

Meereswissenschaftliche Berichte

Marine Science Reports



No 93 2014

Hydrographisch-hydrochemische

Zustandseinschätzung der Ostsee 2013

Günther Nausch, Michael Naumann, Lars Umlauf, Volker Mohrholz und
Herbert Siegel

"Meereswissenschaftliche Berichte" veröffentlichen Monographien und Ergebnisberichte von Mitarbeitern des Leibniz-Instituts für Ostseeforschung Warnemünde und ihren Kooperationspartnern. Die Hefte erscheinen in unregelmäßiger Folge und in fortlaufender Nummerierung. Für den Inhalt sind allein die Autoren verantwortlich.

"Marine Science Reports" publishes monographs and data reports written by scientists of the Leibniz-Institute for Baltic Sea Research Warnemünde and their co-workers. Volumes are published at irregular intervals and numbered consecutively. The content is entirely in the responsibility of the authors.

Schriftleitung: Dr. Norbert Wasmund
(norbert.wasmund@io-warnemuende.de)

Die elektronische Version ist verfügbar unter / The electronic version is available on:
<http://www.io-warnemuende.de/meereswissenschaftliche-berichte.html>



© Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Lizenz CC BY-NC-ND 4.0 International. Mit dieser Lizenz sind die Verbreitung und das Teilen erlaubt unter den Bedingungen: Namensnennung - Nichtkommerziell - Keine Bearbeitung.

© This work is distributed under the Creative Commons License which permits to copy and redistribute the material in any medium or format, requiring attribution to the original author, but no derivatives and no commercial use is allowed, see:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

ISSN 2195-657X

Dieser Artikel wird zitiert als /This paper should be cited as:

Günther Nausch¹, Michael Naumann¹, Lars Umlauf¹, Volker Mohrholz¹, Herbert Siegel¹:
Hydrographisch-hydrochemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2013.
Meereswiss. Ber., Warnemünde, 93 (2014)
DOI: 10.12754/msr-2014-0093

Adressen der Autoren:

¹ Leibniz Institute for Baltic Sea Research (IOW), Seestraße 15, D-18119 Rostock-Warnemünde, Germany

E-mail des verantwortlichen Autors: guenther.nausch@io-warnemuende.de

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Kurzfassung	4
Abstract	4
1. Einleitung	5
2. Meteorologische Bedingungen	8
3. Wasseraustausch durch die Ostseezugänge/ Beobachtungen an der Messplattform „Darßer Schwelle“	29
3.1 Statistische Analyse	29
3.2 Erste Jahreshälfte mit Einströmen im Februar und März/April	33
3.3 Die Herbstmonate mit Einströmen im Oktober/November und Dezember	37
4. Beobachtungen an der Bojenstation „Arkonabecken“	38
5. Beobachtungen an der Bojenstation „Oder- Bank“	43
6. Hydrographisch- hydrochemische Bedingungen	48
6.1. Wassertemperatur	48
6.1.1 Die Wasseroberflächentemperatur abgeleitet aus Satellitendaten	48
6.1.2 Vertikalverteilung der Wassertemperatur	57
6.2 Salzgehalt	65
6.3 Sauerstoff-, und Schwefelwasserstoffverteilung	70
6.4 Anorganische Nährstoffe	81
Zusammenfassung	95
Summary	97
Danksagung	100
Literaturverzeichnis	101

Kurzfassung

Die Arbeit beschreibt die hydrographisch-chemischen Bedingungen in der westlichen und zentralen Ostsee für das Jahr 2013. Basierend auf den meteorologischen Verhältnissen werden die horizontalen und vertikalen Verteilungsmuster von Temperatur, Salzgehalt, Sauerstoff/Schwefelwasserstoff sowie der anorganischen und Nährstoffe mit saisonaler Auflösung dargestellt.

Für den südlichen Ostseeraum ergab sich aus der Kältesumme an der Station Warnemünde von 109,5 K d ein mäßiger Winter 2012/13. Der Wert lag nur knapp über dem langjährigen Mittelwert von 104,5 K d und belegte den 26. Platz der kältesten Winter seit Beginn der Vergleichsdaten im Zeitraum ab 1948. Mit einer Jahreswärmesumme von 230,4 K lag das Jahr weit außerhalb des langjährigen Mittels von 148,8 K d und reiht sich auf Platz 10 im Zeitraum der letzten 66 Jahre ein.

Einstromereignisse mit geschätzten Volumina zwischen 100 und 300 km³ fanden in der Ostsee 2013 vier Mal statt. Von Ende Dezember 2012 bis Anfang Januar 2013 konnte ein Einstromvolumen von 157 km³ errechnet werden. Ein weiterer Einstrom mit einem geschätzten Volumen von 195 km³ schloss sich vom 28.01. bis 7.02. an. Beide Ereignisse können als barotrop bewertet werden. Eine eher barokline Phase erstreckt sich über einen Zeitraum von 32 Tagen vom 26.03. bis 27.04. mit rund 160 km³ Wasservolumen. Zusätzlich ist ab Ende Oktober ein weiterer barotroper Zustrom erkennbar. Vom 22.10. bis 7.11. gelangen durch eine Aneinanderreihung kürzer Phasen von starkem Westwind etwa 200 km³ Wasser in die Ostsee. Die Einströme erreichten aber nicht die zentrale Gotlandsee, wo die Stagnationsperiode unvermindert anhielt.

Abstract

The article summarizes the hydrographic-chemical conditions in the western and central Baltic Sea in 2013. Based on meteorological conditions, the horizontal and vertical distribution of temperature, salinity, oxygen/hydrogen sulphide and inorganic and organic nutrients are described on a seasonal scale.

For the southern Baltic, the “cold sum” of the air temperature in Warnemünde of 109.5 K d 2012/13 ranks on place 26 of the coldest winters since the beginning of the record in 1948 and was slightly above the long-term mean. The summer “heat sum” of 230.4 K d was well above the long-term mean of 148.8 K d and ranks on place 10 of the warmest summers.

In 2013, inflow events with estimated volumes between 100 and 300 km³ took place four times: in December 2012/January 2013 (157 km³), in January/February (195 km³); both of barotropic type. A more baroclinic inflow in March April brought 160 km³ into the Baltic. In November/December several phases of westerly winds imported around 200 km³. However, all these inflow events did not reach the central Gotland Sea where the stagnation period continued undiminished.

1. Einleitung

Die Einschätzung des hydrographisch-chemischen Zustandes der Ostsee im Jahr 2013 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 2013 wurden fünf reguläre Monitoring-Fahrten durchgeführt, die alle vier Jahreszeiten sowie zusätzliche Beobachtungen im März/April umfassten. Die Zustandseinschätzung basiert auf den Daten, die im Rahmen dieser Überwachungsfahrten gewonnen wurden sowie auf Ergebnissen anderer Forschungsarbeiten des IOW. Ausgewählte Daten von Forschungseinrichtungen anderer Ostseeanliegerstaaten, insbesondere des *Schwedischen Meteorologischen und Hydrologischen Instituts (SMHI)* und der *Maritimen Abteilung des Polnischen Instituts für Meteorologie und Wasserwirtschaft (IMGW)* wurden in die Auswertung einbezogen. Die Lage der wesentlichsten Stationen, die in die nachfolgenden Auswertungen einbezogen wurden, ist aus Abb. 1 zu entnehmen. Die internationale Zuordnung dieser Stationen ist bei NAUSCH et al. (2003) zusammengestellt.

Grundlage des hydrographisch-hydrochemischen Standard-Messprogramms, das mit den Forschungsschiffen „Alkor“ (Februar), sowie „Elisabeth Mann Borgese“ (März, Mai, Juli/August, November) durchgeführt wurde, sind die Richtlinien der HELCOM für die Überwachung der Ostsee im Rahmen des COMBINE-Programms (HELCOM, 2000). Angaben über die Gewinnung der Wasserproben und die untersuchten Parameter sowie über die verwendeten Messverfahren und ihre Genauigkeit sind bei NEHRING et al. (1993, 1995) enthalten.

Die schiffsgebundenen Untersuchungen wurden durch Messungen an drei autonomen Stationen des deutschen Umweltüberwachungs-Messnetzes MARNET ergänzt (siehe Abb. 1). Die Station ARKONA-BECKEN ist nach ihrer Generalüberholung seit Juni 2012 wieder in Betrieb. Die Station DARSSER SCHWELLE wurde ebenfalls generalüberholt, die Wiederinbetriebnahme wurde im August 2013 abgeschlossen. Die Station ODER-BANK wurde planmäßig zur Winterpause 2013/2014 außer Betrieb genommen. Sie war 2013 von

Anfang Juli bis Mitte Dezember im Einsatz. Autonom registrierende Geräte an separat ausgebrachten Unterwasserverankerungen kompensierten die Ausfallzeiten partiell. Details sind den Kapiteln 3-5 zu entnehmen.

Neben meteorologischen Parametern wurden an diesen Stationen die Wassertemperatur und der Salzgehalt sowie der Sauerstoffgehalt in verschiedenen Tiefen registriert:

DS:	6 Horizonte T + S	+ 2 Horizonte O ₂
AB:	8 Horizonte T + S	+ 2 Horizonte O ₂
OB:	2 Horizonte T + S	+ 2 Horizonte O ₂

Alle Daten werden als Stundenmittel aus 6 Messungen telemetrisch via Wettersatellit (METEOSAT) an die Datenbank des BSH übertragen (KRÜGER et al., 1998; KRÜGER, 2000a, b). Angaben über die Strömungsverhältnisse im Bereich der Darßer Schwelle und der Station „Arkonabecken“ liefern jeweils ein selbst registrierender akustischer Doppler-Profil-Strömungsmesser (ADCP). Die ADCP an der DS und bei der AB befinden sich jeweils ca. 200 m von der Hauptstation entfernt am Boden, geschützt in einem überschleppbaren Bodengestell mit Releaser (Eigenentwicklung). Sie werden im Echtzeitmodus betrieben, d.h. sie geben jede Stunde einmal ihre Messwerte an die Hauptstation zur Speicherung und Satellitenübertragung über eine akustische Datenverbindung ab. Die in den Geräten selbst registrierten Daten werden in der Regel zur Qualitätssicherung und für Servicezwecke bei den ein- bis zweimal 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 2013 wurde im Vergleich zu den Mittelwerten des Untersuchungszeitraumes 1990-2010 und zu extremen Jahren vorgenommen und konzentriert sich auf das neu definierte Untersuchungsgebiet.

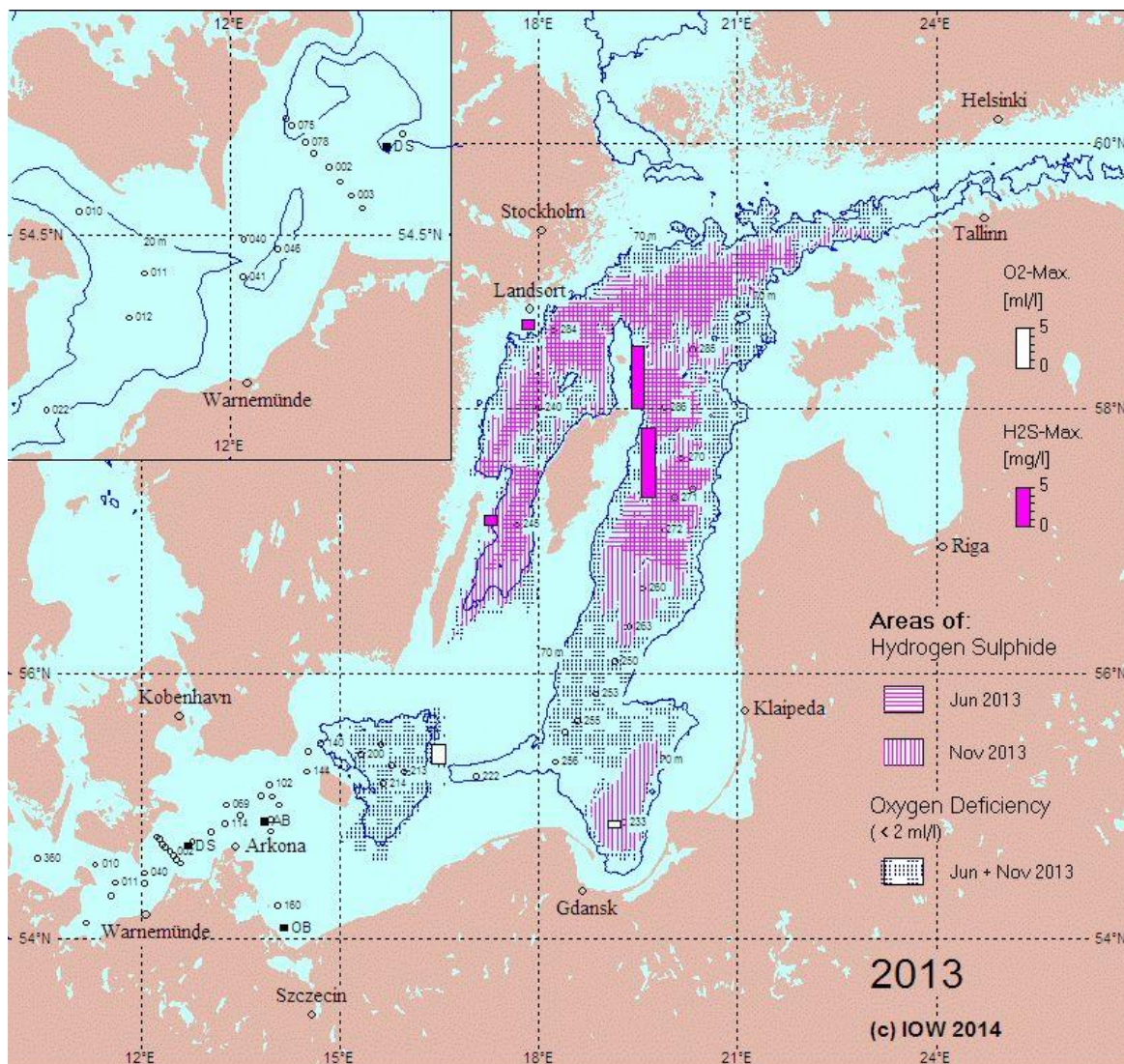


Abb. 1: Stationskarte (■ MARNET-Stationen) und Gebiete mit Sauerstoffmangel und Schwefelwasserstoff in der grundnahen Wasserschicht der Ostsee sowie maximale Sauerstoff- und Schwefelwasserstoffkonzentrationen an ausgewählten Stationen (Säulen) im Jahre 2013; die Abb. enthält zusätzlich die 70 m -Tiefenlinie 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. Bars show the maximum oxygen and hydrogen sulphide concentrations of this layer in 2013; the figure contains additionally the 70 m -depth line resp. 20 m -depth line (small picture)

2. Meteorologische Bedingungen

Für die nachfolgende Beschreibung der Witterungsverhältnisse im südlichen Ostseeraum wurden Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD), des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), des Schwedischen Meteorologischen und Hydrographischen Instituts (SMHI), des polnischen Instituts für Meteorologie und Wassermanagement (IMGW), der Freien Universität Berlin (FU) sowie institutseigene Datenerhebungen ausgewertet. Einen allgemeinen Überblick des Jahresverlaufs 2013 liefert die Tabelle 1 mit monatlichen Mittelwerten für Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Sonnenscheindauer, Niederschlag sowie die Anzahl von Frost- und Eistagen der Wetterstation Arkona. Zusätzlich ist die Sonneneinstrahlung an der Station Gdynia angegeben. Die Wärme- und Kältesummen sind für die Wetterstation Warnemünde und im Vergleich auch für Arkona in den Tabellen 2 und 3 aufgeführt.

Nach Einschätzung des Deutschen Wetterdienstes (DWD, 2013) ist das Jahr 2013 für das gesamtdeutsche Staatsgebiet im Vergleich zum dreißigjährigen Referenzzeitraum 1981-2010 von den Temperaturen in weiten Teilen zu kühl, der Niederschlag ausgeglichen und die Sonnenscheindauer fast überall unter dem Durchschnitt. Die Jahresmitteltemperatur von 8,7 °C lag mit nur 0,2 K knapp unter dem Mittelwert, stellt jedoch den drittkältesten Wert nach 1996 und 2010 im Referenzzeitraum dar. Dabei waren die Monate Januar bis Mai sowie September zu kalt, der Juni erreichte den Mittelwert und die übrigen Monate fielen zu warm aus. Im Dezember wurde die größte positive Abweichung von 2,4 K verzeichnet, während der März um 4,2 K zu kalt war.

Die Niederschlagshöhe von deutschlandweit 774 mm lag 4 % unter dem Mittel von 808 mm. An der Ostseeküste wurden im Vergleich dazu abschnittsweise Niederschlagshöhen von unter 600 mm registriert. Fehmarn weist mit 508 mm den zweitniedrigsten Wert nach Angermünde (483 mm) im deutschlandweiten Vergleich auf.

Die Jahressumme von im Mittel 1508 Sonnenstunden blieb 5 % unter dem vieljährigen Mittelwert von 1588 Stunden. Spitzenreiter war die Station Arkona mit 1950 Stunden vor der Zugspitze mit 1821 Stunden. In weiten Teilen Deutschlands unterschritten die Jahressummen mehr als 10 % die langjährigen Mittelwerte, während Teile Schleswig-Holsteins und entlang der Ostseeküste überdurchschnittlich viel Sonnenschein verzeichneten (z.B. Warnemünde 107 %). In der Jahresbilanz war der Winter 2012/13 der sonnenscheinärmste seit Beginn der flächendeckenden Aufzeichnungen 1951, der Sommer hingegen belegte den 6. Platz.

2.1 Der Eiswinter 2012/2013

Für den südlichen Ostseeraum ergab sich aus der Kältesumme an der Station Warnemünde von 109,5 K d ein mäßig warmer Winter 2012/13 (Tab. 2). Der Wert lag nur knapp über dem langjährigen Mittelwert von 104,5 K d und belegte den 26. Platz der kältesten Winter seit Beginn der Vergleichsdaten im Zeitraum ab 1948. Im Vergleich war die Kältesumme an der Station Arkona mit 87,5 K d deutlich niedriger (Tab. 3). Aufgrund der exponierten Lage des Nordteils der Insel Rügen, der von größeren Wassermassen umgeben ist, wird die lokale Lufttemperaturentwicklung noch stärker von der Wassertemperatur der Ostsee – maritim – beeinflusst (vgl. Kap. 6.1.1). Im Winter ergaben sich je nach Temperatur der Arkonasee häufig mildere Werte und im Sommer wurde die Lufttemperatur im Vergleich zu südlicheren Küstenstandorten entlang des Festlandes stärker gedämpft. Der mäßig warme Temperaturverlauf des Winters spiegelte sich auch in der Eisbildung wieder. In beinahe regelmäßigen Abständen traten Frost- und Tauwetterphasen auf und resultierten nach SCHMELZER et al. (2013) in vier voneinander getrennten Eisperioden (6. Dezember 2012 bis Anfang Januar 2013, Mitte bis Ende Januar, 10. bis 20. Februar, Mitte März bis Anfang April). Die ungewöhnlich späte und langanhaltende Kältephase bis Anfang April wurde durch ein stabiles, kräftiges Hochdruckgebiet über Nordeuropa ausgelöst. Es führte etwa 3 Wochen lang sehr kalte arktische Luftmassen bis in den norddeutschen Raum und sorgte für starken Nachtfrost (z.B. am 24.3. in Ückermünde $-11,7\text{ °C}$) sowie gelegentlichen Schneefall. Bedingt durch diesen Witterungsverlauf stellte sich die maximale Eisbedeckung der Ostsee etwa 4 Wochen später als im Mittel ein. Am 25.3. erreichte sie den Maximalwert von 187 000 km² (SCHMELZER et al., 2013), so dass rund 45 % der Ostseefläche von 415266 km² vereist war. Die flächenhafte Ausdehnung wird in Kapitel 6.1 kartographisch dargestellt (Abb. 22). Der Wert befand sich annähernd auf dem Niveau des Vorjahres von 179 000 km² und unterschritt um rund 13 % den Mittelwert von 214 000 km² der Zeitreihe ab dem Jahr 1720 (Abb. 2). Im Vergleich dazu wurde der sehr niedrige 30-jährige Mittelwert von 170 000 km², wie schon in den letzten drei Wintern, überschritten. Dies deutet auf eine Stagnation bis leichte Zunahme des generellen Trends zu niedriger Eisbedeckung in den letzten drei Dekaden hin.

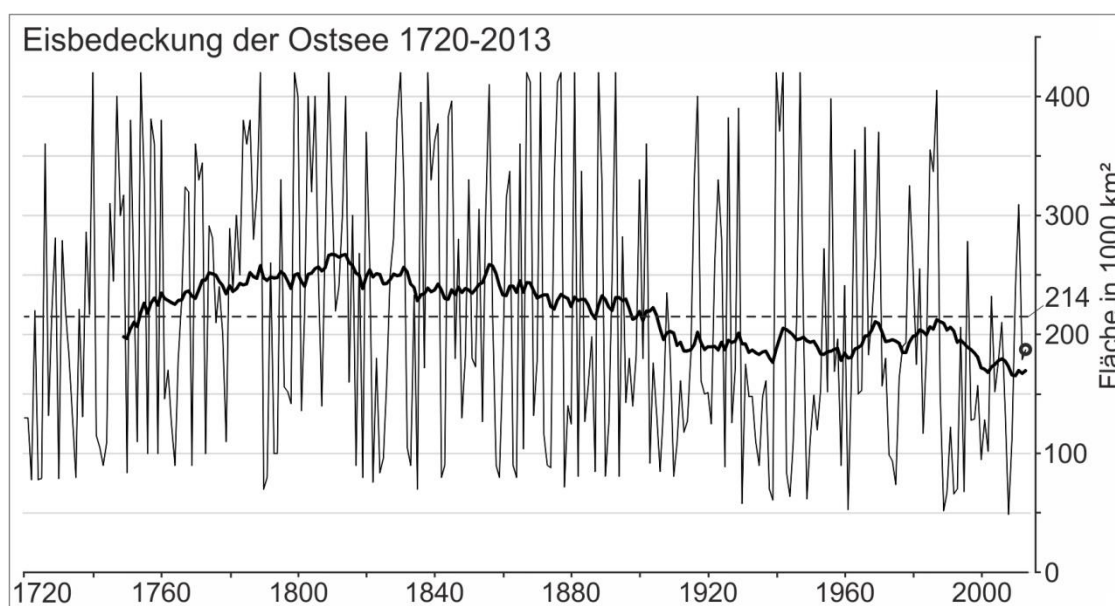


Abb. 2: Maximale Eisbedeckung der Ostsee in 1000 km² in den Jahren 1720 bis 2013 (nach Daten von SCHMELZER et al., 2008, 2013). Der Langzeitmittelwert von 214 000 km² ist gestrichelt dargestellt. Die dicke Linie ist ein gleitender Mittelwert über die vorherigen 30 Jahre. Der Kreis zeigt die Eisbedeckung im Winter 2012/2013 mit 187 000 km²

Fig. 2: Maximum ice covered area in 1000 km² of the Baltic Sea in the years 1720 to 2013 (from data of SCHMELZER et al., 2008, 2013). The long-term average of 214 000 km² is shown as dashed line. The bold line is a running mean value over the past 30 years. The ice coverage in the winter 2012/2013 with 187 000 km² is encircled

Das maximale Eisvolumen von 34,9 km³ wurde erst eine Woche später am 2.4. erreicht. Beide Werte zusammenfassend, wurde der Winter als mäßiger Eiswinter für den gesamten Ostseeraum von SCHMELZER et al. (2013) klassifiziert.

Entlang der deutschen Ostseeküste wurde die lokale Situation als schwacher Eiswinter anhand der flächenbezogenen Eisvolumensumme von 0,38 m eingeschätzt. Dieser Index dient neben verschiedenen anderen Indices zur Beschreibung des Ausmaßes der Vereisung und wurde 1989 für die Bewertung der Situation in den deutschen Küstengebieten eingeführt (KOSLOWSKI, 1989; BSH, 2009). Zusätzlich zur Dauer der Vereisung werden der Bedeckungsgrad und die Eisdicke zur Bestimmung hinzugezogen, um den häufig unterbrochenen Vereisungsperioden in den einzelnen Wintern besser gerecht zu werden. Dafür werden die täglichen Werte an den 13 Eisklimastationen entlang der deutschen Ostseeküste zeitlich aufsummiert. Die höchsten bisher registrierten Werte waren in den Jahren 1942 (26,83 m), 1940 (26,71 m), 1947 (25,26 m) sowie 1963 (23,07 m). In allen anderen Wintern lagen die Werte weit unter 20 m (KOSLOWSKI, 1989). Der Eisvolumensumme des Winters 2013 mit 0,38 m ist deutlich geringer als in den Vorjahren 2012 (1,12 m), 2011 (2,45 m) und 2010 (4,22 m). Zusätzlich variieren die Werte kleinräumig gebunden an die

lokale Küstenmorphologie und Hydrodynamik. So vereisen die flachen Boddengewässer und Teile der Pommerschen Bucht im Ostteil regelmäßig, während die Fördenküste in Schleswig-Holstein seltener vereist. Im Winter 2013 weist die Küste Mecklenburg-Vorpommerns eine flächenbezogene Eisvolumensumme von 0,63 m auf, die als mäßiger Eiswinter klassifiziert wird, während im Schleswig-Holsteiner Teil nur 0,08 m registriert wurden (sehr schwacher Eiswinter). So registrierten die Stationen Landtief in der Pommerschen Bucht 15 Eistage, die Vierendehl-Rinne im Süden Rügens 64 Eistage und Warnemünde einen Tag. Alle westlicheren und nördlicheren Seegebiete mit Ausnahme der Flensburger Innenförde und Häfen blieben nach Angaben des BSH-Meeresdatenportals sowie SCHMELZER et al. (2013) eisfrei.

2.2 Jahresverlauf der Witterung

Besonders zu Jahresbeginn wechselten die Drucksysteme und Luftströmungen häufig mit Dominanz östlicher bis nordöstlicher Windrichtungen (Abb. 4 a). Erst im letzten Drittel war das Jahr geprägt durch die typische Hauptwindrichtung aus Südwesten (Abb. 4a, b). Die nachfolgend angegebenen Namen für Hoch- und Tiefdruckgebiete wurden vom Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin vergeben. Dieses erfolgte in guter Tradition seit 1954 und seit 2002 auch über so genannte „Wetterpatenschaften“ (FU-Berlin, 2013a).

Der **Januar** begann stürmisch, regnerisch und mild mit Tief „Alfredo“. Es schloss sich eine Dauerfrostperiode mit Schneefall und gebietsweise auch Eisregen an. Mit dem Wetterwechsel kam die seit 24.12.2012 andauernde Einstromphase zum Erliegen, die mit rund 157 km³ Wasservolumen nur als kleinerer Einstrom zu bewerten ist. Bis zum 25.01. beeinflusste ein Wechsel aus Hochdruckwetterlagen, z.B. als Hochdruckbrücke mit Kernen über Frankreich und Sibirien und zyklonalen sowie antizyklonalen Kernen über dem Nordmeer den Ostseeraum. Dabei kam es nur kurzzeitig durch eine Trogbildung zur Unterbrechung, die von Skandinavien bis zum Mittelmeer reichte. Anschließend stellte sich bis zum Monatsende wieder atlantischer Tiefdruckeinfluss durch die Abfolge der Tiefs „Jolle“, „Kerim“ und „Lennart“ mit milden Luftmassen in ganz Mitteleuropa ein. Nach einer kurzen Starkwindphase mit Südwest- bis Westwind, dominierten im weiteren Verlauf hauptsächlich moderate Winde aus nordöstlicher bis östlicher Richtung, die erst zum Monatsende wieder auf Süd bis Südwest drehten und zunahmen (Abb. 4a). Das führte zu einem Anstieg des Wasserstandes am Anfang des Monats. Im weiteren Monatsverlauf sorgte die langanhaltende Ostwindphase für einen Ausstrom mit etwa 60 cm abfallendem Pegelstand in der zentralen Ostsee (siehe Abb. 7a).

Der Temperaturverlauf wies im Januar nur geringe Abweichungen von 0,3 K unter dem langjährigen Mittel entlang der deutschen Ostseeküste auf. Die Sonnenscheindauer war gering und mit deutschlandweit 22 Stunden der sonnenscheinärmste Januar seit 1951. An der Station Arkona wurden beispielsweise nur 53 % der mittleren Zeitdauer gemessen (Tab. 1). Die Küste Vorpommerns verzeichnete hohe Niederschlagsmengen (Arkona 185 %), während die Westhälfte Deutschlands zu trocken war. Die größten Mengen fielen zu Beginn und Monatsende als Regen.

Der **Februar** startete durch die anhaltende West-Nordwestlage (Tiefs „One“ und „Pille“) mild und stürmisch aus westlichen bis nordwestlichen Richtungen. So wurden zum Beispiel am 4.2. in Lübeck 11 Bft und am 5.2. auf Fehmarn 10 Bft gemessen. Dieses Windereignis drückte ein Wasservolumen von etwa 195,1 km³ in die Ostsee hinein und sorgte für einen Pegelanstieg von rund 55 cm innerhalb von 9,5 Tagen in Landsort (Abb. 7a). Anschließend sorgte ein Trog über Mitteleuropa für den Zustrom polarer Kaltluft (z.B. am 10.2. in Oberstdorf -22,9 °C), die bis Südeuropa vordrang. Ab dem 11.02. stellte sich zyklonaler Hochdruckeinfluss mit dem Zentrum über Fennoskandien ein, gefolgt von einer antizyklonalen Nordostlage (Hoch „Fenne“), die sich von Nordosteuropa bis Westeuropa ausdehnte. Diese wurde am 19.02. durch eine zyklonale Nordostlage abgelöst, die als Starkwindphase bis zum 27.02. anhielt und für einen erneuten Ausstrom sorgte (Abb. 7a). Zum Monatsende hatte Hoch „Fenne“ sein Zentrum über die Britischen Inseln verlagert und brachte feuchte, milde Luftmassen nach Mitteleuropa.

Die Monatstemperatur entlang der deutschen Ostseeküste war etwa 1,2 K zu kühl und mit nur 13 Sonnenstunden erreichte die Station Arkona den tiefsten Wert im gesamtdeutschen Vergleich. Mit durchschnittlich 33 Stunden lag die Sonnenscheindauer auch im Februar weit unter dem vieljährigen Mittel von 76 Stunden und knüpfte an den Januar an. Auch der Februar 2013 ist der sonnenscheinärmste seit Beginn flächendeckender Aufzeichnungen im Jahr 1951. Die Niederschlagsmengen waren entlang der Ostseeküste auf Niveau des langjährigen Mittels, jedoch fiel die Station Arkona mit 170 % deutlich zu nass aus. In der Westhälfte Deutschlands war es wie schon im Januar zu trocken.

Hoch „Fenne“ über den Britischen Inseln blieb auch noch zu Beginn des **März** wetterbestimmend mit milden atlantischen Luftmassen und Wind aus Nordwest.

Es folgte bis zum 07.03. eine antizyklonale Südostlage, die mit südlichen bis südöstlichen Winden weiterhin milde Luftmassen heran brachte. In Düsseldorf wurde dabei am 06.03. die Maximaltemperatur des Monats von 20,2 °C gemessen.

Anschließend setzte bis Monatsende sehr kalte winterliche Witterung mit Dauerfrost und Schnee im Ostseeraum ein. Die Hochdruckgebiete „Hildi“, „Jill“ und „Katrin“ über Skandinavien blieben für längere Zeit wetterbestimmend, während im Süden Tiefs mit subtropischen Luftmassen in einer Tiefdruckrinne über Mittel- und Südeuropa entlang zogen. Die Ursache für die Dominanz von Hochdruckgebieten im Norden Europas ist der deutlich negative NAO-Index. Dabei waren Azorenhoch und Islandtief vergleichsweise schwach ausgeprägt, was zu fehlenden stärkeren Druckgegensätzen im Nordatlantik führte. Als Folge waren Hochdruckgebiete über Skandinavien weit nach Süden ausgebreitet und blockierten Tiefdruckgebiete. Im Verlauf des März dominierten nordöstliche Windrichtungen mit einer Aneinanderreihung von Starkwindphasen (Abb. 4a). So wurden am 10. und 19.03. Tagesmittelwerte von 19,61 m/s sowie 18,11 m/s an der Station Arkona aufgezeichnet (Abb. 5a). Das führte mit kurzen Unterbrechungen zu einem seit Mitte Februar anhaltendem Ausstrom der Wassermassen. In der zentralen Ostsee wurde an der Station Landsort Norra am 26.03. der niedrigste Pegel des Jahres mit 48 cm unter dem mittleren Wasserstand aufgezeichnet.

Insgesamt war der Temperaturverlauf deutlich zu kalt. Mit 4,2 K unter dem langjährigen Mittelwert war der März knapp kälter als der Januar. Der niedrigste Wert wurde am 16.3. in

Oberstdorf mit $-17,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ registriert. So wurden an vielen Orten die Märzschneehöhenrekorde getoppt (z.B. Hamburg, Köln, Bonn, Frankfurt). Am 10.03. lag Berlin beispielsweise unter einer Schneedecke von 20 cm. An der Ostseeküste war der Monat im Mittel etwa $4,5\text{ K}$ zu kalt, die Sonnenscheindauer jedoch im Durchschnitt. Vor allem an den Küsten im Norden und Nordosten war es sonnenreich, während der Südwesten sonnenarm war.

Die winterlichen Verhältnisse mit aus Osten einströmender arktischer Kaltluft setzten sich im **April** durch Hochdruckgebiete über dem Nordmeer („Liebhild“, „Monika“) weiter fort. Erst im zweiten Monatsdrittel strömte milde Luft aus Südwesten durch eine Abfolge von Tiefdruckgebieten ein. Zu diesem Zeitpunkt war die Vegetationsentwicklung durch die ungewöhnlich lange Kältephase etwa 3 Wochen im Rückstand. Die bedeutendsten Windereignisse von teilweise über 17 m/s (7-8 Bft) in einzelnen Stundenmittelwerten an der Station Arkona wurden durch die Tiefs „Michael“ und „Peter“ im Zeitraum vom 18. bis 24.04. hervorgerufen (Abb. 5a). Nach anfänglichem Nordostwind dominierten im Monatsverlauf westliche bis südwestliche Windrichtungen (Abb. 4a). Dies führte zu kontinuierlichem Wassereinstrom und einem Pegelanstieg um etwa 53 cm an der Station Landsort Norra (Abb. 7a). Im Zeitraum von 32 Tagen strömten bis zum 27.04. rund 161 km^3 Wasservolumen bis in zentrale Ostseeteile. Die Monatstemperaturen waren an der südlichen Ostsee um etwa $0,7\text{ K}$ zu kühl, während die deutschlandweite Situation durch zu warme Temperaturen im Süden ausgeglichen wurde. Als niedrigste Temperatur wurden $-11,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ am 02.04. in Carlsfeld gemessen, während Cottbus $27,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ am 18.04. als Monatsmaximum zu verzeichnen hatte. Die Sonnenscheindauer blieb mit 142 Stunden unter dem Mittel von 168 Stunden. Sie wurde jedoch an den Küsten deutlich überschritten. Arkona war mit 231 Stunden die sonnigste Station. Insgesamt war der April zu trocken, so fiel an der Ostseeküste etwa 37 % zu wenig Niederschlag.

Im **Mai** wurde die Witterung weiterhin vorrangig durch Tiefdruckgebiete gesteuert. Dabei unterlag die Westhälfte häufig nördlichen Strömungsrichtungen mit kühlen und nassen Luftmassen während die Osthälfte aus südlicher Richtung durch warme und feuchte Luft beeinflusst wurde. Dabei dominierte nach einer Hochdruckbrücke über Mitteleuropa zu Monatsbeginn im weiteren Verlauf eine Abfolge von Tiefdruckgebieten aus westlichen und südlichen Richtungen den Raum. Im letzten Teil des Monats strömten mit vorherrschenden östlichen Winden ein weiteres Mal kalte Luftmassen in den Raum ein. Vom 29.-31.05. kam es durch Tief „Frederik“ über Mitteleuropa zu unwetterartigen Regenmengen im Osten und Süden Deutschlands, die zu Hochwasser entlang der kleineren bis mittleren Flüsse führten. Der Monatsverlauf war von leichten bis moderaten Windverhältnissen geprägt. An der Station Arkona wurde die Marke von 5 Windstärken ($8-10,8\text{ m/s}$) in den Tagesmittelwerten nicht überschritten (Abb. 5a). Dabei wurde der erste Teil des Monats durch westliche und der Zweite durch nordöstliche Windrichtungen geprägt (Abb. 4a). Aufgrund der moderaten Windstärke pendelte der Füllstand der Ostsee auf einem Niveau von etwa 10 cm unter dem mittleren Wasserstand (Abb. 7a). Der Temperaturverlauf war an der Ostsee im Mai um $0,4\text{ K}$ zu warm, während das übrige Deutschland Werte unter dem Mittel aufwies. Mit $11,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ist die Monatsmitteltemperatur um $1,2\text{ K}$ zu kalt. Die Sonnenscheindauer war fast überall weit unter dem vieljährigen Mittel von 205 Stunden und betrug 136 Stunden im

Bundesdurchschnitt. Die Station Arkona war auch im Mai Spitzenreiter mit 254 Stunden. Mit 128 mm mittlerer Niederschlag war es der zweitnasseste Mai seit 1951 (Platz 1 belegt 2007). Dabei wies das Gebiet der südlichen Ostsee etwa 80 % zu hohe Werte auf.

Der Monat **Juni** gestaltete sich insgesamt sehr wechselhaft. Die unwetterartigen Regenfälle, ausgelöst durch Tief „Frederik“ und im weiteren Verlauf Tief „Torsten“ mit Zentren über Mitteleuropa, hielten zu Monatsbeginn weiter an und führten zu einem schweren Hochwasser entlang der Elbe und Donau. Mit Schäden in 7 Ländern Europas war dieses mit Abstand das durch Witterung ausgelöste Extremereignis des Jahres 2013 im europäischen Raum. Anschließend schlug die Witterung durch Hochdruckgebiete über Norwegen und dem Nordmeer („Sabine“ und „Therese“) um auf sommerlich heiße Temperaturen mit schwachem Wind aus östlichen Richtungen (Abb. 4a, 5a). Mitte des Monats sorgte Tief „Alfred“, das aus Südwesten kommend Mitteleuropa überquerte, für einen Luftmassenwechsel. Danach bildete sich ein Trog über Westeuropa, der erneut für warme Luft aus östlichen Richtungen in Mitteleuropa sorgte. Ein Kurzwellentrog vom Atlantik führte zur Auflösung dieses westeuropäischen Troges und bildete einen neuen Trog über Mitteleuropa, der von kleinen Randtiefs umkreist wurde. Das führte erneut zu kalten Luftmassen, die von Fronten mit Gewittern, Starkregen, Hagel und Sturmböen begleitet wurden. Trotz wechselhafter Witterung war die Windentwicklung weiterhin mäßig bis schwach, jedoch mit Richtungsänderungen verbunden (Abb. 4a, 5a). Am Monatsende wehte es an zwei Tagen im Tagesmittel mit 5 Bft. Der Pegelstand in der zentralen Ostsee pendelte wie schon im Vormonat nur gering um -10 cm mittlerer Wasserstand (mean sea level=MSL). Die Durchschnittstemperatur von 15,7 °C erreichte den langjährigen Mittelwert. An der Ostseeküste war es nur leicht zu warm (0,1 K) und im westlichen Teil Deutschlands etwas zu kühl. In Kitzingen am Main wurde der Maximalwert von 37,1 °C (19.06.) und in Barth am 06.06. ein Minimum von -0,4 °C gemessen. Die Sonnenscheindauer lag mit 206 Stunden knapp über dem Mittel von 202 Stunden, während Arkona mit 280 Stunden erneut die sonnigste Station war. Kennzeichnend für den Monat waren die hohen Niederschläge zu Monatsbeginn, die zu einem erhöhten Monatswert von 91 mm gegenüber dem Mittel von 77 mm führten. Entlang der Ostseeküste fiel im Nord- und Ostteil wesentlich zu viel Niederschlag, während die Region Rostock einen relativ ausgeglichenen Wert verzeichnete.

Anfang **Juli** löste sich die langanhaltende Troglage auf und es folgte durch eine Hochdruckbrücke über Mitteleuropa wieder ein Wechsel zu sommerlicher Witterung. Anschließend ist Hoch „Yasmine“ über den Britischen Inseln wetterbestimmend, während zur Monatsmitte Kurzwellentröge vom Nordmeer und Skandinavien (Tiefs „Volker“, „Werner“) den Ostseeraum mit einer schwachen Nordwestströmung beeinflussten (Abb. 7b). Das führte zu geringem Wassereinstrom mit einem Pegelanstieg von etwa 20 cm (Abb. 7a). In der zweiten Monatshälfte entstand kurzzeitig eine Omegalage, die für hochsommerlich warme, windarme Witterung in Mitteleuropa sorgte. Dadurch konnten Wassermassen ausströmen und es wurde der Pegelstand von -10 cm MSL wieder erreicht. Im weiteren Verlauf gelangen Hitzetiefs („Yohannes“ und „Andreas“) aus Frankreich mit Konvektionserscheinungen bis zur Unwetterstärke nach Mitteleuropa. Zum Monatsende entstand durch einen Trog über der westeuropäischen Küste eine Südströmung, die schwül-

heiße Luft mit unwetterartigen Gewittern nach Mitteleuropa führte. Im gesamten Monat überschritten die Tagesmittelwerte nicht die Grenze von 4 Windstärken, vereinzelte Stundenmittel überschritten nur knapp 10 m/s (obere 5 Bft) an der Station Arkona (Abb. 5a). Die insgesamt sommerliche Witterung, mit nur kurzer Abkühlungsphase zur Monatsmitte, sorgte für eine Mitteltemperatur von 19,5 °C. Dieser Wert ist 1,5 °C über dem langjährigen Mittel durch erhöhte Werte im süddeutschen Raum (Monatsmaximum 38,6 °C in Rheinfelden). Im Gegenzug wiesen die Küstenregionen nur geringe Temperaturabweichungen zum Mittelwert auf. Zusätzlich betrug die Sonnenscheindauer 294 Stunden, was einen Anstieg von rund 34 % gegenüber dem Mittel von 220 Stunden bedeutet. Der höchste Wert wurde im Juli in Konstanz mit 341 Stunden (137 %) erreicht. Die Niederschlagsmenge fiel mit 39 mm wesentlich zu trocken aus (54 % unter vieljährigem Mittel). Die unwetterartigen Niederschläge am Monatsende verbesserten lokal die Bilanz. Hagel mit Korndurchmessern von bis zu 8 cm sorgte für erhebliche Schäden im Ostteil Hannovers und Landkreis Peine.

Zum Monatswechsel durchzog kurzzeitig Tief „Christian“ aus Westen den Raum. Anfang **August** stellte sich eine Südwestlage, ausgelöst durch ein kräftiges Tiefdrucksystem zwischen Schottland und Island, ein und brachte erneut warme Luftmassen in den Ostseeraum. Im Anschluss bildete sich ein Trog über Westeuropa und es strömte weiterhin feuchte, sehr warme Luft ein. Dieser heiße Monatsbeginn war die dritte Hitzewelle des Sommers. Zur Monatsmitte driftete der Trog nach Osten und es beherrschte eine Westlage (Tief „Franz“) mit atlantischen Luftmassen und unbeständiger Witterung den Raum. Dabei wurde am 14.08. ein Tagesmittelwert von 11,91 m/s aus Nordwest als Monatsmaximum erreicht (Abb. 5a, 7b). Als Folge ergab sich ein erneuter Pegelanstieg in der zentralen Ostsee auf 18,3 cm MSL an der Station Landsort (Abb. 7a). Danach bildete sich eine Hochdruckbrücke über Mitteleuropa, die erneut für sommerliches Wetter sorgte. Ab dem 22.08. steuerte Hoch „Fortuna“ über dem Nordmeer und Fennoskandien das weiterhin sommerliche Wettergeschehen. Der Hochdruckeinfluss setzte sich bis zum Monatsende durch eine Nordostlage weiter fort bis das Hoch am 29.08. nach Osten abzieht und nordwestliche Höhenströmung über Mitteleuropa einsetzt. In der Monatshälfte fiel der Pegel Landsort wieder auf -10 cm MSL ab (Abb. 7a). Der August fiel mit durchschnittlich 17,9 °C und 0,4 K über dem Mittelwert ebenfalls zu warm aus. Die Ostseeküste wies dabei etwa 0,7 K zu hohe Werte auf. Die Sonnenscheindauer ist ebenfalls mit 225 Stunden rund 10 % über dem vieljährigen Mittel. Im August belegte wieder Arkona den Spitzenplatz mit 272 Stunden. Bedingt durch das sommerliche Wetter fiel die Niederschlagsmenge von 56 mm deutlich zu gering aus und liegt 27 % unter dem Mittel von 77 mm. An der Ostseeküste war es sogar 50 % zu trocken.

Der **September** startete sommerlich warm. Anfangs zogen mit einer Nordwestlage die Tiefs „Joseph“, „Kasimir“ und „Lennert“ über den Ostseeraum hinweg, die von einem schmalen Hochdruckkeil von Skandinavien bis Mitteleuropa (Hoch „Iris“) abgelöst wurden. Danach entstand eine Südlage durch einen Trog über Westeuropa und dem weiter nach Osten verschobenen Hochdruckkeil. Die anfängliche Nordwestlage verursachte kurzzeitig Wassereinstrom, während der Pegel durch die anschließende Südströmung sofort wieder

auf das Niveau von -10 cm MSL abfiel (Abb. 7a). Zur Monatsmitte stellte sich wechselhafte Witterung mit kühleren Luftmassen und häufigen Niederschlägen durch Tief „Quentin“ über Mitteleuropa ein. Nachfolgende Trogbildungen und eine Nordwestlage setzten diese unbeständige Witterung weiter fort. Hoch „Karin“, das sich vom Nordmeer nach Süden ausdehnte, brachte ab 24.09. bis zum Monatsende sonniges, trockenes Wetter. Diese ruhige Wetterphase führte nach weiteren kleinen Pegelschwankungen zu einer Wasserstandsabsenkung auf -30 cm MSL in der zentralen Ostsee (Abb. 7a). Insgesamt war der September ebenfalls durch moderate Windverhältnisse mit häufigen Richtungswechseln geprägt (Abb. 4a, 5a). Nur zwei Windphasen zu Monatsbeginn und um den 22.09. zeigten Tagesmittelwerte von über 10 m/s. Die Temperatur lag mit 13,3 °C nur knapp unter dem Mittelwert von 13,5 °C. Dieser deutschlandweite Mittelwert entspricht auch dem regionalen Temperaturverlauf an der südlichen Ostseeküste. Das Monatsmaximum wurde in der Region Münster/Osnabrück am 06.09. mit 33,2 °C gemessen, während in Hof zum Monatsende schon Nachtfrost mit -4,2 °C auftrat. Mit durchschnittlich 123 Sonnenstunden lag der September 17 % unter dem Mittel von 158 Stunden. Arkona belegte mit 175 Stunden erneut den 1. Platz. Der Monat war überwiegend zu nass. Mit 83 mm Niederschlag liegt der September 24 % über dem vieljährigen Mittelwert von 67 mm. Zu trocken war es nur im äußersten Nordosten Deutschlands an der Ostseeküste. An der Station Arkona wurden dabei nur 31 mm Niederschlag registriert.

Das beständige Hoch „Karin“ über Fennoskandien sorgte für einen sonnenreichen, trockenen **Oktoberanfang**. Durch Südverlagerung des Hochs entstand zusammen mit Hoch „Liane“ über Westeuropa eine Hochdruckbrücke in Mitteleuropa, so dass die relativ ruhige Witterung weiter anhielt. Ab 10.10. gewannen Tiefdruckgebiete an Einfluss, die bis Monatsende das Wettergeschehen steuerten. Mit dem Wechsel wehten zu Beginn östliche Winde mit Tagesmittelwerten von 7 Bft (11.-12.10.), bevor südwestliche Windrichtungen zu dominieren begannen. Hervorzuheben ist Orkan „Christian“, der vom 26. bis 28.10. den norddeutschen Raum mit südwestlicher Hauptwindrichtung überquerte. Er entstand aus einem Langwellentrog über dem Nordatlantik, der sich vertiefte und nach Osten verlagerte. Gleichzeitig befand sich Hochdruck in Südosteuropa, der sich nach Norden verschob. Der Trog verschlankte sich um den 25.10. und verstärkte die südwestliche Luftströmung über Mitteleuropa zum Orkan. Seine Hauptaktivität entfaltete „Christian“ in den Niederlanden, Niedersachsen und Schleswig-Holstein, wo auf den Straßen teilweise LKW-Lastzüge einfach umkippten. Die Ostsee streifte der Orkan nur in abgeschwächter Wirkung. An der Station Arkona wurde am 28.10. ein maximales Stundenmittel von 22,3 m/s (9 Bft) gemessen. Jedoch lag das Tagesmittel mit 13,86 m/s nur im Bereich von 6 Bft (Abb. 5a).

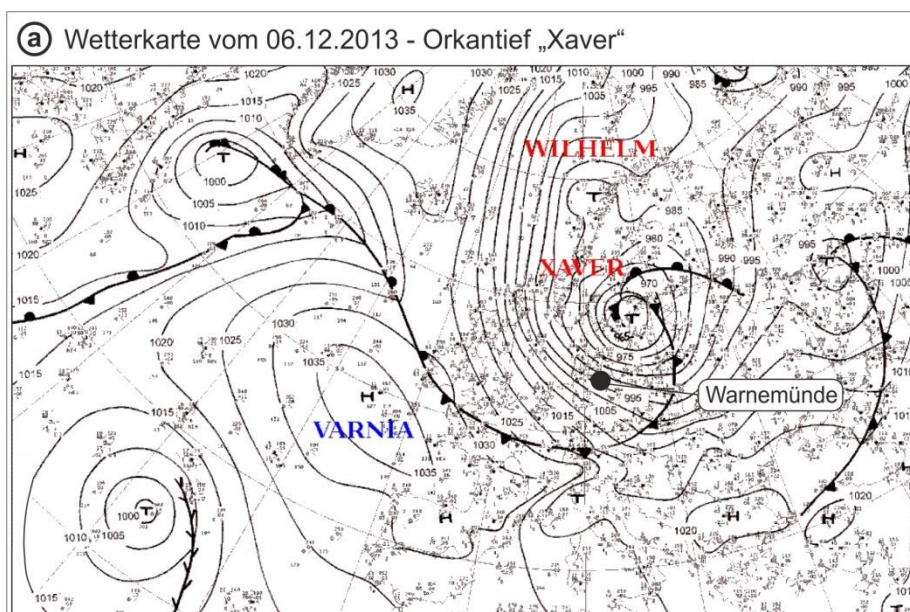
Die Aneinanderreihung von Windereignissen in der zweiten Monatshälfte führte zum Anstieg des Wasserstands in der Ostsee. Am 7.11. erreichte der Pegel Landsort 29,8 mm MSL, so dass in einer Zeitdauer von 15 Tagen mit einem Pegelanstieg von rund 58 cm etwa 201 km³ Wasservolumen in die Ostsee strömte. Im Oktober war es flächendeckend zu warm mit einer mittleren Temperatur von 10,6 °C. Im Süden Deutschlands lag die Temperatur um etwa 1 K über dem langfristigen Mittel und im Norden bis zu 2 K. Dabei war gerade die zweite Monatshälfte ungewöhnlich warm, am 26.10. wurden in Lahr 24,6 °C als Monatsmaximum gemessen. Das Minimum wurde in Barth am 19.10. mit -3,3 °C aufgezeichnet. Die

Sonnenscheindauer lag mit 104 Stunden im Bereich des Mittelwerts von 106 Stunden. Das Maximum von 180 Stunden wurde in diesem Monat auf der Zugspitze registriert. Die mittlere Niederschlagsmenge von 77 mm lag 23 % über dem vieljährigen Mittel von 63 mm. Es traten dabei gebietsweise intensive Niederschläge auf, so fiel am Mittelrhein mehr als doppelt so viel Niederschlag. Am 10.10. wurde der erste Schnee in den Hochlagen der Mittelgebirge gesichtet.

Im **November** prägten Tiefdrucksysteme mit milder Luft, Niederschlägen und Sturmböen den Monatsbeginn. Anfangs folgten in einer Westlage mehrere kurzweilige Tröge vom Atlantik aufeinander, die häufigen Luftmassenwechsel von polar bis subtropisch verursachten. Es schloss sich ein Trog über Mitteleuropa an, der um Hoch „Quinta“ im Zentrum gebildet wurde. Zur Monatsmitte wurde eine Hochdruckbrücke, die vom Ostatlantik bis nach Osteuropa reichte, wetterbestimmend. Es wechselten sich dabei sonnige und trübe Abschnitte ab. Ab dem 19.11. dominierten kalte Luftmassen den Raum. Zu Beginn zogen mehrere Kurzwellentröge von den Britischen Inseln nach Südosten. Kurzzeitig blockierte Hoch „Traude“ vom 25.-27.11. den Tiefdruckeinfluss in Mitteleuropa und wich im späteren Verlauf zurück nach Westen über den Atlantik. An der Nordostflanke des Hochs zogen anschließend die Tiefs „Tilman“ und „Uwe“ durch nordwestliche Strömung nach Mitteleuropa und brachten kalte Polarluft zum Monatsende, die in den Mittelgebirgen und Alpen Schneefall verursachte. Im Verlauf des Novembers wurden mehrere Starkwindtage mit Tagesmittelwerten von mehr als 11 m/s an der Station Arkona registriert (Abb. 5a). Dabei dominierte die Hauptwindrichtung Südwest, die kurzzeitig in der zweiten Monatshälfte von Ostwind unterbrochen wurde (Abb. 4a). Der Füllstand der Ostsee stieg zu Monatsbeginn, pendelte anschließend um Werte von 20 cm MSL und sank dann durch den Ostwind zum Monatsende etwas ab (Abb. 7a). Mit einer Mitteltemperatur von 4,6 °C lag der Monat knapp über dem langjährigen Mittel von 4,4 °C. An den Küsten blieb es zu warm, an der Ostseeküste etwa 1,1 K. So verzeichnete die Station Warnemünde lediglich einen Frosttag (Tab. 1). Westliche und südliche Teile Deutschlands waren jedoch zu kalt, auch wenn durch Föhnunterstützung in Chieming 19,5 °C am 8.11. aufgezeichnet wurden. Der niedrigste Wert wurde in Oberstdorf mit -15,4 °C am 27.11. registriert. Die Sonne schien mit einer durchschnittlichen Dauer von 45 Stunden zu wenig im Vergleich zum vieljährigen Mittel von 54 Stunden. Norddeutschland zeigte jedoch Werte über dem Durchschnitt, während der Süden zu trübe war. Der Spitzenwert wurde auf der Zugspitze mit 175 Stunden registriert. Hauptsächlich fielen Niederschläge im ersten Teil des Novembers. Mit 71 mm lag die Monatsmenge nur knapp über dem langjährigen Mittel von 66 mm. Vor allem das westliche Niedersachsen und Sylt wiesen zu hohe Werte auf.

Nach dem Durchzug von Tief „Uwe“ wurde die Nordwestlage zum Monatsanfang kurzzeitig von Hoch „Ulrike“ unterbrochen, bevor Orkantief „Xaver“ als markantes Witterungsereignis im **Dezember** vom 5. bis 8.12. über den mitteleuropäischen Raum hinweg zog (Abb. 3a). In der Deutschen Bucht wurde eine schwere Sturmflut ausgelöst, während die Auswirkungen im Ostseeraum geringer waren. Mit 3,98 m über dem mittleren Hochwasser (MHW) blieb der Pegelstand in Hamburg St. Pauli nach Informationen des BSH nur 6 cm unter dem Maximalwert der schweren Sturmflut von 1962. An der DWD-Wetterstation Meierwiek in der

Nähe von Flensburg wurden maximale Windböen von 158 km/h (44 m/s) registriert. Abbildung 3b und 3c zeigen Messwerte aus dem Ostseeraum. So fiel der Luftdruck an der MARNET-Station im Arkona Becken in 18 Stunden um 33 hPa auf einen Minimalwert von 982 hPa und erzeugte Windböen bis 30 m/s und im Bereich der Darßer Schwelle bis 38 m/s. In Rostock-Warnemünde wurden ebenfalls Böen von 136 km/h (38 m/s) registriert (DWD, 2013). Ab Spitzenwerten von $>32,7$ m/s (>117 km/h) werden Windereignisse in der Beaufort-Skala als Orkan (12 Bft) eingestuft. Der zeitliche Verlauf von Windstärkeentwicklung und - richtungsänderung ist für die Station Arkona in Abbildung 3c dargestellt. Dort wurden maximale Stundenmittel von 25,9 m/s aus südwestlich bis westlichen Richtungen im ersten Teil des Orkans registriert. Erst am 6.12. drehte der Wind im Verlauf des Vormittags auf Nordwest, schwächte sich jedoch gleichzeitig wieder auf unter 20 m/s (8 Bft) ab. Für den Einstrom von sauerstoffreichem Nordseewasser ist diese Windrichtung von primärer Bedeutung. Die hydrographischen Auswirkungen für den Ostseeraum werden in den nachfolgenden Kapiteln näher beschrieben. Insgesamt war dieser Orkan das bedeutendste Starkwindereignis des Jahres 2013 für den norddeutschen Raum und schuf mit seinem NW-SO gerichteten Zugverlauf günstige Ausgangsbedingungen für einen Einstrom. Der Wasserstand im zentralen Ostseeteil erhöhte sich jedoch nur kurzzeitig um etwa 30 bis 40 cm (Abb. 7a), so dass nicht von einem größeren Einstromereignis gesprochen werden kann.



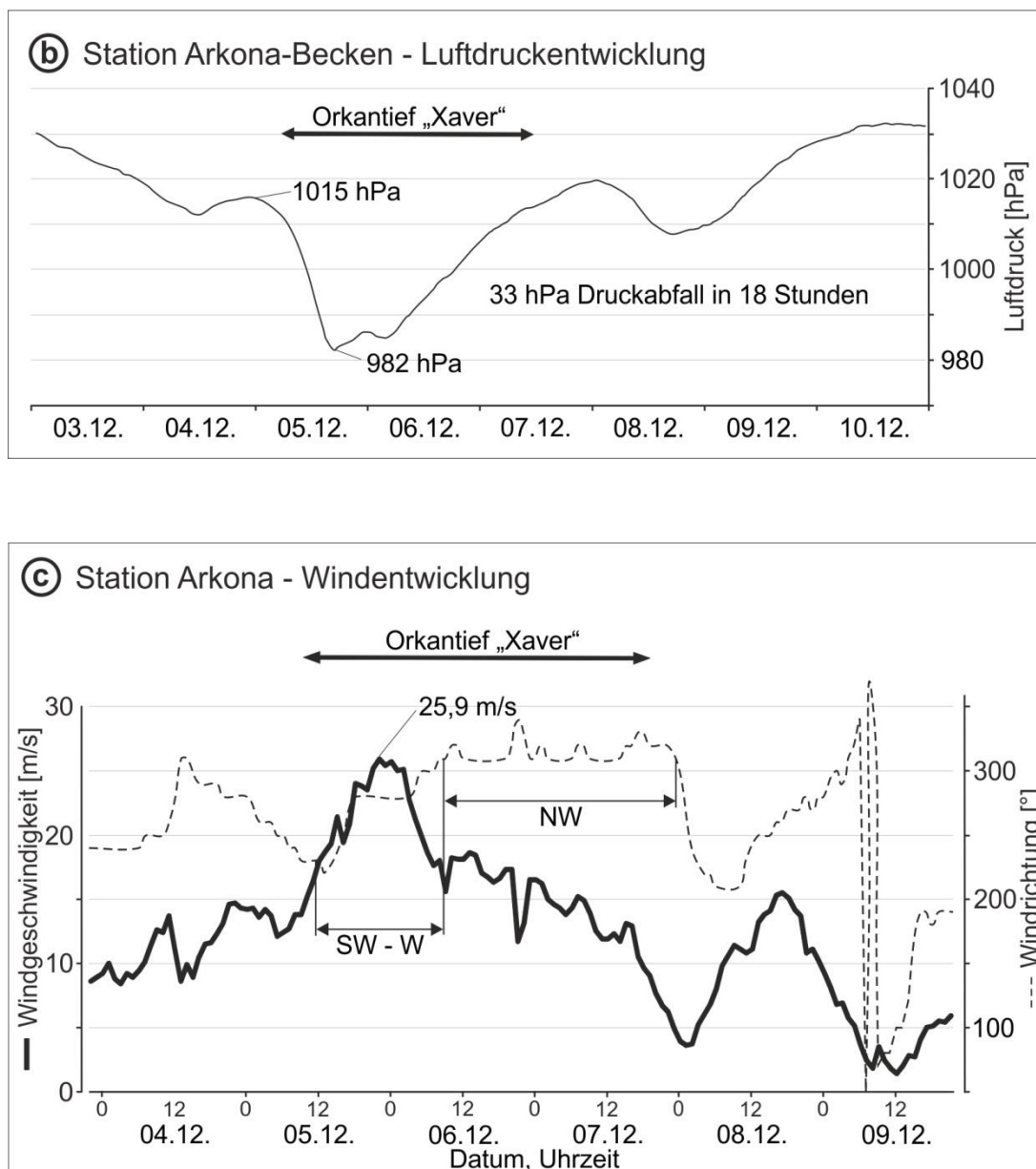


Abb. 3: Orkantief „Xaver“ als bedeutendstes Windereignis des Jahres 2013 in der südlichen Ostsee. a) Wetterkarte vom 06.12.2013 (FU-Berlin, 2013b), b) Luftdruckentwicklung an der MARNET-Dauermessstation Arkona-Becken (nach Daten des BSH und IOW, 2013), c) Windentwicklung an der Wetterstation Arkona (nach Daten des DWD, 2014)

Fig. 3: Hurricane „Xaver“ – the most significant wind event of the southern Baltic Sea in the year 2013. a) weather chart from 2013/12/06 (FU-Berlin, 2013), b) changes of the air-pressure at the MARNET-station Arkona-Basin (data of BSH and IOW, 2013), c) changes of wind strength and direction at the weather-station Arkona (data of DWD, 2014)

Zur Monatsmitte sorgte Hoch „Varnia“ mit Zentrum über Mitteleuropa für ruhige Witterung mit mäßigem Südwind, während die zweite Monatshälfte durch südwestliche Strömung mit stürmisch-mildem Weihnachtswetter gekennzeichnet war. So wurde an der Wetterstation Warnemünde am Heiligabend ein Maximalwert von 13,2 °C gemessen. Im deutschlandweiten Vergleich war die Mitteltemperatur von 3,6 °C um 2,4 K zu warm. Dabei blieb der Süden kalt, während der Osten und Norden teilweise mehr als 3 K zu warm war (Station Marnitz 3,6 K). In Norddeutschland herrschte durchgehend milde Witterung. Die Station Warnemünde verzeichnete nur einen Frosttag in der Nacht vom 2. zum 3.12. (Tab. 1). Das Monatsminimum wurde am 1.12. in Oberstdorf mit -15,9 °C und das Maximum am 25.12. in Chieming mit 18,9 °C registriert. Mit 56 Stunden lag die mittlere Sonnenscheindauer 43 % über dem Mittel von 39 Stunden. Es herrschte jedoch ein starkes Süd-Nord-Gefälle mit dem Maximum von 170 Stunden auf der Zugspitze und 13 Stunden in Kiel-Holtenau (-38 %). Die mittlere Niederschlagsmenge betrug 41 mm und blieb 43 % unter dem Mittelwert von 72 mm. Zu viel Niederschlag wurde nur in Teilen Schleswig-Holsteins, dem Münsterland und am südlichen Oberrhein registriert. In Rostock-Warnemünde lagen die gemessenen 31 mm rund 37 % unter dem Durchschnittswert.

2.3 Jahreszusammenfassung einiger bedeutender Parameter

Die **Solarstrahlung** an der Station Gdynia wies eine Jahressumme von 379 890 J/m² auf und sortiert sich mit Platz 25 im Mittelfeld seit Beginn der Vergleichsdaten ab dem Jahr 1956 ein (FEISTEL et al., 2008). Dieser Wert liegt knapp über dem langjährigen Mittelwert von 373 353 J/m². Am sonnenreichsten waren die Monate Mai, Juni und Juli. Der Juni belegte dabei mit 62 776 J/m² den 24. Platz im langjährigen Vergleich (Tab. 1), blieb jedoch wesentlich hinter dem Spitzenwert von 78 845 J/m² im Juni 1992 zurück. Das absolute Maximum der Datenreihe wurde im Juli 1994 mit 80 389 J/m² gemessen. Den geringsten Wert des Jahres wies der Dezember mit 3705 J/m² auf und lag mit Platz 42 deutlich unter dem langjährigen Mittel von 4354 J/m².

Mit einer **Wärmesumme** von 230,4 K d (Tab. 2), registriert an der Station Warnemünde, reiht sich das Jahr 2013 auf Platz 10 im Zeitraum der letzten 66 Jahre ein. Der Wert liegt weit außerhalb des langjährigen Mittels von 148,8 K d und oberhalb der Standardabweichung, so dass 2013 als ein besonders warmes Jahr eingestuft werden kann. Im monatlichen Vergleich belegen die Monate Mai den 10. Platz, Juli den 9. Platz und August den 11. Platz. Im Gegenzug lag die **Kältesumme** mit 109,5 K d nur knapp über dem langjährigen Mittelwert von 104,5 K d und wird als mäßig warmer Winter 2012/13 eingestuft (siehe Kapitelanfang).

Table 1: Monthly averaged weather data at Arkona station (Rügen island, 42 m MSL) from DWD (2013). 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' O, 22 m MSL from IMGW (2014). Percentages are given with respect to the long-term mean. Maxima and minima are shown in bold

Monat	$t/^\circ\text{C}$	$\Delta t/\text{K}$	$h/\%$	$s/\%$	$r/\%$	Frost	Eis	Solar
Jan	0,9	-0,3	88	53	185	19	6	4436
Feb	0,1	-1,0	92	20	170	21	5	9102
Mrz	-0,3	-3,2	79	132	36	26	9	29758
Apr	5,6	-0,4	81	112	52	4	-	43505
Mai	10,9	0,5	83	93	158	-	-	58646
Jun	14,8	0,6	81	111	133	-	-	62776
Jul	18,1	1,0	79	116	41	-	-	58609
Aug	18,3	1,0	75	112	62	-	-	52449
Sep	14,1	0,0	79	102	55	-	-	31902
Okt	11,3	1,3	k.A.	103	79	-	-	19024
Nov	6,3	0,8	88	109	102	1	-	5981
Dez	4,7	2,4	89	82	77	1	-	3705

Tab. 2: Summen der Tagesmittel der Lufttemperatur an der Wetterstation Warnemünde. Die Kältesumme (KS) ist das Zeitintegral der Lufttemperatur unterhalb der Linie $t = 0$ °C, in K d, die Wärmesumme (WS) das entsprechende Integral oberhalb der Linie $t = 16$ °C. Zum Vergleich sind die entsprechenden Mittelwerte 1948 bis 2012 angegeben

Table 2: Sums of daily mean air temperatures at the weather station Warnemünde. The 'cold sum' (KS) is the time integral of air temperatures below the line $t = 0$ °C, in K d, the 'heat sum' (WS) is the corresponding integral above the line $t = 16$ °C. For comparison, the corresponding mean values 1948 – 2012 are given

Monat	KS 2012/13	Mittelwert	Monat	WS 2013	Mittelwert
Nov	0	2,6 ± 6,3	Apr	0	1,1 ± 2,5
Dez	33,2	22,7 ± 28,4	Mai	10,7	5,4 ± 6,8
Jan	37,3	39,1 ± 40	Jun	26,3	23,2 ± 14,8
Feb	10,6	32,2 ± 38,3	Jul	97,3	55,7 ± 35,8
Mrz	28,4	8,3 ± 11,9	Aug	82,6	51,8 ± 32,2
Apr	0	0 ± 0,2	Sep	12,9	11,3 ± 12,0
			Okt	0,6	0,4 ± 1,1
Σ 2012/2013	109,5	104,5 ± 80,1	Σ 2013	230,4	148,8 ± 68,4

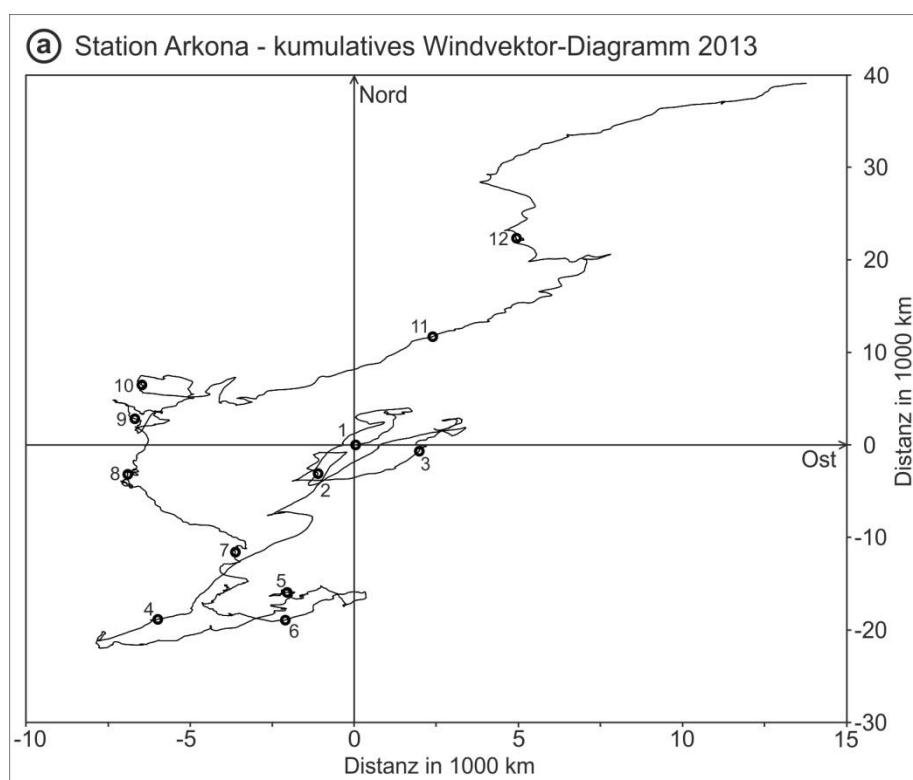
Tab. 3: Summen der Tagesmittel der Lufttemperatur an der Wetterstation Arkona. Die Kältesumme (KS) ist das Zeitintegral der Lufttemperatur unterhalb der Linie $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, in K d, die Wärmesumme (WS) das entsprechende Integral oberhalb der Linie $t = 16 \text{ }^\circ\text{C}$

Table 3: Sums of daily mean air temperatures at the weather station Arkona. The ‘cold sum’ (KS) is the time integral of air temperatures below the line $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, in K d, the ‘heat sum’ (WS) is the corresponding integral above the line $t = 16 \text{ }^\circ\text{C}$

Monat	KS 2012/13	Monat	WS 2013
Nov	0	Apr	0
Dez	23,5	Mai	0
Jan	26,3	Jun	11,5
Feb	10,2	Jul	67,4
Mrz	27,5	Aug	70,8
Apr	0	Sep	9,2
		Okt	0
Σ 2012/2013	87,5	Σ 2013	158,9

Die Abbildungen 4 bis 6 zeigen die **Windsituation** an der Station Arkona im Jahresverlauf 2013. In Abbildung 4 ist die Windentwicklung mit Hilfe fortschreitender Vektordiagramme dargestellt, wobei die Trajektorie durch zeitliche Integration des Windvektors am Ort entsteht. Zur Einschätzung des Jahres 2013 (Abb. 4a) wird im Vergleich der klimatische mittlere Wind gezeigt (Abb. 4b), der aus der Zeitreihe 1951 bis 2002 abgeleitet wurde. Die Kurve für 2013 (13 800 km nach Osten, 39 000 km nach Norden) weicht von der des klimatischen Mittelwerts (52 000 km nach Osten, 25 000 km nach Norden) ganz erheblich ab. Dies ist der Dominanz östlicher bis nordöstlicher Windrichtungen zu Jahresbeginn geschuldet, die im langjährigen Vergleich erhöhte Jahresmittelwerte aufweisen. Anhand des Windrosen-Diagramms (Abb. 6) nehmen östliche Windrichtungen etwa 37 % in der Jahressumme ein. Im Vergleich entfallen weitere 33 % auf die Hauptwindrichtungen West bis Südwest. Der mittlere Betrag der Windgeschwindigkeit von 7 m/s (Abb. 5a) unterschreitet den langjährigen Mittelwert von 7,1 m/s (HAGEN & FEISTEL, 2008) nur knapp. Vergleicht man jedoch die Ostkomponente des Windes (Westwind positiv) von im Mittel 0,4 m/s (Abb. 5b), weicht diese erheblich vom klimatologischen Mittelwert von 1,7 m/s (HAGEN & FEISTEL, 2008) ab. Die Nordkomponente (Südwind positiv) weist mit dem Mittel von 1,23 m/s eine Erhöhung zum Langzeitwert von 0,8 m/s auf. Infolge der häufig wechselnden Windrichtung zeigt die Kurve des Jahres 2013 eine stark ausgeprägte vektorielle Kompensation der Windkomponenten gegenüber dem Mittel von 1951-2002. Der seit 1981 anhaltende Trend von Dominanz an SW-Wind (HAGEN & FEISTEL, 2008), wird erst im letzten Drittel des Jahres deutlich. Auch in diesem Teil wird der sonst typische Verlauf durch Phasen von Südostwind unterbrochen (Abb. 4a).

Die klimatische Windkurve in Abbildung 4b ist erwartungsgemäß glatter als die der einzelnen Jahre. Sie besteht aus einer Winterphase mit Südwestwind, die im Mai endet und im September langsam neu wieder einsetzt. Die Sommerphase dagegen besitzt keine meridionale Komponente und verläuft deshalb parallel zur x-Achse. Die auffälligste Struktur ist der kleine Knick, bei dem der Wind auf nördliche und östliche Richtungen dreht und ein Umschalten von Winter auf Sommer markiert. Er tritt um den 12. Mai herum auf und gehört zur Phase der so genannten „Eisheiligen“. Die außergewöhnliche Regelmäßigkeit des Auftretens dieses Nordostwinds mit Kälterückfall in Deutschland über viele Jahre hinweg ist schon lange bekannt und lässt sich physikalisch aus dem Sonnenstand und der Land-Meer-Verteilung erklären (BEZOLD, 1883).



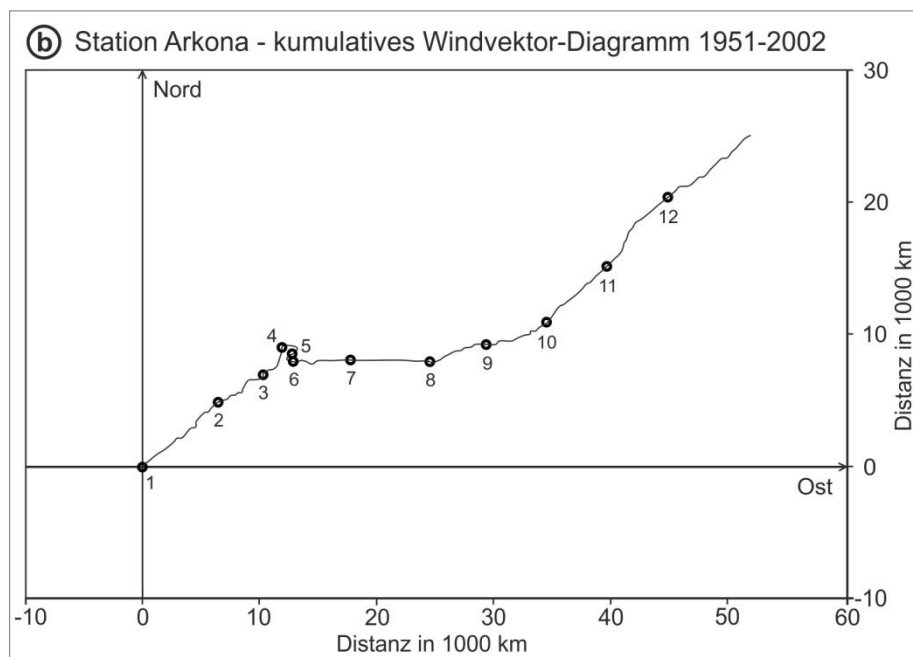


Abb. 4: Fortschreitende Vektordiagramme der Windgeschwindigkeit an der Wetterstation Arkona, Distanz in 1000 km, positiv nach nördlichen und östlichen Richtungen. Der erste Tag des Monats ist durch einen Kreis markiert. a) für das Jahr 2013 (nach Daten des DWD, 2014) b) Langzeitmittel

Fig. 4: Progressive vector diagram of the wind velocity at the weather station Arkona, distance in 1000 km, positive in northerly and easterly directions. The first day of each month is encircled. a) year 2013 (from data of DWD, 2014) b) long-term average

Die Windentwicklung zeigt im Jahresverlauf die typische Verteilung von Starkwindereignissen in den Monaten September bis April (Abb. 5a). Hingegen wurden in den Sommermonaten Tagesmittelwerte von mehr als 10 m/s (>5 Bft) nur vereinzelt überschritten. Der Jahresmittelwert von 7 m/s ist etwas geringer als in den Vorjahren: 2012 mit 7,1 m/s und im Jahr 2011 7,3 m/s (NAUSCH et al., 2012, 2013). Windspitzen von über 20 m/s (>8 Bft) in den Stundenmittelwerten wurden insgesamt an sieben Tagen registriert, während 2012 nur ein Tag diese Grenze überschritten hatte (NAUSCH et al., 2013). Mit einem Spitzenwert von 25,9 m/s aus Westsüdwest fegte Orkan „Xaver“ vom 5.-6.12. über die Ostsee hinweg. Die früheren Maxima von 30 m/s im Jahr 2000 und 26,6 m/s im Jahr 2005 konnten durch „Xaver“ jedoch nicht überboten werden. Tief „Yorick“ wehte am 10.03. mit maximal 22,7 m/s und am 7.03. mit 21,2 m/s aus Ostnordost. Es folgen Tief „Lennart“ (31.01., 22,4 m/s) und „Christian“ (28.10., 22,3 m/s), der über der Nordsee als Orkan wehte, mit westsüdwestlichen Windrichtungen. Der Monat März wies mit 20,8 m/s aus Nordost am 19.03. noch einen dritten Tag diese hohen Stundenmittelwerte auf. Damit herrscht ein annähernd gleiches Verhältnis zwischen Starkwindereignissen mit westlichen und östlichen Richtungen, das in Abbildung 6 anhand der gelben bis rötlichen Signaturen deutlich wird.

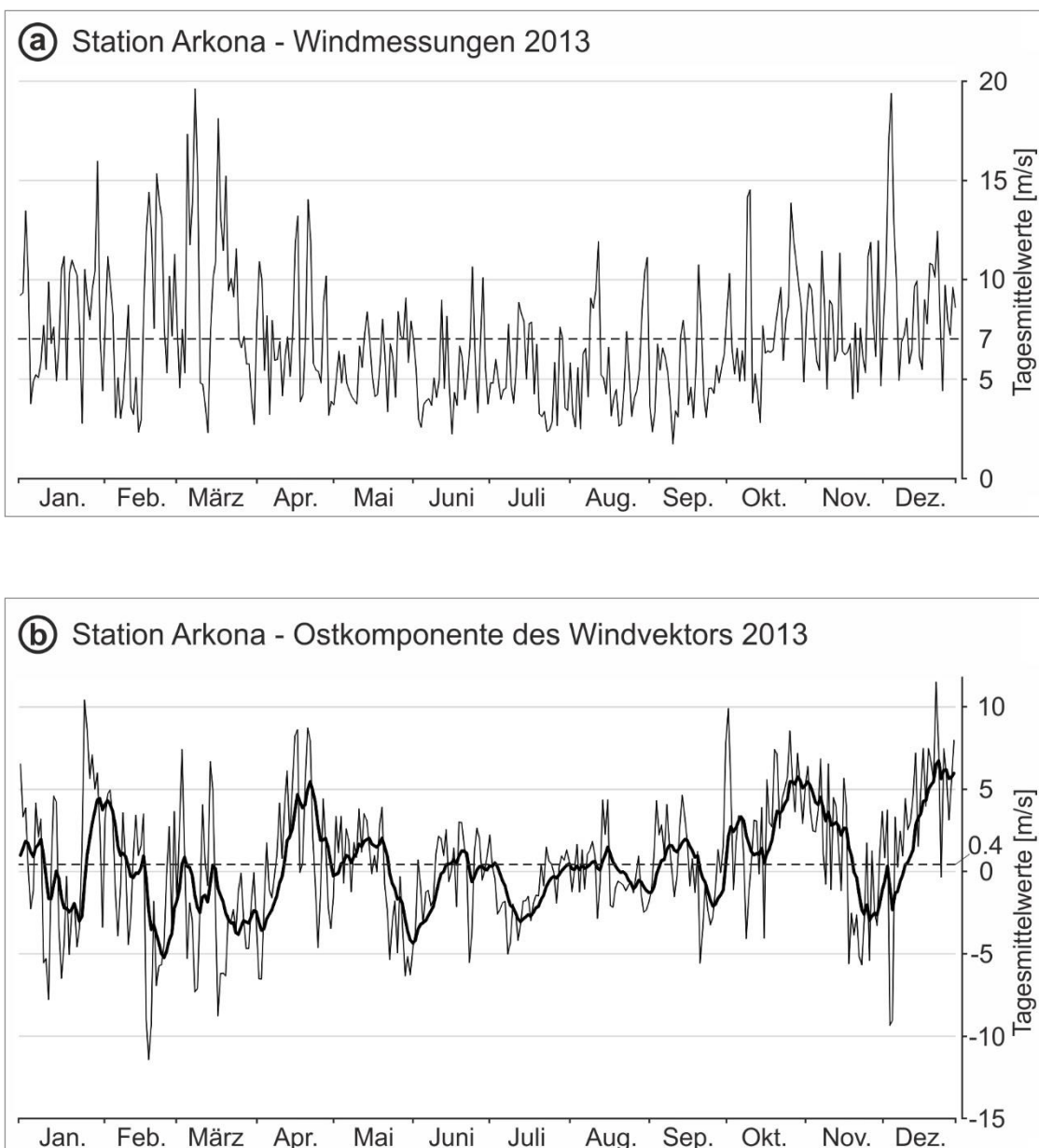


Abb. 5: Windmessungen an der Wetterstation Arkona (nach Daten des DWD, 2014). a) Tagesmittelwerte der Windgeschwindigkeit in m/s, Jahresmittelwert 7 m/s (aus Stundenmittelwerten berechnet) gestrichelt. b) Tagesmittelwerte der Ostkomponente (Westwind positiv), Jahresmittelwert 0,4 m/s gestrichelt. Die fett gezeichnete Linie ist mit einem exponentiellen Gedächtnis von 10 Tagen gefiltert

Fig. 5: Wind measurements at the weather station Arkona (from data of DWD, 2014). a) Daily means of wind speed, in m/s, the dashed line is the annual average of 7 m/s. b) Daily means of the eastern component (westerly wind positive), the dashed line is the annual average of 0.4 m/s. The line in bold is filtered with a 10-days exponential memory

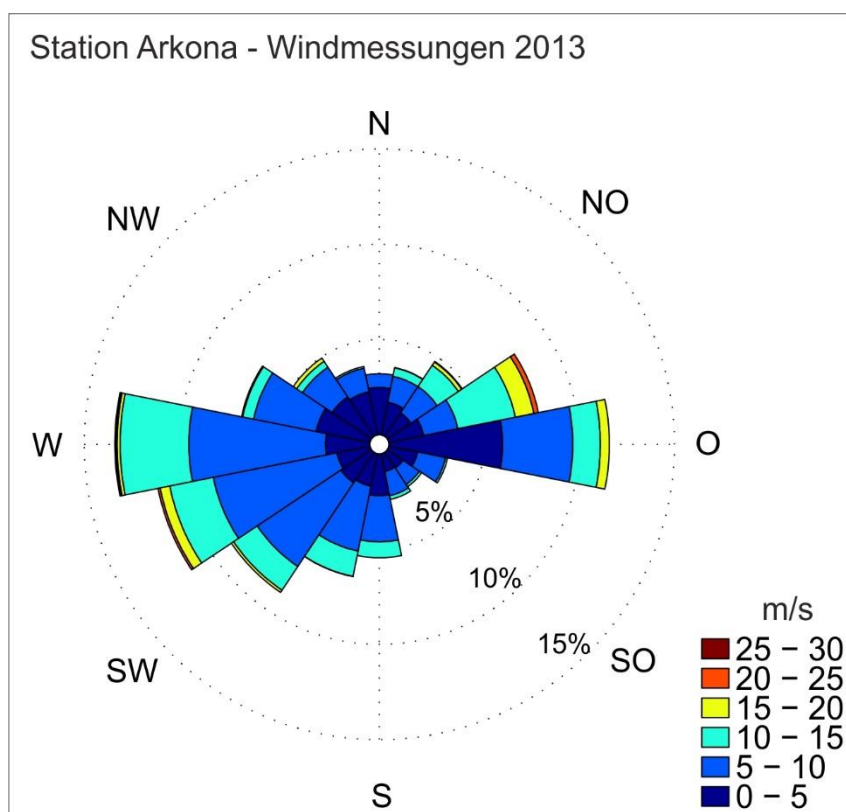


Abb. 6: Windmessungen der Station Arkona (nach Daten des DWD, 2014) dargestellt als Windrosen-Diagramm. Verteilung von Windrichtung und -stärke auf Basis von Stundenmittelwerten des Jahres 2013

Fig. 6: Wind measurements at the weather station Arkona (from data of DWD, 2014) as windrose plot. Distribution of wind direction and strength based on hourly means of the year 2013

Der **Füllungsgrad der Ostsee** wird gut durch den Pegel an der schwedischen Station Landsort beschrieben (Abb. 7a). Im Gegensatz zu früheren Jahren handelt es sich ab 2004 um den neuen Pegel „Landsort Norra“ ($58^{\circ}46'N$, $17^{\circ}52'E$). Der alte Pegel Landsort ($58^{\circ}45'N$, $17^{\circ}52'E$) wurde im September 2006 außer Betrieb genommen, da durch die postglaziale Landhebung seine Lage im Haff bei Niedrigwasser die Verbindung zur offenen Ostsee nicht mehr sicherstellte (FEISTEL et al., 2008). Beide Pegel wurden für mehr als zwei Jahre parallel betrieben und zeigten 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.

Im Verlauf des Jahres 2013 hat es fünf Phasen von Wassereinströmen mit geschätzten Volumina zwischen 147 und 201 km³ in der Ostsee gegeben. 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. 5b, 7b) zu erkennen ist. Die Filterung erfolgt nach der Formel

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

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., 2008).

Die erste Phase begann schon im Vorjahr am 24.12.2012 bei einem Niveau von -27 cm MSL. In einer Zeitdauer von 11 Tagen stieg der Pegel um 45,8 cm auf den Wert von 18,8 cm MSL (4.01.2013) an. Mit der empirischen Näherungsformel $\Delta V / \text{km}^3 = 3,8 \times \Delta L / \text{cm} - 1,3 \times \Delta t / \text{d}$ (NAUSCH et al., 2002; FEISTEL et al., 2008) lässt sich aus den Werten des Pegelunterschieds ΔL in cm und der Einstromdauer Δt in Tagen eine Schätzung für das eingeströmte Volumen ΔV berechnen. Für den Anstieg vom 24.12.2012 bis zum 4.01.2013 ergibt sich dadurch ein Volumen von 157 km³. Nach anschließendem Ausstrom begann bei einem Pegelstand von -32 cm MSL eine nächste Phase, die sich vom 28.01. bis 7.02. erstreckte. Aus der Pegeldifferenz von 54,6 cm und 9,5 Tagen Zeitdauer erhält man ein geschätztes Volumen von etwa 195 km³.

Aufgrund der kurzen Einstromzeiten von wenigen Tagen sind beide Ereignisse als barotrop zu bewerten. Anschließend fiel jedoch der Wasserstand durch eine längere Ostwindphase erheblich ab und erreichte am 26.03. den Jahrestiefststand von -48 cm MSL (Abb. 7a). Eine dritte Phase von längerer Anstiegsdauer erstreckte sich über einen Zeitraum von 32 Tagen vom 26.03. bis 27.04. mit rund 161 km³ Wasservolumen. An der Station Landsort Norra stieg dabei der Pegel um 53,4 cm wieder auf 5,4 cm MSL an. Über den Sommer hinweg folgte ein langer Zeitraum mit eher kleineren Wasserstands-Schwankungen von weniger als 30 cm zwischen -10 cm MSL und 20 cm MSL. Ende September fiel der Pegel erneut auf ein Niveau von etwa -30 cm MSL ab. In der zweiten Oktoberhälfte ist ein weiterer barotroper Zustrom erkennbar (Abb. 7a). Vom 22.10. bis 7.11. gelangten durch eine Aneinanderreihung kurzer Phasen von starkem Westwind etwa 201 km³ Wasser in zentrale Ostseegebiete. An der Station Landsort Norra stieg der Pegel um 58,2 cm auf ein Niveau von 29,8 cm MSL innerhalb von 15,25 Tagen. Bis Ende November sank der Wasserspiegel um etwa 20 cm auf Werte von 10 cm MSL. Anschließend durchquerte vom 5.-7.12. der Orkan „Xaver“ aus Nordwesten kommend den Ostseeraum, brachte aber aufgrund des hohen Füllstandes nur geringfügigen Zustrom. Der Pegel stieg kurzzeitig um 40,2 cm innerhalb von 4,3 Tagen an, woraus sich das Einstromvolumen von 147 km³ ermitteln lässt. Dabei wurde der Spitzenpegel des Jahres von 50,9 cm MSL am 7.12. erreicht. Es folgte im Anschluss bis zum

10.12. ein schneller Abfall des Wasserstands auf Werte von 30 cm MSL. Um dieses Niveau herum pendelte der Pegelstand bis zum Jahresende.

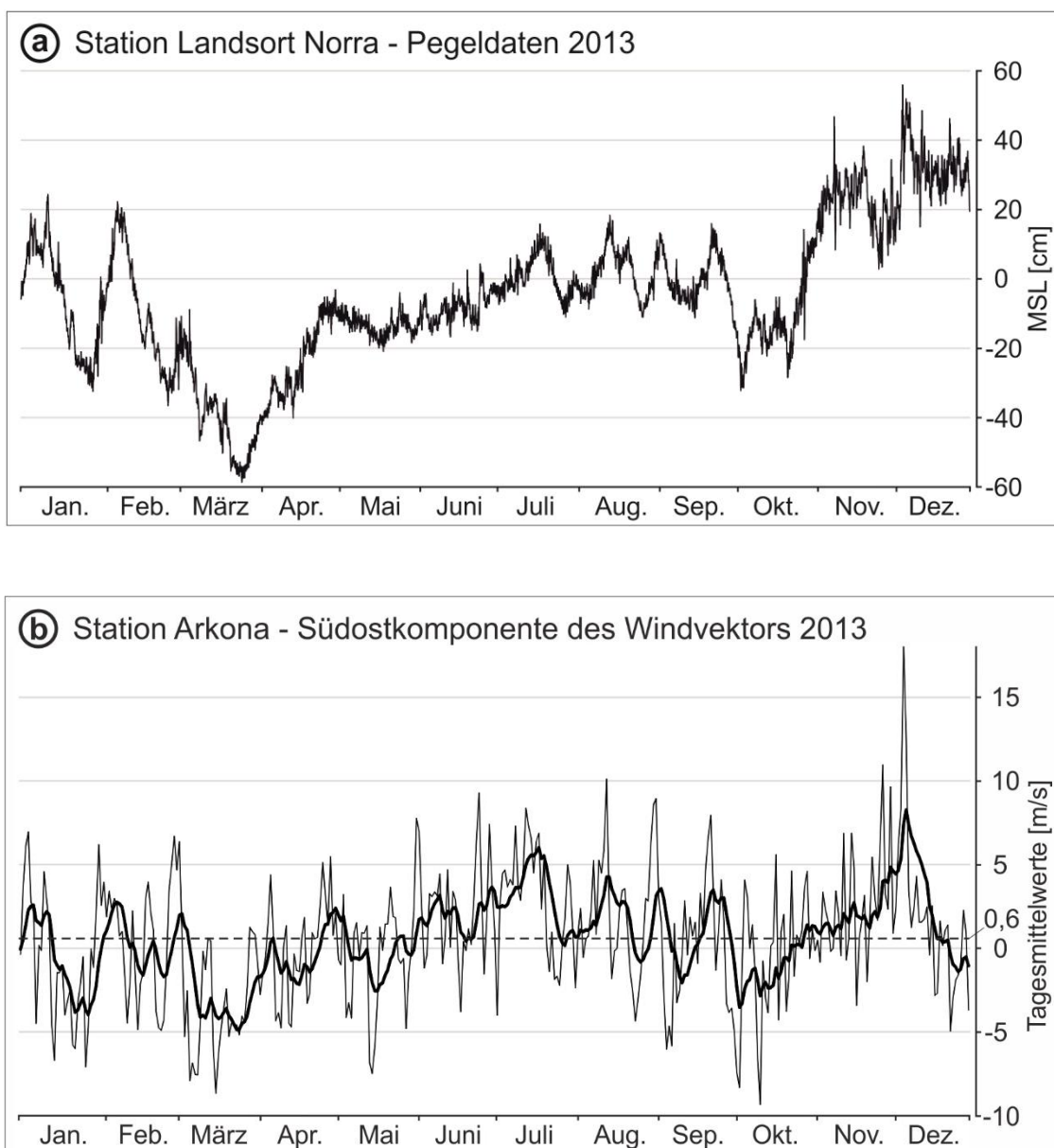


Abb. 7: a) Pegel bei Landsort als Maß für den Füllungsgrad der Ostsee (nach Daten des SMHI, 2014a). b) Stärke des Nordwestwindes (positiv) an der Wetterstation Arkona (nach Daten des DWD, 2014). Die fett gezeichnete Kurve entstand durch Filterung mit einem exponentiellen 10-Tage-Gedächtnis

Fig. 7: a) Sea level at Landsort as a measure of the Baltic Sea fill factor (from data of SMHI, 2014a). b) Strength of the north-west wind (positive) at the weather station Arkona (from data of DWD, 2014). The bold curve appeared by filtering with an exponential 10-days memory

In der Regel sind Volumina unter 200 km^3 von nur geringer Bedeutung. Im Jahresverlauf 2013 erreichten die zwei Ereignisse von Ende Januar bis Anfang Februar mit 195 km^3 und der Einstrom von Ende Oktober bis Anfang November mit 201 km^3 nur knapp diese Grenze. Bei kurzen barotropen Einstromereignissen ist aufgrund des kurzen Weges vom Kattegat zum Arkonabecken in der Regel der Transport durch den Öresund wichtiger als der entlang des langen Weges durch den Großen Belt. Für diese beiden Einstromereignisse betragen die aus Strömungsmessungen berechneten Teilvolumina durch den Öresund etwa 25 km^3 im Januar-Februar und 36 km^3 im Oktober-November (SMHI, 2014b). Die kleineren drei Ereignisse sind anhand dieser Kurve des akkumulierten Wassereinstroms nicht signifikant erkennbar. Zum Vergleich, die entsprechenden Volumina der MBLs von 2011 und 2003 beliefen sich auf 50 km^3 und 30 km^3 (NAUSCH et al., 2012).

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

Da sich der Messmast der Station „Darßer Schwelle“ (DS) im Jahr 2013 aufgrund eines Werftaufenthalts bis zum 16. August nicht im Einsatz befand, steht in diesem Jahr nur ein eingeschränkter Datensatz zur Verfügung. Eine Verankerungskette, die bereits im Vorjahr ersatzweise ausgebracht wurde, war mit Temperatur- und Leitfähigkeitssensoren bestückt und lieferte bis zum 14. Januar vollständige Messwerte. Zu diesem Zeitpunkt wurde die Verankerungskette aus Wartungsgründen planmäßig ausgewechselt, ging aber danach auf bisher ungeklärte Weise und zu einem unbekanntem Zeitpunkt verloren und konnte auch nach intensiver Suche im Messgebiet nicht wieder aufgefunden werden. Aus diesem Grund ist die Datenreihe bis zum 16. August unterbrochen, als der Messmast der Station wieder regulär in Betrieb genommen wurde und bis Ende des Jahres dann vollständige Datensätze für Temperatur, Salzgehalt und Sauerstoffkonzentration lieferte. Vereinzelt Vergleichsmessungen des Sauerstoffgehalts durch Wasserproben aus der Messtiefe der Sensoren wurden mit Hilfe der Winklermethode (vgl. GRASSHOFF et al., 1983) während der Wartungszyklen durchgeführt und die Messkurven entsprechend korrigiert.

Messwerte des profilierenden akustischen Strömungsmessers (ADCP) an der Station liegen 2013 ganzjährig vor, bis auf eine Datenlücke vom 4. bis 28. September, die durch einen Ausfall der Stromversorgung des Gerätes verursacht wurde.

3.1 Statistische Analyse

Da aufgrund der Wertzeit der Messstation und des oben beschriebenen Verlustes einer Ersatzverankerung Datenlücken von insgesamt mehr als 7 Monaten entstanden, konnte die gewohnte statistische Analyse des Jahresverlaufs im Jahr 2013 sinnvollerweise nicht durchgeführt werden. Dies betrifft sowohl die übliche Berechnung von Jahresmittelwerten und Standardabweichungen von Temperatur und Salzgehalt (Tab. 4, Abb. 8 und 9) als auch

die Analyse des Jahrgangs der Temperatur, die üblicherweise in Tab. 5 zusammengefasst ist. Die Tabellen und Graphiken mit den Werten der Vorjahre sind der Vollständigkeit halber angefügt.

Tab. 4: Jahresmittelwerte der Wassertemperatur (T) und des Salzgehaltes (S) sowie deren Standardabweichungen auf der Darßer Schwelle

Table 4: 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
2011	8,46 ± 5,62	-	7,76 ± 5,18	-	7,69 ± 5,17	-
2012	-	-	-	-	-	-
2013	-	-	-	-	-	-

Tab. 5: Amplituden (in K) und Phasen (umgerechnet in Monate) des Jahresganges der Temperatur in verschiedenen Tiefen auf der Darßer Schwelle. Die Phase entspricht hier der Zeitverschiebung zwischen dem sommerlichen Temperaturmaximum und dem Jahresende

Table 5: Amplitude (K) and phase (converted into months) of the yearly cycle of temperature measured at the Darss Sill in different depths. Phase corresponds to the time lag between temperature maximum in summer and the end of the year – Maxima in bold

Jahr	7 m Tiefe		17 m Tiefe		19 m Tiefe	
	Amplitude K	Phase Monat	Amplitude K	Phase Monat	Amplitude K	Phase Monat
1992	7,43	4,65	6,84	4,44	6,66	4,37
1993	6,48	4,79	5,88	4,54	5,84	4,41
1994	7,87	4,42	6,55	4,06	6,32	4,00
1995	7,46	4,36	6,36	4,12	–	–
1996	7,54	4,17	6,97	3,89	6,96	3,85
1997	8,60	4,83	–	–	6,42	3,95
1998	6,39	4,79	5,52	4,46	–	–
1999	7,19	4,52	5,93	4,00	5,70	3,83
2000	5,72	4,50	5,02	4,11	5,09	4,01
2001	6,96	4,46	5,35	4,01	5,11	3,94
2002	7,87	4,53	6,91	4,32	6,80	4,27
2003	8,09	4,56	7,06	4,30	7,24	4,19
2004	7,11	4,48	6,01	4,21	5,90	4,18
2005	6,94	4,40	6,23	4,03	6,21	3,93
2006	8,92	4,32	7,02	3,80	6,75	3,72
2007	6,01	4,69	5,53	4,40	5,51	4,36
2008	6,84	4,60	6,23	4,31	6,08	4,24
2009	7,55	4,57	7,09	4,37	7,03	4,32
2010	8,20	4,52	6,54	4,20	6,19	4,08
2011	7,70	4,64	6,98	4,21	7,04	4,14
2012	–	–	–	–	–	–
2013	–	–	–	–	–	–

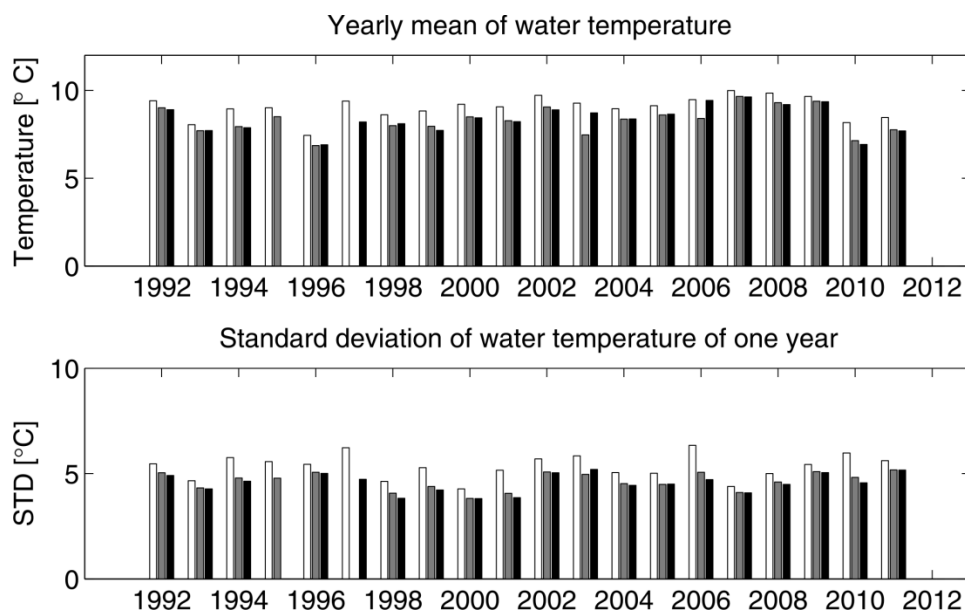


Abb. 8: Jahresmittel und Standardabweichung der Wassertemperatur in der Deckschicht (7 m, helle Säule), und der Bodenschicht (17 m, graue Säule und 19 m, schwarze Säule) auf der Darßer Schwelle

Fig. 8: Mean and standard deviation of water temperature taken over one year in the surface layer (7 m, white bars) and the bottom layer (17 m, grey bars and 19, black bars) at ther Darss Sill

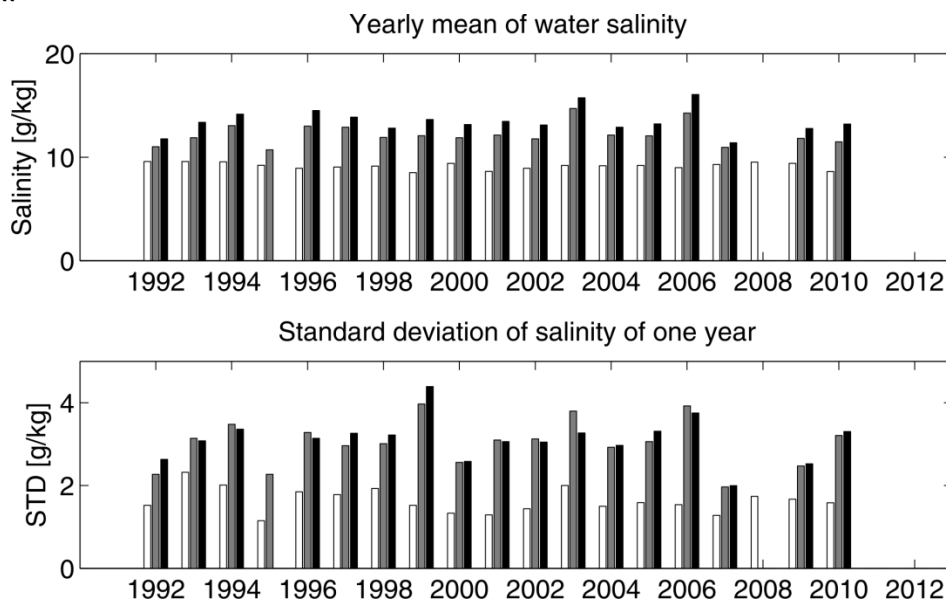


Abb. 9: Jahresmittel und Standardabweichung des Salzgehaltes in der Deckschicht (7 m, helle Säule), und der Bodenschicht (17 m, graue Säule und 19 m, schwarze Säule) auf der Darßer Schwelle

Fig. 9: Mean and standard deviation of salinity taken over one year in the surface layer (7 m, white bars) and the bottom layer (17 m, grey bars and 19, black bars) at ther Darss Sill

3.2 Erste Jahreshälfte mit Einströmen im Februar und März/April

Der Verlauf der Wassertemperatur und des Salzgehalts für das Jahr 2013 ist für die Deckschicht (7 m Tiefe) und die bodennahe Schicht (19 m Tiefe) in Abb. 10 dargestellt. Wie in den letzten Jahren wurden die in Abb. 11 dargestellten Strömungen zur Charakterisierung des tiefenvariablen, baroklinen Anteils zeitlich integriert und als „fortschreitendes Vektordiagramm“ (Pseudotrajektorie) aufgetragen. Diese integrale Darstellungsweise filtert kurzzeitige Fluktuationen aus den Strömungsmessungen und lässt langfristige Phänomene, wie zum Beispiel Ein- und Ausstromsituationen, besser erkennen. Gemäß dieser Definition entspricht die Strömungsgeschwindigkeit dann der Steigung der in Abb. 11 gezeigten Kurven, wobei positive Steigungen Einstromsituationen widerspiegeln. Es sei darauf hingewiesen, dass die in Abb. 11 gezeigten integrierten Geschwindigkeiten aufgrund der oben beschriebenen Datenlücke ab dem 4. September eine unbekannte Verschiebung enthalten und damit ab diesem Zeitpunkt nicht mehr direkt mit den Messungen der Vorjahre verglichen werden können.

Wie in Kapitel 2 beschrieben, hatte sich der Pegel bei Landsort (Abb. 7a) zum Jahresanfang 2013 von den niedrigen Werten des Dezembers 2012 erholt und erreichte nahezu ausgeglichene Werte. Bei westlichen Winden (Abb. 7b) stieg der Pegel in der ersten Januarwoche dann bei leicht erhöhten Salzgehalten (Abb. 10) und auf Einstrom gerichteten Geschwindigkeiten (Abb. 11) weiter an. Das Gesamtvolumen dieses weitgehend barotropen Einstroms, der bei starken westlichen Winden bereits am 24. Dezember 2012 begann und in der zweiten Januarwoche bei auf östliche Richtungen drehenden Winden zum Erliegen kam (zu diesem Zeitpunkt brachen auch die Abb. 10 gezeigten Salinitäten ein), wurde in Kapitel 2 auf etwa 157 km^3 geschätzt.

Aufgrund des oben beschriebenen Verlustes einer Verankerungskette brechen die in Abb. 10 gezeigten Temperatur- und Salzgehaltszeitreihen zu Beginn der 3. Januarwoche ab und setzen sich erst wieder nach Inbetriebnahme des Messmasts im August fort (siehe oben). Einige Rückschlüsse über den physikalischen Charakter der beiden in Kapitel 2 beschriebenen Einstromereignisse im Februar und März/April können aber dennoch aus den in Abb. 11 gezeigten Strömungsdaten gezogen werden.

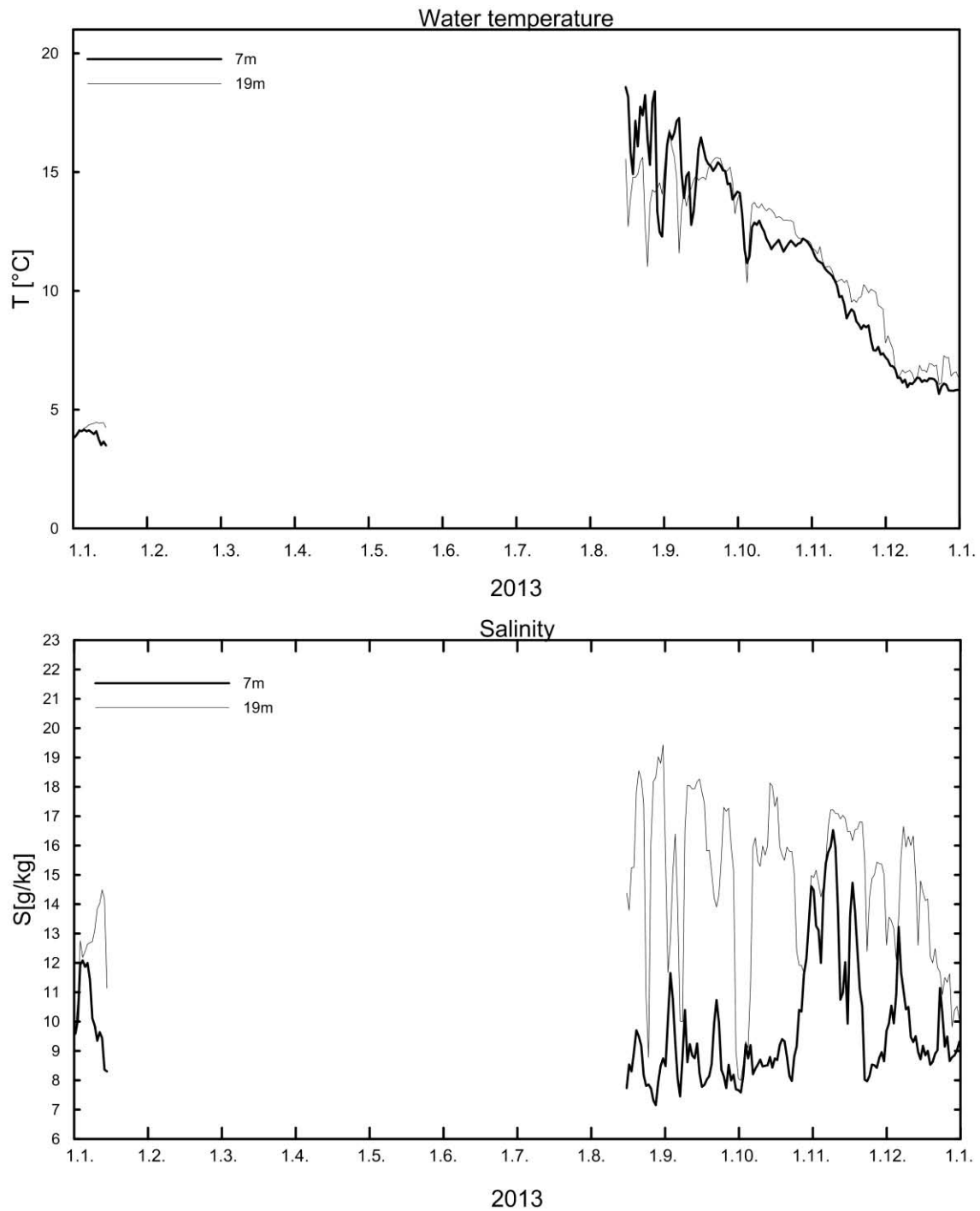


Abb. 10: Verlauf der Wassertemperatur (A) und des Salzgehaltes (B) in der Deck- und Bodenschicht auf der Darßer Schwelle im Jahre 2013

Fig. 10: Water temperature (above) and salinity (below) measured in the surface layer and the near bottom layer at Darss Sill in 2013

Die durch das Umschlagen der Winde auf westliche Richtungen verursachte Pegelerhöhung ab dem 28. Januar (Abb. 7a) spiegelt sich auch in den Strömungsdaten als ein deutliches barotropes Einstromsignal wider (Abb. 11). Die in der ersten Februarwoche durch diesen intensiven Einstrom verursachten Strömungsgeschwindigkeiten überstiegen den Wert von 0.5 m/s über nahezu die gesamte Wassersäule und zählen damit zu den höchsten des Jahres. Dieser am 7. Februar beendete Einstrom wies nach den Berechnungen in Kapitel 2 ein Einstromvolumen von ca. 195 km³ und war damit in etwa äquivalent zu dem weiter unten besprochenen stärkstem Einstromereignis des Jahres, das im Oktober/November stattfand. Aufgrund des Verlustes der Ersatzmesskette liegen zu diesem Einstrom keine direkten Salinitätsmessungen vor. Wie jedoch weiter unten diskutiert, steigen die Bodensalzgehalte im Arkonabecken (Abb. 13) infolge dieses Einstroms auf Werte von über 19 g/kg an (nur knapp unter den Jahreshöchstwerten), so dass von einem substantiellen Salztransport auszugehen ist.

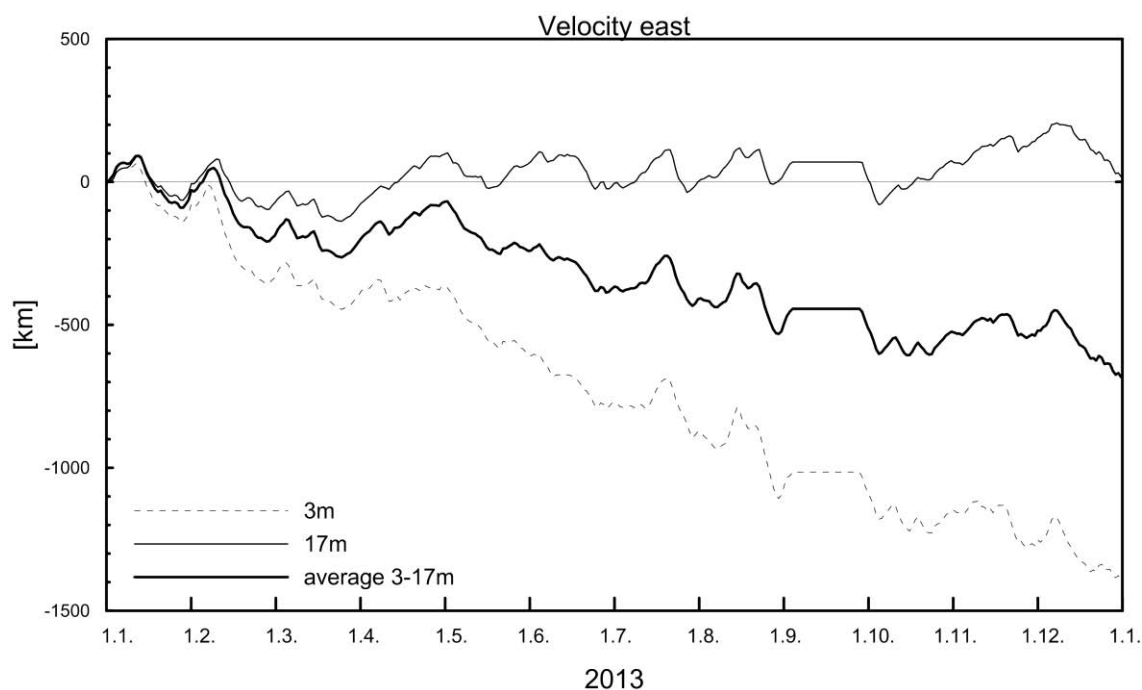


Abb. 11: Ostkomponente der progressiven Vektordiagramme der Strömung in 3 m Tiefe (ausgezogene Linie), der vertikal gemittelten Strömung (dicke Linie) und der Strömung in 17 m Tiefe (gestrichelte Linie) auf der Darßer Schwelle in 2013

Fig 11: East component of the progressive vector diagrams of the current in 3 m depth (solid line), the vertical averaged current (thick line) and the current in 17 m depth (dashed line) at the Darss Sill in 2013

Am 26. März, nachdem der Pegel bei Landsort nach mehreren Phasen starken Ausstroms den niedrigsten Stand des Jahres 2013 erreicht hatte (Abb. 7a), begann bei zunächst noch östlichen Winden (Abb. 5, 7b) eine längere Einstromperiode, die erst am 27. April nach Erreichen des mittleren Pegelniveaus ausklang (Abb. 7a). Bis auf zwei kurze Westwindereignisse im April waren die Windgeschwindigkeiten während dieses Zeitraums nur gering (Abb. 5), so dass dieser Einstrom maßgeblich durch die starken Pegelunterschiede angetrieben wurde. Die Strömungsmessungen an der Darßer Schwelle (Abb. 11) bestätigen den rein barotropen Charakter des Einstroms allerdings nur für die etwa eine Woche andauernde erste Phase. Zu späteren Zeitpunkten fluktuieren die Deckschichtgeschwindigkeiten zum Teil erheblich (am 11. April wurden kurzzeitig über 0,6 m/s Ausstrom gemessen), während die bodennahen Geschwindigkeiten fast durchgehend auf Einstrom gerichtet blieben. Dies deutet insgesamt auf einen starken baroklinen (dichtegetriebenen) Einstromanteil hin, wie er typisch ist für langanhaltende Einstromaktivität bei schwachen Winden. Trotz seiner zeitlichen Ausdehnung von mehr als 4 Wochen ist dieser Einstrom aufgrund seines geringen Volumens von nur etwa 161 km³ (Kapitel 2) als nicht signifikant für die Belüftung der zentralen Ostsee einzustufen.

Die folgenden Sommermonate waren von um den Neutralwert fluktuierenden Pegeln gekennzeichnet und wiesen keine signifikante Einstromaktivität auf (Abb. 7a). Die nach Wiederinbetriebnahme des Messmasts am 16. August gemessenen Oberflächentemperaturen lagen trotz der überdurchschnittlich warmen Monate Juli und August nur bei etwa 18 °C. Es ist allerdings unwahrscheinlich, dass dieser Wert den Jahreshöchsttemperaturen entsprach, wie ein Vergleich mit den weiter unten besprochenen Messstationen im Arkonabecken und in der Oderbucht zeigt. Diese wiesen beide Werte von deutlich über 20° C in der erste Augushälfte auf (Abb. 13, 15), als der Messmast an der Darßer Schwelle noch außer Betrieb war.

Die sommerlichen Sauerstoffkonzentrationen in der Deckschicht lagen durchgehend im Bereich der Sättigung (Abb. 12). In Bodennähe allerdings fielen sie am 30. August kurzzeitig auf etwa 20 Prozent Sättigung ab (der niedrigste gemessene Wert des Jahres), erholten sich aber innerhalb von nur 3 Tagen auf Werte von über 80 Prozent (Abb. 12). Wenige Tage zuvor hatte zunächst schwacher barokliner, dann starker barotroper Einstrom eingesetzt, der in seiner ersten Phase sauerstoffarmes Wasser aus der flachen Beltsee zur Messstation transportierte, bevor dieses durch sauerstoffreiches Nordseewasser ersetzt wurde. Diese Abfolge von Konzentrationsschwankungen zu Beginn von Einstromereignissen findet sich auch bei einigen späteren, hier nicht im Detail besprochenen kleineren Einströmen des Spätsommers 2013. Sie wurde in ähnlicher Form auch schon in den Vorjahren beobachtet und kann daher als typisch für die sommerliche Sauerstoffdynamik an der Darßer Schwelle gelten.

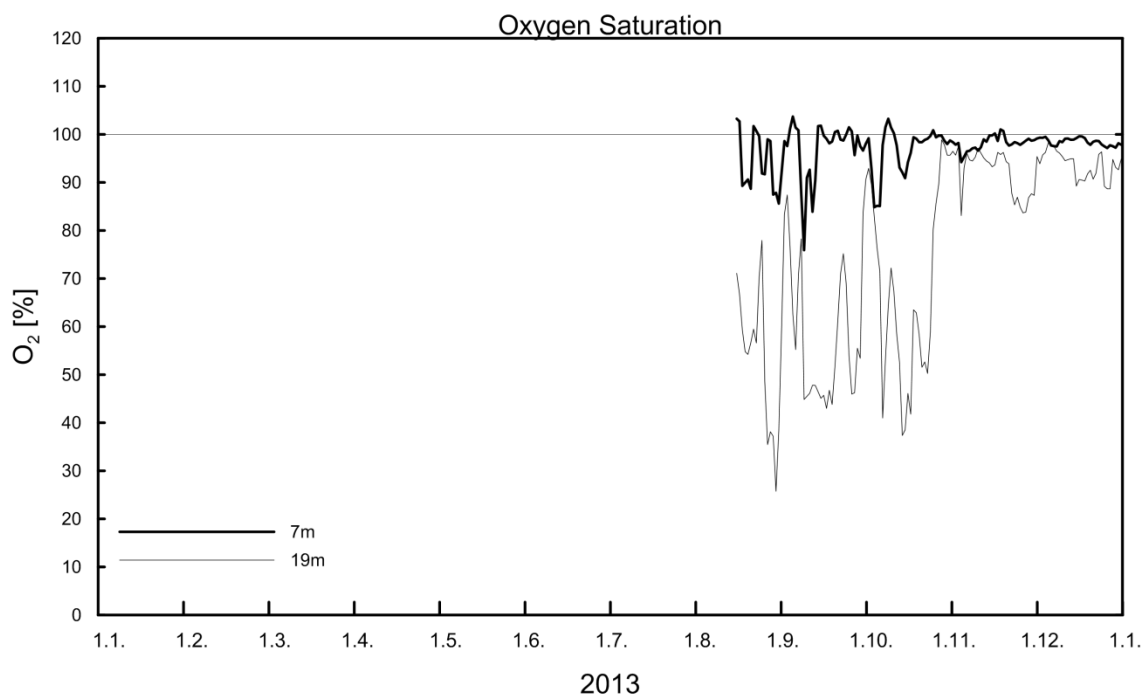


Abb. 12: Verlauf der Sauerstoffsättigung in Deck- und Bodenschicht auf der Darßer Schwelle im Jahre 2013

Fig. 12: Oxygen saturation measured in the surface and bottom layer at the Darss Sill in 2013

3.3 Die Herbstmonate mit Einströmen im Oktober/November und Dezember

Ausgehend von einem relativ niedrigen Füllstand der Ostsee (Abb. 7a) und Winden aus westlichen Richtungen (Abb. 5b, 7b) setzte am 22. Oktober eine etwa zweiwöchige barotrope Einstromphase ein, die mit einem Volumentransport von knapp über 200 km³ das wichtigste Einstromereignis des Jahres 2013 markierte. Im Vorfeld dieses Einstroms war es nach einer intensiven, Mitte September einsetzenden Ausstromphase bereits ab dem 6. Oktober zu einer Serie mehrtägiger barotroper Einstromereignisse gekommen, die von einer generellen Tendenz zu bodennahem, baroklinem Einstrom überlagert wurde (Abb. 11).

Die Sauerstoffkonzentrationen schwankten während dieser etwas dreiwöchigen Phase zwischen Werten von 30 und 70 Prozent Sättigung und sanken damit also weder auf kritisch niedrige Werte ab noch erholten sie sich komplett (Abb. 12). Erst das oben geschilderte kräftige Einstromereignis führte Anfang November zu einem schnellen und andauerndem Anstieg der Konzentrationen auf Werte von um die 90 Prozent Sättigung. Dieses Ereignis und die reduzierte Sauerstoffzehrung durch den anschließenden Abfall der Boden- und Deckschichttemperaturen auf unter 10 °C trugen dazu bei, dass die Sauerstoffgehalte dann bis Jahresende nicht mehr unter die Marke von 10 Prozent Sättigung fielen.

Schließlich bleibt noch zu bemerken, dass das spektakulärste Windereignis des Jahres, der Wintersturm „Xaver“ mit Windgeschwindigkeiten von über 24 m/s (Stundenmittel am 6.

Dezember) an der Messstation „Darßer Schwelle“, keinen wichtigen Einfluss auf die Einstromaktivität hatte (siehe Diskussion in Kapitel 2). Die hohen Windgeschwindigkeiten aus westlichen Richtungen führten lokal zwar zu einer starken Vermischung der Wassersäule und damit zu einer fast vollständigen Homogenisierung der Wassersäule im Bereich der Messstation (Abb. 10). Aufgrund des hohen Füllstands der Ostsee zu Beginn des Windereignisses (Abb. 7a) und der für einen Einstrom nicht idealen südwestlichen Windrichtung (Abb. 3), weisen die Pegelstände (Abb. 7a), Salzgehalte (Abb. 10) und Strömungsgeschwindigkeiten (Abb. 11) jedoch nur auf einen schwachen Einstrom salzreichen Wassers aus der Nordsee hin.

4. Beobachtungen an der Bojenstation „Arkonabecken“

Zur Dynamik der salzreichen Bodenströmungen im Bereich des Arkonabeckens fanden vor einigen 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 detaillierten 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, 2009a, b, UMLAUF et al., 2010).

Die Sollposition der Bojenstation "Arkonabecken" befindet sich annähernd 20 m nordöstlich von Arkona auf 46 m Wassertiefe. Nach einem Werftaufenthalt im Vorjahr lieferte die Station im Jahr 2013 nahezu vollständige Messreihen von Temperatur, Salzgehalt und Sauerstoffkonzentration (letztere wurden wie in Kapitel 3 beschrieben durch direkte Sauerstoffmessungen nach der Winkler-Methode korrigiert).

Die Zeitreihen von Wassertemperatur und Salzgehalt in 7 m und 40 m Tiefe sind in Abb. 13 dargestellt, die entsprechenden Sauerstoffkonzentrationen, hier aufgetragen als Sättigungswerte, in Abb. 14. Ähnlich wie im Vorjahr lagen die Deckschichttemperaturen zu Beginn des Jahres noch bei etwa 5 °C und erreichten aufgrund des außergewöhnlich kalten Monats März (siehe Kapitel 2) erst am 23. März mit 0,9 °C die niedrigsten Temperaturen des Jahres. Wie schon im Vorjahr wurden damit die extrem niedrigen Temperaturen der Jahre 2010 und 2011 nicht mehr ganz erreicht. Nach einer rapiden, in der ersten Aprilwoche

beginnenden Erwärmungsphase wurde die Jahreshöchsttemperatur dann nach der in Kapitel 2 beschriebenen Hitzewelle am 7. August beobachtet. Sie betrug im Tagesmittel 20,8 °C und lag damit deutlich über den Temperaturen der Vorjahre. Ab dem 10. August brachen die Temperaturen aufgrund von einigen Starkwindereignissen (Kapitel 2) kurzzeitig auf unter 17 °C ein und erholten sich bis Anfang September trotz des warmen Spätsommerwetters nur noch unvollständig. Anschließend setzte eine nahezu lineare Abkühlungsphase ein, zu deren Ende Deckschichttemperaturen von ca. 5 °C erreicht wurden. Die Wassertemperaturen in der Silvesternacht lagen damit etwa 1 °C über denen des Vorjahres.

Ebenso wie die Oberflächentemperaturen zeigten auch die Sauerstoffgehalte in der Deckschicht (Abb. 14) ein klares saisonales Signal. Trotz eisiger Temperaturen überstiegen die Sättigungswerte am 1. April erstmalig die Marke von 100 Prozent und zeigten damit den Beginn der ersten Frühjahrsblüte. Maßgeblich hierfür waren die Kombination von relativ schwachen Winden (kleine Mischungstiefe) und starker Globalstrahlung während dieser Phase. Ab Mitte April stieg die Sauerstoffsättigung dann auf über 110 Prozent und deutete damit auf eine weiter erhöhte der Primärproduktion im Verlauf der Blüte hin. Weitere Maxima folgten im Mai (die Jahreshöchstwerte von über 115 Prozent wurden hier gemessen) und den folgenden Sommermonaten, bevor die Sauerstoffkurve im August dann wieder unter die Sättigungsgrenze fiel und bis zum Jahresende langsam weiter auf Werte von knapp über 90 Prozent abfiel.

Die Effekte der in Kapitel 3 beschriebenen Einströme über die Darßer Schwelle manifestierten sich vor allem in den Fluktuationen der Bodensalzgehalte (Abb. 13). Mit leichter zeitlicher Verzögerung sind dort die beiden Einstromereignisse im Dezember/Januar und im Februar als deutliche Maxima in den Salinitäten zu identifizieren. Bemerkenswert waren die sehr hohen Werte von über 20 g/kg (dem höchsten Bodensalzgehalt des Jahres) nach dem Einstrom im Dezember/Januar, welche die Werte an der Darßer Schwelle (Abb. 10) deutlich überstiegen. Dies legt den Einstrom von besonders salzreichen Wassermassen durch den Öresund nahe, der mit dem derzeitigen Messnetz allerdings nicht erfasst werden kann. Strömungsdaten des SMHI zeigen aber eindeutig, dass der Einstrom vom Dezember/Januar auch über den Öresund erfolgte (SMHI, 2014b).

Der folgende kräftige Einstrom im Februar erreichte diese hohen Salinitäten nicht mehr ganz, führte aber aufgrund seines größeren Volumens sogar zu einer kurzzeitigen Erhöhung der Oberflächensalzgehalte (Abb. 13). Auch in diesem Fall weisen die Daten des SMHI auf einen substantiellen Beitrag von Einstrom über den Öresund hin (siehe oben). Der Import von salzreichem und kaltem Nordseewasser zeigte sich auch deutlich im Temperatursignal der Messstation: Am 6. Februar fielen die bodennahen Temperaturen bei der Passage der Einstromfront innerhalb nur eines Tages um mehr als 1,5 °C (Abb. 13). Auffällig bei beiden Einströmen sind die in Abb. 14 jeweils sichtbaren anfänglichen Einbrüche der Sauerstoffkonzentrationen, die möglicherweise als das Signal sauerstoffarmer Wassermassen aus der Beltsee interpretiert werden können (dieser Effekt wird normalerweise nur in den Sommermonaten beobachtet).

In der folgenden intensiven Ausstromphase bis Ende März (Kapitel 3) füllte sich das Arkonabecken bis in die tiefsten Schichten mit den aus Osten einströmenden Wassermassen des Bornholmbeckens. Aufgrund der tieferen Lage der Halokline in diesem Becken wurden die Schwellen zum Arkonabecken während dieses Vorgangs ausschließlich von salzarmem, kaltem und sauerstoffreichem Deckschichtwasser überströmt. Zu Anfang des Monats April dominierte daher dieser Wasserkörper die hydrographischen Parameter an der Messstation. Bei ungewöhnlich schwach geschichteter Wassersäule wurden in der Bodenschicht die niedrigsten Temperaturen und Salzgehalte des Jahres gemessen (Abb. 13), während aufgrund der guten Belüftung des Deckschichtwassers im Bornholmbecken die Sauerstoffkonzentrationen mit über 90 Prozent Sättigung nahe der Oberflächenwerte liegen.

Das Signal des nachfolgenden, an der Darßer Schwelle bereits am 26. März beginnenden Einstroms (Kapitel 3) zeigte sich an der Messstation im Arkonabecken erst mit einer Verzögerung von mehr als 10 Tagen, dafür aber umso beeindruckender: In der Nacht vom 6. zum 7. April stiegen die Salinitäten innerhalb weniger Stunden vom niedrigsten Wert des Jahres (7,6 g/kg) auf über 16 g/kg (Abb. 13). Eine vergleichbare Frontstruktur findet sich weder in der Temperatur noch in den Sauerstoffkonzentrationen, da die einströmenden Wassermassen ebenso wie das zuvor aus dem Bornholmbecken zugeströmte Deckschichtwasser (siehe oben) kalt und gut belüftet waren.

Die geringe Einstromaktivität in den folgenden Sommermonaten (Kapitel 3) zeigte sich besonders deutlich in den bis Anfang Juli nahezu stagnierenden Temperaturen (Abb. 13) und kontinuierlich sinkenden Sauerstoffkonzentrationen der bodennahen Schicht (Abb. 14). Auch die Salzgehalte (Abb. 13) fluktuierten nur schwach um ihren Mittelwert von etwa 13 g/kg. Das markanteste Ereignis während der Sommermonate war der sprunghafte Anstieg der Bodentemperaturen in der zweiten Juliwoche (Abb. 13), der als Signal eines wegen seiner kurzen Dauer ansonsten unerheblichen Einstromschubs im Juli interpretiert werden kann (Abb. 6a, 11). Zum Ende der Sommerperiode sinken die Sauerstoffgehalte im Stundenmittel kurzzeitig auf bis 20 Prozent ab (zum Beispiel 1. und 5. September), erholen sich aber in der zweiten und dritten Septemberwoche wieder auf Werte von über 50 Prozent infolge eines kurzen Einstromschubs in der ersten Septemberhälfte (dieser ist aufgrund des gleichzeitigen Ausfalls der Messkette und des Strömungsmessers an der Darßer Schwelle nur anhand des Pegelanstiegs in Abb. 7a erkennbar).

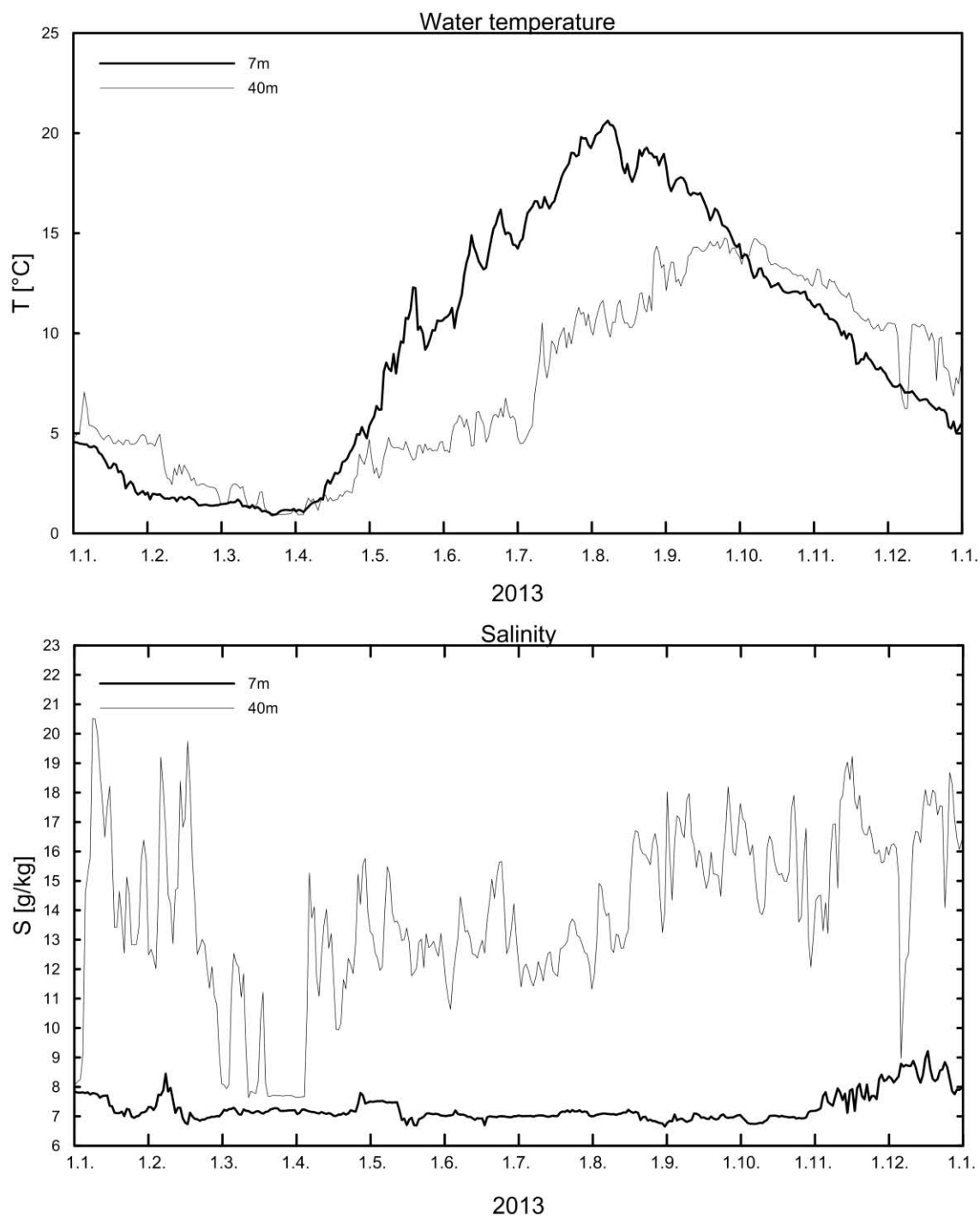


Abb. 13: Verlauf der Wassertemperatur (A) und des Salzgehaltes (B) in der Deck- und Bodenschicht im Arkonabecken (Station AB) im Jahr 2013

Fig. 13: Water temperature (above) and salinity (below) measured in the surface layer and near bottom layer at the station AB in the Arkona Basin in 2013

Trotz beginnender Einstromtendenz an der Darßer Schwelle (Kapitel 3) sind in der Periode von Ende September bis Anfang November keine klaren Einstromsignale in Temperatur, Salzgehalt und Sauerstoffkonzentration in der Bodenschicht zu erkennen. Die bodennahen Sauerstoffwerte unterschritten zu Anfang der zweiten Novemberwoche im Stundenmittel sogar mehrmals die Marke von 20 Prozent Sättigung und erreichten am Abend des 7. November den Jahrestiefstwert von 16,9 Prozent. Ein eindeutiges Indiz für die Ankunft des über die Darßer Schwelle und den Öresund bereits seit der letzten Oktoberwoche verstärkt einströmenden Nordseewassers zeigte sich erst am 11. November, als die Bodensalzgehalte erstmalig seit Februar den Wert von 20 g/kg übersprangen (Abb. 13). Ab dem 17. November etablierte sich dann auch eine langfristige Erholung der Sauerstoffgehalte mit Sättigungskonzentrationen im Bereich von 80-90 Prozent. Diese Beobachtungen unterstreichen den Einstrom vom Oktober/November als das wichtigste Einstromereignis des Jahres 2013.

Schließlich sei bemerkt, dass der Wintersturm Xaver, ähnlich wie an der Darßer Schwelle, auch im Arkonabecken keine langfristigen Effekte zur Folge hatte. Im Stundenmittel wurden hier am 6. Dezember zwar ebenfalls Windgeschwindigkeiten von über 25 m/s aus West gemessen, die aber keine klar identifizierbaren Signale (z.B. von Vermischungsprozessen) in den Oberflächenwerten von Temperatur, Salzgehalt und Sauerstoff hinterließen (Abb. 13, 14). Die zunächst erstaunlichen mehrtägigen Ausschläge der bodennahen Messreihen in Richtung der oberflächennahen Werte (Abb. 13, 14) sollten daher nicht als Manifestation von vertikaler Vermischung missverstanden werden. Es ist wahrscheinlicher, dass der bei westlichen Winden nach Süden gerichtete „Ekman“-Transport von Deckschichtwasser zu einem starkem, ebenfalls südwärts gerichtetem Abkippen der Halokline geführt hatte, durch welches die bodennahen Sensoren der Messstation vom Deckschichtwasser erreicht wurden. Im Gegensatz zur Windmischung ist dieser Prozess durch Rückkippen der Halokline weitgehend reversibel, was die schnelle Relaxation der bodennahen Parameter nach dem Windereignis erklären mag.

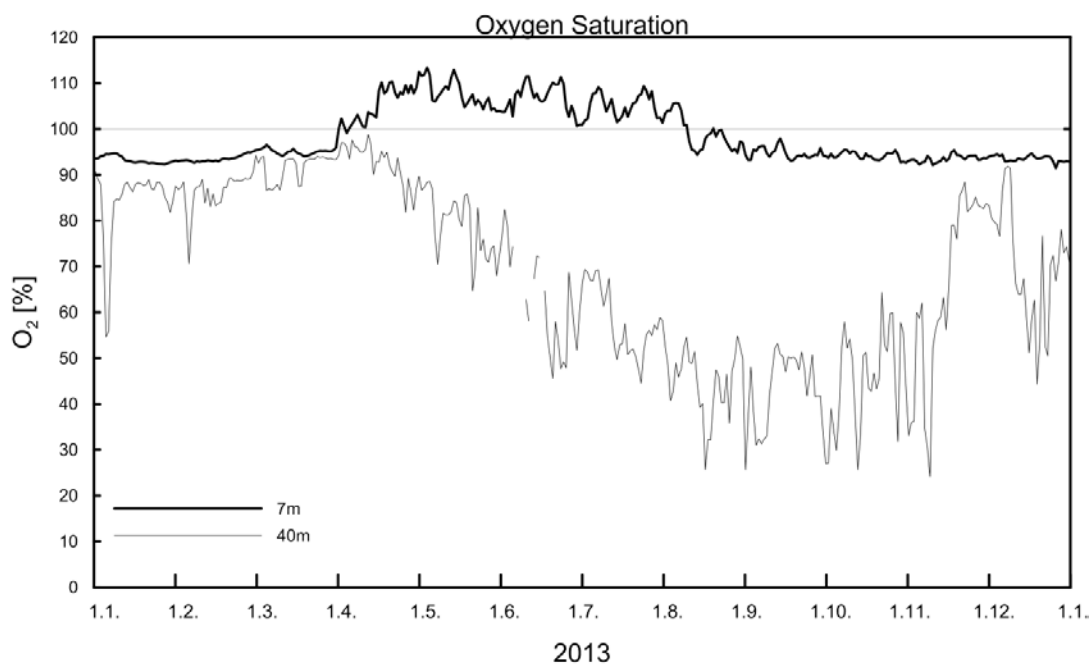


Abb. 14: Verlauf der Sauerstoffgehaltes in der Deck- und Bodenschicht im Arkonabecken (Station AB) im Jahr 2013

Fig. 14: Oxygen saturation measured in the surface and bottom layer at the station AB in the Arkona Basin in 2013

5. Beobachtungen an der Bojenstation „Oderbank“

Die Verteilung von Wassermassen und die Zirkulation in der Pommerschen Bucht sind im Rahmen des TRUMP-Projektes (*TR*ansport und *UM*satzprozesse in der *P*ommerschen Bucht) untersucht (v. BODUNGEN et al., 1995; TRUMP, 1998) sowie durch SIEGEL et al. (1996), MOHRHOLZ (1998) und LASS, MOHRHOLZ & SEIFERT (2001) beschrieben worden. Bei Westwindlagen wird dort gut durchmischtes Wasser aus der Pommerschen Bucht, dem sich ein geringer Anteil von Oberflächenwasser aus dem Arkonabecken beimischt, beobachtet. Während anhaltender Ostwindlagen strömt Wasser aus dem Oderhaff durch Swina und Peenestrom in die Pommersche Bucht und schichtet sich vor der Küste Usedom über das Buchtwasser. Wie unten dargestellt, haben diese Prozesse einen wichtigen Einfluss auf die Primärproduktion und den Sauerstoffhaushalt in der Pommerschen Bucht.

Die Bojenstation „Oder Bank“ befindet sich annähernd 5 m nordöstlich von Koserow/Usedom auf 15 m Wassertiefe. Die Messdaten umfassen Temperatur, Salzgehalt und Sauerstoff in 3 m und 12 m Tiefe. Nach der schrittweisen Umstellung der Sauerstoffsensoren an allen Messstationen werden auch an der Station „Oder Bank“ die Sauerstoffmessungen seit dem Jahr 2010 durchgehend mit den neuen Optoden der Firma Aanderaa (Norwegen) durchgeführt und während der Wartungszyklen mit Vergleichsmessungen nach der Winklermethode kalibriert. Bereits am 19. Dezember des

Vorjahres war die Bojenstation wegen Eisgefahr eingeholt worden und ging nach einer Werftreparatur und wetterbedingten Problemen beim Ausbringen erst wieder am 4. Juli 2013 wieder in Betrieb. Nach diesem Zeitpunkt lieferte die Station durchgehend vollständige Datenreihen, bis sie am 18. Dezember, wie schon im Vorjahr, zur Vermeidung potentieller Risiken durch Eisgang eingeholt wurde.

Die Temperaturen und Salzgehalte der Messstation sind in Abb. 15 aufgetragen, die zugehörigen Sauerstoffmessungen in Abb. 16. Bemerkenswert in den Temperaturzeitreihen sind besonders die hohen Deckschichttemperaturen des Jahres 2013, die aufgrund der ab dem 20. Juli beginnenden Hochsommerphase (siehe Kapitel 2) die Temperaturen der beiden Vorjahre bei weitem überschritten und sogar an die ungewöhnlich hohen Werte (bis zu 23 °C) des Rekordjahres 2010 heranreichten. Am 28. Juli 2013 wurden Stundenmittelwerte von 22,8 °C und am 3. August mit 22,9 °C die Jahreshöchsttemperatur aller Messstationen erreicht. Mit einem Windereignis um den 12. August herum brachen die Temperaturen an der Oberbank dann aber auf Werte von unter 20 °C ein und mit einer kurzzeitigen Volldurchmischung der Wassersäule begann die herbstliche Abkühlungsphase (Abb. 15).

Ein wichtiger dynamischer Grund für die starke Erwärmung der Deckschicht in der Oderbucht liegt in der Unterdrückung von vertikaler Vermischung durch die Aufsichtung weniger salzreichen (also weniger dichten) Mischwassers aus dem Oderhaff. Solche Schichtungsereignisse korrelieren während der Sommermonate im Allgemeinen hervorragend mit kürzeren Perioden ausgeprägter Temperaturschichtung und hohen Deckschicht-temperaturen. In den Jahren 2007 und 2010 hatten besonders ausgedehnte Schichtungsereignisse dieser Art außerdem zu einer starken Reduktion der bodennahen Sauerstoffgehalte geführt. Auch im Vorjahr wurden drei solcher Ereignisse während der Sommermonate registriert, wobei allerdings die bodennahen Sauerstoffkonzentrationen nicht unter die Marke von 40 Prozent der Sättigungskonzentration fielen (NAUSCH et al., 2013).

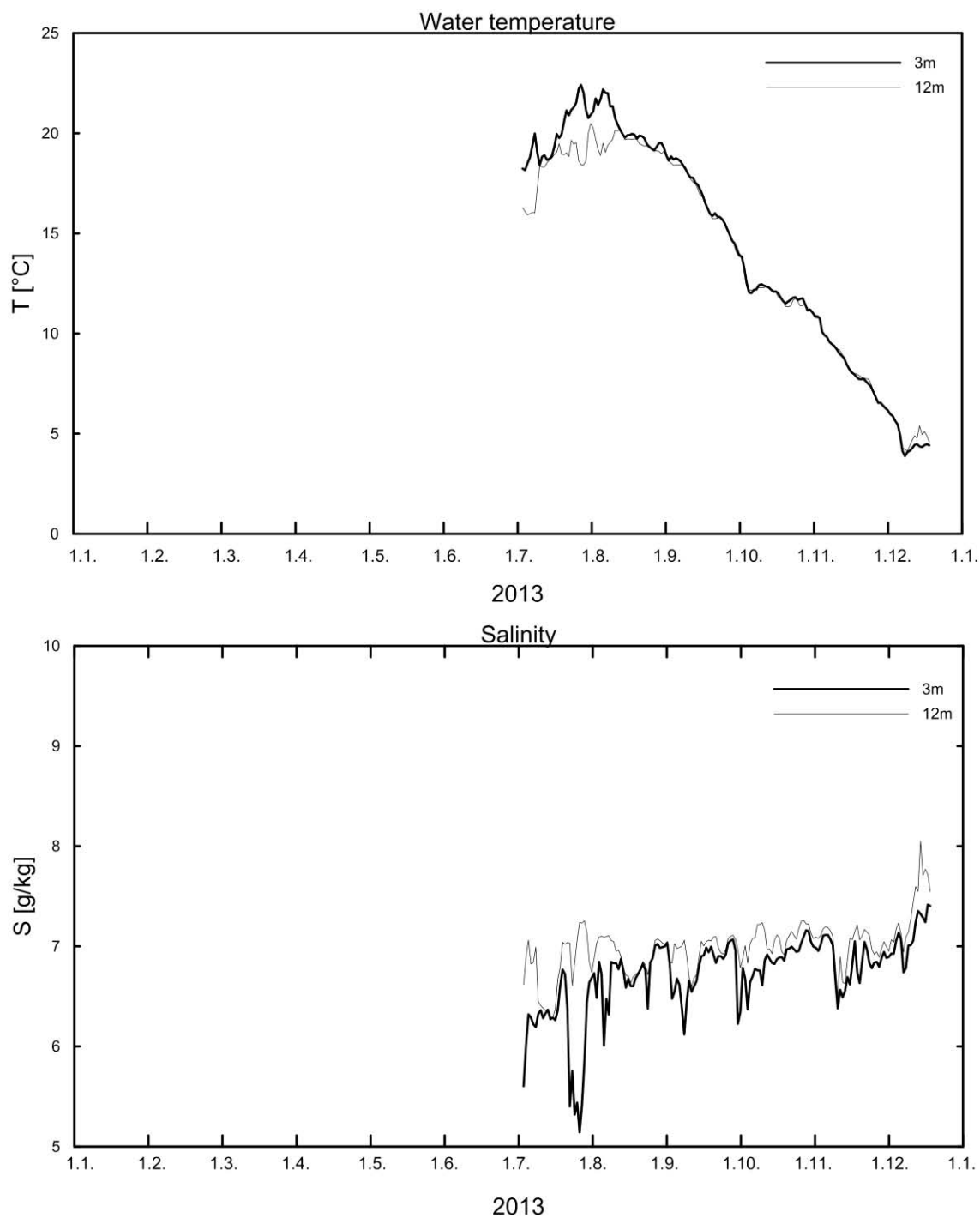


Abb. 15: Verlauf der Wassertemperatur (A) und des Salzgehaltes (B) in der Deck- und Bodenschicht in der Pommerschen Bucht (Station OB) im Jahr 2013

Fig. 15: Water temperature (above) and salinity (below) measured in the surface layer and near bottom layer at the station OB in the Pomeranian Bight in 2013

Für das Jahr 2013 konnten insgesamt drei der oben beschriebenen Schichtungsereignisse identifiziert werden, die allerdings insgesamt weniger deutlich ausgeprägt waren als die der Vorjahre. Das erste Ereignis dieser Art fand in den ersten beiden Juliwochen statt, kurz nach Wiederinbetriebnahme der Station, als die Deckschichttemperaturen erstmalig über die Marke von 20 °C kletterten. Die schnelle Relaxation der Deckschichtsalzgehalte in den ersten Tagen der Messungen (Abb. 15) legen nahe, dass dieses Aufschichtungsereignis bereits vor dem Start der Messreihen begonnen hatte und hier nur teilweise erfasst wurde. Trotzdem zeigen die Temperaturdaten in Abb. 15 eine deutliche Abkopplung von Boden- und Deckschichttemperaturen mit Temperaturunterschieden von bis zu 4 K. Dieses Ereignis wird bereits am 10. Juli durch auffrischende Winde (Windgeschwindigkeiten > 10 m/s) und eine vollständigen Homogenisierung der Wassersäule durch Vermischung aufgelöst.

Das zweite Schichtungsereignis begann am 20. Juli und erreichte mit einem Rückgang der Oberflächensalzgehalte auf unter 5 g/kg (im Stundenmittel) und Salzgehaltsunterschieden von bis zu 2,5 g/kg zwischen Boden- und Deckschichtwasser seinen Höhepunkt am 27. Juli (Abb. 15). Innerhalb der Messreihe ist dieses Ereignis das ausgeprägteste in Bezug auf die Stärke der vertikalen Schichtung. Aufgrund der schnellen Erwärmung der dünnen Brackwasserschicht ist es somit wenig überraschend, dass bereits einen Tag später die oben geschilderten Höchsttemperaturen in der Deckschicht erreicht wurden. Am 31. Juli frischten die Winde im Stundenmittel dann kurz auf bis zu 10 m/s auf und zerstörten die aufgebaute Schichtung weitgehend.

Mit dem Abflauen der Winde schloss sich das dritte, in Bezug auf die Sauerstoffdefizite in der Bodenschicht besonders wichtige Schichtungsereignis nahezu nahtlos an. Obwohl die vertikalen Salinitätsunterschiede bei diesem Ereignis deutlich schwächer waren als bei den vorherigen, ist die Abkopplung der Temperaturentwicklung von Boden- und Deckschicht auch hier deutlich zu erkennen (Abb. 15). Am 3. August wurde in der Deckschicht der oben erwähnte Jahreshöchstwert von 22,9 °C erreicht, während die bodennahen Temperaturen bei unter 19 °C stagnierten. Am 11. August auffrischende Winde beendeten am Abend des 12. August auch dieses Ereignis, das mit einer Dauer von etwa 10 Tagen als das am längsten andauernde gezählt werden muss.

Die aus ökologischer Sicht weitaus wichtigste Konsequenz aus der Unterdrückung turbulenter Vermischung während der oben geschilderten Ereignisse ist die Abnahme der bodennahen Sauerstoffgehalte durch die Abkopplung der Bodenschicht von der direkten atmosphärischen Belüftung. Dieser Effekt auf den Sauerstoffhaushalt der Pommerschen Bucht wird in Abb. 16 sichtbar, in welcher die Sauerstoffkonzentrationen in 3 m und 12 m Tiefe aufgetragen sind. Während aller Schichtungsereignisse zeigte sich eine klare negative Korrelation zwischen ansteigender Sauerstoffsättigung in der Deckschicht und einer Abnahme in der bodennahen Schicht.

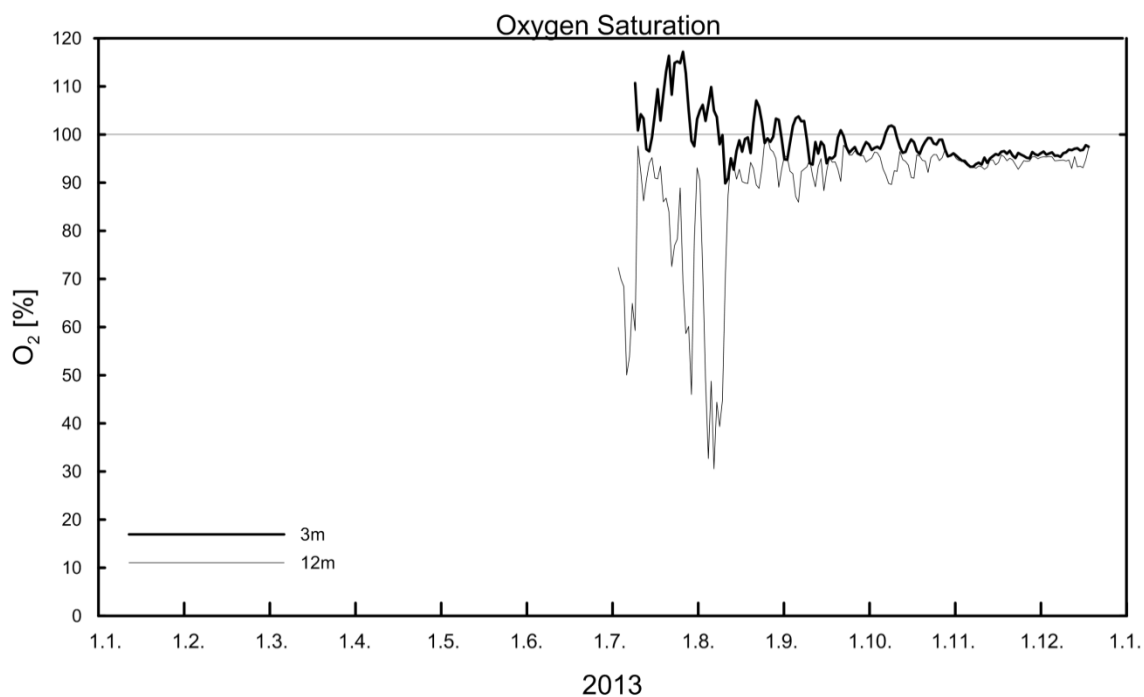


Abb. 16: Verlauf der Sauerstoffgehaltes in der Deck- und Bodenschicht in der Pommerschen Bucht (Station OB) im Jahr 2013

Fig. 16: Oxygen saturation measured in the surface and bottom layer at the station OB in the Pomeranian Bight in 2013

Bei den drei Hauptereignissen dieser Art im Jahr 2013 fielen die Sauerstoffsättigungen jeweils bis weit unter die Sättigungsgrenze (Abb. 16). Die Minimalwerte wurden bei den ersten beiden oben beschriebenen Ereignissen jeweils kurz vor deren Auflösung durch Windmischung erreicht. Sie betragen (jeweils im Stundenmittel) 20 Prozent, gemessen am 10. Juli für Ereignis 1, und 36 Prozent, gemessen am 30. Juli für Ereignis 2.

Trotz der relativ schwachen Dichteschichtung hatte das 3. Ereignis in Bezug auf Dauer und Intensität die bei weitem bedeutendsten Auswirkungen auf den Sauerstoffhaushalt der Bodenschicht. Während der etwa 10-tägigen Dauer dieser Schichtungsperiode schwankten die Bodensauerstoffgehalte im Stundenmittel zwischen 30 und 70 Prozent Sättigung und erreichten am 7. August mit 20 Prozent den kleinsten gemessenen Wert des Jahres. Am 11. August wurde schließlich auch dieses letzte signifikante Schichtungsereignis des Jahres 2013 durch Windmischung aufgelöst. Insgesamt unterschritt dieses Ereignis die kleinsten gemessenen Sauerstoffkonzentrationen der Vorjahre, wobei aber anoxische Zustände wie im Juli des „Rekordjahres“ 2010 (NAUSCH et al., 2011a) nicht beobachtet wurden.

Es liegt nahe, dass die erhöhte Primärproduktion von Biomasse im Oderhaff zu den während aller Ereignisse ebenfalls beobachteten übersättigten Sauerstoffkonzentrationen in der Deckschicht führte (Abb. 16), und zwar durch lateralen Transport von Haffwasser zur Station OB. Zusätzlich oder alternativ wurden mit dem Haffwasser hohe Nährstoffkonzentrationen in

der Deckschicht aus dem Haff exportiert, was an der Station OB lokal zu erhöhter Produktion und damit wiederum zu erhöhten Sauerstoffkonzentrationen an der Oberfläche geführt haben mag. Die Korrelation dieser Ereignisse mit einer Sauerstoffreduktion in der bodennahen Schicht weist auf eine erhöhte Sauerstoffzehrung durch den Abbau absinkender oder bereits abgesunkener Biomasse hin, wobei die entsprechenden mikrobiellen Prozesse bei den beobachteten hohen Wassertemperaturen beschleunigt ablaufen.

Auch nach Auflösung des dritten oben beschriebenen Schichtungsereignisses lassen sich in den Salzgehaltsmessreihen Indizien für kurzfristige Aufschichtungen von Brackwasserfahnen aus dem Oderhaff finden. Aufgrund der kurzen Dauer und der stetig sinkenden Wassertemperaturen ist aber keines von ihnen in der Lage, zu einer signifikanten Reduktion der Bodensauerstoffgehalte zu führen.

6. Hydrographisch- hydrochemische Bedingungen

6.1. Wassertemperatur

6.1.1 Die Wasseroberflächentemperatur abgeleitet aus Satellitendaten

Die Entwicklung der Wasseroberflächentemperatur (Sea Surface Temperature = SST) der Ostsee wurde im Jahr 2013 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 täglichen Satellitendaten wurden 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 in den HELCOM Indicator Fact Sheets (SIEGEL & GERTH, 2013) zusammengefasst. Betrachtungen zur Langzeitentwicklung der Wasseroberflächentemperatur in der Periode seit 1990 sind bei SIEGEL et al. (1999, 2006, 2009) und SIEGEL & GERTH (2010) dargestellt. Zur Interpretation der thermischen Entwicklung wurden die Wärme- und Kältesummen der Lufttemperatur von Warnemünde (Tab. 2), die Beschreibung der Wetterentwicklung (Kapitel 2) sowie Daten der MARNET Stationen (BSH/IOW) und des Internen Messnetzes Küste MV des StALU MM Rostock herangezogen.

Das Jahr 2013 startete mit einem vergleichsweise normalen Januar. Durch den lang anhaltenden Winter lagen die SST in der westlichen und weiten Teilen der zentralen Ostsee von Januar bis Mai unter den langjährigen Mittelwerten. Die maximalen negativen Anomalien traten im März mit bis zu -1,5 K und im April mit -2,5 K auf. Dadurch war der März mit 0-1 °C im Mittel ungewöhnlicherweise der kälteste Monat des Jahres. Der kälteste Tag war der 25.03. mit bis zu 1 °C und maximaler Eisbedeckung in der nördlichen Ostsee. In der westlichen Ostsee war die maximale Eisbedeckung bereits am 28.01.2013 erreicht. Anhaltende südöstliche Winde haben im Mai den Küstenabfluss der südlichen Ostsee

(Oder, Weichsel, Kurisches Haff) bis in die zentralen Becken geführt und dadurch die Wasseroberflächentemperatur dort zeitweise stark erhöht (z.B. MARNET Station Arkonasee). Die Monatsmittel Juni bis November lagen in der westlichen Ostsee im Bereich der langjährigen Mittelwerte oder geringfügig darüber. Die Monate Juni und September waren in der zentralen und besonders in der nördlichen Ostsee durch positive Anomalien von bis zu 4 K gekennzeichnet. Der wärmste Monat war der August mit 16-20 °C und der wärmste Tag der 5. August mit 20-22,5 °C in der westlichen und zentralen und 15-17 °C in der nördlichen Ostsee.

Insgesamt gehörte 2013 trotz des lang anhaltenden Winters zu den sechs wärmsten Jahren seit 1990 und lag mit über 8 °C in der Jahresmitteltemperatur ca. 0,4 K über dem langjährigen Mittelwert (7,66 °C) der Periode 1990-2013. Dazu haben insbesondere die hohen Temperaturanomalien im Juni und September beigetragen. Die westliche Ostsee lag im Bereich des langjährigen Mittelwertes.

Die Kältesummen der Lufttemperatur von Warnemünde (Tab. 2) zeigten, dass der Winter 2012/2013 mit 109,5 K d (Mittel 104,5 K d) geringfügig über dem langjährigen Mittelwert lag. Zu dieser Kältesumme hatten insbesondere die Monate Dezember mit 33,2 K d (22,7 K d), Januar mit 37,3 K d (39,1 K d) und März mit 28,4 K d (8,6 K d) beigetragen. Dabei hatte der März das Dreifache des langjährigen Mittelwertes erreicht. Der Februar zeigte allerdings mit 10,6 K d (31,9 K d) nur ein Drittel des langjährigen Mittelwertes. Der durchgeführte Vergleich (Kapitel 2) mit der Station Arkona zeigt einen ähnlichen Verlauf in den monatlichen Kältesummen (Dezember – 23,5 K d, Januar – 26,3 K d, Februar – 10,2 K d, März – 27,5 K d). Die Kältesummen sind an der Station Arkona nicht so hoch, da die Station sehr durch das umgebende Wasser beeinflusst ist. Die Wärmesumme des Sommers 2013 lag in Warnemünde mit 230,4 K d weit über dem langjährigen Mittelwert (150 K d). Alle Monate, Mai bis September, lagen über den langjährigen Mittelwerten, wobei der Juli mit 97,3 K d (56,4 K d) und der August mit 82,6 K d (52,2 K d) insbesondere zu der Wärmesumme beitrugen. An der Station Arkona war der August mit 70,8 K d der wärmste Monat vor dem Juli mit 67,4 K d. Das ist hier so ausführlich zusammengefasst, weil sich diese Unterschiede in der Lufttemperatur auch im Wasser wiederfinden.

Die generelle Entwicklung der SST wird anhand der Monatsmittel diskutiert. Die Anomalien der Monatsmittel des Jahres 2013 sind für die gesamte Ostsee in Abb. 17 dargestellt. Der saisonale Verlauf der Monatsmitteltemperatur in den zentralen Bereichen der Arkona-, Gotland- und Bottensee ist im Vergleich zu den langjährigen Monatsmittelwerten der Periode 1990-2010 in Abb. 18 zusammengefasst.

Nach dem vergleichsweise normalen Dezember 2012 kühlt sich die gesamte Ostsee im Januar und Februar 2013 entsprechend den langjährigen Mittelwerten ab. Nur geringfügig sind negative Anomalien zu verzeichnen. Die Abkühlung setzt sich im März in der gesamten Ostsee fort, was in der nördlichen und zentralen Ostsee dem normalen Verlauf entspricht. In der westlichen und südlichen Ostsee sorgt das für negative Anomalien, denn normalerweise setzt im März von Westen her die Erwärmung ein. Dadurch war der März der kälteste Monat in der gesamten Ostsee. Setzte im April in der westlichen Ostsee eine leicht Erwärmung ein, so gab es in der Gotlandsee und im Bottnischen Meerbusen keine Veränderung.

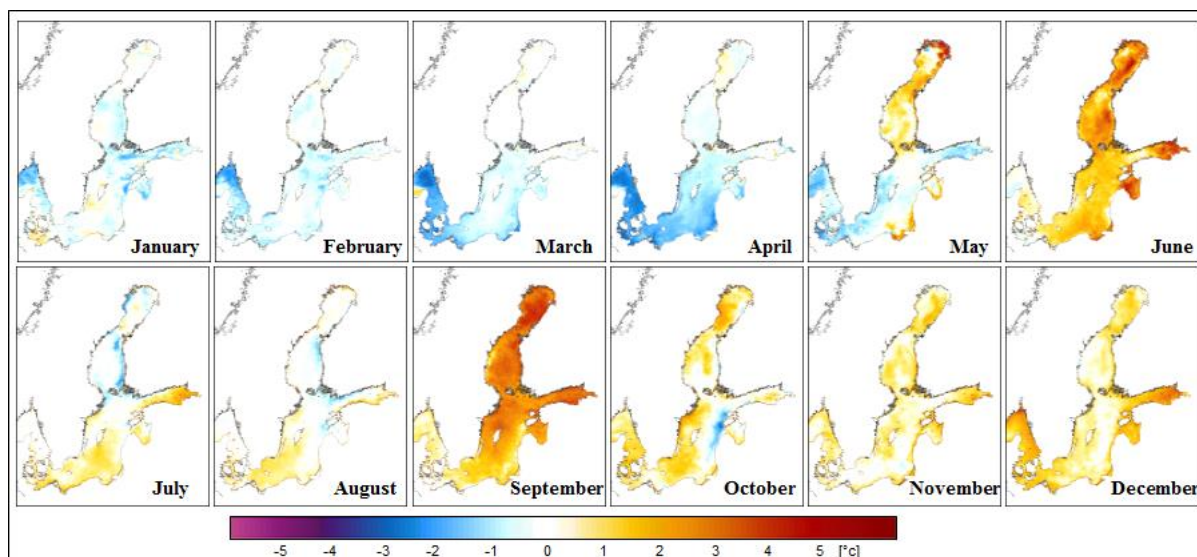


Abb. 17: SST- Anomalien der Monatsmitteltemperatur der Ostsee im Jahre 2013 bezogen auf die langjährigen Mittel 1990-2010

Fig. 17: SST- Anomalies of the monthly mean temperature of the Baltic Sea in 2013 referring to the long-term means 1990-2010

Das verstärkte die negativen Anomalien und dehnte das Gebiet aus. Die Monatsmittel der SST lagen in der westlichen Ostsee um 2 K unter den langjährigen Mittelwerten. In der Bottensee lagen die Temperaturen von Januar bis April im Bereich der Mittelwerte. Je nach Meeresgebiet gab es im Mai eine Erwärmung von 3,5-4,5 °C, was weiterhin zu negativen Anomalien von der westlichen Ostsee über die westliche Gotlandsee bis zum Finnischen Meerbusen führte. Die südliche, östliche und nördliche Ostsee war durch positive Anomalien von +2 K und im äußersten Norden von +4 K gekennzeichnet. Die Gründe dafür werden in der detaillierten Darstellung herausgearbeitet. Im Juni waren die negativen Anomalien verschwunden. Die gesamte Ostsee war durch positive Anomalien von bis zu +3 K in Bottnischen Meerbusen charakterisiert. Das bedeutete einen Temperaturanstieg von Mai bis Juni von 6,5°C in der westlichen Ostsee und in der Gotlandsee und von 7,5 °C in der Bottensee. Im Juli und August lagen die Temperaturen im Bereich der langjährigen Mittelwerte, wodurch der August mit ca. 16 °C in der Bottensee und bis zu 19-20 °C in der Arkonasee und Gotlandsee der wärmste Monat des Jahres war. Von September bis November lagen die SST in der westlichen Ostsee im Bereich der langjährigen Mittelwerte bzw. wechselseitig geringfügig darüber. In der übrigen Ostsee waren im September positive Anomalien von bis zu 4 K zu verzeichnen. Dadurch war die Ostsee vergleichsweise warm mit 16-18 °C und einer sehr homogenen Verteilung. In der nördlichen Ostsee war es im Mittel wärmer als im Monat Juli. Im Oktober und November lagen die SST in weiten Gebieten im Bereich der langjährigen Mittelwerte. Im Dezember waren die Beltsee und der Finnische Meerbusen mit Anomalien von bis +2 K vergleichsweise warm.

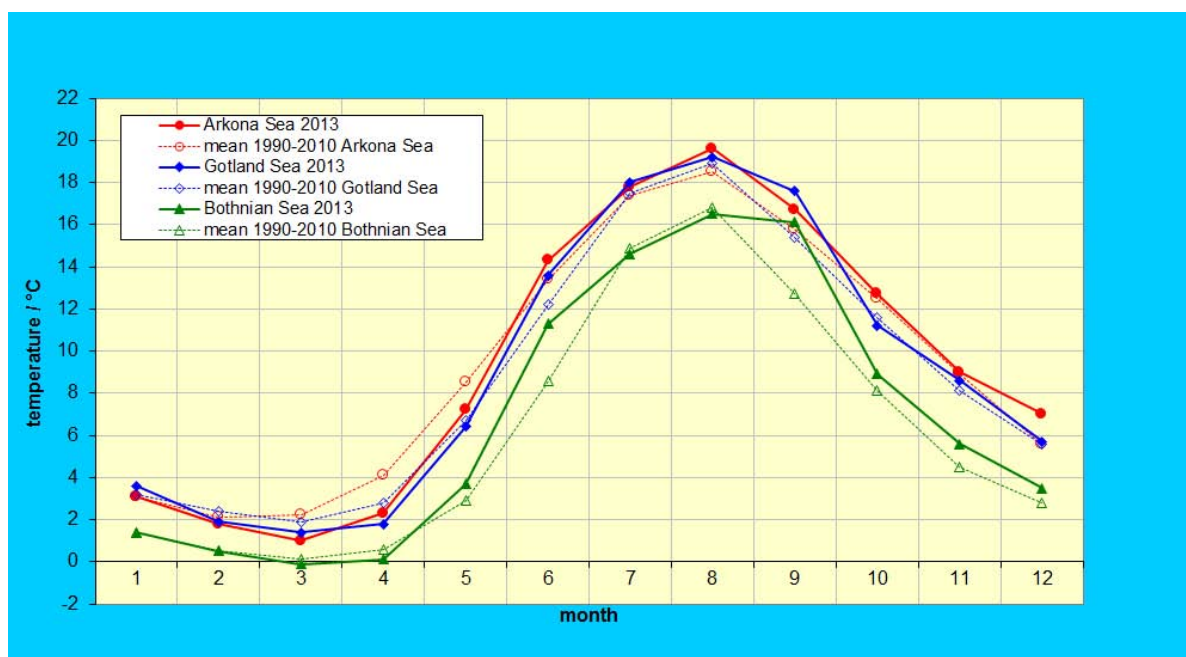


Abb. 18: Saisonaler Verlauf der Wasseroberflächentemperatur (NOAA-SST) in der zentralen Arkona-, Gotland- und Bottensee des Jahres 2013 im Vergleich zum jeweiligen 21-Jahresmittel (1990-2010)

Fig. 18: Seasonal course of sea surface temperature (NOAA-SST) in the central Arkona-, Gotland- and Bothnian Sea in 2013 in comparison to the mean values of the last 21 years (1990-2010)

Die Monatsmittel der SST des März (oben) und des April (unten) sind entlang des Schnittes durch die zentralen Becken der Ostsee in Abb. 19 dargestellt. Die Monate wurden ausgewählt, weil der März der kälteste Monat des Jahres 2013 war und weil der April die höchsten negativen Anomalien aufwies. Der Schnitt führt durch die zentralen Becken der Ostsee von der Mecklenburger Bucht bis zur Bottenwiek und ist im Vergleich zum Vorjahr, zum langjährigen Mittelwert 1990-2010 und dessen Schwankungsbreite präsentiert. Im März lagen die Monatsmitteltemperaturen im Westteil zwischen Mecklenburger Bucht und Arkonasee um 1 °C und darunter, was 1,5 bzw. 1 K unter dem langjährigen Mittelwert bedeutete. Richtung Osten stiegen die SST auf Werte um 2 °C in der Bottensee und Gotlandsee an und näherten sich den langjährigen Mittelwerten an. Im April stiegen die SST geringer als normal auf 3 °C in der MB und auf 2 °C von der Arkonasee bis zur zentralen Gotlandsee, was negative Anomalien von -1 bis -2 K in diesem Bereich bedeutete. In der Bottensee und Bottenwiek lagen die Monatsmittel der SST im Bereich der langjährigen Mittelwerte. Teilweise erreichte der Mittelwert 2013 das langjährige Minimum oder bestimmte das Minimum der Schwankungsbreite neu.

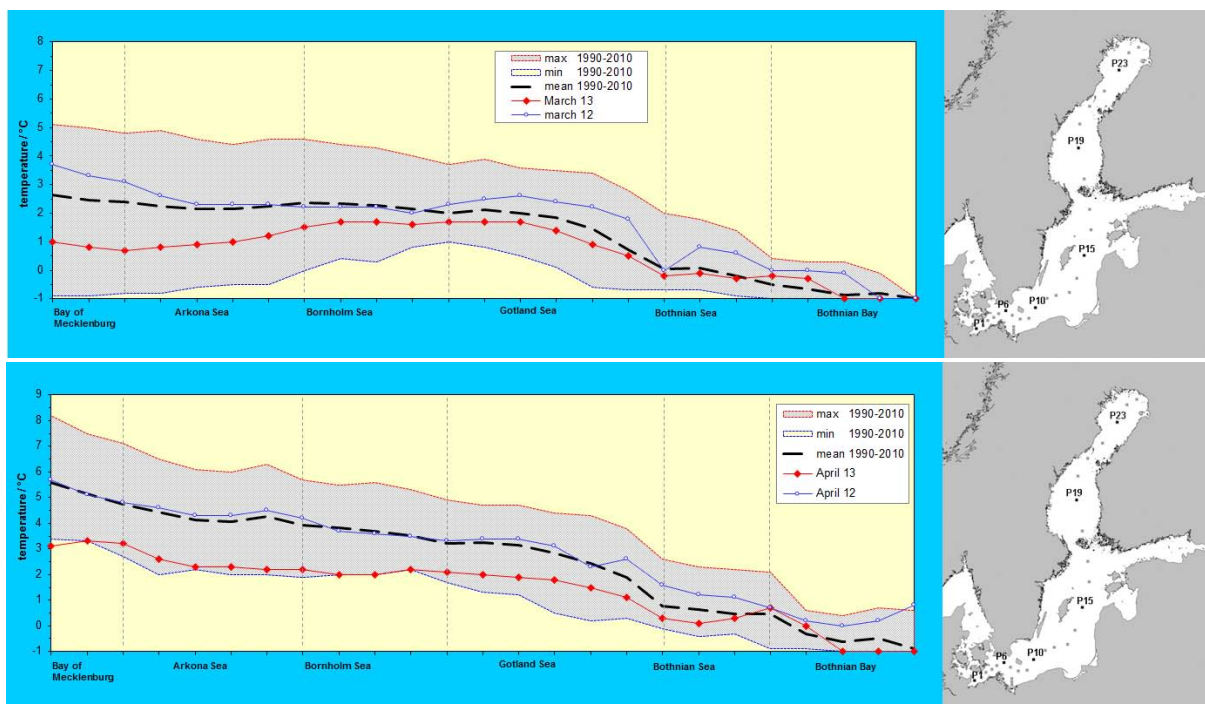


Abb. 19: Temperaturverteilung entlang des Schnittes durch die zentralen Becken der Ostsee für den kältesten Monat März und April 2013 im Vergleich zum langjährigen Mittel 1990-2010, dem Vorjahr und der Schwankungsbreite

Fig. 19: Temperature distribution along the transect through the central basins of the Baltic Sea for the coldest month March (upper panel) and April 2013 (lower panel) both in comparison to the previous year, to the long-term mean value of 1990-2010, and to the variation range

Für die Sommermonate wurden der August als wärmster Monat und der September als Monat mit den höchsten positiven Anomalien ausgewählt. Die Monatsmittelwerte sind in Abb. 20 im Vergleich zu den Vorjahresmittelwerten August und September, zum langjährigen Mittel 1990-2010 und zur Schwankungsbreite im Untersuchungszeitraum auf dem Längsschnitt durch die Ostsee dargestellt. Im August liegen die SST von der Arkonasee bis zur südlichen Gotlandsee mit 19-20 °C ca. 1 K über und westlich und nördlich davon im Bereich der langjährigen Mittelwerte. Die Monatsmittel der SST entlang des Schnittes im September zeigt sehr anschaulich die seltene ziemlich homogene Verteilung in der gesamten Ostsee mit Temperaturen zwischen 15 und 18 °C und die Zunahme der Differenz zum langjährigen Mittel von 0 K in der Mecklenburger Bucht bis +4 K in der Bottenwiek.

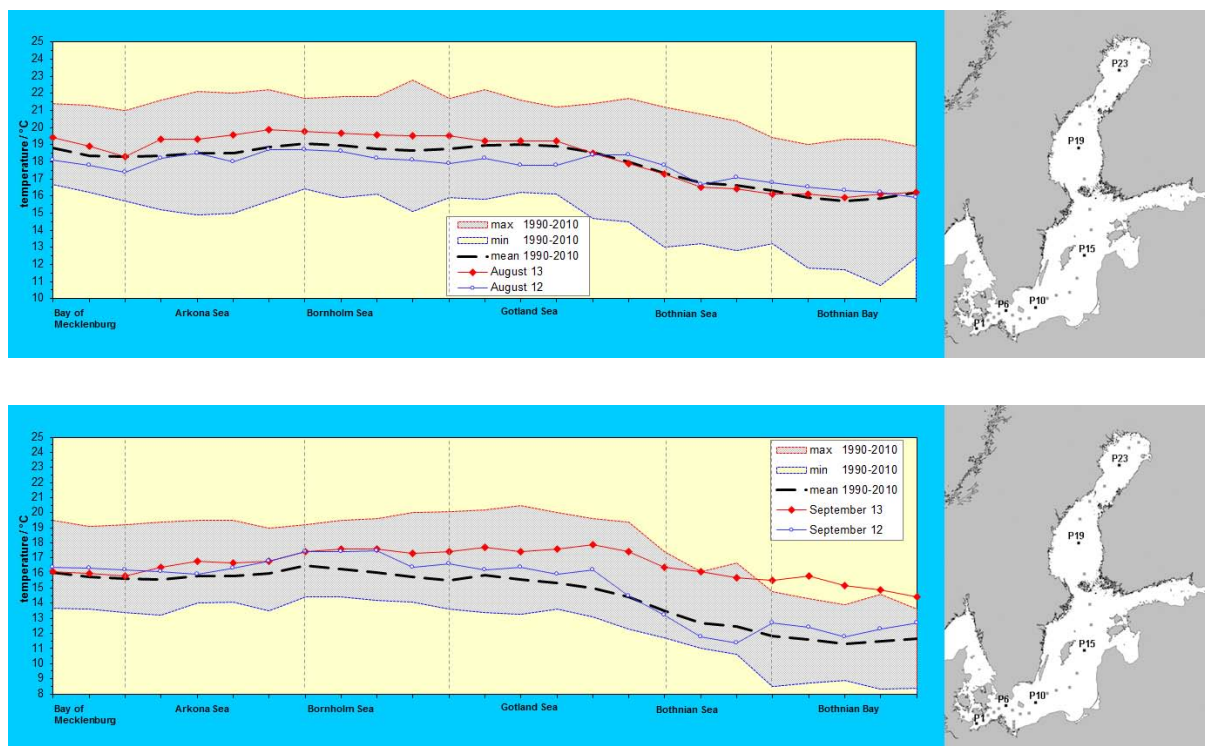


Abb. 20: Temperaturverteilung entlang des Schnittes durch die zentralen Becken der Ostsee für den wärmsten Monat des Jahres 2013 August und September im Vergleich zum Vorjahr, zum langjährigen Mittel 1990-2010 und zur Schwankungsbreite im Untersuchungszeitraum

Fig. 20: Temperature distribution along the transect through the central basins of the Baltic Sea in August and September 2013 in comparison to the previous year, to the long-term mean value of 1990-2010, and to the variation range of the investigation period

Die folgende detaillierte Beschreibung der thermischen Entwicklung der Ostsee im Jahr 2013 charakterisiert die wichtigsten Phasen im Jahresverlauf. Nach dem normalen Dezember 2012 lag Anfang Januar die SST bei 2-4 °C in der westlichen Ostsee, bis 5 °C in der östlichen Gotlandsee und 0-2 °C in der nördlichen Ostsee. Der Kälteeinbruch im Januar hat dafür gesorgt, dass nicht nur die inneren Küstengewässer sondern auch in der Pommersche Bucht die Eisbildung einsetzte. Die maximale Eisbedeckung des Winters war in der westlichen Ostsee schon am 28.01.2013 erreicht. In der offenen westlichen Ostsee lagen die Temperaturen zu diesem Zeitpunkt noch bei ca. 1-2 °C und stiegen zum Monatsende auf 2 °C an. In dieser Zeit war die SST in der Gotlandsee 3 °C und in der Bottensee waren maximal 1,5 °C zu verzeichnen. Durch windbedingte Durchmischung wurde eine weitere Eisentwicklung in der westlichen Ostsee verhindert (SCHMELZER et al., 2013). Die SST stagnierte bis ca. Mitte Februar, bevor dann wieder eine Abkühlungsphase von Westen und von Norden einsetzte. Die maximalen Temperaturen von ca. 2,5 °C lagen in der südlichen Gotlandsee vor. Nach dem 10. März gab es eine weitere Abkühlung, die dazu führte, dass der März der kälteste Monat wurde. Der kälteste Tag war der 25.03. mit max. 1 °C in der westlichen und nördlichen Ostsee und 2 °C in der zentralen Ostsee. Gleichzeitig war es der Tag mit der maximalen Eisbedeckung (Abb. 22). Die Kälteperiode hielt bis Anfang April mit Wassertemperaturen um

1 °C an. Am 3.04. setzte dann eine erste Erwärmung von Westen her ein, die sich ab 12.04. stärker entwickelte. Die Erwärmung setzte sich bis Ende des Monats fort und erreichte Werte 4-7 °C in der westlichen Ostsee, 3-4 °C in der gesamten Gotlandsee und max. 2 °C in der nördlichen Ostsee. Bis 11.05. stiegen die Temperaturen in der westlichen Ostsee auf etwa 8-10 °C und in der Pommernbucht auf 10-12 °C. Danach wurde an der MARNET Station „Arkona See“ ein starker Temperaturanstieg (Abb. 13) gemessen, der aber nicht auf eine reine Erwärmung zurückzuführen war. Oderwasser wurde bis in die zentrale Arkonasee transportiert. Das Beispiel vom Höhepunkt am 18. Mai zeigt das warme Oderwasser, das in der Pommernbucht 15 °C und in der Arkonasee ca. 12-13 °C aufwies (Abb. 21), was auch an der MARNET Station gemessen wurde (Abb. 13).

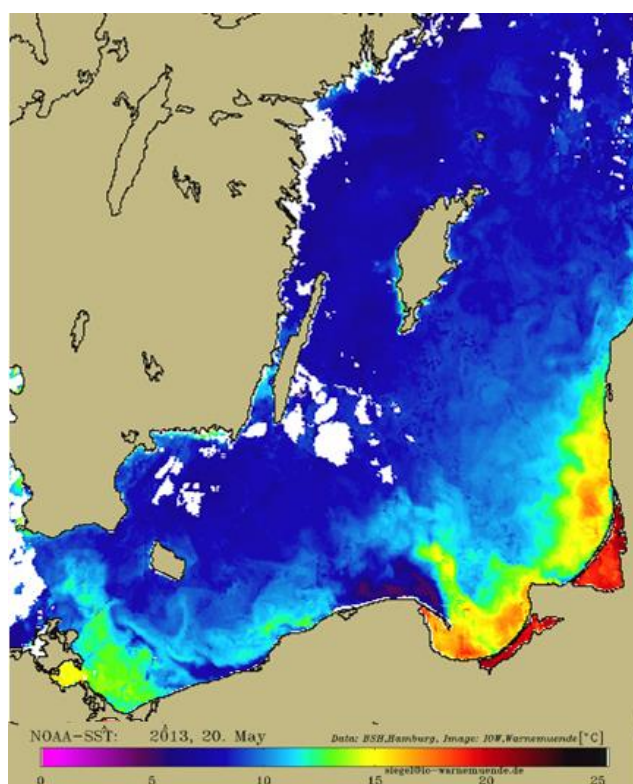


Abb. 21: Temperaturverteilung in der Ostsee am 20.05.2013 mit Einfluss des Küstenabflusses in den zentralen Becken der südlichen Ostsee

Fig. 21: Temperature distribution in the Baltic Sea on 20 May 2013 showing the influence of coastal discharge in the central basins of the southern Baltic Sea

Ähnlich sieht es in der gesamten südlichen Ostsee aus. Durch den starken Küstenabfluss und südöstliche Winde wird das Flusswasser seewärts transportiert und erhöht dadurch die SST in den zentralen Bereichen. Danach blieb die Temperatur in der zentralen Ostsee bei 10-11 °C, bevor Ende Mai eine leichte Erwärmung von der Beltsee einsetzte. Das galt auch insbesondere für den nördlichen Teil der Bottenwiek, in der SSTs von 15-16 °C erreicht wurden, was sich auch in den Monatsmittelwerten und in den Anomalien widerspiegelte. Ab 5. Juni breitete sich die Erwärmung in einer Schwachwindphase rasant nach Osten aus und

beeinflusste dann auch die zentrale Ostsee, besonders den Finnischen Meerbusen und die Rigaer Bucht. In diesen beiden Gebieten stieg die SST bereits auf 16-19 °C. Am 8.06. waren in der westlichen Ostsee Temperaturen von 14-17 °C zu verzeichnen, in der Gotlandsee 12-14 °C und in der nördlichen Ostsee 7-11 °C. Diese Situation hielt in den zentralen Bereichen bis ca. 17.06. an, bevor ab 18.06. eine neue Erwärmungsphase begann. Windereignisse mit starker Bewölkung und Windgeschwindigkeiten von 13-16 ms⁻¹ am 26.06. und 30.06. sorgten für eine Durchmischung und Temperaturen von 13-17 °C in der gesamten Ostsee am Ende des Monats. Ab 3.07. setzte eine starke Erwärmung ein, die bereits am 9.07. für Temperaturen von 16-20 °C sorgte. In dieser Phase traten auch die ersten Cyanobakterien auf. Windbedingte Durchmischung sorgte für eine Temperaturverminderung auf 16-18 °C, die bis zum 19.07. anhielt. Danach fand die nächste Erwärmungsphase statt, die in einigen Regionen wie z.B. in der Mecklenburger Bucht und Pommernbucht am 28.07. zu Temperaturen von 23 °C geführt hatte. Ausgenommen war in dieser gesamten Zeit die nördliche Ostsee, die Ende Juli nur 11-16 °C aufwies. Hochdruckeinfluss mit schwachem Wind ließ den 5.08. mit 20-22,5 °C in der gesamten westlichen und zentralen Ostsee zum wärmsten Tag des Jahres werden (Abb. 22). Die nördliche Ostsee hatte sich nun auch auf 15-17 °C erwärmt.

Der Durchzug von Tiefausläufern ab 5.08. brachte auch in den Folgetagen viele Wolken, die Wassertemperatur verminderte sich aber nur geringfügig. Erst die windreiche Periode vom 9.08. bis 14.08. vermischte das Oberflächenwasser und die SST sank deutlich auf 17-19 °C am 15. August. Danach stagnierte die thermische Entwicklung bis 22.08., bevor durch starken Auftrieb entlang der deutschen Küste die SST in der MB abnahm. Ansonsten blieben die Temperaturen bis Ende des Monats erhalten. Im Bottnischen Meerbusen waren immer noch 15-17 °C vorhanden. Tiefdruckeinfluss ab 30.08. und Windereignisse am 1./2.09. sorgten für eine Durchmischung und für Temperaturen von 16-18 °C in der eigentlichen Ostsee und 13-16 °C in der nördlichen Ostsee. Diese Temperaturen blieben bis ca. 14.09. erhalten. Danach zogen Tiefdruckgebiete mit hoher Wolkenbedeckung und Wind durch und reduzierten die SST auf 13-15 °C am Ende des Monats in der westlichen und südlichen Ostsee und auf 8-13 °C in den nördlichen und nordöstlichen Teilen. Für die starke Abkühlung sorgten im Oktober windbedingte Durchmischung und insbesondere auch Auftrieb an der deutschen und polnischen sowie entlang der Küsten der Baltischen Länder und im Bottnischen Meerbusen. Ende des Monats lagen die Werte bei 10-12 °C in der südlichen Ostsee und bei 5-10 °C in den nördlichen Teilen. Die SST sank weiter kontinuierlich und zeigte am 15.11. 5-10°C, Anfang Dezember 6-8 °C und im Norden 0-5 °C, am 15.12. 3-5 °C und 0-3 °C im Bottnischen Meerbusen, was bis Ende des Jahres erhalten blieb.

Insgesamt gehörte 2013 trotz des lang anhaltenden Winters zu den sechs wärmsten Jahren seit 1990 und lag mit über 8 °C in der Jahresmitteltemperatur 0,4 K über dem langjährigen Mittelwert (7,66 °C) der Periode 1990-2010. Das war insbesondere auf die hohen Temperaturanomalien im Juni und im September zurückzuführen. Die SST der westlichen Ostsee lag 2013 im Bereich des langjährigen Mittelwertes.

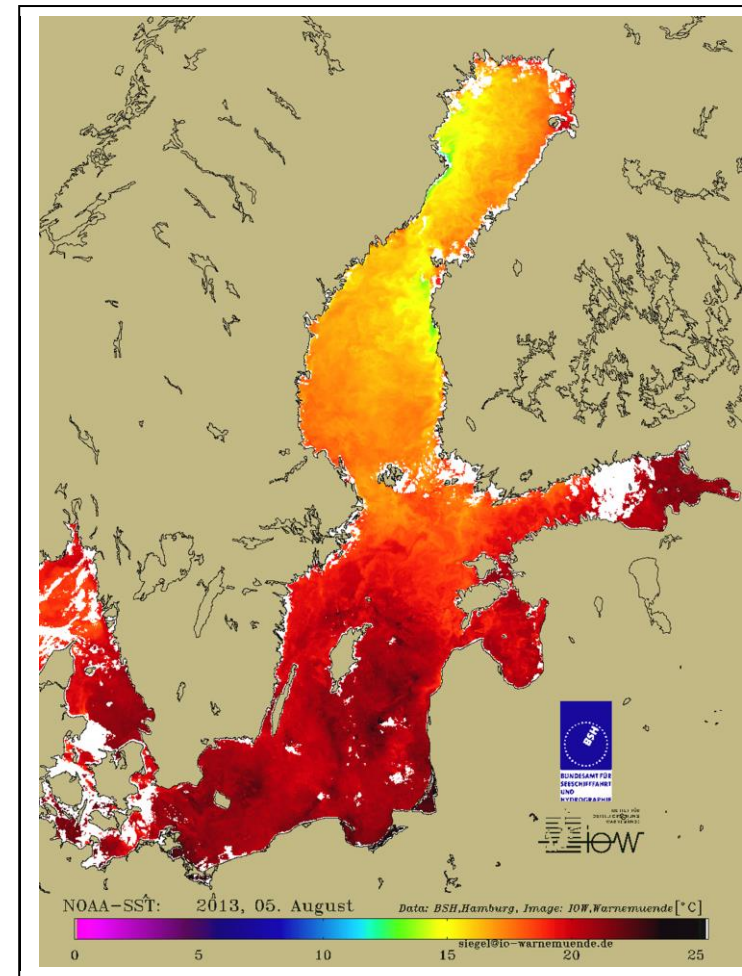
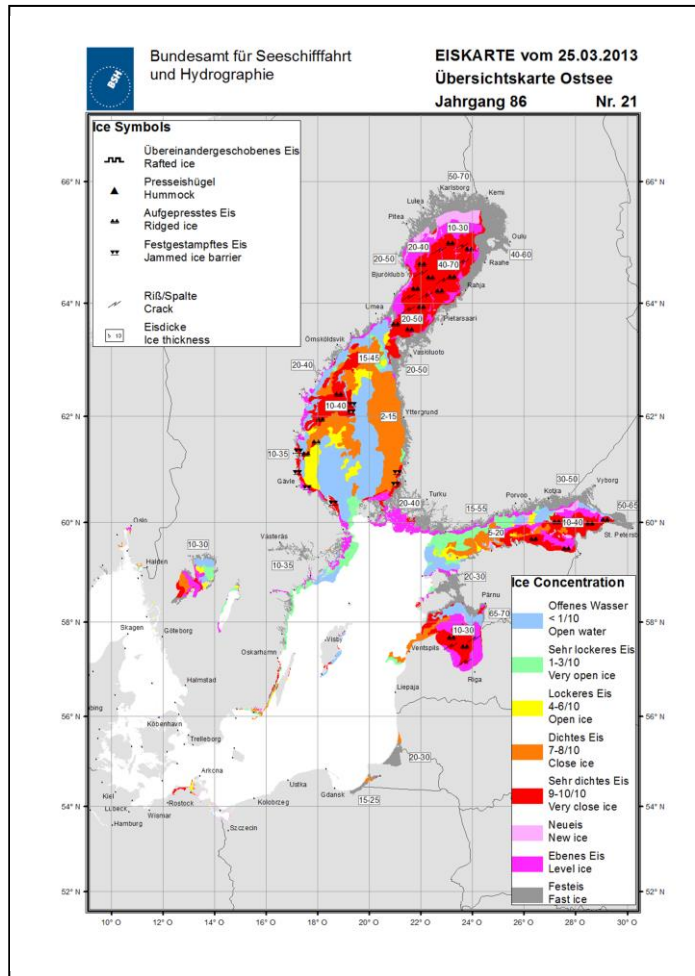


Abb. 22: Maximale Eisbedeckung der Ostsee im Jahr 2013 am 25.03.2013 (SCHMELZER, BSH) und Temperaturverteilung der Ostsee an einem der wärmsten Tage, dem 05. August 2013

Fig. 22: Maximum ice coverage of the year 2013 on 25 March (SCHMELZER, BSH) and temperature distribution of the Baltic on one of the warmest days of the year (05 August 2013)

6.1.2 Vertikalverteilung der Wassertemperatur

Die regelmäßigen Überwachungsfahrten des IOW liefern die grundlegende Datenbasis für die Beurteilung der hydrographischen Verhältnisse in der westlichen und zentralen Ostsee. Diese Überwachungsfahrten wurden im Februar, März, Mai, Juli/August und November 2013 durchgeführt. Abbildung 23 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 wurden. Weitere hydrographische Daten wurden im östlichen Gotlandbecken mit zwei Langzeitverankerungen gewonnen, die die hydrographischen Verhältnisse im Tiefenwasser überwachen. Die Ergebnisse dieser Messungen sind u.a. in Abb. 24 und 26 dargestellt.

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

Im Jahresverlauf 2013 wurde kein größeres Einstromereignis beobachtet. Das Einstromgeschehen war wie in den vorangegangenen Jahren geprägt von einer Serie kleiner barokliner und barotroper Einströme (vgl. Kapitel 2 und 3). Die Wirkung dieser Einströme blieb im Jahresverlauf 2013 hauptsächlich auf die westliche Ostsee und das Bornholmbecken, sowie auf den Bereich der Halokline in der zentralen Ostsee begrenzt. Die beobachteten Einstromvolumina ($<200 \text{ km}^3$) waren nicht groß genug um ökologisch signifikante Veränderungen im Tiefenwasser der zentralen Ostsee hervorzurufen. Die Entwicklung der vertikalen Temperaturverteilung oberhalb der Halokline wird in der zentralen Ostsee hauptsächlich durch den Jahresgang der Atmosphärentemperatur geprägt (vgl. Kapitel 2). Der Winter 2012/2013 begann zunächst ungewöhnlich mild. Anfang Januar 2013 lagen die Temperaturen zum Teil deutlich über den langjährigen Mittelwerten (vgl. Kapitel 2). Durch zwei starke Kälteperioden ab Mitte Januar und relativ spät ab Mitte März erfolgte dann eine rasche Abkühlung des Oberflächenwassers. Nach einem kühlen Frühjahr lagen die Sommertemperaturen 2013 leicht über dem langjährigen Mittel.

Die Temperaturverteilung Anfang Februar 2013 zeigte die saisonale Abkühlung der Deckschicht (Abb. 23). Trotz der mit der Abkühlung verbundenen tiefen Konvektion war die Deckschicht in der zentralen Ostsee noch nicht vollständig homogenisiert. Die Tiefe der thermischen Sprungschicht lag an der Station 271 in der östlichen Gotlandsee bei 47 m. Durch den milden Winterbeginn waren die Oberflächentemperaturen relativ hoch. Die geringsten Temperaturen wurden mit $1,7\text{-}1,8 \text{ }^\circ\text{C}$ in der westlichen Arkonasee gemessen. Hier lag die Oberflächentemperatur im Februar bereits deutlich unter dem Dichtemaximum, so dass die weitere Abkühlung zu einer Stabilisierung der Schichtung führte. Die Bodentemperaturen in der Arkonasee waren infolge des seit dem 28. Januar aktiven Einstromes bei sehr geringen

Werten von 4 °C. Im Bornholmbecken wurden unterhalb der Halokline mit 7,2 °C die höchsten Temperaturen in der gesamten Ostsee gemessen. Dieser warme Wasserkörper füllte die gesamte Tiefenwasserschicht des Beckens von 55 bis ca. 80 m Tiefe aus. Der warme Wasserkörper stammte zum großen Teil aus dem Einstrom zum Jahreswechsel 2012/13 bei dem ca. 160 km³ Salzwasser aus dem Kattegat in die Ostsee gelangten. Ein Teil des eingeströmten Wassers hatte bereits die Stolper Schwelle passiert und formierte das warme Bodenwasser in der Stolper Rinne. Der Bodenwasserkörper im Bornholmbecken war mit 5,8 °C deutlich kühler (Abb. 23). Ein warmer Bodenwasserkörper mit Temperaturen um 6,2 °C wurde zwischen dem Ausgang der Stolper Rinne und dem östlichen Gotlandbecken beobachtet. Dieses Wasser stammte aus den kleinen, zum Teil baroklinen Einströmen im Sommer und Herbst 2012.

Im östlichen Gotlandbecken lagen die Oberflächentemperaturen im Februar bei 2,5 °C. Damit lag hier die Oberflächentemperatur noch geringfügig über dem Dichtemaximum, so dass die tiefe Vertikalkonvektion weiter zu einer stetigen Vertiefung der Deckschicht führte.

Bis Mitte März hatte sich die Oberflächentemperatur in der Ostsee gegenüber den Februarwerten weiter abgekühlt. Westlich der Darßer Schwelle lagen die Temperaturen deutlich unter 1 °C. Das Minimum wurde mit 0,74 °C vor Warnemünde beobachtet (Station 41). Aber auch die übrigen Bereiche der westlichen und zentralen Ostsee waren vergleichsweise kalt, mit Oberflächentemperaturen von 1,2 °C im Arkonabecken, 1,9 °C im Bornholmbecken und 1,5 °C im östlichen Gotlandbecken. Die saisonale Erwärmung, die sonst im März bereits zu beobachten ist, hatte wegen des starken Kälteeinbruchs zu Beginn des Monats noch nicht eingesetzt. Die Oberflächentemperaturen lagen deutlich unterhalb des Dichtemaximums. An der Station 271 (östliches Gotlandbecken) hatte sich durch die starke Abkühlung eine stabile Schichtung mit einer ca. 25 m dicken kalten Oberflächenschicht etabliert. Darunter stieg die Temperatur stetig an und erreichte an der Oberkante der Halokline bei etwa 60 m Tiefe die Temperatur des Dichtemaximums (2,4 °C).

Der kleine Einstrom Anfang Februar, bei dem etwa 195 km³ kaltes salzreiches Wasser eingeströmt waren, hatte bis Mitte März die Bedingungen im Tiefenwasser des westlichen Ostsee stark verändert. Die Temperatur im Bodenwasser der Arkonasee betrug nur noch 1,3 °C. Der überwiegende Teil des eingeströmten Wassers hatte bereits das Bornholmbecken erreicht und den dort vorher vorhandenen warmen Tiefenwasserkörper zum großen Teil verdrängt. Dadurch lag die Temperatur im gesamten Tiefenwasserkörper mit 5,0 °C um bis zu 2 K unter den im Februar beobachteten Werten. Die warmen Bodenwasserkörper in der Stolper Rinne und östlich davon hatten sich durch die Einmischung von kaltem Einstromwasser deutlich auf unter 6 °C abgekühlt. Im östlichen Gotlandbecken hatte sich durch den Zustrom kalten Wassers die Tiefenlage der 6 °C Isotherme von 142 m im Februar auf 147 m im März verändert.

Anfang Mai hatte sich das Oberflächenwasser der Ostsee gegenüber den Werten vom März deutlich erwärmt. Jedoch lagen die Oberflächentemperaturen mit Werten zwischen 6,7 °C im Arkonabecken und 4,7 °C im östlichen Gotlandbecken unter den langjährigen Mittelwerten. Die sich langsam ausprägende saisonale Temperaturschichtung führte zum Abkoppeln der Winterwasserschicht (30-60 m Tiefe) von der direkten Wechselwirkung mit der Atmosphäre. Diese Zwischenschicht ist 2013 verglichen mit dem Vorjahr relativ kalt. In der östlichen

Gotlandsee betrug die Minimaltemperatur des winterlichen Zwischenwassers im Mai 2013 1,8 °C und lag damit bis zu 1,6 K unter dem Wert des Vorjahres. Ähnliche Verhältnisse wurden in der gesamten Ostsee beobachtet. Im Bornholmbecken wies das Winterwasser eine deutlich geringere Minimaltemperatur von 1,4 °C auf. Hier waren auch die Auswirkungen des Einstroms vom Februar 2013 besonders spürbar. Das kalte Einstromwasser hatte den vorherigen Bodenwasserkörper ersetzt. Die Temperatur im Tiefenwasser unter der Halokline lag etwa 2-3 K niedriger als im Februar. Das kalte Einstromwasser hatte sich weiter ostwärts ausgebreitet. Die Bodentemperatur in der Stolper Rinne war weiter abgesunken und lag nun unter 5 °C. Östlich des Ausgangs der Stolper Rinne war die Ausbreitung des kalten Wasser besonders gut an der Lage der 5 °C Isotherme zu beobachten (vgl. Abb. 23). Die Grenze zum ‚alten‘ Bodenwasser verlief zwischen Station 253 und 250.

Ein neuer Einstrom der bis Ende April ca. 160 km³ Salzwasser in die Ostsee brachte, hatte im Arkonabecken zu einem Anstieg der Bodentemperaturen geführt. Das vorher vorhandene extrem kalte Tiefenwasser wurde dadurch vollständig ausgetauscht und ins Bornholmbecken verlagert.

Bis Anfang August 2013 hatte sich in der gesamten Ostsee die typische sommerliche Temperaturschichtung aufgebaut. Die saisonale Thermokline in etwa 20-25 m Tiefe war verglichen mit dem Vorjahr relativ flach und trennte das stark erwärmte Oberflächenwasser vom kalten winterlichen Zwischenwasser. Die Minimaltemperaturen im Zwischenwasser lagen in der Bornholmsee bei 2,7 °C und sanken in den zentralen Ostseebecken auf unter 2,4 °C ab (Gotlandtief). Das Zwischenwasser war damit im Durchschnitt 0,9 K kälter als im Vorjahr.

Die Oberflächentemperaturen lagen in der westlichen Ostsee um 20 °C, teilweise auch darüber. An der Station 213 im Bornholmbecken wurden am 07. August 20,36 °C gemessen. Auch in der zentralen Ostsee waren die Oberflächentemperaturen relativ hoch, z.B. 18,9 °C an Station 271 im östlichen Gotlandbecken.

In der westlichen Arkonasee wurde im August der Einstrom eines warmen Bodenwasserkörpers mit Maximaltemperaturen um 12-13 °C beobachtet. Dieser Warmwasserkörper wurde durch barokline Einstromprozesse über die Darßer Schwelle gespeist, die durch die windarme Wetterlage ab Mitte Juli begünstigt wurden. Die bodennahe Warmwasserschicht hatte im Arkonabecken eine vertikale Ausdehnung von bis zu 15 m. Zum Zeitpunkt der Überwachungsfahrt begann der Einstrom dieses Wassers über das Bornholmsgat ins Bornholmbecken, dessen Tiefenwasser mit Temperaturen um 5 °C relativ kalt war. In der zentralen Ostsee hatte sich der kalte Tiefenwasserkörper aus den Wintereinströmen weiter in Richtung Gotlandbecken ausgebreitet (vgl. Lage der 5 °C Isotherme). Die Dichte dieses Wasserkörpers war jedoch zu gering um die tieferen Schichten des Gotlandbeckens zu erreichen. Er begann sich langsam vom Boden abzulösen und in einer Tiefe um 120 m einzuschichten. Das Tiefenwasser im östlichen Gotlandbecken hatte sich im Vergleich zum Frühjahr weiter abgekühlt. Die 6 °C-Isotherme war um weitere 5 m abgesunken und lag Anfang August bei 152 m Tiefe.

Die Temperaturverteilung Anfang November 2013 zeigte die herbstliche Erosion der

Thermokline. Die Temperatur in der bereits auf 35-45 m vertieften dicken Deckschicht betrug noch 11,3 °C im Arkonabecken und fiel in Richtung zentrale Ostsee auf 9 °C ab. Eine stärkere Abkühlung bis auf 8,5 °C erfolgte lediglich der östlichen Gotlandsee. Die Wassertemperatur oberhalb der Halokline lag damit aufgrund des milden Herbstes um bis zu 2 K über den Vorjahreswerten. Das winterliche Zwischenwasser war noch als dünne Schicht von 10-20 m Dicke mit Minimaltemperaturen von 2,7 °C in der zentralen Ostsee zu beobachten. Kleinere Reste der Zwischenwasserschicht waren auch noch im östlichen Bornholmbecken vorhanden.

Die Temperaturschichtung in der westlichen Ostsee wurde durch die warmen baroklinen Einströme während des Sommers, sowie durch einen barotropen Einstrom in Folge des Orkantiefs „Christian“ im Oktober bestimmt. Da die Deckschicht noch relativ warm war, verursachte das neu eingeströmte warme und salzreiche Wasser am Boden des Arkonabeckens nur einen geringen vertikalen Temperaturgradienten. Das Einstromwasser bildete eine 15 m dicke Bodenschicht, die in der Beckenmitte (Station 113) mit 12,5 °C nur etwa 1 K wärmer war als die Deckschicht. Der noch im August vorhandene kalte Wasserkörper unterhalb der Halokline des Bornholmbeckens wurde durch das warme Wasser der Sommer- und Herbsteinströme weitgehend verdrängt. Für eine Erneuerung des Bodenwassers im Bornholmbecken war die Dichte des einströmenden Wassers jedoch zu gering. Es füllt das zentrale Bornholmbecken im November als kalte Schicht vom Boden bis in 70 m Tiefe. Das über den Sommer eingeströmte warme Wasser war noch nicht über die Stolper Schwelle abgeflossen. In der Stolper Rinne lag wie im Juli das kalte Wasser der Einströme vom Winter 2012/13. Deren Einschichtung in die zentralen Becken der Ostsee war inzwischen weiter fortgeschritten. In den zentralen Bereichen des östlichen Gotlandbeckens sank die 6 °C Isotherme zwischen Anfang August und Anfang November weiter ab und lag nun mit 156 m noch einmal 4 m tiefer als Anfang August.

Im Rahmen seines Langzeitüberwachungsprogrammes betreibt das IOW seit Oktober 2010 eine hydrographische Verankerung nahe der zentralen Station 271 im östlichen Gotlandbecken. Im Gegensatz zu der seit 1998 betriebenen Verankerung ‚Gotland Nordost‘, von der die bekannte „Hagen-Kurve“ abgeleitet wird, werden an dieser Station auch Salzgehaltsdaten erhoben. Mit Hilfe der gewonnenen Zeitreihen kann die Entwicklung der hydrographischen Bedingungen im Tiefenwasser des Gotlandbeckens in hoher zeitlicher Auflösung beschrieben werden. Diese Zeitreihe stellt deshalb eine wertvolle Ergänzung zum schiffsgestützten Überwachungsprogramm dar. Abbildung 24 zeigt den Temperaturverlauf im Tiefenwasser des östlichen Gotlandbeckens für den Zeitraum von Januar 2012 bis Dezember 2013 für fünf Tiefenniveaus. Über die letzten zwei Jahre ergibt sich für alle Tiefenschichten von 140 m bis zum Boden ein genereller Trend zur Abkühlung des Tiefenwassers. Dieser ist in den einzelnen Tiefenschichten unterschiedlich stark ausgeprägt und nimmt zum Boden hin ab. In 140 m Tiefe nahm die Temperatur im Jahr 2013 von 6,05 °C auf 5,7° C um 0,35 K ab, während am Boden im gleichen Zeitraum nur eine geringfügige Abnahme der Temperatur von 6,42 °C auf 6,38 °C beobachtet wurde. Der generelle Trend zur Abkühlung ist mit kurzzeitigen Fluktuationen auf unterschiedlichen Zeitskalen überlagert. Neben kurzen negativen Temperaturspitzen, die durch die Passage kleinerer Kaltwasserlinsen verursacht werden können, wurden auch länger anhaltende Signale beobachtet (z.B. März/April 2013). Die Fluktuationen im Temperatursignal

sind häufig über den gesamten Bereich des Tiefenwassers korreliert. Die Amplitude der Fluktuationen nimmt dabei mit zunehmender Tiefe ab.

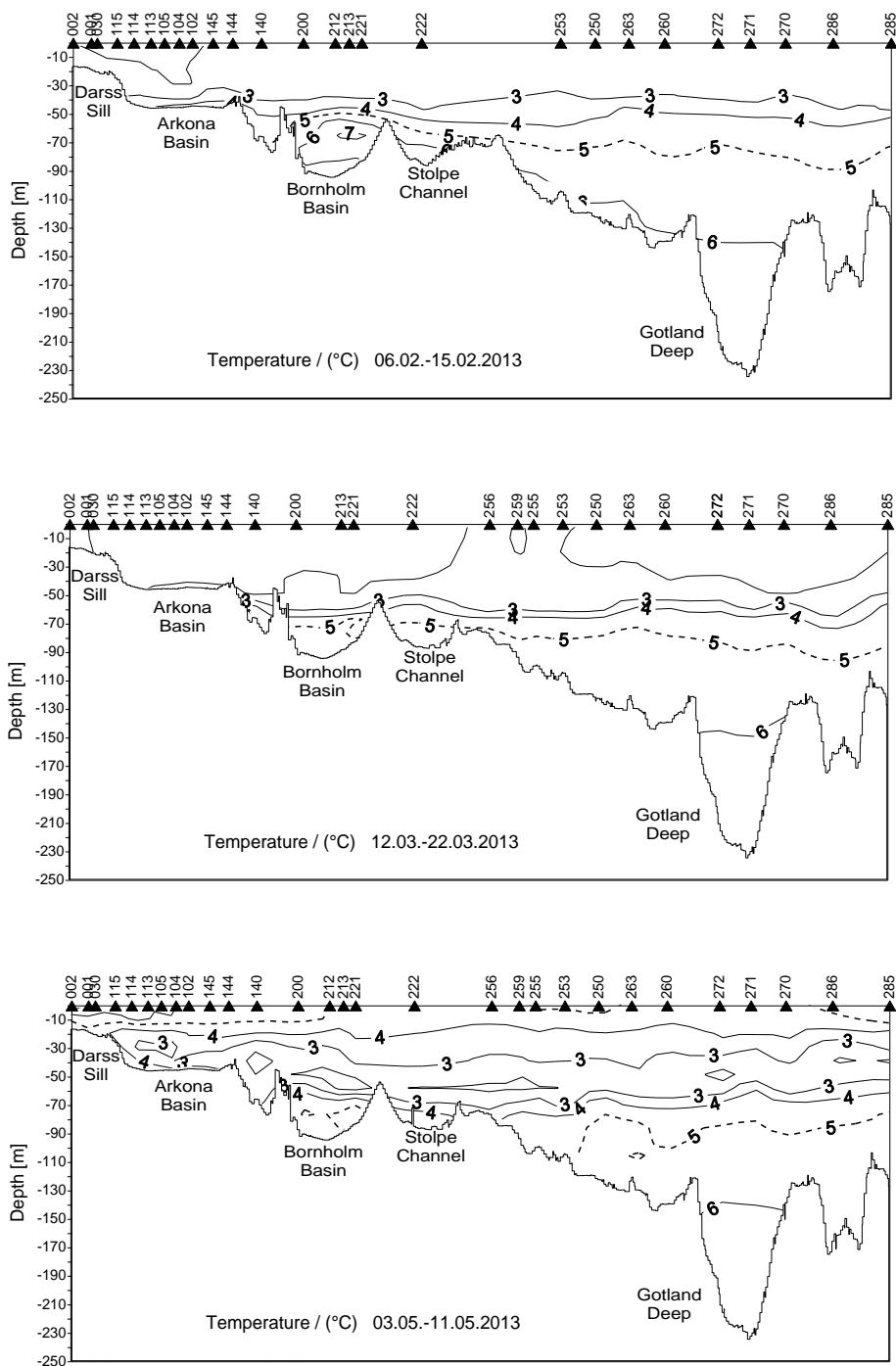


Abb. 23: Vertikale Verteilung der Wassertemperatur zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 23: Vertical water temperature distribution between Darss Sill and northern Gotland Basin

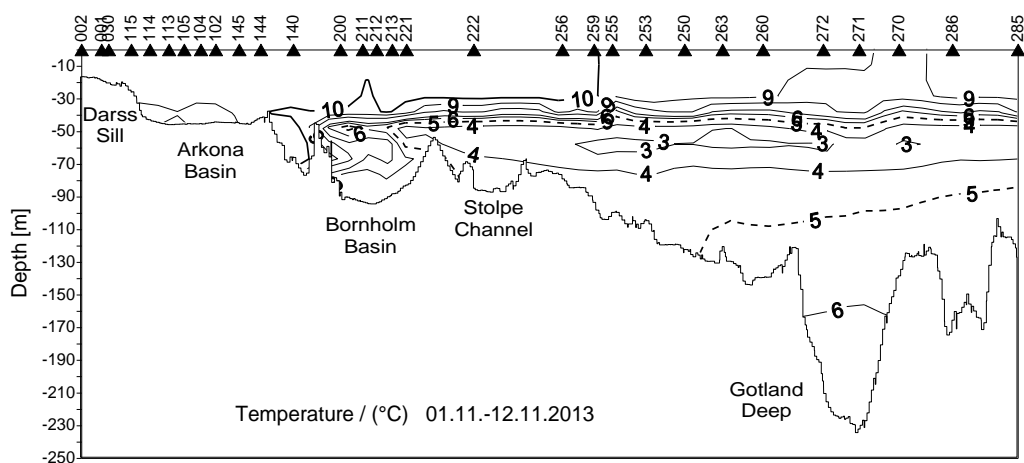
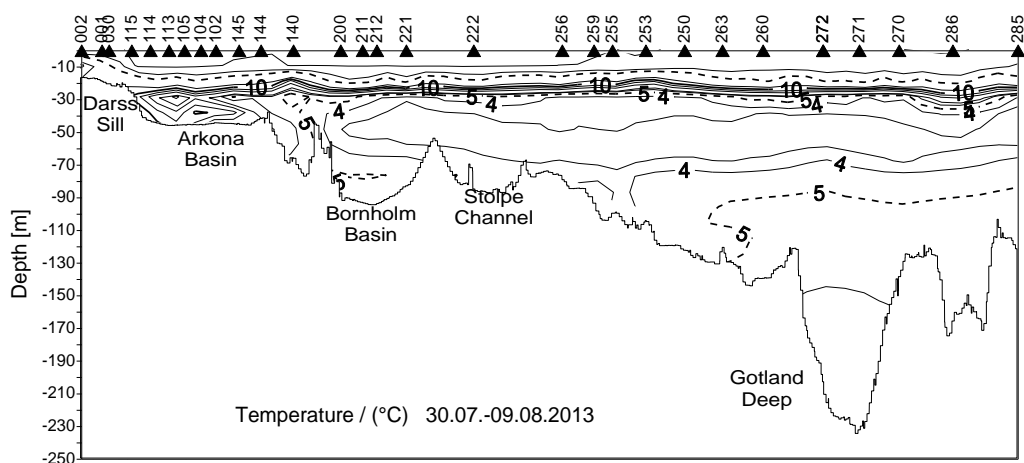


Abb. 23: Vertikale Verteilung der Wassertemperatur zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 23: Vertical water temperature distribution between Darss Sill and northern Gotland Basin

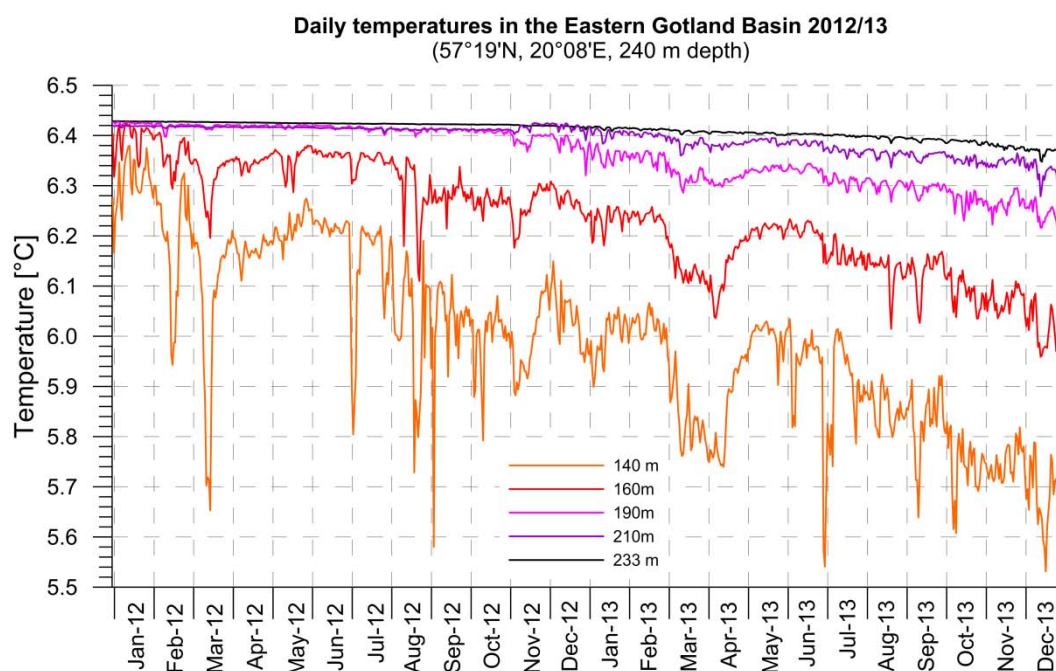


Abb. 24: Zeitlicher Verlauf der Tiefenwassertemperatur im östlichen Gotlandbecken (Station 271) von Januar 2012 bis Dezember 2013 (tägliche Mittelwerte der Daten mit 10 min Messintervall)

Fig. 24: Temporal development of deep water temperature in the Eastern Gotland Basin (station 271) from January 2012 to December 2013 (daily averages of original data with 10 min sampling interval)

Die Jahresmittelwerte und Standardabweichungen der Temperatur im Tiefenwasser der zentralen Ostsee sind in Tabelle 5 für die zurückliegenden fünf Jahre auf Basis der CTD-Messungen zusammengestellt. Im Jahr 2013 waren die Tiefenwassertemperaturen aufgrund der Wirkung der kalten Einströme vom Dezember 2012 und Februar 2013 deutlich geringer als 2012. Eine Ausnahme bildete lediglich das Karlsötief, das von den kalten Einströmen noch nicht erreicht wurde. Die Standardabweichungen der Temperaturfluktuationen waren 2013 bis auf das Bornholmbecken vergleichbar mit den geringen Vorjahreswerten. Das impliziert, dass das Bodenwasser im Fårötief, Landsortief und im östlichen Gotlandbecken nur im geringen Maße von den Einströmen beeinflusst wurde, und die Einströme die Bodenschicht des Karlsötief nicht erreichten. Die starken Fluktuationen im Bornholmbecken sind auf den Austausch des wärmeren alten Bodenwassers mit kaltem Einstromwasser aus den Wintereinströmen zurückzuführen.

Tab. 6: Jahresmittelwerte und Standardabweichungen ausgewählter hydrographischer Parameter im Tiefenwasser der zentralen Ostsee: IOW sowie SMHI- Daten (n= 7-20)

Table 6: Annual means and standard deviations of selected hydrographic parameters in the deep water of the central Baltic Sea: IOW- and SMHI data (n= 7-20)

Wassertemperatur (° C; Maximalwerte hervorgehoben)

Station	Tiefe/m	2009	2010	2011	2012	2013
213 (Bornholmtief)	80	9,04 ± 0,54	8,29 ± 1,06	6,48 ± 0,69	6,40 ± 0,40	5,55 ± 0,78
271 (Gotlandtief)	200	6,29 ± 0,01	6,46 ± 0,07	6,43 ± 0,00	6,42 ± 0,01	6,33 ± 0,03
286 (Fårötief)	150	6,43 ± 0,17	6,74 ± 0,12	6,42 ± 0,07	6,14 ± 0,08	5,83 ± 0,05
284 (Landsorttief)	400	5,79 ± 0,06	6,09 ± 0,15	5,95 ± 0,09	5,70 ± 0,06	5,46 ± 0,11
245 (Karlsötief)	100	5,31 ± 0,09	5,43 ± 0,10	5,44 ± 0,07	5,15 ± 0,12	5,22 ± 0,07

Salzgehalt (Maximalwerte hervorgehoben)

Station	Tiefe/m	2009	2010	2011	2012	2013
213 (Bornholmtief)	80	15,59 ± 0,17	15,85 ± 0,33	14,68 ± 0,45	15,16 ± 0,49	15,16 ± 0,24
271 (Gotlandtief)	200	12,43 ± 0,03	12,33 ± 0,03	12,20 ± 0,03	12,13 ± 0,04	12,00 ± 0,04
286 (Fårötief)	150	11,84 ± 0,04	11,77 ± 0,04	11,69 ± 0,16	11,52 ± 0,06	11,28 ± 0,17
284 (Landsorttief)	400	10,86 ± 0,06	10,76 ± 0,03	10,65 ± 0,02	10,50 ± 0,03	10,43 ± 0,05
245 (Karlsötief)	100	9,98 ± 0,09	10,01 ± 0,17	9,98 ± 0,11	9,61 ± 0,12	9,76 ± 0,18

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

Station	Tiefe/m	2009	2010	2011	2012	2013
213 (Bornholmtief)	80	1,13 ± 0,74	1,28 ± 0,88	0,78 ± 0,83	1,68 ± 1,45	1,62 ± 1,05
271 (Gotlandtief)	200	-3,09 ± 0,47	-4,29 ± 0,69	-3,98 ± 0,51	-4,81 ± 0,50	-5,30 ± 0,83
286 (Färötief)	150	-1,25 ± 0,78	-1,97 ± 0,34	-1,57 ± 0,30	-2,20 ± 0,38	-1,95 ± 1,46
284 (Landsortief)	400	-1,17 ± 0,17	-1,15 ± 0,26	-1,06 ± 0,31	-1,24 ± 0,30	-1,11 ± 0,24
245 (Karlsötief)	100	-0,61 ± 0,42	-1,49 ± 0,83	-1,36 ± 0,58	-0,17 ± 0,44	-0,72 ± 0,73

6.2 Salzgehalt

Die vertikale Verteilung des Salzgehaltes in der westlichen und zentralen Ostsee ist in Abbildung 25 für die fünf Überwachungsfahrten des IOW zusammengestellt. Die Salzgehaltverteilung zeigte eine deutlich geringere Variabilität als die Temperatur. Typisch ist der West-Ost Gradient im Bodenwasser. Größere Schwankungen des Salzgehaltes waren besonders in der westlichen Ostsee zu beobachten, wo der Salzgehalt durch die Einstromereignisse von salzhaltigem Nordseewasser am stärksten beeinflusst wurde. 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. 25 dargestellten Salzgehaltsverteilung stellen lediglich „Schnappschüsse“ dar, die nicht geeignet sind ein vollständiges Bild der Einstromaktivität nachzuzeichnen. Im Jahr 2013 fanden mehrere kleine Einströme statt, die durch Zufall zeitlich meist auf eine der Überwachungsfahrten fielen. So zeigten vier der fünf Datensätze eine Einstromsituation in der westlichen Ostsee, was deutlich zeigt, dass allein auf der Basis der Überwachungsfahrten keine aussagekräftige Statistik der Einstromereignisse möglich ist.

Anfang Februar wurde in der Arkonasee eine etwa 20 m mächtige salzreiche Schicht am Boden beobachtet, die sich durch den aktiven Einstrom beginnend ab 28. Januar aufgebaut hatte. Die Salinität am Boden des Arkonabeckens stieg in Folge des Einstroms auf 20,8 g/kg an. Der vorhergehende Einstrom vom Jahreswechsel 2012/13 hatte zu diesem Zeitpunkt das westliche Bornholmbecken erreicht. Im März 2013 war der größte Teil des eingeströmten Salzwassers vom Februar bereits wieder aus der Arkonasee abgeflossen und hatte große Teile des Tiefenwassers im Bornholmbecken ersetzt, das über die Stolper Rinne weiter ostwärts abfloss. In der Stolper Rinne wurde dadurch die Halokline um bis zu 20 m angehoben (vgl. Abb. 25). Im Arkonabecken war im März nur noch eine 5-10 m dünne salzreiche Bodenschicht mit

maximalen Salzgehalten von 17 g/kg zu finden. Im Mai war der Salzwasserpool in der Arkonasee durch einen erneuten Einstrom Ende April 2013 wieder aufgefüllt. Der Bodensalzgehalt war auf 19,5 g/kg angestiegen. In der Stolper Rinne war die Halokline wieder auf die übliche Tiefe von 70 m abgesunken, und der Großteil des kalten Einstromwassers weiter in Richtung zentrale Ostsee abgeflossen.

Anfang August war die Salzsichtung in der westlichen Ostsee durch den baroklinen Einstrom geprägt. Typisch ist dabei der starke vertikale Salzgradient an der Darßer Schwelle, mit einer Salzgehaltsdifferenz von fast 10 g/kg zwischen Oberflächen- und Bodenwasser. Im November 2013 wurde in Folge des Orkantiefs „Christian“ erneut eine Einstromsituation beobachtet. Dabei stieg der Bodensalzgehalt im Arkonabecken bis auf 23,8 g/kg an.

Den generellen Trend des Salzgehaltes im Tiefenwasser der Ostsee für die zurückliegenden fünf Jahre zeigt Tabelle 6. Generell hat sich die Abnahme der Salzgehalte, die über die vergangenen Jahre zu beobachten war, in der zentralen Ostsee weiter fortgesetzt. Eine Ausnahme bildet jedoch das Karlsötief. Hier hat sich der Bodensalzgehalt leicht erhöht. Die Verringerung des Salzgehaltes im Tiefenwasser 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, da sich die Masse dieser Einströme in der Halokline einschichtet. Die Tiefenlage der Halokline hat sich seit dem großen Salzwassereinstrom von 2003 kaum verändert, weil der vertikale Salztransport in die Deckschicht durch die kleinen Einstromereignisse weitgehend kompensiert wird. Ausgenommen von dieser generellen Entwicklung ist lediglich das Bornholmbecken, das regelmäßig von kleineren Einstromereignissen erreicht wird, hier hat sich der mittlere Salzgehalt im Tiefenwasser gegenüber 2012 nicht verändert.

Die zeitliche Entwicklung des Tiefenwassersalzgehaltes in der östlichen Gotlandsee für die Jahre 2012 und 2013 ist in Abbildung 26 auf Basis der oben beschriebenen Verankerungsdaten dargestellt. In allen Tiefenniveaus ab 140 m Tiefe ist der generelle negative Trend im Salzgehalt zu beobachten. Auch hier sind wie in der Temperatur starke kurzzeitige Fluktuationen zu beobachten, deren Amplitude mit zunehmender Wassertiefe abnimmt. Diese Fluktuationen sind meist gut mit der beobachteten Temperaturvariabilität korreliert. Für den Oberflächensalzgehalt der Ostsee ergibt sich über die letzten fünf Jahre kein eindeutiger Trend. Tabelle 7 fasst die Änderungen des Oberflächensalzgehaltes zusammen. Gegenüber den Vorjahreswerten haben sich die Oberflächensalzgehalte in der zentralen Ostsee 2013 leicht verringert. Im östlichen Gotlandbecken und im Farötief wurden 2013 die geringsten Oberflächensalzgehalte der letzten fünf Jahre beobachtet, während im Landsorttief eine leichte Erhöhung des Oberflächensalzgehaltes zu verzeichnen war. Die Standardabweichungen des Oberflächensalzgehaltes liegen etwa auf dem Niveau des Vorjahres und bewegen sich damit im üblichen Bereich.

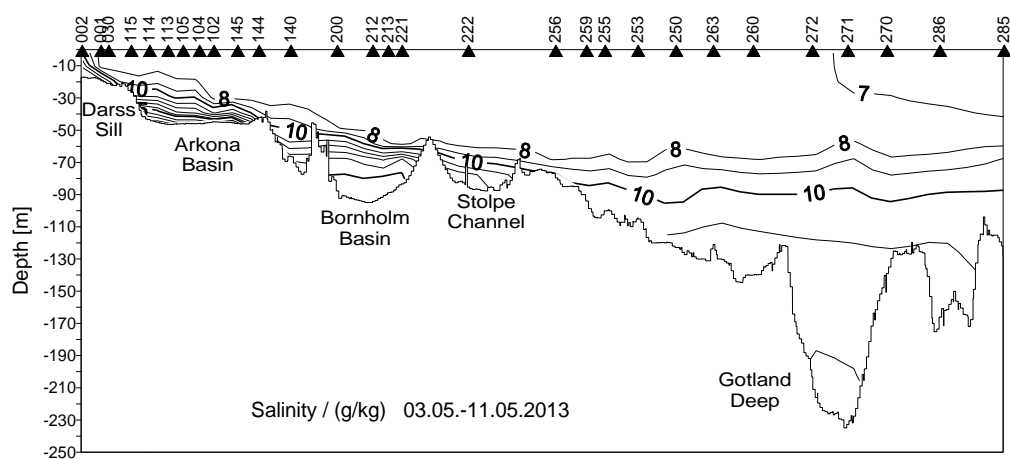
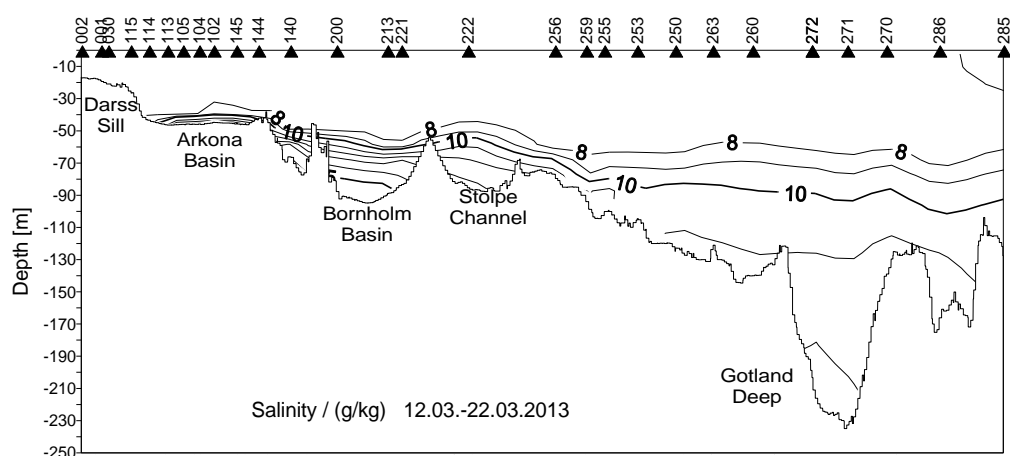
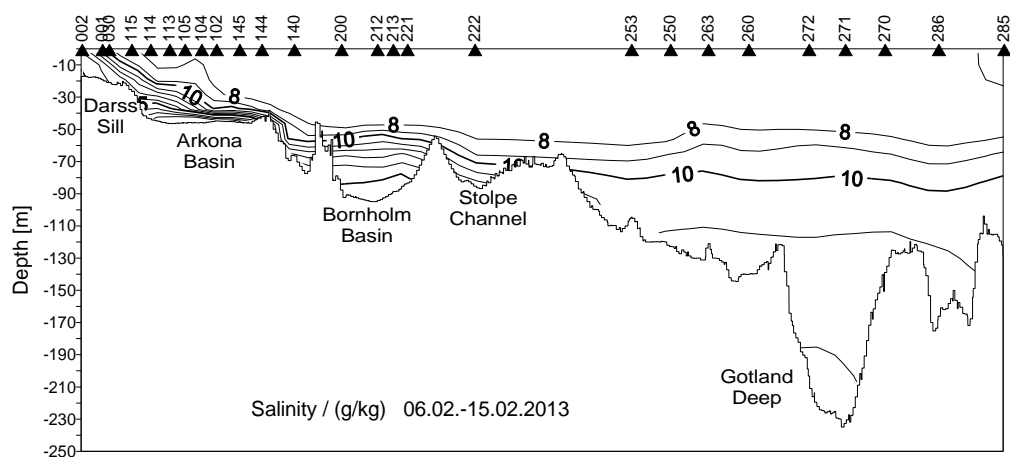


Abb. 25: Vertikale Verteilung des Salzgehaltes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 25: Vertical salinity distribution between Darss Sill and northern Gotland Basin

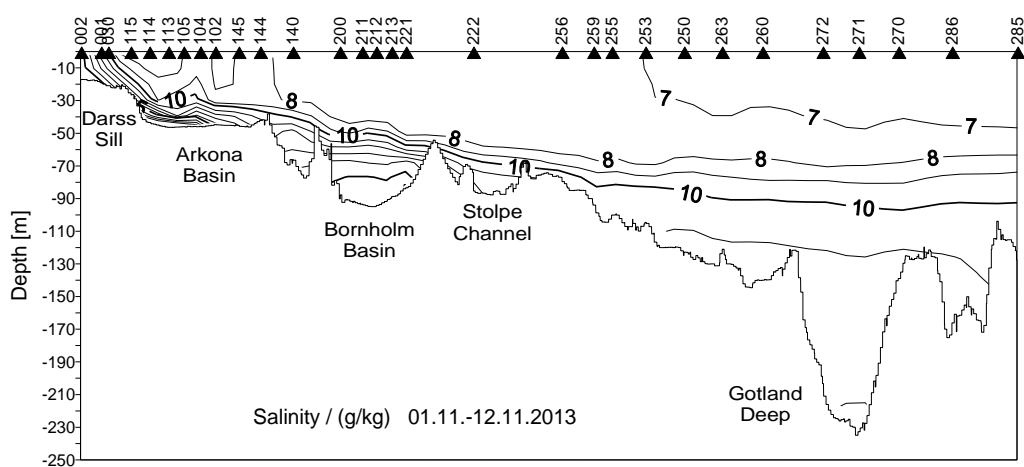
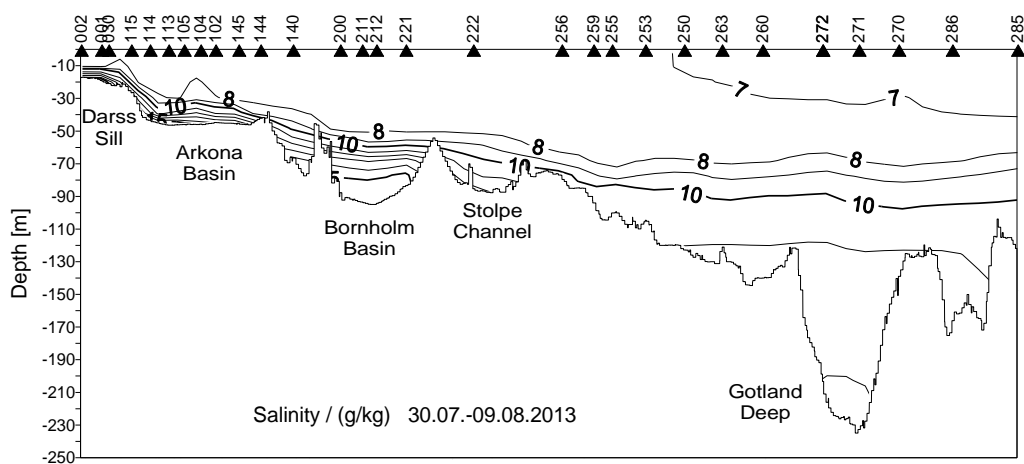


Abb. 25: Vertikale Verteilung des Salzgehaltes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 22: Vertical salinity distribution between Darss Sill and northern Gotland Basin

Tab. 6: Jahresmittelwerte von 2008 bis 2012 und Standardabweichungen der Salinität im Oberflächenwasser der zentralen Ostsee (Minimalwerte hervorgehoben, n= 8-20). Die Langzeitmittelwerte der Jahre 1952-2005 sind dem BALTIC-Klima-Atlas entnommen (FEISTEL et al., 2008)

Table 6: Annual means of 2009 to 2013 and standard deviations of surface water salinity in the central Baltic Sea (minimum values in bold, n= 13-22). The long-term averages of the years 1952-2005 are taken from the BALTIC climate atlas (FEISTEL et al., 2008)

Station	1952- 2005	2009	2010	2011	2012	2013
213 (Bornholmtief)	7,60 ±0,29	7,54 ±0,15	7,17 ±0,17	7,23 ±0,11	7,64 ±0,11	7,28 ±0,12
271 (Gotlandtief)	7,26 ±0,32	7,15 ±0,16	7,20 ±0,20	7,15 ±0,19	7,10 ±0,13	6,78 ±0,28
286 (Fårötief)	6,92 ±0,34	6,80 ±0,28	6,74 ±0,41	6,96 ±0,24	6,91 ±0,16	6,64 ±0,29
284 (Landsorttief)	6,75 ±0,35	6,63 ±0,14	6,37 ±0,40	6,68 ±0,40	6,27 ±0,38	6,52 ±0,12
245 (Karlsötief)	6,99 ±0,32	6,84 ±0,25	6,60 ±0,22	6,81 ±0,24	6,97 ±0,21	6,77 ±0,10

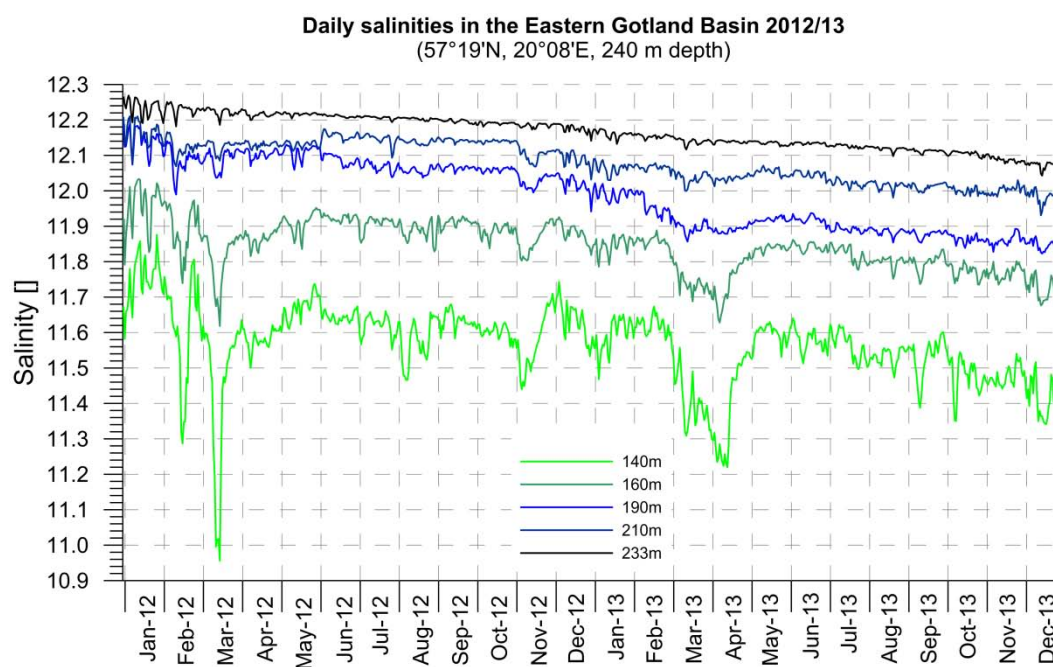


Abb. 26: Zeitlicher Verlauf des Tiefenwassersalzgehaltes im östlichen Gotlandbecken (Station 271) von Januar 2012 bis Dezember 2013 (Tägliche Mittelwerte der Daten mit 10 min Messintervall)

Fig. 26: Temporal development of deep water salinity in the Eastern Gotland Basin (station 271) from January 2012 to December 2013 (Daily averages of original data with 10 min sampling interval)

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 Jahrgänge 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. Der lang anhaltende Winter (vgl. Kapitel 2) kühlte das Wasser bis zum März weiter ab, so dass die Sauerstoffgehalte im Vergleich zum Februar weiter anstiegen. Die Frühjahrsblüte des Phytoplanktons setzte dadurch sehr spät ein und war sowohl in der

westlichen Ostsee als auch im Arkonabecken erst Anfang Mai zu beobachten, einem Zeitpunkt zu dem sie in den meisten Jahren bereits weitgehend vorüber war. Dies wird auch aus dem Vergleich der Jahre 2012 und 2013 ersichtlich (Tab. 8). Der rasche Temperaturanstieg verringert die Sauerstofflöslichkeit im weiteren Jahresverlauf deutlich, was in der flacheren westlichen Ostsee rascher zu sehen ist als im Arkonabecken und den Becken der zentralen Ostsee. Im Sommer liegen die Sauerstoffgehalte dann in der Regel unter 7 ml/l. Im Herbst verursacht die Abkühlung wieder zu einer Zunahme der Sauerstoffkonzentrationen (Tab. 8).

Tab. 8: Jahresgang des Sauerstoffgehaltes in der durchmischten Oberflächenschicht (0-10 m) im Jahr 2012 und 2013

Table 8: Annual oxygen cycle in the mixed surface layer (0-10 m) in the year 2012 and 2013

	Februar	März/April	Mai	Juli	November
westl. Ostsee					
O ₂ (ml/l)	8,49/8,21	9,25/8,89	8,31/8,32	6,52/6,27	6,95/6,50
Stabw. (ml/l)	0,17/0,23	0,31/0,15	0,24/0,16	0,11/0,03	0,19/0,12
n	5/5	5/5	5/5	4/4	5/5
Arkonabecken					
O ₂ (ml/l)	8,63/8,63	9,41/9,36	8,68/9,28	6,90/6,40	7,33/7,05
Stabw. (ml/l)	0,06/0,06	0,15/0,05	0,18/0,25	0,09/0,13	0,06/0,05
n	13/13	13/13	12/13	13/13	13/12
Bornholmbecken					
O ₂ (ml/l)	8,61/8,61	9,18/9,15	8,95/9,70	6,85/6,38	7,42/7,19
Stabw. (ml/l)	0,03/0,02	0,02/0,03	0,05/0,06	0,09/0,11	0,07/0,04
n	6/4	3/3	3/4	3/6	4/6
östl. Gotlandbecken					
O ₂ (ml/l)	8,49/8,59	8,92/9,02	9,25/9,97	7,00/6,56	7,31/7,41
Stabw. (ml/l)	0,05/0,08	0,07/0,07	0,21/0,25	0,06/0,15	0,08/0,10
n	8/7	9/8	9/9	9/9	7/9

Um den Einfluss von Temperatur und Salzgehalt auf die Sauerstofflöslichkeit zu eliminieren, wird häufig der Sauerstoffsättigung gegenüber der Sauerstoffkonzentration der Vorrang gegeben. Dadurch wird die Vergleichbarkeit der Messwerte deutlich erhöht. Abb. 27 fasst die Sauerstoffsättigungswerte des Oberflächenwassers für das Jahr 2013, für die westliche Ostsee, das Arkonabecken, das Bornholmbecken und das östliche Gotlandbecken zusammen. Die bei den Sauerstoffkonzentrationen beschriebene jahreszeitliche Entwicklung wird hier noch deutlicher. Im Ergebnis der Dominanz sauerstoffzehrender Prozesse und geringer Produktion ist das Oberflächenwasser im Februar in allen Seegebieten mit etwa 95 % leicht untersättigt (Abb. 16). Auch im März, wenn in der westlichen Ostsee die Frühjahrsblüte in der Regel in vollem Gange ist (NAUSCH et al., 2013) findet sich weiterhin eine Untersättigung (96,6 %). Im Arkonabecken liegt die Sättigung im März bei 99,0 %, im Bornholmbecken bei 98,4 % und im östlichen Gotlandbecken bei 97 %. Der Höhepunkt der Frühjahrsblüte findet sich 2013 in allen

Seegebieten erst im Mai. Dies ist für die zentrale Ostsee typisch, nicht jedoch für die westliche Ostsee und das Arkonabecken. Es muss hier jedoch angemerkt werden, dass durch die geringe Messfrequenz nicht gesichert ist, dass das Maximum der Blüte erfasst wird. Dies ist möglicherweise in der westlichen Ostsee der Fall, wo die Sauerstoffsättigung im Mai nur bei 106,2 % liegt (Abb. 27). Der Sommer zeigt das gewohnte Bild mit Sättigungswerten um 105 %. 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. (1995) für das Jahr 1994 beschrieben wurden treten nicht mehr auf.

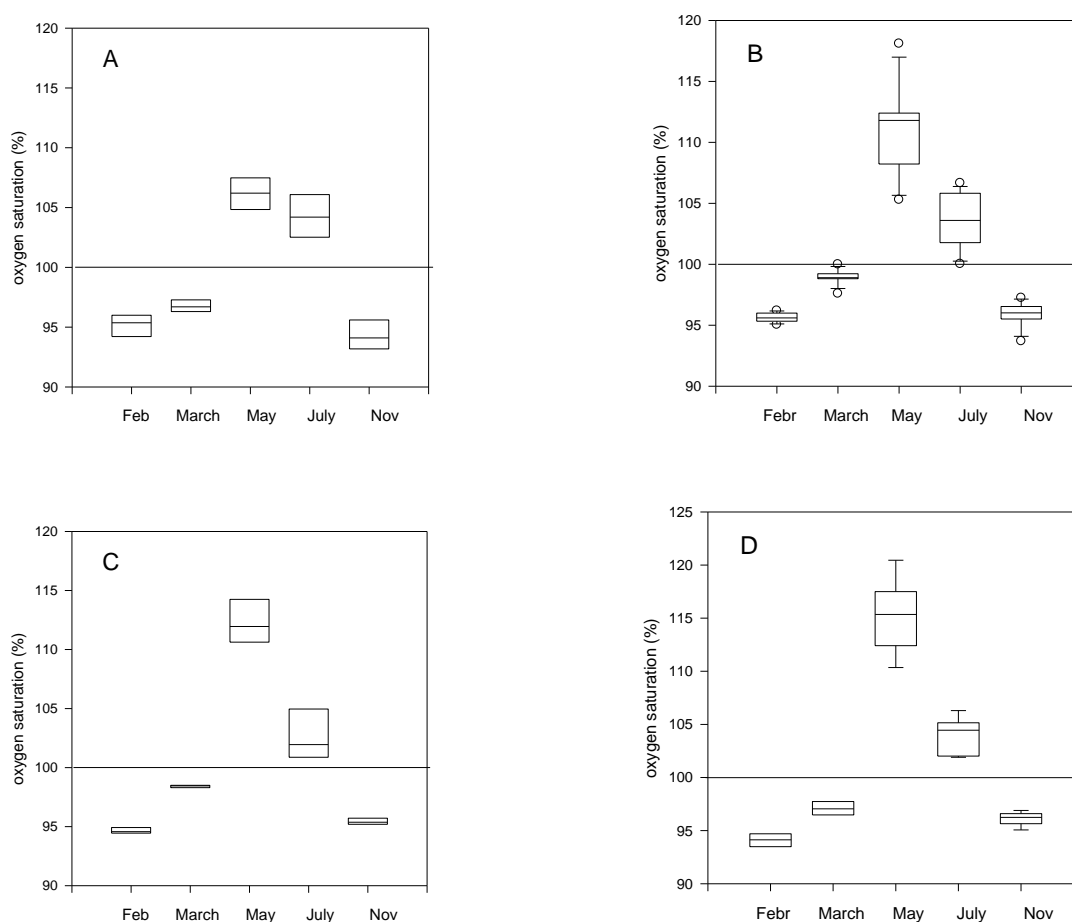
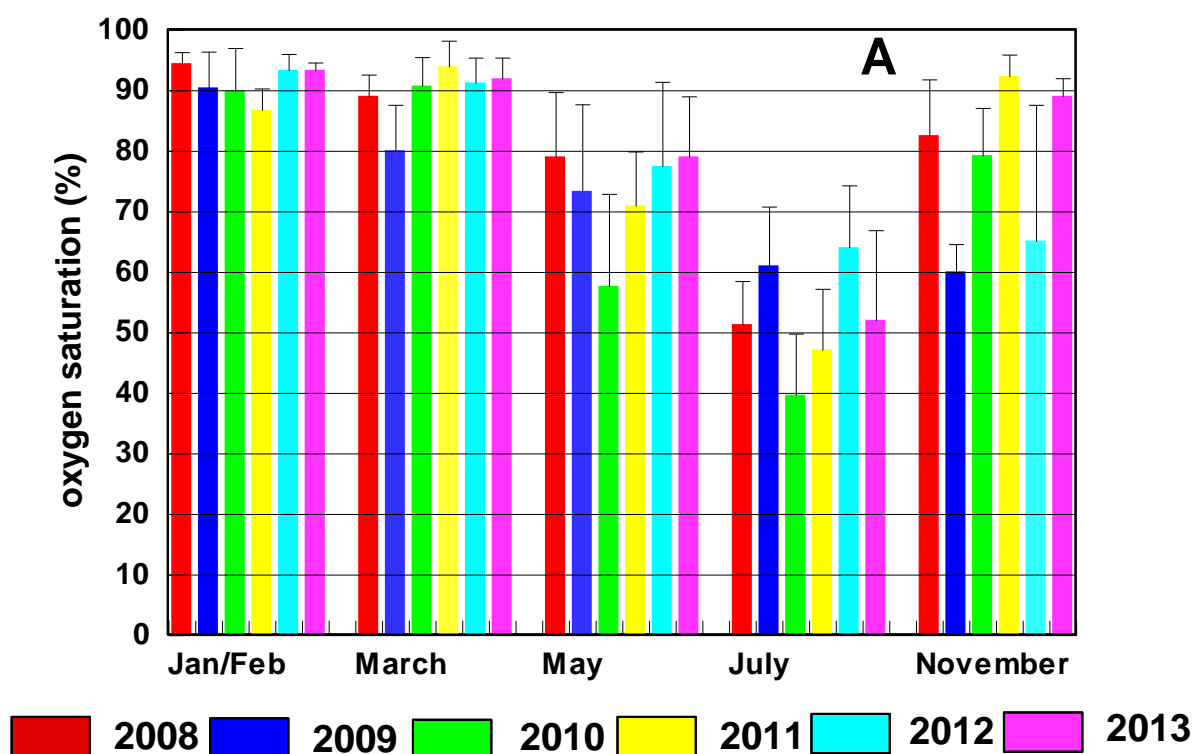


Abb. 27: Box- Whisker- Plots der Sauerstoffsättigung (%) im Jahr 2013 in der Oberflächenschicht (0-10 m) in der westlichen Ostsee (A) und im Arkonabecken (B)

Fig. 27: Box-Whisker- Plots of oxygen saturation (%) in 2013 in the mixed surface layer (0-10 m) of the western Baltic (A), the Arkona Basin (B), the Bornholm Basin (C) and the eastern Gotland Basin (D)

In der westlichen Ostsee und im Arkonabecken ist ein ausgeprägter Jahresgang des Sauerstoffs in Bodennähe zu beobachten. Dort erfolgt alljährlich im Winterhalbjahr eine vertikale Durchmischung. Zusätzlich führen Einstromprozesse wiederholt zur Wassererneuerung, so dass im Februar und März eine recht gute Sauerstoffversorgung bis zum Grund vorherrscht (Abb. 28). Die Sättigungswerte am Boden liegen nur geringfügig unter den Werten der Deckschicht. Auf Grund der oben beschriebenen Entwicklung mit lang anhaltendem Winter und geringen Wassertemperaturen ist der Gewässergrund auch im Mai noch recht gut mit Sauerstoff versorgt. 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. Der Sommer 2013 kann mit bodennahen Sättigungswerten von $52,0\% \pm 14,9\%$ (westliche Ostsee, $n=5$) und $36,4\% \pm 21,0\%$ (Arkonabecken, $n=11$) als durchschnittlich angesehen werden, wenngleich im nördlichen Teil des Arkonabeckens nur Werte um 10 % ermittelt wurden. Der Orkan „Christian“ am 28. Oktober führte in der flacheren westlichen Ostsee bereits wieder zu Durchmischung bis zum Boden, so dass die Sättigungswerte bei 90 % lagen. Im Arkonabecken schaffte dies erst der Sturm „Xaver“ vom 5.-7. Dezember (vgl. Kapitel 2), was eindrucksvoll durch die Registrierung an der Station Arkona-Becken dokumentiert werden konnte (vgl. Kapitel 4).



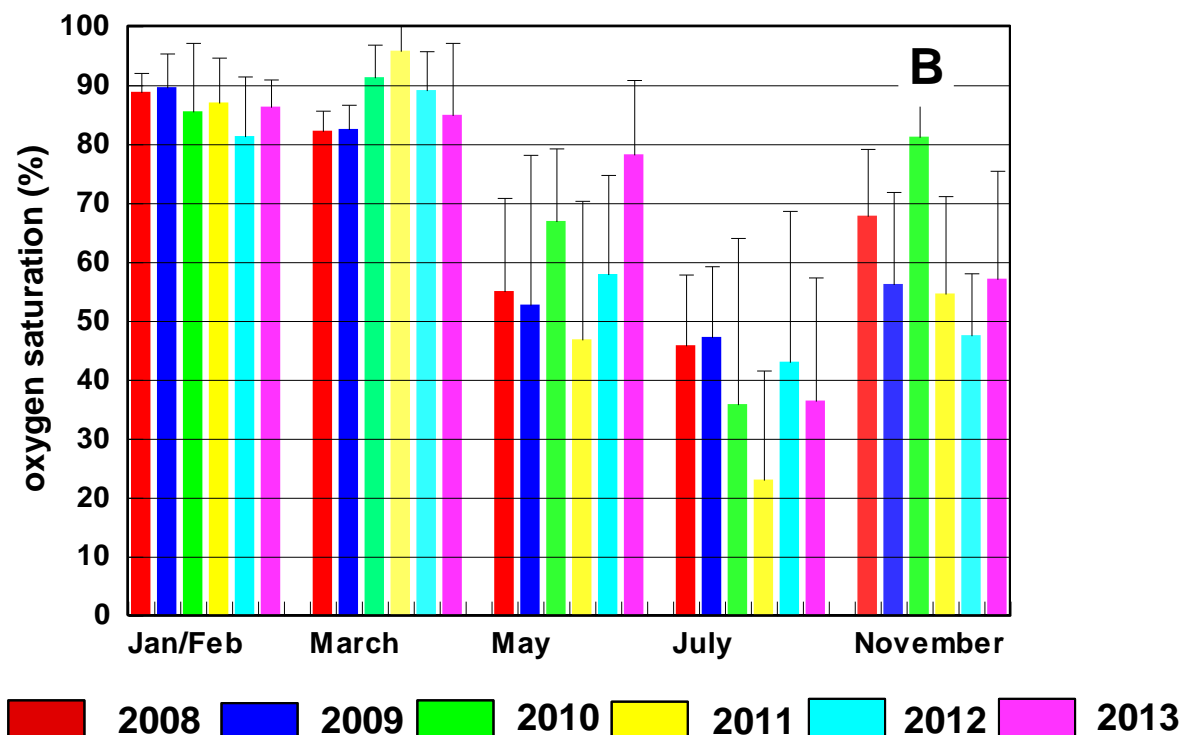


Abb. 28: Sauerstoffsättigung in Bodennähe in der westlichen Ostsee (A) und im Arkonabecken (B) in den Jahren 2008 bis 2013

Fig. 28: Oxygen saturation in the near bottom layer in the western Baltic Sea (A) and the Arkona Basin (B) between 2008 and 2013

Die Periode der größten Sauerstoffverarmung wird in der Regel im Spätsommer/Frühherbst beobachtet. Die Messfrequenz der Überwachungsfahrten des IOW reicht nicht aus, diesen Zeitraum zu erfassen. Jedoch führt das Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (LLUR) mit dem Mess- und Laborschiff „Haithabu“ in diesem Zeitraum seit vielen Jahren intensive Untersuchungen zum Sauerstoffgehalt in Bodennähe durch. 2013 fand diese Untersuchung vom 3.-11. September statt. Es wurde der Sauerstoffgehalt in Bodennähe an 36 Stationen, davon 34 mit einer Wassertiefe >15 m, gemessen (Abb. 29).

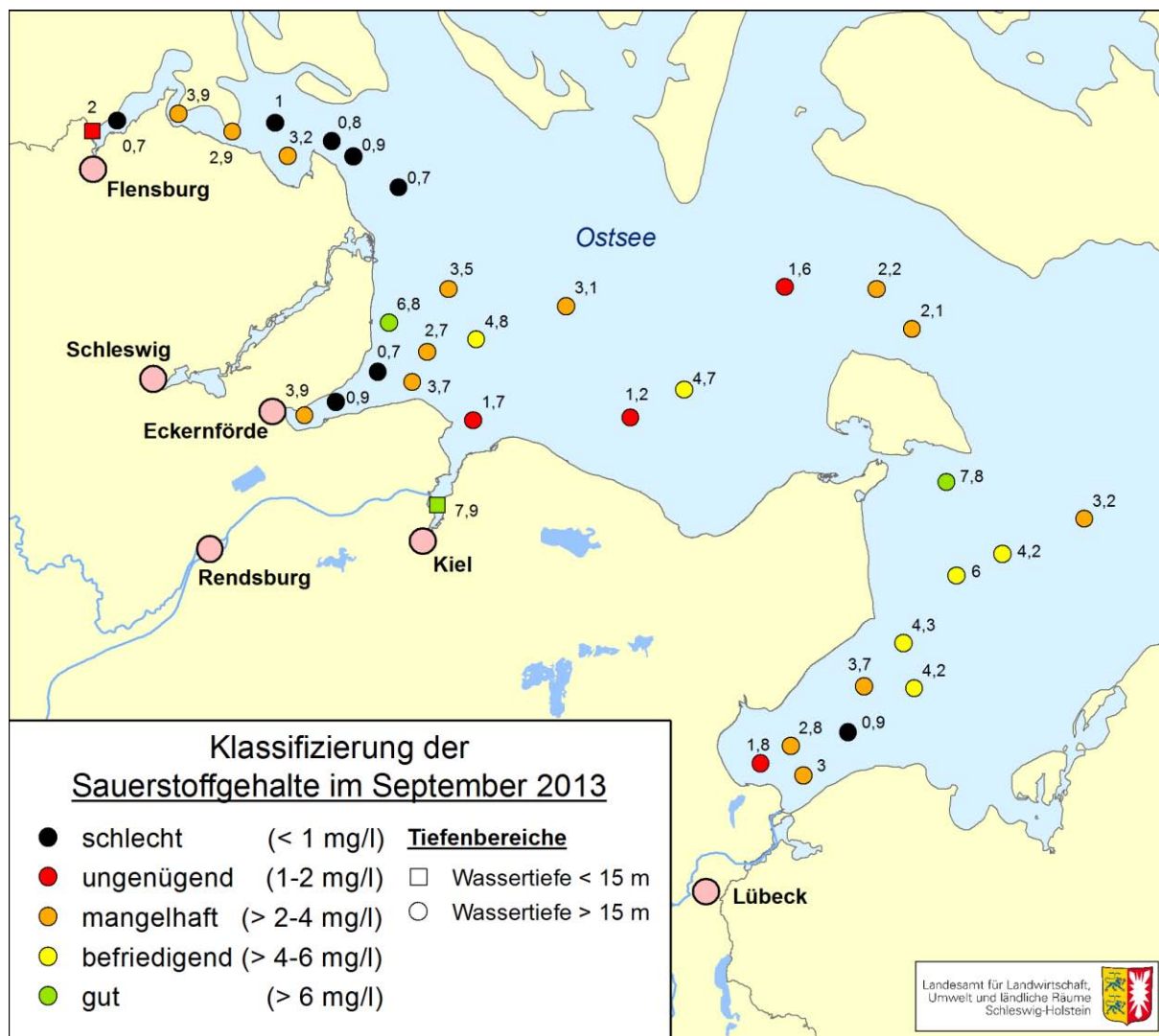


Abb. 29: Sauerstoffmangel in der westlichen Ostsee im September 2013 (LLUR, 2013)
Umrechnung: O_2 [mg/l] \times 0,7005 = O_2 [ml/l]

Fig. 29: Oxygen deficiency in the western Baltic Sea in September 2013 (LLUR, 2013) –
 O_2 [mg/l] \times 0,7005 = O_2 [ml/l]

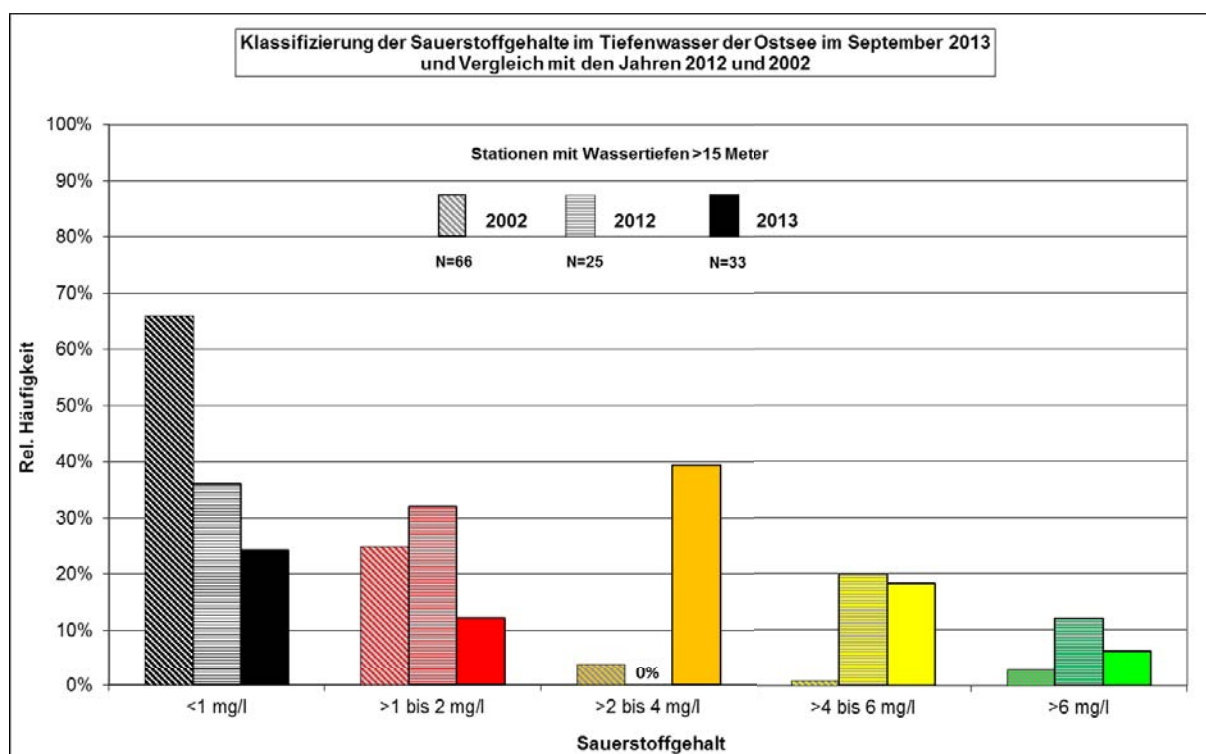


Abb. 30: Klassifizierung der gemessenen Sauerstoffgehalte im Tiefenwasser der westlichen Ostsee für die Jahre 2002, 2012 und 2013 (LLUR, 2013)

Fig. 30: Classification of the oxygen content in the deep water (water depth > 15 m) in the western Baltic Sea in the years 2002, 2012 and 2013 (LLUR, 2013)

Eine Auswertung der Messungen 2013 (Abb. 30) an den Stationen mit einer Wassertiefe >15 m zeigt, dass 36 % aller Messwerte auf die Klassen *schlecht* und *ungenügend* entfielen (<2 mg/l Sauerstoff). Dieser Anteil ist im Jahr 2013 somit deutlich niedriger im Vergleich zum Vorjahr, als 68 % der Messwerte auf diese Klassen entfielen. Im Jahr 2002, dem Jahr mit der bisher schlechtesten Sauerstoffsituation, betrug der Anteil in diesem Klassen sogar 91 %. Der Anteil der Messwerte mit einer *mangelhaften* Sauerstoffsituation (>2 mg/l bis 4 mg/l) lag bei 39 % (2012: 0 %, 2002: 4 %). Der Anteil mit *befriedigenden* (>4 bis 6 mg/l) bis *guten* (>6 mg/l) Sauerstoffgehalten lag bei 24 % (2012: 32 %, 2002: 4 %).

Nach Informationen des LLUR ist der spätsommerliche bzw. frühherbstliche Sauerstoffmangel in der westlichen Ostsee ein Phänomen, das bis in die 1970er Jahre nur gelegentlich zu beobachten war. Allerdings wurden die intensiven herbstlichen Messkampagnen erst Anfang der 2000er Jahre aufgenommen. Die Ergebnisse sind in Abb. 31 zusammen gefasst. Der prozentuale Anteil der Stationen mit einem Sauerstoffgehalt <2mg/l in der bodennahen Schicht zeigt eine leicht abnehmende Tendenz. Jedoch muss beachtet werden, dass es erhebliche zwischenjährliche Variationen in der hydrographischen Situation gibt, der Probenahmezeitpunkt nicht in jedem Jahr identisch war und auch die Anzahl der Stationen variierte. Es muss also geschlussfolgert werden, dass weitere Nährstoffreduktionen notwendig sind, um die herbstliche Sauerstoffsituation dauerhaft zu verbessern.

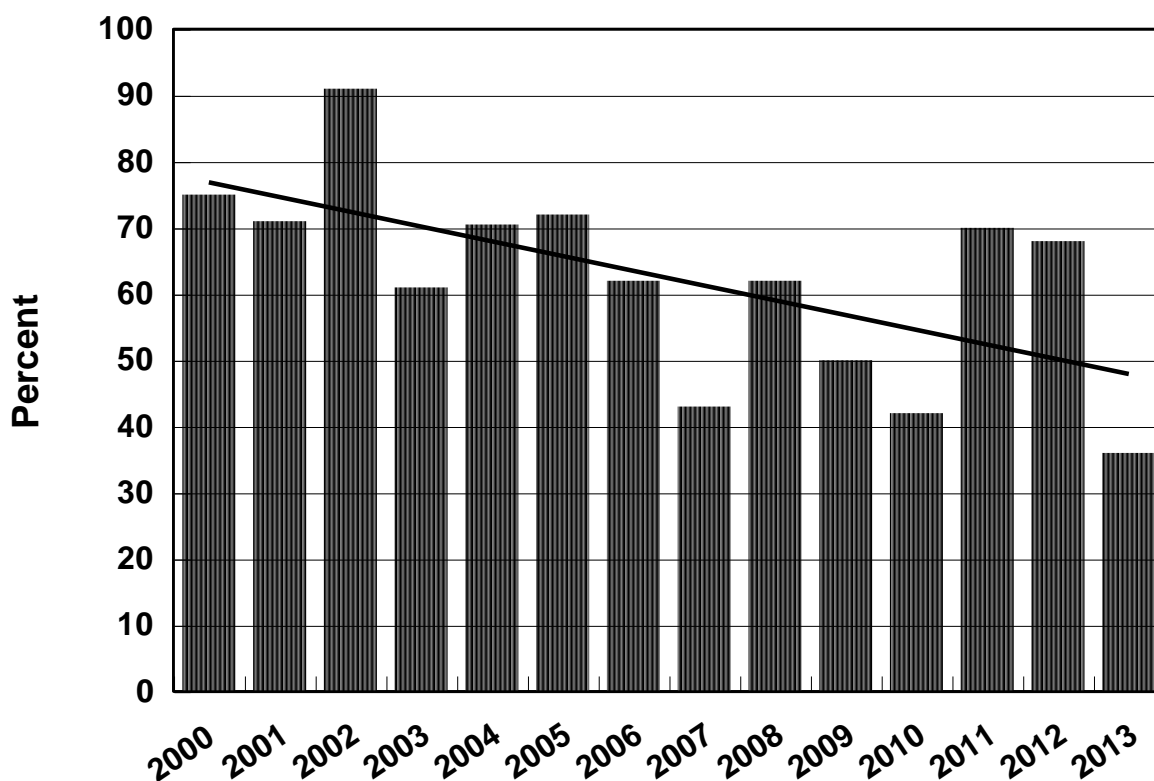
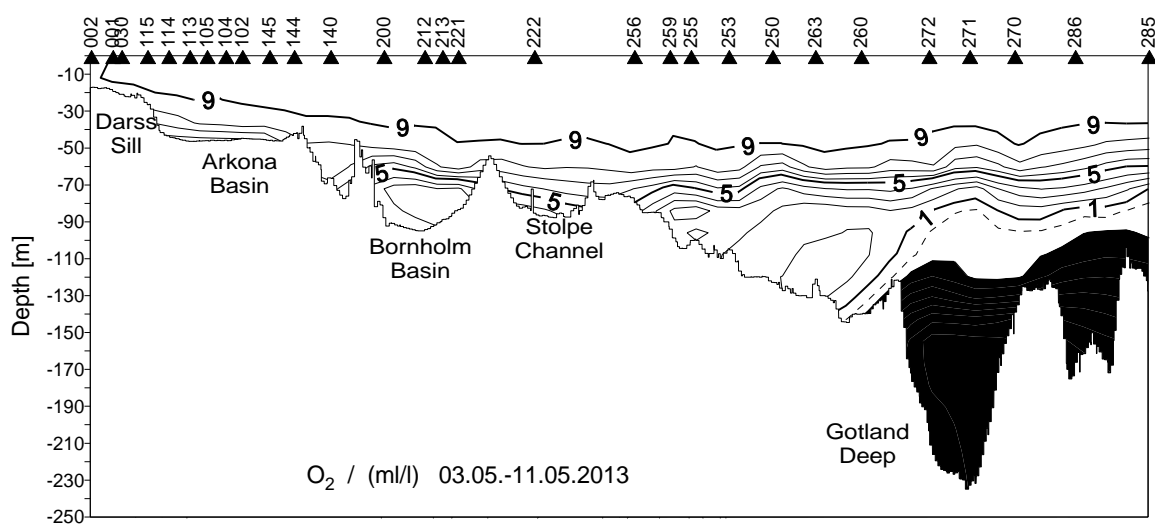
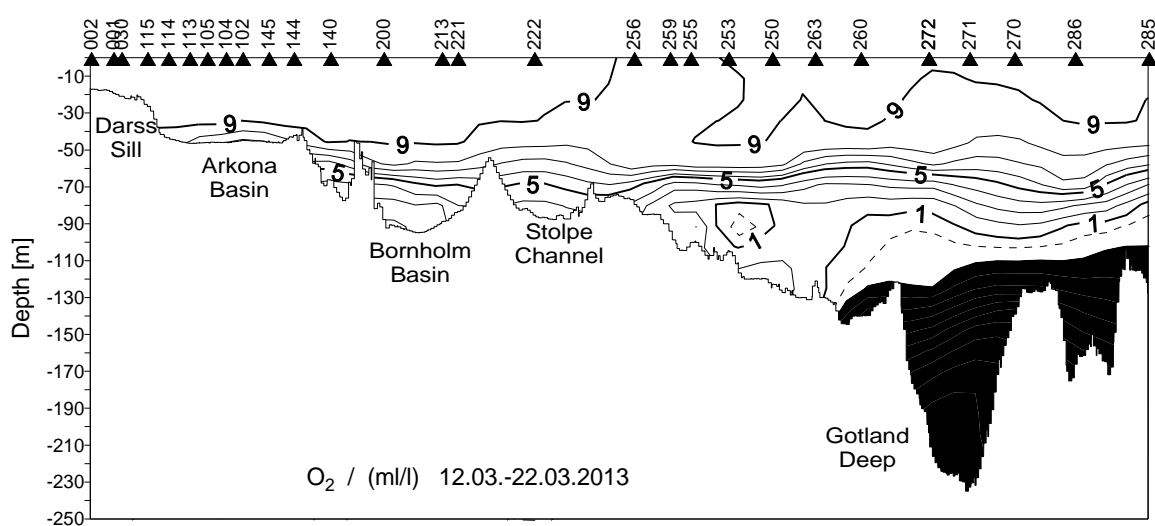
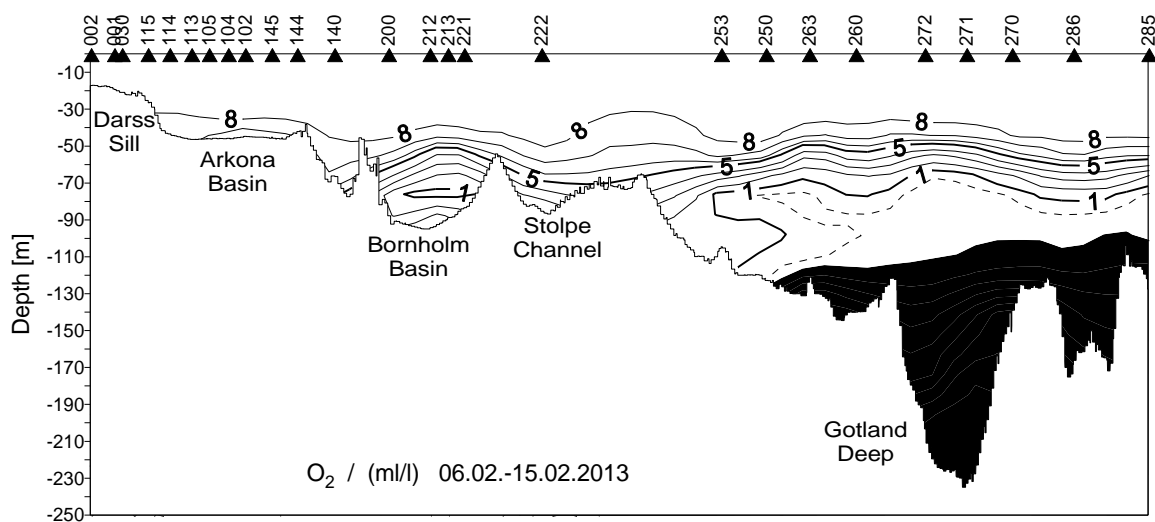


Abb. 31: Prozentualer Anteil der Stationen mit einem Sauerstoffgehalt $< 2 \text{ mg/l}$ in der bodennahen Schicht der westlichen Ostsee im Herbst – Daten LLUR

Fig. 31: Percentage of stations with an oxygen content $< 2 \text{ mg/l}$ in the bottom near layer in the western Baltic Sea in autumn – data LLUR

Genauere Aussagen zur jahreszeitlichen Entwicklung der Sauerstoffsättigung können den Registrierungen auf der Darßer Schwelle (Kapitel 3), im Arkonabecken (Kapitel 4) und in der Oderbucht (Kapitel 5) 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 Einstromereignissen geprägt. Abb. 32 zeigt die Sauerstoffverhältnisse entlang des Längsschnittes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken für die fünf im Jahr 2013 durchgeführten Messfahrten.



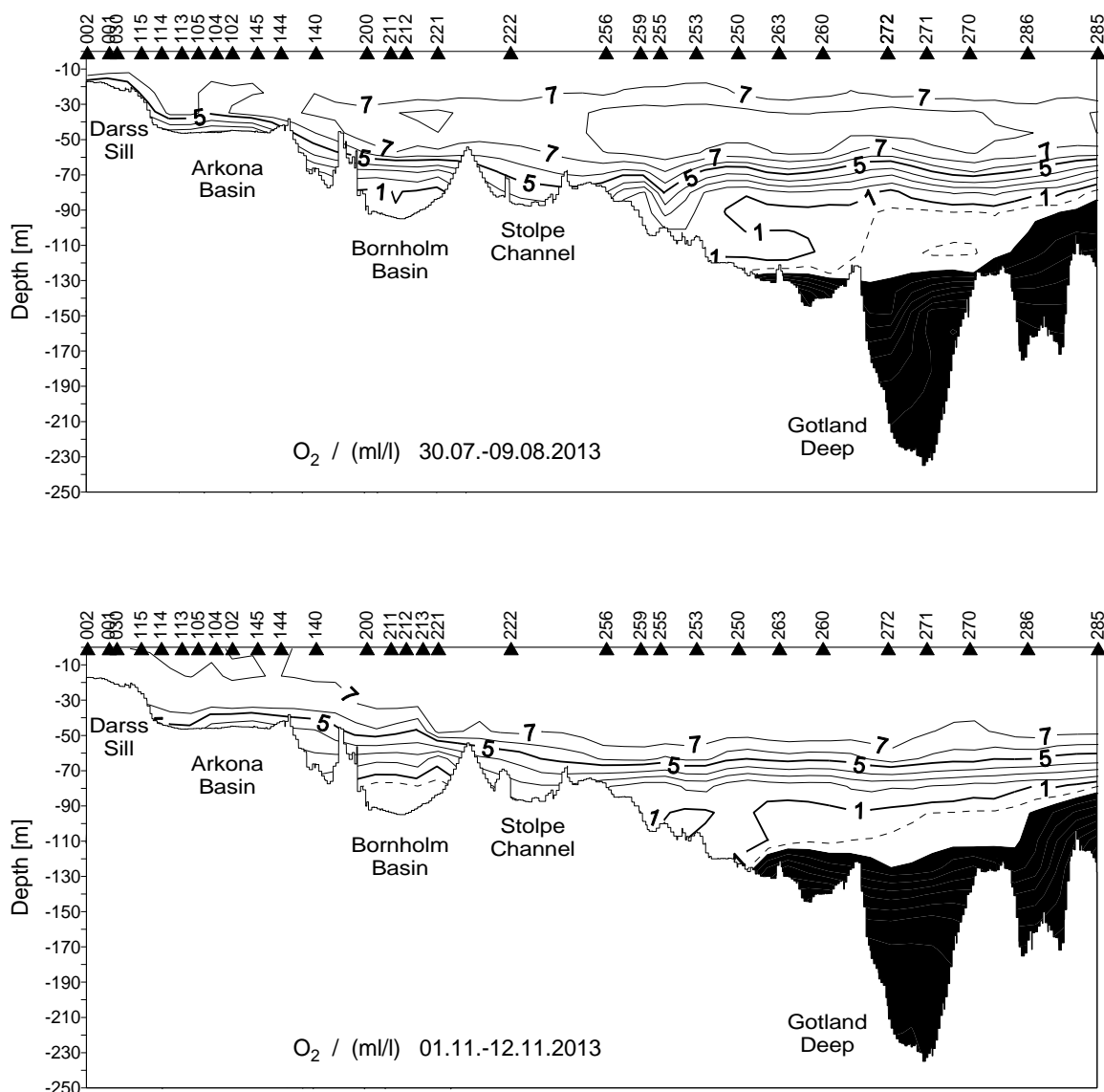


Abb. 32: Vertikale Verteilung des Sauerstoff/Schwefelwasserstoffgehaltes 2013 zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 32: Vertical distribution of oxygen resp. hydrogen sulphide between Darss Sill and northern Gotland Basin

Das Bornholmbecken ist das am weitesten westlich gelegene der Tiefenbecken. Barotrope und barokline Einströme sind häufig in der Lage das Tiefenwasser zu belüften (Abb. 32), was auch die Langzeitentwicklung seit 2001 belegt (Abb. 33). Der letzte große barotrope Einstrom vom Januar 2003 hatte schon im Februar dieses Jahres zu einer nachhaltigen Belüftung des Bornholmbeckens geführt. Im Tiefenwasser wurde eine maximale Sauerstoffkonzentration von 7,66 ml/l gemessen, der Jahresmittelwert lag bei 4,53 ml/l (NAUSCH et al., 2004). In den Jahren 2004 und 2005 konnten keine nennenswerten Einstromereignisse registriert werden, so dass die Sauerstoffkonzentration kontinuierlich abnahm und ab Mai 2005 ab 80 m Wassertiefe durchweg Schwefelwasserstoff gemessen wurde. Seit 2006 führten jedoch vorwiegend barokline Einstromereignisse dazu, dass das Tiefenwasser des Bornholmbeckens fast

durchweg oxisch war (Abb. 33, Tab. 6). Nur sporadisch wurden geringe Mengen von Schwefelwasserstoff gemessen. Im Februar 2012 konnte der relativ starke Einstrom vom November/Dezember des Vorjahres im Bornholmbecken beobachtet werden. Salzreiches Wasser mit Sauerstoffkonzentrationen über 5 ml/l füllt das Tiefenwasser des Beckens. Das Ereignis konnte auf Grund der importierten Salzmenge als kleiner MBI (Major Baltic Inflow) klassifiziert werden (NAUSCH et al., 2013) und ist damit der erste MBI seit 2003. Auch im Jahr 2013 herrschten im Tiefenwasser des Bornholmbeckens durchweg oxische Verhältnisse, der Jahresmittelwert unterscheidet sich nur unwesentlich von dem des Vorjahres. Die höchste Sauerstoffkonzentration in 80 m Wassertiefe wurde im März mit 4,07 ml/l gemessen, was als Ergebnis des barotropen Einstroms Ende Januar/Anfang Februar gewertet werden kann.

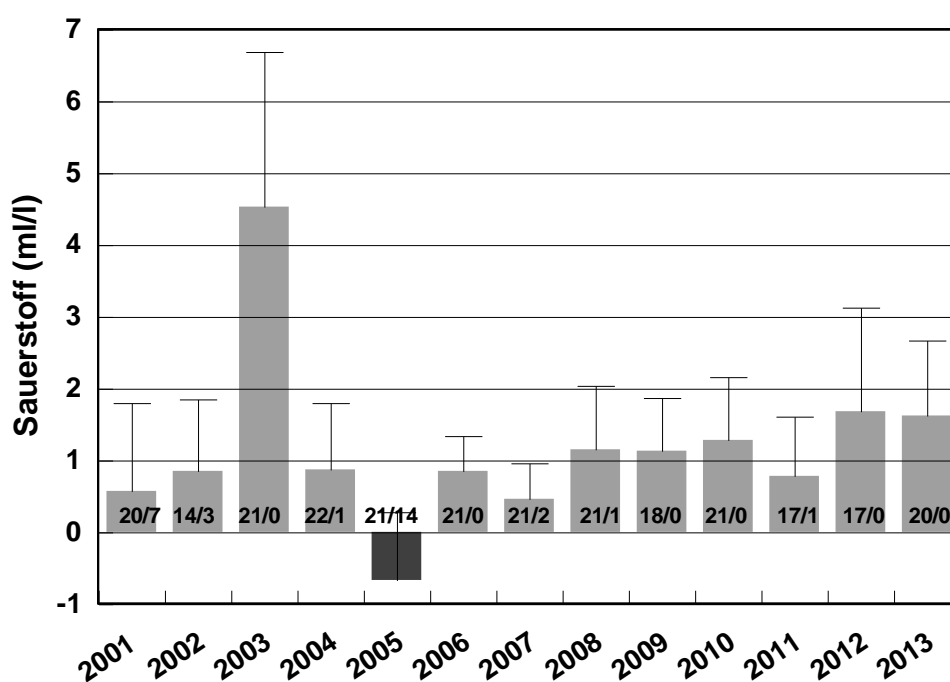


Abb. 33: Mittlere Sauerstoffgehalte in 80 m Wassertiefe im Bornholmbecken (Station 213) seit 2001 – zusätzlich ist die Anzahl der Messungen je Jahr sowie das Auftreten von Schwefelwasserstoff angegeben – IOW und SMHI Daten

Fig. 33: Mean oxygen concentrations in 80 m water depth in the Bornholm Basin (station 213) since 2001 – additionally the number of measurements per year and the occurrence of hydrogen sulphide is given – IOW and SMHI data

Die für das Bornholmbecken aufgezeigte Entwicklung im Sauerstoffgehalt führte dazu, dass sich der Dorschbestand östlich von Bornholm vollständig erholt hat. Die Größe der Population mit fast 400 000 Tonnen entspräche der von vor 20 Jahren (ICES, 2011). Neben den hydrographischen Bedingungen trugen auch Fangbeschränkungen zu dieser positiven Entwicklung bei.

Die Intensität der oben beschriebenen Einströme war jedoch nicht groß genug, die zentrale Ostsee zu erreichen. Der MBI vom November/Dezember 2011 konnte bis in die südliche Ostsee und die Danziger Bucht nachgewiesen werden (NAUSCH et al., 2013), erreichte aber das Gotlandbecken nicht. An dieser Situation hat sich auch im Jahr 2013 nichts geändert, die Stagnationsperiode hält unvermindert an. Der Salzgehalt und die Temperatur gingen im Gotlandtief, im Farötief und im Landsorttief weiter zurück (Tab. 6, vgl. auch Kapitel 6.1.1 und 6.1.2). Im Jahresverlauf traten nur sehr geringe Schwankungen von Salz und Temperatur auf. Im Gotlandtief wird die höchste Schwefelwasserstoffkonzentration, ausgedrückt als negative Sauerstoffäquivalente (-5,30 ml/l), seit Beginn der Stagnationsperiode im Jahre 2005 erreicht. Der Jahresmittelwert im Farötief und im Landsorttief ist nur geringfügig geringer als im Vorjahr (Tab. 6). Wie auch in den Vorjahren, ist die hydrographische Situation im Karlsötief nicht so stabil. So wurde das Tiefenwasser im März und April 2013 kurzzeitig belüftet, maximal wurden in 100 m Wassertiefe jedoch nur 0,21 ml/l gemessen, und rasch traten wieder anoxische Verhältnisse auf.

6.4 Anorganische Nährstoffe

Die Eutrophierung wird als schwerwiegendste anthropogene Belastung der Ostsee angesehen (HELCOM, 2007). Diese Einschätzung wird auch durch die neueste Eutrophierungsbewertung der HELCOM bestätigt (HELCOM, 2014). Darin heisst es: "The entire open Baltic Sea was assessed as being affected by eutrophication. The following coastal areas were assessed by national authorities as being in good ecological status according to WFD requirements: Orther Bucht (Germany), outer coastal Quark /Finland) and outer coastal Bothnian Bay, outer coastal Bothnian Sea, inner and outer coastal Quark (Sweden). Der Begriff Eutrophierung wird „als die erhöhte biologische Produktivität des Gewässers als Ergebnis der verstärkten Zufuhr von Pflanzennährstoffen (Phosphor- und Stickstoffverbindungen), hauptsächlich verursacht durch anthropogene Aktivitäten in den Einzugsgebieten“ definiert (EUTROSYM, 1976). Obwohl die Ostseeanrainerstaaten bereits umfangreiche Maßnahmen zur Reduzierung des Nährstoffeintrags unternommen haben, sind weitere Reduktionen unabdingbar. Sie wurden im „Baltic Sea Action Plans“ der HELCOM (HELCOM, 2007) festgeschrieben. Basierend auf neuen und erweiterten Datensätzen, verbesserten Modellansätzen und überarbeiteten und harmonisierten Eutrophierungszielwerten wurden die dort festgelegten Reduktionsziele überarbeitet (HELCOM, 2013a). Für die gesamte Ostsee wurde ein maximal möglicher Eintrag (MAI = Maximum Allowable Inputs) von 792 209 t Stickstoff/Jahr und 21 716 t Phosphor/Jahr errechnet. Für die Referenzperiode 1997-2003 wurden folgende Einträge ermittelt: 910 344 t Stickstoff/Jahr und 36 894 t Phosphor/Jahr. Daraus resultiert eine notwendige Reduktion von 118 134 t Stickstoff/Jahr und 15 178 t Phosphor/Jahr, deren Großteil auf die zentrale Ostsee entfällt (Stickstoff: 85 %; Phosphor: 72 %). Hierbei sind erstmals auch die atmosphärischen Stickstoffeinträge berücksichtigt. HELCOM (2013) hat daraus weiterhin die notwendigen Reduktionsziele für die einzelnen Ostseeanrainerstaaten abgeleitet. Für Deutschland ergeben sich Reduktionsanforderungen (CART = Country Allocated Reduction Targets) von 7670 t Stickstoff/Jahr und 170 t Phosphor/Jahr. Auch die neueste Erhebung der Nährstoffeinträge in die Ostsee für das Jahr 2010 (HELCOM, 2013b) ermittelt nach wie vor große Mengen. Aus nicht

abflussnormierten Flusseinträgen plus atmosphärischer Einträge ergaben sich 976 941 t Stickstoff/Jahr und 38 255 t Phosphor/Jahr.

Um die Effekte des erhöhten Nährstoffeintrags, aber auch um den Erfolg von eingeleiteten Maßnahmen bewerten zu können, ist die Überwachung der Nährstoffsituation essentiell. Sie gehört seit der Etablierung eines einheitlichen Überwachungsprogramms der HELCOM Ende der 1970er Jahre zu den Schlüsselementen des Messprogramms. In die Untersuchungen sind vor allem die anorganischen Nährstoffe Phosphat, Ammonium, Nitrit, Nitrat und Silikat einbezogen, aber auch die Summenparameter Gesamtphosphor und Gesamtstickstoff werden regelmäßig gemessen.

In der Oberflächenschicht weisen Phosphat und Nitrat den für die gemäßigten Breiten typischen Jahresgang auf (NEHRING und MATTHÄUS, 1991; NAUSCH und NEHRING, 1996). Abb. 34 zeigt dies für die Arkona- und die Bornholmsee. In der zentralen Ostsee bildet sich im Winter eine typische Plateauphase aus, die in Abhängigkeit vom Witterungsverlauf über 2-3 Monate anhalten kann (NAUSCH et al., 2008b). Dies ist sehr deutlich in der Bornholmsee zu erkennen (Abb. 34 b). Auf Grund des lang anhaltenden Winters 2012/2013 ist dies auch für die Arkonasee deutlicher zu sehen als in anderen Jahren (Abb. 34 a), in denen das frühe Einsetzen der Frühjahrsblüte im Arkonabecken und vor allem in der westlichen Ostsee dieses stabile Plateau verhindert. Somit hielten sich 2013 bis Ende März winterliche Konzentrationen, die aber durch die dann einsetzende Frühjahrsblüte extrem rasch verbraucht waren. In den meisten Jahren (z.B. NAUSCH et al. 2012, 2013) ist das Nitratreservoir rascher verbraucht und es verbleiben zunächst noch messbare Phosphatkonzentrationen, wie es in der Bornholmsee der Fall ist. In diesen Fällen bricht die Frühjahrsblüte durch Stickstofflimitation zusammen. Die späte und schnell einsetzende Frühjahrsblüte führte im Jahr 2013 in der Arkonasee zum vollständigen Verbrauch beider Nährstoffe. Von Anfang Mai bis in den Spätsommer hinein liegen die Phosphat- bzw. Nitratwerte an oder unter der Nachweisgrenze. Im Herbst kommt es infolge der verstärkten Mineralisation der organischen Substanz zu einem langsamen Anstieg der Nährstoffkonzentrationen bis dann spätestens im Februar des Folgejahres wieder die Winterkonzentrationen erreicht werden. Abb. 20 zeigt aber auch, dass die Phosphatanreicherung rascher voran geht als die des Nitrats. Dies ist auch eine Folge des niedrigen N/P-Verhältnisses.

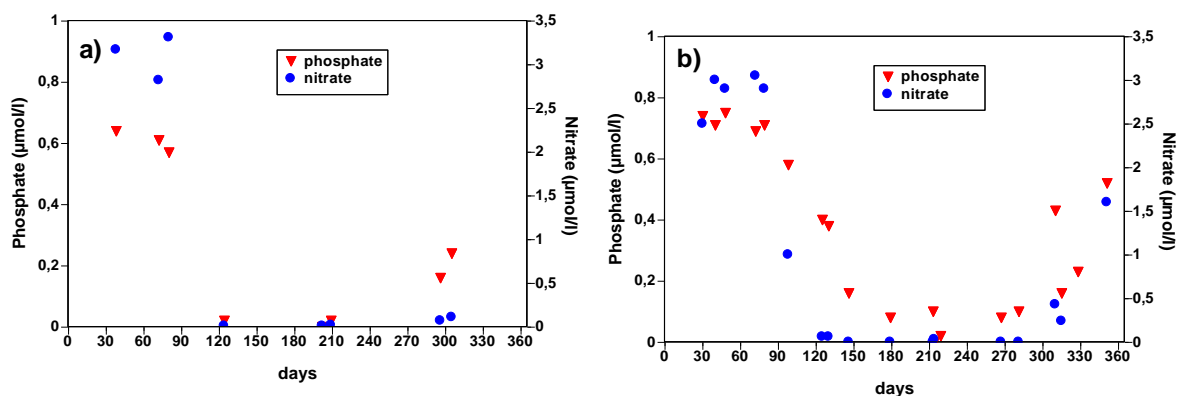
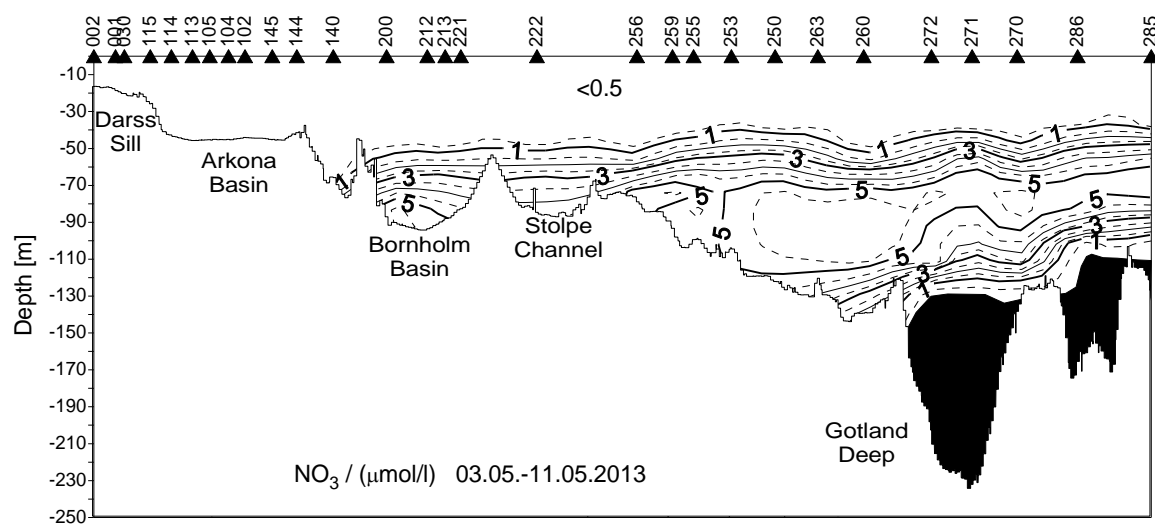
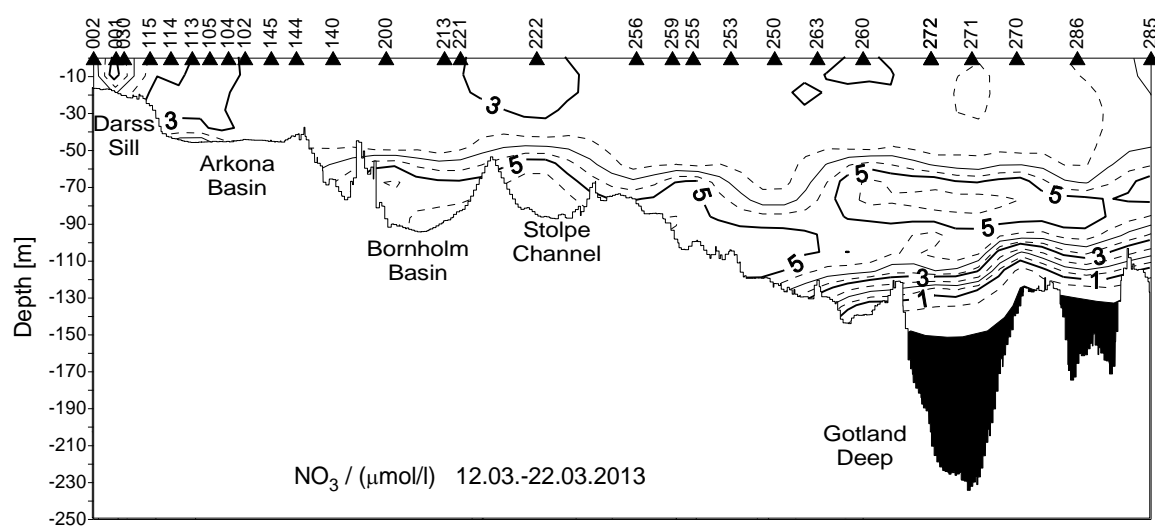
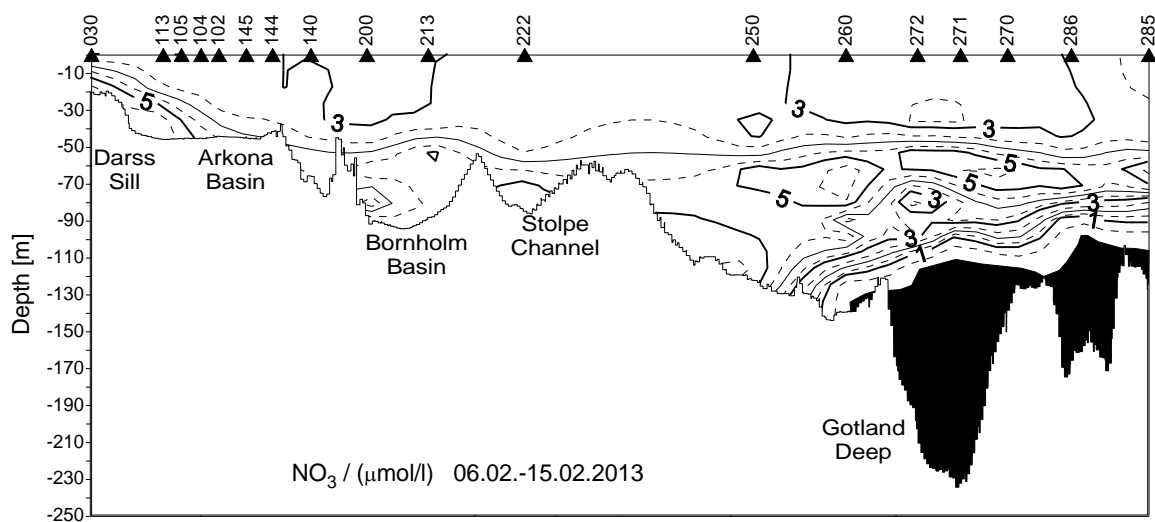


Abb. 34: Phosphat- und Nitratjahresgang 2013 im Oberflächenwasser (0-5 m)
a) Arkonasee (Station 113), b) Bornholmsee (Station 213) - IOW und SMHI-Daten

Fig. 34: Annual phosphate and nitrate cycle 2013 in the surface layer (0-5 m)
a) Arkona Sea (station 113), b) Bornholm Sea (station 213) - IOW and SMHI data

Der oben beschriebene Jahresgang für Nitrat und Phosphat kann auch aus den in Abb. 35 und 36 dargestellten Schnitten für die fünf durchgeführten Messfahrten entnommen werden. Die winterlichen Phosphat- und Nitratwerte sind in Tab. 9 zusammengefasst. Sie bewegen sich im Bereich der Vorjahre. Aus beiden Konzentrationsniveaus lässt sich ein N/P-Verhältnis ableiten.

Die in Richtung Beltsee gelegene Station 360 und die von der Lübecker Bucht beeinflusste Station 022 weisen vergleichsweise hohe N/P-Verhältnisse auf, wenngleich sie noch deutlich unter den Redfield-Verhältnis von 16:1 liegen (REDFIELD et al., 1963). Die Station 012 in der Mecklenburger Bucht stellt einen Übergang zu den Seegebieten östlich der Darßer Schwelle dar, wo die typischen niedrigen N/P-Verhältnisse beobachtet werden, die auch die Ursache für den oben beschriebenen Jahresgang ist.



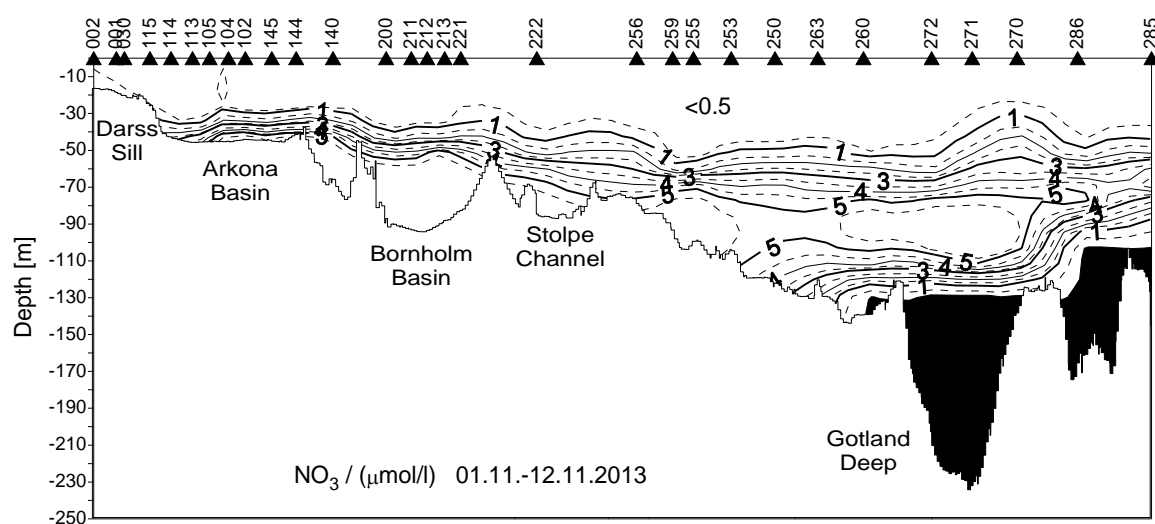
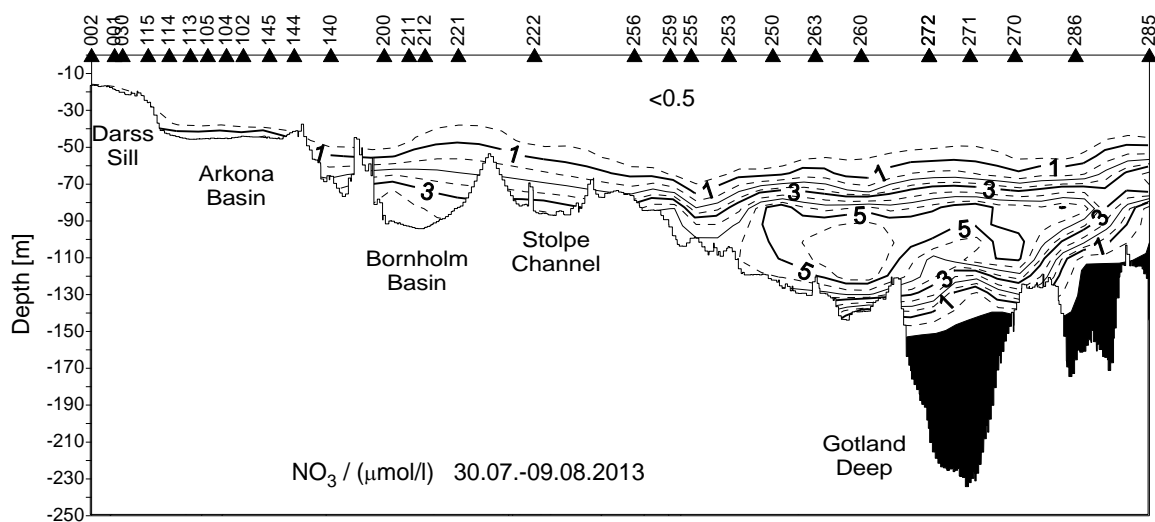
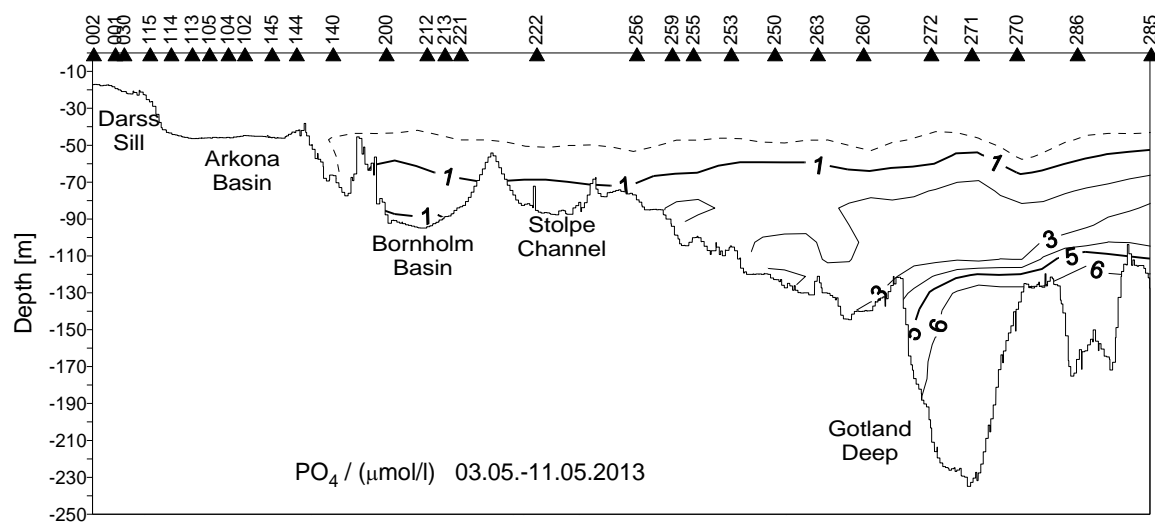
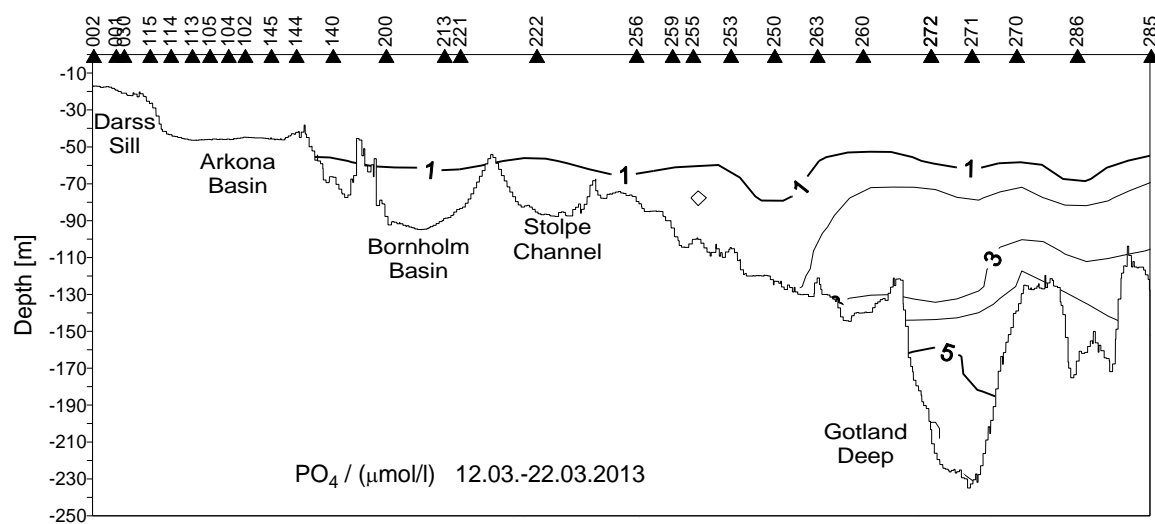
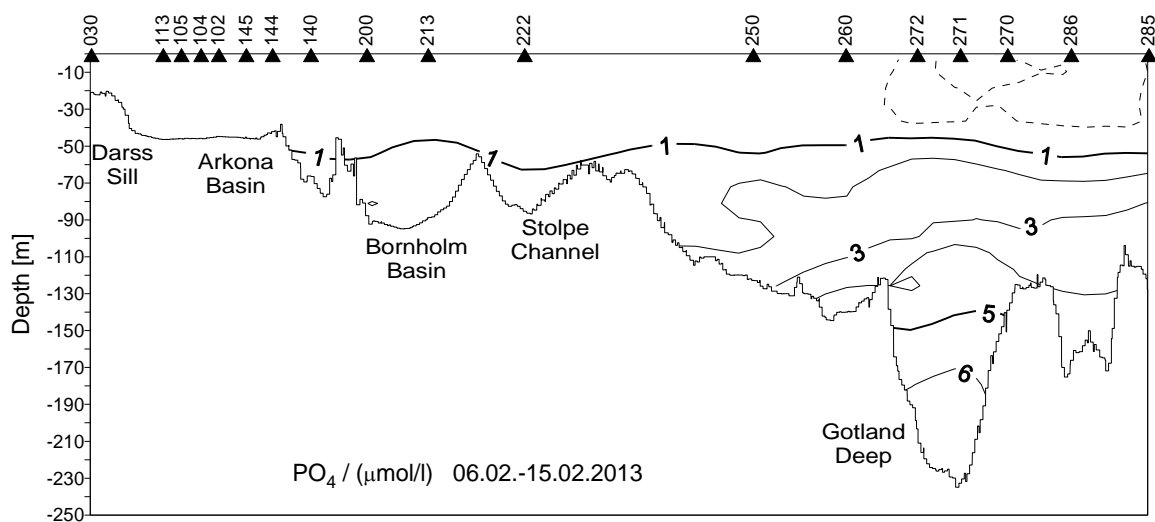


Abb. 35: Vertikale Verteilung des Nitratgehaltes 2013 zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 35: Vertical distribution of nitrate 2013 between Darss Sill and northern Gotland Basin



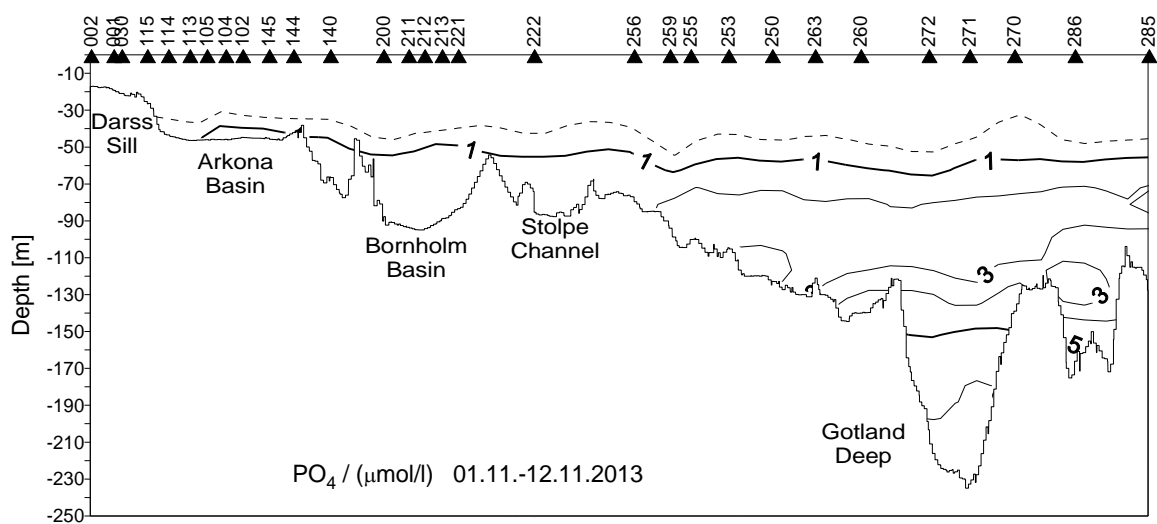
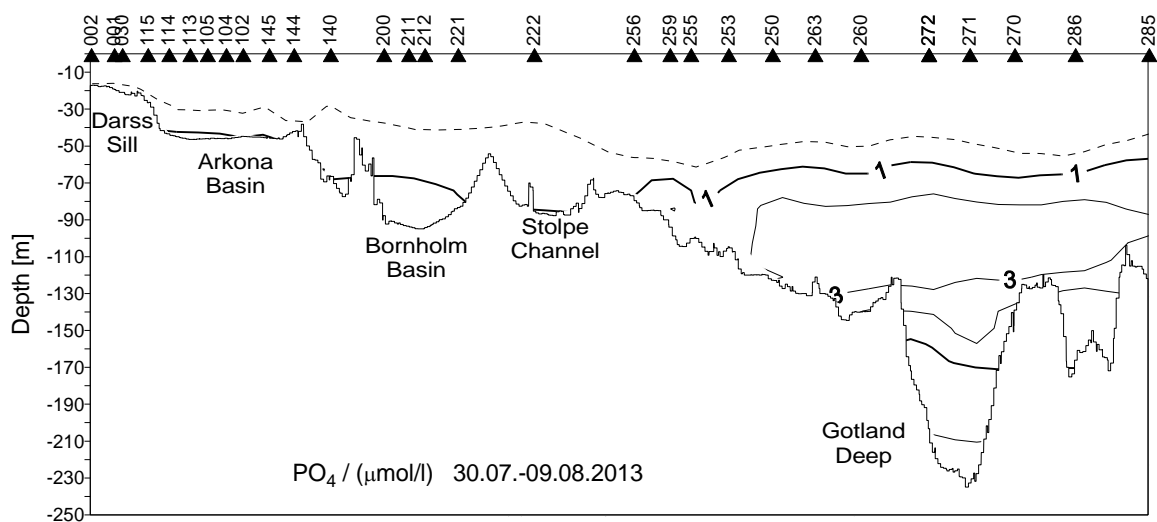


Abb. 36: Vertikale Verteilung des Phosphatgehaltes 2013 zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Fig. 36: Vertical distribution of phosphate 2013 between Darss Sill and northern Gotland Basin

Tab. 9: Gemittelte Nährstoffkonzentrationen in der winterlichen Oberflächenschicht (0-10 m) der westlichen und zentralen Ostsee (Minimalwerte hervorgehoben)

Table 9: 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	2009	2010	2011	2012	2013
360 (Fehmarnbelt)	Feb.	0,63 \pm 0,04	0,47 \pm 0,01	0,58 \pm 0,01	0,71 \pm 0,01	0,72 \pm 0,01
022 (Lübecker Bucht)	Feb.	0,70 \pm 0,00	0,61 \pm 0,01		0,71 \pm 0,01	0,85 \pm 0,01
012 (Meckl. Bucht) Bucht)	Feb.	0,67 \pm 0,02	0,62 \pm 0,02	0,55 \pm 0,00	0,73 \pm 0,02	0,85 \pm 0,01
113 (Arkonasee)	Feb.	0,58 \pm 0,00	0,56 \pm 0,02	0,51 \pm 0,01	0,73 \pm 0,00	0,63 \pm 0,01
213 (Bornholmtief)	Feb.	0,70 \pm 0,00	0,56 \pm 0,01	0,54 \pm 0,01	0,66 \pm 0,01	0,71 \pm 0,0
271 (Gotlandtief)	Feb.	0,59 \pm 0,01	0,62 \pm 0,0*	0,54 \pm 0,01	0,64 \pm 0,01	0,54 \pm 0,02
286 (Fårötief)	Feb.	0,64 \pm 0,02	0,62 \pm 0,0*		0,56 \pm 0,00	0,50 \pm 0,01
284 (Landsorttief)	Feb.	0,55 \pm 0,01	0,63 \pm 0,0*		0,63 \pm 0,01	0,56 \pm 0,02
245 (Karlsötief)	Feb.	0,67 \pm 0,01	0,65 \pm 0,0*		0,80 \pm 0,02	0,60 \pm 0,02

* SMHI data

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

Station	Monat	2009	2010	2011	2012	2013
360 (Fehmarnbelt)	Feb.	3,6 \pm 0,3	4,9 \pm 0,0	5,9 \pm 0,2	5,7 \pm 0,1	4,1 \pm 0,0
022 (Lübecker Bucht)	Feb.	3,8 \pm 0,0	6,4 \pm 0,2		6,2 \pm 0,2	6,7 \pm 0,1
012 (Meckl. Bucht Bucht)	Feb.	3,7 \pm 0,3	4,5 \pm 0,0	4,8 \pm 0,0	3,8 \pm 0,2	5,8 \pm 0,0
113 (Arkonasee)	Feb.	2,8 \pm 0,0	4,1 \pm 0,1	2,6 \pm 0,0	2,9 \pm 0,0	3,2 \pm 0,0
213 (Bornholmtief)	Feb.	3,1 \pm 0,0	3,6 \pm 0,0	3,7 \pm 0,0	2,6 \pm 0,0	3,0 \pm 0,0
271 (Gotlandtief)	Feb.	3,6 \pm 0,0	3,5 \pm 0,0	3,2 \pm 0,0	2,6 \pm 0,2	2,9 \pm 0,0
286 (Fårötief)	Feb.	3,8 \pm 0,0	3,9 \pm 0,0		3,3 \pm 0,0	3,0 \pm 0,0
284 (Landsortief)	Feb.	3,6 \pm 0,0			4,6 \pm 0,1	4,4 \pm 0,0
245 (Karlsötief)	Feb.	3,5 \pm 0,0	3,5 \pm 0,0		4,0 \pm 0,1	3,8 \pm 0,1

Generell auffällig ist die große Variabilität der Messwerte. So lässt auch eine Korrelationsanalyse der 10-jährigen Datenreihe 2004-2013 keine signifikanten Veränderungen erkennen. Das Bestimmtheitsmaß R^2 beträgt beispielsweise für die Station 012 in der Mecklenburger Bucht 0,09 (Phosphat), 0,01 (Nitrat); für die Station 113 in der Arkonasee 0,00 (Phosphat), 0,02 (Nitrat); für Station 213 in der Bornholmsee 0,09 (Phosphat), 0,17 (Nitrat) und für die Station 271 in der östlichen Gotlandsee 0,09 (Phosphat) und 0,02 (Nitrat).

Das bedeutet, dass die für die Küstengewässer beobachteten Rückgänge der Nährstoffkonzentrationen (NAUSCH et al., 2011b) noch nicht in der offenen See zu beobachten sind. HELCOM hat in verschiedenen wissenschaftlichen Projekten Zielwerte für die winterlichen Nährstoffkonzentrationen entwickelt (HELCOM, 2013c):

	DIN ($\mu\text{mol/l}$)	PO ₄ ($\mu\text{mol/l}$)
Kieler Bucht	5,5	0,59
Mecklenburger Bucht	4,2	0,49
Arkonasee	2,9	0,36
östliches Gotlandbecken	3,0	0,29
westliches Gotlandbecken	2,0	0,33

Ein Vergleich mit den Winterwerten in Tabelle 8 macht deutlich, dass diese Zielwerte nicht erreicht werden. Dies wird noch deutlicher, wenn man die Mittelwerte der Jahresreihe 2004 – 2013 mit diesen Zielwerten (targets) vergleicht (Abb. 37). Es muss jedoch angemerkt werden, dass für die Ermittlung der Zielwerte der Winterzeitraum Dezember-Februar herangezogen wurde. Wie aus Abb. 34 ersichtlich, ist im Dezember die Plateauphase noch nicht erreicht, d.h. das winterliche Nährstoffniveau hat sich noch nicht etabliert. Da HELCOM für die Bewertung auch den Zeitraum Dezember – Februar heranzieht, würde die Differenz nicht so drastisch ausfallen. Allerdings wird auch dann die Bewertung in jedem Fall „eutrophiert“ sein (HELCOM, 2013c). Damit wird deutlich, dass weitere Anstrengungen zur Nährstoffreduktion notwendig sind. Modellsimulationen (Gustafsson et al., in prep., HELCOM, 2014) deuten jedoch darauf hin, dass die winterlichen Nährstoffkonzentrationen zurückgehen werden, wenn die maximal möglichen Einträge (siehe oben) eingehalten werden.

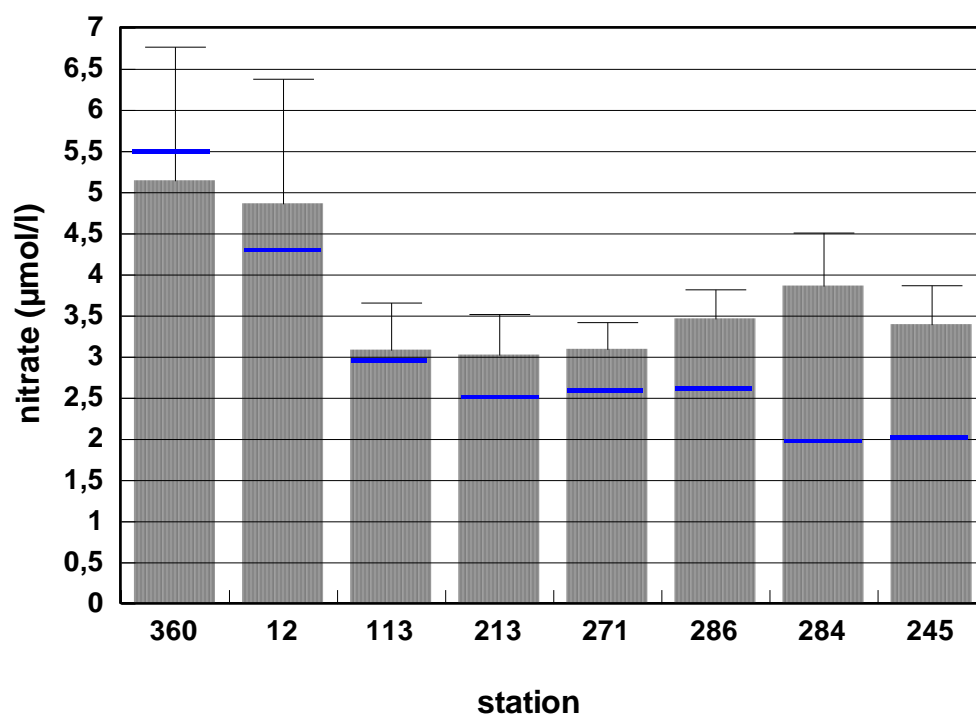
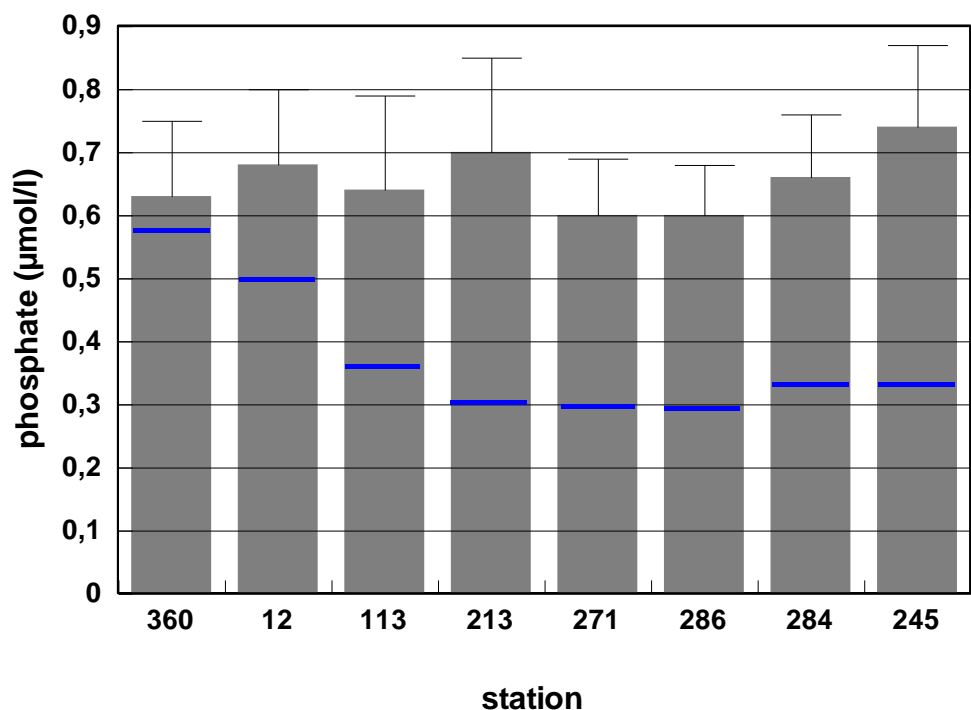


Abb. 37: Gemittelte winterliche Phosphat- und Nitratkonzentrationen (Säulen) in der winterlichen Oberflächenschicht (0-10 m; Februar) der Jahresreihe 2004-2013 im Vergleich zu den von HELCOM festgelegten Zielwerten (Linie)

Fig. 37: Averaged winter phosphate and nitrate concentrations (columns) in the surface layer (0-10 m, February) for the period 2004-2013 compared with HELCOM's target values (line)

Verallgemeinernde Aussagen zur Vertikalverteilung der Nährstoffe lassen sich für die flachen Seegebiete der westlichen Ostsee nur eingeschränkt treffen. Nährstoffgradienten werden im

Wesentlichen durch die variierenden Schichtungen von Salzgehalt und Temperatur bestimmt. Deshalb beschränken wir uns hier auf das zentrale Arkonabecken (Station 113) mit einer Wassertiefe von 47 m (Abb. 38). Im Februar ist die Wassersäule bis zu einer Tiefe von 20 m weitgehend durchmischt, so dass sich recht einheitliche Konzentrationen für Phosphat und Nitrat bis zu dieser Tiefe finden. Darunter steigen die Werte für Nitrat deutlich, für Phosphat in geringerem Maße an. Der lang anhaltende Winter führt zu einer weiteren Abkühlung des Wassers und im März ist die Wassersäule weitgehend durchmischt. Nur in Bodennähe finden sich erhöhte Konzentrationen. Die bereits mehrfach beschriebene späte und rasche Frühjahrsblüte des Phytoplanktons führt zu kompletten Nitratverbrauch ehe sich die Wassersäule thermisch stabilisieren kann. Unterhalb der sich dann bildenden thermischen Sprungschicht verbleiben jedoch messbare Phosphatkonzentrationen. Bis in den Spätsommer hinein ist das Oberflächenwasser völlig nährstoffverarmt. Unterhalb der Thermokline kommt es zu einer Phosphatanreicherung während dieses kalte Zwischenwasser nitratfrei ist. Lokale Auftriebsprozesse können dieses Zwischenwasser an die Oberfläche transportieren und dort das Wachstum von Blaualgen begünstigen. Fortschreitende Mineralisation führt im Herbst sukzessive zum Aufbau des winterlichen Nährstoffpools, wobei dies beim Phosphat rascher als beim Nitrat erfolgt.

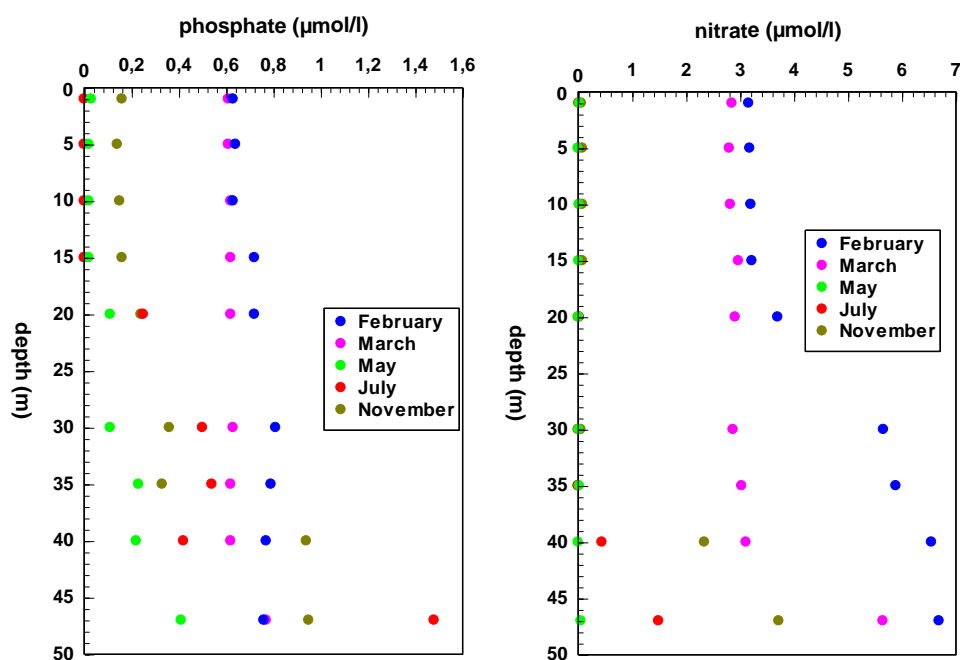


Abb. 38: Vertikalverteilung für Nitrat und Phosphat im Arkonabecken (Station 113) im Jahresverlauf 2013

Fig. 38: Vertical distribution for nitrate and phosphate in the Arkona Basin (station 113) during 2013

Tab. 10: Jahresmittelwerte und Standardabweichungen für Phosphat, Nitrat und Ammonium im Tiefenwasser der zentralen Ostsee: IOW sowie SMHI Daten (n = 7-20)

Table 10: Annual means and standard deviations for phosphate, nitrate and ammonium in the deep water of the central Baltic Sea: IOW and SMHI data (n = 7-20)

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

Station	Tiefe/m	2009	2010	2011	2012	2013
213 (Bornholmtief)	80	2,13 \pm 0,79	2,22 \pm 0,62	2,66 \pm 1,39	1,81 \pm 0,85	1,62 \pm 0,35
271 (Gotlandtief)	200	5,22 \pm 0,15	5,39 \pm 0,29	5,66 \pm 0,28	5,87 \pm 0,16	6,32 \pm 0,92
286 (Fårötief)	150	4,40 \pm 0,23	4,27 \pm 0,33	4,34 \pm 0,61	4,45 \pm 0,23	4,77 \pm 0,58
284 (Landsortief)	400	4,07 \pm 0,19	3,82 \pm 0,17	3,67 \pm 0,45	3,92 \pm 0,25	3,89 \pm 0,21
245 (Karlsötief)	100	4,05 \pm 0,26	4,37 \pm 0,44	4,22 \pm 0,33	3,47 \pm 0,47	3,91 \pm 0,53

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

Station	Tiefe/m	2009	2010	2011	2012	2013
213 (Bornholmtief)	80	6,4 \pm 2,1	7,5 \pm 0,1	4,6 \pm 2,8	7,9 \pm 3,1	6,4 \pm 1,9
271 (Gotlandtief)	200	0,0 \pm 0,0	0,0 \pm 0,0	0,0 \pm 0,0	0,0 \pm 0,0	0,0 \pm 0,0
286 (Fårötief)	150	0,0 \pm 0,0	0,0 \pm 0,0	0,0 \pm 0,0	0,0 \pm 0,0	0,0 \pm 0,0
284 (Landsortief)	400	0,0 \pm 0,0	0,0 \pm 0,0	0,0 \pm 0,0	0,0 \pm 0,0	0,0 \pm 0,0
245 (Karlsötief)	100	0,01 \pm 0,05	0,0 \pm 0,0	0,0 \pm 0,0	1,51 \pm 2,08	0,1 \pm 0,2

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

Station	Tiefe/m	2009	2010	2011	2012	2013
213 (Bornholmtief)	80	0,4 \pm 0,8	0,1 \pm 0,1	2,1 + 3,4	0,1 \pm 1,9	0,1 \pm 0,1
271 (Gotlandtief)	200	19,6 \pm 1,4	21,3 \pm 2,6	20,2 \pm 2,8	26,2 \pm 2,8	22,1 \pm 8,7
286 (Fårötief)	150	9,1 \pm 1,5	9,8 \pm 1,3	9,0 \pm 1,4	12,2 \pm 1,5	12,6 \pm 3,0
284 (Landsortief)	400	8,2 \pm 1,2	6,8 \pm 1,0	6,3 \pm 1,7	8,5 \pm 1,6	7,2 \pm 2,3
245 (Karlsötief)	100	6,8 \pm 2,0 \pm	8,4 \pm 2,3	9,7 \pm 3,5	4,4 \pm 2,9	6,5 \pm 3,1

In den Becken der zentralen Ostsee wird die Nährstoffverteilung primär durch das Auftreten oder Ausbleiben starker barotroper oder barokliner Einströme geprägt. Die Nährstoffverhältnisse im Tiefenwasser sind ebenfalls aus den Abb. 35 und 36 zu entnehmen. Hierbei ist anzumerken, dass unter anoxischen Bedingungen Ammonium das Endprodukt der Mineralisation der organischen Substanz darstellt und kein Nitrat gebildet werden kann (Tab. 9).

Wie in Kapitel 6.3 beschrieben, herrschten im Tiefenwasser des Bornholmbeckens während des gesamten Jahres 2013 oxische Verhältnisse. Das spiegelt sich in den Nährstoffverhältnissen wider (Tab. 10). Die Ammoniumkonzentrationen sind an der Nachweisgrenze, die mineralisierte organische Substanz wird zu Nitrat nitrifiziert. Die Phosphatkonzentrationen sind niedrig, da Phosphat in Anwesenheit von Sauerstoff in partikulärer Form ausgefällt wird.

Im östlichen und westlichen Gotlandbecken hält die Stagnationsperiode dagegen unvermindert an, da die Intensität der Einstromprozesse (Kapitel 2) nicht ausreichte die zentrale Ostsee zu erreichen. Demzufolge ist das Tiefenwasser frei von Nitrat, die Ammoniumkonzentrationen bewegen sich auf einem hohen Niveau, ebenso die Phosphatkonzentrationen. Im Gotland- und Fårötief wurden erneut Höchstwerte ermittelt (Tab. 10).

Zusammenfassung

Für den südlichen Ostseeraum ergab sich aus der Kältesumme an der Station Warnemünde von 109,5 K d ein mäßiger Winter 2012/13. Der Wert lag nur knapp über dem langjährigen Mittelwert von 104,5 K d und belegte den 26. Platz der kältesten Winter seit Beginn der Vergleichsdaten im Zeitraum ab 1948. Besonders bemerkenswert war der kalte März, dessen Kältesumme von 28,4 K d weit über dem langjährigen Mittel von 8,3 K d lag. Der kälteste Winter in der Beobachtungsreihe seit 1948 war der von 1962/63 mit 395,2 K d.

Mit einer Wärmesumme von 230,4 K d, registriert an der Station Warnemünde, reiht sich das Jahr 2013 auf Platz 10 im Zeitraum der letzten 66 Jahre ein. Der Wert liegt weit außerhalb des langjährigen Mittels von 148,8 K d und oberhalb der Standardabweichung, so dass 2013 als ein besonders warmes Jahr eingestuft werden kann. Im monatlichen Vergleich belegen die Monate Mai den 10. Platz, Juli den 9. Platz und August den 11. Platz.

Das Jahr 2013 startete mit einem vergleichsweise normalen Januar. Durch den lang anhaltenden Winter lagen die Oberflächentemperaturen in der westlichen und weiten Teilen der zentralen Ostsee von Januar bis Mai unter den langjährigen Mittelwerten. Die maximalen negativen Anomalien traten im März mit bis zu -1,5 K und im April mit -2,5 K auf. Dadurch war der März mit $0-1$ °C im Mittel ungewöhnlicher Weise der kälteste Monat des Jahres. Die Monatsmittel Juni bis November lagen in der westlichen Ostsee im Bereich der langjährigen Mittelwerte oder geringfügig darüber. Die Monate Juni und September waren in der zentralen und besonders in der nördlichen Ostsee durch positive Anomalien von bis zu 4 K gekennzeichnet. Der wärmste Monat war der August mit 16-20 °C. Insgesamt gehörte 2013 trotz des lang anhaltenden Winters zu den sechs wärmsten Jahren seit 1990 und lag mit über 8°C in der Jahresmitteltemperatur ca. 0,4 K über dem langjährigen Mittelwert (7,66 °C) der Periode 1990-2013. Dazu haben insbesondere die hohen Temperaturanomalien im Juni und September beigetragen.

Einstromereignisse mit geschätzten Volumina zwischen 100 und 300 km³ fanden in der Ostsee 2013 vier Mal statt. Von Ende Dezember 2012 bis Anfang Januar 2013 konnte ein Einstromvolumen von 157 km³ errechnet werden. Ein weiterer Einstrom mit einem geschätzten Volumen von 195 km³ schloss sich vom 28.01. bis 7.02. an. Beide Ereignisse können als barotrop bewertet werden. Eine eher barokline Phase erstreckt sich über einen Zeitraum von 32 Tagen vom 26.03. bis 27.04. mit rund 160 km³ Wasservolumen. Vom 22.10. bis 7.11. gelangen durch eine Aneinanderreihung kürzer Phasen von starkem Westwind etwa 200 km³ Wasser in die Ostsee. Anschließend durchquert vom 5.-7.12. der Orkan „Xaver“ als bedeutendstes Windereignis des Jahres den Ostseeraum, brachte aber aufgrund des hohen Füllstandes nur geringfügigen Zustrom. Auswirkungen dieser Ereignisse konnten bis ins Bornholmbecken registriert werden, sie erreichten aber nicht die zentrale Ostsee.

Der Jahresgang der Sauerstoffsättigung des Oberflächenwassers zeigte 2013 das typische Muster. Im Ergebnis der Dominanz sauerstoffzehrender Prozesse und geringer Produktion war das Oberflächenwasser im Februar in allen Seegebieten mit etwa 95 % leicht untersättigt. Auch

im März, wenn in der westlichen Ostsee die Frühjahrsblüte in der Regel in vollem Gange ist findet sich auf Grund des lang anhaltenden Winters eine Untersättigung (96,6 %). Im Arkonabecken liegt die Sättigung im März bei 99,0 %, im Bornholmbecken bei 98,4 % und im östlichen Gotlandbecken bei 97 %. Der Höhepunkt der Frühjahrsblüte findet sich 2013 in allen Seegebieten erst im Mai. Dies ist für die zentrale Ostsee typisch, nicht jedoch für die westliche Ostsee und das Arkonabecken. Der Sommer zeigt das gewohnte Bild mit Sättigungswerten um 105 %. 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.

Die Sauerstoffsituation des Tiefenwassers der tieferen Becken wird vorwiegend durch das Auftreten oder Ausbleiben barotroper und/oder barokliner Einstromprozesse geprägt. Das Bornholmbecken ist das am weitesten westlich gelegene der Tiefenbecken, so dass die Einströme häufig in der Lage sind das Tiefenwasser zu belüften. Seit 2006 ist das Tiefenwasser des Bornholmbeckens fast durchweg oxisch, was sich auch 2013 fortsetzte. Der Jahresmittelwert in 80 m Wassertiefe von 1,62 ml/l unterscheidet sich nur unwesentlich von dem des Vorjahres. Die höchste Sauerstoffkonzentration in dieser Tiefe wurde im März mit 4,07 ml/l gemessen, was als Ergebnis des barotropen Einstroms Ende Januar/Anfang Februar gewertet werden kann. Die Intensität der oben beschriebenen Einströme war jedoch, wie in den Vorjahren, nicht groß genug, die zentrale Ostsee zu erreichen. Die Stagnationsperiode hält unvermindert an. Der Salzgehalt und die Temperatur gingen im Gotlandtief, im Farötief und im Landsorttief weiter zurück. Im Jahresverlauf traten nur sehr geringe Schwankungen von Salz und Temperatur auf. Im Gotlandtief wird die höchste Schwefelwasserstoffkonzentration, ausgedrückt als negative Sauerstoffäquivalente (-5,30 ml/l), seit Beginn der Stagnationsperiode im Jahre 2005 erreicht. Der entsprechende Jahresmittelwert im Farötief und im Landsorttief ist nur geringfügig geringer als im Vorjahr.

Die Sauerstoffsituation des Tiefenwassers spiegelt sich auch in den Nährstoffkonzentrationen wider. Im durchweg belüfteten Bornholmbecken wurde der niedrigste Phosphatmittelwert der letzten Jahre ermittelt (1,62 $\mu\text{mol/l}$), die Ammoniumkonzentration war im Jahresmittel an der Nachweisgrenze während im Mittel 6,4 $\mu\text{mol/l}$ Nitrat gemessen wurden. Dagegen ist das Tiefenwasser in den Becken der zentralen Ostsee mit Ausnahme des Karlsötiefs seit 2005 Jahren frei von Nitrat. Für Phosphat wurden im Gotlandtief (6,32 $\mu\text{mol/l}$) und im Farötief (4,77 $\mu\text{mol/l}$) neue Höchstwerte für die Stagnationsperiode erreicht. Auch die Ammoniumkonzentrationen bewegen sich durchweg auf hohem Niveau.

In der Oberflächenschicht weisen Phosphat und Nitrat den für die gemäßigten Breiten typischen Jahresgang auf. Auf Grund des lang anhaltenden Winters 2012/2013 hielten sich im Jahr 2013 in allen Seegebieten bis Ende März winterliche Konzentrationen, die aber durch die dann einsetzende Frühjahrsblüte extrem rasch verbraucht waren. Dies ist für die westliche Ostsee und das Arkonabecken ungewöhnlich. In den meisten Jahren ist das Nitratreservoir rascher verbraucht und es verbleiben zunächst noch messbare Phosphatkonzentrationen, wie es in der Bornholmsee und der Gotlandsee der Fall ist. In diesen Fällen bricht die

Frühjahrsblüte durch Stickstofflimitation zusammen. Die späte und schnell einsetzende Frühjahrsblüte führte im Jahr 2013 in der Arkonasee zum vollständigen Verbrauch beider Nährstoffe. Von Anfang Mai bis in den Spätsommer hinein liegen die Phosphat- bzw. Nitratwerte an oder unter der Nachweisgrenze. Im Herbst kommt es infolge der verstärkten Mineralisation der organischen Substanz zu einem langsamen Anstieg der Nährstoffkonzentrationen bis dann spätestens im Februar des Folgejahres wieder die Winterkonzentrationen erreicht werden. Die Phosphatanreicherung im Herbst geht rascher voran als die des Nitrats. Dies ist auch eine Folge des niedrigen N/P-Verhältnisses der anorganischen Nährstoffe.

Die winterlichen Nährstoffkonzentrationen werden für Trendanalysen verwendet. Hierbei ist die große Variabilität der Messwerte auffällig. So lässt eine Korrelationsanalyse der 10-jährigen Datenreihe 2004-2013 für Phosphat und Nitrat in allen untersuchten Seegebieten keine signifikanten Veränderungen erkennen. Das bedeutet, dass die für die Küstengewässer beobachteten Rückgänge der Nährstoffkonzentrationen noch nicht in der offenen See zu beobachten sind.

Ein Vergleich der gefundenen Winterkonzentrationen für Phosphat und Nitrat mit den durch die HELCOM ermittelten Zielkonzentrationen (target values) zeigt, dass diese nicht erreicht werden. Damit wird deutlich, dass weitere Anstrengungen zur Nährstoffreduktion notwendig sind.

Summary

For the southern Baltic, the “cold sum” of the air temperature in Warnemünde of 109.5 K d 2012/13 ranks on place 26 of the coldest winters since the beginning of the record in 1948 and was slightly above the long-term mean 104.5 K d. Especially remarkable was the cold March with a “cold sum” of 28.4 K d laying well above the long-term mean of 8.3 K d. The coldest winter in the observation period since 1948 was in 1962/63 with 395.2 K d.

The summer “heat sum” of 230.4 K d was well above the long-term mean of 148.8 K d and above the standard deviation and ranks on place 10 of the warmest summers of the last 66 years. On monthly comparison, May ranks on place 10, July on place 9 and August on place 11.

The year 2013 started with a comparatively normal January. Due to the long lasting winter, sea surface temperature in the western and huge parts of the central Baltic Sea was from January until May below the long-term average. Maximal negative anomalies appeared in March with up to -1.5 K and in April with -2.5 K. Thus, March was with 0-1 °C in mean unusually the coldest month of the year. The monthly mean from June to November was in the western Baltic in the range of the long-term average or slightly above, but were characterized in the central and especially in the northern Baltic Sea by positive anomalies up to 4 K from June to September. The warmest month was August with 16-20 °C. All in all, 2013 belonged despite the long lasting winter to the sixth warmest years since 1990 and was laying with an annual mean temperature of more than 8 °C around 0.4 K over the average of 7.66 °C for the period 1990-2013. Especially June and September contributed to these high temperature anomalies.

In 2013, inflow events with estimated volumes between 100 and 300 km³ took place four times. From the end of December 2012 until January 2013 and inflow volume of 157 km³ was calculated. A further inflow with an estimated volume of 195 km³ followed from January 28th to February 7th, both of barotropic type. A more baroclinic phase lasted over 32 days between March 26th and April 27th and transported 160 km³ water into the Baltic. From 27th October 27th to November 7th, several phases of westerly winds imported around 200 km³. Afterwards, the hurricane “Xaver” crossed the Baltic Sea being the most prominent wind event of the year but brought only marginal water inflow due to the high water level. Effects of all these inflows could be registered in the Bornholm Basin, but did not reach the central Baltic Sea where the stagnation period continued undiminishedly.

In 2013, the annual cycle of the oxygen saturation in the surface layer showed the typical behavior. As a result of the dominance of oxygen consuming processes and low productivity, the winter surface layer was with around 95 % slightly sub-saturated in all investigated areas. Also in March, when the phytoplankton spring bloom is normally in full swing in the western Baltic, sub-saturation is still observed (96.6 %) due to the long winter. Saturation in March was 99.0 % in the Arkona Basin, 98.4 % in the Bornholm Basin and 97 % in the Gotland Basin. The height of the spring bloom was found 2013 in all areas in May. This is typical for the central Baltic Sea, but not for the western Baltic and the Arkona Basin. Summer showed the typical situation with saturation of around 105 %. In autumn, intensified decomposition processes resulted in sub-saturation again. In general, it has to be ascertained that the annual fluctuation range of the saturations is, as in the years before, relatively small indicating a healthy oxygen balance of the surface water.

The oxygen situation in the deep waters of the Baltic Sea is mainly coined by the occurrence or absence of barotropic and/or baroclinic inflow processes. The Bornholm Basin is the most westerly of the deep basins, so that inflows frequently are able to ventilate the deep water. Since 2006, the deep water of the Bornholm Basin contains oxygen what was continued also in 2013. The annual mean in 80 m water depth of 1.62 ml/l distinguishes only negligibly from the year before. Highest oxygen concentration was observed in March with 4.07 ml/l what could be related to the barotropic inflow end of January/beginning of February. The intensity of the above described inflow events was, however as in the years before, not strong enough to reach the central Baltic Sea. Salinity and temperature in the Gotland Farö and Landsort Deeps decreased further, with only small variations throughout the year. In the Gotland Deep highest hydrogen sulphide concentration, expressed as negative oxygen equivalents (-5.30 ml/l), was measured during the present stagnation period lasting since 2005. The corresponding annual means in the Farö and Landsort Deeps are only marginally lower than in the year before.

The oxygen situation in the deep water is also mirrored in the nutrient concentrations. In the permanently ventilated Bornholm Basin, lowest phosphate concentrations of the last years were observed (1.62 µmol/l), ammonium values were near to the detection limit and nitrate concentrations were averaged to 6.4 µmol/l. In contrast, the deep waters of the central Baltic Sea were with exception of the Karlsö Deep free of nitrate since 2005. For phosphate, on average 6.32 µmol/l were measured in the Gotland Deep and 4.77 µmol/l in the Farö Deep,

being the highest values in the present stagnation period so far. Also ammonium concentrations remain on a high level.

In the surface layer, phosphate and nitrate show the typical behavior found in temperate latitudes. Due to the long-lasting winter 2012/13, winter nutrient concentrations were preserved in all investigated areas until the end of March. The onset of the spring bloom consumed them very rapidly. This behavior is unusual for the western Baltic and the Arkona Basin. In most years, nitrate is quicker consumed and measurable phosphate concentrations remain as it is the case in the Bornholm and Gotland Sea. In these cases, the spring bloom is terminated by nitrogen limitation. The late and rapid bloom resulted in 2013 in a complete consumption of both, nitrate and phosphate in the Arkona Sea. From Beginning of May until late summer phosphate and nitrate concentrations were near to the detection limit. In autumn, mineralization of organic matter causes an increase in nutrient concentrations reaching the winter level in February of the following year latest. Phosphate enrichment is more rapid than nitrate enrichment which is also a result of the low N/P ratio of inorganic nutrients.

Winter nutrient concentrations are used for trend analysis. The high variability of measured values is obvious. Thus, a correlation analysis for the 10-years period 2004-2013 for phosphate and nitrate did not show significant changes in all investigated areas. That means, that the observed nutrient decrease in coastal areas is not yet reflected in the open sea. A comparison of the observed winter concentrations for phosphate and nitrate with target values defined by HELCOM show that these are not reached. Further reduction measures are necessary.

Danksagung

Die Autoren danken den am Ostseeüberwachungsprogramm beteiligten Mitarbeitern des Leibniz- Instituts für Ostseeforschung Warnemünde für die Durchführung der Messungen sowie Kapitänen und Besatzungen der Forschungsschiffe „Alkor“, und „Elisabeth Mann Borgese“ für die Unterstützung und den Einsatz bei den Messfahrten des Jahres 2013. Für die Unterstützung bei der Beschreibung des Eiswinters, insbesondere durch Übermittlung einer Bedeckungskarte, sind wir Frau Natalija Schmelzer vom Eisdienst des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Hamburg und Rostock, dankbar. Wir danken Frau Kristin Junge vom Deutschen Wetterdienst (DWD), Offenbach, für die Bereitstellung der Winddaten von Arkona und Frau Gisela Tschersich vom BSH für die Bereitstellung der NOAA-Wettersatellitendaten. Die Autoren bedanken sich bei den Herren BARRY BROMAN und THOMAS HAMMARKLINT, Schwedisches Meteorologisches und Hydrologisches Institut (SMHI), Norrköpping, für die Überlassung der Pegeldata. Herr JAN SZARON, Ozeanographisches Labor des SMHI in Göteborg, stellte uns hydrographisch-chemische Beobachtungen ausgewählter Ostseestationen aus dem Schwedischen Ozean Archiv (SHARK) zur Verfügung, die im Rahmen des nationalen schwedischen Umweltüberwachungsprogrammes gewonnen wurden. Frau ELZBIETA LYSIK-PASTUSZAK von der Maritimen Abteilung des Instituts für Meteorologie und Wasserwirtschaft in Gdynia (IMGW) stellte uns freundlicherweise Beobachtungsdaten für das „Danziger Tief“ zur Verfügung. Wir danken Barbara Bogdanska, IMGW Warschau, für die freundliche Überlassung von Daten der Sonneneinstrahlung in Gdynia. Das Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (LLUR) hat uns freundlicherweise den Bericht zum „Sauerstoffmangel im bodennahen Wasser der westlichen Ostsee“ zur Verfügung gestellt.

Literaturverzeichnis

- ARNEBORG, L., FIEKAS, V., UMLAUF, L. and BURCHARD, H. (2007): Gravity current dynamics and entrainment. A process study based on observations in the Arkona Basin, *J. Phys. Oceanogr.*, **37**, 2094-2113.
- BEZOLD, W.V. (1883): Die Kälterückfälle im Mai. – Abhandlungen der königlich Bayerischen Akademie der Wissenschaften. Bd. **14**, Nr. 6, 71-108.
- V.BODUNGEN, B., GRAEVE, M., KUBE, J., LASS, H.U., MEYER-HARMS, B., MUMM, N., NAGEL, K., POLLEHNE, F., POWILLEIT, M., RECKERMANN, M., SATTLER, C., SIEGEL, H. and WODARG, D. (1995): Stoff-Flüsse am Grenzfluss – Transport- und Umsatzprozesse im Übergangsbereich zwischen Oderästuar und Pommerscher Bucht (TRUMP). – *Geowiss.* **13**, 479-485.
- BSH (2009): Flächenbezogene Eisvolumensumme.
<http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Beobachtungen/Eis/Kuesten.jsp>
- BSH, IOW (2013): unveröffentlichte Daten der MARNET-Station Arkona-Becken.
- 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 (2013): WitterungsReportExpress, Jahrgang 15, Nr. 1-13, Deutscher Wetterdienst.
- DWD (2014): Windmessungen der Station Arkona in Stundenmittelwerten des Jahres 2013 – unveröffentlichte Daten.
- FEISTEL, R., NAUSCH, G. and WASMUND, N. (Eds.), *State and Evolution of the Baltic Sea 1952-2005.* – John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- FU-Berlin (2013a): Werden auch Sie Wetterpate!
<http://www.met.fu-berlin.de/wetterpate/>
- FU-Berlin (2013b): Wetterkarte vom 06.12.2013 basierend auf Daten vom Deutschen Wetterdienst. <http://www.met.fu-berlin.de/de/wetter/maps>
- EUTROSYM (1976): UNEP-Symposium über Eutrophierung und Sanierung von Oberflächengewässern. – Karl-Marx-Stadt, 20. – 25.09.1976, Bd. 1, Teil 2.2.
- GRASSHOFF, K., ERHARDT, M. and KREMLING, K. (1983): *Methods of seawater analysis.* – 2nd Ed., Verlag Chemie, Weinheim.
- GUSTAFSSON, B.G., MÖRTH, C.-M. (eds.) MÜLLER-KARULIS, B., GUSTAFSSON, E., HONG, D., HUMBORG, C., LYON, S., NEKORO, M., RODRIGUEZ-MEDINA, M. SACHUK, O., SMEDBERG, E., SOKOLOV, A., SWANEY, D. TOMCZAK, M. and WULFF, F. (in prep.): Revision of the maximum allowable inputs and country Allocation Scheme of the Baltic Sea Action Plan. – Baltic Nest Institute, Stockholm University, 1-219.
- 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 (2007): *Baltic Sea Action Plan.* – http://www.helcomfi/BSAP/en_GB/intro/
- HELCOM (2013a): HELCOM Copenhagen Ministerial Declaration: Taking further action to implement the Baltic Sea Action Plan – Reaching good ecological status for a healthy Baltic Sea. Adopted 3 October 2013.

- HELCOM (2013b): Review of the Fifth Baltic Sea pollution load compilation. – Balt. Sea Environ. Proc. **141**, 1-49.
- HELCOM (2013c): Approaches and methods for eutrophication target setting in the Baltic Sea region. – Balt. Sea Environ. Proc. **133**, 1-134.
- HELCOM (2014): Eutrophication status of the Baltic Sea 2007-2011 – A concise assessment. Balt. Sea Environ. Proc. **143**, 1-41.
- ICES (2011): Report of the Advisory Committee of Fishery Management, Book 8, pp. 15ff.
- IMGW (2014): Sonnenstrahlung in J/m² an der Station Gdynia des Jahres 2013 – unveröffentlichte Daten.
- KOSŁOWSKI, G. (1989): Die flächenbezogene Eisvolumensumme, eine neue Maßzahl für die Bewertung des Eiswinters an der Ostseeküste Schleswig-Holsteins und ihr Zusammenhang mit dem Charakter des meteorologischen Winters. – Dt. hydrogr. Z. **42**, 61-80.
<http://www.baltic.vtt.fi/pdfs/dhz422koslowski.pdf>
- KRÜGER, S., ROEDER, W., WLOST, K.-P., KOCH, M., KÄMMERER, H. and KNUTZ, T., (1998): Autonomous instrumentation carrier (APIC) with acoustic transmission for shallow water profiling. – Oceanology International 98: The Global Ocean Conf. Proc. **2**, 149-158.
- KRÜGER, S. (2000a): Basic shipboard instrumentation and fixed autonomic stations for monitoring in the Baltic Sea. – In: EL-HAWARY, F. (Ed.): The Ocean Engineering Handbook, CRC Press, Boca Raton, USA, 52-61.
- KRÜGER, S. (2000b): Activities of the Institut für Ostseeforschung (IOW), Germany. – Proc. Int. Workshop on the “Coordinated Adriatic Observing System” CAOS, 21-22 October 1998, Trieste, Italy, 53-60.
- LASS, H.U., MOHRHOLZ, V. and SEIFERT, T. (2001): On the dynamics of the Pomeranian Bight. – Cont. Shelf. Res. **21**, 1237-1261.
- LASS, H.U. and MATTHÄUS, W. (2008): General Oceanography of the Baltic Sea, in: Feistel, R., Nausch, G., and Wasmund, N. (Eds.), State and Evolution of the Baltic Sea 1952 – 2005. – John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, p. 5-43.
- MATTHÄUS, W. (1978): Zur mittleren jahreszeitlichen Veränderlichkeit im Sauerstoffgehalt der offenen Ostsee. – Beitr. Meereskd., Berlin **41**, 61-94.
- MOHRHOLZ, V. (1998): Transport- und Vermischungsprozesse in der Pommerschen Bucht. – Meereswiss. Ber. **33**, 1-106.
- NAUSCH, G. and NEHRING, D. (1996): Baltic Proper, Hydrochemistry. In: Third Periodic Assessment of the State of the Marine Environment of the Baltic Sea. – Balt. Sea Environ. Proc. **64B**, 80-85.
- NAUSCH, G., FEISTEL, R., LASS, H.-U., NAGEL, K. and SIEGEL, H. (2002): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2001. – Meereswiss. Ber. **49**, 3-77.
- NAUSCH, G., FEISTEL, R., UMLAUF, L., LASS, H.-U., NAGEL, K. and SIEGEL, H. (2003): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2002. – Meereswissenschaftliche Berichte Warnemünde **55**, 1-71.
- NAUSCH, G., FEISTEL, R., UMLAUF, L., LASS, H.-U., NAGEL, K. and SIEGEL, H. (2004): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2003. – Meereswissenschaftliche Berichte Warnemünde **62**, 1-78.

- NAUSCH, G., FEISTEL, R., UMLAUF, L., MOHRHOLZ, V., NAGEL, K. and SIEGEL, H. (2008a): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2007. – *Meereswissenschaftliche Berichte Warnemünde* **72**, 1-100.
- NAUSCH, G., NEHRING, D. and K. NAGEL (2008b): Nutrient concentrations, trends and their relation to eutrophication. In: FEISTEL, R., NAUSCH, G., WASMUND, N. (Eds.) (2008b): State and evolution of the Baltic Sea, 1952-2005. – John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, 337-366.
- NAUSCH, G., FEISTEL, R., UMLAUF, L., MOHRHOLZ, V. and SIEGEL, H. (2011a): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2010. – *Meereswissenschaftliche Berichte Warnemünde* **84**, 1-99.
- NAUSCH, G., BACHOR, A., PETENATI, T., VOSS, J. und V. WEBER, M. (2011b): Nährstoffe in den deutschen Küstengewässern der Ostsee und angrenzenden Seegebieten. – *Meeresumwelt Aktuell Nord- und Ostsee 2011/1*.
- NAUSCH, G., FEISTEL, R., UMLAUF, L., MOHRHOLZ, V., NAGEL, K. and SIEGEL, H. (2012): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2011. – *Meereswissenschaftliche Berichte Warnemünde* **86**, 1-121.
- NAUSCH, G., FEISTEL, R., UMLAUF, L., MOHRHOLZ, V. and SIEGEL, H. (2013): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2012. – *Meereswissenschaftliche Berichte Warnemünde* **91**, 1-109.
- NEHRING, D. and MATTHÄUS, W. (1991): Current trends in hydrographic and chemical parameters and eutrophication in the Baltic Sea. – *Int. Revues ges. Hydrobiol.* **76**, 297-316.
- NEHRING, D., MATTHÄUS, W. and LASS, H.U. (1993): Die hydrographisch-chemischen Bedingungen in der westlichen und zentralen Ostsee im Jahre 1992. – *Dt. Hydrogr. Z.* **45**, 281-331.
- NEHRING, D., MATTHÄUS, W., LASS, H.U., NAUSCH, G. and NAGEL, K. (1995): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1994. – *Meereswiss. Ber.* **9**, 1-71.
- REDFIELD, A.C., KETCHUM, B.H. and RICHARDS, F.A. (1963): The influence of organisms on the composition of sea water. – In: Hill, M.N. (Ed.): *The Sea*, Vol. II, Wiley, New York, 26-77.
- SCHMELZER, N., HOLFORT, J. und DÜSKAU, T. (2013): Der Eiswinter 2012/13 an den deutschen Nord- und Ostseeküsten sowie eine kurze Beschreibung der Eisverhältnisse im gesamten Ostseebereich.
http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Beobachtungen/Eis/Eiswinter_2012_13.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., GERTH, M. and TSCHERSICH, G. (2008): Satellite-derived Sea Surface Temperature for the period 1990-2005. In: *State and Evolution of the Baltic Sea, 1952 – 2005*, Ed. By R. FEISTEL, G. NAUSCH, N. WASMUND, Wiley, 241-265.
- SIEGEL, H., and GERTH, M. (2010): Satellite Based Process Studies in the Baltic Sea. Proceedings Conference “Ocean from Space” Venice 26-30 April 2010,
- SIEGEL, H., and GERTH, M. (2012): Development of Sea Surface Temperature in the Baltic Sea in 2011. HELCOM Indicator Report,
http://www.helcom.fi/environment2/ifs/ifs2008/en_GB/sst/
- SMHI (2014a): Pegelmessungen der Station Landsort Norra in Stundenmittelwerten des Jahres 2013; Bezugsniveau RH2000. – <http://opendata-download-ocobs.smhi.se/explore/>
- SMHI (2014b): Accumulated inflow through the Öresund. -
http://www.smhi.se/hfa_coord/BOOS/Oresund.html
- 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.

NAUSCH, G, NAUMANN, M., UMLAUF,
L., MOHRHOLZ, V., SIEGEL, H.:
Hydrographic-hydrochemical
assessment of the Baltic Sea 2013

CONTENT

1. Introduction
 2. Meteorological conditions
 3. Observations at the measuring platform "Darss Sill"
 4. Observations at the buoy "Arkona basin"
 5. Observations at the buoy "Oder Bank"
 6. Hydrographic-hydrochemical conditions
- Summary
Acknowledgments
References

