

Meereswissenschaftliche Berichte

MARINE SCIENCE REPORTS

No. 84

Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee

2010

von

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

Leibniz- Institut für Ostseeforschung Warnemünde

2011

NAUSCH, G.; FEISTEL, R.; UMLAUF, L.; MOHRHOLZ, V.; SIEGEL, H.:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2010

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Abstract	3
Kurzfassung	3
1. Einleitung	4
2. Meteorologische Bedingungen	7
3. Wasseraustausch durch die Ostseezugänge/ Beobachtungen an der Messplattform „Darßer Schwelle“	28
3.1 Wassertemperatur, Salzgehalt und Sauerstoffgehalt	28
3.2 Strömung	37
4. Beobachtungen an der Bojenstation „Arkonabecken“	39
5. Beobachtungen an der Bojenstation „Oder- Bank“	44
6. Hydrographisch- hydrochemische Bedingungen	49
6.1. Wassertemperatur	49
6.1.1 Wasseroberflächentemperatur	49
6.1.2 Vertikalverteilung der Wassertemperatur	57
6.2 Salzgehalt	65
6.3 Sauerstoffverteilung	70
6.4 Anorganische Nährstoffe	79
Zusammenfassung	91
Summary	93
Danksagung	95
Literaturverzeichnis	95

Abstract

The article summarizes the hydrographic-hydrochemical conditions in the western and central Baltic Sea in 2010. Based on meteorological conditions, the horizontal and vertical distribution of temperature, salinity, oxygen/hydrogen sulphide and inorganic nutrients are described on a seasonal scale.

The year was characterized by a long and cold winter 2009/2010 and a warm summer which is also reflected in the surface water temperature.

In 2010, barotropic inflow events with estimated volumes between 100 and 200 km³ took place five times: in January/February, in July, in September, in October/November and in December. However, they were not able to ventilate the deeper basins of the Baltic Sea. The barotropic inflow of November/December 2009 was only able to oxygenate the Bornholm Basin and could be detected within the halocline of the eastern Gotland Basin in March 2010. In the deep water of the eastern and northern Gotland Basin, the stagnation period is continuing undiminishedly. Compared with the end of the previous long stagnation period in 2002, the 2010 ammonium concentrations of the Gotland and Farö Deeps are reached again or even exceeded. Also phosphate concentrations are in the same order of magnitude.

Kurzfassung

Die Arbeit beschreibt die hydrographisch-chemischen Bedingungen in der westlichen und zentralen Ostsee für das Jahr 2010. Basierend auf den meteorologischen Verhältnissen werden die horizontalen und vertikalen Verteilungsmuster von Temperatur, Salzgehalt, Sauerstoff/Schwefelwasserstoff sowie der anorganischen Nährstoffe mit saisonaler Auflösung dargestellt.

Das Jahr war durch einen langen und kalten Winter 2009/2010 und einen warmen Sommer gekennzeichnet, was sich auch in den Oberflächenwassertemperaturen widerspiegelte.

Barotrope Einstromereignisse mit geschätzten Volumina zwischen 100 und 200 km³ fanden in der Ostsee 2010 fünf Mal statt, im Januar/Februar, im Juli, im September, im Oktober/November und im Dezember. Sie waren aber nicht in der Lage, die tiefen Becken der Ostsee zu belüften. Der barotrope Einstrom vom November/Dezember 2009 konnte lediglich das Bornholmbecken belüften und konnte im März 2010 auch im Bereich der Halokline des östlichen Gotlandbeckens nachgewiesen werden. Im Tiefenwasser des östlichen und nördlichen Gotlandbeckens hält die Stagnationsperiode unvermindert an. Vergleicht man die Ammoniumwerte des Gotland- und Farötiefs im Jahr 2010 mit denen des Jahres 2002, dem Ende der letzten Stagnationsperiode, so sind diese wieder erreicht oder bereits überschritten. Auch die Phosphatkonzentrationen liegen in der gleichen Größenordnung.

1. Einleitung

Die Einschätzung des hydrographisch-hydrochemischen Zustandes der Ostsee im Jahre 2010 erfolgte einerseits auf der Basis des Ostsee-Überwachungsprogramms, das das *Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde* (IOW) im Auftrag des *Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie* (BSH) Hamburg und Rostock durchführt. Im Rahmen einer Verwaltungsvereinbarung wird dem IOW der deutsche Beitrag für das Überwachungsprogramm (COMBINE) der Helsinki-Kommission (HELCOM) zum Schutz der Meeresumwelt des Ostseegebietes übertragen. Beginnend mit dem Jahr 2008 wurde das Untersuchungsgebiet neu definiert. Es erstreckt sich von der Kieler Bucht bis zum Bornholmsgat und umfasst damit im Wesentlichen die Ausschließliche Wirtschaftszone Deutschlands (AWZ). Zur Absicherung und Fortführung der Langzeitmessungen wird dieses Messprogramm ab 2008 durch einen IOW-finanzierten Anteil ergänzt, um auch die Situation in den Becken der zentralen Ostsee, die ausschlaggebend für den Zustand der gesamten Ostsee sind, beschreiben zu können. Zu den Aufgaben des Gesamtprogramms gehört die Beschreibung des Wasseraustausches zwischen Ost- und Nordsee, der hydrographisch-chemischen Bedingungen im Untersuchungsgebiet und deren zeitliche und räumliche Veränderungen sowie die Identifikation und Untersuchung von Langzeittrends.

Im Jahre 2010 wurden fünf Fahrten durchgeführt, die alle vier Jahreszeiten sowie zusätzliche Beobachtungen im März 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 „Heincke“ (Februar, Mai, November) und „Professor Albrecht Penck“ (März) sowie „Alkor“ (Juli) durchgeführt wurde, sind die Richtlinien der HELCOM für die Überwachung der Ostsee im Rahmen des COMBINE-Programms (HELCOM, 2000). Angaben über die Gewinnung der Wasserproben und die untersuchten Parameter sowie über die verwendeten Messverfahren und ihre Genauigkeit sind bei NEHRING et al. (1993, 1995a) enthalten.

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

und der Salzgehalt sowie der Sauerstoffgehalt in verschiedenen Tiefen registriert:

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

Die MARNET-Stationen arbeiteten auch im Jahr 2010 im Wesentlichen mit der bisher bekannten, hohen Zuverlässigkeit. Die MARNET-Station „Oder-Bank“ wurde im Dezember 2010 wegen Eisgangs außer Betrieb genommen und nahm im Frühjahr 2011 den Betrieb wieder auf.

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

Die Überwachung der Wasseroberflächentemperatur der gesamten Ostsee erfolgte anhand von Einzelszenen und mittleren monatlichen Verteilungen, ermittelt aus NOAA-AVHRR-Wettersatellitendaten. Dabei wurden alle wolken- und eisfreien Bildpunkte (Pixel 1 x 1 km) der Satellitenüberflüge eines Monats berücksichtigt und in Karten zusammengestellt (SIEGEL et al., 1999, 2006). Die Einschätzung des Jahres 2009 wurde im Vergleich zu den Mittelwerten des Untersuchungszeitraumes 1990-2008 und zu extremen Jahren vorgenommen und konzentriert sich auf das neu definierte Untersuchungsgebiet.

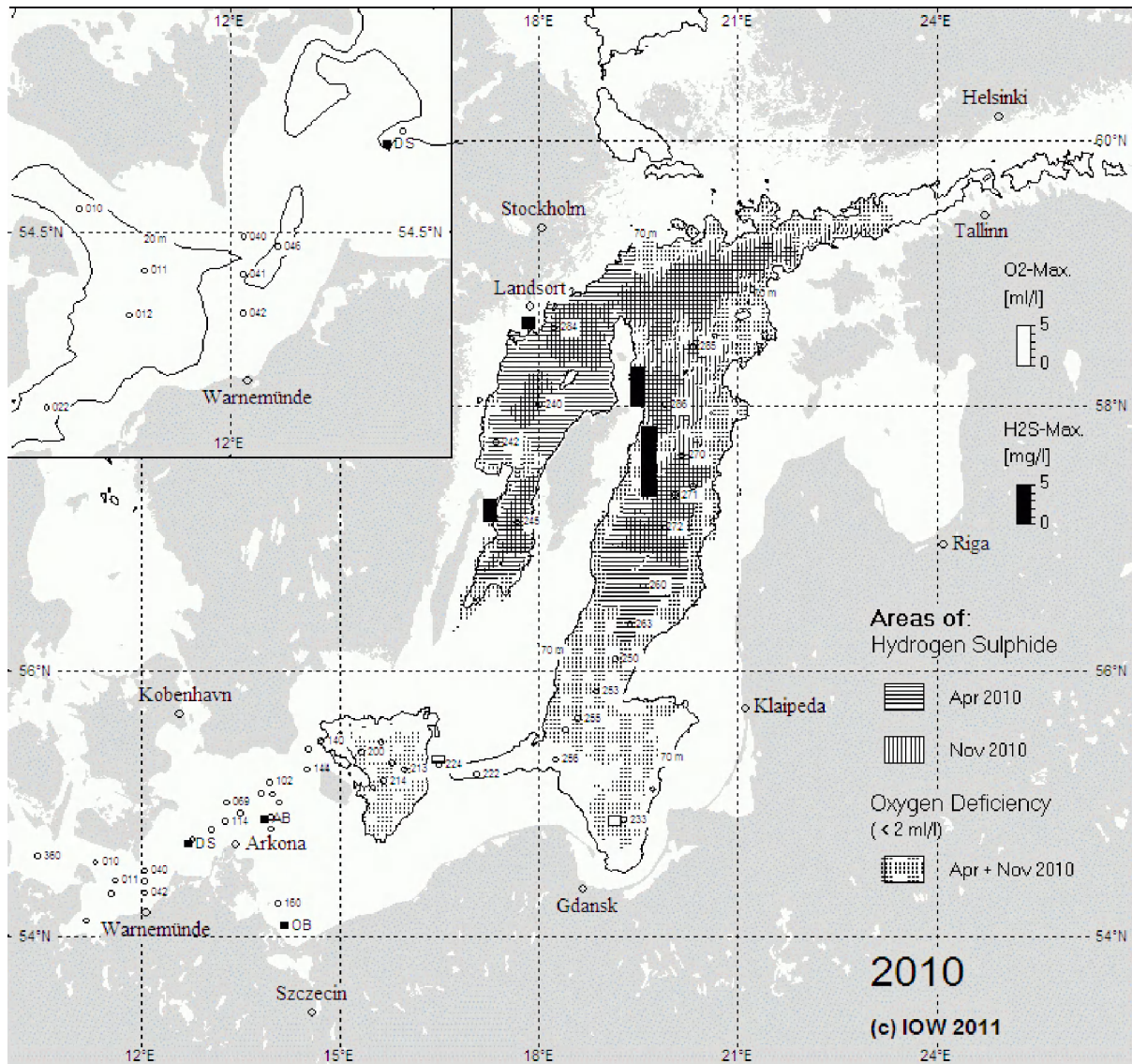


Abb. 1

Stationskarte (■ MARNET-Stationen) und Gebiete mit Sauerstoffmangel und Schwefelwasserstoff in der grundnahen Wasserschicht der Ostsee sowie maximale Sauerstoff- und Schwefelwasserstoffkonzentrationen an ausgewählten Stationen (Säulen) im Jahre 2010; 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 2010. Bars show the maximum oxygen and hydrogen sulphide concentrations of this layer in 2010; the figure contains additionally the 70 m – depth line resp. 20 m – depth line (small picture)

2. Meteorologische Bedingungen

Der Witterungsverlauf des Jahres 2010 in der südlichen Ostsee kann durch Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD, 2010, 2011a) 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 drei besonders milden und kurzen Wintern in Folge war der Winter 2009/2010 auffällig lang und kalt. Mit einer Kältesumme 203,7 K d von Warnemünde (Tab. 2) liegt er auf Platz 12 der kältesten Winter seit Beginn der Vergleichsdaten im Jahr 1948. Der kälteste Winter war 1962/63 mit 395,2 K d, der letzte kältere Winter war 1995/96 mit 292 K d. Der Winter 2009/2010 führte nach BSH-Angaben (SCHMELZER & HOLFORT, 2010) zu einer maximalen Eisbedeckung der Ostsee von 240 000 km² am 8. März, die bei 112% des langjährigen Mittelwerts von 214 000 km² seit 1720 lag. An der Küste von Schleswig-Holstein zählte er als mäßiger, in Mecklenburg-Vorpommern aber als starker Eiswinter. Das erste Eis bildete sich in der Bottenwiek Ende November, 2 bis 3 Wochen später als normal. Bis Mitte Dezember setzte sich die Vereisung im Bottnischen Meerbusen fort. In der Kältewelle im Januar blieb die Fähre „Nordlandia“ vor Helsinki am 29.1. im Eis stecken. Der Höhepunkt der Eisbedeckung wurde um den 8. März erreicht, als der Bottnische, Finnische und Rigaische Meerbusen vollständig zugefroren waren. Zu dieser Zeit saßen etwa 50 Schiffe im Eis der Alandsee fest, darunter auch große wie die „Amorella“ mit 1000 Passagieren. Ende Mai löste sich das letzte Treibeis in der Bottenwiek zu einem durchschnittlichen Endpunkt der Eissaison auf. Der Winter 2009/10 war vor allem im Nordosten Deutschlands ungewöhnlich schneereich und kalt. Er bestand aus einer von Mitte Dezember bis Ende Februar dauernden Kälteperiode, die nur kurzzeitig um die Jahreswende unterbrochen wurde. Die tiefsten Werte der Tagesmitteltemperatur wurden um den 20. Dezember 2009 und um den 25. Januar 2010 erreicht. Im Südtail der Kieler Bucht und nördlich des Darß sank die Wassertemperatur Anfang Februar knapp unter 0 °C, im Arkona-Becken blieb sie im Februar und im März leicht über 0 °C. Der Gefrierpunkt von Brackwasser mit einem Salzgehalt von 8 g/kg liegt bei - 0,5 °C. Besonders im Raum Rügen und Usedom kam es zu starker Eisbildung; die Insel Hiddensee war wegen des Eisgangs längere Zeit von Rügen abgeschnitten.

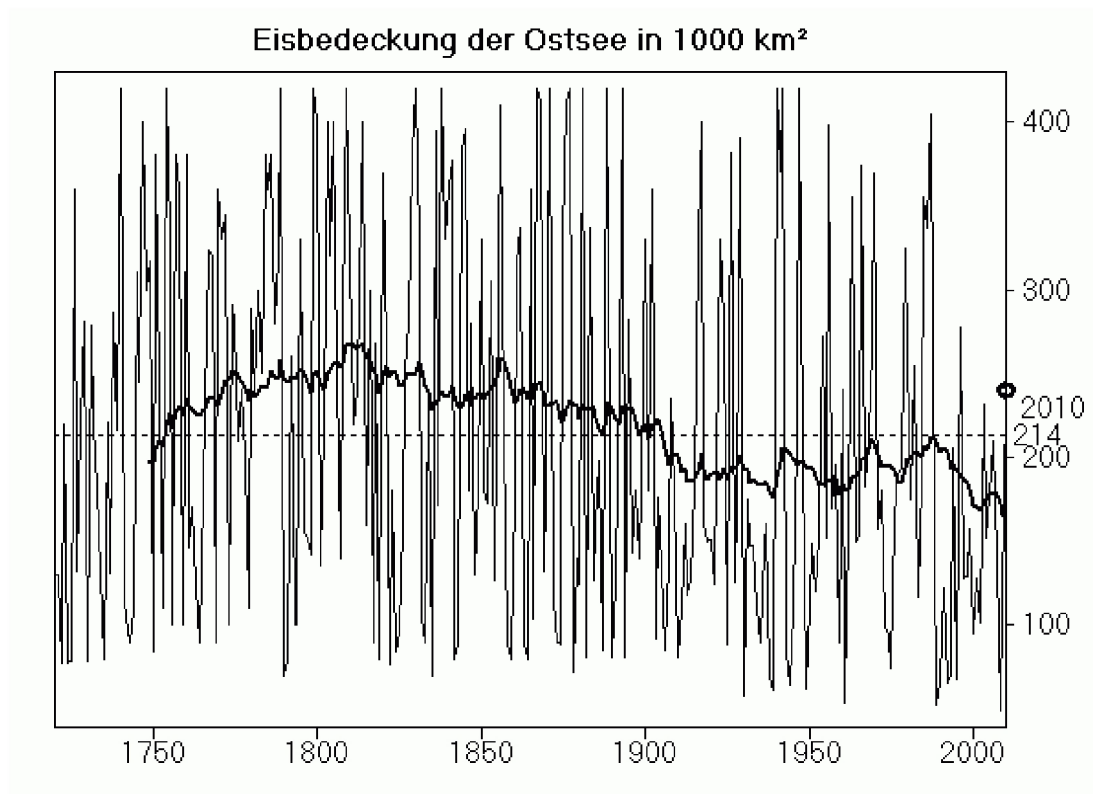


Abb. 2

Maximale Eisbedeckung der Ostsee in 1000 km² in den Jahren 1720 bis 2010 (SCHMELZER et al., 2008; SCHMELZER & HOLFORT, 2010). 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 2009/2010 mit 240 000 km²

Fig. 2

Maximum ice covered area in 1000 km² of the Baltic Sea in the years 1720 to 2010 (SCHMELZER et al., 2008; SCHMELZER & HOLFORT, 2010). The long-term average of 214 000 km² is shown as dashed line. The bold line is a running mean value over the past 30 years. The ice coverage in winter 2009/2010 with 240 000 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, 2010). 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 2010 gleich 4,22 m (2009 nur 0,13 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 werden. 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 betrug die reduzierte Eisumme 45,8 d (2009 nur 4,7 d).

Der 30-jährige Mittelwert der Eisbedeckung bleibt durch den Winter 2009/10 weiter bei den tiefen Werten der letzten Jahre (Abb. 2). Eine Bedeckung von etwa 58% der Gesamtfläche der Ostsee von 415 266 km² fällt in die Nähe der Obergrenze des Bereichs 40% - 60%. Dieser Bedeckungsgrad wird im langfristigen Mittel nur etwa in 20% 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 2010 war geprägt von vielen Blockierungslagen über Deutschland und dem Ostseeraum, mit häufigeren und anhaltenden Ost- oder Nordwinden (Abb. 3a). Die hier angegebenen Namen der Hochs und Tiefs wurden 2010 von der Freien Universität Berlin vergeben, in guter Tradition seit 1954, und seit 2002 auch über so genannte „Wetterpatenschaften“ (FU-BERLIN, 2011).

Anfang **Januar** 2010 herrschte Frost im gesamten Ostseeraum. Hoher Luftdruck bei Island und niedriger bei den Azoren bewirkten einen negativen NAO und eine Blockierungslage. Tief „Annette“ zog am 3.1. als kleines Schneetief von der Nordsee nach Böhmen. Der Verkehr auf deutschen Autobahnen und Flughäfen war durch die Schneefälle stark behindert. Die Boddengewässer waren mit Eis bedeckt, Norddeutschland lag unter einer geschlossenen Schneedecke. Ein barokliner Einstrom erreichte am 5.1. einen Salzgehalt von 17 g/kg in Bodennähe am Messmast Darßer Schwelle, der bis zum 9.1. noch auf 18 g/kg anstieg. Die Wettersituation wurde durch die Ankunft des Vb-Tiefs „Daisy“ weiter verschärft. Schneesturm und Hochwasser (bis 158 cm in Travemünde) sorgten für extreme Verhältnisse in der westlichen Ostsee und in ganz Mitteleuropa, selbst Großbritannien erlebte Tiefsttemperaturen von unter -20 °C. Der starke Ausstrom aus der Ostsee bei bis zu 1,80 m Pegeldifferenz entlang des Großen Belt stoppte schließlich den baroklinen Einstrom. Am 21.1. hatten sich auf dem Atlantik zwar wieder ein Islandtief und ein Azorenhoch gebildet, trotzdem hielt die Blockierungslage an mit einer Tiefdruckrinne von Island bis Sizilien. Die Grenze zwischen maritimem Tauwetter und sibirischem Frost lag bevorzugt entlang der Elbe. Am 23.1. bildete sich ein neues kleines Schneetief „Ina“ über der Nordsee und verursachte

noch mehr Schnee und Kälte in Deutschland. Am 25.1. fiel die Wassertemperatur am Leuchtturm Kiel unter 0 °C und der Landsortpegel auf -49 cm; die Nachttemperaturen in Norddeutschland lagen verbreitet unter -20 °C. Am 27.1. zog das Sturmtief „Jennifer“ vom Nordmeer nach Süden, Kälterekorde und Schneeverwehungen waren die Folge. In Warnemünde fiel der Pegel auf -115 cm. Die Lage verschärfte sich weiter durch das nachfolgende Orkantief „Keziban“ am 29.1., auf dessen Rückseite starker Nordwind mit Schnee die Ostseeküste traf. In Mecklenburg-Vorpommern kam der Verkehr zeitweise völlig zum Erliegen. Nach dem Ausfall der Fähre "Vitte" war kein weiterer Schiffsverkehr zwischen Schaprode und Hiddensee mehr möglich.

Am 2. **Februar** kehrte das Hoch „Eberhard“, das zuvor von Spanien nach Island gezogen war, nach Spanien zurück. Am 3.2. setzte mit dem Sturmtief „Miriam“ über Dänemark Einstrom in die relativ leere Ostsee ein. An der Darßer Schwellen stieg der Salzgehalt an der Oberfläche auf 13 g/kg, die Temperatur fiel unter 0 °C. Mit der milden Westwindlage fanden weitere kräftige Schneefälle statt. Vielerorts waren Dächer wegen der Schneelast einsturzgefährdet. Hiddensee wurde mit dem Hubschrauber versorgt. Mit dem Hoch „Eberhard“, das über Tunesien am 6.2. nach Bulgarien gezogen war, kehrte die Kälte und die Ausstromlage zurück. Am 7.2. erreichte die „Grömitz“ Hiddensee. Am 11.2. sank die Oberflächentemperatur im Fehmarnbelt auf -0,6 °C. Mit dem neuen Vb-Tief „Queen“, ähnlich wie zuvor „Daisy“, setzte im Nordosten am 12.2. wieder starker Schneefall ein, begleitet von Sturm aus Ost, Hochwasser und starkem Ausstrom. In Greifswald lagen 60 cm Schnee, im Katastrophenwinter von 1978 waren es dagegen „nur“ 58 cm gewesen. Am 18.2. trat mit Tief „Susanne“ Eisregen und Tauwetter ein, obwohl mit Azorentief und Islandhoch weiterhin eine Blockierungslage bestand. Auch der Ausstrom setzte sich fort, bis durch das Sturmtief „Ruby“ am 21.2. kurzzeitig Einstrom begann, gefolgt von neuem Frost und Schneefall auf dessen Rückseite. Gleichzeitig verwüstete das Nachfolgetief „Undine“ die Insel Madeira. Ein ähnliches Schicksal traf die Kanaren, Spanien, Frankreich und Deutschland durch das Orkantief „Xynthia“ vom 26.2. bis 28.2. Die höchste Windgeschwindigkeit in Deutschland wurde nach DWD-Angaben mit 166 Kilometern pro Stunde am 557 Meter hohen Weinbiet bei Neustadt/Weinstraße (Rheinland-Pfalz) gemessen, Mecklenburg-Vorpommern blieb von dem Orkan weitgehend verschont. Trotz des heftigen Sturms erfolgt nur ein geringer Einstrom.

Unter dem Einfluss von Hoch „Harro“ kam es am 5. **März** zu einem neuen Kälteeinbruch im Ostseeraum. Die Fähre „Amorella“ musste vor der schwedischen Küste mit Eisbrechern aus dem Packeis befreit werden, weitere Fähren und Frachter steckten fest. Von der Nordsee zog das kleine Schneetief „Yve“ bis zu den Alpen, verschonte aber die Ostsee. Bei Schneefall bis 15 cm traten erhebliche Verkehrsprobleme auf. Während am 10.3. das Hoch „Isidor“ bei uns für ruhiges, kaltes Winterwetter sorgte, waren von Mallorca bis Kroatien Schneeketten erforderlich, teilweise lag dort bis zu 70 cm dicker Schnee. Nach längerem kräftigem Westwind und barotropem Einstrom überstieg der bodennahe Salzgehalt am 24.3. im Fehmarnbelt 25 g/kg, am 23.3. an der Darßer Schwellen 18 g/kg, und an der Arkona-Boje zwei Tage später ebenfalls 18 g/kg. Mit Hoch „Jochen“ über der Ukraine kam am 25.3. der erste

richtige Frühlingstag nach Mecklenburg-Vorpommern, mit Südwind und Temperaturen von über 20 °C. Die Blockierungslage bestand weiter, kräftiger Ausstrom setzte ein. Mit dem Durchzug einer kräftigen Gewitterfront von Tief „Judy“ von West nach Ost am 26.3., begleitet von Tornados und abgedeckten Dächern, endete die kurze Frühlingsepisode und wurde von kühlem Westwindwetter mit Schauern und Nieselregen abgelöst.

Zu Ostern am 4. **April** herrschte eine ruhige, kühle, nasse Blockierungslage mit barotropem Ausstrom und baroklinem Einstrom. Seit Ende März erreichte der Salzgehalt am Boden der Darßer Schwelle wiederholt Werte um 18 g/kg. Das Einstromwasser war sehr kalt (unter 2 °C) und sauerstoffreich (80 - 100%). Mit Hoch „Lancelot“ am 10.4. gelangte zu uns noch einmal kalte Luft von Norden und Schnee fiel in den Mittelgebirgen. Während die Asche aus dem Vulkan Eyjafjallajökull Europa in Atem und den Luftverkehr am Boden hielt, kam es am 16.4. zu einem außergewöhnlich hohen Salzgehalt von 21 g/kg an der Darßer Schwelle, ein Wert, der in der Regel nur bei stärkeren Einstromereignissen erreicht oder überschritten wird. Der zugehörige Sauerstoffwert lag unter 70%, die Temperatur bei 2,5 °C. Erst am 22.4. wurde der Luftraum für den Flugverkehr wieder geöffnet. Mit Hoch „Peter“ am 25.4. herrschte ein warmes, sonniges Wochenende auch an der Küste, mit Ausnahme von Rügen, wo kalter Seewind von Ost wehte. Noch immer lagen an der Darßer Schwelle die Salzwerte am Boden bei 15 g/kg und darüber. Barotroper Ausstrom und sonniges, trockenes Wetter setzte sich fort, nachdem sich Tief „Rosalie“ am 27.4. über Mecklenburg-Vorpommern aus einer Kaltfront entwickelt hatte und in ganz Deutschland Schauer und Gewitter auslöste, außer im Raum Rostock. Hoch „Quinn“ sorgte am 28.4. für den ersten Sommertag des Jahres, den wärmsten Tag von 2010 bis dahin, aber nur für einen Tag. Mit Durchzug des Tiefs „Siglinde“ am 30.4. stellte sich das Wetter wieder um auf kühlen, feuchten Westwind. Mit dem Umschwung traten noch einmal extreme Salzwerte von knapp 20 g/kg an der Darßer Schwelle auf, diesmal aber nicht als Teil baroklinen, sondern eines schwachen barotropen Einstroms. Es herrschte meridional ausgedehnter Hochdruck von Grönland bis zu den Azoren, Tiefdruck von Lappland bis Marokko, Hochdruck von Novaya Semlya bis Libyen.

Am 5. **Mai** überfluteten Riesenwellen die französische Cote d’Azur, ausgelöst durch das Tief „Ulrike“ über dem Golf von Lyon. Am Tag darauf zog das Vb-Tief „Valeska“ über die Alpen nach Norden, begleitet von Schneefällen, Hochwasser in der westlichen Ostsee und einem kurzen, starken Ausstromsignal. Danach setzte sich der barokline Einstrom fort. Noch einmal wurden viele Flughäfen wegen des isländischen Vulkans geschlossen. Am 11.5. zogen Tiefs von Südfrankreich zur Ostsee. Sehr kalte Luft von Norden befand sich an der Westseite von Tief „Wilma“, sehr warme und feuchte im Osten von Europa (über 25 °C am Weißen Meer, 30 °C in Griechenland). Es war Eisheiligenzeit; die kalte Nordluft dauerte jedoch schon eine ganze Woche an, teilweise mit Bodenfrost in Norddeutschland. Ungewöhnlich war auch der Fund eines drei Meter langen Riemenfischs *Regalecus glesne* an der schwedischen Ostseeküste bei Göteborg, wie die Presse am 12.5. berichtete. Der barokline Einstrom mit hohen Salzgehalten zwischen 16 und 18 g/kg setzte sich weiter bis zum 15.5. fort, als Tief „Xena“ für Dauerregen in Mecklenburg-Vorpommern sorgte. Islandtief und Azorenhoch hatten sich wieder normal eingerichtet. Hoch „Siegbert“ am 17.5. schenkte

einen Frühlingstag und leitete nach dem Sturm und Regen von „Xena“ eine Wetterumstellung ein. Die Regenfälle in Norddeutschland waren teils sehr ergiebig, das Mai-Soll war bis dahin bereits erfüllt. Am 18.5. wurden die Flugplätze wieder freigegeben, „Xena“ zog nach Island ab, während von Osten her das Vb-artige Tief „Yolanda“ Regenfronten auf die Ostsee und nach Ostdeutschland drückte, entgegen der scheinbar klaren NAO-Westwindlage. Es war ein sehr kalter Mai in Deutschland, während am Weißen Meer, im Baltikum, in Finnland und Lappland bereits Temperaturen von 25 – 30 °C herrschten. Diese warme Luft kam von Süden auf einem langen Weg über Russland dorthin. Nach tagelangen Regenfällen waren Häuser, Straßen und Felder in Polen, Tschechien und der Slowakei überflutet. Eine Hochwasserwelle der Oder erreichte am 24.5. Brandenburg. Das schöne Pfingstwochenende wurde in Sachsen und Brandenburg durch Tief „Zaza“ mit Unwettern und Tornados getrübt, gefolgt am 25.5. von Sturm aus NW und Einstrom. Am 26.5. erreichte das Weichsel-Hochwasser die Ostsee. Am 28.5. passierte die Oderflut in Frankfurt ihren Höhepunkt.

Anfang Juni spitze sich das „Jahrtausendhochwasser“ in Polen, der Slowakei und Ungarn noch einmal dramatisch zu. Das erste sommerliche Badewetter an der Ostsee dank Hoch „Urs“ endete mit Gewittern und Sturmböen von Tief „Cordula“ am 7.6. Ein Unwetter durch das Tief „Doris“ blockierte am 11.6. die Autobahn A19 bei Röbel durch umgestürzte Bäume. Ein Tornado hatte eine regelrechte Schneise in den Wald geschlagen. Auf Usedom standen Straßen unter Wasser. Mit Tief „Doris“, das über Deutschland noch Nebentiefs entlang der Front erzeugte, gelangte schwüle Luft mit Gewittern nach Deutschland. Es waren die bisher wärmsten Tage des Jahres in Deutschland, mit Ausnahme der Küsten. Der Südwestwind transportierte heiße Luft aus der Sahara, die über dem Mittelmeer feucht wurde, nach Norden, wo kalte Luft aus Skandinavien lag. Mit dem Sturm von NW setzte barotroper Einstrom ein und die Temperatur an der Ostseeküste sank wieder deutlich ab. Am 14.6. beruhigte sich das Wetter, während ein kleines Vb-Tief zur Ostsee wanderte und entlang des Wegs in Österreich Erdrutsche und Überschwemmungen auslöste. Eine Hagelzone quer durch Mecklenburg-Vorpommern verwüstete die Felder am 15.6. Durch das abfließende Oderhochwasser wurden deutlich erhöhte Stickstoffkonzentrationen in der Pommerschen Bucht gemessen. Am 16.6. traten schwere Unwetter in der französischen Provence auf. Auf der Nordseite der Front des Tiefs „Eliane“ herrschte dagegen kühles, ruhiges Sommerwetter. Wie schon in früheren Sommern stabilisierte sich die Front in Deutschland südlich des Mains. Mit Hoch „Wendelin“ stellte sich am 23.6. zum Siebenschläfertag ruhiges Sommerwetter ein, das mit Hoch „Xerxes“ in eine Omega-Lage überging. Trotzdem unterdrückte steifer Wind noch immer eine barokline Einstrom-Schichtung. Während „Xerxes“ nach Osten abwanderte, drangen Tiefausläufer nach Norddeutschland vor, die im Raum Lübeck am 29.6. heftige Gewitter auslösten. Der Ostwind wich einem frischen Westwind durch die Tiefs „Ilse“ und „Jutta“.

Am 2. Juli sorgte Hoch „Yari“ gemeinsam mit einem starken Islandtief für eine Hitzewelle in ganz Deutschland; der Südwind erreichte als Warmfront auch die Ostseeküste. Der barotrope Ausstrom hielt an, aber der barokline Einstrom blieb zunächst irrelevant. Durch

„Yari“ über der Ostsee stieg die Wassertemperatur in Warnemünde und an flachen Stränden bereits über 20 °C, sehr ungewöhnlich für diese Zeit im Jahr. An einzelnen Orten Deutschlands stiegen die Lufttemperaturen auf 37 °C. Am 6. Juli kühlte Tief „Karin“ den Norden etwas ab und brachte leichten Regen. Es bestand keine wirklich stabile Omega-Lage; ein Hoch nach dem anderen wurde vom Azorenhoch abgeschnürt und zog zum Baltikum/Weißen Meer. So am 7. Juli, als das folgende Hoch „Zadok“ sich abtrennte und am 9.7. die nächste Hitzewelle mit bis zu 40 °C auslöste. Am 11.7. entstand das kleine Hitzetief „Norina“ aus der Gewitterfront über der Lüneburger Heide, das Orkanböen und einen Tornado auf Helgoland zur Folge hatte. Weitere schwere Unwetter folgten am 13.7. und 14.7. durch das Tief „Olivia“, wobei die Hitze anhielt. An der Darßer Schwellen begann wieder barokliner Einstrom mit Salzgehalten um 16 g/kg. Zwischen den von den Azoren kommenden Hochs „Achilles“ und „Beowulf“ gibt es etwas Abkühlung durch Tief „Petra“ am 17.7. Am 21.7. sorgten Berichte des WWF und der Presse über bedrohliche Cyanobakterienblüten auf der Ostsee für Aufregung, die sich jedoch nach Untersuchung durch das FS „Alkor“, die sich gerade vor Ort auf Überwachungsfahrt befand, als stark übertrieben und sachlich falsch herausstellten (WASMUND, 2010). Am 24.7. zog Tief „Renate“, das über Ostpolen entstanden war, westwärts, begleitet von Unwettern und Starkregen von Polen bis Venedig. Es setzte sich gemeinsam mit den Tiefs „Silke“ und „Tina“ über der Ostsee fest und vermischte die Deckschicht. Am 27.7. rutsche eine größere Kreidemenge in der Nähe der Wissower Klinken ab. Dann kam am 29.7. eine lang ersehnte Regenfront auch in Rostock vorbei, wo alle Wiesen schon seit längerer Zeit braun und verbrannt aussahen. Das vereinte Tief „Tina“ zog von der Ostsee in Richtung Island, und bevor das Tief „Uschi“ von Schottland eintraf, sorgte Zwischenhoch „Damian“ für einen schönen Sommertag am 31.7. In Finnland und Russland herrschte Ende Juli dagegen anhaltende Hitze bis 40 °C, dichter Rauch von Torfbränden hüllte Moskau ein. Fast gleichzeitig versank Pakistan in einer bisher ungekannten Monsun-Flut.

In der Nacht vom 1. zum 2. **August** fielen endlich auch im Raum Rostock reichliche Niederschläge in Form von Schauern und Gewittern der Ausläufer von Tief „Uschi“, das sich mit „Tina“ über Skandinavien vereinigte, während Hoch „Damian“ nach Osten weiter zog. Entlang einer Front von Spanien bis zur Ostsee bildeten sich neue lokale Unwettertiefs, davon eines auch über Mecklenburg. In der Nacht zum 5.8. waren in Norddeutschland Polarlichter zu sehen, ausgelöst durch einen Sonnensturm. Der barokline Einstrom hatte ab 4.8. wieder eingesetzt, mit hohem Salzgehalt am Boden (fast 19 g/kg am 6.8.) und kritisch niedrigem Sauerstoff. Während in der Windphase vom 30.7. bis 4.8. die Salzkonzentrationen gut vermischt erschienen, blieb an der Darßer Schwellen eine kräftige thermische Sprungschicht erhalten. Das bedeutet, dass die Vermischung nicht lokal an der Darßer Schwellen geschehen war, sondern dass unterschiedliche, andernorts vermischte Wasserkörper herangeführt wurden, die sich wenig im Salzgehalt, aber stark in der Temperatur unterschieden. Das bodennahe Einstromwasser blieb trotz Vermischung kühl, das ausströmende Oberflächenwasser trotz Vermischung sehr warm. Am 9.8. hatte sich über Deutschland bei weiterhin schwachen Luftdruckgradienten über Mitteleuropa eine nahezu ortsfeste Regen- und Gewitterfront gebildet, aus der in der Nacht ergiebige

Niederschläge fielen. An der Würm und im Allgäu trat leichtes Hochwasser auf. An der Front entlang wehte warmer, feuchter Südwind. Tief „Viola“ hatte sich zu einem Vb-Tief entwickelt und zog seit dem 7.8. die Oder entlang nach Norden, wobei es in Sachsen und Polen Hochwasser verursachte. Durch einen Dammbruch in Polen kam es am 8.8. an der Neiße rasch zu einer kritischen Situation. Im Dreiländereck bei Görlitz und Zittau entstand das schlimmste Hochwasser in Sachsen seit über 100 Jahren; auch die Elbe und die Donau führten Hochwasserpegel. Im Spreewald fielen 100 mm Regen in 48 Stunden, Orte in Brandenburg wurden evakuiert. Nach diesen Wetterkapriolen schnürte sich am 11.8. ein neues Hoch "Edlef" vom Azorenhoch ab und brachte zeitweilige Wetterberuhigung. Jedoch begann sich nun die quasi-stationäre Siebenschläferlage umzustellen. Das bisher vorhandene NAO-Paar Islandtief-Azorenhoch wich einer neuen Blockierungslage, hoher Druck reichte von Island bis zu den Azoren, tiefer dagegen von Spitzbergen bis Spanien. Die Gründe für das starke Absinken des Bodensalzgehalts an der Darßer Schwelle ab dem 11.8. sind nicht klar. Anscheinend setzte in der ganzen Wassersäule Ausstrom ein, die den baroklinen Einstrom stoppte. Damit stieg der bodennahe Sauerstoff deutlich an.

Am 14.8. folgte das nächste Vb-Tief „Yvette“ von Süden nach mit Dauerregen in Mecklenburg und verstärktem Ausstrom. Die stärksten Überschwemmungen gab es in Zinnowitz auf Usedom mit 78 mm Regen. Mitte August löschten Regenfälle schließlich auch die russischen Torfbrände. Während sich „Yvette“ über Deutschland drehte, verstärkte der Ostwind an der Ostsee den Ausstrom, und der barokline Einstrom transportierte sehr sauerstoffarmes Wasser in Bodennähe. Mit nur 2% Sättigung wurde am 15.8. das bisherige Sauerstoffminimum des Jahres an der Darßer Schwelle erreicht. Bis 12 m Tiefe lagen die Temperaturen nur noch zwischen 18 und 19 °C. Erst am 18.8. zog „Yvette“ ganz langsam nach Norden ab, begleitet von Dauerregen in Mecklenburg-Vorpommern und Schleswig-Holstein. Es stellte sich eine Westwindlage ein, aber bei freundlichen Temperaturen. Am 21.8. wurde in Warnemünde vom lang gedienten Forschungsschiff „Prof. A. Penck“ feierlich Abschied genommen. Tornados auf dem Darß und in Hessen wurden am 22. und 23.8. beobachtet. Das verantwortliche Sturmtief „Beate“ verstärkte die Westwindlage weiter und führte am 24.8. zu einem kleinen barotropen Salzwassereinbruch bei Pegelständen von +50 cm in Göteborg und -64 cm in Kiel und Westwind mit 8 BF, in Böen bis 10 BF über der See. Weitere Windhosen auf Usedom, dem Darß und in Graal-Müritz folgten. Tief „Cathleen“ sorgte am 27.8. für massive Regenfälle, insbesondere im Raum Osnabrück – Harz. In Greifswald waren bisher bereits mehr als 400% der normalen August-Regenmenge gefallen. Am 28.8. überquerte ein Tornado, von See kommend, auch die Warnemünder Promenade neben dem Leuchtturm. Am 30.8. folgte Tief „Erina“ wieder mit viel Regen und zog nach Südosten ab. Über der Ostsee bildete sich am 31.8. das Altweibersommer-Hoch „Helmut“.

Am 1. **September** setzte nach einer Woche mit Wind, Regen, Kälte und Tornados nun wieder barokliner Einstrom ein. Islandtief und Azorenhoch waren wieder an ihrem Platz, Hoch „Helmut“ zog westwärts zu den Britischen Inseln. Durch die westliche Lage von „Helmut“ über der Nordsee am 3.9. und das sich verstärkende Tief „Erina“ bei St. Petersburg, wahrscheinlich verursacht durch den heißen Südwind über Russland, blieb Deutschland im Zustrom trockener und kalter Luft von Norden. Die Nachttemperaturen lagen bereits deutlich

unter 10 °C. Die Windlage intensivierte den Ausstrom. Bis zum 13.9. verstärkte sich „Helmut“ über Skandinavien und dem Baltikum, der barokline Einstrom und der barotrope Ausstrom nahmen bei spätsommerlichen Temperaturen um und über 20 °C weiter zu. Die Salzwerte von 19,5 g/kg an der Darßer Schwelle am 12.9. waren ungewöhnlich hoch. Am 13.9. kam Tief „Hiltrud“ mit stürmischen Westwinden und löste einen kleinen barotropen Einstrom aus. Durch Tief „Imogen“ wurde der Sturm von West am 16.9. noch intensiver und mischte die Schichtung an der Darßer Schwelle auf. Barotroper Einstrom erfolgte bei einer Pegeldifferenz von fast 1 m entlang der Dänischen Straßen. Am 20.9. setzte sich der Einstrom nur noch schwach fort, obwohl Tief „Joleen“ am 21.9. noch etwas nachhalf, bis Hoch „Ludger“ am 22.9. auch in Norddeutschland etwas Altweibersommer erahnen ließ. Gleichzeitig tobte der Hurrikan „Igor“ vor Neufundland trotz der hohen Breite von 50° N noch immer mit Kategorie 1. Während Ex-Hurrikane gewöhnlich über Island als Tiefs zu uns kommen, wanderte „Igor“ nach Nordwesten in die Labradorsee und löste sich auf. Mit Abzug von „Ludger“ nach Osten entstand am 25.9. wieder eine markante Blockierungslage, hoher Druck von den Azoren bis Grönland und eine Tiefdruckrinne von Sizilien bis zum Nordkap. Am 27.9. herrschte stürmischer Ostwind, in den Nordosten wurde feucht-warme Mittelmeerluft gedrückt. Die Zugbahn von „Lya“ war weitgehend die eines Vb-Tiefs. Eine Regenfront lag den ganzen Tag ortsfest entlang der Elbe, danach verlief sie zonal. Warnungen vor Hochwasser und Erdbeben wurden ausgegeben. Besonders betroffen waren wieder das Dreiländereck bei Görlitz und Zittau, aber auch die Flüsse Spree und Schwarze Elster. In einigen Gebieten im Süden Brandenburgs war in diesen zwei Tagen der durchschnittliche Niederschlag eines ganzen Monats gefallen. Am 29.9. schwächte sich der barotrope Ausstrom ab, barokliner Einstrom setzte wieder ein. Nach dem Abzug von „Lya“ baute sich eine Omega-Lage auf mit dem Hoch „Marcel“ über Skandinavien. An der Schwarzen Elster wurden die historisch höchsten Wasserstände beobachtet, die je gemessen wurden.

Der **Oktober** begann mit Spätsommerwetter, aber schon recht kalten Nächten. Nach einem weiteren baroklinen Einstromschub am 10. Oktober trat am 14.10. kräftiger Westwind mit Tief „Quanna“ auf. Vom 15. bis 17.10. zog das Tief „Roswitha“ von Dänemark über Mecklenburg-Vorpommern nach Genua, d.h. den umgekehrten Weg eines Vb-Tiefs. Eine Hochdruck-Brücke von den Azoren bis Moskau stellte sich ein, und der erste Schnee fiel. Am 18.10. zog Hoch „Norman“ vom Atlantik herein, während „Roswitha“ über der Adria Feuchtigkeit auftankte. Klare Nächte und leichter Ostwind sorgten bereits für morgendlichen Frost. Danach verursachte am 19.10. das Tief „Saphira“ über Skandinavien Westwind und kräftigen Einstrom, der sich bis zum 22.10. noch verstärkte. Das nächste lokale Sturmtief „Tina“ lag über Südschweden als Teil eines großen „Supertiefs“ mit 5 Kernen über Skandinavien. Am 24.10. zog Tief „Ursula“ weiter südlich nach Mecklenburg-Vorpommern mit Sturm und Regen, schwächte aber den Einstrom, der die Darßer Schwelle noch nicht erreicht hatte. Dann blockierte Hoch „Quentin“ am 25.10. den Westwind, kalter Nordwind strömte nach Mecklenburg-Vorpommern und legte eine erste dichte Schneedecke über Südbayern. Im nun beruhigten Herbstwetter kam das Einstromwasser, das im Fehmarnbelt schon seit einer Woche sichtbar war, am 27.10. auch an der Darßer Schwelle an. Und wieder

wechselte das Wetter am 28.10. zurück in eine Einstromlage, diesmal mit milder Luft von Spanien, die das Hoch „Viorica“ heranzuführte.

Der barotrope Einstrom setzte sich im **November** mit Unterstützung durch das Sturmtief „Yentl“ am 3.11. fort mit maximalen Salzgehalten um 16 g/kg an der Darßer Schwelle, jedoch mit fallender Tendenz. Dagegen wurden 18 g/kg im Arkonabecken überschritten, was auf einen stärkeren Einstromeffekt durch den Sund hinweist. Am 6.11. wurde der Westwind durch Tief „Zelda“ über Dänemark und Hoch „Rolf“ über Frankreich angetrieben. Dann flaute der Wind ab. Unter einem skandinavischen Hoch sanken die Temperaturen am 9.11. bis -20 °C. Sturmtief „Becky“ wich nach Süden aus und zog nach Frankreich; an seiner Ostflanke wanderte Tief „Anneli“ von der Adria nach Norden. Zwischen diesem Ostseetief und dem nördlichen Hoch entstand ein massiver Schneesturm von Estland bis Mittelschweden. Der zu diesem Zeitpunkt registrierte Landsortpegel von +40 cm entspricht deshalb nicht der momentanen mittleren Füllung der Ostsee; es bestand zeitweilig über 1 m Pegeldifferenz zwischen Landsort und Estland. Trotz der Orkanböen von Tief „Carmen“ und Niedrigwasser in Warnemünde fand am 10. und 11.11. an der Oberfläche zunächst noch barotroper Ausstrom statt. Es mussten Karnevalsfeiern wegen des Sturms abgesagt werden, in Höhenlagen fiel Schnee. Vor Fehmarn geriet ein Kutter in Seenot. Am 13.11. ließ der Sturm nach, jetzt aber begleitet von Einstrom in eine schon gut gefüllte Ostsee. Den stärksten Wind gab es von Düsseldorf bis Cottbus entlang einer Kaltfront zwischen Nord- und Süddeutschland; dort wurde aus Spanien sehr warme Luft bis 20 °C herangeführt. So fielen in Nordrhein-Westfalen örtlich bis zu 60 mm Regen in 24 h, mit Überschwemmungen als Folge. Ab 17.11. wurde der Westwind durch das Hoch „Stephan“ über der Ostsee blockiert, begleitet von kräftigem Ausstrom. Gleichzeitig zog das Tief „Emilya“ auf Vb-Kurs nordwärts von Italien zur Ostsee und verursachte Dauerregen in Mecklenburg-Vorpommern. An der Westflanke von Hoch „Theis“ über Lappland strömte anschließend am 20.11. Polarluft weit nach Süden. Der Winter nahte in Form des nächsten Vb-Tiefs „Gundula“ am 22. und 23.11., in ganz Deutschland fiel bei klirrender Kälte reichlich Schnee. Tiefdruck bei den Azoren und das Hoch „Uwe“ bei Island markierten die Blockierungslage. Auf Rügen kam es erneut zu einem Kreideabbruch, bis 70 m weit in die Ostsee schob sich das abgerutschte Material. Das Vb-Tief „Gundula“ lag am 24.11. stabil über der Ostsee. Der Regen in Deutschland ging systematisch in Schnee über. Es herrschten starker Ausstrom und extreme Pegelunterschiede an den „Enden“ der Ostsee, z.B. +88 cm in Warnemünde, -69 cm in Oulu und -107 cm vor St. Petersburg. Es baute sich eine stabile Hochdruckzone von Grönland bis Novaya Semlya auf, an deren Südflanke kalte Luft aus Sibirien weit nach Westen gelangte, und Tiefs vom Mittelmeer und vom Atlantik wie „Irmi“, „Hanni“ und „Jenna“ für immer neue Schneefälle sorgten. Insbesondere nördlich von Gotland herrschte nun schon länger starke Kälte, die Eisbildung in der Bottensee führte zu ersten Beschränkungen der Schifffahrt. Bei Ostwind fand kräftiger Ausstrom statt. Am 29.11. erreichte der Pegel in Travemünde +120 cm, am 30.11. sogar +126 cm. Ganz Mitteleuropa litt unter heftiger Kälte mit Eis und Schnee, auf Flugplätzen und Autobahnen traten erhebliche Probleme auf.

Bei wenig veränderter Wetterlage wurden Anfang **Dezember** zahlreiche Kälterekorde in Deutschland gemeldet. Das Hoch „Uwe“ setzte sich über Skandinavien fest. Selbst in Schottland meldeten Wetterstationen bis zu $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Am 2.12. kam das Vb-Tief „Katharina“ mit viel Schnee und Wind von Süden zur Ostsee. Auch in Rostock und Warnemünde gab es Schneeverwehungen, besonders stark aber auf Rügen. Der Fähr- und Eisenbahnverkehr musste erheblich eingeschränkt werden, Hiddensee war wieder von der Versorgung abgeschnitten. Tief „Liane“ drang am 5.12. vom Atlantik mit Tauwetter bis zur Ostsee vor, Regen und Glatteis führten zu neuen Verkehrsproblemen. Bei Nienhagen rutschten 10 t Lehm und Sand von der Steilküste ab. Eine Front mit Glatteis, Tauwetter und Starkregen erstreckte sich am 8.12. von Düsseldorf bis Cottbus, im Süden bei Temperaturen bis $+13\text{ }^{\circ}\text{C}$, im Norden unter Null. In München genoss man die Wärme in den Straßencafés. Es herrschte schwacher Wind mit barotropem Ausstrom und baroklinem Einstrom, bis das Tief „Monika“ von Frankreich nach Polen zog. Danach kam an der Rückseite der Winter mit Macht zurück. Der Greifswalder Bodden vereiste, nicht winterfeste Tonnen wurden eingeholt. Deutschland schneite wieder ein, Bahn und Flüge fielen verbreitet aus. Am 10.12. zog Hoch „Warren“ von den Azoren nach Frankreich und leitete zeitweilig milde Atlantikluft in den Ostseeraum, gemeinsam mit dem Sturmtief „Orike“ über der Norwegischen See, gefolgt von neuer Kaltluft und Schneefällen am 12.12., sowie Hochwasser an der Ostseeküste. Zwischen Hoch „Warren“ im Raum Schottland-Island und Tief „Orike“ über Polen strömte vom 13. bis 15.12. weiter kalte Luft mit Schneefronten von NO nach Deutschland. Die ausgeprägte Blockierungslage dauerte weiter an. Tief „Orike“ kam zunächst als Sturmtief von Spitzbergen zu uns, zog weiter bis in die Ägäis, um dort mit Sturm, Schnee und Regen auf Kreta, in Israel und Ägypten Verwüstungen anzurichten, und zog nun wieder vom Schwarzen Meer nach Norden. In ähnlich ungewöhnlicher Weise zog das Sturmtief „Petra“ von Spitzbergen mit arktischer Luft rasch südwärts. Temperaturen bis unter $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$ wurden am 16.12. in Bayern gemessen. Am 17.12. bewirkte „Petra“ reichlichen Schneefall in ganz Deutschland und mischte die barokline Einstrom-Schichtung partiell auf. Der starke Südwind bis 16 m/s wechselte mit dem Frontdurchgang auf Nord und schwächte sich stark ab. Der NAO war ausgeprägt negativ, hoher Luftdruck über Island in Kombination mit niedrigem bei den Azoren. Wieder gab es erhebliche Probleme durch Schnee auf vielen europäischen Flughäfen, Bahnhöfen und Autobahnen, ersten Tankstellen ging der Nachschub aus. Während „Petra“ sich in den Folgetagen über den Britischen Inseln drehte, blieb es im Ostseeraum kalt und es schneite weiter. Durch Eisbildung bei Rügen und Usedom wurde der Schiffsverkehr behindert. Am 19.12. riet die Deutsche Bahn wegen des Winterwetters von Bahnreisen ab. Während die Londoner Flughäfen Heathrow und Gatwick geschlossen waren, registrierte der britische Wetterdienst mit Temperaturen von örtlich knapp $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ den kältesten Dezember seit hundert Jahren. In Rom, Neapel und auf Capri schneite es, die Schneefälle erreichten sogar Algerien. Auch am 20.12. erwies sich die Blockierungslage mit negativem NAO als weiterhin äußerst stabil. Geringe Druckgegensätze über Europa führten zu immer neuen Fronten und machten Vorhersagen schwierig. Im Süden der „Petra“-Front, die von Frankfurt bis Berlin über Deutschland lag, strömte milde Atlantik-Luft in den Mittelmeerraum, im Norden strömte kalte kontinentale Luft bis hinaus nach Schottland. In dieser Woche fiel die Wassertemperatur an der Darßer Schwelle von $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf

2 °C. Auch am Winteranfang am 21.12. blieb die Blockierungslage stabil, Winde wehten vorwiegend in meridionalen Richtungen. Die Front über Deutschland war praktisch ortsfest, nördlich davon traten Temperaturen bis -20 °C auf, südlich davon bis +10 °C. Weitere intensive Schneefälle folgten vom 22. bis 24.12. durch das Tief „Scarlett“, das vom Atlantik über Spanien nach Italien zog. In Mecklenburg-Vorpommern führte Neuschnee bis zu 25 Zentimetern und teils meterhohe Verwehungen in der Nacht zum Heiligabend vielerorts zu Straßensperrungen und Zugausfällen. Bäume brachen unter der Last der teils nassen Schneemassen zusammen und blockierten die Straßen. In einigen Gebieten kam es zu stundenlangen Ausfällen der Stromversorgung. Das Eis bei Greifswald und Stralsund war bereits 15-30 cm dick. Die MARNET-Station Oderbank musste wegen Eisgangs geborgen werden. Die Hochdruckbrücke von Spitzbergen bis Marokko sorgte am 25.12. weiterhin für überwiegend meridionale Winde, ein Islandtief verstärkte sich jedoch. Die Kalt- und Schneefront von „Scarlett“ stand ortsfest über einer Linie Berlin-Erfurt-Frankfurt. Am 26. und 27. beruhigten sich die Schneefälle, es blieb aber sehr kalt. Ab 28.12. dehnte Hoch „Xaver“ seinen Einfluss auf den gesamten Ostseeraum aus. An seiner Südflanke strömte kalte Luft von NO nach Ostdeutschland. Temperaturen von unter -20 °C wurden verbreitet gemessen, Tageshöchstwerte überstiegen kaum -10 °C. Zu Silvester endete das Jahr 2010 nach einem dramatischen Winteranfang unter dem Einfluss von Tief „Vesna“ mit leichtem Tauwetter im Norden Deutschlands und über die Ostsee.

Tab. 1 zeigt das Jahresmaximum der Solarstrahlung in Gdynia im Juni und Juli, als auch die astronomische und die über der Ostsee gemessene mittlere Einstrahlung ihren Höchstwert erreichen (HAGEN & FEISTEL, 2008). Das Maximum lag im Juni 2010 mit ca 68 kJ/m² höher als im Vorjahr.

Im Vergleich zum langjährigen Mittel fielen 2010 die negativen und die positiven Temperaturanomalien in Warnemünde im Januar und Juli extrem aus (Tab. 2). Das Jahr war überdurchschnittlich warm. Die Jahreswärmesumme 2010 von 258,5 K d war noch einmal deutlich höher als in den Vorjahren und lag wesentlich höher als der Mittelwert 148 K d der Beobachtungsreihe seit 1948, deutlich oberhalb der statistischen Streuung aber noch klar unter dem Rekordwert 355 K d des Jahrs 2006. Die Kältesumme des Winters 2009/10 war fast doppelt so hoch wie das statistische Mittel. Wie die Temperaturen an der Station Arkona zeigen (Tab. 1), war es 2010 in sechs Monaten kälter als im langfristigen Mittel; im Januar und Dezember war es mit den Monatsmitteln zwischen -2,4 °C und -2,6 °C wesentlich zu kalt; deutlich zu warm waren dagegen April, Juli und August, ähnlich wie im Vorjahr, mit Werten zwischen 1,2 °C und 3,8 °C über dem langjährigen Mittel. Die größere Sonnenscheindauer ging im April mit positiven, im Oktober mit negativen Temperaturanomalien einher. April und Juli waren mit der Hälfte der normalen Niederschlagsmenge sehr trocken, während der August mit der vierfachen Menge des mittleren Niederschlags extrem nass ausfiel.

Insgesamt war das Jahr 2010 in Arkona im Mittel etwas zu kalt, was insbesondere auf die deutlich kälteren Wintermonate zurückgeht. Dieses Verhalten steht im Gegensatz zu dem beobachteten mittleren Trend der letzten 50 Jahre (HAGEN & FEISTEL, 2008). Der Extremwerte der Luftfeuchte in Arkona waren 75% im Juli und September sowie 92% im Februar. Deutschlandweit war der August der nasseste seit Aufzeichnungsbeginn.

Gemeinsam mit 2005 war 2010 das weltweit wärmste Jahr seit Beginn der Aufzeichnungen im Jahr 1880 (NOAA, 2011). Mit $+0.62\text{ }^{\circ}\text{C}$ Abweichung von der mittleren Oberflächentemperatur von Land ($+0.96\text{ }^{\circ}\text{C}$) und Meer ($+0.49\text{ }^{\circ}\text{C}$) war 2010 das 34. Jahr in Folge, dessen Temperatur über dem Durchschnitt des 20. Jahrhunderts lag. Für zahlreiche globale Wetterextreme wird unter anderem der dramatische Übergang von El Nino zu La Nina im Juli 2010 verantwortlich gemacht. Die Hurrikan-Saison im Atlantik war mit 12 Hurrikanen die zweitstärkste seit Mitte der 1960er. Das Minimum der arktischen Eisbedeckung erreichte den drittkleinsten Wert nach 2007 und 2008. Von Mitte Juni bis Mitte August lag ein ungewöhnlich starker Jetstream kaum veränderlich über Asien, der die Dürre in Russland und das Hochwasser in Pakistan maßgeblich verursachte. Der Arktische Oszillationsindex AO erreichte mit $-4,27$ den tiefsten Wert seit 5 Jahrzehnten und korrespondierte zu der ausgeprägten Winterkälte mit extremen Schneefällen in Europa, Asien und Nordamerika.

Tab. 1

Monatliche gemittelte Wetterdaten der Station Arkona (Rügen, 42 m über NN) nach DWD (2010). 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 (2011). 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 (2010). 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 (2011). 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	-2,4	-2,6	87	87	91	29	18	6823
Feb	-0,8	-1,0	92	41	137	24	14	10199
Mrz	2,7	+0,6	87	124	68	14	3	27411
Apr	6,3	+1,3	82	135	47	1	-	44750
Mai	8,6	-1,1	88	61	265	-	-	45760
Jun	13,7	-0,4	83	119	73	-	-	67696
Jul	20,0	+3,8	75	122	46	-	-	64734
Aug	17,7	+1,2	84	73	405	-	-	48125
Sep	13,6	0,0	83	102	75	-	-	33416
Okt	9,0	-0,9	81	135	105	-	-	23822
Nov	5,4	+0,1	90	53	196	7	-	4881
Dez	-2,6	-4,6	91	34	95	30	17	4546

Tab. 2

Summen der Tagesmittel der Lufttemperatur an der Wetterstation Warnemünde. Die Kältesumme (KS) ist das Zeitintegral der Lufttemperatur unterhalb der Linie $t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, in Kd, die Wärmesumme (WS) das entsprechende Integral oberhalb der Linie $t = 16\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zum Vergleich sind die entsprechenden Mittelwerte 1948 bis 2010 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 $t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, in Kd, the 'heat sum' (WS) is the corresponding integral above the line $t = 16\text{ }^{\circ}\text{C}$. For comparison, the corresponding mean values 1948 - 2010 are given

Monat	KS 2009/10	Mittelwert	Monat	WS 2010	Mittelwert
November	0,0	$2,6 \pm 6,3$	April	0,6	$1,0 \pm 2,4$
Dezember	41,5	$22,9 \pm 28,5$	Mai	0,0	$4,8 \pm 5,6$
Januar	112,3	$39,7 \pm 40,5$	Juni	17,3	$22,9 \pm 14,7$
Februar	38,9	$31,6 \pm 38,7$	Juli	165,1	$55,8 \pm 36,4$
März	11,0	$8,5 \pm 12,0$	August	71,8	$52,1 \pm 32,4$
April	0,0	$0,0 \pm 0,2$	September	3,7	$11,4 \pm 12,2$
			Oktober	0,0	$0,4 \pm 1,2$
Σ 2009/2010	203,7	$105,4 \pm 82,2$	Σ 2010	258,5	$148,4 \pm 69,4$

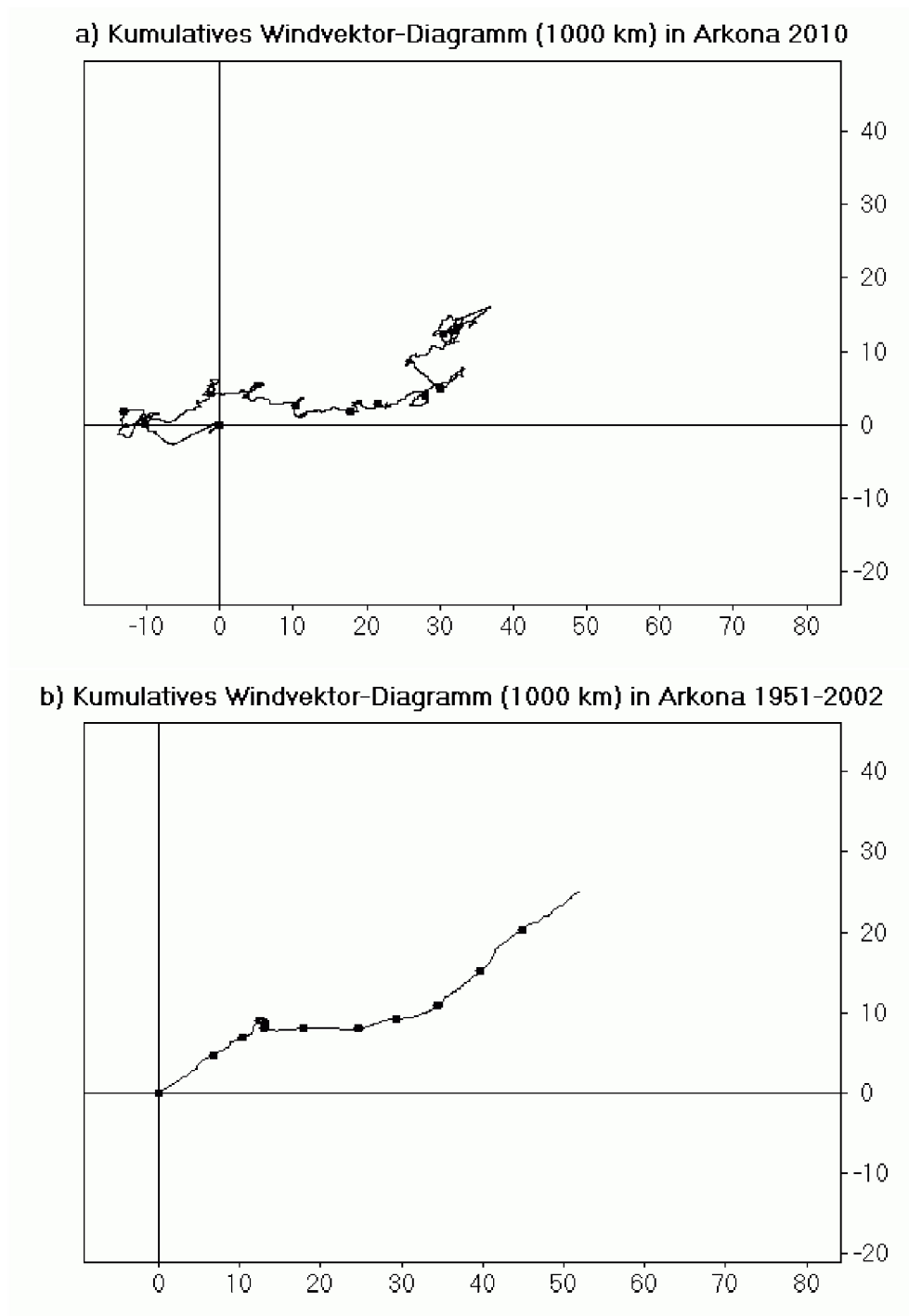


Abb. 3

Fortschreitende Vektordiagramme der Windgeschwindigkeit an der Wetterstation Arkona (nach Daten des DWD, 2011b), in 1000 km, positiv nach nördlichen und östlichen Richtungen. a) 2010, b) Langzeitmittel. Der erste Tag jeden Monats ist durch einen Kreis markiert

Fig. 3

Progressive vector diagram of the wind velocity at the weather station Arkona (from data of DWD, 2011b), in 1000 km, positive in northerly and easterly directions. a) 2010, 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 2010 ist dargestellt im Vergleich mit dem klimatischen mittleren Wind der Jahre 1951 bis 2002. Die Kurve für 2010 (33 000 km nach Osten, 11 000 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 2010 im Mittel viel schwächer als im Langzeitmittel. Die häufigen Blockierungslagen zeigen sich in überdurchschnittlich vielen und langen Windsituationen aus Ost und Nord. So beginnt die PVD-Kurve mit vorherrschendem Ostwind im Januar und Februar. Der mittlere Windvektor von Frühling bis Herbst war relativ normal. Zum Jahresende überwogen wieder Blockierungslagen, mit dominierenden Ost- und Nordwinden im November und Dezember. Der mittlere Betrag der Windgeschwindigkeit ist 7,0 m/s, siehe Abb. 4, der Betrag des mittleren Windvektors ist 1,1 m/s. Beide Werte sind geringer als die entsprechenden klimatologischen Mittel von 7,1 m/s und 1,9 m/s (HAGEN & FEISTEL, 2008). 2010 war also auch ein unterdurchschnittlich windiges Jahr. Markante Stürme sind nur im Januar, November und Dezember zu erkennen, besonders ruhig war dagegen der Juli (Abb. 4a).

Die klimatische Windkurve in Abb. 3b ist erwartungsgemäß glatter als die der einzelnen Jahre. Sie besteht aus einer Winterphase mit Südwestwind, die im Mai endet und im September langsam neu wieder einsetzt. Die Sommerphase dagegen besitzt keine meridionale Komponente und verläuft deshalb parallel zur x-Achse. Die auffälligste Struktur jedoch ist der kleine Knick, bei dem der Wind auf nördliche und östliche Richtungen dreht und ein Umschalten von Winter auf Sommer markiert. Er tritt um den 12. Mai herum auf und gehört zur Phase der so genannten „Eisheiligen“. Die außergewöhnliche Regelmäßigkeit des Auftretens dieses Nordostwinds mit Kälterückfall in Deutschland über viele Jahre hinweg ist schon lange bekannt und lässt sich physikalisch aus dem Sonnenstand und der Land-Meer-Verteilung erklären (BEZOLD, 1883).

Barotrope Einstromereignisse mit geschätzten Volumina zwischen 100 und 200 km³ fanden in der Ostsee 2010 fünf Mal statt, im Januar/Februar, im Juli, im September, im Oktober/November und im Dezember. Im Gotlandbecken zwischen 174 m und 219 m Tiefe wurde von einer Verankerung ab dem 13. Februar 2010 das Eintreffen des warmen Einstroms registriert, der dem barotropen Einstrom vom 26.11. bis 1.12.2009 zuzuordnen ist. Von August bis November 2010 wurden einzelne kalte Signale (bis unter 6° C) registriert. Anfängliche Spitzenwerte von bis zu 7,3 °C gingen im Laufe des Jahres 2010 unter ausklingenden Fluktuationen allmählich auf etwa 6,5 °C zurück. Die seit Herbst 1997 registrierte „Warmzeit“ der sogenannten „Hagen-Kurve“ hält somit in diesem Tiefenwasser seit über 10 Jahren weiter an. Alle zentralen Becken weisen im Tiefenwasser die höchsten Temperaturen der letzten 5 Jahre auf.

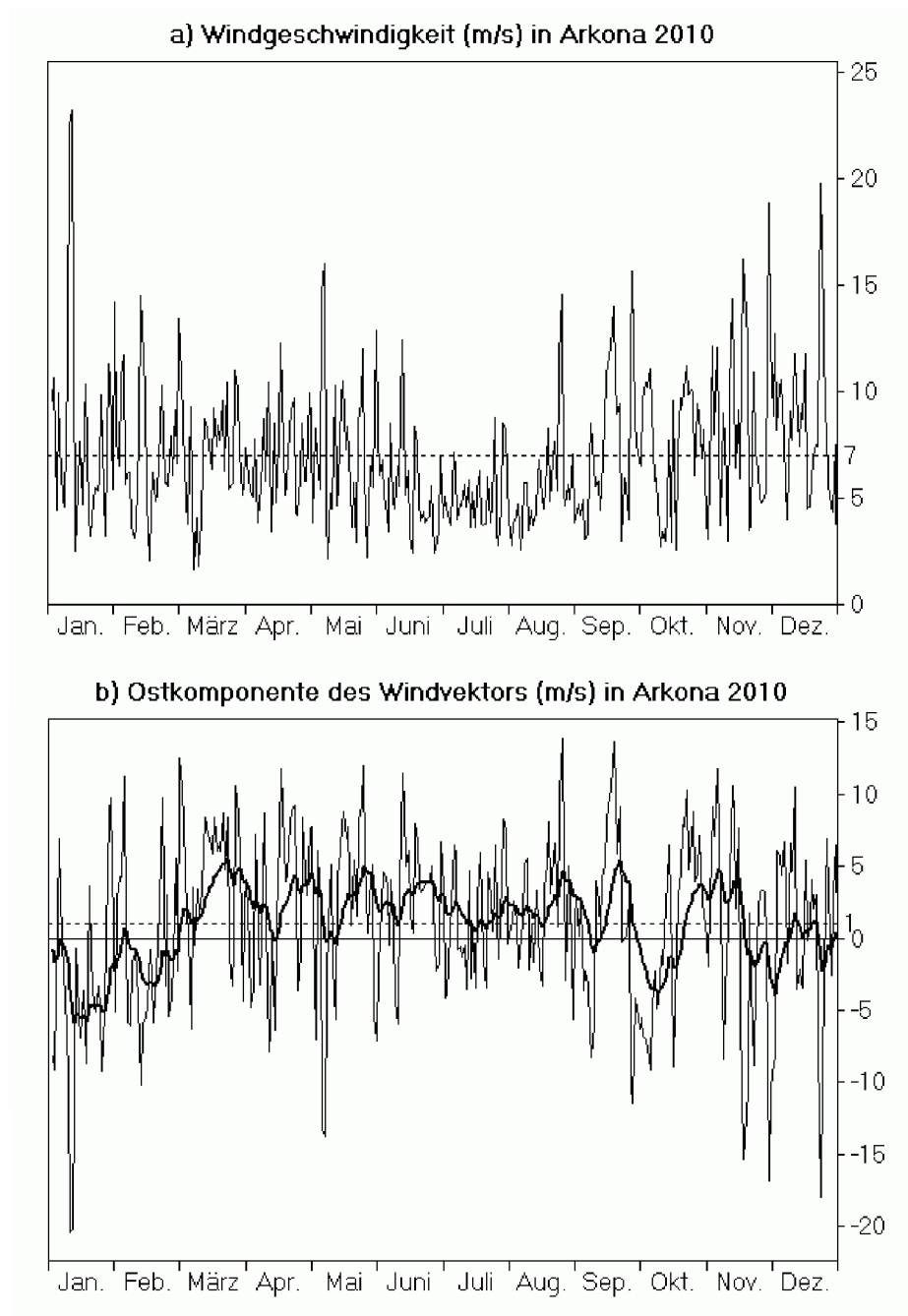


Abb. 4

Windmessungen an der Wetterstation Arkona (nach Daten des DWD, 2011b). a) Tagesmittelwerte der Windgeschwindigkeit in m/s, Jahresmittelwert 7,0 m/s gestrichelt. b) Tagesmittelwerte der Ostkomponente (Westwind positiv), Jahresmittelwert 1,0 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, 2011b). a) Daily means of wind speed, in m/s, the dashed line is the annual average of 7.0 m/s. b) Daily means of the eastern component (westerly wind positive), the dashed line is the annual average of 1.0 m/s. The line in bold is filtered with a 10-days exponential memory

Die Verhältnisse im zentralen Tiefenwasser waren 2010 einerseits noch immer geprägt durch die Nachwirkungen der warmen und kalten Einstrome 2002 und 2003 (FEISTEL et al., 2003a, b, NAUSCH et al., 2004, FEISTEL et al., 2004a, b, 2006a, b, c). Jedoch deuteten schon seit 2006 mehrere Indizien auf erneute barokline und barotrope Einstrome geringer Stärke hin, die nur zum Teil in einzelnen Schüben und mit unterschiedlichen Eigenschaften auch die zentrale Ostsee erreichten. Das relativ starke Einstromsignal von Ende November 2009 wurde erst in Januar 2010 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 Drogenschwelle im Sund.

Die mittlere Windgeschwindigkeit an der Station Arkona lag 2010 mit 7,0 m/s unter denen der Vorjahre zwischen 7,1 m/s im Jahr 2003 (NAUSCH et al., 2004) und 7,9 m/s im Jahr 2009 (NAUSCH et al., 2010). Als Windspitzen der Stundenwerte über 20 m/s traten 2010 auf 26,2 m/s am 10.01. aus ONO (Vb-Tief „Daisy“), und 22,4 m/s am 29.11. aus ONO (Tief „Jenna“) sowie 22,1 m/s am 24.12. aus NO (Tief „Scarlett“). 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, 2011). 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 2010 sind der hohe Pegel Anfang November und der extreme Niedrigpegel Ende Januar, bedingt durch den anhaltenden Ostwind, sowie der kräftige anhaltende Ausstrom Ende September. Die Extrempiegel 2010 betrugen 623 cm am 27.01. und 722 cm am 09.11.

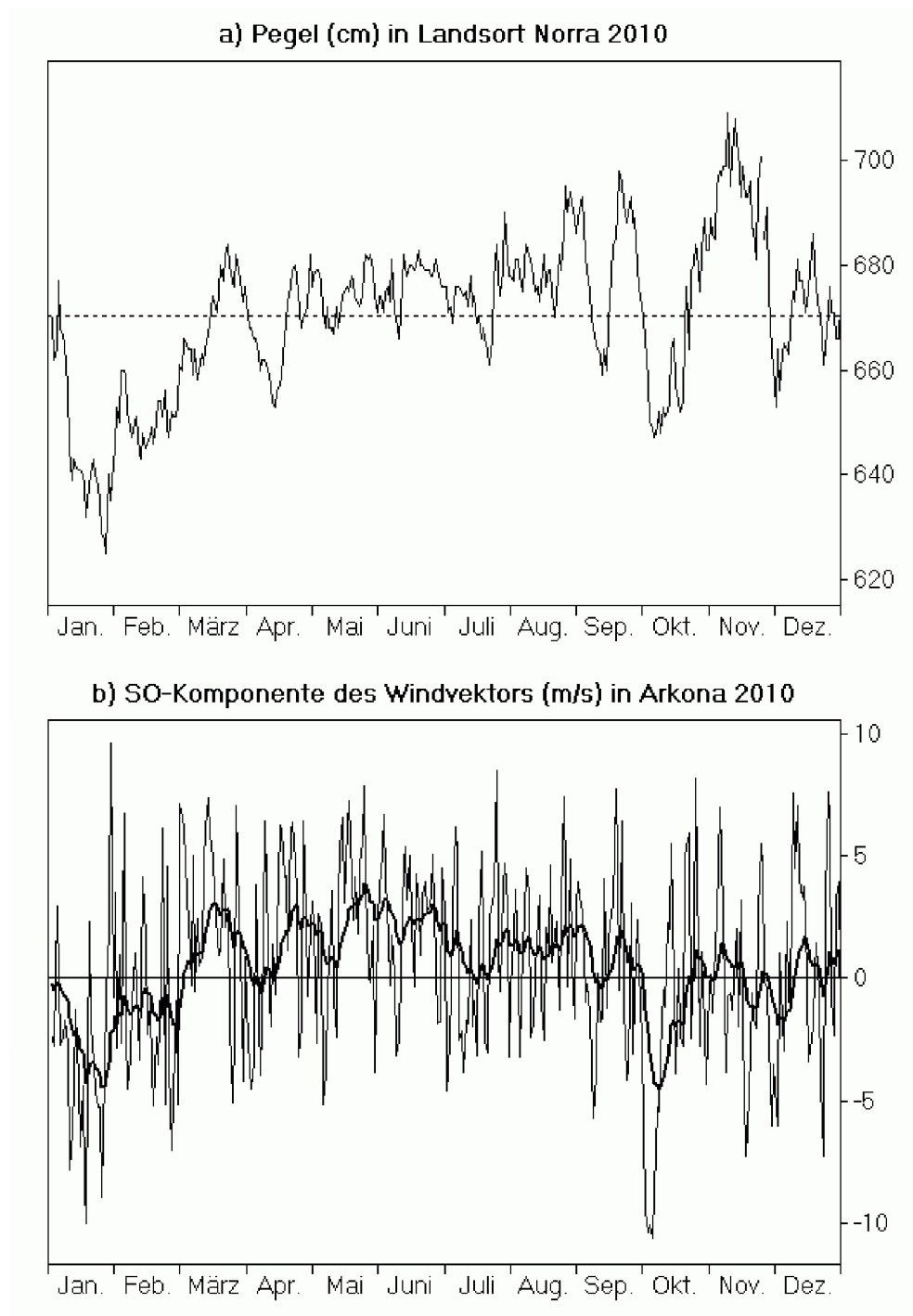


Abb. 5

a) Pegel bei Landsort als Maß für den Füllungsgrad der Ostsee (nach Daten des SMHI, 2011).
 b) Stärke des Nordwestwinds (positiv) an der Wetterstation Arkona (nach Daten des DWD, 2011b). 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, 2011).
 b) Strength of the north-west wind (positive) at the weather station Arkona (from data of DWD, 2011b). 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).

Fünf kleinere barotrope Einstromereignisse sind 2010 an schnellen Anstiegen um mindestens 30 cm zu erkennen, so um 44 cm in 7 Tagen vom 27. Januar bis 3. Februar (Tiefs „Jennifer“ und „Keziban“), um 30 cm in 7 Tagen vom 23. bis 30. Juli (Tiefs „Renate“, „Silke“ und „Tina“), um 36 cm vom 13. bis 19. September in 6 Tagen (Tiefs „Hiltrud“ und „Imogen“), um 54 cm in 28 Tagen vom 9. Oktober bis 6. November (Tiefs „Quanna“ bis „Zelda“), und um 35 cm in 11 Tagen vom 2. bis 13. Dezember (Tiefs „Liane“ und „Orike“). 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 $\Delta V = 158 \text{ km}^3$ im Januar/Februar, 105 km^3 im Juli, 129 km^3 im September, 169 km^3 im Oktober/November und 120 km^3 im Dezember. Volumina unter 200 km^3 sind in der Regel von nur geringer Bedeutung, 2010 überstieg kein Einstrom diese Grenze.

Das wichtigste Einstromereignis des Jahres 2009 war ein barotroper Einstrom vom 26.11. bis 1.12.2009, dessen Auswirkungen auf das Tiefenwasser im Frühjahr 2010 untersucht wurden. Dazu war 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 jedoch als zu kurz und zu schwach heraus, um als starker Einstrom (nach MATTHÄUS et al., 2008) klassifiziert zu werden. Obwohl wesentliche Effekte nur bis zur Bornholmsee zu beobachten waren, wurde jedoch eine Belüftung der Wassersäule bis in die südöstliche Gotlandsee hinein registriert (FEISTEL, 2010).

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“ 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. Inzwischen behobene Korrosionsprobleme bei den Steckverbindungen der Optoden führten allerdings an der Station „Arkonabecken“ zu substantiellen Datenverlusten bei den Sauerstoffmessungen (siehe Kapitel 4).

Die Messungen an der Darßer Schwelle finden nach wie vor in 7 m und 19 m Tiefe am Messmast statt. Vereinzelte Vergleichsmessungen des Sauerstoffgehalts an Wasserproben aus der Messtiefe der Geräte wurden mit Hilfe der Winklermethode (vgl. GRASSHOFF et al., 1983) während der Wartungszyklen des Messmastes durchgeführt. Die Zeitreihenmessungen wiesen einen Trend in der Empfindlichkeit der Sauerstoffsensoren auf und wurden entsprechend korrigiert. Die Sauerstoffmessungen an den Stationen Arkonabecken und Oderbucht wurden ebenfalls nach dieser Methode korrigiert.

3.1 Wassertemperatur, Salzgehalt und Sauerstoffgehalt

Mittelwerte und Standardabweichung des in Abb. 6a gezeigten Temperaturverlaufs an der Darßer Schwelle sind in Tab. 3 aufgeführt und in Abb. 7 grafisch dargestellt. Aufgrund von Treibeisbildung infolge der extrem niedrigen Temperaturen im Februar und März liegen für den Zeitraum vom 7. 2. bis 9. 3. 2010 keine Messdaten vor. Die oben erwähnte Statistik beruht daher für diesen Zeitraum auf einer Interpolation von Temperatur und Salzgehalt. Die tatsächlichen Minimaltemperaturen und die Amplitude des Jahresganges werden dadurch nur leicht unterschätzt (die Temperaturen sind bereits im Bereich der Minimaltemperaturen). Der Effekt der Interpolation auf die Statistik des Salzgehalts ist wegen möglicher (nicht erfasster) Einstromereignisse eventuell stärker.

Trotz der Tatsache, dass das Jahr 2010 global eines der wärmsten Jahre seit 1880 war (siehe Kapitel 2) und trotz der vergleichsweise hohen Maximaltemperaturen im Hochsommer, liegen die Jahresmittelwerte der Temperaturen an der Darßer Schwelle im Bereich der kältesten im Beobachtungszeitraum (Tab. 3). Nach mehreren Jahren in Folge mit Rekordtemperaturen erweist sich das Jahr 2010 damit als zweitkältestes Jahr, knapp hinter dem Jahr 1996, das aufgrund extremer Wintertemperaturen auf allen Tiefniveaus noch niedrigere Durchschnittstemperaturen erreichte. Auch im Jahr 2010 sind die niedrigen Jahresmittelwerte vor allem ein Resultat der lang anhaltenden Kälteperiode im Februar und

März mit Wassertemperaturen unter null (deutlich unter den Minimalwerten der Vorjahre) und zeitweiliger Eisbildung in der westlichen Ostsee.

Wie aus den in Tab. 4 dargestellten Ergebnissen der Fourier-Analyse hervorgeht, führt die Kombination aus ungewöhnlich niedrigen Temperaturen im Winter und überdurchschnittlichen Sommertemperaturen zu einem besonders ausgeprägten Jahresgang. Die Amplitude der Oberflächentemperatur weist den dritthöchsten Wert seit Beginn der Messungen auf, bleibt allerdings etwas unter den Rekordwerten der Jahre 1997 und 2006 zurück, welche beide durch einen außergewöhnlich starken Kontrast von warmen Sommer- und kalten Wintertemperaturen geprägt waren. Leicht überdurchschnittliche Amplituden finden sich auch bei den tiefer gelegenen Sensoren.

Die in Tab. 3 und Abb. 7 dargestellten Standardabweichungen der oberflächennahen Wassertemperaturen weisen mit vergleichsweise hohen Werten auf starke Temperaturschwankungen während des Jahres 2010 hin. Da diese Standardabweichungen jedoch von der Amplitude des Jahresganges dominiert werden, ist dieses Ergebnis kaum mehr als eine direkte Konsequenz der ausgeprägten Temperaturunterschiede zwischen Sommer und Winter. Die Standardabweichungen der bodennahen Sensoren werden ebenfalls vom Jahresgang dominiert, zeigen aber im Allgemeinen eine geringere Amplitude, was auf die Filterung der atmosphärischen Wärmeflüsse durch zwei physikalische Effekte zurückgeführt werden kann: (a) einer Dämpfung des lokalen atmosphärischen Signals durch die Dichteschichtung der Wassersäule und (b) einer Dämpfung des Temperatursignals von lateral durch Einströme herangeführtem Nordseewasser durch Vermischung mit dem Brackwasser der Ostsee. Der Transport von Nordseewasser durch die Beltsee führt neben einer Dämpfung des Temperatursignals auch zu einer zeitlichen Verzögerung. Letztere lässt sich besonders klar an 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 im Jahresgang mit der Tiefe nach hinten verschoben, typischerweise um etwa 2 Wochen zwischen Deck- und Bodenschicht.

Die in Tab. 3 und Abb. 8 dargestellte Deckschichtsalinität und ihre Standardabweichung zeigen durchschnittliche Werte und weisen damit bereits auf das Fehlen starker barotroper Einströme im Jahr 2010 hin. Wie weiter unten ausgeführt, wird die Deckschichtstatistik im Jahr 2010 maßgeblich von einem Ereignis im Oktober/November bestimmt. Im Gegensatz zur Deckschicht liegen die Salzkonzentrationen und ihre Standardabweichungen in den tieferen Schichten im oberen Bereich der Statistik. Grund hierfür war in diesem Jahr die starke barokline Einstromtendenz, die zu hohen Maximalkonzentrationen und starken, über das ganze Jahr verteilten Schwankungen der Bodensalzgehalte geführt hat. Bei der Interpretation dieser Ergebnisse sollte bedacht werden, dass durch den Ausfall der Station wegen Eisgang im Februar/März einige Einströme möglicherweise nicht beobachtet werden konnten, was zu einer Unterschätzung sowohl der Durchschnittssalinitäten als auch der Standardabweichungen geführt haben könnte.

Tab. 3

Jahresmittelwerte der Wassertemperatur (T) und des Salzgehaltes (S) sowie deren Standardabweichungen auf der Darßer Schwelle – Maxima 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	9,42 ± 4,71	16,05 ± 3,75
2007	9,99 ± 4,39	9,30 ± 1,28	9,66 ± 4,10	10,94 ± 1,97	9,63 ± 4,08	11,39 ± 2,00
2008	9,85 ± 5,00	9,53 ± 1,74	9,30 ± 4,60	-	9,19 ± 4,48	-
2009	9,65 ± 5,43	9,39 ± 1,67	9,38 ± 5,09	11,82 ± 2,47	9,35 ± 5,04	12,77 ± 2,52
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

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 – Maxima 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

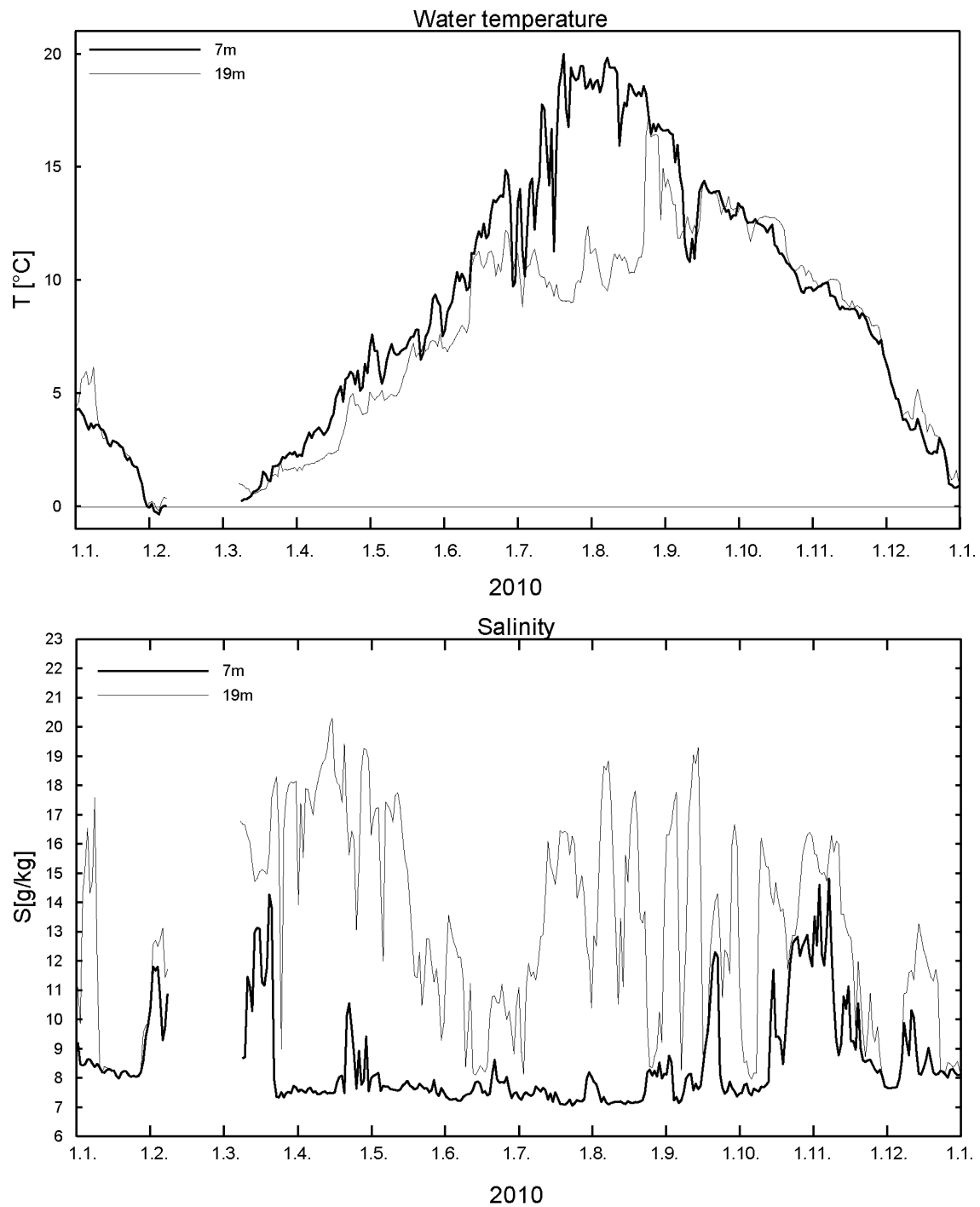


Abb. 6

Verlauf der Wassertemperatur (A) und des Salzgehaltes (B) in der Deck- und Bodenschicht auf der Darßer Schwell im Jahre 2010

Fig. 6

Water temperature (a) and salinity (b) measured in the surface layer and near bottom layer at the Darss Sill in 2010

Der Verlauf der Wassertemperatur und des Salzgehalts für das Jahr 2010 in der Deckschicht (7 m Tiefe) und der bodennahen Schicht (19 m Tiefe) sind in Abb. 6 dargestellt. Der Sauerstoffgehalt, der wegen der leichteren Interpretierbarkeit im Gegensatz zu den Vorjahren nicht als absolute Konzentration sondern als Sättigungsgrad ausgedrückt wurde, ist in Abb. 9 gezeigt.

Der Verlauf dieser Kurven zeigt, dass die erste Januarwoche von einem schwachen baroklinen Einstrom geprägt war. Während die Deckschichttemperaturen in diesem Zeitraum stetig fallen, führt der barokline Transport von bodennahem Wasser aus dem Beltbereich zu einer Temperaturerhöhung bei gleichzeitigem starkem Anstieg des Salzgehalts auf über 17 g/kg. Deutlich untersättigte Sauerstoffkonzentrationen in der Bodenschicht weisen dabei auf Zehrungsprozesse im Sediment hin. In der zweiten Januarwoche werden mit dem Tagesmittelwert von ca. 23 m/s die stärksten Winde des gesamten Jahres beobachtet (Abb. 4a), die trotz der starken halinen Dichteschichtung zu einer sofortigen Volldurchmischung der Wassersäule führen. Starke Pegeldifferenzen (Abb. 5a) und eine Umkehr der Windrichtung (Abb. 5b) sorgen dann für den Rest des Monats für Ausstrom von kaltem, salz- und sauerstoffreichem Deckschichtwasser aus dem Arkonabecken (Abb. 6, 9). Bei Dauerfrost findet eine Abkühlung bis in die Nähe des Gefrierpunkts statt bei gleichzeitiger Durchmischung der Wassersäule durch Konvektion und starke Winde. Mit Änderung der Windrichtung und vergleichsweise niedrigen Pegelständen findet Anfang Februar eine kurze Periode barotropen Einstroms mit maximalen Salzgehalten um die 12 g/kg statt, bevor die Messreihen wegen Treibeis bis zur ersten Märzwoche abbrechen. Die weiter unten diskutierten Geschwindigkeitsmessungen (Abb. 10) und das Verhalten der Pegelstände bei Landsort (Abb. 5a) legen nahe, dass diese Periode von baroklinem Einstrom geprägt ist, der, wie die stagnierenden oder nur schwach ansteigenden Pegelstände zeigen, partiell von barotropem Ausstrom in der Deckschicht kompensiert wird.

Der Monat März war von einem barotropen, von kräftigen Westwinden ausgelösten Einstromereignis geprägt, das zu hohen Salzkonzentrationen in Deckschicht und bodennahem Bereich führte. Sauerstoffwerte oberhalb der Sättigung weisen auf verstärkte Primärproduktion (Frühjahrsblüte) hin. Dieser Einstrom endet abrupt mit einem Wetterumschwung in der letzten Märzwoche und dem Einsetzen thermischer Schichtung durch verstärkte solare Einstrahlung (Abb. 6a). Trotz einzelner barotroper Einstrome in den folgenden Monaten werden die hohen Deckschichtsalzgehalte des Einstroms im März weder im Frühjahr noch im Sommer wieder erreicht. Fallende Pegelstände bis etwa Mitte April (Abb. 5a) verursachen Ausstrom in der Deckschicht, der teilweise durch schwachen baroklinen Einstrom kompensiert wird. Dies führt zu ungewöhnlich hohen Salzkonzentrationen von über 20 g/kg in Sedimentnähe, die gleichzeitig die höchsten Bodensalzgehalte des Jahres darstellen. Der graduelle Sauerstoffverlust durch mikrobiellen Abbau kann durch diesen salzreichen, aber schwachen Einstrom nicht vollständig kompensiert werden (Abb. 9). Erst durch eine sich anschließende Umkehr der Winde auf West in der zweiten Aprilwoche ergibt sich ein kleiner barotroper Einstrom, der zu einer vollständigen Erholung der Sauerstoffkonzentration (Abb. 10) und zu einer Erwärmung des

durch Schichtung isolierten Tiefenwassers führt (Abb. 6a). Das Temperatursignal dieses Ereignisses pflanzt sich, wie weiter unten diskutiert, bis in das Arkonabecken fort. Aufgrund des geringen Einstromvolumens werden die hohen an der Darßer Schelle beobachteten Bodensalzgehalte dort aber bei weitem nicht erreicht. Der ostseeweite Effekt dieses Ereignisses ist damit wahrscheinlich vernachlässigbar.

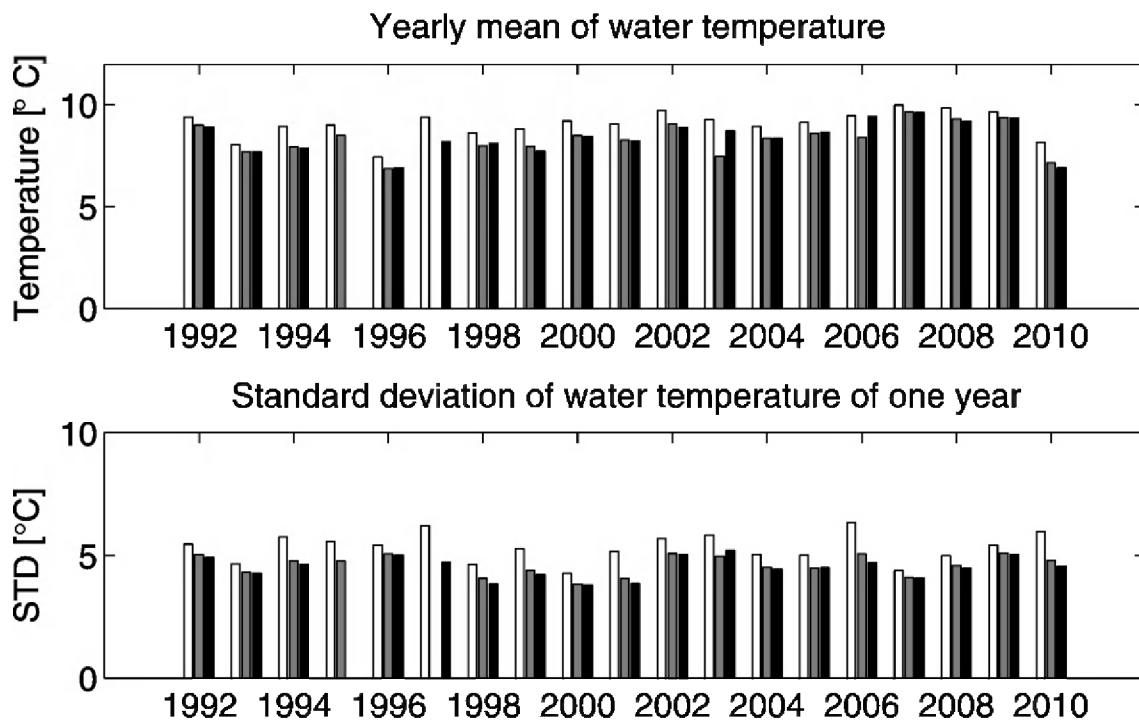


Abb. 7

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

Fig. 7

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

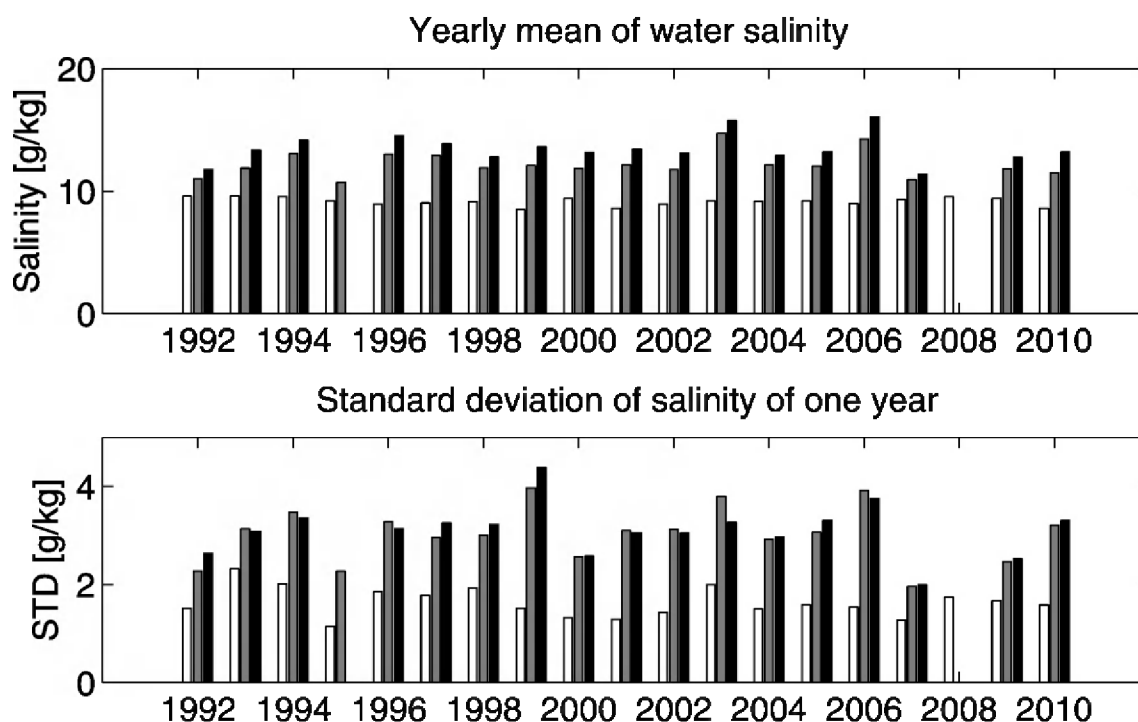


Abb. 8

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

Fig. 8

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

Bis in die letzte Juliwoche hinein steigen die Deckschichttemperaturen auf Werte um 20 °C. Sowohl die Oberflächensalzgehalte (Abb. 6b) als auch die Pegelstände (Abb. 5) variieren nur schwach, was auf das Fehlen markanter barotroper Einstürme hinweist. Wie in Abschnitt 3.2 ausgeführt, lassen sich in den Geschwindigkeitsmessungen tatsächlich nur einige kleinere barotrope Einstürme ausmachen. Neben diesen Ereignissen ist die gesamte Periode geprägt von einer Kompensation von schwachem, oberflächennahem Ausstrom und baroklinem Einstrom. Bis Anfang des Monats Juli verhindert diese Kombination aus episodischen barotropen und baroklinen Einstürmen ein Absinken der Sauerstoffsättigung in der Bodenschicht auf Werte unter 50 %. Die Salzgehalte in der Bodenschicht zeigen einen klaren abnehmenden Trend und liegen in der letzten Juliwoche mit Werten um 10 g/kg nur noch leicht über den Oberflächenwerten.

Bemerkenswert ist ein Windereignis in der zweiten Juniwoche, das die Wassersäule an der Darßer Schwelle nahezu komplett durchmischt. Dies führt zu einer sprunghaften Erwärmung des Tiefenwassers (Abb. 6a) und zu einer kompletten Erholung der Sauerstoffkonzentrationen in der Bodenschicht (Abb. 9). Bei weitgehend ruhigem und sehr

warmem Wetter findet ab Anfang Juli eine Entkopplung der Bodenschicht von der Erwärmung der Deckschicht statt. Dies manifestiert sich in einem Zusammenbruch der Sauerstoffkonzentrationen bis auf Werte um 20 % Sättigung in der zweiten Juliwoche.

Der anschließend einsetzende barokline, später bei kräftigem Westwind zunehmend barotrop ausgeprägte Einstrom führt zu einer kurzfristigen Erholung der Bodensauerstoffgehalte bis auf über 70 % Sättigung. Nach kurzer Stagnation setzt in der ersten Augustwoche barokliner Einstrom mit einem zunächst dramatischen Einbruch der Sauerstoffkonzentrationen ein. Ähnliche Phänomene werden Mitte August und in der zweiten Septemberwoche beobachtet. Solch kurzfristige Einbrüche in der Sauerstoffkonzentration an der Darßer Schwelle sind auch in den letzten Jahren beobachtet worden und lassen sich auf die starke Sauerstoffzehrung in den flachen, warmen Gebieten der Beltsee zurückführen. Bei kurzen Einstromereignissen und in der ersten Phase starker Einströme wird durch diesen Effekt sauerstoffarmes Bodenwasser aus dem Belt zur Messstation an der Darßer Schwelle gespült und dort als lokaler Einbruch des Sauerstoffgehalts registriert. Mehrere kleine barotrope Einströme führen Ende Juli, Ende August und Mitte September dann aber jeweils zu einer Minderung des bodennahen Sauerstoffdefizits. Das Ereignis Ende August verursacht eine starke Erwärmung der Bodenschicht bis auf Werte, die in der Deckschicht beobachtet werden (Abb. 6a), während das Ereignis Mitte September für Sauerstoffkonzentrationen nahe der Sättigungsgrenze sorgt (Abb. 9).

Der weitere Verlauf des Jahres war von zwei Einstromereignissen im Oktober/November und Anfang Dezember geprägt. Die Voraussetzungen für das Hauptereignis der Jahres 2010 im Oktober werden durch eine in der letzten Septemberwoche beginnende Ostwindlage geschaffen (Abb. 4b und 5b), die Anfang Oktober zum niedrigsten Füllstand der Ostsee seit Ende Februar führt. Bei sich langsam abschwächenden Winden findet zunächst barokliner Einstrom statt, der mit einem Umschwenken der Winde auf westliche Richtungen und im Langzeitmittel stetig wachsenden Windgeschwindigkeiten ab Mitte Oktober in barotropen Einstrom übergeht. Die Salzkonzentrationen steigen bis auf 15 g/kg (Abb. 6b) und die Sauerstoffkonzentrationen in der Bodenschicht liegen nur knapp unter der Sättigungsmarke. Im weiteren Jahresverlauf werden die Sauerstoffgehalte nicht mehr unter die Marke von 90 % Sättigung fallen. Trotz stark fluktuierender Winde aufgrund des Durchzugs mehrerer Störungen bleiben die Windrichtung im Mittel bei West und der Einstrom bis etwa Mitte November erhalten. Die Pegelstände erreichen in der zweiten Novemberwoche den Höchststand des Jahres (Abb. 5a).

Getrieben durch diesen Druckunterschied erfolgt bis Ende November kräftiger Ausstrom. Ein starkes Windereignis führt Ende November/Anfang Dezember zu einer Volldurchmischung der Wassersäule an der Darßer Schwelle. Trotz kräftiger Winde aus West baut sich in der zweiten Dezemberwoche wieder haline Schichtung auf und führt bei dem ab Anfang Dezember beobachteten barotropen Einstrom zu einer starken baroklinen Komponente, die am deutlichsten in den im Folgenden besprochenen Geschwindigkeitsmessungen sichtbar

wird. Aufgrund der hohen Sauerstoffkonzentrationen im Vorfeld ist dieses Ereignis für den Sauerstoffhaushalt an der Darßer Schwelle aber nahezu irrelevant.

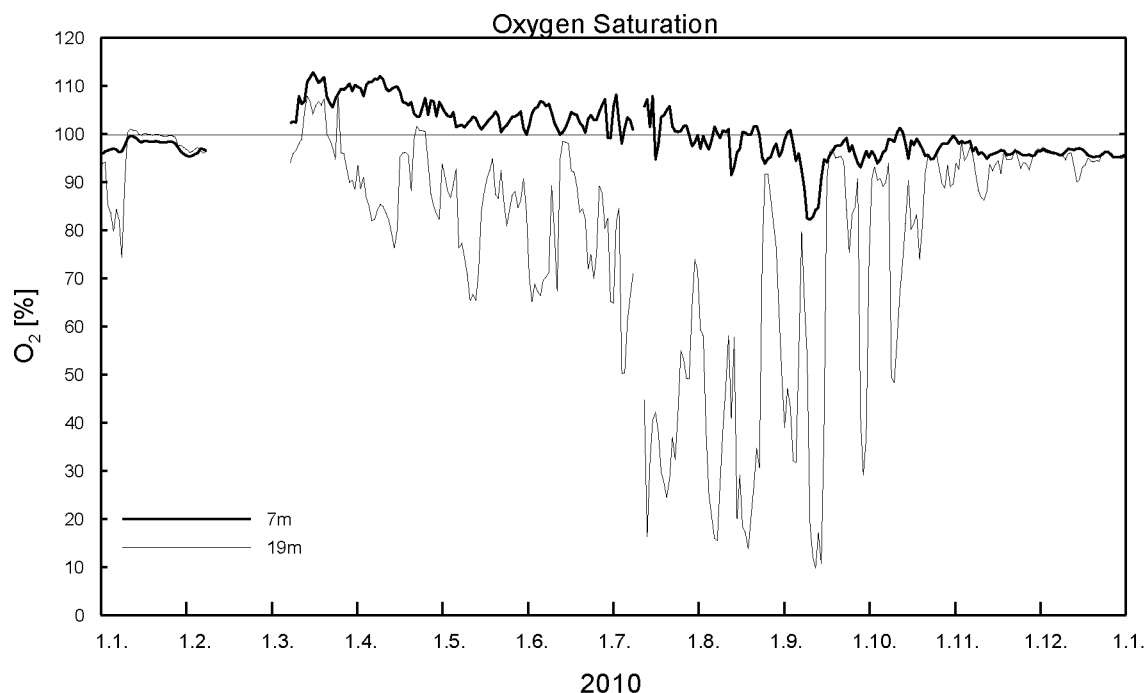


Abb. 9
Verlauf der Sauerstoffsättigung in der Deck- und Bodenschicht auf der Darßer Schwelle im Jahre 2010

Fig. 9
Dissolved oxygen content measured in the surface and bottom layer at the Darss Sill in 2010

3.2 Strömung

Wie im Vorjahr lieferte das akustische Strömungsmessgerät an der Darßer Schwelle im Jahr 2010 durchgehend Geschwindigkeitsprofile in hoher Qualität (im Gegensatz zu den Temperatur- und Salzmessungen war dieses bodenverankerte Gerät nicht von den Treibeisproblemen während der Kälteperiode im Februar/März betroffen). Während des ganzen Jahres sind die mittlere Strömung und ihre Fluktuationen auf der Darßer Schwelle innerhalb der Wassersäule stark kohärent. Zur Charakterisierung des tiefenvariablen, baroklinen Anteils ist die Strömung in 3 m und 17 m Messtiefe zeitlich integriert als „fortschreitendes Vektordiagramm“ (Pseudotrajektorie) in Abb. 10 dargestellt. Diese integrale Darstellungsweise filtert kurzzeitige Fluktuationen aus den Strömungsmessungen und lässt daher langfristige Periodizitäten in der Strömung besser erkennen. Gemäß dieser Definition entspricht die Strömungsgeschwindigkeit dann der Steigung der in Abb. 10 gezeigten Kurven, wobei eine positive Steigung Einstromsituationen widerspiegelt.

Die ungewöhnlich starke Spreizung der Kurven für Deck- und Bodenschicht weist auf einen starken Einfluss barokliner (dichtegetriebener) Effekte im Jahr 2010 hin. Die Deckschichttransporte, die von solchen baroklinen Prozessen nicht betroffen sind, zeigen eine klare Ausstromtendenz, die nur gelegentlich durch moderate barotrope Einstromereignisse unterbrochen wird. Die bodennahen Transporte dagegen weisen nach einer leichten Einstromphase im Februar und März keinen signifikanten Trend während der Sommermonate auf, was physikalisch als eine Kompensation des in erster Näherung vertikal über die Wassersäule konstanten barotropen Ausstroms durch bodennahen, baroklinen Einstrom interpretiert werden kann. Diese Tendenz wird erst Anfang Oktober durch den oben beschriebenen barotropen Einstrom unterbrochen.

Die in Kapitel 2 anhand der Pegelschwankungen bei Landsort identifizierten 5 kleineren barotrope Einströme Ende Januar, Ende Juli, Mitte September, im Oktober und Anfang Dezember lassen sich direkt in den Deckschichttransporten in Abb. 10 nachweisen. Sowohl im Pegelanstieg (Abb. 5a) als auch im Deckschichttransport (Abb. 10) ist hierbei der einmonatige, etwa Anfang Oktober beginnende Einstrom als der stärkste des Jahres 2010 zu werten. Relevant für die Erholung des bodennahen Sauerstoffgehalts im Bereich der Darßer Schwelle sind, wie weiter oben gezeigt, aber auch die in Kapitel 2 als schwach kategorisierten Ereignisse Mitte April, Ende Juli, Ende August und Mitte September, welche jeweils zu markanten Pegeländerungen führen (Abb. 5a). Aufgrund ihrer geringen Dauer führt das durch diese Ereignisse herangeführte salzreiche Wasser aus Beltsee und Kattegat nur zu einer kurzzeitigen und schwachen Erhöhung des Salzgehaltes in der Deckschicht. Trotzdem äußert sich jedes dieser kleineren Einstromereignisse in einer deutlichen, aber nur kurzfristigen Erholung der Sauerstoffkonzentrationen im Bodenwasser.

Barokline Einstromereignisse spiegeln sich in einer Spreizung der in Abb. 10 dargestellten integrierten Geschwindigkeitskurven für Deckschicht- und Bodenströmungen wider. So kann der kontinuierliche Pegelanstieg von der zweiten Februarwoche an bis etwa Ende März (Abb. 5a) auf einen solchen baroklin getriebenen Einstrom zurückgeführt werden: Während in der Deckschicht leichter Ausstrom oder Stagnation beobachtet wird, kann in der bodennahen Schicht in diesem Zeitraum nahezu permanenter Einstrom registriert werden (Abb. 10). Ähnliche, aber deutliche schwächer ausgeprägte Ereignisse lassen sich Mitte April und Anfang September identifizieren. Die lang andauernde Ventilation der Bodenschicht im Februar und März zeigt sich in hohen Bodensalzgehalten (Abb. 6) und Sauerstoffkonzentrationen nahe der Sättigung (Abb. 9), die erst nach Umkehr der bodennahen Strömungen in der zweiten Märzhälfte zusammenbrechen. Neben diesem besonders ausgeprägten Ereignis manifestiert sich der Effekt zahlreicher kleinerer barokliner Einströme während der Sommermonate in der oben beschriebenen Kompensation von barotropem Ausstrom und baroklinem Einstrom in der Bodenschicht. Insgesamt wird durch diesen Effekt der bodennahe Transport von Sauerstoff über die Darßer Schwelle stark vermindert. Ein umgekehrter Effekt zeigt sich bei den hauptsächlich barotrop getriebenen Einströmen im Oktober und Dezember, die beide durch barokline Effekte in der Bodenschicht verstärkt werden (Abb. 10).

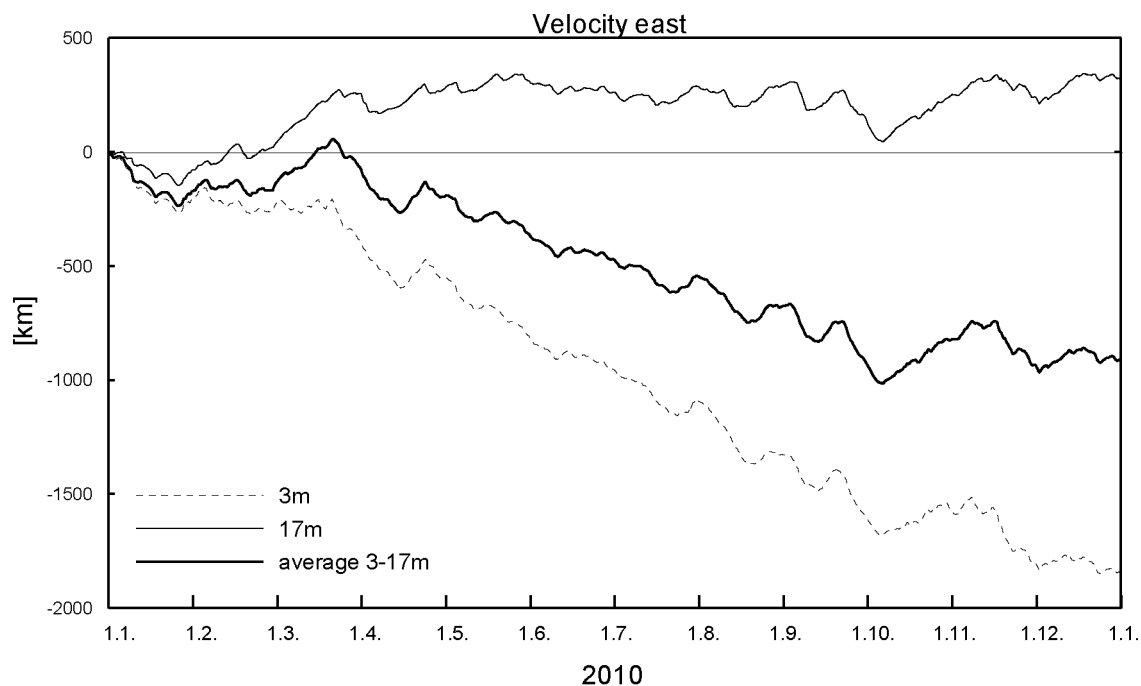


Abb. 10

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 2010

Fig. 10

East component of progressive vector diagrams of the current in 3 m depth (solid line), the vertical averaged current (thick line) and the current in 17 m depth (dashed line) at the Darss Sill in 2010

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 Bornholmsgat als Zonen stark erhöhter Vermischung identifiziert. Zur Validierung der Modelldaten wurden unter anderem die in dieser Reihe jährlich vorgestellten Daten aus dem MARNET-Messnetz verwendet. Weitergehende theoretische Untersuchungen, die auf den in

QuantAS gewonnenen Daten basieren, haben einen überraschend starken Einfluss der Erdrotation auf die turbulenten Einmischungsprozesse in dichten Bodenströmungen sichtbar gemacht und zu neuen theoretischen Modellen für solche Strömungen geführt (UMLAUF & ARNEBORG, 2009 a,b; UMLAUF et al., 2010).

Die Bojenstation "Arkonabecken" befindet sich annähernd 20 m nordöstlich von Arkona bei 46 m Wassertiefe. Bis auf einige Einschränkungen bei den Sauerstoffmessungen war die Station während des ganzen Jahres 2010 operativ. Wie im letzten Jahr kam es allerdings bei den neuen Sauerstoffoptoden der Firma Aanderaa zu schwerer Korrosion an den Steckverbindungen beider Sensoren, die zu substantiellen Datenverlusten geführt hat. Diese Probleme, die bei Nutzung identischer Sensoren an allen Stationen nur an der Station Arkonabecken entstanden, konnten auf einen herstellerbedingten Materialmangel zurückgeführt werden und gelten mittlerweile als behoben.

Die Zeitreihen von Wassertemperatur und Salzgehalt in 7 m und 40 m Tiefe sind in Abb. 11 dargestellt, die entsprechenden Sauerstoffsättigungen in Abb. 12. Die an dieser Station in der Deckschicht gemessene Wassertemperatur folgt in ihrem Jahresgang weitgehend dem auf der Darßer Schwelle gemessenen Verlauf (vgl. Abb. 6a). Das Maximum der Oberflächentemperatur im Arkonabecken wird in der zweiten Julihälfte erreicht und liegt während einer kurzen Periode bei 22 °C, noch einmal deutlich über der Marke von 20 °C, die den Höchstwerten der letzten beiden Jahre entsprach. Ähnlich wie an der Darßer Schwelle liegen die niedrigsten Temperaturen Anfang März nur knapp über 0 °C und sorgen zusammen mit den hohen Sommertemperaturen für eine ungewöhnlich starke Amplitude des Jahresganges. Die thermische Schichtung ist im Arkonabecken insgesamt ausgeprägter als an der Darßer Schwelle und wechselt von thermisch stabil während der sommerlichen Erwärmungsphase zu thermisch instabil während der herbstlichen Abkühlungsphase ab Anfang Oktober. Der starke Kontrast von kaltem Winterwasser und hohen Sommertemperaturen verursacht eine außergewöhnlich ausgeprägte thermische Schichtung während der Sommermonate, die Mitte Juli zu einer Temperaturdifferenz von bis zu 14 K zwischen Boden- und Deckschicht führt (Abb. 11a).

Die Signaturen der in Kapitel 3 beschriebenen Einstromereignisse während der ersten Monate des Jahres 2010 lassen sich deutlich an der Entwicklung der Temperaturen und Salzgehalte in Abb. 11 ablesen. Wie an der Darßer Schwelle zeigt sich der kurze Einstrom in der ersten Januarhälfte in einer deutlichen Erhöhung der Bodentemperaturen und Salzgehalte. Ungewöhnlich ist die im Vergleich zu den Messungen an der Darßer Schwelle um ca. 2 K höhere Temperatur des Einstromwassers, die auf zusätzlichen Einstrom über den Örsesund hinweist. Da das Einstromwasser bereits an der Darßer Schwelle deutlich unter der Sättigungsgrenze liegt (Abb. 9), kann das bereits am Jahresende 2009 im Arkonabecken vorhandene Sauerstoffdefizit durch den Einstrom Anfang Januar nicht völlig ausgeglichen werden (Abb. 12). Erst das Sturmereignis in der zweiten Januarwoche (Abb. 4a) führt zu einer Volldurchmischung der Wassersäule und damit zu einer kompletten Ventilation des Tiefenwassers (Abb. 12).

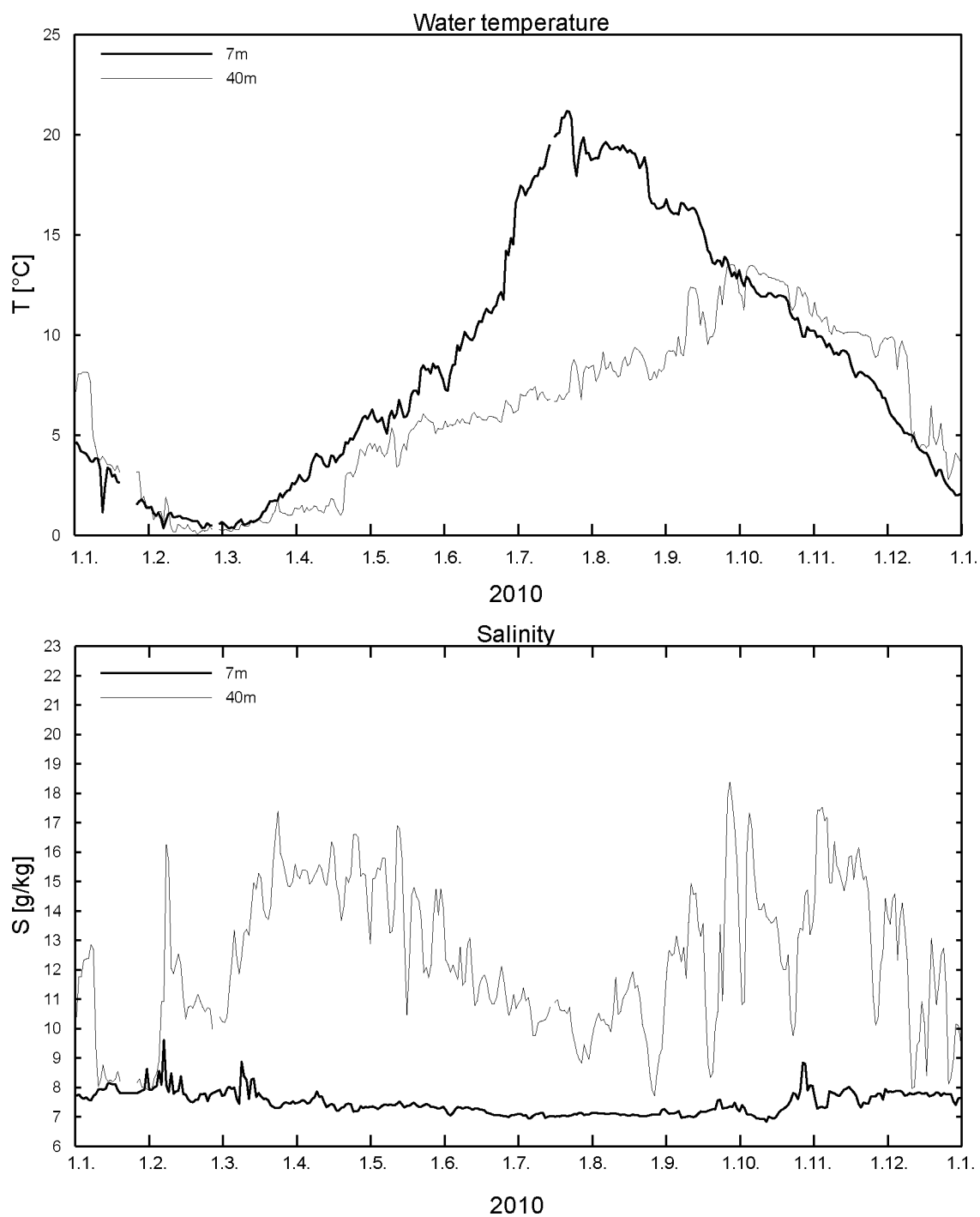


Abb. 11
Verlauf der Wassertemperatur (A) und des Salzgehaltes (B) in der Deck- und Bodenschicht im Arkonabecken (Station AB) im Jahr 2010

Fig. 11
Water temperature (a) and salinity (b) measured in the surface layer and near bottom layer at station AB in the Arkona Basin in 2010

Das Wasser des folgenden barotropen Einstroms Anfang Februar schichtet sich an der Arkonastation als dichtes, salzreiches Bodenwasser ein (Abb. 11b), lässt sich aber aufgrund ähnlicher Temperaturen und Sauerstoffgehalte anhand dieser Parameter kaum vom Umgebungswasser unterscheiden (Abb. 11a, 12). Die maximalen Salzkonzentrationen liegen mit Werten von über 16 g/kg kurzzeitig deutlich über den an der Darßer Schwelle beobachteten Werten (Abb. 6b), was auf den Einfluss von salzreichem Einstrom über die Drogdenschwelle schließen lässt. Aufgrund des geringen Einstromvolumens (siehe Kapitel 2) sinken die Salzkonzentrationen innerhalb einer Woche auf Werte unter 11 g/kg und steigen erst wieder im Zuge des Anfang März erfolgenden, barotropen Einstroms an. Bei erhöhter Sonneneinstrahlung steigen die Deckschichttemperaturen langsam an und schwache thermische Schichtung entsteht (Abb. 11a). Die Frühljahrsblüte setzt ein und treibt den Sauerstoffgehalt in der Deckschicht über die Sättigungsgrenze. Trotz starker Produktion von Biomasse in der Deckschicht und dem davon begleiteten Absinken von organischem Material und Detritus bleiben die Sauerstoffkonzentrationen in der Bodenschicht als Konsequenz des Einstroms im Bereich der Sättigung (Abb. 12). Eine weitere Ventilation des Bodenwassers im Arkonabecken findet in der zweiten Aprilhälfte durch das in Kapitel 3 beschriebene kurze barotrope Einstromereignis statt. Aufgrund der bereits hohen Salz- und Sauerstoffkonzentrationen manifestiert sich dieser Einstrom am deutlichsten in den bodennahen Temperaturen, bei denen in der dritten Aprilwoche ein sprunghafter Anstieg beobachtet werden kann.

Die folgenden Sommermonate bis Ende Juli sind von sporadischen, hauptsächlich baroklinen Einströmen über die Darßer Schwelle geprägt (Kapitel 3). Diese Einströme sind insgesamt zu schwach, um ein stetiges Absinken der Bodensalzgehalte und Sauerstoffkonzentrationen in dieser Periode zu verhindern. Auch die advektive Erwärmung der unteren Wasserschichten durch warmes Einstromwasser von der Darßer Schwelle ist nur gering und führt zu der oben beschriebenen, außergewöhnlich starken vertikalen Temperaturschichtung. Trotzdem verhindert die kontinuierliche Ventilation des Tiefenwassers ein Abfallen der Sauerstoffgehalte unter die Marke von 60 % Sättigung, wobei für den Monat Juli aufgrund einer Datenlücke diesbezüglich keine Aussage getroffen werden kann.

Beginnend mit dem kleinen barotropen Einstromereignis Ende Juli folgt im Spätsommer und Herbst eine Periode, die von starken, durch weitere kleinere Ereignisse verursachten Fluktuationen der Sauerstoffgehalte und Salzkonzentrationen geprägt ist. Besonders deutlich treten hierbei die Einströme Mitte September und im Oktober/November hervor, die jeweils zu den zweithöchsten und höchsten im Jahr 2010 gemessenen Salzgehalten führen (Abb. 11b). In beiden Fällen liegen die maximalen Bodensalzgehalte über den entsprechenden Werten an der Darßer Schwelle, was auf den zusätzlichen Zustrom von salzhaltigem Einstromwasser über die Drogdenschwelle schließen lässt. Sofern Messdaten vorhanden sind (Abb. 12), werden extreme, mit diesen Einströmen assoziierte Fluktuationen der Sauerstoffkonzentrationen beobachtet, die die stark variablen Sauerstoffgehalte im Einstromwasser an der Darßer Schwelle abbilden (siehe Abb. 9). Durch das gemischt

barotrop-barokline Einstromereignis im Dezember steigen die Bodensauerstoffgehalte schließlich bis zur Sättigungsgrenze, und zwar ohne dass hierbei eine Volldurchmischung der Wassersäule beobachtet wird. Das Jahresende 2010 ist somit, im Gegensatz zum Vorjahr, durch eine optimal belüftete Wassersäule gekennzeichnet. Im Jahresüberblick liegen die niedrigsten im Arkonabecken beobachteten Sauerstoffgehalte in der Bodenschicht im Tagesmittel knapp über 30 % der Sättigungskonzentration und werden jeweils nur für einige Tage erreicht. Wie diskrete Messungen belegen (siehe Kapitel 6.3) wurden im zentralen Arkonabecken im Juli (Ausfall des Sensors) Sättigungen von deutlich unter 10% gemessen. Das Jahr 2010 war demnach zum Teil von einem starken Sauerstoffdefizit in Bodennähe geprägt, was in der westlichen Ostsee zu Schädigungen der benthischen Fauna im November führte (siehe Kapitel 6.3).

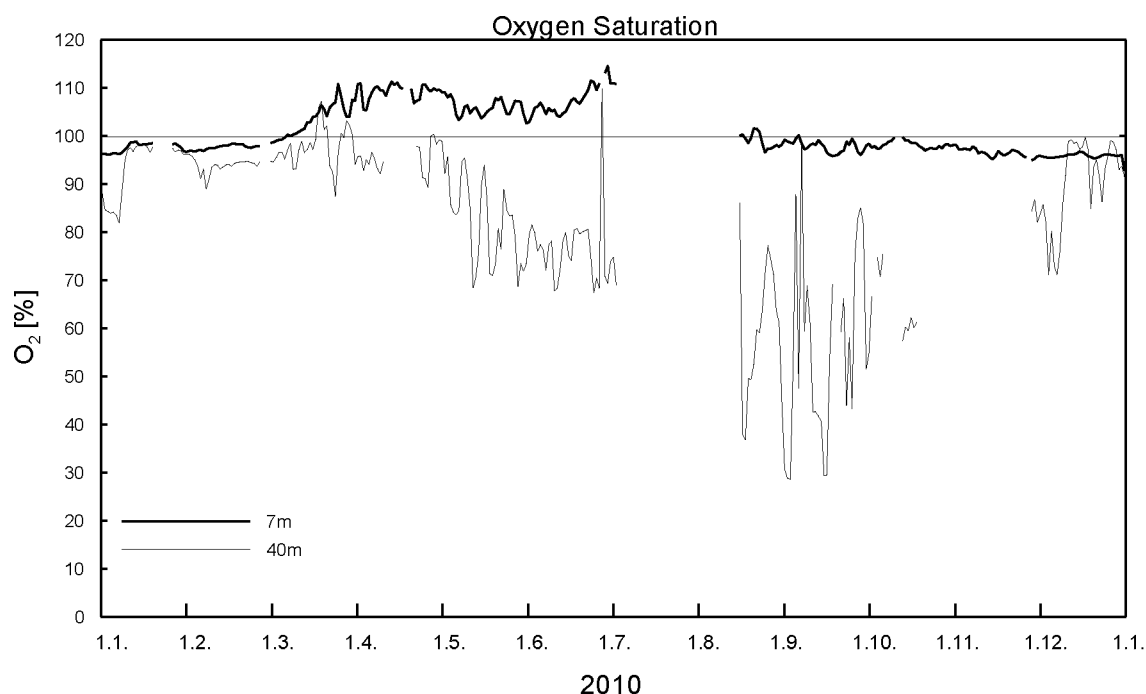


Abb. 12

Verlauf der Sauerstoffsättigung in der Deck- und Bodenschicht im Arkonabecken (Station AB) im Jahr 2010

Fig. 12

Dissolved oxygen content measured in the surface and bottom layer at the station AB in the Arkona Basin in 2010

5. Beobachtungen an der Bojenstation „Oder Bank“

Die Verteilung von Wassermassen und die Zirkulation in der Pommerschen Bucht sind im Rahmen des TRUMP-Projektes (*TR*ansport und *UM*satzprozesse in der *P*ommerschen Bucht) untersucht (v. BODUNGEN et al., 1995; TRUMP, 1998) sowie durch SIEGEL et al. (1996), MOHRHOLZ (1998) und LASS, MOHRHOLZ and SEIFERT (2001) beschrieben worden. Bei Westwindlagen wird dort gut durchmisches Wasser 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 bei 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 wurden auch an der Station „Oder Bank“ die Sauerstoffmessungen im Jahr 2010 durchgehend mit den neuen Optoden der Firma Aanderaa (Norwegen) durchgeführt. Infolge eines planmäßigen Werftaufenthalts war diese Station erst ab dem 09.07.2010 wieder dauerhaft in Betrieb und hat ab diesem Zeitpunkt Daten in vollem Umfang geliefert.

Die Zeitreihen von Wassertemperatur und Salzgehalt in 3 m und 12 m Tiefe sind in Abb. 13 dargestellt. Die Oberflächentemperatur im Juli erreicht aufgrund der extremen Lufttemperaturen und geringen Windgeschwindigkeiten mediterrane Werte von über 23 °C und liegt damit noch einmal deutlich über den bereits ungewöhnlich hohen Maximaltemperaturen im Arkonabecken (Abb. 11) und an der Darßer Schwelle (Abb. 6). Der große Temperaturunterschied zwischen Deckschicht und bodennahem Wasser weist auf einen Feedbackmechanismus hin, bei dem sich der Aufbau temperaturbedingter Dichteschichtung und die dadurch verursachte Unterdrückung turbulenter vertikaler Vermischung gegenseitig bedingen. Dieser Prozess wird durch die weiter unten diskutierte haline Schichtung noch verstärkt. Erst durch die bei der Passage einiger Tiefdruckgebiete (siehe Kapitel 2) verursachten Starkwinde in der letzten Juliwoche wird die stabile Schichtung zerstört. Die Oberflächentemperaturen brechen bis auf etwa 20 °C ein und gleichen sich den bodennahen Temperaturen an. Dies und die vertikale Homogenisierung der Salzsichtung weisen auf eine totale Vermischung der Wassersäule hin. Durch die wechselhafte Wetterlage im August werden die hohen Temperaturen des Vormonats nicht mehr erreicht. Trotzdem ist die erste Monatshälfte durch stabile thermische und haline Schichtung gekennzeichnet, die erst ab Mitte des Monats durch anwachsende Westwinde zusammenbricht.

Bereits ab Ende August setzt eine kontinuierliche, nur sporadisch durch kurze Erwärmungsphasen unterbrochene Abkühlung von spätsommerlichen Werten um 20 °C bis auf Werte um

o °C zum Ende der Messperiode ein. Die Temperaturen in Deckschicht und bodennaher Schicht folgen einem nahezu identischen Verlauf, was aber nicht als Indiz für die dauerhafte Vermischung der Wassersäule interpretiert werden darf. Die Bodensalzgehalte liegen während der gesamten Abkühlungsphase über den Oberflächenwerten und weisen damit auf durchgehend stabile Schichtung hin, die nur gelegentlich durch Vermischung aufgrund von Starkwindereignissen unterbrochen wird.

Ein wichtiger dynamischer Grund für die Unterdrückung von Mischung im Bereich dieser Station liegt in der Aufschichtung weniger salzreichen (also weniger dichten) Mischwassers aus dem Oderhaff über das Wasser der Pommerschen Bucht. Die daraus resultierende Stabilisierung der Wassersäule führt zu einer Abschwächung des vertikalen turbulenten Austausches, die sich deutlich in der ausgeprägten vertikalen Temperaturstruktur im Juli manifestiert. In dieser Periode führt der oben beschriebene Schichtungsmechanismus zu einer Abkopplung der bodennahen Schicht vom atmosphärischen Wärmefluss, was sich in einer Stagnation der Bodentemperaturen äußert (Abb. 13a). Diese Stagnationsphase wird Ende des Monats durch ein starkes Windereignis aufgelöst, bei dem sich Deckschicht- und Bodentemperaturen durch die Durchmischung der Wassersäule wieder angleichen (siehe oben). In Bezug auf Dauer und Stärke ist das Schichtungsereignis im Juli 2010 als ungewöhnlich stark einzuordnen – mit beträchtlichen Konsequenzen für den Sauerstoffhaushalt der Bodenschicht, wie weiter unten beschrieben. Weniger markante Schichtungsereignisse dieser Art können auch in den Folgemonaten anhand der vertikalen Salzgehaltsdifferenzen (Abb. 13b) identifiziert werden, wobei sich durch die Abschwächung der solaren Einstrahlung auch die Temperaturunterschiede zwischen Boden- und Deckschicht vermindern.

Der Effekt dieser Ereignisse auf den Sauerstoffhaushalt der Pommerschen Bucht wird in Abb. 14 sichtbar, in welcher die Sauerstoffsättigungen in 3 m und 12 m Tiefe aufgetragen sind. Während aller Schichtungsereignisse zeigt sich eine klare negative Korrelation zwischen ansteigenden Sauerstoffsättigungen in der Deckschicht und einer Abnahme in der bodennahen Schicht. Es liegt nahe, dass die erhöhte Primärproduktion von Biomasse im Oderhaff zu übersättigten Sauerstoffkonzentrationen führt, welche mit dem Haffwasser zur Station OB transportiert werden. Zusätzlich oder alternativ werden mit dem Haffwasser hohe Nährstoffkonzentrationen in der Deckschicht aus dem Haff exportiert, was an der Station OB lokal zu erhöhter Produktion und damit wiederum zu erhöhten Sauerstoffkonzentrationen an der Oberfläche führen kann. Die Korrelation dieser Ereignisse mit einer 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. Ähnlich wie beim oben diskutierten Temperaturverlauf führen Windereignisse jeweils zu einer Auflösung der Sauerstoffunterschiede und damit auch zu einem kurzzeitigen Einbruch der oberflächennahen Sauerstoffkonzentrationen durch Einmischung sauerstoffarmen Bodenwassers.

Bemerkenswert ist der Einbruch der bodennahen Sauerstoffkonzentration bis auf 0 % Sättigung während der Periode anhaltender Schichtung im Juli. Erst die windinduzierte Vermischung mit übersättigtem Wasser aus der Deckschicht führt kurzzeitig zu einer Erholung der Sauerstoffkonzentrationen bis auf Werte von ca. 80 %. Durch erneute Aufschichtung weniger dichten Wassers aus dem Haff wird die Bodenschicht in der ersten Augushälfte allerdings wieder von der sauerstoffreichen Deckschicht isoliert und die Sättigungsgrade fallen bis etwa Mitte des Monats auf 50 %. Durch die Windereignisse in der zweiten Augushälfte wird dieses Sauerstoffdefizit nachhaltig ausgeglichen und bis Ende des Jahres werden keine Perioden mit kritischer Untersättigung mehr beobachtet. Trotzdem lässt sich das Zusammenspiel von Aufschichtung salzarmen Haffwassers in der Deckschicht und einem milden Einbruch der Bodensauerstoffgehalte an mehreren kleinen Ereignissen bis etwa Ende Oktober nachvollziehen. Die trotz vergleichbarer Dauer dieser Schichtungsereignisse abnehmende Ausprägung der Sauerstoffeinbrüche ist dabei vermutlich ein Resultat fehlender Deckschichtproduktion und stetig abnehmender Temperaturen in der Bodenschicht. Letztere führen zu einer Verminderung der temperaturabhängigen mikrobiellen Abbauraten im Sediment und damit zu einer Reduktion des sedimentären Sauerstoffbedarfs.

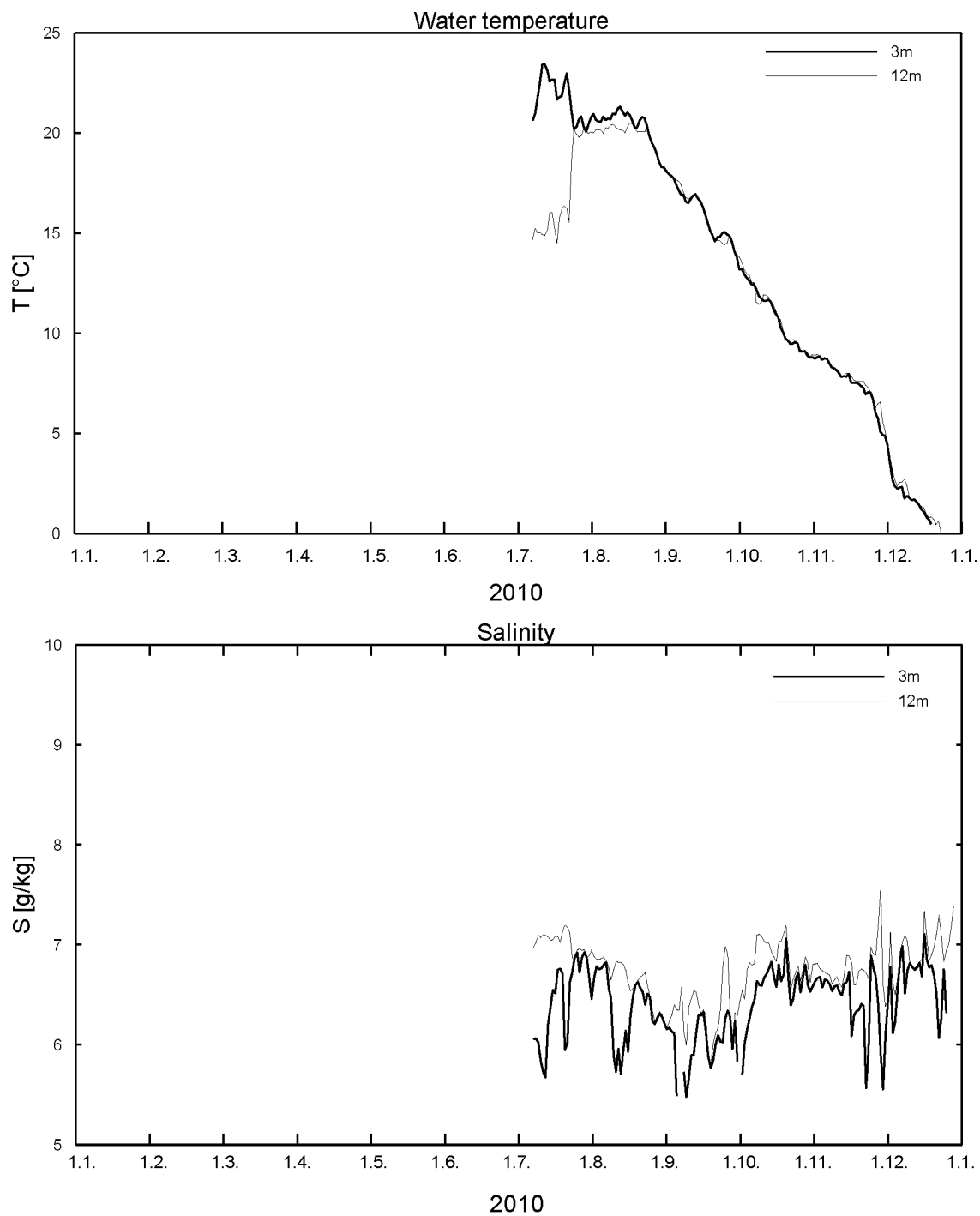


Abb. 13
Verlauf der Wassertemperatur (A) und des Salzgehaltes (B) in der Deck- und Bodenschicht in der Pommerschen Bucht (Stat. OB) im Jahr 2010

Fig. 13
Water temperature (a) and salinity (b) measured in the surface layer and near bottom layer at station OB in the Pomeranian Bight in 2010

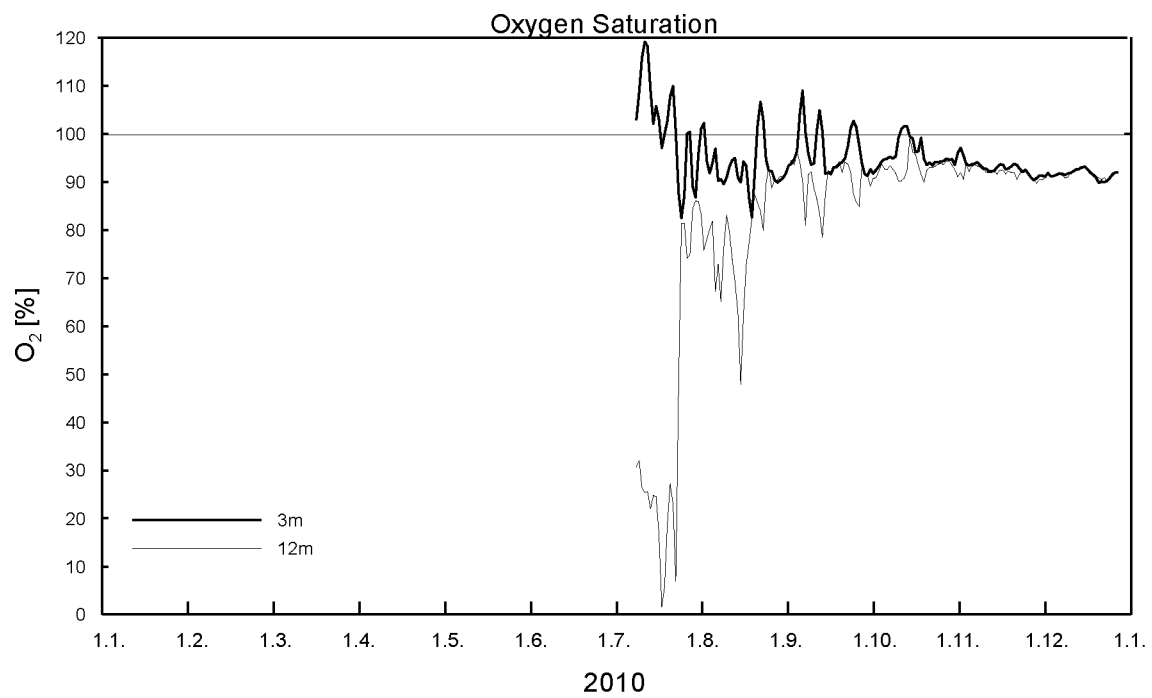


Abb. 14

Verlauf der Sauerstoffsättigung in der Deck- und Bodenschicht in der Pommerschen Bucht (Stat. OB) im Jahr 2010

Fig. 14

Dissolved oxygen content measured in the surface and bottom layer at the station OB in the Pomeranian Bight in 2010

6. Hydrographisch-chemische Bedingungen

6.1. Wassertemperatur

6.1.1 Die Wasseroberflächentemperatur der Ostsee im Jahr 2010

Die Entwicklung der Wasseroberflächentemperatur der Ostsee im Jahr 2010 wurde 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. Die jährliche Einschätzung der Entwicklung der Wasseroberflächentemperatur der Ostsee ist bei Nausch et al. (2010) und in den HELCOM Indicator Fact Sheets (SIEGEL and GERTH, 2009) zusammengefasst. Betrachtungen zur Langzeitentwicklung der Wasseroberflächentemperatur in der Periode seit 1990 sind bei SIEGEL et al. (1999, 2006, 2009) und SIEGEL and GERTH (2010) dargestellt.

Im Jahr 2010 lagen von Januar bis Mai die Monatsmittel unter den langjährigen Mittelwerten. Nach der starken Abkühlung im November/Dezember 2009, die sich bis Anfang März fortsetzte, entwickelte sich der März zum kältesten Monat in der zentralen Ostsee. Durch die Eisbildung im Januar und Februar in der westlichen Ostsee war die maximale Eisbedeckung am 17.02. erreicht, obwohl das Maximum in der nördlichen Ostsee erst am 8. März zu verzeichnen war. Ende Juni begann die anhaltende schwüle Witterung, die im Juli zu einer sehr starken Erwärmung der Ostsee führte. Obwohl die Maximaltemperaturen bereits in der Periode 15.-17.07. beobachtet wurden und danach schon eine leichte Abkühlung einsetzte, war der Juli im Mittel der wärmste Monat des Jahres und führte mit maximalen Tagesmitteltemperaturen von 20-23 °C zu positiven Anomalien von bis zu +3,5 K in der östlichen Gotlandsee. In der Periode September – November lagen die Sea Surface Temperature (SST) im Bereich der langjährigen Mittelwerte. Durch die starke atmosphärische Abkühlung im November/Dezember verringerte sich die SST im Dezember in der gesamten Ostsee sehr stark. Im Vergleich zu den langjährigen Mittelwerten zeigt die SST im Kattegat/Skagerrak mit -4 K und in der westlichen mit minus 2-3 K die größten Abweichungen. Das führte dann bereits in der dritten Dezemberdekade zur Eisbildung in der Pommernbucht. 2010 wurde neben 1998 in der westlichen Ostsee und neben 2002 in der zentralen Ostsee der kälteste Dezember seit 1990 registriert.

Die Besonderheiten in der Entwicklung der Lufttemperatur spiegeln sich in den Kälte- und Wärmesummen wider (Kapitel 2). Die Kältesummen der Lufttemperatur von Warnemünde (Tab. 2, Kapitel 2) zeigen, dass der Winter 2009/2010 mit 203,7 Kd (Mittel 105,4 Kd) der zwölft kälteste Winter seit 1948 war. Die Wärmesumme des Sommers 2010 lag mit 258,5 Kd über dem langjährigen Mittelwert (148,4) und war der sechstwärmste Sommer. Dazu hatte insbesondere der Monat Juli beigetragen, der nach 2006 der zweitwärmste Juli war.

Der Dezember 2010 sorgte mit 109,2 Kd für einen kalten Beginn des Winters 2010/2011. Dieser Wert repräsentiert nach 1969 den zweitkältesten Dezember seit 1948.

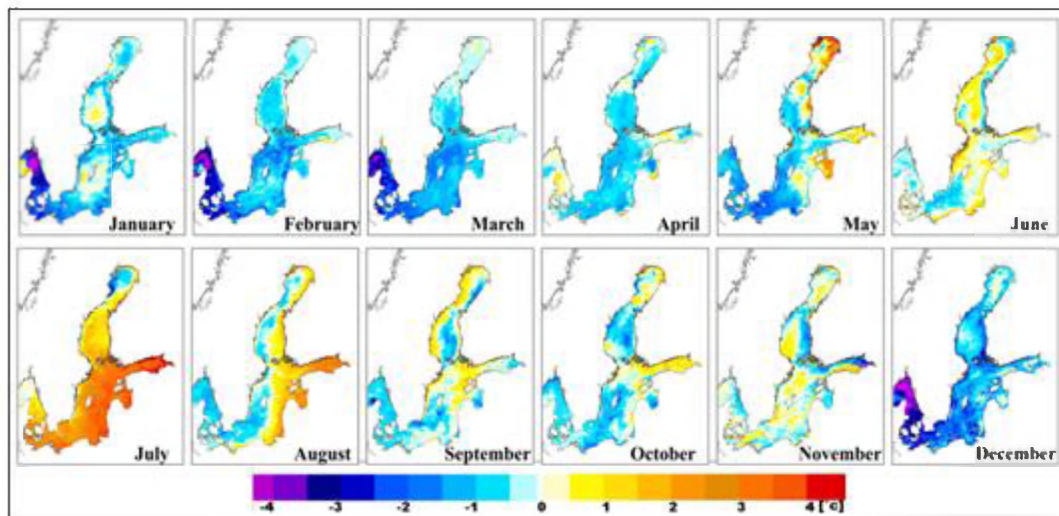


Abb. 15

SST- Anomalien der Monatsmitteltemperatur der Ostsee im Jahre 2010 bezogen auf die langjährigen Mittel 1990 – 2008

Fig. 15

SST- Anomalies of the monthly mean temperature of the Baltic Sea in 2010 referring to the long-term means 1990 - 2008

Die Anomalien der Monatsmittel der SST des Jahres 2010 für die gesamte Ostsee sind in Abb. 15 dargestellt. Der saisonale Verlauf der Monatsmitteltemperatur in den zentralen Bereichen der Arkona-, Gotland- und Bottensee sind im Vergleich zu den langjährigen Monatsmittelwerten in Abb. 16 zusammengefasst. Die im November/Dezember 2009 einsetzende Abkühlung hatte zu geringeren Monatsmittelwerten im Dezember in der Arkonasee im Vergleich zur Gotlandsee geführt (NAUSCH et al., 2010). Das setzte sich im Januar – März fort, wodurch der März in diesem Jahr der kälteste Monat in allen drei Seegebieten war. In der westlichen Ostsee führte das zu Anomalien von -2 K und bis zu -4 K im Skagerrak und Kattegat. In der Arkonasee setzten sich diese negativen Abweichungen von den langjährigen Mittelwerten bis Mai fort. Erst im Juni waren in weiten Teilen der Ostsee die langjährigen Mittelwerte erreicht. Ab Ende Juni beeinflussten tropische Luftmassen die Ostsee, sodass ein schneller Anstieg der SST zu verzeichnen war. Mitte Juli wurden in der östlichen Gotlandsee teilweise Temperaturen von über 23 °C erreicht. Obwohl es schon nach dem 17.07. eine Wetterumstellung und Abkühlung gab, lagen die Monatsmittel in der gesamten Ostsee weit über den langjährigen Mittelwerten und erreichten in der östlichen Gotlandsee Anomalien von bis zu +3,5 K. Durch die Fortsetzung

der Abkühlung entwickelte sich in der westlichen und zentralen Ostsee der Juli zum wärmsten Monat des Jahres. Das Maximum der Monatsmitteltemperatur wurde mit 20 °C in der Gotlandsee erreicht. Damit gehörte der Juli 2010 zu den wärmsten seit 1990. Ab August bis Oktober lag besonders die zentrale Ostsee im Bereich der langjährigen Mittelwerte. Der Kälteeinbruch im Dezember lies besonders die südliche Ostsee abkühlen, sodass die SST stark unter das langjährige Mittel fiel. Lagen die SST von der Gotlandsee bis zur nördlichen Ostsee im Bereich der langjährigen Mittelwerte, so waren in der westlichen Ostsee Anomalien von -2 K und im Kattegat/Skagerrak bis -4 K zu verzeichnen. Insgesamt war dadurch der Dezember 2010 nach 2002 der kälteste in der zentralen Ostsee seit 1990.

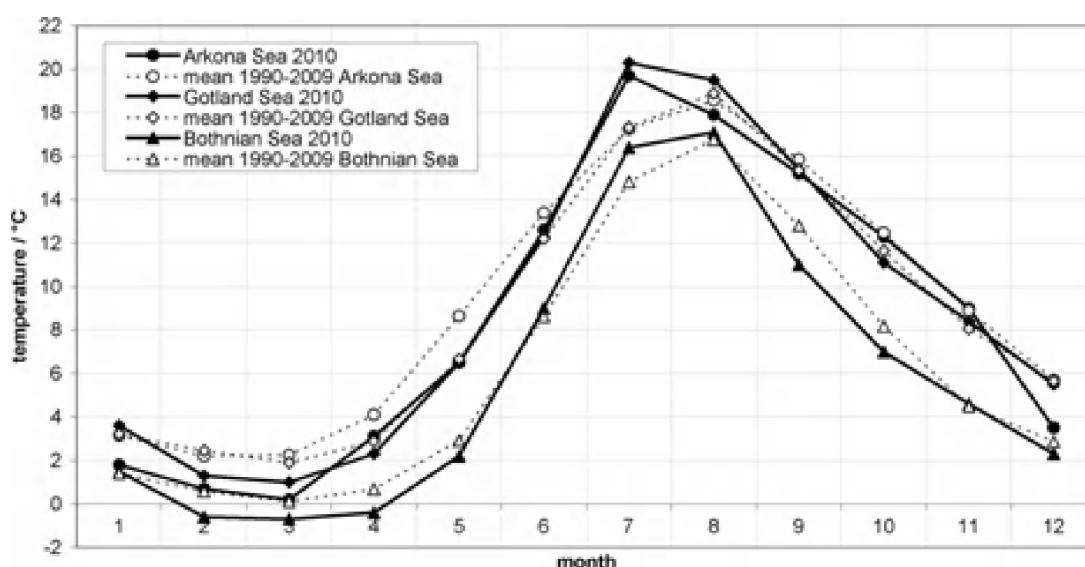


Abb. 16

Saisonaler Verlauf der Wasseroberflächentemperatur (NOAA-SST) in der zentralen Arkona-, Gotland- und Bottensee des Jahres 2010 im Vergleich zum jeweiligen 20-Jahresmittel (1990-2009)

Fig. 16

Seasonal course of sea surface temperature (NOAA-SST) in the central Arkona-, Gotland and Bothnian Sea in 2010 in comparison to the mean values of the last 20 years (1990-2009)

Die folgende detaillierte Beschreibung der thermischen Entwicklung in der Ostsee im Jahr 2010 charakterisiert die wichtigsten Phasen im Jahresverlauf. Anfang Januar lag die SST um 2-5 °C in den zentralen Bereichen, in der Pommernbucht und in der nördlichen Ostsee bei 0-3 °C. Zum Ende des Monats reduzierten sich die Werte in der westlichen Ostsee bis zur Darßer Schwelle auf um und leicht unter 0 °C. Die Pommernbucht war bereits mit Eis bedeckt. In der zentralen Ostsee waren die SST auf 0-3 °C gesunken. Im Februar kühlte die Ostsee insbesondere in den westlichen und nördlichen Gebieten weiter ab. Ende Februar

wurden in der Arkonasee Temperaturen um $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ beobachtet. Die Temperaturverteilung entlang des Schnittes durch die zentralen Becken der Ostsee (Abb. 17) zeigt den Februar 2010 im Vergleich zum Vorjahr, zum langjährigen Mittelwert 1990 – 2009 und dessen Schwankungsbreite. Die SST lagen in der gesamten Ostsee im Februar unter dem langjährigen Mittelwert. In der Gotlandsee wurden mittlere Temperaturen von maximal $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ erreicht. Zum Zeitpunkt der maximalen Eisbedeckung der gesamten Ostsee am 17. Februar 2010 war im Kattegat, von der Kieler bis zur Lübecker Bucht und auch in der Pommerschen Bucht Eis vorhanden (Abb. 19). In der nördlichen Ostsee war die Bottensee noch nicht ganz mit Eis bedeckt, aber auch der Finnische Meerbusen war zugefroren und es entwickelte sich Eis entlang der Küsten Schwedens und der Baltischen Länder nach Süden. Ging in der Folgezeit in der westlichen Ostsee das Eis zurück, so entwickelte es sich in der nördlichen Ostsee weiter und hatte dort am 8. März seine maximale Ausdehnung erreicht (SCHMELZER and HOLFORT, 2010). Bis 4. März lagen die Temperaturen in der westlichen Ostsee zwischen $-0,5$ und $+0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ bevor ein leichter Temperaturanstieg ab ca. 08.03. begann. Ende März waren in weiten Teilen der westlichen Ostsee bis zur südlichen Gotlandsee Temperaturen von $2-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ vorhanden und unter $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ nördlich davon. In der Periode 06.-10.04. ist die Ausbreitung des Oderausstrom bis in die zentrale Arkonasee in der Oberflächentemperatur zu erkennen. Bis zum 20.04. hatten sich die $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis in die Arkonasee entwickelt.

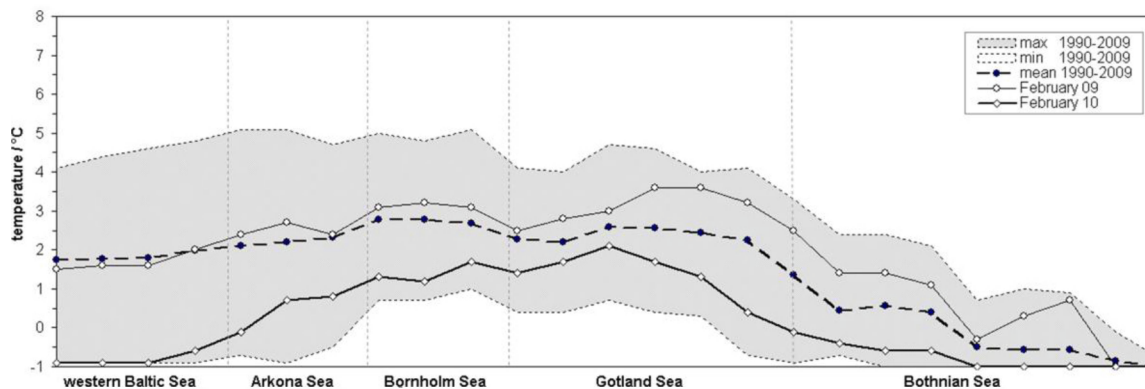


Abb. 17

Temperaturverteilung entlang des Schnittes durch die zentralen Becken der Ostsee für den Monat Februar 2010 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 2010 in comparison to the previous year, to the long-term mean value of 1990 – 2009, and to the variation range

Danach gab es eine weitere Erwärmung in einer anhaltenden Westwindsituation. Die Temperaturen stiegen bis zum 28.4. auf 7-8 °C vom Kattegat bis zur Darßer Schwelle und in der Pommernbucht, 5-6 °C in der Arkonasee und 3-5° in der zentralen Ostsee. Im Mai blieben die Temperaturen bis ca. 20.05. aufgrund von regelmäßigen Windereignissen aus unterschiedlichen Richtungen bei 6-7 °C in der zentralen Ostsee stehen. Danach setzte sich die Erwärmung vom 21.-23.05. weiter fort und war im flacheren westlichen Teil und entlang der Küste der Baltischen Länder mit Werten bis 12-13 °C am stärksten ausgeprägt. Bis Ende des Monats war alles wieder durchmischt und die SST lag bei 8 °C in den zentralen Bereichen und bis 12 °C an den Rändern und in der inneren westlichen Ostsee. In der Bottensee waren die SST bei 5 °C und in der Bottenwiek bei 2-3 °C. Der Juni war durch vier Erwärmungsphasen (02.-07.06., 13.-18.06., 20.-25.06., 27.-29.06.) gekennzeichnet, die durch Windereignisse unterbrochen wurden. Die beiden letzten Perioden waren besonders intensiv (siehe Kapitel 2). Bis Ende Juni stiegen die Temperaturen auf 16-17 °C von der westlichen Ostsee bis zur zentralen Gotlandsee, in der Bottensee auf 10-13 °C und in der Bottenwiek auf 8-12 °C. Ende Juni und verstärkt ab 2. Juli begann der Einfluss von Hochdrucklagen, die tropische Luftmassen mit Temperaturen von bis zu 37 °C nach Deutschland führten. Am Ende der ersten Phase am 05.-06.07. waren bereits Wassertemperaturen von 19-21 °C in der westlichen Ostsee und 20-23 °C in der Pommernbucht und in der Gotlandsee erreicht. Ein kleines Tief am 06.07. kühlte die Ostsee auf 17-20 °C leicht ab, bevor die nächste Hitzewelle am 09.07. an Einfluss gewann. Im Zeitraum vom 10.07. bis 12.07. 2010 werden mit 20-23 °C die höchsten Temperaturen des Jahres in der westlichen Ostsee erreicht. An den folgenden Tagen entwickelte sich gleichzeitig Auftrieb sowohl vor der Küste Darß - Hiddensee als auch vor Südschweden. Das bewirkte eine Abkühlung der nördlichen Arkonasee, des Bereiches Darßer Schwelle und westlich davon. In der zentralen Ostsee ging die Erwärmung weiter und vom 15.-17.07. wurde das Temperaturmaximum mit Werten von bis zu 24-25 °C in der östlichen Gotlandsee erreicht (Abb.19). In der Bottensee lagen zu diesem Zeitpunkt die Temperaturen bei 17-20 °C und in der Bottenwiek in weiten Teilen unter 15 °C. Bei bis zu 23 °C hielten sich die SST noch bis 23.07. als sich dann ein Tiefdruckgebiet im Ostseeraum festsetzte. Die damit einhergehenden höheren Windgeschwindigkeiten vermischten die Deckschicht und verminderten die SST auf 18-21 °C bis Ende Juli. Trotzdem gehörte der Juli zu den wärmsten seit 1990, was auch die Temperaturverteilung entlang des Schnittes durch die zentralen Becken der Ostsee belegt (Abb. 18).

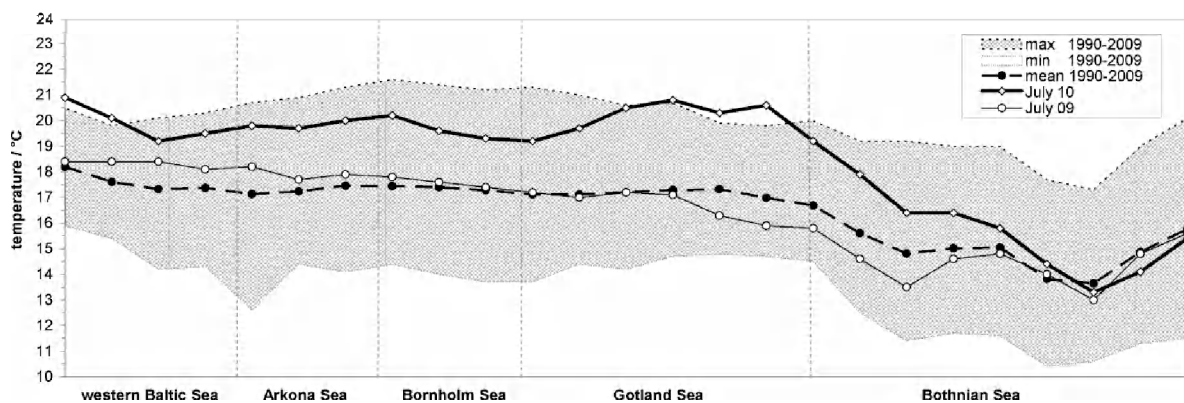


Abb. 18

Temperaturverteilung entlang des Schnittes durch die zentralen Becken der Ostsee für den Monat Juli 2010 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 2010 in comparison to the previous year, to the long-term mean value of 1990 – 2009, and to the variation range of the investigation period.

Die Werte liegen außer in der Bottenwiek und im Bereich der Darßer Schwelle 2-3 K über dem langjährigen Mittelwert. In der Lübecker Bucht und in der Gotlandsee übersteigen sie auch die Schwankungsbreite des Zeitraumes 1990-2009.

Anfang August beruhigte sich das Wetter wieder und in der östlichen Gotlandsee stiegen die Temperaturen wieder bis auf 22-23 °C. Diese Situation blieb in der Gotlandsee bis ca. 17.8. erhalten. Ein Sturmtief am 24.-25.08. verstärkte die Westwindphase und durchmischte mit Windgeschwindigkeiten von 15-20 ms⁻¹ die westliche Ostsee und die SST sank bis Ende August auf Werte von 12-13 °C in den Auftriebsfilamenten in der nördlichen Arkonasee, auf ca. 17 °C in der Pommernbucht. In der Gotlandsee waren noch 14-18 °C und im Bottnischen Meerbusen 13-15 °C zu beobachten. Der September war durch ein anhaltendes Windereignis mit Geschwindigkeiten über 10 ms⁻¹ aus westlichen Richtungen nach dem 10. und speziell vom 14.-21. gekennzeichnet. Das führte zu einem massiven Rückgang der SST auf Werte um 10-15 °C in der eigentlichen Ostsee am Ende des Monats. Der Oktober war sehr windreich. In der Arkonasee wurden an ca. 20 Tagen Windgeschwindigkeiten von 10 ms⁻¹ und mehr gemessen. Die starke Vermischung besonders ab 15.10. führte dann Ende des Monats zu Temperaturen von 8-11 °C und im Bottnischen Meerbusen zu Werten um 5 °C. Im November prägten regelmäßig Orkanböen die Situation und der Einstrom polarer Luft ab 20.11. kühlte die westliche Ostsee massiv auf 5-7 °C ab. Im Kattegat reduzierten sich die Temperaturen

bereits auf ca. 3 °C und in der nördlichen Ostsee noch darunter. Diese Wetterlage setzte sich auch im Dezember fort. Durch ein Sturmereignis Anfang des Monats sanken die Temperaturen schnell, besonders in der flachen Pommernbucht. Ein erneuter Kälteeinbruch ab 16.12. ließ die Temperaturen schnell unter den Gefrierpunkt sinken und ab ca. 20.12. setzte Eisbildung ein. Die andauernde Eisbildung machte es notwendig, die MARNET Station „Oder Bank“ zu bergen. Auch an der Darßer Schwelle und westlich davon waren ab 24.12. Wasseroberflächentemperaturen von nur 1-2 °C gemessen worden.

Durch das kalte erste Halbjahr und den Frosteinbruch im November/Dezember lag die Jahresmitteltemperatur der gesamten Ostsee erstmals seit 1998 wieder deutlich unter dem langjährigen Mittelwert.

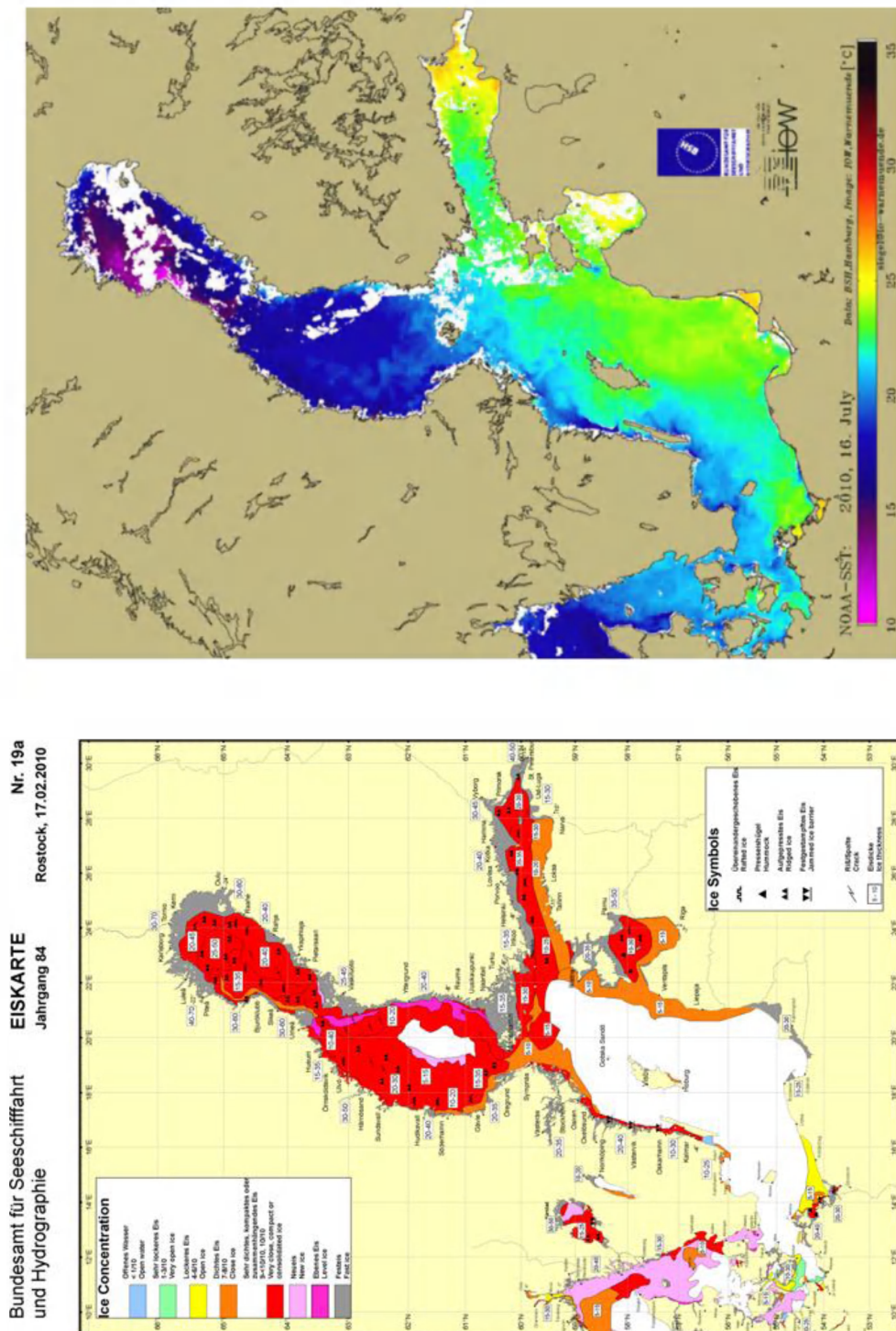


Abb. 19

Maximale Eisbedeckung der Ostsee im Jahr 2010 am 17.02.2010 (SCHMELZER, BSH) und Temperaturverteilung der Ostsee am wärmsten Tag, dem 16. Juli 2010

Fig. 19

Maximum ice coverage of the year 2010 on 17 February (SCHMELZER, BSH) and temperature distribution of the Baltic on the warmest day of the year (16 July 2010)

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 Januar/Februar, März, Mai, Juli und November durchgeführt. Abb. 22 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.

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

Große barotrope Einstromereignisse von salzhaltigem Wasser aus der Nordsee wurden im Jahresverlauf 2010 nicht nachgewiesen (vgl. Kapitel 2). Das Einstromgeschehen war geprägt von einer Serie kleiner barokliner und barotroper Einströme. Die Wirkung dieser Einströme blieb im Jahresverlauf 2010 meist auf die westliche Ostsee begrenzt. Lediglich der stärkere Einstrom von Oktober/November 2010 hat das Potential auch die zentrale Ostsee zu beeinflussen. Jedoch werden seine Auswirkungen erst im Jahr 2011 sichtbar werden.

Die Entwicklung der vertikalen Temperaturverteilung in der zentralen Ostsee wurde im Jahr 2010 hauptsächlich durch zwei Ereignisse geprägt. Das war zum einen der relativ warme Einstrom vom November 2009 der als eigener Wasserkörper in der Halokline der Gotlandsee bis in den Hochsommer 2010 zu beobachten war. Zum anderen war der Winter 2009/2010 einer der kältesten Winter der letzten 20 Jahre, mit einer lang andauernden Kälteperiode von Mitte Dezember 2009 bis Ende Februar 2010.

Die Temperaturverteilung Ende Januar 2010 zeigt die starke Abkühlung der Deckschicht und die beginnende Homogenisierung der oberen 60 m durch tiefe Konvektion. Die Oberflächentemperaturen lagen in der Arkonasee bereits unter 1,5 °C während im Gotlandbecken noch 2,5 °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. Die schwache Schichtung wurde zeitweise durch Starkwindereignisse wieder aufgebrochen und die Eisbildung damit gebremst. In der Gotlandsee lag die Temperatur noch leicht über dem Dichtemaximum und die Abkühlung der Deckschicht verursachte tiefe Vertikalkonvektion. Die Temperaturverteilung in Abb. 22 zeigt im Januar/Februar zwei ausgeprägte Warmwasserkörper. In der Bornholmsee wurden unterhalb der Schwellentiefe (55 m) zur Stolper Rinne Temperaturen von mehr als 9 °C gemessen. Mit einem absoluten Maximum von 10,01 °C in 60 m Tiefe. Dieser Warmwasserkörper ist das Ergebnis der Einstromereignisse im Oktober und November 2009. Ein Teil des eingeströmten Wassers ist bereits weiter durch die Stolper Rinne bis an den südlichen Rand des Gotlandbeckens

gelangt. Dort bildet es im Januar eine warme Bodenwasserschicht von bis zu 30 m Mächtigkeit mit Temperaturen von über 7 °C.

Bis März hat sich die Oberflächentemperatur in der Ostsee weiter abgekühlt und liegt nun in der gesamten Ostsee deutlich unterhalb des Dichte-Maximums. Extrem niedrige Oberflächentemperaturen werden in der westlichen und nördlichen Gotlandsee mit 0,57 °C im Karlsötief, 0,68 °C im Landsorttief und 0,32 °C im Farö Tief gemessen. In der östlichen Gotlandsee liegen die Oberflächentemperaturen ca. 1K darüber (1,33 °C Gotlandtief).

Im Bornholmbecken ist auch im März der warme Bodenkörper dominierend. Durch Einmischung von umgebendem kaltem Wasser hat sich die Temperatur des Tiefenwassers leicht verringert auf nun maximal 9,7 °C. Der im Januar am Eingang des Gotlandbeckens beobachtete Warmwasserkörper hat sich bis März im gesamten östlichen Gotlandbecken ausgebreitet und in einer Tiefe von 90 bis 140 m eingeschichtet. In Abbildung 20 ist eine Serie von Temperaturprofilen an der Zentralstation (271) des östlichen Gotlandbeckens dargestellt. Bereits im Januar sind deutliche Temperaturfluktuationen zwischen 70 und 140 m Tiefe erkennbar. Das deutet darauf hin, dass erste Wassermassen des Novembereinstroms 2009 schon zu dieser Zeit im Gotlandbecken angekommen waren. Ihre Einschichtung verursacht die vertikalen Variationen im Temperaturprofil. Die Tiefe der durchmischten Deckschicht betrug Anfang Februar etwa 60 m. Das Temperaturprofil vom 21. März zeigt eine Erwärmung der gesamten Halokline von 60 bis 130 m Tiefe. Besonders hoch fällt diese Erwärmung in einer Tiefenschicht von 110 bis 130 m aus. Die Temperatur stieg hier von ca. 7 °C Anfang Februar auf 7,8 °C Mitte März. Die Erwärmung dieser Schicht ist primär auf den Einstrom des Warmwasserkörpers zurückzuführen, während die Erwärmung der darüber liegenden Schichten durch die Anhebung des alten Wassers verursacht wurde. Deutlich erkennbar ist das in der Anhebung der Thermokline von 60 m Anfang Februar auf 45 m Mitte März. Der Einstrom führt in der Gotlandsee zu einer Belüftung der Halokline. Das neu eingeströmte Wasser hat einen Sauerstoffgehalt zwischen 0,9 und 1,0 ml/l.

Im Mai 2010 ist der Einstrom des Warmwasserkörpers vollständig abgeschlossen. Die vertikalen Temperaturfluktuationen sind gering und die im März sichtbaren starken Temperaturgradienten sind durch vertikale Vermischung abgebaut worden. Das Temperaturmaximum in 120 m Tiefe hat sich gegenüber dem März deutlich abgekühlt und beträgt nur noch 7,3 °C. Der Sauerstoffgehalt im eingeströmten Wasser beträgt im Mai noch zwischen 0,3 und 0,7 ml/l.

Das Oberflächenwasser der Ostsee hat sich im Mai schon deutlich erwärmt. Mit Temperaturen zwischen 5 und 6 °C liegt es nun oberhalb des Dichtemaximum. Die beginnende sommerliche Temperaturschichtung führt zum Abkoppeln der Zwischenschicht (30-60 m Tiefe) von der direkten Wechselwirkung mit der Atmosphäre. Diese Zwischenschicht, winterliches Zwischenwasser, ist 2010 verglichen mit den Jahren 2007 bis 2009 besonders kalt. In der östlichen Gotlandsee beträgt die Minimaltemperatur des winterlichen Zwischenwassers im Mai 2010 nur 1,6 °C. Ähnliche Temperaturen werden in der gesamten Ostsee beobachtet.

Ein kleinerer Einstrom im März 2010 führte zu einer Erneuerung des Tiefenwassers im Bornholmbecken. Der dort im Mitte März noch beobachtete Warmwasserkörper aus dem Novembereinstrom 2009 ist im Mai 2010 weitgehend verschwunden. Lediglich in einer bodennahen Schicht sind noch Teile des warmen Wassers erkennbar, dessen Temperatur nun deutlich unter 9 °C liegt. Die 5 °C Isotherme hat sich im Bornholmbecken zwischen März und Mai 2010 von 48m auf 66 m Tiefe verlagert.

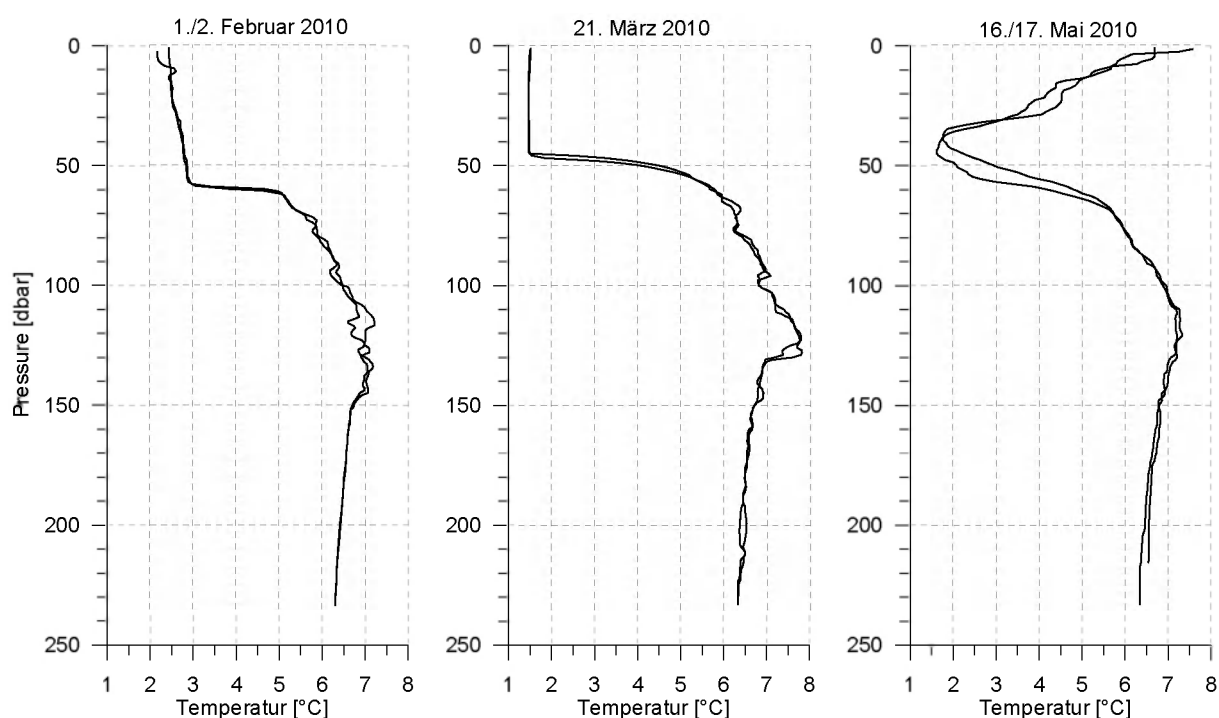


Abb. 20

Vertikale Temperaturprofile an der Station 271 „Gotlandtief“ aus CTD Messungen während der Überwachungsfahrten des IOW. Die zwei Profile für jede Fahrt wurden jeweils in 12 bis 18 Stunden Abstand gemessen. Im Februar und März sind starke Fluktuationen zwischen 70 und 150 m zu erkennen, die auf die Einschichtung des Novembereinstroms 2009 hinweisen

Fig. 20

Vertical temperature profiles at station 271 “Gotland Deep”, derived from CTD casts of the IOW monitoring cruises. The two profiles of each cruise were taken subsequently with 12 to 18 hours in between. In February and March strong temperature fluctuations between 70 and 150 m depth point to interleaving of warm waters from the inflow in November 2009

Der Warmwassereinstrom vom November 2009 führte über sechs Monate zu einer ungewöhnlichen Erwärmung der Halokline im Gotlandbecken. Ähnlich hohe Temperaturen wurden zuletzt nach den baroklinen Sommereinströmen 2002 beobachtet. In der Zwischenzeit lagen die Temperaturen in der Halokline 1 bis 2 °C niedriger.

Bis Mitte Juli 2010 hat sich in der gesamten Ostsee die typische sommerliche Temperaturschichtung aufgebaut. Die saisonale Thermokline in etwa 30 m Tiefe trennt das stark erwärmte Oberflächenwasser vom kalten winterlichen Zwischenwasser. Die Minimaltemperaturen im Zwischenwasser liegen von der Bornholmsee (2,6 °C) bis in die zentralen Ostseebecken (Gotlandtief 2,1 °C) deutlich unter 3 °C.

Der Warmwasserkörper in der Halokline des Gotlandbeckens wird im Juli durch kälteres einströmendes Wasser nach Osten abgedrängt. Mit diesem vermischt es sich und ist im November nicht mehr als eigenständiges Temperatursignal zu beobachten. In der Temperaturverteilung von Juli 2010 ist das einströmende Kaltwasser als etwa 20 m dicke Schicht zwischen der Stolper Rinne und dem Eingang ins Gotlandbecken zu erkennen. Die niedrigsten Temperaturen werden an der Station 255 mit 3,8 °C beobachtet. Der Sauerstoffgehalt in diesem Wasserkörper ist mit 4,2 ml/l relativ hoch. Die Quelle des Kaltwasserkörpers ist mit hoher Wahrscheinlichkeit der barotrope Einstrom über die Darsser Schwelle im März 2010.

Die Temperaturverteilung von November 2010 zeigt, dass die herbstliche Erosion der Thermokline bereits stark fortgeschritten ist. Die Temperatur in der etwa 50 m dicken Deckschicht beträgt noch 8 bis 9 °C. Das winterliche Zwischenwasser ist nur noch als dünne Schicht von 10 m Dicke in der Gotlandsee zu erkennen. Die Temperaturschichtung in der westlichen Ostsee wird durch den barotropen Einstrom von Oktober/November 2010 bestimmt, der als Haupteinstromereignis des Jahres 2010 gilt (vgl. Kapitel 2). Die Arkonasee zeigt eine inverse Temperaturschichtung mit hohen Temperaturen von über 10 °C am Boden. Im Bornholmbecken hat sich das warme Einstromwasser in der Halokline in 50 bis 70 m Tiefe eingeschichtet und liegt über dem alten Bodenwasserkörper. Die maximalen Temperaturen in der Halokline der Bornholmsee liegen bei 10,5 °C (Station 214).

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 1997 bis Dezember 2010. Nachdem über einen Zeitraum von fast zwei Jahren (2005-2006) der Temperaturgradient in den bodennahen Schichten des Gotlandbeckens sehr gering war stellte sich durch die Einstromereignisse des Jahres 2007 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 kommt es zu einer weiteren Erwärmung des Tiefenwassers in der Gotlandsee, die ihren Höhepunkt im Mai 2010 erreicht. Bis Dezember 2010 kühlt sich das Tiefenwasser wieder leicht ab, auch der vertikale Temperaturgradient verschwindet bis Dezember 2010 fast vollständig. Zu Beginn des Jahres 2011 weist das Tiefenwasser des östlichen Gotlandbeckens im zwischen 170 und 220 m Tiefe eine fast konstante Temperatur von 6,4 °C auf. Die Ursache für den Abbau des

Temperaturgradienten ist gegenwärtig noch unklar. Eine längere Periode mit nahezu konstanten Temperaturen im Tiefenwasser wurde zuletzt 2005 beobachtet.

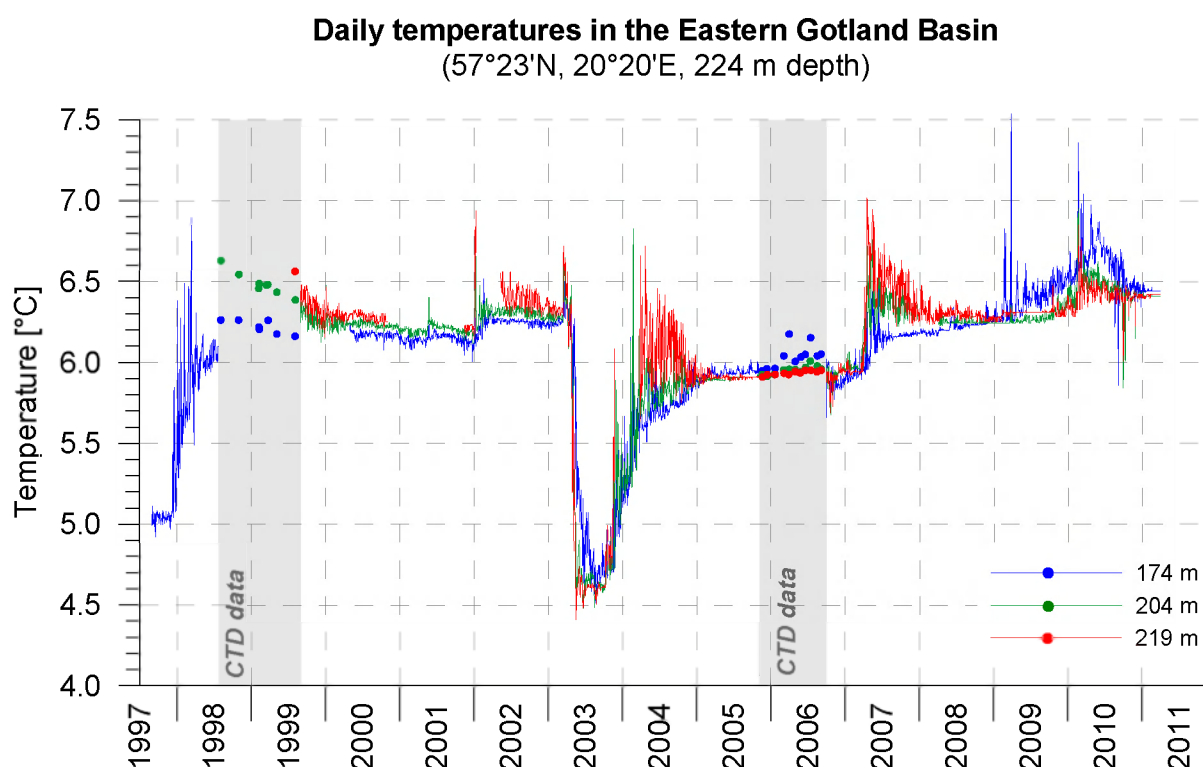


Abb. 21

Die „Hagen-Kurve“ zeigt den Temperaturverlauf des Tiefenwassers im östlichen Gotlandbecken (EGB) von September 1997 bis Dezember 2010 an 3 Tiefenniveaus einer Verankerung bei 224 m Wassertiefe (HAGEN und FEISTEL, 2001, 2004). Abrupte Änderungen zeigen Einstromprozesse an, insbesondere die von 1997, 2001, 2002, 2003 und 2007

Fig. 21

The „Hagen curve“ shows the temperature signal of the deep water in the eastern Gotland Basin (EGB) between September 1997 and December 2010 at three depth levels of a mooring at 224 m bathymetric depth (HAGEN and FEISTEL, 2001, 2004). Abrupt changes indicate inflow processes, in particular those of 1997, 2001, 2002, 2003 and 2007

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. Mit Ausnahme des Bornholmbeckens wurden 2010 die höchsten Temperaturen der letzten fünf Jahre im Tiefenwasser der Ostsee gefunden. Auch die Standardabweichungen lagen im oberen Bereich der Statistik, was das Jahr 2010 als Jahr mit einer erhöhten Einstromaktivität ausweist. Hauptursache der Erwärmung des Tiefenwassers ist der Einstrom vom November 2009, sowie die Zunahme der warmen baroklinen Sommereinströme in den letzten Jahren.

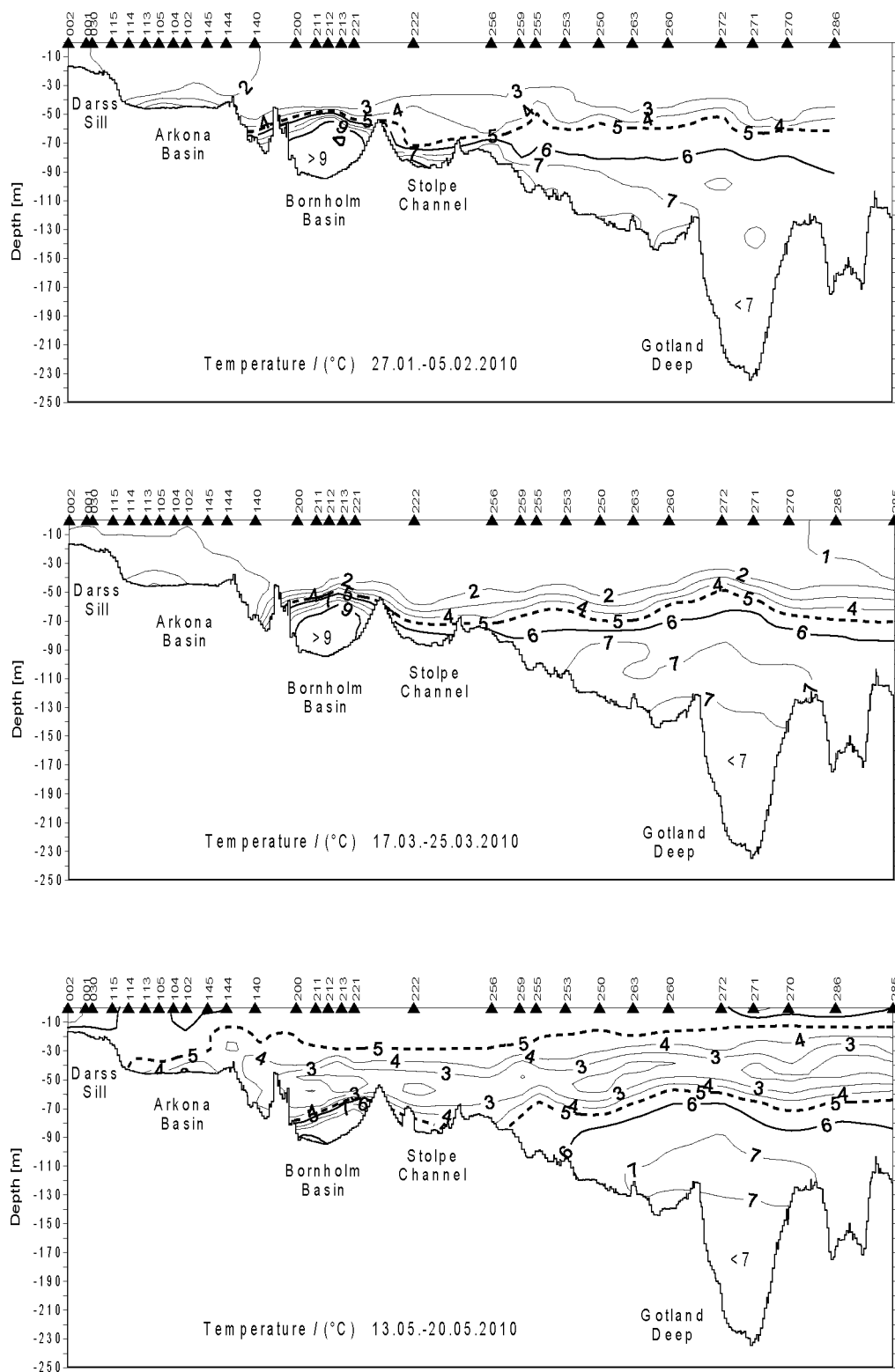


Abb. 22
Vertikale Verteilung der Wassertemperatur zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 22
Vertical water temperature distribution between Darss Sill and northern Gotland Basin

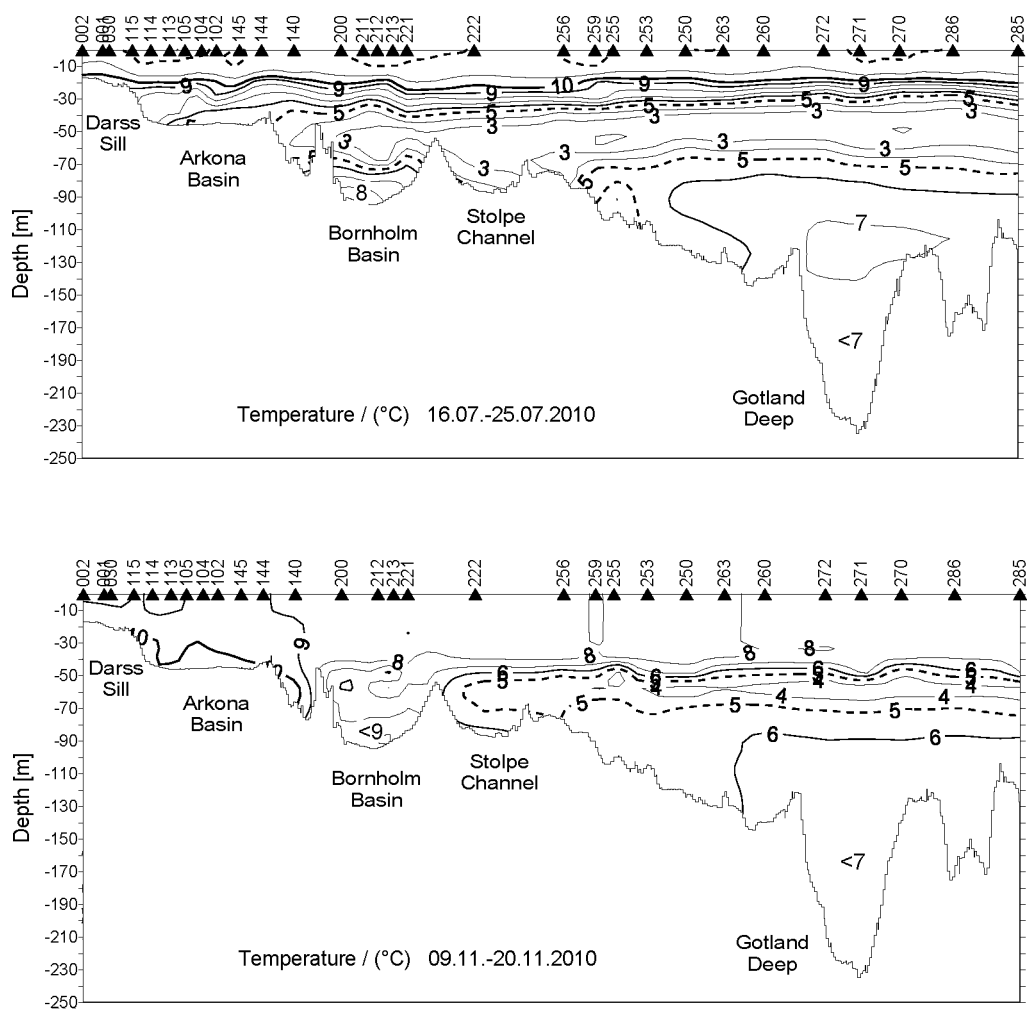


Abb. 22 Forts.

Vertikale Verteilung der Wassertemperatur zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 22 cont

Vertical water temperature distribution between Darss Sill and northern Gotland Basin

Tab. 5

Jahresmittelwerte und Standardabweichungen ausgewählter hydrographischer Parameter im Tiefenwasser der zentralen Ostsee: IOW sowie SMHI- Daten (n= 8-16)

Table 5

Annual means and standard deviations of selected hydrographic parameters in the deep water of the central Baltic Sea: IOW- and SMHI data (n= 8-16)

Wassertemperatur (°C; Maximalwerte hervorgehoben)

Station	Tiefe/m	2006	2007	2008	2009	2010
213 (Bornholmtief)	80	8,26 ± 0,80	8,95 ± 0,36	7,92 ± 0,80	9,04 ± 0,54	8.29 ± 1.06
271 (Gotlandtief)	200	5,95 ± 0,04	6,22 ± 0,21	6,29 ± 0,01	6,29 ± 0,01	6.46 ± 0.07
286 (Fårötfief)	150	6,15 ± 0,08	6,02 ± 0.05	6,11 ± 0.02	6,43 ± 0,17	6.74 ± 0.12
284 (Landsortief)	400	5,80 ± 0,08	5,71 ± 0,04	5,70 ± 0,08	5,79 ± 0,06	6.09 ± 0.15
245 (Karlsötfief)	100	5,16 ± 0,15	5,17 ± 0.08	5,24 ± 0.08	5,31 ± 0,09	5.43 ± 0.10

Salzgehalt (g/kg; Maximalwerte hervorgehoben)

Station	Tiefe/m	2006	2007	2008	2009	2010
213 (Bornholmtief)	80	16,21 ± 0,43	16,07 ± 0,35	15,49 ± 0,24	15,59 ± 0,17	15.85 ± 0.33
271 (Gotlandtief)	200	12,52 ± 0,04	12,61 ± 0,06	12,54 ± 0,02	12,43 ± 0,03	12.33 ± 0.03
286 (Fårötfief)	150	12,01 ± 0,04	12,02 ± 0,04	11,93 ± 0,08	11,84 ± 0,04	11.77 ± 0.04
284 (Landsortief)	400	11,05 ± 0,05	11,05 ± 0,09	11,00 ± 0,05	10,86 ± 0,06	10.76 ± 0.03
245 (Karlsötfief)	100	10,17 ± 0,22	10,20 ± 0,12	10,08 ± 0,18	9,98 ± 0,09	10.01 ± 0.17

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

Station	Tiefe/m	2006	2007	2008	2009	2010
213 (Bornholmtief)	80	0,85 ± 0,49	0,46 ± 0,50	1.15 ± 0.89	1,13 ± 0,74	1.28 ± 0.88
271 (Gotlandtief)	200	-1,58 ± 0,88	-1,46 ± 0,55	-2.22 ± 0.49	-3,09 ± 0,47	-4.29 ± 0.69
286 (Fårötfief)	150	-1,20 ± 0,34	-0,72 ± 0,35	-1.06 ± 0.33	-1,25 ± 0,78	-1.97 ± 0.34
284 (Landsorttief)	400	-0,71 ± 0,15	-0,81 ± 0,23	-1.02 ± 0.29	-1,17 ± 0,17	-1.15 ± 0.26
245 (Karlsötfief)	100	-1,29 ± 0,53	-1,19 ± 0,72	-0,63 ± 0,57	-0,61 ± 0,42	-1.49 ± 0.83

6.2 Salzgehalt

Die vertikale Verteilung des Salzgehaltes in der westlichen und zentralen Ostsee ist in Abbildung 23 für die fünf Überwachungsfahrten des IOW zusammengestellt. Die Salzgehaltverteilung zeigt 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. 23 dargestellten Salzgehaltsverteilungen stellen lediglich „Schnappschüsse“ dar, die nicht geeignet sind ein vollständiges Bild der Einstromaktivität nachzuzeichnen. 2010 waren nur die barotropen Einströme von März und November langanhaltend genug um mit diesem Messregime erfasst zu werden.

Der barotrope Einstrom vom März 2010 füllt das Arkonabecken mit salzreichem kalten Wasser auf. Die Halokline steigt auf 25 bis 30 m Tiefe an. Der Bodensalzgehalt an der Station 113 liegt zu dieser Zeit bei 18,5 g/kg. Bis Mitte Mai fließt ein Großteil des salzreichen Bodenwassers über das Bornholmgat ins Bornholmbecken ab und verdrängt dort das warme Wasser des Novembereinstroms 2009. Im Arkonabecken sinkt die Haloklinentiefe bis Mitte Mai auf ca. 38 m ab. Bis Juli hat sich das Volumen des salzreichen Bodenwassers im Arkonabecken weiter verringert. Die Halokline liegt nun bei 40 bis 42 m Tiefe.

Der barotrope Novembereinstrom 2010 füllt den Salzwasserpool des Arkonabeckens wieder

auf. Im November 2010 wird die Halokline im Arkonabecken bei 15 m Tiefe beobachtet, der Bodensalzgehalt beträgt 15,2 g/kg. Wegen des geringen Salzgehaltes schichtet sich das Wasser aus diesem Einstrom in der Halokline des Bornholmbeckens über dem alten Bodenwasser ein.

Den generellen Trend des Salzgehaltes im Tiefenwasser der Ostsee für die zurückliegenden fünf Jahre zeigt Tabelle 5. Dabei zeigt sich kein einheitliches Bild für die gesamte Ostsee. Auch wenn 2010 die geringsten Salzgehalte der letzten fünf Jahre in der östlichen Gotlandsee und im Landsorttief gemessen wurden, lässt sich daraus noch kein genereller Trend ablesen. Im Bornholmtief und im Karlsötief wurde ein leichter Anstieg im Salzgehalt des Tiefenwassers beobachtet. Die Verringerung des Salzgehaltes in der östlichen Gotlandsee ist auf das Andauern der seit 2004 begonnenen Stagnationsperiode zurückzuführen. Die seitdem beobachteten kleinen Einstromereignisse haben das Tiefenwasser des Gotlandbeckens nur in geringem Umfang erreicht. Die Masse dieser Einströme schichtet sich in der Halokline ein. Die Tiefenlage der Halokline sowie deren Salzgehalt sind seit dem großen Salzwassereinstrom von 2003 relativ konstant. Das spricht dafür, dass der vertikale Salztransport in die Deckschicht durch die kleinen Einstromereignisse kompensiert wird.

Ähnlich den Verhältnissen im Tiefenwasser ergibt sich auch für den Oberflächensalzgehalt der Ostsee kein eindeutiger Trend über die letzten fünf Jahre. Tabelle 6 fasst die Änderungen des Oberflächensalzgehaltes zusammen. Minimalwerte werden 2010 für das Bornholmtief, das Landsorttief und das Karlsötief beobachtet. Für das Gotlandtief ergibt sich ein geringer Anstieg des Oberflächensalzgehaltes gegenüber dem Vorjahr.

Tab. 6

Jahresmittelwerte von 2006 bis 2010 und Standardabweichungen des Salzgehalts (in g/kg) im Oberflächenwasser der zentralen Ostsee (Minimalwerte hervorgehoben). Die Langzeitmittelwerte der Jahre 1952-2005 sind dem BALTIC-Klima-Atlas entnommen (FEISTEL et al., 2008a)

Table 6

Annual means of 2006 to 2010 and standard deviations of surface water salinity (in g/kg) 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., 2008a)

Station	1952- 2005	2006	2007	2008	2009	2010
213 (Bornholmtief)	7,60 ± 0,29	7,33 ± 0,10	7,58 ± 0,24	7,58 ± 0,10	7,54 ± 0,15	7,17 ± 0.17
271 (Gotlandtief)	7,26 ± 0,32	6,92 ± 0,38	7,15 ± 0,14	7,19 ± 0,25	7,15 ± 0,16	7,20 ± 0.20
286 (Fårötfief)	6,92 ± 0,34	6,62 ± 0,33	6,88 ± 0,22	6,85 ± 0,39	6,80 ± 0,28	6,74 ± 0.41
284 (Landsorttief)	6,75 ± 0,35	6,66 ± 0,18	6,54 ± 0,25	6,49 ± 0,37	6,63 ± 0,14	6,37 ± 0.40
245 (Karlsötfief)	6,99 ± 0,32	6,96 ± 0,12	6,81 ± 0,27	7,11 ± 0,16	6,84 ± 0,25	6,60 ± 0.22

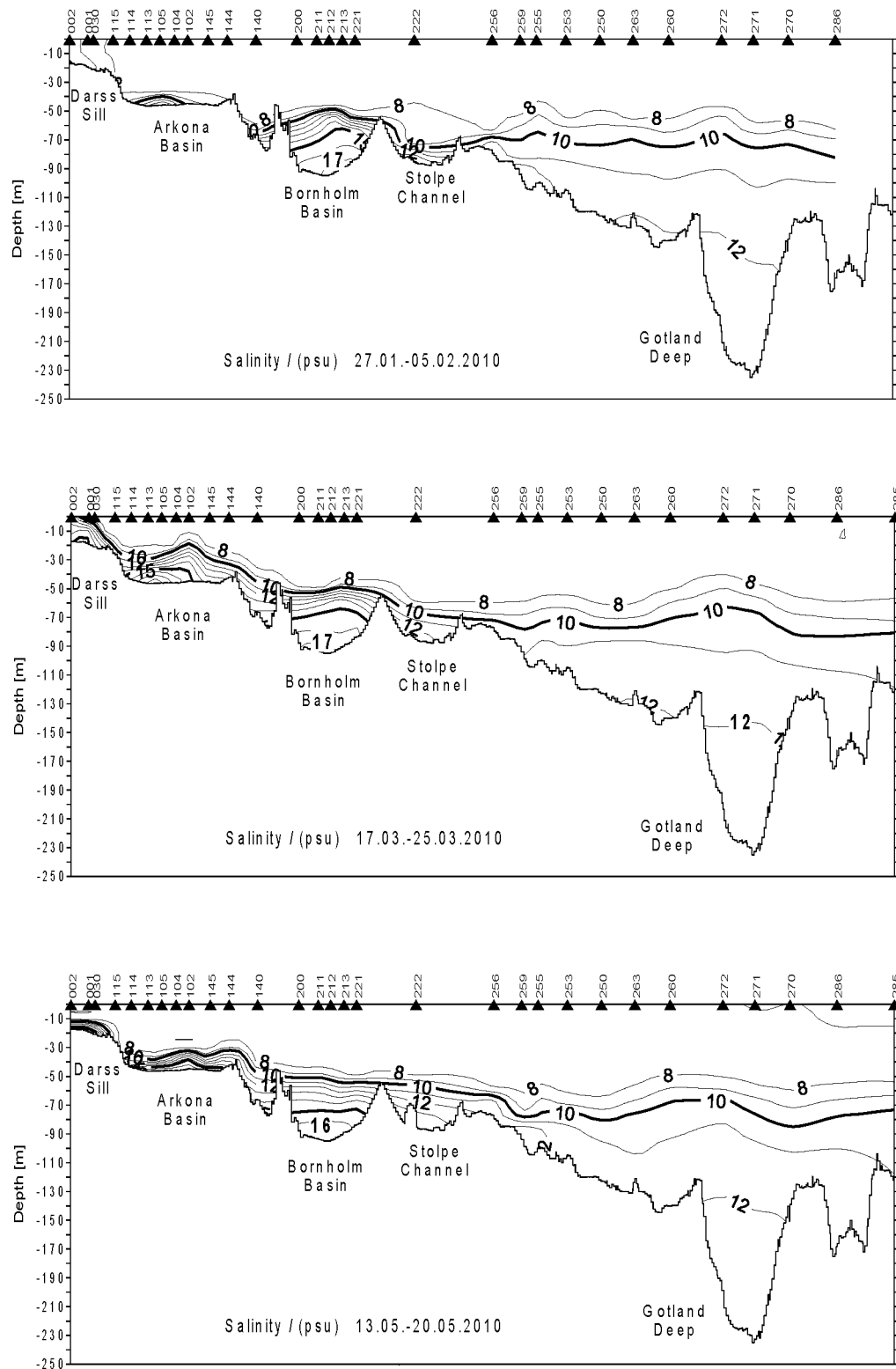


Abb. 23

Vertikale Verteilung des Salzgehaltes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 23

Vertical salinity distribution between Darss Sill and northern Gotland Basin

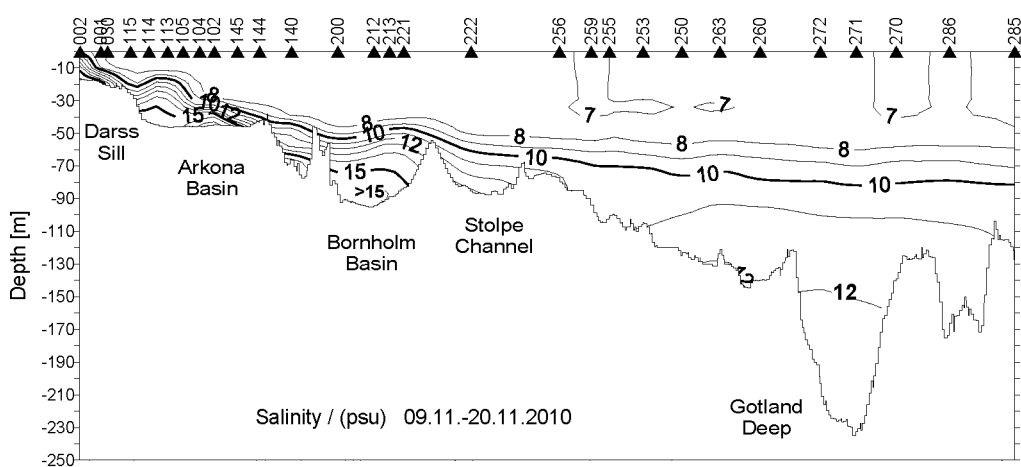
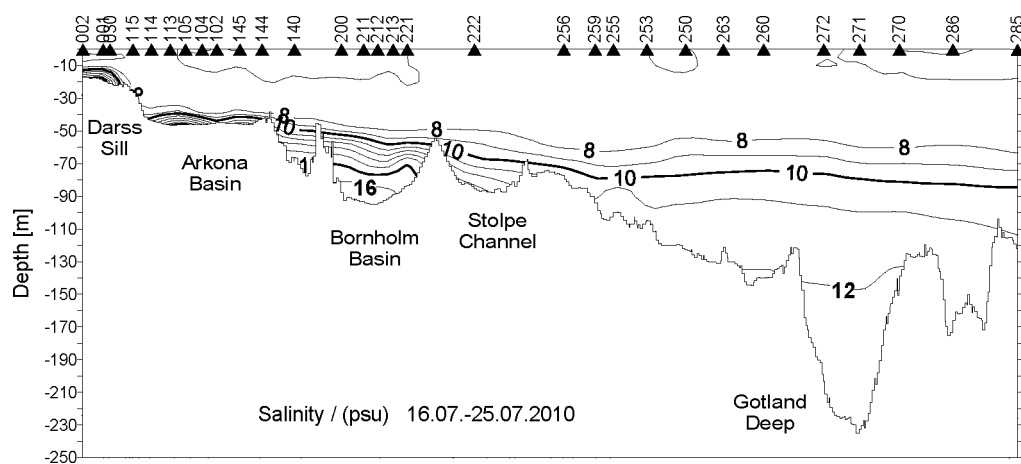


Abb. 23 Forts.

Vertikale Verteilung des Salzgehaltes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 23 cont

Vertical salinity distribution between Darss Sill and northern Gotland Basin

6.3 Sauerstoff- und Schwefelwasserstoffverteilung

Die Sauerstoffversorgung des Oberflächenwassers kann in der Regel als gut angesehen werden. Dafür verantwortlich sind intensive Austauschvorgänge mit der Atmosphäre und die Primärproduktion des Phytoplanktons in der durchlichteten Deckschicht. Die Variationen des Sauerstoffgehaltes werden im Wesentlichen durch die Jahresgänge von Temperatur und Salzgehalt und die jahreszeitlich unterschiedlich stark ausgeprägten Produktions- und Zehrungsprozesse bestimmt. Zusätzlich können hydrodynamische Prozesse eine wesentliche Rolle spielen. Dies ist besonders in der hoch variablen westlichen Ostsee der Fall. Unterhalb permanenter oder temporärer Sprungschichten, die durch Temperatur und/oder Salzgehaltsgradienten entstehen, kann es dagegen zu einer erheblichen Sauerstoffzehrung kommen, da diese Wasserschichten nicht durchlichtet sind, somit nur Zehrungsprozesse stattfinden.

In der durchmischten Oberflächenschicht kann ein typischer Jahresgang 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, die im Jahr 2010 auf Grund des lang anhaltenden Winters (vgl. Kapitel 2) relativ spät einsetzte, führt im März in der westlichen Ostsee und im Arkonabecken zu einem zusätzlichen Sauerstoffeintrag (Tab. 7). Der rasche Temperaturanstieg im Mai verringert in diesen Seegebieten die Sauerstofflöslichkeit deutlich. In der flacheren westlichen Ostsee ist dies rascher zu sehen als im Arkonabecken. Im Bornholmbecken und im östlichen Gotlandbecken setzt die Erwärmung des Oberflächenwassers erst Ende April ein (Abb. 24). Die Phytoplanktonblüte kann durch erhöhte Sauerstoffkonzentrationen im Bornholmbecken im April und im Gotlandbecken im Mai dokumentiert werden (Abb. 24). Im Sommer liegen die Sauerstoffgehalte dann in der Regel unter 7 ml/l. Im Herbst verursacht die Abkühlung wieder eine Zunahme der Sauerstoffkonzentrationen (Tab. 7, Abb. 24). Die jahreszeitliche und räumliche Entwicklung der Sauerstoffkonzentrationen kann auch an den Schnitten von der Darßer Schwelle bis ins nördliche Gotlandbecken verfolgt werden (Abb. 25).

Tab. 7

Jahresgang des Sauerstoffgehaltes in der durchmischten Oberflächenschicht (0 – 10 m) im Jahr 2010

Table 7

Annual oxygen cycle in the mixed surface layer (0 – 10 m) in 2010

	Jan./Febr.	März/April	Mai	Juli	November
westl. Ostsee					
O ₂ (ml/l)	8,91	9,59	7,80	6,93	7,03
Stabw. (ml/l)	0,21	0,29	0,22	0,61	0,09
n	5	5	5	5	5
Arkonabecken					
O ₂ (ml/l)	8,91	9,60	8,42	6,93	7,64
Stabw. (ml/l)	0,15	0,12	0,07	0,22	0,09
n	13	13	13	12	13
Bornholmbecken					
O ₂ (ml/l)	8,61	9,19	8,93	6,87	7,50
Stabw. (ml/l)	0,06	0,12	0,11	0,13	0,09
n	6	5	4	7	3
östl. Gotlandbecken					
O ₂ (ml/l)	8,54	9,09	9,34	7,08	7,69
Stabw. (ml/l)	0,06	0,10	0,13	0,25	0,08
n	9	9	9	9	9

Um den Einfluss von Temperatur und Salzgehalt auf die Sauerstofflöslichkeit zu eliminieren, wird häufig der Sauerstoffsättigung gegenüber der Sauerstoffkonzentration der Vorrang gegeben. Dadurch wird die Vergleichbarkeit der Messwerte deutlich erhöht. Im Ergebnis der Dominanz sauerstoffzehrender Prozesse und geringer Produktion ist das Oberflächenwasser im Winter in allen Seegebieten mit etwa 95% leicht untersättigt. Im Vergleich zu den Vorjahren weist der Jahresgang einige Besonderheiten auf. Die Frühjahrsblüte des Phytoplanktons führt in der westlichen Ostsee Ende März zu einer Übersättigung des Wassers. Im Arkonabecken scheint die Blüte auf Grund des langen Winters zu diesem Zeitpunkt erst an ihrem Beginn. Ungewöhnlich ist die Untersättigung im Mai in der westlichen Ostsee. Möglicherweise wurde hier der Zusammenbruch der Frühjahrsblüte erfasst. Das Ende der Frühjahrsblüte kann auch im Bornholmbecken und im östlichen Gotlandbecken durch einen deutlichen Rückgang der Sauerstoffsättigung belegt werden. Der Sommer zeigt das gewohnte Bild mit Sättigungswerten zwischen 100% und 115%. Im Gotlandbecken ist deutlich die Blaualgenblüte Ende Juli zu erkennen. Im Herbst führen verstärkte Abbauprozesse erneut zu einer Untersättigung. Generell muss festgestellt werden, dass die jährliche Schwankungsbreite der Sättigung wie schon in den Vorjahren relativ gering ist. Dies spricht für eine gesunde Sauerstoffbilanz des Oberflächenwassers.

Extreme Übersättigungen zwischen 140 und 160%, wie sie z.B. von NEHRING et al. (1995b) für das Jahr 1994 beschrieben wurden treten nicht mehr auf.

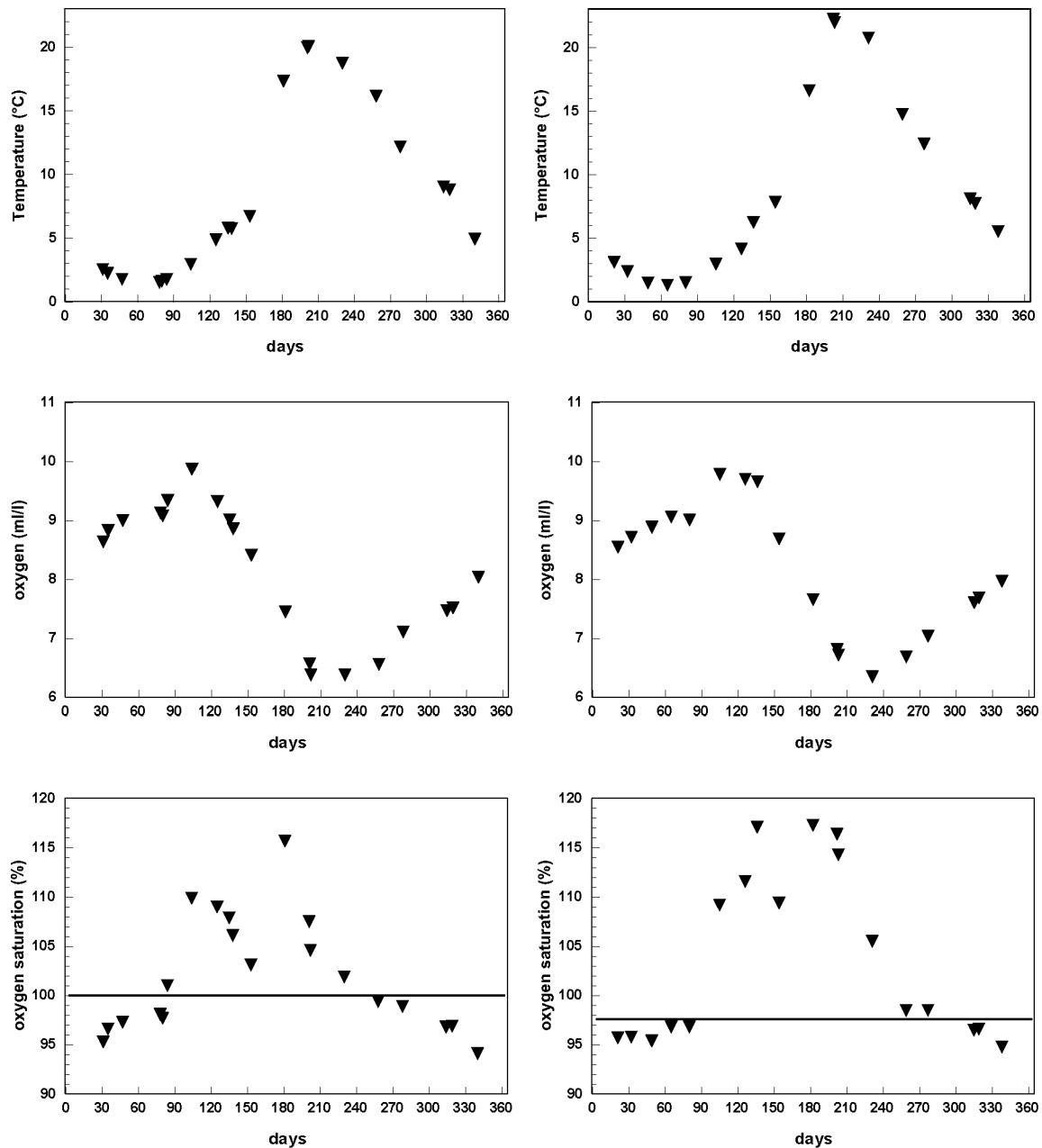


Abb. 24

Jahresgang 2010 der Temperatur, der Sauerstoffkonzentration und der Sauerstoffsättigung in der Oberflächenschicht (0 m) im Bornholmbecken (Station 213, links) und im östlichen Gotlandbecken (Station 271, rechts) – IOW und SMHI-Daten

Fig. 24

Annual temperature, oxygen concentration and oxygen saturation cycles in 2010 in the surface layer (0 m) of the Bornholm Basin (station 213, left) and the eastern Gotland Basin (station 271, right) – IOW and SMHI data

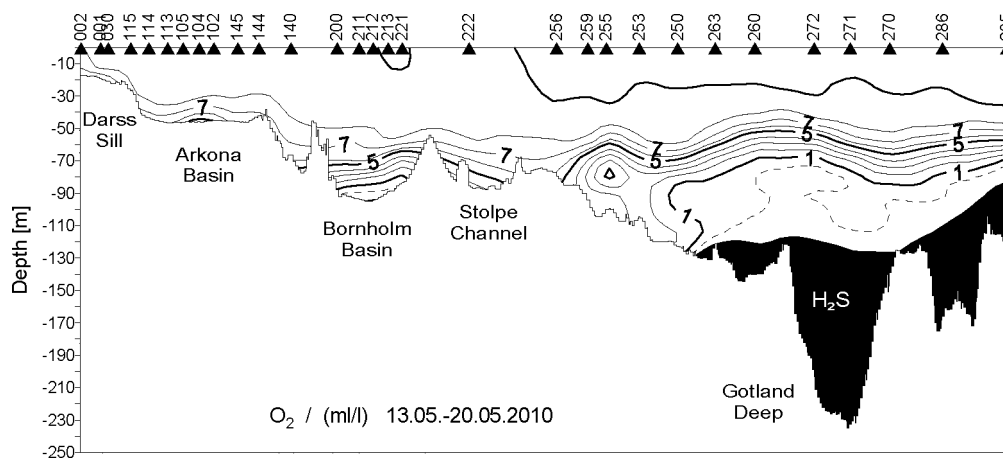
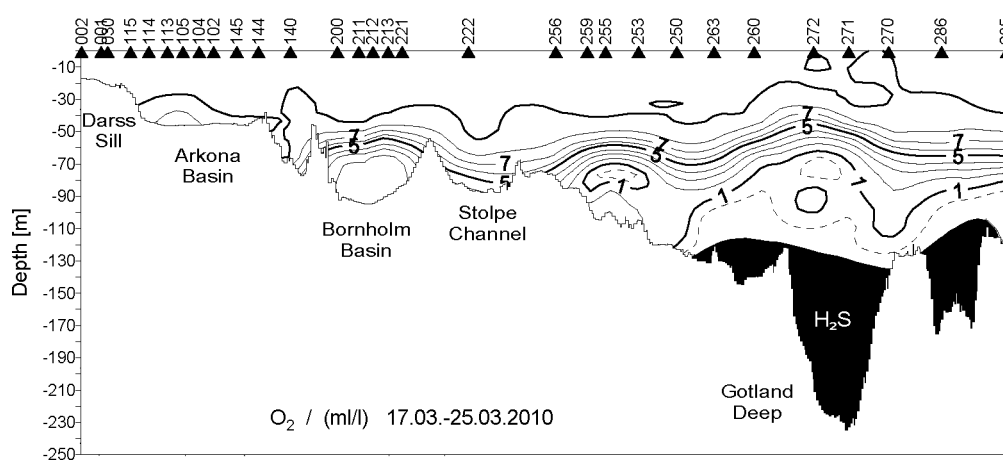
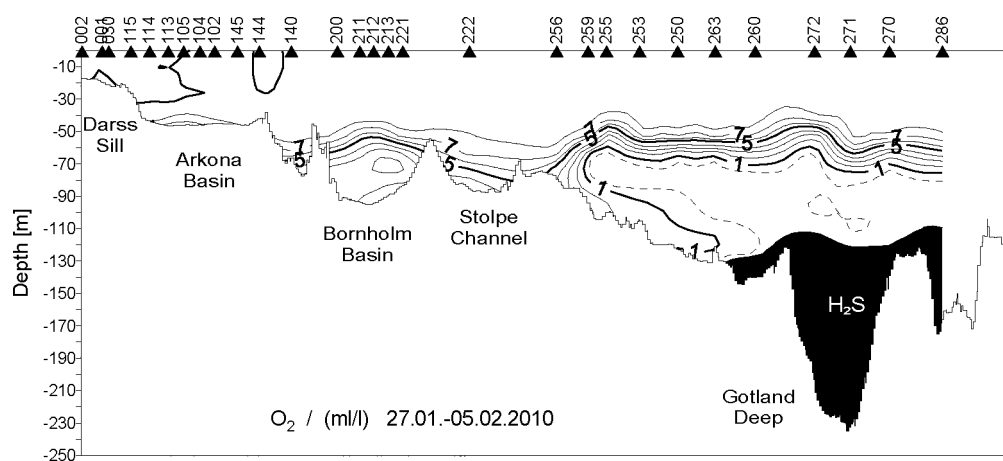


Abb. 25

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

Fig. 25

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

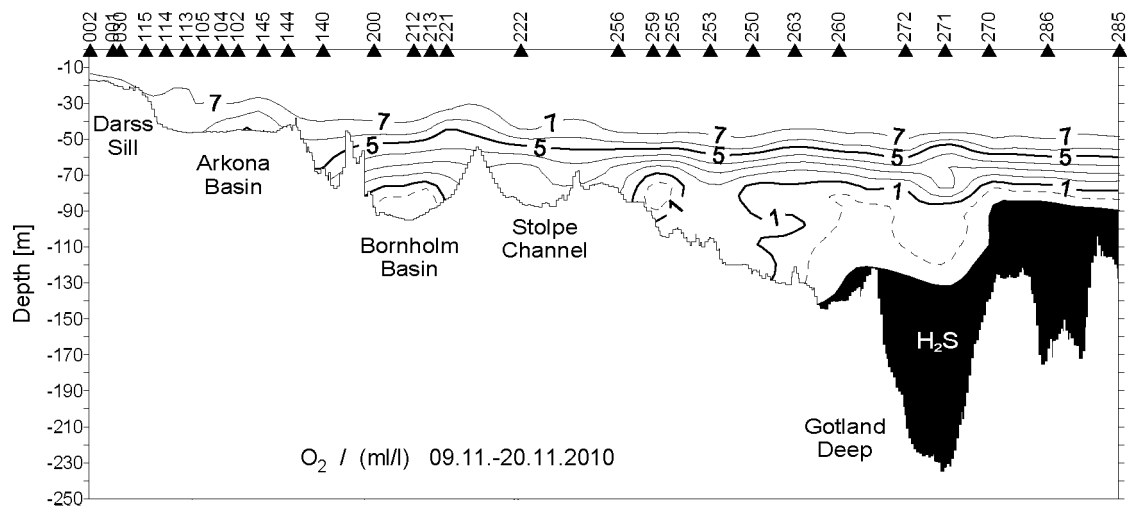
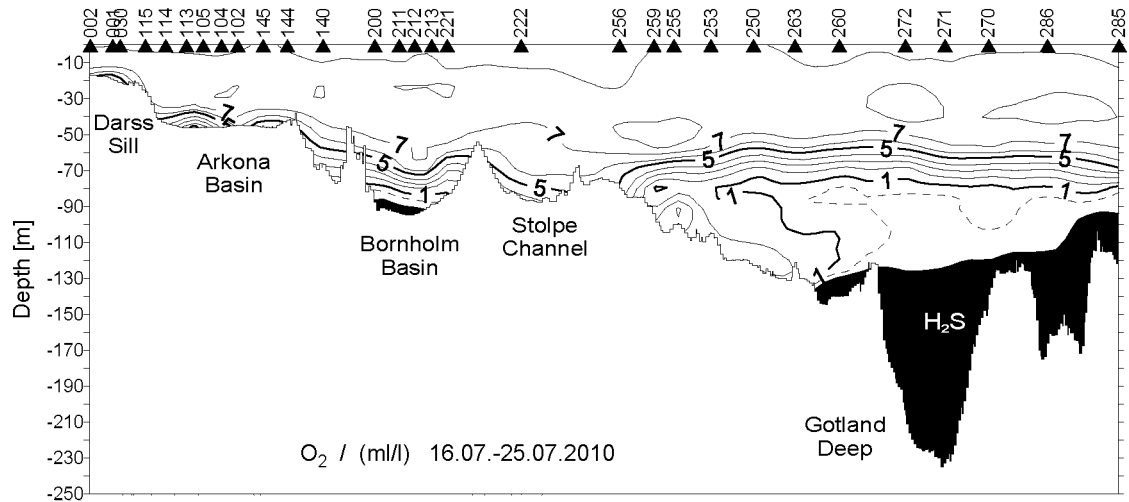


Abb. 25 Forts.

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

Fig. 25 cont

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

Auch in Bodennähe ist ein ausgeprägter Jahresgang zu beobachten. In der flachen westlichen Ostsee und im Arkonabecken erfolgt alljährlich im Winterhalbjahr eine vertikale Durchmischung. Zusätzlich führen Einstromprozesse wiederholt zur Wassererneuerung, so dass im Winter und Frühjahr eine recht gute Sauerstoffversorgung bis zum Grund vorherrscht. Die Ausbildung der thermischen Schichtung und der verstärkte Abbau der organischen Substanz führen im Sommer zu einem Rückgang der Sauerstoffsättigung in den bodennahen Schichten beider Seegebiete. Die rasche Ausbildung der thermischen Sprungschicht nach dem langen und kalten Winter 2009/2010 verursachte in der westlichen Ostsee bereits im Mai eine stabile Schichtung. Die absterbende Frühjahrsblüte führt zu einem Rückgang der Sättigung auf 57,6%. Im Arkonabecken setzte dieser Vorgang später ein. Bis Ende Juni war das Tiefenwasser dort noch gut mit Sauerstoff versorgt (siehe Kap. 4). Im Juli werden jedoch nur noch Sättigungswerte von 39,6% (westliche Ostsee) bzw. 35,8% (Arkonabecken) erreicht. Im zentralen Teil des Arkonabeckens lagen die Sättigungswerte im Sommer sogar deutlich unter 10%. Leider kann diese Entwicklung durch den Sensorausfall an der Arkona-Boje nicht dokumentiert werden. Eine starke Schädigung der benthischen Fauna in der westlichen Ostsee im November (pers. Mitteilung M. Zettler) lässt vermuten, dass die Sauerstoffkonzentrationen im Spätsommer/Frühherbst nochmals deutlich zurückgingen. Im Spätherbst führt die Abkühlung des Oberflächenwassers verbunden mit dem häufigeren Auftreten von Sturmereignissen schrittweise zur Durchmischung bis zum Boden, so dass sich die Sauerstoffsättigungswerte wieder dem Oberflächenwasser annähern.

Wie die Befunde des Benthos belegen, reicht die Messfrequenz der regulären Überwachungsfahrten nicht aus, um Sauerstoffminima in Bodennähe zu erfassen. Deshalb führt das Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (LLUR) mit dem Mess- und Laborschiff "Haithabu" im Spätsommer/Frühherbst seit mehreren Jahren eine intensive Messkampagne zum Sauerstoffgehalt in Bodennähe durch.

Leider fand die Messkampagne 2010 wegen fehlender Schiffskapazität erst drei Wochen später als in früheren Jahren statt. Die fortgeschrittene Abkühlung des Oberflächenwassers und herbstliche Sturmlagen führten bereits zur teilweisen vertikalen Durchmischung. Obwohl die Daten damit nur eingeschränkt mit den Vorjahren verglichen werden können, sollen sie hier zusammengefasst werden. Zwischen dem 28.09. und 12.10.2010 wurden an 41 Stationen, davon 31 mit Wassertiefen >15 m, die Sauerstoffgehalte in Bodennähe gemessen (Abb. 26).

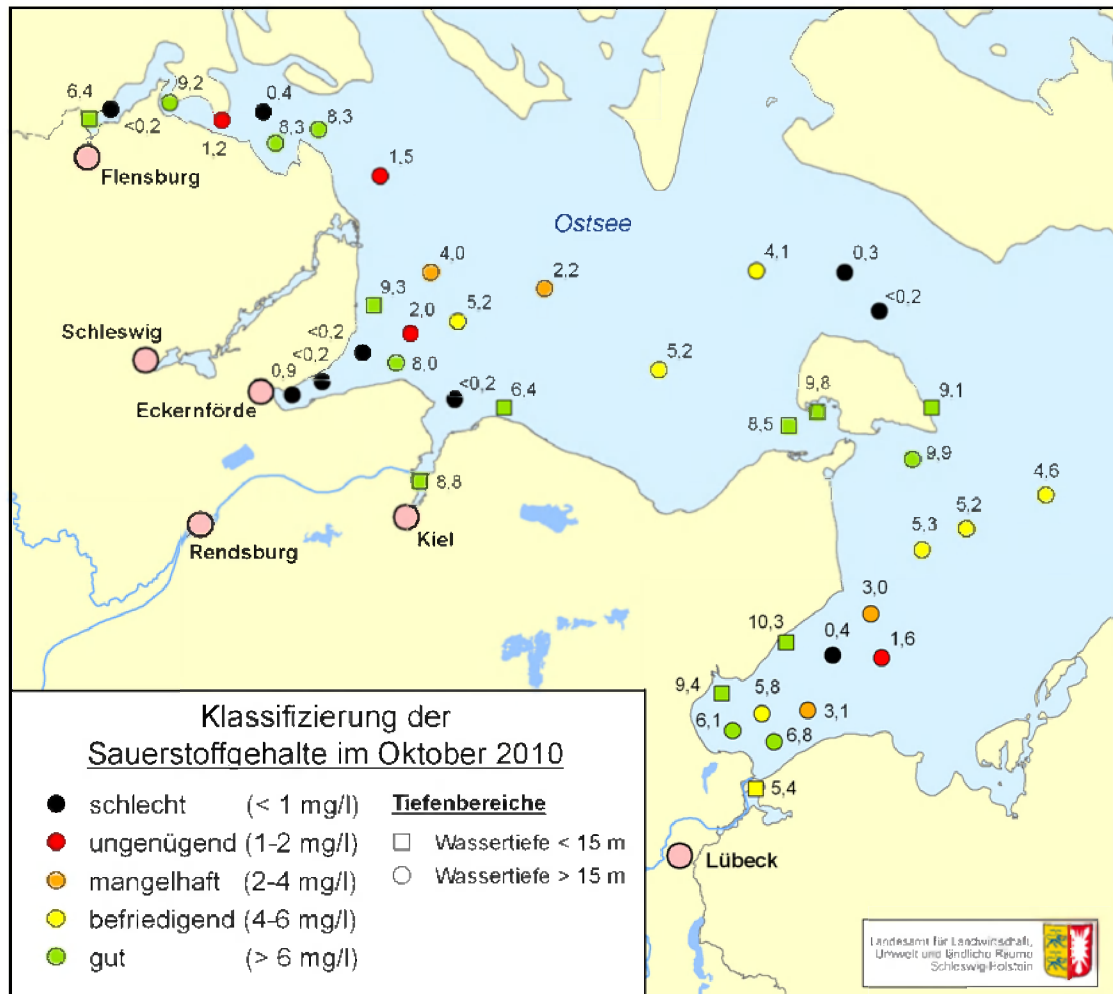


Abb. 26

Sauerstoffmangel in der westlichen Ostsee im September/ Oktober 2010 (LLUR 2010) –
 $\text{mg/l} \cdot 0,7005 = \text{ml/l}$

Fig. 26

Oxygen deficiency in the western Baltic Sea in September/ Oktober 2010 (LLUR 2010) –
 $\text{mg/l} \cdot 0,7005 = \text{ml/l}$

Eine Auswertung der Sauerstoffmessungen im Oktober 2010 zeigte, dass 42% aller Messwerte an Stationen mit Wassertiefen >15 m auf die Klasse *schlecht* oder *ungenügend* (kleiner 2 Milligramm pro Liter) entfielen (2009: 50%, 2002: 91%). Der Anteil an Messwerten mit *mangelhaften* Sauerstoffgehalten (größer 2 und kleiner 4 Milligramm pro Liter) lag bei 15% (2009: 29%, 2002: 4%). Der Anteil mit *befriedigenden* bis *guten* Sauerstoffgehalten (größer 4 Milligramm pro Liter) liegt bei 42% (2009: 21%, 2002: 4%). Das bisher größte Ausmaß an Sauerstoffschwund gab es im Jahr 2002 (HELCOM, 2003, NAUSCH et al., 2003).

Auch die Untersuchungen des LLUR belegten bereits im Juli 2010 einen erheblichen Sauerstoffschwund im Tiefenwasser der Förden und Buchten, was in Übereinstimmung mit unseren Messungen ist. So lagen die Sauerstoffkonzentrationen in der Flensburger Förde unter 3 mg/l und zwischen 1 und 2 mg/l in der Kieler Außenförde sowie der Eckernförder, Mecklenburger und Lübecker Bucht.

Genauere Aussagen zur jahreszeitlichen Entwicklung der Sauerstoffsättigung können den Registrierungen am Messmast „Darßer Schwelle“ (vgl. Kapitel 3) und an der Bojenstation „Arkonabecken“ (vgl. Kapitel 4) entnommen werden.

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 Einstromprozessen geprägt. Das wichtigste Einstromereignis 2009 war ein barotroper Einstrom Ende November/Anfang Dezember. Er verursachte eine Belüftung des Bornholmbeckens. So waren von Januar bis März 2010 Sauerstoffkonzentrationen in 80 m Tiefe zwischen 2 und 3 ml/l vorhanden. Der Einstrom war jedoch zu schwach, um auch die nachgeschalteten Becken zu belüften. Lediglich im südöstlichen Gotlandbecken konnten im März noch geringe Effekte beobachtet werden (FEISTEL, 2010). Auch die fünf kleineren barotropen Ereignisse, die 2010 beobachtet wurden (vgl. Kapitel 2), konnten nur bis ins Bornholmbecken wirksam werden. In der Folge war dieses Becken ganzjährig bis zum Boden mit Sauerstoff versorgt, Schwefelwasserstoff trat nicht auf (Tab. 5, Abb. 25).

Im Tiefenwasser des östlichen Gotlandbeckens hält die Stagnationsperiode nach wie vor an. Die zeitliche Entwicklung ist deutlich aus Abb. 27 zu entnehmen. Der Salzwassereinbruch vom Januar 2003 führte letztmalig zu einer intensiven Belüftung bis zum Boden und beendete eine lange Stagnationsperiode. Von April 2003 bis Mai 2004 war das Tiefenwasser frei von Schwefelwasserstoff. Am Boden beginnend traten bereits ab Mitte 2004 anoxische Verhältnisse auf. Die schwefelwasserstoffhaltige Schicht nahm in der Folge kontinuierlich an Mächtigkeit zu und erstreckt sich gegenwärtig zwischen etwa 130 m Wassertiefe und dem Boden. Auch die H_2S -Konzentrationen nahmen weiter zu. Der Jahresmittelwert von -4,29 ml/l war nochmals deutlich höher als im Vorjahr (-3,09 ml/l) (Tab. 5). Der Wert liegt damit noch über dem am Ende der letzten Stagnationsperiode gemessenen Wert (-3,82 ml/l). Ähnliche Aussagen lassen sich für das weiter nördliche gelegene Farötief treffen. Der Jahresmittelwert in 150 m Wassertiefe von -1,97 ml/l lag deutlich über dem des Jahres 2009 (-1,25 ml/l) und übertraf den des Jahres 2002, als -1,56 ml/l gemessen wurden.

Im westlichen Gotlandbecken machen sich Salzwassereinbrüche noch deutlich verzögerter und in gedämpfter Form bemerkbar. Erwartungsgemäß waren im Landsorttief kaum Veränderungen im Vergleich zum Vorjahr zu beobachten. Die Schwefelwasserstoffkonzentration in 400 m Wassertiefe war nahezu identisch mit der des Vorjahres (Tab. 5). Auch hier ist die Konzentration höher als am Ende der letzten langen Stagnationsperiode 2003 (-1,01 ml/l).

Im südlicher gelegenen Karlsötief ist die Situation nicht so stabil. Während es in den Jahren 2007-2009 wiederholt zu kurzzeitiger bis zum Boden reichender Konvektion gekommen war, war das Jahr 2010 durch durchweg anoxische Bedingungen in 100 m Wassertiefe geprägt. Folgerichtig lag der Jahresmittelwert bei -1,49 ml/l, und damit deutlich höher als im Landsorttief.

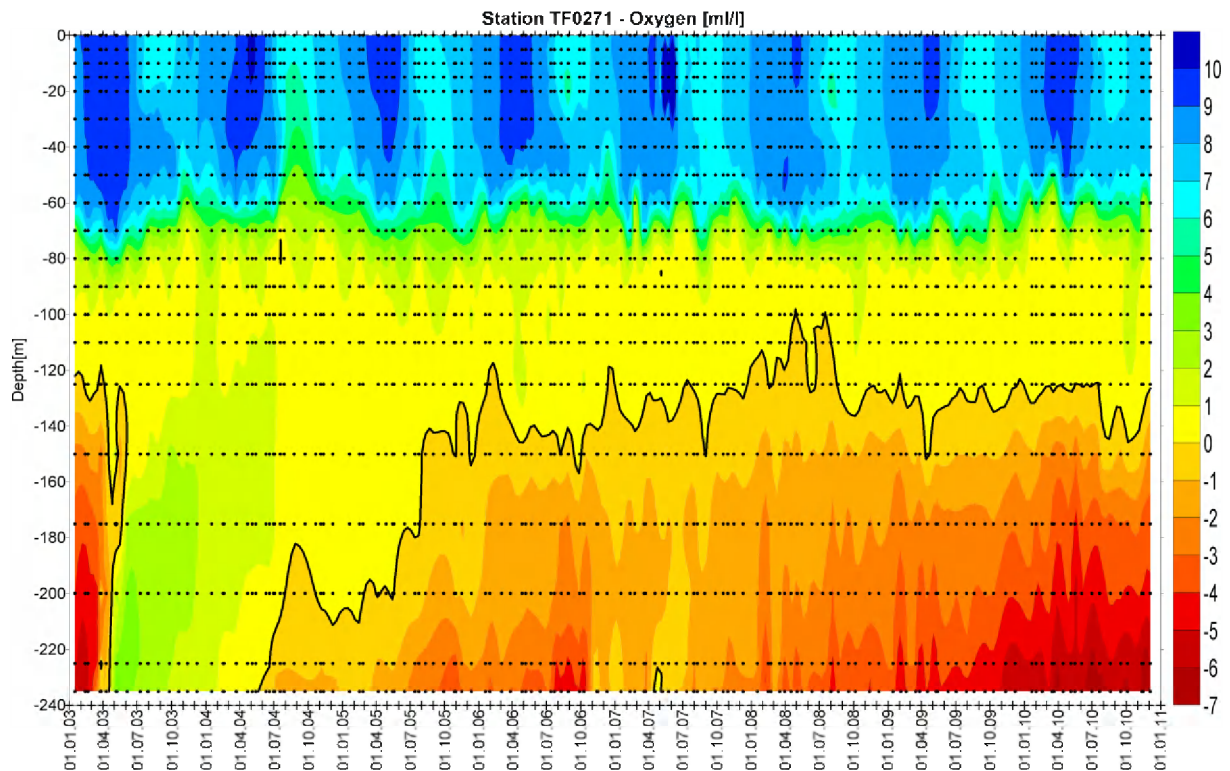


Abb. 27

Entwicklung der Sauerstoff- und Schwefelwasserstoffkonzentration im östlichen Gotlandbecken (Station 271) zwischen 2003 und 2010. Schwefelwasserstoffkonzentrationen wurden in negative Sauerstoffäquivalente umgerechnet. – IOW und SMHI-Daten

Fig. 27

Development of oxygen and hydrogen sulphide concentrations in the eastern Gotland Basin between 2003 and 2010. Hydrogen sulphide concentrations were converted into negative oxygen equivalents. – IOW and SMHI data

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 im 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. So hat sich der Phosphoreintrag aus den acht wichtigsten Kläranlagen an der deutschen Ostseeküste zwischen 1990 und 2008 um 98% verringert. Der Stickstoffeintrag ging im gleichen Zeitraum um 89% zurück (NAUSCH et al., 2011). Der flussbürtige Eintrag von Gesamtposphor aus dem deutschen Einzugsgebiet der Ostsee ist um 61% zurück gegangen, vergleicht man die Zeiträume 1986/90 und 2004/08, vor allem bedingt durch geringere Frachten aus Punktquellen. Der vorwiegend aus diffusen Quellen stammende Stickstoffeintrag hat sich nur um 13% verringert, wovon die Hälfte der Abnahme dem geringeren Abflussgeschehen geschuldet ist. Trotzdem müssen alle deutschen Küstengewässer und die angrenzenden Seegebiete als eutrophiert bewertet werden. Dabei weisen die offenen Meeresgebiete (westliche Ostsee, Kieler Bucht, Arkonabecken) einen mäßigen Gewässerzustand auf. Die küstennahen und mehr abgeschlossenen Regionen (Flensburger Förde, Lübecker Bucht, Wismarbucht, Pommernbucht) werden als schlecht eingestuft. Einen besonders hohen Eutrophierungsgrad weisen die inneren Küstengewässer (Schlei, Untertrave, Unterwarnow, Darß-Zingster Boddenkette, Jasmunder Bodden, Peenestrom, Kleines Haff) auf (NAUSCH et al., 2011).

Die Beschreibung der Nährstoffsituation gehört seit 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 Gesamtposphor 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), wie er in Abb. 28 für die westliche Ostsee dargestellt ist. In der zentralen Ostsee bildet sich im Winter eine typische Plateauphase, die in der Regel 2 – 3 Monate bestehen bleibt (NAUSCH et al., 2008b). Der zeitigere Beginn der Frühjahrsblüte in der westlichen Ostsee verhindert die Ausbildung eines lang anhaltenden Winterniveaus. Im Jahr 2009 war das Nitratreservoir bereits Ende Februar erschöpft. 2010 verzögerte sich die Frühjahrsblüte auf Grund des langen und strengen Winters, aber auch in diesem Jahr war Ende März kein Nitrat mehr in der Oberflächenschicht vorhanden (Abb. 28).

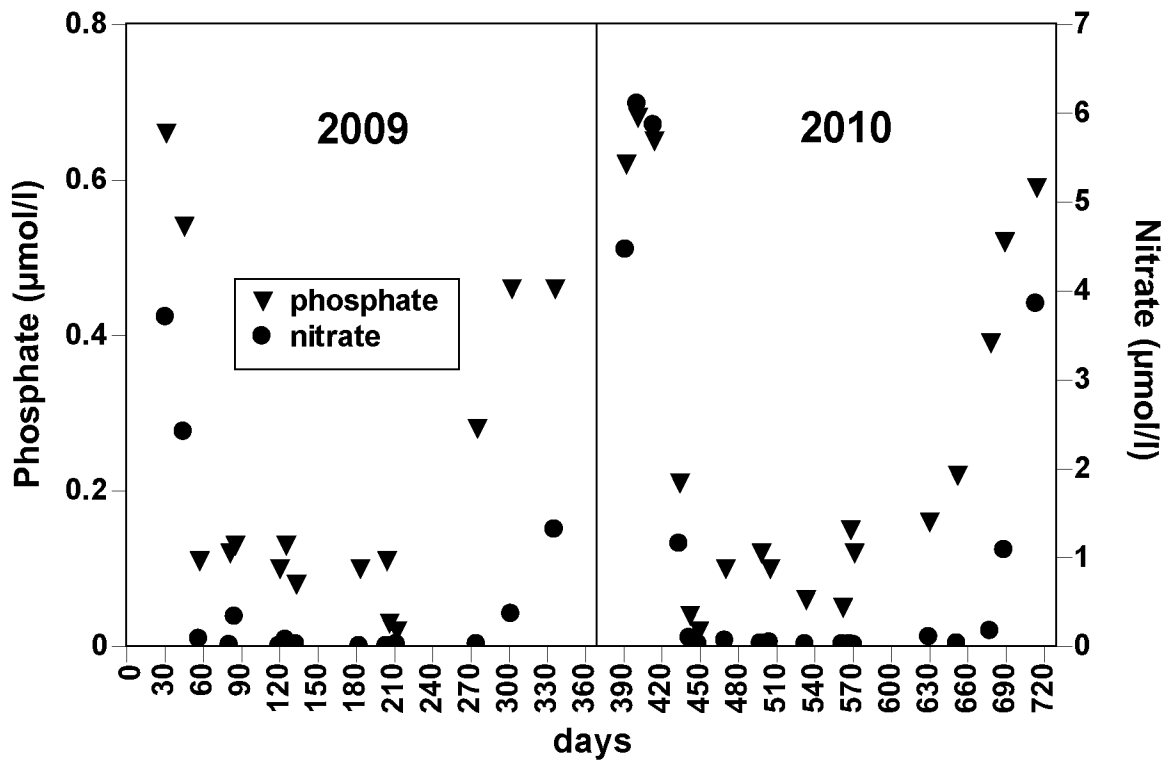


Abb. 28

Phosphat- und Nitratjahresgang 2009 und 2010 im Oberflächenwasser (0 – 5 m) der westlichen Ostsee (Station o12)

Fig. 28

Annual cycle of phosphate and nitrate 2009 and 2010 in the surface layer (0 – 5 m) in the western Baltic Sea (station 12)

Dagegen sind in der Regel noch ca. 0,1 – 0,2 µmol/l Phosphat vorhanden. Die Frühlingsblüte wird durch Stickstoffmangel beendet. Im weiteren Jahresverlauf gehen die Phosphatkonzentrationen zurück. Tritt eine intensive Blaualgenblüte auf, wird im Juli/August die Nachweisgrenze erreicht, wie es insbesondere 2009 zu sehen ist. Im Herbst nehmen die Phosphat- und später auch die Nitratkonzentrationen wieder zu und erreichen im Januar/Februar des Folgejahres wieder typische Winterwerte. Dieser Jahresgang kann auch in den Abb. 29 und 30 verfolgt werden. Wie schon in Kapitel 6.3 für die Sauerstoffwerte beschrieben, kann auch in den Nährstoffkonzentrationen die späte Frühlingsblüte dokumentiert werden. Die Aufnahme in der 2. Märzhälfte zeigt, mit Ausnahme der westlichen Ostsee noch nahezu winterliche Verhältnisse.

Die fehlende typische winterliche Plateauphase erschwert in der westlichen Ostsee auch die Ableitung von langfristigen Nährstofftrends wie dies für die zentrale Ostsee möglich ist (NAUSCH et al., 2008b). Zusätzlich verursacht die große Hydrodynamik des Seegebietes

größere Variationen im Nährstoffregime. Die winterlichen Phosphat- und Nitratwerte im Oberflächenwasser sind in Tab. 8 zusammen gefasst. Auffällig waren in den Jahren 2005 und 2006 sehr hohe Phosphatkonzentrationen, verbunden mit niedrigen Konzentrationen der gelösten anorganischen Stickstoffverbindungen. Das führt zu N/P-Verhältnissen, die deutlich unter dem langjährigen Mittel lagen (NAUSCH et al., 2007). In den Folgejahren kam es zu einem leichten Rückgang der winterlichen Phosphatkonzentrationen bei gleichzeitigem Anstieg der Nitratwerte, so dass sich die N/P-Verhältnisse wieder dem langjährigen Mittel annäherten (NAUSCH et al., 2008b).

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	2006	2007	2008	2009	2010
360 (Fehmarnbelt)	Feb.	0,76 $\pm$ 0,00	0,70 $\pm$ 0,0	0,78 $\pm$ 0,00	0,63 $\pm$ 0,04	0,47 $\pm$ 0,01
022 (Lübecker Bucht)	Feb.	0,93 $\pm$ 0,01	0,62 $\pm$ 0,00	0,74 $\pm$ 0,01	0,70 $\pm$ 0,00	0,61 $\pm$ 0,01
012 (Meckl. Bucht) Bucht)	Feb.	0,82 $\pm$ 0,01	0,57 $\pm$ 0,00	0,81 $\pm$ 0,00	0,67 $\pm$ 0,02	0,62 $\pm$ 0,02
113 (Arkonasee)	Feb.	0,79 $\pm$ 0,00	0,81 $\pm$ 0,01	0,62 $\pm$ 0,00	0,58 $\pm$ 0,00	0,56 $\pm$ 0,02
213 (Bornholmtief)	Feb.	0,79 $\pm$ 0,01	0,80 $\pm$ 0,04	0,74 $\pm$ 0,00	0,70 $\pm$ 0,00	0,56 $\pm$ 0,01
271 (Gotlandtief)	Feb.	0,44 $\pm$ 0,00	0,56 $\pm$ 0,00	0,64 $\pm$ 0,00	0,59 $\pm$ 0,01	0,62 $\pm$ 0,0*
286 (Fårötief)	Feb.	0,53 $\pm$ 0,00	0,56 $\pm$ 0,02	*	0,64 $\pm$ 0,02	0,62 $\pm$ 0,0*
284 (Landsorttief)	Feb.	0,59 $\pm$ 0,00	0,70 $\pm$ 0,02	* -	0,55 $\pm$ 0,01	0,63 $\pm$ 0,0*
245 (Karlsötief)	Feb.	0,60 $\pm$ 0,01	0,76 $\pm$ 0,00	*	0,67 $\pm$ 0,01	0,65 $\pm$ 0,0*

* SMHI data

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

Station	Monat	2006	2007	2008	2009	2010
360 (Fehmarnbelt)	Feb.	3,1 $\pm$ 0,0	8,6 $\pm$ 0,0	6,5 $\pm$ 0,0	3,6 $\pm$ 0,3	4,9 $\pm$ 0,0
022 (Lübecker Bucht)	Feb.	4,2 $\pm$ 0,1	9,6 $\pm$ 0,5	6,6 $\pm$ 0,0	3,8 $\pm$ 0,0	6,4 $\pm$ 0,2
012 (Meckl. Bucht) Bucht)	Feb.	3,5 $\pm$ 0,0	6,5 $\pm$ 0,1	7,8 $\pm$ 0,0	3,7 $\pm$ 0,3	4,5 $\pm$ 0,0
113 (Arkonasee)	Feb.	3,3 $\pm$ 0,0	4,0 $\pm$ 0,2	2,7 $\pm$ 0,0	2,8 $\pm$ 0,0	4,1 $\pm$ 0,1
213 (Bornholmtief)	Feb.	2,2 $\pm$ 0,0	3,1 $\pm$ 0,1	3,5 $\pm$ 0,0	3,1 $\pm$ 0,0	3,6 $\pm$ 0,0
271 (Gotlandtief)	Feb.	2,8 $\pm$ 0,0	2,9 $\pm$ 0,0	3,3 $\pm$ 0,0	3,6 $\pm$ 0,0	3,5 $\pm$ 0,0
286 (Fårötief)	Feb.	3,6 $\pm$ 0,0	3,3 $\pm$ 0,1	*	3,8 $\pm$ 0,0	3,9 $\pm$ 0,0
284 (Landsorttief)	Feb.	3,1 $\pm$ 0,0	4,4 $\pm$ 0,0	*	3,6 $\pm$ 0,0	
245 (Karlsötief)	Feb.	2,8 $\pm$ 0,0	3,6 $\pm$ 0,0	*	3,5 $\pm$ 0,0	3,5 $\pm$ 0,0

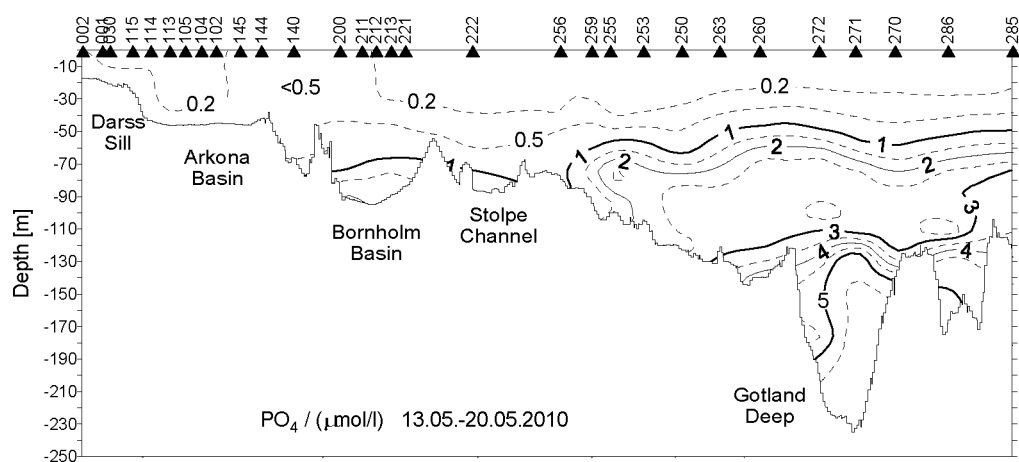
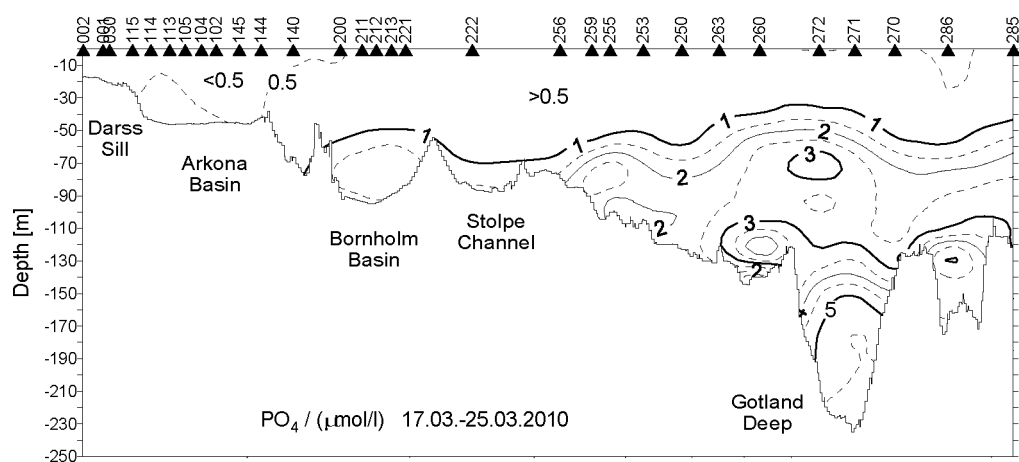
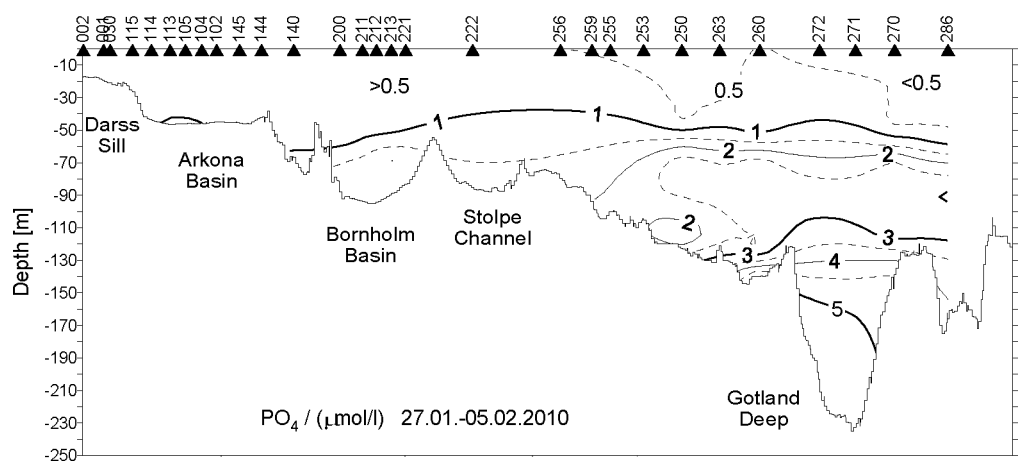


Abb. 29

Vertikale Verteilung des Phosphatgehaltes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 29

Vertical distribution of phosphate between Darss Sill and northern Gotland Basin

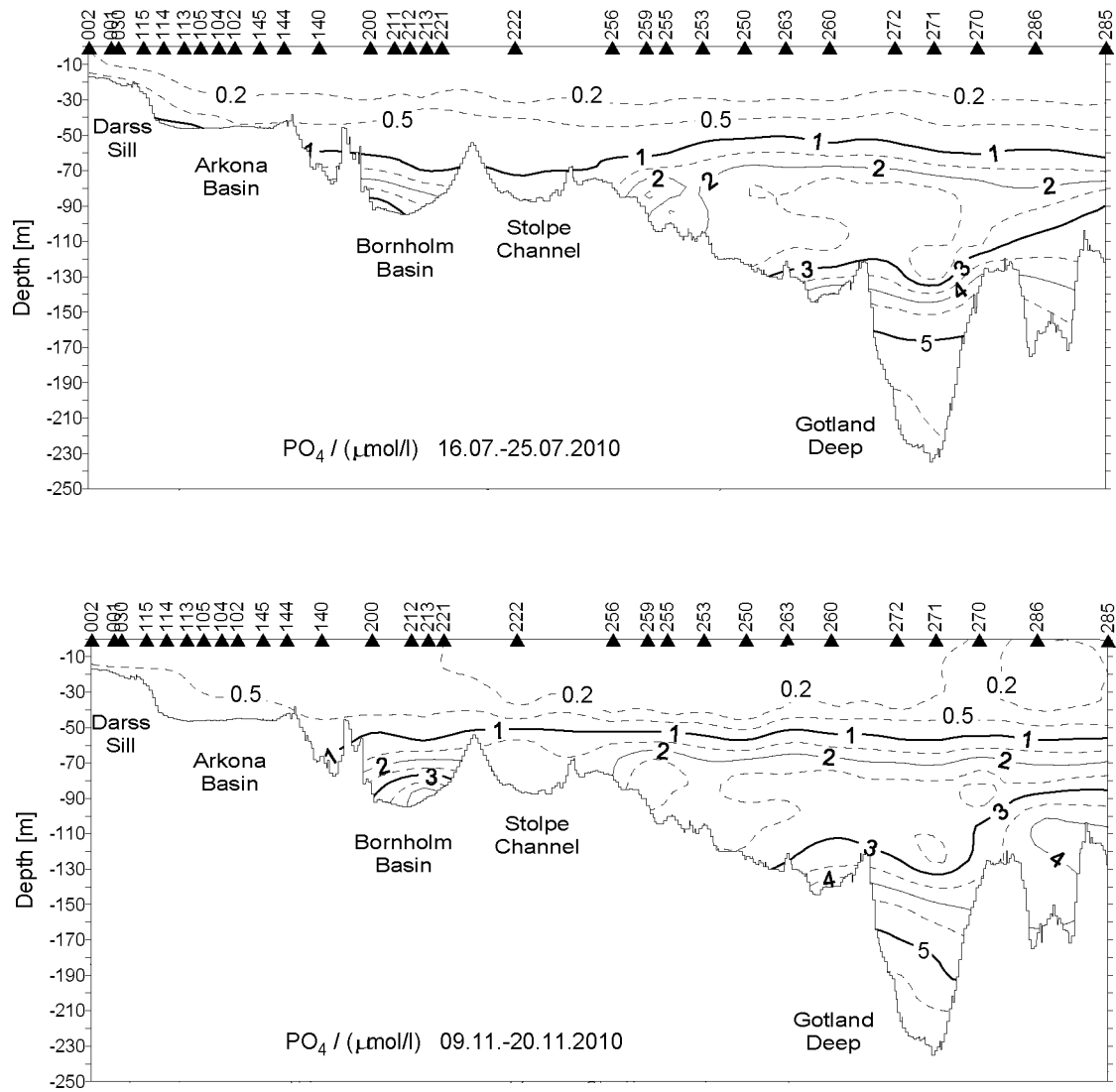


Abb. 29 Forts.

Vertikale Verteilung des Phosphatgehaltes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 29 cont

Vertical distribution of phosphate between Darss Sill and northern Gotland Basin

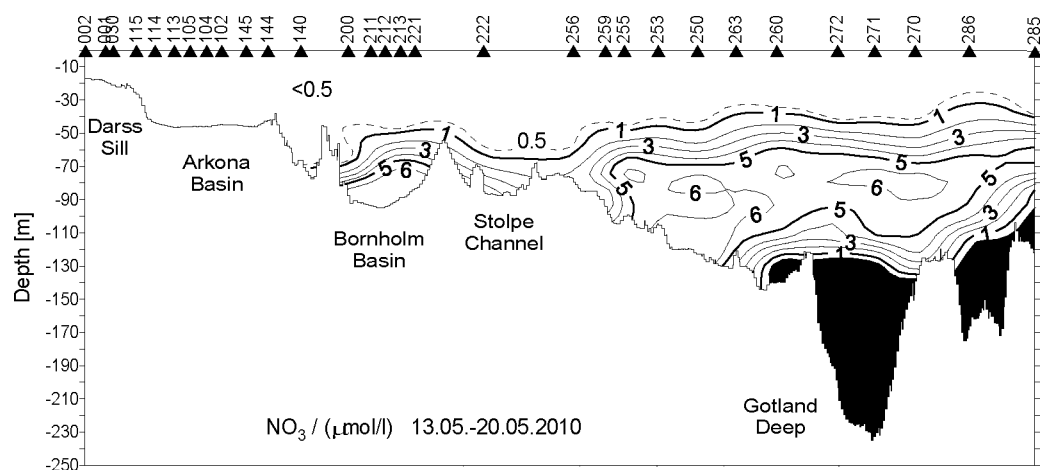
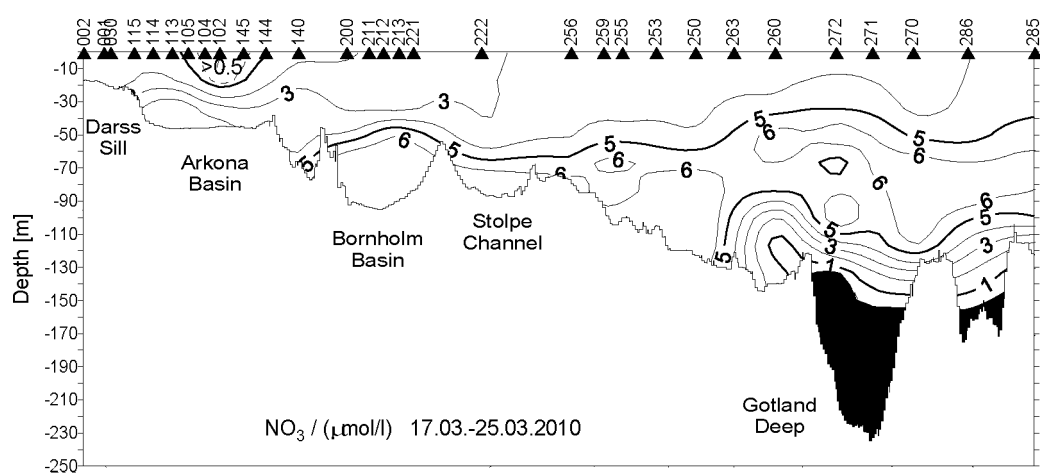
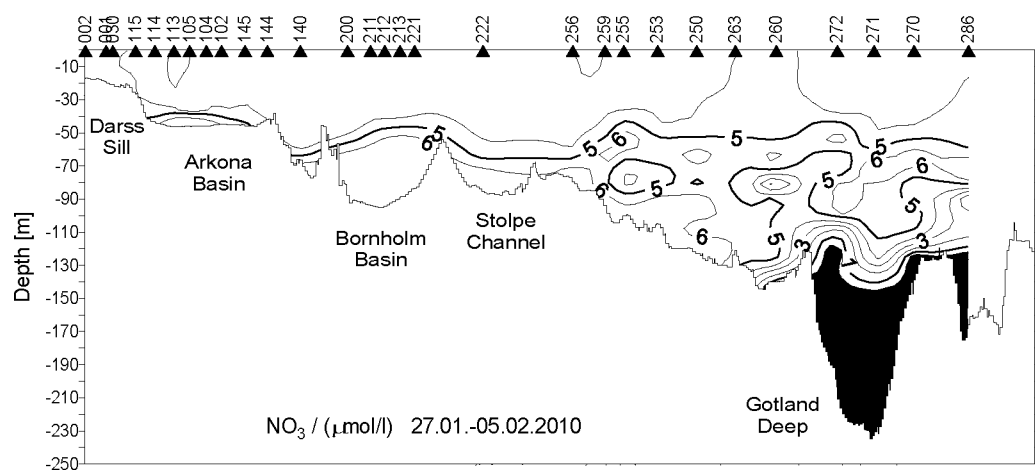


Abb. 30
Vertikale Verteilung des Nitratgehaltes zwischen Darßer Schwelle und dem nördlichen Gotlandbecken

Fig. 30
Vertical distribution between Darss Sill and northern Gotland Basin

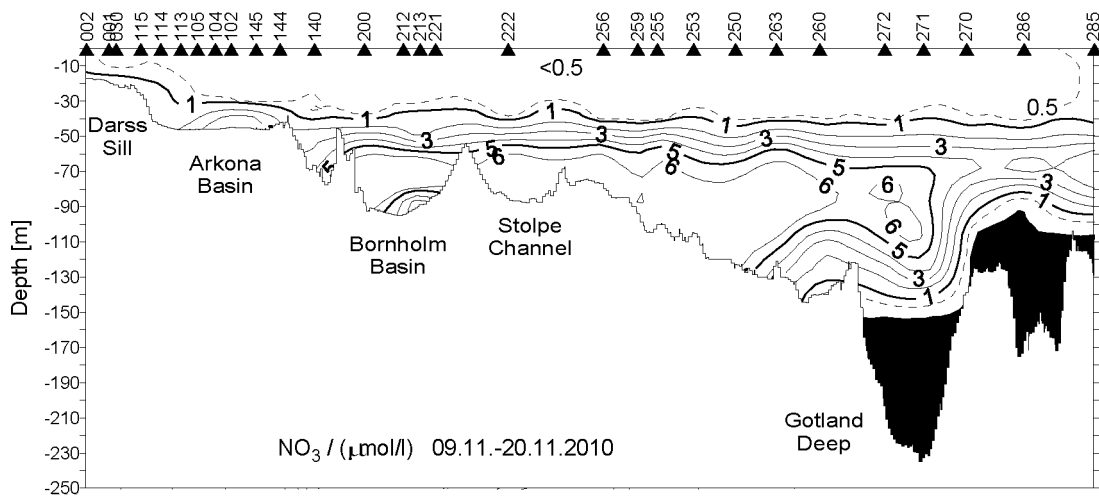
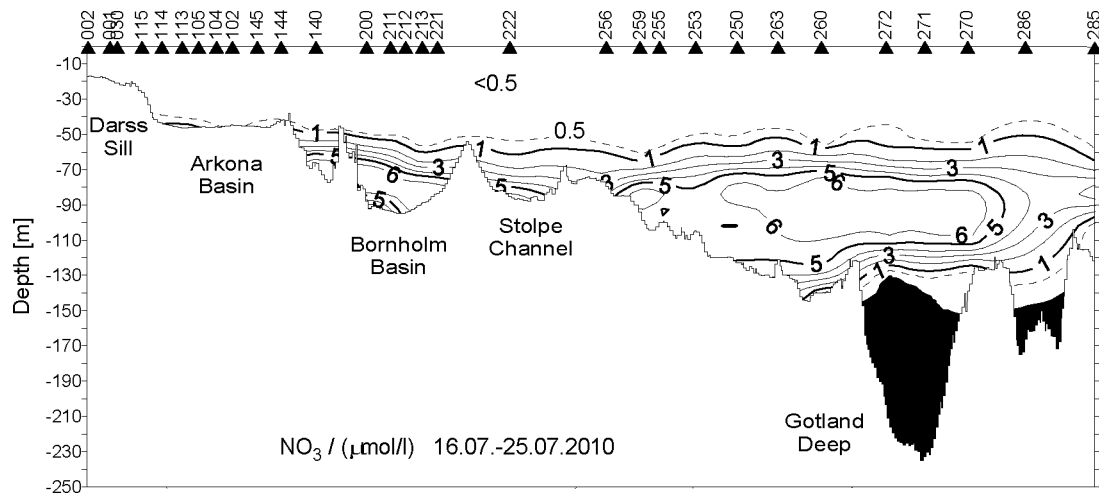


Abb. 30 Forts.

Vertikale Verteilung des Nitratgehaltes zwischen Darßer Schwelle und dem nördlichen Gotlandbecken

Fig. 30 cont

Vertical distribution between Darss Sill and northern Gotland Basin

Ähnlich wie für Phosphat und Nitrat (Abb. 28) weist auch das Silikat einen Jahresgang auf (Abb. 31), der auf Grund geringer Datendichte häufig nicht genau beschrieben werden kann. In den Jahren 2009 und 2010 konnten neben dem HELCOM-Monitoringprogramm auch monatliche Messungen aus dem Fehmarnbelt-Projekt verwendet werden. Die Frühlingsblüte des Phytoplanktons führte Ende Februar (2009) bzw. Ende März (2010) zu einer drastischen Abnahme des Silikatgehaltes. Messwerte unter $1 \mu\text{mol/l}$ weisen eindeutig auf eine kurzzeitige Limitation der Kieselalgen durch Silikat hin. Dieser Zeitraum wurde bei einer geringeren Anzahl an Messwerten in den Vorjahren kaum erfasst. Ein zweiter Rückgang der Silikatkonzentrationen im Frühherbst weist auf eine Herbstblüte der Diatomeen hin, die aber nicht so intensiv wie die im Frühjahr ausfällt. Im Rest des Jahres war durchweg ausreichend Silikat vorhanden. Der Jahresmittelwert von $8,2 \mu\text{mol/l}$ ($n=18$) entspricht dem des Vorjahres ($7,9 \mu\text{mol/l}$) und liegt nur wenig unter dem langjährigen Mittel 1993 – 2007 von $9,8 \mu\text{mol/l}$ (NAUSCH et al., 2008a). Ein abnehmender Trend ist nicht zu belegen.

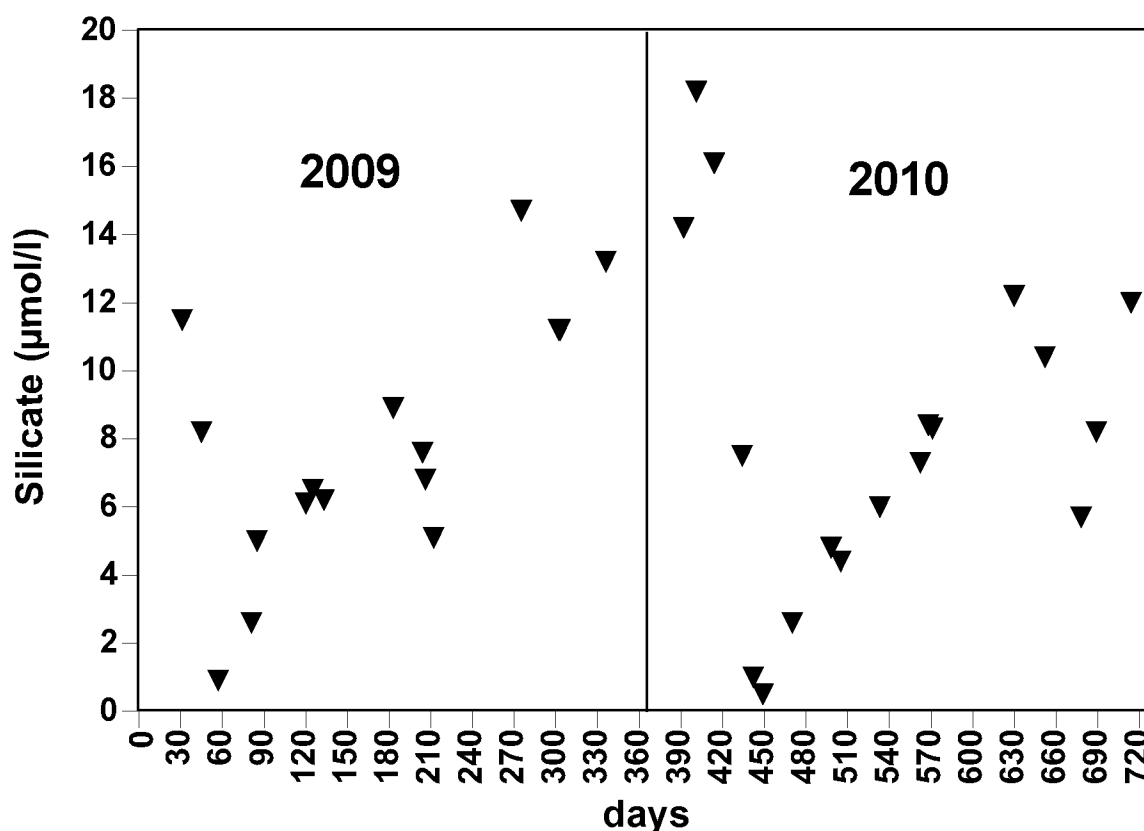


Abb. 31

Silikatjahresgang 2009 und 2010 im Oberflächenwasser (0 – 5 m) der westlichen Ostsee (Station 012)

Fig. 31

Annual silicate cycle 2009 and 2010 in the surface layer (0 – 5 m) in the western Baltic Sea (station 012)

Tab. 9

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

Table 9

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

Phosphat (µmol/l; Maximalwerte hervorgehoben)

Station	Tiefe/m	2006	2007	2008	2009	2010
213 (Bornholmtief)	80	3,01 ± 0,75	2,73 ± 1,16	2,81 ± 1,08	2,13 ± 0,79	2,22 ± 0,62
271 (Gotlandtief)	200	4,20 ± 0,27	4,03 ± 0,33	4,62 ± 0,23	5,22 ± 0,15	5,39 ± 0,29
286 (Fårötfief)	150	4,02 ± 0,19	3,84 ± 0,19	4,33 ± 0,26	4,40 ± 0,23	4,27 ± 0,33
284 (Landsortief)	400	3,57 ± 0,12	3,70 ± 0,17	3,97 ± 0,18	4,07 ± 0,19	3,82 ± 0,17
245 (Karlsötfief)	100	4,12 ± 0,48	4,09 ± 0,19	4,00 ± 0,57	4,05 ± 0,26	4,37 ± 0,44

Nitrat (µmol/l; Minimalwerte hervorgehoben)

Station	Tiefe/m	2006	2007	2008	2009	2010
213 (Bornholmtief)	80	7,7 ± 2,5	6,6 ± 3,75	6,1 ± 2,4	6,4 ± 2,1	7,51 ± 0,1
271 (Gotlandtief)	200	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0
286 (Fårötfief)	150	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0
284 (Landsortief)	400	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0
245 (Karlsötfief)	100	0,0 ± 0,1	0,0 ± 0,0	0,1 ± 0,3	0,01 ± 0,05	0,0 ± 0,0

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

Station	Tiefe/m	2006	2007	2008	2009	2010
213 (Bornholmtief)	80	$0,5 \pm 0,9$	$2,1 \pm 3,2$	$0,9 \pm 1,9$	$0,4 \pm 0,8$	$0,1 \pm 0,1$
271 (Gotlandtief)	200	$9,2 \pm 1,7$	$11,1 \pm 1,6$	$15,5 \pm 1,7$	$19,6 \pm 1,4$	$21,3 \pm 2,6$
286 (Fårötfief)	150	$6,9 \pm 1,3$	$5,5 \pm 1,2$	$8,3 \pm 1,7$	$9,1 \pm 1,5$	$9,8 \pm 1,3$
284 (Landsorttief)	400	$4,8 \pm 0,9$	$5,8 \pm 1,1$	$7,4 \pm 1,2$	$8,2 \pm 1,2$	$6,8 \pm 1,0$
245 (Karlsötfief)	100	$7,1 \pm 1,9$	$7,9 \pm 1,8$	$7,8 \pm 1,4$	$6,8 \pm 2,0 \pm$	$8,4 \pm 2,3$

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 bzw. 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 Einströme noch wirksam sein. Wie in Kapitel 6.3 beschrieben, war das Tiefenwasser des Bornholmbeckens 2010 durchgängig belüftet, Schwefelwasserstoff trat nicht auf, was sich auch in den Nährstoffverhältnissen widerspiegelt (Tab. 9). Die Ammoniumkonzentrationen lagen im Jahresmittel im Bereich der Nachweisgrenze, die Nitratkonzentrationen sind im Vergleich zum Vorjahr nochmals angestiegen und die Phosphatwerte bleiben auf einem niedrigen Niveau ($2,22 \mu\text{mol/l}$).

Im Tiefenwasser des östlichen und nördlichen Gotlandbeckens (Gotlandtief und Fårötfief) hält die Stagnationsperiode unvermindert an. Folgerichtig konnte im sauerstofffreien Tiefenwasser Nitrat letztmalig im Jahr 2005 nachgewiesen werden. Der fortschreitende Abbau der organischen Substanz führt seitdem zu einer kontinuierlichen Anreicherung von

Ammonium (Tab. 9), da keine Nitrifikation möglich ist. Vergleicht man die Ammoniumwerte des Gotland- und Farötiefs im Jahr 2010 (21,3 bzw. 9,8 $\mu\text{mol/l}$) mit denen des Jahrs 2002, dem Ende der letzten Stagnationsperiode, so sind diese wieder erreicht oder bereits überschritten. Die entsprechenden Konzentrationen betrugen 2002 19,7 $\mu\text{mol/l}$ (Gotlandtief) und 9,8 $\mu\text{mol/l}$ (Farötief). Unter anoxischen Bedingungen kommt es auch zu einer Anreicherung des Phosphates, da keine Ausfällung erfolgt. Im Gotlandtief wurde in 200 m Wassertiefe 2010 ein Jahresmittelwert von 5,39 mmol/l berechnet, der noch etwas unter dem Wert des Jahres 2002 (5,88 $\mu\text{mol/l}$) liegt. Im Farötief zeigen sich in den Jahren 2008 - 2010 keine wesentlichen Änderungen (Tab. 9).

Im westlichen Gotlandbecken machen sich die Auswirkungen von Einstromereignissen verzögert und in deutlich abgeschwächter Form bemerkbar. Damit sind auch die Fluktuationen im Nährstoffregime geringer (Tab. 9). Im Landsorttief herrschen seit 2006 permanent anoxische Verhältnisse. Im Karlsötief kam es dagegen in den Jahren 2008 und 2009 auf Grund einer instabilen Schichtung wiederholt zu kurzzeitigen Sauerstoffeinträgen, so dass Spuren von Nitrat nachgewiesen wurden. Das Jahr 2010 war erneut durchgängig anoxisch, was sich in erhöhten Phosphat- und Ammoniumkonzentrationen widerspiegelt.

Zusammenfassung

Nach drei besonders milden und kurzen Wintern in Folge war der Winter 2009/2010 auffällig lang und kalt. Mit einer Kältesumme 203,7 K d von Warnemünde liegt er auf Platz 12 der kältesten Winter seit Beginn der Vergleichsdaten im Jahr 1948. Der kälteste Winter war 1962/63 mit 395,2 K d. Der Dezember 2010 sorgte mit 109,2 K d für einen kalten Beginn des Winters 2010/2011. Dieser Wert repräsentiert nach 1969 den zweikältesten Dezember seit 1948.

Die Jahreswärmesumme 2010 von 258,5 K d war noch einmal deutlich höher als in den Vorjahren (2008: 196 K d; 2009: 208 K d) und lag wesentlich höher als der Mittelwert 148 K d der Beobachtungsreihe seit 1948, deutlich oberhalb der statistischen Streuung aber noch klar unter dem Rekordwert 355 K d des Jahrs 2006. Der Sommer 2010 war damit der sechstwärmste Sommer seit 1948, wozu insbesondere der Monat Juli beigetragen hat.

Die Wasseroberflächentemperatur war durch unter dem langjährigen Mittel liegende Monate Januar bis Mai und einen heißen Juli gekennzeichnet. Nach der starken Abkühlung im November/Dezember 2009, die sich im Januar und Februar fortsetzte, entwickelte sich der Februar zum kältesten Monat mit Anomalien von -2 K in der westlichen Ostsee und bis zu -5 K im Skagerrak/Kattegat. Durch die anhaltende schwüle Witterung im Juli erwärmte sich die Ostsee sehr stark, was zu positiven Anomalien von bis zu +2 K und Maximaltemperaturen von 20-23 °C im Monatsmittel führte. In der zweiten Julihälfte kühlte die westliche Ostsee leicht ab, was sich im August fortsetzte. Von September – November gab es nur sehr geringe Abweichungen der Wasseroberflächentemperatur von den langjährigen Mittelwerten. Durch die starke atmosphärische Abkühlung im November/Dezember 2010 kühlte die westliche Ostsee rasch ab und in der dritten Dekade setzte Eisbildung in der Pommernbucht ein. 2010 war neben 1998 der kälteste Dezember in der westlichen Ostsee seit 1990.

Barotrope Einstromereignisse mit geschätzten Volumina zwischen 100 und 200 km³ fanden in der Ostsee 2010 fünf Mal statt, im Januar/Februar, im Juli, im September, im Oktober/November und im Dezember. Im Gotlandbecken zwischen 174 m und 219 m Tiefe wurde von einer Verankerung ab dem 13. Februar 2010 das Eintreffen des warmen Einstroms registriert, der dem barotropen Einstrom vom 26.11. bis 1.12.2009 zuzuordnen ist. Anfängliche Spitzenwerte von bis zu 7,3 °C gingen im Laufe des Jahre 2010 unter ausklingenden Fluktuationen allmählich auf etwa 6,5 °C zurück. Ein weiteres kaltes Signal trat dort am 24./25. November 2010 auf, das die Wassertemperatur aber nur kurzfristig auf etwa 6,0 °C sinken ließ.

Im Vergleich zu den Vorjahren weist der Jahresgang der Sauerstoffsättigung 2010 einige Besonderheiten auf. Im Ergebnis der Dominanz sauerstoffzehrender Prozesse und geringer Produktion war das Oberflächenwasser im Winter in allen Seegebieten mit etwa 95% leicht untersättigt. Die Frühjahrsblüte des Phytoplanktons führte in der westlichen Ostsee Mitte März zu einer Übersättigung des Wassers. Im Arkonabecken scheint die Blüte auf Grund des

langen Winters zu diesem Zeitpunkt erst an ihrem Beginn gewesen zu sein. Ungewöhnlich war die Untersättigung im Mai in der westlichen Ostsee. Möglicherweise wurde hier der Zusammenbruch der Frühjahrsblüte erfasst. Der Sommer zeigt das gewohnte Bild mit Sättigungswerten zwischen 100% und 115%. Im Herbst führten verstärkte Abbauprozesse erneut zu einer Untersättigung. Generell muss festgestellt werden, dass die jährliche Schwankungsbreite der Sättigung wie schon in den Vorjahren relativ gering war. Dies spricht für eine gesunde Sauerstoffbilanz des Oberflächenwassers.

Die Sauerstoffsituation des Tiefenwassers der tieferen Becken wird vorwiegend durch das Auftreten oder Ausbleiben barotroper und/oder barokliner Einstromprozesse geprägt. Der barotrope Einstrom vom November/Dezember 2009 verursachte eine Belüftung des Bornholmbeckens. So waren von Januar bis März 2010 Sauerstoffkonzentrationen in 80 m Tiefe zwischen 2 und 3 ml/l vorhanden. Im östlichen Gotlandbecken konnte diese warme Wassermasse im März im Bereich der Halokline nachgewiesen werden, wo sie noch einen Sauerstoffgehalt von 0,9 – 1,0 ml/l hatte. Das Tiefenwasser wurde nicht belüftet. Hier nahmen die Schwefelwasserstoffkonzentrationen weiter zu. Der Jahresmittelwert in 200 m Wassertiefe von -4,29 ml/l war nochmals deutlich höher als im Vorjahr (-3,09 ml/l). Der Wert liegt damit noch über dem am Ende der letzten Stagnationsperiode gemessenen Wert (-3,82 ml/l). Ähnliche Aussagen lassen sich für das weiter nördlich gelegene Farötief treffen.

Die Sauerstoffsituation des Tiefenwassers spiegelt sich auch in den Nährstoffkonzentrationen wider. Das im Jahr 2010 durchgängig belüftete Tiefenwasser des Bornholmbeckens wies im Jahresmittel Ammoniumkonzentrationen im Bereich der Nachweisgrenze auf, die Nitratkonzentrationen waren im Vergleich zum Vorjahr nochmals angestiegen und die Phosphatwerte blieben auf einem niedrigen Niveau (2,22 $\mu\text{mol/l}$). Im Tiefenwasser des östlichen und nördlichen Gotlandbeckens hält die Stagnationsperiode unvermindert an. Vergleicht man die Ammoniumwerte des Gotland- und Farötiefs im Jahr 2010 (21,3 bzw. 9,8 $\mu\text{mol/l}$) mit denen des Jahres 2002, dem Ende der letzten Stagnationsperiode, so sind diese wieder erreicht oder bereits überschritten. Die entsprechenden Konzentrationen betrugen 2002 19,7 $\mu\text{mol/l}$ (Gotlandtief) und 9,8 $\mu\text{mol/l}$ (Farötief). Für Phosphat wurde im Gotlandtief in 200 m Wassertiefe 2010 ein Jahresmittelwert von 5,39 $\mu\text{mol/l}$ berechnet, der noch etwas unter dem Wert des Jahres 2002 (5,88 $\mu\text{mol/l}$) liegt.

In der Oberflächenschicht weisen Phosphat und Nitrat den typischen Jahresgang auf. Für Trenduntersuchungen werden jedoch die winterlichen Konzentrationen verwendet. Auffällig waren in den Jahren 2005 und 2006 sehr hohe Phosphatkonzentrationen, verbunden mit niedrigen Konzentrationen der gelösten anorganischen Stickstoffverbindungen. Das führte zu N/P-Verhältnissen, die deutlich unter dem langjährigen Mittel lagen. In den Folgejahren kam es zu einem leichten Rückgang der winterlichen Phosphatkonzentrationen bei gleichzeitigem Anstieg der Nitratwerte, so dass sich die N/P-Verhältnisse wieder dem langjährigen Mittel annäherten.

Summary

After three particularly mild and short winters in a row, the winter 2009/2010 was strikingly long and cold. With the “cold sum” of the air temperature in Warnemünde of 203.7 K d it ranks on place 12 of the coldest winters since the beginning of the record in 1948. The coldest winter was 1962/63 with 395.2 K d. With 109.2 K d, December 2010 caused a cold start of the winter 2010/11. This value represents the second coldest December since 1948, after December 1969.

The summer “heat sum” 2010 in Warnemünde of 258.5 K d was once again clearly higher than in the years before (2008: 196 K d; 2009: 208 K d) and well above the 60-years mean of 146 K d, but well below the record value of 355 K d in 2006. The summer 2010 was the sixth warmest one since 1948, especially caused by the warm July.

Sea surface temperature in 2010 was characterized from January to May by temperatures below the long-term mean and a hot July. After a strong cooling in November/December 2009 which continued in January and February, February was the coldest month of the year with anomalies of -2 K in the western Baltic and -5 K in the Skagerrak/Kattegat region. The long lasting sticky weather in July warmed up the Baltic Sea extremely, with positive anomalies up to +2 K and maximum temperatures of 20-23 °C on the monthly average. From September to November 2010, only slight deviations from the long-term mean were observed. The strong atmospheric cooling in November/December caused a rapid decrease of the sea surface temperature in the western Baltic. In the third December decade, ice formation started in the Pomeranian Bight. Except for 1998, December of 2010 was the coldest December in the western Baltic since 1990.

In 2010, barotropic inflow events with estimated volumes between 100 and 200 km³ took place five times: in January/February, in July, in September, in October/November and in December. From February 13th onwards, a mooring in the Gotland Basin registered between 174 m and 219 m depth a warm inflow which can be associated with the barotropic inflow event between November 26th and December 1st 2009. Several cold signals were registered between August and November 2010. At the beginning, highest temperatures of 7.3 °C were measured which decreased to 6.5 °C under fading variations during the course of the year. A further cold signal was observed on November 24th/25th, decreasing the water temperature shortly to 6.0 °C.

Compared to the years before, the oxygen saturation in the surface layer showed in 2010 some peculiarities. As a result of the dominance of oxygen consuming processes and low productivity, the winter surface layer in all sea areas was slightly sub saturated (95%). In the western Baltic the phytoplankton spring bloom caused a super saturation in the middle of March. Due to the long-lasting winter, at this point of time the bloom seemed to be only at its beginning in the Arkona Basin. An unusual under-saturation in the western Baltic in May can be linked most probably to the late break down of the spring bloom. The summer period shows the typical picture with saturation values between 100% and 115%. In autumn,

increased degradation of organic matter caused again sub saturation. Generally, the yearly range of fluctuations in oxygen saturation is relatively narrow, thus indicating a healthy oxygen balance of the surface water.

The oxygen situation in the deep water of the central basins is mainly coined by the occurrence or absence of barotropic and/or baroclinic inflow processes. The barotropic inflow of November /December 2009 caused the ventilation of the Bornholm Basin. From January to March 2010 oxygen concentrations between 2 and 3 ml/l were measured in 80 m depth. In the eastern Gotland Basin, this warm water mass was detected within the halocline in March, still containing 0.9 – 1.0 ml/l oxygen. The deep water was not oxygenated, hydrogen sulphide concentrations increased further. The annual mean of -4.29 ml/l in 200 m water depth was once again higher than in the year before (-3.09 ml/l). The value is also higher than the one measured at the end of the last stagnation period. The same holds for the Farö Deep located further north.

The oxygen situation in the deep water is also mirrored in the nutrient concentrations. The deep water of the Bornholm Basin which was oxygenated throughout the whole year 2010 had ammonium concentrations near to the detection limit on an annual mean. Nitrate concentrations increased further compared to 2009 and phosphate values remained on a low level (2.22 $\mu\text{mol/l}$). In the deep water of the eastern and northern Gotland Basin (Gotland and Farö Deep) the stagnation period continues undiminished. Compared with the end of the previous long stagnation period in 2002, the 2010 ammonium concentrations of the Gotland and Farö Deeps (21.3 and 9.8 $\mu\text{mol/l}$) are reached again or even exceeded. The corresponding concentrations in 2002 amounted to 19.7 $\mu\text{mol/l}$ (Gotland Deep) and 9.8 $\mu\text{mol/l}$ (Farö Deep). The annual average for phosphate in 200 m water depth in the Gotland Deep was 5.39 $\mu\text{mol/l}$, still somewhat lower than in 2002 (5.88 $\mu\text{mol/l}$).

In the surface layer of the Baltic Sea, the nutrients phosphate and nitrate show an annual cycle typical for the temperate climate zone. For trend analysis, however, concentrations in winter are used. High phosphate concentrations combined with relatively low concentrations of the dissolved inorganic nitrogen compounds were noticeable in 2005 and 2006 resulting in N/P ratios well below the long-term mean. In the following years, a slight decrease in winter phosphate concentrations was observed together with a moderate increase of nitrate concentrations. Thus, N/P ratios approach the long-term mean again.

Danksagung

Die Autoren danken den am Ostseeüberwachungsprogramm beteiligten Mitarbeitern des Leibniz Instituts für Ostseeforschung Warnemünde für die Durchführung der Messungen sowie den Kapitänen und Besatzungen der Forschungsschiffe „Professor Albrecht Penck“, „Alkor“ und „Heincke“ für die Unterstützung und den Einsatz bei den Messfahrten des Jahres 2010. Für die Unterstützung bei der Beschreibung des Eiswinters, insbesondere durch Übermittlung einer Bedeckungskarte, sind wir Frau NATALIJA SCHMELZER vom Eisdienst des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Hamburg und Rostock, dankbar. Wir danken Frau KRISTIN JUNGE vom Deutschen Wetterdienst (DWD), Offenbach, für die Bereitstellung der Winddaten von Arkona und Frau GISELA TSCHERSICH vom BSH für die Bereitstellung der NOAA-Wetterstatellitendaten. Die Autoren bedanken sich bei Herrn BARRY BROMAN, Schwedisches Meteorologisches und Hydrologisches Institut (SMHI), Norrköpping, für die Überlassung der Pegeldaten. Herr JAN SZARON, Ozeanographisches Labor des SMHI in Göteborg, stellte uns hydrographisch-chemische Beobachtungen ausgewählter Ostseestationen aus dem Schwedischen Ozean Archiv (SHARK) zur Verfügung, die im Rahmen des nationalen schwedischen Umweltüberwachungsprogrammes gewonnen wurden. Frau ELZBIETA LYSIAK-PASTUSZAK von der Maritimen Abteilung des Instituts für Meteorologie und Wasserwirtschaft in Gdynia (IMGW) stellte uns freundlicherweise Beobachtungsdaten für das „Danziger Tief“ zur Verfügung. Wir danken Frau BARBARA BOGDANSKA, IMGW Warschau, für die freundliche Überlassung von Daten der Sonneneinstrahlung in Gdynia. 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.

Literatur

- ARNEBORG, L., FIEKAS, V., UMLAUF, L. and BURCHARD, H. (2007): Gravity current dynamics and entrainment. A process study based on observations in the Arkona Basin, J. Phys. Oceanogr., **37**, 2094-2113.
- BEZOLD, W.V. (1883): Die Kälterückfälle im Mai. – Abhandlungen der königlich Bayerischen Akademie der Wissenschaften. Bd. **14**, Nr. 6, 71-108.
- V.BODUNGEN, B., GRAEVE, M., KUBE, J., LASS, H.U., MEYER-HARMS, B., MUMM, N., NAGEL, K., POLLEHNE, F., POWILLEIT, M., RECKERMANN, M., SATTLER, C., SIEGEL, H. and WODARG, D. (1995): Stoff-Flüsse am Grenzfluss – Transport- und Umsatzprozesse im Übergangsgebiet 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): Flächenbezogene Eisvolumensumme. http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Beobachtungen/Eis/Eiswinter2009_10.pdf

- BURCHARD, H., JANSSEN, F., BOLDING, K., UMLAUF, L. and RENNAU, H. (2009): Model simulations of dense bottom currents in the Western Baltic Sea, *Cont. Shelf Res.*, 29, 205-220.
- DWD (2010): Witterungsreport: express. 12, Nr. 1 - 13. Deutscher Wetterdienst.
- DWD (2011a): Klimadaten Deutschland, Daten im Standardformat, www.dwd.de
- DWD (2011b): unveröffentlichte Daten
- EUTROSYM (1976): UNEP-Symposium über Eutrophierung und Sanierung von Oberflächengewässern. – Karl-Marx-Stadt, 20. – 25.09.1976, Bd. 1, Teil 2.2.
- FEISTEL, R. (2010): IOW Cruise Report 07PE/10/07, 17 – 27 March 2010
- FEISTEL, R., NAUSCH, G., MATTHÄUS, W. and HAGEN E. (2003a): Temporal and spatial evolution of the Baltic deep water renewal in spring 2003. – *Oceanologia* 45 (4), 623-642.
<http://www.iopan.gda.pl/oceanologia/454feis2.pdf>
- FEISTEL, R., NAUSCH, G., MOHRHOLZ, V., ŁYSIAK-PASTUSZAK, E., SEIFERT, T., MATTHÄUS, W., KRÜGER, S. and HANSEN, I.S. (2003b): Warm waters of summer 2002 in the deep Baltic Proper. – *Oceanologia* 45 (4), 571-592.
<http://www.iopan.gda.pl/oceanologia/454feis1.pdf>
- FEISTEL R., NAUSCH, G., HEENE, T., PIECHURE, J. and HAGEN, E. (2004a): Evidence for a warm water inflow into the Baltic Proper in summer 2003. – *Oceanologia* 46, 581-598.
http://www.iopan.gda.pl/oceanologia/46_4.html
- FEISTEL, R., NAUSCH, G., MATTHÄUS, W., ŁYSIAK-PASTUSZAK, E., SEIFERT, T., SEHESTED HANSEN, I., MOHRHOLZ, V., KRÜGER, S., and BUCH, E. (2004b): Background data to the exceptionally warm inflow into the Baltic Sea in late summer of 2002. – *Meereswiss. Ber.* 58, 1-58.
http://www.io-warnemuende.de/documents/mebe58_2004_paper.pdf
- FEISTEL, R., NAUSCH, G., and HAGEN E. (2006a): Unusual Inflow Activity 2002/3 and Varying Baltic Deep-Water Properties. – *Oceanologia*, 48(S), 2006, 21-35.
http://www.iopan.gda.pl/oceanologia/48_S.html#A2
- FEISTEL, R., NAUSCH, G., and HAGEN E. (2006b): Water Exchange between the Baltic Sea and the North Sea, and conditions in the Deep Basins. HELCOM Indicator Fact Sheets 2006, Online 31 Aug 2006,
http://www.helcom.fi/environment2/ifs/en_GB/cover/
- FEISTEL, R., NAUSCH, G., and HAGEN E. (2006c): Response of Baltic Water Properties to the Unusual Inflow Sequence since 2002. ICES CM 2006/C:09, ICES Annual Science Conference 2006. Maastricht, the Netherlands, 19–23 September 2006
- FEISTEL, R., FEISTEL, S., NAUSCH, G., SZARON, J., ŁYSIAK-PASTUSZAK, E. and ÆRTEBJERG, G.: (2008a): BALTIC: Monthly time series 1900 – 2005. In: FEISTEL, R., NAUSCH, G. and WASMUND, N. (Eds), *State and Evolution of the Baltic Sea, 1952 – 2005*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken.
- FEISTEL, R. SEIFERT, T., FEISTEL, S., NAUSCH, G. BOGDANSKA, B. BROMAN, B. HANSEN, L. HOLFORT, J., MOHRHOLZ, V., SCHMAGER, G., HAGEN, E., PERLET, I. and WASMUND, N. (2008b): Digital supplement. In: FEISTEL, R., NAUSCH, G. and WASMUND, N. (Eds.), *State and Evolution of the Baltic Sea 1952-2005*. – John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, p. 625-667.
- FU-BERLIN (2011): Werden auch Sie Wetterpate! <http://www.met.fu-berlin.de/wetterpate/>

- GRASSHOFF, K., ERHARDT, M. and KREMLING, K. (1983): Methods of seawater analysis. – 2nd Ed., Verlag Chemie, Weinheim.
- HAGEN, E. and FEISTEL, R. (2001): Spreading of Baltic Deep Water: A Case Study for the Winter 1997-1998. *Meereswissenschaftliche Berichte IOW*, 45, 99-133.
- HAGEN, E. and FEISTEL, R. (2004): Observations of Low Frequency Current Fluctuations in Deep Water of the Eastern Gotland Basin / Baltic Sea. *J. Geophys. Res.* 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/
- IMGW (2011): Global Solar Radiation at GDYNIA station in 2010. – 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/dhz42koslowski.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.
- LLUR (2010): Sauerstoffmangel im bodennahen Wasser der westlichen Ostsee im September 2010.

- 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., VOLKER 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, 265-309.
- MOHRHOLZ, V. (1998): Transport- und Vermischungsprozesse in der Pommerschen Bucht. – Meereswiss. Ber. **33**, 1-106.
- NAUSCH, G., FEISTEL, R., LASS, H.-U., NAGEL, K. and SIEGEL, H. (2003): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2002. – Meereswiss. Ber. **55**, 1-71.
- NAUSCH, G., FEISTEL, R., LASS, H.-U., NAGEL, K. and SIEGEL, H. (2004): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2003. – Meereswiss. Ber. **59**, 1-80.
- NAUSCH, G., FEISTEL, R., LASS, H.-U., NAGEL, K. and SIEGEL, H. (2007): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2006. – Meereswiss. Ber. **70**, 1-91.
- NAUSCH, G., FEISTEL, R., UMLAUF, L., NAGEL, K. and SIEGEL, H. (2008a): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2007.- Meereswissenschaftliche Berichte Warnemünde **72**, 1-93.
- NAUSCH, G., NEHRING, D. and K. NAGEL (2008b): Nutrient concentrations, trends and their relation to eutrophication. In: FEISTEL, R., NAUSCH, G., WASMUND, N. (Eds.) (2008b): State and evolution of the Baltic Sea, 1952-2005. – John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, 337-366.
- NAUSCH, G., FEISTEL, R., UMLAUF, L., NAGEL, K. and SIEGEL, H. (2010): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2009.- Meereswissenschaftliche Berichte Warnemünde **80**, 1-102.
- NAUSCH, G., BACHOR, A., PETENATI, T., VOSS, J. UND WEBER, M. v. (2011): Nährstoffe in den deutschen Küstengewässern der Ostsee und angrenzenden Gebieten. - Meeresumwelt Aktuell Nord- und Ostsee, 2011/1, ISSN 1867-8874, 1-16.
http://www.blmp-online.de/PDF/Indikatorberichte/2011_o1_d.pdf
- NAUSCH, G. and NEHRING, D. (1996): Baltic Proper, Hydrochemistry. In: Third Periodic Assessment of the State of the Marine Environment of the Baltic Sea. – Balt. Sea Environ. Proc. **64B**, 80-85.
- NEHRING, D. and MATTHÄUS, W. (1991): Current trends in hydrographic and chemical parameters and eutrophication in the Baltic Sea. – Int. Revue 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 (2011): NOAA: 2010 Tied For Warmest Year on Record.
http://www.noaanews.noaa.gov/stories2011/20110112_globalstats.html

- SCHMELZER, N. and HOLFORT, J. (2010): Der Eiswinter 2009/10 an den deutschen Nord- und Ostseeküsten – Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg•Rostock. http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Beobachtungen/Eis/Eiswinter2009_10.pdf
- SCHMELZER, N., SEINÄ, A., LUNDQUIST, J.-E. and SZTOBRYN, M. (2008): Ice, In: Feistel, R., Nausch, G., and Wasmund, N. (Eds.), State and Evolution of the Baltic Sea 1952 – 2005. – John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, p. 199-240.
- SELLSCHOPP, J., ARNEBORG, L., KNOLL, M., FIEKAS, V., GERDES, F., BURCHARD, H., LASS, H.-U., MOHRHOLZ, V., and UMLAUF, L. (2006): Direct observations of a medium-intensity inflow into the Baltic Sea, *Cont. Shelf Res*, **26**, 2393-2414.
- SIEGEL, H., GERTH, M. and SCHMIDT, T. (1996): Water exchange in the Pomeranian Bight – investigated by satellite data and shipborne measurements. – *Cont. Shelf Res* **16**, 1793-1817.
- SIEGEL, H., GERTH, M., TIESEL, R. and TSCHERSICH, G. (1999): Seasonal and interannual variations in satellite derived sea surface temperature of the Baltic Sea in the 1990s. – *Dt. Hydrogr. Z.* **51**, 407-422.
- SIEGEL, H., GERTH, M. and TSCHERSICH, G. (2006): Sea Surface Temperature development of the Baltic Sea in the period 1990-2004 – *Oceanologia* **48** (S), 119-131.
- SIEGEL, H., and GERTH, M., 2008. Development of Sea Surface Temperature in the Baltic Sea in 2007. HELCOM Indicator Report, http://www.helcom.fi/environment2/ifs/ifs2008/en_GB/sst/
- SIEGEL, H., and GERTH, M., 2009. Development of Sea Surface Temperature in the Baltic Sea in 2008. HELCOM Indicator Report, http://www.helcom.fi/environment2/ifs/ifs2009/en_GB/SeaSurfaceTemperature/
- 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): unveröffentlichte Daten.
- 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., (2010): IOW Cruise Report o6AK/10/o3. http://www.io-warnemuende.de/tl_files/forschung/pdf/cruise-reports/cro6ak10o3.pdf

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 Salzwassereintritten in die Ostsee
- 13 (1996) Meyer-Harms, Bettina:
Ernährungsstrategie calanoider Copepoden in zwei unterschiedlich trophierten Seegebieten der Ostsee (Pommernbucht, Gotlandsee)
- 14 (1996) Reckermann, Marcus:
Ultraplankton and protozoan communities and their interactions in different marine pelagic ecosystems (Arabian Sea and Baltic Sea)
- 15 (1996) Kerstan, Eberhard:
Untersuchung der Verteilungsmuster von Kohlenhydraten in der Ostsee unter Berücksichtigung produktionsbiologischer Meßgrößen
- 16 (1996) Nehring, Dietwart; Matthäus, Wolfgang; Lass, Hans Ulrich; Nausch, Günther; Nagel, Klaus:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1995
- 17 (1996) Brosin, Hans-Jürgen:
Zur Geschichte der Meeresforschung in der DDR
- 18 (1996) Kube, Jan:
The ecology of macrozoobenthos and sea ducks in the Pomeranian Bay
- 19 (1996) Hagen, Eberhard (Editor):
GOBEX - Summary Report
- 20 (1996) Harms, Andreas:
Die bodennahe Trübezone der Mecklenburger Bucht unter besonderer Betrachtung der Stoffdynamik bei Schwermetallen
- 21 (1997) Zülke, Christoph; Hagen, Eberhard:
GOBEX Report - Hydrographic Data at IOW
- 22 (1997) Lindow, Helma:
Experimentelle Simulationen windangeregter dynamischer Muster in hochauflösenden numerischen Modellen
- 23 (1997) Thomas, Helmuth:
Anorganischer Kohlenstoff im Oberflächenwasser der Ostsee
- 24 (1997) Matthäus, Wolfgang; Nehring, Dietwart; Lass, Hans Ulrich; Nausch, Günther; Nagel, Klaus; Siegel, Herbert:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1996

- 25 (1997) v. Bodungen, Bodo; Hentzsch, Barbara (Herausgeber):
Neue Forschungslandschaften und Perspektiven der Meeresforschung - Reden und Vorträge zum Festakt und Symposium am 3. März 1997.
- 26 (1997) Lakaschus, Sönke:
Konzentrationen und Depositionen atmosphärischer Spurenmetalle an der Küstenstation Arkona
- 27 (1997) Löffler, Annekatrin:
Die Bedeutung von Partikeln für die Spurenmetallverteilung in der Ostsee, insbesondere unter dem Einfluß sich ändernder Redoxbedingungen in den zentralen Tiefenbecken
- 28 (1998) Leipe, Thomas; Eidam, Jürgen; Lampe, Reinhard; Meyer, Hinrich; Neumann, Thomas; Osadczuk, Andrzej; Janke, Wolfgang; Puff, Thomas; Blanz, Thomas; Gingele, Franz Xaver; Dannenberger, Dirk; Witt, Gesine:
Das Oderhaff. Beiträge zur Rekonstruktion der holozänen geologischen Entwicklung und anthropogenen Beeinflussung des Oder-Ästuars.
- 29 (1998) Matthäus, Wolfgang; Nausch, Günther; Lass, Hans Ulrich; Nagel, Klaus; Siegel, Herbert:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1997
- 30 (1998) Fennel, Katja:
Ein gekoppeltes, dreidimensionales Modell der Nährstoff- und Planktondynamik für die westliche Ostsee
- 31 (1998) Lemke, Wolfram:
Sedimentation und paläogeographische Entwicklung im westlichen Ostseeraum (Mecklenburger Bucht bis Arkonabecken) vom Ende der Weichselvereisung bis zur 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