

Im Zuge steigender CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in der Atmosphäre und einer allenfalls schleppenden Abkehr von fossilen Brennstoffen als Energieträger gewinnt die Frage eines sinnvollen Umgangs mit dem Industrieabfall „CO<sub>2</sub>“ an Bedeutung. Die Abscheidung aus Kraftwerken und Deponierung in geologischen Formationen wird daher als wichtiger Pfeiler moderner CO<sub>2</sub>-Minderungsbestrebungen betrachtet (Bericht des Weltklimarats 2007). Neben den geologischen Formationen an Land erscheint eine Einlagerung im Meeresboden hierbei vielversprechend. Doch die Abschätzung der Folgen ist schwierig. Wechselwirkungen mit dem Sediment, Anpassung von Meeresbewohnern auf langen Zeitskalen und der Weg des Treibhausgases im Falle von Leckagen sind nur einige der Prozesse, die man im Vorfeld gerne verstehen möchte. Glücklicherweise hat die Natur an einigen wenigen Stellen des Meeresbodens ein natürliches Versuchsfeld geschaffen. Die Untersuchung von Austrittsstellen flüssigen CO<sub>2</sub>s in der Tiefsee, in über 1000 m Wassertiefe, kann wichtige Rückschlüsse darüber ermöglichen, wie das Ökosystem der Tiefsee auf die Einbringung von CO<sub>2</sub> im großen Maßstab reagieren würde. Hierzu diente die durch das BMBF geförderte Expedition 196 des deutschen Großforschungsschiffes SONNE im Okinawa-Trog, Teil des Südchinesischen Meeres zwischen Japan und Taiwan. Die Fahrt stellt das Herzstück des Verbundprojekts SUM-SUN (Studien zur marinen CO<sub>2</sub>-Sequestrierung durch Untersuchung natürlicher hydrothormaler CO<sub>2</sub>-Austritte im nördlichen Westpazifik) dar.

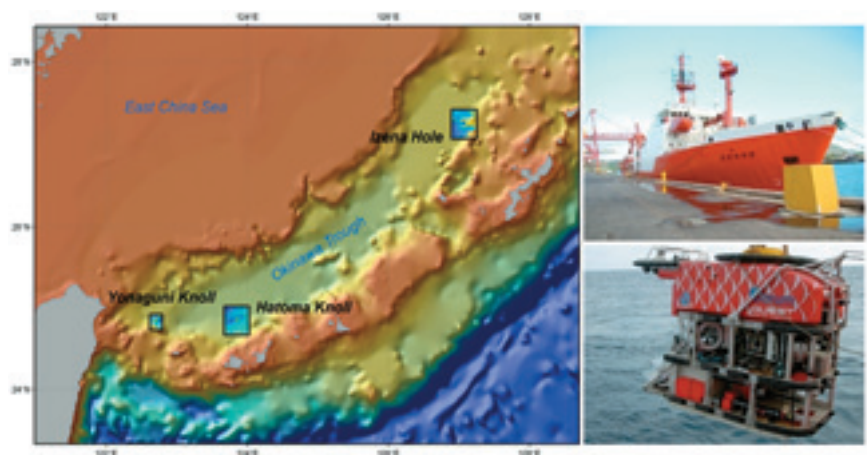
### CO<sub>2</sub>-Abscheidung und Deponierung als CO<sub>2</sub>-Minderungsstrategie

Das Problem ist altbekannt: Bereits im Jahre 1860 befand John Tyndall, dass der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre von Bedeutung für das Klima ist. Er spekulierte, dass der Gehalt an CO<sub>2</sub> eine wichtige Rolle beim Wechsel zwischen Warm- und Kaltzeiten spielt. 1896 berechnete Svante Arrhenius auf Grundlage seines damaligen Wissens die Temperaturerwärmung, die eine Verdopplung des vorindustriellen CO<sub>2</sub>-Gehalts der Atmosphäre mit sich bringen würde, 5–6° C. Visionäre Arbeiten zweier Nobelpreisträger. Arrhenius lag zwar mit seiner Prognose der Temperaturerhöhung nach

# Die Kohlendioxidaustritte im Okinawa-Graben

## Ein natürliches Labor für Untersuchungen zur marinen CO<sub>2</sub>-Deponierung

Gregor Rehder



Bathymetrische Karte des Okinawatrogs, Forschungsschiff SONNE an der Pier des Hafens von Guam und der wissenschaftliche Tauchroboter Quest des Bremer MARUM (Abb. 1)

Quelle: Karte, Steffen Gauger, Fielax; Bild Sonne, Gregor Rehder, IOW; Bild ROV, MARUM Bremen

derzeitigen Klimamodellen zu hoch, doch sein Szenario einer Verdopplung des vorindustriellen atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Inventars (d. h. ~ 560 ppm) ist heute bereits als sehr optimistisches und ehrgeiziges Klimaziel zu sehen.

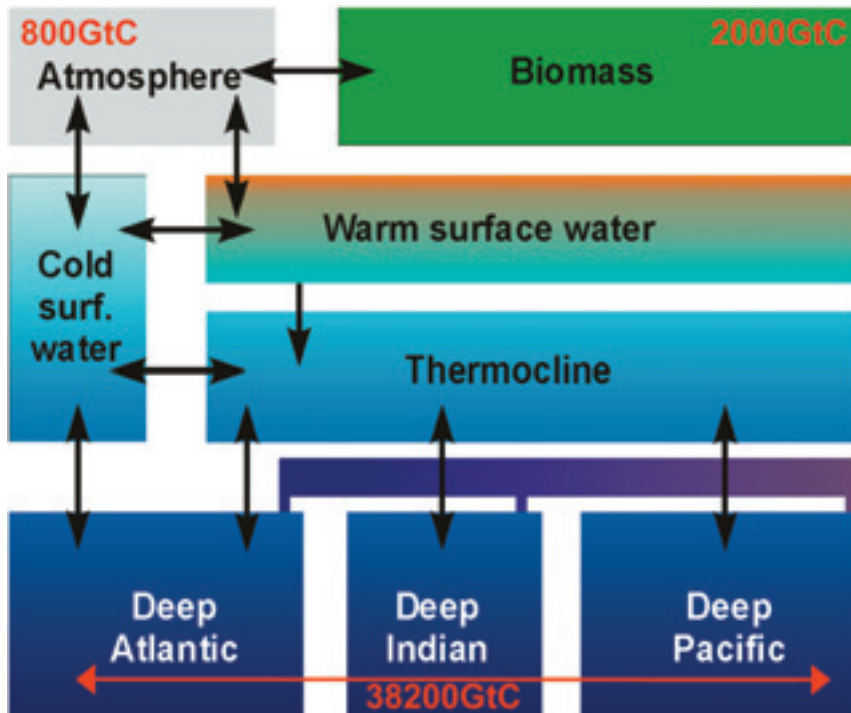
Etwa vierzig Prozent des seit Beginn der Industrialisierung produzierten CO<sub>2</sub>s hat mittlerweile über den Austausch mit dem Ozean seinen Weg ins Meer gefunden. Im Gleichgewicht wird die Aufnahme des karbonatgepufferten Ozeans bei etwa 90 % liegen, doch der Weg in den tiefen Ozean ist ein zeitliches Nadelöhr, bedingt durch eine Zeitskala der Tiefenwasserneubildung von 500 bis 1000 Jahren. Bei den möglichen Strategien für eine Minderung des Eintrags in die Atmosphäre durch Abscheiden aus Industrieabgasen und Lagern des CO<sub>2</sub>s (Carbon Capture and Storage – CCS) wurde daher neben diversen geologischen Formationen an Land vor allem die Möglichkeit der Lösung in den Tiefen des Ozeans dis-

kutiert (Spezialbericht des Weltklimarates zu CCS, 2005). Dies entspräche, wenn man so will, einer Beschleunigung der natürlichen CO<sub>2</sub>-Aufnahme durch den Ozean, wenn auch das Verteilungsmuster zwischenzeitlich deutlich anders aussähe.

### Einlagerung in marine Sedimente

Doch in den letzten Jahren ist auch zunehmend die sogenannte Ozeanversauerung als Folge der menschlichen CO<sub>2</sub>-Produktion in das Bewusstsein der Forschung gerückt. Die Einlagerung in marine Sedimente weist daher gegenüber einer Lösung im Meerwasser – und auch gegenüber der Lagerung an Land – diverse Vorteile auf:

- Das mit CO<sub>2</sub> angereicherte Wasser wäre dichter als das umgebende Porenwasser und hätte daher die Tendenz, sich von der von der Oberfläche des Meeresbodens wegzubewegen.



Der Weg des menschengemachten Kohlendioxid – der Ozean als Großabnehmer (Abb. 2)  
Quelle: in Anlehnung an Siegenthaler und Sarmiento, 1993.

- In großen (> ~ 500 m) Wassertiefen bildet CO<sub>2</sub> mit Wasser eine feste, eisförmige Verbindung, das sogenannte CO<sub>2</sub>-Hydrat.
- Sedimente weisen einen hohen Anteil an Karbonaten und Tonmineralen auf. Beide Mineralgruppen können das CO<sub>2</sub> langfristig neutralisieren.

Im Falle einer Leckage würde immer noch der Ozean als Hemmschwelle zwischen Einlagerungsort und Atmosphäre fungieren.

Doch solche Szenarien und die auftretenden Reaktionen zu untersuchen oder gar die Auswirkung lokaler hoher CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in der Tiefsee zu simulieren, ist ein schwieriges Unterfangen. Das Projekt SUMSUN soll daher

zeigen, ob die wenigen natürlichen Austrittsstellen flüssigen CO<sub>2</sub>s in der Tiefsee geeignet sind, um Rückschlüsse auf biologische, chemische und geologische Folgen zu ziehen.

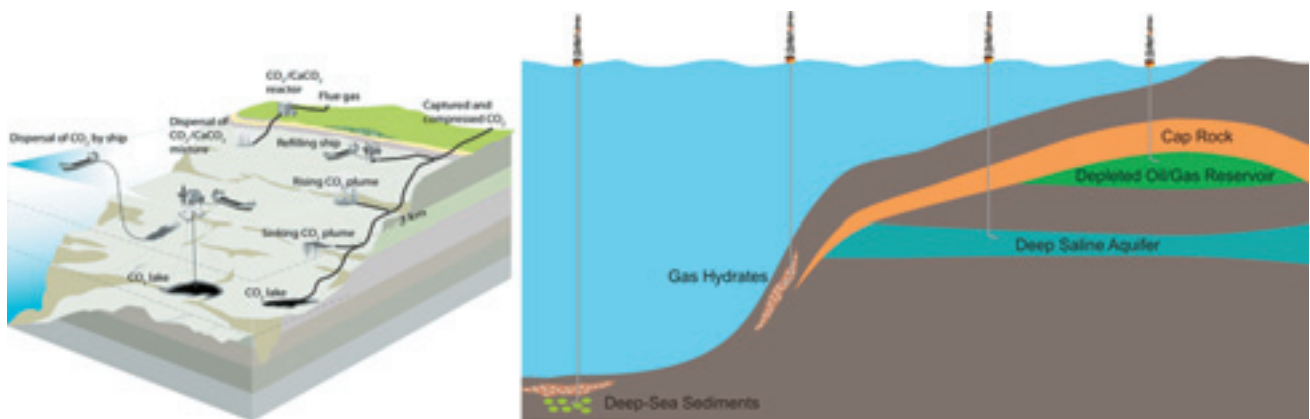
### Submarine CO<sub>2</sub>-Quellen – ein Sonderfall von Hydrothermalismus in der Tiefsee

Während heiße Quellen am Meeresboden seit Ende der 70er Jahre bekannt und ein weltweites Phänomen sind, sind Quellen flüssigen CO<sub>2</sub>s nur an sehr wenigen Orten bekannt. In allen Fällen handelt es sich um sogenannten Inselbogenvulkanismus. Eine erste solche Austrittsstelle war bereits 1989 im

Okinawatrog gefunden worden – auch damals mit FS SONNE, unter Leitung von Prof. Peter Halbach, einem Pionier der Deutschen Meeresforschung. Mehr als ein Jahrzehnt lang war das Gebiet aber aufgrund intensiver Fischerei für die Forschung nicht zugänglich. Seit Beginn des Jahrtausends sind nun noch weitere CO<sub>2</sub>-Austritte gefunden worden; dazu gesellte sich im Jahr 2004 am Marianenbogen in der Nähe der Insel Guam ein weiteres vulkanisches Meeressystem. Die Prozesse, die im Rahmen einer Trennung von Phasen im Meeresboden schließlich zur Bildung des im Wesentlichen CO<sub>2</sub>-enthaltenden Kondensats führen, sind ein wissenschaftliches Thema für sich – hier aber unmöglich mit abzuhandeln.

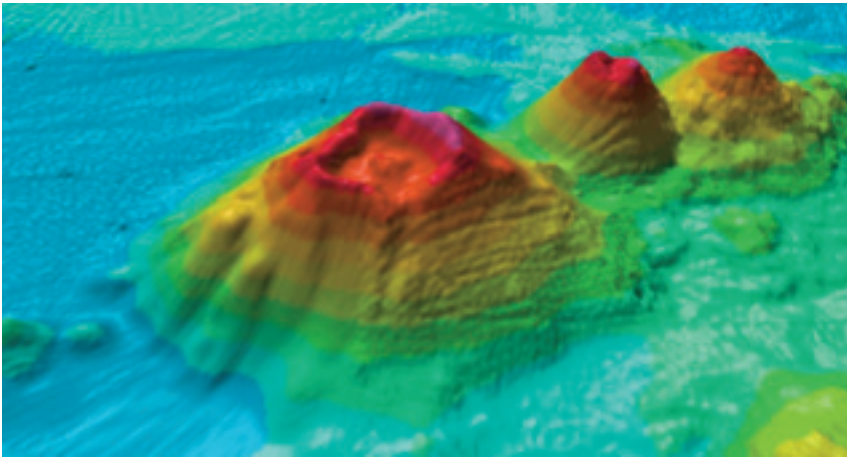
### Die Arbeitsgebiete

Die zwei im Rahmen der Expedition untersuchten Felder sind, trotz ihrer Lage in sehr ähnlichen Wassertiefen von 1500 bzw. 1600 m, stark unterschiedlich. Hatoma Knoll ist ein Vulkan mit einer Caldera, wie sie jedem Lehrbuch über Vulkanismus Ehre machen würde. Im Inneren der Caldera sind mehrere aktive Hydrothermalschlote, von denen einige neben heißen Lösungen auch flüssiges CO<sub>2</sub> absondern. Die nur wenigen sedimentbedeckten Gebiete weisen hingegen keine Aktivität auf. Die steilen Flanken der Caldera schließen die CO<sub>2</sub>-angereicherten Lösungen hierbei ein, ein Ausfluss erfolgt im Wesentlichen im Süden. Solche halbabgeschlossenen Systeme sind ideal für quantitative Untersuchungen. Yonaguni Knoll IV, in einer Art Schlucht gelegen, weist hingegen neben den aktiven Schloten auch Sedimente auf, die von CO<sub>2</sub>-haltigen Lösungen durchtränkt werden. Nur hier



Übersicht mariner Deponierungsstrategien nach IPCC 2005 (l.) und neu diskutierte Methoden der Einlagerung in den Sedimenten (r.) (Abb. 3)  
Quelle: Links, IPCC, 2005; Rechts, Matthias Häckel, IFM-GEOMAR





Ästhetik am Meeresboden: Die 3D-Struktur des Arbeitsgebietes Hatoma Knoll. Die Struktur ragt etwa 500 m aus dem Meeresboden heraus, der höchste Punkt liegt bei etwa 1450 m Wassertiefe (Abb. 4). Quelle: Jens Schneider von Deimling, IOW

können wir Fragen zur Wechselwirkung von CO<sub>2</sub> und Sediment klären.

### Beobachtungen

Die wohl auffälligste Beobachtung an den CO<sub>2</sub>-Austrittsstellen sind die dicht auftretenden biologischen Lebensgemeinschaften der Tiefsee, die wir von anderen Systemen kennen: Schlotkrabben, in Symbiose mit Schwefelbakterien lebende Muscheln und Krabben, vereinzelt auftretende Seespinnen, die eher als sekundär auftretende Fauna zu sehen sind und sich von den Muscheln ernähren. Diese Lebensformen deuten schon an, was die Analysen an Bord zeigen. Das austretende CO<sub>2</sub> enthält Beimischungen von Methan und Schwefelwasserstoff. Diese energiereichen Verbindungen sind es auch, die diese Oasen der Tiefsee am Leben halten. Dennoch ungewöhnlich ist die Toleranz der Großlebewesen gegenüber den hohen CO<sub>2</sub>-Drücken und dem niedrigen pH-Wert. Ein ganz anderes Bild zeigt sich bei den Sedimentbeobachtungen. Trotz der auch hier auftretenden erhöhten Methan- und Schwefelwasserstoffgehalte zeichnen sich die betroffenen Gebiete durch das fast vollständige Fehlen der Großlebewesen und sogar eine ungewöhnlich niedrige mikrobiologische Aktivität aus. Anscheinend entfaltet sich die Wirkung des CO<sub>2</sub>s im Porenraum in einer Weise, die auch die sonst sehr robusten spezialisierten Extremophilen an ihre Grenzen stoßen lässt.

Nicht nur für den Chemiker faszinierend sind die Phasenumwandlungen von flüssigem CO<sub>2</sub> und Wasser zu Hydrat, das sich an Überhängen ablagert, zu sty-

roporartigen Netzwerken zusammensintert oder von flüssigem CO<sub>2</sub> durchströmte Gänge bildet. Ein ideales Gebiet, um die selektive Anreicherung der einzelnen Gase in den unterschiedlichen Phasen zu untersuchen.

Erste Analysen der Zusammensetzung des Porenwassers stützen die Theorien. Erhöhte Gehalte an Kieselsäure und Alkalinität, einem Parameter zur Einschätzung des Kohlensäuresystems, scheinen die beschleunigte Verwitterung der Sedimente anzuzeigen –



Vergesellschaftungen von klassischen Bewohnern von Fluidaustritten der Tiefsee, die hier den hohen CO<sub>2</sub>-Austritten trotzen; hier gruppiert um einen Bereich, an dem flüssiges CO<sub>2</sub> austritt und in Kontakt mit Wasser Röhren, styporartige Ansammlungen und Röhren aus CO<sub>2</sub>-Hydrat formt (Abb. 5). Quelle: MARUM Bremen

und damit eine teilweise Neutralisierung der aus dem flüssigen CO<sub>2</sub> gebildeten Kohlensäure. Doch auch eine Änderung des Eisengehaltes an den durch das CO<sub>2</sub> beeinflussten Sedimenten lässt sich augenscheinlich ableiten. Die Mobilisation von Metallen – die praktisch immer eine starke Abhängigkeit von pH-Wert aufweist – ist eines der möglichen Kernprobleme bei der Einlagerung von CO<sub>2</sub> in Sedimente und Gesteinsformationen.

### Resümee – und ein Kommentar zur Sache

Die Untersuchung der natürlichen CO<sub>2</sub>-Austritte hat sich als wertvolle Möglichkeit der Abschätzung der Konsequenzen einer möglichen CO<sub>2</sub>-Deponierung erwiesen. Gerade langzeitige Auswirkungen auf Sediment und biologisches Umfeld sind hervorragend zu untersuchen. Allerdings muss beachtet werden, dass die Beimengungen anderer Gaskomponenten im vorgefundenen Maße sowie der gleichzeitige Wärmetransport im Szenario der gewollten Einlagerung von CO<sub>2</sub> in das Sediment nicht auftreten würden.

Übergeordnet bleibt die Frage, ob Abscheidung und Deponierung von CO<sub>2</sub> überhaupt in das Portfolio der

## Der Autor



## Prof. Dr. Gregor Rehder

Studium der Chemie an der Universität Bayreuth; Promotion über den Marinen Methankreislauf am Forschungszentrum GEOMAR in Kiel (Dissertation 1996); PostDoc; 2000 bis 2001 Tätigkeit am Monterey Bay Aquarium Research Institute in Kalifornien; 2002 Rückkehr als Akademischer Rat an das Zentrum für Meereswissenschaften IFM-GEOMAR in Kiel; seit 2006 Professor für Meereschemie am Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW), lehrt an der Universität Rostock; sein Interesse gilt den marinen biogeochemischen Stoffkreisläufen, insbesondere der Spurengaschemie

## Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW)

Sektion Meereschemie  
Seestr. 15  
18119 Rostock-Warnemünde  
Tel.: 0381/5197-301  
E-Mail: gregor.rehder@io-warnemuende.de  
Internet: www.io-warnemuende.de

Maßnahmen zur CO<sub>2</sub>-Minderung aufgenommen werden sollte – und das fern von der Frage der ökologischen Auswirkung, wie sie in diesem Projekt behandelt wird. Denn anders als praktisch alle anderen Maßnahmen der CO<sub>2</sub>-Minderung ist CCS mit einer Einbuße von etwa 30 % der Energieeffizienz verbunden, die im Wesentlichen durch die Abscheidung des CO<sub>2</sub>s bedingt ist. Es gilt also, zwei heilige Kühe moderner Umweltpolitik gegeneinander abzuwägen – Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emission gegen effizienten Umgang mit den Ressourcen fossiler Energieträger.

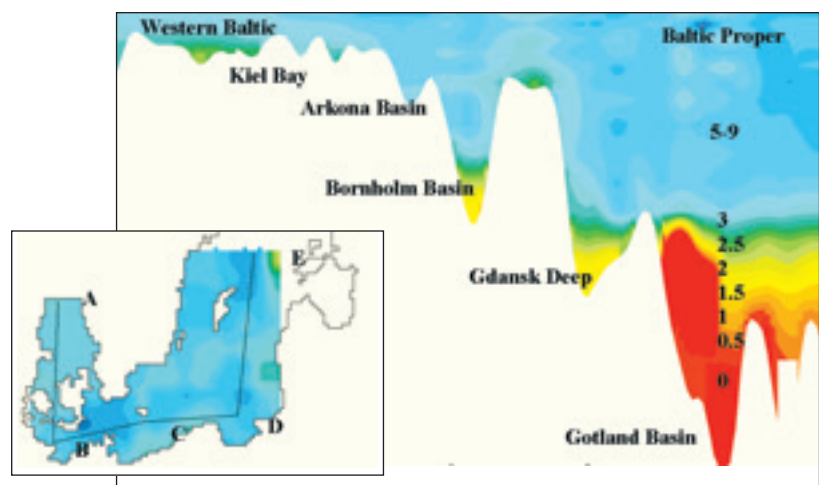
## Literatur:

- IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. IPCC 2005.
- IPCC Forth Assessment Report „Climate Change 2007“. IPCC 2007. ■

# Mikrobielles Leben in den lebensfeindlichen Tiefen der Ostsee

## Mikroorganismen als Katalysatoren wichtiger Stoffkreisläufe

Klaus Jürgens



West-Ost-Schnitt durch die Ostsee: Mittlere O<sub>2</sub>-Konzentrationen 1987-1990 (in ml/L) (Abb. 1).  
Quelle: Baltic Environmental Data Base (BED, Stockholm Univ.)

Die Tiefen der zentralen Ostsee werden in den Medien oft als sogenannte „Todeszonen“ bezeichnet, in denen jegliches Leben fehlt. Damit ist allerdings höheres Leben (Metazoen) gemeint, was dort aufgrund des Fehlens von Sauerstoff und der hohen Konzentrationen von Schwefelwasserstoff (Sulfid) tatsächlich weitgehend fehlt. Stattdessen wimmelt es von Mikroorganismen: Bakterien, Archebakterien und Einzeller (Protisten) bevölkern in hohen Konzentrationen diese Zonen. Insbesondere dort, wo sauerstoffhaltiges auf sauerstofffreies und sulfidisches Wasser trifft („Chemokline“), herrscht hohe mikrobielle Aktivität und die hier von Bakterien geleisteten Stoffumsetzungen spielen eine wichtige Rolle für die biogeochemischen Stoffkreisläufe der gesamten Ostsee. Dies ist ein aktuelles Forschungsgebiet der Arbeitsgruppe für Molekulare und Mikrobielle Ökologie am Leibniz-Institut für Ostseeforschung (IOW).

In der Ostsee schiebt sich das leichtere, aus den Zuflüssen kommende Wasser über das salzhaltigere, schwerere Wasser, das aus der Nordsee stammt. Eine Dichtesprungschicht, die Halokline, trennt beide Wassermassen voneinander und verhindert in den tieferen Becken eine effiziente Vermischung (z. B. durch Stürme). Da am Boden der Ostsee der Abbau von abgesunkenem organischen Material Sauerstoff verbraucht, die Nachlieferung von oben aber viel zu langsam verläuft, kommt es zur Aufzehrung von Sauerstoff (Anoxie) in den zentralen tiefen Bereichen, wie z. B. dem Gotlandbecken (ca. 250 m Tiefe) (Abb. 1). Der mikrobielle Abbau geht auch ohne Sauerstoff weiter, aber in diesem Fall wird Sulfat (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) als Oxidationsmittel benutzt, und dabei entsteht der für die meisten höheren Organismen giftige Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S). Nur in unregelmäßigen Abständen (im Schnitt alle 10 Jahre) kommt es zu einer „Belüftung“