

# Hydrographisch-hydrochemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2014

Günther Nausch<sup>1</sup>, Michael Naumann<sup>1</sup>, Lars Umlauf<sup>1</sup>, Volker Mohrholz<sup>1</sup>,  
Herbert Siegel<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Leibniz- Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW)  
Seestraße 15, D-18119 Rostock-Warnemünde

Dies ist eine deutsche Fassung des englischen Artikels:

Günther Nausch, Michael Naumann, Lars Umlauf, Volker Mohrholz,  
Herbert Siegel: Hydrographic-hydrochemical assessment of the Baltic Sea  
2014. Meereswiss. Ber., Warnemünde, 96 (2015) DOI: 10.12754/msr-2015-  
0096

## Inhaltsverzeichnis

	<b>Seite</b>
1. Einleitung	3
2. Meteorologische Bedingungen	6
2.1 Der Eiswinter 2013/2014	7
2.2 Jahresverlauf der Witterung	9
2.3 Jahreszusammenfassung einiger bedeutender Parameter	15
3. Wasseraustausch durch die Ostseezugänge/ Beobachtungen an der Messplattform „Darßer Schwelle“	24
3.1 Statistische Analyse	24
3.2 Erwärmungsphase mit Einströmen im Februar und März	28
3.3 Abkühlungsphase mit dem „Major Baltic Inflow“ im Dezember	31
4. Beobachtungen an der Bojenstation „Arkonabecken“	33
5. Beobachtungen an der Bojenstation „Oder- Bank“	38
6. Hydrographisch- hydrochemische Bedingungen	42
6.1. Wassertemperatur	42
6.1.1 Die Wasseroberflächentemperatur der Ostsee im Jahr 2014	42
6.1.2 Vertikalverteilung der Wassertemperatur	50
6.2 Salzgehalt	58
6.3 Sauerstoffverteilung	64
6.4 Anorganische Nährstoffe	73
Zusammenfassung	86
Literaturverzeichnis	88
Danksagung	92

## 1. Einleitung

Die Einschätzung des hydrographisch-hydrochemischen Zustandes der Ostsee im Jahr 2014 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 Bornholmstrog und umfasst damit im Wesentlichen die Ausschließliche Wirtschaftszone Deutschlands (AWZ). Zur Absicherung und Fortführung der Langzeitmessungen wird dieses Messprogramm ab 2008 durch einen IOW-finanzierten Anteil ergänzt, um auch die Situation in den Becken der zentralen Ostsee, die ausschlaggebend für den Zustand der gesamten Ostsee sind, beschreiben zu können. Zu den Aufgaben des Gesamtprogramms gehört die Beschreibung des Wasseraustausches zwischen Ost- und Nordsee, der hydrographisch-hydrochemischen Bedingungen im Untersuchungsgebiet und deren zeitliche und räumliche Veränderungen sowie die Identifikation und Untersuchung von Langzeittrends.

Im Jahre 2014 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, März), sowie „Elisabeth Mann Borgese“ (Mai, Juli, 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. 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 2014/2015 außer Betrieb genommen. Sie war 2014 von Mitte Mai bis Mitte Dezember im Einsatz. 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 <sub>2</sub>
AB:	8 Horizonte T + S	+ 2 Horizonte O <sub>2</sub>
OB:	2 Horizonte T + S	+ 2 Horizonte O <sub>2</sub>

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 2014 wurde im Vergleich zu den Mittelwerten des Untersuchungszeitraumes 1990-2014 und zu extremen Jahren vorgenommen.

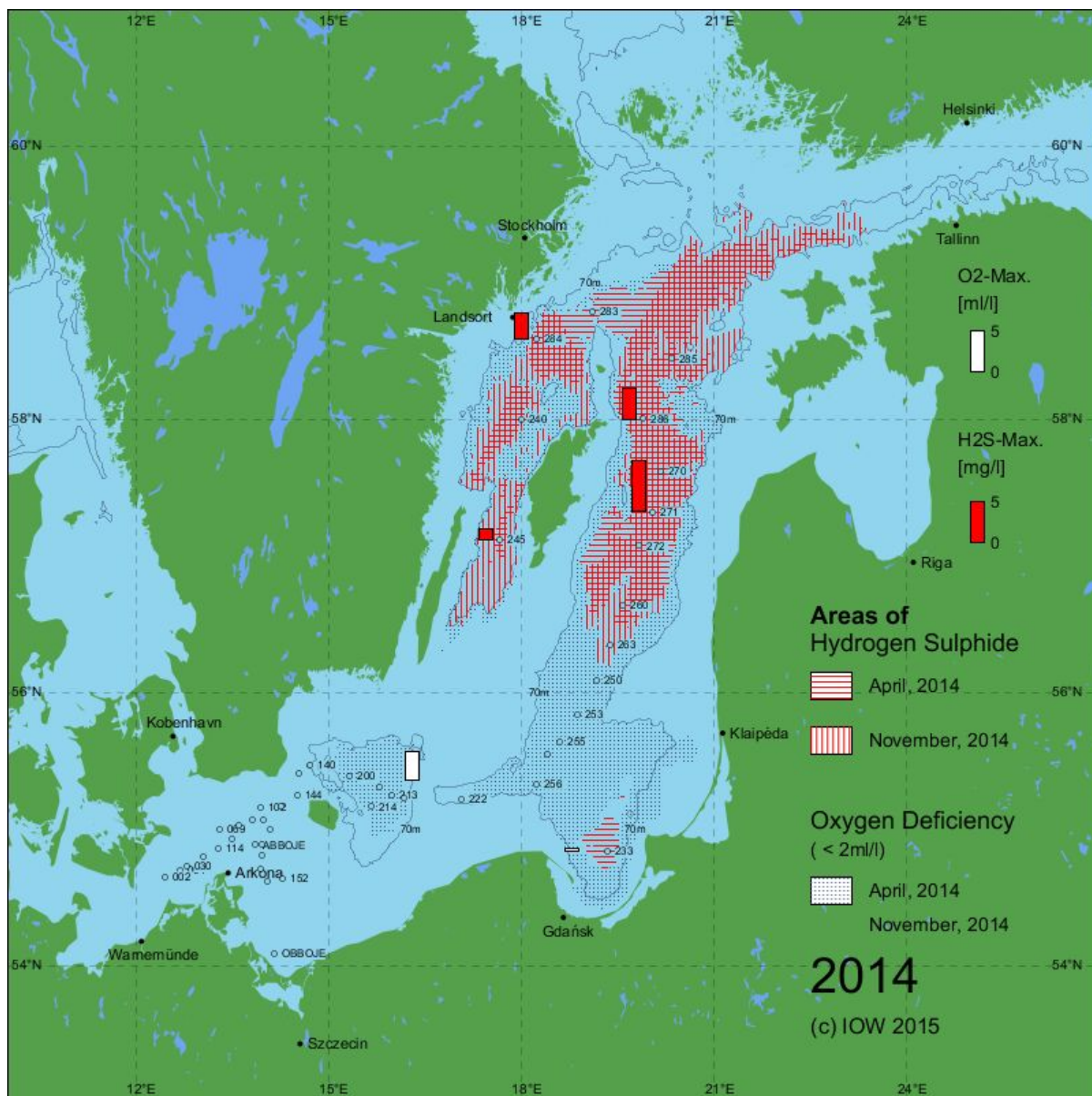


Abb. 1: Stationskarte (■ MARNET-Stationen) und Gebiete mit Sauerstoffmangel und Schwefelwasserstoff in der grundnahen Wasserschicht der Ostsee sowie maximale Sauerstoff- und Schwefelwasserstoffkonzentrationen an ausgewählten Stationen (Säulen) im Jahre 2014; die Abb. enthält zusätzlich die 70 m - Tiefenlinie

## 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 2014 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 Auswertung des Deutschen Wetterdienstes (DWD, 2014) ist das Jahr 2014 für das gesamtdeutsche Staatsgebiet und auch weltweit das wärmste Jahr seit Beginn der flächendeckenden Wetteraufzeichnungen im Jahr 1881. Die Jahresmitteltemperatur von 10,3 °C lag um 1,4 K über dem Mittelwert des Referenzzeitraums 1981-2010. Mit diesem neuen Höchstwert werden die bisherigen Spitzenjahre 2000 sowie 2007 um 0,4 K übertroffen. Das Jahr begann mit einem deutlich zu milden Winter, die Monate Februar, März sowie April waren entlang der deutschen Ostseeküste jeweils  $>2$  K über dem dreißigjährigen Mittelwert. Das setzte sich über das gesamte Jahr hinweg mit einem warmen Temperaturverlauf fort. Ausnahme bilden im Küstenraum nur die Monate Juni und August, die Werte leicht unterhalb des Langzeitmittels aufwiesen.

Die Niederschlagshöhe von deutschlandweit 721 mm lag 11 % unter dem Mittel von 808 mm und unterhalb des Vorjahreswertes von 774 mm. Im regionalen Vergleich weisen jedoch Schleswig-Holstein (801 mm) und Mecklenburg-Vorpommern (603 mm) den gleichen Anteil von 98 % des Mittels 1981-2010 auf. Die trockensten Monate sind März und November.

Die Jahressumme von im Mittel 1621 Sonnenstunden lag 2 % über dem vieljährigen Mittelwert von 1588 Stunden. Spitzenreiter war wie auch im Vorjahr die Station Arkona mit 2031 Stunden vor dem Ortsteil Dahlem im Südwesten Berlins mit 1844 Stunden. Der sonnenärmste Monat war der Dezember, mit durchschnittlich 22 Stunden lag er 42 % unter dem Langzeitmittel, während im März die Sonne 60 % länger als üblich schien. Die absoluten Spitzenwerte belegen die Monate Juni und Juli mit 232 und 229 Stunden.

## 2.1 Der Eiswinter 2013/14

Für den südlichen Ostseeraum ergab sich aus der Kältesumme an der Station Warnemünde von  $65,8 \text{ K} \cdot \text{d}$  ein warmer Winter 2013/14 (Tab. 2). Der Wert liegt weit unter dem langjährigen Mittelwert von  $104,5 \text{ K} \cdot \text{d}$  der Vergleichsdaten ab dem Jahr 1948. Im Vergleich war die Kältesumme an der Station Arkona mit  $42,1 \text{ K} \cdot \text{d}$  (Tab. 3) noch deutlich niedriger und weniger als halb so groß wie im Vorjahreswinter 2012/13. 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. 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. Bis auf einer längeren Frostphase in der zweiten Januarhälfte mit 12 Frost- und 8 Eistagen sind nur vereinzelt kühlere Phasen von kurzer Zeitdauer in den anderen Wintermonaten registriert worden (Tab. 1). Insgesamt wurden nur 8 Frost- und 20 Eistage im Gegenzug zu 24 und 86 Tagen im ebenfalls milden Vorjahreswinter an der Station Warnemünde aufgezeichnet (NAUSCH et al., 2013, 2014). Der warme Temperaturverlauf des Winters spiegelte sich auch in der Eisbildung wider.

Nach SCHMELZER & HOLFORT (2014) wird die Eissaison in der Ostsee als schwach bis extrem schwach klassifiziert. Bedingt durch den Witterungsverlauf stellte sich die maximale Eisausdehnung etwas zeitversetzt zu der Kältephase im Januar in den ersten 10 Februartagen mit einer Fläche von etwa  $95\,000 \text{ km}^2$  und einem sehr geringem Eisvolumen von  $15,7 \text{ km}^3$  ein. Der Maximalwert entspricht etwa 23 % der Ostseefläche von  $415\,266 \text{ km}^2$  und konzentrierte sich im Wesentlichen auf die nördliche Hälfte des Bottnischen Meerbusens und kleinere vereiste Randbereiche im Finnischen Meerbusen sowie entlang der Rigaer Bucht und weiteren Lagunen der südlichen Ostseeküste. Der Wert befindet sich weit unterhalb der Werte der Vorjahre von  $179\,000 \text{ km}^2$  (2011/12) sowie  $187\,000 \text{ km}^2$  (2012/13) und unterschritt um rund 55% den Mittelwert von  $213\,000 \text{ km}^2$  der Zeitreihe ab dem Jahr 1720 (Abb. 2). Im Vergleich dazu wurde auch der sehr niedrige 30-jährige Mittelwert von  $170\,000 \text{ km}^2$  deutlich unterschritten.

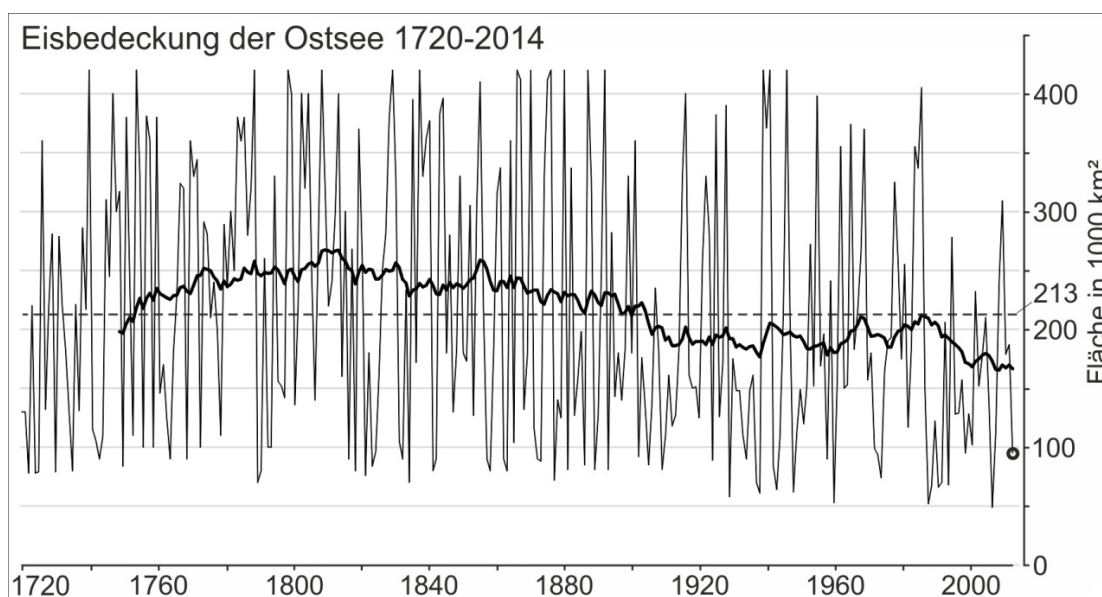


Abb. 2: Maximale Eisbedeckung der Ostsee in 1000 km<sup>2</sup> in den Jahren 1720 bis 2014 (nach Daten von SCHMELZER et al., 2008, SCHMELZER & HOLFORT, 2014). Der Langzeitmittelwert von 213 000 km<sup>2</sup> ist gestrichelt dargestellt. Die dicke Linie ist ein gleitender Mittelwert über die vorherigen 30 Jahre. Der Kreis zeigt die Eisbedeckung im Winter 2013/2014 mit 95 000 km<sup>2</sup>

Entlang der deutschen Ostseeküste wurde die lokale Situation als schwacher Eiswinter anhand der flächenbezogenen Eisvolumensumme von 0,37 m eingeschätzt (SCHMELZER & HOLFORT, 2014). 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 2013/14 mit 0,37 m ist auf dem Niveau von 2012/13 mit 0,38 m, jedoch deutlich geringer als in den Jahren davor 2011/12 (1,12 m), 2010/11 (2,45 m) und 2009/10 (4,22 m). Zusätzlich variieren die Werte kleinräumig gebunden an die lokale Küstenmorphologie und Hydrodynamik. So vereisten in der zweiwöchigen Frostperiode die flachen Boddengewässer Mecklenburg-Vorpommerns und Teile der Pommerschen Bucht, während die Fördenküste im Schleswig-Holsteiner Teil bis auf eine kleine Fläche in der Neustädter Bucht, der Schlei- und Travemündung eisfrei blieb. Im Winter 2013/14 weist die Küste Mecklenburg-Vorpommerns eine flächenbezogene Eisvolumensumme von 0,56 m auf, die als mäßiger Eiswinter klassifiziert wird, während im Schleswig-Holsteiner Teil nur 0,14 m registriert wurden (sehr schwacher Eiswinter). So registrierten die Stationen Landtief in der Pommerschen Bucht 16 Eistage, die Vierendehl-Rinne im Süden Rügens 24 Tage, Timmendorf in der Wismarer Bucht 14 Tage, Lübeck in der Travemündung 12 Tage sowie die Schleimündung 21 Tage. Alle



offeneren deutschen Seegebiete blieben nach Angaben des BSH-Meeresdatenportals sowie SCHMELZER & HOLFORT (2014) eisfrei.

## 2.2 Jahresverlauf der Witterung

Über den gesamten Jahresverlauf änderten sich die Drucksysteme und Luftströmungen im nahezu rhythmischen Wechsel zwischen den Hauptwindrichtungen West bis Südwest und östlichen Windrichtungen (vgl. Abb. 4a, 5b, 6). Mit etwa 46 % in der Jahressumme, weisen Ostwinde einen stark erhöhten Anteil im Jahr 2014 gegenüber der normalen Situation auf (vgl. 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, 2014).

Der **Januar** begann mit einer Abfolge atlantischer Tiefausläufer, die für stürmisches und mildes Wetter sorgten. Die Tiefs „Christina“ und „Dagmar“ zogen zwischen 7. bis 12. Januar von Südwesten über Nordeuropa hinweg. Diese kurze Westwindphase mit Tagesmittelwerten zwischen 10-15 m/s und Stundenmaxima von 20,2 m/s ließ den Pegel an der Station Landsort Norra kurzzeitig auf 44,4 cm MSL (mean sea level) ansteigen. Ab dem 15.01. gewann Hoch „Benjamin“ über Skandinavien zunehmend an Einfluss und dehnte sich im weiteren Monatsverlauf großflächig über weite Teile Osteuropas aus. Die Witterung wechselte bis zum Monatsende auf kaltes Winterwetter mit Tiefstwerten jenseits der -10 °C Marke. Der damit einhergehende anhaltende Ostwind induzierte einen starken Ausstrom, so dass am Monatsende Werte von -43 cm MSL an der Station Landsort Norra registriert wurden (Abb. 7a). Der Temperaturverlauf wies im Januar nur geringe Abweichungen von 0,2 K unter dem langjährigen Mittel entlang der deutschen Ostseeküste auf. Die Sonnenscheindauer war deutschlandweit in den meisten Gebieten unter dem Mittel. So wurden beispielsweise an der Station Arkona nur 49 % der mittleren Zeitdauer gemessen (Tab. 1), womit der Vorjahreswert von 53 % geringfügig unterschritten wurde. Die Küste Mecklenburg-Vorpommerns verzeichnete ausgeglichene Niederschlagsmengen (Arkona 100 %), während das Hinterland leicht zu trocken war und in Schleswig-Holstein um etwa 7 % erhöhte Werte gemessen wurden.

Der **Februar** startete mit einem Wetterwechsel durch die Tiefs „Nadja“ und „Okka“ über dem Nordatlantik, die für Zustrom milder Luftmassen aus südwestlichen bis südlichen Richtungen sorgten. Die milde Witterung hielt über den gesamten Monatsverlauf an, mit positiven Temperaturanomalien von etwa 3,5 K entlang der Ostseeküste, zu geringen Niederschlägen von 70-80 % (Station Arkona 70 %) und einer rekordverdächtigen Sonnenscheindauer von mehr als der Hälfte über dem üblichen Wert. Mit einer Sonnenscheindauer von 155 % an der Station Arkona belegt der Monat Februar den Spitzenplatz im Jahresverlauf, gemessen an der Abweichung zum Normalwert.

Der stetige Südwest- bis Westwind ließ den Wasserstand in der Ostsee von einem Tiefstand mit -46,6 cm MSL (3.2.) um 43 cm in Landsort ansteigen (-3,6 cm MSL am 20.02.). Damit

gelangte ein Wasservolumen von etwa 141 km<sup>3</sup> in die Ostsee hinein, bevor sich zum Monatsende ab dem 27.02. leichte Ausstrombedingungen durch Süd- bis Südostwinde einstellten (Abb. 7a, 5b).

Auch im **März** setzte sich die milde Witterung durch dominierenden Hochdruckeinfluss weiter fort und wurde nur zur Monatsmitte durch die Tiefausläufer „Danli“, „Ev“ und „Feliz“ unterbrochen. Mit dem Durchzug dieser Tiefs über Nordeuropa stellten sich vom 15.-20.03. anhaltende West- bis Nordwestwinde mit Tagesmitteln über 10 m/s ein (Abb. 5a), die den Pegel in Landsort erneut von -35,7 cm MSL bis auf 21,7 cm MSL ansteigen ließen (Abb. 7a). Diese Pegeldifferenz von 57,4 cm entsprach einem Einstromvolumen von etwa 203 km<sup>3</sup> und wirkte sich zusammen mit den vorangegangenen Einstromphasen ab Oktober 2013 belüftend bis in die Becken der zentralen Ostsee aus (NAUMANN & NAUSCH 2015). Zum Monatsende drehte das Windsystem wieder auf östlichen Einfluss und ließ den Ostseepiegel erneut absinken. Insgesamt war der Temperaturverlauf deutlich zu warm. Zum meteorologischen Frühlingsanfang wurden flächendeckend Rekordwerte erreicht von beispielsweise 18 °C in Rostock und entlang der Ostseeküste erreichten die Monatsmittel eine Abweichung von 2,6 K. Zusätzlich war es bundesweit erheblich zu trocken, z.B. mit Niederschlagsmengen von nur 40-50 % des Langzeitmittels an der Ostseeküste. Mit einer durchschnittlichen Sonnenscheindauer von 182 Stunden liegt der Wert 60 % über dem vieljährigen Mittel von 114 Stunden.

Auch im **April** setzte sich die warme und überwiegend trockene Witterung weiter fort. Die Temperatur lag an der Ostseeküste etwa 2 K über dem Langzeitmittel, während die Niederschlagsmengen gebietsweise stark schwankten. In Schleswig-Holstein war es über 60 % zu nass, in Rostock 26 % zu trocken, Arkona 13 % zu nass und in Ueckermünde an der polnischen Grenze etwa 41 % zu nass. Mit bundesweit durchschnittlich 168 Sonnenstunden erreicht der Wert genau den vieljährigen Mittelwert. An der Station Arkona war es etwa 10 % zu sonnig. Die Luftdruckgegensätze über Europa waren im gesamten Monatsverlauf nur relativ gering ausgeprägt und es dominierte Hochdruckeinfluss über Mitteleuropa, so dass keine länger anhaltenden Windphasen mit übergeordnetem Einfluss auf den Füllstand der Ostsee zu verzeichnen waren. Der Pegel Landsort schwankte im Bereich zwischen -20 cm MSL und 10 cm MSL.

Im **Mai** wurde die Witterung in der ersten Monatshälfte vorrangig durch Tiefdruckgebiete über dem Nordatlantik gesteuert. Tief „Vicky“ und „Xena“ brachten dabei kühle und feuchte Luftmassen nach Mitteleuropa. Anschließend steuerten Hoch „Steffen“, „This“ und „Urs“ das Wettergeschehen in Mitteleuropa.

Der Monatsverlauf war bundesweit zu kühl und nur an den Küsten leicht zu warm (0,4 K entlang der Ostseeküste). Die Niederschlagsmengen lagen in der Fläche über dem Durchschnitt, waren aber regional sehr unterschiedlich. In einem NW-SO gerichteten Streifen von der Nordseeküste bis Bayern war es wesentlich zu nass mit Spitzenwerten von 112 % über dem Langzeitmittel. Im Gegenzug war es an der Mecklenburg-Vorpommerschen Ostseeküste zu trocken (Rostock -24 %, Arkona -42 %, Ueckermünde -2 %). Die Sonne zeigte sich vor allem in der zweiten Monatshälfte und lag mit 180 Stunden 12 % unter dem Mittel

(Arkona -8 %). Der Wind wehte hauptsächlich in geringer Intensität ( $<10$  m/s) außer in einer kurzen Ostwindphase vom 27.-28.05. mit hohen Tagesmittelwerten von 15,1 m/s sowie 17,7 m/s. Der Wasserstand der Ostsee schwankte nur gering um Werte zwischen 0 und -25 cm MSL.

Der Monat **Juni** gestaltete sich insgesamt sehr wechselhaft. Eine Hitzewelle über Pfingsten wurde am 11.6. von Gewittern mit Starkregenereignissen, teilweise heftigem Hagel und Orkanböen begleitet, die erhebliche Schäden im Bundesgebiet anrichteten. Anschließend setzte eine Nordwestströmung ein, die für kühles aber meist trockenes Wetter sorgte. Das stabile Hoch „Xerxes“ über den Britischen Inseln zusammen mit den aufeinanderfolgenden Tiefs „Frederike“, „Gisela“ und „Hildegunde“ über Skandinavien und dem Nordmeer erzeugte vom 18.-24.06. eine längere Nordwest- bis Westwindphase mit konstanten 5-6 Bft. Dabei überschritt die Südostkomponente des Windes (Nordwestwind positiv) Tagesmittelwerte von  $>5$  m/s, was zu einem Pegelanstieg von etwa 30 cm in Landsort führte (Abb. 7b, 7a). Die übrigen Monatsteile waren, wie im Sommer üblich, durch eher schwache bis mäßige Winde gekennzeichnet. Die Temperatur lag mit 16,1 °C um 0,4 K über dem vieljährigen Mittel des Referenzzeitraums 1981-2010. An der Ostseeküste waren es etwa 0,6 K über dem Mittelwert. Insgesamt war der Juni mit 52 mm Niederschlagshöhe zu trocken. Besonders Süddeutschland war davon betroffen, während die Niederschlagsituation an der Ostseeküste zwischen -56 % in Schleswig, 13 % zu nass in Rostock und -17 % in Arkona regional schwankte. Die Sonnenscheindauer lag mit 232 Stunden um 15 % über dem Durchschnitt von 202 Stunden.

Auch im **Juli** wechselte die Witterung zwischen sonnigem heißen Hochdruckwetter (Hoch „Zeus“ und „Bertram“ über Skandinavien und Osteuropa) und kurzen Tiefdruckphasen. Es ergaben sich langanhaltende Nordost- bis Ostwindphasen mit kurzen Unterbrechungen von Westwinden (Abb. 5b), die sich in dem stückchenweisen Pegelabfall in Landsort von etwa 25 cm auf das Niveau von Anfang Juni widerspiegelten (Abb. 7a). Somit war der Monat bei überdurchschnittlich viel Sonne zu warm und zu nass. Entlang der Ostseeküste waren die Temperaturen im Durchschnitt 2,4 K zu warm und die Regenmenge schwankte wie auch schon im Vormonat regional sehr stark. Werte von -56 % in Arkona, -48 % in Schleswig zu ausgeglichenen Werten in der Region Ueckermünde und leicht positiven Werten um 9 % in Rostock wurden registriert. Die Sonnenscheindauer lag mit 229 Stunden nur 4 % über dem vieljährigen Mittel, während Arkona 122 % verzeichnete.

Anfang **August** sorgte Hoch „Susanne“ mit Ausdehnung von Großbritannien, Skandinavien und Mitteleuropa am 3.08. für starke Gewitter im Norden. Anschließend stellte sich langanhaltender Tiefdruckeinfluss ein, dessen Schwerpunkt sich von den Britischen Inseln zum südlichen Skandinavien verlagerte. Zusammen mit Hochdruckgebieten über dem Mittelmeer ergab sich eine ab dem 9.08. bis zum Monatsende andauernde Südwestwindphase (Abb. 5b). Das führte zu Niedrigwasser in der westlichen Ostsee und einem Pegelanstieg von 47,8 cm in der zentralen Ostsee (164 km<sup>3</sup> Wasservolumen). Einströmende Wassermassen aus dem Kattegat waren relativ gering, was anhand der Kurve des akkumulierten Einstroms über den Öresund von nur etwa 25 km<sup>3</sup> deutlich wird (SMHI,

2015b). So wurden hauptsächlich Wassermassen aus der südwestlichen Ostsee in die zentralen Gebiete gepresst.

Sommerliche Temperaturen zu Monatsbeginn gingen im Verlauf deutlich zurück, Sonnenschein war nur von kurzer Dauer und die Regenmenge war vielerorts deutlich erhöht. An der Ostsee waren die Temperaturen etwa 0,7 K unter dem Durchschnitt. Die Regenmenge umfasste zum Beispiel an der Station Arkona 134 mm, was einen Extremwert von 220 % des vieljährigen Mittels darstellt, während die Sonnenscheindauer sich auf ausgeglichenem Niveau von 241 Stunden befand. Im Bundesdurchschnitt lag die Sonnenscheindauer mit 176 Stunden um 14 % unter dem Mittelwert.

Der **September** war geprägt durch einen ständigen Wechsel von Hoch- und Tiefdruckgebieten über Mitteleuropa. Nach dem Abzug der Hochdruckgebiete „Helmut“, „Ingemar“ und „Josef“ nach Osteuropa blieben sie dort für längere Zeit wetterbestimmend und sorgten im Ausgleich mit Tiefdruckgebieten über dem Nordatlantik sowie Skandinavien für großteilig östliche Winde im Monatsverlauf. Mit dem Durchzug von Tief „Irina“ gewann ab dem 25.09. die westliche Komponente wieder an Bedeutung (Abb. 5b). Einzige stärkere Windphase mit Tagesmittelwerten von 11,6 m/s und 11,3 m/s aus Ost wurde am 15.-16.09. durch das Zusammenwirken von Hoch „Ingemar“ über Skandinavien und Tief „Elisabeth“ über der Biskaya erzeugt (Abb. 5a). Als Reaktion fiel im Monatsverlauf der Wasserpegel in der Ostsee von 27,5 cm MSL zum Ende September bis auf Werte von -20 cm MSL erheblich ab. Die Temperaturen lagen bundesweit mit 14,9 °C um 1,4 K über dem vieljährigen Mittel, mit einer Niederschlagshöhe von 52 mm war es um etwa 22 % unter dem Soll von 67 mm und auch die Sonnenscheindauer lag mit 136 Stunden 8% unter dem Langzeitniveau. Im südwestlichen Ostseeraum lagen die Temperaturen etwa 1,8 K über dem Mittel, im westlichen Teil war es um 39 % zu trocken, während das Wetter in Arkona mit 67 mm um 20 % zu regnerisch war. Die Sonnenscheindauer wurde an der Station Arkona mit 204 Stunden registriert (119 %), Spitzenreiter im Bundesvergleich ist die Region Ueckermünde mit 126 % (198 Sonnenstunden).

Im **Oktober** durchzog eine Abfolge von Tiefdruckgebieten vom Nordatlantik kommend den Skandinavischen Raum (Tief „Joanna“, „Katrin“, „Margit“, „Noa“, Ex-Hurrikan „Gonzalo“) und trat in Interaktion mit stabilen Hochdruckgebieten über Südost- bis Osteuropa. Dieses Druckgefüge sorgte für anhaltenden Zustrom milder Luft aus überwiegend südwestlichen bis südöstlichen Richtungen. Typische Herbststürme waren nicht zu verzeichnen und der Pegel Landsort pendelte im Wertebereich 0 bis -20 cm MSL. Infolge dieser warmen Luftmassen lag die Durchschnittstemperatur bei 11,9 °C, die 2,7 K über dem Mittel von 1981-2010 lag. Nur die Oktobermonate in den Jahren 2001 und 2006 waren wärmer. Die Niederschlagsmenge erreichte mit 63 mm exakt den Mittelwert und die Sonnenscheindauer lag mit 100 Stunden 6 % darunter. Die Stationen an der Ostseeküste registrierten ebenfalls im Durchschnitt 2,7 K zu warme Monatstemperaturen. Die Regenmengen variierten regional wieder, mit leicht negativen Werten im Schleswig-Holsteiner Raum, zu trockenen Werten von 45 mm (-15 %) an der Station Arkona und positiven Niederschlagsmengen von 71 mm (182 %) in Ueckermünde.

Die Dominanz milder Luftmassen aus südlichen Richtungen hielt im **November** durch die großflächigen und lange Zeit stabilen Hochdruckgebiete „Quinn“ und „Robin“ in Ost- und Südosteuropa an. Ab dem 12.11. dominierten Ostwinde mit nur einer kurzen Unterbrechung von West- bis Nordwestwinden (24.-25.11.). In diesem Monat wurden jedoch keine Tagesmittelwerte von über 10 m/s erreicht, so dass weiterhin die typischen Herbststürme ausblieben. Der Pegel Landsort fiel in dieser Phase rapide ab und erreichte am 3.12. den Jahrestiefststand von -52,7 cm MSL in Landsort. Der November startete bundesweit mit Wärmerekorden und so lag die mittlere Temperatur auch in diesem Monat mit 2,1 K (6,5 °C) weit über dem Mittelwert. Mit 29 mm Niederschlag war die Witterung deutlich zu trocken und lag 56 % unter dem dreißigjährigen Durchschnitt von 66 mm. Die mittlere Sonnenscheindauer wurde mit 60 Stunden errechnet und liegt über dem Mittel von 54 Stunden. Die positive Temperaturanomalie entspricht auch im Küstenraum dem bundesdeutschen Mittelwert. Arkona registrierte nur 17 mm Niederschlag, das nur 35 % der üblichen Monatssumme umfasst. Die Sonnenscheindauer betrug an dieser Station 49 Stunden und liegt damit 9 % unter dem Mittelwert 1981-2010.

Hoch „Robin“ dominierte auch Anfang **Dezember** Osteuropa und wurde anschließend von „Stefan“ und „Thue“, die von Südeuropa nach Nordosten vordrangen und bis zum Monatsende dort verharren, abgelöst. Vom Nordatlantik zogen eine Abfolge von Sturmtiefs über eine lange Zeitdauer von etwa 3 Wochen (6.-26.12.) über Skandinavien hinweg. Die Tiefs „Yasmina“ und „Zoe“ machten den Anfang, gefolgt von Sturmtief „Alexandra“ mit 955 hPa Kerndruck (Abb. 3). Anschließend folgten bis Ende des Monats die Tiefs „Doris“, „Engel“, „Freia“ und „Hiltrud“.

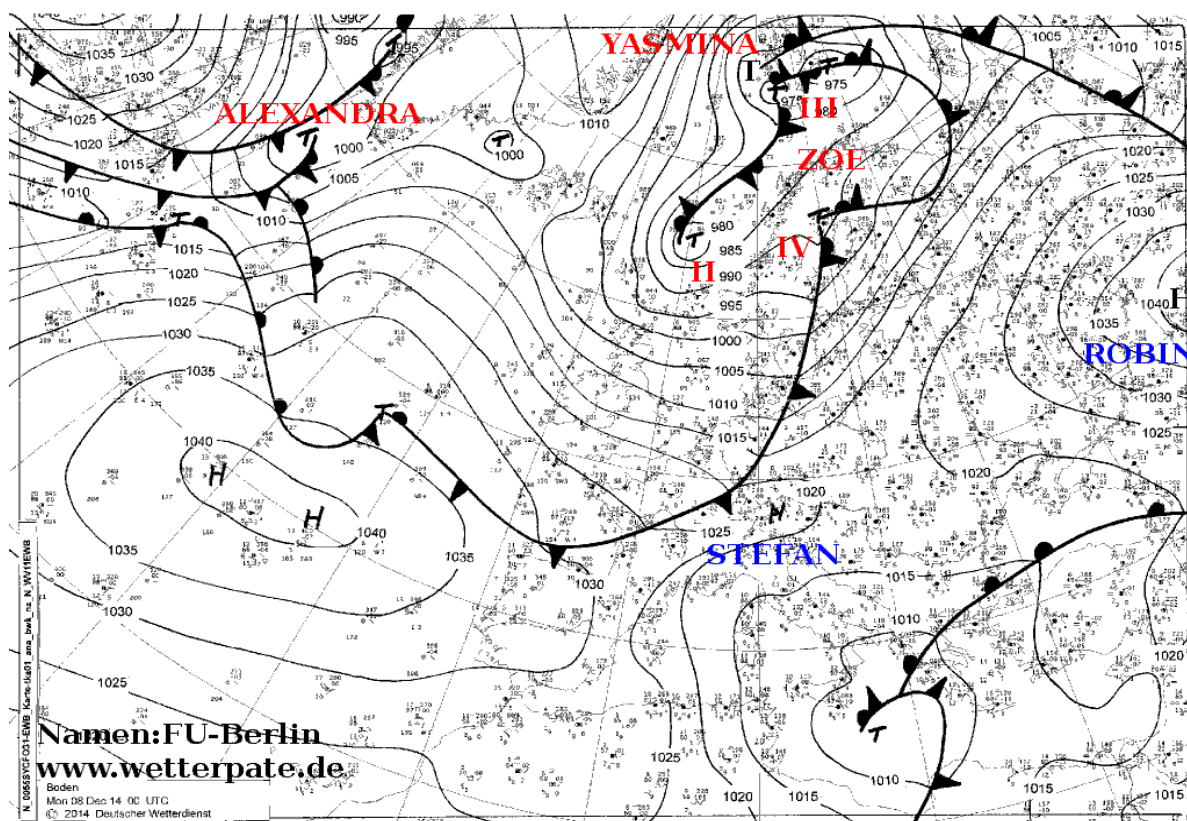


Abb. 3: Wetterkarte vom 8. Dezember 2014 mit Sturmtiefaktivität im Nordatlantik (FU-Berlin, 2014)

Diese außergewöhnlich langanhaltende Phase von westlichen Winden verursachte einen massiven Salzwassereinstrom in die Ostsee (Abb. 5a, 5b). Am Pegel Landsort wurde am 24.12. der Jahresspitzenpegel von 48,6 cm MSL erreicht, was eine Pegeldifferenz von über einem Meter seit Monatsanfang bedeutet. Daraus lässt sich ein Einstromvolumen von 358 km<sup>3</sup> errechnen, was etwa 198 km<sup>3</sup> salzreicheres Wasser beinhaltet und ausreicht, um die tiefen Becken der zentralen Ostsee zu belüften (MOHRHOLZ et al., 2015). Insgesamt war auch der letzte Monat des Jahres zu mild. Mit durchschnittlich 2,7 °C lag der Wert 1,5 K zu hoch. Im Küstenraum startete der Monat mit Frosttagen, verzeichnete während der Westwindphase Tagesspitzenwerte von über 10 °C und endete nach Weihnachten wieder mit kalten Temperaturen. Entlang der Küste lag der Durchschnitt bei 1,3 K zu hohen Monatsmitteltemperaturen. Die Niederschlagsmenge wurde bundesweit mit 76 mm errechnet und ist damit nur knapp über dem Mittelwert von 72 mm. Die Werte im Norden Rügens waren mit 87 mm jedoch doppelt so hoch wie üblich. Sonnige Abschnitte waren eher selten und somit lag die mittlere Sonnenscheindauer bei 22 Stunden. Das entspricht einer 42 % geringeren Intensität im Vergleich zum dreißigjährigen Mittel von 39 Stunden. Kap Arkona registrierte 25 Sonnenstunden.

### 2.3 Jahreszusammenfassung einiger bedeutender Parameter

Die **Solarstrahlung** an der Station Gdynia wies eine Jahressumme von  $387\,139 \text{ J/m}^2$  auf und sortiert sich mit Platz 17 im oberen Mittelfeld seit Beginn der Vergleichsdaten ab dem Jahr 1956 ein (FEISTEL et al., 2008). Dieser Wert liegt über dem langjährigen Mittelwert von  $373\,595 \text{ J/m}^2$  auf dem Niveau des Jahres 2012. Am sonnenreichsten waren die Monate Mai, Juni und Juli. Der Juli belegte dabei mit  $65\,193 \text{ J/m}^2$  den 10. Platz im langjährigen Vergleich (Tab. 1), blieb jedoch wesentlich hinter dem Spitzenwert von  $80\,389 \text{ J/m}^2$  im Juli 1994 zurück, der das absolute Maximum der gesamten Datenreihe darstellt. Den geringsten Wert des Jahres wies der Dezember mit  $4376 \text{ J/m}^2$  auf und lag mit Platz 26 auf dem Niveau des langjährigen Mittels von  $4354 \text{ J/m}^2$ .

Mit einer **Wärmesumme** von  $236,9 \text{ K} \cdot \text{d}$  (Tab. 2), registriert an der Station Warnemünde, reiht sich das Jahr 2014 erneut auf Platz 10 im Zeitraum der letzten 67 Jahre ein und verdrängt den Vorjahreswert von  $230,4 \text{ K} \cdot \text{d}$  auf den elften Platz. Der Wert liegt weit außerhalb des langjährigen Mittels von  $150 \text{ K} \cdot \text{d}$  und oberhalb der Standardabweichung, so dass 2014 erneut als ein besonders warmes Jahr eingestuft werden kann. Dabei waren die Monatsmitteltemperaturen in den Monaten Juni und August leicht unterhalb des langjährigen Mittelwertes und April sowie Oktober auf ausgeglichenem Niveau. Im Vergleich weisen die übrigen Monate Mai, Juli und September mehr als doppelt so hohe Wärmesummen auf. Diese außergewöhnlich warmen Monate belegen die Plätze 8, 4 und 6 in der Zeitreihe seit 1948.

Mit einer **Kältesumme** von  $65,8 \text{ K} \cdot \text{d}$  in Warnemünde belegt der Winter 2013/14 den 27. Platz der wärmsten Winter der Langzeitdatenreihe und befindet sich damit im oberen Mittelfeld. Dabei fiel nur der Monat Januar mit  $65,8 \text{ K} \cdot \text{d}$  kühler als der langjährige Mittelwert von  $39,1 \text{ K} \cdot \text{d}$  aus, während alle übrigen Wintermonate mit einer Kältesumme von  $0 \text{ K} \cdot \text{d}$  zu warm waren. Entlang der deutschen Ostseeküste war der Februar etwa  $3,5 \text{ K}$  zu warm. Der März lag etwa  $2,5 \text{ K}$  über dem Mittelwert, gefolgt vom April mit  $2 \text{ K}$ .

Tab. 1: Monatlich gemittelte Wetterdaten der Station Arkona (Rügen, 42 m NN) nach DWD (2014).  $t$ : Lufttemperatur,  $\Delta t$ : Lufttemperatur-Anomalie,  $h$ : Luftfeuchte,  $s$ : Sonnenscheindauer,  $r$ : Niederschlag, Frost: Zahl der Tage mit Tiefsttemperatur unter 0 °C, Eis: Zahl der Tage mit Höchsttemperatur unter 0 °C. Solar: Sonnenstrahlung in J/m<sup>2</sup> an der Station Gdynia, 54°31' N, 18°33' O, 22 m NN, von IMGW (2015). Prozentangaben sind relativ zum langjährigen Mittel. Maxima und Minima hervorgehoben

Monat	$t/^\circ\text{C}$	$\Delta t/\text{K}$	$h/\%$	$s/\%$	$r/\%$	Frost	Eis	Solar
Jan	<b>1,1</b>	0,1	<b>90</b>	49	100	<b>12</b>	<b>8</b>	
Feb	3,6	2,5	89	<b>155</b>	70	5	-	
Mrz	5,5	<b>2,6</b>	86	142	58	1	-	
Apr	7,6	1,6	86	110	113	-	-	
Mai	11,5	1,1	83	93	58	-	-	
Jun	15,2	1,0	79	121	83	-	-	
Jul	<b>19,2</b>	2,1	82	122	44	-	-	
Aug	17,3	<b>0,0</b>	77	100	<b>220</b>	-	-	
Sep	15,7	1,6	84	119	120	-	-	
Okt	12,5	2,5	89	71	85	-	-	
Nov	7,9	2,4	<b>90</b>	91	35	2	-	
Dez	3	0,7	<b>90</b>	66	202	10	1	

Tab. 2: Summen der Tagesmittel der Lufttemperatur an der Wetterstation Warnemünde. Die Kältesumme (KS) ist das Zeitintegral der Lufttemperatur unterhalb der Linie  $t = 0^\circ\text{C}$ , in  $\text{K} \cdot \text{d}$ , die Wärmesumme (WS) das entsprechende Integral oberhalb der Linie  $t = 16^\circ\text{C}$ . Zum Vergleich sind die entsprechenden Mittelwerte 1948 bis 2014 angegeben

Monat	KS 2013/14	Mittelwert	Monat	WS 2014	Mittelwert
Nov	0	2,6 ± 6,3	Apr	0	1,1 ± 2,5
Dez	0	22,2 ± 28,3	Mai	14,4	5,4 ± 6,7
Jan	65,8	39,1 ± 39,7	Jun	18,8	23,2 ± 14,7
Feb	0	31,9 ± 38,1	Jul	117,7	56,4 ± 35,9
Mrz	0	8,6 ± 12,1	Aug	59,4	52,2 ± 32,1
Apr	0	0 ± 0,2	Sep	24,5	11,3 ± 12,0
			Okt	2,1	0,4 ± 1,1
$\Sigma$ 2013/2014	65,8	104,5 ± 79,5	$\Sigma$ 2014	236,9	150 ± 68,7



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

Monat	KS 2013/14	Monat	WS 2014
Nov	0	Apr	0
Dez	0	Mai	2,2
Jan	42,1	Jun	7
Feb	0	Jul	100
Mrz	0	Aug	57,9
Apr	0	Sep	15
		Okt	0
$\Sigma$ 2013/2014	42,1	$\Sigma$ 2014	182,1

Die Abbildungen 4 bis 6 zeigen die **Windsituation** an der Station Arkona im Jahresverlauf 2014. 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 2014 (Abb. 4a) wird im Vergleich der klimatische mittlere Wind gezeigt (Abb. 4b), der aus der Zeitreihe 1951 bis 2002 abgeleitet wurde. Die Kurve für 2014 (33 600 km nach Osten, 44 000 km nach Norden) weicht von der des klimatischen Mittelwerts (52 000 km nach Osten, 25 000 km nach Norden) ganz erheblich ab. Dies ist den häufigen Phasen östlicher Windrichtungen geschuldet, die im gesamten Jahresverlauf im Wechsel zu Westwindphasen auftraten (Abb. 5b) und im langjährigen Vergleich erhöhte Jahresmittelwerte aufweisen. Anhand des Windrosen-Diagramms (Abb. 6) nehmen östliche Windrichtungen etwa 46 % in der Jahressumme ein. Im Vergleich entfallen weitere 40 % auf die Hauptwindrichtungen West bis Südwest. Der mittlere Betrag der Windgeschwindigkeit von 6,7 m/s (Abb. 5a) unterschreitet geringfügig den langjährigen Mittelwert von 7,1 m/s (HAGEN & FEISTEL, 2008). Vergleicht man jedoch die Ostkomponente des Windes (Westwind positiv) von im Mittel 1,1 m/s (Abb. 5b) mit dem klimatologischen Mittelwert von 1,7 m/s (HAGEN & FEISTEL, 2008), werden die verstärkten Ostwindphasen deutlich. Die Nordkomponente (Südwind positiv) weist mit dem Mittel von 1,39 m/s eine Erhöhung zum Langzeitwert von 0,8 m/s auf. Infolge der häufig wechselnden Windrichtung zeigt die Kurve des Jahres 2014 besonders in den Monaten April bis Oktober 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), tritt nur in den Monaten Februar, August, Oktober und Dezember etwas deutlicher hervor.

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-See-Verteilung erklären (BEZOLD, 1883).

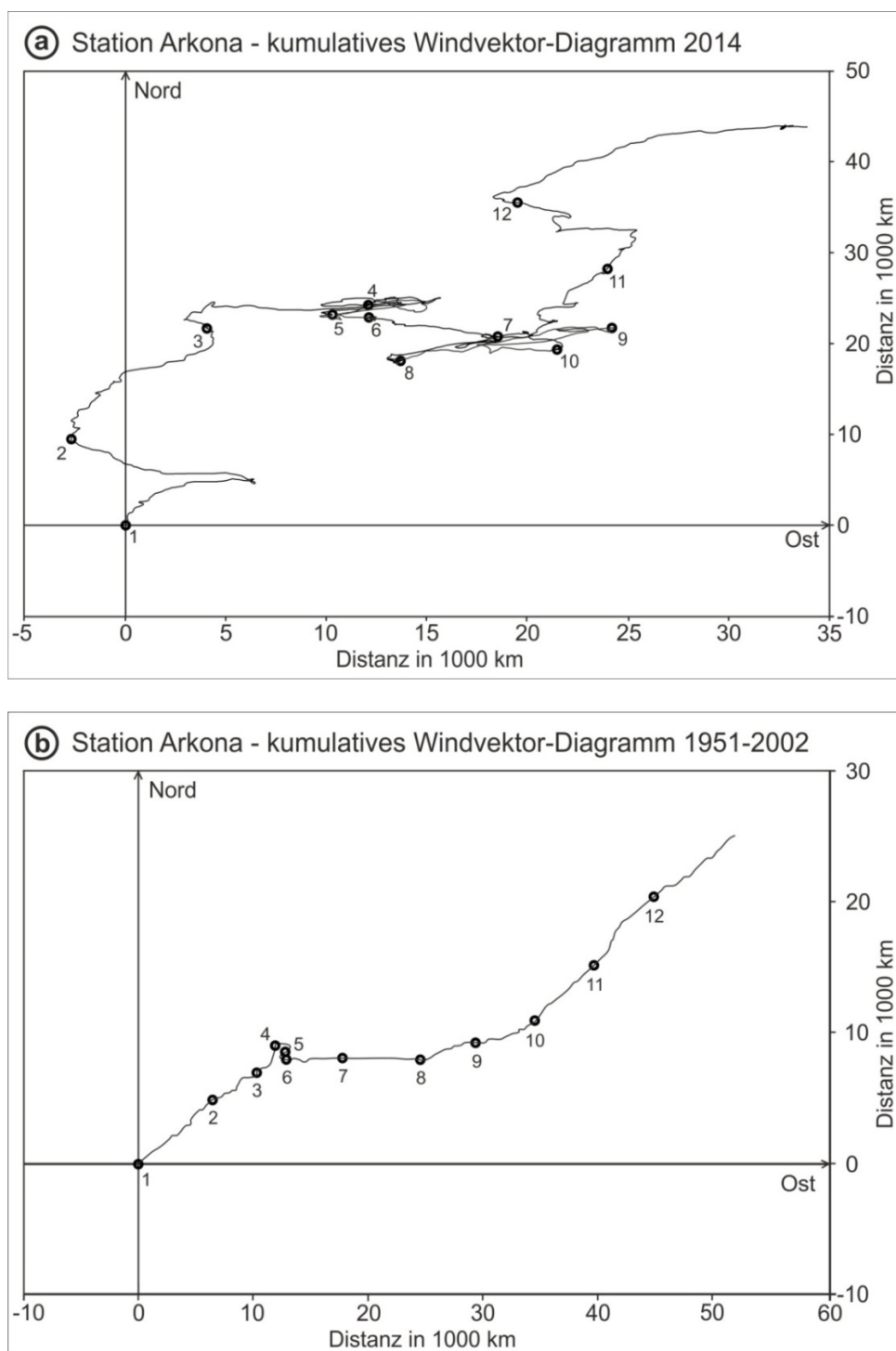


Abb. 4: Fortschreitende Vektordiagramme der Windgeschwindigkeit an der Wetterstation Arkona, Distanz in 1000 km, positiv nach nördlichen und östlichen Richtungen. Der erste Tag des Monats ist durch einen Kreis markiert. a) für das Jahr 2014 (nach Daten des DWD, 2015) b) Langzeitmittel

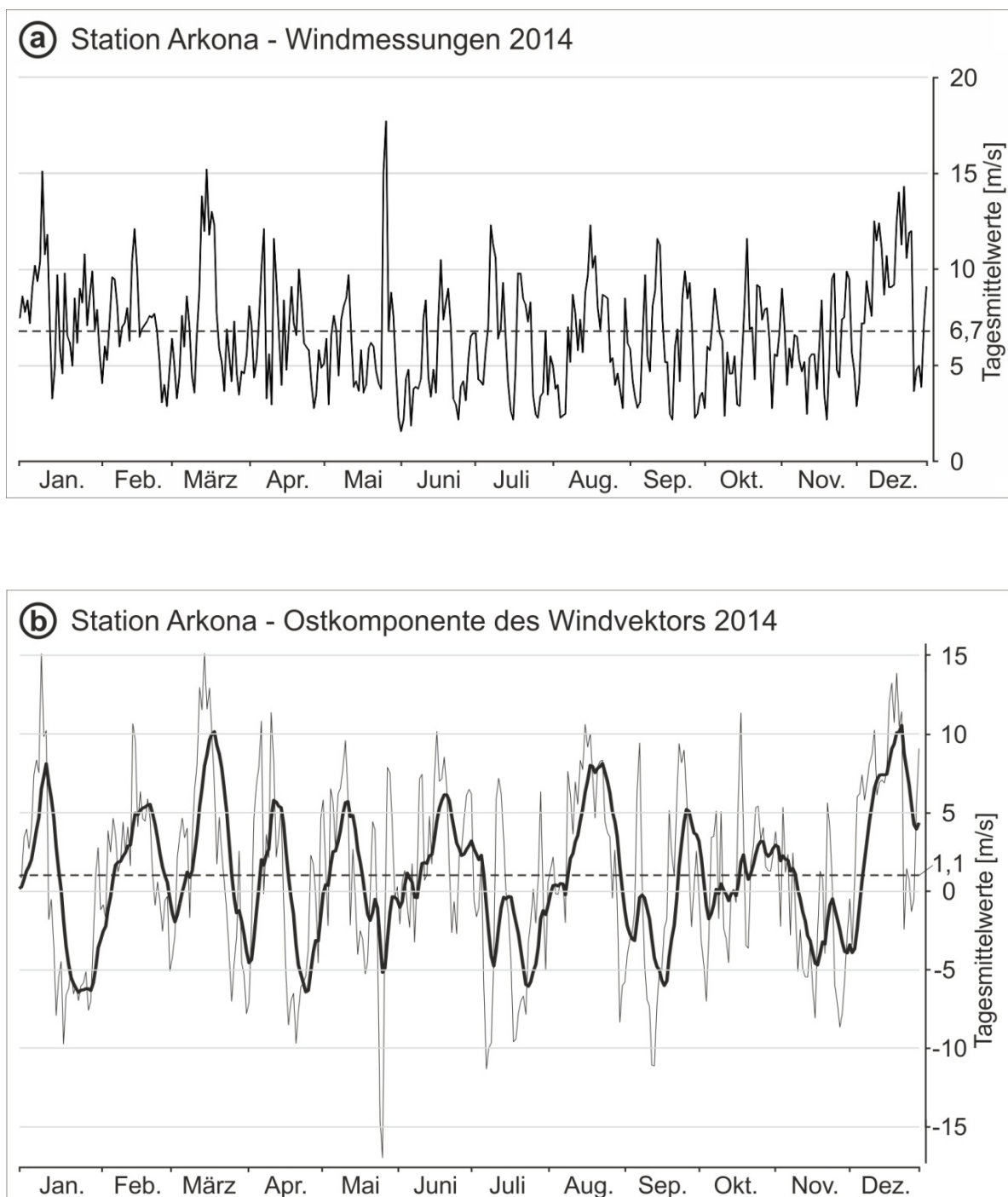


Abb. 5: Windmessungen an der Wetterstation Arkona (nach Daten des DWD, 2015)

- a) Tagesmittelwerte der Windgeschwindigkeit in m/s, Jahresmittelwert 6,7 m/s (aus Stundenmittelwerten berechnet) gestrichelt
- b) Tagesmittelwerte der Ostkomponente (Westwind positiv), Jahresmittelwert 1,1 m/s gestrichelt. Die fett gezeichnete Linie ist mit einem exponentiellen Gedächtnis von 10 Tagen gefiltert

Die Windentwicklung zeigt im Jahresverlauf eine etwas untypische Verteilung von Starkwindereignissen, da auch in den Sommermonaten Mai bis August häufiger Tagesmittelwerte von mehr als 10 m/s (>5 Bft) überschritten wurden (Abb. 5a). Besonders auffällig ist der größte Tagesmittelwert von 17,7 m/s, mit Spitzenböen bis 25,4 m/s, am 28. Mai aus Ost bis Nordost. Im Normalfall sind diese Ereignisse auf die Wintermonate Oktober bis März konzentriert. Der Jahresmittelwert von 6,7 m/s ist etwas geringer als in den Vorjahren 2013 mit 7,0 m/s, 2012 mit 7,1 m/s und im Jahr 2011 7,3 m/s (NAUSCH et al., 2012, 2013, 2014). Windspitzen von über 20 m/s (>8 Bft) in den Stundenmittelwerten wurden nur am späten Abend des 9. Januar registriert, während 2013 an sieben Tagen diese Grenze überschritten wurde (NAUSCH et al., 2014). Mit einem Spitzenwert von 21,2 m/s aus West fegte Sturmtief „Dagmar“ vom 9.-11.1. über die Ostsee hinweg. Frühere Maxima der Stundenmittelwerte von 30 m/s im Jahr 2000, 26,6 m/s im Jahr 2005 und 25,9 m/s durch Orkan „Xaver“ (Dezember 2013) wurden weit unterschritten.

Dieses wird auch anhand des Windrosendiagramms (Abb. 6) deutlich, da orangene und rote Farbsignaturen des Wertebereiches größer als 20 m/s im Gegenzug zu 2013 (NAUSCH et al., 2014) nicht auftraten.

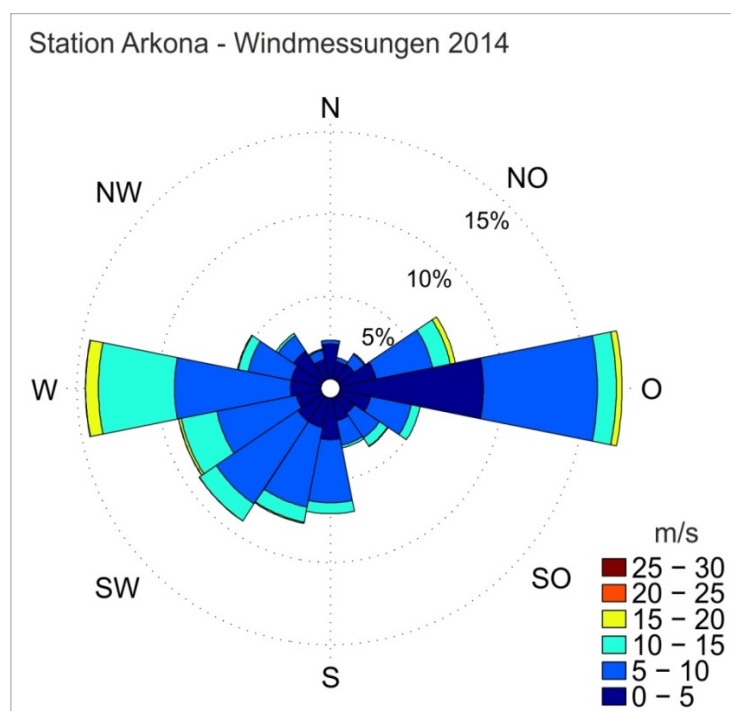


Abb. 6: Windmessungen der Station Arkona (nach Daten des DWD, 2015) dargestellt als Windrosen-Diagramm. Verteilung von Windrichtung und -stärke auf Basis von Stundenmittelwerten des Jahres 2014

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°46'N, 17°52'E). Der alte Pegel Landsort (58°45'N, 17°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 2014 hat es vier Phasen von Wassereinströmen mit geschätzten Volumina zwischen 141 km<sup>3</sup> und 358 km<sup>3</sup> 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 Windes (Abb. 5b, 7b) zu erkennen ist. Die Filterung erfolgt nach der Formel

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

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

Zum Jahresanfang war am 10. Januar ein hoher Füllstand von 44,4 cm MSL am Pegel Landsort Norra (Abb. 7a) infolge von Starkwindphasen im November/Dezember 2013 zu verzeichnen. Durch langanhaltenden Ostwind erfolgte intensiver Ausstrom bis auf einen Tiefstand von -46,6 cm MSL am 3. Februar. Anschließend setzte Einstrom ein und der Wasserstand stieg in einer Zeitdauer von 17 Tagen um 43 cm auf den Wert von -3,6 cm MSL (20.02.2014) an. Mit der empirischen Näherungsformel  $\Delta V/\text{km}^3 = 3,8 \times \Delta L/\text{cm} - 1,3 \times \Delta t/d$  (NAUSCH et al., 2002; FEISTEL et al., 2008) lässt sich aus den Werten des Pegelunterschieds  $\Delta L$  in cm und der Einstromdauer  $\Delta t$  in Tagen eine Schätzung für das eingeströmte Volumen  $\Delta V$  berechnen. Für den Anstieg vom 03.02.2014 bis zum 20.02.2014 ergibt sich dadurch ein Volumen von 141 km<sup>3</sup>. Nach kurzem Ausstrom begann bei einem Pegelstand von -35,7 cm MSL eine nächste Phase, die sich vom 8.03. bis 19.03. erstreckte und den Pegel bis auf 21,7 cm MSL ansteigen ließ. Aus der Pegeldifferenz

von 57,4 cm und 11,5 Tagen Zeitdauer erhält man ein geschätztes Volumen von etwa 203 km<sup>3</sup>. Diese zwei Ereignisse führten mit den vorangegangenen Auswirkungen des Orkan Xaver im Dezember 2013 und der langen Westwindphase Ende Oktober bis Anfang November 2013 zu einem komplexen Zusammenwirken, so dass die Stolper Rinne gegen Ende April/Anfang Mai überströmt werden konnte. Das Gotlandtief wurde Ende Mai von diesen Wassermassen erreicht und erstmalig seit 2003 das Tiefenwasser mit Sauerstoff belüftet (NAUSCH & NAUMANN, 2015). Anschließend fiel der Wasserstand zu Ende März wieder auf Werte um -20 cm MSL ab und variierte im weiteren Jahresverlauf bis Mitte August zwischen -25 cm MSL bis 15 cm MSL infolge des zyklischen Wechsels von Ost- und Westwinden (Abb. 5b). Eine dritte Phase von längerer Anstiegsdauer erstreckte sich über einen Zeitraum von 13,5 Tagen vom 13.-27.08. mit rund 164 km<sup>3</sup> Wasservolumen durch eine zweiwöchige Südwestwindphase. An der Station Landsort Norra stieg dabei der Pegel um 47,8 cm von -20,3 cm MSL bis auf 27,5 cm MSL an. Die Auswirkungen in Bezug auf die Belüftung der tiefen Becken blieben eher auf das Arkonabecken bis Bornholmbecken beschränkt. Messungen von RAK (2015, in press) zeigen Anfang Oktober erhöhte Temperaturen im Tiefenwasser des Bornholmbeckens, die auf den Einstrom des wärmeren Wassers im Sommer zurückzuführen sind. Sie weisen jedoch nur geringe Sauerstoffkonzentrationen auf. Anschließend fiel der Pegel Anfang September erneut ab und pendelte bis Ende Oktober um Werte zwischen -20 cm MSL bis 16 cm MSL. Im November erfolgte durch langanhaltende Ostwinde ein intensiver Ausstrom bis auf den Jahrestiefststand von -52,7 cm MSL am Pegel Landsort (03.12.2014). Ab Anfang Dezember setzte starker Südwestwind ein, der anfangs die Wassermassen aus der südlichen Ostsee nach Nordosten schob und einen Niedrigwasserstand in der westlichen Ostsee erzeugte. Ab 13. Dezember drehte der Wind auf westliche Richtungen und es wurden große Mengen salzreiches Nordseewasser in die Ostsee gedrückt. Der Pegel Landsort Norra stieg in 21 Tagen vom 3.-24. Dezember um 101,3 cm an, so dass sich ein Gesamtvolumen von 358 km<sup>3</sup> ergibt. Dabei wurde der Spitzenpegel des Jahres von 48,6 cm MSL am 24.12. erreicht. Nach Berechnungen von MOHRHOLZ et al. (2015) stellt dieses Ereignis den drittgrößten Salzwassereinstrom seit Beginn von Messdaten im Jahr 1880 dar.

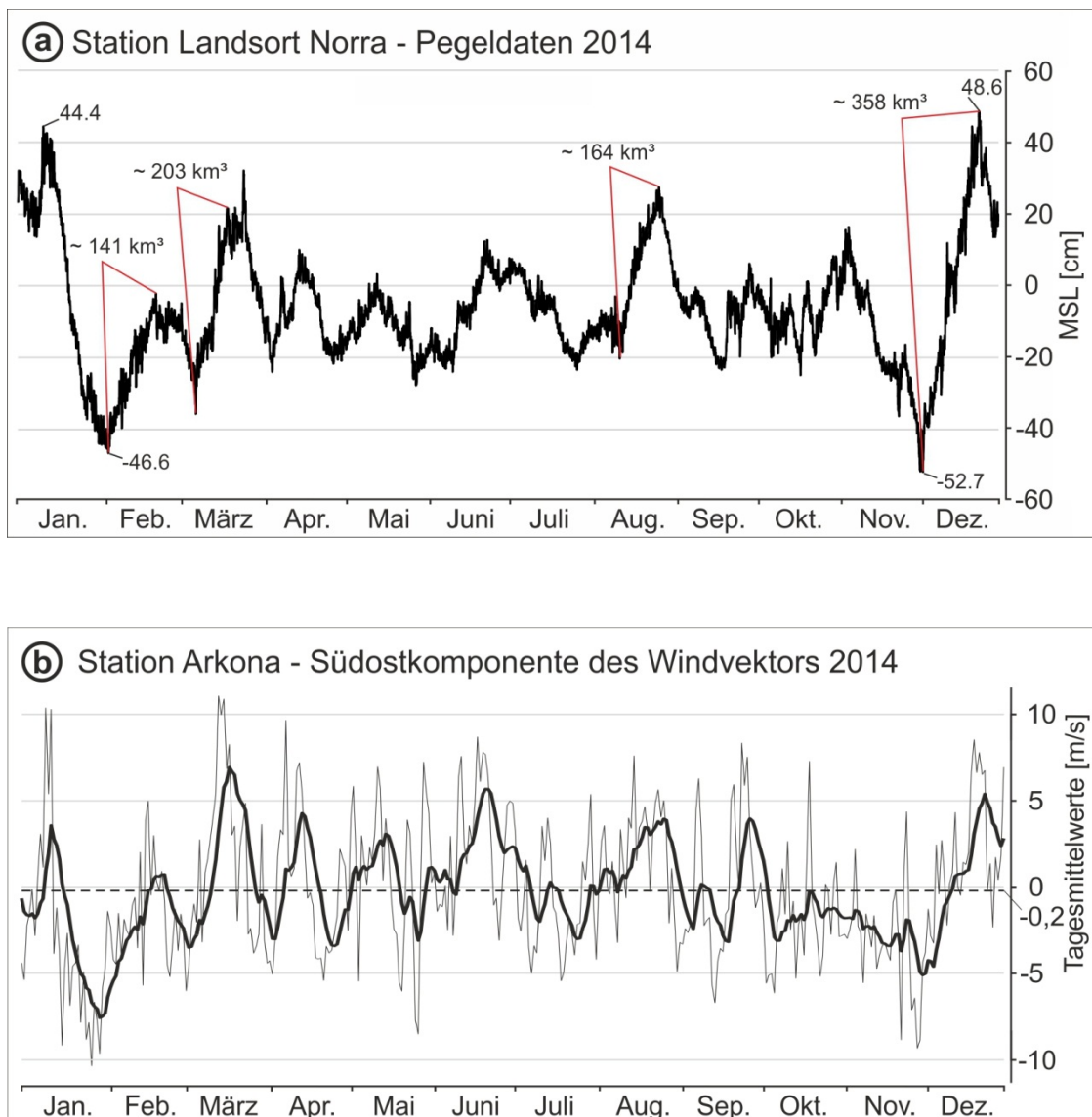


Abb. 7: a) Pegel bei Landsort als Maß für den Füllungsgrad der Ostsee (nach Daten des SMHI, 2015). b) Stärke des Nordwestwindes (positiv) an der Wetterstation Arkona (nach Daten des DWD, 2015). Die fett gezeichnete Kurve entstand durch Filterung mit einem exponentiellen 10-Tage-Gedächtnis

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

Nachdem der Messmast der Station „Darßer Schwelle“ (DS) in den vergangenen Jahren wegen Werftaufenthalt und technischen Schwierigkeiten nur unvollständige Messreihen geliefert hatte, standen im Jahr 2014 wieder komplette und durchgängige Datensätze für Temperatur, Salzgehalt und Sauerstoffkonzentration zur Verfügung. Wie üblich wurden zu den automatischen Sauerstoffmessungen am Messmast vereinzelt Vergleichsmessungen des Sauerstoffgehalts durch Wasserproben aus den Messtiefen der Sensoren mit Hilfe der Winklermethode (vgl. GRASSHOFF et al., 1983) durchgeführt und die Messkurven entsprechend korrigiert.

Messwerte des profilierenden akustischen Strömungsmessers (ADCP) an der Station DS liegen, abgesehen von einer durch Geräteausfall verursachten kurzen Datenlücke vom 18. Oktober bis 3. November, für das Jahr 2014 durchgehend vor.

#### **3.1 Statistische Analyse**

Die statistische Auswertung der Messdaten an der Station „Darßer Schwelle“ bestätigt das Jahr 2014 als außergewöhnlich warmes Rekordjahr: Die Jahresmittelwerte der Wassertemperatur lagen in allen Messtiefen zum Teil deutlich über allen bisher an dieser Position beobachteten mittleren Temperaturen (Tab. 4, Abb. 8). Der bisherige Spitzenwert der mittleren Deckschichttemperatur von 9,99 °C aus dem Jahr 2007 wurde sogar um den spektakulären Wert von 0,6 K übertroffen, womit das Jahr 2014 zum mit Abstand wärmsten des gesamten Aufzeichnungszeitraums gezählt werden muss.

Die Amplitude des Jahresganges, die hier mit Hilfe der Fourieranalyse bestimmt wurde, lag ebenfalls im oberen Bereich des Vergleichszeitraums, erreichte aber trotz der weiter unten beschriebenen hohen Temperaturen in den Sommermonaten keine Rekordwerte (Tab. 5). Grund hierfür waren die noch relativ hohen Wassertemperaturen zum Jahresende und die relativ kurze Dauer des sommerlichen Temperaturmaximums, die den Jahresgang insgesamt etwas abflachten. Dies spiegelt sich auch in den Standardabweichungen der Temperatur wider, die im Wesentlichen von der Amplitude des Jahresganges bestimmt werden (Tab. 4, Abb. 8). Auch hier wurden die höchsten Werte seit Beginn der Aufzeichnungen nicht übertroffen.

Die starke Einstromaktivität des Jahres 2014 zeigt sich am deutlichsten im Mittelwert des Salzgehaltes an der Oberfläche, der, im Gegensatz zu den Aufzeichnungen der bodennahen Sensoren, alle bisher beobachteten Mittelwerte deutlich übertraf (Tab. 4, Abb. 9). Auch die Standardabweichung der Oberflächensalzgehalte, die auch ein Maß für die durch Einströme verursachten Salzgehaltsfluktuationen darstellt, verfehlte den Rekordwert aus dem Jahr



1993 nur knapp. Die besonders in der Deckschicht ausgeprägte Signatur der Einströme des Jahres 2014, insbesondere des Extremereignisses im Dezember, lassen sich durch das außergewöhnlich hohe Einstromvolumen erklären, durch welches die komplette Wassersäule an der Darßer Schwelle erfasst wurde (siehe Diskussion unten).

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

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 ± <b>2,32</b>	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 ± <b>3,97</b>	7,72 ± 4,22	13,64 ± <b>4,39</b>
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	<b>14,71</b> ± 3,80	8,72 ± <b>5,20</b>	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 ± <b>6,34</b>	8,99 ± 1,54	8,40 ± 5,06	14,26 ± 3,92	9,42 ± 4,71	<b>16,05</b> ± 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 ± <b>5,18</b>	-	7,69 ± 5,17	-
2012	-	-	-	-	-	-
2013	-	-	-	-	-	-
2014	<b>10,58</b> ± 5,58	<b>9,71</b> ± 2,27	<b>10,01</b> ± 4,96	13,75 ± 3,53	<b>9,99</b> ± 4,90	14,91 ± 3,40

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

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	<b>4,54</b>	5,84	<b>4,41</b>
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	<b>4,83</b>	–	–	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	<b>7,24</b>	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	<b>8,92</b>	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	<b>7,09</b>	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	–	–	–	–	–	–
2014	7,72	4,43	6,86	4,17	6,77	4,13

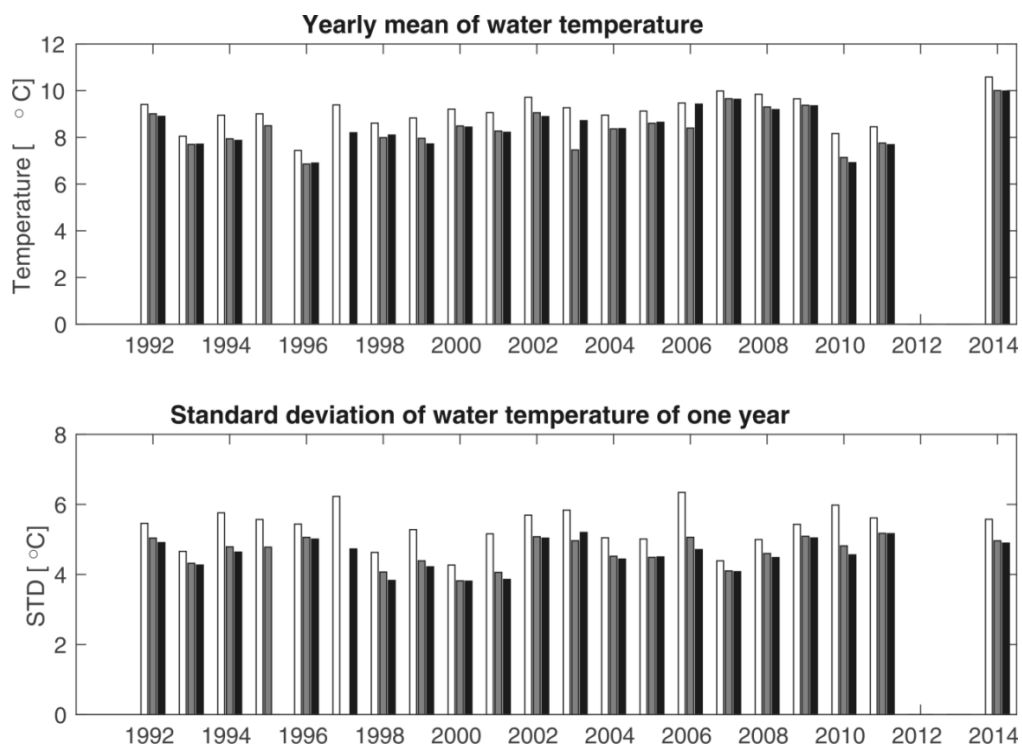


Abb. 8: Jahresmittel und Standardabweichung der Wassertemperatur in der Deckschicht (7 m, helle Säule), und der Bodenschicht (17 m, graue Säule und 19 m, schwarze Säule) auf der Darßer Schwelle

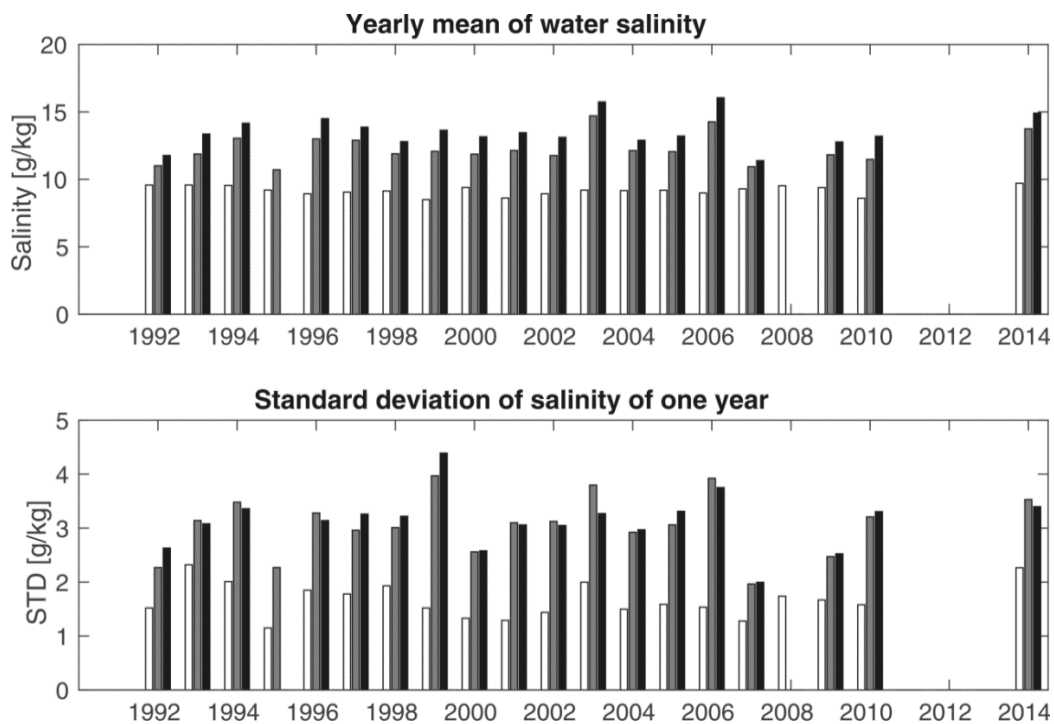


Abb. 9: Jahresmittel und Standardabweichung des Salzgehaltes in der Deckschicht (7 m, helle Säule), und der Bodenschicht (17 m, graue Säule und 19 m, schwarze Säule) auf der Darßer Schwelle

### 3.2 Erwärmungsphase mit Einströmen im Februar und März

Der Verlauf der Wassertemperatur und des Salzgehalts für das Jahr 2014 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 etwa zweiwöchigen Datenlücke ab dem 18. Oktober eine unbekannte Verschiebung enthalten und damit ab diesem Zeitpunkt nicht mehr direkt mit den Messungen der Vorjahre verglichen werden können.

Wie in Kapitel 2 bereits kurz beschrieben, war der Monat Januar von einer ausgeprägten Ostwindlage gekennzeichnet, die sich in den Strömungsmessungen an der Darßer Schwelle durch starke, durchgehend auf Ausstrom gerichtete Geschwindigkeiten in der kompletten Wassersäule während einer etwa dreiwöchigen Periode vom 13. Januar bis 2. Februar spiegelte (Abb. 11). Während dieser Phase wurden Ausstromgeschwindigkeiten von bis zu 0,4 m/s und ein rapides Absinken des Pegels bei Landsort auf den zweittiefsten Stand des Jahres beobachtet (Abb. 7a). Die Wassersäule war komplett durchmischt und durch die nahezu konstanten Oberflächensalzgehalte der westlichen Ostsee (8-9 g/kg) charakterisiert. Aufgrund des hohen Wärmeverlusts an die Atmosphäre (Kapitel 2) sank die Wassertemperatur während dieser Phase kontinuierlich und erreichte in den ersten Tagen des Monats Februar mit etwa 2,2 °C den Jahrestiefstwert.

Mit dem Abklingen der östlichen Winde setzte ab dem 3. Februar die erste kräftige Einstromphase des Jahres ein, die sich an der Darßer Schwelle bis zum 13. Februar zunächst als kontinuierliches, danach als abgeschwächtes und fluktuierendes Geschwindigkeitssignal zeigte. Die Analyse des Pegels bei Landsort ergab ein Einstromvolumen von etwa 140 km<sup>3</sup> während dieses Ereignisses, wobei die Bodensalzgehalte an der Darßer Schwelle auf über 16 g/kg anstiegen (Abb. 10). Ab dem 2. März leiteten östliche Winde dann eine kurze Ausstromphase ein (Abb. 11), die zu einem moderatem Absinken des Pegels führte (Abb. 7a).

Bei auf westliche Richtungen drehenden Winden setzte aber bereits ab dem 8. März wieder Einstrom ein, der um den 15. März mit ungewöhnlich hohen Einstromgeschwindigkeiten von über 0,7 m/s seinen Höhepunkt erreichte und ab dem 19. März langsam abklang (Abb. 11). Die Pegeldata (Abb. 7a) lassen auf ein Einstromvolumen von etwa 200 km<sup>3</sup> schließen und damit auf den zweitstärksten Einstrom des Jahres 2014 (Kapitel 2). Die

Oberflächensalzgehalte erreichten am 22. März Maximalwerte von etwa 17 g/kg, die Bodensalzgehalte sogar über 18 g/kg (Abb. 10). Diese Periode überschneidet sich zeitlich mit dem Einsetzen der Frühjahrsblüte, die sich in den Messungen an der Darßer Schwelle deutlich an den stark übersättigten Oberflächensauerstoffgehalten identifizieren lässt (Abb. 12).

Keines der beiden Einstromereignisse des Frühjahrs 2014 erfüllte die Kriterien für einen „Major Baltic Inflow“. Überraschenderweise zeigten die Beobachtungen des IOW aber eine deutliche Signatur dieser Einströme im Bodenwasser der zentralen Ostsee: Ab Juli 2014 wurde im östlichen Gotlandbecken in einer bodennahen Schicht von 30-40 m Dicke kurzzeitig eine Belüftung des Bodenwassers beobachtet, die einher ging mit einer Reduktion der Phosphatrücklösung und einem Anstieg der Nitratgehalte. Es ist davon auszugehen, dass durch laterale Intrusionen auch in höheren Wasserschichten eine Teiloxidation von Schwefelwasserstoff stattgefunden hat, was bei der Interpretation der Effekte des weiter unten beschriebenen „Major Baltic Inflow“ vom Dezember 2014 in Betracht gezogen werden sollte.

Nach Beendigung des zweiten Frühjahrseinstroms durch eine ausgeprägte Ausstromphase vom 23. März bis 8. April wurden während der Sommermonate bis August keine stärkeren Salzwassereinbrüche mehr beobachtet. Am markantesten in dieser Periode waren zwei kleinere kombinierte Einstromereignisse im Juni (Abb. 11), die durch den Import von warmem Wasser aus dem Kattegat zu einer schlagartigen Erwärmung der bodennahen Wasserschichten führten (Abb. 10) sowie zu einer Erholung der zu Anfang Juni bereits auf unter 60 % Sättigung abgesunkenen Sauerstoffgehalte im Bodenwasser (Abb. 12). Die höchste Deckschichttemperatur des Jahres wurde mit 21,5 °C am 8. August beobachtet; das Maximum der Bodenwassertemperatur von 17,2 °C wurde aufgrund der durch laterale Advektion verursachten Zeitverschiebung erst zum Monatsende erreicht. Aufgrund der hohen Bodenwassertemperaturen in den Sommermonaten (Abb. 10) und des Ausbleibens weiterer relevanter Einströme sanken die Bodensauerstoffgehalte im Juli und August zeitweise bis auf unter 40 % des Sättigungswertes ab (Abb. 12).

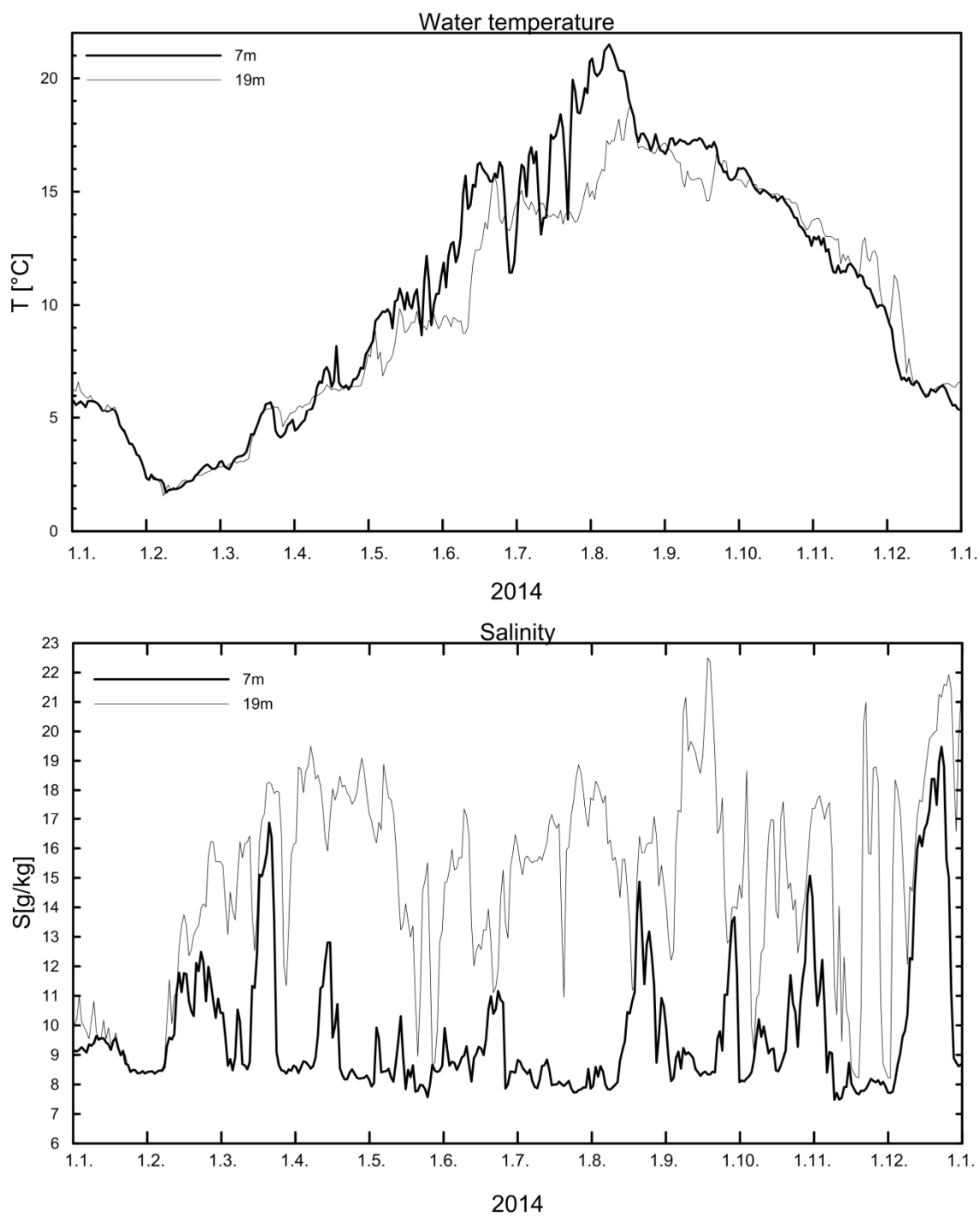


Abb. 10: Verlauf der Wassertemperatur (A) und des Salzgehaltes (B) in der Deck- und Bodenschicht auf der Darßer Schwelle im Jahre 2014

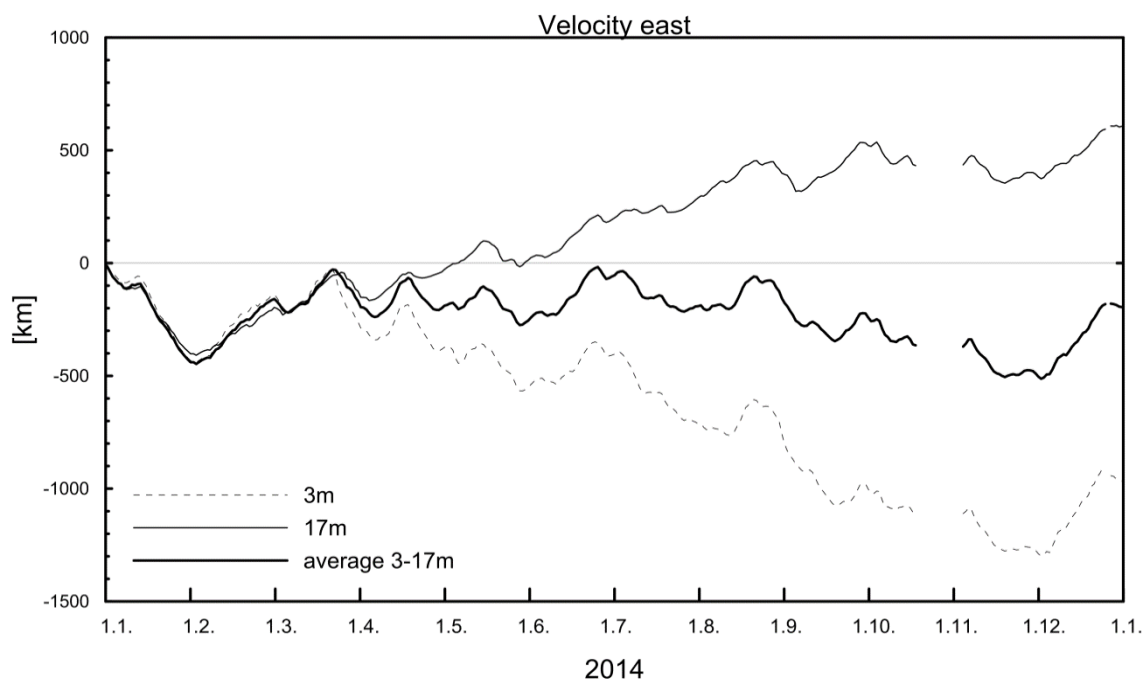


Abb. 11: Ostkomponente der progressiven Vektordiagramme der Strömung in 3 m Tiefe (ausgezogene Linie), der vertikal gemittelten Strömung (dicke Linie) und der Strömung in 17 m Tiefe (gestrichelte Linie) auf der Darßer Schwelle in 2014

### 3.3 Abkühlungsphase mit dem „Major Baltic Inflow“ im Dezember

Bei zunehmenden Winden aus östlicher Richtung begann am 12. August dann simultan mit dem Auftakt der herbstlichen Abkühlphase ein stärkerer Einstrom, der bis zum 21. August anhielt. Im Verlaufe dieses Ereignisses erholte sich die Sauerstoffsättigung im Bodenwasser ab dem 16. August schlagartig von unter 40 % auf über 95 %. In der oberflächenschicht wurden Salzgehalte von über 15 g/kg beobachtet. Interessanterweise wurde am Pegel bei Landsort ein stetiger Anstieg bis zum 27. August gemessen (Abb. 7a), also auch noch fast eine Woche nach Abklingen des Einstroms über die Darßer Schwelle. Strömungsdaten des SMHI zeigen, dass der Pegelanstieg in der letzten Augustwoche auch nicht (wie zunächst vermutet) durch Einstrom über den Öresund erklärt werden kann ([http://www.smhi.se/hfa\\_coord/BOOS/Oresund.html](http://www.smhi.se/hfa_coord/BOOS/Oresund.html)). Es bleibt zu vermuten, dass es sich hierbei um ein transientes, wahrscheinlich durch Windstau verursachtes Phänomen gehandelt hat, das nicht im direkten Zusammenhang mit einströmenden Wassermassen in der westlichen Ostsee stand. Es ist daher anzunehmen, dass das in Kapitel 2 berechnete Einstromvolumen von 164 km<sup>3</sup> (formal der drittgrößte Einstrom des Jahres) die Menge des effektiv eingeströmten Wassers überschätzt. Eine klare Signatur dieses Einstroms wurde zwar im Bornholmbecken (RAK, in press), nicht aber im Bodenwasser der zentralen Ostsee beobachtet.

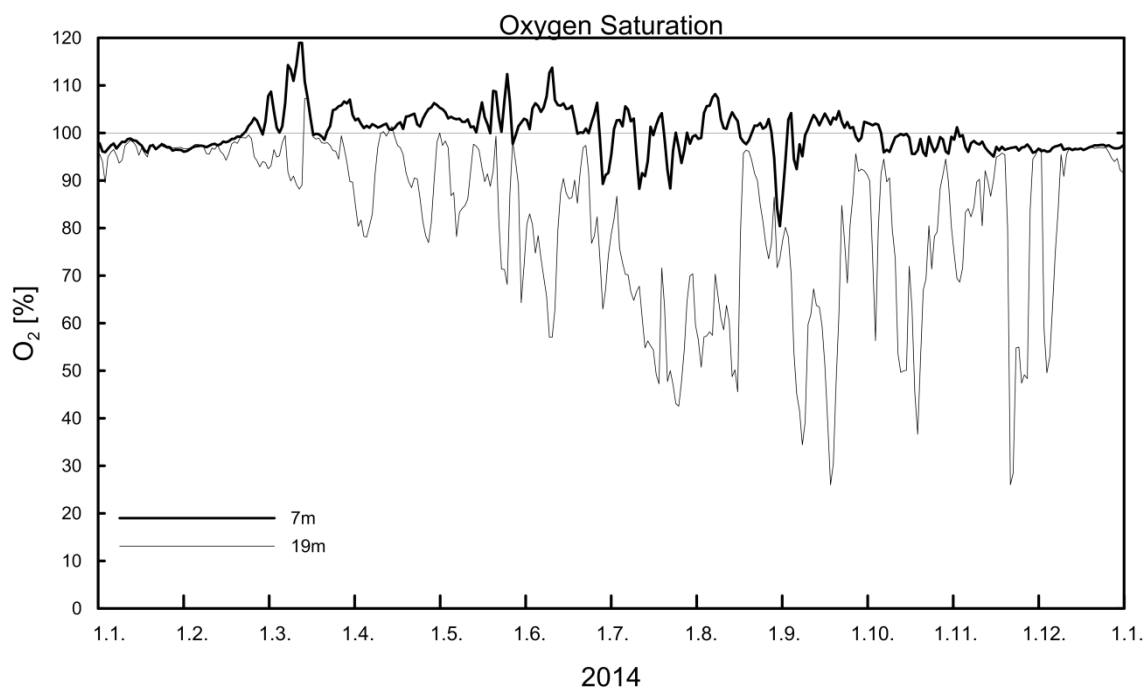


Abb. 12: Verlauf der Sauerstoffsättigung in Deck- und Bodenschicht auf der Darßer Schwelle im Jahre 2014

Nach einer Periode starken Ausstroms (am 31. August wurden in der Deckschicht Ausstromgeschwindigkeiten von 0,85 m/s beobachtet) pegelte sich der Wasserstand bei Landsort in der ersten Septemberwoche bei neutralen Werten ein (Abb. 7a). Am 5. September drehten die Geschwindigkeiten in der Bodenschicht auf Ost (Einstrom), während in den oberflächennahen Schichten weiterhin Ausstrom stattfand (Abb. 11). Diese Tendenz von bodennahem baroklinen (also durch Dichteunterschiede getriebenem) Einstrom und oberflächennahem barotropem Ausstrom hielt, bei kaum variierendem Füllstand der Ostsee, über weite Teile des Monats September an, wie die Spreizung der Pseudotrajektorien in Boden- und Deckschicht in Abb. 11 deutlich zeigt. Am 19. September werden im Bodenwasser mit 23 g/kg die höchsten Salzgehalte des gesamten Jahres beobachtet (Abb. 10). Erst ab diesem Zeitpunkt begannen die Bodensauerstoffgehalte, die mit einem Sättigungsgrad von unter 25 % auf den niedrigsten Wert des Jahres gefallen waren, sich langsam zu erholen (Abb. 12). In der letzten Septemberwoche wurde die barokline Einstromtendenz dann durch einen kurzen, aber kräftigen barotropen Einstromschub verstärkt, der zum Monatsende zu Sauerstoffsättigungen von etwa 90 % im Bodenwasser führte.

Nach einem durch geringe Austauschaktivität über die Schwellen und bei neutralen Werten stagnierendem Pegel gekennzeichneten Monat Oktober startete am 7. November die Vorbereitungsphase für eines der stärksten je beobachteten Einstromereignisse. Zu diesem Zeitpunkt begann eine etwa einmonatige, von lang anhaltenden östlichen Winden angetriebene Ausstromphase, die zwar mehrmals kurz unterbrochen wurde, im Resultat aber zu den niedrigsten Pegelständen des Jahres führte (Abb. 7a). Am 2. Dezember drehte



die Strömung an der Darßer Schwelle bei immer noch östlichen, aber schwächer werdenden Winden auf Einstrom (Abb. 11) und eine lange Phase kontinuierlichen Salzwassereinstroms begann. Zunächst durch Pegeldifferenzen, später durch starke und lang anhaltende westliche Winde getrieben, führte dieser Prozess zu einem Pegelanstieg von etwa 1 m bei Landsort (Abb. 7a), was einem Einstromvolumen von etwa 360 km<sup>3</sup> entspricht.

Wie in Kapitel 2 ausgeführt, reiht sich dieses Ereignis damit als drittstärkster je beobachteter Einstrom in die Aufzeichnungen ein, bzw. als stärkster Einstrom seit 1951. Die Wassersäule an der Darßer Schwelle blieb während dieses Ereignisses leicht geschichtet, wobei die Salzgehalte am 26. Dezember Maximalwerte von 22,2 g/kg am Boden und 15,5 g/kg an der Wasseroberfläche erreichten (Abb. 10). Die Sauerstoffgehalte blieben nahe dem Sättigungswert über die komplette Wassersäule, so dass von einem massiven Import von Sauerstoff auszugehen ist (Abb. 12). Nach dem Stand der bisherigen Abschätzungen und den bis Redaktionsschluss vorliegenden Beobachtungen wird dieses Ereignis von entscheidender Bedeutung für die Entwicklung der Tiefenwassereigenschaften in der zentralen Ostsee in den nächsten Jahren sein.

#### **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 Bornholmkanal 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. Wie schon im Vorjahr lieferte die Station auch im Jahr 2014 wieder vollständige Messreihen von Temperatur, Salzgehalt und Sauerstoffkonzentrationen (letztere wurden wie in Kapitel 3 beschrieben durch gelegentliche 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.

Der in Abb. 13 dargestellte Jahresgang der Deckschichttemperatur zeigt, dass die niedrigsten Temperaturen des Jahres mit 2,4 °C (Tagesmittelwert) am 7. Februar gemessen wurden. Dieser Wert lag damit deutlich über dem Minimalwert von 0,9 °C des Vorjahres, der nach einer ungewöhnlich späten Kältephase erst am 23. März erreicht wurde. Im Gegensatz hierzu zeigten die oberflächennahen Temperaturen des Jahres 2014 bereits ab Mitte Februar einen ansteigenden Trend, dem die Temperaturen in der Bodenschicht aufgrund der Einstromaktivität (siehe Kapitel 3) mit einer Verzögerung von etwa 3 Wochen folgten. Am Ende der ab März verstärkt einsetzenden Erwärmungsphase wurde in der Deckschicht am 8. August mit 22 °C der höchste Tagesmittelwert des Jahres erreicht. Dieser Wert liegt ca. 1 °C über dem bereits hohen Wert des Vorjahres, was den Ausnahmecharakter des Jahres 2014 weiter unterstreicht.

Die herbstliche Abkühlungsphase setzte unmittelbar nach diesem Temperaturmaximum ein, und bereits am Ende des Monats August betragen die Deckschichttemperaturen nur noch knapp über 17 °C. Nach weiterer kontinuierlicher Abkühlung in den folgenden Herbstmonaten wurden zum Jahresende in der Deckschicht mit 6,3 °C immer noch Temperaturen beobachtet, die 1-2 °C über den Jahresendwerten der beiden Vorjahre lagen. Die Temperaturen in der Bodenschicht folgen dem Abkühlungstrend in der zweiten Jahreshälfte verzögert und in Sprüngen, verursacht durch die sukzessive Ankunft von kalten und salzreichen Wassermassen im Verlauf der in Kapitel 3 beschriebenen Einstromereignisse. Am markantesten ist dabei der Temperatureinbruch von mehr als 5 °C in der Bodenschicht als Resultat des „Major Baltic Inflow“ im Dezember.

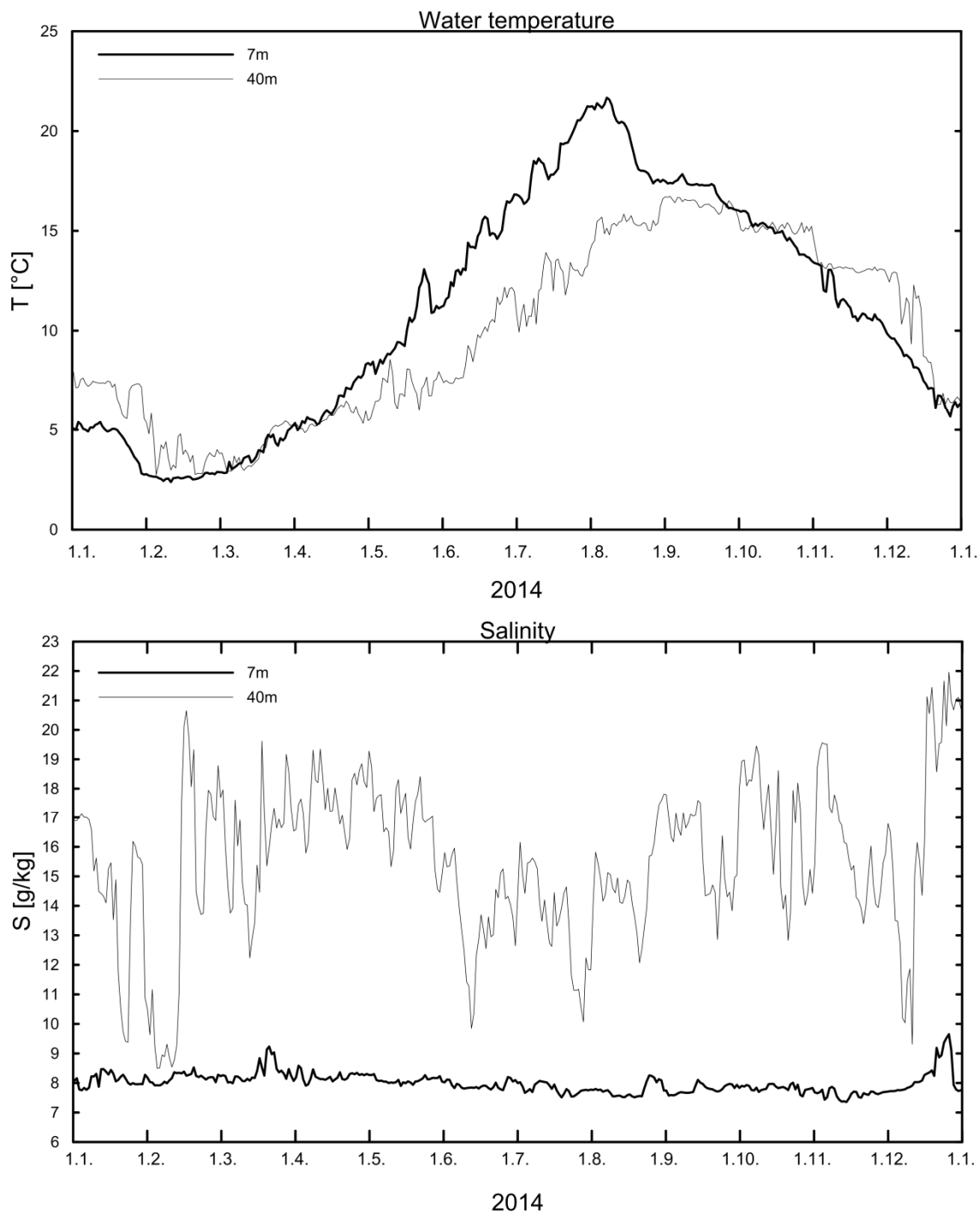


Abb. 13: Verlauf der Wassertemperatur (A) und des Salzgehaltes (B) in der Deck- und Bodenschicht im Arkonabecken (Station AB) im Jahr 2014

Ebenso wie die Oberflächentemperaturen zeigten auch die Sauerstoffgehalte in der Deckschicht (Abb. 14) ein klares saisonales Signal. Bereits Ende Februar, also einen Monat früher als im Vorjahr, überstiegen die Sättigungswerte erstmalig die Marke von 100 Prozent und wiesen damit auf stark erhöhte Photosyntheseraten und Primärproduktion im Rahmen der beginnenden Frühjahrsblüte hin. Die höchsten Sauerstoffkonzentrationen des Jahres 2014 wurde am 13. März erreicht, als nach einigen Tagen besonders ruhigen und sehr

sonnigen Wetters bis zu 115 % Sättigung in der Deckschicht beobachtet wurden. Aufgrund stärker werdender Winde und einbrechender Deckschichttemperaturen sanken die Sättigungsraten ab dem 11. August, simultan mit dem Beginn der oben beschriebenen herbstlichen Abkühlungsphase, schließlich wieder auf unter 100 % ab, fluktuierten dann bis Anfang November um das Sättigungsniveau und fielen in den letzten beiden Monaten des Jahres nochmals leicht auf die typischen Winterkonzentrationen von ca. 95 % der Sättigungsgrenze.

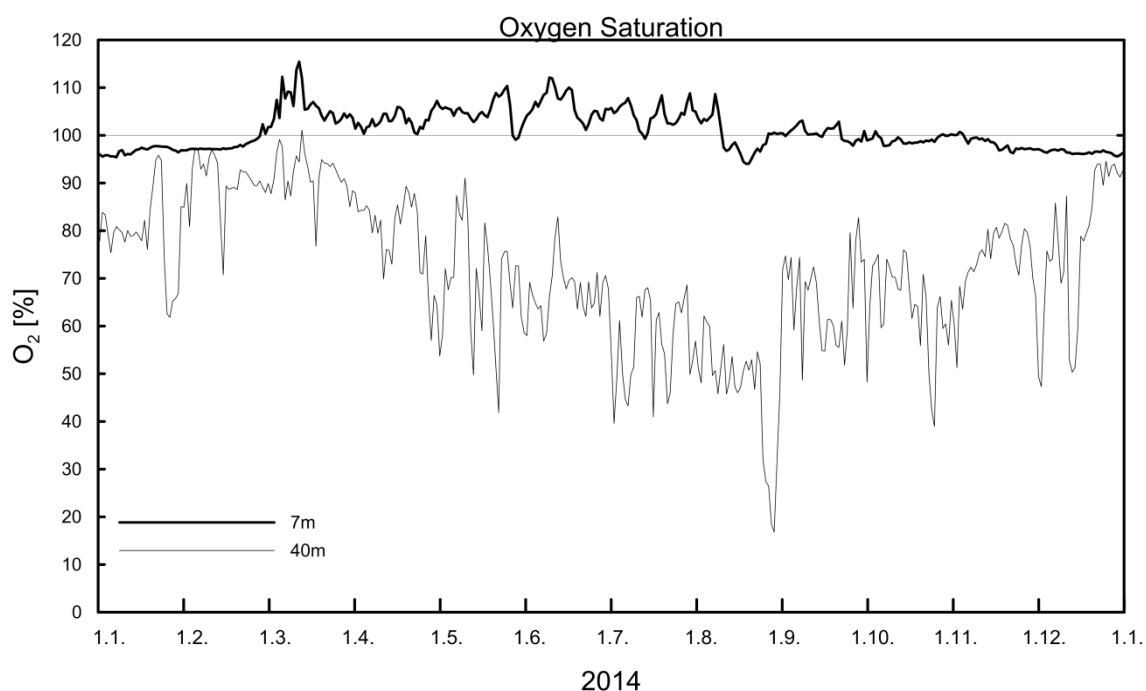


Abb. 14: Verlauf der Sauerstoffgehaltes in der Deck- und Bodenschicht im Arkonabecken (Station AB) im Jahr 2014

Die Signatur der beiden moderaten Einströme im Februar und März (siehe Kapitel 3) zeigte sich deutlich im Bodenwasser, wo die Salzgehalte ab der zweiten Februarwoche innerhalb weniger Tage auf über 20 g/kg anstiegen (Abb. 13). Die nicht dargestellten Daten der zusätzlichen Sensoren in 40 m, 33 m und 25 m Tiefe deuten darauf hin, dass durch diese Einströme im Arkonabecken ein salzreicher Pool von Bodenwasser gebildet wurde, dessen Dicke 15-20 m betragen haben dürfte. Die Sauerstoffgehalte im Bodenwasser sind in diesem Zeitraum hoch, beginnen aber wegen Ausbleibens weiterer relevanter Einströme und der vorangegangenen Frühjahrsblüte in der Deckschicht ab Mitte März kontinuierlich abzusinken.

Aufgrund der schwachen, aber kontinuierlichen Einstromtendenz sanken die Bodensauerstoffgehalte bis in die letzte Augustwoche allerdings nicht unter die Grenze von 40% Sättigung. Die niedrigsten Sauerstoffgehalte des Jahres (unter 17 % Sättigung) wurden interessanter Weise am 29. August beobachtet (Abb. 14), also zu einem Zeitpunkt, als die Wassermassen des in Kapitel 3 beschriebenen Einstromereignisses im August begannen,

das Arkonabecken zu erreichen. Abb. 13 zeigt, dass die Salzgehalte im Tiefenwasser bereits ab dem 23. August auf einströmendes Salzwasser hinwiesen, während die Sauerstoffgehalte gleichzeitig stark einbrachen. Dies deutet darauf hin, dass der erste Puls des Augusteinstroms, vermutlich aufgrund von Zehrungsprozessen in den Dänischen Straßen, nahezu anoxische Wassermassen mit sich brachte. Im weiteren Verlauf dieses Ereignisses trafen aber immer sauerstoffreichere Wassermassen im Arkonabecken ein und führten dort zu einer nachhaltigen Erholung der Sauerstoffkonzentrationen am Boden. Dieser Trend wurde durch den oben beschriebenen, hauptsächlich baroklin getriebenen Septembereinstrom fortgesetzt, wobei aber der Pool an salzreichem Bodenwasser im Arkonabecken eine Dicke von etwa 10 m nie überstieg.

Bis zum Beginn der in Kapitel 3 beschriebenen Ausstromphase, die den großen Einstrom im Dezember vorbereitete, fluktuierten die Sauerstoffgehalte in der Bodenschicht dann um Werte von etwa 60-70 % Sättigung. Im Verlauf der Ausstromphase wurde der Wasserkörper des Arkonabeckens dann sukzessive durch nachströmendes Wasser aus den Bornholmbecken ersetzt, was sich, wie in Abb. 13 und 14 sichtbar, in einer Verringerung des Salzgehaltes und einem leichten Anstieg der Sauerstoffkonzentrationen äußerte. Am Ende der Ausstromphase betrug der Bodensalzgehalt in 40 m Tiefe nur noch 10-11 g/kg und nur der mit 43 m Tiefe am bodennahesten gelegene (und in Abb. 13 nicht gezeigte) Sensor wies noch auf Reste salzreichen Bodenwassers mit Salzgehalten von über 14 g/kg hin.

Das Signal des am 2. Dezember an der Darßer Schwelle beginnenden „Major Baltic Inflow“ (siehe Kapitel 2 und 3) erreichte das Bodenwasser an der Messstation im Arkonabecken am 11. Dezember. Anhand der fünf tiefsten Sensoren, von denen nur der Sensor in 40 m Tiefe in Abb. 13 dargestellt ist, lässt sich das Auffüllen des Beckens mit einströmendem Salzwasser im Detail nachverfolgen. So wurde die Marke von 20 g/kg bei den Salzgehalten in 43 m, 40 m und 33 m Tiefe jeweils am 13., 17. und 26. Dezember durchbrochen, was insgesamt auf eine Schicht sehr salzhaltigen Wassers von mindestens 10 m Dicke hinweist (die höchsten Bodensalzgehalte lagen im Tagesmittel bei knapp 23 g/kg). Bei den höher gelegenen Messsensoren in 25 m und 16 m Tiefe wurden derart hohe Salzgehalte zwar nicht beobachtet, aber auch hier kam es zu einem deutlichen Anstieg, bei dem der Wert von 15 g/kg jeweils am 21. und 22. Dezember überschritten wurde. Selbst in der Deckschicht stiegen die Salzgehalte von 7,5-8 g/kg vor dem Einstrom auf 9-9,5 g/kg zu dessen Ende an.

Ab dem 26. Dezember beginnen die Salzgehalte in 16 m Tiefe dann aufgrund des Abflusses durch den Bornholmkanal wieder zu sinken und erreichen die Standardwerte von 7,5 g/kg bereits zum Jahresende. An den tiefer liegenden Sensoren (25 m und tiefer) wurden zu diesem Zeitpunkt immer noch Salzgehalte von mehr als 18 g/kg beobachtet, allerdings mit fallender Tendenz. Das abströmende Wasser ist neben den hohen Salzgehalten vor allem durch Sauerstoffkonzentrationen von über 90 % des Sättigungswertes und vergleichsweise niedrigen Temperaturen von 6-6,5 °C charakterisiert, was bei der Verfolgung der abströmenden Wassermassen in den östlicher gelegenen Becken im Folgejahr hilfreich sein dürfte.

## 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 durchmisches Wasser aus der Pommerschen Bucht, dem sich ein geringer Anteil von Oberflächenwasser aus dem Arkonabecken beimischt, beobachtet. Während anhaltender Ostwindlagen strömt Wasser aus dem Oderhaff durch Swina und Peenestrom in die Pommersche Bucht und schichtet sich vor der Küste Usedom über das Buchtwasser. Wie unten dargestellt, haben diese Prozesse einen wichtigen Einfluss auf die Primärproduktion und den Sauerstoffhaushalt in der Pommerschen Bucht.

Die Bojenstation „Oder Bank“ befindet sich annähernd 5 km 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 18. Dezember des Vorjahres war die Bojenstation zum Transport in ihr Winterquartier eingeholt worden und ging nach der Winterpause erst wieder am 22. Mai 2014 in Betrieb. Seit diesem Zeitpunkt lieferte die Station dann durchgehende Datenreihen von allen Parametern bis sie am 16. Dezember, wie schon im Vorjahr, zur Vermeidung potentieller Risiken durch Eisgang eingeholt wurde.

Die Temperaturen und Salzgehalte der Messstation sind in Abb. 15, die zugehörigen Sauerstoffmessungen in Abb. 16 aufgetragen. Bemerkenswert in den Temperaturzeitreihen sind besonders die hohen Deckschichttemperaturen des Jahres 2014, die während der hochsommerlichen Wärmephase im Juli und August an die Temperaturen des bereits außergewöhnlich warmen Vorjahres heranreichten. So stagnierte die Deckschichttemperatur Anfang August bei heißem Sommerwetter und geringen Windgeschwindigkeiten über eine Periode von mehr als 10 Tagen über dem Wert von 22 °C, der in durchschnittlichen Jahren selbst kurzzeitig nicht erreicht wird. Der höchste Tagesmittelwert wurde mit 22,5 °C am 8. August gemessen, die Stundenmittelwerte überschritten am Nachmittag des 6. August sogar die Marke von 23 °C. Damit wurden die Höchstwerte des Rekordjahres 2010 und des ebenfalls außergewöhnlich warmen Vorjahres knapp übertroffen.

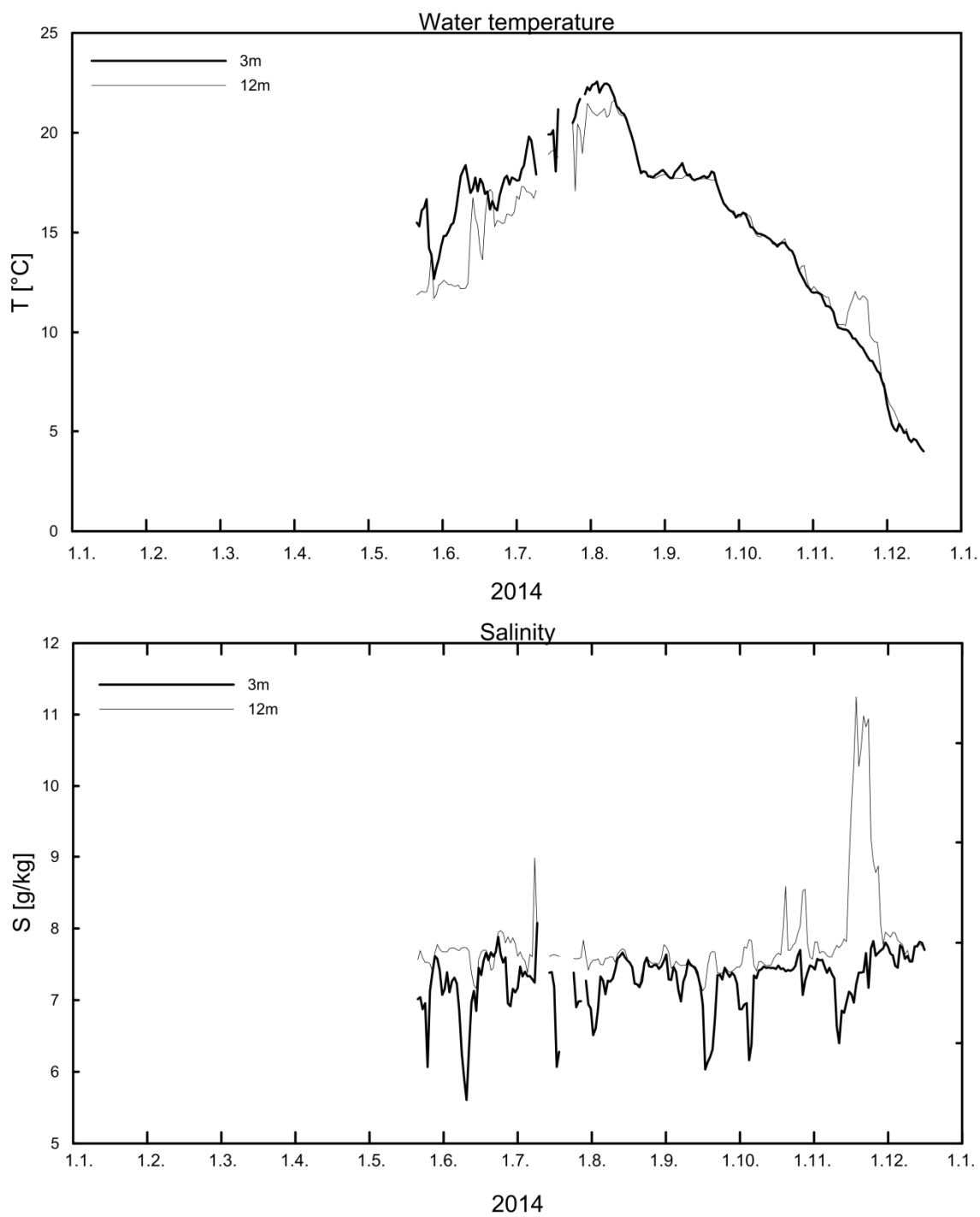


Abb. 15: Verlauf der Wassertemperatur (A) und des Salzgehaltes (B) in der Deck- und Bodenschicht in der Pommerschen Bucht (Stat. OB) im Jahr 2014

Ein wichtiger dynamischer Grund für die starke Erwärmung der Deckschicht in der Oderbucht liegt in der Unterdrückung 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 Deckschichttemperaturen. In den Jahren 2007 und 2010 hatten besonders ausgedehnte Schichtungsereignisse dieser Art außerdem zu einer starken Reduktion der bodennahen Sauerstoffgehalte geführt.

Besonders ausgeprägte Ereignisse dieser Art wurden im Jahr 2014 in den Monaten Juni, August, September und Oktober beobachtet. So fiel am 11. Juni der Salzgehalt der Deckschicht, der typischerweise nur schwach um einen Mittelwert von etwa 7,5 g/kg fluktuiert, durch die Aufsichtung von Wasser aus dem Oderhaff auf 5,6 g/kg, während die Deckschichttemperatur simultan auf 18,4 °C anstieg (Abb. 15). Auffrischende Winde mit Windgeschwindigkeiten bis 10 m/s beendeten dieses Ereignis in den Folgetagen durch Durchmischung. In den ersten Augusttagen bereitete ein etwas schwächer ausgeprägtes Ereignis dieser Art dann das physikalische Umfeld für das Erreichen der oben beschriebenen Rekordtemperaturen in der Deckschicht. Bei den herbstlichen Aufsichtungen von Haffwasser am 17. September und am 5. Oktober kam es ebenfalls zu einer deutlichen Reduktion der Deckschichtsalzgehalte auf jeweils etwa 6 g/kg, wobei aufgrund der bereits stark reduzierten solaren und atmosphärischen Wärmezufuhr allerdings keine signifikante Erhöhung der Deckschichttemperaturen beobachtet werden konnte (Abb. 15).

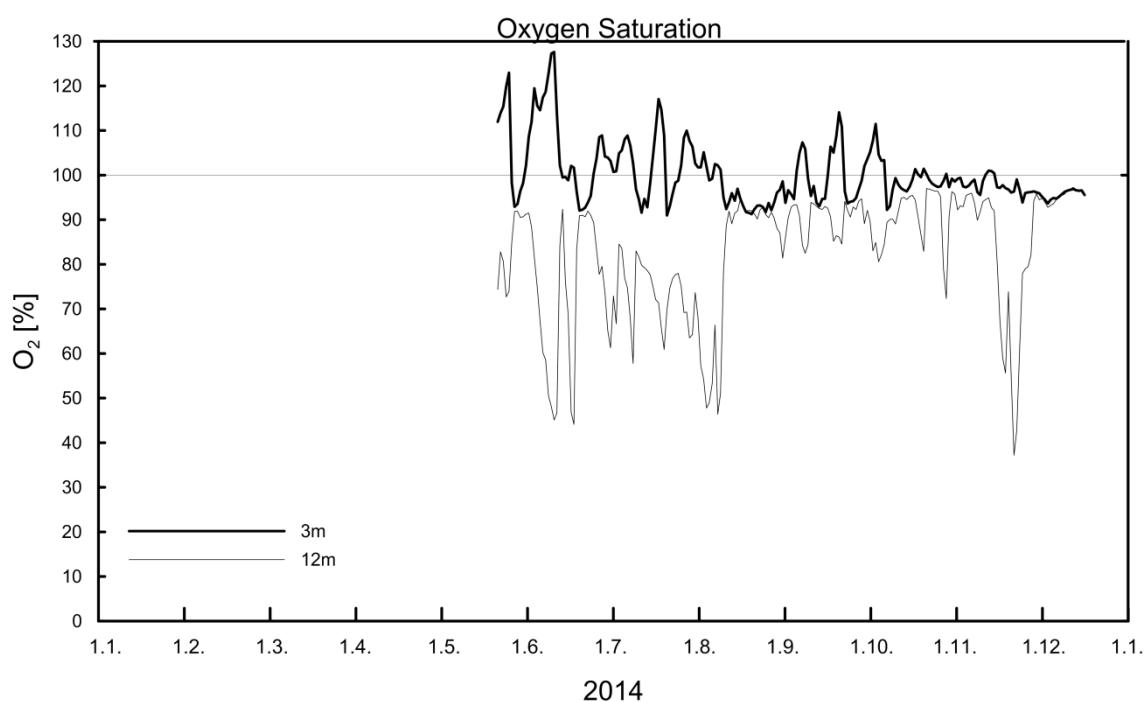


Abb. 16: Verlauf der Sauerstoffgehalte in der Deck- und Bodenschicht in der Pommerschen Bucht (Stat. OB) im Jahr 2014



Die aus ökologischer Sicht weitaus wichtigste Konsequenz 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. So fallen bei den oben beschriebenen Sommerereignissen im Juni und Anfang August die Bodensauerstoffgehalte jeweils auf etwa 45 % Sättigung, während bei den Herbstereignissen die Zehrungsraten bereits zu gering waren, um zu einer markanten Reduktion zu führen. Insgesamt wurden die niedrigen Sauerstoffkonzentrationen in den Sommermonaten der Vorjahre oder gar die anoxischen Zustände des „Rekordjahres“ 2010 (NAUSCH et al. 2011a) allerdings nicht erreicht.

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 werden mit dem Haffwasser auch hohe Nährstoffkonzentrationen 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.

Bemerkenswerterweise wurden die mit 37 % Sättigung niedrigsten Sauerstoffgehalte des Jahres am 21. November beobachtet (Abb. 16), also zu einem Zeitpunkt, an dem aufgrund herbstlicher Vermischungsprozesse und durch niedrige Wassertemperaturen und nur noch marginale Primärproduktion stark reduzierter Zehrungsraten die Sauerstoffgehalte am Boden typischerweise nahe der Sättigungsgrenze liegen. Gleichzeitig stiegen die Temperaturen und Salzgehalte in der Bodenschicht stark an (Abb. 15). Letztere erreichten Werte von 11 g/kg, wie sie im Bereich der flachen Oderbank nur extrem selten beobachtet werden.

Zur Erklärung dieses seltenen Phänomens ist es hilfreich, sich ins Gedächtnis zu rufen, dass der Monat November durch eine von Ostwindlagen getriebene Ausstromtendenz charakterisiert war. Auch in den Tagen vor dem oben beschriebenen Ereignis wurden starke östliche Winde über dem Arkonabecken beobachtet, was folgende physikalische Erklärung nahelegt: Gemäß der klassischen Theorie von Ekman findet aufgrund der Erdrotation bei östlichen Winden ein nach Norden gerichteter Transport in der Deckschicht statt. Im Bereich der südlichen Küste des Arkonabeckens ist dieser sogenannte „Ekman-Transport“ also weg von der Küste gerichtet und impliziert dadurch ein kompensierendes Aufquellen von Wassermassen aus tieferen Schichten. Dieser „Küstenauftrieb“ führte im vorliegenden Fall

zu einem bodennahen Transport von salzreichen, warmen und sauerstoffarmen Wassermassen aus den mittleren Tiefen des Arkonabeckens in den Bereich der Messstation OB. Zusätzliche Sauerstoffzehrung in dieser durch starke Dichteschichtung von direkter atmosphärischer Belüftung isolierten Bodenschicht dürfte dann zu den beobachteten niedrigen Sauerstoffkonzentrationen beigetragen haben. Nach Abklingen der Ostwindphase sank diese salzreiche Bodenschicht aufgrund ihrer hohen Dichte wieder ab und verschwand damit aus dem Bereich der Messsensoren der Station OB (Abb. 15 und 16).

## **6. Hydrographisch- hydrochemische Bedingungen**

### **6.1. Wassertemperatur**

#### **6.1.1 Die Wasseroberflächentemperatur der Ostsee im Jahr 2014**

Die Entwicklung der Wasseroberflächentemperatur (SST) der Ostsee wurde im Jahr 2014 auf der Grundlage von Satellitendaten der amerikanischen NOAA- und der europäischen MetOp-Wettersatelliten erarbeitet. Bis zu 8 tägliche Satellitenszenen wurden durch das BSH Hamburg bereitgestellt. Die Auswerteverfahren und methodische Untersuchungen sind bei SIEGEL et al. (2008) diskutiert. Die jährliche Einschätzung der Entwicklung der SST der Ostsee ist bei NAUSCH et al. 2014 und in den HELCOM Environment Fact Sheets (SIEGEL & GERTH, 2014) zusammengefasst. Betrachtungen zur Langzeitentwicklung der SST seit 1990 sind bei SIEGEL et al. (1999, 2006, 2009) und SIEGEL & GERTH (2010) dargestellt. Zur Interpretation wurden die Wärme- und Kältesummen der Lufttemperatur von Warnemünde (Tab. 2) sowie Daten der MARNET Stationen (BSH/IOW) und des Internen Messnetzes Küste MV des StALU MM Rostock herangezogen.

2014 war das wärmste Jahr seit 1990 und lag mit ca. 1,2 K über dem Mittelwert der Periode 1990-2014 und 0,4 K über dem bisher wärmsten Jahr 2008. Dazu haben außer Februar und Juni alle Monate und insbesondere die Monate Juli und August in der nördlichen Ostsee beigetragen. Die westliche Ostsee lag außer im Februar in allen Monaten +1 bis +3 K über den langjährigen Mittelwerten.

Nach mildem Beginn des Jahres sorgte ein Kälteeinbruch ab ca. 20.01.2014 für eine starke Abkühlung bis Anfang Februar. Trotzdem lag das Januar- Monatsmittel +2 K über den Mittelwerten (1990-2014) und der Januar war nach 2007 der zweitwärmste in der westlichen Ostsee. Der Februar lag im Bereich der langjährigen Mittelwerte und war in der Arkonasee und im Bottnischen Meerbusen der kälteste Monat des Jahres. Der 4. Februar war der kälteste Tag in der gesamten Ostsee und der 6. Februar der Tag maximaler Eisbedeckung. Der März entwickelte sich wie üblich zum kältesten Monat des Jahres in der Gotlandsee. Von März bis Mai waren in der gesamten Ostsee und sogar von März bis Dezember im westlichen Teil Anomalien von +1 bis +3 K zu verzeichnen. Der Juni war der einzige Monat mit beckenweiten negativen Anomalien von -1 bis -2 K in der zentralen und nördlichen Ostsee. Der Juli war nur in der Mecklenburger Bucht der wärmste Monat, ansonsten der August. Der

wärmste Tag war der 28. Juli mit Temperaturen von 21-25 °C. Die untypische gleichmäßige Temperaturverteilung in der gesamten Ostsee im Juli und August hat in der nördlichen Ostsee zu hohen Anomalien von bis zu +5 K im Juli geführt. Der Juli 2014 war der absolut wärmste seit 1990. Die Monate Oktober und November waren mit Anomalien von bis zu +3 K die jeweils wärmsten in der westlichen Ostsee.

Die Kälte- und Wärmesummen der Lufttemperatur von Warnemünde (Tab. 2, Kapitel 2) geben Aufschluss über die Strenge des Winters und den Verlauf des Sommers. Mit einer Kältesumme von 66 K d gehörte der Winter 2013/14 zu den wärmsten Wintern seit 1948. Diese Kältesumme entfiel auf den Monat Januar, der damit wesentlich kälter war als das langjährige Januarmittel von 39,1 K d. Die übrigen Wintermonate waren mit +2 bis +3,5 K zu warm. Die Wärmesumme des Sommers 2014 lag mit 236,9 K d nur knapp über den Werten des Vorjahres (230,4 K d), aber weit über dem langjährigen Mittelwert (150 K d). Die Monate Mai und Juni bis Oktober lagen über den langjährigen Mittelwerten, wobei der Juli mit 117,7 K d (56,4 K d) insbesondere zu der Wärmesumme beitrug.

Die generelle Entwicklung der SST wird anhand der Monatsmittel diskutiert. Die Anomalien der Monatsmittel des Jahres 2014 sind für die gesamte Ostsee in Abb. 17 dargestellt.

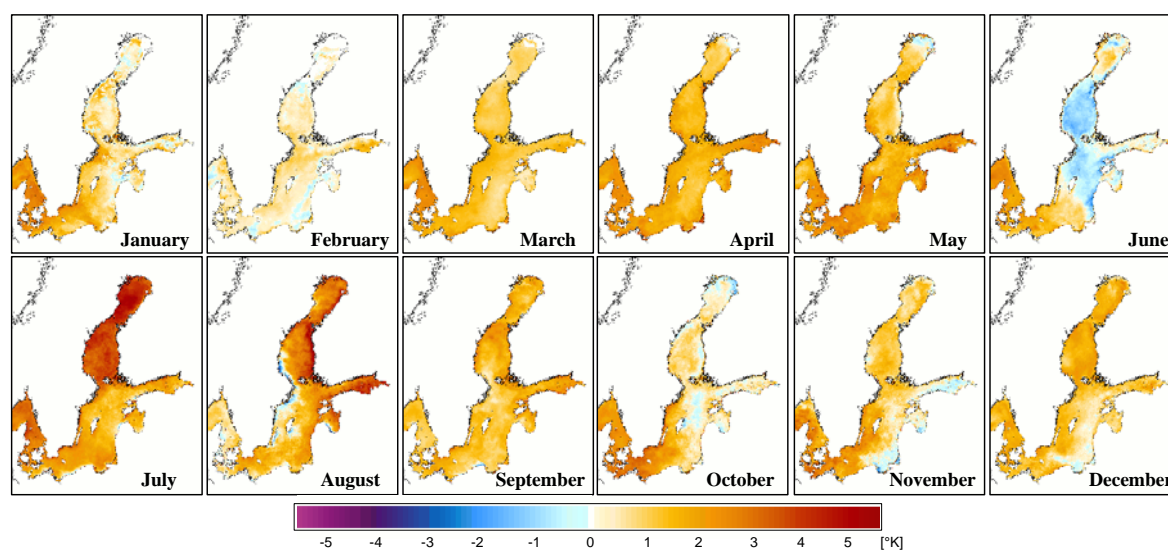


Abb. 17: SST- Anomalien der Monatsmitteltemperatur der Ostsee im Jahre 2014 bezogen auf die langjährigen Mittel 1990-2014

Der saisonale Verlauf der Monatsmitteltemperatur in den zentralen Bereichen der Arkona-, Gotland- und Bottensee ist im Vergleich zu den langjährigen Monatsmittelwerten der Periode 1990-2014 in Abb. 18 dargestellt. Die detaillierte Beschreibung der Temperaturentwicklung erfolgt anhand von Tagesmittelwerten der SST, die hier nicht präsentiert werden.

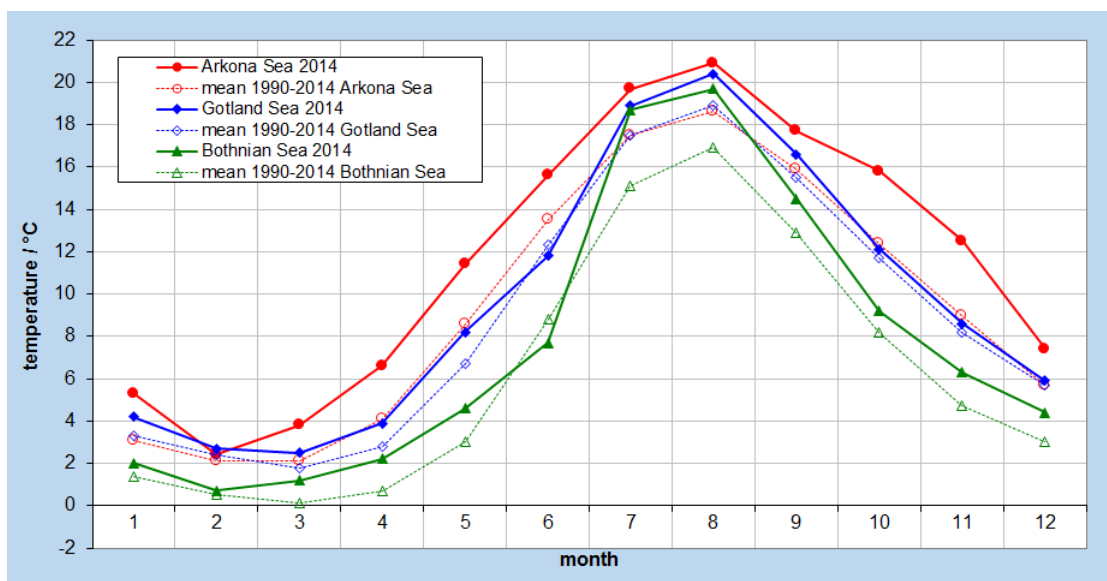


Abb. 18: Saisonaler Verlauf der Wasseroberflächentemperatur in der zentralen Arkona-, Gotland- und Bottensee des Jahres 2014 im Vergleich zum jeweiligen 25-Jahresmittel (1990-2014)

Nach vergleichsweise milder, erster Januarhälfte in der westlichen Ostsee mit SSTs um 5 °C setzte ein Kälteeinbruch ab ca. 20.01.2014 (siehe Kältesummen der Lufttemperatur) ein, der für eine starke Abkühlung bis Anfang Februar auf ca. -0.5 °C in der Pommernbucht, 1-2 °C in der Mecklenburger Bucht und 2-3 °C in der Arkonasee am 4.02. sorgte (Abb. 19). Das war gleichzeitig auch der kälteste Tag in den deutschen Küstengewässern und in der gesamten Ostsee. Der 6.02. wird in der gesamten Ostsee als Tag der maximalen Eisbedeckung geführt (SCHMELZER & HOLFORT, 2014). Trotz der Abkühlung zeigen die Anomalien der Januar-Monatsmittel +2 K. Dadurch war der Januar 2014 nach 2007 der zweitwärmste Januar der letzten 25 Jahre in der westlichen Ostsee. Die Anfang Februar erreichten Temperaturen blieben weitgehend bis Ende des Monats erhalten, wodurch der Februar im Bereich der langjährigen Mittelwerte lag und in der Arkonasee und in der Bottensee der kälteste Monat des Jahres war. In der Folgezeit sorgte eine windbedingte Durchmischung für eine leichte Abkühlung in der Arkonasee, die flacheren Gebiete erwärmten sich leicht und das Eis ging zurück.

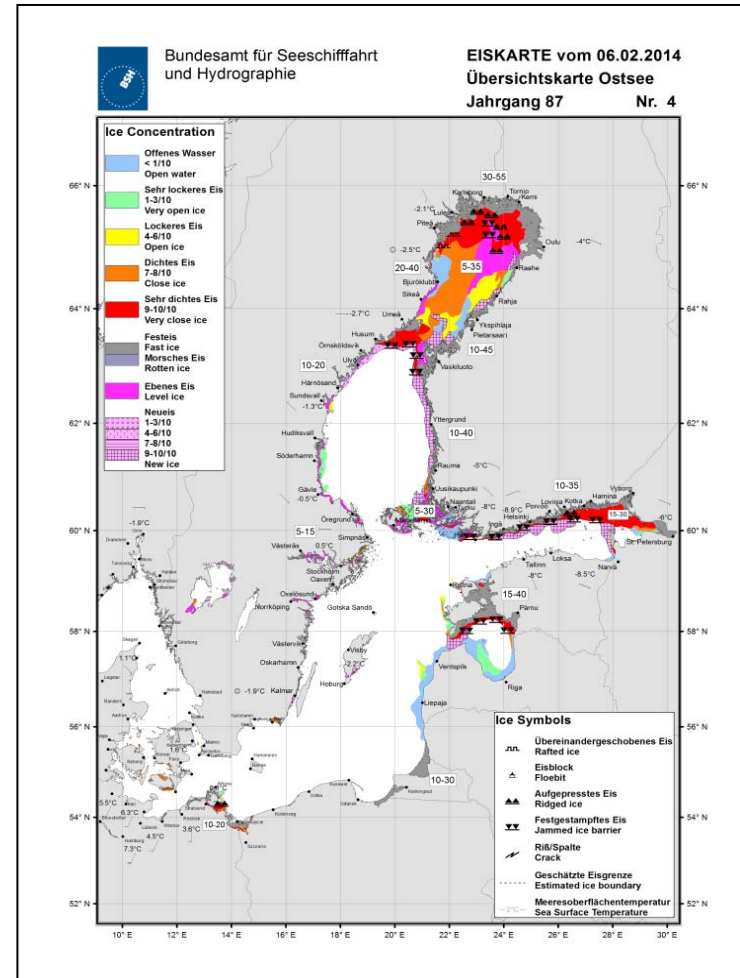
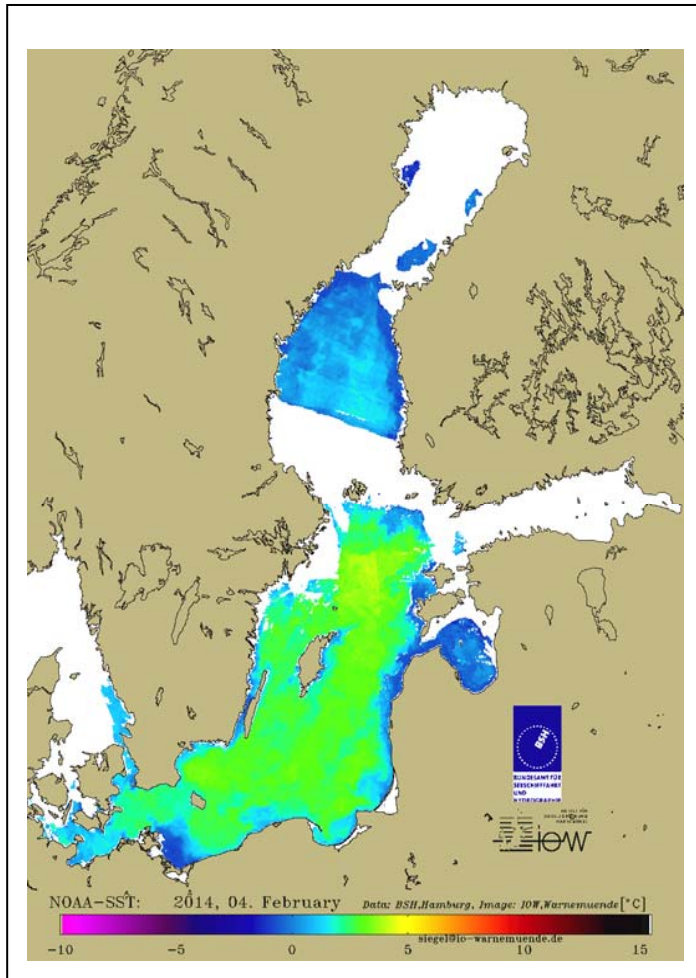


Abb. 19: SST der Ostsee am 04. Februar (der kälteste Tag) und Eiskarte vom 6. Februar (Tag der maximalen Eisbedeckung) 2014

Ab Mitte Februar setzte eine leichte Erwärmung ein, die Ende des Monats zu Temperaturen von 2-3 °C führte. Der März war durch einen ziemlich gleichmäßigen Anstieg mit kurzen Stagnationsphasen gekennzeichnet. Ende des Monats waren 4-5 °C in der gesamten westlichen Ostsee, 3-5 °C in der zentralen Ostsee bis zur Gotlandsee und 0,5-2 °C im Bottnischen und Finnischen Meerbusen erreicht. Von März bis Mai verzeichnete die gesamte Ostsee Anomalien von +1 bis +3 K. Das führte dazu, dass wie üblich die Gotlandsee im März am kältesten war. In der westlichen Ostsee blieben die Anomalien ähnlich über das gesamte Jahr erhalten und überstiegen die +2 K im Oktober und November. Die Erwärmung setzte sich im April weiter fort, ohne dass es starke windbedingte Durchmischungen gab, die in den Vorjahren häufig zu starken SST-Schwankungen geführt hatten. In den flachen Gebieten der Mecklenburger Bucht, der Pommerschen Bucht und in der Gdanskener Bucht wurden Ende des Monats schon teilweise 10 °C erreicht. In den zentralen Bereichen der westlichen Ostsee lag die SST bei 7-8 °C und der zentralen Ostsee bei 5-7 °C. In der nördlichen Ostsee wurden auch schon 2-4 °C registriert. Das war bereits erheblich wärmer als im Vorjahr zur gleichen Zeit. Bis Mitte Mai erwärmte sich die westliche Ostsee nur langsam auf 9-12 °C. In der nördlichen Ostsee war kein Eis mehr vorhanden und die SST lag bei 2-5 °C. Ab 20.05. folgte eine rasche Erwärmung, sodass am 26.05. Werte von 14-17 °C in der westlichen Ostsee, 12-15 °C in der zentralen Ostsee, 10-12 °C in der nördlichen Gotlandsee und 5-8 °C im Bottnischen Meerbusen erreicht waren. Danach sorgte eine windbedingte Durchmischung für die erste gravierende Abkühlung in diesem Jahr, teilweise um mehr als 1-2 K. Der Mai war mit +2 K bis +3 K besonders warm und war nach Mai 2008 der zweitwärmste der letzten 25 Jahre. Starke Schwankungen waren in den Anomalien in der nördlichen Ostsee zu verzeichnen. Im Mai und besonders im Juni war der typische Nord-Süd Anstieg mit bis zu 8 K sehr ausgeprägt (Abb. 18). Das zeigt auch die SST-Verteilung entlang des Schnittes durch die zentralen Becken der Ostsee für den Monat Juni 2014 (Abb. 20).

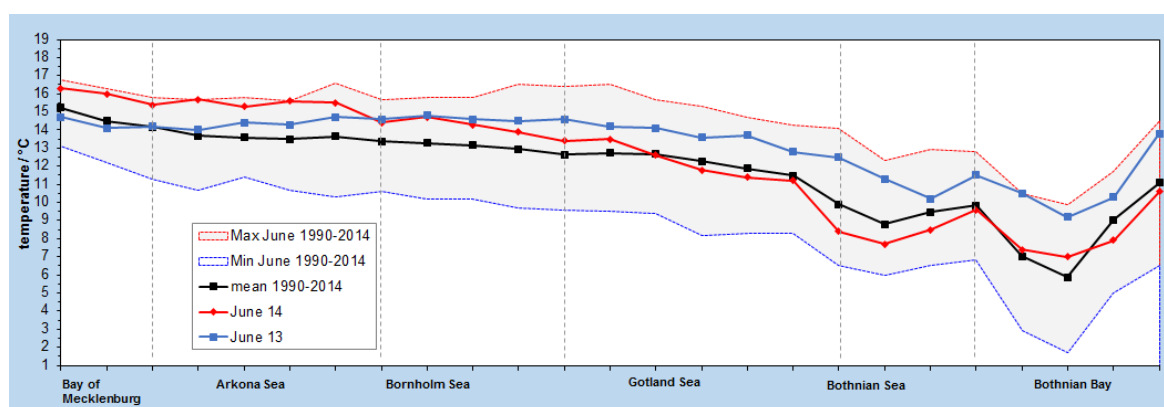


Abb. 20: Temperaturverteilung entlang des Schnittes durch die zentralen Becken der Ostsee für den Juni 2014 im Vergleich zum langjährigen Mittel 1990-2014, dem Vorjahr und der Schwankungsbreite

Die SST ist im Vergleich zum langjährigen Mittel 1990-2014, dem Vorjahr und der Schwankungsbreite dargestellt. Der Juni war sehr wechselhaft, Hochdruckphasen, die für eine Erwärmung sorgten, wurden immer wieder durch Tiefausläufer mit hoher Wolkenbedeckung und Wind unterbrochen. Dadurch erwärmte sich das Wasser im Juni nur unwesentlich, die Monatsmitteltemperaturen fielen relativ gering aus (Abb. 20) und es entstanden negative Anomalien in der zentralen und nördlichen Ostsee. Lag das Monatsmittel der SST der Arkonasee schon bei 16 °C (Anomalie +2 K), waren es in der Gotlandsee 12 °C (-0,5 K) und in der Bottensee nur 7,5 °C (-1,5 K). Die nächste massive Erwärmung erfolgte Anfang Juli. Am 06.07. erhöhte sich die SST auf 17-20 °C in der westlichen Ostsee, auf 15-18 °C in der Gotlandsee und 12-16 °C im Bottnischen Meerbusen. In den nächsten Tagen erwärmte sich die nördliche Ostsee besonders stark, wodurch am 9.07. in der gesamten Ostsee eine ziemlich ausgeglichene Temperatur von 16-20 °C vorherrschte. Nach einer windbedingten Durchmischung vom 12.-15.07. waren diese Temperaturen am 16.07. wieder erreicht. Danach nahm die SST in einer Schwachwindphase stark zu. Ab 22.07. war die nördliche Ostsee wärmer als der zentrale und westliche Teil. Östliche Winde und Auftrieb entlang der deutschen und polnischen Küste verhinderten eine stärkere Erwärmung in der südlichen und westlichen Ostsee. Ab 25.07. lagen die SST in der nördlichen Ostsee bei 23-25 °C. Eine Reduktion der Auftriebsintensität sorgte dafür, dass sich der 28.07. mit Temperaturen von 21-24 °C in der westlichen Ostsee zum wärmsten Tag der gesamten Ostsee entwickelte (Abb. 21).

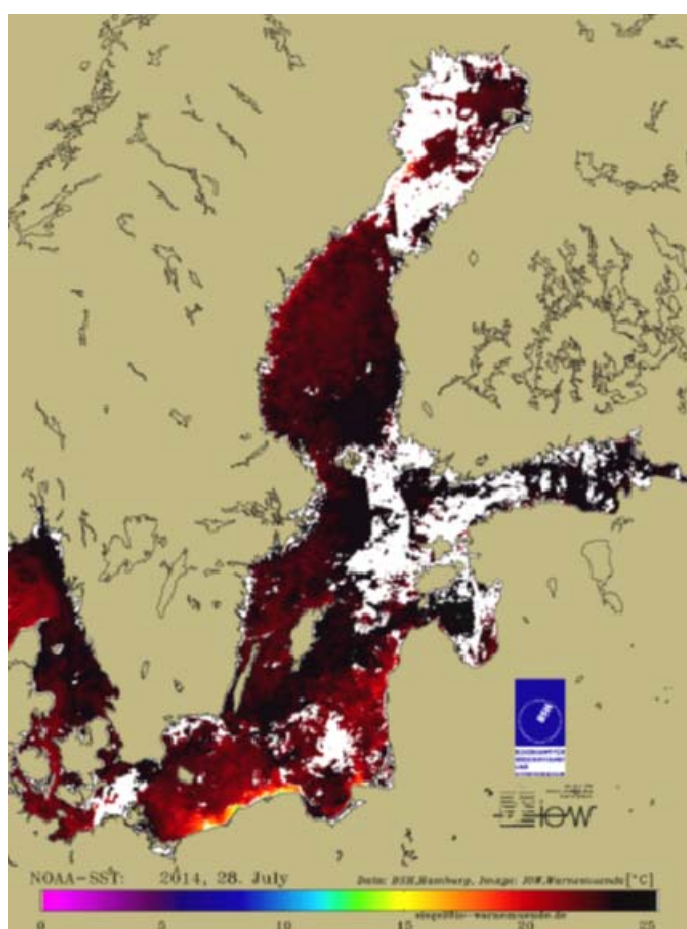


Abb. 21: SST der Ostsee am 28. Juli, dem wärmsten Tag des Jahres 2014

Danach sorgten Ostwinde im Süden und Westwinde im Norden für eine Intensivierung der Auftriebsaktivität sowohl in der südlichen Ostsee als auch im Bottnischen Meerbusen und für eine Verminderung der SST auf unter 19 °C in den Auftriebsgebieten und 23 °C in weiten Teilen der zentralen Ostsee. Im Juli und August waren die Nord-Süd-Unterschiede im Gegensatz zu allen anderen Monaten nicht vorhanden, die gesamte Ostsee hatte ähnliche Monatsmitteltemperaturen von etwa 19-21 °C. Das ist sehr schön im Jahresgang der SST in den drei zentralen Becken in Abb. 18 zu erkennen. Die Monatsmittelwerte liegen sehr dicht beieinander. Die Temperaturverteilung entlang des Schnittes durch die zentralen Becken der Ostsee ist für den Monat Juli 2014 in Abb. 22 im Vergleich zum langjährigen Mittel 1990-2014, dem Vorjahr und der Schwankungsbreite dargestellt. Die Abbildung zeigt sehr deutlich die geringen Temperaturunterschiede entlang des Schnittes (rote Kurve). Im Norden in der Bottensee und Bottenwiek bestimmten die Julimittel 2014 die Obergrenze der Schwankungsbreite des gesamten Untersuchungszeitraumes.

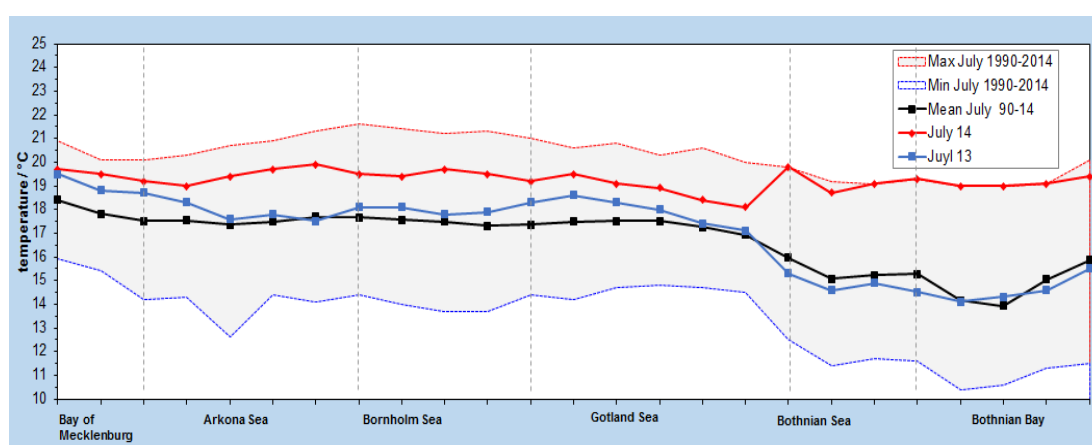


Abb. 22: Temperaturverteilung entlang des Schnittes durch die zentralen Becken der Ostsee für den Monat Juli 2014 im Vergleich zum Vorjahr, zum langjährigen Mittel 1990-2014 und zur Schwankungsbreite im Untersuchungszeitraum

Dadurch ergaben sich extreme Anomalien in der nördlichen Ostsee von bis zu +5 K. Der Juli 2014 war in der nördlichen Ostsee mit Abstand der wärmste der letzten 25 Jahre. Die Temperaturen von Ende Juli hielten bis ca. 9. August an, bevor eine erste Abkühlung einsetzte. Durchzug von Tiefausläufern in der zweiten Augusthälfte sorgte für weitere Abkühlung, sodass die SST Ende des Monats auf 17-18 °C in der westlichen und südlichen Ostsee und auf 13-17 °C in der zentralen und nördlichen Ostsee reduziert war. In den drei ausgewählten Gebieten entwickelte sich der August zum wärmsten Monat des Jahres. Er war auch neben dem August 2002 der wärmste im Beobachtungszeitraum. Der weitere Verlauf war weitgehend durch positive Anomalien im Monatsmittel gekennzeichnet. Nur in der östlichen Gotlandsee lagen die Monatsmittel im Bereich der langjährigen Mittelwerte. Die Temperaturen von Ende August blieben bis ca. 10.09. erhalten. Bis 20.09. stagnierten die Temperaturen in der südlichen Ostsee bei ca. 17 °C, bevor der Durchzug von Tiefdruckgebieten erneute windbedingte Durchmischung verursachte. Die SST sank bis Ende des Monats auf ca. 15-16 °C in der südlichen und westlichen Ostsee, auf 13-15 °C in der zentralen und merklich auf 8-13 °C in der



nördlichen Ostsee. Vom 3.-6.10. kam es zu einer kurzen Erwärmung in der westlichen Ostsee auf 15-17 °C, was im Vergleich zum Vorjahr einen Unterschied von mehr als +2 K ausmachte. Danach begann die nächste wolkenreiche Phase, in der sich bis Ende des Monats die SST kontinuierlich auf 12-14 °C in der westlichen Ostsee, 9-13 °C in der zentralen und 3-8 °C in der nördlichen Ostsee vermindert hatte. Die SST-Anomalien vom Oktober und November waren in der westlichen Ostsee besonders ausgeprägt (Abb. 23) und die höchsten der letzten 25 Jahre, wie man eindrucksvoll am Schnitt der Monatsmittel Oktober durch die zentralen Becken der Ostsee erkennt (Abb. 23). Die Monatsmittel bestimmen die Schwankungsbreite im Untersuchungszeitraum. Die Temperaturen blieben bis ca. 11.11. erhalten, bevor Tiefdruckgebiete mit hoher Wolkenbedeckung durchzogen. Bis Ende des Monats kühlte insbesondere die flache Bereiche der westlichen Ostsee und die zentrale Ostsee auf 7-8 °C ab. Die Arkonasee und die Bornholmsee lagen noch bei 10 °C, wogegen die Lagunen und die nördliche Bottenwiek nur noch 1-4 °C aufwiesen. Ab 2. Dezember nahmen die SST besonders in den flachen Teilen der westlichen Ostsee ab. Diese Temperaturen von 5-7 °C hielten bis ca. 20.12. an, bevor sich die SST auf 1 °C in der nördlichen Ostsee und bis auf 6 °C in der südlichen Ostsee zum Ende des Jahres reduzierten.

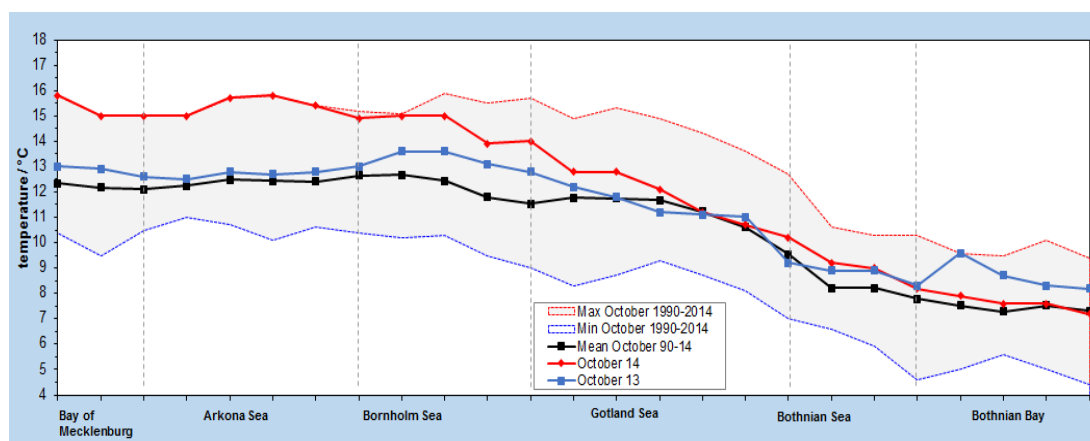


Abb. 23: Temperaturverteilung entlang des Schnittes durch die zentralen Becken der Ostsee für den Monat Oktober im Vergleich zum Vorjahr, zum langjährigen Mittel 1990-2014 und zur Schwankungsbreite im Untersuchungszeitraum

Insgesamt war 2014 das wärmste Jahr der letzten 25 Jahre. In der westlichen Ostsee lag die Anomalie der Monatsmittelwerte außer im Februar mit +1 bis +3 K über den langjährigen Mittelwerten. Im Oktober und November waren teilweise sogar +3 K übertroffen, was dazu führte, dass sich beide Monate zu den jeweils wärmsten der letzten 25 Jahre entwickelten. In der zentralen und nördlichen Ostsee wies nur der Monat Juni klare beckenweite negative Anomalien von -1 bis -2 K auf. Zum wärmsten Jahr haben insbesondere auch die Monate Juli und August in der nördlichen Ostsee beigetragen. Untypische gleichmäßige Temperaturverteilungen in der gesamten Ostsee haben im Juli zu Anomalien von bis zu +5°C in der nördlichen Ostsee geführt. Die Jahresmitteltemperatur der gesamten Ostsee lag 1.2 K über dem langjährigen Mittelwert und 0,4 K über dem bisher wärmsten Jahr 2008.

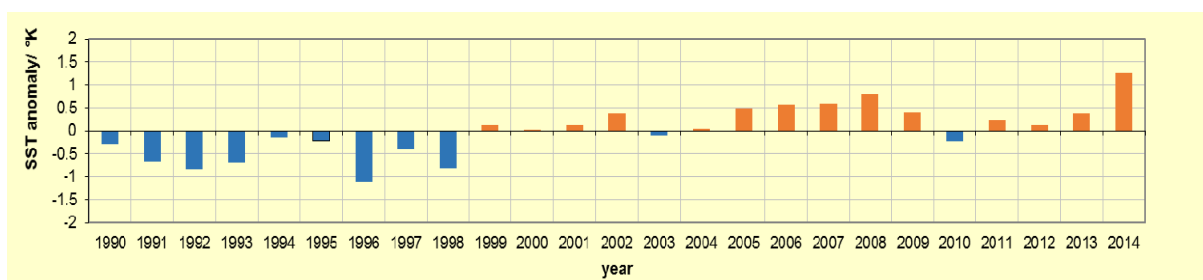


Abb. 24: Anomalien der Jahresmitteltemperatur der gesamten Ostsee der letzten 25 Jahre (1990-2014)

### 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 und November 2014 durchgeführt. Abb. 25 zeigt die Momentaufnahmen der vertikalen Temperaturverteilung die auf den jeweiligen Expeditionen gewonnen wurden. Zusätzlich fließen in die Beurteilung der hydrographischen Verhältnisse in der zentralen Ostsee Daten aus dem nationalen Schwedischen Monitoring Programm des SMHI ein, die monatlich an den zentralen Stationen der einzelnen Ostseebecken erhoben werden. 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. 26 und 29 dargestellt.

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

In Jahresverlauf 2014 wurde eines der seltenen großen Einstromereignisse (Major Baltic Inflow, MBI) beobachtet. Dieses Ereignis fand im Dezember 2014 statt und brachte ca.  $198 \text{ km}^3$  salzreiches Wasser mit 4Gt Salz in die Ostsee (MOHRHOLZ et al., 2015). Die Auswirkungen dieses MBI wurden jedoch erst im Januar 2015 wirksam und sind deshalb nicht Bestandteil dieses Berichtes. Vor Dezember 2014 war das Einstromgeschehen wie in den vorangegangenen Jahren von einer Serie kleinerer barotroper Einströme geprägt (vgl. Kapitel 2 und 3). Im Gegensatz zu den Vorjahren erreichte ein Teil dieser Einströme das Tiefenwasser in den zentralen Ostseebecken und führte hier bereits vor dem MBI 2014 zu ökologisch signifikanten Veränderungen.

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 2013/2014 war ungewöhnlich mild, lediglich der Januar wies eine Temperatur um den klimatischen Mittelwert auf. Anfang Januar 2014 lagen die Temperaturen zum Teil deutlich über den langjährigen Mittelwerten (vgl. Kapitel 2). Durch eine starke Kälteperiode ab Mitte Januar kühlte sich das Oberflächenwassers leicht ab. Durch die Lufttemperaturen im Februar und März war dieser Effekt jedoch zeitlich begrenzt. Die Oberflächentemperaturen blieben im gesamten Jahr deutlich über dem langjährigen Mittel, die Einstromereignisse hatten im Jahr 2014 einen signifikanten Einfluss auf die vertikale Temperaturverteilung in der zentralen Ostsee.

Die Temperaturverteilung Anfang Februar 2014 zeigt ein sehr heterogenes Bild der saisonalen Abkühlung der Deckschicht. Wegen der Kälteperiode Ende Januar sind die Oberflächentemperaturen in den flachen Bereichen der westlichen Ostsee z.T. unter  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  gefallen. Die geringsten Temperaturen werden in der Pommerschen Bucht auf der Oderbank mit  $-0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  gemessen. In der angrenzenden Arkonasee liegen die Oberflächentemperaturen noch bei ca.  $1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Dieser Wert ist bereits deutlich unter dem Dichtemaximum, so dass die weitere Abkühlung zu einer Stabilisierung der Schichtung führt. In der zentralen Ostsee hat die mit der Abkühlung verbundene tiefe Konvektion die Deckschicht weitgehend homogenisiert. Die Tiefe der thermischen Sprungschicht liegt an der Station TF271 in der östlichen Gotlandsee bei 53 m. Der vertikale Temperaturgradient bis zur Halokline bei 70 m Tiefe ist jedoch nur schwach ausgeprägt. Die Oberflächentemperatur an der Station TF271 liegt mit  $2,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  noch über der Temperatur des Dichtemaximums, so dass eine weitere Abkühlung die tiefe Vertikalkonvektion noch aufrechterhält und zu einer weiteren Homogenisierung der Deckschicht beiträgt. Die Bodentemperaturen in der zentralen Arkonasee sind infolge des kleinen Einstromes vom November 2013 bei relativ hohen Werten von bis zu  $7,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Station 102). Im Bornholmbecken werden unterhalb der Halokline mit bis zu  $9,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  die höchsten Temperaturen in der gesamten Ostsee gemessen. Dieser warme Wasserkörper füllt die Tiefenwasserschicht des Beckens von 60 m bis zum Boden aus. Der warme Wasserkörper stammt zum großen Teil ebenfalls aus dem November-Einstrom 2013, bei dem ca.  $90\text{ km}^3$  salzreiches Wasser in die westliche Ostsee einströmten. Ein Teil des eingeströmten Wassers hat bereits die Stolper Schwelle passiert und formiert das warme Bodenwasser in der Stolper Rinne mit Temperaturen von  $8,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Abb. 25). Dieser warme Bodenwasserkörper setzt sich zwischen Ausgang der Stolper Rinne und dem östlichen Gotlandbecken mit Bodentemperaturen bis  $7,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  fort.

In normalen Jahren werden auf der Überwachungsfahrt im März noch relativ geringe Oberflächentemperaturen beobachtet. Durch die anormal warmen Lufttemperaturen im Februar und März 2014 erhöhte sich die Oberflächentemperatur in der westlichen und zentralen Ostsee von Anfang Februar bis Mitte März jedoch wieder. Westlich der Darßer Schwelle liegen die Temperaturen zum Teil schon deutlich über  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Das Maximum wird mit  $5,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  am Eingang der Kieler Bucht beobachtet (Station TF361). Aber auch die übrigen Bereiche der westlichen und zentralen Ostsee sind vergleichsweise warm, mit Oberflächentemperaturen von  $3,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  im Arkonabecken,  $3,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  im Bornholmbecken und  $2,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  im östlichen Gotlandbecken. Die saisonale Erwärmung hat bereits eingesetzt. Die Oberflächentemperaturen liegen deutlich oberhalb des Dichtemaximums. Der kleinen Einströme Mitte Februar und Anfang März, bei

denen in der Summe etwa 75 km<sup>3</sup> kaltes salzreiches Wasser eingeströmt waren, haben bis Mitte März die Bedingungen im Tiefenwasser der westlichen Ostsee verändert. Die Temperatur im Bodenwasser der Arkonasee ist deutlich reduziert und beträgt nur noch 4,5 °C. Ein größerer Teil des eingeströmten Wassers hat bereits das Bornholmbecken erreicht und den dort vorher vorhandenen warmen Bodenwasserkörper aus dem Novembereinstrom 2013 angehoben. Dadurch liegt die Temperatur im Bodenwasser mit 6,3 °C um bis zu 2,7 K unter den im Februar beobachteten Wert. Der Tiefenwasserkörper zwischen 55 m und 80 m Tiefe besteht noch aus dem warmen Novembereinstrom mit Temperaturen bis 8,5 °C. Die warmen Bodenwasserkörper in der Stolper Rinne und östlich davon haben sich durch die Einmischung von kaltem Wasser aus der darüber liegenden Schicht deutlich abgekühlt. In das östliche Gotlandbecken ist am Boden eine warme Wasserschicht von etwa 10 m Mächtigkeit eingeströmt. Deren Temperatur von 6,7 °C liegt um 0,3-0,5 °C über der des alten Bodenwassers, dass dadurch angehoben wurde. Die Tiefenlage der 6 °C Isotherme ist von 172 m Anfang Februar auf 158 m im März angestiegen. Im gleichen Zeitraum veränderte sich die Tiefenlage der 5 °C Isotherme von 111 m auf 103 m.

Anfang Mai hat sich das Oberflächenwasser der Ostsee gegenüber den Werten vom März deutlich erwärmt. Die Oberflächentemperaturen liegen zwischen 7,2 °C im Arkonabecken, 7,7 °C im Bornholmbecken und 5,3 °C im östlichen Gotlandbecken. Die sich langsam ausprägende saisonale Temperaturschichtung führt zum Abkoppeln der Winterwasserschicht (30-70 m Tiefe) von der direkten Wechselwirkung mit der Atmosphäre. Diese Zwischenschicht, ist 2014 verglichen mit dem Vorjahr relativ warm. In der östlichen Gotlandsee beträgt die Minimaltemperatur des winterlichen Zwischenwassers im Mai 2014 3,0 °C und liegt damit bis zu 1,2 K über dem Wert des Vorjahres. Ähnliche Verhältnisse werden in der gesamten zentralen Ostsee beobachtet. Im Gegensatz dazu ist im Bornholmbecken keine ausgeprägte Winterwasserschicht zu beobachten. Hier sind vor allem die Auswirkungen der Einströme vom Februar und März 2014 spürbar. Das kalte Einstromwasser hat den vorherigen Tiefenwasserkörper vollständig ersetzt. Die Temperatur im Tiefenwasser unter Halokline liegt etwa 1-3 K niedriger als im Februar. Das kalte Einstromwasser hat sich weiter ostwärts ausgebreitet. Die Bodentemperatur in der Stolper Rinne ist weiter abgesunken und liegt nun bei 6,3 °C. Östlich des Ausgangs der Stolper Rinne ist die Ausbreitung des kalten Wassers nicht weiter in der Temperatursignatur zu verfolgen. Die anhaltende Anhebung der Tiefenlage der 5°C Isotherme von 103 m im März auf 98 m Anfang Mai deutet jedoch auf einen weiteren Zustrom salzreichen Wassers in die tieferen Schichten des östlichen Gotlandbeckens hin (vgl. Abb. 25).

Bis Ende Juli 2014 hat sich in der gesamten Ostsee die typische sommerliche Temperaturschichtung aufgebaut. Die saisonale Thermokline liegt in etwa 25 m Tiefe und trennt das stark erwärmte Oberflächenwasser vom kalten winterlichen Zwischenwasser. Die Minimaltemperaturen im Zwischenwasser liegen in den zentralen Ostseebecken bei 3,4 °C. Das Zwischenwasser ist damit im Durchschnitt 1,0 K wärmer als im Vorjahr. Im Bornholmbecken ist auch im Juli keine ausgeprägte Winterwasserschicht erkennbar.

Die Oberflächentemperaturen liegen in der westlichen Ostsee nur leicht unter 20 °C, teilweise auch darüber. An der Station TF213 im Bornholmbecken werden am 22. Juli 19,43 °C gemessen. Auch in der zentralen Ostsee sind die Oberflächentemperaturen relativ hoch, z.B. 19,6 °C an

Station TF271 im östlichen Gotlandbecken.

In der westlichen Bornholmsee wird im Juli der Einstrom eines warmen Zwischenwasserkörpers mit Maximaltemperaturen um 12-13 °C beobachtet. Dieser Warmwasserkörper wird durch barokline Einstromprozesse über die Darßer Schwelle gespeist, die durch die windarme Wetterlage im Juli begünstigt werden. Die Tiefenwassertemperaturen im zentralen Bornholmbecken sind mit 5,9 °C relativ kalt. Hier dominiert noch das kalte Wasser aus den kleinen Einströmen im Februar und März 2014. Im östlichen Gotlandbecken hat sich der Tiefenwasserkörper in Folge dieser kleinen Einströme weiter abgekühlt. Wegen des vorher relativ geringen Salzgehaltes im Tiefenwasser konnten die einströmenden Wassermassen der kleinen Einströme die Bodenschicht des östlichen Gotlandbeckens erreichen. Der Zustrom dieses Wassers führt zu einer weiteren Anhebung der 5 °C Isotherme von 97 m Anfang Mai auf 92 m Mitte Juli 2014.

Die Temperaturverteilung Anfang November 2014 zeigt in der Oberflächenschicht die herbstliche Erosion der Thermokline. Die Temperatur in der bereits auf 35 m bis 40 m vertieften dicken Deckschicht beträgt noch 12,3 °C im Arkonabecken und fällt in Richtung zentrale Ostsee auf 9,7 °C ab (Station TF271). Die Wassertemperatur oberhalb der Halokline liegt damit aufgrund des warmen Sommers und milden Herbstes deutlich über den Vorjahreswerten. Das winterliche Zwischenwasser ist nur noch in Resten als dünne Schicht von 10 m bis 15 m Dicke mit Minimaltemperaturen von 3,8 °C in der zentralen Ostsee zu beobachten. Im Bornholmbecken ist keine winterliche Zwischenwasserschicht vorhanden.

Die Temperaturschichtung in der westlichen Ostsee wird durch die kleinen Einströme im August und September 2014 bestimmt. Insgesamt transportierten diese Einströme 45 km<sup>3</sup> warmes, salzreiches Wasser in die westliche Ostsee. Da das eingeströmte warme und salzreiche Wasser am Boden des Arkonabeckens nahezu dieselbe Temperatur wie die noch relativ warme Deckschicht aufweist, ist im Arkonabecken nur ein sehr geringer vertikaler Temperaturgradient zu beobachten. Im Bornholmbecken schichtet sich das warme Einstromwasser in der Halokline ein. Hier bildet es eine 20 m dicke Zwischenschicht mit Temperaturen >10 °C. Für einen Austausch des Bodenwassers im Bornholmbecken war die Dichte des einströmenden Wassers jedoch zu gering. Im November beginnt, das über den Sommer eingeströmte warme Wasser, über die Stolper Schwelle abzufließen. Östlich der Stolper Rinne wird am Boden ein Wasserkörper mit Temperaturen >6 °C beobachtet, der sich zwischen 150 m und 190 m Tiefe im östlichen Gotlandbecken einschichtet. In den zentralen Bereichen des östlichen Gotlandbeckens steigt dadurch die Tiefenlage der 5 °C Isotherme zwischen Mitte Juli und Anfang November um weitere 5 m auf 87 m an (Abb. 25). Seit Februar 2014 hat damit der Zustrom von salzreichen Wasser aus mehreren kleinen Einströmen im östlichen Gotlandbecken zu einer Anhebung der 5 °C Isotherme um 24 m geführt.

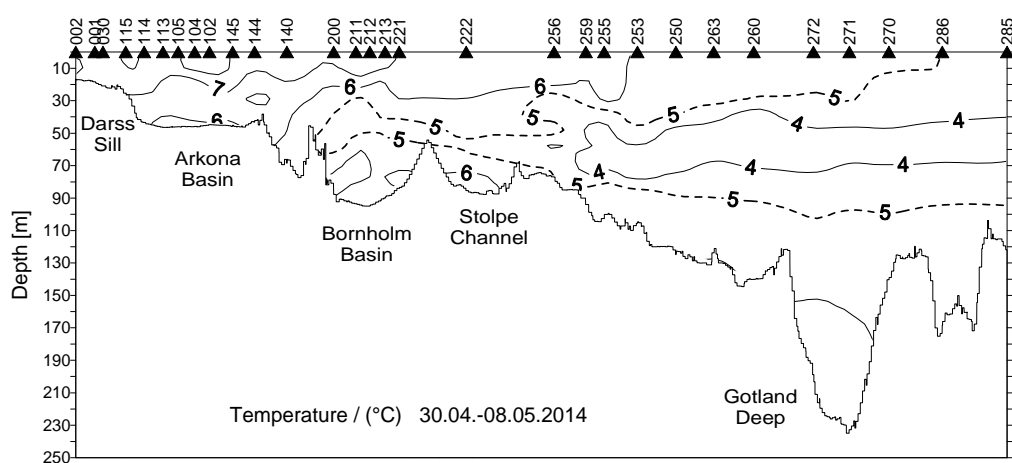
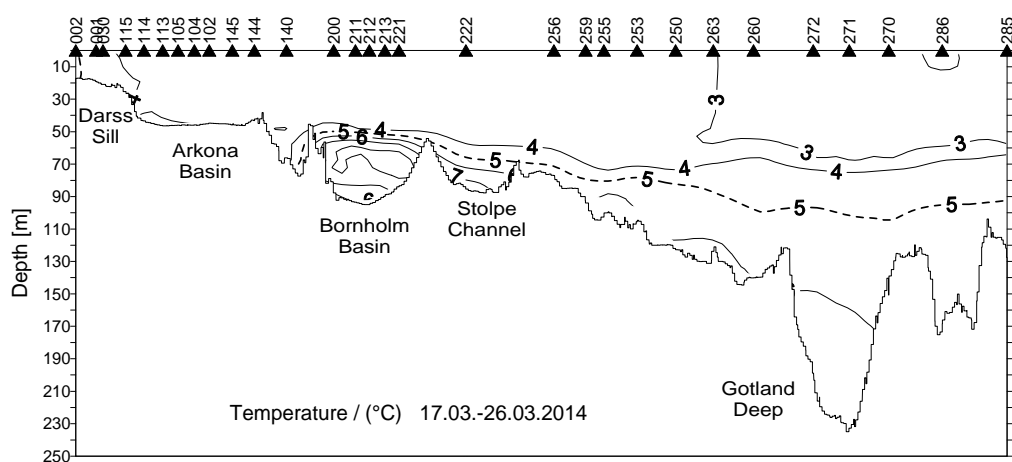
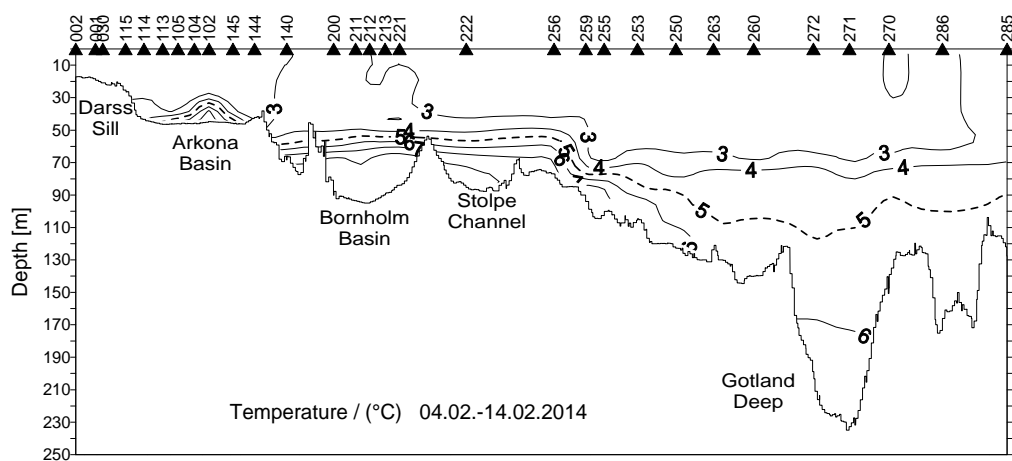


Abb. 25: Vertikale Verteilung der Wassertemperatur zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

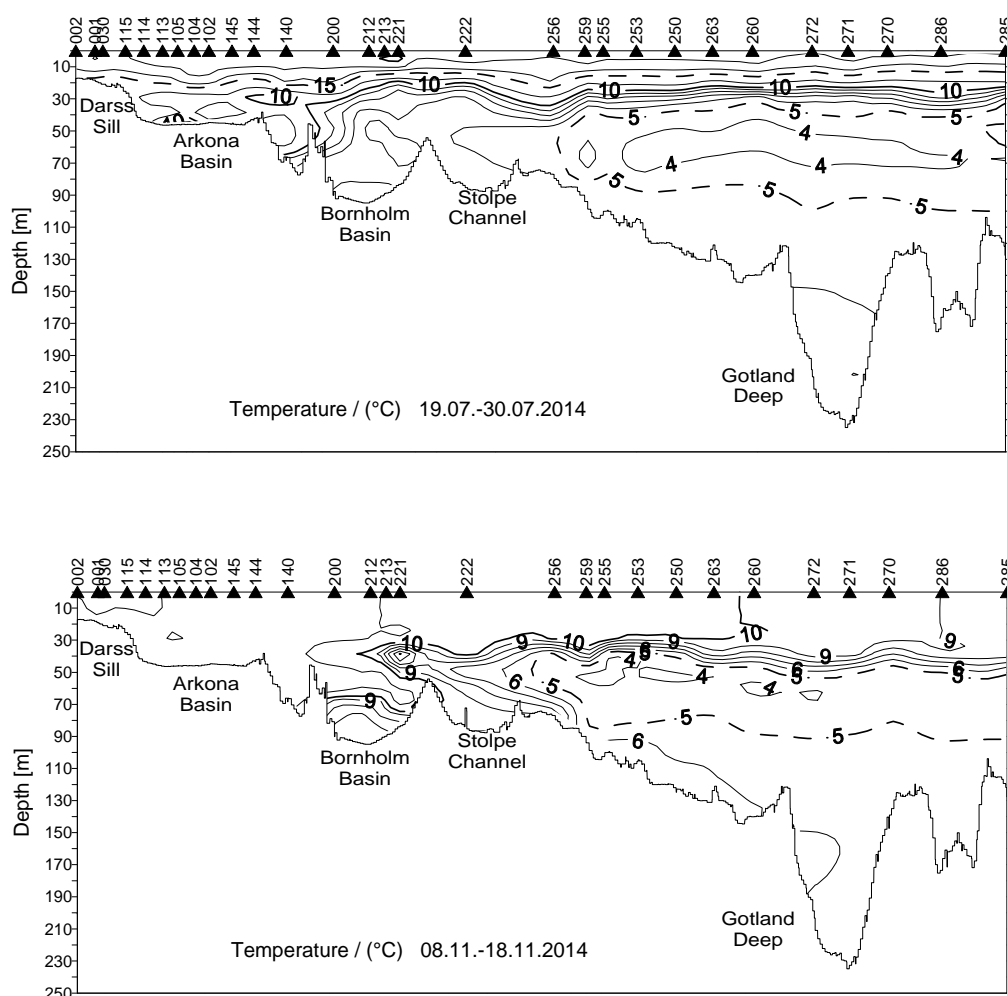


Abb. 25: Vertikale Verteilung der Wassertemperatur zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Im Rahmen seines Langzeitüberwachungsprogrammes betreibt das IOW seit Oktober 2010 eine hydrographische Verankerung nahe der zentralen Station TF271 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 eine wertvolle Ergänzung zum schiffsgestützten Überwachungsprogramm dar. Abbildung 26 zeigt den Temperaturverlauf im Tiefenwasser des östlichen Gotlandbeckens für das Jahr 2014 in fünf Tiefenniveaus. Wegen der Heterogenität der einströmenden Wasserkörper aus den unterschiedlichen kleinen Einströmen ergibt sich kein genereller Trend für alle Tiefenschichten. Lediglich der vertikale Temperaturgradient nimmt im Laufe der zweiten Jahreshälfte kontinuierlich ab. Anfang März ist die Ankunft des warmen Wassers aus dem Novembereinstrom 2013 als positiver Temperatursprung im Bodenwasser erkennbar (Abb. 26). Wegen des geringen Volumens bleibt dieser Wasserkörper auf die Bodenschicht begrenzt und

wird ab Mai 2014 mit dem Wasser aus den Februar/März 2014 Einströmen vermischt. Diese führen in der bodennahen Schicht zu einer Invertierung des vertikalen Temperaturgradienten. Der generelle Trend im Temperaturverlauf in den einzelnen Tiefen ist mit Fluktuationen auf unterschiedlichen Zeitskalen überlagert. Kurzzeitige Temperaturfluktuationen können durch die Passage kleinerer Kalt- oder Warmwasserlinsen verursacht werden. Die Fluktuationen sind häufig über den gesamten Bereich des Tiefenwassers korreliert, und zeigen eine mit der Tiefe abnehmende Amplitude.

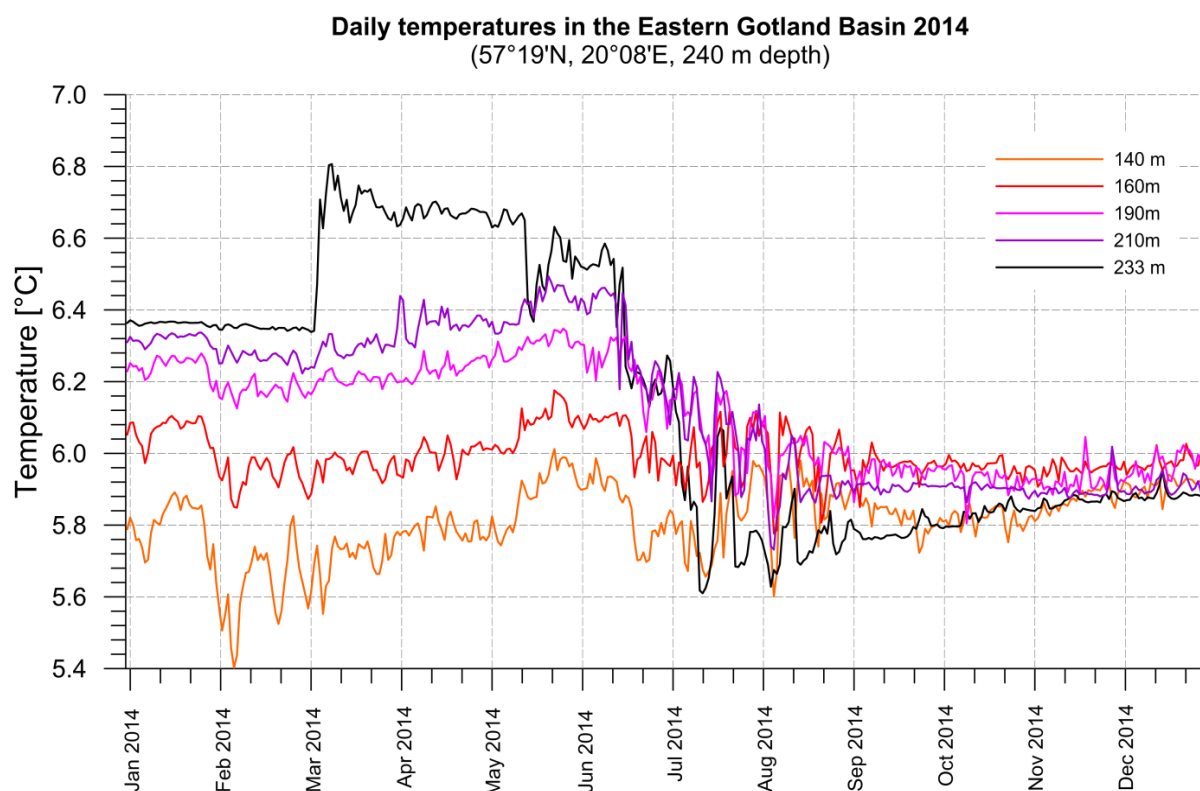


Abb. 26: Zeitlicher Verlauf der Tiefenwassertemperatur im östlichen Gotlandbecken (Station TF271) von Januar bis Dezember 2014 (Tägliche Mittelwerte der Daten mit 10 min Messintervall)

Die Jahresmittelwerte und Standardabweichungen der Temperatur im Tiefenwasser der zentralen Ostsee sind in Tabelle 6 für die zurückliegenden fünf Jahre auf Basis der CTD Messungen zusammengestellt. Im Jahr 2014 waren die Tiefenwassertemperaturen aufgrund der Wirkung der kalten Einströme vom Februar und März 2014 deutlich geringer als 2013. Eine Ausnahme bildet lediglich das Bornholmtief mit einer Zunahme der mittleren Bodentemperatur um ca. 1,5 °C gegenüber dem Vorjahr. Die Standardabweichungen der Temperaturfluktuationen waren 2014 im Rahmen der üblichen Schwankungsbreite. Eine Ausnahme bildet auch hier das Bornholmbecken und zum Teil das Gotlandtief. Die hier beobachteten stärkeren Fluktuationen sind auf die erhöhte Einstromaktivität und auf die damit verbundene Tiefenwassererneuerung zurückzuführen.



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

**Wassertemperatur (° C; Maximalwerte hervorgehoben)**

Station	Tiefe/m	2010	2011	2012	2013	2014
<b>213</b> (Bornholmtief)	80	<b>8,29 ± 1,06</b>	6,48 ± 0,69	6,40 ± 0,40	5,55 ± 0,78	6,99 ± 1,29
<b>271</b> (Gotlandtief)	200	<b>6,46 ± 0,07</b>	6,43 ± 0,00	6,42 ± 0,01	6,33 ± 0,03	6,11 ± 0,19
<b>286</b> (Fårötief)	150	<b>6,74 ± 0,12</b>	6,42 ± 0,07	6,14 ± 0,08	5,83 ± 0,05	5,69 ± 0,04
<b>284</b> (Landsortief)	400	<b>6,09 ± 0,15</b>	5,95 ± 0,09	5,70 ± 0,06	5,46 ± 0,11	5,27 ± 0,06
<b>245</b> (Karlsötief)	100	5,43 ± 0,10	<b>5,44 ± 0,07</b>	5,15 ± 0,12	5,22 ± 0,07	5,00 ± 0,04

**Salzgehalt (Maximalwerte hervorgehoben)**

Station	Tiefe/m	2010	2011	2012	2013	2014
<b>213</b> (Bornholmtief)	80	15,85 ± <b>0,33</b>	14,68 ± 0,45	15,16 ± 0,49	15,16 ± 0,24	<b>16,06 ± 0,41</b>
<b>271</b> (Gotlandtief)	200	<b>12,33 ± 0,03</b>	12,20 ± 0,03	12,13 ± 0,04	12,00 ± 0,04	12,06 ± 0,11
<b>286</b> (Fårötief)	150	<b>11,77 ± 0,04</b>	11,69 ± 0,16	11,52 ± 0,06	11,28 ± 0,17	11,36 ± 0,08
<b>284</b> (Landsortief)	400	<b>10,76 ± 0,03</b>	10,65 ± 0,02	10,50 ± 0,03	10,43 ± 0,05	10,37 ± 0,08
<b>245</b> (Karlsötief)	100	<b>10,01 ± 0,17</b>	9,98 ± 0,11	9,61 ± 0,12	9,76 ± 0,18	9,58 ± 0,11

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

Station	Tiefe/m	2010	2011	2012	2013	2014
<b>213</b> (Bornholmtief)	80	1,28 ± 0,88	<b>0,78 ± 0,83</b>	1,68 ± 1,45	1,62 ± 1,05	2,07 ± 1,47
<b>271</b> (Gotlandtief)	200	-4,29 ± 0,69	-3,98 ± 0,51	-4,81 ± 0,50	<b>-5,30 ± 0,83</b>	2,94 ± 2,38
<b>286</b> (Fårötief)	150	-1,97 ± 0,34	-1,57 ± 0,30	-2,20 ± 0,38	-1,95 ± 1,46	<b>-2,35 ± 0,53</b>
<b>284</b> (Landsortief)	400	-1,15 ± 0,26	-1,06 ± 0,31	<b>-1,24 ± 0,30</b>	-1,11 ± 0,24	-1,02 ± 0,68
<b>245</b> (Karlsötief)	100	<b>-1,49 ± 0,83</b>	-1,36 ± 0,58	-0,17 ± 0,44	-0,72 ± 0,73	-0,85 ± 0,52

**6.2 Salzgehalt**

Die vertikale Verteilung des Salzgehaltes in der westlichen und zentralen Ostsee ist in Abbildung 27 für die fünf Überwachungsfahrten des IOW zusammengestellt. Die Salzgehaltverteilung zeigt eine deutlich geringere Variabilität als die Temperatur. Typisch ist der West-Ost Gradient im Bodenwasser. Größere Schwankungen des Salzgehaltes sind besonders in der westlichen Ostsee zu beobachten, wo der Salzgehalt durch die Einstromereignisse von salzhaltigem Nordseewasser am stärksten beeinflusst wird. Die Dauer und der Einfluss kleiner Einstromereignisse sind meist zu gering, um sich in der generellen Salzgehaltsverteilung niederzuschlagen. Lediglich in der Summe können sie zu langsamen langfristigen Änderungen des Salzgehaltes führen. Die in Abbildung 27 dargestellten Salzgehaltsverteilungen stellen lediglich „Schnappschüsse“ dar, die nicht geeignet sind ein vollständiges Bild der Einstromaktivität nachzuzeichnen. Im Jahr 2014 fanden mehrere kleine Einströme statt, die in unterschiedlichen Phasen auf den Überwachungsfahrten erfasst wurden. Drei der fünf Datensätze zeigen eine Einstromsituation in der westlichen Ostsee. Allein auf der Basis der Überwachungsfahrten kann jedoch keine aussagekräftige Statistik der Einstromereignisse erstellt werden.

Anfang Februar wird in der Mitte des Arkonabeckens eine 10 m bis 15 m dicke salzreiche Bodenschicht beobachtet, die sich durch den Einstrom vom November 2013 aufgebaut hatte. Die Salinität am Boden des Arkonabeckens beträgt zu diesem Zeitpunkt maximal 16. Ein großer Teil des eingeströmten Wassers ist bereits in das Bornholmbecken abgeflossen und bildet hier den salzreichen Tiefenwasserkörper. Das alte Tiefenwasser ist in die Stolper Rinne abgeflossen und hat hier zum Anheben der 10 g/kg Isohaline geführt. Der Salzgehalt im Tiefenwasser der zentralen Ostsee ist Anfang 2014 nach einer längeren Stagnationsperiode relativ gering. Am Boden des Gotlandtiefs beträgt der Salzgehalt im Februar 2014 nur 12,04 g/kg. Die Tiefe der 12 g/kg Isohaline liegt bei 221 m.

Ende März ist der Salzwasserpool in der Arkonasee durch die kleinen Einströme Ende Februar und Anfang März 2014 wieder aufgefüllt. Der Bodensalzgehalt ist auf 21,3 g/kg angestiegen. In der Stolper Rinne ist die Halokline wieder auf die übliche Tiefe von ca. 70 m abgesunken, und der Großteil des alten Bornholmbecken-Tiefenwassers ist in Richtung zentrale Ostsee abgeflossen. Dies führt im Gotlandtief zu einem leichten Anstieg des Bodensalzgehaltes auf 12,27 g/kg und zu einer Anhebung der 12 g/kg Isohaline um 9 m auf 212 m Tiefe. Anfang Mai hat sich der Salzwasserpool im Arkonabecken weiter aufgefüllt. Durch Vermischung mit dem umgebenden Wasser ist der Bodensalzgehalt auf 19,59 g/kg abgesunken. Das Wasser der Februar/März Einströme hat das Tiefenwasser des Bornholmbeckens verdrängt. Im Gotlandbecken füllt das pulsartig einströmende salzreiche Wasser die tieferen Bereiche des Beckens weiter auf. Der Bodensalzgehalt im Gotlandtief liegt Anfang Mai wie Ende März bei ca. 12,2 g/kg. Die Tiefenlage der 12 g/kg Isohaline wurde jedoch um weitere 13 m auf 199 m Tiefe angehoben. Dieses Geschehen setzt sich bis zum Juli 2014 fort. Bei nahezu gleichbleibendem Bodensalzgehalt steigt die Tiefenlage der 12 g/kg Isohaline um weitere 19 m auf 178 m an. Anfang November ist die Salzsichtung in der westlichen Ostsee durch die kleinen Sommereinströme vom August und September 2014 geprägt. Der Bodensalzgehalt in der Arkonasee beträgt 21,4 g/kg. Die Dichte des eingeströmten Wassers reicht jedoch nicht aus um das Tiefenwasser des Bornholmbeckens zu ersetzen. Das warme Einstromwasser fließt relativ schnell in der Halokline des Bornholmbeckens in Richtung Stolper Rinne ab. Der Einstrom ins Tiefenwasser des östlichen Gotlandbeckens ist zu diesem Zeitpunkt nahezu zum Erliegen gekommen. Von Juli bis November 2014 hat sich die Tiefenlage der 12 g/kg Isohaline mit einem Anstieg um 3 m auf 175 m Tiefe kaum verändert.

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 nicht weiter fortgesetzt. Durch die Vielzahl der kleinen Einstromereignisse sind die Salzgehalte im Gotlandtief und im Farötief leicht angestiegen. Im Bornholmtief wurden mit 16,06 g/kg die höchsten mittleren Bodensalzgehalte der letzten fünf Jahre beobachtet. Eine Ausnahme bilden das Karlsötief und das Landsorttief. Hier haben sich die Bodensalzgehalte weiter leicht verringert. Die Verringerung des Salzgehaltes ist hier auf das Andauern der seit 2004 begonnenen Stagnationsperiode zurückzuführen. Die seitdem beobachteten kleinen Einstromereignisse haben das Tiefenwasser des Karlsötiefs und des Landsorttiefs nicht erreicht.

Die zeitliche Entwicklung des Tiefenwassersalzgehaltes in der östlichen Gotlandsee für das Jahre 2014 ist in Abbildung 28 auf Basis der oben beschriebenen Verankerungsdaten dargestellt. In allen Tiefenniveaus ab 140 m Tiefe ergibt sich im Jahresverlauf ein positiver Trend im Salzgehalt. Markant ist der Salzgehaltsanstieg im Bodenwasser Anfang März mit dem Eintreffen des Novembereinstromes 2013. Auch in den Zeitserien des Salzgehaltes 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. Der vertikale Salzgradient nimmt im Jahresverlauf geringfügig ab.

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 Vorjahreswertenwerten haben sich die Oberflächensalzgehalte in der zentralen Ostsee 2014 leicht erhöht. Die Standardabweichungen des Oberflächensalzgehaltes liegen etwa auf dem Niveau des Vorjahres und bewegen sich damit im üblichen Bereich.

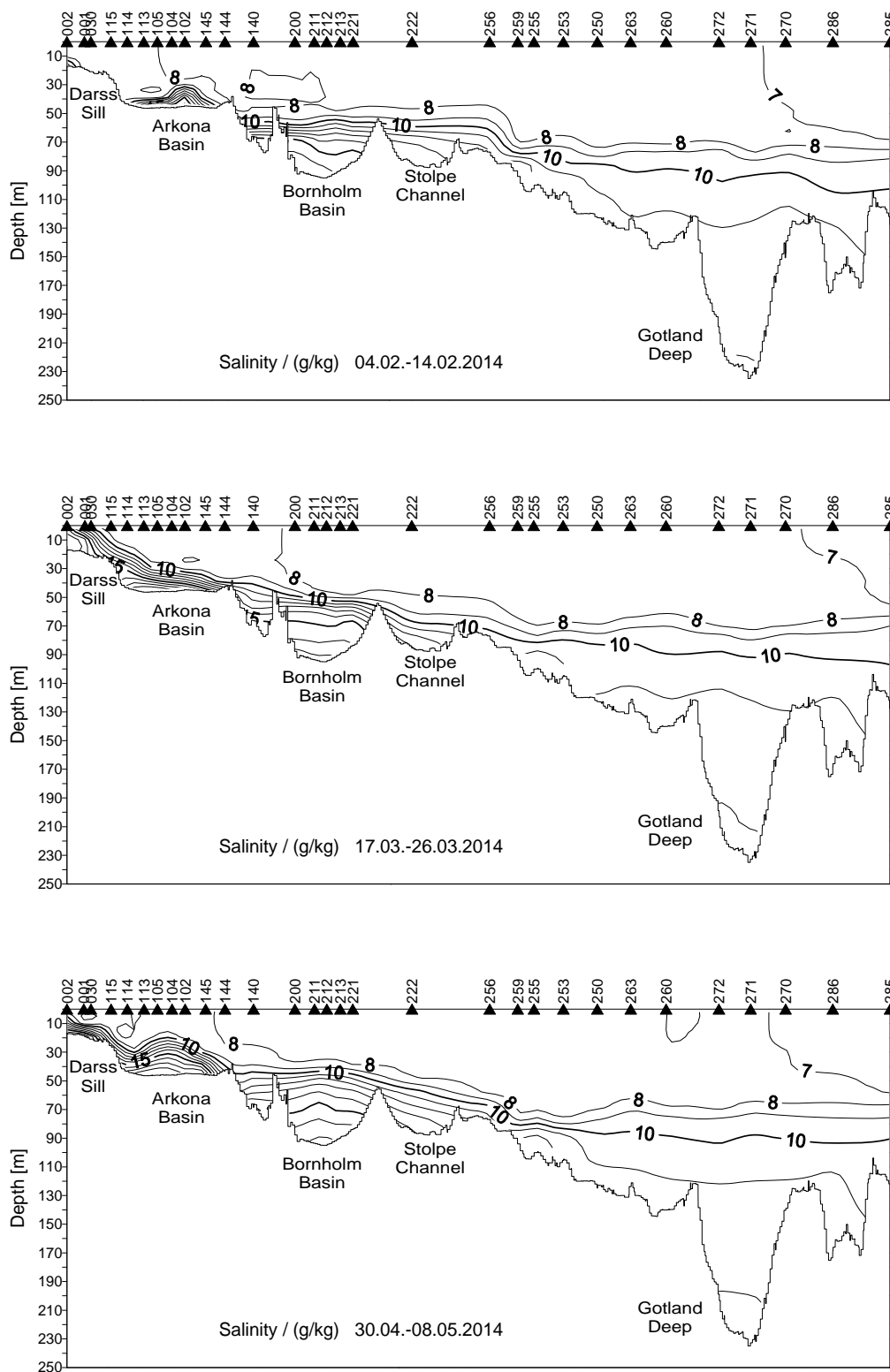


Abb. 27: Vertikale Verteilung des Salzgehaltes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem

## Gotlandbecken

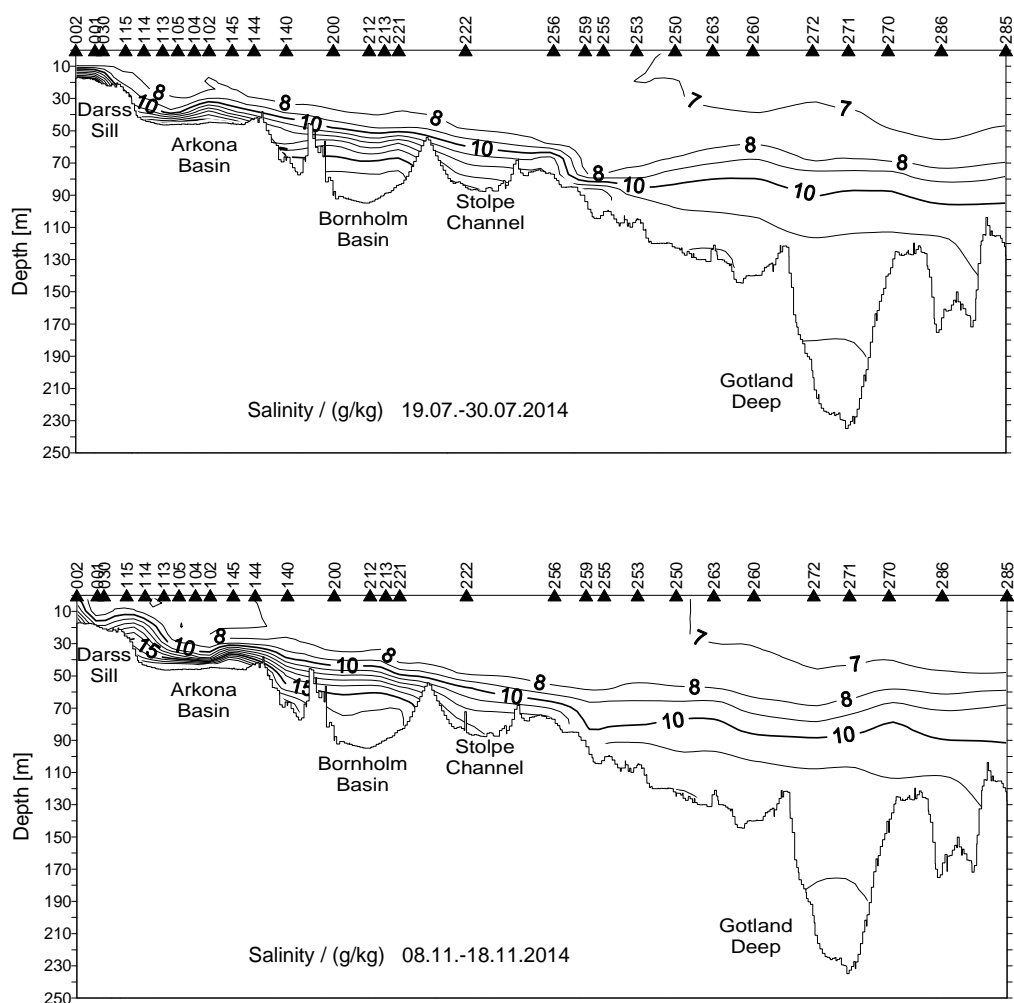


Abb. 27: Vertikale Verteilung des Salzgehaltes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Tab. 7: Jahresmittelwerte von 2008 bis 2012 und Standardabweichungen der Salinität im Oberflächenwasser der zentralen Ostsee (Minimalwerte hervorgehoben, n=13-29). Die Langzeitmittelwerte der Jahre 1952-2005 sind dem BALTIC-Klima-Atlas entnommen (FEISTEL et al., 2008a)

Station	1952- 2005	2010	2011	2012	2013	2014
<b>213</b> (Bornholmtief)	7,60 ±0,29	<b>7,17 ±0.17</b>	7,23 ±0,11	7,64 ±0,11	7,28 ±0,12	7,65 ±0,18
<b>271</b> (Gotlandtief)	7,26 ±0,32	7,20 ±0.20	7,15 ±0,19	7,10 ±0,13	<b>6.78 ±0,28</b>	6.87 ±0,17
<b>286</b> (Fårötief)	6,92 ±0,34	6,74 ±0.41	6,96 ±0,24	6,91 ±0,16	<b>6,64 ±0,29</b>	6,73 ±0,21
<b>284</b> (Landsortief)	6,75 ±0,35	6,37 ±0.40	6,68 ±0,40	<b>6,27 ±0,38</b>	6,52 ±0,12	6,60 ±0,24
<b>245</b> (Karlsötief)	6,99 ±0,32	<b>6,60 ±0.22</b>	6,81 ±0,24	6,97 ±0,21	6,77 ±0,10	7,00 ±0,13

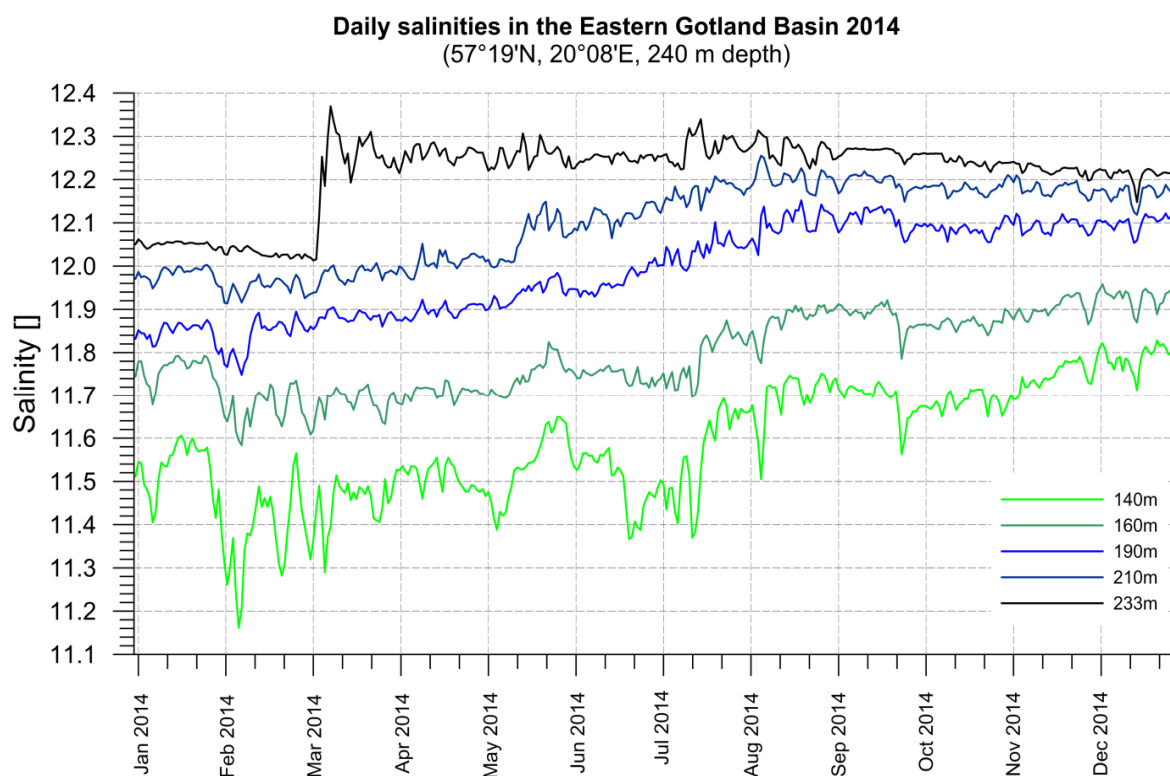


Abb. 28: Zeitlicher Verlauf des Tiefenwassersalzgehaltes im östlichen Gotlandbecken (Station TF271) von Januar bis Dezember 2014 (Tägliche Mittelwerte der Daten mit 10 min Messintervall)

Die Änderungen im Tiefenwasser des Gotlandbeckens lassen sich sehr anschaulich mit Hilfe eines Temperatur-Salzgehalts-Diagrammes verdeutlichen in dem zusätzlich die Sauerstoffgehalte farblich codiert wurden (Abb. 29). Zu Beginn des Jahres 2014 herrschen im Tiefenwasser des Gotlandtiefs anoxische Verhältnisse mit nur leicht variierenden Temperatur und Salzgehalten vor (Wassermasse A). Anfang März 2014 erreicht anoxisches Wasser, das durch den November-Einstrom 2013 aus dem Bornholmbecken verdrängt wurde, das Gotlandtief (Wassermasse B). Anfang Mai erreichen Wassermassen aus dem Frühjahrseinströmen das Gotlandbecken. Diese haben eine niedrigere Temperatur und bringen erstmals seit Jahren geringe Mengen Sauerstoff ins Gotland Tief (Wassermassen C und D). Durch Vermischung mit dem alten Tiefenwasser und Sauerstoffzehrung nimmt der Sauerstoffgehalt im Tiefenwasser wieder ab (Wassermasse E). Gegen Ende des Jahres 2014 erreichen erste Teile der warmen Sommereinströme das Gotlandbecken und bringen erneut geringe Mengen Sauerstoff ins Tiefenwasser ein (Wassermasse F). Im Verlauf der sukzessiven Einströme erhöht sich langsam die Dichte des Tiefenwassers von  $1009,4 \text{ kg/m}^3$  auf  $1009,6 \text{ kg/m}^3$ .

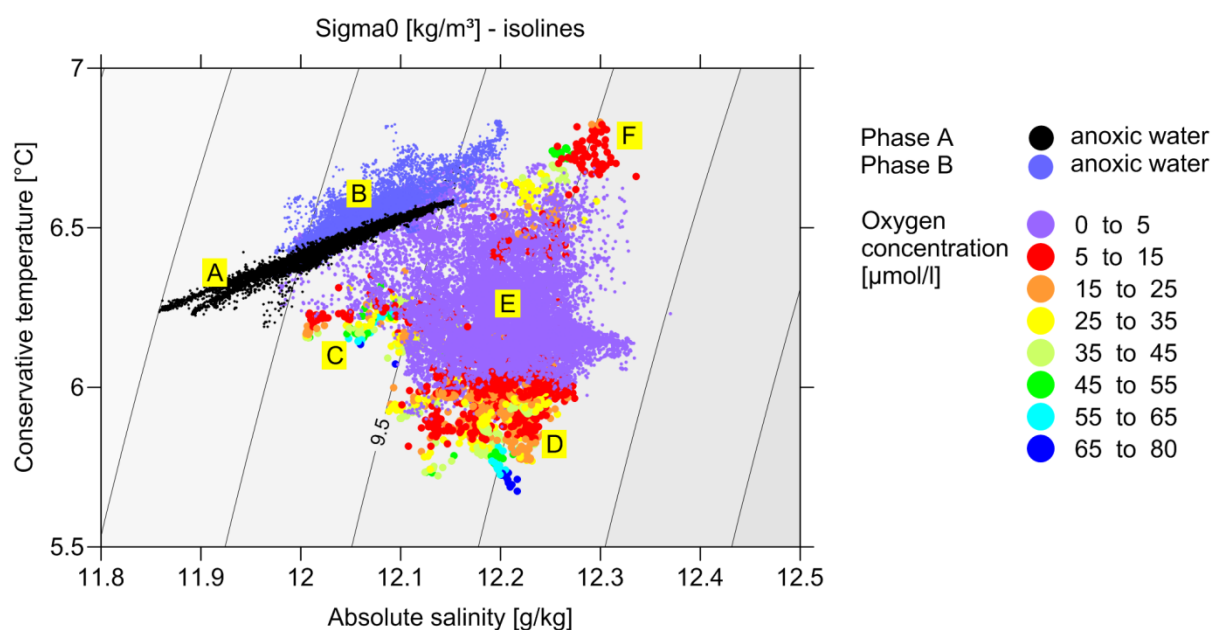


Abb. 29: Temperatur-Salzgehalts-Sauerstoff-Diagramm des Tiefenwassers im östlichen Gotlandbecken (Station TF271) von Januar bis Dezember 2014 (Daten bei 200 m Tiefe mit 10 min Messintervall)

### 6.3 Sauerstoffverteilung

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 Jahrgang des Sauerstoffgehaltes beobachtet werden (MATTHÄUS, 1978, NAUSCH et al., 2008a). Die hohe Sauerstofflöslichkeit bei niedrigen Temperaturen führt im Winter und Frühjahr zu hohen Sauerstoffkonzentrationen. Das Jahr 2014 war durch einen milden Winter gekennzeichnet. Lediglich im Februar lagen die Wassertemperaturen im Bereich des langjährigen Mittels. Ab März lagen die Monatsmittel fast immer +1 K bis +3 K über den langjährigen Mittelwerten (vgl. Kapitel 6.1.1). Die relativ niedrigen Sauerstoffwerte im März in der westlichen Ostsee (Tab. 8) sind zum einen der erhöhten Temperatur geschuldet, die Sättigungswerte (siehe unten) legen außerdem den Schluss nahe, dass die erste Phase der Frühjahrsblüte bereits vorbei war. Im Arkonabecken erhöht sich dagegen der Sauerstoffgehalt, da im März eine intensive Blüte stattfindet. Im Bornholmbecken und im östlichen Gotlandbecken finden sich die höchsten Sauerstoffkonzentrationen erst im Mai. Verbunden mit den überdurchschnittlichen Wassertemperaturen weist das auf eine intensive Phytoplanktonblüte hin. Der rasche Temperaturanstieg verringert die Sauerstofflöslichkeit im weiteren Jahresverlauf deutlich, was in der flacheren westlichen Ostsee rascher zu sehen ist als im Arkonabecken. Im Sommer liegen die Sauerstoffgehalte dann in der Regel deutlich unter 7 ml/l. In allen Seegebieten sind die Unterschiede zwischen den Jahren 2013 und 2014 nur gering. Im Herbst verursacht die Abkühlung wieder eine Zunahme der Sauerstoffkonzentrationen (Tab. 8).



Tab. 8: Jahresgang des Sauerstoffgehaltes in der durchmischten Oberflächenschicht (0-10 m) in den Jahren 2013/2014

	Februar	März/April	Mai	Juli	November
<b>westl. Ostsee</b>					
<b>O<sub>2</sub> (ml/l)</b>	<b>8,21/8,76</b>	<b>8,89/7,77</b>	<b>8,32/7,89</b>	<b>6,27/6,32</b>	<b>6,50/6,55</b>
Stabw. (ml/l)	0,23/0,19	0,15/0,25	0,16/0,27	0,03/0,21	0,12/0,13
n	5/5	5/5	5/5	4/4	5/5
<b>Arkonabecken</b>					
<b>O<sub>2</sub> (ml/l)</b>	<b>8,63/8,75</b>	<b>9,36/9,15</b>	<b>9,28/8,40</b>	<b>6,40/6,40</b>	<b>7,05/6,87</b>
Stabw. (ml/l)	0,06/0,11	0,05/0,10	0,25/0,11	0,13/0,16	0,05/0,14
n	13/13	13/13	13/13	13/13	13/13
<b>Bornholmbecken</b>					
<b>O<sub>2</sub> (ml/l)</b>	<b>8,61/8,66</b>	<b>9,15/8,67</b>	<b>9,70/9,82</b>	<b>6,38/6,44</b>	<b>7,19/7,01</b>
Stabw. (ml/l)	0,02/0,09	0,03/0,02	0,06/0,18	0,11/0,06	0,04/0,03
n	4/4	3/3	4/4	6/4	6/4
<b>östl. Gotlandbecken</b>					
<b>O<sub>2</sub> (ml/l)</b>	<b>8,59/8,69</b>	<b>9,02/8,78</b>	<b>9,97/10,27</b>	<b>6,56/7,19</b>	<b>7,41/7,34</b>
Stabw. (ml/l)	0,08/0,05	0,07/0,07	0,25/0,25	0,15/0,23	0,10/0,15
n	7/7	8/8	9/9	9/9	9/9

Um den Einfluss von Temperatur und Salzgehalt auf die Sauerstofflöslichkeit zu eliminieren, wird häufig der Sauerstoffsättigung gegenüber der Sauerstoffkonzentration der Vorrang gegeben. Dadurch wird die Vergleichbarkeit der Messwerte deutlich erhöht. Abbildung 30 fasst die Sauerstoffsättigungswerte des Oberflächenwassers für das Jahr 2014 für die vier Untersuchungsgebiete 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 % bis 96 % leicht untersättigt (Abb. 30). Auch im März verzeichnen wir in allen Seegebieten mit Ausnahme des Arkonabeckens weiterhin eine Untersättigung. Im Arkonabecken liegt die Sättigung im März dagegen bei 104,3 %. Das legt den Schluss nahe, dass der erste Peak der Frühjahrsblüte in der westlichen Ostsee schon vorüber ist. Der Höhepunkt der Frühjahrsblüte findet sich 2014 in beiden Seegebieten erst im Mai. Dies gilt in noch deutlicherem Maße auch für das Bornholmbecken und das östliche Gotlandbecken, wo 2014 Sättigungswerte zwischen 120 % und 125 % ermittelt wurden. Dies ist zwar höher als in den Vorjahren. Extreme Übersättigungen zwischen 140 % und 160 %, wie sie z.B. von NEHRING et al. (1995) für das Jahr 1994 beschrieben wurden, werden jedoch nicht erreicht. Es muss jedoch auch angemerkt werden, dass durch die geringe Messfrequenz nicht gesichert ist, dass das Maximum der Blüte in jedem Fall erfasst wird. Der Sommer zeigt das gewohnte Bild mit Sättigungswerten um 105 %. Nur im östlichen Gotlandbecken deuten Sättigungswerte um 115 % auf eine intensive Cyanobakterienblüte hin. 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.

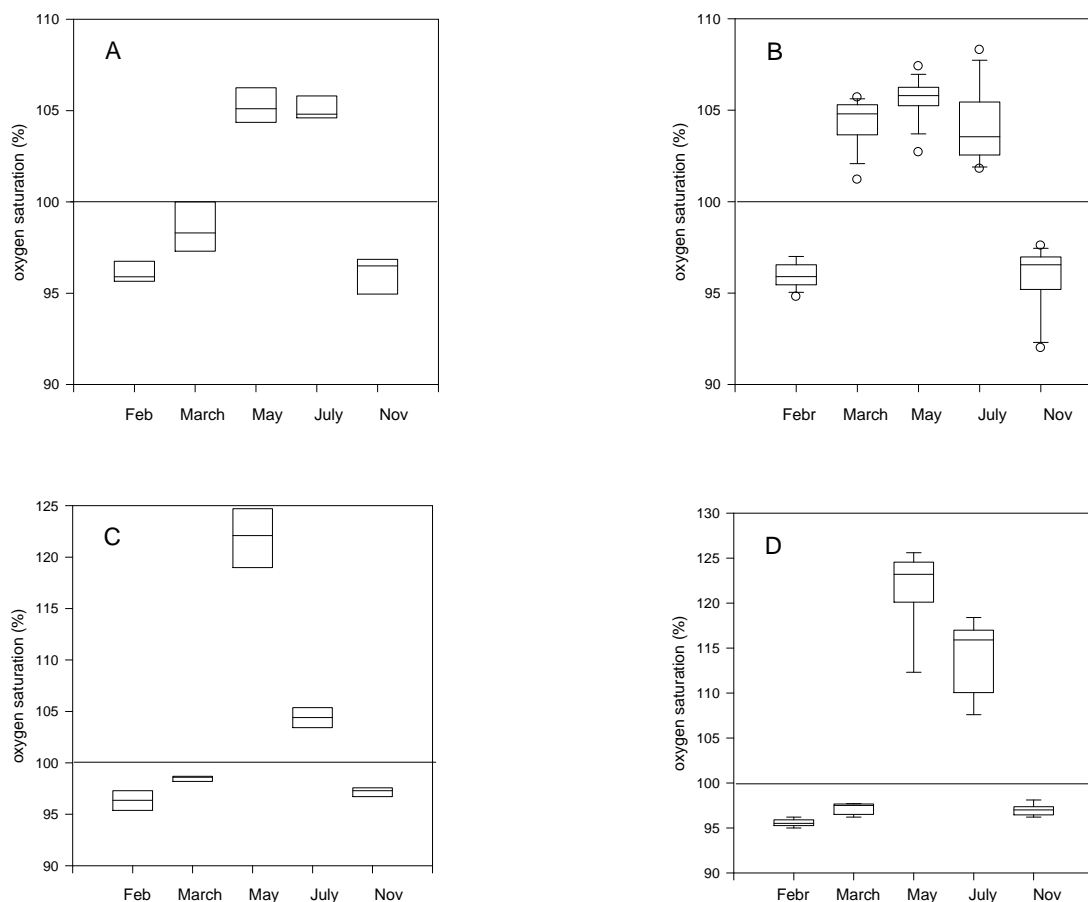


Abb. 30: Box-Whisker-Plots der Sauerstoffsättigung (%) im Jahr 2014 in der Oberflächenschicht (0–10 m) in der westlichen Ostsee (A), im Arkonabecken (B), im Bornholmbecken (C) und im östlichen Gotlandbecken (D)

In der westlichen Ostsee und im Arkonabecken ist ein ausgeprägter Jahresgang des Sauerstoffs in Bodennähe zu beobachten. Im Winterhalbjahr erfolgt alljährlich eine vertikale Durchmischung. Zusätzlich führen Einstromprozesse wiederholt zur Wassererneuerung, so dass im Februar und März eine gute Sauerstoffversorgung bis zum Grund vorherrscht (Abb. 31). Die Ausbildung der thermischen Schichtung und der verstärkte Abbau der organischen Substanz führen im weiteren Jahresverlauf zu einem Rückgang der Sauerstoffsättigung in den bodennahen Schichten beider Seegebiete. Der Sommer 2014 kann in der westlichen Ostsee mit bodennahen Sättigungswerten von  $55,0 \% \pm 16,8 \%$  ( $n=5$ ) als durchschnittlich angesehen werden. Im Arkonabecken lag der mittlere Sättigungswert nur bei  $26,9 \pm 24,0 \%$  ( $n = 10$ ), was vor allem an sehr niedrigen Werten im zentralen und nördlichen Teil des Beckens lag. So wurden an den Stationen TF069, TF104, TF105, TF109 und TF113 (siehe Abb. 1) nur Sättigungswerte zwischen 2 % und 10,8 % errechnet. Die Abkühlung des Wassers sowie sturmbedingte Durchmischung führen im Herbst zu einem Anstieg der Sauerstoffsättigung.

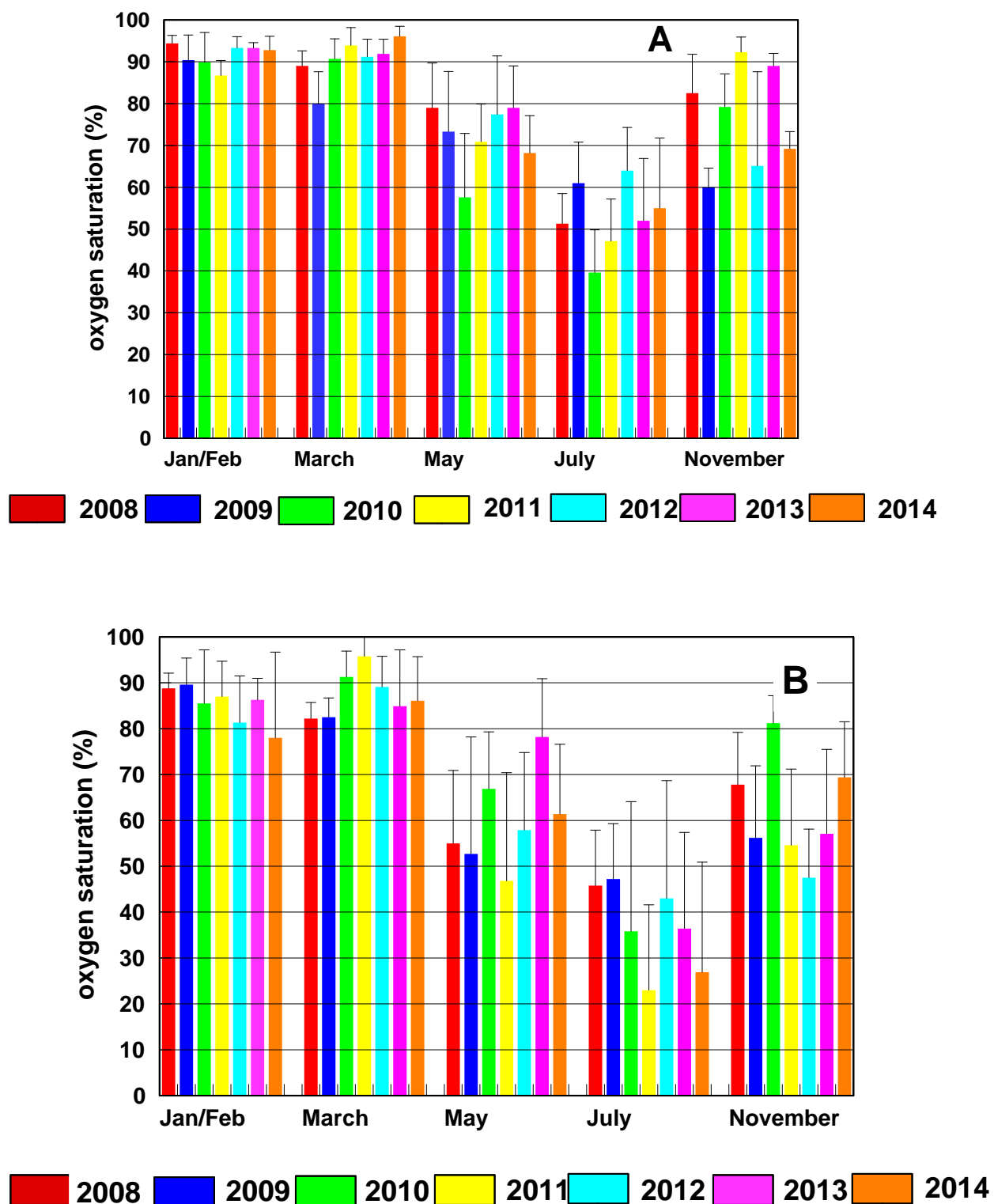


Abb. 31: Sauerstoffsättigung in Bodennähe in der westlichen Ostsee (A) und im Arkonabecken (B) in den Jahren 2008 bis 2014

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. 2014 fand diese Untersuchung vom 1.–17. September statt. Es wurde der Sauerstoffgehalt in Bodennähe an 37 Stationen, davon 31 mit einer Wassertiefe  $>15$  m, gemessen (Abb. 32).

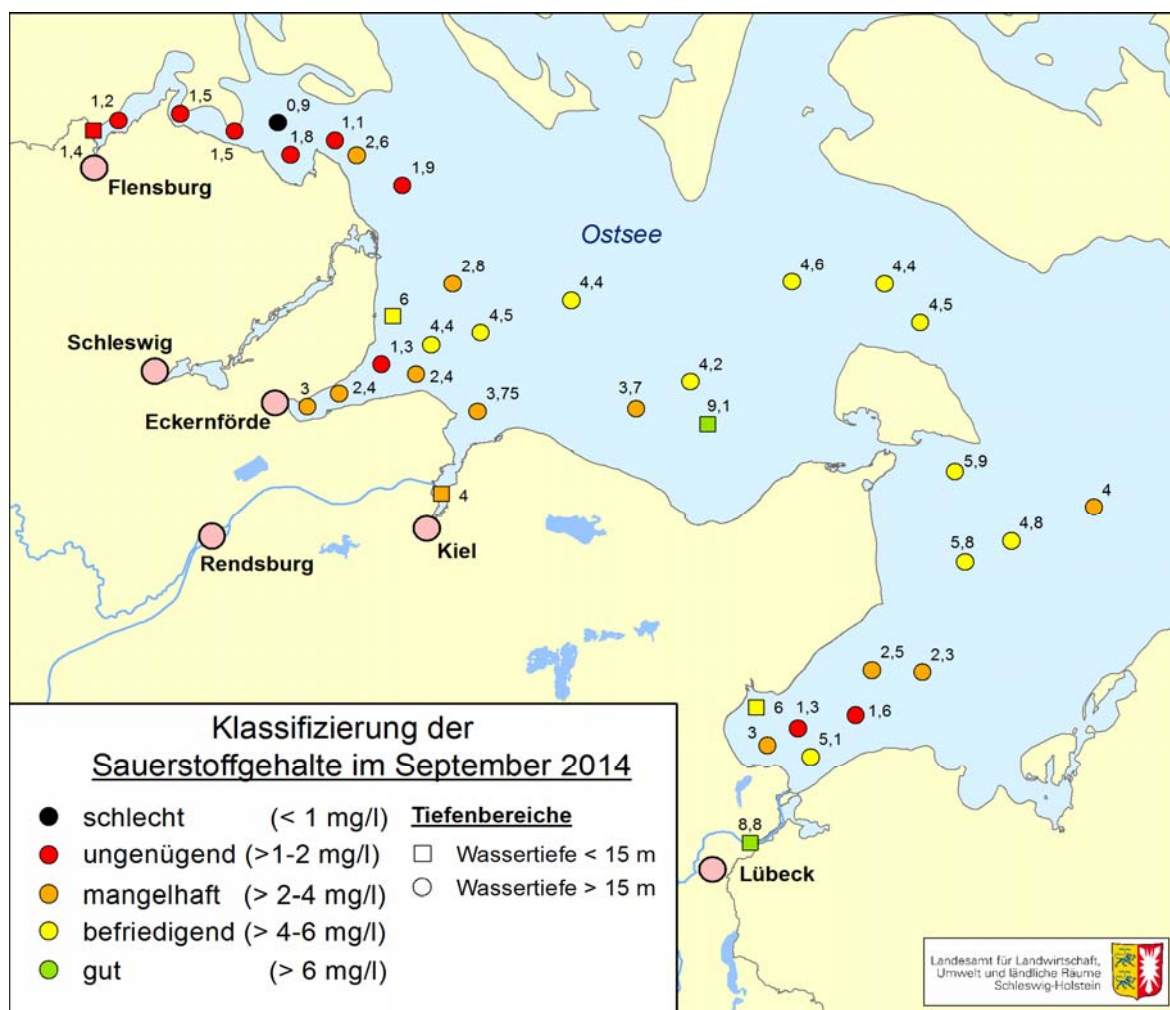


Abb. 32: Sauerstoffmangel in der westlichen Ostsee im September 2014 (LLUR 2014)

Umrechnung:  $O_2$  [mg/l]  $\times$  0,7005 =  $O_2$  [ml/l]

Eine Auswertung der Messungen 2014 (Abb. 33) an den Stationen mit einer Wassertiefe  $>15$  m zeigt, dass 30 % aller Messwerte auf die Klassen *schlecht* und *ungenügend* entfielen ( $<2$  mg/l Sauerstoff), im Vorjahr waren dies 36 %. Im Jahr 2012 entfielen sogar 68 % der Messwerte in diesen Bereich. Im Jahr 2002, dem Jahr mit der bisher schlechtesten Sauerstoffsituation, betrug

der Anteil in diesen Klassen 91 %. Der Anteil der Messwerte mit einer *mangelhaften* Sauerstoffsituation ( $>2$  mg/l bis 4 mg/l) lag bei 33 % (2013: 39 %, 2002: 4 %). Der Anteil mit *befriedigenden* ( $>4$  bis 6 mg/l) bis *guten* ( $>6$  mg/l) Sauerstoffgehalten lag bei 36 % (2013: 24 %, 2002: 4 %).

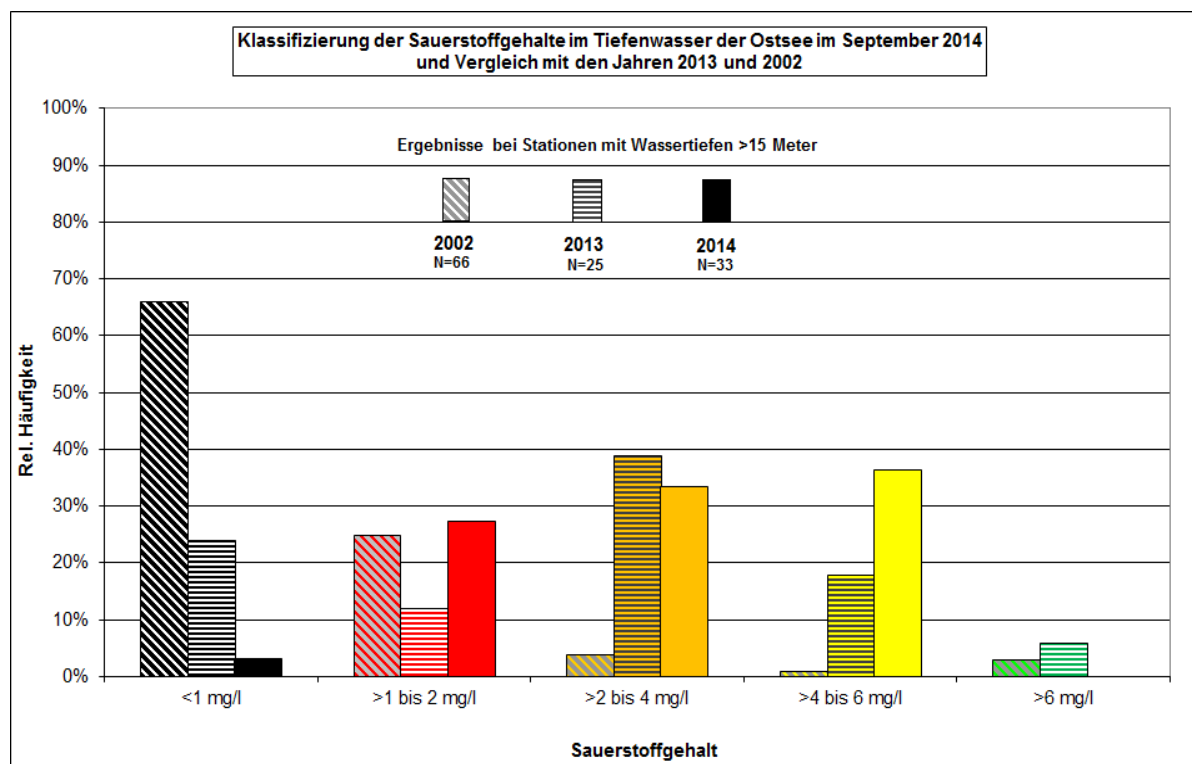


Abb. 33: Klassifizierung der gemessenen Sauerstoffgehalte im Tiefenwasser der westlichen Ostsee für die Jahre 2002, 2013 und 2014 – LLUR 2014

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 der Trendanalyse sind in Abb. 34 zusammengefasst. Der prozentuale Anteil der Stationen mit einem Sauerstoffgehalt  $<2$  mg/l in der bodennahen Schicht zeigt eine leicht abnehmende Tendenz, in 2014 wurde sogar der geringste Wert der Zeitreihe ermittelt. 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.

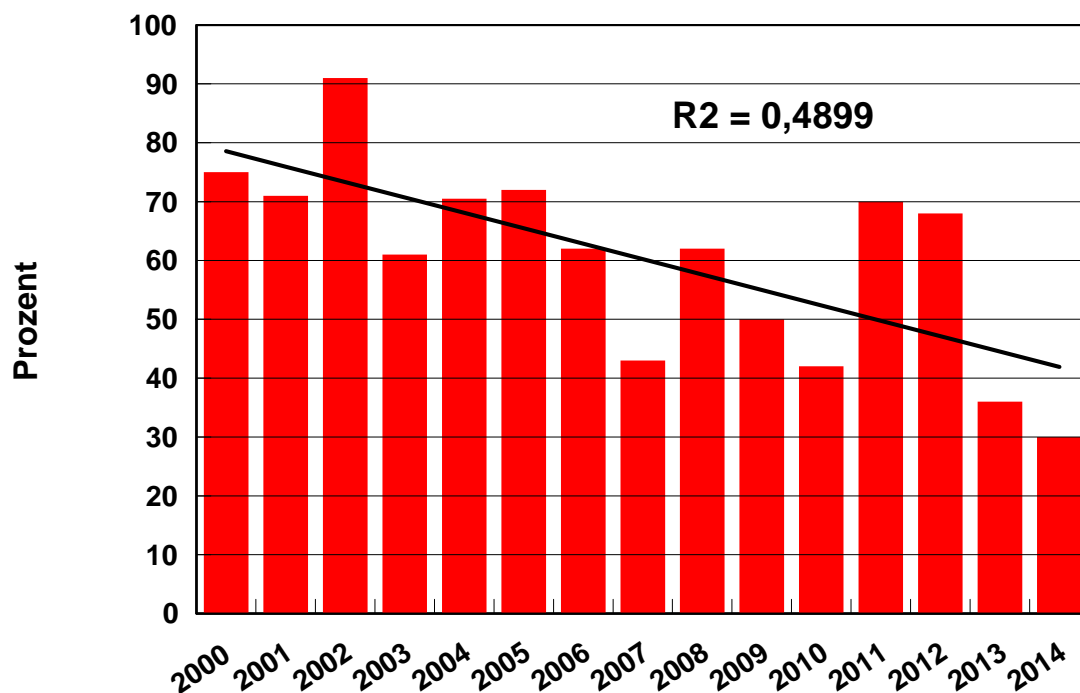


Abb. 34: Prozentualer Anteil der Stationen mit einem Sauerstoffgehalt  $< 2$  mg/l in der bodennahen Schicht der westlichen Ostsee im Herbst – Daten LLUR

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 Einströmen geprägt. Abbildung 35 zeigt die Sauerstoffverhältnisse entlang des Längsschnittes zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken für die fünf im Jahr 2014 durchgeführten Fahrten.

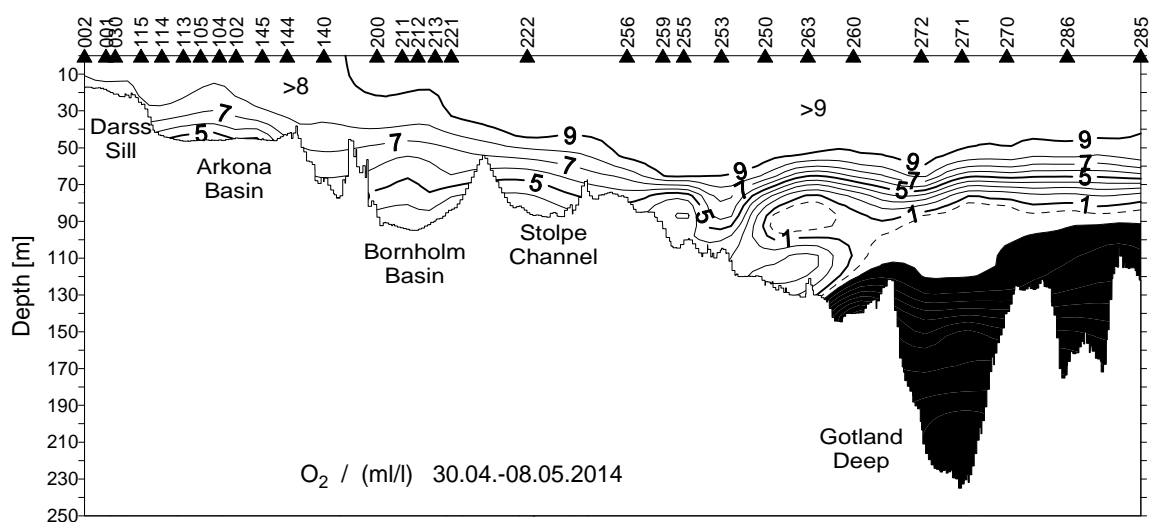
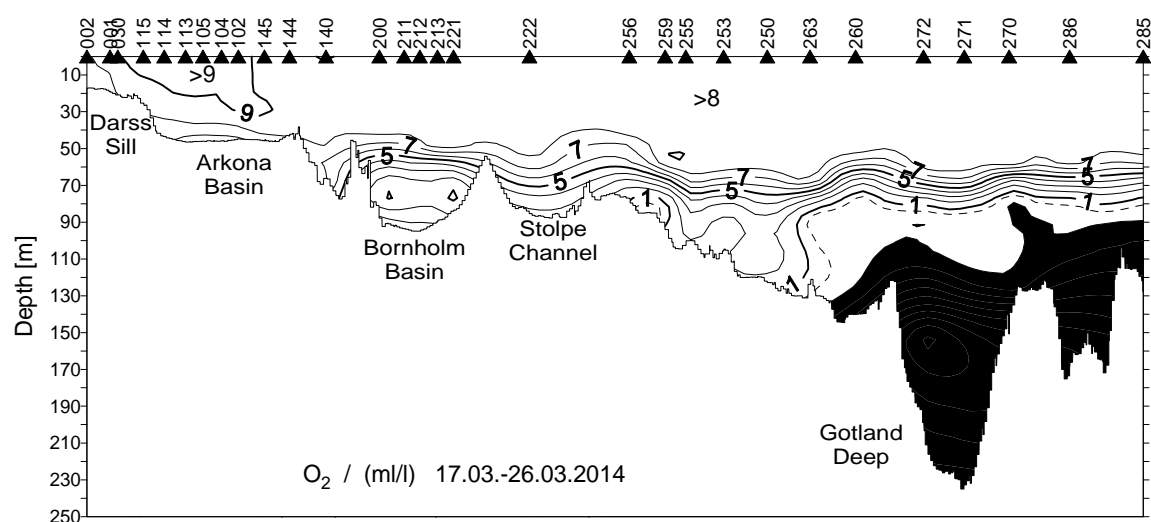
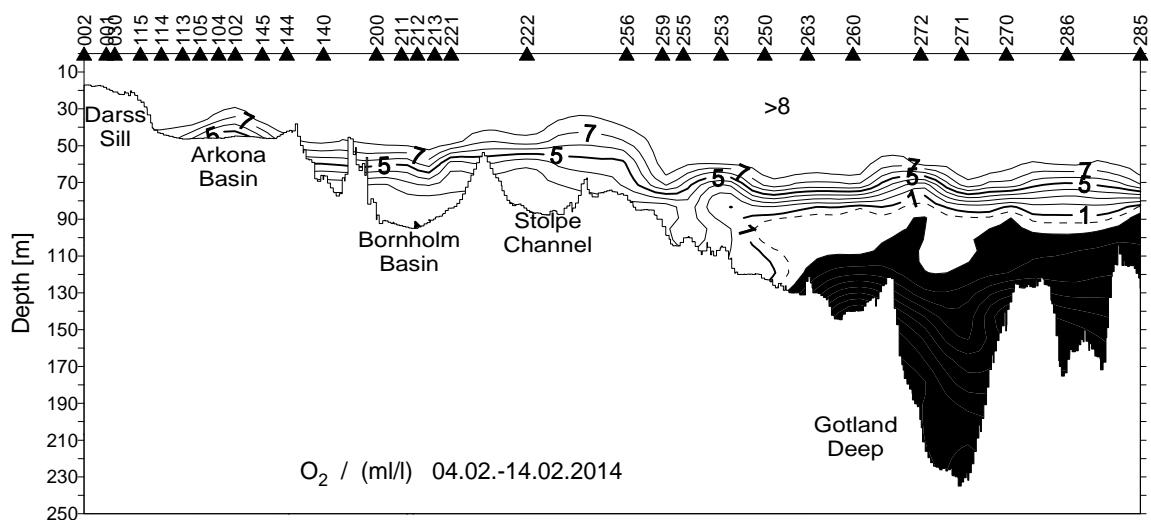


Abb. 35: Vertikale Verteilung des Sauerstoff/Schwefelwasserstoffgehaltes 2014 zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

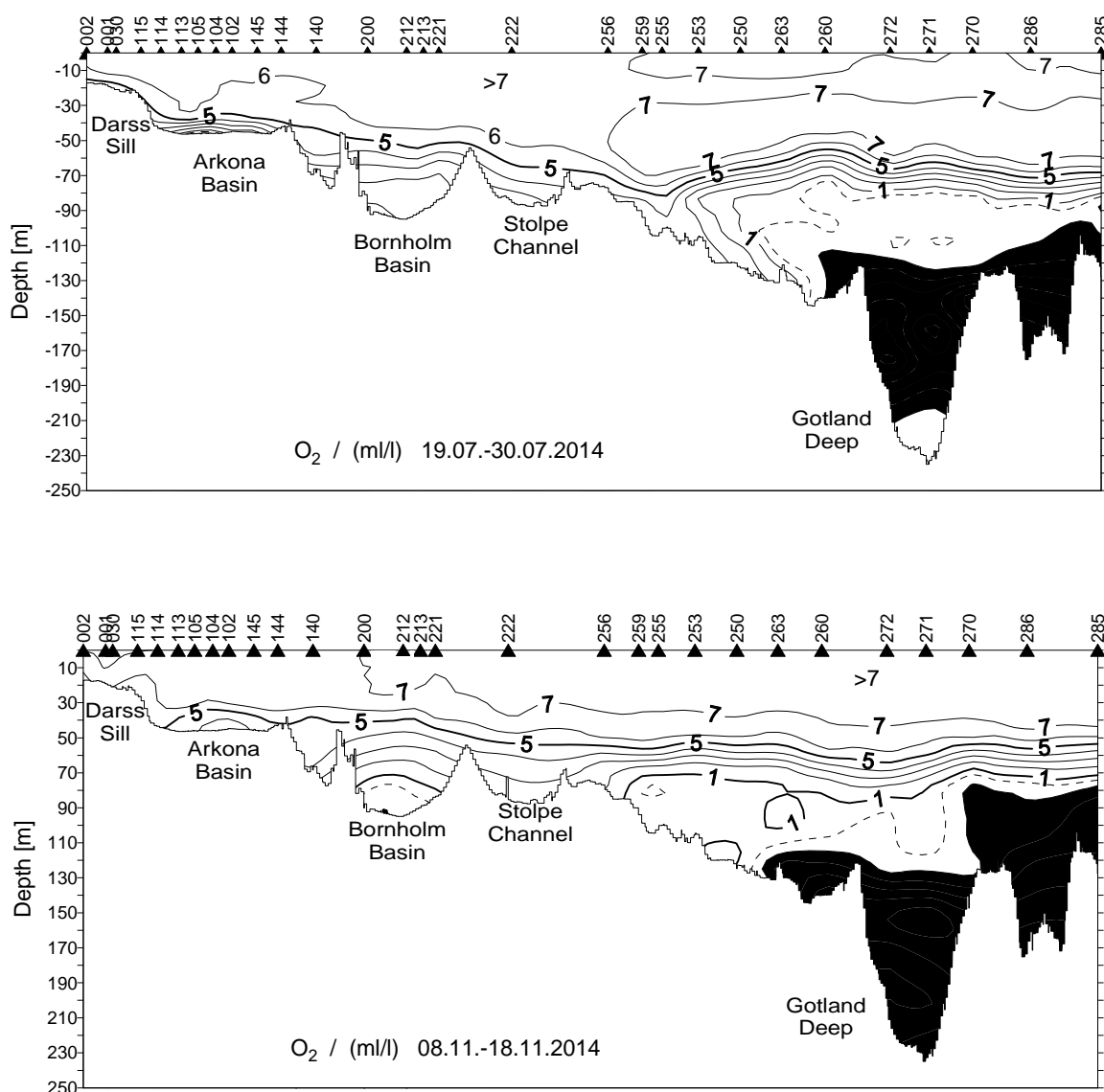


Abb. 35: Vertikale Verteilung des Sauerstoff/Schwefelwasserstoffgehaltes 2014 zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Das Bornholmbecken ist das am weitesten westlich gelegene der Tiefenbecken. Barotrope und barokline Einströme sind häufig in der Lage das Tiefenwasser zu belüften, was auch die Langzeitentwicklung seit 2001 belegt (NAUSCH et al., 2014). Seit 2006 führten vorwiegend barokline Einstromereignisse dazu, dass das Tiefenwasser des Bornholmbeckens fast durchweg oxisch war. Nur sporadisch wurden geringe Mengen an Schwefelwasserstoff gemessen, so auch im November 2013. Die oben ausführlich beschriebenen Einstromereignisse im Herbst 2013 (eingeströmtes Volumen 147 km<sup>3</sup>), im Februar (eingeströmtes Volumen 141 km<sup>3</sup>) und März 2014 (eingeströmtes Volumen 203 km<sup>3</sup>) führten im Frühjahr zu einer nachhaltigen Verbesserung der Sauerstoffverhältnisse im Tiefenwasser des Bornholmbeckens (Abb. 36), wo Ende April 5,65 ml/l Sauerstoff gemessen wurden.



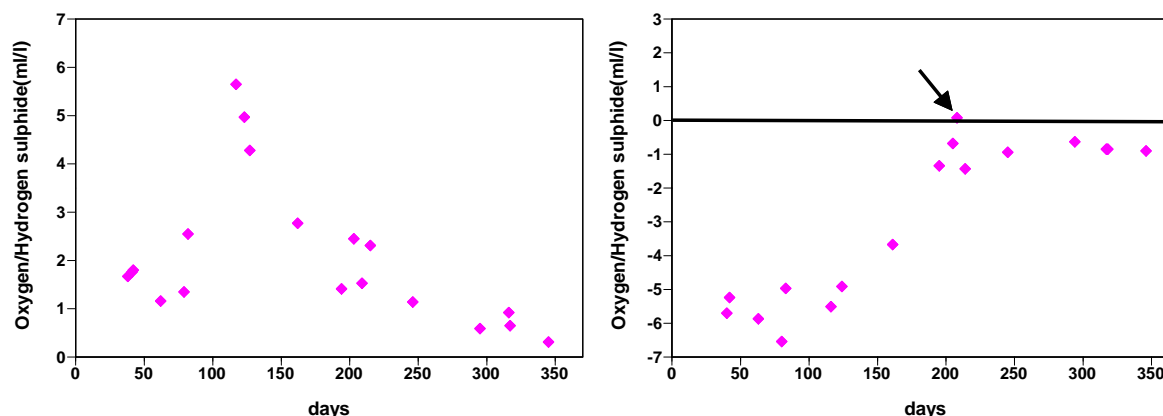


Abb. 36: Entwicklung des Sauerstoffgehaltes/Schwefelwasserstoffgehaltes im Bornholmtief (80 m Wassertiefe, links) und im Gotlandtief (200 m Wassertiefe, rechts) – IOW und SMHI-Daten

Im weiteren Jahresverlauf gingen die Sauerstoffkonzentrationen jedoch wieder zurück. Das komplexe Zusammenwirken der drei beschriebenen Ereignisse führte Ende April/Anfang Mai zum Überströmen der Stolper Schwelle. Somit konnten diese Wassermassen in der Folge bis ins Gotlandbecken vordringen und das Tiefenwasser erstmals seit 2003 wiederholt, jedoch nur kurzzeitig mit Sauerstoff belüftet (Abb. 35 und Abb. 36). Obwohl keines der drei Ereignisse die typischen Merkmale eines „Major Baltic Inflow“ erfüllte wurden jedoch in ihrer Kombination vergleichbar große Wasser-, Salz- und Sauerstoffmengen in das Tiefenwasser der Ostsee eingetragen. Diese „neuartige“ Form der Tiefenwasserbelüftung konnte erstmals beschrieben werden. Dies führte gleichzeitig dazu, dass im östlichen Gotlandbecken zum Ende des Jahres vergleichsweise geringe Schwefelwasserstoffkonzentrationen gemessen wurden. Üblicherweise finden sich am Ende einer langen Stagnationsperiode Werte zwischen  $-5$  ml/l und  $-7$  ml/l, wie das noch Anfang des Jahres 2014 der Fall war. Somit hatten sich schon Ende 2014 eine Situation eingestellt, die „günstige“ Voraussetzungen für den „Major Baltic Inflow“ vom Dezember 2014 geschaffen haben.

#### 6.4 Anorganische Nährstoffe

Die Eutrophierung wird nach wie vor als schwerwiegendste anthropogene Belastung der Ostsee angesehen (HELCOM, 2007). Eutrophierungseffekte konnten im Bereich großer Städte entlang der Ostseeküste bereits in der 1. Hälfte des 20. Jahrhunderts nachgewiesen werden (ELMGREN & LARSSON, 2001). In der offenen Ostsee fanden sich in den 1960er Jahren erste Anzeichen der Eutrophierung (FONSELIUS, 1969). Dies wird auch durch die Langzeitdatenreihen des IOW gestützt (NAUSCH et al., 2008b). Bis Mitte der 1980er Jahre nahm die Eutrophierung ernsthafte Ausmaße an. In den letzten Jahrzehnten wurden umfangreiche Maßnahmen zur Reduzierung der Eutrophierung vorgenommen. Trotzdem ist nach wie vor fast die gesamte Ostsee von

Eutrophierung betroffen. Lediglich kleine Bereiche in der Bottenwiek wurden als „nicht von Eutrophierung betroffen“ klassifiziert (HELCOM, 2014).

Exzessive Einträge von Stickstoff- und Phosphorverbindungen aus dem Einzugsgebiet der Ostsee stellen die Hauptursache der Eutrophierung dar. Die jüngste „Updated Pollution Load Compilation“ (HELCOM, 2015) gibt für das Jahr 2010 einen Eintrag von 36 200 t Phosphor und 758 000 t Stickstoff aus dem Einzugsgebiet an. Beim Stickstoff kommen noch 219 100 t über den atmosphärischen Eintrag hinzu. Hierbei ist zu beachten, dass ungefähr 40 % der Deposition über der Ostsee aus Emissionen außerhalb der Ostseeanrainerstaaten stammen. Für den atmosphärischen Phosphoreintrag liegen keine belastbaren Zahlen vor. Betrachtet man die Langzeitentwicklung ergibt sich für den atmosphärischen Stickstoffeintrag eine Reduktion von ca. 15 % zwischen 1995 und 2010. Unter Verwendung abflussnormierter Daten ergibt sich für den Phosphoreintrag aus dem Einzugsgebiet eine Reduktion von 20 % für den Zeitraum 1994 bis 2010. Für den Stickstoffeintrag in die Ostsee konnte eine Reduktion von 17 % errechnet werden (HELCOM, 2015). Aus dem deutschen Einzugsgebiet entstammen 490 t Phosphor und 16 900 t Stickstoff je Jahr.

Betrachtet man das deutsche Einzugsgebiet der Ostsee, so ist der flussbürtige Eintrag von Gesamtphosphor zwischen 1986/90 und 2004/08 um 61 % zurück gegangen, vor allem bedingt durch geringe Frachten aus den Punktquellen. Der vorwiegend aus diffusen Quellen stammende Stickstoffeintrag hat sich im gleichen Zeitraum nur um 13 % verringert, wovon die Hälfte der Abnahme dem geringeren Abflussgeschehen geschuldet ist (NAUSCH et al., 2011). Trotzdem müssen alle deutschen Küstengewässer und die angrenzenden Seegebiete nach wie vor als eutrophiert bewertet werden (HELCOM, 2014).

Die Nährstoffkomponenten gehören deshalb seit Etablierung eines einheitlichen Überwachungsprogramms der HELCOM Ende der 1970er Jahre zu den primären Indikatoren des Messprogramms und finden auch in seiner gegenwärtig stattfindenden Überarbeitung und Anpassung an die Meeres-Strategie-Rahmen-Richtlinie (MSRL) sowohl national als auch international entsprechende Beachtung. In die Untersuchungen sind vor allem die anorganischen Nährstoffe Ammonium, Nitrit, Nitrat, Phosphat und Silikat einbezogen, aber auch die Summenparameter Gesamtstickstoff und Gesamtphosphor werden regelmäßig gemessen.

In der Oberflächenschicht der gemäßigten Breiten weisen Nitrat und Phosphat einen typischen Jahresgang auf (NEHRING & MATTHÄUS, 1991, NAUSCH & NEHRING, 1996). In Abbildung 37 ist der Phosphat- und Nitratjahresgang 2014 für die östliche Gotlandsee dargestellt.

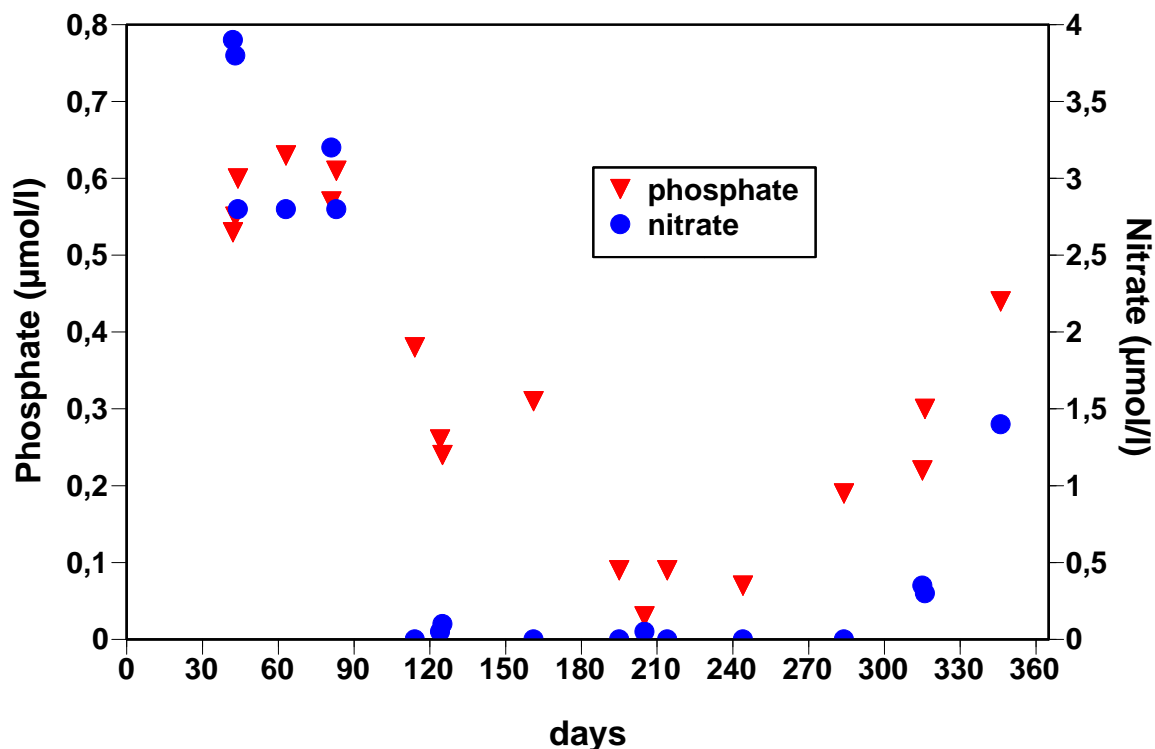


Abb. 37: Phosphat- und Nitratjahresgang 2014 im Oberflächenwasser (0-10 m) in der östlichen Gotlandsee (Station TF271) – IOW- und SMHI-Daten

In der zentralen Ostsee bildet sich im Winter eine typische Plateauphase aus, die in Abhängigkeit vom Witterungsverlauf über 2-3 Monate anhält (NAUSCH et al, 2008b), im Jahr 2014 jedoch bereits Ende März endete (Abb. 37). Der milde Winter (siehe Kapitel 2) führt zu einem zeitigen Beginn der Frühjahrsblüte des Phytoplanktons. Auf Grund des niedrigen N:P-Verhältnisses im Winter (7,5; Tab. 9) sind die Nitratvorräte bereits in der letzten Aprildekade verbraucht. Die Frühjahrsblüte bricht durch Stickstofflimitation zusammen und es verbleiben noch Phosphatkonzentrationen um 0,3 µmol/l. Im weiteren Jahresverlauf nehmen die Phosphatwerte weiter ab und erreichen Ende Juli die Nachweisgrenze. Je nach Intensität der Cyanobakterienblüte kann die Phosphatverarmung über einen längeren Zeitraum anhalten. Mit dem Ende der Blüte setzen Mineralisierungsprozesse ein und die Phosphatkonzentrationen beginnen wieder anzusteigen während die Nitratwerte bis Ende Oktober im Bereich der Nachweisgrenze verbleiben. Spätestens im Februar des Folgejahres werden für beide Nährstoffe wieder die Winterkonzentrationen erreicht.



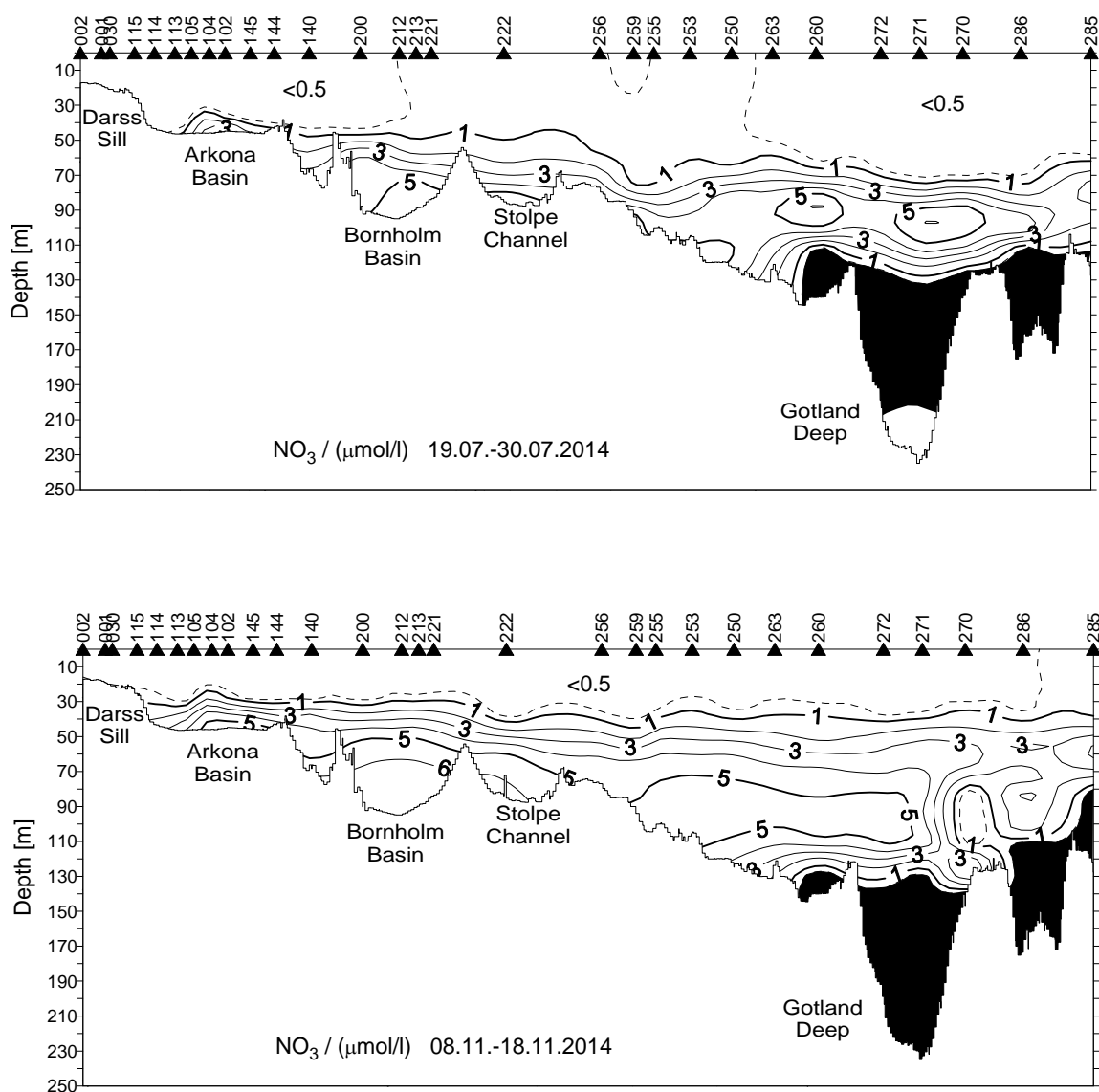


Abb. 38: Vertikale Verteilung des Nitratgehaltes 2014 zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

Der oben beschriebene Jahresgang für Nitrat und Phosphat kann auch aus den in Abbildung 38 und 39 dargestellten Schnitten für die fünf Messfahrten entnommen werden. Die winterlichen Phosphat- und Nitratwerte sind in Tabelle 9 zusammengefasst. Sie bewegen sich im Bereich der Vorjahre, wobei jedoch im nördlichen und westlichen Gotlandbecken recht hohe Phosphatkonzentrationen gefunden wurden.

Aus beiden Konzentrationsniveaus lässt sich das N/P-Verhältnis ermitteln. Generell liegen die Werte deutlich unter dem Redfield-Verhältnis von 16:1 (REDFIELD et al., 1963), wobei die Verhältnisse in der westlichen Ostsee mit Werten um 9 noch über den N/P-Verhältnissen der zentralen Ostsee liegen.

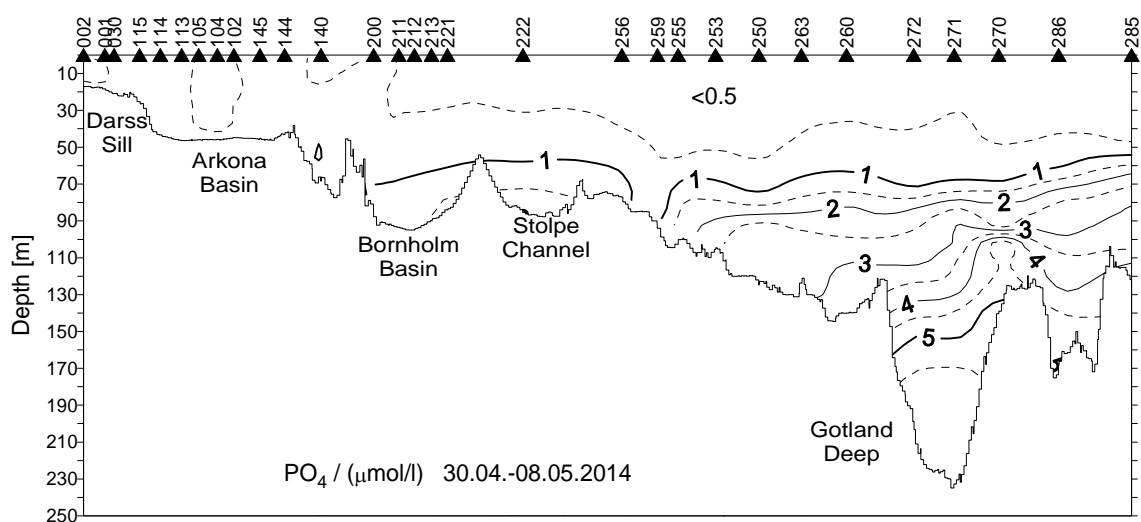
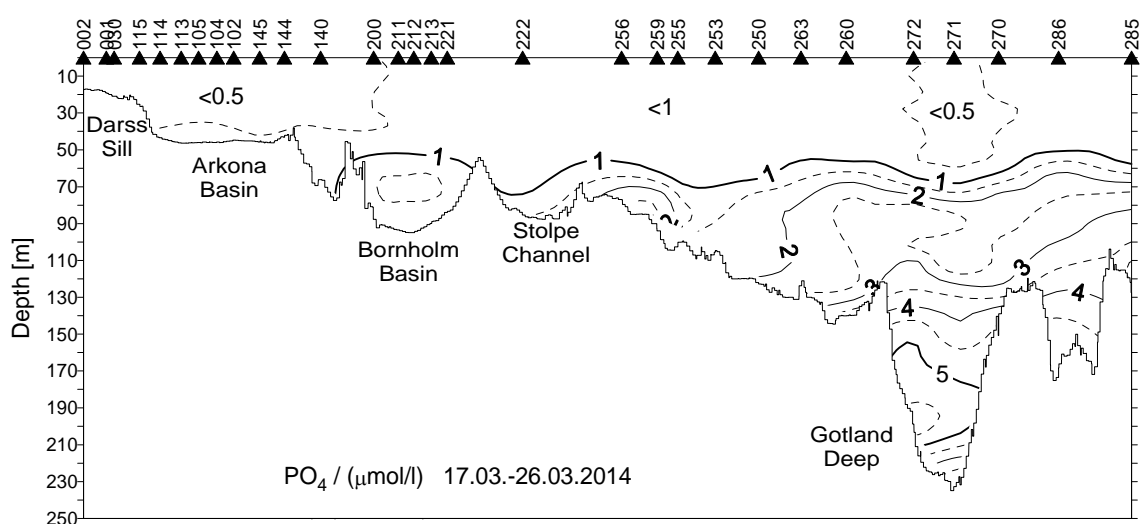
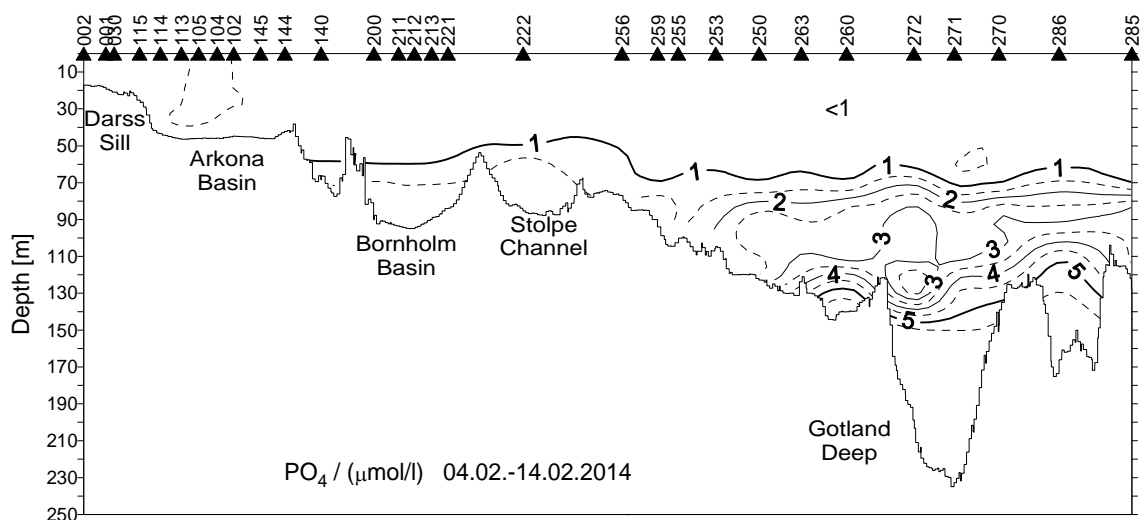


Abb. 39: Vertikale Verteilung des Phosphatgehaltes 2014 zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

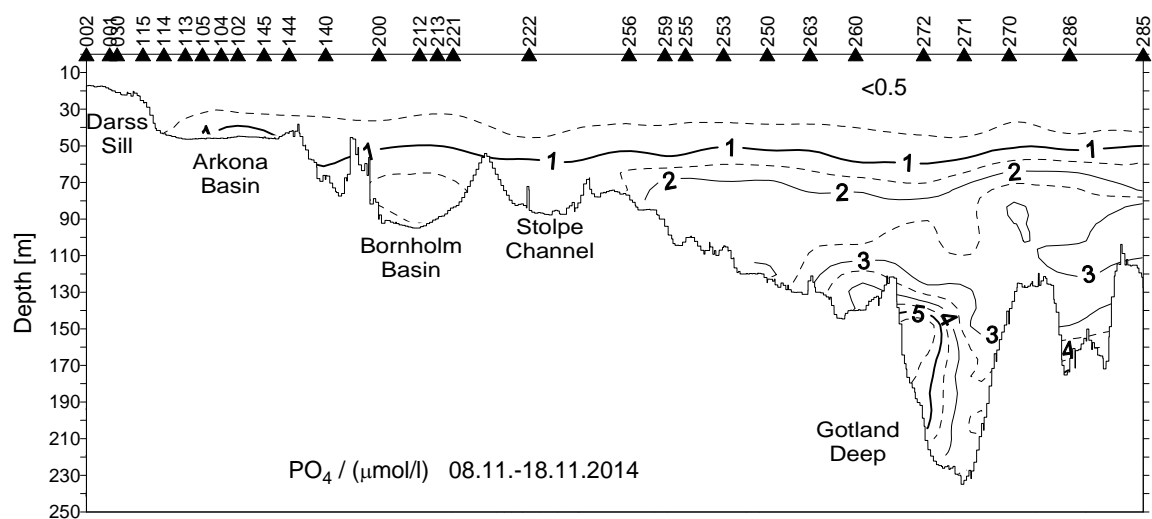
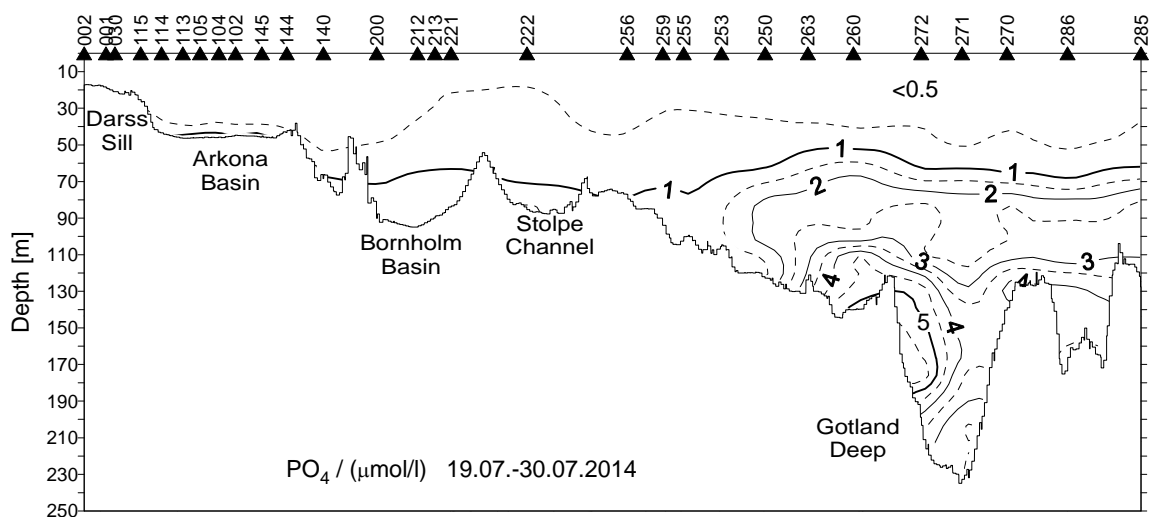


Abb. 39: Vertikale Verteilung des Phosphatgehaltes 2014 zwischen Darßer Schwelle und nördlichem Gotlandbecken

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

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

Station	Monat	2010	2011	2012	2013	2014
<b>360</b> (Fehmarnbelt)	Feb.	<b>0,47 <math>\pm</math> 0,01</b>	0,58 $\pm$ 0,01	0,71 $\pm$ 0,01	0,72 $\pm$ 0,01	0,57 $\pm$ 0,01
<b>022</b> (Lübecker Bucht)	Feb.	<b>0,61 <math>\pm</math> 0,01</b>		0,71 $\pm$ 0,01	0,85 $\pm$ 0,01	0,71 $\pm$ 0,04
<b>012</b> (Meckl. Bucht)	Feb.	0,62 $\pm$ 0,02	<b>0,55 <math>\pm</math> 0,00</b>	0,73 $\pm$ 0,02	0,85 $\pm$ 0,01	0,56 $\pm$ 0,00
<b>113</b> (Arkonasee)	Feb.	0,56 $\pm$ 0,02	<b>0,51 <math>\pm</math> 0,01</b>	0,73 $\pm$ 0,00	0,63 $\pm$ 0,01	0,53 $\pm$ 0,00
<b>213</b> (Bornholmtief)	Feb.	0,56 $\pm$ 0,01	<b>0,54 <math>\pm</math> 0,01</b>	0,66 $\pm$ 0,01	0,71 $\pm$ 0,0	0,70 $\pm$ 0,01
<b>271</b> (Gotlandtief)	Feb.	0,62 $\pm$ 0,0*	0,54 $\pm$ 0,01	0,64 $\pm$ 0,01	0,54 $\pm$ 0,02	<b>0,52 <math>\pm</math> 0,01</b>
<b>286</b> (Fårötief)	Feb.	0,62 $\pm$ 0,0*		0,56 $\pm$ 0,00	<b>0,50 <math>\pm</math> 0,01</b>	0,78 $\pm$ 0,01
<b>284</b> (Landsorttief)	Feb.	0,63 $\pm$ 0,0*		0,63 $\pm$ 0,01	<b>0,56 <math>\pm</math> 0,02</b>	0,84 $\pm$ 0,01
<b>245</b> (Karlsötief)	Feb.	0,65 $\pm$ 0,0*		0,80 $\pm$ 0,02	<b>0,60 <math>\pm</math> 0,02</b>	0,85 $\pm$ 0,00

\* SMHI data



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

Station	Monat	2010	2011	2012	2013	2014
<b>360</b> (Fehmarnbelt)	Feb.	4,9 $\pm$ 0,0	5,9 $\pm$ 0,2	5,7 $\pm$ 0,1	<b>4,1 <math>\pm</math> 0,0</b>	4,9 $\pm$ 0,2
<b>022</b> (Lübecker Bucht)	Feb.	6,4 $\pm$ 0,2		<b>6,2 <math>\pm</math> 0,2</b>	6,7 $\pm$ 0,1	6,6 $\pm$ 0,1
<b>012</b> (Meckl. Bucht) Bucht)	Feb.	4,5 $\pm$ 0,0	4,8 $\pm$ 0,0	<b>3,8 <math>\pm</math> 0,2</b>	5,8 $\pm$ 0,0	4,5 $\pm$ 0,1
<b>113</b> (Arkonasee)	Feb.	4,1 $\pm$ 0,1	<b>2,6 <math>\pm</math> 0,0</b>	2,9 $\pm$ 0,0	3,2 $\pm$ 0,0	5,2 $\pm$ 0,2
<b>213</b> (Bornholmtief)	Feb.	3,6 $\pm$ 0,0	3,7 $\pm$ 0,0	<b>2,6 <math>\pm</math> 0,0</b>	3,0 $\pm$ 0,0	4,0 $\pm$ 0,1
<b>271</b> (Gotlandtief)	Feb.	3,5 $\pm$ 0,0	3,2 $\pm$ 0,0	<b>2,6 <math>\pm</math> 0,2</b>	2,9 $\pm$ 0,0	3,9 $\pm$ 0,0
<b>286</b> (Färötief)	Feb.	3,9 $\pm$ 0,0		3,3 $\pm$ 0,0	<b>3,0 <math>\pm</math> 0,0</b>	4,5 $\pm$ 0,1
<b>284</b> (Landsortief)	Feb.			4,6 $\pm$ 0,1	4,4 $\pm$ 0,0	<b>3,8 <math>\pm</math> 0,3</b>
<b>245</b> (Karlsötief)	Feb.	<b>3,5 <math>\pm</math> 0,0</b>		4,0 $\pm$ 0,1	3,8 $\pm$ 0,1	<b>3,5 <math>\pm</math> 0,2</b>

Generell auffällig ist die große Variabilität der Messwerte in Tabelle 9. So lässt auch eine Korrelationsanalyse der 10-jährigen Datenreihe 2004-2013 keine signifikanten Veränderungen erkennen (NAUSCH et al., 2014). Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  beträgt beispielsweise für die Station TFO12 in der Mecklenburger Bucht 0,09 (Phosphat), 0,01 (Nitrat); für die Station TF113 in der Arkonasee 0,00 (Phosphat), 0,02 (Nitrat); für Station TF213 in der Bornholmsee 0,09 (Phosphat), 0,17 (Nitrat) und für die Station TF271 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, 2013):

	DIN ( $\mu\text{mol/l}$ )	PO <sub>4</sub> ( $\mu\text{mol/l}$ )
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 9 macht deutlich, dass diese Zielwerte nicht erreicht werden. Lediglich im Bereich Fehmarnbelt nähern sich Ist- und Zielwerte an. Es muss jedoch angemerkt werden, dass für die Ermittlung der Zielwerte der Winterzeitraum Dezember-Februar herangezogen wurde. Wie aus Abbildung 37 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, 2013). Damit wird deutlich, dass weitere Anstrengungen zur Nährstoffreduktion notwendig sind.

Tab. 10: Jahresmittelwerte und Standardabweichungen für Phosphat, Nitrat und Ammonium im Tiefenwasser der zentralen Ostsee: IOW sowie SMHI Daten (n = 15-28)

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

Station	Tiefe/m	2010	2011	2012	2013	2014
<b>213</b> (Bornholmtief)	80	2,22 $\pm$ 0,62	<b>2,66 <math>\pm</math> 1,39</b>	1,81 $\pm$ 0,85	1,62 $\pm$ 0,35	1,49 $\pm$ 0,31
<b>271</b> (Gotlandtief)	200	5,39 $\pm$ 0,29	5,66 $\pm$ 0,28	5,87 $\pm$ 0,16	<b>6,32 <math>\pm</math> 0,92</b>	4,50 $\pm$ 1,54
<b>286</b> (Fårötief)	150	4,27 $\pm$ 0,33	4,34 $\pm$ 0,61	4,45 $\pm$ 0,23	<b>4,77 <math>\pm</math> 0,58</b>	4,60 $\pm$ 0,67
<b>284</b> (Landsortief)	400	3,82 $\pm$ 0,17	3,67 $\pm$ 0,45	<b>3,92 <math>\pm</math> 0,25</b>	3,89 $\pm$ 0,21	3,85 $\pm$ 0,35
<b>245</b> (Karlsötief)	100	<b>4,37 <math>\pm</math> 0,44</b>	4,22 $\pm$ 0,33	3,47 $\pm$ 0,47	3,91 $\pm$ 0,53	3,99 $\pm$ 0,51

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

Station	Tiefe/m	2010	2011	2012	2013	2014
<b>213</b> (Bornholmtief)	80	7,5 $\pm$ 0,1	<b>4,6 <math>\pm</math> 2,8</b>	7,9 $\pm$ 3,1	6,4 $\pm$ 1,9	8,24 $\pm$ 1,83
<b>271</b> (Gotlandtief)	200	<b>0,0 <math>\pm</math> 0,0</b>	<b>0,0 <math>\pm</math> 0,0</b>	<b>0,0 <math>\pm</math> 0,0</b>	<b>0,0 <math>\pm</math> 0,0</b>	<b>0,0 <math>\pm</math> 0,0</b>
<b>286</b> (Fårötief)	150	<b>0,0 <math>\pm</math> 0,0</b>	<b>0,0 <math>\pm</math> 0,0</b>	<b>0,0 <math>\pm</math> 0,0</b>	<b>0,0 <math>\pm</math> 0,0</b>	<b>0,0 <math>\pm</math> 0,0</b>
<b>284</b> (Landsortief)	400	<b>0,0 <math>\pm</math> 0,0</b>	<b>0,0 <math>\pm</math> 0,0</b>	<b>0,0 <math>\pm</math> 0,0</b>	<b>0,0 <math>\pm</math> 0,0</b>	<b>0,0 <math>\pm</math> 0,0</b>
<b>245</b> (Karlsötief)	100	<b>0,0 <math>\pm</math> 0,0</b>	<b>0,0 <math>\pm</math> 0,0</b>	1,51 $\pm$ 2,08	0,1 $\pm$ 0,2	<b>0,0 <math>\pm</math> 0,0</b>

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

Station	Tiefe/m	2010	2011	2012	2013	2014
<b>213</b> (Bornholmtief)	80	0,1 $\pm$ 0,1	<b>2,1 <math>\pm</math> 3,4</b>	0,1 $\pm$ 1,9	0,1 $\pm$ 0,1	0,1 $\pm$ 0,2
<b>271</b> (Gotlandtief)	200	21,3 $\pm$ 2,6	20,2 $\pm$ 2,8	<b>26,2 <math>\pm</math> 2,8</b>	22,1 $\pm$ 8,7	18,4 $\pm$ 10,9
<b>286</b> (Fårötief)	150	9,8 $\pm$ 1,3	9,0 $\pm$ 1,4	12,2 $\pm$ 1,5	12,6 $\pm$ 3,0	<b>12,8 <math>\pm</math> 3,6</b>
<b>284</b> (Landsortief)	400	6,8 $\pm$ 1,0	6,3 $\pm$ 1,7	<b>8,5 <math>\pm</math> 1,6</b>	7,2 $\pm$ 2,3	7,9 $\pm$ 1,7
<b>245</b> (Karlsötief)	100	8,4 $\pm$ 2,3	<b>9,7 <math>\pm</math> 3,5</b>	4,4 $\pm$ 2,9	6,5 $\pm$ 3,1	7,7 $\pm$ 2,1

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 TF113) mit einer Wassertiefe von 47 m (Abb. 40). Im Winter ist die Wassersäule nahezu bis zum Grund durchmischt, so dass recht einheitliche Konzentrationen für Phosphat und Nitrat gemessen werden. Nitrat ist im März schon bis zu einer Wassertiefe von 25 m völlig verbraucht, im Mai und Juli ist die gesamte Wassersäule frei von Nitrat und erst im Herbst ist wieder eine allmähliche Zunahme zu beobachten. Im März ist im Oberflächenwasserkörper eine Abnahme der Phosphatkonzentrationen auf etwa 0,15  $\mu\text{mol/l}$  zu registrieren. Die untypischen Phosphatkonzentrationen im Mai in der gesamten Wassersäule sind schwer zu erklären. Im Juli liegen die Konzentrationen dann oberhalb der Thermokline im Bereich der Nachweisgrenze, im Herbst führen Mineralisation und Durchmischung zur Erhöhung der Phosphatwerte.

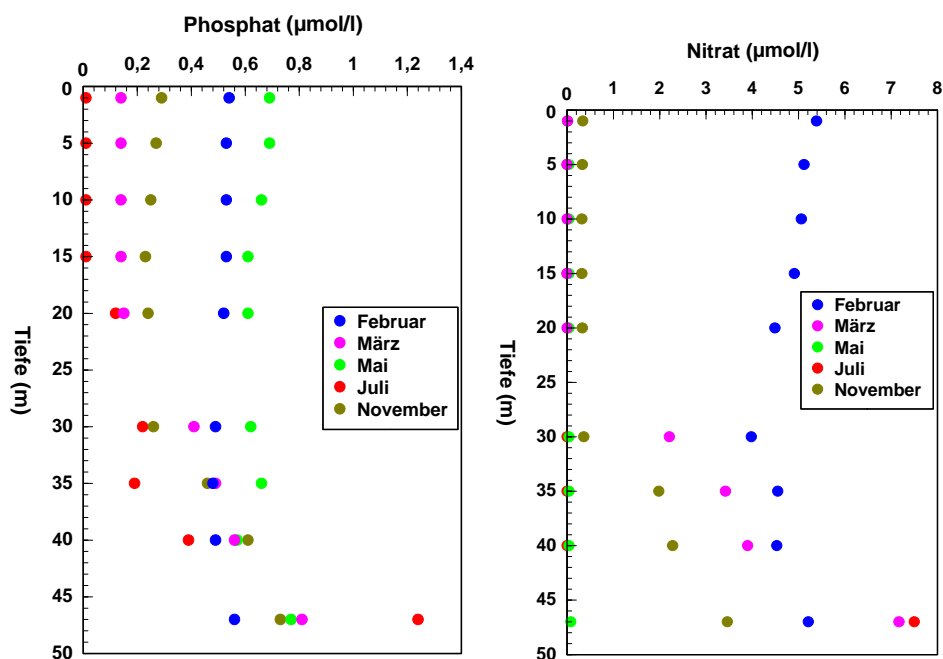


Abb. 40: Vertikalverteilung für Nitrat und Phosphat im Arkonabecken (Station TF113) im Jahresverlauf 2014

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 Abbildungen 38 und 39 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. 6 und 10).

Das Bornholmbecken ist das am weitesten westlich gelegene der Tiefenbecken. Barotrope und barokline Einströme sind häufig in der Lage das Tiefenwasser zu belüften, was auch die Langzeitentwicklung seit 2001 belegt (Nausch et al., 2014). Die oben ausführlich beschriebenen Einstromereignisse im Herbst 2013 und im Februar und März 2014 führten im Jahr 2014 zu weitgehend günstigen Sauerstoffverhältnissen. Die Nährstoffe reagieren entsprechend (Abb. 41). Es befinden sich im Tiefenwasser Phosphatkonzentrationen  $< 2 \mu\text{mol/l}$ , da das gelöste Phosphat unter oxidischen Bedingungen ausgefällt wird. Auf der anderen Seite ermöglicht der Sauerstoff die Nitrifikation vom Ammonium zum Nitrat. Folgerichtig sind die Ammoniumkonzentration von  $0,1 \pm 0,2 \mu\text{mol/l}$  (Tab. 10) im Bereich der Nachweisgrenze während die Nitratwerte mit zwei Ausnahmen zwischen  $7 \mu\text{mol/l}$  und  $9 \mu\text{mol/l}$  liegen (Abb. 41).

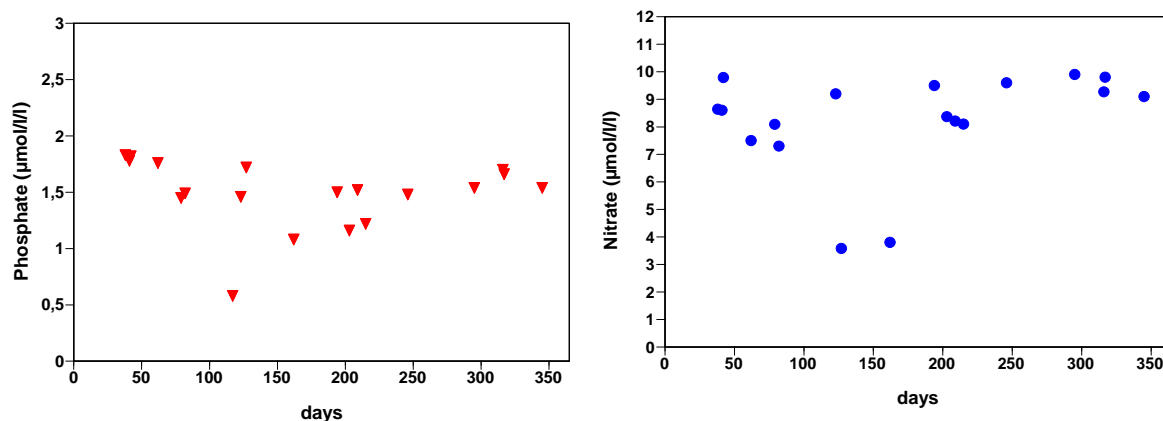


Abb. 41: Entwicklung des Phosphatgehaltes (links) und des Nitratgehaltes (rechts) im Bornholmtief (80 m Wassertiefe) im Jahr 2014 – IOW und SMHI-Daten

Das komplexe Zusammenwirken der drei beschriebenen Ereignisse führt Ende April/Anfang Mai zum Überströmen der Stolper Rinne. Damit konnten sauerstoffhaltige Wassermassen, die durch geringe Phosphat- und hohe Nitratkonzentrationen gekennzeichnet waren, bis ins Gotlandbecken vordringen. Dies führte neben der Reduzierung des Schwefelwasserstoffgehaltes (Kapitel 6.3) auch zu einem Rückgang der Phosphatkonzentrationen (Abb. 42). Die kurzzeitige Belüftung des Tiefenwassers im Juli 2014 resultierte in der ebenfalls kurzzeitigen Bildung von Nitrat (Abb. 42) und auch die Ammoniumwerte waren geringer als in den Vorjahren (Tab. 10).

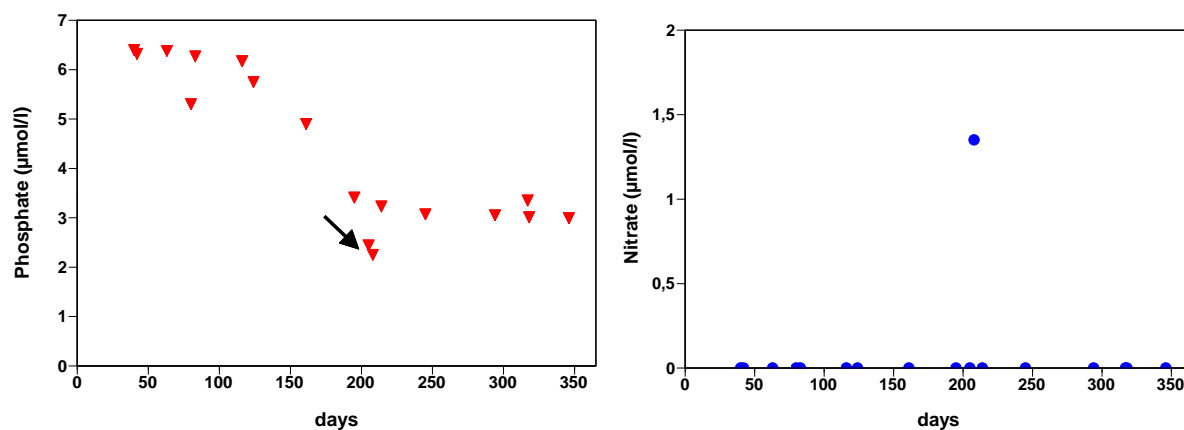


Abb. 42: Entwicklung des Phosphatgehaltes (links) und des Nitratgehaltes (rechts) im Gotlandtief (200 m Wassertiefe) im Jahr 2014 – IOW und SMHI-Daten

Somit hatten sich schon Ende 2014 eine Situation eingestellt, die „günstige“ Voraussetzungen für den „Major Baltic Inflow“ vom Dezember 2014 geschaffen haben.

## Zusammenfassung

Für den südlichen Ostseeraum ergab sich aus der Kältesumme an der Station Warnemünde von 65,8 K · d ein milder Winter 2013/14. Der Wert lag deutlich unter dem langjährigen Mittelwert von 104,5 K · d und belegte den 27. Platz der kältesten Winter seit Beginn der Vergleichsdaten im Zeitraum ab 1948. Die Kältesumme resultierte ausschließlich aus dem Monat Februar während alle anderen Monate die Kältesumme 0 K · d aufwiesen. Der kälteste Winter in der Beobachtungsreihe war der von 1962/63 mit 395,2 K · d.

Mit einer Wärmesumme von 236,9 K · d, registriert an der Station Warnemünde, reiht sich das Jahr 2014 auf Platz 10 im Zeitraum der letzten 67 Jahre ein und verdrängt den Vorjahreswert von 230,4 K · d auf den elften Platz. Der Wert liegt weit außerhalb des langjährigen Mittels von 148,8 K · d und oberhalb der Standardabweichung, so dass 2014 erneut als ein besonders warmes Jahr eingestuft werden kann. Dabei waren die Monatsmitteltemperaturen in den Monaten Juni und August leicht unterhalb des langjährigen Mittelwertes und April sowie Oktober auf ausgeglichenem Niveau. Im Vergleich weisen die übrigen Monate Mai, Juli und September mehr als doppelt so hohe Wärmesummen auf. Diese außergewöhnlich warmen Monate belegen die Plätze 8, 4 und 6 in der Zeitreihe seit 1948.

2014 war in Bezug auf Wasseroberflächentemperatur das wärmste Jahr seit 1990 und lag mit ca. 1,2 K über dem Mittelwert der Periode 1990-2014 und 0,4 K über dem bisher wärmsten Jahr 2008. Dazu haben außer Februar und Juni alle Monate und insbesondere die Monate Juli und August in der nördlichen Ostsee beigetragen. Die westliche Ostsee lag außer im Februar in allen Monaten +1 bis +3 K über den langjährigen Mittelwerten. Nach mildem Beginn des Jahres sorgte ein Kälteeinbruch ab ca. 20.01.2014 für eine starke Abkühlung bis Anfang Februar. Trotzdem lag das Januar-Monatsmittel +2 K über den Mittelwerten (1990-2014) und der Januar war nach 2007 der zweitwärmste in der westlichen Ostsee. Der Februar lag im Bereich der langjährigen Mittelwerte und war in der Arkonasee und im Bottnischen Meerbusen der kälteste Monat des Jahres. Der März entwickelte sich wie üblich zum kältesten Monat des Jahres in der Gotlandsee. Von März bis Mai waren in der gesamten Ostsee und sogar von März bis Dezember im westlichen Teil Anomalien von +1 bis +3 K zu verzeichnen.

Einstromereignisse mit geschätzten Volumina zwischen 100 und 400 km<sup>3</sup> fanden in der Ostsee 2014 vier Mal statt. Im Februar konnte an Hand der Pegeländerungen von Landsort Norra ein Einstromvolumen von 141 km<sup>3</sup> errechnet werden. Nach einer kurzen Ausstromphase kam es im März zu einem erneuten Einstrom mit einem geschätzten Volumen von 203 km<sup>3</sup>. Diese zwei Ereignisse führten mit den vorangegangenen Auswirkungen des Orkan Xaver im Dezember 2013 (eingeströmtes Volumen 147 km<sup>3</sup>) und der langen Westwindphase Ende Oktober bis Anfang November 2013 zu einem komplexen Zusammenwirken, so dass die Stolper Rinne gegen Ende April/Anfang Mai überströmt werden konnte. Das Gotlandtief wurde Ende Mai von diesen Wassermassen erreicht und das Tiefenwasser erstmalig seit 2003 mit Sauerstoff belüftet. Keines der drei Ereignisse erfüllte die typischen Merkmale eines „Major Baltic Inflow“. In ihrer Kombination sind jedoch vergleichbar große Wasser-, Salz- und Sauerstoffmengen in das

Tiefenwasser der Ostsee eingetragen worden. Diese „neuartige“ Form der Tiefenwasserbelüftung konnte erstmals beschrieben werden. Im August konnte eine weitere Einstromphase mit rund 164 km<sup>3</sup> nachgewiesen werden. Die Auswirkungen in Bezug auf die Belüftung der tiefen Becken blieben eher auf das Arkonabecken und das Bornholmbecken beschränkt.

Ab 13. Dezember 2014 kam es zu einem extrem starken Einstrom. Es strömten 358 km<sup>3</sup> Wasser in die Ostsee, davon waren 198 km<sup>3</sup> mit ca. 4 Gt Salz sehr salzreich. Nach gegenwärtigen Berechnungen stellt dieses Ereignis den drittgrößten Salzwassereinstrom seit Beginn der Messdaten im Jahr 1880 dar.

Der Jahresgang der Sauerstoffsättigung des Oberflächenwassers zeigte auch 2014 das typische Muster. Im Ergebnis der Dominanz sauerstoffzehrender Prozesse und geringer Produktion war das Oberflächenwasser im Februar in allen Seegebieten mit etwa 95 % bis 96 % leicht untersättigt. Auch im März verzeichnen wir in allen Seegebieten mit Ausnahme des Arkonabeckens weiterhin eine Untersättigung. Im Arkonabecken liegt die Sättigung im März dagegen bei 104,3 %. Der Höhepunkt der Frühjahrsblüte findet sich 2014 in allen Seegebieten im Mai, im Bornholmbecken und im östlichen Gotlandbecken wurden Sättigungswerte zwischen 120 % und 125 % ermittelt. Der Sommer zeigt das gewohnte Bild mit Sättigungswerten um 105 %. Nur im östlichen Gotlandbecken deuten Sättigungswerte um 115 % auf eine intensive Cyanobakterienblüte hin. 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 im Tiefenwasser der Becken der zentralen Ostsee wird vorwiegend durch das Auftreten oder Ausbleiben von starken barotropen und/oder baroklinen Einstromen geprägt. Das Bornholmbecken ist das am weitesten westliche gelegene der Tiefenbecken, so dass die Einstrome häufig in der Lage sind das Tiefenwasser zu belüften. So führten auch 2014 die oben beschriebenen Einstromereignisse vom Herbst 2013 sowie vom Februar und März 2014 im Frühjahr zu einer nachhaltigen Verbesserung der Sauerstoffverhältnisse im Tiefenwasser des Bornholmbeckens, wo Ende April 5,65 ml/l Sauerstoff gemessen wurden. Nach Überströmen der Stolper Schwelle konnten diese Wassermassen in der Folge bis ins Gotlandbecken vordringen und das Tiefenwasser erstmals seit 2003 wiederholt, jedoch nur kurzzeitig mit Sauerstoff belüften. Dies führte gleichzeitig dazu, dass im östlichen Gotlandbecken zum Ende des Jahres vergleichsweise geringe Schwefelwasserstoffkonzentrationen gemessen wurden. Üblicherweise finden sich am Ende einer langen Stagnationsperiode Werte zwischen -5 ml/l und -7 ml/l, wie das noch Anfang des Jahres 2014 der Fall war. Somit hatten sich schon Ende 2014 eine Situation eingestellt, die „günstige“ Voraussetzungen für den „Major Baltic Inflow“ vom Dezember 2014 geschaffen haben.

Die Sauerstoffsituation des Tiefenwassers spiegelt sich auch in den Nährstoffkonzentrationen wider. Die gute Sauerstoffversorgung des Tiefenwassers des Bornholmbeckens führt zu Phosphatkonzentrationen <2 µmol/l, da das gelöste Phosphat unter oxischen Bedingungen ausgefällt wird. Dagegen sind die Ammoniumkonzentration von 0,1 ± 0,2 µmol/l im Bereich der

Nachweisgrenze während die Nitratwerte mit zwei Ausnahmen zwischen 7 µmol/l und 9 µmol/l liegen. Die bis ins östliche Gotlandbecken vorgedrungenen Wassermassen, die durch geringe Phosphat- und hohe Nitratkonzentrationen gekennzeichnet waren, führten zu einem Rückgang der Phosphatkonzentrationen. Die kurzzeitige Belüftung des Tiefenwassers im Juli 2014 resultierte in der ebenfalls kurzzeitigen Bildung von Nitrat und auch die Ammoniumwerte waren geringer als in den Vorjahren. Auch nährstoffseitig waren damit „günstige“ Voraussetzungen für den „Major Baltic Inflow“ vom Dezember 2014 geschaffen.

## Literatur

- ARNEBORG, L., FIEKAS, V., UMLAUF, L. and BURCHARD, H. (2007): Gravity current dynamics and entrainment. A process study based on observations in the Arkona Basin, *J. Phys. Oceanogr.*, **37**, 2094-2113.
- BEZOLD, W.v. (1883): Die Kälterückfälle im Mai. – *Abhandlungen der königlichen Bayerischen Akademie der Wissenschaften*. Bd. **14**, Nr. 6, 71-108.
- BSH (2009): Flächenbezogene Eisvolumensumme.  
<http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Beobachtungen/Eis/Kuesten.jsp>
- 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.
- 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 (2014): WitterungsReport Express. Jahrgang 15, Nr. 1 – 13. Deutscher Wetterdienst
- DWD (2015): Windmessungen der Station Arkona in Stundenmittelwerten des Jahres 2013 –  
[ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/observations\\_germany/climate/](ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/observations_germany/climate/)
- FEISTEL, R., FEISTEL, S., NAUSCH, G., SZARON, J., LYSIAK-PASTUSZAK, E., AERTEBERG, G. (2008a): BALTIC: Monthly time series 1900-2005. In: FEISTEL, R., NAUSCH, G., WASMUND, N. (Eds.) (2008): State and evolution of the Baltic Sea, 1952-2005. – John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, 311-336.
- FEISTEL, R. SEIFERT, T., FEISTEL, S., NAUSCH, G. BOGDANSKA, B. BROMAN, B. HANSEN, L. HOLFORT, J., MOHRHOLZ, V., SCHMAGER, G., HAGEN, E., PERLET, I. and WASMUND, N. (2008b): Digital supplement. In: FEISTEL, R., NAUSCH, G. and WASMUND, N. (Eds.), State and Evolution of the Baltic Sea 1952-2005. – John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, p. 625-667.
- FONSELIUS, S. (1969): Hydrography of the Baltic deep basins. – *III. Fish. Board Swed. Ser. Hydrogr.* **23**, 1-97.
- FU-Berlin (2014a): Werden auch Sie Wetterpate!  
<http://www.met.fu-berlin.de/wetterpate/>
- FU-Berlin (2014b): Wetterkarte vom 08.12.2014 basierend auf Daten vom Deutschen Wetterdienst. <http://www.met.fu-berlin.de/de/wetter/maps>
- GRASSHOFF, K., ERHARDT, M. and KREMLING, K. (1983): *Methods of seawater analysis*. – 2<sup>nd</sup> Ed., Verlag Chemie, Weinheim.



- 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](http://www.helcom.fi/Monas/CombineManual2/CombineHome.htm)
- HELCOM (2007): *Baltic Sea Action Plan*. – [http://www.helcom.fi/Documents/Baltic%20sea%20action%20plan/BSAP\\_Final.pdf](http://www.helcom.fi/Documents/Baltic%20sea%20action%20plan/BSAP_Final.pdf)
- HELCOM (2013): Approaches and methods for eutrophication target setting in the Baltic Sea region. – *Balt. Sea Environ. Proc.* **133**, 1-134.
- HELCOM (2014): *Eutrophication of the Baltic Sea 2007-2011 – a concise thematic assessment*. – *Balt. Sea Environ Proc.* **143**, 1-41. [www.helcom.fi/Lists/Publications/BSEP143.pdf](http://www.helcom.fi/Lists/Publications/BSEP143.pdf)
- HELCOM (2015): *Updated Baltic Sea Pollution Load Compilation (PLC 5.5)*. *Balt. Sea Environ Proc.* **145**, 1-143. [www.helcom.fi/Lists/Publications/BSEP145\\_lowres.pdf](http://www.helcom.fi/Lists/Publications/BSEP145_lowres.pdf)
- IMGW (2015): *Sonnenstrahlung in J/m<sup>2</sup> an der Station Gdynia des Jahres 2013 – unveröffentlichte Daten*.
- KOSLOWSKI, G. (1989): Die flächenbezogene Eisvolumensumme, eine neue Maßzahl für die Bewertung des Eiswinters an der Ostseeküste Schleswig-Holsteins und ihr Zusammenhang mit dem Charakter des meteorologischen Winters. – *Dt. hydrogr. Z.* **42**, 61-80.
- KRÜGER, S., ROEDER, W., WLOST, K.-P., KOCH, M., KÄMMERER, H. and KNUTZ, T., (1998): *Autonomous instrumentation carrier (APIC) with acoustic transmission for shallow water profiling*. – *Oceanology International 98: The Global Ocean Conf. Proc.* **2**, 149-158.
- KRÜGER, S. (2000a): *Basic shipboard instrumentation and fixed autonomic stations for monitoring in the Baltic Sea*. – In: EL-HAWARY, F. (Ed.): *The Ocean Engineering Handbook*, CRC Press, Boca Raton, USA, 52-61.
- KRÜGER, S. (2000b): *Activities of the Institut für Ostseeforschung (IOW), Germany*. – *Proc. Int. Workshop on the “Coordinated Adriatic Observing System” CAOS*, 21-22 October 1998, Trieste, Italy, 53-60.
- LASS, H.U., MOHRHOLZ, V. and SEIFERT, T. (2001): *On the dynamics of the Pomeranian Bight*. – *Cont. Shelf. Res.* **21**, 1237-1261.
- LASS, H.U. and MATTHÄUS, W. (2008): *General Oceanography of the Baltic Sea*, in: FEISTEL, R., NAUSCH, G., and WASMUND, N. (Eds.), *State and Evolution of the Baltic Sea 1952 – 2005*. – John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, p. 5-43.
- LLUR (2014): *Sauerstoffmangel im bodennahen Wasser der westlichen Ostsee im September 2014*.
- 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.
- MOHRHOLZ, V., NAUMANN, M., NAUSCH, G., KRÜGER, S. and GRÄWE, U. (2015): *Fresh oxygen for the Baltic Sea – an exceptional saline inflow after a decade of stagnation*. – *Journal Mar. Syst.* **148**, 152-166.

- NAUMANN, M. and Nausch, G. (2015): Die Ostsee atmet auf – Salzwassereinstrom 2014. – Chemie in unserer Zeit 49, 76-81.
- 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., LASS, H.-U., NAGEL, K. and SIEGEL, H. (2003): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2002. – Meereswiss. Ber. **55**, 1-71.
- 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.
- NAUSCH, G.; NAUMANN, M.; UMLAUF, L.; MOHRHOLZ, V.; SIEGEL, H. (2014): Hydrographisch-hydrochemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2013. Meereswiss. Berichte Warnemünde **93**, 1-105.
- 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.
- RAK, D. (2015, in press): The new major Baltic inflow as observed in October 2014 in the Baltic Proper. – Oceanologia, <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceano.2015.02.001>.
- SCHMELZER, N., HOLFORT, J. (2014): Der Eiswinter 2013/14 an den deutschen Nord- und Ostseeküsten mit einem Überblick über die Eisverhältnisse im gesamten Ostseeraum. Eisdienst, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie Rostock.  
[http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Beobachtungen/Eis/Eiswinter2013\\_14.pdf](http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Beobachtungen/Eis/Eiswinter2013_14.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. – Conference Proceedings “Ocean from Space”, Venice, 26-30 April 2010.
- SIEGEL, H., and GERTH, M., 2014: Development of Sea Surface Temperature in the Baltic Sea in 2013. HELCOM Baltic Sea Environment Fact Sheets 2014. Online. [3.11.2014], <http://www.helcom.fi/baltic-sea-trends/environment-fact-sheets/>.
- SMHI (2015a): Pegelmessungen der Station Landort Norra in Stundenmittelwerten des Jahres 2014; Bezugsniveau RH2000. <http://opendata-download-ocobs.smhi.se/explore/>
- SMHI (2015b): Accumulated inflow through the Öresund. [http://www.smhi.se/hfa\\_coord/BOOS/Oresund.html](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.

## 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 2014. 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 dem Deutschen Wetterdienst (DWD) für die Bereitstellung der Winddaten von Arkona im Online-Datenportal und Frau Gisela Tschersich vom BSH für die Bereitstellung der NOAA-Wettersatellitendaten. Die Autoren bedanken sich bei dem Schwedischen Meteorologischen und Hydrologischen Institut (SMHI), Norrköpping, für die Bereitstellung von Pegeldata im Online-Datenportal. Frau Lotta Fyrberg, Ozeanographisches Labor des SMHI in Göteborg, stellte uns hydrographisch-chemische Beobachtungen ausgewählter Ostseestationen aus dem Schwedischen Ozean Archiv (SHARK) zur Verfügung, die im Rahmen des nationalen schwedischen Umweltüberwachungsprogrammes gewonnen wurden. Frau ELZBIETA LYSIAK-PASTUSZAK von der Maritimen Abteilung des Instituts für Meteorologie und Wasserwirtschaft in Gdynia (IMGW) stellte uns freundlicherweise Beobachtungsdaten für das „Danziger Tief“ zur Verfügung. Wir danken 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.