



Wasseraustausch zwischen Nord- und Ostsee sowie Bedingungen in den Tiefenbecken der Ostsee

Water exchange between the Baltic Sea and the North Sea, and conditions in the deep basins

RAINER FEISTEL, GÜNTHER NAUSCH UND EBERHARD HAGEN

Key Words: water exchange, anoxic basins, North Sea, Baltic Sea

Zusammenfassung

Die Einstromaktivität aus der Nordsee in die Ostsee war in den letzten Jahren durch eine Folge ungewöhnlicher Ereignisse geprägt: einem warmen Sommerein-
strom 2002 folgten ein kalter Salzwassereinbruch im Januar 2003 sowie ein erneuter warmer Einstrom 2003, die zusammen die Stagnationsperiode in den Tiefenbecken der Ostsee beendeten, die seit 1995 herrschte. Die darauf folgenden Jahre waren durch geringe Einstromaktivitäten gekennzeichnet. Mit Ausnahme der südlichen Ostsee verstärkte sich dadurch die seit 2004/2005 anhaltende Stagnationsperiode. Ein barokliner Einstrom im Sommer 2006, gefolgt von einem barotropen Einstrom im Jahr 2007 führten erneut zu sehr hohen Temperaturen im Tiefenwasser der zentralen Ostsee.

Summary

Inflow activities from the Kattegat into the Baltic Sea in the past few years have been characterised by a sequence of unusual events: a warm summer inflow in 2002 was followed by a cold inflow of highly saline water in January 2003 and by another warm summer inflow in 2003. This combination of events ended the stagnation period in Baltic deep water, which had continued since 1995. In the period following these inflow events, inflow generally was low. With the exception of the southern Baltic Sea, the stagnation period lasting since 2004/2005 is strengthening further. A baroclinic inflow in the summer of 2006, followed by a barotropic inflow in 2007, again led to very high temperatures in the deep water of the Baltic Proper.

Hintergrund

Einstromereignisse aus der Nordsee in die Ostsee sind die einzigen Prozesse, die zu einer nachhaltigen Belüftung der tiefen Becken der Ostsee führen können. Die Beobachtung der Intensität, der Häufigkeit und der Effektivität dieser Belüftungsprozesse ist von fundamentaler Bedeutung für das Verständnis der physikalischen und geochemischen Prozesse sowie des Lebens in der Ostsee.

Darstellung der Ergebnisse

Die Erneuerungsprozesse des Tiefenwassers können in zwei Typen untergliedert werden:

- die "klassischen" barotropen Salzwassereintrübe und die
- "neuen" baroklinen Einströme.

Salzwassereintrübe treten normalerweise im Winter und Frühjahr auf und führen zu niedrigen Temperaturen sowie einer Zunahme des Salzgehalts und des Sauerstoffs in den tiefen Becken. Die baroklinen Einströme werden im Sommer und Herbst beobachtet und verursachen eine Zunahme des Salzgehaltes und der Temperatur, transportieren aber nur wenig Sauerstoff.

Vor 1980 traten Salzwassereintrübe relativ häufig auf und wurden im Mittel alle 1 bis 2 Jahre beobachtet. In den letzten Dekaden sind sie jedoch sehr selten geworden. Die letzten drei Salzwassereintrübe fanden 1993, 1997 und 2003 statt, ein kleinerer Einstrom wurde 2001 registriert.

Die sehr unterschiedliche thermische Signatur der beiden Einstromtypen erlaubt deutliche Einblicke in die Dynamik der Einstromvorgänge von der westlichen bis in die zentrale Ostsee (Abb. 1).

Im östlichen Gotlandbecken, dem größten der Ostseebecken, führten die barotropen Einströme vom Herbst 1997 und Oktober 2001 zu einem Temperaturanstieg auf über 6,5 °C in 200 m Wassertiefe, verbesserten aber die Sauerstoffverhältnisse nicht signifikant. Der barokline Einstrom vom Sommer/Herbst 2002 transportierte zusätzlich warmes Wasser in dieses Becken. Unmittelbar danach wurde es durch sehr kaltes, dichtes Wasser des starken Einstroms vom Januar 2003 sowie kleinerer Einstromereignisse vom Frühjahr 2003 ersetzt. Die Temperatur fiel auf etwa 4,5 °C. Danach stieg die Temperatur der bodennahen Wasserschicht wieder über das langjährige Mittel. Dies ist vor allem das Ergebnis des warmen baroklinen Einstroms 2003. Barokline Einströme 2006 führten zu einem weiteren Temperaturanstieg in 2007 (NAUSCH et al. [2007], Abb. 1). Der barokline Einstrom vom August/September 2006 transportierte sehr warmes Wasser ins Bornholmtief, das dort ab November 2006 anzutreffen war. Offensichtlich wurde es im Januar 2007 über die Stolper Schwelle gehoben und erreichte im April 2007 das Gotlandbecken. In der bodennahen Schicht wurde ein extrem hoher Wert vom 7,1 °C gemessen. Trotz des drastischen Temperatursignals (Abb. 1) konnten keine signifikanten Änderungen im Salzgehalt festgestellt werden. Dieses Ereignis setzte die „Warmperiode“ im Tiefenwasser der zentralen Ostsee fort, die seit 1997 anhält (Tab. 1).

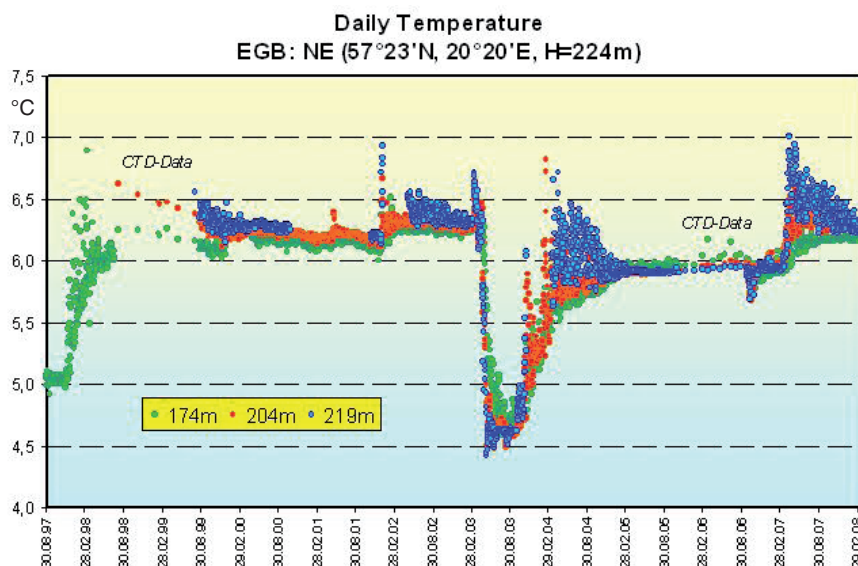


Abb. 1: Temperaturserie 1997-2008 einer Verankerung im östlichen Gotlandbecken für die Tiefen 174 m, 204 m und 219 m. Die Wassertiefe beträgt 224 m. Die Signale der kalten und warmen Einstromereignisse zeigen sich als plötzliche Sprünge und nachfolgenden, sich im Laufe eines Jahres abschwächenden Fluktuationen

Fig. 1: 1997-2008 temperature series at a mooring in the eastern Gotland Basin, at 174 m, 204 m, and 219 m depth. The water depth is 224 m. The signals of the cold and warm inflow events are indicated by sudden jumps followed by fluctuations which become weaker in the course of the year

Tief	Juli 2003	Juli 2004	Juli 2005	Juli 2006	Juli 2007	Juli/August 2008	Mean 1971-90
Bornholmtief	3,71 °C	5,12 °C	6,97 °C	7,96 °C	8,80 °C	7,22 °C	6,12 °C
Gotlandtief	4,63 °C	6,51 °C	5,97 °C	5,95 °C	6,82 °C	6,40 °C	5,62 °C
Farötief	6,00 °C	5,87 °C	6,03 °C	6,19 °C	6,06 °C	6,16 °C	5,20 °C
Landsorttief	5,88 °C	5,69 °C	5,82 °C	5,78 °C	5,73 °C	5,81 °C	4,76 °C
Karlsötief	4,90 °C	5,29 °C	5,34 °C	5,23 °C	5,14 °C	5,32 °C	4,18 °C

Tab.1: Temperaturentwicklung in der bodennahen Wasserschicht
Table 1: Temperature development in the near-bottom layer

Der Salzwassereinbruch vom Januar 2003 war das letzte starke Einstromereignis in die Ostsee. Zusätzlich beeinflusste der warme Einstrom vom Sommer 2003 das Tiefenwasser. Die Entwicklung des Salzgehaltes im Gotlandbecken spiegelt diese Einstromprozesse wider (Abb. 2). Einer starken Zunahme des Salzgehaltes nach Einstromereignissen folgt eine langsame Abnahme in der darauf folgenden Stagnationsperiode. Insbesondere der Einstrom vom August 2003 erhöhte den Salzgehalt auf

ein Niveau, das typisch für die 1960er und 1970er Jahre war. Der Oberflächensalzgehalt folgt den Veränderungen im Tiefenwasser mit einer Verzögerung von einem Jahrzehnt und in stark gedämpfter Form. Die seit 2004 anhaltende Stagnationsperiode führt zu einer langsamen Abnahme des Salzgehaltes in allen Tiefenbecken der zentralen Ostsee (Tab. 2). Die barotropen Einstromereignisse des Jahres 2007 beeinflussten das Tiefenwasser um Gotland kaum, wenn überhaupt.

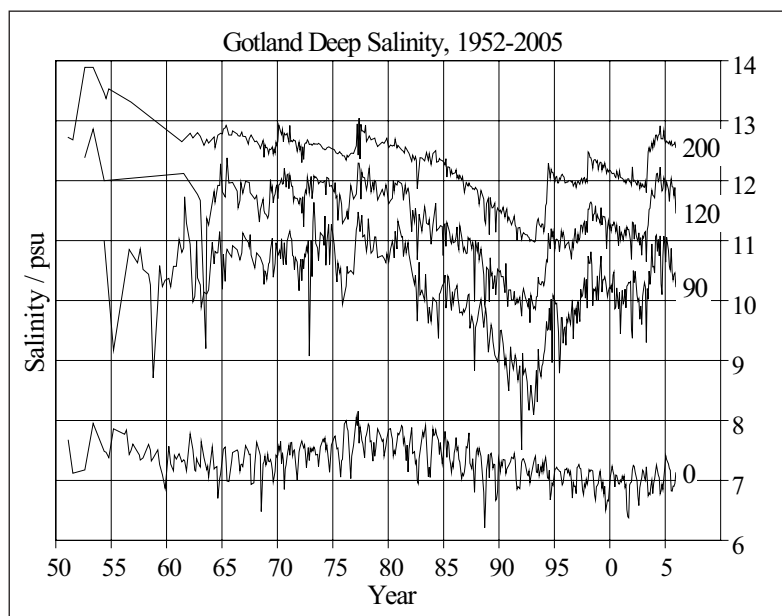
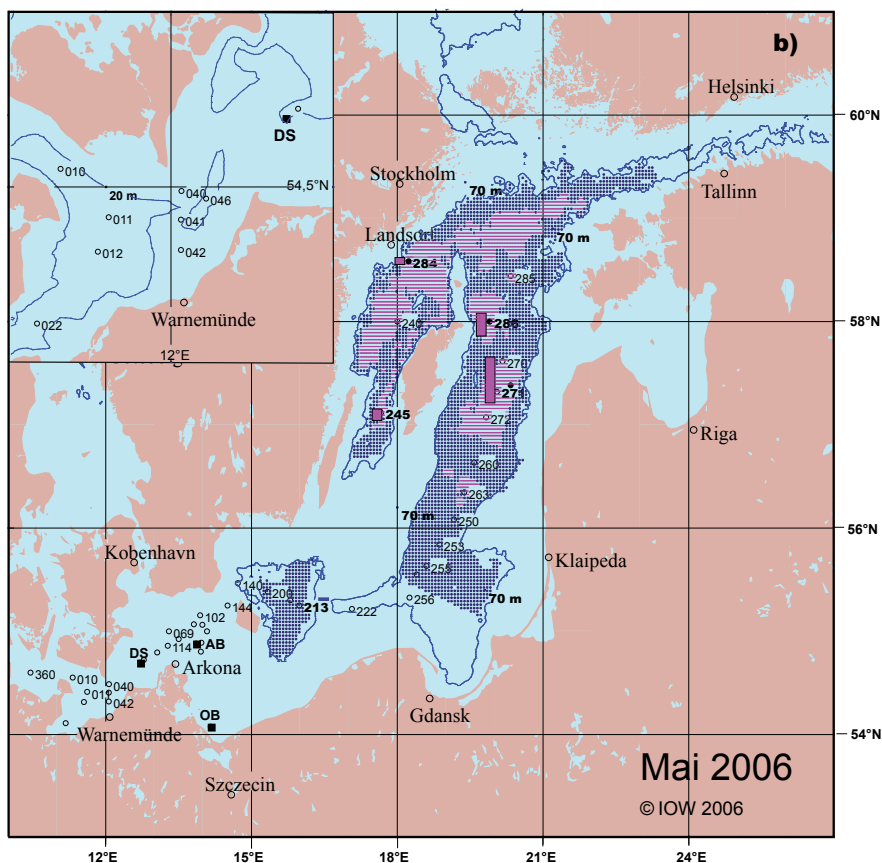
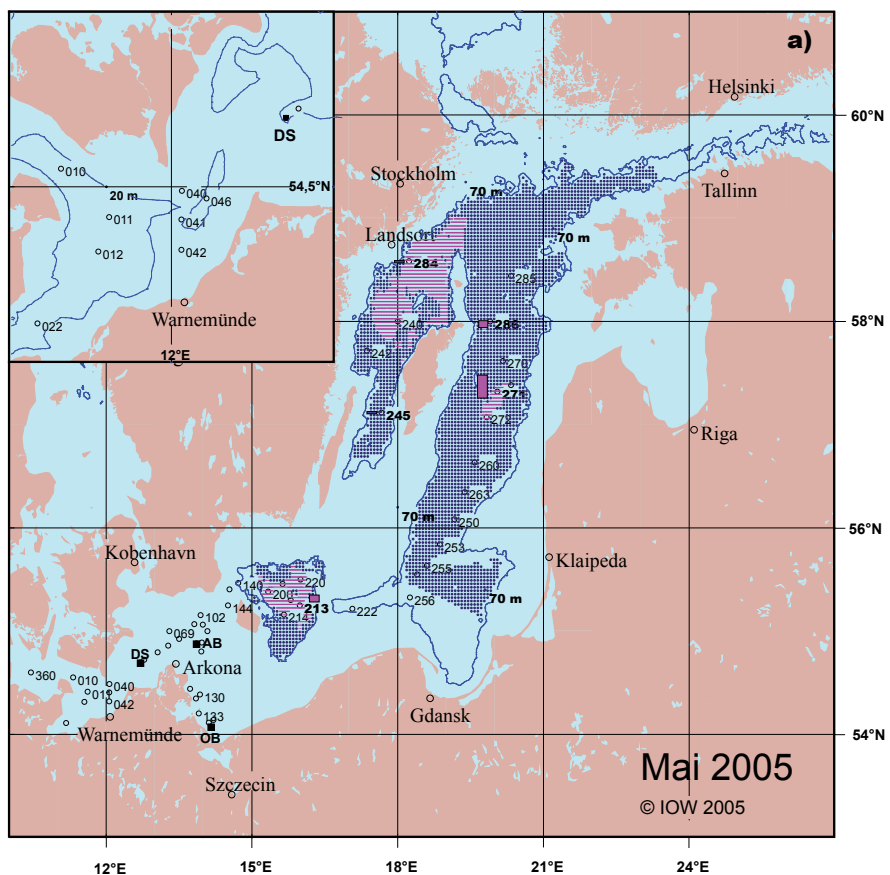


Abb. 2: Salzgehaltsentwicklung im östlichen Gotlandbecken für die Oberfläche sowie für 90 m, 120 m und 200 m Wassertiefe für die Zeitreihe 1952-2007. Die monatlich gemittelten Zeitserien entstammen dem [BALTIC-Atlas](#) (FEISTEL et al. [2008])

Fig. 2: Salinity in the Gotland Deep at the surface, at 90 m, 120 m and 200 m depth from 1952 to 2007. Monthly mean time series available from the [BALTIC-Atlas](#) (FEISTEL et al. [2008])

Tief	Juli 2005	Juli 2006	Juli 2007	Juli/August 2008
Gotlandtief	12,73 psu	12,62 psu	12,89 psu	12,66 psu
Farötief	12,22 psu	12,11 psu	12,15 psu	12,13 psu
Landsorttief	11,14 psu	11,06 psu	11,23 psu	11,07 psu
Karlsötief	10,35 psu	10,25 psu	10,41 psu	10,27 psu

Tab. 2: Salzgehaltsentwicklung in der bodennahen Wasserschicht
Table 2: Salinity development in the near-bottom layer



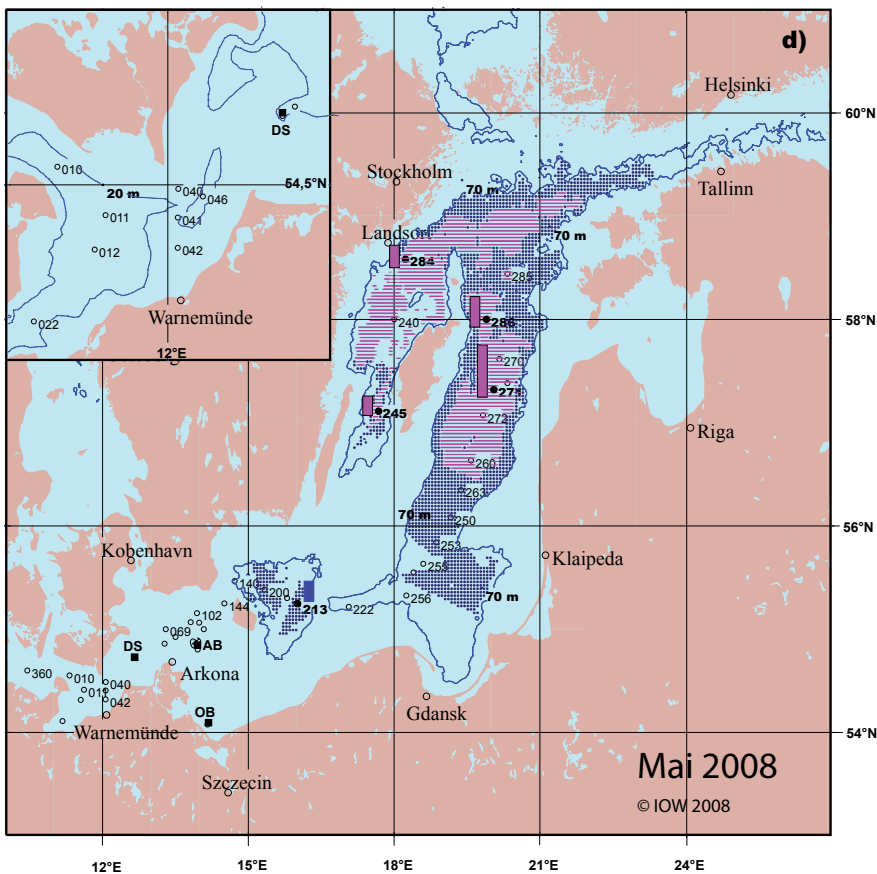
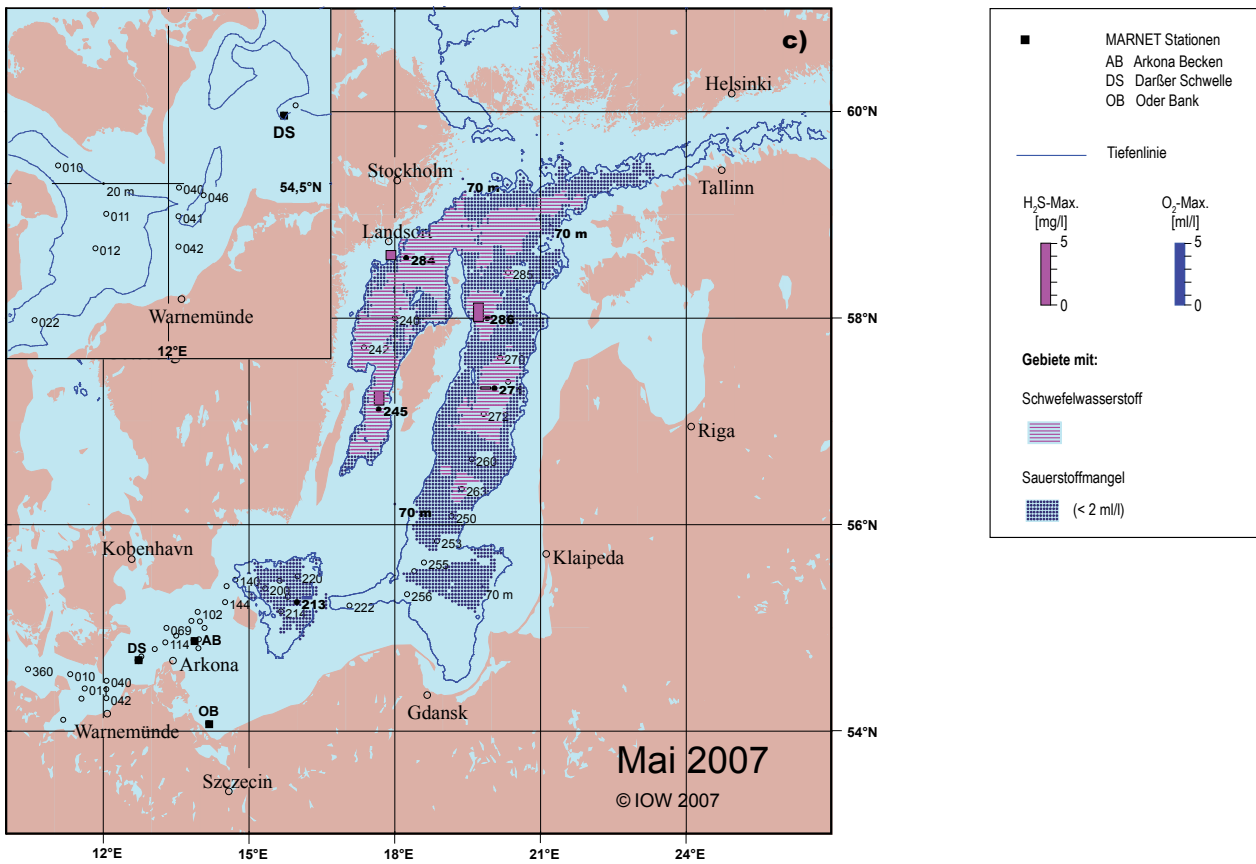


Abb. 3 a - d:

Gebiete mit Sauerstoffmangel und Schwefelwasserstoff in der grundnahen Wasserschicht der Ostsee für den Mai der Jahresreihe 2005-2008. Die Säulen zeigen die maximalen Sauerstoff- bzw. Schwefelwasserstoffkonzentrationen an ausgewählten Stationen. Die Abbildung enthält zusätzlich die 70-m-Tiefenlinie. In der oberen, linken Ecke ist die westliche Ostsee mit der 20-m-Tiefenlinie gezeigt

Fig. 3 a - d:

Areas with oxygen deficiency and hydrogen sulphide in the near-bottom layer of the Baltic Sea in May in the years 2005 – 2008. Histograms show the maximum oxygen and hydrogen sulphide concentrations in this layer. The figure additionally contains the 70 m isobath. The top-left corner shows the western Baltic Sea with the 20 m isobath

Die bodennahe Verteilung des Sauerstoffs bzw. des Schwefelwasserstoffs spiegelt die oben beschriebenen Prozesse wider und ist für die Jahre 2005 bis 2008 in Abb. 3 dargestellt. Im Frühjahr 2003 hatte der starke Salzwassereinbruch vom Januar das Bornholmbecken, das Danziger Becken und das östliche Gotlandbecken mit erheblichen Mengen Sauerstoff belüftet. Im Gotlandbecken wurde in der bodennahen Wasserschicht ein Sauerstoffgehalt von 3,96 ml/l gemessen. Danach setzte Sauerstoffzehrung im Tiefenwasser ein und es kam beginnend in 2005 zu einer erneuten Bildung von Schwefelwasserstoff. Der Schwefelwasserstoffgehalt, ausgedrückt als negativer Sauerstoff, nahm kontinuierlich zu (Tab. 3). Auch die vertikale Ausdehnung der schwefelwasserstoffhaltigen Schicht

nahm zu. Im Sommer 2008 wurde Schwefelwasserstoff im Gotland- und Farötief zwischen 125 m und dem Boden gefunden. Im Landsorttief war die Wasserschicht ab 100 m frei von Sauerstoff.

Dagegen belüfteten die baroklinen Einströme im Jahr 2006 und der kleine barotrope Einstrom 2007 das Tiefenwasser des Bornholmbeckens.

Überraschend war die komplette Belüftung des Karlsötiefs, offensichtlich verursacht durch eine bis zum Boden reichende winterliche Durchmischung. So wurden im April 2008 am Boden geringe Mengen von Sauerstoff (0,5 ml/l) und Nitrat (1 µmol/l) gemessen. Aber schon im Juli herrschten wieder anoxische Verhältnisse (Tab. 3).

Tief	Mai 2006	Juli 2006	Juli 2007	Juli/Aug. 2008
Gotlandtief	- 3,61 ml/l	- 4,42 ml/l	- 3,95 ml/l	- 4,93 ml/l
Farötief	- 2,33 ml/l	- 2,56 ml/l	- 2,84 ml/l	- 3,84 ml/l
Landsorttief	- 0,50 ml/l	- 1,01 ml/l	- 1,08 ml/l	- 1,18 ml/l
Karlsötief	- 0,86 ml/l	- 1,88 ml/l	- 2,74 ml/l	- 1,76 ml/l

Tab. 3: Entwicklung des Schwefelwasserstoffs (ausgedrückt als negativer Sauerstoff) in der bodennahen Wasserschicht
Table 3: Hydrogen sulphide development in the near-bottom layer (given as negative oxygen)

Bewertung

Seit 2003 sind keine bedeutenden Einstromereignisse zu verzeichnen gewesen. Damit hat sich die seit 2004/2005 andauernde Stagnationsperiode weiter verstärkt. Kleinere Einstromereignisse in den Jahren 2006 und 2007 haben die Temperaturen im Tiefenwasser weiter erhöht, konnten die Sauerstoffsituation aber nur in der südlichen Ostsee verbessern.

Weiterführende Literatur

- FEISTEL R., NAUSCH G. and E. HAGEN, 2003: The Baltic Inflow of Autumn 2001. *Meereswiss. Ber. Warnemünde*, 54, 55-68.
http://www.io-warnemuende.de/documents/mebe54_inflow01.pdf
- FEISTEL R., NAUSCH G., MATTHÄUS W. and E. HAGEN, 2003: Temporal and Spatial Evolution of the Baltic Deep Water Renewal in Spring 2003. *Oceanologia*, 45, 623-642.
<http://www.iopan.gda.pl/oceanologia/454feis2.pdf>
- FEISTEL R., NAUSCH G., MOHRHOLZ V., ŁYSIAK-PASTUSZAK E., SEIFERT T., MATTHÄUS W., KRÜGER S., and I. SEHESTED HANSEN, 2003: Warm Waters of Summer 2002 in the Deep Baltic Proper. *Oceanologia* 45, 571-592.
<http://www.iopan.gda.pl/oceanologia/454feis1.pdf>
- FEISTEL R., NAUSCH G., MATTHÄUS W., ŁYSIAK-PASTUSZAK E., SEIFERT T., SEHESTED HANSEN I., MOHRHOLZ V., KRÜGER S., BUCH E., and E. HAGEN, 2004: Back-

- ground Data to the Exceptionally Warm Inflow into the Baltic Sea in Late Summer of 2002. *Meereswiss. Ber. Warnemünde*, 58, 1-58.
http://www.io-warnemuende.de/documents/mebe58_2004_paper.pdf
- FEISTEL R., NAUSCH G., HEENE T., PIECHURA J., and E. HAGEN, 2004: Evidence for a Warm Water Inflow into the Baltic Proper in Summer 2003. *Oceanologia*, 46, 581-598.
<http://www.iopan.gda.pl/oceanologia/464feist.pdf>
- FEISTEL R., NAUSCH G. and E. HAGEN, 2006: Unusual Baltic Inflow Activity in 2002-2003 and varying Deep-Water Properties. *Oceanologia*, 48(S), 21-35.
http://www.iopan.gda.pl/oceanologia/48_S.html#A2
- FEISTEL, R., FEISTEL, S., NAUSCH, G., SZARON, J., ŁYSIAK-PASTUSZAK, E., and G. ÆRTEBJERG, 2008: BALTIC: Monthly time series 1900 – 2005. In: FEISTEL, R., NAUSCH, G., WASMUND, N. (Eds.): State and Evolution of the Baltic Sea, 1952 – 2005. A Detailed 50-Year Survey of Meteorology and Climate, Physics, Chemistry, Biology, and Marine Environment. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 311-336.
- MATTHÄUS, W., NEHRING, D., FEISTEL, R., NAUSCH, G., MOHRHOLZ, V., and H.-U.LASS, 2008: The inflow of highly saline water into the Baltic Sea. In: FEISTEL, R., NAUSCH, G., WASMUND, N. (Eds.): State and Evolution of the Baltic Sea, 1952 – 2005. A Detailed 50-Year Survey of Meteorology and Climate, Physics, Chemistry, Biology, and Marine Environment. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 265-309
- MEIER, H.E.M., FEISTEL, R., PIECHURA, J., ARNEBORG, L., BURCHARD, H., FIEKAS, V., GOLENKO, N., KUZMINA, N., MOHRHOLZ, V., NOHR, CH., PAKA, V. T., SELLSCHOPP, J., STIPS, A., and V. ZHURBAS, 2006: Ventilation of the Baltic Sea deep water: A brief review of present knowledge from observations and models. *Oceanologia*, 48(S), 133-164.
http://www.iopan.gda.pl/oceanologia/48_S.html#A8
- NAUSCH, G., FEISTEL, R., LASS, H.-U., NAGEL, K., und H. SIEGEL, 2007: Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2006. *Meereswiss. Ber. Warnemünde*, 70, 2-91.
http://www.io-warnemuende.de/documents/mebe70_2006-zustand-hc.pdf
- NAUSCH, G., FEISTEL, R., UMLAUF, L., NAGEL, K. und H. Siegel, 2008: Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2007. *Meereswiss. Ber. Warnemünde*, 72, 1-93.
http://www.io-warnemuende.de/documents/mebe72_2007-zustand-hc-und-schwermetalle.pdf

Zusätzliche Informationen

Cruise reports, suboxische und anoxische Regionen in der Ostsee:

http://www.io-warnemuende.de/research/de_datbild.html

http://www.io-warnemuende.de/research/en_datbild.html

Monitoring Darßer Schwelle:

http://www.io-warnemuende.de/projects/monitoring/de_home.html

http://www.io-warnemuende.de/projects/monitoring/en_home.html

BSH MARNET:

<http://www.bsh.de/Meeresdaten/Beobachtungen/MARNET-Messnetz/index.jsp>

http://www.bsh.de/en/Marine_data/Observations/MARNET_monitoring_network/index.jsp

Meereswissenschaftliche Berichte:

<http://www.io-warnemuende.de/research/mebe.html>

BALTIC atlas :

<http://www.io-warnemuende.de/projects/baltic/index.html>

Autoren dieses Berichts:

Dr. Rainer Feistel
 Dr. Günther Nausch
 Dr. Eberhard Hagen

Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW)
 Seestr. 15
 18119 Rostock-Warnemünde



ARGE BLMP Nord- und Ostsee

Auf der 34. Umweltministerkonferenz Norddeutschland am 17. April 1997 sind die zuständigen Ressorts des Bundes und der Länder Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen und Schleswig-Holstein übereingekommen, für die Zusammenarbeit bei der Überwachung der Meeresumwelt von Nord- und Ostsee eine Arbeitsgemeinschaft Bund/Länder-Messprogramm für die Meeresumwelt von Nord- und Ostsee (ARGE BLMP Nord- und Ostsee) zu bilden.

Mitglieder der ARGE BLMP sind:

- Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
- Bundesministerium für Bildung und Forschung
- Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt der Freien und Hansestadt Hamburg
- Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern
- Niedersächsisches Ministerium für Umwelt und Klimaschutz
- Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein

Impressum

Herausgegeben vom
Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)
Sekretariat Bund/Länder-Messprogramm für die Meeresumwelt von Nord- und Ostsee (BLMP)
Bernhard-Nocht-Straße 78
20359 Hamburg

www.blmp-online.de

Zu zitieren als: Meeresumwelt Aktuell Nord- und Ostsee, 2009 / 2
© Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)
Hamburg und Rostock 2009

Ein Glossar zur Reihe findet sich auf der oben genannten Webseite.

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieses Werkes darf ohne ausdrückliche schriftliche Genehmigung des BSH reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.