



#### Impressum:

Herausgeber:  
Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW)  
Seestraße 15, D-18119 Rostock  
Tel.: 0381 51970  
postmaster@io-warnemuende.de  
<http://www.io-warnemuende.de>

Redaktion:  
Dr. Barbara Hentzsch

Layout:  
Robert Aldag  
dekas

Satz: dekas

Druck: Druckhaus Trautmann



## Ostseesplitter 2006

Meereskundliche Geschichten  
aus der Ostsee

Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde



## Editorial

Wer hätte das gedacht: nach einem langen, strengen Winter überrascht uns der Sommer 2006 mit lang anhaltenden Hochdrucklagen und Rekordtemperaturen. Damit Ihnen im Strandkorb nicht die Lektüre ausgeht, möchten wir Ihnen heute unseren Ostseesplitter 2006 überreichen - eine kleine Sammlung populärwissenschaftlicher Aufsätze zum Thema Ostsee und Meer. Wir hoffen, damit Ihr Interesse an den Besonderheiten, den Tieren und Pflanzen der Ostsee zu wecken oder weiter anzustacheln, denn unsere Ostsee ist weder tot noch langweilig.

In diesem Jahr erwartet Sie von Dr. Herbert Siegel, Physikalischer Ozeanograph am IOW, ein Vergleich der Temperaturen des Oberflächenwassers der Ostsee - also quasi der Badewassertemperaturen - über die letzten 16 Jahre. Vergleichen Sie selbst, wo sich die momentanen Wassertemperaturen einordnen lassen. Dr. Rainer Feistel, ebenfalls Ozeanograph am IOW, geht der Frage nach, ob die Ostsee allmählich zu einem großen Süßwassermeer wird und Frau Dr. Maren Voß, Meeresbiologin in Warnemünde, erklärt, was es mit der Überdüngung der Ostsee auf sich hat. Dr. Stefan Forster, Meeresbiologe an der Universität Rostock, wird Sie in die Welt der Meeresbodenbewohner einführen, wo von kleinen Tieren Gärten angelegt und Herden von Bakterien „gezüchtet“ werden. Zwei weitere Artikel beleuchten die Auswirkungen, die Offshore-Windanlagen auf die Ostsee haben können: Dr. Michael Zettler und Dr. Falk Pollehne, beide Warnemünder Meeresbiologen, untersuchen den Einfluss, den die Anlagen auf die Artenvielfalt am Meeresboden haben, Prof. Hans Burchard, Physikalischer Ozeanograph am IOW, beschreibt mögliche Auswirkungen auf die Sauerstoffversorgung der tieferen Wasserschichten in der Ostsee.

Wenn Ihnen das noch nicht reicht, so schauen Sie doch mal in das Programm unserer Warnemünder Abende ([www.io-warnemuende.de](http://www.io-warnemuende.de)), wo Sie weitere spannende Themen erwarten. Wir wünschen viel Vergnügen!

Für die Herausgeber, im Juni 2006

**Barbara Hentzsch**

## Inhaltsverzeichnis

### Wird die Ostsee zum Süßwassermeer?

Dr. Rainer Feistel

### Können Windparks die Ostsee aufmischen?

Prof. Dr. Hans Burchard

### Stickstoff als Lebensspender oder als Problemstoff im Meer

Dr. Maren Voß

### Was kriecht denn da?

### Die unsichtbaren Bewohner des Meeresbodens

Dr. Stefan Forster

### Ökologische Begleitforschung zur Windenergienutzung im Offshore-Bereich

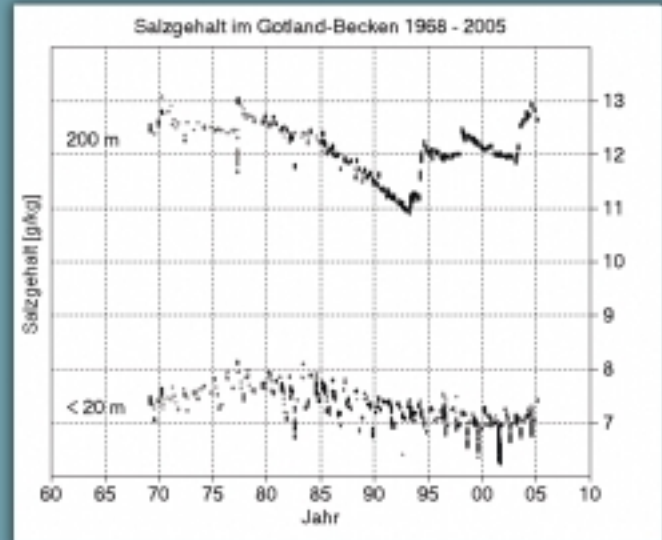
Dr. Michael Zettler, Dr. Falk Pollehne

### Die Entwicklung der Badewassertemperatur (Wasseroberflächentemperatur) der Ostsee seit 1990

Dr. Herbert Siegel

# Wird die Ostsee zum Süßwassermeer?

Dr. Rainer Feistel



Die Veränderung des Salzgehaltes in der Ostsee (Gotland-Becken östlich der schwedischen Insel Gotland) zwischen 1968 und heute

In den Jahren 1976 bis 1979 wurden im Ostseewasser vor Warnemünde im Sommer Salzgehalte um die 9 g/kg festgestellt. Rund 20 Jahre später, 1998, wurden dagegen nur noch etwa 8g/kg gemessen. Süßt die Ostsee aus, verwandelt sie sich in absehbarer Zukunft vielleicht in ein Süßwassermeer? Die klare Antwort darauf lautet - nein.

Um zu verstehen, warum das so ist und Vorhersagen zu wagen, wie sich die Eigenschaften des Badewassers an der deutschen Ostseeküste und speziell am Warnemünder Strand wohl entwickeln werden, reicht es nicht aus, den Salzgehalt vor Ort über 20 Jahre zu messen und daraus Schlüsse für die Zukunft abzuleiten. Vielmehr müssen die Veränderungen in der zentralen Ostsee und dort speziell im tiefen Wasser, bei 100 - 200 m Tiefe beobachtet werden. Was hier passiert, steht in engem Zusammenhang mit dem Wasseraustausch zwischen Ost- und Nordsee durch die Belte und den Sund und beeinflusst langfristig das Oberflächenwasser der Ostsee.

Ein Beobachtungszeitraum von 20 Jahren reicht nicht aus, weil das Wasser der Ostsee erst im Verlauf von 30 - 40 Jahren einmal komplett ausgetauscht wird. Bei einem solchen inneren Zeitmaßstab verlangt die Statistik, dass man mindestens über zwei oder drei solcher Zyklen hinweg Messdaten erhebt, um zu signifikanten Aussagen über Trends zu kommen. Man muss also mindestens 60 - 80 Jahre lang messen, um überhaupt so etwas wie einen „Normalzustand“ der Ostsee festzustellen, und erst dann kann man vielleicht beurteilen, ob beobachtete Veränderungen eher eine zufällige Schwankung oder aber einen generellen Trend anzeigen. Obwohl es reguläre Messungen in der Ostsee bereits seit etwa 1900 gibt, begannen erst Anfang der 1970er Jahre systematische Beprobungen des gesamten Seegebiets in allen Jahreszeiten. So besitzen wir heute umfangreiche Datenreihen seit etwa 40 Jahren, leider noch zu kurz, um statistisch gesicherte Trendaussagen machen zu können, aber lang genug, um einen guten Einblick in die Mechanismen zu gewinnen, die für die längerfristigen Schwankungen des Salzgehalts der Ostsee verantwortlich sind.

Die nebenstehende Abbildung zeigt die Veränderung des Salzgehalts in der zentralen Ostsee, im Gotland-Becken östlich der schwedischen Insel Gotland, wo das Wasser bis zu 250 m tief ist, zwischen 1968 und heute, also über nahezu 40 Jahre. Die untere Punktfolge mit 6 - 8 g Salz pro kg Seewasser stammt aus der

*Will man wissen, wieviel Salz das Wasser am Strand von Warnemünde in Zukunft haben wird, so muss man in die Tiefen der zentralen Ostsee abtauchen.*

*Um in der Ostsee zu statistisch abgesicherten Aussagen zu kommen, sind Messungen über 60 bis 80 Jahre erforderlich.*

**Salzwassereinbrüche sorgen für abrupte Veränderungen des Salzgehaltes im Tiefenwasser.**

**Jedes Jahr verliert die Ostsee 4 Mrd. Tonnen Salz durch den Ausstrom in die Nordsee. Ohne Nachschub würde sie wirklich aussüßen.**

Schicht an der Oberfläche, bis etwa 20 m Tiefe. Die obere Reihe mit Werten zwischen 11 und 13 g/kg ist von Proben, die aus 200 m Tiefe heraufgeholt wurden. Ein Liter Wasser mit wenig Salz ist leichter als einer mit viel Salz und „schwimmt“ deshalb auf dem schwereren Wasser.

Zunächst stellen wir anhand der Daten durch Augenschein fest, dass der Salzgehalt weder konstant ist noch systematisch ab- oder zunimmt, sondern über Zeiträume von 10 - 20 Jahren mal in die eine, mal in die andere Richtung wandert. So führte die obere Kurve von 13 g/kg im Jahr 1978 über viele Jahre abwärts bis unter 11 g/kg im Jahr 1993, seither aber steigt sie, wenn auch ungleichmäßig, immer weiter an, bis im Sommer 2004 wieder Werte gemessen wurden wie zuletzt 1978/79. Dieser sägezahn-ähnliche Verlauf der Kurve ist typisch: der Salzgehalt steigt schubweise an und sinkt danach wieder langsam ab. Es sind die so genannten Salzwassereinbrüche aus der Nordsee, bei denen zumeist heftige Weststürme von ein bis drei Wochen Dauer sehr salziges Wasser in die Ostsee pressen. Dieses Salzwasser gleitet danach den Boden entlang von Becken zu Becken und verdrängt das dort befindliche „alte“ Wasser. Dieser Vorgang zieht sich in der Regel über mehr als ein Jahr hin. Wenn dann jedoch weiterer Nachschub aus der Nordsee ausbleibt, vermischt sich das Wasser aus der Tiefe allmählich mit dem salzarmen Wasser an der Oberfläche, das danach an Warnemünde vorbei aus der Ostsee hinausfließt. So nimmt der Salzgehalt in der Tiefe in Zeiten ohne Einströme, die man „Stagnationsperioden“ nennt, immer wieder langsam ab. Von den über 100 Milliarden Tonnen Salz, die die gesamte Ostsee enthält, gehen jedes Jahr etwa 4 %, also 4 Milliarden Tonnen, durch den Ausstrom in das Kattegat verloren. Je nachdem, wie gut dieser Verlust durch neue Einströme kompensiert wird, vergrößert oder verkleinert sich ihr Salzvorrat im Laufe der Zeit.

Das leichtere Brackwasser an der Oberfläche entsteht dadurch, dass zahlreiche Flüsse ihr Süßwasser in die Ostsee leiten, wo es sich dann auf dem Weg von Nord und Ost nach Südwest allmählich mit Salz aus den Schichten darunter anreichert. Wegen der Größe der Ostsee dauert es im Mittel etwa 30 Jahre, bis Wasser, welches über die Flüsse in die Ostsee gelangt, diese als Brackwasser in dem so genannten „Baltischen Strom“ in Richtung Nordsee wieder verlässt. Sprunghafte Änderungen der Salzkonzentration im Tiefenwasser werden im Oberflächenwasser bei einer solch langen Verweildauer nicht deutlich wahrgenommen. Vielmehr reagiert das Oberflächenwasser darauf äußerst träge und bildet gewis-

sermaßen ständig einen natürlichen Mittelwert über viele Jahre. So sehen wir es in der unteren Kurve der Abbildung: die großen und steilen Änderungen der oberen Kurve erscheinen nur stark abgemildert und um etwa 10 Jahre verzögert in der unteren.

Seit etwa 1980 hatte sich der Salzgehalt an der Oberfläche der Ostsee, und damit auch des Badewassers vor Warnemünde, ständig verringert. Seit 2001 jedoch beobachten wir den umgekehrten Trend, der dem Umschwung im Tiefenwasser, der dort bereits 1993 stattfand, verspätet nachfolgt. Seither hat sich wieder ein erheblicher Salzvorrat angesammelt, der zunächst seinen Weg zur Oberfläche nehmen, dort längere Zeit verweilen und schließlich die Ostsee wieder verlassen wird. Wir können also davon ausgehen, dass der ansteigende Trend, der 2001 begann, sich noch über die nächsten 10 Jahre so fortsetzen wird.

Warum es aber überhaupt zu derart langfristigen Schwankungen im Salzgehalt der Ostsee kommt, mit anderen Worten, warum es in bestimmten Jahrzehnten zu häufigen Einströmen kommt, in anderen aber nicht, ist im Detail noch ebenso wenig bekannt, wie die Antwort auf die Frage, warum es Phasen mit heißen Sommern oder kalten Wintern gibt, warum unser Klima also erheblichen großräumigen und andauernden Schwankungen unterliegt.

Aussagen, die einen einfachen linearen Zusammenhang zwischen der globalen Erwärmung und dem Salzgehalt der Ostsee unterstellen, sind nicht richtig. Wie wir gesehen haben, ist dieser Zusammenhang weder einfach, noch linear. Es ist wohl richtig, dass das Salzminimum zwischen 1985 und 1995 wesentlich dazu beigetragen hat, dass zum Beispiel die großen Dorschbestände der 1970er Jahre inzwischen weitgehend verschwunden sind. Genauso richtig ist aber auch, dass der Dorsch den Ostseefischern noch um 1920 praktisch unbekannt war, und stattdessen Plattfisch den wichtigsten Fang bildete. Wenn man also auffällige Veränderungen in der Ostsee, sei es beim Salz am Strand oder beim Fang im Netz, richtig verstehen und beurteilen will, so ist man gut beraten, den Blickwinkel auf größere Zeitabschnitte zu erweitern als vielleicht nur 10 oder 20 Jahre. Und schließlich spielen in diesem komplizierten System auch noch viele andere Faktoren eine Rolle. Nur eins scheint sicher: falls die Dorsche in den kommenden Jahren nicht zurückkehren sollten, so wird nicht das Salz daran schuld sein.

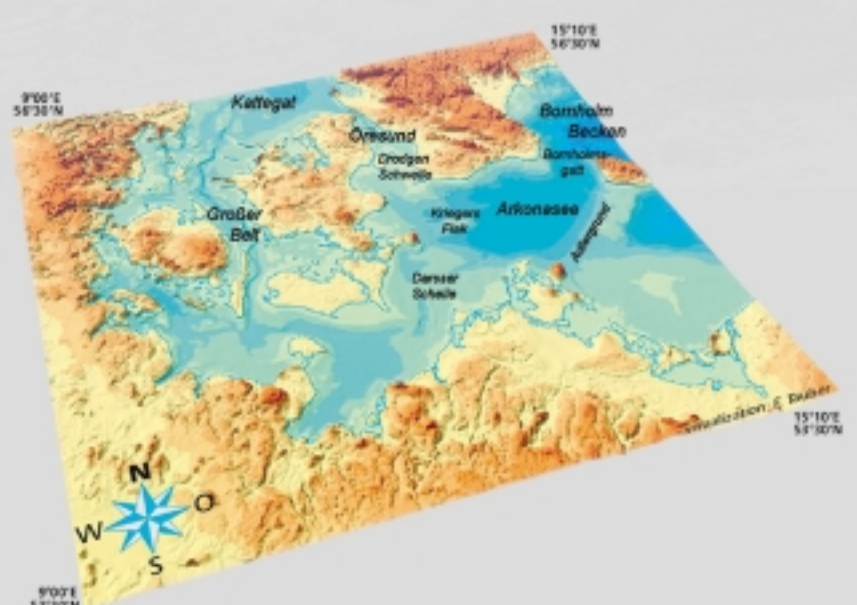
**Durch Salzwassereinbrüche verursachte Salzgehaltsveränderungen im Tiefenwasser sind erst nach rund 10 Jahren im Oberflächenwasser messbar.**

**Wir können davon ausgehen, dass in den nächsten Jahren das Oberflächenwasser salziger wird.**

**Wenn man Veränderungen in der Ostsee richtig verstehen will, so ist man gut beraten, den Blickwinkel auf größere Zeiträume zu erweitern.**

## Können Windparks die Arkonasee aufmischen?

Prof. Dr. Hans Burchard



Fotos: Iffländer/WIND-Projekt GmbH

Die Gewinnung von Windenergie mit Hilfe von Offshore-Anlagen ist im letzten Jahrzehnt mit Nachdruck ausgebaut worden. Das bringt eine Reihe ökologischer Probleme mit sich, die im Planungsverfahren mit berücksichtigt werden müssen. Eine bislang vernachlässigte Fragestellung ist, in welcher Weise große Parks von bis zu 100 Einzelanlagen die Schichtung der Ostsee beeinflussen. Warum ist das wichtig?

Während in den Küstenbereichen der Nordsee durch die Gezeiten eine weitgehende vertikale Vermischung der Wassersäule gegeben ist, sind die Wassermassen der Ostsee typischerweise stark geschichtet. Diese Schichtung kommt zustande, da sich das Frischwasser aus den Zuflüssen in die Ostsee (z.B. Oder, Weichsel, Neva) und das Salzwasser, welches aus der Nordsee über den Skagerrak und den Kattegat über die dänischen Belte und den Öresund in die Arkonasee gelangt, kaum vermischen. Das schwere salzhaltige Nordseewasser schiebt sich unter das ausströmende, durch das Flusswasser weniger salzige und deshalb leichtere Ostseewasser. Sobald das Salzwasser die flachen Schwellen im Öresund (die nur 7 m flache Drogdenschwelle) und zwischen dem Darß und der dänischen Insel Falster (die 20 m tiefe Darßer Schwelle) überwunden hat, taucht es ab und sucht sich seinen Weg entlang des Meeresbodens der Arkonasee, angetrieben durch die Neigung des Bodens, gebremst durch die Reibung am Boden, durch die Erdrotation in Strömungsrichtung nach rechts abgelenkt.

Auf seinem Weg durch die Arkonasee nimmt dieser Salzwasserstrom zwar nur geringfügig, aber kontinuierlich salzarmes Oberflächenwasser auf. Wenn es schließlich über das Bornholmsgatt zwischen der dänischen Insel Bornholm und dem schwedischen Festland ins Bornholmbecken abfließt, hat es sich deutlich verdünnt und schichtet sich seiner Dichte entsprechend in Tiefen zwischen 60 und 80 m so ein, dass das darunter liegende Wasser schwerer und das darüber liegende Wasser leichter ist.

Was ist nun die ökologische Bedeutung dieser Einschichtung in das Bornholmbecken? In den tiefen Becken der zentralen Ostsee sammelt sich alles, was im Wasser absinkt, auch abgestorbenes pflanzliches und tierisches Plankton. Insbesondere nach den Algenblüten - einer saisonal auftretenden massiven Vermehrung von Phytoplankton - sinkt viel totes organisches Material ab und verrottet auf dem Weg zum Meeresboden - ein Prozess, bei dem im Wasser gelöster Sauerstoff

*Die Ostsee ist geschichtet: schweres Salzwasser liegt unter leichtem Brackwasser*

*Auf seinem Weg in die zentrale Ostsee wird der Salzwasserstrom durch Verdünnung immer leichter.*

*Nur mit dem Salzwasserstrom kann lebenswichtiger Sauerstoff in die Becken transportiert werden.*

verbraucht wird, so dass sich in Tiefen unter 60 m schnell ein Sauerstoffmangel einstellt. Dadurch ist zum Beispiel die Entwicklung von Dorscheiern, die typischerweise in diesen Tiefen im Wasser schweben, akut gefährdet. Da die stabile Schichtung des Ostseewassers die Sauerstoffzufuhr aus dem gut durchlüfteten Oberflächenwasser verhindert, ist die einzige Möglichkeit den Bereich unter 60 m mit Sauerstoff zu belüften, der oben dargestellte Einstrom von salzreichem Nordseewasser, das vor allem im Winterhalbjahr einen hohen Sauerstoffgehalt aufweist. Damit werden die Salzwassereinbrüche zur Lebensader der Bornholmsee.

Je stärker die Verdünnung des Nordseewassers auf dem Weg durch die Arkonasee ist, desto leichter wird das Wasser, und desto weniger tief reicht es in das Bornholmbecken hinab, mit der Folge, dass bei stärkerer Verdünnung auch größere Bereiche des Bornholmbeckens unbelüftet bleiben. Die Frage ist nun, ob im Bereich der Arkonasee durch Verwirbelungen an den Fundamenten von Offshore-Windparks diese natürliche Verdünnung des Nordseewassers spürbar verstärkt und somit die Sauerstoffversorgung der Bornholmsee negativ beeinflusst werden kann. Um diese Frage mit einiger Sicherheit beantworten zu können, müssen sowohl die natürlichen Vermischungs- und Verdünnungsprozesse besser verstanden werden, als auch die Einflüsse der Fundamente von Windkraftanlagen untersucht werden.

Dieser Problematik widmen sich seit Beginn des Jahres 2005 zwei Projekte, die am Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW) koordiniert werden. Die so genannten QuantAS-Projekte (Quantifizierung von Wassermassentransformationsprozessen in der Arkonasee) untersuchen die natürliche (QuantAS-Nat) und die durch Offshore-Windparks (QuantAS-Off) bedingte Vermischung in der Arkonasee. Im Projekt-Konsortium arbeiten neben deutschen auch polnische, schwedische und dänische Meeresforscher zusammen. Auf fünf Schiffsexpeditionen wurden die Salzwasserströme durch die Arkonasee unter die Lupe genommen. Dabei wurde festgestellt, dass der Hauptstrom durch den Öresund nach Passieren der Drogdenschwelle nach Osten abbiegt, um dann entlang der Nordflanke der Untiefe „Kriegers Flak“ ins breite Arkonabecken einzuströmen. Dabei wurden überraschend hohe Strömungsgeschwindigkeiten bis zu 1 m/s (3.6 km/h) gemessen. Damit ist der Salzwasserstrom immerhin fast so schnell wie der Rhein, der in seinem mittleren Abschnitt im Sommer zwischen 3 und 5 km/h erreicht. Der Salzwasserstrom wies eine Dicke von bis zu 10 m auf und war bis zu 10 kg/m<sup>3</sup>

*Kann durch Verwirbelungen zwischen den Pfeilern der Windkraftanlagen ein Verdünnungseffekt eintreten?*

*Der genaue Verlauf des Salzwasserstroms konnte vermessen werden.*

schwerer war als das darüber liegende Oberflächenwasser. Am IOW durchgeführte Computersimulationen für den gesamten Bereich vom Kattegat über die Arkonasee bis ins Bornholmbecken konnten diesen Salzwasserstrom simulieren und damit helfen, seine Dynamik besser zu verstehen.

Wie sich nun Fundamente von Windkraftanlagen auf diese Strömungen auswirken, untersuchen Projektpartner an den Universitäten von Hannover und Rostock. Die Rostocker Kollegen vom Institut für Strömungsmechanik (unter der Leitung von Prof. Alfred Leder) haben in einem Strömungskanal Salzwasserströme im Maßstab 1:100 ein zylindrisches Fundament umströmen lassen. Die Hannoveraner Kollegen (unter Leitung von Prof. Mark Markofsky) führen hoch aufgelöste Computersimulationen dieser geschichteten Zylinderumströmung durch. Durch Vergleich dieser beiden Methoden soll erfasst werden, wie ein Fundament und schließlich ein ganzer Windpark, bestehend aus etwa 80 Einzelanlagen, die Strömung beeinflussen kann. Die vermischende Wirkung eines oder mehrerer Windparks soll dann in ein am IOW entwickeltes Computermodell von der Arkonasee eingebaut werden, so dass die Auswirkungen der Windparks auf die Strömung abgeschätzt werden können. Mit verlässlichen Ergebnissen wird nicht vor Ende des Jahres 2007 gerechnet.

Erste generelle Aussagen sind jedoch schon jetzt möglich. Windkraftanlagen, die in Wassertiefen geringer als 25 m errichtet werden, können die Salzwassereinströme kaum behindern, da diese sich den Talweg durch das Arkonabecken suchen, der sich unterhalb dieser Tiefe befindet. Die zurzeit in der Arkonasee geplanten Windparks (Kriegers Flak und Adlergrund) decken einen Tiefenbereich von 20 m bis 40 m ab, so dass einzelne Fundamente in die Salzwasserströme hereinreichen können. Diese sind jedoch von der Anzahl her so gering, dass eine spürbare zusätzliche Verdünnung unwahrscheinlich ist. Diese Windparks stehen auch etwas abseits des wichtigsten Salzwasserstromes, der nördlich von Krieger Flak entlangfließt. Es sind jedoch auf polnischer, schwedischer und dänischer Seite Windparks geplant, die in der Gesamtheit für eine spürbare zusätzliche Verdünnung des einströmenden Nordseewassers sorgen könnten. Das IOW hat sich mit seinen QuantAS-Projekten zur Aufgabe gemacht, Empfehlungen für die langfristige Standortplanung von Offshore-Windparks zu machen sowie die Kapazitätsgrenzen für die Errichtung von Windparks in der gesamten Arkonasee aufzuzeigen.

*Im Strömungskanal wird getestet, wie die Pfeiler umflossen werden.*

*Erste Ergebnisse: Die in der Arkonasee geplanten Windparks werden die Sauerstoffversorgung der tiefen Bereiche nicht stören, da sie nicht auf dem Weg des Salzwasserstromes liegen.*

# Stickstoff als Lebensspender oder als Problemstoff im Meer

Dr. Maren Voß

Die vier wichtigsten Stickstoffquellen der Ostsee

Niederschläge  
260.000 t/Jahr



Stickstofffixierung  
bis zu 400.000 t/Jahr

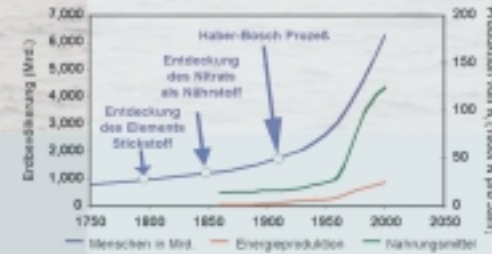


Punktquellen z. B. Industrie-  
anlagen 100.000 t/Jahr



Flußeinträge  
1 Mio t/Jahr

Entwicklung der globalen Produktion reaktiven Stickstoffs ( $N_r$ ) nach Galloway und Carling 2002



Wenn es um die Probleme der Meeresumwelt geht, so ist der Begriff „Eutrophierung“ oder „Überdüngung“ in aller Munde. Aber was verbirgt sich dahinter? Und was meinen die Wissenschaftler zu dieser Problematik in der Ostsee?

Eutroph ist ein Wort aus dem Griechischen (gr. eu = reichlich, trophe = Nahrung), das „gut mit Nahrung versorgt“ bedeutet. Oligotroph (gr. oligos = wenig) hingegen bedeutet, dass eine sehr karge Versorgung mit Nahrung besteht. Wissenschaftler charakterisieren mit diesen Begriffen einen Ernährungszustand von Lebewesen und auch von Ökosystemen. Wenn ein Gewässer eutrophiert ist, enthält es reichlich Nährstoffe, die zu einer hohen Produktion (Wachstum) von Algen und Plankton führen. Das muss erstmal nicht schlecht sein, da dies auch zu hohem Fischreichtum führen kann. In manchen Seen oder in Altarmen von Flüssen kann es außerdem auch auf ganz natürliche Art und Weise zu eutrophen Zuständen kommen. Wenn jedoch Algen und Plankton in so großen Mengen produziert werden, dass bei ihrem Abbau der Sauerstoff eines Gewässers vollständig aufgebraucht wird, dann kann dies zum Tod allen höheren Lebens führen. Muscheln, Würmer und Fische sterben ab und ihr Abbau zehrt weiteren Sauerstoff, bis der faulig riechende Schwefelwasserstoff entsteht. In Nordjütland ist im Sommer 1997 ein ganzer Fjord „umgekippt“ mit genau diesen Folgen.

Unter Nährstoffen verstehen die Meeresforscher dasselbe wie Gärtner und Landwirte – wasserlösliche Nitrat-, Ammonium- und Phosphat-Salze, wie sie von jedem Blumenliebhaber im Garten und auf dem Balkon eingesetzt werden, damit die Pflanzen grünen und blühen. Der Effekt der Düngung ist erst seit Mitte des 19. Jahrhunderts verstanden. Damals fand Justus von Liebig heraus, dass bestimmte Stoffe das Pflanzenwachstum limitieren können, ihre Zugabe auf ausgelaugten Böden jedoch das Wachstum wieder ankurbeln. Trotz dieser bahnbrechenden Erkenntnis kam es in den Jahren danach immer wieder zu Missernten und Hungersnöten, denn natürliche Dünger (Mist und Kompost) waren ein knappes Gut. Das änderte sich erst, als die späteren Nobelpreisträger Fritz Haber (1868-1934) und Carl Bosch (1874-1940) ein Verfahren entwickelten, mit dem sie aus dem unbegrenzt verfügbaren, aber reaktionsträgen Stickstoff der Luft Ammoniak herstellen und in Nitrat umwandeln konnten. Der Kunstdünger, der nun reaktiven Stickstoff ( $N_r$ ) enthält, war somit geschaffen. Diese segensreiche Erfindung und technische Meisterleistung rettete viele

Wenn ein Gewässer eutroph ist, enthält es Nährstoffe im Überfluss.

Durch die Herstellung von Kunstdüngern konnten Hungersnöte verhindert werden. Aber der Einsatz der Nährstoffe lässt sich nicht immer auf die Äcker begrenzen.

*Innerhalb von 50 Jahren  
versiebenfachte sich die  
Menge an Stickstoff, die über  
die Oder in die Ostsee gelangt.*

*Blualgen sorgen auf  
natürlichem Wege für eine  
„Düngung“ der Ostsee.*

*Auch über die Niederschläge  
werden Nährstoffe  
ins Meer eingetragen.*

Menschenleben und erlaubte ein rasches Anwachsen der Bevölkerung (siehe Abbildung), da ausreichend Nahrung auch auf kargen Böden produziert werden konnte. Doch heute wird Kunstdünger in den Industrieländern in so großen Mengen eingesetzt, dass die Böden viel zu viel Stickstoff enthalten. Dieser wird zum großen Teil ausgewaschen und gelangt dann in die Flüsse und Meere. In den Ostseezufüssen wurden ab der Mitte des 20. Jahrhunderts starke Anstiege in den Nährstoffkonzentrationen verzeichnet. Während die Oder im Jahr 1950 noch ca. 10.000 Tonnen Stickstoff pro Jahr mit sich führte, sind es heute über 70.000 Tonnen. Und nicht nur die Oder hat sich so verändert, auch alle anderen Zuflüsse zur Ostsee, die durch dicht besiedeltes und bewirtschaftetes Land fließen, bringen hohe Konzentrationen an Nitrat mit sich. Insgesamt macht die Flusszufuhr in die Ostsee heute bis zu 1.000.000 Tonnen Stickstoff pro Jahr aus.

Weitere Stickstoffquellen der Ostsee sind die Blualgen. Sie entwickeln sich jeden Sommer und sind im Gegensatz zu den allermeisten anderen Phytoplanktonen in der Lage den reaktionsträgen Luftstickstoff aufzunehmen, der dann beim Absterben und der Zersetzung der Organismen als Nitrat die Ostsee auf natürliche Weise zusätzlich düngt. Dies macht im Jahr weitere 300.000 bis 400.000 Tonnen aus. Ihr natürliches Vorkommen in der Ostsee während der letzten 10.000 Jahre ist aus Sedimentuntersuchungen belegt. Ob die Blualgen in ihrer Häufigkeit in den letzten hundert Jahren zugenommen haben ist umstritten.

Als drittgrößte Quelle für Nitrat und Ammonium müssen für die Ostsee die Niederschläge berücksichtigt werden. Durch Regen werden ca. 260.000 Tonnen eingetragen. In den Abgasen von Autos, Haushalten und der Industrie sind stickstoffhaltige Verbindungen, und aus den Tanks mit Gülle entweicht Ammonium in die Luft. Dies alles wird mit dem Regen ausgewaschen. Besonders im Sommer, wenn Nitrat in der Deckschicht der Ostsee knapp ist, kann der Regen einen düngenden Effekt ausüben.

Doch zurück zum landwirtschaftlichen Einsatz von Düngemitteln: die Produktion von pflanzlichen Nahrungsmitteln und von Fleisch verläuft äußerst unrentabel, wenn man sich die Bilanz des Stickstoffeinsatzes und -verlustes ansieht. Von 100 Teilen aufgebrauchten Kunstdünger werden nur 50 von den Pflanzen aufgenommen, während die anderen 50 im Boden bleiben oder ausgewaschen werden. Weitere 20 bleiben als Pflanzenreste nach der Ernte im Boden und ledig-

lich 14 kommen als Nahrung bei uns an. Wird Fleisch verzehrt, ist die Bilanz noch verheerender: von 100 Teilen Stickstoff kommen dann nur 4 beim Konsumenten auf den Teller. Diese sehr grobe Betrachtung verdeutlicht dennoch, dass unsere Ernährung zu enorm hohen Belastungen von Stickstoff in der Umwelt führt. Wir müssten längst eine massive Eutrophierung in jedem Bächlein, Tümpel, See und Meer haben.

Glücklicherweise hält die Natur einen Prozess bereit, der den Haber-Bosch Prozess quasi umzukehren vermag. Dies ist die Denitrifizierung, die Umwandlung von Nitrat zurück in reaktionsträgen Luftstickstoff ( $N_2$ ). Bakterien sind die Organismen, die dies können und dabei noch Energie gewinnen. Allerdings leben sie nur in Böden und Gewässern, die kaum noch Sauerstoff, wohl aber Nitrat enthalten. Weltweit wird durch diesen Prozess ein großer Teil - in Flussmündungsgebieten bis zu 60% - des reaktiven Nitratstickstoffs ( $N_r$ ) in unreaktiven Stickstoff ( $N_2$ ) zurückverwandelt. Die genaue Menge ist unbekannt. Sümpfe, Moore und schlammige Meeresböden sind somit wichtige Orte der Stickstoffumwandlung und werden heute erhalten, da man um ihre Bedeutung weiß. Uferrandstreifen-Programme gehören auch in diesen Katalog von Maßnahmen, um der Eutrophierung der Gewässer entgegenzuwirken. Dort, wo Felder an Gewässer grenzen, soll ein mehrere Meter breiter Streifen Land unbewirtschaftet bleiben, damit dem zum Bach oder Teich hinsickernden nitrathaltigen Wasser in der sauerstoffarmen Zone reaktiver Stickstoff entzogen werden kann.

In den tiefen, sauerstoffarmen Becken der Ostsee, und vermutlich auch in flachen Küstenbereichen, geht auf diesem Wege ein großer Anteil des eingetragenen Nitrats verloren. Man verzeichnet in der zentralen Ostsee seit den 80er Jahren keinen weiteren Anstieg in den Konzentrationen an Nitrat, was auf ein gewisses Gleichgewicht zwischen Einträgen und Verlusten hinweisen könnte. Seit dem EU-Beitritt weiterer Ostseeanrainer kann jedoch mit einer Intensivierung der Landwirtschaft gerechnet werden, wie sie aus anderen EU-Ländern bekannt ist - auch mit ihren negativen Folgen für die Natur. Dies würde die Nährstoffeinträge in die Ostsee weiter erhöhen, weshalb eine sorgfältige Überwachung der Umwelt, wie sie von der HELCOM (Helsinki Kommission zum Schutz der Ostsee) und von dem BSH (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie) in Deutschland betrieben wird, unerlässlich wichtig ist.

*Die Art und Weise unserer  
Ernährung führt zu einer hohen  
Belastung der Umwelt mit  
Stickstoff.*

*Die gute Nachricht:  
mit der Denitrifizierung verfügt  
die Natur über einen Prozess,  
das Haber-Bosch-Verfahren  
umzukehren.*



# Was kriecht denn da? Die unsichtbaren Bewohner des Meeresbodens

Dr. Stefan Forster



Abb. 4  
Saduria - Nachbildung:  
einer der wenigen  
grabenden Krebse  
in der Ostsee

(Quelle: Popszuck)

Abb. 2  
Das ist alles, was man  
von der Sandklaffmuschel  
sieht, wenn sie sich  
eingebuddelt hat (Quelle: Fiedler)



Abb. 1  
Die Große Sandklaffmuschel  
(Nachbildung), rechts mit  
ausgefahretem Siphon

(Quelle: Fiedler)



Abb. 3 Maulwurfskrebse-Weibchen  
in ihrem Wohnbau

(Quelle: Forster)

Kameras und autonome Tauchroboter ermöglichen heutzutage immer mehr und immer bessere Bilder von der Oberfläche des Meeresbodens. Die Organismen aber, die in den weichen Meeresböden, also unterhalb der Sedimentoberfläche leben, entziehen sich weitgehend unserer Betrachtung. Was wir heute von ihnen wissen, basiert oft nur auf indirekten Informationen, wie den Kunstharzausgüssen ihrer Wohngänge, oder auf der Beobachtung von Aquarien-Tieren.

Warum leben Tiere im Sediment und was ist das Besondere daran? Das Leben im Boden bietet im Vergleich zu dem auf der Sedimentoberfläche mehr Schutz vor Räubern. Insbesondere Würmer und kleinere Krebse nutzen diesen Vorteil und bauen sich in weichem Boden zum Teil aufwändige Wohnungen. Andere Tiere buddeln sich ein, um eine feste Position zu haben, von der aus sie Nahrung aus dem vorbeiströmenden Wasser filtrieren können. Ein Beispiel ist die Große Sandklaffmuschel (Abb. 1). Sie sitzt tief im Sediment und steckt lediglich einen langen Siphon, eine Art Schnorchel, zur Meeresbodenoberfläche. Durch diesen saugt sie Wasser an und filtriert die Nahrungsteilchen mit Hilfe ihrer Kiemen aus dem Wasserstrom (Abb. 2). Andere Tiere, zum Beispiel einige Würmer, leiten einen Wasserstrom durch ihre U-förmigen Wohngänge, aus dem sie dann mit Körperanhängen oder Schleimnetzen ihr tägliches Brot herausfiltrieren.

Nahrung findet sich aber nicht nur im Wasser, sondern auch im Boden selbst. All die Reste des im Meer absinkenden Materials, von toten Fischen bis zu lebendigen einzelligen Algen, sammeln sich als Ablagerung in den Sedimenten. Daher lohnt es sich, wühlend und grabend den Meeresboden nach Verwertbarem zu durchsuchen. Manche Tiere sind für diese Tätigkeit besonders ausgerüstet. So gibt es Seeigel mit ganz kurzen Stacheln, die sich wie Bulldozer in 5 - 15 cm Tiefe horizontal durchs Sediment schieben. Mit Hilfe hunderter kleiner Füßchen mit Saugnapfen transportieren sie Korn für Korn aus der Wand vor sich bis nach hinten, wühlen dabei geeignetes Futter aus und hinterlassen im Sediment typische Kriechspuren, die Geologen schon aus Versteinerungen lange verlandeter Ozeane kennen. Diese goldfarbenen Herzseeigel sind 3 - 7 cm groß. Unter einem Quadratmeter Nordseeboden können über 100 Exemplare leben.

Die auffälligste Architektur findet sich bei Maulwurfskrebse, die in praktisch allen schlickigen und sandigen Meeresböden der Welt vorkommen (Abb. 3). Indem sie ihre komplizierten Gänge anlegen, schaffen sie an der Sedimentoberfläche oft

*Manch kleiner Krebs baut sich zum Schutz vor Räubern aufwändige Wohnungen in den Meeresboden.*

*Muscheln wie die Sandklaffmuschel sitzen tief im Sediment und stecken einen Schnorchel zur Oberfläche des Meeresbodens, durch den sie Wasser und Nahrung ansaugen.*

*Der Herzseeigel schiebt sich wie ein Bulldozer durch das Sediment und sortiert dabei feinsäuberlich Essbares von Un genießbarem.*

**Der Maulwurfskrebs legt sich Vorratskammern an, in denen Bakterien ihm die Nahrung aufbereiten.**

bizarre Hügellandschaften. Sie entstehen aus dem Material, das aus den Tiefen des Sedimentes an die Oberfläche befördert wurde. Maulwurfskrebse graben vertikale Gänge, die Kammern verbinden, horizontale Galerien mit blind endenden Vorratskammern, oft auch trichterförmige Öffnungen zum Meeresboden hin, durch die der Krebs ab und zu die Oberfläche besucht. Sie sind fortwährend damit beschäftigt, Sediment zu sortieren und es unterschiedlicher Verarbeitung zuzuführen. Nicht nutzbare Bestandteile werden in einem engen vertikalen Schacht gesammelt und, kurz bevor dieser mit Teilchen verstopft ist, mit starken Schlägen des Schwanzfächers an die Sedimentoberfläche katapultiert. Besonderes Interesse zeigen diese Krebse aber an den organischen Bestandteilen des Sedimentes, die als feine Flocken vorliegen. Beständig wird solches Material aussortiert, mit der großen Schere an die Wände der Gänge gespachtelt oder in Vorratskammern verbracht. Auch an der Oberfläche vorbeidriftende Schnipsel von Seegräsern oder Algen werden in diese Kammern verbracht, in denen auf Grund ihrer Lage tief im Sediment kein Sauerstoff vorhanden ist. Nur unter solchen Bedingungen setzt Gärung ein und es ist anzunehmen, dass die Maulwurfskrebse sich auf diese Weise gezielt der Hilfe von Mikroorganismen bedienen, um durch sie schwer verdauliches Futter aufbereiten zu lassen. Diese Strategie gleicht der eines Gärtners, der Beete anlegt und umsorgt, um möglichst hohe Erträge zu erhalten.

Überhaupt spielt Sauerstoff im Zusammenhang mit dem Leben unter der Sedimentoberfläche eine große Rolle. Normalerweise gibt es im Sediment keinen Sauerstoff zum Atmen. Vergleichsweise viel organisches Material und etwa eine Milliarde Bakterien pro Kubikzentimeter Sediment führen dazu, dass schon wenige Millimeter unterhalb der Meeresbodenoberfläche der Sauerstoff verbraucht ist. Deshalb müssen alle Bewohner des Bodens zur Atmung ihre Gänge wenigstens zeitweise mit frischem sauerstoffhaltigem Wasser spülen. Der Maulwurfskrebs unterlässt dies gezielt und fördert dabei das Wachstum von bestimmten Mikroben und Pilzen in seinen Gärkammern. Aber auch das Gegenteil tritt auf, die gezielte und dosierte Versorgung mit Sauerstoff. Eine kleine Muschel mit dem Namen *Tyasira* trägt auf ihren Kiemen symbiotische Bakterien. Das bedeutet, Bakterien und Muschel leben in einer bestimmten Weise zum gegenseitigen Vorteil zusammen. Die Muschel verdaut regelmäßig einen Teil der Bakterien, ernährt sich also von ihnen. Andererseits versorgt sie die Mikroben mit allem, was diese für ihr Wachstum brauchen. Aus langen Gängen, die in die sauerstofffreien Tiefen des

**Die kleine Muschel *Tyasira* lebt in enger Gemeinschaft mit Bakterien: einerseits versorgt sie sie, andererseits ernährt sie sich von ihnen.**

Sedimentes hineinreichen, pumpt die Muschel gelösten Schwefelwasserstoff heran. Dieser entsteht vor allem dort, wo kein Sauerstoff vorkommt und enthält viel Energie, die bestimmte Bakterien zum Wachstum nutzen können, wenn sie gleichzeitig Sauerstoff zur Verfügung haben. Von der Sedimentoberfläche her versorgt *Tyasira* daher ihre Mitbewohner zusätzlich mit Sauerstoff und hält so ihre Symbionten nicht ganz uneigennützig am Leben.

Die im Meeresboden lebenden Tiere beschleunigen den Abbau der abgesunkenen organischen Stoffe und spielen somit eine ähnliche Rolle wie der Regenwurm in der Humusschicht der Böden auf dem Festland. Besonders hoch ist die Abbauproduktivität dank bakterieller Hilfe im direkten Kontakt zwischen Sedimentoberfläche und Wasser. Alle Gänge und Röhren, die mit frischem Wasser gespült und so mit Sauerstoff versorgt werden, stellen solche oxidierten Grenzflächen bereit, die zusätzlich zur Meeresbodenoberfläche existieren. Wie in einem Tauchsieder die Oberfläche vergrößert wird, um durch eine solche Erweiterung der Kontaktfläche zwischen Wasser und Heizstab die Erwärmung zu optimieren, so bewirken die durch die Bodenbewohner geschaffenen Röhren- und Gangsysteme mancherorts bis zu 5 Quadratmeter zusätzliche Grenzflächen, wo ohne diese Tiere nur 1 Quadratmeter Bodenoberfläche wäre. Auch das Wühlen und Umschichten innerhalb des Sedimentes beschleunigt mikrobielle Abbauprozesse deutlich. Während die Tiere zwischen den Sandkörnern nach verwertbarem Futter suchen oder ein Räuber auf Beutejagd geht, stimulieren sie ständig die überall im Sediment liegenden Bakterien, die die Masse des Abbaus bewerkstelligen, bis nur noch Nähr- und Mineralsalze vorhanden sind, die wieder zum Wachstum von Organismen aufgenommen werden können.

Die Tätigkeit der Tiere im Meeresboden hinterlässt Spuren, wie die bereits erwähnten Spreiten des Herzseeigels. Sogar am Meeresboden der Tiefsee fand man Lebensspuren. Die Tiere, die sie verursacht haben, sind jedoch noch unbekannt. In unserer heimischen Ostsee kann man trotz des oft weichen Untergrundes nicht viele solcher Lebensspuren finden. Der geringe Salzgehalt reduziert die Artenvielfalt auf natürliche Weise und somit haben wir vor unserer Haustür nur wenige grabende Arten. Wir kennen zwar Würmer mit unterschiedlichsten Gangstrukturen, aber keine grabenden Seeigel und nur einen Krebs (*Saduria*, Abb. 4), eine urtümliche Assel, die auf der Suche nach Nahrung die Sandböden der mittleren Ostsee durchwühlt.

**Durch die zahlreichen Grab- und Wohngänge kann die Grenzfläche zwischen Sediment und Wasser um das 5-fache vergrößert werden.**

**Die Ostsee kennt nur wenige grabende Arten - unter anderem eine urtümliche Assel.**

# Ökologische Begleitforschung zur Windenergienutzung im Offshore-Bereich

Dr. Michael Zettler und Dr. Falk Pollehne

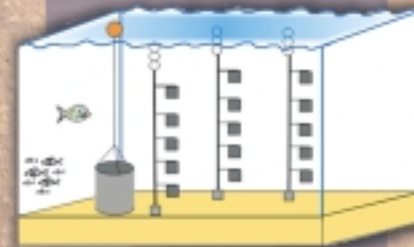
Abb. 1:  
Das Stahlrohrsegment



Abb. 2:  
Auskolkung am Stahlrohr



Abb. 3:  
Schema der Versuchsanordnung:  
links Stahlrohr, rechts Bewuchsleinen  
mit jeweils 5 Stahlplatten



Seit dem Beginn der Planungen von Offshore-Windkraftanlagen werden immer wieder Bedenken laut, dass größere Anlagenfelder negative ökologische Folgen für die marine Umwelt haben könnten. Neben den direkten Auswirkungen durch Betriebsgeräusche und rotierende Teile, die vor allem Vögel, Fledermäuse, Fische und Meeressäuger betreffen könnten, wird auch eine langfristige Wirkung auf die am Boden lebenden Organismen diskutiert. Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) fördert deshalb ein breit angelegtes Projekt, in dem geklärt werden soll, ob das natürliche Umfeld am Fuß solcher Anlagen in Nord- und Ostsee stark verändert wird. Beteiligt sind mehrere Forschungseinrichtungen. Der Gruppe am IOW fiel die Aufgabe zu, den Nahbereich der Windradfundamente in der Ostsee unter die Lupe zu nehmen und dabei mögliche Veränderungen in der Gemeinschaft der größeren Bodenlebewesen (zum Beispiel Muscheln, Seesterne, Krebse) zu erforschen.

Als Modell für den Anlagenfuß wurde ein Stahlrohr mit 2 m Durchmesser benutzt (Abb. 1). Dieser Zylinder wurde in der Ostsee in unmittelbarer Nachbarschaft der Messstation „Darßer Schwelle“ ausgebracht, an der vollautomatisch rund um die Uhr die wichtigsten Umweltparameter wie Wassertemperatur, Strömung, Salzgehalt gemessen werden. Durch diese Positionierung war gegeben, dass die wichtigsten Hintergrundwerte die ganze Zeit über bekannt waren. Folglich waren auch die Hauptströmungsrichtungen im Gebiet bekannt.

Bereits kurze Zeit nach dem Ausbringen des Stahlzylinders kam es zu deutlichen Sedimentumlagerungen, die sich entlang der Hauptströmungsrichtungen orientierten. Parallel zur Strömungsrichtung wurde vor und hinter dem Modell Sediment abgelagert, während es senkrecht dazu, an den Seiten zu 30 bis 40 cm tiefen und bis zu 1 m breiten Auskolkungen (Abb. 2) kam. Die Kolke waren zu Beginn des Experimentes mit Muschelschill bedeckt. Die Schalenreste, die üblicherweise Bestandteile des Sedimentes sind, hatten sich angereichert, nachdem die feineren Bestandteile durch die Strömung wegtransportiert wurden. Nach circa einem Jahr füllten sich die Kolke mit Muschelpaketen, die zu diesem Zeitpunkt aufgrund ihres bis dahin angewachsenen Gewichtes von der Wand des Rohres abfielen. Auf den aufgefüllten Kolken siedelten sich Rot- und Braunalgen an. Diese Bereiche stellten offensichtlich attraktive Besiedlungsräume für eine Reihe von anderen Organismen dar. Wir konnten

*Das Bundesumweltministerium wollte wissen, welche Auswirkungen Windräder auf die Gemeinschaft der Bodenlebewesen haben.*

*Durch die Strömung am Boden entstehen am Fuß der Anlage einerseits tiefe Kolke, andererseits Sedimentablagerungen.*

also eine deutliche Veränderung im Nahbereich der Mastfüße feststellen, die auf die Wirkung veränderter Strömungsverhältnisse zurückzuführen war, ohne dass dadurch jedoch eine Verschlechterung der ökologischen Gegebenheiten eingetreten war.

Parallel zu den Veränderungen am Boden wurde auch untersucht, wie die Besiedlung der Windradfundamente aussehen könnte. Dazu waren neben der Stahlrohr-Konstruktion, die als Modell für den Pfeiler diente, in verschiedenen Wassertiefen Eisenplatten montiert worden, die die sukzessive Besiedlung durch Makrofauna erfassen sollten (Abb 3).

Unmittelbar nach Ausbringen des Stahlrohrs begann dessen Bewuchs. Die Artenvielfalt erreichte im Oberflächenwasser (5 bis 8 m Wassertiefe) schon nach 6 Monaten ein Plateau bei 10 Arten, während in den tieferen Wasserschichten bis zum Ende der Untersuchungen nach 470 Tagen die Artenzahl weiter anstieg. Bei allen Untersuchungsterminen zeigten sich die bodennahen Wassertiefen (14 bis 19 m) als die artenreichsten. Insbesondere dort nahm die Artenzahl über die Zeit rasant zu und lag nach einem Jahr zwischen 25 und 30.

Die Anzahl der Individuen verhielt sich konträr zur Artenzahl und nahm mit zunehmender Wassertiefe ab. Es wurden nicht zum Ende sondern zur Mitte des Untersuchungszeitraumes die höchsten Werte beobachtet. In fast allen Wassertiefen kam es nach 246 Tagen zu einer Verdoppelung bis Verdreifachung der Dichten. Zum Ende der Untersuchungsperiode (nach 470 Tagen Exposition) fiel die Anzahl der Individuen in den meisten Wassertiefen unter die des Anfangswertes. Es wird vermutet, dass die Abnahme nach einem Jahr auf das Abfallen und Zubodensinken des besiedelten Wandbelags zurückzuführen ist.

Die Biomasse - also das gesamte organische Material - erreichte in fast allen Wassertiefen bereits nach der Hälfte des Untersuchungszeitraumes die „Endgröße“. Nur im Flachwasser (5 m) kam es noch zu einer starken Zunahme gegen Ende des Untersuchungszeitraumes.

Eine zweite Untersuchung, bei der die Bewuchsplatten im Winter ausgebracht wurden, zeigte deutlich, dass die beobachteten Prozesse dann noch wesentlich schneller ablaufen können: Liegt die Initialphase im Winterhalbjahr, ist, begünstigt durch die Haupt-Reproduktionszeiten der dominanten, benthischen Orga-

nismen, noch schnellerer Bewuchs zu erwarten. Bereits nach 177 Tagen erreichte die Biomasse Werte, wie sie zur Sommerexposition erst nach ca. einem Jahr zu beobachten war.

In den Jahren 2003 und 2004 lag die Biomasse (Frischgewicht) an der Station „Darßer Schwelle“ im Weichboden bei durchschnittlich 140 g/m<sup>2</sup>. Vergleicht man die Werte mit den am Stahlrohrsegment ermittelten Biomassen, so wird die Dimension der Zunahme sehr deutlich. Durch die eingebrachten Hartsubstrate wurden Siedlungsstrukturen für viele epibenthische Organismen geschaffen. Die Zunahme der Biomasse hat einen Vergrößerungsfaktor von 14 bis 140. Das bedeutet, dass nach Ausbringung der Fundamente die Sekundärproduktion und auch die Akkumulation der Biomasse im Gebiet um ein Vielfaches höher liegt als vorher.

Wenn man die Berechnungen der Biomasseentwicklung an den Bewuchsplatten und dem Stahlrohrsegment heranzieht, so ergibt sich für ein Rohr von 2 m Durchmesser über die gesamte 20 m Wassersäule eine Biomasseproduktion (Feuchtmasse) von 150 kg nach 143 Tagen und von 1.6 Tonnen nach 246 bzw. 470 Tagen. In unterschiedlichen Wassertiefen variierte der Aufwuchs allerdings beträchtlich. Die größten Produktionsraten fanden sich in geringer Wassertiefe. Hier wird der Bewuchs der Pfeiler am intensivsten sein. Geht man davon aus, dass ein Windkraftfundament von etwa 3fach größerem Ausmaß und ein Windkraftfeld 100 Windräder hat (die Planungen in der Ostsee liegen zwischen 20 und 400), dann werden je Feld rund 500 Tonnen Biomasse zusätzlich produziert.

Was zuerst einmal positiv klingt, kann sehr ernste Folgen haben, denn der Bewuchs wird aufgrund seines Gewichtes regelmäßig von den Wänden des Pfeilers abfallen. Geschieht dies nur einmal im Jahr, werden pro Windfeld auch ungefähr 500 Tonnen Biomasse punktuell ins Sediment gebracht, wo durch die Zersetzung Sauerstoff verbraucht wird. Ob dies großräumige Sauerstoffdefizite auslösen kann, ist noch offen. Eine Kettenreaktion durch die Vergiftung der Bodenfauna durch Schwefelwasserstoff, der sich bei völligem Sauerstoffmangel bildet, ist jedoch durchaus im Bereich des Möglichen. Diese Problematik soll mit einem flächenbezogenen Forschungsansatz weiter verfolgt werden.

*Schon nach 6 Monaten war das Stahlrohr mit allen Hauptgruppen des Benthos besiedelt.*

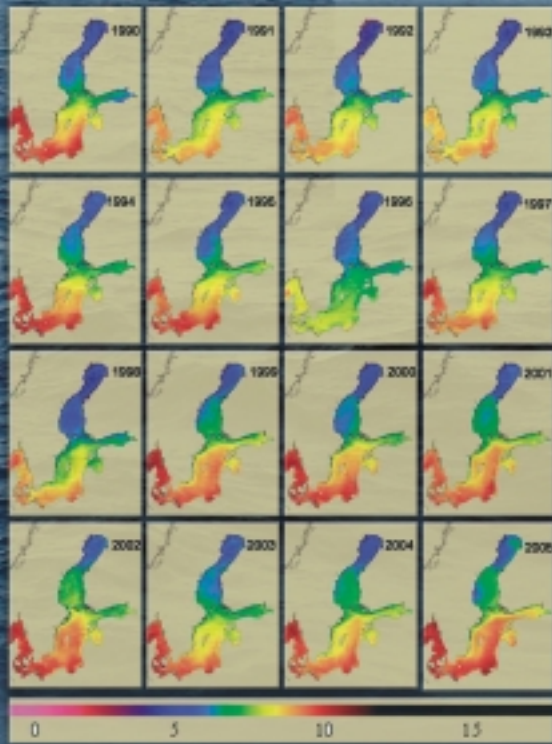
*Bei einer Anlage von 100 Windrädern könnten durch den Bewuchs bis zu 500 Tonnen zusätzlicher Biomasse entstehen.*

*Wenn der Bewuchs zu schwer wird und abfällt, entstehen lokale „Verrottungsinseln“, die zur Vergiftung der Bodenfauna führen könnten.*

*Bringt man die Bewuchsplatten im Winter aus, so vollzieht sich die Besiedlung noch schneller.*

# Die Entwicklung der Badewassertemperatur (Wasser- oberflächentemperatur) der Ostsee seit 1990

Dr. Herbert Siegel



Jahresmittel der Wasser-  
oberflächen-  
temperatur der Ostsee für die Jahre  
1990 bis 2005 berechnet auf der Basis  
von ca. 30.000 Satellitenaufnahmen.  
Die Farbskala zeigt die  
Temperaturzuordnung  
zu den Farben.

Monatsmittelwerte der Wasser-  
oberflächentemperatur  
der Ostsee im August der Jahre 1990 - 2004



Global change - der globale Klimawandel - ist gegenwärtig ein breit untersuchtes und viel diskutiertes Thema. Und dabei handelt es sich um kein einfaches Forschungsobjekt, schließlich setzt sich unser Klimasystem aus 5 Hauptbestandteilen zusammen (Atmosphäre, Hydrosphäre, Kryosphäre = eisbedeckte Erdoberfläche, Landoberfläche und Biosphäre), die alle betrachtet werden müssen und die außerdem miteinander in Wechselwirkung stehen.

Um das Klima und seine Änderungen beschreiben zu können, müssen bestimmte Umweltvariablen kontinuierlich und über lange Zeiträume gemessen werden. Zu diesen Größen gehören neben der Luft- und Wassertemperatur Wind, Niederschlag, Wolkenbedeckung und Solarstrahlung. Während das Wetter die aktuellen Schwankungen des Zustandes der Atmosphäre in einem bestimmten Gebiet beschreibt, ist das Klima eine statistische Beschreibung des mittleren Zustandes und der Veränderlichkeit der relevanten Messgrößen über einen bestimmten Zeitraum. Klimaänderungen können durch natürliche interne Prozesse (Luftdruckverschiebungen), durch externe Antriebe wie Vulkanausbrüche (veränderte Sonneneinstrahlung durch vulkanische Aschen in der Atmosphäre) und solare Veränderungen (Sonnenfleckenaktivitäten), aber auch durch anhaltende anthropogene Änderungen im Aufbau der Atmosphäre (Treibhausgase) oder in der Landnutzung (Abholzung der Regenwälder) hervorgerufen werden.

Eine der wichtigsten und meist verwendeten Variablen zur Beschreibung des Klimas ist die Temperatur. Die globale Oberflächentemperatur ist der Mittelwert der Wasseroberflächentemperatur der Ozeane und der Oberflächenlufttemperatur über Land, gemessen 1.5 m über dem Boden. Untersuchungen zur globalen Oberflächentemperatur haben gezeigt, dass sich die Erde gegenwärtig in einer Erwärmungsphase befindet, die in den 1970er Jahren begann. Dabei hat sich die nördliche Hemisphäre mit ca. + 0.7 °C stärker erwärmt als die südliche. Zuvor gab es schon eine Erwärmungsphase zwischen 1920 und 1940. 2005 war nach Untersuchungen der NASA das wärmste Jahr seit mehr als 100 Jahren.

Die globale Erwärmung hat weit reichende Auswirkungen. Eine der Folgen ist das Abschmelzen der Gletscher und polaren Eiskappen, was unter anderem für den weltweiten Meeresspiegelanstieg verantwortlich ist. Die Gletscher der Alpen verloren im Zeitraum 1850 bis 1980 ca. ein Drittel ihrer Fläche und die Hälfte ihrer Eismasse. Der Rest schrumpfte bis 2000 noch einmal um ca. 30 %. In der Arktis

*Klimaänderungen können viele Ursachen haben.*

*Die meist verwendete Größe zur Beschreibung des Klimas ist die Temperatur.*

*Auch an der Tier- und Pflanzenwelt geht die Erwärmung nicht spurlos vorbei.*

reduzierte sich die Eisbedeckung zwischen 1978 und 2003 um 7 % und die Eisdicke um 40 %. Der Meeresspiegelanstieg an den europäischen Küsten seit 1990 liegt zwischen 0.8 und 3 mm/Jahr.

Aber auch an den Pflanzen und Tieren im Meer und an Land geht die Erwärmung nicht folgenlos vorbei: In der Arktis verringert sich der Lebensraum der Eisbären. Im Nordatlantik und in der Nordsee hat sich in den letzten Jahren die Phytoplankton-Biomasse erhöht und die Wachstumsperiode verlängert. Auch die Entwicklung des Zooplanktons setzt seitdem ca. 4-5 Wochen früher ein. Im Atlantik breiteten sich in den letzten 30 Jahren bestimmte Zooplanktonarten rund 1.000 km weiter nach Norden aus. Auf dem Festland verlagerte sich das Pflanzenwachstum weiter in die Berge und die Wachstumsperiode verlängerte sich um 10 Tage.

Doch nun zur Ostsee: Die Entwicklung der Wassertemperaturen in der Ostsee in den letzten 100 Jahren ist durch kältere und wärmere Phasen gekennzeichnet. Eine erste Erwärmungsphase begann 1920 und erreichte ihr Maximum um 1940. Eine zweite Phase begann Ende der 1980er Jahre. Diese Erwärmungsphase dauert bis in die Gegenwart an. Das bedeutet nicht, dass sich die Temperaturen kontinuierlich erhöht haben. Der Trend ist vielmehr von starken zwischenjährlichen Variationen überlagert. In diese Zeit ab 1990 fallen für Warnemünde die 7 wärmsten Sommer der letzten 60 Jahre.

Seit 1990 stehen auch Satellitendaten der Wasseroberflächentemperatur zur Verfügung, die es nun gestatten, die Entwicklung nicht nur an einzelnen Positionen oder Wetterstationen zu studieren, sondern die Ostsee in ihrer Gesamtheit in diese Betrachtungen einzubeziehen. Die Daten werden von amerikanischen Wettersatelliten aufgenommen und erfassen mehrfach täglich die gesamte Ostsee mit einer Auflösung von 1x1 km. Nur bei Wolkenbedeckung können diejenigen Satellitensensoren, die im infraroten Spektralbereich arbeiten, die Wasseroberfläche nicht erfassen. Die Auswertung dieser Daten, in die ca. 30.000 Satellitenszenen eingeflossen sind, hat gezeigt, dass sich die Oberfläche der gesamten Ostsee im Jahresmittelwert in den letzten 16 Jahren um rund 0.8 °C erwärmt hat.

Starke zwischenjährliche Variationen traten in allen Regionen der Ostsee auf. Kältere Jahre waren die frühen neunziger Jahre und das Jahr 1996, in dem der strengste Winter in der südlichen Ostsee seit 1990 registriert wurde. Die Jahresmitteltemperaturen der zentralen Ostsee lagen in diesen Jahren zwischen 8 und

9 °C. Die Jahre ab 1999 gehörten dann hinsichtlich der Jahresmitteltemperatur der Ostsee zu den wärmsten der letzten 16 Jahre. In den wärmsten Jahren (2005, 2002, 1999 und 1994) lagen die Temperaturen in der zentralen Ostsee zwischen 9 und 10 °C. Der Mittelwert der gesamten Ostsee war für den Untersuchungszeitraum 7.37 °C. Das Minimum wurde im Jahr 1996 mit 6.55 °C beobachtet. Im wärmsten Jahr 2005 lag die mittlere Temperatur der Ostsee bei 8.15 °C. Die globale Aussage trifft also auch auf die Wasseroberflächentemperatur der Ostsee zu.

Diese Temperaturentwicklung war saisonal und regional sehr unterschiedlich. Der positive Trend bei der Jahresmitteltemperatur wird in der Ostsee hauptsächlich durch die Anstiege der Temperatur im Sommer und Herbst bestimmt. Nach dem wärmsten Winter 1990 und den warmen Wintern 1989 und 1988 ist besonders in den Monaten Februar und März ein leichter negativer Trend zu verzeichnen, d. h. die Winter wurden in den letzten 16 Jahren geringfügig kälter.

Deutliche regionale Unterschiede zeigten sich in den Sommermonaten. In der nördlichen Ostsee war die Zunahme der Wasseroberflächentemperatur stärker ausgeprägt als in den südlichen Bereichen. Der maximale Anstieg wurde für Juli im Bottnischen Meerbusen mit + 0.3 °C pro Jahr bestimmt. Über den Untersuchungszeitraum bedeutet das eine Zunahme von mehr als 4 °C. Die höchsten Wassertemperaturen des Jahres sind im Monatsmittel gewöhnlich im August in der zentralen Ostsee zu beobachten. Sie erreichten in den wärmsten Jahren wie zum Beispiel 2002 Werte über 23 °C.

Die Zunahme der Wasseroberflächentemperatur im Sommer hat für den Touristen nicht nur angenehme Seiten. Sie unterstützt auch die Entwicklung der für den Sommer typischen Blaualgen in der Ostsee. Bei ruhigem Sommerwetter, bei dem sich das Wasser besonders schnell aufheizt, schwimmen diese Algen auf und sammeln sich in regelrechten Teppichen an der Meeresoberfläche. Dies passiert hauptsächlich in der zentralen Ostsee, wo es den Badeurlauber nicht stört. Werden sie jedoch durch Oberflächenströmungen an die Küste getrieben, so kann das Strandleben empfindlich gestört werden. Wer will schließlich in einer gelblich-braunen Algensuppe schwimmen?

Abschließend muss angemerkt werden, dass die 16 Jahre, die hier erfasst wurden, in klimatologischer Sicht nur ein kleines Zeitfenster darstellen. Die Daten fügen sich jedoch gut in die Ergebnisse globaler Betrachtungen ein.

*Die höchste Jahresmitteltemperatur im Oberflächenwasser der Ostsee wurde im Jahr 2005 erreicht und betrug 8,15 °C.*

*Im Bottnischen Meerbusen wurden die größten sommerlichen Temperaturanstiege verzeichnet.*

*Für den Touristen sind diese Temperaturanstiege nicht nur positiv.*

*Satellitendaten zeigen, dass sich das Oberflächenwasser der Ostsee im Jahresmittel in den letzten 16 Jahren um ca. 0,8 °C erwärmt hat.*