaushalt wider. Die schwefelwasserstoffhaltige Schicht hat unverändert eine Mächtigkeit von ca. 100 m. Der Mittelwert 2011 für den Schwefelwasserstoffgehalt, ausgedrückt in negativen Sauerstoffäquivalenten (-3,98 ml/l) liegt nur geringfügig unter dem Wert des Vorjahres (-4,29 ml/l). Der Wert liegt noch über dem am Ende der letzten Stagnationsperiode im Jahr 2002 gemessenen Wert (-3,82 ml/l). Ähnliche Aussagen lassen sich für das nördlicher gelegene Farötief treffen. Auch hier ist ein leichter Rückgang von Temperatur und Salzgehalt (Tab. 5) wie auch der Schwefelwasserstoffkonzentration (Tab. 9) zu beobachten. Trotzdem ist der Jahresmittelwert 2011 in 150 m Wassertiefe (-1,57 ml/l) vergleichbar mit dem des Jahres 2002 (1,56 ml/l).

Die für das östliche Gotlandbecken getroffenen Aussagen sind auch für den Bereich westlich Gotland gültig. Wir trafen im Landsorttief eine weitgehend stabile Stagnationsphase an (Tab. 5). Die gesamte Wassersäule zwischen 100 m und dem Boden war anoxisch. Auch im 100 m- Horizont des weiter südlich gelegenen Karlsötiefs wurde während des gesamten Jahres Schwefelwasserstoff angetroffen, wenngleich die höhere Standardabweichung für eine höhere Dynamik spricht. In den Jahren 2007 – 2009 wurde sogar kurzzeitig bis zum Boden reichende Konvektion beobachtet (NAUSCH et al., 2011a).

6.4. Anorganische Nährstoffe

Die Eutrophierung wird nach wie vor als schwerwiegendste anthropogene Belastung der Ostsee angesehen (HELCOM, 2007). 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). Obwohl die Ostseeanrainerstaaten bereits umfangreiche Maßnahmen zur Reduzierung des Nährstoffeintrags unternommen haben, sind weitere Reduktionen unabdingbar und sind wesentliches Element des „Baltic Sea Action Plans“ der HELCOM (HELCOM, 2007). Auch in Deutschland konnten insbesondere bei den Punktquellen erhebliche Reduzierungen des Nährstoffeintrags erzielt werden (NAUSCH et al., 2011b). Trotzdem sieht der „Baltic Sea Action Plan“ für Deutschland eine Reduktion von 240 t Phosphor pro Jahr vor, was etwa 50 % des mittleren Eintrags der Jahresreihe 2000/2010 von 494 t Phosphor pro Jahr entspricht. Für Stickstoff ist eine Reduktion um 5620 t/a geplant. Dies entspricht ca. 30 % des Eintrags des Mittels der Jahre 2000/2010 von 18 895 t Stickstoff pro Jahr. Diese Reduktion muss fast ausschließlich im Bereich der diffusen Quellen realisiert werden.

Um die Effekte des erhöhten Nährstoffeintrags, aber auch um den Erfolg von eingeleiteten Maßnahmen bewerten zu können, ist die Überwachung der Nährstoffsituation essentiell. Sie gehört seit der Etablierung eines einheitlichen Überwachungsprogramms der HELCOM Ende der 1970er Jahre 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 & MATTHÄUS, 1991; NAUSCH & NEHRING, 1996). Abb. 28 stellt dies exemplarisch am Beispiel der Bornholmsee dar. Im Winter bildet sich ein stabiles Nährstoffplateau auf hohem Niveau aus, das in der Regel 2–3 Monate erhalten bleibt (NAUSCH et al., 2008b). Dieses Plateau wird in der Regel für Trenduntersuchungen genutzt. Durch den lang anhaltenden und strengen Winter 2010/2011 war dieses Plateau im Winter 2011 sehr deutlich sichtbar und hatte bis Anfang April Bestand. Mit Einsetzen der Frühjahrsblüte wurde das Nitratreservoir innerhalb von 2–3 Wochen vollständig aufgebraucht. Anfang Mai konnte kein Nitrat mehr nachgewiesen werden. Damit kam es zur Stickstofflimitation und zum Zusammenbruch der Frühjahrsblüte. Bis Ende November lagen die Nitratkonzentrationen unterhalb der Nachweisgrenze. Erst Anfang Dezember konnten wieder $0,8 \mu\text{mol/l}$ Nitrat gemessen werden.

Die Phosphatkonzentrationen nehmen dagegen im Frühjahr langsamer ab. Anfang Mai, als kein Nitrat mehr nachgewiesen werden konnte, wurden noch $0,13 \mu\text{mol/l}$ Phosphat gemessen. Bis zum Sommer gehen die Konzentrationen weiter zurück. Besonders wenn intensive Blaualgenblüten auftreten, wird die Nachweisgrenze erreicht. So konnte Anfang August kein Phosphat mehr gefunden werden. Im Herbst nehmen die Phosphatkonzentrationen infolge der Dominanz abbauender Prozesse allmählich wieder zu und erreichen im Februar des Folgejahres wieder typische Winterwerte. Dieser Jahresgang kann auch den Abbildungen 30 und 31 entnommen werden.

Auf Grund des lang anhaltenden Winters 2010/2011 konnte die Plateauphase 2011 andeutungsweise auch in der Arkonasee nachgewiesen werden. In der Regel verhindert aber das frühe Einsetzen der Frühjahrsblüte im Arkonabecken und vor allem in der westlichen Ostsee diese stabile Plateau. Zusätzlich verursacht die große Hydrodynamik dieses Seegebietes größere Variationen im Nährstoffregime. Die winterlichen Phosphat- und Nitratwerte im Oberflächenwasser sind in Tab. 8 zusammen gefasst. Die Phosphatwerte zeigten in den letzten drei Jahren ein recht stabiles Niveau nachdem 2005 und 2006 sehr hohe Winterkonzentrationen gefunden wurden. Die Nitratwerte zeigten kein einheitliches Bild, wenngleich sie sich generell auf niedrigem Niveau bewegen. Aus beiden Konzentrationsniveaus lässt sich ein N/P-Verhältnis ableiten, das deutlich unter dem Redfield-Verhältnis von 16:1 liegt (REDFIELD et al., 1963) und auch die Ursache für den oben beschriebenen Jahresgang darstellt.

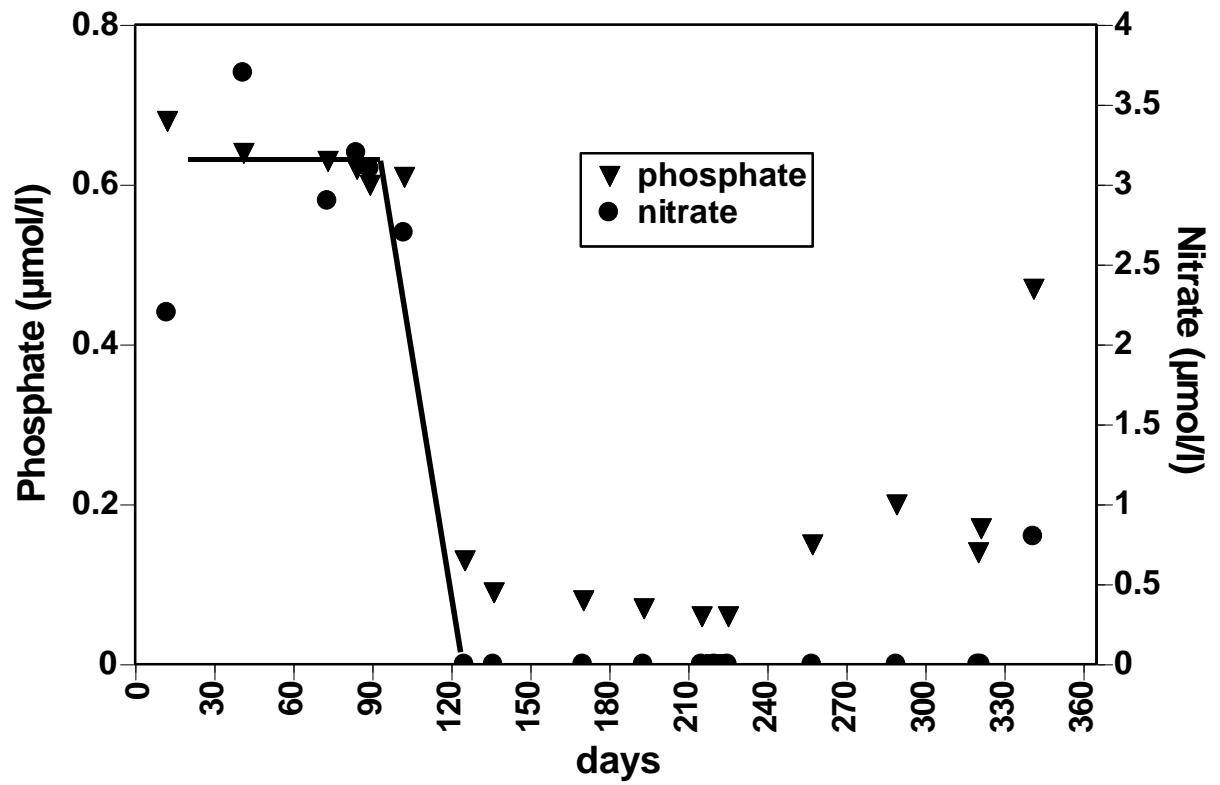


Abb. 28

Phosphat- und Nitratjahresgang 2011 im Oberflächenwasser (0 – 10 m) der Bornholmsee (Station 213) – IOW und SMHI Daten

Fig. 28

Annual phosphate and nitrate cycle in 2011 in the surface layer (0 – 10 m) of the Bornholm Sea – IOW and SMHI data

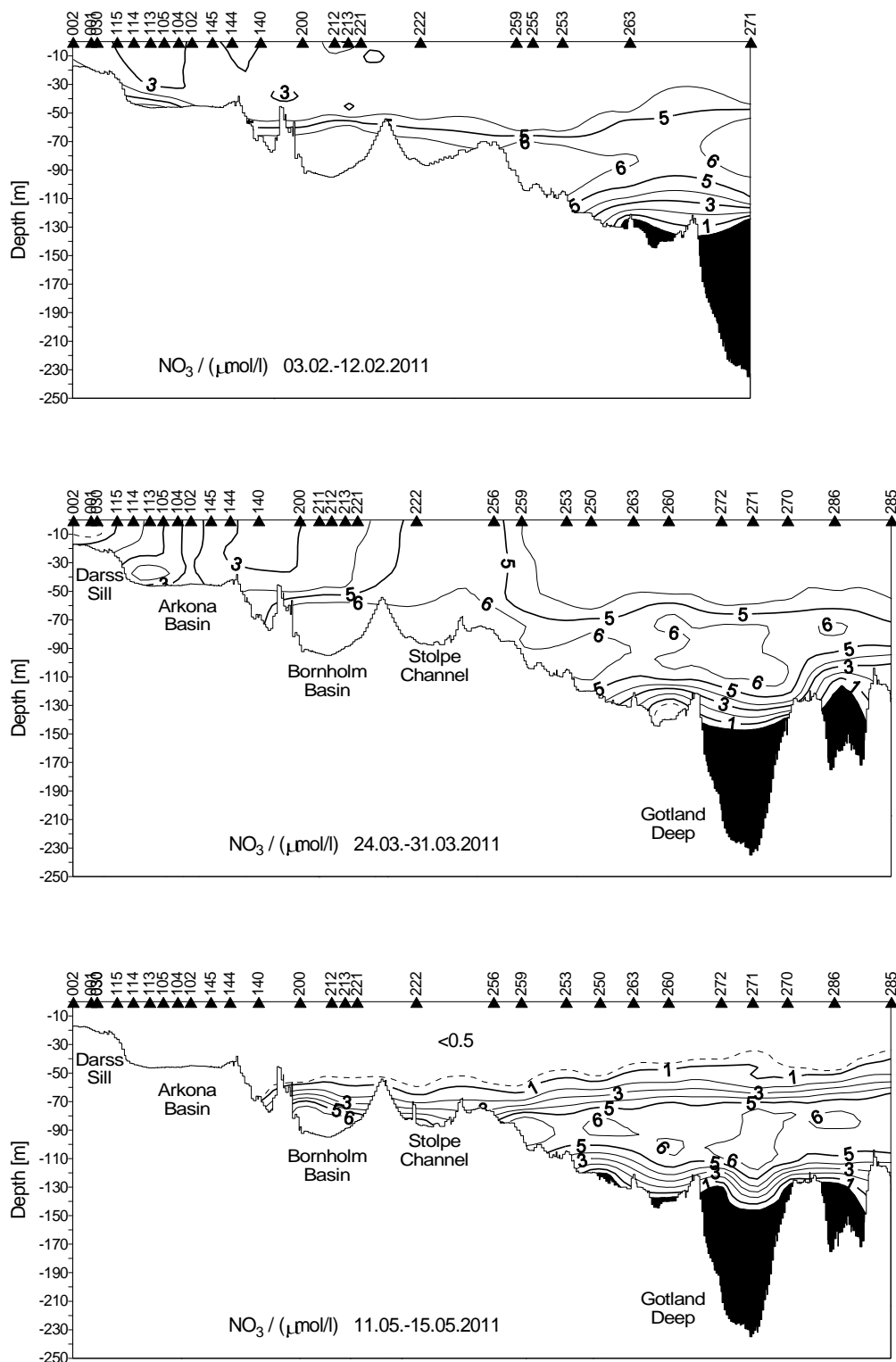


Abb. 29

Vertikale Verteilung des Nitratgehaltes 2011 zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 29

Vertical distribution of nitrate in 2011 between Darss Sill and northern Gotland Basin

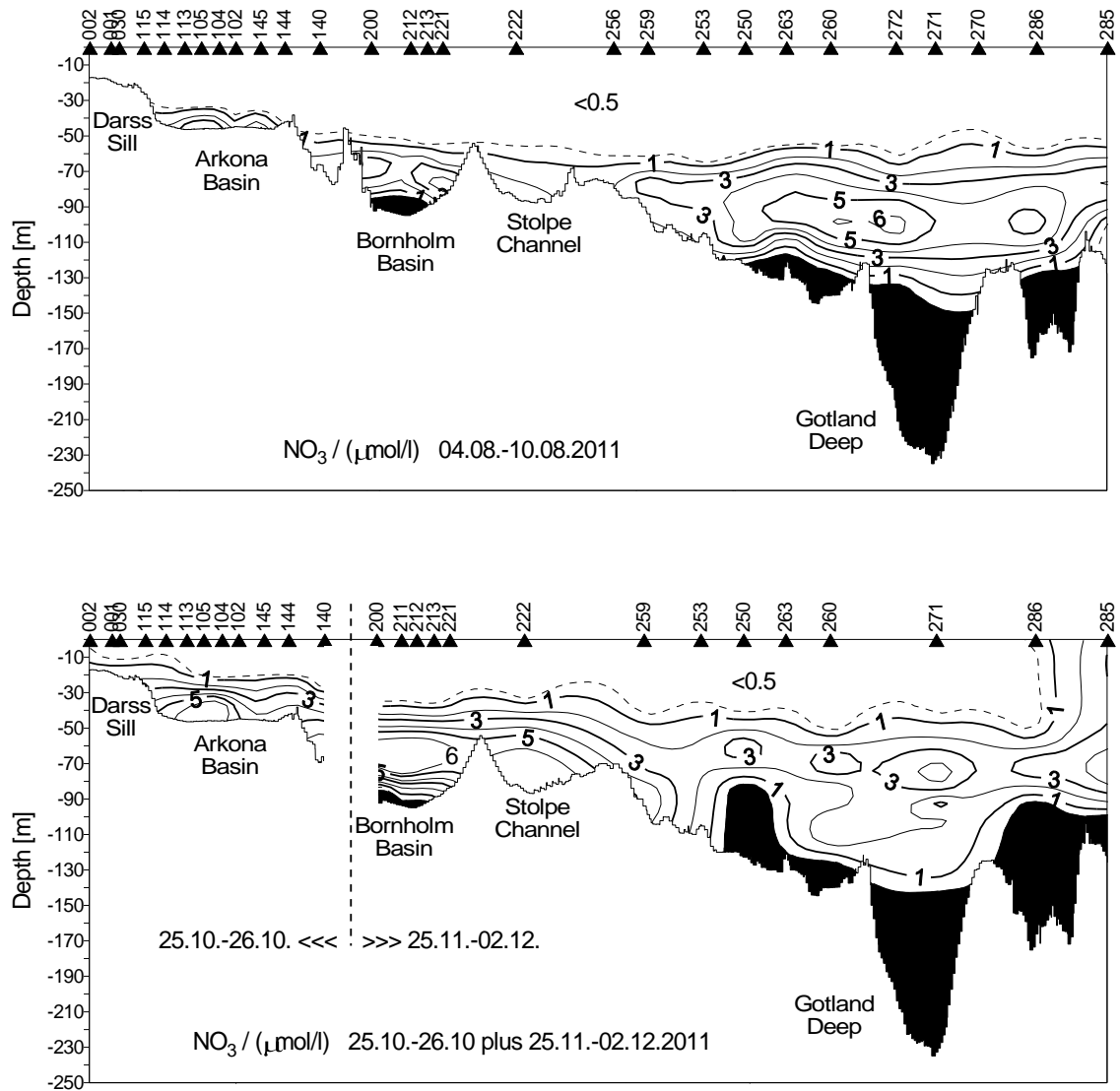


Abb. 29 Forts.

Vertikale Verteilung des Nitratgehaltes 2011 zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 29 cont.

Vertical distribution of nitrate in 2011 between Darss Sill and northern Gotland Basin

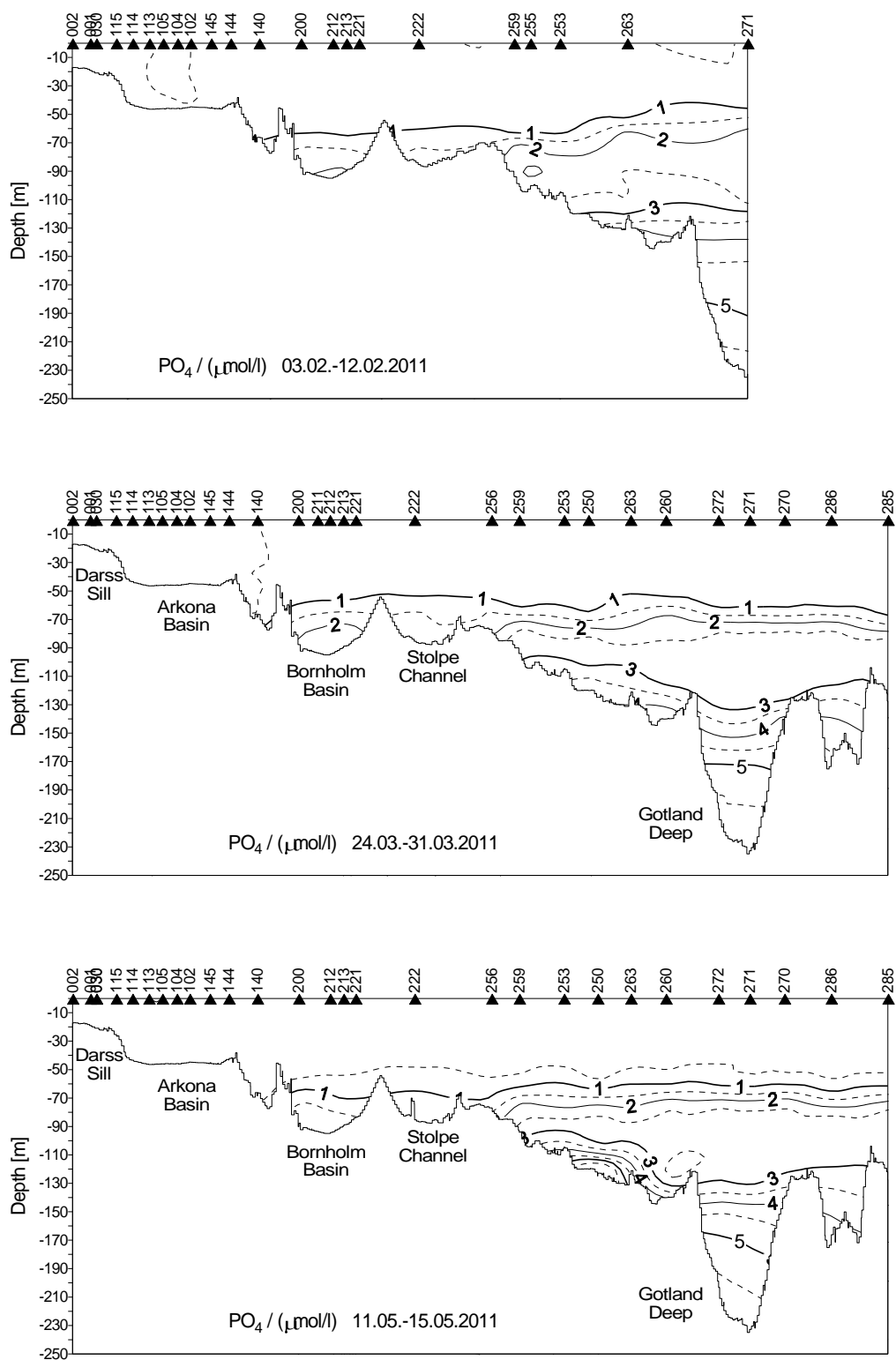


Abb. 30

Vertikale Verteilung des Phosphatgehaltes 2011 zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 30

Vertical distribution of phosphate in 2011 between Darss Sill and northern Gotland Basin

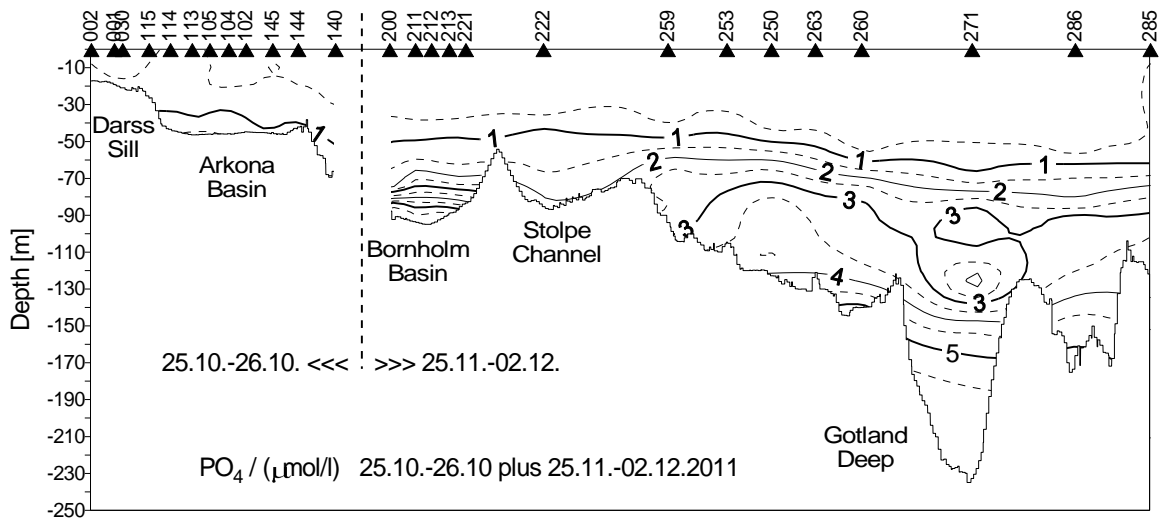
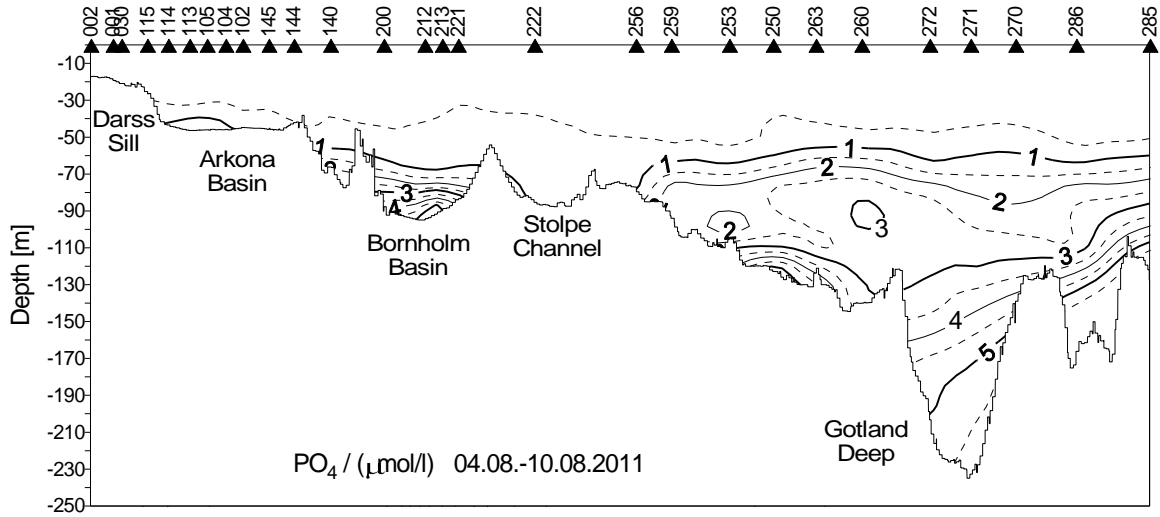


Abb. 30 Forts.

Vertikale Verteilung des Phosphatgehaltes 2011 zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 30 cont.

Vertical distribution of phosphate in 2011 between Darss Sill and northern Gotland Basin

Tab. 8

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

Table 8

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

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

Station	Monat	2007	2008	2009	2010	2011
360 (Fehmarnbelt)	Feb.	0,70 \pm 0,0	0,78 \pm 0,00	0,63 \pm 0,04	0,47 \pm 0,01	0,58 \pm 0,01
022 (Lübecker Bucht)	Feb.	0,62 \pm 0,00	0,74 \pm 0,01	0,70 \pm 0,00	0,61 \pm 0,01	
012 (Meckl. Bucht)	Feb.	0,57 \pm 0,00	0,81 \pm 0,00	0,67 \pm 0,02	0,62 \pm 0,02	0,55 \pm 0,00
113 (Arkonasee)	Feb.	0,81 \pm 0,01	0,62 \pm 0,00	0,58 \pm 0,00	0,56 \pm 0,02	0,51 \pm 0,01
213 (Bornholmtief)	Feb.	0,80 \pm 0,04	0,74 \pm 0,00	0,70 \pm 0,00	0,56 \pm 0,01	0,54 \pm 0,01
271 (Gotlandtief)	Feb.	0,56 \pm 0,00	0,64 \pm 0,00	0,59 \pm 0,01	0,62 \pm 0,0*	0,54 \pm 0,01
286 (Fårötief)	Feb.	0,56 \pm 0,02	*	0,64 \pm 0,02	0,62 \pm 0,0*	0,60 \pm 0,00
284 (Landsorttief)	Feb.	0,70 \pm 0,02	* -	0,55 \pm 0,01	0,63 \pm 0,0*	0,57 \pm 0,01
245 (Karlsötief)	Feb.	0,76 \pm 0,00	*	0,67 \pm 0,01	0,65 \pm 0,0*	0,60 \pm 0,01

* SMHI data

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

Station	Monat	2007	2008	2009	2010	2011
360 (Fehmarnbelt)	Feb,	8,6 \pm 0,0	6,5 \pm 0,0	3,6 \pm 0,3	4,9 \pm 0,0	5,9 \pm 0,2
022 (Lübecker Bucht)	Feb,	9,6 \pm 0,5	6,6 \pm 0,0	3,8 \pm 0,0	6,4 \pm 0,2	
012 (Meckl, Bucht)	Feb,	6,5 \pm 0,1	7,8 \pm 0,0	3,7 \pm 0,3	4,5 \pm 0,0	4,8 \pm 0,0
113 (Arkonasee)	Feb,	4,0 \pm 0,2	2,7 \pm 0,0	2,8 \pm 0,0	4,1 \pm 0,1	2,6 \pm 0,0
213 (Bornholmtief)	Feb,	3,1 \pm 0,1	3,5 \pm 0,0	3,1 \pm 0,0	3,6 \pm 0,0	3,7 \pm 0,0
271 (Gotlandtief)	Feb,	2,9 \pm 0,0	3,3 \pm 0,0	3,6 \pm 0,0	3,5 \pm 0,0	3,2 \pm 0,0
286 (Fårötief)	Feb,	3,3 \pm 0,1	*	3,8 \pm 0,0	3,9 \pm 0,0	3,8 \pm 0,0
284 (Landsortief)	Feb,	4,4 \pm 0,0	*	3,6 \pm 0,0		2,7 \pm 0,0
245 (Karlsötief)	Feb,	3,6 \pm 0,0	*	3,5 \pm 0,0	3,5 \pm 0,0	3,3 \pm 0,0

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

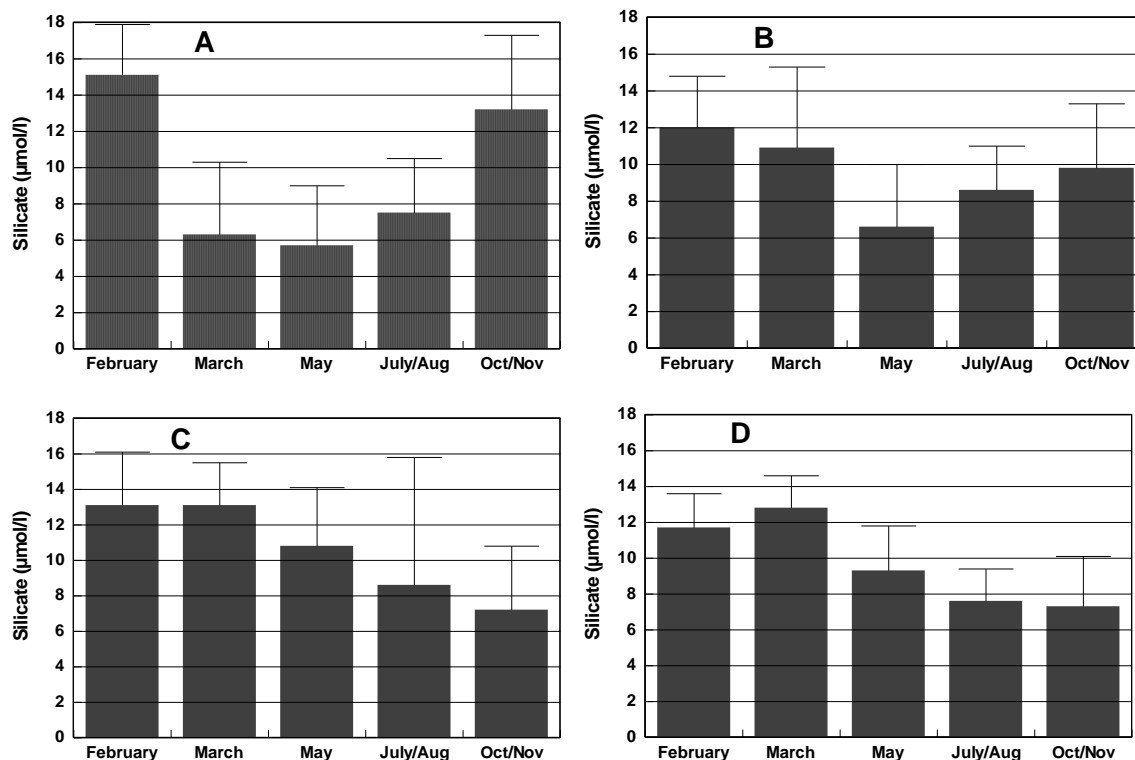


Abb. 31

Mittlerer Jahresgang der Silikatkonzentrationen in der Oberflächenschicht (0 – 10 m) in der Mecklenburger Bucht (A), der Arkonasee (B), der Bornholmsee (C) und der östlichen Gotlandsee (D), gemittelt für den Zeitraum 1993 – 2011

Fig. 31

Mean annual cycle of silicate concentrations in the surface layer (0 – 10 m) in the Mecklenburg Bight (A), the Arkona Sea (B), the Bornholm Sea (C) and the eastern Gotland Sea (D), averaged for the period 1993 - 2011

Die Silikatjahresgänge (Abb. 31) unterscheiden sich deutlich von denen des Phosphats und Nitrats. Im Mittel ist während des gesamten Jahresverlaufs ausreichend Silikat vorhanden, so dass das Wachstum der Kieselalgen normalerweise nicht durch Silikat begrenzt wird. Monatliche Messungen in den Jahren 2009 und 2010 in der westlichen Ostsee zeigten jedoch, dass es im Februar/März zu einer drastischen Abnahme des Silikats kommen kann (NAUSCH et al., 2011a). Messwerte unter 1 µmol/l weisen eindeutig auf eine kurzzeitige Silikatlimitation hin.

Eine Betrachtung der gemittelten Jahresgänge für die Zeitreihe 1993 – 2011 macht Unterschiede zwischen den Seegebieten deutlich. In der Mecklenburger Bucht findet in der Regel eine intensive Frühjahrsblüte der Kieselalgen statt, die zu einem deutlichen

Silikatrückgang um ca. 10 $\mu\text{mol/l}$ vom Februar bis zum Mai führt. In der Arkonasee kann ebenfalls eine Kieselalgenblüte beobachtet werden, die jedoch später einsetzt; von Februar bis März nehmen die Messwerte nur geringfügig ab. Auch scheint die Intensität der Blüte im Mittel geringer zu sein, da die Differenz zwischen Februar und Mai nur knapp 6 $\mu\text{mol/l}$ beträgt. In der Bornholmsee und der östlichen Gotlandsee ist der Silikatverbrauch vom Winter bis zu Mai nur gering (2,3 bzw. 3,5 $\mu\text{mol/l}$). Dies ist besonders einer Verschiebung in der Artenzusammensetzung in den 1990er Jahren geschuldet. In beiden Seegebieten ist in diesem Zeitraum der Anteil der Diatomeen zugunsten der Dinoflagellaten stark zurückgegangen (WASMUND et al., 1998, 2000). In den zurückliegenden Jahren kann jedoch eine Rückkehr der Diatomeen beobachtet werden. Eine Beziehung zu kalten Wintern, die der Frühjahrsblüte voraus gehen wird postuliert (WASMUND et al., 2012). Zum Herbst hin wird in beiden Seegebieten ein leichter Rückgang des Silikatgehaltes beobachtet, der mit einer Herbstblüte in Zusammenhang gebracht werden kann.

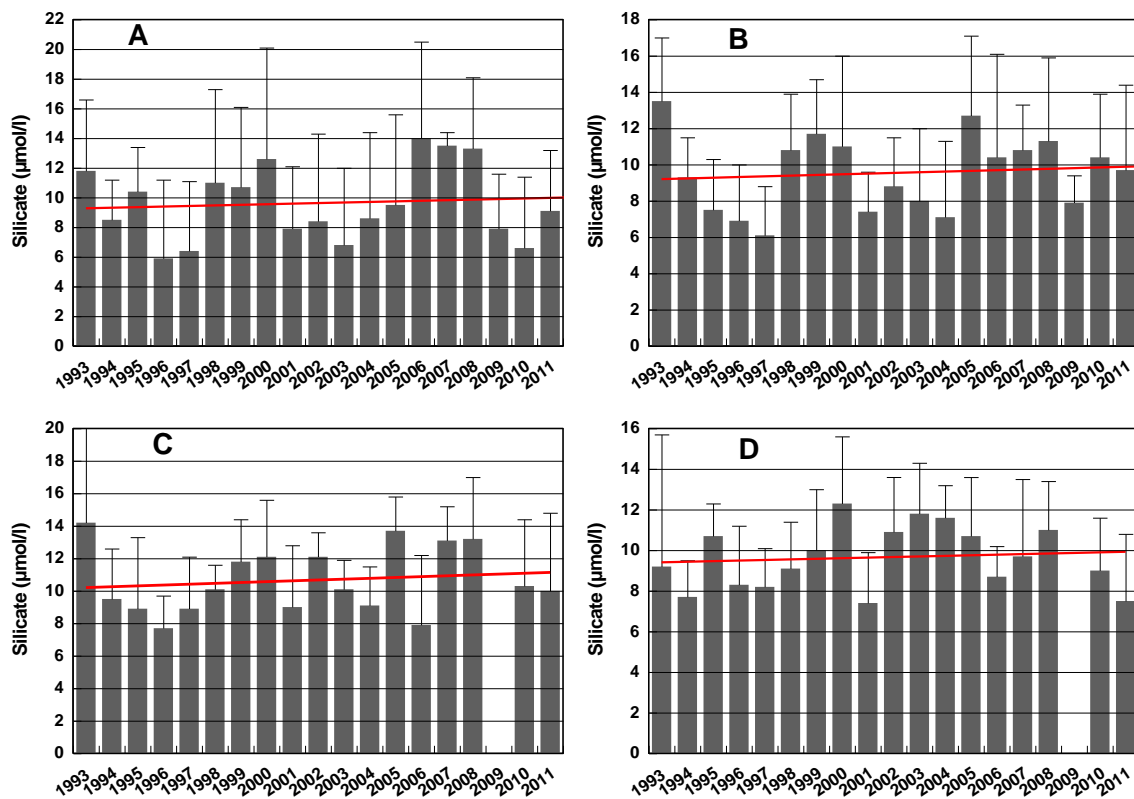


Abb. 32

Jahresmittelwerte der Silikatkonzentrationen in der Oberflächenschicht (0 – 10 m) in der Mecklenburger Bucht (A), der Arkonasee (B), der Bornholmsee (C) und der östlichen Gotlandsee (D), gemittelt für den Zeitraum 1993 – 2011

Fig. 32

Annual mean silicate concentrations in the surface layer (0 – 10 m) in the Mecklenburg Bight (A), the Arkona Sea (B), the Bornholm Sea (C) and the eastern Gotland Sea (D), averaged for the period 1993 – 2011

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

Eine Betrachtung der Datenreihe 1993 – 2011 bestätigt dies. Die Mittelwerte der 19-jährigen Serie liegen für die westliche Ostsee bei 9,6 $\mu\text{mol/l}$, für die Arkonasee bei 9,5 $\mu\text{mol/l}$, in der Bornholmsee bei 9,7 $\mu\text{mol/l}$ und in der östlichen Gotlandsee bei 9,9 $\mu\text{mol/l}$. Die in der Abb. 32 gezeigten Trendlinien bestätigen, dass keine weitere Abnahme der Silikatkonzentrationen zu beobachten ist. Für alle Seegebiete liegt das Bestimmtheitsmaß r^2 zwischen 0,01 und 0,02.

Tab. 9

Jahresmittelwerte und Standardabweichungen für Phosphat, Nitrat und Ammonium im Tiefenwasser der zentralen Ostsee: IOW sowie SMHI Daten (n = 8 – 17)

Table 9

Annual means and standard deviations for phosphate, nitrate and ammonium in the deep water of the central Baltic Sea: IOW and SMHI data (n = 8 – 17)

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

Station	Tiefe/m	2007	2008	2009	2010	2011
213 (Bornholmtief)	80	2,73 \pm 1,16	2,81 \pm 1,08	2,13 \pm 0,79	2,22 \pm 0,62	2,66 \pm 1,39
271 (Gotlandtief)	200	4,03 \pm 0,33	4,62 \pm 0,23	5,22 \pm 0,15	5,39 \pm 0,29	5,66 \pm 0,28
286 (Färötief)	150	3,84 \pm 0,19	4,33 \pm 0,26	4,40 \pm 0,23	4,27 \pm 0,33	4,34 \pm 0,61
284 (Landsorttief)	400	3,70 \pm 0,17	3,97 \pm 0,18	4,07 \pm 0,19	3,82 \pm 0,17	3,67 \pm 0,45
245 (Karlsötief)	100	4,09 \pm 0,19	4,00 \pm 0,57	4,05 \pm 0,26	4,37 \pm 0,44	4,22 \pm 0,33

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

Station	Tiefe/m	2007	2008	2009	2010	2011
213 (Bornholmtief)	80	6,6 \pm 3,75	6,1 \pm 2,4	6,4 \pm 2,1	7,51 \pm 0,1	4,55 \pm 2,78
271 (Gotlandtief)	200	0,0 \pm 0,0	0,0 \pm 0,0	0,0 \pm 0,0	0,0 \pm 0,0	0,0 \pm 0,0
286 (Fårötief)	150	0,0 \pm 0,0	0,0 \pm 0,0	0,0 \pm 0,0	0,0 \pm 0,0	0,0 \pm 0,0
284 (Landsortief)	400	0,0 \pm 0,0	0,0 \pm 0,0	0,0 \pm 0,0	0,0 \pm 0,0	0,0 \pm 0,0
245 (Karlsötief)	100	0,0 \pm 0,0	0,1 \pm 0,3	0,01 \pm 0,05	0,0 \pm 0,0	0,0 \pm 0,0

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

Station	Tiefe/m	2007	2008	2009	2010	2011
213 (Bornholmtief)	80	2,1 \pm 3,2	0,9 \pm 1,9	0,4 \pm 0,8	0,1 \pm 0,1	2,1 + 3,4
271 (Gotlandtief)	200	11,1 \pm 1,6	15,5 \pm 1,7	19,6 \pm 1,4	21,3 \pm 2,6	20,2 + 2,8
286 (Fårötief)	150	5,5 \pm 1,2	8,3 \pm 1,7	9,1 \pm 1,5	9,8 \pm 1,3	9,0 \pm 1,4
284 (Landsortief)	400	5,8 \pm 1,1	7,4 \pm 1,2	8,2 \pm 1,2	6,8 \pm 1,0	6,3 \pm 1,7
245 (Karlsötief)	100	7,9 \pm 1,8	7,8 \pm 1,4	6,8 \pm 2,0 \pm	8,4 \pm 2,3	9,7 \pm 3,5

Die vertikale Verteilung der wichtigsten Nährstoffe Phosphat und Nitrat entlang des Hauptschnittes durch die Ostsee kann für die fünf durchgeführten Messfahrten ebenfalls den Abb. 29 und 30 entnommen werden. Es muss beachtet werden, dass unter anoxischen Bedingungen Ammonium das Endprodukt der Mineralisation der organischen Substanz darstellt.

Verallgemeinernde Aussagen zur Vertikalverteilung der Nährstoffe in den flachen Seegebieten der westlichen Ostsee sind nur eingeschränkt möglich. Die große Hydrodynamik des Gebietes führt zu variierenden Schichtungen von Temperatur und Salzgehalt, sehr unterschiedliche Wassermassen können angetroffen werden.

Eindeutiger sind die Aussagen für die tieferen Becken der Ostsee. Dort wird die Situation vorwiegend durch das Auftreten oder Ausbleiben von starken barotropen oder baroklinen Einstromprozessen geprägt. Der Salzwassereinbruch vom Januar 2003 war das letzte starke Einstromereignis in die Ostsee, so dass die Nährstoffverhältnisse im Tiefenwasser seit 2005 durch eine lang anhaltende Stagnationsphase bestimmt werden.

Nur im Bornholmbecken können auch kleinere Einstromereignisse wirksam werden. Wie in den Vorjahren war das Tiefenwasser auch 2011 weitgehend belüftet. Allerdings war der Jahresmittelwert für den Sauerstoff in 80 m Wassertiefe geringer als im Vorjahr (Tab. 5). Zusammen mit einer großen Variation im Jahresverlauf wirkt sich dies auch auf die Nährstoffverhältnisse aus. Im Mittel waren höhere Phosphat- und Ammoniumkonzentrationen als im Vorjahr zu beobachten; der Nitratgehalt ging zurück. Die Auswirkungen des wichtigsten Einstromereignisses 2011, des barotropen Einstroms vom November/Dezember, konnten erst Anfang des Jahres 2012 im Bornholmbecken beobachtet werden.

Im Tiefenwasser des östlichen und westlichen Gotlandbeckens hielt 2011 die Stagnationsperiode unvermindert an. Nitrat konnte dort letztmalig im Jahr 2005 nachgewiesen werden. Ammonium- und Phosphatwerte stabilisieren sich auf dem Niveau des Vorjahres (Tab. 9) und sind vergleichbar mit den Konzentrationen, die am Ende der letzten langen Stagnationsphase 2002 gemessen wurden.

6.5. Natürliche organische Verbindungen

Natürliche organische Verbindungen werden sowohl in terrestrischen als auch marinen Ökosystemen durch photosynthetisch aktive Organismen aus atmosphärischem CO₂ aufgebaut. Mithilfe des Photosynthesystems wird die für die Synthese erforderliche Energie aus dem Sonnenlicht bereitgestellt. Neben CO₂ sind darüber hinaus anorganische Stickstoff- und Phosphorverbindungen sowie eine Reihe weiterer Spurenstoffe für diesen Prozess essentiell, der auch als Primärproduktion bezeichnet wird. Neben der Neubildung organischer Verbindungen wird bei der Photosynthese gleichzeitig Sauerstoff freigesetzt. Durch eine Vielzahl unterschiedlicher kataboler und anaboler Reaktionen werden aus den neu gebildeten Verbindungen alle organischen Substanzen aufgebaut, die Organismen zur Aufrechterhaltung ihrer Funktion benötigen.

Während photosynthetisch aktive Organismen weitgehend in der Lage sind, alle zur Aufrechterhaltung des zellulären Stoffwechsels erforderlichen Verbindungen selbst aufzubauen, sind alle nicht zur Photosynthese befähigten Organismen darauf angewiesen, relativ energiereiche organische Verbindungen aufzunehmen. Im Rahmen ihres Stoffwechsels nutzen sie diese Verbindungen sowohl zur Gewinnung der (chemischen) Energie, die zur Aufrechterhaltung ihres Stoffwechsels erforderlich ist, als auch als

Ausgangsverbindungen zur Synthese der vom Organismus benötigten Stoffe. Dabei wird - unter Aufnahme von Sauerstoff - neben CO_2 und anorganischen Stickstoff- und Phosphorverbindungen auch eine Vielzahl unterschiedlicher organischer Verbindungen freigesetzt. Während einige dieser Stoffe von anderen Organismen relativ schnell aufgenommen und in ihrem Stoffwechsel verwertet werden können, sind andere Verbindungen nur schwer weiter umzusetzen. Da ihr Abbau spezialisierten Organismen vorbehalten bleibt, erscheinen sie 'stabil' (refraktär) zu sein und sich langfristig im Ökosystem anzureichern. Sie werden dadurch dem Kreislauf zumindest vorübergehend entzogen. Werden organische Verbindungen in einem Ökosystem dauerhaft entzogen, wird dadurch auch das für ihre Synthese erforderliche atmosphärische CO_2 dauerhaft gebunden. Der Gesamtumsatz organischen Materials in terrestrischen und marinen Ökosystemen ist deshalb eng mit dem CO_2 - Gehalt der Atmosphäre verknüpft.

In marinen Ökosystemen werden der Gehalt und die Zusammensetzung des organischen Materials nicht nur durch die biologischen Aktivitäten im marinen System selbst beeinflusst, sondern auch durch terrigene Einträge, z.B. durch Flusseinträge oder durch Auswaschung des Bodens. Bei dem eingetragenen terrigenen Material handelt es sich in erster Linie um schwerer abbaubare, lösliche Verbindungen, da biologisch leicht umsetzbare Verbindungen meist bereits im terrestrischen Bereich durch andere Organismen aufgenommen werden und unlösliche, partikuläre Stoffe zum großen Teil im Boden zurückgehalten werden. Dementsprechend finden sich in offenen Seegebieten deutlich geringere Konzentrationen organischer Verbindungen als in küstennahen Bereichen, die durch terrigene Einträge stärker beeinflusst sind.

In marinen Ökosystemen wird der Umsatz natürlicher organischer Verbindungen durch verschiedene Prozesse kontrolliert bzw. limitiert. Entsprechend des unterschiedlichen jahreszeitlichen Lichtangebotes ist die Photosyntheseleistung in den lichtreichen Sommermonaten deutlich größer als in den dunkleren Wintermonaten. Da die Photosynthese an photosynthetisch aktives Phytoplankton gebunden ist, führt eine Zunahme der Primärproduktion zunächst zu einer Zunahme des zellulären, partikulären Materials (POM), verbunden mit einer Zunahme der Phytoplanktonbiomasse. Die Zunahme wird in der Regel dadurch limitiert, dass nur begrenzte Mengen der essentiell benötigten stickstoff- bzw. phosphorhaltigen anorganischen Nährstoffe oder Spurenstoffe zur Verfügung stehen.

Durch das Absterben von Phytoplanktonzellen und durch katabole Prozesse, die unabhängig vom Lichtangebot permanent stattfinden, verringert sich ständig der Gehalt an organischem Material. Diese Prozesse nutzen den im Wasser gelösten Sauerstoff und setzen neben CO_2 auch anorganische Nährstoffe und gelöste organische Verbindungen wieder frei. Unter günstigen Bedingungen werden durch den Abbau organischen Materials relativ schnell ausreichende Mengen limitierender Verbindungen wieder bereitgestellt, sodass es innerhalb einer Saison zu einer erneuten Zunahme der Phytoplanktonbiomasse kommen kann.

Neben biologisch gesteuerten Umsatzprozessen kann der Gehalt und die Zusammensetzung an natürlichem organischen Material auch durch hydrodynamische Prozesse beeinflusst werden. Die Vermischung von Wasserkörpern mit deutlich unterschiedlichen Gehalten an organischem Material können dabei unter Umständen die saisonalen, biologisch gesteuerten Prozesse vollständig überlagern. Da hydrodynamische Prozesse oft durch sporadisch auftretende Ereignisse wie z.B. windinduzierte Strömungen gesteuert werden, erscheinen Veränderungen im Gehalt an organischen Verbindungen oft regellos zu erfolgen. Hiervon sind besonders die gelösten organischen Verbindungen (DOM) betroffen. Der Einfluss auf das partikuläre organische Material (POM) hängt in erster Linie von der Dichte der Partikel ab. Partikel mit einer hohen Dichte sedimentieren relativ schnell und werden durch Strömungen weniger weit transportiert als Partikel mit einer geringeren Dichte, die nicht oder nur langsam sedimentieren.

Abgesehen von natürlichen Vorgängen kann der Gehalt und die Zusammensetzung von natürlichem organischen Material auch durch anthropogene Aktivitäten beeinflusst werden. Hierzu zählen unter anderem die Einleitung von anorganischen Nährstoffen, die langfristig zu einer Erhöhung der Bildung von organischem Material führen (Eutrophierung) oder die Einleitung von Verbindungen, die eine toxische Wirkung auf die an der Umsetzung des organischen Materials beteiligten Organismen haben.

Aufgrund der Vielzahl verschiedener organischer Substanzen und Substanzklassen im natürlichen organischen Material wird der Gehalt meist durch den in diesen Verbindungen festgelegten Kohlenstoff (TOC) oder Stickstoff (TON) angegeben. Häufig wird auch noch zwischen der gelösten und partikulären Fraktion des Kohlenstoffs (DOC und POC) bzw. des Stickstoffs (DON und PON) unterschieden. Als partikulär gilt dabei der Anteil des organischen Materials, der durch Glasfaserfilter mit einer nominellen Porengröße von 0,7 µm zurückgehalten wird.

Im Jahr 2011 sind die Konzentrationen von gelöstem organisch gebundenem Kohlenstoff und Stickstoff an ausgewählten Stationen in der westlichen Ostsee und im Arkonabecken auf 5 Ausfahrten untersucht worden. Am Beispiel einzelner Stationen sind die dabei gemessenen Konzentrationen in der oberflächennahen bzw. bodennahen Wasserschicht den Mittelwerten der Messungen der vorangegangenen 10 Jahre (Zeitraum 2001 bis 2010) gegenübergestellt.

Abb. 33 zeigt die POC und PON Konzentrationen an einer Station in der Mecklenburger Bucht (TF0012) und im zentralen Arkonabecken (TF0113). An beiden Stationen liegen die 2011 gemessenen Konzentrationen im Wesentlichen im erwarteten Konzentrationsbereich. Einzelne stark abweichende Werte können dabei durch kurzzeitig auftretende Prozesse hervorgerufen werden, die aufgrund der geringen zeitlichen Auflösung der Messungen besonders deutlich hervortreten können.

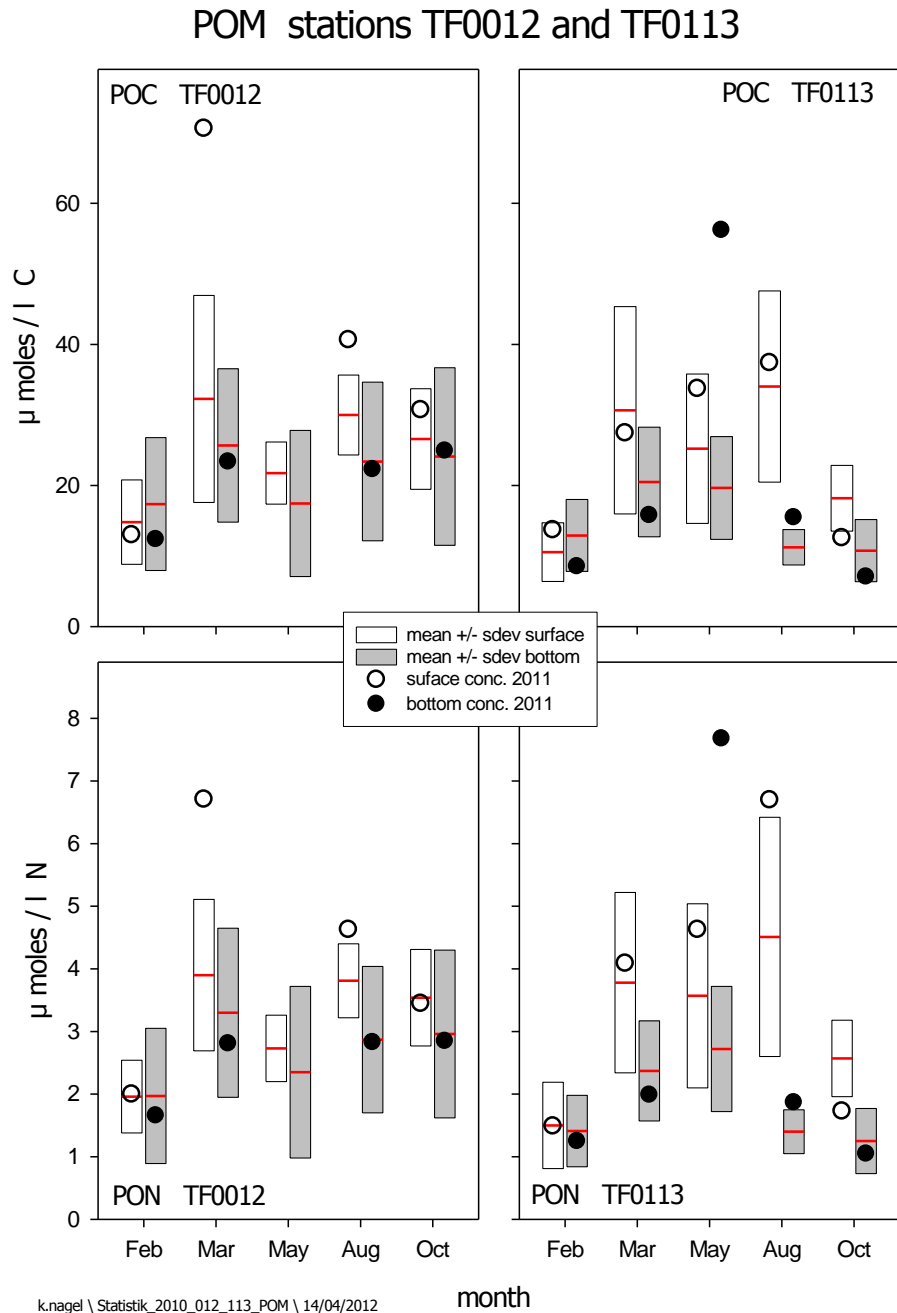


Abb. 33

POC und PON Konzentrationen in der oberflächen- und bodennahen Wasserschicht der Stationen TF0012 (Mecklenburger Bucht) und TF0113 (zentrale Arkonasee). Den Messwerten des Jahres 2011 sind jeweils die Mittelwerte der Messungen der vorangegangenen 10 Jahre gegenübergestellt (Zeitraum 2001 – 2010)

Fig. 33

POC and PON concentrations in the near surface and near bottom layer at stations TF0012 (Mecklenburg Bight) and TF0113 (Arkona Sea). Concentrations measured in 2011 are compared with mean values obtained during the last 10 years (time period 2001 – 2010)

An beiden Stationen ist in der oberflächennahen Wasserschicht bei den langjährigen Mittelwerten eine erhöhte Konzentration partikulären Materials im Frühjahr und im Spätsommer zu erkennen, die eine Erhöhung der Planktonbiomasse (Planktonblüte) zu diesen beiden Zeiten anzeigt. Bedingt durch Abbauprozesse während der Sedimentation ist die Konzentration des partikulären Materials in der bodennahen Schicht deutlich geringer. An relativ flachen Stationen, wie z.B. der Station TFO012 mit einer Wassertiefe von nur ca. 25 m, können die Konzentrationen in der Oberfläche und am Boden durch eine häufigere, windinduzierte vollständige Durchmischung des Wasserkörpers weitgehend angeglichen werden. An der Station TFO113 (Wassertiefe ca. 45 m) findet eine bodentiefe Durchmischung des Wasserkörpers nur bei ausreichend langen und kräftigen Stürmen statt, die in dieser Region vornehmlich in den Wintermonaten auftreten.

Aus den langjährigen Mittelwerten lässt sich auch ableiten, dass im saisonalen Verlauf die durch die Primärproduktion neu gebildete Menge an organischem Material in einer Größenordnung von 20 – 60 $\mu\text{mol/l C}$ bzw. 2 – 4 $\mu\text{mol/l N}$ liegt. Diese Werte gelten nicht nur für die westliche Ostsee und die Arkonasee, sondern auch für das Bornholmbecken und die zentrale Ostsee.

Für eine Reihe von Stationen von der westlichen Ostsee bis zum Landsorttief sind die Konzentrationen gelösten organischen Materials in den Abb. 34 bis 36 dargestellt. In der oberflächennahen Schicht lagen die 2011 gemessenen Konzentrationen im Wesentlichen in dem aus den Langzeitbeobachtungen erwarteten Bereich. Auffallend ist, dass die DOM Konzentrationen um ein Vielfaches höher sind als die Menge des partikulären organischen Materials, das durch die Primärproduktion im saisonalen Verlauf neu aufgebaut wurde. Die hohen Konzentrationen gelösten organischen Materials sind ein Indiz dafür, dass ein sehr hoher Anteil dieser Verbindungen nicht in den untersuchten Gebieten der Ostsee gebildet wurde, sondern aus angrenzenden Bereichen oder aus terrigenen Quellen stammt. Der große Überschuss eingetragenen organischen Materials, der vornehmlich durch hydrodynamisch gesteuerte Prozesse verteilt wird, kann dabei den durch biologische Prozesse im System umgesetzten Anteil praktisch vollständig überlagern.

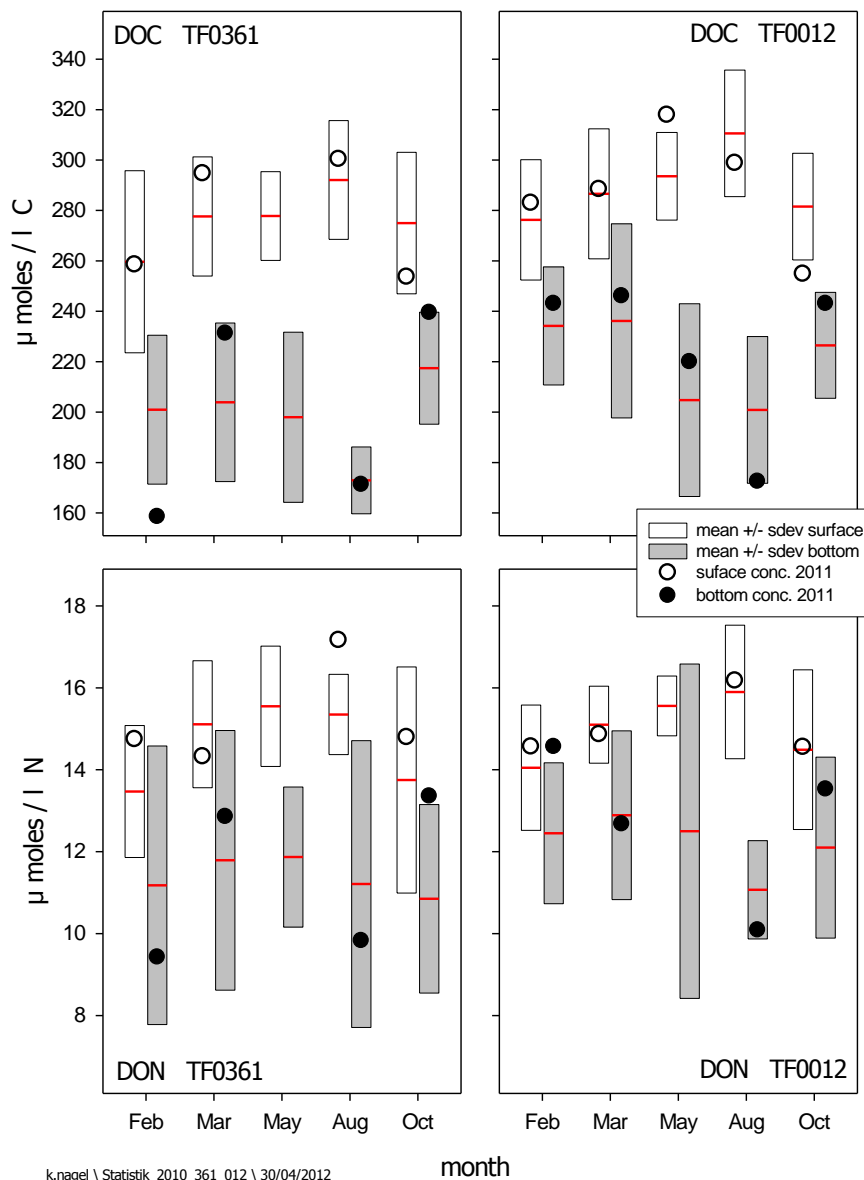
Die relativ flache westliche Ostsee - und in geringerem Maße auch die etwas tiefere Arkonasee - sind stark durch den Wasseraustausch zwischen Nord- und Ostsee geprägt, der über die Belte und den Sund erfolgt. Der Wasseraustausch wird dabei sowohl durch großräumige, überregionale Prozesse (z.B. die Wasserstände in Nord- und Ostsee, die Großwetterlage) als auch durch lokale Prozesse (z.B. eine lokale, windinduzierte bodentiefe Durchmischung des Wasserkörpers) geprägt. Durch die in die Ostsee mündenden Flüsse wird salzarmes, an terrigenem organischen Material reiches Wasser in die Ostsee eingetragen. Dies führt in den zentralen Bereichen der Ostsee zu mittleren DOC Konzentrationen von 300 bis 350 $\mu\text{mol/l C}$. Das salzarme und DOC - reiche Wasser fließt über die westliche Ostsee und das Kattegat in die Nordsee ab. Findet keine (windinduzierte) Durchmischung der Wassersäule statt, erfolgt der Abfluss des salzarmen Wassers aufgrund seiner geringeren Dichte überwiegend in der oberflächennahen Wasserschicht. Demgegenüber erfolgt der Einstrom von salzreichem Nordseewasser bevorzugt in

Bodennähe. Da die DOC Konzentration in der zentralen Nordsee bei nur ca. 100 $\mu\text{mol/l C}$ liegt, besitzt das einströmende, salzreiche Wasser im Vergleich zum ausströmenden, salzärmeren Ostseewasser einen deutlich geringeren DOC Gehalt. In den flachen Gebieten der Ostsee, insbesondere in der westlichen Ostsee, können die unterschiedlichen Konzentrationen des organischen Materials zwischen dem oberflächen- und bodennahen Wasserkörper durch die vertikale Durchmischung der Wassersäule, die z.B. durch Windereignisse verursacht werden kann, weitgehend ausgeglichen werden. In den tieferen Becken, in denen eine bodentiefe Durchmischung keine oder nur eine untergeordnete Rolle spielt, liegt die mittlere DOC Konzentration in der Bodenschicht generell ca. 20 % bis 30 % unter derjenigen, die in der Oberflächenschicht gemessen wird.

Die Verteilung gelöster organischer Stickstoffverbindungen (DON) entspricht im Wesentlichen der des DOC. Da die DON Konzentrationen in Nord- und Ostsee im Vergleich zum DOC weit ähnlicher sind, treten die beschriebenen Unterschiede der Verteilung in der Wassersäule weniger deutlich in Erscheinung.

Ähnlich wie beim partikulären organischen Material würde man auch für das DOM eine durch biologische Prozesse bedingte Saisonalität erwarten, mit einem Maximum während oder kurz nach der Zeit der größten Primärproduktion und einem Minimum während des Winterhalbjahres. Obwohl sich an vielen Stationen in Oberflächennähe ein derartiges Verteilungsmuster in den langjährigen Mittelwerten zumindest andeutungsweise zeigt (z.B. TFO012, TFO113, TFO271), ist das Auftreten eines saisonalen Signals allein noch kein Indiz, das auf biologische Prozesse hindeutet. So dürfte z.B. das saisonale Maximum der DOC Konzentration in der Oberflächenschicht bzw. das Minimum im bodennahen Wasserkörper an der Station TFO012 (Abb. 34) darauf zurückzuführen sein, dass durch die in dieser Region im Sommer üblicherweise vorherrschenden schwächeren Winde die vertikale Durchmischung des Wasserkörpers stark eingeschränkt ist und die aus der Nord- und Ostsee stammenden Wasserkörper nur in geringerem Maße miteinander gemischt werden. Relativ geringe Mengen ausströmenden Ostseewassers bzw. einströmenden Nordseewassers führen dann zu einer saisonalen Erhöhung bzw. zu einer Verringerung der DOC Konzentration in der Oberflächen- bzw. Bodenschicht.

DOM stations TF0361 and TF012



k.nagel \ Statistik_2010_361_012 \ 30/04/2012

month

Abb. 34

DOC und DON Konzentrationen in der oberflächen- und bodennahen Wasserschicht der Stationen TF0361 (Kieler Bucht) und TF012 (Mecklenburger Bucht). Den Messwerten des Jahres 2011 sind jeweils die Mittelwerte der Messungen der vorangegangenen 10 Jahre gegenübergestellt (Zeitraum 2001 – 2010)

Fig. 34

DOC and DON concentrations in the near surface and near bottom layer at stations TF0361 (Kiel Bight) and TF012 (Mecklenburg Bight). Concentrations measured in 2011 are compared with mean values obtained during the last 10 years (time period 2001 – 2010)

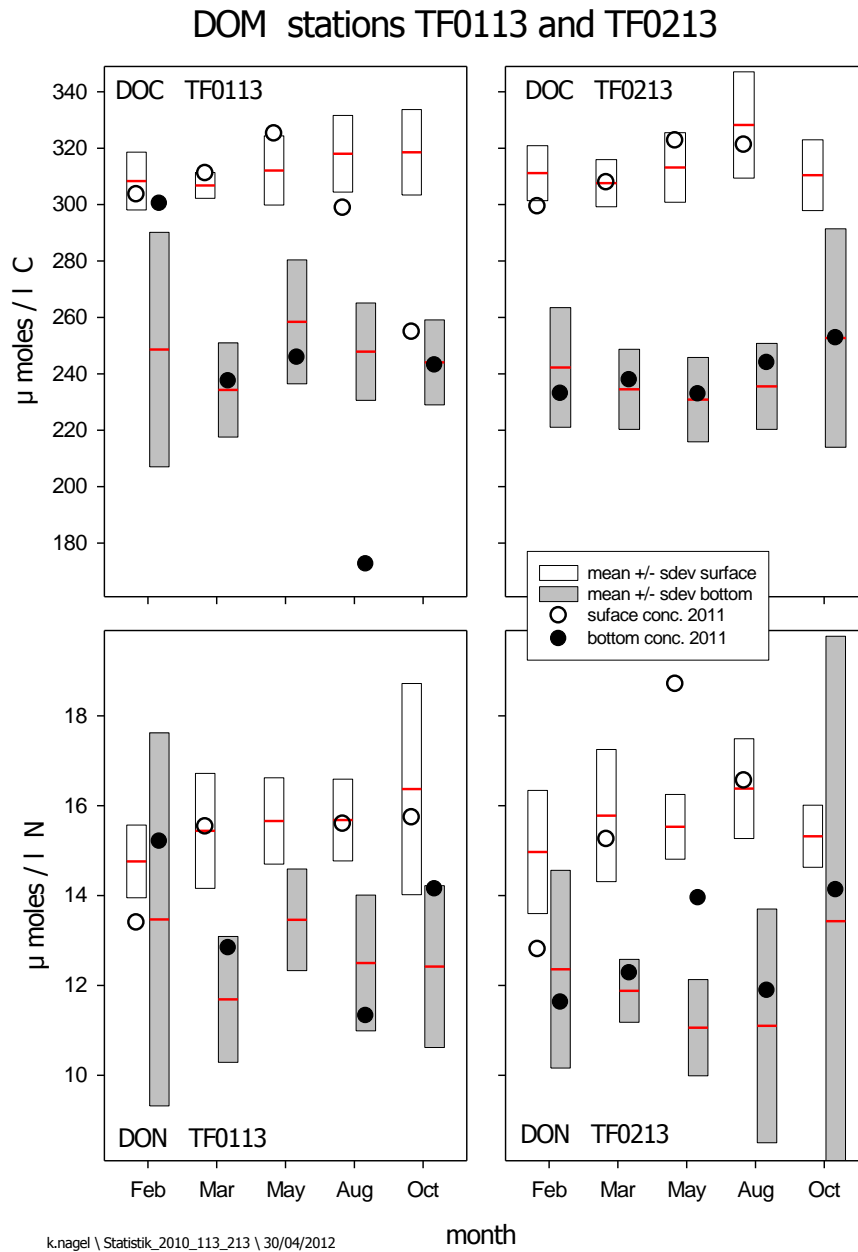


Abb. 35

DOC und DON Konzentrationen in der oberflächen- und bodennahen Wasserschicht der Stationen TF0113 (Arkonabecken) und TF0213 (Bornholmbecken). Den Messwerten des Jahres 2011 sind jeweils die Mittelwerte der Messungen der vorangegangenen 10 Jahre gegenübergestellt (Zeitraum 2001 – 2010)

Fig. 35

DOC and DON concentrations in the near surface and near bottom layer at stations TF0113 (Arkona Basin) and TF0213 (Bornholm Basin). Concentrations measured in 2011 are compared with mean values obtained during the last 10 years (time period 2001 – 2010)

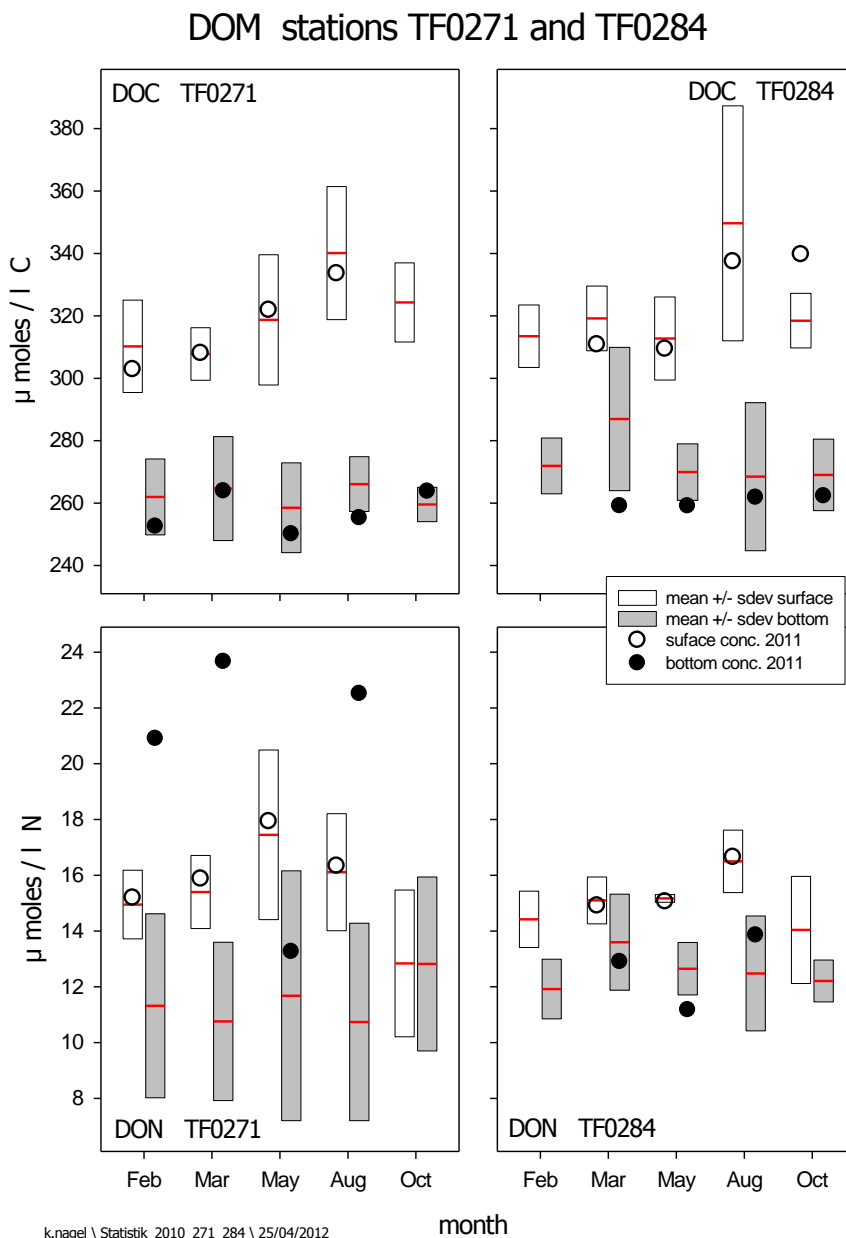


Abb. 36

DOC und DON Konzentrationen in der oberflächen- und bodennahen Wasserschicht der Stationen TF0271 (östliches Gotlandbecken) und TF0284 (Landsortief). Den Messwerten des Jahres 2011 sind jeweils die Mittelwerte der Messungen der vorangegangenen 10 Jahre gegenübergestellt (Zeitraum 2001 – 2010)

Fig. 36

DOC and DON concentrations in the near surface and near bottom layer at stations TF0271 (eastern Gotland Basin) and TF0284 (Landsort Deep). Concentrations measured in 2011 are compared with mean values obtained during the last 10 years (time period 2001 – 2010)

In den tieferen zentralen Becken der Ostsee (Bornholmbecken, östliches Gotlandbecken, Landsorttief) ist aufgrund der Wassertiefe eine vertikale Durchmischung nur bis zur Haloklinen zu erwarten. Das saisonale DOC - Maximum in den langjährigen Mittelwerten im Sommerhalbjahr in der oberflächennahen Schicht dürfte deshalb eng mit biologischen Prozessen der Freisetzung bzw. des Abbaus des bei der Primärproduktion neu gebildeten Materials korreliert sein. Die saisonale Änderung der mittleren DOC Konzentration liegt dabei jedoch deutlich unter derjenigen des partikulären organischen Materials.

Die Konzentrationsänderungen des organischen Materials im bodennahen Wasserkörper in den tieferen Becken sind demgegenüber weitgehend von denen in der Oberfläche entkoppelt. Da hier keine Primärproduktion und kein Gasaustausch mit der Atmosphäre möglich sind, beeinflussen Abbauprozesse die Menge und Zusammensetzung des organischen Materials. Organisches Material gelangt dabei ständig in Form sedimentierender Partikel in den bodennahen Wasserkörper und wird dort abgebaut, sofern es nicht im Sediment eingelagert wird. Findet kein Wasseraustausch statt, führt der Abbau des organischen Materials zu einer Sauerstoffverarmung und - bei ausreichend langen austauschfreien Phasen - zu anoxischen Bedingungen und zur Bildung von Schwefelwasserstoff.

Am Boden der tiefen Becken der Bornholmsee und der zentralen Ostsee findet ein Austausch des bodennahen Wasserkörpers nur statt, wenn ausreichend große Mengen salzhaltigen Wassers aus der Nordsee in die Ostsee gelangen und die Becken von West nach Ost der Reihe nach auffüllen und das dort befindliche, weniger salzreiche Wasser verdrängen. Dieser Vorgang, der auch als Salzwassereinbruch bezeichnet wird, tritt nur sporadisch, oft im Abstand von mehreren Jahren auf (MATTHÄUS et al., 2008). Zwischen aufeinanderfolgenden Salzwassereinbrüchen stagniert der Wasserkörper am Boden der tiefen Becken, d.h. es findet kein oder nur ein geringer Austausch mit den darüber liegenden bzw. angrenzenden Wasserkörpern statt. Die Stagnationsphasen sind deshalb geeignet, Veränderungen im organischen Material weitgehend unabhängig von hydrodynamischen Einflüssen zu beobachten.

Die chemischen Veränderungen, die in den tiefen Becken nach einem Salzwassereinbruch stattfinden, lassen sich gut an der Veränderung des Sauerstoffgehalts bzw. der Bildung von H_2S verfolgen. Da das einströmende salzreiche Wasser in den flachen Gebieten des Kattegats und der westlichen Ostsee relativ stark mit Sauerstoff angereichert wird, ist der Sauerstoffgehalt beim Absinken in den tieferen Becken relativ hoch. Das Ende einer Stagnationsphase ist deshalb an einer deutlichen Zunahme des Sauerstoffgehalts innerhalb einer kurzen Zeitspanne zu erkennen. Aufgrund des Abbaus von organischem Material nimmt der Sauerstoffgehalt im Verlauf der Stagnationsphase ab bzw. der H_2S - Gehalt bis zum Ende der Stagnationsphase zu. In Abb. 37 ist diese Abfolge für 4 Stationen in den tieferen Becken dargestellt (Station TFO213: Bornholmbecken, TFO271: östliches Gotlandbecken, TFO286: Fårötief, TFO284: Landsorttief). Gezeigt sind die beiden Stagnationsphasen in den Zeiträumen 1994 bis zum Salzwassereinbruch 2003 und von 2003 bis 2011 (mit einem kleineren Salzwassereinbruch 2007).

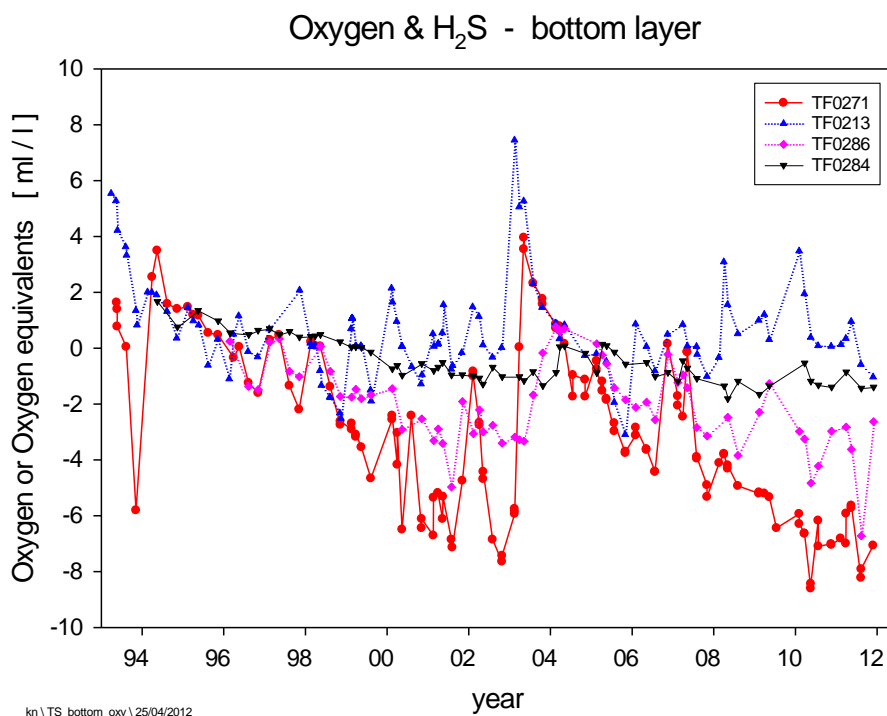


Abb. 37

Zeitreihe des Sauerstoff bzw. H₂S-Gehalts in der Bodenschicht der Stationen TF0213 (Bornholmbecken), TF0271 (östliches Gotlandbecken), TF0286 (Fårötief) und TF0284 (Landsortief) für den Zeitraum 1993 - 2011. Die H₂S-Konzentrationen sind als negative Sauerstoffäquivalente angegeben

Fig. 37

Time series of oxygen or H₂S concentrations in the bottom layer at stations TF0213 (Bornholm Basin), TF0271 (eastern Gortland Basin), TF0286 (Fårö Deep) and TF0284 (Landsort Deep) for the time period 1993 – 2011. H₂S concentrations are given as negative oxygen equivalents

Abgesehen von der Station TF0213 zeigt sich bei den betrachteten Stationen ein ähnlicher Verlauf, wobei die Änderungen an der Station TF0271 am ausgeprägtesten sind. Die Station TF0213 nimmt insofern eine Sonderstellung ein, als sie einerseits relativ flach ist (knapp 90 m), andererseits die Station ist, die als erste auf dem Weg des einströmenden Wassers liegt. Kleine Mengen salzreichen Wassers können deshalb hier schon zur Verdrängung des Bodenwassers und zu einer deutlich erkennbaren Änderung des Sauerstoffgehalts führen.

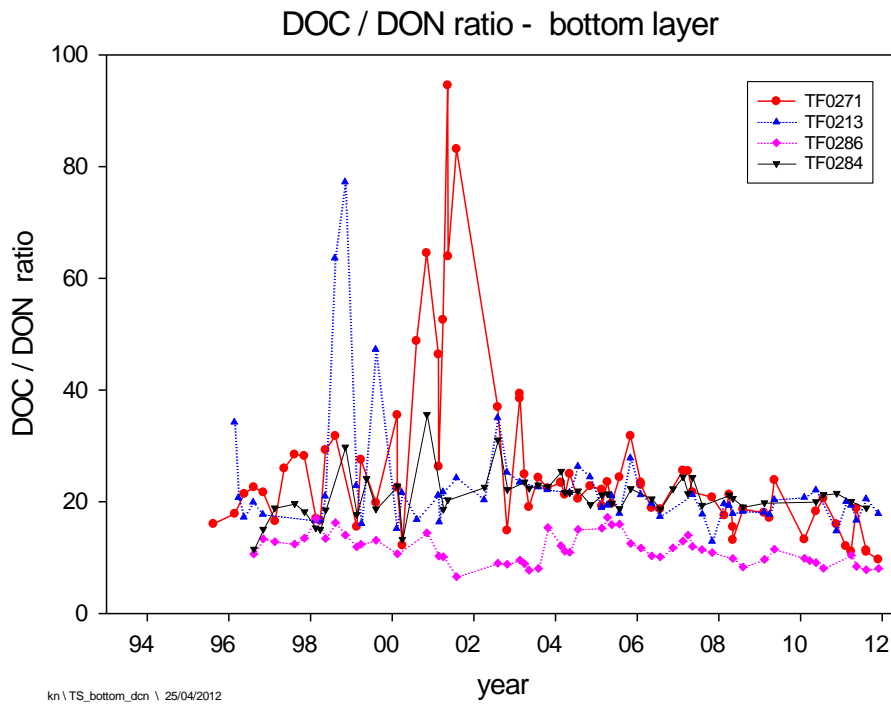


Abb. 38

Zeitreihe des DOC / DON Verhältnisses in der Bodenschicht der Stationen TF0213 (Bornholmbecken), TF0271 (östliches Gotlandbecken), TF0286 (Fårötief) und TF0284 (Landsortief) für den Zeitraum 1993 - 2011

Fig. 38

Time series of DOC / DON ratio in the bottom layer at stations TF0213 (Bornholm Basin), TF0271 (eastern Gortland Basin) , TF0286 (Fårö Deep) and TF0284 (Landsort Deep) for the time period 1993 – 2011

Während die Änderungen des Sauerstoffgehalts im Verlauf beider Stagnationsphasen sehr ähnlich verlaufen, zeigen sich für DOC und DON deutliche Unterschiede. So nimmt der DOC Gehalt während der ersten Stagnationsperiode bis zum Jahr 2001 deutlich zu und sinkt bis zum Ende dieser Periode wieder ab. Im Zeitraum von 2004 bis 2011 ist er demgegenüber weitgehend konstant. Der DON Gehalt nimmt demgegenüber in der ersten Periode - insbesondere zum Ende hin - deutlich ab, während er im Verlauf der zweiten Stagnationsphase - insbesondere nach dem kleinen Salzwassereinbruch 2007 - deutlich zunimmt. Dieses unterschiedliche Verhalten von DOC und DON wird bei einem Blick auf die DOC / DON Verhältnisse besonders deutlich (Abb. 38). Während es im Verlauf der ersten Stagnationsphase zunächst leicht, gegen Ende jedoch dramatisch auf einen Wert knapp unter 100 ansteigt, sinkt es im Verlauf der zweiten Stagnationsphase leicht ab und erreicht

2011 Werte unterhalb von 20. In den nicht stagnierenden Wasserkörpern in allen Gebieten der westlichen und zentralen Ostsee und in allen Tiefenbereichen liegt das DOC / DON Verhältnis bei ca. 20 und schwankt nur in einem Bereich zwischen 17 und 25. Das C / N Verhältnis des partikulären organischen Materials liegt in der Bodenschicht der tiefen Becken bei 7 - 8 und ändert sich praktisch nicht im Verlauf der Stagnationsphasen.

Es ist bisher unklar, durch welche Mechanismen die Umsatzprozesse im organischen Material kontrolliert und gesteuert werden und welche Faktoren für das unterschiedliche Verhalten von DOC und DON während der beiden Stagnationsphasen verantwortlich sind. Angesichts der großen Menge organischer Verbindungen in der Ostsee wäre es auch interessant herauszubekommen, wodurch der Abbau des organischen Materials limitiert wird. Da beim Abbau des organischen Materials auch Sauerstoff erforderlich ist, hätte ein erhöhter Abbau einen direkten Einfluss auf den Sauerstoffgehalt der Ostsee. Eine Beantwortung dieser Fragen scheitert derzeit jedoch noch daran, dass bei der Beschreibung der Veränderungen in der Zusammensetzung des organischen Materials nicht in ausreichendem Maß zwischen der Wirkung biologischer und hydrodynamischer Prozesse unterschieden werden kann. Die Vorgänge in stagnierenden Wasserkörpern, in denen hydrodynamische Prozesse nur eine untergeordnete Rolle spielen, macht jedoch deutlich, dass eine Reihe unterschiedlicher Prozesse an der Umsetzung des organischen Materials beteiligt sind.

Zusammenfassung

Nach dem mäßigen bis starken, auffällig langen und kalten Winter 2009/2010 folgte unmittelbar danach ein ähnlich strenger 2010/11. Mit einer Kältesumme 177,7 K d von Warnemünde liegt er auf Platz 13 der kältesten Winter seit Beginn der Vergleichsdaten im Jahr 1948, gleich hinter dem des Vorjahrs mit 203,7 K d. Der kälteste war der von 1962/63 mit 395,2 K d.

Die Jahreswärmesumme 2011 von 174,5 K d war geringer als in den Vorjahren und lag nur wenig höher als der Mittelwert 148 K d der Beobachtungsreihe seit 1948, deutlich innerhalb der statistischen Streuung und nur halb so groß wie Rekordwert 355 K d des Jahrs 2006. In der Liste der letzten 64 Jahreswärmesummen belegt 2011 den Platz 20.

Das Jahr 2011 war in der Wasseroberflächentemperatur in der westlichen Ostsee durch vergleichsweise kalte Monate Januar bis März und einen warmen Juni gekennzeichnet. Die starke Abkühlung im Dezember 2010 setzte sich im Januar und Februar in der Mecklenburger Bucht und bis März in der Arkonasee fort. Dadurch entwickelte sich der Februar in der Mecklenburger Bucht mit Monatsmitteltemperaturen kurz unter 0 °C und Anomalien von -2 K zum kältesten Monat. In der Arkonasee lagen die Oberflächentemperaturen in den ersten beiden Monaten um 1°C und verminderten sich im März auf 0,5 °C, als sich die Mecklenburger Bucht schon zu erwärmen begann. Die höchsten positiven Anomalien traten im Juni mit bis zu 1,5 K auf. Im Juli lagen die Monatsmittel noch im Bereich der langjährigen Mittelwerte, im August mit etwa 1,6 K darunter. Dadurch erreichten die Maximaltemperaturen Anfang August nur noch Werte um 18 – 19 °C. September und Oktober waren durch anhaltende Westwinde gekennzeichnet, die zu starkem Auftrieb an der schwedischen Küste führten. Dadurch entstanden in der nördlichen Arkonasee negative Anomalien bis -4 K. Im November lagen die Wasseroberflächentemperaturen in der westlichen Ostsee im Bereich der langjährigen Mittelwerte. Der Dezember war im etwa 1 K wärmer als das langjährige Mittel.

Barotrope Einstromereignisse mit geschätzten Volumina zwischen 100 und 300 km³ fanden in der Ostsee 2011 vier Mal statt, im Januar/Februar, im März/April, im Mai und im November/Dezember. Das relativ starke Einstromsignal von November/Dezember 2011 transportierte etwa eine Milliarde Tonnen (1 Gt) Salz in die Ostsee und bleibt damit deutlich hinter den letzten großen Salzwassereinbrüchen in den Winter 2003 (2,0 Gt) und 1993 (3,4 Gt) zurück. Das eingeströmte Salz konnte erst im Januar 2012 in Bornholmbecken quantifiziert werden. Nach dem jetzigen Kenntnisstand erfolgen die kleinen barotropen, also sturmgetriebenen Einstromprozesse hauptsächlich auf dem kurzen Weg durch den Sund in das Arkonabecken. Die baroklinen Ereignisse dagegen erfolgen bevorzugt über die Darßer Schwelle wegen der zu geringen Tiefe der Drogenschwelle im Sund.

Nachdem der Jahresgang 2010 einige Besonderheiten aufwies, zeigte das Jahr 2011 wieder ein typisches Muster. Im Ergebnis der Dominanz sauerstoffzehrender Prozesse und geringer

Produktion war das Oberflächenwasser im Winter in allen untersuchten Seegebieten mit etwa 97-98 % leicht untersättigt. Die Frühjahrsblüte des Phytoplanktons führte in der westlichen Ostsee besonders im März zu einer Übersättigung des Oberflächenwassers. Im Arkonabecken setzte die Blüte auf Grund des langen Winters verspätet ein und dauerte bis in den Mai fort. Wie bei den Sauerstoffkonzentrationen dokumentiert die große Spannweite der Werte einen unterschiedlichen Entwicklungsstand der Phytoplanktonblüte. Der lang anhaltende Winter führte auch im Bornholmbecken und im östlichen Gotlandbecken zu einem recht späten Blütenbeginn. Die Untersuchungen im Mai dokumentieren dies. In beiden Seegebieten wurde im Mai eine mittlere Sättigung von 128 % errechnet.

Die Sauerstoffsituation des Tiefenwassers der tieferen Becken wird vorwiegend durch das Auftreten oder Ausbleiben barotroper und/oder barokliner Einstromprozesse geprägt. Im Tiefenwasser des Bornholmbeckens wurden in den letzten Jahren wiederholt barokline Einströme beobachtet, die die Sauerstoffsituation positiv beeinflussten. So wurden auch 2011 fast durchweg oxische Verhältnisse angetroffen. Nur bei einer der 17 Beprobungen wurden kurzzeitig geringe Mengen Schwefelwasserstoff gemessen. Die Auswirkungen des wichtigsten Einstromereignisses 2011, des barotropen Einstroms vom November/Dezember konnten jedoch erst Anfang des Jahres 2012 im Bornholmbecken beobachtet werden konnten. Im Tiefenwasser des östlichen Gotlandbeckens hielt die Stagnationsperiode 2011 unvermindert an. Die Temperatur und der Salzgehalt gingen in 200 m Wassertiefe im Vergleich zum Vorjahr weiter zurück. Die extrem geringen Standardabweichungen beider Parameter verdeutlichen die große Stabilität des Systems im Jahresverlauf und weisen auf eine außergewöhnlich geringe Einstromaktivität hin. Dies spiegelt sich auch im Sauerstoff/Schwefelwasserstoffhaushalt wider. Die schwefelwasserstoffhaltige Schicht hat unverändert eine Mächtigkeit von ca. 100 m. Der Mittelwert 2011 für den Schwefelwasserstoffgehalt, ausgedrückt in negativen Sauerstoffäquivalenten (-3,98 ml/l) liegt nur geringfügig unter dem Wert des Vorjahres (-4,29 ml/l). Der Wert liegt noch über dem am Ende der letzten Stagnationsperiode im Jahr 2002 gemessenen Wert (-3,82 ml/l). Ähnliche Aussagen lassen sich auch für das nördlicher gelegene Farötief treffen.

Die Sauerstoffsituation des Tiefenwassers spiegelt sich auch in den Nährstoffkonzentrationen wider. Nitrat konnte dort letztmalig im Jahr 2005 nachgewiesen werden. Ammonium- und Phosphatwerte stabilisierten sich auf dem Niveau des Vorjahres und sind vergleichbar mit den Konzentrationen, die am Ende der letzten langen Stagnationsphase 2002 gemessen wurden.

Der Bericht stellt eine zusammenfassende Analyse der Silikatmessungen der Jahresreihe 1993 – 2011 vor. Im Mittel ist während des gesamten Jahresverlaufs ausreichend Silikat vorhanden, so dass das Wachstum der Kieselalgen normalerweise nicht durch Silikat begrenzt wird. Monatliche Messungen in den Jahren 2009 und 2010 in der westlichen Ostsee zeigten jedoch, dass es im Februar/März zu einer drastischen Abnahme des Silikats

kommen kann. Messwerte unter 1 $\mu\text{mol/l}$ weisen eindeutig auf eine kurzzeitige Silikatlimitation hin.

Die gemittelten Silikatjahresgänge unterscheiden sich deutlich. In der Mecklenburger Bucht findet in der Regel eine intensive Frühjahrsblüte der Kieselalgen statt, die zu einem deutlichen Silikatrückgang um ca. 10 $\mu\text{mol/l}$ vom Februar bis zum Mai führt. In der Arkonasee kann ebenfalls eine Kieselalgenblüte beobachtet werden, die jedoch später einsetzt; von Februar bis März nehmen die Messwerte nur geringfügig ab. Auch scheint die Intensität der Blüte im Mittel geringer zu sein, da die Differenz zwischen Februar und Mai nur knapp 6 $\mu\text{mol/l}$ beträgt. In der Bornholmsee und der östlichen Gotlandsee ist der Silikatverbrauch vom Winter bis zu Mai nur gering (2,3 bzw. 3,5 $\mu\text{mol/l}$). Dies ist besonders einer Verschiebung in der Artenzusammensetzung in den 1990er Jahren geschuldet. In beiden Seegebieten war in diesem Zeitraum der Anteil der Diatomeen zugunsten der Dinoflagellaten stark zurückgegangen. In den zurückliegenden Jahren konnte jedoch eine Rückkehr der Diatomeen beobachtet werden.

Bis in die Mitte des vergangenen Jahrhunderts wurden erheblich höhere Silikatkonzentrationen als gegenwärtig gemessen (20 – 30 $\mu\text{mol/l}$). Ein signifikanter Rückgang konnte Ende der 1950er/ Anfang der 1960er Jahre beobachtet werden. Ende der 1980er Jahre wurden in der Oberflächenschicht im Durchschnitt etwa 10 $\mu\text{mol/l}$ gemessen. Seitdem hat sich in der ein neues Gleichgewicht herausgebildet. Eine Betrachtung der Datenreihe 1993 – 2011 bestätigt dies. Die Mittelwerte der 19-jährigen Serie liegen für die westliche Ostsee bei 9,6 $\mu\text{mol/l}$, für die Arkonasee bei 9,5 $\mu\text{mol/l}$, in der Bornholmsee bei 9,7 $\mu\text{mol/l}$ und in der östlichen Gotlandsee bei 9,9 $\mu\text{mol/l}$. Trenduntersuchungen bestätigen, dass keine weitere Abnahme der Silikatkonzentrationen zu beobachten ist. Für alle Seegebiete liegt das Bestimmtheitsmaß r^2 zwischen 0,01 und 0,02.

Summary

The moderate to severe, long and cold winter 2009/2010 was immediately followed by a similarly strong winter 2010/2011. With the “cold sum” of the air temperature in Warnemünde of 177.7 K d it ranks on place 13 of the coldest winters since the beginning of the record in 1948, directly behind the winter before with 203.7 K d. The coldest winter was 1962/63 with 395.2 K d.

The summer “heat sum” 2011 in Warnemünde of 174.5 K d was lower than in the years before and was lying only slightly above the average of 148 K d of the observation period since 1948. The value is clearly within the statistical spread and only half of the record value of 355 K d in 2006. In the list of the last 64 “heat sums”, the year 2011 ranks on place 20.

Sea surface temperature in 2011 was characterized in the western Baltic by relatively cold months January to March and a warm June. The strong cooling in December 2010 continued in the Mecklenburg Bight in January and February and until March in the Arkona Sea. As a result, February was the coldest month in the Mecklenburg Bight with temperatures shortly

below 0 °C and an anomaly of -2 K. In the Arkona Sea, surface temperatures were lying around 1 °C in the first two months of the year and decreased to 0.5 °C in March, a period when temperatures already started to increase in the Mecklenburg Bight. Highest positive anomalies were observed in June with up to +1.5 K. In July, the monthly mean was in the range of the long-term average whereas August was too cold (-1.6 K). Maximum temperatures at the beginning of August were only 18-19 °C. September and October were characterized by persistent westerly winds causing upwelling at the Swedish coast and resulting in negative anomalies in the northern Arkona Sea of -4 K. In November, surface temperatures were in the range of the long-term mean; December was around 1 K too warm.

In 2011, barotropic inflow events with estimated volumes between 100 and 300 km³ took place four times: in January/February, in March/April, in May and in November/December. The relatively strong inflow signal of November/December 2011 transported about one billion tons (1 Gt) of salt into the Baltic Sea; it remains clearly behind the Major Baltic Inflows in the winter 2003 (2.0 Gt) and the winter 1993 (3.4 Gt). The salt of the inflow could only be quantified in January 2012 in the Bornholm Basin. To the present knowledge, small barotropic inflows, driven by storm events, take mainly the short way via the Sound into the Arkona Basin. Baroclinic events in contrast, take place preferentially across the Darss Sill due to the shallow depth of the Drogden Sill in the Sound.

The annual cycle of the oxygen saturation in the surface layer showed in 2011 the typical behaviour. As a result of the dominance of oxygen-consuming processes and low productivity, the winter surface layer of the investigation area was with 97-98 % slightly subsaturated. In the western Baltic, the phytoplankton spring bloom caused a supersaturation especially of March. In the Arkona Basin, the bloom started with delay due to the long-lasting winter and continued until May. As also documented by the oxygen concentrations, the huge range of values reflected the unequal development stage of the bloom. The long lasting winter resulted also in the Bornholm and eastern Gotland Basin in a late start of the bloom which is documented by investigations in May. In both sea areas, oxygen saturation in May was on average at 128 %.

The oxygen situation in the deep waters of the central basins is mainly coined by the occurrence or absence of barotropic and/or baroclinic inflow processes. In the deep water of the Bornholm Basin, baroclinic inflows were recorded repeatedly during the last years which influenced the oxygen situation positively. Thus, oxic conditions were observed nearly permanently throughout 2011. Only one out of 17 observations showed measureable amounts of hydrogen sulphide. In the deep water of the eastern Gotland Basin, the stagnation period was continuing undiminished. Temperature and salinity decreased further at 200 m depth compared to the previous year. Extremely low standard deviations for both parameters illustrate the stability of the system and point to the exceptional low inflow activity. This is mirrored also in the oxygen/hydrogen sulphide concentrations. The hydrogen sulphide containing layer has a thickness of around 100 m. On average, a hydrogen sulphide content of -3.98 ml/l, expressed as negative oxygen equivalents, was

measured in 200 m water depth which is only slightly below that of the previous year (-4.29 ml/l). The value is higher than the one measured at the end of the last stagnation period in 2002 (-3.82 ml/l). Similar conclusions can be drawn also for the more northern located Farö Deep.

The oxygen situation in the deep water is also mirrored in the nutrient concentrations. Nitrate was detected in 2005 for the last time. Phosphate and ammonium stabilized at the previous year's level and were comparable with those at the end of the last stagnation period in 2002.

The report summarizes silicate measurements for the period 1993-2011. On average, sufficient silicate is available throughout the whole year so that diatom growth is normally not limited by silicate. However, monthly measurements in 2009 and 2010 in the western Baltic showed that in February/March a drastic decrease in silicate can take place. Values below 1 $\mu\text{mol/l}$ indicated a temporary limitation of diatoms by silicate.

The mean annual silicate cycles in the Mecklenburg Bight and in the Arkona Sea differ clearly. In the Mecklenburg Bight, normally an intensive diatom bloom is observed resulting in a silicate decrease of about 10 $\mu\text{mol/l}$ between February and May. In the Arkona Sea, a diatom bloom can also be seen, but starting later. Between February and March values decrease only slightly. Also it seems to be that the intensity of the bloom is lower on average because the difference between February and May is only 6 $\mu\text{mol/l}$. In the Bornholm and eastern Gotland Sea, silicate consumption from winter to May is minor (2.3 and 3.5 $\mu\text{mol/l}$, respectively). This is mainly due to a shift in the species composition in the 1990s. In both sea areas, diatoms decreased and dinoflagellates increased. In the last years, a return to diatoms was observed.

Until the middle of the last century, remarkably higher silicate concentrations were measured (20 – 30 $\mu\text{mol/l}$). A significant decrease could be observed at the end of the 1950s/beginning of the 1960s. At the end of the 1980s silicate concentrations in the surface layer of about 10 $\mu\text{mol/l}$ were reported. Since then, a new equilibrium state seems to have established. This conclusion is supported by the data series 1993 – 2011. This 19-years series gives an annual average of 9.6 $\mu\text{mol/l}$ in the western Baltic, of 9.5 $\mu\text{mol/l}$ in the Arkona Sea, of 9.7 $\mu\text{mol/l}$ in the Bornholm Sea and 9.9 $\mu\text{mol/l}$ in the eastern Gotland Sea. Trend investigations document no further decrease of silicate concentrations. For all sea regions, the coefficient of determination, r^2 , is between 0.01 and 0.02.

Danksagung

Die Autoren danken den am Ostseeüberwachungsprogramm beteiligten Mitarbeitern des Leibniz- Instituts für Ostseeforschung Warnemünde für die Durchführung der Messungen sowie Kapitänen und Besatzungen der Forschungsschiffe „Alkor“, „Deneb“ und „Elisabeth Mann Borgese“ für die Unterstützung und den Einsatz bei den Messfahrten des Jahres 2011. 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 und Hydrologisches Institut (SMHI), Norrköpping, für die Überlassung der Pegeldaten. Herr JAN SZARON, Ozeanographisches Labor des SMHI in Göteborg, stellte uns hydrographisch-chemische Beobachtungen ausgewählter Ostseestationen aus dem Schwedischen Ozean Archiv (SHARK) zur Verfügung, die im Rahmen des nationalen schwedischen Umweltüberwachungsprogrammes gewonnen wurden. Frau ELZBIETA 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. Das Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (LLUR) hat uns freundlicherweise den Bericht zum „Sauerstoffmangel im bodennahen Wasser der westlichen Ostsee“ zur Verfügung gestellt.

Die Autoren bedanken sich bei Barry Broman, Lars Andersen, Arne Svensson und Martin Hansen vom Schwedischen Meteorologischen und Hydrologischen Institut (SMHI) sowie bei Gerhard Schmager Norrköpping vom Marineamt Rostock für die Überlassung von Pegeldaten und Informationen zum Einstrom im November/ Dezember.

Literatur

- Andersson, L.S. (2011): Cruise Report from KBV001 Poseidon, Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Oceanographic Laboratory, Vastra Frolunda
- 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.
- BSH (2009): Flächenbezogene Eisvolumensumme.
<http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Beobachtungen/Eis/Kuesten.jsp>
- BSH (2011): Reduzierte Eisumme.
<http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Beobachtungen/Eis/RedEisummeNord.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.
- CONLEY, D., SCHELSKE, C. and E. STOERMER (1993): Modification of the biogeochemical cycle of silica with eutrophication. *Mar. Ecol.Prog. Ser.* **101**, 179-192.
- DWD (2011): Witterungsreport: express. **13**, Nr. 1 - 13. Deutscher Wetterdienst.
- DWD (2012a): Klimadaten Deutschland, Daten im Standardformat, www.dwd.de
- DWD (2012b): unveröffentlichte Daten
- EUTROSYM (1976): UNEP-Symposium über Eutrophierung und Sanierung von Oberflächengewässern. – Larl-Marx-Stadt, 20. – 25.09.1976, Bd. 1, Teil 2.2.
- FEISTEL, R., NAUSCH, G., MATTHÄUS, W. and HAGEN E. (2003a): Temporal and spatial evolution of the Baltic deep water renewal in spring 2003. – *Oceanologia* **45** (4), 623-642.
<http://www.iopan.gda.pl/oceanologia/454feis2.pdf>
- FEISTEL, R., NAUSCH, G., MOHRHOLZ, V., LYSIAK-PASTUSZAK, E., SEIFERT, T., MATTHÄUS, W., KRÜGER, S. and HANSEN, I.S. (2003b): Warm waters of summer 2002 in the deep Baltic Proper. – *Oceanologia* **45** (4), 571-592.
<http://www.iopan.gda.pl/oceanologia/454feis1.pdf>
- FEISTEL R., NAUSCH, G., HEENE, T., PIECHURE, J. and HAGEN, E. (2004a): Evidence for a warm water inflow into the Baltic Proper in summer 2003. – *Oceanologia* **46**, 581-598.
http://www.iopan.gda.pl/oceanologia/46_4.html
- FEISTEL, R., NAUSCH, G., MATTHÄUS, W., LYSIAK-PASTUSZAK, E., SEIFERT, T., SEHESTED HANSEN, I., MOHRHOLZ, V., KRÜGER, S., and BUCH, E. (2004b): Background data to the exceptionally warm inflow into the Baltic Sea in late summer of 2002. – *Meereswiss. Ber.* **58**, 1-58.
http://www.io-warnemuende.de/documents/mebe58_2004_paper.pdf
- FEISTEL, R., NAUSCH, G., and HAGEN E. (2006a): Unusual Inflow Activity 2002/3 and Varying Baltic Deep-Water Properties. – *Oceanologia*, **48**(S), 2006, 21-35

- http://www.iopan.gda.pl/oceanologia/48_S.html#A2
- FEISTEL, R., NAUSCH, G., and HAGEN E. (2006b): Water Exchange between the Baltic Sea and the North Sea, and conditions in the Deep Basins. HELCOM Indicator Fact Sheets 2006, Online 31 Aug 2006, http://www.helcom.fi/environment2/ifs/en_GB/cover/
- FEISTEL, R., NAUSCH, G., and HAGEN E. (2006c): Response of Baltic Water Properties to the Unusual Inflow Sequence since 2002. ICES CM 2006/C:09, ICES Annual Science Conference 2006. Maastricht, the Netherlands, 19–23 September 2006
- FEISTEL, R., 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. (2008): 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.
- FTA (2011): Baltic Sea Icebreaking Report 2010-2011. Finnish Transport Agency. http://portal.fma.fi/sivu/www/baltice/BIM_Joint_Annual_2010_2011.pdf
- FU-BERLIN (2011): Werden auch Sie Wetterpate! <http://www.met.fu-berlin.de/wetterpate/>
- GRASSHOFF, K. (1975): The hydrochemistry of land-locked basins and fjords. In: RILEY, J.P. and G. SKIRROW. (Eds), Chemical Oceanography, Academic Press, New York, 455-497.
- GRASSHOFF, K., ERHARDT, M. and KREMLING, K. (1983): Methods of seawater analysis. – 2nd Ed., Verlag Chemie, Weinheim.
- HAGEN, E. and FEISTEL, R. (2001): Spreading of Baltic Deep Water: A Case Study for the Winter 1997-1998. - Meereswiss. Ber. 45, 91-133. <http://www.io-warnemuende.de/research/mebe.html>
- HAGEN, E. and FEISTEL, R. (2004): Observations of low frequency current fluctuations in deep water of the eastern Gotland Basin/Baltic Sea. – Journal of Geophysical Research 109, C03044, doi:10.1029/2003JC002017.
- HAGEN, E. and FEISTEL, R. (2005): Climatic Turning Points and Regime Shifts in the Baltic Sea Region: The Baltic Winter Index (1659-2002). – Boreal Environment Research, **10**, 211-224. <http://www.borenv.net/BER/pdfs/ber10/ber10-211.pdf>
- HAGEN, E. and FEISTEL, R. (2008): Baltic climate change, in: FEISTEL, R., NAUSCH, G., and WASMUND, N. (Eds.), State and Evolution of the Baltic Sea 1952 – 2005. – John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, p. 93-120.
- HELCOM (2000): Manual of marine monitoring in the COMBINE programme of HELCOM. – Baltic Marine Environment Protection Commission, Helsinki, Updated 2002: www.helcom.fi/Monas/CombineManual2/CombineHome.htm
- HELCOM (2003): The 2002 oxygen depletion event in the Kattegat, Belt Sea and western Baltic. - Balt. Sea Environ. Proc. **90**, 1-59.
- HELCOM (2007): Baltic Sea Action Plan. – http://www.helcomfi/BSAP/en_GB/intro/
- HINZ, T. (2011): Forscher sind Klimawandel auf der Spur. Norddeutsche Neueste Nachrichten vom 6.12.2011, <http://www.nnn.de/nachrichten/home/top-thema/article//forscher-sind-klimawandel-auf-der-spur.html>
- HUMBORG, C., ITTEKOT, V., COCIASI, A. and B. V. BODUNGEN (1997): Effect of Danube river dam in Balck Sea biogeochemistry and ecosystem structure. Nature **386**, 385-388.
- HUMBORG, C., CONLEY, D., RAHM, L., WULFF, F., COCIASI, A. and V. ITTEKOT (2000): Silicate retention in river basins: far-reaching effects on biogeochemistry and aquatic food webs in coastal marine environments. Ambio **29**, 45-50.

- HUMBORG C., SMEDBERG, E., MÖRTH, C.-M., RAHM, L. and Å. DANIELSSON (2006a): Dissolved silica dynamics in boreal and arctic rivers: vegetation control over temperature? In: ITTEKOT, V., UNGER, D., HUMBORG, C., TAC AN, N. (Eds.), *The Silicon Cycle*. SCOPE 66, Island Press, Washington D.C., pp. 53-69.
- HUMBORG, C., PASTUSZAK, M., AIGARS, J., SIEGMUND, H., MÖRTH, C.-M. and V. ITTEKOT (2006b): Decreased silica land-sea fluxes through damming in the Baltic Sea catchment area – significance of particle trapping and hydrological alterations. *Biogeochemistry* **77**, 265-281.
- ICES (2011): Report of the Advisory Committee of Fishery Management, Book 8, pp. 15ff.
- IMGW (2012): Global Solar Radiation at GDYNIA station in 2011. – Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa, unveröffentlichte Daten.
- 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.
- 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.
- VAN DER LEE, E. M., and UMLAUF, L. (2011): Internal-wave mixing in the Baltic Sea: Near-inertial waves in the absence of tides. *J. Geophys. Res.* **116**, C10016, doi:10.1029/2011JC007072, 2011.
- LLUR (2011): Sauerstoffmangel im bodennahen Wasser der westlichen Ostsee im September 2011.
- MATTHÄUS, W. (1978): Zur mittleren jahreszeitlichen Veränderlichkeit im Sauerstoffgehalt der offenen Ostsee. – *Beitr. Meereskd.*, Berlin **41**, 61-94.
- MATTHÄUS, W., NEHRING, D., FEISTEL, R., NAUSCH, G., MOHRHOLZ, V. and LASS, H.U. (2008): The inflow of highly saline water into 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, 265-309.
- MOHRHOLZ, V. (1998): Transport- und Vermischungsprozesse in der Pommerschen Bucht. – *Meereswiss. Ber.* **33**, 1-106.

- MOHRHOLZ, V., HEENE, T., SCHUFFENHAUER, I. AND BEIER, S. (2011): IOW Cruise Report o6EZ1116, MEDOS 2011, 29. November to 08. December 2011, http://www.iowarnemuende.de/tl_files/forschung/pdf/cruise-reports/cro6ez1116.pdf
- NAUSCH, G., FEISTEL, R., LASS, H.-U., NAGEL, K. und SIEGEL, H. (2002): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2001. – *Meereswiss. Ber.* **49**, 3-77.
- NAUSCH, G., FEISTEL, R., LASS, H.-U., NAGEL, K. und SIEGEL, H. (2003): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2002. – *Meereswiss. Ber.* **55**, 1-71.
- NAUSCH, G., FEISTEL, R., LASS, H.-U., NAGEL, K. und SIEGEL, H. (2004): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2003. – *Meereswiss. Ber.* **59**, 1-80.
- NAUSCH, G., FEISTEL, R., UMLAUF, L., NAGEL, K. und SIEGEL, H. (2008a): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2007.- *Meereswissenschaftliche Berichte Warnemünde* **72**, 1-93.
- 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., NEHRING, D. and K. NAGEL (2008b): Nutrient concentrations, trends and their relation to eutrophication. In: FEISTEL, R., NAUSCH, G., WASMUND, N. (Eds.) (2008b): State and evolution of the Baltic Sea, 1952-2005. – John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, 337-366.
- NAUSCH, G., FEISTEL, R., UMLAUF, L., MOHRHOLZ, V. and SIEGEL, H. (2011a): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2010. *Meereswissenschaftliche Berichte Warnemünde* **84**, 1-99.
- NAUSCH, G., BACHOR, A., PETENATI, T., VOSS, J. und V. WEBER, M. (2011b): Nährstoffe in den deutschen Küstengewässern der Ostsee und angrenzenden Seegebieten. – *Meeresumwelt Aktuell Nord- und Ostsee* 2011/1.
- NEHRING, D. and MATTHÄUS, W. (1991): Current trends in hydrographic and chemical parameters and eutrophication in the Baltic Sea. – *Int. Revues ges. Hydrobiol.* **76**, 297-316.
- NEHRING, D., MATTHÄUS, W. and LASS, H.U. (1993): Die hydrographisch-chemischen Bedingungen in der westlichen und zentralen Ostsee im Jahre 1992. – *Dt. Hydrogr. Z.* **45**, 281-331.
- NEHRING, D., MATTHÄUS, W., LASS, H.U., NAUSCH, G. and NAGEL, K. (1995a): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1994. – *Meereswiss. Ber.* **9**, 1-71.
- NEHRING, D., MATTHÄUS, W., LASS, H.U., NAUSCH, G. and NAGEL, K. (1995b): The Baltic Sea 1994 – consequences of the hot summer and inflow events.. – *Dt. Hydrogr. Z.* **47**, 131-144.
- NOAA (2012): NOAA: 2011 a year of climate extremes in the United States. http://www.noaanews.noaa.gov/stories2012/20120119_global_stats.html
- PAPUSH, L. and Å . DANIELSSON (2006): Silicon in the marine environment: dissolved silica trends in the Baltic Sea. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **67**, 53-66.
- SANDEN, P., RAHM, L. and F. WULFF, F (1991): Non-parametric trend test of Baltic Sea data. *Environmetrics* **2**, 263-278.
- SCHMAGER, G. (2011): Auswertung der Messfahrt mit MZB „Kronsort“ vom 05.12. – 07.12. 2011, Marineamt Rostock

- SCHMELZER, N. and HOLFORT, J. (2011): Der Eiswinter 2010/11 an den deutschen Nord- und Ostseeküsten sowie eine Beschreibung der Eisverhältnisse im gesamten Ostseebereich. Eisdienst, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie Rostock. http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Beobachtungen/Eis/Eiswinter2010_11.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.
- Schwoerbel, J. (1984): Einführung in die Limnologie. – VEB Gustav Fischer Verlag, Jena, 1-233.
- SELLSCHOPP, J., ARNEBORG, L., KNOLL, M., FIEKAS, V., GERDES, F., BURCHARD, H., LASS, H.-U., MOHRHOLZ, V., and UMLAUF, L. (2006): Direct observations of a medium-intensity inflow into the Baltic Sea, *Cont. Shelf Res*, **26**, 2393-2414.
- SIEGEL, H., GERTH, M. and SCHMIDT, T. (1996): Water exchange in the Pomeranian Bight – investigated by satellite data and shipborne measurements. – *Cont. Shelf Res* **16**, 1793-1817.
- SIEGEL, H., GERTH, M., TIESEL, R. and TSCHERSICH, G. (1999): Seasonal and interannual variations in satellite derived sea surface temperature of the Baltic Sea in the 1990s. – *Dt. Hydrogr. Z.* **51**, 407-422.
- SIEGEL, H., GERTH, M. and TSCHERSICH, G. (2006): Sea Surface Temperature development of the Baltic Sea in the period 1990-2004 – *Oceanologia* **48** (S), 119-131.
- SIEGEL, H., GERTH, M., and TSCHERSICH, G., 2008: Satellite-derived Sea Surface Temperature for the period 1990-2005. In: FEISTEL, R., NAUSCH, G., WASMUND, N. (Eds.) (2008): State and evolution of the Baltic Sea, 1952-2005. – John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, 337-366.241-265.
- SIEGEL, H., and GERTH, M., 2010. Satellite Based Process Studies in the Baltic Sea. Proceedings Conference “Ocean from Space” Venice 26-30 April 2010.
- SMHI (1982): Climatological Ice Atlas. – Sjöfartsverkets tryckeri, Norrköping. 220 pp.
- SMHI (2011): Accumulated inflow through the Öresund. http://www.smhi.se/hfa_coord/BOOS/Oresund.html
- SMHI (2012): unveröffentlichte Daten.
- TRZOSINSKA, A. and E. LYSIAK-PASTUSZAK (1996): Oxygen and nutrients in the southern Baltic Sea. *Oceanological Studies* 1-2, 41-76.
- TRUMP (1998): Transport- und Umsatzprozesse in der Pommerschen Bucht (TRUMP) 1994-1996. – Abschlussbericht, IOW Warnemünde, 1-32 (unveröffentlicht).
- UMLAUF, L., ARNEBORG, L., BURCHARD, H., FIEKAS, V., LASS, H.-U., MOHRHOLZ, V., and PRANDKE, H. (2007): The transverse structure of turbulence in a rotating gravity current. - *Geophys. Res. Lett.* **34**, L08601, doi:10.1029/2007GL029521.
- UMLAUF, L. and ARNEBORG, L. (2009a). Dynamics of rotating shallow gravity currents passing through a channel. Part I: Observation of transverse structure. - *J. Phys. Oceanogr.* **39**, 2385-2401.
- UMLAUF, L. and ARNEBORG, L. (2009b). Dynamics of rotating shallow gravity currents passing through a channel. Part II: Analysis. - *J. Phys. Oceanogr.* **39**, 2402-2416

- UMLAUF, L., ARNEBORG, L., HOFMEISTER, R., AND BURCHARD, H. (2010). Entrainment in shallow rotating gravity currents: A modeling study, *J. Phys. Oceanogr.* **40**, 1819-1834, 2010.
- WASMUND, N., NAUSCH, G. and MATTHÄUS, W. (1998): Phytoplankton spring blooms in the southern Baltic Sea- spatio-temporal development and long-term trends. – *Journal Plankton Research* **20**, 1099-1117.
- WASMUND, N., NAUSCH, G., POSTEL, L., WITEK, Z., ZALEWSKI, M., GROMISZ, S., LYSIAK-PASTUSZAK, E., OLENINA, I., KAVOLYTE, R., JASINSKEITE, A., MÜLLER-KARULIS, B., IKAUNIECE, A., OJAVEER, H., KALLISTE, K. AND A. JANNUS (2000): Trophic status of coastal and open areas of the south-eastern Baltic Sea based on nutrient and phytoplankton data from 1993 – 1997. – *Meereswiss. Ber.* **38**, 1-83.
- WASMUND, N. , NAUSCH, G. and FEISTEL, R. (2012): Silicate consumption – an indicator for long term trends in spring diatom development in the Baltic Sea. – in prep.
- WULFF, F. AND L. RAHM (1988): Long-term, seasonal and spatial variation of nitrogen, phosphorus and silicate in the Baltic. An overview. - *Marine Environmental Research* **26**, 19-37.

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

- 10 (1995) Schmidt, Martin:
Analytical theory and numerical experiments to the forcing of flow at isolated topographic features
- 11 (1995) Kaiser, Wolfgang; Nehring, Dietwart; Breuel, Günter; Wasmund, Norbert; Siegel, Herbert; Witt, Gesine; Kerstan, Eberhard; Sadkowiak, Birgit:
Zeitreihen hydrographischer, chemischer und biologischer Variablen an der Küstenstation Warnemünde (westliche Ostsee)
Schneider, Bernd; Pohl, Christa:
Spurenmittelkonzentrationen vor der Küste Mecklenburg-Vorpommerns
- 12 (1996) Schinke, Holger:
Zu den Ursachen von 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-Pastuszek, Elżbieta; Olenina, Irina; Kavolyte, Rima; Jasinskaite, Aldona; Müller-Karulis, Bärbel; Ikauniece, Anda; Andrushaitis, Andris; Ojaveer, Henn; Kallaste, Kalle; Jaanus, Andres:
Trophic status of coastal and open areas of the south-eastern Baltic Sea based on nutrient and phytoplankton data from 1993 - 1997
- 39 (2000) Matthäus, Wolfgang; Nausch, Günther; Lass, Hans Ulrich; Nagel, Klaus; Siegel, Herbert:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1999
- 40 (2000) Schmidt, Martin; Mohrholz, Volker; Schmidt, Thomas; John, H.-Christian; Weinreben, Stefan; Diesterheft, Henry; Iita, Aina; Filipe, Vianda; Sangolay, Bomba-Bazik; Kreiner, Anja; Hashoongo, Victor; da Silva Neto, Domingos:
Data report of R/V "Poseidon" cruise 250 ANDEX'1999
- 41 (2000) v. Bodungen, Bodo; Dannowski, Ralf; Erbguth, Wilfried; Humborg, Christoph; Mahlburg, Stefan; Müller, Chris; Quast, Joachim; Rudolph, K.-U.; Schernewski, Gerald; Steidl, Jörg; Wallbaum, Volker:
Oder Basin - Baltic Sea Interactions (OBBSI): Endbericht
- 42 (2000) Zettler, Michael L.; Bönsch, Regine; Gosselck, Fritz:
Verbreitung des Makrozoobenthos in der Mecklenburger Bucht (südliche Ostsee) - rezent und im historischen Vergleich
- 43 (2000) Wasmund, Norbert; Alheit, Jürgen; Pollehne, Falk; Siegel, Herbert:
Der biologische Zustand der Ostsee im Jahre 1999 auf der Basis von Phytoplankton- und Zooplanktonuntersuchungen
- 44 (2001) Eichner, Christiane:
Mikrobielle Modifikation der Isotopensignatur des Stickstoffs in marinem partikulären Material
- 45 (2001) Matthäus, Wolfgang; Nausch, Günther (Editors):
The hydrographic-hydrochemical state of the western and central Baltic Sea in 1999/2000 and during the 1990s
- 46 (2001) Wasmund, Norbert; Pollehne, Falk; Postel, Lutz; Siegel, Herbert; Zettler, Michael L.:
Biologische Zustandseinschätzung der Ostsee im Jahre 2000
- 47 (2001) Lass, Hans Ulrich; Mohrholz, Volker; Nausch, Günther; Pohl, Christa; Postel, Lutz; Rüß, Dietmar; Schmidt, Martin; da Silva, Antonio; Wasmund, Norbert:
Data report of R/V "Meteor" cruise 48/3 ANBEN'2000
- 48 (2001) Schöner, Anne Charlotte:
Alkenone in Ostseesedimenten, -schwebstoffen und -algen: Indikatoren für das Paläomilieu?

- 49 (2002) Nausch, Günther; Feistel, Rainer; Lass, Hans Ulrich; Nagel, Klaus; Siegel, Herbert:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2001
Pohl, Christa; Hennings, Ursula:
Ostsee-Monitoring - Die Schwermetall-Situation in der Ostsee im Jahre 2001
- 50 (2002) Manasreh, Riyad:
The general circulation and water masses characteristics in the Gulf of Aqaba and northern Red Sea
- 51 (2002) Wasmund, Norbert; Pollehne, Falk; Postel, Lutz; Siegel, Herbert; Zettler, Michael L.:
Biologische Zustandseinschätzung der Ostsee im Jahre 2001
- 52 (2002) Reißmann, Jan Hinrich:
Integrale Eigenschaften von mesoskaligen Wirbelstrukturen in den tiefen Becken der Ostsee
- 53 (2002) Badewien, Thomas H.:
Horizontaler und vertikaler Sauerstoffaustausch in der Ostsee
- 54 (2003) Fennel, Wolfgang; Hentzsch, Barbara (Herausgeber):
Festschrift zum 65. Geburtstag von Wolfgang Matthäus
- 55 (2003) Nausch, Günther; Feistel, Rainer; Lass, Hans Ulrich; Nagel, Klaus; Siegel, Herbert:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2002
Pohl, Christa; Hennings, Ursula:
Die Schwermetall-Situation in der Ostsee im Jahre 2002
- 56 (2003) Wasmund, Norbert; Pollehne, Falk; Postel, Lutz; Siegel, Herbert; Zettler, Michael L.:
Biologische Zustandseinschätzung der Ostsee im Jahre 2002
- 57 (2004) Schernewski, Gerald; Dolch, Tobias (Editors):
The Oder estuary against the background of the European Water Framework Directive
- 58 (2004) Feistel, Rainer; Nausch, Günther; Matthäus, Wolfgang; Łysiak-Pastuszak, Elżbieta; Seifert, Torsten; Sehested Hansen, Ian; Mohrholz, Volker; Krüger, Siegfried; Buch, Erik; Hagen, Eberhard:
Background Data to the Exceptionally Warm Inflow into the Baltic Sea in late Summer of 2002
- 59 (2004) Nausch, Günther; Feistel, Rainer; Lass, Hans Ulrich; Nagel, Klaus; Siegel, Herbert:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2003
Pohl, Christa; Hennings, Ursula:
Die Schwermetall-Situation in der Ostsee im Jahre 2003
- 60 (2004) Wasmund, Norbert; Pollehne, Falk; Postel, Lutz; Siegel, Herbert; Zettler, Michael L.:
Biologische Zustandseinschätzung der Ostsee im Jahre 2003
- 61 (2004) Petry, Carolin:
Mikrobieller Abbau von partikulärem organischen Material in der tiefen Wassersäule

- 62 (2005) Nausch, Günther; Feistel, Rainer; Lass, Hans Ulrich; Nagel, Klaus; Siegel, Herbert:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2004
Pohl, Christa; Hennings, Ursula:
Die Schwermetall-Situation in der Ostsee im Jahre 2004
- 63 (2005) Umlauf, Lars; Burchard, Hans; Bolding, Karsten:
GOTM – Scientific Documentation. Version 3.2
- 64 (2005) Wasmund, Norbert; Pollehne, Falk; Postel, Lutz; Siegel, Herbert; Zettler, Michael L.:
Biologische Zustandseinschätzung der Ostsee im Jahre 2004
- 65 (2006) Matthäus, Wolfgang:
The history of investigation of salt water inflows into the Baltic Sea
- from the early beginning to recent results
- 66 (2006) Nausch, Günther; Feistel, Rainer; Lass, Hans Ulrich; Nagel, Klaus; Siegel, Herbert:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2005
Pohl, Christa; Hennings, Ursula:
Die Schwermetall-Situation in der Ostsee im Jahre 2005
- 67 (2006) Rößler, Doreen:
Reconstruction of the Littorina Transgression in the Western
Baltic Sea
- 68 (2006) Yakushev, Evgeniy V.; Pollehne, Falk; Jost, Günter; Kuznetsov, Ivan;
Schneider, Bernd; Umlauf, Lars:
Redox Layer Model (ROLM): a tool for analysis of the water column
oxic/anoxic interface processes
- 69 (2006) Wasmund, Norbert; Pollehne, Falk; Postel, Lutz; Siegel, Herbert; Zettler, Michael L.:
Biologische Zustandseinschätzung der Ostsee im Jahre 2005
- 70 (2007) Nausch, Günther; Feistel, Rainer; Lass, Hans Ulrich; Nagel, Klaus; Siegel, Herbert:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2006
Pohl, Christa; Hennings, Ursula:
Die Schwermetall-Situation in der Ostsee im Jahre 2006
- 71 (2007) Wasmund, Norbert; Pollehne, Falk; Postel, Lutz; Siegel, Herbert; Zettler, Michael L.:
Biologische Zustandseinschätzung der Ostsee im Jahre 2006
- 72 (2008) Nausch, Günther; Feistel, Rainer; Umlauf, Lars; Nagel, Klaus; Siegel, Herbert:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2007
Pohl, Christa; Hennings, Ursula:
Die Schwermetall-Situation in der Ostsee im Jahre 2007
- 73 (2008) Telesh, Irena; Postel, Lutz; Heerkloss, Reinhard; Mironova, Ekaterina;
Skarlato, Sergey:
Zooplankton of the Open Baltic Sea: Atlas
- 74 (2008) Wasmund, Norbert; Pollehne, Falk; Postel, Lutz; Siegel, Herbert; Zettler, Michael L.:
Biologische Zustandseinschätzung der Ostsee im Jahre 2007

- 75 (2009) Hagen, Eberhard; Plüschke, Günter:
Daily Current Series in the Deep Eastern Gotland Basin (1993 – 2008)
- 76 (2009) Telesh, Irena; Postel, Lutz; Heerkloss, Reinhard; Mironova, Ekaterina;
Skarlato, Sergey:
Zooplankton of the Open Baltic Sea: Extended Atlas
- 77 (2009) Nausch, Günther; Feistel, Rainer; Umlauf, Lars; Nagel, Klaus; Siegel,
Herbert:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2008
Pohl, Christa; Hennings, Ursula; Leipe, Thomas:
Die Schwermetall-Situation in der Ostsee im Jahre 2008
- 78 (2009) Wasmund, Norbert; Pollehne, Falk; Postel, Lutz; Siegel, Herbert; Zettler,
Michael L.:
Biologische Zustandseinschätzung der Ostsee im Jahre 2008
- 79 (2009) Wasmund, Norbert; Postel, Lutz; Zettler, Michael L.:
Biologische Bedingungen in der deutschen ausschließlichen
Wirtschaftszone der Nordsee im Jahre 2008
- 80 (2010) Nausch, Günther; Feistel, Rainer; Umlauf, Lars; Nagel, Klaus; Siegel,
Herbert:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2009
Pohl, Christa; Hennings, Ursula; Leipe, Thomas:
Die Schwermetall-Situation in der Ostsee im Jahre 2009
- 81 (2010) Wasmund, Norbert; Pollehne, Falk; Postel, Lutz; Siegel, Herbert;
Zettler, Michael L.:
Biologische Zustandseinschätzung der Ostsee im Jahre 2009
- 82 (2010) Wasmund, Norbert; Postel, Lutz; Zettler, Michael L.:
Biologische Bedingungen in der deutschen ausschließlichen
Wirtschaftszone der Nordsee im Jahre 2009
- 83 (2010) Matthäus, Wolfgang:
Germany and the investigation of the Baltic Sea hydrography during
the 19th and early 20th century
Matthäus, Wolfgang:
Publications on the history of the marine research in
Warnemünde/Germany
- 84 (2011) Nausch, Günther; Feistel, Rainer; Umlauf, Lars; Mohrholz, Volker; Siegel,
Herbert:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2010
- 85 (2011) Wasmund, Norbert; Pollehne, Falk; Postel, Lutz; Siegel, Herbert;
Zettler, Michael L.:
Biologische Zustandseinschätzung der Ostsee im Jahre 2010
Wasmund, Norbert; Postel, Lutz; Zettler, Michael L.:
Biologische Bedingungen in der deutschen ausschließlichen
Wirtschaftszone der Nordsee im Jahre 2010
- 86 (2012) Nausch, Günther; Feistel, Rainer; Umlauf, Lars; Mohrholz, Volker; Nagel,
Klaus; Siegel, Herbert:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2011