

# **Hydrographisch-chemische Bedingungen in der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) im Jahr 2008**

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

Leibniz- Institut für Ostseeforschung Warnemünde  
an der Universität Rostock

**Im Auftrag  
des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie  
Hamburg und Rostock**

Warnemünde  
April 2009

# Inhaltsverzeichnis

	<b>Seite</b>
1. Einleitung	2
2. Meteorologische Bedingungen	4
3. Wasseraustausch durch die Ostseezugänge/ Beobachtungen an der Messplattform „Darßer Schwelle“	17
3.1 Wassertemperatur, Salzgehalt und Sauerstoffgehalt	17
3.2 Strömung	25
4. Beobachtungen an der Bojenstation „Arkonabecken“	26
5. Beobachtungen an der Bojenstation „Oder- Bank“	30
6. Hydrographisch- hydrochemische Bedingungen in der westlichen Ostsee	33
6.1. Wassertemperatur	33
6.1.1 Wasseroberflächentemperatur	33
6.1.2 Vertikalverteilung der Wassertemperatur	36
6.2 Salzgehalt	37
6.3 Sauerstoffverteilung	38
6.4 Anorganische Nährstoffe	42
6.5 Natürliche organische Verbindungen	48
Zusammenfassung	55
Summary	56
Danksagung	57
Literaturverzeichnis	58

## 1. Einleitung

Der vorliegende Bericht basiert im Wesentlichen auf dem Ostsee-Überwachungsprogramm, 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 Bornholmsgatt und umfasst damit im Wesentlichen die Ausschließliche Wirtschaftszone Deutschlands (AWZ). Abb. 1 gibt eine Übersicht über die zu beprobenden Stationen. Nur im Zusammenhang mit starken Einstromereignissen aus der Nordsee können operativ 3 Stationen im Bornholmbecken zusätzlich in das Messprogramm aufgenommen werden (vgl. Arbeitsplan 2008). Zu den Aufgaben des Programms gehört die Überwachung des Wasseraustausches zwischen Ost- und Nordsee, die Beschreibung der hydrographisch-chemischen Bedingungen im Untersuchungsgebiet sowie die Identifikation der zeitlichen und räumlichen Veränderungen.

Im Jahre 2008 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. Die internationale Zuordnung der Stationen kann aktualisiert gemäß dem ICES Stationary Code dem Arbeitsplan 2009 entnommen werden.

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

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

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

Die MARNET-Station „ODER-BANK“ mußte im November 2007 wegen Verankerungsbruch außer Betrieb genommen werden. Auf Grund technischer und organisatorischen Probleme konnte sie erst am 19.07.2008 wieder in Betrieb genommen werden (vgl. hierzu Tätigkeitsbericht 2008). Leider ist hier somit erstmalig eine größere Datenlücke entstanden, da die nach dem Verankerungsbruch und der Einschleppung gesetzte Off-Line-Ersatzmooring kurze Zeit nach Ausbringung durch Schifffahrt zerstört worden war.

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

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

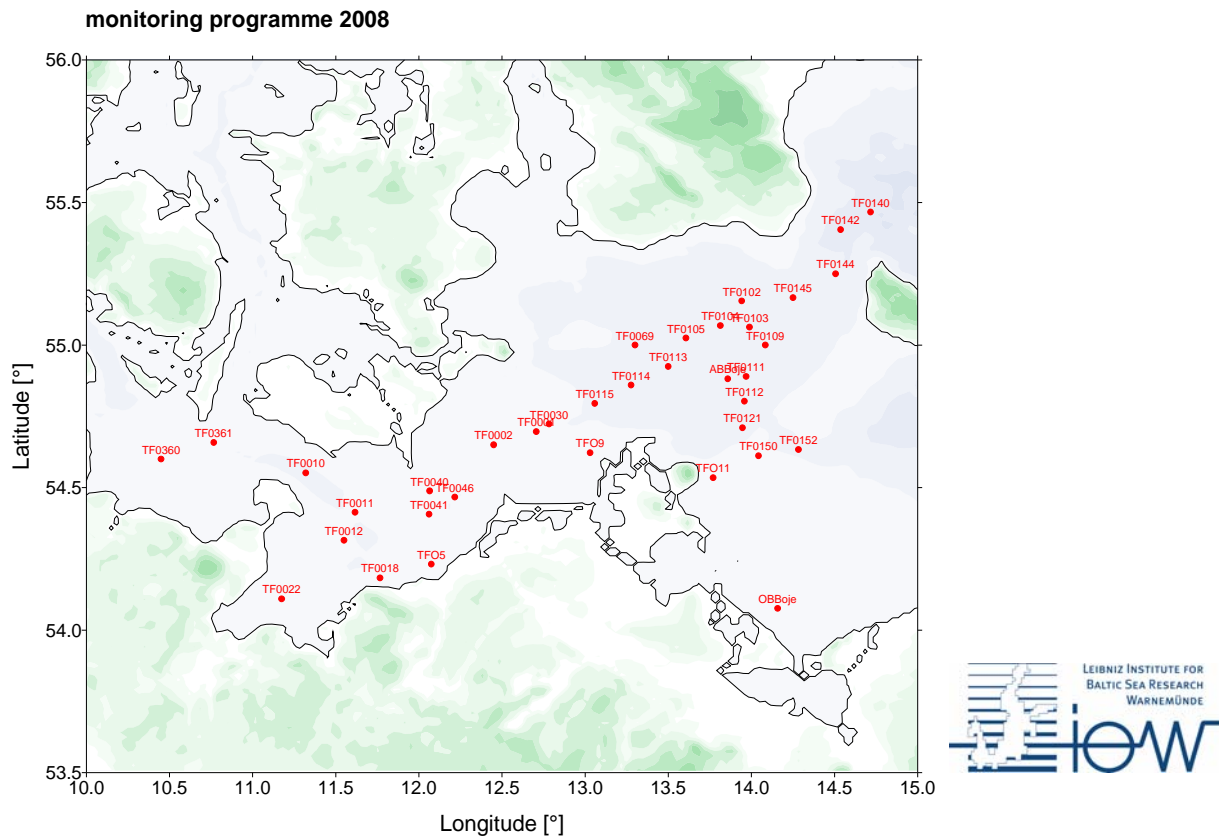


Abb. 1:  
 Stationskarte des Untersuchungsgebietes. Die Station OB Boje wird nur im Rahmen des Schadstoffmonitorings während der Überwachungsfahrten im Februar und August beprobt. An den Stationen TF0018 und TF0152 erfolgen hydrographische Messungen nur im Zusammenhang mit der Benthosbeprobung im November

## 2. Meteorologische Bedingungen

Der Witterungsverlauf des Jahres 2008 in der südlichen Ostsee kann durch Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD, 2008a) an der Wetterstation Arkona auf Rügen, die Wärme- und Kältesummen der Wetterstation Warnemünde sowie den Verlauf des Eiswinters beschrieben werden. Tab. 1 zeigt die monatlichen Temperaturen, die Luftfeuchtigkeit, die Sonnenscheindauer, den Niederschlag sowie die Zahl der Frost- und Eistage, gemessen an der Station Arkona sowie die Strahlungswerte der Station Gdynia. Tab. 2 enthält die Kälte- und Wärmesummen der Wetterstation Warnemünde zusammen mit dem langjährigen Mittel.

Der Winter 2007/2008 war durch die geringste Eisbedeckung seit 1720 sehr ungewöhnlich. Er war mild und kurz, mit der Kältesumme 20,0 K d von Warnemünde (Tab. 2) auf Platz 8 der mildesten seit Beginn der Vergleichsdaten im Jahr 1948, mit einem Wert von nur 20% des langjährigen Mittels über 60 Jahre. Damit ist er seit 2000 der zweite

unter den mildesten 10 Wintern seit 1948, nach 2006/2007 mit 10,3 K d als dem mildesten. Er lag nach finnischen Angaben (FIMR, 2008) mit einer maximalen Eisbedeckung der Ostsee von 49 000 km<sup>2</sup>, dem niedrigsten seit Beginn der Aufzeichnungen bei 23% des langjährigen Mittelwerts von 214 000 km<sup>2</sup> seit 1720. Ähnlich mild waren seit dem Zweiten Weltkrieg nur die Winter 1988/89 mit 52 000 km<sup>2</sup> und 1960/61 mit 53 000 km<sup>2</sup>.

Neben verschiedenen anderen Indices zur Beschreibung des Ausmaßes der Ostseevereisungen (SCHMELZER et al., 2008) wurde 1989 die flächenbezogene Eisvolumensumme für die Bewertung der Stärke eines Eiswinters in den deutschen Küstengebieten eingeführt (KOSLOWSKI, 1989; BSH, 2009). Zusätzlich zur Dauer der Vereisung werden der Bedeckungsgrad und die Eisdicke zur Bestimmung hinzugezogen, um den häufig unterbrochenen Vereisungsperioden in den einzelnen Wintern besser gerecht zu werden. Die täglichen Werte der flächenbezogenen Eismenge an den 13 deutschen Eisklimastationen werden zeitlich aufsummiert. Die flächenbezogene Eisvolumensumme ergibt sich daraus als Durchschnittswert dieser 13 Stationen. Der Mittelwert für die Winter von 1896/97 bis 1986/87 liegt mit  $3,06 \pm 5,80$  m in einem ganz schwach besetzten Intervall, das die Übergangsstelle der bimodalen Verteilung zwischen mäßigen und starken Wintern bildet. Die höchsten registrierten Werte waren 26.83 m (1942), 26.71 m (1940), 25.26 m (1947) und 23.07 m (1963); alle anderen Winter lagen weit unter 20 m (KOSLOWSKI, 1989). Die flächenbezogene Eisvolumensumme für die deutsche Ostseeküste war im Jahr 2008 gleich 0.01 m. Die Eisbildung beschränkte sich auf die flachen und geschützt liegenden Küstengewässer und Häfen, die offene See des deutschen Hoheitsgebiets blieb im Winter 2007/8 eisfrei. Nur acht Winter in der seit 1896/97 bestehenden Beobachtungsreihe waren in Deutschland noch schwächer als der Eiswinter 2007/8 (SCHMELZER, 2008). Die Kältesummen von Warnemünde der Wintermonate 2007/8 (Tab. 2) waren erheblich unterdurchschnittlich in allen Monaten. Die Eissaison der deutschen Ostseeküste war extrem kurz, begann am 4. Januar 2008 (im Gegensatz zum mittleren Termin 28. November) und endete schon wieder am 21. Januar (SCHMELZER, 2008).

Das Jahr 2008 war geprägt von häufigen Blockierungslagen über Deutschland und dem Ostseeraum, mit häufigeren und anhaltenden Süd-, Ost- oder Nordwinden (Abb 2a), sowie mehreren Vb-Tiefs, die den Ostseeraum von der Adria aus erreichten. Die hier angegebenen Namen der Hochs und Tiefs wurden 2008 von der Freien Universität Berlin vergeben, in guter Tradition seit 1954, und seit 2002 auch über sogenannte „Wetterpatenschaften“ (FU-BERLIN, 2008).

Zwischen dem kräftigen Hoch „Evi“ am Weißen Meer und dem Tief „Anje“ über der Biskaya führte südöstlicher Wind am 3. und 4. Januar sehr kalte Luft heran (-6 °C in Warnemünde), die zu einer ersten Eisbildung im deutschen Ostseeraum führte und deren Stagnation in der nördlichen Ostsee überwand. Ein Pegelunterschied von ca 1 m zwischen Gedser und Hornbaek bewirkte starken Ausstrom von Ostseewasser in das Kattegat. Mit den nachfolgenden Tiefs „Brigitta“ und „Christine“ vom 5. – 7.1. bildete sich

eine Tiefdruckrinne von Korsika bis Grönland. Am 8.1. setzte an der Darßer Schwelle barokliner Einstrom ein. Die zweite Januarhälfte war überwiegend stürmisch mit Orkanböen an den Küsten und in den Mittelgebirgen und bewirkte einen kleinen barotropen Einstrom. So brachte am 16.1. das Tief „Jette“ Sturm von West, gefolgt von „Louisa“ am 19.1., „Paula“ am 26.1. und „Resi“ am 1.2.

Der Februar blieb in Deutschland fast immer und überall ohne Schnee; er war verbreitet deutlich zu warm, meist zu trocken und sonnig. Am 22. Februar begann mit dem Tief „Anette“ ein neuer kleiner barotroper Einstrom, gefolgt von „Birgit“, „Carmelita“ am 27.2. und „Emma“ am 1. März. Im Tiefenwasser des Bornholmbeckens wurde Ende März thermisch sehr inhomogenes Wasser (bis über 8 °C) mit Sauerstoff (bis 3 ml/l) gefunden, das offenbar in Folge der barotropen Ereignissen im Winter 2008 durch junge Einschichtung in vorhandenes warmes Wasser aus dem Vorjahr entstand. Das über die Stolper Schwelle abfließende warme Wasser konnte bis hin zum südöstlichen Gotlandbecken beobachtet werden (FEISTEL, 2008). Von Juli bis Oktober 2008 bewirkte es eine allmähliche Erwärmung der Schicht um 125 m Tiefe im östlichen Gotlandbecken. Durch das Tief „Melli“ über der südlichen Ostsee am 22./23.3. traten auf Rügen Böen bis Stärke 11 auf; in Lübeck und Wismar erreichte das Hochwasser die Altstädte. Am 24.3. sorgte ein Zustrom von polarer Luft für starke Schneefälle und die kältesten Ostern seit 38 Jahren. Am 26.3. reichte die Neuschneedecke vom Ostseestrand bis an die Alpen (OZ, 2008a). Die damit beginnende Blockierungslage führte zu kräftigem Ausstrom und sinkendem Landsortpegel bis Mitte April.

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

Der Mai 2008 lag bei den trockenen Monaten auf Platz 3 (nach 1919 und 1992), bei den sonnenscheinreichen auf Rang 4 seit Beginn deutschlandweiter Messungen (DWD, 2008a). 404 Sonnenstunden auf Hiddensee (OZ, 2008b) waren ein neuer Rekord für Mai, ebenso 395,5 h in Warnemünde. Der Allzeitrekord ist 414 h im Juli 1994 am Kap Arkona. Tab. 1 zeigt im Mai das Jahresmaximum der Solarstrahlung in Gdynia, obwohl die astronomische und die über der Ostsee gemessene mittlere Einstrahlung erst im Juni

ihren Höchstwert erreicht (HAGEN und FEISTEL, 2008). Ab Mitte Mai, unter den Hochs „Marco“ ab 5.5., „Nevio“ und „Otto“, bei anfänglicher Omega-Lage über der Mitteleuropa, registrierte der Mast an der Darßer Schwelle einen baroklinen Einstrom ab dem 17.5. Ein Indikator für die Blockierungslage war auch das Tief „Fei“, das am 27.5. entgegen der Regel westwärts von Frankreich auf die Biskaya zog. Während der Osten Deutschlands viel Sonne genoss, richteten am 30. und 31.5. heftige Hagelschauer im Westen schwere Schäden an. Westlich der Elbe zogen schwüle Luftmassen mit Unwettern nordwärts von Korsika und der Po-Ebene über Schwaben, Hessen und Rheinland-Pfalz nach Benelux und England und hinterließen großräumig Überschwemmungen. Heftiger Hagel, Gewitter und Sturm durch Tief „Hilal“ richteten in der Nacht zum 31.5. schwere Schäden in der Südhälfte Deutschlands an, die Bahn sperrte mehrere ICE-Strecken. Vom 2.6. bis 4.6. traten heftige Gewitter, sintflutartige Regenfälle und verheerende Überschwemmungen in Baden-Württemberg und Hamburg auf.

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

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

Am 20./21.7. verursachte Tief „Yvonne“ Sturm an der Nordseeküste, bevor Hoch „Volker“ am 23.07. die ungewöhnliche Siebenschläferperiode 2008 scheinbar beendete. Der Kern von „Volker“ lag bei Lappland jedoch weiter nördlich als bei normalen Omega-Lagen im



August und ließ am Südrand Tiefausläufer mit schwül-warmer feuchter Luft nach Deutschland und Mitteleuropa ziehen, die dort westlich der Elbe weitere Niederschläge bewirkten. Mit starken Regenschauern, schweren Sturmböen und Blitzen zogen heftige Unwetter des Tiefs „Christine“ am 6. August über Norddeutschland. Windgeschwindigkeiten über 100 km/h wurden in Hannover und am Bodensee gemessen. Heftiger Regen bis zu 30 mm fiel innerhalb von zwei Stunden auf der Nordseeinsel Wangerooge, 40 mm in nur einer Stunde in Schleswig. Unter der Wirkung von Hoch „Volker“ setzte ab 24. Juli starker Ausstrom ein, der an der Darßer Schwelle bis zum Boden zu geringem Salzgehalt führte. Am 30.07. begann dann plötzlich barokliner Einstrom am Mast, wobei der bodennahe Salzgehalt über 18 g/kg stieg und der Sauerstoff auf 5% Sättigung absank.

Wie schon 2007 waren die Hundstage Anfang August 2008 entgegen der Regel überwiegend verregnet (DWD, 2008a). Hinter Tief „Elfriede“, das am 14.8. eine Folge von stürmischen Westwindtiefs abschloss, fehlte ein nächstes Islandtief. In der Folge drang kalte Luft über Irland bis Südfrankreich vor und führt dort zur Entstehung des Vb-Tiefs „Friederike“, das am 15. bis 17.8. entlang der Oder nordwärts zog. Nachdem „Friederike“ weiter östlich über Polen viel Regen brachte, kehrte in der 2. Augushälfte über der Ostsee die Siebenschläferlage noch einmal zurück mit Schauern und Gewittern.

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

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

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

Am 11.11. setzte mit dem Sturmtief „Chanel“ wieder barotroper Einstrom ein. Mit „Biergartenwetter“ bei Temperaturen von bis zu 15 °C war die Nacht bei Südwestwind die wärmste an einem 11. November seit Beginn der Aufzeichnungen in Süd- und

Ostdeutschland. In Berlin wurde mit 15,2 °C eine neue November-Höchstmarke seit 1982 erreicht. Die Tiefs „Doreen“ am 16.11. und „Gabrijela“ am 20.11. setzten den barotropen Einstrom fort; am 21. und 22.11. fiel der erste Schnee bis in das Flachland (DWD, 2008a).

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

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

In Warnemünde war es 2008 in Bezug auf die monatlichen Wärmesummen nur im April und Oktober geringfügig zu kalt (Tab. 2), der Rest des Jahres fiel zum Teil erheblich wärmer aus als der langjährige Mittelwert. Die Jahreswärmesumme 2008 von 196 K d liegt deutlich höher als der Mittelwert 146 K d der Beobachtungsreihe seit 1948, aber noch innerhalb der statistischen Streuung und weit unter dem Rekordwert 355 K d des Jahrs 2006. Wie die Temperaturen an der Station Arkona zeigen (Tab. 1), war 2008 kein Monat kälter als im langfristigen Mittel; bis auf den Oktober herrschten positive Temperaturanomalien vor, insbesondere im Februar (+4,0 K) und Januar (+3,1 K). Die positiven Temperaturanomalien von Februar bis Juli gingen mit größerer Sonnenscheindauer einher, die im Oktober keine vergleichbare Wirkung aufwies. Mit 241% war der April mit Abstand niederschlagsreichster Monat des Jahres 2008, fast vergleichbar mit den hohen monatlichen Maxima über 270% im Juni/Juli 2007. Dagegen fielen Juni/Juli 2008 und der November mit weniger als 50% des normalen Durchschnitts deutlich zu trocken aus. Insgesamt war auch das Jahr 2008 in Warnemünde im Mittel sehr warm und setzte die jüngste Folge von positiven Anomalien fort, wobei der zu warme Winter ausgeprägter war als der Sommer. Dieses Verhalten entspricht dem beobachteten mittleren Trend der letzten 50 Jahre (HAGEN und FEISTEL, 2008). Die Niederschläge schwankten 2008 zwischen 44% im Juli und 241% im April. Der Extremwerte der Luftfeuchte waren 75% im Mai und 77% im Juni in Warnemünde sowie 89% im Januar und 90% im Dezember. Die relative Luftfeuchte über den Ozeanen weltweit liegt bei 75-82% in allen Jahreszeiten mit geringen zwischenjährlichen und regionalen Schwankungen (DAI, 2006).

Tab. 1

Monatliche gemittelte Wetterdaten der Station Arkona (Rügen, 42 m über NN) nach DWD (2009).  $t$ : Lufttemperatur,  $\Delta t$ : Lufttemperatur-Anomalie,  $h$ : Luftfeuchte,  $s$ : Sonnenscheindauer,  $r$ : Niederschlag, Frost: Zahl der Tage mit Tiefsttemperatur unter  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Eis: Zahl der Tage mit Höchsttemperatur unter  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Solar: Sonnenstrahlung in  $\text{J}/\text{m}^2$  an der Station Gdynia,  $54^{\circ}31'\text{ N}$ ,  $18^{\circ}33'\text{ O}$ , 22 m über NN, von IMGW (2009). Prozentangaben sind relativ zum langjährigen Mittel. Maxima und Minima hervorgehoben.

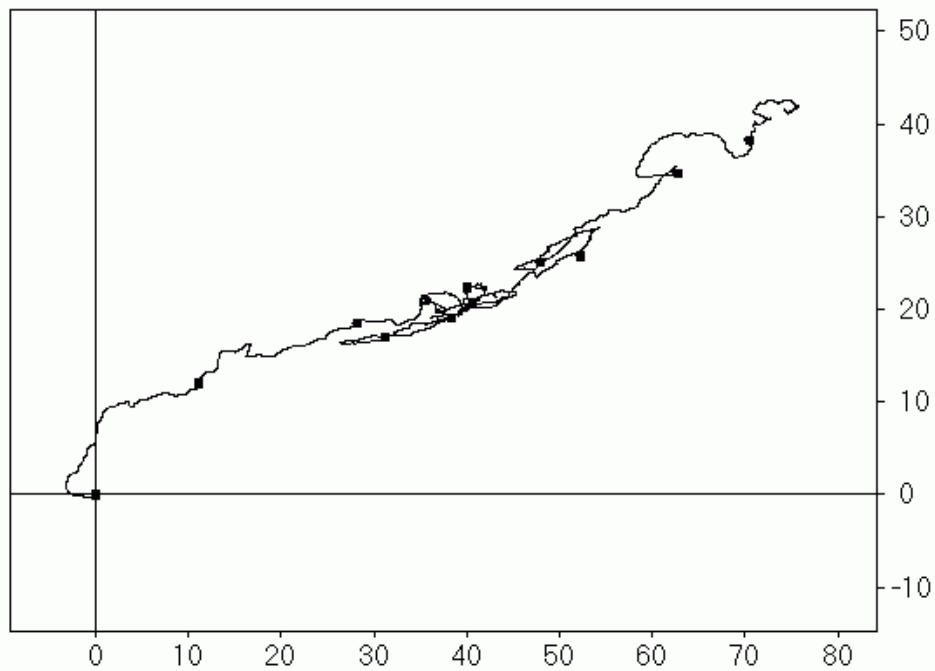
Monat	$t/^{\circ}\text{C}$	$\Delta t/\text{K}$	$h/\%$	$s/\%$	$r/\%$	Frost	Eis	Solar
Jan	3,3	+3,1	89	76	74	4	2	6333
Feb	4,2	<b>+4,0</b>	85	144	70	4	-	10527
Mrz	3,9	+1,8	82	125	106	8	-	28086
Apr	6,4	+1,4	88	112	<b>241</b>	-	-	39069
Mai	12,0	+2,3	<b>75</b>	<b>148</b>	97	-	-	<b>71975</b>
Jun	14,9	+0,8	77	117	46	-	-	68896
Jul	17,5	+1,3	80	122	<b>44</b>	-	-	64565
Aug	17,5	+1,0	81	76	59	-	-	42010
Sep	14,3	+0,7	80	79	75	-	-	27907
Okt	9,9	<b>0,0</b>	88	105	150	-	-	19374
Nov	6,6	+1,3	86	<b>72</b>	47	1	-	7647
Dez	3,2	+1,2	<b>90</b>	97	88	6	-	<b>4127</b>

Tab. 2

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

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

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



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

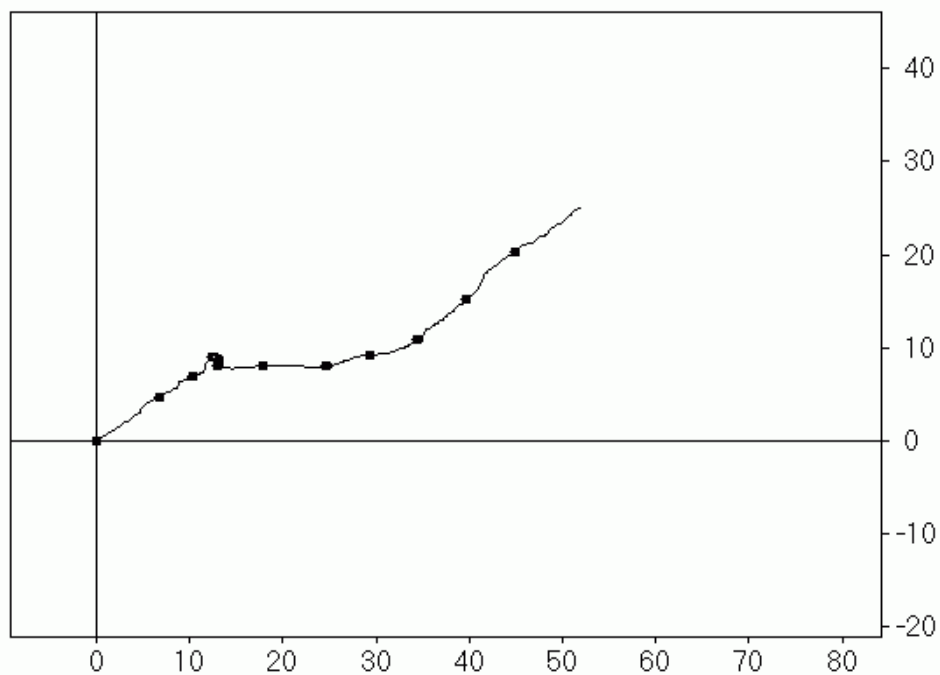


Abb. 2

Fortschreitende Vektordiagramme der Windgeschwindigkeit an der Wetterstation Arkona (nach Daten des DWD, 2009), in 1000 km, positiv nach nördlichen und östlichen Richtungen. a) 2008, b) Langzeitmittel. Der erste Tag des Monats ist durch einen Kreis markiert

Abb. 2 zeigt die Windentwicklung mit Hilfe fortschreitender Vektordiagramme für die Station Arkona, wobei die Trajektorie durch zeitliche Integration des Windvektors am Ort entsteht. Das Jahr 2008 ist dargestellt im Vergleich mit dem klimatischen mittleren Wind der Jahre 1951 bis 2002. Die Kurve für 2008 (74 000 km nach Osten, 42 000 km nach Norden) weicht von der des klimatischen Mittelwerts (52 000 km nach Osten, 25 000 km nach Norden) erheblich ab. Beide Windkomponenten sind 2008 im Mittel viel stärker. Die häufigen Blockierungslagen zeigen sich in überdurchschnittlich vielen und langen Windsituationen aus Süd, Ost und Nord. So beginnt die PVD-Kurve mit dem Ostwind des ersten Wintereinbruchs Anfang Januar und geht dann in starken Südwind über. Das typische Sommerplateau des klimatischen Diagramms findet sich 2008 nur schwach ausgeprägt, stattdessen zeigen die Schleifen der Kurve anhaltende Ost- und Nordostwinde. Während der Windverlauf im Oktober normal ist, zeigen sich Blockierungslagen erneut im November und Dezember in Form von deutlich abweichenden Richtungen. Der mittlere Betrag der Windgeschwindigkeit ist 7,7 m/s, siehe Abb. 3, der Betrag des mittleren Windvektors ist 2,7 m/s. Beide Werte übersteigen die entsprechenden klimatologischen Mittel von 7,1 m/s und 1,9 m/s (HAGEN und FEISTEL, 2008). 2008 war also auch ein überdurchschnittlich windiges Jahr. Markante Stürme sind von Januar bis März, aber auch im September, November und Dezember zu erkennen, besonders ruhig war dagegen der sonnige, warme und trockene Mai (Abb. 3a).

Die klimatische Windkurve in Abb. 2b ist erwartungsgemäß glatter als die der einzelnen Jahre. Sie besteht aus einer Winterphase mit Südwestwind, die im Mai endet und im September langsam neu wieder einsetzt. Die Sommerphase dagegen besitzt keine meridionale Komponente und verläuft deshalb parallel zur x-Achse. Die auffälligste Struktur jedoch ist der kleine Knick, bei dem der Wind auf nördliche und östliche Richtungen dreht und ein Umschalten von Winter auf Sommer markiert. Er tritt um den 12. Mai herum auf und gehört zur Phase der so genannten „Eisheiligen“. Die außergewöhnliche Regelmäßigkeit des Auftretens dieses Nordostwinds mit Kälterückfall in Deutschland über viele Jahre hinweg ist schon lange bekannt und lässt sich physikalisch aus dem Sonnenstand und der Land-Meer-Verteilung erklären (BEZOLD, 1883).

Barotrope Einstromereignisse mit geschätzten Volumen um 200 km<sup>3</sup> fanden in der Ostsee 2008 fünf Mal statt, im Januar, im Februar/März, im Juni, im September/Okttober und November. Nach dem jetzigen Kenntnisstand erfolgen die kleinen barotropen, also sturmgetriebenen Einstromprozesse hauptsächlich auf dem kurzen Weg durch den Öresund in das Arkonabecken, bleiben jedoch wegen ihres geringen Volumens und ihrer bevorzugten Ausbreitung entlang des Beckenrands der Registrierung durch die MARNET-Station „Arkonaboje“ weitgehend verborgen.

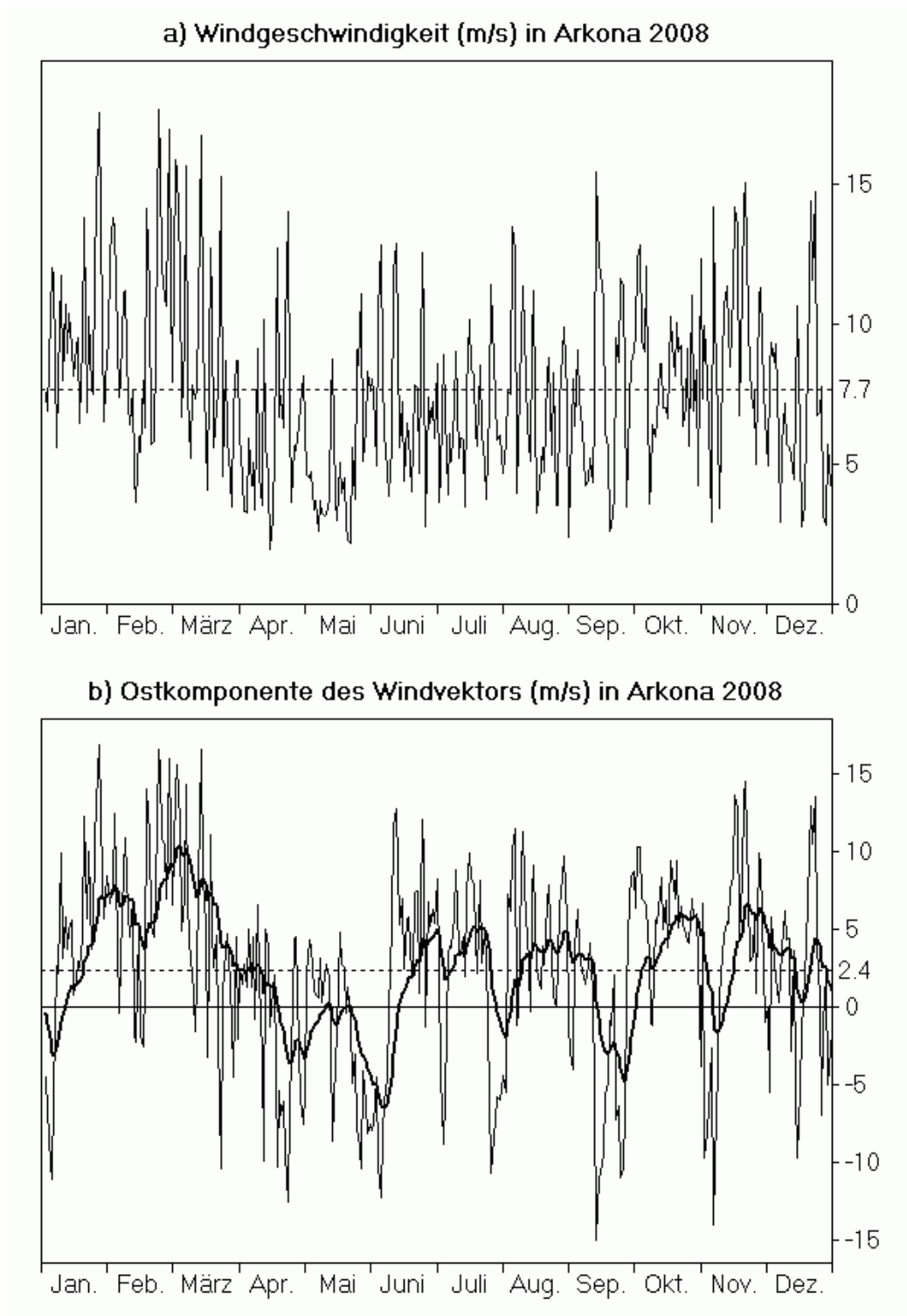


Abb. 3  
 Windmessungen an der Wetterstation Arkona (nach Daten des DWD, 2009). a) Tagesmittelwerte der Windgeschwindigkeit in m/s, Jahresmittelwert 7,7 m/s gestrichelt. b) Tagesmittelwerte der Ostkomponente (Westwind positiv), Jahresmittelwert 2,4 m/s gestrichelt. Die fett gezeichnete Linie ist mit einem exponentiellen Gedächtnis von 10 Tagen gefiltert

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

Der Füllungsgrad der Ostsee wird gut durch den Pegel an der schwedischen Station Landsort beschrieben (Abb. 4a, nach Daten des SMHI, 2009). Im Gegensatz zu früheren Jahren handelt es sich jetzt um den neuen Pegel „Landsort Norra“ (58°46'N, 17°52'E). Der alte Pegel Landsort (58°45'N, 17°52'E) wurde im September 2006 außer Betrieb genommen, weil wegen der postglazialen Landhebung seine Lage im Haff bei Niedrigwasser die Verbindung zur offenen Ostsee nicht mehr sicherstellte (FEISTEL et al., 2008b). Beide Pegel wurden für mehr als zwei Jahre parallel betrieben und zeigen nahezu identische Mittelwerte bei natürlichen Abweichungen auf kurzen Zeitskalen (Wellen, Seiches). Ein Vergleich der 8760 stündlichen Werte beider Pegel von 2005 ergibt einen Korrelationskoeffizienten zwischen Landsort ( $L$ ) und Landsort Norra ( $L_N$ ) von 98,88 % und eine lineare Regressionsbeziehung  $L + 500 \text{ cm} = 0,99815 \times L_N + 0,898 \text{ cm}$  mit der mittleren quadratischen Abweichung (rms) von 3,0 cm und einer maximalen von 26 cm. Wir werden im Folgenden den Pegel weiter einfach „Landsort“ nennen, obwohl Landsort Norra damit gemeint ist.

Das markanteste Signal im Verlauf des Landsortpegels 2008 ist der hohe Pegel bis Ende März, der nachfolgende Niedrigpegel bis Ende Juni, und noch einmal ein hoher Pegelstand von Mitte Oktober bis Mitte Dezember. Der Spitzenpegel im März betrug 193 cm am 6.3. nach Durchzug des Sturms „Gabi“. Die schwachen und östlichen Winde vor allem im Mai bewirkten einen deutlich abgesenkten Pegel bis zu 96 cm am 5. Juni. Zwischen dem Höchstpegel im März und dem Minimum im Juni betrug der Unterschied fast 1 m, entsprechend einem sehr intensiven Ausstrom in März und April. Von Ende Juni bis Anfang September herrschten niedrige Füllstände. Dem niedrigen Pegel im September folgte ein anhaltender Anstieg auf ein zweites Jahresmaximum von 193 cm am 30. Oktober, während die Sturmtiefs „Pelagia“ und „Quinta“ über Skandinavien nach Osten zogen.

Von besonderem Interesse sind hier stets schnelle Pegelanstiege, die in der Regel nur durch einen Zustrom von Nordseewasser durch Sund und Belte hervorgerufen werden können. Sie sind bedingt durch Stürme von West bis Nordwest, wie an der klaren Korrelation des Landsortpegels mit den gefilterten Kurven des Winds (Abb. 3b, 4b) zu erkennen ist.

Die Filterung erfolgt nach der Formel

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

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

Kleinere barotrope Einstromereignisse sind 2008 zu erkennen an den Anstiegen um 47 cm in 9 Tagen vom 17. bis zum 26. Januar, um 54 cm in 11 Tagen vom 22. Februar bis 4. März, um 46 cm vom 8. Juni bis zum 23. Juni in 15 Tagen, um 34 cm vom 28. September bis zum 1. Oktober in 3 Tagen, und um 68 cm in 13 Tagen vom 10. bis 23. November. Mit der empirischen Näherungsformel (NAUSCH et al., 2002; FEISTEL et al., 2008b)

$\Delta V / \text{km}^3 = 3,8 \times \Delta L / \text{cm} - 1,3 \times \Delta t / \text{d}$  erhalten wir aus den Werten des Pegelunterschieds  $\Delta L$  in cm und der Einstromdauer  $\Delta t$  in Tagen als Schätzungen für das eingeströmte Volumen  $\Delta V = 167 \text{ km}^3$  im Januar,  $191 \text{ km}^3$  im Februar/März,  $155 \text{ km}^3$  im Juni,  $125 \text{ km}^3$  im September/Oktober und  $242 \text{ km}^3$  im November.



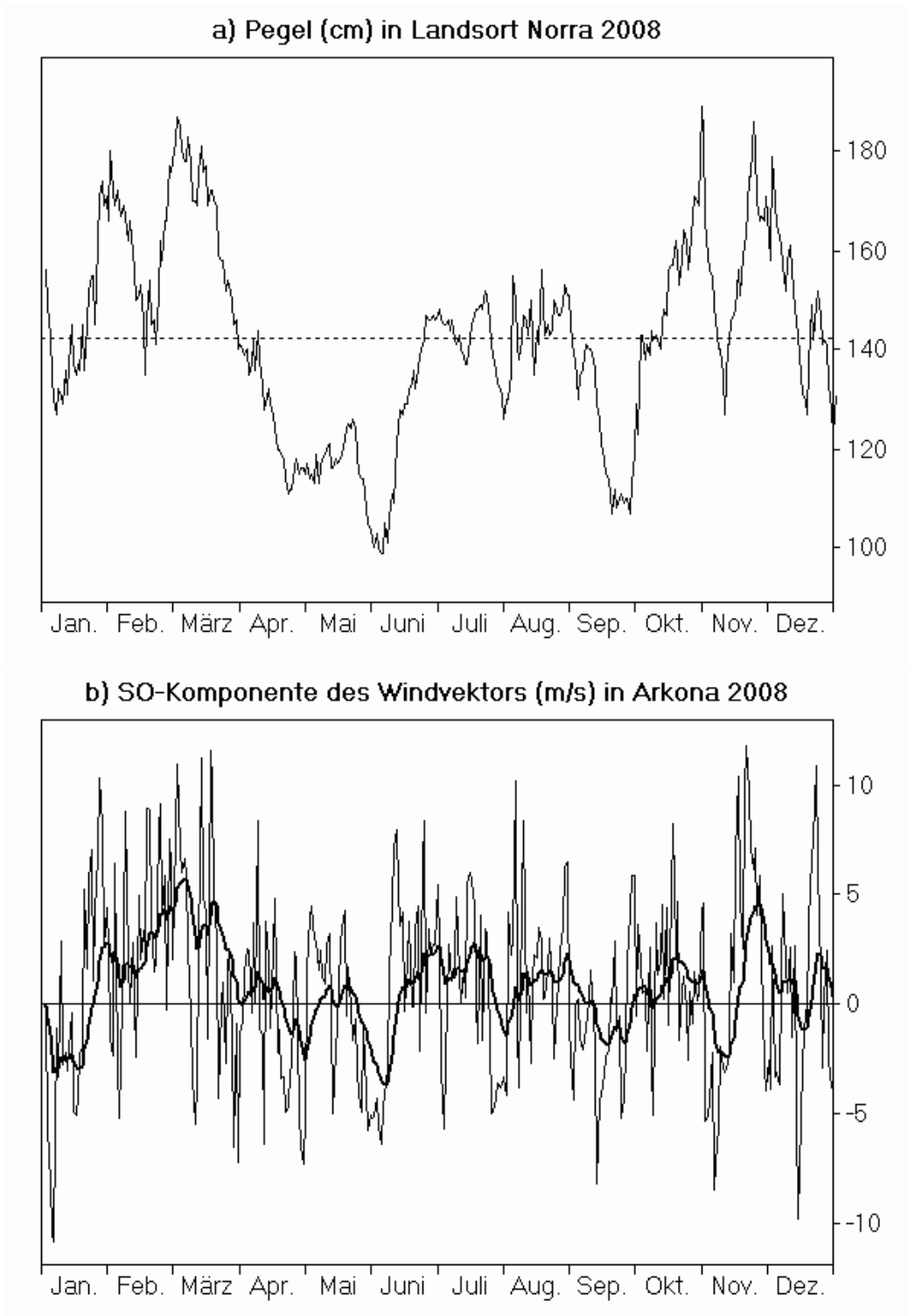


Abb. 4

a) Pegel bei Landsort als Maß für den Füllungsgrad der Ostsee (nach Daten des SMHI, 2009). b) Stärke des Nordwestwinds (positiv) an der Wetterstation Arkona (nach Daten des DWD, 2009). Die fett gezeichnete Kurve entstand durch Filterung mit einem exponentiellen 10-Tage-Gedächtnis

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

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

#### **3.1 Wassertemperatur, Salzgehalt und Sauerstoffgehalt**

Mittelwerte und Standardabweichung des in Abb. 5 gezeigten Temperaturverlaufs an der Darßer Schwelle sind in Tab. 3 aufgeführt und in Abb. 6 grafisch dargestellt. Die hohen Jahresmittelwerte der in den verschiedenen Tiefen gemessenen Wassertemperaturen spiegeln das überdurchschnittlich warme Jahr 2008 wider. Nach den Rekordwerten im Vorjahr wurden im Jahr 2008 die zweithöchsten mittleren Temperaturen seit 1992 in 7 und 17 m Tiefe gemessen, obwohl der Sommer 2008 mit maximalen Oberflächentemperaturen von wenig über 18 °C (Abb. 5) nicht überdurchschnittlich warm war. Wie im Vorjahr sind die hohen Jahresmittelwerte damit hauptsächlich auf den außerordentlich kurzen und milden Winter 2007/2008 zurückzuführen.

Der milde Winter und der moderate Sommer des Jahres 2008 führen zu einer insgesamt geringen Amplitude des Jahresganges der Oberflächentemperatur, wobei der extrem flache Jahresgang des Vorjahres allerdings nicht mehr erreicht wird, wie aus den in Tab. 4 dargestellten Ergebnissen der Fourier-Analyse hervorgeht. Vergleichsweise niedrige Werte finden sich auch in den in Tab. 3 und Abb. 6 dargestellten Standardabweichungen der oberflächennahen Wassertemperaturen. Da die Standardabweichungen von der Amplitude des Jahresganges dominiert werden, ist dieses Ergebnis allerdings kaum mehr als eine direkte Konsequenz des flachen Jahresganges. Die Standardabweichungen der bodennahen Sensoren werden ebenfalls vom Jahresgang dominiert, zeigen aber im Allgemeinen eine geringere Amplitude, da der vertikale Wärmeaustausch mit der Atmosphäre durch die stabile haline Schichtung unterdrückt wird. Die bodennahen Temperaturfluktuationen werden auch durch die Stärke, Art, und Häufigkeit von salzreichen Intrusionen bestimmt.

Eine vollständige Statistik des Salzgehaltes an der Darßer Schwelle steht für das Jahr 2008 nicht zur Verfügung, da die Leitfähigkeitssensoren in der Bodenschicht wegen

übermäßigen Bewuchses für die Monate Oktober und November keine zuverlässigen Messwerte lieferten. Nach Austausch der Sensoren ist der volle Datensatz erst ab Dezember 2008 wieder verfügbar. Die oberflächennahen Sensoren sind von diesem Problem nicht betroffen und liefern in 7 m Wassertiefe eine durchschnittliche Salinität von 9,53 psu, was einem der höchsten seit 1992 gemessenen Werte entspricht (Tab. 3). Dieser hohe Durchschnittswert sowie die überdurchschnittlich hohe Standardabweichung (Tab. 3, Abb. 7) weisen auf eine deutliche, stark fluktuierende Einstromaktivität an der Darßer Schwelle hin. Wie weiter unten ausgeführt, sind zahlreiche dieser Einstromereignisse baroklin geprägt (d.h. vornehmlich durch Dichteunterschiede getrieben), so dass die hier diskutierten Mittelwerte und Standardabweichungen der Deckschicht nicht für die gesamte Wassersäule repräsentativ sind.

Tab. 3  
Jahresmittelwerte der Wassertemperatur (T) und des Salzgehaltes (S) sowie deren Standardabweichungen auf der Darßer Schwelle

Jahr	7 m Tiefe		17 m Tiefe		19 m Tiefe	
	T °C	S PSU	T °C	S PSU	T °C	S PSU
1992	9,41 ± 5,46	<b>9,58</b> ± 1,52	9,01 ± 5,04	11,01 ± 2,27	8,90 ± 4,91	11,77 ± 2,63
1993	8,05 ± 4,66	<b>9,58</b> ± <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 ± <b>5,08</b>	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>	<b>15,74</b> ± 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	<i>9,42 ± 4,71</i>	<b>16,05</b> ± 3,75
2007	<b>9,99</b> ± 4,39	9,30 ± 1,28	<b>9,66</b> ± 4,10	10,94 ± 1,97	<b>9,63</b> ± 4,08	<i>11,39 ± 2,00</i>
2008	9,85 ± 5,00	9,53 ± 1,74	9,30 ± 4,60	-	<i>9,19 ± 4,48</i>	-

Tab. 4

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

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	<b>4,79</b>	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	4,83	–	–	6,42	3,95
1998	6,39	<b>4,79</b>	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	<b>7,06</b>	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

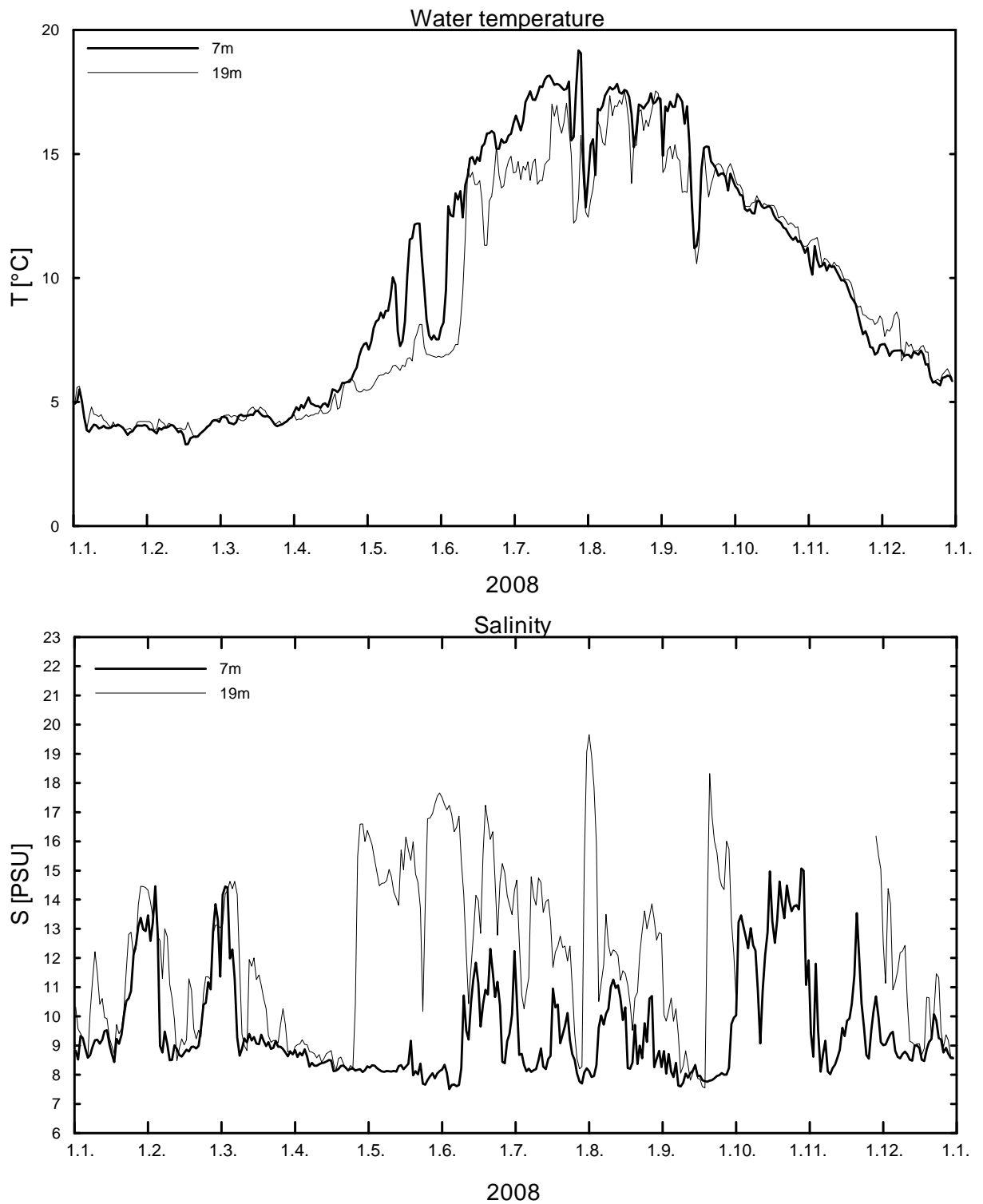


Abb. 5  
Verlauf der Wassertemperatur (A) und des Salzgehaltes (B) in der Deck- und Bodenschicht auf der Darßer Schwelle im Jahre 2008

Der Verlauf der Wassertemperatur des Jahres 2008 für die Deckschicht (7 m Tiefe) und die bodennahe Schicht (19 m Tiefe) ist in Abb. 5a dargestellt. Während des ersten Drittels des Jahres liegen die gemessenen Temperaturen in einem engen Bereich von ca. 3 – 5 °C

und verdeutlichen damit den überaus milden Winter 2007/2008. Von April bis Juli findet ein kontinuierlicher Temperaturanstieg bis auf etwa 18 °C statt. Dieser Wert liegt nur knapp unter dem Jahreshöchstwert von 19 °C, der nur während einiger Tage Ende Juli erreicht wurde, und ist damit vergleichbar mit der Höchsttemperatur des kühlen Sommers 2007. Östliche Winde im Mai und Juni (Abb. 3b) korrelieren mit zwei kurzzeitigen Temperatureinbrüchen um bis zu 5 °C, was auf die laterale Advektion von kalten Filamenten aus den Auftriebsgebieten nahe Rügen und Hiddensee schließen lässt. Temperatureinbrüche dieser Art sind auch in den vorangegangenen Jahren beobachtet worden, im Vorjahr zum Beispiel während zweier Ereignisse im August. Während der Erwärmungsphase ist die vertikale Temperaturschichtung stabil und kehrt sich erst ab etwa Mitte September aufgrund des Wärmeverlustes zur Atmosphäre und durch Einschichtung wärmeren Bodenwassers um. Die Abkühlung bis auf ca. 6 °C zum Ende des Jahres ist kontinuierlich bis auf einen kurzzeitigen Temperatureinbruch in der gesamten Wassersäule in der zweiten Septemberwoche. Dieser Einbruch wird zeitgleich mit den stärksten östlichen Winden des Jahres (bis zu 15 m/s, siehe Abb. 3b) beobachtet und dürfte ebenfalls auf den oben geschilderten Mechanismus zurückzuführen sein.

Der in Abb. 5b dargestellte Verlauf des Oberflächen- und Bodensalzgehaltes an der Darßer Schwelle zeigt Manifestationen zahlreicher Einstromereignisse, wobei die höchsten Salzgehalte des Jahres (mehr als 19 psu am Boden) während eines kurzen baroklinen Einstroms Ende Juli / Anfang August beobachtet werden. Das erste Drittel des Jahres wird von zwei kleineren barotropen Einströmen mit Salzgehalten von etwas über 14 psu dominiert. Diese beiden Ereignisse sind das Ergebnis von starken westlichen Winden und resultieren im hohen Füllungsgrad der Ostsee während der ersten Monate des Jahres. Dieser hohe Füllungsgrad und eine Abschwächung bzw. Umkehr der Ostwindkomponente ab Anfang März (Abb. 3b) führen zu einem starken, nur zeitweilig unterbrochenen Ausstrom, der bis Anfang Juni beobachtet werden kann. Im Zuge dieses Ausstroms sinkt der Oberflächensalzgehalt an der Darßer Schwelle auf Werte unter 8 psu zu Anfang Juni. Gleichzeitig setzt in der letzten Aprilwoche ein anhaltender barokliner Einstrom ein, der den oberflächennahen Ausstrom bis in die dritte Maiwoche hinein überkompensiert und damit sogar zu einem leichten Anstieg des Füllungsgrads der Ostsee führt (Abb. 4).

In der letzten Maiwoche schwenken die Winde auf östliche Richtungen um (Abb. 3b). Das veränderte Windfeld ist nicht stark genug um die Wassersäule zu durchmischen und so den oben beschriebenen, immer noch anhaltenden baroklinen Einstrom zu unterbrechen; es führt aber zu einer Umkehr von (Netto-)Einstrom auf Ausstrom und damit zu einem Absinken des Pegels bei Landsort auf den Tiefststand des Jahres 2008, der Anfang Juni erreicht wird (Abb. 4). Mit einer erneuten Umkippen der Winde auf westliche Richtungen ab der zweiten Juniwoche (Abb. 3b) kann die Windschubspannung den starken Druckabfall über die Dänischen Straßen nicht mehr kompensieren, was unmittelbar zu barotropem Einstrom und damit zu einer raschen Erholung des Pegels bei Landsort bis Ende Juni führt (Abb. 4).

Während der Sommermonate bis etwa Anfang September sind die Pegelschwankungen dann vergleichsweise schwach und die stark schwankenden Salzgehalte (Abb. 5b) signalisieren den Wechsel von schwachem Ein- und Ausstrom, wobei der hohe Bodensalzgehalt auf einen fortwährenden baroklinen Einstromanteil hinweist. Interessant ist in dieser Periode insbesondere ein etwa einwöchiges Ostwindereignis Ende Juli (Abb. 3b), das zu einer fast völligen Durchmischung der Wassersäule (Abb. 5) und einem kurzfristigen Pegelabfall bei Landsort führt (Abb. 4). Damit werden die Bedingungen für einen baroklinen Einstrom Ende Juli / Anfang August mit den höchsten im Jahr 2008 gemessenen Bodensalzwerten geschaffen (Abb. 5). Ein weiteres Ereignis dieser Art findet in der zweiten Septemberwoche statt, in der Ostwinde bis 15 m/s (Abb. 3b) die Wassersäule für etwa eine Woche komplett durchmischen und zunächst barotropen Ausstrom verursachen, welcher in der dritten September von einem starken baroklinen Einstrom kompensiert wird (Abb. 5).

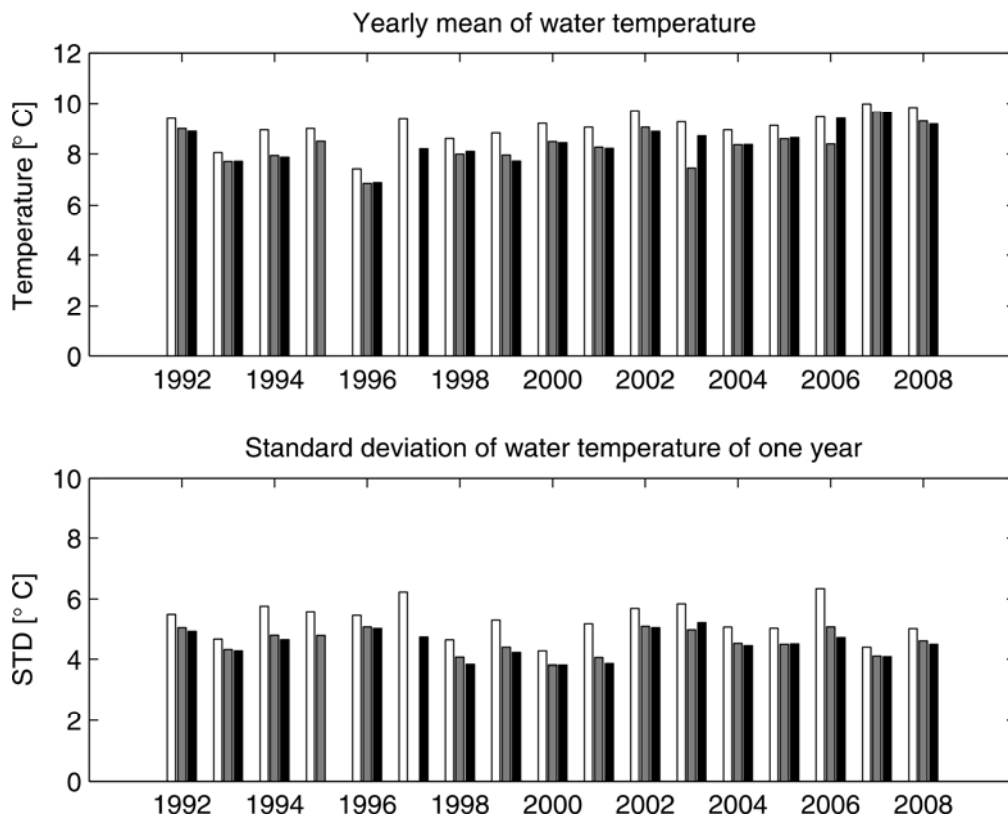


Abb. 6

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

Im weiteren Verlauf ist das Einstromverhalten an der Darßer Schwelle vom Rhythmus der Westwindkomponente (Abb. 3b) dominiert mit Einstrom im Oktober, kurzem Ausstrom Ende Oktober / Anfang November und Einstrom im November. Die Salzgehalte an der Oberfläche spiegeln diese barotropen Austauschprozesse, wobei die höchsten Werte während des starken Einstroms im Oktober beobachtet werden (Abb. 5b). Wegen des oben erwähnten Geräteausfalls stehen für die Monate Oktober und November keine Messwerte in der bodennahen Schicht zur Verfügung.

Der Sauerstoffgehalt des Oberflächenwassers (Abb. 8) schwankt während des ganzen Jahres um die Sättigungskonzentration des Sauerstoffs und weist damit einen vor allem durch die Wassertemperatur aufgeprägten Jahresgang mit einem Minimum im Spätsommer auf. Während des ganzen Jahres werden die Sauerstoffzehrungsprozesse in der Beltsee und im Arkonabecken durch den Sauerstoffbedarf des Sediments gesteuert. Algenblüten und hohe Sedimenttemperaturen während der warmen Jahreszeit steigern diesen sedimentären Sauerstoffbedarf und führen zu reduzierten Sauerstoffkonzentrationen im unteren Bereich der Wassersäule. Die spezifische Sauerstoffzehrung in der Wassersäule nimmt mit dem Verhältnis von Sedimentfläche zu Wasservolumen zu und ist damit in flachen Gebieten stärker als in den tiefen Becken. Dieser Effekt ist vor allem in der flachen Beltsee sichtbar und manifestiert sich in einem starken Einbruch der an der Darßer Schwelle gemessenen Bodensauerstoffkonzentrationen während barokliner Einstromereignisse. Während solcher Einstrome wird sauerstoffarmes Wasser aus den Bodenschichten der Beltsee über die Darßer Schwelle transportiert, wie zum Beispiel während der Einstromphase von Ende April bis Anfang Juni oder während der kurzen baroklinen Einstrome Ende Juli / Anfang August und Ende September (Abb. 5b und 8). Während der letzten beiden Ereignisse sinkt die Bodensauerstoffkonzentration auf die geringsten Werte des Jahres mit einer fast sauerstofffreien Bodenschicht.

Im Gegensatz zu dem oben beschriebenen Prozess bringen barotrope Einstrome sauerstoffreiches Wasser aus der Nordsee mit sich und sorgen für eine Erholung der Bodensauerstoffkonzentrationen an der Darßer Schwelle. Dies ist besonders dann sichtbar, wenn solche Einstrome unmittelbar auf sauerstoffarme barokline Einstrome folgen. Beispiele finden sich im Jahr 2008 in der zweiten Juniwoche, in der ersten Augustwoche und Anfang Oktober (Abb. 8). Die barotropen Einstrome im ersten Drittel des Jahres und im November und Oktober haben hingegen nur einen vergleichsweise schwachen Effekt auf den Sauerstoffgehalt, da sie sich zu einer Zeit mit niedriger Sauerstoffzehrung und starker Vermischung ereignen, in der die Sauerstoffwerte überall in der Wassersäule nahe der Sättigung liegen (die bodennahen Sauerstoffwerte von Oktober bis Dezember werden aufgrund von Sensorbewuchs leicht überschätzt).



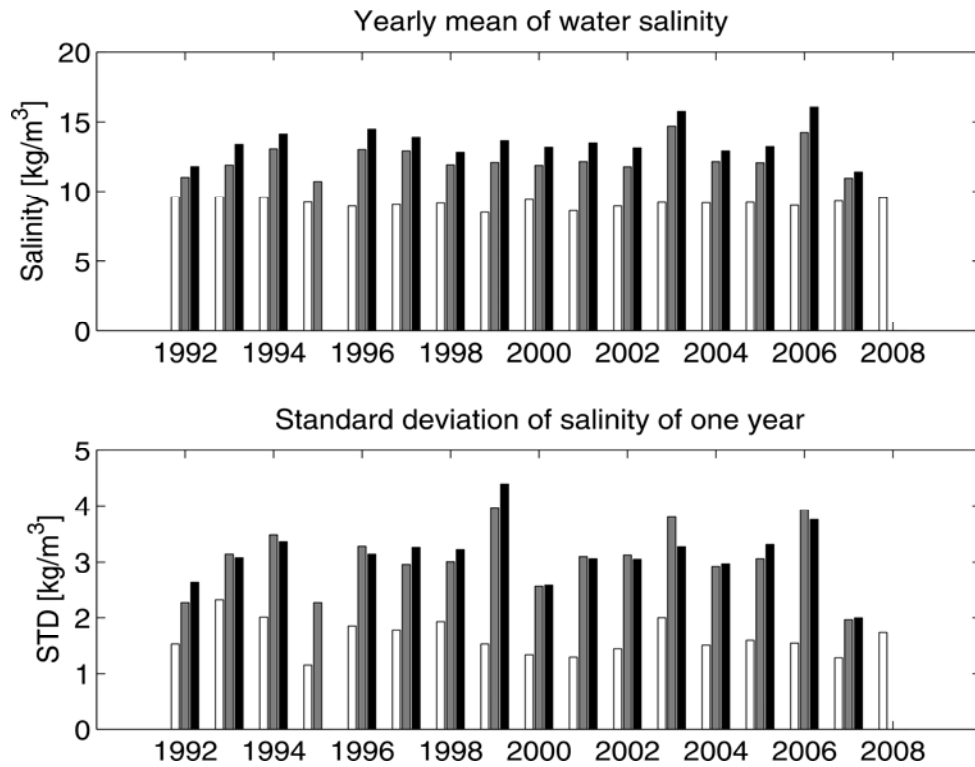


Abb. 7  
 Jahresmittel und Standardabweichung des Salzgehaltes in der Deckschicht (7 m, helle Säule), und der Bodenschicht (17 m, graue Säule und 19 m, schwarze Säule) auf der Darßer Schwelle

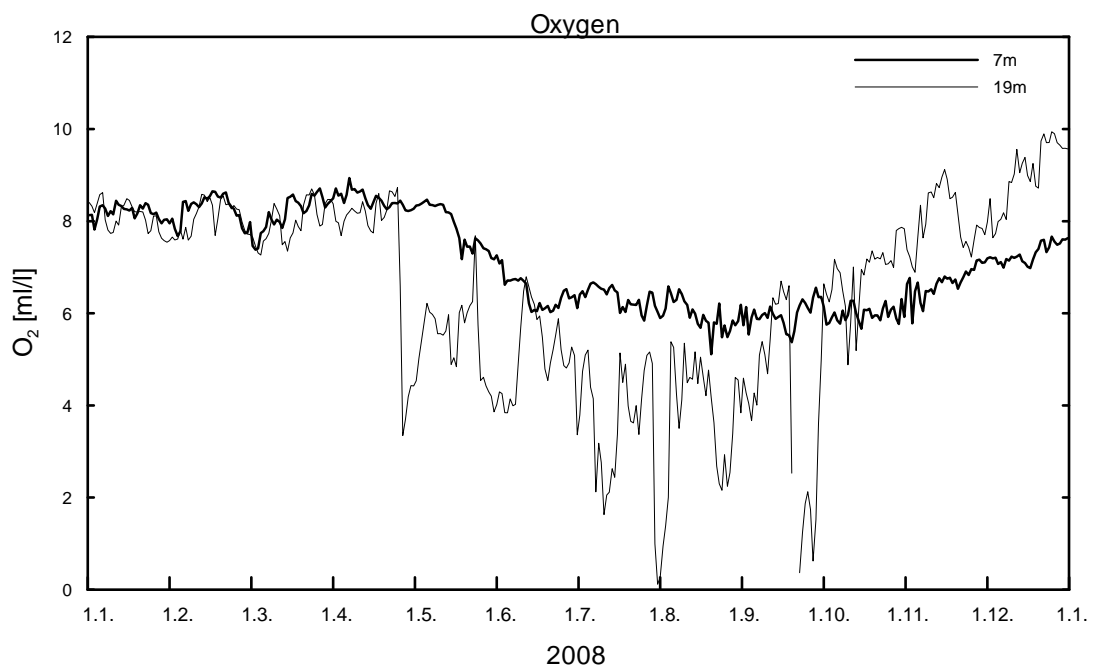


Abb. 8  
 Verlauf des Sauerstoffgehaltes in der Deck- und Bodenschicht auf der Darßer Schwelle im Jahre 2008

### 3.2 Strömung

Aufgrund eines Speicherausfalls für den akustischen Strömungsmesser liegen Strömungsdaten an der Darßer Schwelle für das Jahr 2008 nur für die Monate Januar-Mai und ab Ende November vor. Während dieser Perioden sind die mittlere Strömung und ihre Fluktuationen auf der Darßer Schwelle innerhalb der Wassersäule stark kohärent. Zur Charakterisierung des tiefenvariablen, baroklinen Anteils ist die Strömung in 3 m und 17 m Messtiefe zeitlich integriert als „fortschreitendes Vektordiagramm“ (Pseudotrajektorie) in Abb. 9 dargestellt. Diese integrale Darstellungsweise filtert kurzzeitigen Fluktuationen aus den Strömungsmessungen und lässt daher langfristige Periodizitäten in der Strömung besser erkennen. Gemäß dieser Definition entspricht die Strömungsgeschwindigkeit dann der Steigung der in Abb. 9 gezeigten Kurven, wobei eine positive Steigung Einstromsituationen widerspiegelt.

Die beiden barotropen Einströme im Januar und Februar, deren Effekt sich wie oben erwähnt sowohl im Pegel als auch in den Salinitäten nachweisen lässt, hinterlassen auch in den Strömungsdaten an der Darßer Schwelle deutlich sichtbare Signale (Abb. 9). Die zeitlich integrierten Strömungsgeschwindigkeiten in verschiedenen Tiefen zeigen einen fast identischen Verlauf und bestätigen somit den barotropen Charakter der beiden Ereignisse. Dies gilt auch für den ab der zweiten Märzwoche einsetzenden barotropen Ausstrom, der bis etwa Mitte April andauert und sich unter anderem (siehe oben) in stark abfallenden Pegelwerten äußert. Dieses Verhalten steht im Gegensatz zu der baroklinen Einstromphase, die sich ab der letzten Aprilwoche anschließt. Die, wie oben bereits diskutiert, ab diesem Zeitpunkt für einige Wochen leicht ansteigenden Pegelstände und die starken Salinitätsgegensätze zwischen der Deckschicht und der Bodenschicht (Abb. 5b) weisen auf die Überkompensation des barotropen Ausstroms durch einen bodennahen baroklinen Einstrom hin. Dieses Bild ist konsistent mit den Strömungsdaten, die ab der letzten Aprilwoche deutlich zwischen Ausstrom in 7 m und Einstrom in 17 m Tiefe unterscheiden lassen (Abb. 9).

Weitere Strömungsdaten liegen dann erst wieder ab der letzten Novemberwoche vor. Diese Daten sind in Einklang mit der ab diesem Zeitpunkt beobachteten Ausstromtendenz, die nur in der zweiten Hälfte des Monats Dezember durch eine mehrtägige Periode schwachen barotropen Einstroms unterbrochen wird (Abb. 4, 5, 9).

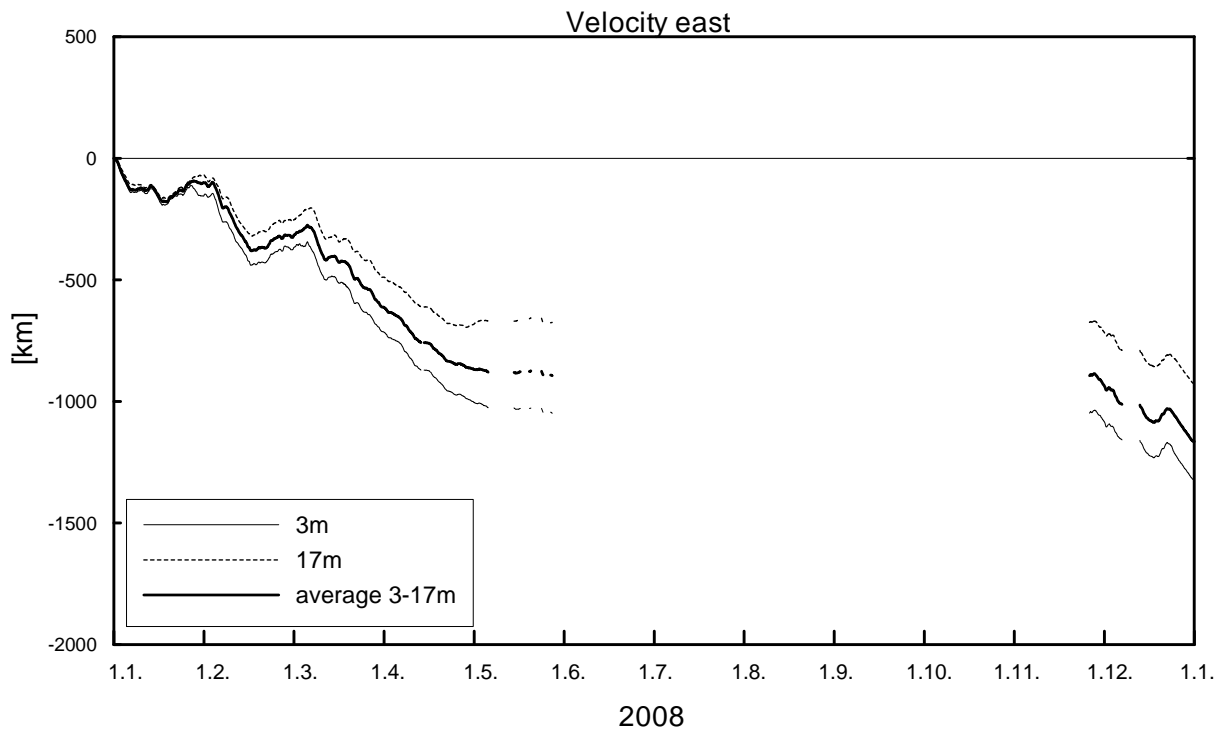


Abb. 9  
Ostkomponente der progressiven Vektordiagramme der Strömung in 3 m Tiefe (ausgezogene Linie), der vertikal gemittelten Strömung (dicke Linie) und der Strömung in 17 m Tiefe (gestrichelte Linie) auf der Darßer Schwelle in 2008

#### 4. Beobachtungen an der Bojenstation „Arkonabecken“

Zur Dynamik der salzreichen Bodenströmungen im Bereich des Arkonabeckens fanden in den letzten Jahren intensive Untersuchungen statt, die im Rahmen des von der DFG und dem BMU geförderten Projektes „QuantAS“ (Quantification of water mass transformation in the Arkona Sea) durchgeführt wurden. Die Ergebnisse beinhalten unter anderem die ersten detaillierten Turbulenz- und Geschwindigkeitsschnitte durch dichtegetriebene Bodenströmungen, die während einiger mittlerer Einstromereignisse in einem Kanal nördlich von Kriegers Flak beobachtet wurden (ARNEBORG et al. 2007, UMLAUF et al. 2007, SELLSCHOPP et al. 2006). In einer kürzlich veröffentlichten Modellstudie haben BURCHARD et al. (2009) die Ausbreitungswege mittlerer Einstromereignisse in den Jahren 2003 und 2004 im Arkonabecken untersucht und die Kanäle nördlich von Kriegers Flak und im Bornholmsgatt als Zonen stark erhöhter Vermischung identifiziert. Zur Validierung der Modelldaten wurden unter anderem die in dieser Reihe jährlich vorgestellten Daten aus dem MARNET-Messnetz verwendet. Weitergehende theoretische Untersuchungen, die auf den in QuantAS gewonnenen Daten basieren, haben einen überraschend starken Einfluss der Erdrotation auf die turbulenten Einmischungsprozesse in dichten Bodenströmungen sichtbar gemacht und zu neuen theoretischen Modellen für solche Strömungen geführt (Umlauf and Arneborg 2009 a,b).

Die Bojenstation "Arkonabecken" befindet sich annähernd 20 m nordöstlich von Arkona auf 46 m Wassertiefe. Die Station war während des ganzen Jahres 2008 operativ (mit Ausnahme eines Sauerstoffsensors, siehe unten). Die Zeitreihen von Wassertemperatur und Salzgehalt in 7 m und 40 m Tiefe sind in Abb. 10 dargestellt. Die an dieser Station in der Deckschicht gemessene Wassertemperatur folgt in ihrem Jahresgang weitgehend dem auf der Darßer Schwelle gemessenen Verlauf (vgl. Abb. 5a). Es gibt jedoch auch charakteristische Unterschiede, die besonders im Sommer ausgeprägt sind. Das Maximum der Oberflächentemperatur im Arkonabecken wird Ende August erreicht und liegt mit 20 °C etwas über den höchsten an der Darßer Schwelle gemessenen Temperaturen (Abb. 5a) und den im Vorjahr ermittelten Höchsttemperaturen. Die thermische Schichtung ist im Arkonabecken insgesamt ausgeprägter und zwar sowohl bezüglich der stabilen thermischen Schichtung während der sommerlichen Erwärmungsphase als auch bezüglich der instabilen thermischen Schichtung während der kalten Jahreszeit bis Ende März und ab Anfang Oktober. Beide Effekte lassen sich auf die im Arkonabecken insgesamt deutlich stärkere Dichteschichtung aufgrund des salzreichen Bodenwasserpools zurückführen. Diese unterdrückt die vertikale turbulente Vermischung und isoliert damit das Bodenwasser effektiv von den lokalen atmosphärischen Flüssen. Dieser Effekt ist besonders in den Monaten April und Mai erkennbar, wo relativ konstante Bodenwassertemperaturen um 5 °C einem gleichzeitigen starken Anstieg der Deckschichttemperaturen gegenüberstehen (Abb. 10). Bemerkenswert in diesem Jahr ist die bei hohen Werten zwischen 4-5 °C stagnierende Oberflächentemperatur in den Wintermonaten Januar bis März, die den sehr milden Winter 2007/2008 auch im Arkonabecken sichtbar werden lässt.

Die ebenfalls in Abb. 10 dargestellten Salzgehalte verdeutlichen den Effekt der an der Darßer Schwelle im ersten Viertel des Jahres beobachteten barotropen Einströme (Abb. 5, 9), die den Bodensalzgehalt im Arkonabecken in mehreren Schüben ansteigen lassen. Die höchsten Werte des Jahres werden mit über 21 psu Anfang Februar gemessen und liegen damit deutlich über den höchsten an der Darßer Schwelle zu dieser Jahreszeit erkennbaren Werten (Abb. 5). Damit ist es wahrscheinlich, dass ein erheblicher Teil der Einströme über den Öresund erfolgt ist, wobei aufgrund der kürzeren Ausbreitungswege eine deutlich geringere Verdünnung der Bodensalzgehalte durch Mischung stattgefunden hat (siehe SELLSCHOPP et al, 2006, UMLAUF UND ARNEBORG, 2009a, BURCHARD et al. 2009). Das Signal des Ende April an der Darßer Schwelle einsetzenden baroklinen Einstroms manifestiert sich im Arkonabecken in der Form von zwei Salinitätsspitzen Anfang und Ende Mai (Abb. 10), die zu einer kurzen – und beim ersten Ereignis deutlichen – Reduktion der Sauerstoffkonzentrationen führen (Abb. 11).

Die barotropen Einströme der Sommermonate (Abb. 4, 5) führen zu relativ hohen Salzkonzentrationen zwischen 13 und 17 psu im Bodenwasser des Arkonabeckens, die erst ab Mitte August langsam auf Werte um 9 psu zu Ende September abklingen. Der ab Mitte September an der Darßer Schwelle beobachtete barokline Einstrom (Abb. 5) hat

demnach nur einen geringen Effekt auf den Salz- und Sauerstoffgehalt im Arkonabecken. Die Salinitäten steigen erst wieder rapide im Zuge des in zwei Schüben erfolgenden barotropen Einstroms, der von Ende September bis Anfang November andauert (Abb. 5, 10). Gleichzeitig verursacht die laterale Advektion von Wärme mit diesen in der bodennahen Schicht einströmenden Wassermassen die Umkehr der thermischen Schichtung ab der ersten Oktoberwoche (Abb. 10). Dieser Effekt kehrt sich während des zweiten Einstromschubs, der an der Darßer Schwelle in der zweiten Novemberhälfte (Abb. 5) seinen Höhepunkt erreicht, nahezu um. Das nunmehr in der flachen Beltsee abgekühlte salzreiche Einstromwasser manifestiert sich an der Arkonastation in einer abrupten Abkühlung und einem Anstieg der Salinität des Bodenwassers (Abb. 10).

Der an der Station "Arkonabecken" gemessene Sauerstoffgehalt ist in Abb. 11 dargestellt. Aufgrund von Bewuchs des bodennahen Sauerstoffsensors haben die Messwerte in 40 m Tiefe die Qualitätskontrolle ab dem Monat August nicht passiert. Für den oberflächennahen Sensor stehen in Jahr 2008 durchgängige Messwerte zur Verfügung. Die Sauerstoffgehalte in der Deckschicht des Arkonabeckens und auf der Darßer Schwelle sind sehr ähnlich. Dies weist auf eine enge Korrelation mit der Löslichkeit und dem Gleichgewicht zwischen Produktion und Zehrung des Sauerstoffs im Deckschichtwasser auf der Darßer Schwelle und im Arkonabecken hin. Markant ist ein kurzer Einbruch der Temperatur Anfang Mai (Abb. 10), der mit einem kurzen Anstieg des Oberflächensauerstoffgehalts (Abb. 11) korreliert ist. Dieses Phänomen ereignet sich während einer Schwachwindphase nach einer Periode mit östlichen Winden Ende April (Abb. 3) und deutet damit auf die Präsenz eines kalten, sauerstoffreichen Filaments aus den Auftriebsgebieten am Südrand des Beckens hin.

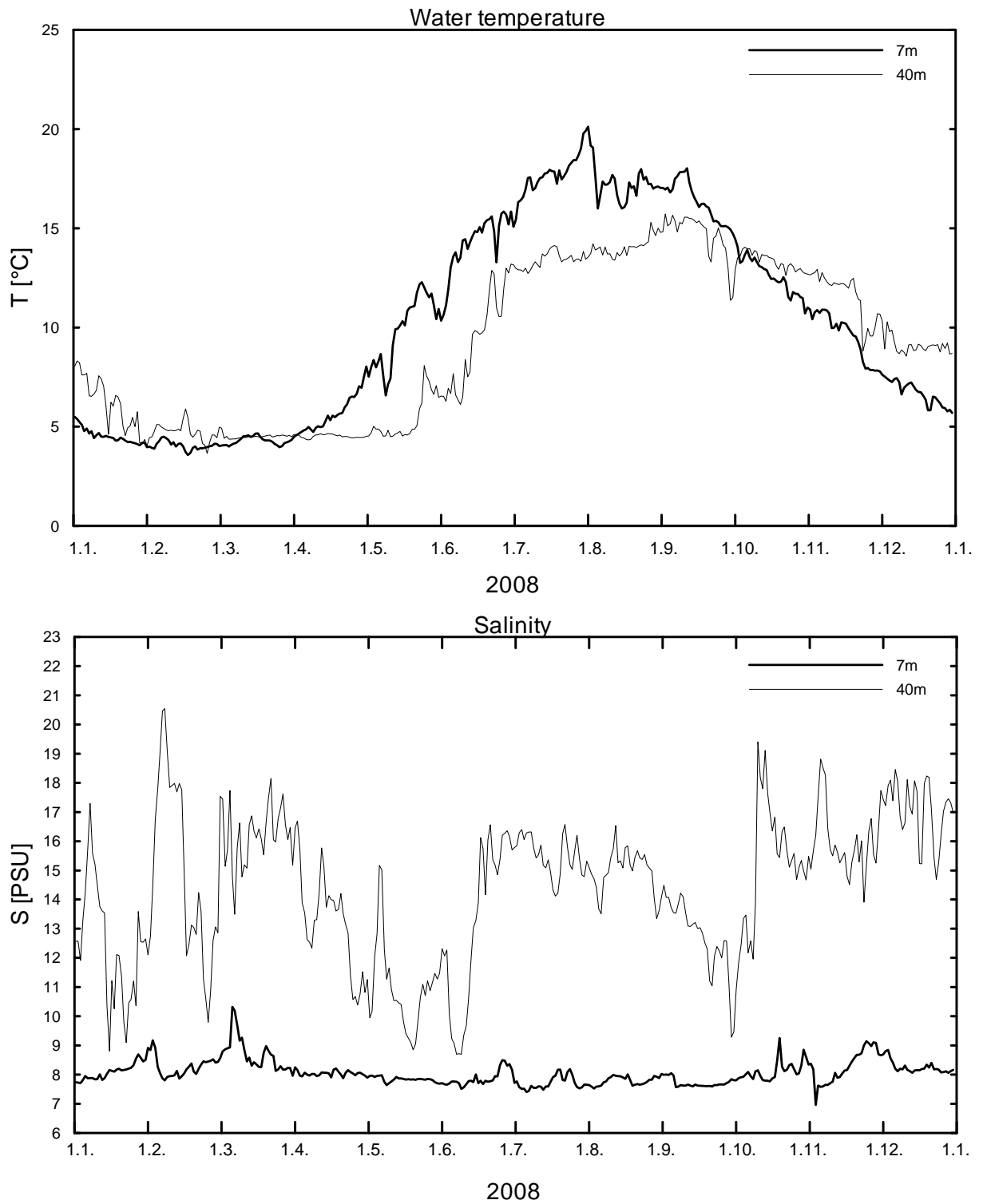


Abb. 10  
 Verlauf der Wassertemperatur (A) und des Salzgehaltes (B) in der Deck- und Bodenschicht im Arkonabecken (Station AB) im Jahr 2008

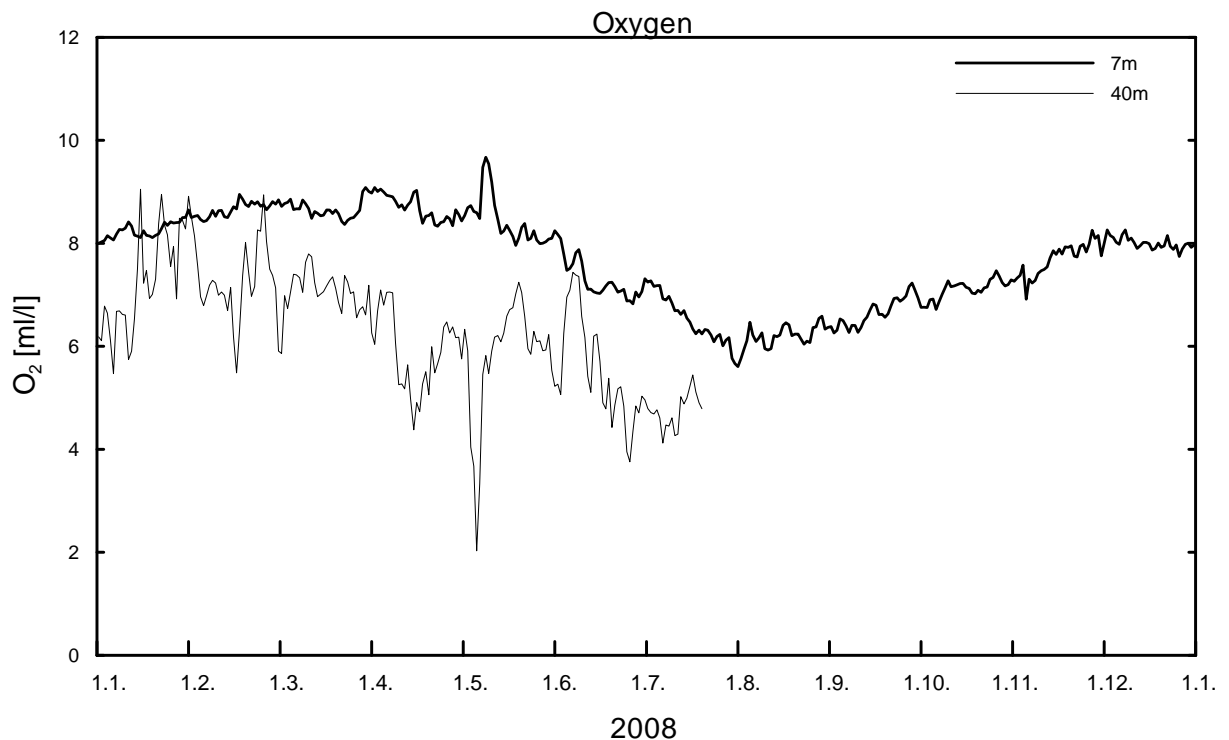


Abb. 11  
Verlauf der Sauerstoffgehaltenes in der Deck- und Bodenschicht im Arkonabecken (Station AB) im Jahr 2008

## 5. Beobachtungen an der Bojenstation „Oderbank“

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

Die Bojenstation „Oder Bank“ befindet sich annähernd 5 sm nordöstlich von Koserow/Usedom auf 15 m Wassertiefe. Im Gegensatz zum Vorjahr konnte die Station im Jahr 2008 aufgrund einer Werftzeit erst ab dem 19. Juli betrieben werden. Eine Aussage über die Ausbildung der in den Vorjahren beobachteten sommerlichen Sauerstoffminima in der Bodenschicht ist daher nur eingeschränkt möglich.

Die Zeitreihen von Wassertemperatur und Salzgehalt in 3 m und 12 m Tiefe sind in Abb. 12 dargestellt. Die an dieser Station Ende Juli gemessenen sommerlichen Maximaltemperaturen von 20 °C sind mit den Oberflächentemperaturen im

Arkonabecken vergleichbar (Abb. 10) und liegen leicht über den an der Darßer Schwelle beobachteten Werten (Abb. 5). Ab etwa der zweiten Septemberwoche setzt eine kontinuierliche und nahezu lineare Abkühlung von spätsommerlichen Werten um 18 °C auf Werte um 4 °C zum Ende des Jahres hin ein. Die in 3 und 12 m beobachteten Werte sind in ihrem Verlauf ähnlich, aber nicht identisch, was darauf hindeutet, dass die Wassersäule auch in diesem flachen Bereich nicht ständig durchmischt ist.

Dies wird bestätigt durch den in den gleichen Tiefen wie die Wassertemperatur gemessenen Salzgehalt, der ebenfalls in Abb. 12 dargestellt ist. Markant ist besonders ein Einbruch des Oberflächensalzgehaltes um den 10. Oktober herum, der vermutlich durch die Schichtung von Mischwasser aus dem Oderhaff über das Wasser der Pommerschen Bucht gesteuert wird. Dieser Prozess wurde bereits in den Vorjahren beobachtet und stellt einen effektiven Mechanismus zur Schaffung von stabiler vertikaler Schichtung dar, welcher die Einmischung von Sauerstoff aus der Deckschicht in die Bodenschicht unterdrückt. Am 17.10. einsetzende Windmischung durch das Sturmtief „Tiffany“ zerstört diese Episode stabiler Schichtung innerhalb kurzer Zeit. Ein zweites Ereignis dieser Art lässt sich während des Monats Dezember beobachten (Abb. 12), kurzfristig unterbrochen ab dem 20.12. durch starke Windmischung infolge eines weiteren Sturmtiefs.

Der Effekt dieser Ereignisse auf den Sauerstoffgehalt in der Pommerschen Bucht wird in Abb. 13 sichtbar, in welcher die Sauerstoffkonzentrationen in 3 und 12 m Tiefe aufgetragen sind. Die Unterbrechung der Sauerstoffeinmischung durch die oben erwähnte advective Erzeugung stabiler Schichtung im Oktober hinterlässt ein deutliches Signal in den bodennahen Sauerstoffkonzentrationen, die um ca. 1 ml/l gegenüber den Oberflächenwerten einbrechen. Ein fast identisches Phänomen wurde im Jahr 2007 in der ersten Oktoberwoche beobachtet. Diese Reaktion der Bodensauerstoffgehalte wird durch die ausgedehnte Periode stabiler Schichtung im Dezember kontrastiert, die kein identifizierbares Signal in den Sauerstoffdaten aufweist. Dies ist konsistent mit der im Vergleich zum Oktober deutlich geringeren Bodenwassertemperatur und der vernachlässigbaren Primärproduktion, welche beide in direktem Zusammenhang mit dem Sauerstoffbedarf des Sediments stehen.

Interessanter Weise ist der kurzzeitigen Einbruch des Oberflächensalzgehaltes im Oktober (sowie zahlreiche im Jahr 2007 beobachtete ähnliche Einbrüche) aufgrund von Brackwasserfahnen aus dem Oderhaff mit erhöhten Sauerstoffkonzentrationen an der Oberfläche korreliert. Dies ist erstaunlich, da das wärmere Haffwasser eine geringere Sättigungskonzentration für Sauerstoff aufweist und daher niedrige Oberflächenkonzentrationen erwarten ließe. Es liegt nahe, dass hier die erhöhte Produktion im Oderhaff zu übersättigten Sauerstoffkonzentrationen führt, welche mit dem Haffwasser zur Station OB transportiert werden. Zusätzlich oder alternativ werden mit dem Haffwasser hohe Nährstoffkonzentrationen in der Deckschicht aus dem Haff exportiert, was an der Station OB lokal zu erhöhter Produktion und damit wiederum zu erhöhten – und möglicherweise übersättigten – Sauerstoffkonzentration an der



Oberfläche führen kann. Beide Effekte sind bei dem Ereignis im Dezember abwesend, da hier die Primarproduktion keine Rolle mehr spielen dürfte.

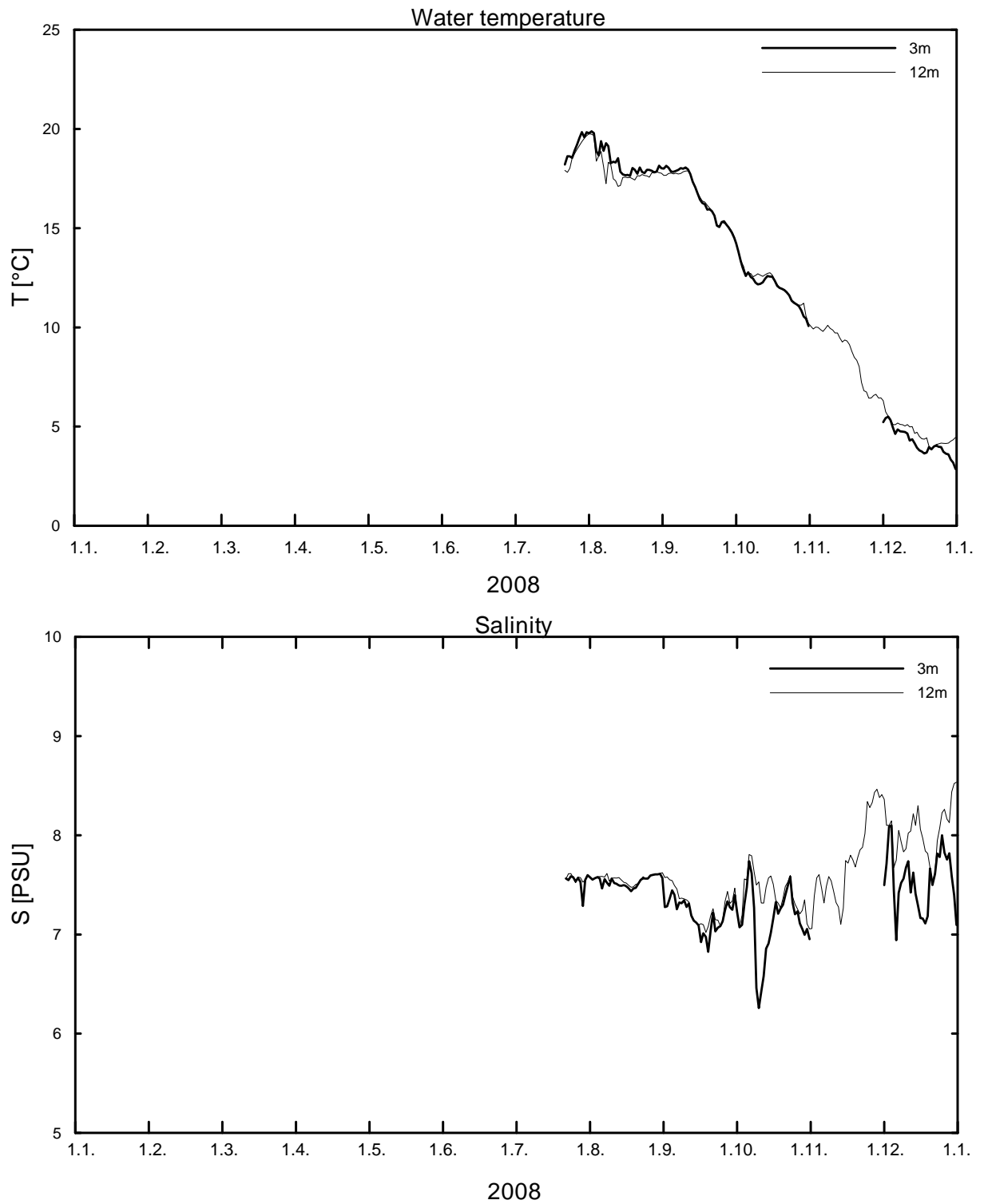


Abb. 12  
Verlauf der Wassertemperatur (A) und des Salzgehaltes (B) in der Deck- und Bodenschicht in der Pommerschen Bucht (Stat. OB) im Jahr 2008

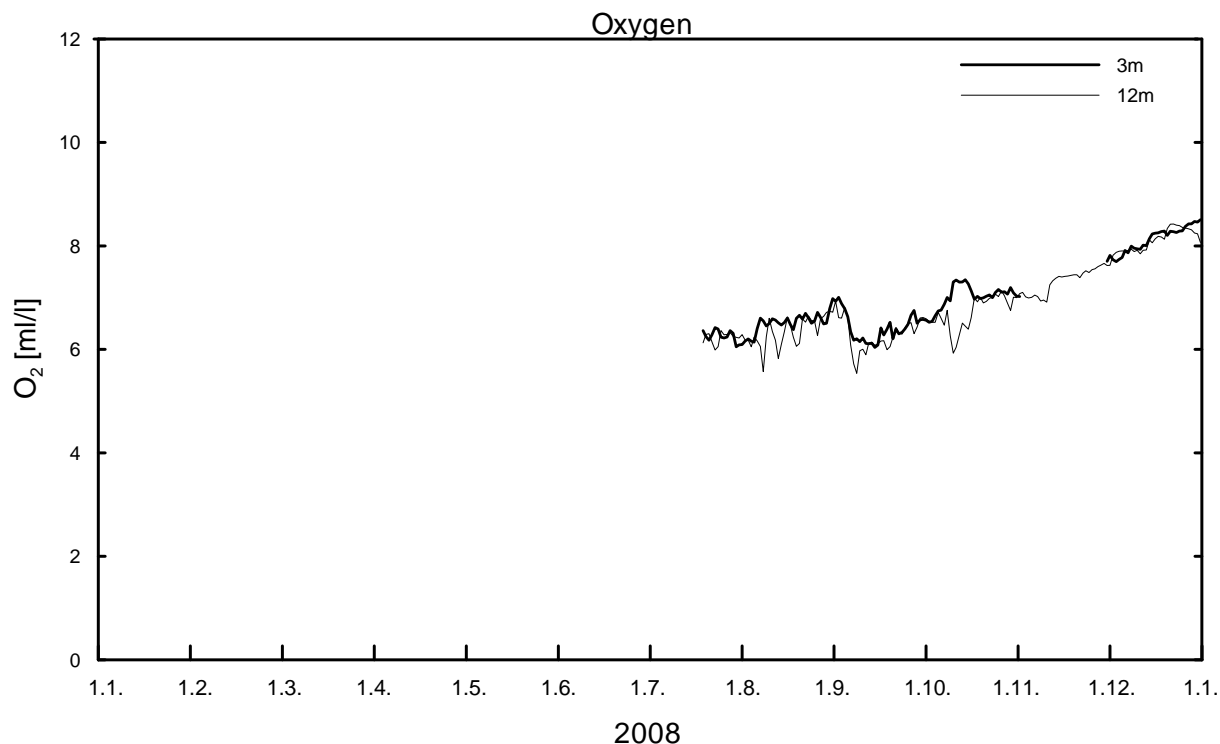


Abb. 13  
Verlauf der Sauerstoffgehaltes in der Deck- und Bodenschicht in der Pommerschen Bucht (Stat. OB) im Jahr 2008

## 6. Hydrographisch-chemische Bedingungen in der westlichen Ostsee

### 6.1 Wassertemperatur

#### 6.1.1 Wasseroberflächentemperatur

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

Das Jahr 2008 war in der Wasseroberflächentemperatur wie 2007 durch ein sehr warmes erstes Halbjahr und einen warmen Spätherbst gekennzeichnet. Das trug dazu bei, dass

die Jahresmitteltemperatur der gesamten Ostsee weiter stieg. Außer in den Monaten August und September lagen die Monatsmittelwerte in weiten Teilen der Ostsee über dem langjährigen Mittelwert. Insbesondere die Monate Januar bis Mai gehörten zu den wärmsten im Untersuchungszeitraum 1990-2008. Dadurch gab es in der westlichen Ostsee kein Eis. Die höchsten Temperaturen des Jahres wurden am 31. Juli bestimmt, da ab 1. August schon von Norden eine Abkühlung erfolgte. Regionale Besonderheiten ergaben sich durch lang anhaltende Auftriebsprozesse, die sich teilweise auch in den Monatsmitteln und Anomalien durchpausten.

Anhand der Kältesummen der Lufttemperatur von Warnemünde (Tab. 2) zeigt sich, dass der Winter 2007/2008 wie der des Vorjahres auch zu den mildesten seit über 50 Jahren zählt. Die Wärmesumme des Sommers 2008 lag mit 195,5 K über dem langjährigen Mittelwert (145,6), wozu insbesondere die Monate Mai – Juli beigetragen haben. Auch die Wärmesummen der Monate August und September waren geringfügig höher als die langjährigen Mittelwerte.

Die Besonderheiten in der Lufttemperatur von Warnemünde spiegeln sich auch weitgehend in der Wasseroberflächentemperatur der westlichen Ostsee wider. Die Anomalien der Monatsmittel des Jahres 2008 zeigen, dass die Temperaturen im Januar - Mai in der westlichen Ostsee mit 2-3 K über dem langjährigen Mittelwert lagen. Der Juni war durch starke räumliche Unterschiede gekennzeichnet, die durch Auftriebsprozesse entlang der Südküsten entstanden. Dadurch waren die Mecklenburger Bucht und die Pommernbucht durch starke negative Anomalien gekennzeichnet, wogegen entlang der dänischen und schwedischen Küste noch leichte positive Anomalien vorhanden waren. Lagen die Anomalien im Juli noch bei +1-2 K, änderten sich die Verhältnisse im August und September drastisch und negative Anomalien waren in weiten Teilen zumindest im August vorherrschend. In den Monaten Oktober bis Dezember dominierten dann wieder positive Anomalien bis +2 K in weiten Teilen der westlichen Ostsee.

Der saisonale Verlauf der Monatsmitteltemperatur in der zentralen Arkonasee und Mecklenburger Bucht sind im Vergleich zu den langjährigen Monatsmittelwerten in Abb.14 dargestellt. Die Maximaltemperaturen wurden in diesem Jahr in beiden Gebieten im Juli erreicht. Das Jahresminimum war im Februar in der Arkonasee und im Januar in der Mecklenburger Bucht zu beobachten. Lagen die Monate Januar bis Mai um +2 K über den langjährigen Mittelwerten, waren es im Mai in der Arkonasee sogar +2-3 K. Im Juni und Juli lagen die Temperaturen nur noch geringfügig über und im August geringfügig unter den langjährigen Mittelwerten. Ab Oktober erhöhten sich die Anomalien wieder und erreichten ca. +1,5 K in der Mecklenburger Bucht im November.

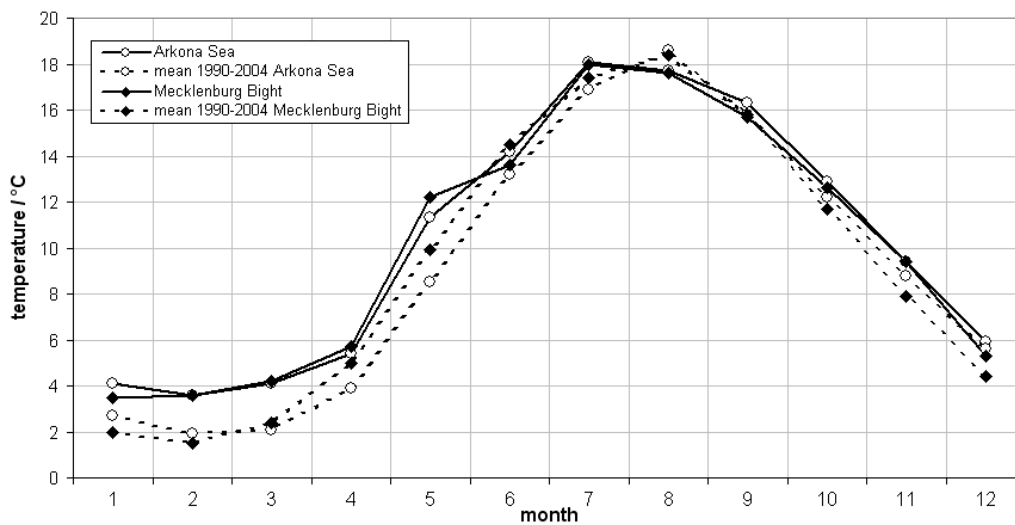


Abb. 14

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

Die folgende detaillierte Beschreibung der thermischen Entwicklung der westlichen Ostsee im Jahr 2008 fasst die wichtigsten Phasen im Jahresverlauf zusammen. Im Januar lag die SST um 3-4°C in den zentralen Bereichen und war in der Pommernbucht niedriger, bei 2.5°C. Das reduzierte sich im Februar nur geringfügig und blieb dann auch im März weitgehend erhalten. Die Temperaturverteilung entlang eines Schnittes durch die westliche Ostsee für den Monat Februar 2008 im Vergleich zum Mittel 1990 – 2004 und zum Februar der Vorjahre zeigt deutlich, dass die westliche Ostsee außergewöhnlich warm war. Die Temperaturen lagen um bis zu 2 K über dem langjährigen Mittel, waren aber niedriger als die maximalen Werte von 2007. Im März gab es kurzzeitige Phasen, in denen die Temperaturen von Westen her anstiegen, windbedingte Durchmischung sorgte aber wieder für Abkühlung. Ab Anfang April begann eine merkliche Erwärmung von Westen. Am 7. April lagen die Temperaturen vom Kattegat bis zur Arkonasee bei 5-6°C. Die nächsten Erwärmungsphasen fanden vom 14.-16. April und ab 25. April statt. Das führte Ende April im Kattegat zu Temperaturen um 10°C, in den Buchten der südlichen Ostsee um 8°C und in der zentralen westlichen Ostsee um 5-7°C. Die Erwärmung setzte sich Anfang Mai fort, wodurch am 11. Mai die maximalen Temperaturen des Monats mit 15-17°C erreicht waren. Am 12. Mai erfolgte eine Windumstellung von West- auf Ostlage mit kurzzeitiger Erhöhung der Windgeschwindigkeit von durchgängig 5 m/s auf 12 m/s und daraus resultierend eine Abkühlung. Nach westlichen Winden vom 15. bis 21. Mai stellte sich eine stabile Ostwindlage ein, die bis zum 8. Juni anhielt. Dadurch entwickelte sich Ende Mai intensiver Auftrieb entlang der deutschen und polnischen Küste, der bis ca. 10. Juni die Wasseroberflächentemperatur in der westlichen Ostsee bestimmte. Dadurch gab es hier kaum Temperaturen über 15°C. Bei den ab ca. 9. Juni dominierenden westlichen Winden entwickelte sich Auftrieb an der Südküste Schwedens. Der Juli war

durch eine erste Erwärmungsphase bis ca. 8. Juli, eine danach folgende Stagnationsphase bis ca. 20. Juli und eine weitere Erwärmung bis Ende Juli gekennzeichnet. Der 31. Juli war der wärmste Tag des Jahres 2008. In weiten Teilen waren Temperaturen zwischen 20 und 22°C erreicht. An den Südküsten prägte Auftrieb, der sich bei Ostwind nach dem 24. Juli entwickelt hatte, das Bild. In den Kernen der Auftriebszellen vor Hiddensee und vor der polnischen Küste waren Temperaturen um 12°C zu verzeichnen. Diese Entwicklung pauste sich auch in den Monatsmitteln entlang des Schnittes durch die westliche Ostsee durch. Die Monatsmittel der westlichen Ostsee lagen nur ca. +1 K über dem langjährigen Mittelwert und in der Arkonasee bis +2 K. Am 1. August drehte in der westlichen Ostsee der Wind von Ost auf West. Die westlichen Winde blieben im gesamten Monat vorherrschend. Ein Starkwindereignis am 4./5. August mit Geschwindigkeiten bis über 20 m/s sorgte für eine Durchmischung der Wassersäule und somit für eine Abkühlung. Bis Ende August blieben die Temperaturen von 16-18°C erhalten. Die Temperaturen entlang des Schnittes durch die zentrale westliche Ostsee für den Monat August 2008 lagen ca. -1-2 K unter dem langjährigen Mittelwert und waren mit dem August 2007 vergleichbar. Diese Situation blieb bis ca. 11. September erhalten. Danach reduzierte sich die SST weiter und Ende September lagen die Temperaturen ähnlich wie im Vorjahr zwischen 12 und 15°C. Im Oktober kühlt die Ostsee weiter von Norden kontinuierlich ab. Ende Oktober hatte die westliche Ostsee 10-13°C. Das reduzierte sich bis Ende November weiter auf Temperaturen um 7-10°C und bis Ende Dezember auf 3-7°C.

### **6.1.2 Vertikalverteilung der Wassertemperatur**

Die klimatologische Temperaturverteilung des Wassers in der westlichen Ostsee folgt dem Jahresgang der Sonneneinstrahlung mit einer Phasenverschiebung von etwa einem Monat (HAGEN und FEISTEL, 2008; FEISTEL et al., 2008a). Dieser saisonalen Verteilung sind wetterbedingte Anomalien überlagert durch Schwankungen der Sonneneinstrahlung, der Lufttemperatur, der Wolkendecke und der Windstärke und -richtung.

Die Besonderheit der vertikalen Temperaturverteilung in der westlichen Ostsee ergibt sich aus dem nahezu permanent vorhandenen starken vertikalen Salzgradienten, der die Dichte des Wasser dominiert und der Temperatur die Rolle eines „passiven Tracers“ zuweist, der in der Regel keinen kausalen Einfluss auf das dynamische Geschehen im Seegebiet hat. Ausnahmen von dieser Regel bilden nur Schichtungen, die im Salzgehalt weitgehend homogen sind und deshalb die Bildung einer Thermokline zulassen, typischerweise im Sommer.

In Sturmsituationen wird die Wassersäule vertikal vermischt und ist dann auch in der Temperatur weitgehend homogen. Wegen der geringen Tiefe der Ostsee westlich der Darßer Schwelle können starke Stürme die Vermischung bis zum Boden bewirken. In den häufigsten Wettersituationen herrscht schwacher Wind, der den Aufbau eines starken vertikalen Dichtegradienten zulässt und das Bodenwasser von dem der Deckschicht thermisch entkoppelt. Das Oberflächenwasser folgt dann dem aktuellen jahrszeitlichen

Verlauf. Das Bodenwasser jedoch ist ursprünglich Oberflächenwasser des Kattegats gewesen, bringt seinen Wärmeinhalt von dort mit und speichert ihn über die Dauer seiner Verweilzeit zwischen dem Großen Belt und der Darßer Schwelle. In der Folge ist der Jahresgang der Temperatur im Tiefenwasser deutlich verzögert, typischerweise um mehrere Monate.

Tabelle 5 zeigt die Temperaturverteilung des Tiefenwasser, der westlichen Ostsee in °C, gemessen 2008 auf den Überwachungsfahrten des IOW. Die jahreszeitliche Verteilung der gemessenen Temperaturen ist in den Zeilen ersichtlich, die räumliche von West (oben) nach Ost (unten) in den Spalten. Es ist klar zu erkennen, dass kaltes Tiefenwasser 2008 bis in den frühen Sommer vorgefunden wurde, warmes dagegen bis in den späten Herbst.

Tab. 5

Bodennahe Temperaturen der westlichen Ostsee in °C, gemessen 2008 auf den Überwachungsfahrten des IOW

IOW Station	Tiefe m	10.Feb -12.Feb	27.Mrz -28.Mrz	29.Apr - 1.Mai	29. Jul - 30.Jul	15.Nov -17.Nov
360	15	4,16	4,96	7,16	12,98	10,20
12	20	4,00	4,78	5,50	10,97	10,34
22	20	4,81	4,72	5,14	10,29	10,30
30	20	3,98	3,99	5,52	13,96	9,95
113	40	4,74	4,40	4,57	13,51	12,33

## 6.2 Salzgehalt

Die klimatologische Verteilung des Salzgehalts (FEISTEL et al., 2008a) nimmt von West nach Ost ab, da durch Vertikalaustausch das von Westen am Boden einströmende salzreiche Wasser Salz an das in der Deckschicht nach Westen ausströmende süßere Wasser abgibt. Die Tabellen 6 und 7 zeigen die jahreszeitliche Verteilung der gemessenen Salzgehalte in den Zeilen, die räumliche von West (oben) nach Ost (unten) in den Spalten. Dabei spielt die Lübecker Bucht (Station 22) eine Sonderrolle, weil sie abseits des Hauptstroms zwischen der Kieler Bucht (Station 360) und der Arkonasee (Station 113) liegt.

Die Einzelmessungen in den Tabellen 6 und 7 folgen der zonalen klimatologischen Tendenz bis auf wenige Ausnahmen. Solche Ausnahmen sind durch zwei gegenläufige Prozesse bedingt. Sturmereignisse vermischen verstärkt die bodennahe mit der Oberflächenschicht, abhängig von der Sturmstärke, seiner Dauer, der Wassertiefe und dem Salzgehalt am Boden, d.h. der Stabilität der Schichtung. In ruhigen Lagen führt barokliner Zustrom von sehr salzigem Wasser aus dem Kattegat in einer dünnen Bodenschicht bei gleichzeitigem Ausstrom von salzarmem Wasser in der Deckschicht in

das Kattegat zu einer Verstärkung des vertikalen Salzgradienten. Wegen der langsamen baroklinen Transporte durch den Großen Belt braucht es ca 2-4 Wochen, bis sich eine durch Sturm zerstörte Schichtung regeneriert hat. Der Schichtungs Aufbau ist abgeschlossen, sobald die sehr salzige Bodenschicht das Becken zwischen dem Großen Belt und der Darßer Schwelle aufgefüllt hat. Danach beginnt das zusätzliche sehr salzige Wasser über die Darßer Schwelle in die Arkonasee abzufließen, und von dort weiter in das Bornholmbecken, d.h. ein barokliner Einstrom setzt ein.

Momentaufnahmen durch die Beobachtungsfahrten treffen wetterbedingt zufällig in aktuelle Aufbau- oder Abbauphasen der Schichtung der westlichen Ostsee. Deren zeitlicher Ablauf wird aus den Reihen erkennbar, die an den MARNET-Stationen aufgezeichnet werden (Kapitel 3 und 4). Diese Zeitreihen wiederum sind wesentlich besser interpretierbar, wenn sie zusammen mit räumlichen Momentaufnahmen durch die Überwachungsfahrten analysiert werden. Die einzelnen Sturm- und Einstromsituationen 2008 werden in den Kapiteln 2 - 4 genauer beschrieben.

Tab. 6

Oberflächennahe Salzgehalte der westlichen Ostsee in PSU, gemessen 2008 auf den Überwachungsfahrten des IOW

IOW Station	Tiefe m	10.Feb -12.Feb	27.Mrz -28.Mrz	29.Apr - 1.Mai	29. Jul - 30.Jul	15.Nov -17.Nov
360	2	18,54	15,60	9,48	13,36	19,19
12	2	15,70	9,83	9,40	9,60	15,50
22	2	16,54	12,45	10,17	13,04	18,15
30	2	8,69	8,18	8,15	7,95	9,17
113	2	8,16	8,09	7,99	7,65	8,39

Tab. 7

Bodennahe Salzgehalte der westlichen Ostsee in PSU, gemessen 2008 auf den Überwachungsfahrten des IOW

IOW Station	Tiefe m	10.Feb -12.Feb	27.Mrz -28.Mrz	29.Apr - 1.Mai	29. Jul - 30.Jul	15.Nov -17.Nov
360	15	19,04	19,73	15,43	20,91	20,70
12	20	17,12	15,58	19,20	26,37	18,29
22	20	19,66	16,82	17,85	23,94	18,35
30	20	9,95	9,89	16,12	11,82	12,13
113	40	15,04	12,95	14,21	15,96	16,12

### 6.3 Sauerstoffverteilung

Die Sauerstoffversorgung des Oberflächenwassers kann in der Regel als gut angesehen werden. Dafür sorgen intensive Austauschvorgänge mit der Atmosphäre und die

Primärproduktion in der euphotischen Zone. Die Veränderungen des Sauerstoffgehaltes werden im Wesentlichen durch die Jahresgänge von Temperatur und Salzgehalt (vgl. NAUSCH et al. 2008) und die jahreszeitlich unterschiedlich stark ausgeprägten Produktions- und Zehrungsprozesse verursacht. Im gesamten Untersuchungsgebiet, insbesondere jedoch in der westlichen Ostsee, können zusätzlich hydrodynamische Prozesse eine wesentliche Rolle spielen. Unterhalb permanenter oder temporärer Sprungschichten, die durch Temperatur- und/oder Salzgehaltgradienten entstehen, kann es dagegen zu einer erheblichen Sauerstoffzehrung kommen, da diese Wasserschichten nicht durchlichtet sind, folglich nur Zehrungsprozesse stattfinden.

In der durchmischten Oberflächenschicht kann ein typischer Jahresgang des Sauerstoffgehaltes beobachtet werden (MATTHÄUS, 1978, NAUSCH et al. 2008). Die hohe Sauerstofflöslichkeit bei niedrigen Temperaturen führt bis in den Mai hinein zu hohen Sauerstoffkonzentrationen. Die Frühjahrsblüte des Phytoplanktons führt zu einem zusätzlichen Sauerstoffeintrag. Der rasche Temperaturanstieg ab Mitte Mai verringert die Sauerstofflöslichkeit deutlich, so dass im Sommer nur noch Konzentrationen zwischen 6 und 7 ml/l gemessen werden. Die herbstliche Abkühlung führt zu einer erneuten Zunahme des Sauerstoffgehaltes (Tab. 8).

Tab. 8

Jahresgang des Sauerstoffgehaltes in der durchmischten Oberflächenschicht (0 – 10 m) im Jahr 2008

	Februar	März	Mai	August	November
<b>westl. Ostsee</b>					
<b>O<sub>2</sub> (ml/l)</b>	<b>8.22</b>	<b>8.38</b>	<b>8.05</b>	<b>6.16</b>	<b>6.78</b>
Stabw. (ml/l)	0.13	0.18	0.09	0.08	0.13
n	4	5	5	5	5
<b>Arkonabecken</b>					
<b>O<sub>2</sub> (ml/l)</b>	<b>8.58</b>	<b>8.91</b>	<b>8.66</b>	<b>6.55</b>	<b>7.28</b>
Stabw. (ml/l)	0.10	0.19	0.15	0.06	0.06
n	13	11	12	7	13

Um den Einfluss von Temperatur und Salzgehalt auf die Sauerstofflöslichkeit zu eliminieren, wird häufig der Sauerstoffsättigung gegenüber der Sauerstoffkonzentration der Vorrang gegeben. Dadurch wird die Vergleichbarkeit der Messwerte deutlich erhöht. Abb. 15 fasst die Sauerstoffsättigungswerte des Oberflächenwassers für das Jahr 2008 zusammen. Der typische Jahresgang wird deutlich. Im Februar verursacht die nur sehr geringe Produktion und die Dominanz von Zehrungsprozessen eine leichte Untersättigung. Die Frühjahrsblüte führt zu einer Zunahme des Sauerstoffgehaltes. Aus Abb. 15 wird deutlich, dass diese Blüte in der westlichen Ostsee zum Zeitpunkt der Probenahme Ende Mai schon vorüber ist, die Untersättigung dokumentiert Abbauprozesse. Ende März und Anfang Mai findet sich im Arkonabecken eine Übersättigung, die auch den ganzen Sommer anhält. In der westlichen Ostsee konnte



dagegen nur im Mai eine geringe Übersättigung beobachtet werden. Im Herbst kommt es zu einem vermehrten Abbau der organischen Substanz. In beiden Untersuchungsgebieten liegt die Sättigung bei 95 %.

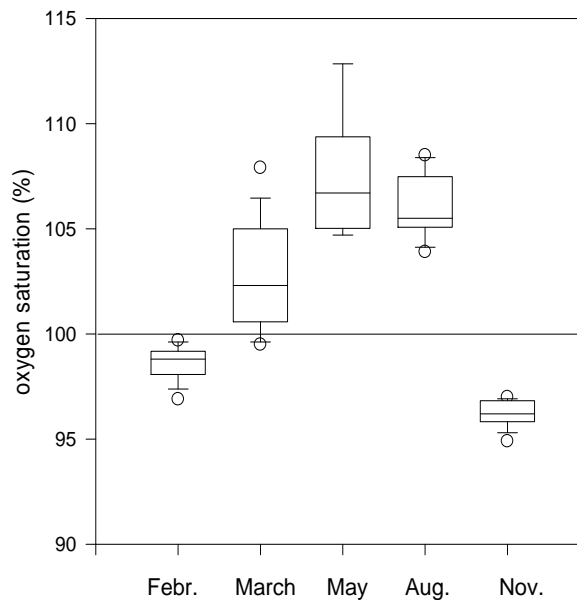
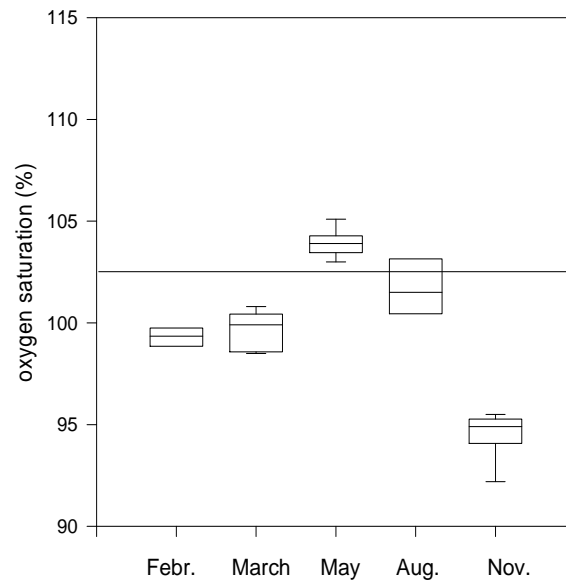


Abb. 15

Box- Whisker- Plots der Sauerstoffsättigung (%) im Jahr 2008 in der Oberflächenschicht (0 – 10 m) in der westlichen Ostsee (oben) und im Arkonabecken (unten)

Tab. 9

Sauerstoffsättigung in Bodennähe in der westlichen Ostsee und im Arkonabecken im Jahr 2008

	Tiefe (m)	Februar	März	Mai	August	November
<b>westl. Ostsee</b>						
<b>Sättigung (%)</b>	<b>23.6</b>	<b>94.4</b>	<b>89.0</b>	<b>79.0</b>	<b>51.3</b>	<b>82.5</b>
Stabw. (%)		1.9	3.6	10.7	7.2	9.3
n		4	5	5	5	5
<b>Arkonabecken</b>						
<b>Sättigung (%)</b>	<b>44.1</b>	<b>88.8</b>	<b>82.2</b>	<b>55.0</b>	<b>45.8</b>	<b>67.8</b>
Stabw. (%)		3.3	3.5	15.9	12.1	11.4
n		11	8	11	6	11

Auch in Bodennähe ist im Untersuchungsgebiet ein ausgeprägter Jahresgang zu beobachten. Im Winter, während der Beprobungen im Februar und März, findet häufig eine tief greifende vertikale Durchmischung statt, eine stabile Schichtung kann sich in der Regel nicht aufbauen. So liegt die Sättigung, besonders in der westlichen Ostsee, nur relativ wenig unter der des Oberflächenwassers. Im tieferen Arkonabecken liegen die Sättigungswerte dagegen durchweg unter 90 %. Mit der Entwicklung einer stabilen thermohalinen Schichtung ab dem Frühjahr wird das Tiefenwasser weitgehend von der vertikalen Konvektion ausgeschlossen und die Sauerstoffsättigung des Bodenwassers nimmt auf Grund des Abbaus der organischen Substanz ab. Die niedrigsten Sättigungswerte werden im Spätsommer/Frühherbst ermittelt (Tab. 9). Im Spätherbst führt die Abkühlung des Oberflächenwassers mit dem häufigeren Auftreten von Sturmereignissen schrittweise zu einer Durchmischung bis zum Boden, so dass die Sauerstoffsättigungswerte sich wieder dem Oberflächenwasser annähern. Dies geschieht in der flacheren westlichen Ostsee schneller als im tieferen Arkonabecken (Tab. 9). Genauere Aussagen zur jahreszeitlichen Entwicklung von Sauerstoffgehalt und -sättigung können den Registrierungen am Messmast „Darßer Schwelle“ (vgl. Kapitel 3) und an der Bojenstation „Arkonabecken“ (vgl. Kapitel 4) entnommen werden.

Die Periode größter Sauerstoffverarmung in Bodennähe wird in der Regel im September beobachtet. Dieser Zeitraum wird durch unsere Probenahmen nicht abgedeckt. Zur Beschreibung dieses Zeitraums können jedoch Untersuchungen des Landesamtes für Natur und Umwelt Schleswig-Holstein (LANU) für die westliche Ostsee herangezogen werden. Das LANU führt seit 2001 flächenhafte Aufnahmen der Sauerstoffsituation im Spätherbst durch. Im Jahr 2008 fand diese Aufnahme vom 10. – 24. September statt, wobei 44 Stationen, davon 34 mit einer Wassertiefe von > 15 m untersucht wurden. Die Ergebnisse sind in Abb. 16 dargestellt. Im Tiefenwasser wiesen 62 % aller Messwerte einen Sauerstoffgehalt < 2 mg/l = 1.40 ml/l auf. Im Jahr 2007 war dieser Anteil mit 43 % deutlich geringer (LANU 2008). Der Sauerstoffmangel erweist sich aber insgesamt als nicht so weit verbreitet wie im Jahr 2002 (HELCOM 2003, Nausch et al. 2003).

## Sauerstoffmangel in der westl. Ostsee im September 2008

Landesamt für  
Natur und Umwelt  
des Landes  
Schleswig-Holstein

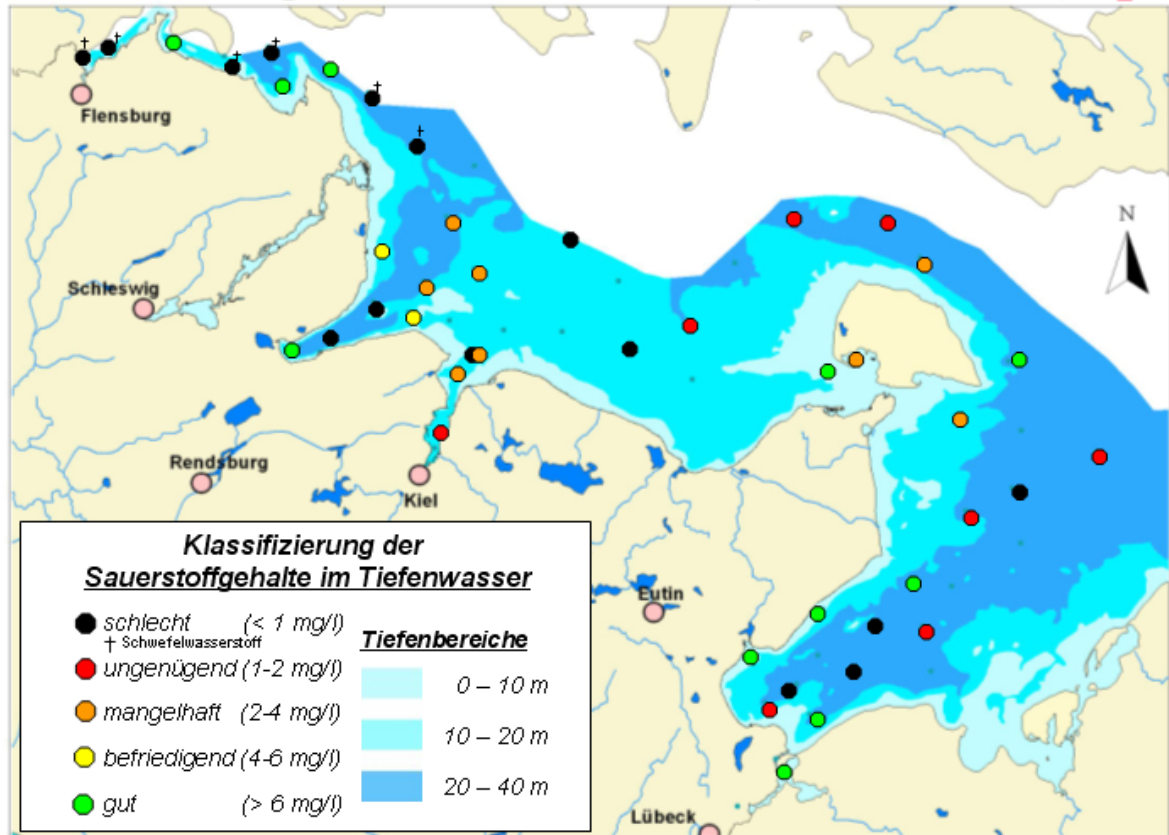


Abb. 16

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

### 6.4 Anorganische Nährstoffe

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

Bottnischen Meerbusen. Die restlichen 161 Küstengebiete sind z.T. sehr stark von Eutrophierung beeinflusst. Auch die 9 in der deutschen AWZ klassifizierten offenen Seegebiete und Küstenzonen befinden sich in einem moderaten bis schlechten Eutrophierungszustand.

Die Beschreibung der Nährstoffsituation gehört seit der Etablierung eines einheitlichen Überwachungsprogramms der HELCOM Ende der 1970er Jahr zu den Schlüsselementen des Messprogramms. In die Untersuchungen sind vor allem die anorganischen Nährstoffe Phosphat, Ammonium, Nitrit, Nitrat und Silikat einbezogen, aber auch die Summenparameter Gesamtphosphor und Gesamtstickstoff werden regelmäßig gemessen.

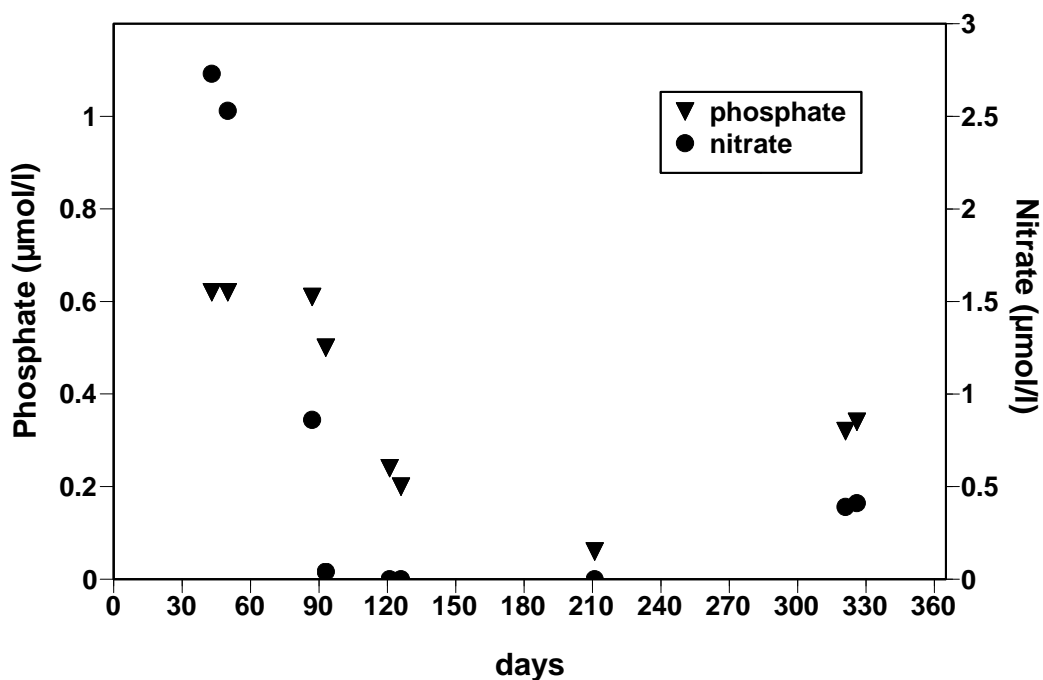


Abb. 17  
Phosphat- und Nitratjahresgang 2008 im Oberflächenwasser (0 – 5 m) der zentralen Arkonasee (Station 113)

In der Oberflächenschicht weisen Phosphat und Nitrat den für die gemäßigten Breiten typischen Jahresgang auf (NEHRING und MATTHÄUS, 1991; NAUSCH und NEHRING, 1996). Abb. 17 zeigt dies für die Arkonasee. In der zentralen Ostsee bildet sich im Winter eine typische Plateauphase aus, die in Abhängigkeit vom Witterungsverlauf über 2-3 Monate anhalten kann (NAUSCH et al., 2008). In der westlichen Ostsee und im Arkonabecken setzt dagegen die Frühjahrsblüte des Phytoplanktons deutlich früher ein, so dass ein stabiles Winterplateau kaum sichtbar wird. Schon Ende März ist das Nitratreservoir vollständig erschöpft (Abb. 17), während noch ausreichend Phosphat vorhanden ist. Nachdem Nitrat völlig aufgebraucht ist, bricht die Frühjahrsblüte auf Grund der Stickstofflimitation

zusammen. Die Phosphatkonzentrationen gehen dagegen erst allmählich zurück und erreichen im Sommer die Nachweisgrenze, häufig verursacht durch eine intensive Cyanobakterienblüte. Die geringe Datendichte beschreibt diese Phase des Jahresganges nur ungenügend. Im Herbst kommt es infolge der verstärkten Mineralisation der organischen Substanz zu einem langsamen Anstieg der Nährstoffkonzentrationen bis dann im Februar des Folgejahres wieder die Winterkonzentrationen erreicht werden. Während in der Arkonasee die herbstlichen Nährstoffkonzentrationen des Oberflächenwassers im normalen Bereich liegen, wurden im November in der westlichen Ostsee schon sehr hohe Werte gemessen. So lagen diese Phosphatwerte schon zwischen  $0.60 - 0.70 \mu\text{mol/l}$  (vgl. Tab. 10), was typisch für die Wintersituation ist. Ammoniumwerte um  $1 \mu\text{mol/l}$  deuten ebenfalls auf starke Abbauprozesse hin.

Die fehlende typische winterliche Plateauphase erschwert in der westlichen Ostsee auch die Ableitung von langfristigen Nährstofftrends wie dies für die zentrale Ostsee möglich ist. Milde und sonnenreiche Winter können durchaus schon im Februar zum Einsetzen der Frühjahrsblüte führen. So können die in Tab. 10 zusammengefassten Nährstoffkonzentrationen auch nur einen groben Überblick über die Nährstoffsituation geben. So zeigen die in der Regel während der Februarfahrt doppelt beprobten Stationen teilweise starke Variationen im Nährstoffgehalt innerhalb weniger Tage. Auch die große Hydrodynamik dieses Seegebietes beeinflusst den Nährstoffstatus erheblich. Offensichtlich ist jedoch, dass die Phosphatkonzentrationen in der westlichen Ostsee (Stationen 360, 022, 012) deutlich über dem 5-Jahresmittel liegen, während sie im Bereich der Darßer Schwelle (Station 30) und in der Arkonasee (Station 113) im Durchschnitt liegen. Recht hohe Nitratwerte in der westlichen Ostsee stehen unterdurchschnittlichen Nitratwerten in der Arkonasee gegenüber. Deutlich sind auch die Unterschiede in den N/P-Verhältnissen. Die in Richtung Beltsee gelegene Station 360 und die von der Lübecker Bucht beeinflusste Station 022 weisen vergleichsweise hohe N/P-Verhältnisse auf, wenn gleich sie noch deutlich unter dem Redfield-Verhältnis von 16:1 liegen (REDFIELD et al., 1963). Die Station 012 in der Mecklenburger Bucht stellt einen Übergang zu den Seegebieten östlich der Darßer Schwelle dar, wo die typischen sehr niedrigen N/P-Verhältnisse beobachtet werden (NAUSCH et al., 2008).

Der Silikatjahresgänge in der Mecklenburger Bucht und der Arkonasee (Abb. 18) unterscheiden sich deutlich von denen des Phosphats und des Nitrats. Während des gesamten Jahresverlaufs ist ausreichend Silikat vorhanden, so dass das Wachstum der Diatomeen nicht durch Silikat begrenzt ist. Die Jahresmittelwerte der dargestellten Stationen liegen mit  $13.6 \mu\text{mol/l}$  in der Mecklenburger Bucht ( $n = 8$ ) und mit  $11.3 \mu\text{mol/l}$  in der Arkonasee ( $n = 9$ ) etwas über dem langjährigen Mittel 1993 – 2007 (NAUSCH et al., 2007). Ein abnehmender Trend ist für diesen Zeitraum nicht zu belegen.

Die Betrachtung des Jahresganges zeigt Unterschiede. Der starke Abfall der Silikatkonzentrationen vom Winter zum Frühjahr von mehr als  $10 \mu\text{mol/l}$  deutet wie in den Vorjahren auf eine typische Frühjahrsblüte der Diatomeen hin, die in 2008 leider nur durch einen Messwert belegt werden konnte. Zum Herbst steigen die Konzentrationen wieder an. In der Arkonasee ist die Frühjahrsblüte der Kieselalgen deutlich schwächer ausgeprägt, was wiederum in Einklang mit langjährigen Beobachtungen steht (NAUSCH et

al., 2007). Im Herbst 2008 weisen die niedrigen Silikatkonzentrationen auf eine Herbstblüte der Diatomeen hin.

Tab. 10

Gemittelte Nährstoffkonzentrationen in der winterlichen Oberflächenschicht (0 – 5 m) der westlichen Ostsee im Februar 2008

**NO<sub>3</sub>**

Station	2003	2004	2005	2006	2007	2003/2007	2008
360	6.35	5.04	3.94	3.12	8.63	<b>5.42</b>	6.45
012	5.74	5.16	2.87	3.54	6.48	<b>4.76</b>	7.77
022	8.92	11.24	5.20	4.15	9.40	<b>7.78</b>	6.64
030	4.12	3.19	2.47	2.88	3.96	<b>3.32</b>	2.86
113	4.52	2.46	2.36	3.31	4.18	<b>3.37</b>	2.73

**DIN**

Station	2003	2004	2005	2006	2007	2003/2007	2008
360	6.70	5.83	4.61	3.91	10.35	<b>6.28</b>	7.53
012	6.66	6.26	3.18	4.44	7.42	<b>5.59</b>	8.95
022							
030							
113	5.06	2.84	2.60	4.05		<b>3.64</b>	3.14

**PO<sub>4</sub>**

Station	2003	2004	2005	2006	2007	2003/2007	2008
360	0.53	0.44	0.50	0.76	0.70	<b>0.59</b>	0.78
012	0.62	0.51	0.69	0.82	0.58	<b>0.64</b>	0.81
022	0.56	0.55	0.70	0.93	0.62	<b>0.67</b>	0.73
030	0.54	0.42	0.64	0.78	0.76	<b>0.63</b>	0.61
113	0.54	0.35	0.72	0.80	0.80	<b>0.64</b>	0.62

**N/P**

Station	2003	2004	2005	2006	2007	2003/2007	2008
360	12.6	13.2	9.2	5.1	14.8	<b>10.6</b>	9.6
012	10.7	12.3	4.6	5.4	12.8	<b>8.7</b>	11
022	15.9	20.4	7.43	4.5	15.2	<b>11.6</b>	9.1
030	7.6	7.6	3.8	3.7	5.2	<b>5.3</b>	4.7
113	9.4	8.1	3.6	5.1		<b>5.7</b>	5.1

**SiO<sub>4</sub>**

Station	2003	2004	2005	2006	2007	2003/2007	2008
360	12.4	11.4	11.1	15.6	17.6	<b>13.6</b>	21.6
012	13.7	15.8	14.8	17.9	14.3	<b>15.3</b>	20.4
022	16.0	19.2	15.4	20.2	16.0	<b>17.7</b>	20.0
030	12.6	11.8	14.2	16.8	13.0	<b>13.7</b>	13.4
113	13.8	9	14.1	18.6	13.4	<b>13.8</b>	13.5

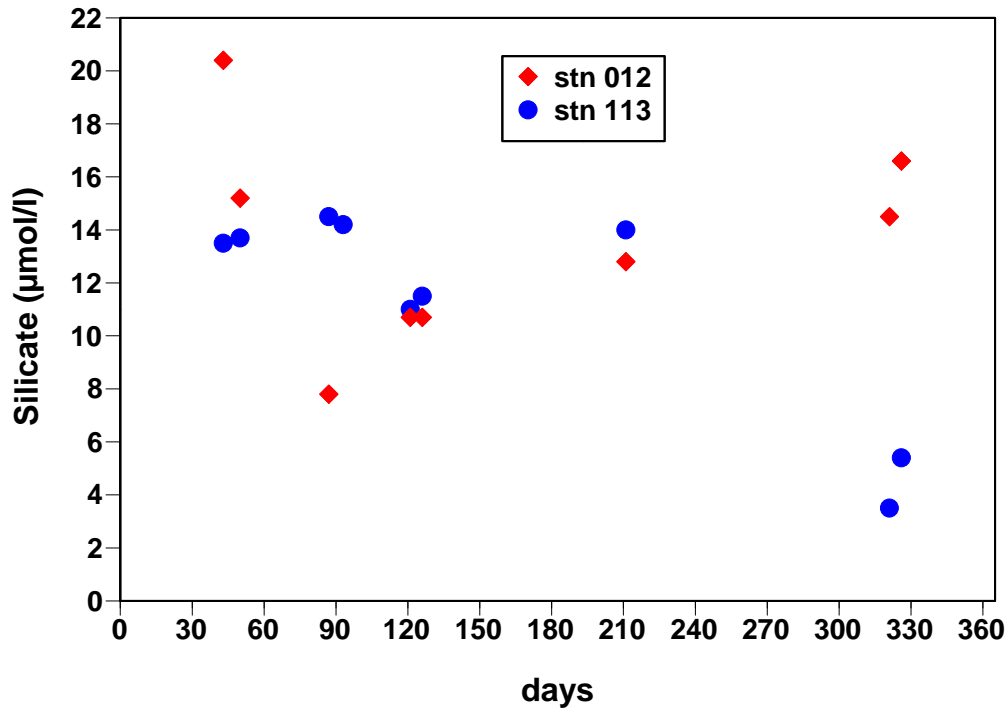


Abb. 18

Silikatjahresgang 2008 im Oberflächenwasser (0 – 5 m) der Mecklenburger Bucht (Station 012) und der zentralen Arkonasee (Station 113)

Verallgemeinernde Aussagen zur vertikalen Nährstoffverteilung lassen sich für die recht flachen Seegebiete der westlichen Ostsee nur eingeschränkt ziehen. Nährstoffgradienten werden im Wesentlichen durch die variierenden Schichtungen von Salzgehalt und Temperatur geprägt. Deshalb soll hier eine für die Ostsee typische Vertikalverteilung für die Arkonasee diskutiert werden (Abb. 19). Durch die winterliche Konvektion finden sich zu dieser Jahreszeit von der Oberfläche bis zur Halokline recht einheitliche, hohe Konzentrationen für Phosphat und Nitrat. Das Nitrat wird durch die Frühjahrsblüte des Planktons sehr rasch verbraucht (siehe oben). Dadurch ist die Wassersäule bis zur Halokline weitgehend nitratverarmt bevor sich eine stabile Temperaturschichtung aufbauen kann. Im Arkonabecken finden sich deshalb auch unterhalb der Thermokline, die bei etwa 17 m liegt, nur sehr geringe Nitratkonzentrationen. Erst im Bereich der Halokline und darunter steigen die Konzentrationen stark an. Wenn sich im späteren Frühjahr eine stabile Thermokline bildet, ist Phosphat noch in höheren Konzentrationen vorhanden. Diese bleiben im kalten winterlichen Zwischenwasser während des gesamten Sommers erhalten, da in dieser Wasserschicht nur eine geringe Produktivität herrscht. Episodische Auftriebsprozesse können dieses phosphatreiche, aber nitratarme Zwischenwasser bei entsprechenden Windverhältnissen an die Oberfläche transportieren und Planktonblüten, insbesondere von Cyanobakterien fördern. Die hier beschriebene Vertikalverteilung ist in den tieferen Becken der zentralen Ostsee noch deutlich stärker ausgeprägt.

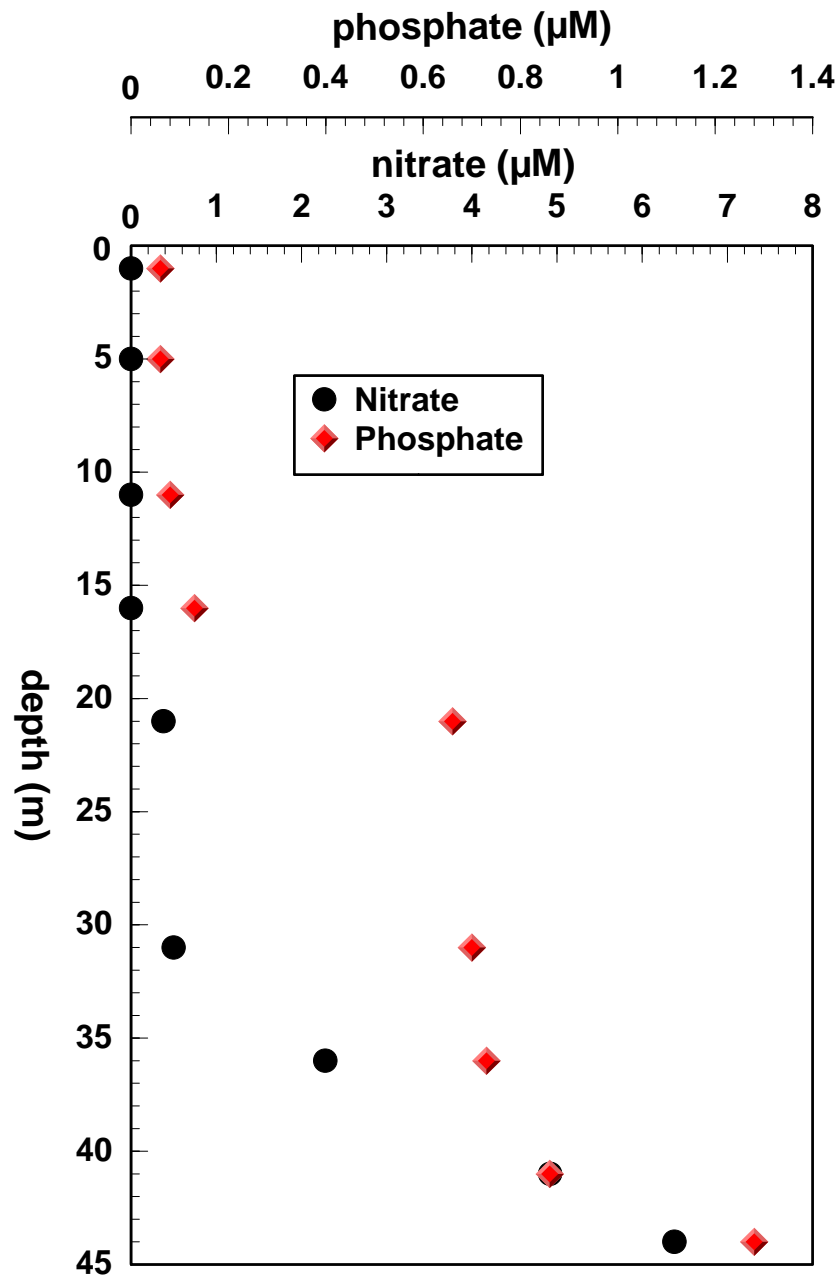


Abb. 19  
Vertikalverteilung für Phosphat und Nitrat im Arkonabecken im Juli 2008



## 6.5 Natürliche organische Verbindungen

In marinen Ökosystemen wird durch die Photosyntheseleistung des Phytoplanktons organisches Material gebildet, wobei CO<sub>2</sub> und in erster Linie anorganische Nährstoffe eingesetzt werden. Die zur Synthese der organischen Verbindungen notwendige Energie stammt letztlich aus dem Sonnenlicht. Gelöstes und partikuläres organisches Material ist auch die Quelle, aus der durch den Prozess der Remineralisation anorganische Nährstoffe regeneriert werden. Bei diesem Prozess wird Sauerstoff verbraucht und - neben anorganischen Nährstoffen - CO<sub>2</sub> freigesetzt. Der Auf- und Abbau organischen Materials in marinen Ökosystemen ist deshalb eng mit den Problemen der Eutrophierung und des Treibhauseffekts verknüpft.

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

Die schwächer ausgeprägte Saisonalität organischer Verbindungen wird besonders deutlich anhand der POC - Konzentrationen in den Oberflächenschichten der Stationen in der westlichen Ostsee und der Arkonasee (z.B. Station 012 (Mecklenburger Bucht) und Station 113 (Arkonabecken), Abb. 20). Verglichen mit den Konzentrationsmustern in der zentralen Ostsee (NAUSCH et. al., 2007) fällt das nur kurzzeitig auftretende Winterminimum und ein länger anhaltendes, inhomogenes Sommermaximum auf. Im Frühjahr und Sommer fallen dabei einzelne, zum Teil extrem hohe Werte auf, die mit den beobachteten raschen Veränderungen der anorganischen Nährstoffe in Zusammenhang stehen (vergl. 6.4). Auch die Ansammlung von Cyanobakterien in der Oberflächenschicht kann Ursache für kurzzeitige und zu Teil lokal begrenzte extreme Konzentrationen partikulären organischen Materials sein. Aufgrund der geringen Wassertiefe und der häufigeren Durchmischung unterscheiden sich die Konzentrationen partikulären organischen Materials in den verschiedenen Tiefen der Wassersäule nicht wesentlich. Allerdings sind die Extremwerte in den tieferen Wasserschichten weniger stark ausgeprägt.

In den Abbildungen 21 und 22 sind die mittleren Konzentrationen partikulären und gelösten organischen Materials in den oberflächennahen bzw. bodennahen Wasserschichten an ausgewählten Stationen in der westlichen Ostsee und in der Arkonasee dargestellt. Die Mittelwerte, Standardabweichungen und Minimal- bzw.

Maximalwerte wurden dabei aus den Ergebnissen der Messungen an diesen Stationen seit 1995 berechnet.

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

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

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

Der Einfluss hydrodynamischer Prozesse wird auch deutlich, wenn man den Verlauf der DOC - Konzentration über mehrere Jahre betrachtet. Als ein Beispiel sind die Zeitreihen der DOC - Konzentrationen in der Oberflächenschicht der Stationen 012 und 113 in Abb. 23 dargestellt. Die Station 012 in der Mecklenburger Bucht ist dabei deutlich stärker von den

Ein- und Ausstromereignissen betroffen als die Station 113, die in der zentralen Arkonasee liegt. Dabei zeigt sich an der Station 012 ein schwach ausgeprägtes jahreszeitliches Muster mit geringeren Konzentrationen in den Wintermonaten und höheren Konzentrationen im Sommer. Aufgrund der meteorologischen Bedingungen wird salzreiches und DOC - armes Wasser vorzugsweise in den Wintermonaten in die Ostsee transportiert und gelangt bei kleinen Einstromereignissen bis in die Oberflächenschicht der flachen Gebiete der westlichen Ostsee. In den Sommermonaten überwiegt demgegenüber der Ausstrom von salzarmem und DOC - reichem Ostseewasser.

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

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

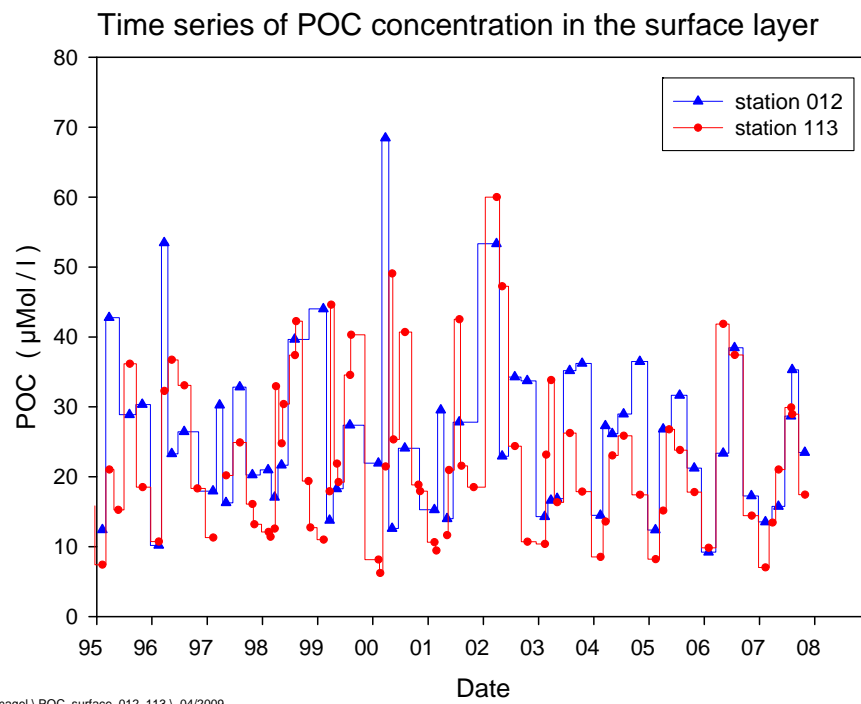
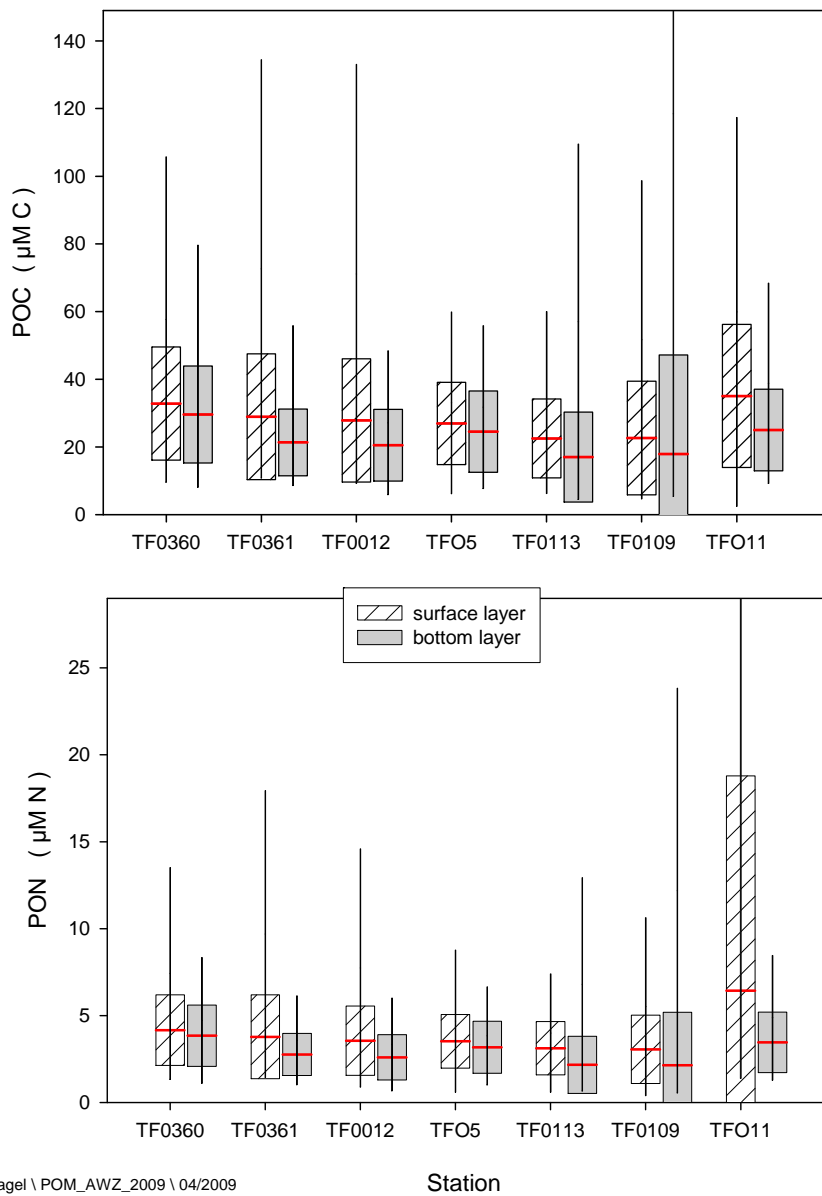


Abb. 20

Zeitreihe der POC - Konzentrationen in der Oberflächenschicht an der Stationen 012 (Mecklenburger Bucht) und Station 113 (Arkonasee)

Variability of particulate organic matter at selected stations



K.Nagel \ POM\_AWZ\_2009 \ 04/2009

Abb. 21

Mittlere POC - und PON - Konzentrationen in der Oberflächenschicht (weiße Boxen) und der bodennahen Schicht (graue Boxen) an ausgewählten Stationen in der westlichen Ostsee und der Arkonasee. Zur Berechnung des Mittelwertes, der Standardabweichung und der Spannweite zwischen minimalen und maximalen Werten (Linie) wurden die Messungen seit 1995 herangezogen

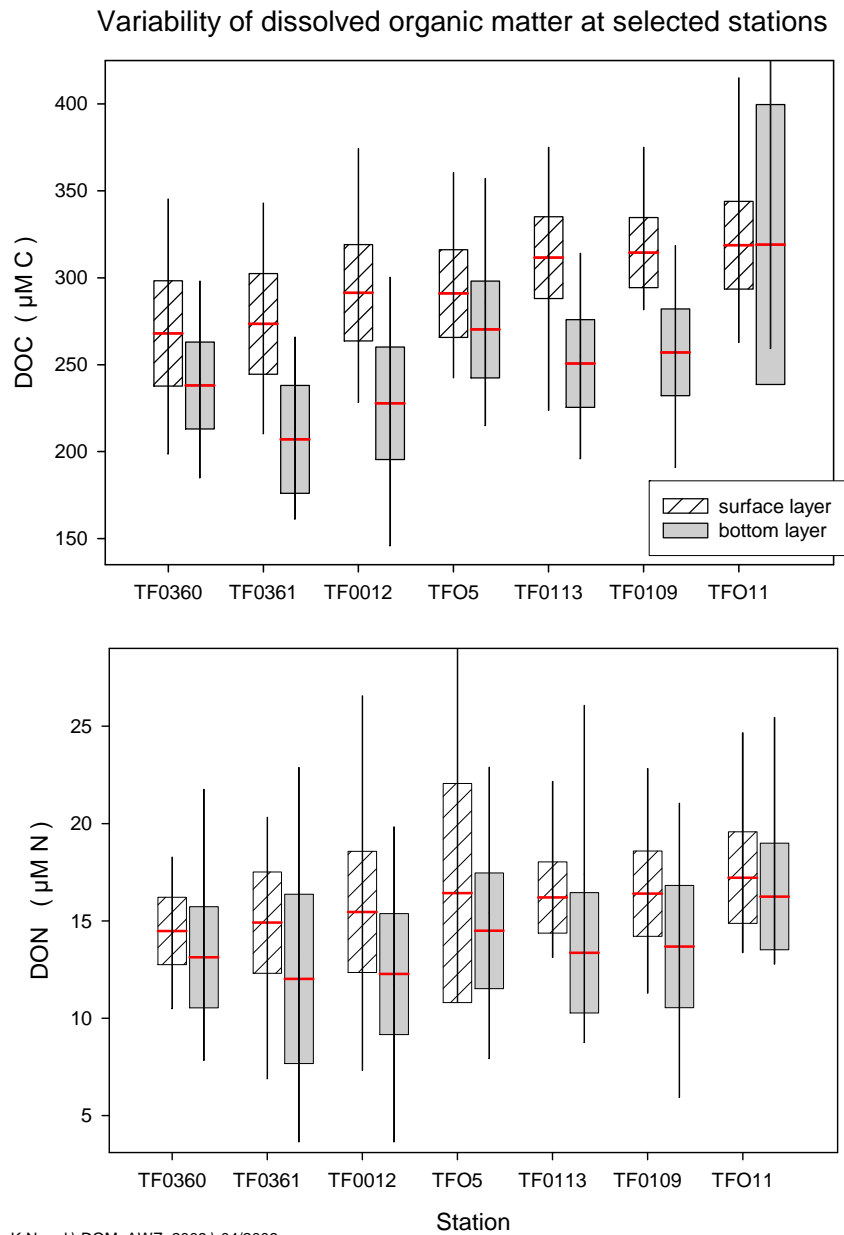


Abb. 22

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

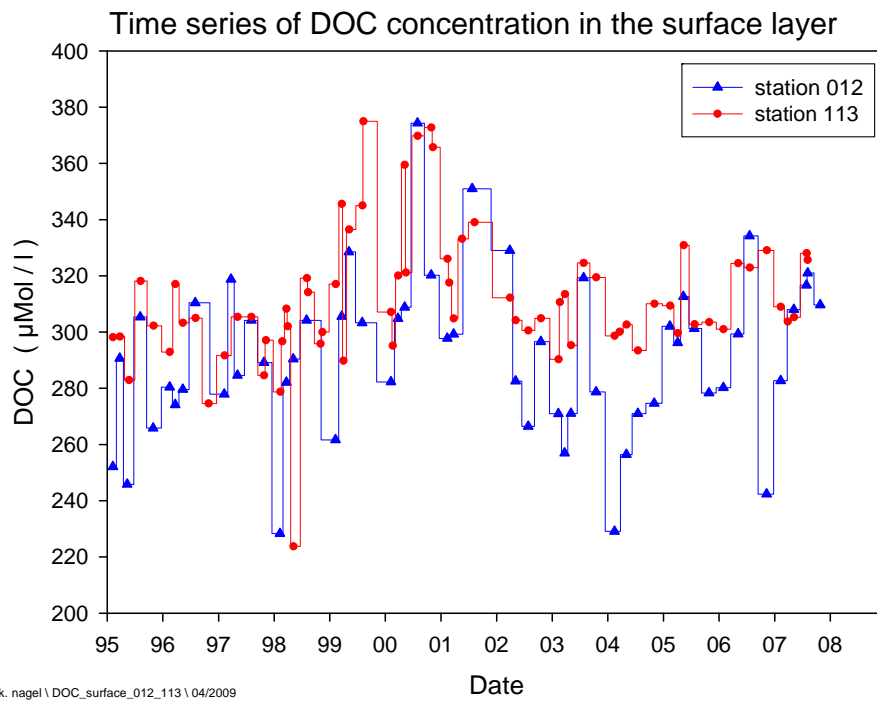


Abb. 23

Zeitreihe der DOC - Konzentrationen in der Oberflächenschicht an den Stationen 012 (Mecklenburger Bucht) und Station 113 (Arkonasee)

## Zusammenfassung

Der Bericht beschreibt die hydrographisch-chemischen Bedingungen in der westlichen Ostsee von der Kieler Bucht bis zum Arkonabecken für das Jahr 2008. Basierend auf den meteorologischen Verhältnissen werden die horizontalen und vertikalen Verteilungsmuster von Temperatur, Salzgehalt, Sauerstoff und Nährstoffen mit saisonaler Auflösung dargestellt.

Der Winter 2007/2008 war mild und kurz und lag mit der Kältesumme 20,0 K d von Warnemünde auf Platz 8 der mildesten seit Beginn der Vergleichsdaten im Jahr 1948. Die Eisbildung im deutschen Hoheitsgebiet beschränkte sich auf Küstengewässer und Häfen, die offene See blieb im Winter 2007/8 eisfrei. Nur acht Winter seit 1896/97 waren in Deutschland noch schwächer als der Eiswinter 2007/8. Die Jahreswärmesumme 2008 von 196 K d lag deutlich höher als der Mittelwert von 146 K d der Beobachtungsreihe seit 1948, aber weit unter dem Rekordwert 355 K d des Jahrs 2006.

Das Jahr 2008 war in der Wasseroberflächentemperatur, wie schon 2007, durch ein sehr warmes erstes Halbjahr und einen milden Spätherbst gekennzeichnet. Das trug dazu bei, dass die Jahresmitteltemperatur der gesamten Ostsee mit 8,5°C die höchste seit 1990 war. Außer in den Monaten August und September lagen die Monatsmittelwerte in weiten Teilen der Ostsee über dem langjährigen Mittelwert. Insbesondere die Monate Januar bis Mai gehörten zu den wärmsten im Untersuchungszeitraum 1990-2008. Die höchsten Temperaturen des Jahres traten am 31. Juli auf; ab 1. August erfolgte eine Abkühlung.

Barotrope Einstromereignisse mit geschätzten Volumen um je 200 km<sup>3</sup> fanden in der Ostsee 2008 fünf Mal statt, im Januar, im Februar/März, im Juni, im September/Oktober und November. Die kleinen barotropen Einstromprozesse erfolgten hauptsächlich durch den Öresund in das Arkonabecken, blieben jedoch wegen ihres geringen Volumens und ihrer bevorzugten Ausbreitung entlang des Beckenrands der Registrierung durch die MARNET-Station „Arkonaboje“ weitgehend verborgen. Diese barotropen sowie vier barokline Einströme im Januar, Mai, August und September erreichten nur zum Teil in einzelnen Schüben und mit unterschiedlichen Eigenschaften die zentrale Ostsee.

Die Sauerstoffsättigung des Oberflächenwassers zeigte 2008 den typischen Jahresgang. Im Februar verursachte die nur sehr geringe Produktion und die Dominanz von Zehrungsprozessen eine leichte Untersättigung. Die Frühjahrsblüte führte zu einer Zunahme des Sauerstoffgehaltes. Die Sättigungswerte lagen bis zum Ende des Sommers bei 100% oder leicht darüber. Im Herbst kam es zu einem vermehrten Abbau der organischen Substanz und in beiden Untersuchungsgebieten lag die Sättigung bei 95 %. Auch in Bodennähe war im Untersuchungsgebiet ein ausgeprägter Jahresgang zu beobachten. Im Winter findet häufig eine tief greifende vertikale Durchmischung statt, eine stabile Schichtung kann sich in der Regel nicht aufbauen. So liegt die Sättigung, besonders in der westlichen Ostsee, nur relativ wenig unter der des Oberflächenwassers. Die niedrigsten Sättigungswerte werden in der Regel im September ermittelt. Das Landesamt für Natur und Umwelt Schleswig-Holstein (LANU) führt deshalb seit 2001 flächenhafte Aufnahmen der Sauerstoffsituation im Spätherbst in der westlichen Ostsee durch. Im Tiefenwasser wiesen 2008 62 % aller Messwerte einen Sauerstoffgehalt  $< 2 \text{ mg/l} = 1.40 \text{ ml/l}$  auf. Im Jahr 2007 war dieser Anteil mit 43 % deutlich geringer. Der



Sauerstoffmangel erweist sich aber insgesamt als nicht so weit verbreitet wie im Extremjahr 2002.

Die Nährstoffe Phosphat und Nitrat wiesen in der Oberflächenschicht den typischen Jahresgang auf. Allerdings war das für die zentrale Ostsee charakteristische Winterplateau, das für Trendaussagen genutzt werden kann, in der westlichen Ostsee und im Arkonabecken kaum sichtbar, da die Frühjahrsblüte des Planktons bereits sehr zeitig einsetzt. Schon Ende März war das Nitratreservoir vollständig erschöpft, während noch ausreichend Phosphat vorhanden war. Nachdem Nitrat völlig aufgebraucht war, brach die Frühjahrsblüte auf Grund der Stickstofflimitation zusammen. Die Phosphatkonzentrationen gingen dagegen erst allmählich zurück und erreichten im Sommer die Nachweisgrenze. Im Herbst kam es infolge der verstärkten Mineralisation der organischen Substanz zu einem langsamen Anstieg der Nährstoffkonzentrationen bis dann im Februar 2009 wieder die Winterkonzentrationen erreicht wurden.

## Summary

The report summarizes the hydrographic-hydrochemical conditions in the western Baltic Sea and the Arkona Basin in 2008. Based on the meteorological situation, the horizontal and vertical distribution of temperature, salinity, oxygen and nutrients is described on a seasonal scale.

The winter 2007/2008 was mild and short. With the “cold sum” of the air temperature in Warnemünde of 20.0 K d ranged on place 8 of the mildest winters since the beginning of the record in 1948. The 60-years mean is 103 K d. Ice formation in Germany’s territorial waters occurred only in coastal areas and harbours, the open sea remained free of ice. Only eight winters since 1896/97 were weaker than the ice winter 2007/8. The summer “heat sum” 2008 in Warnemünde of 196 K d was higher than the 60-years mean (146 K d), but well below the record value of 355 K d in 2006.

Sea surface temperature in 2008 was, as already in 2007, characterized by a warm first half of the year and a mild late autumn contributing to the highest mean annual surface temperature of the entire Baltic Sea of 8.5°C since 1990. Except August and September, monthly averages were lying over the long-term mean. Especially the months January – May were amongst the warmest of the observation period 1990-2008. The highest temperatures of the year were measured on July 31<sup>st</sup>, from August 1<sup>st</sup> onwards cooling took place.

Five times in 2008 barotropic inflow events were estimated to carry each about 200 km<sup>3</sup>: in January, February/March, in June, September/October and November. The small barotropic inflows took place mainly through the Sound into the Arkona Basin, but could not be registered by the MARNET station „Arkonaboje“ due to their small volume and the favoured spreading along the border of the basin. Identification was possible through changes in the Landsort gauge as well as T-S-O<sub>2</sub> data from representative stations east of Bornholm. These barotropic as well as four baroclinic inflows in January, May, August and September reached the central Baltic Sea only partly in single pulses and with different features.

The oxygen saturation in the surface layer showed in 2008 the typical seasonal cycle. In February, a slight undersaturation was observed due to the low production and the dominance of oxygen consuming processes. The spring bloom resulted in increasing oxygen concentrations. Until the end of the summer, oxygen saturation was around 100 % or slightly higher. In autumn, increased degradation of organic matter in both investigated areas caused saturation values of around 95 %.

Also in the near-bottom layer a pronounced seasonal cycle could be observed. During winter time frequent deep convection normally prevents a stable stratification. Consequently, oxygen saturation is only somewhat lower than in the surface layer. Lowest oxygen values are normally detected in September. Therefore since 2001 the "Landesamt für Natur und Umwelt Schleswig-Holstein (LANU)" performs spatial observations of the oxygen situation in the western Baltic Sea in autumn. In 2008, in the near bottom layer 62 % of all measured values had an oxygen content  $< 2 \text{ mg/l} = 1.40 \text{ ml/l}$ . In 2007 this share was 43 %, i.e. clearly lower. However, oxygen deficiency was not so far spread as in the extreme year of 2002.

The nutrients phosphate and nitrate showed the typical annual cycle in the surface layer. But, the stable winter plateau which is characteristic for the central Baltic Sea and preferably used for trend analysis, is not always obvious in the western Baltic Sea and the Arkona Basin because spring bloom of the phytoplankton starts quite early here. Already at the end of March the nitrate pool was completely exhausted whereas sufficient phosphate was remaining. After nitrate was consumed, the spring bloom ended due to nitrogen limitation. Phosphate concentrations decreased only slowly and reached the detection limit in summer. In autumn, the intensified mineralization of organic matter resulted in an increase of nutrient concentrations reaching winter concentration in February 2009 again.

## **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 „Professor Albrecht Penck“ und „Alkor“ für die Unterstützung und den Einsatz bei den Messfahrten des Jahres 2007. Für die Unterstützung bei der Beschreibung des Eiswinters, insbesondere durch Übermittlung einer Bedeckungskarte, sind wir Frau Natalija Schmelzer vom Eisdienst des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Hamburg und Rostock, dankbar. Wir danken Frau Kristin Junge vom Deutschen Wetterdienst (DWD), Offenbach, für die Bereitstellung der Winddaten von Arkona und Frau Gisela Tschersich vom BSH für die Bereitstellung der NOAA- Wettersatellitendaten. Wir danken Barbara Bogdanska, IMGW Warschau, für die freundliche Überlassung von Daten der Sonneneinstrahlung in Gdynia.

## Literaturverzeichnis

- ARNEBORG, L., FIEKAS, V., UMLAUF, L., and BURCHARD, H. (2007): Gravity current dynamics and entrainment. A process study based on observations in the Arkona Basin, *J. Phys. Oceanogr.*, **37**, 2094-2113.
- BEZOLD, W.v. (1883): Die Kälterückfälle im Mai. – *Abhandlungen der königlich Bayerischen Akademie der Wissenschaften*. Bd. **14**, Nr. 6, 71-108.
- V.BODUNGEN, B., GRAEVE, M., KUBE, J., LASS, H.U., MEYER-HARMS, B., MUMM, N., NAGEL, K., POLLEHNE, F., POWILLEIT, M., RECKERMANN, M., SATTLER, C., SIEGEL, H. and WODARG, D. (1995): Stoff-Flüsse am Grenzfluss – Transport- und Umsatzprozesse im Übergangsbereich zwischen Oderästuar und Pommerscher Bucht (TRUMP). – *Geowiss.* **13**, 479-485.
- BOOS (2008): Waterlevel. <http://www.boos.org/index.php?id=29>
- BSH (2009): Flächenbezogene Eisvolumensumme. <http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Beobachtungen/Eis/1977.isp>
- BURCHARD, H., JANSSEN, F., BOLDING, K., UMLAUF, L., and H. RENNAU, H. (2009): Model simulations of dense bottom currents in the Western Baltic Sea, *Cont. Shelf Res.*, **29**, 205-220.
- DAI, A. (2006): Recent Climatology, Variability, and Trends in Global Surface Humidity – *J. Climate*, **19**, 3589-3605.
- DWD (2008a): Witterungsreport: express. 9, Nr. 1 - 13. Offenbach: Deutscher Wetterdienst.
- DWD (2009): Klimadaten Deutschland, Daten im Standardformat, [www.dwd.de](http://www.dwd.de)
- EUTROSYM (1976): UNEP-Symposium über Eutrophierung und Sanierung von Oberflächengewässern. – *Larl-Marx-Stadt*, 20. – 25.09.1976, Bd. 1, Teil 2.2.
- FEISTEL R., NAUSCH, G., HEENE, T., PIECHURE, J. und HAGEN, E. (2004a): Evidence for a warm water inflow into the Baltic Proper in summer 2003. – *Oceanologia* **46**, 581-598. [http://www.iopan.gda.pl/oceanologia/46\\_4.html](http://www.iopan.gda.pl/oceanologia/46_4.html)
- FEISTEL, R. (2008): IOW Cruise Report 07PE/08/06, 27 March – 4 April, 2008. [http://www.io-warnemuende.de/tl\\_files/forschung/pdf/cruise-reports/cro7pe0806.pdf](http://www.io-warnemuende.de/tl_files/forschung/pdf/cruise-reports/cro7pe0806.pdf)
- FEISTEL, R., FEISTEL, S., NAUSCH, G., SZARON, J., LYSIAK-PASTUSZAK, E., ÆRTEBJERG, G. (2008a): BALTIC: Monthly time series 1900 – 2005. In: FEISTEL, R., NAUSCH, G. and WASMUND, N. (Eds.), *State and Evolution of the Baltic Sea 1952-2005*. Wiley 2008, 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., 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.
- FIMR (2008): Ice winter 2007-2008. Ice winter 2007-2008 was short and very mild. [http://www.fimr.fi/en/tietoa/jaa/jaatalvi/en\\_GB/2008/](http://www.fimr.fi/en/tietoa/jaa/jaatalvi/en_GB/2008/)

- FU-BERLIN (2008): Werden auch Sie Wetterpate! <http://www.met.fu-berlin.de/wetterpate/>
- GIWA (2003): Newsletter 2, 2003. – [http://www.giwa.net/newsletter\(giwa\\_2-2003.pdf](http://www.giwa.net/newsletter(giwa_2-2003.pdf)
- 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/CombineManualz/CombineHome.htm](http://www.helcom.fi/Monas/CombineManualz/CombineHome.htm)
- HELCOM (2003): The 2002 oxygen depletion event in the Kattegat, Belt Sea and western Baltic. - Balt. Sea Environ. Proc. **90**, 1-59.
- HELCOM (2009): Eutrophication in the Baltic Sea – An integrated assessment of the effects of nutrient enrichment in the Baltic Sea region. - Balt. Sea Environ. Proc. **115B**, , 1-148.
- IMGW (2009): Global Solar Radiation at GDYNIA station in 2008. – Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa, unveröffentlichte Daten.
- KOSLOWSKI, G. (1989): Die flächenbezogene Eisvolumensumme, eine neue Maßzahl für die Bewertung des Eiswinters an der Ostseeküste Schleswig-Holsteins und ihr Zusammenhang mit dem Charakter des meteorologischen Winters. – Dt. hydrogr. Z. **42**, 61-80.  
<http://www.baltic.vtt.fi/pdfs/dhz422koslowski.pdf>
- KRÜGER, S., ROEDER, W., WLOST, K.-P., KOCH, M., KÄMMERER, H. and KNUTZ, T., (1998): Autonomous instrumentation carrier (APIC) with acoustic transmission for shallow water profiling. – Oceanology International 98: The Global Ocean Conf. Proc. **2**, 149-158.
- KRÜGER, S. (2000a): Basic shipboard instrumentation and fixed autonomic stations for monitoring in the Baltic Sea. – In: EL-HAWARY, F. (Ed.): The Ocean Engineering Handbook, CRC Press, Boca Raton, USA, 52-61.
- KRÜGER, S. (2000b): Activities of the Institut für Ostseeforschung (IOW), Germany. – Proc. Int. Workshop on the “Coordinated Adriatic Observing System” CAOS, 21-22 October 1998, Trieste, Italy, 53-60.
- LANU (2008): Sauerstoffmangel im bodennahen Wasser der westlichen Ostsee im September 2008. - [http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Beobachtungen/MURSYS-Umweltreportsystem/Mursys\\_031/seiten/oso27\\_01.jsp](http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Beobachtungen/MURSYS-Umweltreportsystem/Mursys_031/seiten/oso27_01.jsp)
- LASS, H.U., MOHRHOLZ, V. and SEIFERT, T. (2001): On the dynamics of the Pomeranian Bight. – Cont. Shelf. Res. **21**, 1237-1261.
- LASS, H.U. and MATTHÄUS, W. (2008): General Oceanography of the Baltic Sea, in: Feistel, R., Nausch, G., and Wasmund, N. (Eds.), State and Evolution of the Baltic Sea 1952 – 2005. – John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, p. 5-43.
- MATTHÄUS, W. (1978): Zur mittleren jahreszeitlichen Veränderlichkeit im Sauerstoffgehalt der offenen Ostsee. – Beitr. Meereskd., Berlin, **41**, 61-94.
- METEOMEDIA (2008): Luftdruck Stationsdaten Deutschland. <http://nachrichten.t-online.de/c/12/34/77/20/12347720.html>

- MOHRHOLZ, V. (1998): Transport- und Vermischungsprozesse in der Pommerschen Bucht. – Meereswiss. Ber. **33**, 1-106.
- NAUSCH, G. and NEHRING, D. (1996): Baltic proper, Hydrochemistry. In: Third Periodic Assessment of the State of the Marine Environment of the Baltic Sea. – Balt. Sea Environ. Proc. **64B**, 80-85.
- NAUSCH, G., FEISTEL, R., LASS, H.-U., NAGEL, K. and SIEGEL, H. (2002): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2001. – Meereswiss. Ber. **49**, 1-77.
- NAUSCH, G., FEISTEL, R., LASS, H.-U., NAGEL, K. and SIEGEL, H. (2003): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2002. – Meereswiss. Ber. **55**, 1-71.
- NAUSCH, G., FEISTEL, R., LASS, H.-U., NAGEL, K. and SIEGEL, H. (2004): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2003. – Meereswiss. Ber. **59**, 1-80.
- NAUSCH, G., FEISTEL, R., UMLAUF, L., NAGEL, K. and SIEGEL, H. (2008): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2007. – Meereswiss. Ber. **72**, 1-93.
- NEHRING, D. and MATTHÄUS, W. (1991): Current trends in hydrographic and chemical parameters and eutrophication in the Baltic Sea. – Int. Revues ges. Hydrobiol. **76**, 297-316.
- NEHRING, D., MATTHÄUS, W., and LASS, H.U. (1993): Die hydrographisch-chemischen Bedingungen in der westlichen und zentralen Ostsee im Jahre 1992. – Dt. Hydrogr. Z. **45**, 281-331.
- NEHRING, D., MATTHÄUS, W., LASS, H.U., NAUSCH, G. and NAGEL, K. (1995): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1994. – Meereswiss. Ber. **9**, 1-71.
- OZ (2008a): War das der Winter? – Ostseezeitung 27.3.2008
- OZ (2008b): MV hat die fünf sonnigsten Orte. – Ostseezeitung 3.6.2008
- REDFIELD, A.C., KETCHUM, B.H. and RICHARDS, F.A: (1963): The influence of organisms on the composition of sea water. – In: Hill, M.N. (Ed.): The Sea, Vol. II, Wiley, New York, 26-77.
- ROEDER, W. (2008): IOW Cruise Report 07PE/08/13, 09 June -16 June 2008.
- SCHMELZER, N. (2008): Der Eiswinter 2007/08 an den deutschen Nord- und Ostseeküsten. – Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg•Rostock.  
<http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Beobachtungen/Eis/Eiswinter0708.pdf>
- SCHMELZER, N., SEINÄ, A., LUNDQUIST, J.-E. und 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., TIESEL, R. and TSCHERSICH, G. (1999): Seasonal and interannual variations in satellite derived sea surface temperature of the Baltic Sea in the 1990s. – Dt. Hydrogr. Z. **51**, 407-422.
- SIEGEL, H., GERTH, M. and TSCHERSICH, G. (2006): Sea Surface Temperature development of the Baltic Sea in the period 1990-2004 – Oceanologia **48** (S), 119-131.
- SMHI (2009): unveröffentlichte Daten.

- TRUMP (1998): Transport- und Umsatzprozesse in der Pommerschen Bucht (TRUMP) 1994-1996. – Abschlussbericht, IOW Warnemünde, 1-32 (unveröffentlicht).
- TOPÇU, D. H. and BROCKMANN, U. (2001): Synthesis and new conception of North Sea research (SYCON), Working Group 5 : Fluxes of matter, Berichte aus dem Zentrum für Meeres- und Klimaforschung der Universität Hamburg
- 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. (2009). Dynamics of rotating shallow gravity currents passing through a channel. Part I: Observation of transverse structure, *J. Phys. Oceanogr.*, in press.
- UMLAUF, L. and ARNEBORG, L. (2009). Dynamics of rotating shallow gravity currents passing through a channel. Part II: Analysis, *J. Phys. Oceanogr.*, in press.
- VAN BEBBER, W. J. (1891): Die Zugstrassen der barometrischen Minima. – *Meteorologische Zeitschrift* **8**, 361–366.
- WIKIPEDIA (2008): Vb-Wetterlage. <http://de.wikipedia.org/wiki/Vb-Wetterlage>