

KLIMAWANDEL UND MARINE ÖKOSYSTEME

Meeresschutz ist Klimaschutz

Impressum

Herausgeber: Umweltbundesamt

Postfach 14 06

06844 Dessau-Roßlau

Telefax: (0340) 21 03 22 85

E-Mail: info@umweltbundesamt.de

Internet: www.umweltbundesamt.de

Redaktion: Fachgebiet II 2.3 Meeresschutz

Stand: Juni 2009

Gestaltung: Umweltbundesamt

Titelbild: Ulrich Claussen, Umweltbundesamt

Gedruckt auf Recyclingpapier aus 100% Altpapier.

KLIMAWANDEL UND MARINE ÖKOSYSTEME

Meeresschutz ist Klimaschutz

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	3
2	Marine Ökosysteme	4
3	Folgen des Klimawandels für die marinen Ökosysteme	7
	3.1 Anstieg der Wassertemperaturen und Veränderung der Meeresströme	8
	3.1.1 Beispiele für direkte Wirkungen	9
	3.1.2 Beispiele für indirekte Wirkungen	12
	3.1.2.1 Arealverschiebungen und Entkopplungen	12
	3.1.2.2 Einwanderung nicht heimischer Arten	14
	3.2 Rückgang des Meereises	18
	3.3 Anstieg des Meeresspiegels	21
	3.4 Versauerung	24
	3.4. Wirkungen auf Meeresorganismen	25
	3.4.2 Auswirkungen auf kalkbildende Organismen	25
4	Welche Folgen hat die durch den Klimawandel verursachte Veränderung von Meeresökosystemen auf die Nutzung des Meeres?	29
	4.1 Fischerei	29
	4.1.1 Nordsee	31
	4.1.2 Ostsee	33
	4.2 Tourismus	35
	4.2.1 Quallenplagen	35
	4.2.2 Algenblüten und Fischsterben	37
	4.2.3 Korallensterben	39
	4.3 Gesundheit	40
	4.4 Naturstoffforschung	40
5	Abschließende Bemerkungen	42
6	Literaturverzeichnis	44
7	Glossar	54

1 EINLEITUNG

Die Weltmeere bedecken 71 Prozent der Erdoberfläche. Sie beherbergen circa 230.000 Arten in einer Vielzahl von Lebensräumen, die sich von den flachen Küstenstreifen bis in die Tiefsee erstrecken.

Die Meere haben vielfältige Funktionen: Sie sind Nahrungsquelle für Mensch und Tier, sie regulieren den Klima-, Temperatur-, Kohlendioxid- und Sauerstoffhaushalt der Erde, sie bergen Energieressourcen (wie Öl, Gas oder Wellen und Strömung), sie sind Rohstoffquelle (zum Beispiel Manganknollen, Erzschlämme, Sand oder Kies), Lieferanten für Naturheilstoffe und Grundstoffe für Arzneimittel sowie Kosmetika. Die Meere sind Transportweg für die Seeschifffahrt und wichtig als Erholungsräume für den Menschen.

Die intensive Nutzung durch den Menschen birgt große Gefahren für die Meeresökosysteme: Überfischung, Einträge gefährlicher Stoffe, Überdüngung und Einschleppung fremder Arten führen zu Verlusten empfindlicher Arten und Lebensräume. Zunehmend leiden die Meere auch unter den Folgen des Klimawandels.

Der Klimawandel verändert unsere Meere. Neue wissenschaftliche Erkenntnisse machen deutlich, dass die oberen Wasserschichten sich immer mehr erwärmen, der Meeresspiegel steigt und die Meere versauern. Die verursachten Veränderungen und Schäden für die Meeresumwelt und die Küsten sind mit erheblichen Folgen für den Menschen verbunden.

Ziel dieses Berichtes ist es, die wesentlichen Zusammenhänge zwischen der Veränderung des Klimas und der Meeresökosysteme deutlich zu machen. Dabei stehen insbesondere die neuen Erkenntnisse zu Erwärmung, Meeresspiegelanstieg, Versauerung sowie zu den Wirkungen dieser Faktoren auf marine Ökosysteme und deren Nutzung durch den Menschen im Vordergrund. Eine wichtige Quelle dieses Berichtes ist das Sondergutachten des Wissenschaftlichen Beirates der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) „Die Zukunft der Meere – zu warm, zu hoch, zu sauer“ (2006) [1], ergänzt um aktuelle nationale und internationale Forschungsergebnisse. Einen weiteren Beitrag liefert ein im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) erstelltes Gutachten zum Thema „Konsequenzen des Klimawandels für die Biodiversität der Meere“ der Biologischen Anstalt Helgoland (BAH) des Alfred-Wegener-Instituts für Polar- und Meeresforschung (AWI) [2]. Der Fokus dieses Berichtes liegt auf den deutschen Meeresgewässern, gleichwohl sind Erkenntnisse über andere Meeresgebiete einbezogen.

2 MARINE ÖKOSYSTEME

Seit dem Jahr 2000 läuft die ozeanische Bestandsaufnahme „Census of Marine Life“, in der mehr als 2.000 Fachleute aus 80 Ländern die derzeit rund 230.000 bekannten Arten von Meereslebewesen erfassen und der Öffentlichkeit zugänglich machen wollen. Das zu diesem Zweck eingerichtete Online-Verzeichnis „World Register of Marine Species“ umfasst bisher 122.500 verifizierte Arten [3]. Wie viele Arten es in unseren Weltmeeren tatsächlich gibt, ist noch unbekannt. Während die küstennahen Gebiete der Ozeane relativ gut untersucht sind, ist die Tiefsee unter 2.000 Metern (m) bisher noch weitgehend unerforscht, da sie nur schwer und mit sehr kostspieligen Methoden zugänglich ist. Taxonomen schätzen, dass mindestens eine Million marine Arten existieren; die obere Grenze können sie aber nicht beziffern.

Die biologische Vielfalt eines marinen Lebensraums ist das Resultat einer Vielzahl von Umweltfaktoren sowie Interaktionen zwischen den Organismen. Die Biodiversität innerhalb eines Gebietes ist deshalb selten eine feste Größe, sondern sowohl kürzer- (zum Beispiel jahreszeitlichen) als auch längerfristigen Zyklen unterworfen [4]. Abiotische und biotische Faktoren bestimmen direkt oder indirekt die räumliche Verbreitung verschiedener Organismen [5].

Zu den **abiotische Faktoren** zählen unter anderem Strahlung (Licht), Temperatur, Salzgehalt (Salinität) und Nährstoffkonzentrationen im Wasser. Diese Fakto-

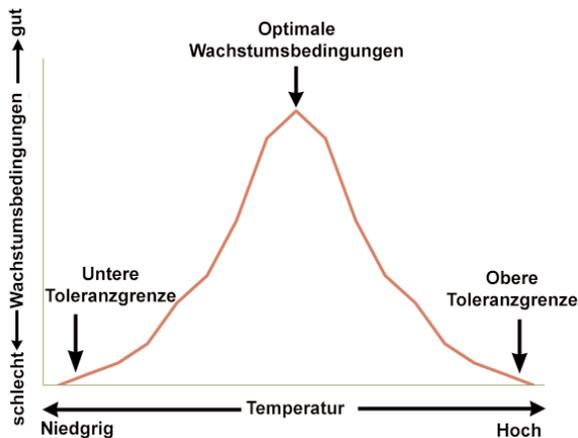


Abb. 1: Graphische Darstellung der Toleranz von Organismen gegenüber Umweltfaktoren, zum Beispiel Temperatur. Für jede Art gibt es einen Bereich, in dem für sie optimale Bedingungen für Wachstum und Fortpflanzung herrschen. Außerhalb dieses Bereichs ist ein Überleben möglich, solange die oberen und unteren (physiologischen) Toleranzbereiche nicht über- oder unterschritten werden (Quelle: [2]).

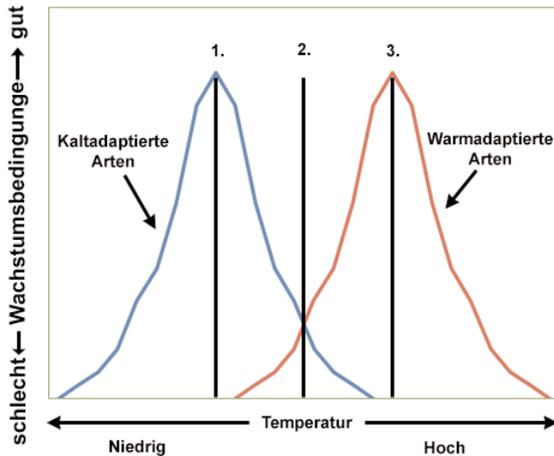


Abb. 2: Graphische Darstellung des Einflusses von Umweltfaktoren auf die Wachstumsbedingungen verschiedener Arten: Die Kurven repräsentieren die Toleranzen zweier Arten gegenüber dem Faktor Temperatur. Im Bereich der Linie 1 und 3 kann jeweils nur eine Art überleben. Linie 2 zeigt den Temperaturbereich, in dem beide Arten überleben können (Quelle: [2]).

ren können unmittelbare physische und damit Konsequenzen für die Entwicklung des Organismus haben (siehe Abb. 1).

Höhere Temperaturen können zum Beispiel erhöhte Stoffwechselraten bewirken, die Sauerstoffaufnahme und dessen Transport beeinträchtigen [6] oder eine Verminderung der Reproduktion verursachen. Die physiologischen Toleranzen verschiedener mariner Arten gegenüber diesen Faktoren variieren erheblich (zum Beispiel bei Austern hoch [7], Fischen niedrig [8]). Im schlimmsten Fall führt ein Unter- oder Überschreiten des Toleranzbereichs zum Tode. Zuvor kann es jedoch bereits zu einem abweichenden Verhalten oder veränderten Fortpflanzungsraten kommen, wodurch die Populationsgröße einer Art beeinflusst werden kann.

Wegen der verschiedenen Toleranzbereiche können in einem Gebiet sowohl optimal angepasste Arten leben als auch solche, die sich in Bezug auf einen bestimmten Umweltfaktor an ihrem oberen oder unteren Limit befinden (siehe Abb. 2). Arttypische physiologische Toleranzbereiche tragen entscheidend zur räumlichen Begrenzung von Lebensräumen verschiedener Arten und damit zur Ausbildung biogeografischer Zonen mit typischen Artengemeinschaften bei.

Neben den abiotischen Faktoren kommt auch den Wechselbeziehungen zwischen den einzelnen Arten und zwischen Artgenossen innerhalb eines Ökosystems, nämlich den **biotischen Faktoren**, eine große Bedeutung zu. Arten einer Lebensgemeinschaft existieren nicht unabhängig voneinander, sondern sind mehr oder weniger stark von einander abhängig.

Bekannte Wechselbeziehungen sind:

- ▶ Konkurrenzverhalten (innerhalb einer Art oder zwischen Individuen zweier Arten) für begrenzte Ressourcen und
- ▶ Räuber-Beute Beziehungen, die zur Ausbildung von Nahrungsnetzen führen.

Marine Nahrungsnetze enthalten eine Vielzahl von Organismen, die nach ihrer Funktion und/oder Größe in mehrere Gruppen eingeteilt sind. Die Basis des marinen Nahrungsnetzes bildet das Photosynthese betreibende Phytoplankton (Primärproduzent), welches wiederum einer Vielzahl von Sekundärproduzenten, wie zum Beispiel Zooplankton, Fischen und marinen Säugetieren, als Nahrungsgrundlage dient. In Abbildung 3 ist ein vereinfachtes marines Nahrungsnetz dargestellt.

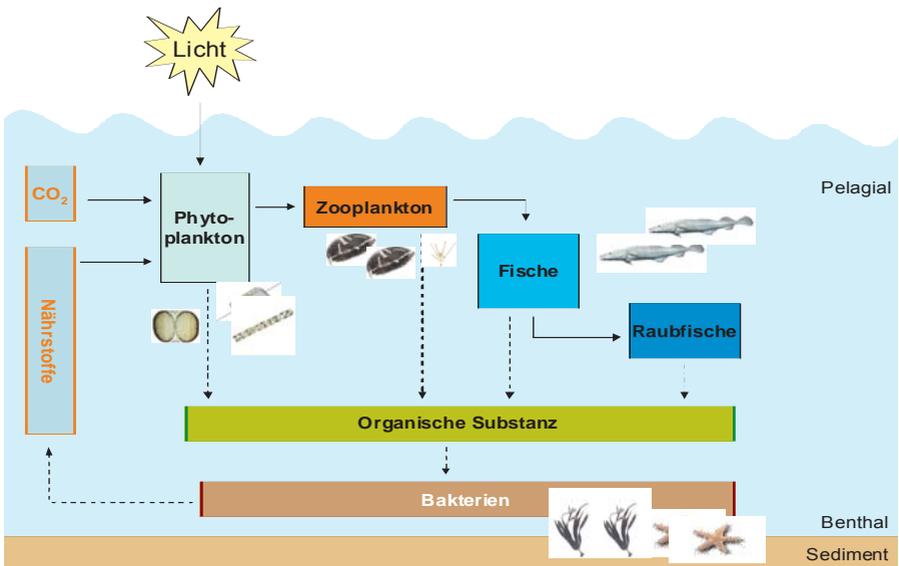


Abb. 3: Darstellung eines vereinfachten marinen Nahrungsnetzes. Die durchgehenden Pfeile zeigen die Fraßbeziehungen zwischen den Organismengruppen, die gestrichelten Pfeile zeigen den „Rückfluss“ von Nährstoffen (Quelle: verändert nach [2]).

Das Zusammenspiel abiotischer und biotischer Faktoren ist für die Dynamik der Nahrungsnetze entscheidend. So bestimmen zum Beispiel für photosynthetisch aktive Organismen, wie Phytoplankton, die Wassertemperatur und die Sonneneinstrahlung bestimmt ausschlaggebend die jahreszeitlichen Wachstumsphasen (beispielsweise Frühjahrsblüten) [9]. Diese dienen dem Teil des Zooplanktons, der sich von Pflanzen ernährt, als Nahrungsgrundlage, welches wiederum als Nahrung für zum Beispiel Fischlarven dient. Der zeitliche Ablauf des Auftretens und die Abundanz der Arten in einem Nahrungsnetz sind also sowohl an ihre physikalische und chemische Umwelt angepasst als auch durch andere im Nahrungsnetz lebende Organismen beeinflusst.

3 FOLGEN DES KLIMAWANDELS FÜR DIE MARINEN ÖKOSYSTEME

Bereits heute sind weltweit vielfältige Klimaänderungen zu beobachten. So ist die globale Jahresmitteltemperatur seit Beginn des 20. Jahrhunderts um $0,74\text{ }^{\circ}\text{C}$ angestiegen, im Wesentlichen als Folge des verstärkten Ausstoßes von Treibhausgasen wie Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4) und Lachgas (N_2O). Die globale atmosphärische Konzentration des wichtigsten anthropogenen Treibhausgases CO_2 stieg beispielsweise von einem vorindustriellen Wert von etwa 280 ppm (parts per million) auf 379 ppm im Jahre 2005. Zurückzuführen ist dies vor allem auf den Verbrauch fossiler Brennstoffe und auf Landnutzungsänderungen. Der weltweite Anstieg der Konzentrationen von Methan und Lachgas wird primär durch die Landwirtschaft verursacht [10].

Der Anstieg der anthropogenen Treibhausgaskonzentrationen verändert die Meeresumwelt in vielfältiger Weise (siehe Abb. 4).

Die durch den globalen Klimawandel in marinen Ökosystemen hervorgerufenen Veränderungen sind bereits heute zu beobachten und umfassen das gesamte Spektrum physikalischer (Wassertemperatur, Salzgehalt, vertikale Schichtung, Durchmischung, Strömungen etc.), chemischer (Gaslöslichkeit, pH-Wert, Nährstoffe) und biologischer Faktoren (Nahrungsnetz, Auftreten invasiver, das heißt nicht heimischer Arten, Verlust heimischer Arten).

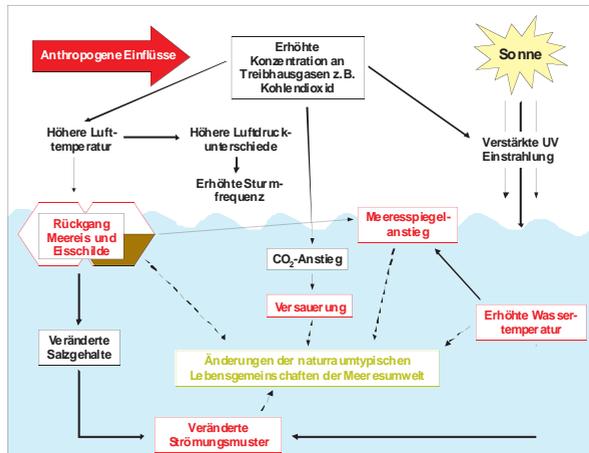


Abb. 4: Schematische Darstellung der wichtigsten Wirkungen des Klimawandels auf die Meere (Quelle: verändert nach [2]).

Von wenige Mikrometer (?m) großen Bakterien und frei schwebenden Algen (Phytoplankton), über Fische bis hin zu Robben sind alle Bewohner unserer Meere Bestandteil des marinen Nahrungsnetzes. Jede Gruppe spielt eine entscheidende funktionelle Rolle im komplexen marinen Ökosystem. Jede Veränderung bei einer Art hat folglich mit hoher Wahrscheinlichkeit auch Auswirkungen auf die anderen Mitglieder des Nahrungsnetzes. Die Auswirkungen veränderter klimatischer Bedingungen in den Ozeanen werden über das Nahrungs-

netz sozusagen „von unten nach oben“ (vom Plankton, über Fische, hin zu den Seevögeln) als „bottom-up“-Effekt weitergeben.

Im Folgenden finden sich beispielhaft für die wichtigsten Klimafaktoren bereits heute beobachtbare Effekte des Klimawandels auf die Verbreitung mariner Organismen und die Artenzusammensetzung der Meeresökosysteme.

3.1 Anstieg der Wassertemperaturen und Veränderung der Meeresströme

Die Wassertemperaturen beeinflussen das Leben im Meer sowie die Löslichkeit des Kohlendioxids im Wasser. Sie verändern die Dichte des Meerwassers und beeinflussen dadurch die Strömungen und den Meeresspiegel.

Auf Basis weltweiter Temperaturmessdaten rekonstruierten Levitus et al. (2005) den Zeitverlauf des Wärmegehalts der Weltmeere von 1955 bis 1998 und belegten damit einen signifikanten Anstieg der Wärmemenge im Meer [11]. Auch der 4. Sachstandsbericht des Klimarates der Vereinten Nationen, dem Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), stellte fest, dass die durchschnittliche Temperatur des Weltozeans bis in Tiefen von mindestens 3000 m gestiegen ist und der Ozean mehr als 80 Prozent der dem Klimasystem zugeführten Wärme absorbierte [10]. Das Meer nimmt also den größten Teil der anthropogen erzeugten Wärmeenergie auf.

Laut Boelens et al. (2005) stieg die Temperatur mariner europäischer Gewässer seit dem Jahr 1900 um ungefähr 0,8 °C, wobei dieser Anstieg nicht überall gleichmäßig verlief [12]. Auch Kirby et al. (2007) stellten für die Nordsee, beruhend auf Daten der Sir Alister Hardy Foundation for Ocean Science (SAHFOS), eine signifikante Erhöhung der Temperaturen fest. Sie hoben dabei vor allem die milderen Winter in den letzten Jahren hervor [13]. An der Langzeit-Messstation „Helgoland Reede“ stieg die Wassertemperatur an der Oberfläche seit Beginn der Aufzeichnungen im Jahr 1962 um 1,5 °C [2]. MacKenzie und Schiedek (2007) zeigten ähnliche Ergebnisse für vier Nord- und Ostseestationen [14].

Der globale Klimawandel kann auch Meeresströmungen beeinflussen, welche neben der allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre der wichtigste Faktor für den globalen Temperatúraustausch sind. Meeresströmungen spielen eine bedeutende Rolle im Wetter- und Klimageschehen der Erde und sind zudem ein wichtiger Transportweg, beispielsweise für Fischlarven und Larven von Wirbellosen sowie Phytoplankton- und Zooplanktonarten.

Wind, Gezeitenkräfte und Dichteänderungen der Wassermassen, die mit Temperatur- und Salzgehaltsänderungen einhergehen, treiben die Meeresströmungen an. Die ozeanischen Strömungen sind ein erdumspannendes Zirkulationssystem, das „globale Förderband“. In den Polar- und Subpolargebieten, wie dem Europäischen Nordmeer, kühlt das sehr salzhaltige Oberflächenwasser ab, wird schwerer und sinkt in die Tiefe. Dort strömt es als kalte Tiefenströmung (Tiefen-

wasser) nach Süden bis ins Südpolarmeer. Zum Ausgleich strömt von Süden warmes Wasser an der Oberfläche in die nördlichen Breiten.

Der globale Klimawandel beeinflusst die Meeresströmungen, indem er die Dichte des Meerwassers auf zwei Arten verringert: Zum einen führt der Temperaturanstieg des Wassers zu thermischer Ausdehnung, zum anderen verdünnen starke Niederschläge und Schmelzwasser das Meerwasser mit Süßwasser. Eine Beeinträchtigung der Tiefenwasserbildung, das Absinken des Wassers im nördlichen Atlantik, ist dadurch möglich. Trotz in den letzten Jahren zunehmender Forschung über die Wahrscheinlichkeit und möglichen Folgen abrupter Änderungen der Atlantikströmungen gibt es bisher kaum gesicherte Erkenntnisse und viele offene Fragen.

Wie die Erwärmung der Ozeane das Leben der Meeresorganismen direkt und/oder indirekt beeinflussen kann, erläutern wir beispielhaft im Folgenden.

3.1.1 Beispiele für direkte Wirkungen

a) Fische

An der Aalmutter (*Zoarces viviparus*), einem standorttreuen Fisch des Wattenmeers, untersuchten Fachleute des Alfred-Wegener-Instituts die Beziehungen zwischen der saisonalen Entwicklung der Wassertemperatur und der Bestandsdichte der Tiere. Durch den Vergleich ökologischer Felddaten mit Untersuchungen im Labor wiesen die Forscherinnen und Forscher zum ersten Mal nach, dass es einen direkten Zusammenhang zwischen der wärmebedingten Sauerstofflimitierung der Aalmutter und ihrer Bestandsdichte gibt [8]. Wärmeres Wasser weist eine geringere Sauerstoffsättigungskonzentration auf. Gleichzeitig führt ein gesteigerter Stoffwechsel bei den Fischen zu einem höheren Bedarf des lebenswichtigen Gases. Die Untersuchungen zeigen, dass die Aufnahme und Verteilung des Sauerstoffs über Atmung und Blutkreislauf nur in einem begrenzten Temperaturfenster optimal funktionieren. Außerhalb des optimalen Bereichs verringert sich die Sauerstoffversorgung und damit auch die Leistungsfähigkeit der Tiere bis an eine Grenze, bei deren Überschreitung ein Überleben nicht mehr möglich ist. Zählungen aus den vergangenen 50 Jahren ergaben, dass jeweils ein Jahr nach einem besonders warmen Sommer weniger ausgewachsene Aalmuttern vorkamen als nach kühleren Sommern. Im Labor gezüchtete Fische, die bei wärmeren Temperaturen aufwuchsen, blieben kleiner als üblich. Nach Aussage von Pörtner und Knust (2007) bewirken warme Sommer mit Wassertemperaturen von mehr als 17 °C geringeres Wachstum und höhere Sterblichkeit der Aalmuttern [15, 16].

Wissenschaftler/innen der Australian Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) untersuchten acht besonders langlebige Fischarten des Südwestpazifiks [17]. Die Forscherinnen und Forscher bestimmten, wie stark einzelne Exemplare der untersuchten Art in ihren „Jugendjahren“ wuch-

sen. Bei sechs Arten änderte sich die Wachstumsgeschwindigkeit im Verlauf des vergangenen Jahrhunderts, wobei die Art und Weise von der Wassertiefe abhängig war. So korrelierten steigende Oberflächentemperaturen mit erhöhten Wachstumsraten bei oberhalb von 250 m gefundenen Arten. Zum Beispiel waren die Wachstumsraten von Jungfischen des Großaugen-Morwong (*Nemadactylus macropterus*), die in Tiefen zwischen 40 und 400 m leben, in den 1990er Jahren 28,5 Prozent höher als zu Beginn der Zeitreihen Mitte der 1950er Jahre [17].

b) Korallen

Tropische Korallenriffe gelten als artenreichste marine Biotope, nicht so sehr wegen des Artenreichtums der Riff bildenden Korallen selbst (beschrieben sind über 835 Arten), sondern wegen der Vielfalt der Organismen, die auf und von Korallenriffen leben, mit geschätzten 0,5 bis 2 Millionen Arten [1].

Seit 1979 beschreiben Fachleute mit zunehmender Häufigkeit und geografischer Ausdehnung das Phänomen der „Korallenbleiche“ [131]. Es bezeichnet den Verlust einzelliger Algen, die mit den Korallen in Symbiose leben (Dinoflagellaten - *Symbiodinium* spp.). Gerät eine Koralle in eine Stresssituation, zum Bei-

Abb. 5: Korallenbleiche (Quelle: [132]).



spiel durch hohe oder niedrige Temperaturen, intensives Licht oder Veränderungen im Salzgehalt, so verlieren sie die symbiontischen Algen aus dem Gewebe.

Das lebende Gewebe der Korallen ist ohne Algenzellen durchsichtig, so dass das weißliche Korallenskelett durchscheint – daher der Begriff Korallenbleiche (siehe Abb. 5). Dieses Phänomen ist teilweise reversibel, weil die Koralle wieder Algenzellen in das Körpergewebe aufnehmen kann. Bei längerem Andauern des Phänomens sterben die Korallen jedoch ab [1].

Tropische Korallen benötigen eine Wassertemperatur von 20 bis 30 °C. Ihre im Inneren lebenden Algen, endosymbiontische Dinoflagellaten, reagieren sensitiv auf steigende Umgebungstemperaturen [18], indem sie das Korallengewebe verlassen. Der Schwellenwert der Meerestemperatur für das Auslösen einer Korallenbleiche liegt an vielen Standorten nur 1 bis 2 °C über dem Maximum der Sommertemperatur. Tropische Korallen leben also nahe der Höchsttemperatur, bei der sie noch existieren können. Je intensiver der Temperaturanstieg ist und je länger er anhält, desto irreversibler ist die Korallenbleiche. Nach dem Temperaturstress zeigen Korallen typischerweise reduziertes Wachstum, reduzierte Kalkbildung und verminderte Fertilität [18].

Die Korallenbleiche ist ein weltweit auftretendes Phänomen, das bereits 1972, 1988 und 2002 bei erhöhten Wassertemperaturen beobachtet wurde. Im Jahr 1998 waren rund 30 Prozent der weltweiten Riffe betroffen. Einige Fachleute sehen das in regelmäßigen Abständen wiederkehrende Wetterphänomen „El Nino“ als Auslöser für Korallensterben an [19]. Bei diesem Ereignis kommt es zu einer kurzzeitigen Erhöhung der Wassertemperatur. Andere wiederum nennen die durch den Klimawandel bedingte Erwärmung der Meere als Ursache. Der IPCC (2007) prognostiziert bei einem Anstieg der Meerestemperatur von 1 bis 3 °C ein vermehrtes Eintreten der Korallenbleichen und ein großräumiges Absterben [10].

c) Makroalgen

Von einigen Makroalgen ist bekannt, dass sie bei zu hohen Temperaturen ihre sexuelle Fortpflanzung einstellen. Dethier et al. 2005 zeigten am Beispiel der Makroalge *Fucus gardneri*, dass starker Stress – unter anderem durch Temperaturerhöhung – negativ auf das Wachstum und die Fortpflanzung wirkt [20]. Beobachtungen der marinen Makroalgen vor Helgoland über einen Zeitraum von fast 150 Jahren (1845 bis 1999) zeigten eine Veränderung der Artenzusammensetzung. Der Gabeltang *Dictyota dichotoma* kam früher nur sporadisch im Helgoländer Felswatt vor, da Helgoland die Nordgrenze seiner Verbreitung markierte. Seit 1989 ist eine zunehmende Besiedlung des Sublitorals mit *D. dichotoma* zu beobachten, was mit den steigenden Wintertemperaturen zusammenhängen könnte [21].

Die sexuelle Fortpflanzung einiger Makroalgen ist temperaturabhängig. Es besteht daher die Gefahr, dass im Zuge einer deutlichen Temperaturerhöhung

der Nordsee deren Reproduktionsfähigkeit sinkt. Die Spanne der Wassertemperatur nahe Helgoland reicht im Jahresverlauf von etwa 0 °C im Februar bis 18 °C im August und ist damit wesentlich größer als beispielsweise die der offenen atlantischen Küsten. Langzeituntersuchungen der Helgoland Reede zeigen einen deutlichen Temperaturanstieg von insgesamt 1,5 °C seit 1962 [2]. Sollte sich diese Entwicklung fortsetzen, so könnte dies in den Sommermonaten zu Temperaturen führen, die die Algen der Gattung *Laminaria* sowohl in ihrer Reproduktionsfähigkeit als auch im Überleben einschränken [22]. Die experimentell bestimmten Überlebensgrenztemperaturen von *L. hyperborea* (20 bis 21 °C), *L. digitata* (20 bis 22 °C) und *L. saccharina* (21 bis 23 °C) zeigen ein Überleben der Algen bei Temperaturen von bis zu 20 °C, jedoch nicht mehr bei 23 °C (Letalgrenze) [23-25]. Aufgrund der oben geschilderten Beobachtungen würde die Alge *L. digitata*, die sich in der Bretagne und auch auf Helgoland an ihrer südlichen Verbreitungsgrenze befindet, weiter in nördlichere Küstenbereiche zurückgedrängt werden [26].

3.1.2 Beispiele für indirekte Wirkungen

Die globalen, regionalen und lokalen Klimaänderungen entfalten – neben den direkten physiologischen Wirkungen auf Organismen – auch indirekte Wirkungen. So können zum Beispiel die für eine Art früher orts- oder zeitgleich vorhandenen Nahrungsorganismen durch temperaturbedingte Veränderungen im Artenspektrum eines Ökosystems nicht mehr zur Verfügung stehen. Beide Wirkungsketten können zum Verschieben von Populationen, zur Einwanderung nicht heimischer Arten und sogar zum Verschwinden von Arten führen.

3.1.2.1 Arealverschiebungen und Entkopplungen

Jede Lebensgemeinschaft besteht aus einem Mosaik von Populationen verschiedener Arten mit unterschiedlichen Toleranzen gegenüber abiotischen Faktoren, wie Temperatur und Nährstoffkonzentrationen im Wasser. Auf eine dauerhafte Erhöhung der Temperatur reagieren zum Beispiel Arten, die an ihrem unteren oder oberen physiologischen Temperaturlimit leben, grundlegend unterschiedlich, wobei es oft Temperaturen zu bestimmten Jahreszeiten sind (Sommer, Winter), die den Ausschlag geben.

Eine Art, die bereits an ihrem oberen physiologischen Temperaturlimit lebt, kann in kältere Gebiete ausweichen (weiter nördlich gelegene oder tiefere Gewässer) und aus dem heimischen Gebiet verschwinden. Arten, die in einem Gebiet an ihrem unteren Temperaturlimit leben, erweitern ihr Verbreitungsgebiet möglicherweise in Richtung „Optimum“. Diese Phänomene wurden für eine Vielzahl von Ökosystemen, sowohl aquatisch als auch terrestrisch, beschrieben [27-29]. Verschiedene Organismengruppen reagieren unterschiedlich auf die Klimaerwärmung. So können verschieden starke oder schnelle Populationsverschiebungen Arten treffen, die früher im gleichen Gebiet oder gleichzeitig

auftraten. Diese räumlichen und zeitlichen Entkopplungen zwischen vormals synchronen trophischen Ebenen können erhebliche Veränderungen der Ökosystemstruktur hervorrufen.

a) Zeitliche Entkopplung

Der Begriff „Match-Mismatch“ (Treffen/Nichttreffen) umschreibt im Englischen die zeitliche Entkoppelung des Auftretens von Räuber und Beute. So können Änderungen des zeitlichen Auftretens von Phytoplanktonblüten und -zusammensetzung das bestehende marine Nahrungsnetz bis in höhere trophische Ebenen beeinflussen. Experimente zeigten, dass eine Temperaturzunahme ($\Delta T +2, +4, +6 \text{ }^\circ\text{C}$) die Entwicklung der Frühjahrsblüte (Primärproduktion) um durchschnittlich 0,8 Tage pro $^\circ\text{C}$ und das darauf folgende Bakterienwachstum (Sekundärproduktion) um durchschnittlich 2,2 Tage pro $^\circ\text{C}$ beschleunigt [30]. Hoppe et al. (2008) vermuten, dass es wegen einer Erwärmung der Ostsee (Kiel-er Förde) im Winter/Frühling zu einer engeren Kopplung der Primär- und Sekundärproduktion kommen wird. Dies führte zu einer schnelleren und früheren Zersetzung des in Folge entstandenen organischen Materials durch bakterielle Prozesse. Eine verringerte Algenbiomasse bedeutete weniger Nahrung für Zooplankton und folglich die gesamte Nahrungskette.

In der Nordsee beobachteten Fachleute eine verzögerte Entwicklung des Phytoplanktons, vor allem für die im Frühjahr typischen Diatomeenblüten, und nehmen als klimabedingte Ursache Änderungen innerhalb des Zooplanktons, das sich größtenteils vom Phytoplankton ernährt, an. Wegen erhöhter Wassertemperaturen im vorangegangenen Herbst können Zooplanktonorganismen milde Winter besser überleben und sich früher im Jahr entwickeln [31]. Das Zooplankton frisst das Phytoplankton noch vor dem Entstehen einer Blüte, so dass sich eine solche erst verspätet ausbilden kann [32]. Es kommt zu einer zeitlichen Verschiebung der Räuber-Beute-Beziehung zwischen Zooplankton und Phytoplankton. Das Phytoplankton bildet auch die Nahrungsgrundlage für herbivore Fische. Es kann dazu kommen, dass die Fischlarven und die Futteralgen nicht mehr zeitgleich auftreten, was zu einem Kollaps der Räuberpopulation führen würde [33], sollte der Räuber seine Nahrung nicht umstellen können [34, 35].

Auch eine gegenteilige Entwicklung ist möglich, wenn die zeitliche Verteilung zweier Arten, die früher nicht gemeinsam auftraten, aufgrund steigender Temperaturen sich zu überlappen beginnt. Dies bedeutet, dass neue Räuber-Beute- oder auch Konkurrenz-Beziehungen entstehen [36, 37].

b) Räumliche Entkopplungen

Das Wasser um Helgoland wurde in den vergangenen 40 Jahren salziger und klarer, was auf einen verstärkten Eintrag atlantischen Wassers hindeutet [32, 38]. Zeitgleich beobachteten Fachleute ein regelmäßigeres Vorkommen bisher nicht oder nur sporadisch auftretender Phytoplanktonarten und eine veränderte Zusammensetzung des Zooplanktons [39]. Wegen veränderter Strömungsmuster und Umgebungsbedingungen in der Nordsee hat sich zum Beispiel anstelle

des heimischen Ruderfußkrebsses (Copepoden) *Calanus finmarchicus* die verwandte, aus wärmeren Gewässern stammende Art *Calanus helgolandicus* erfolgreich verbreitet [31, 40]. *C. helgolandicus* ist wesentlich kleiner als *C. finmarchicus* und tritt erst im Herbst in größeren Mengen auf. Dies hat negative Auswirkungen auf den Kabeljau, dessen Larven sich im Frühjahr hauptsächlich von *C. finmarchicus* ernähren. Auf der Suche nach Nahrung verschiebt sich somit das Verbreitungsgebiet des Kabeljaus nordwärts. Beaugrand et al. 2003 konnten zeigen, dass der Rückgang des Kabeljaus signifikant mit der veränderten Artensammensetzung, der Bestandsabnahme und der geringeren mittleren Körpergröße des Zooplanktons korreliert [41].

Auch der Sandaal (*Ammodytes tobianus*) ernährt sich hauptsächlich von *C. finmarchicus*. Dessen klimatisch bedingter Rückgang beeinflusst somit auch diese Art [42, 43]. Das hat wiederum Folgen für die Verfügbarkeit von Nahrung für verschiedene Seevögel, wie die Trottellumme, die sich vom Sandaal ernährt [44].

3.1.2.2 Einwanderung nicht heimischer Arten

Die Besiedlung neuer Lebensräume mit nicht heimischen Arten ist ein natürlicher Prozess. Häufig bestehen Lebensgemeinschaften in einem Ökosystem im Laufe der Zeit verglichen mit der ursprünglichen Fauna und Flora größtenteils aus zugewanderten oder eingeschleppten Arten. Im Laufe der Erdgeschichte erweiterten Arten immer wieder durch Wanderungen oder Fernausbreitung ihr Verbreitungsgebiet. Meist ging dieser Prozess langsam vor sich. Wegen der zunehmenden Globalisierung des Verkehrs und Handels beschleunigte sich dieser Vorgang erheblich. Fremde Tier- und Pflanzenarten (Neozoen und Neophyten) tauchen heute in Gebieten und Ökosystemen auf, in die sie durch natürliche Ausbreitung nicht gelangt wären. Sie gelangen über Kanäle, auf dem Landweg, per Flugzeug oder per Schiff als Aufwuchs auf Schiffskörpern oder im Ballastwasser in neue Gebiete.

Das Auftreten gebietsfremder Arten in einem Ökosystem ist nicht zwangsläufig schädlich. Er führt kurzfristig zu einer Erhöhung der Biodiversität. Soweit sich die eingeschleppten Arten gut an die neuen Gegebenheiten anpassen und sich als konkurrenzstark gegenüber den heimischen Arten erweisen, kann es jedoch zu einer Verdrängung dieser und einer Verringerung der Biodiversität kommen.

Auch in der Nord- und Ostsee gab es bereits in der Vergangenheit eine Vielzahl von Einwanderungen, im Wesentlichen verursacht durch den Schiffsverkehr [45-47]. Insgesamt etablierten sich bis heute in der Nordsee (Deutschen Bucht, Wattenmeer und Ästuar) 41 eingeschleppte Arten, das sind circa 2 Prozent des bekannten Artenbestandes. Leppäkoski et al. (2002) bezeichneten die Ostsee als eine „See der Einwanderer“ [48]. Bis heute wanderten nachweislich ungefähr 60 nicht heimische Arten in die Ostsee und etablierten sich dort.

Viele dieser Arten richteten dort keinen ökologischen Schaden an. Sie fanden zwar günstige Umweltbedingungen vor, mussten jedoch mit ansässigen Arten

konkurrieren, die ähnliche Bedürfnisse hatten und bereits optimal angepasst waren. Der sehr rasch voranschreitende anthropogene Klimawandel, vor allem der Temperaturanstieg, macht viele einheimische, Kaltwasser liebende Arten weniger konkurrenzfähig. Da sich die Umweltbedingungen sehr schnell verändern, sind die Chancen zur langsamen Anpassung an diese Bedingungen deutlich geringer.

Gründe für eine Etablierung gebietsfremder oder ein Verschwinden einheimischer Arten sind schwer nachzuweisen. Wegen einer Vielzahl von möglicherweise relevanten Faktoren, wie zum Beispiel Nährstoffkonzentrationen und physikalische Parameter (Temperatur, Salzgehalt, etc.), ist es außerordentlich schwierig zu bewerten, ob der Klimawandel invasive Arten und ihre erfolgte Ansiedlung allein oder maßgeblich fördert. Es ist jedoch sehr wahrscheinlich, dass der anthropogen bedingte Klimawandel bessere Bedingungen für gebietsfremde, wärme liebende Arten schafft.

BEISPIELE

a) Pazifische Auster

Der Mensch begann vor mehr als 25 Jahren in der Nordsee, die Pazifische Auster (*Crassostrea gigas*) zu züchten. Eine selbständige Vermehrung und unkontrollierte Ausbreitung hielt man wegen der niedrigen Wassertemperaturen im Winter für unwahrscheinlich. Mittlerweile profitiert diese Art von den milden Wintern und Wassertemperaturen über 20 °C im Sommer [49], die zu einer raschen Reproduktion mit der Folge einer weiten Verbreitung in allen Bereichen des Wattenmeeres führt.

Pazifische Austern besiedeln vorzugsweise Miesmuschelbänke oder frühere Muschelbankstandorte und kommen an verfügbaren Hartsubstraten, wie Steinkanten, Hafentmolten, vor. Der Gesamtbestand im Wattenmeer lag 2006 bei 61.000 Tonnen Lebendnassgewicht und liegt inzwischen vermutlich deutlich über 100.000 Tonnen (siehe Abb. 6). Die Pazifische Auster entwickelt sich derzeit zu einer prägenden Art der benthischen Lebensgemeinschaft im Wattenmeer und ersetzt dabei zunehmend die Miesmuschel (*Mytilus edulis*), deren Bestände in den meisten Teilen des Wattenmeeres deutlich zurückgehen. Fachleute vermuten, dass die Pazifische Auster durch eine Reihe überdurchschnittlich warmer Sommer gefördert, die Reproduktion der Miesmuscheln durch milde Winter dagegen unterdrückt wurde. Veränderungen der klimatischen Bedingungen sind vermutlich Ursache für die Verschiebungen der Artengemeinschaft [50]. Eiderenten und Austernfischer, die Schalentiere bevorzugen, fressen die Austern wegen ihrer Größe (20-30 cm) nicht.

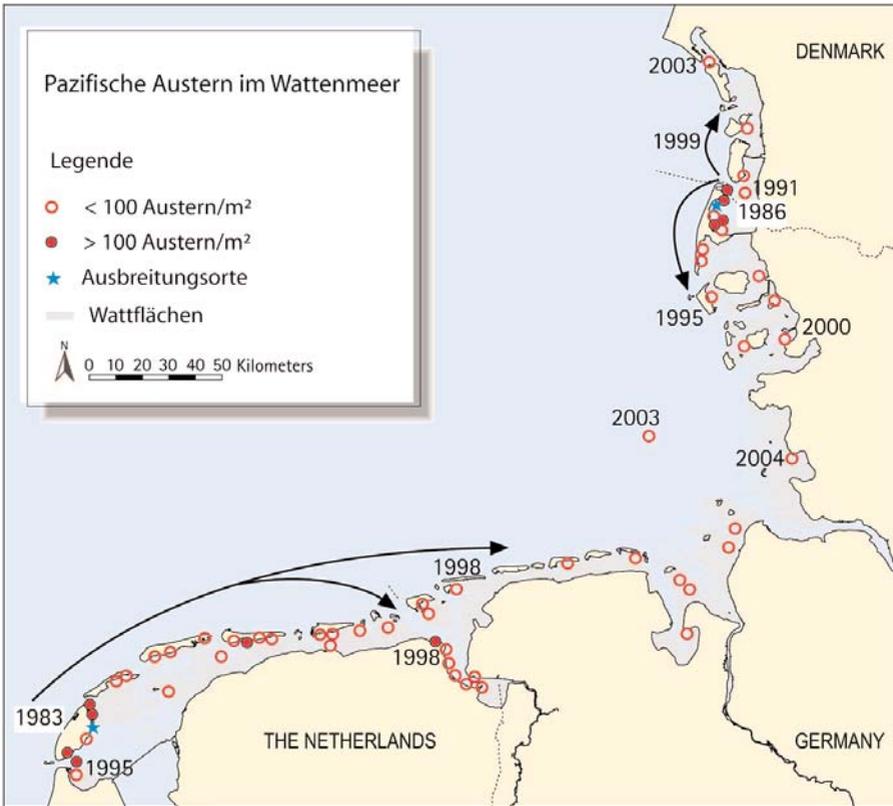


Abb. 6: Ausbreitung der Pazifischen Auster im Wattenmeer seit 1983 (Quelle: [133]).

b) Amerikanische Pantoffelschnecke

Auch die vor mehr als 80 Jahren mit dem Schiffsballastwasser in die Nordsee transportierte Amerikanische Pantoffelschnecke (*Crepidula fornicata*) profitiert von den steigenden Temperaturen. Bis 1995/96 dezimierten die kalten Winter den Bestand in der Nordsee regelmäßig und ihr Vorkommen war selten. Die Erwärmung des Wassers in den letzten Jahren trägt nun zu einer vermehrten Fortpflanzungsrate bei. Eine große Zahl von Schnecken breitet sich auf Miesmuschelbänken aus und verdrängt diese, ebenso wie die oben beschriebene Pazifische Auster [51, 52].

c) Englisches Schlickgras

In den 1920er Jahren pflanzte der Mensch das Englische Salz-Schlickgras (*Spartina anglica*) zur Landgewinnung im Gezeitenbereich des Wattenmeers an. Die vermehrte Ausbreitung des Salz-Schlickgrases in den letzten Jahren erklären Fachleute mit wärmeren Frühjahren seit dem Jahr 1987 [53].

Das Salz-Schlickgras beeinflusst das Wattenmeer auf vielfältige Art und Weise, beispielsweise durch die Etablierung einer „neuen“ Pflanzengesellschaft – die Schlickgrasgesellschaft. Dabei handelt es sich um eine ausdauernde und sehr artenarme Initialgesellschaft des Wattenmeeres [54]. Die Ansiedlung des Englischen Schlickgrases geht mit der Verdrängung weniger konkurrenzfähiger Arten, wie des heimischen Schlickwatt-Quellers (*Salicornia stricta*), einher. Das dichte Wurzelwerk wirkt sich zudem nachteilig auf Bodenlebewesen und Mikrofauna aus (Verlust von Lebensräumen). Dringt das Schlickgras in Salzwiesen ein, so verdrängt es durch seinen hohen und dichten Wuchs die Salzwiesenpflanzen in der Anedelzone (*Puccinellietum maritimae*). Es behindert den Abfluss des Wassers in dieser Zone, was zu einer Vernässung der Salzwiesen mit biozönotischen Änderungen führt.

d) Rippenqualle *Mnemiopsis leidyi*

Im Herbst 2006 dokumentierten Forscherinnen und Forscher erstmals das Auftreten der Rippenqualle *Mnemiopsis leidyi* in der Nord- und Ostsee [55]. Rippenqualen sind für ihre räuberische Ernährungsweise und großes Vermehrungspotential bekannt. Als Nahrungskonkurrent und -konsument unterstellen Fischer ihnen eine Gefährdung heimischer Nutzfischbestände. Wegen ihrer großen ökophysiologicalen Anpassungsfähigkeit erwarten Fachleute, dass sich *M. leidyi* als neue Art in der Ostsee etabliert (siehe Abb. 7).

M. leidyi überstand den milden Winter 2006/2007 in der Kieler und Mecklenburger Bucht bei Wassertemperaturen von über 4 °C mit Häufigkeiten um 5 Individuen/m³. Im Bornholmbecken und südöstlichen Gotlandbecken überwinterte die Art unterhalb der Halokline mit Häufigkeiten von weniger als 1 Individuum/m³. Dort herrschen Temperaturen von 9 bis 10 °C, die deutlich über dem unteren Verbreitungslimit von 2 °C liegen. Ein Salzgehalt von 10 bis 14 und eine Sauerstoffkonzentration von 1 bis 3 mg/l boten ebenfalls tolerierbare Lebensbedingungen. Im Winter 2007/2008 traten ähnliche Ergebnisse auf [56].

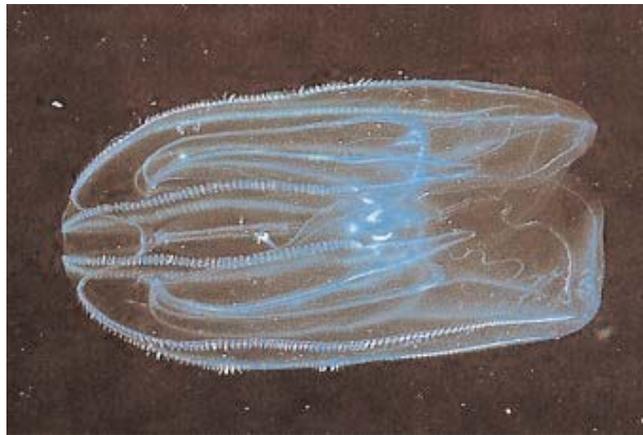


Abb. 7: *Mnemiopsis leidyi* (Quelle: [2]).

Derzeit untersuchen Fachleute, ob von dem Fischlarvenräuber *M. leidyi* ein Gefährdungspotenzial für die Herings- und Dorschbestände in der südwestlichen Ostsee ausgeht. Beide Fischarten laichen jedoch im Frühjahr, einem Zei-

traum, in welchem wegen der Temperaturansprüche von mindestens 10 °C bisher nicht mit einer gefährlichen, massenhaften Reproduktion der Rippenqualle zu rechnen ist [56].

e) Australische Seepocke



Abb. 8: *Elminius modestus*
(Quelle: [2]).

Die Australische Seepocke (*Elminius modestus*) steht in Konkurrenz zur einheimischen Art *Semibalanus balanoides* (siehe Abb. 8). Die Wechselbeziehungen zwischen diesen beiden Arten zeigen eindrucksvoll, wie Temperaturänderungen auf eingewanderte Arten wirken.

E. modestus ist eine Warmwasserart, die sich um Helgoland etablierte und die heimische *S. balanoides* verdrängen kann, wenn die Temperaturen im Winter nicht zu tief sinken. Kalte Winter dezimieren *E. modestus* und erlauben eine Erholung der *S. balanoides*-Population. Dieses dynamische System funktioniert, solange es kalte Winter gibt. Diese treten im Gebiet um Helgoland aber immer seltener auf. Durch die Erwärmung der Nordsee könnte dieser natürliche Regulationsmechanismus zusammenbrechen und dieses dazu führen, dass *E. modestus* sich dauerhaft durchsetzt [2].

3.2 Rückgang des Meereises

Die Reaktion des Meereises auf klimatische Veränderungen erfolgt nahezu unmittelbar. Die Ausdehnung der Meereisgebiete und die Dicke des Meereises schwanken mit den jahreszeitlichen Temperaturänderungen, wodurch längerfristige Trends schwierig zu ermitteln sind.

Die Ausdehnung des Meereises lässt sich seit den 1970er Jahren durch Satellitenbeobachtungen erfassen. Alle Beobachtungen zeigen für die letzten Jahrzehnte eine deutliche Abnahme der arktischen Meereisbedeckung. Nach Angaben des 4. IPCC-Sachstandberichts sind die durchschnittlichen Temperaturen der Arktis in den letzten 100 Jahren fast doppelt so schnell gestiegen wie im globalen Mittel [10]. Die Satellitendaten seit 1978 zeigen, dass die durchschnittliche jährliche Ausdehnung des arktischen Meereises um 2,7 [2,1 bis 3,3] Prozent

pro Jahrzehnt schrumpfte, wobei die Abnahme im Sommer mit 7,4 [5,0 bis 9,8] Prozent pro Jahrzehnt größer ausfällt. Im September 2007 vermaßen Forscherinnen und Forscher die mittlere Ausdehnung des arktischen Meereises mit 4,28 Millionen km² – die geringste Meereisfläche seit Aufzeichnungsbeginn [57] (siehe Abb. 9).

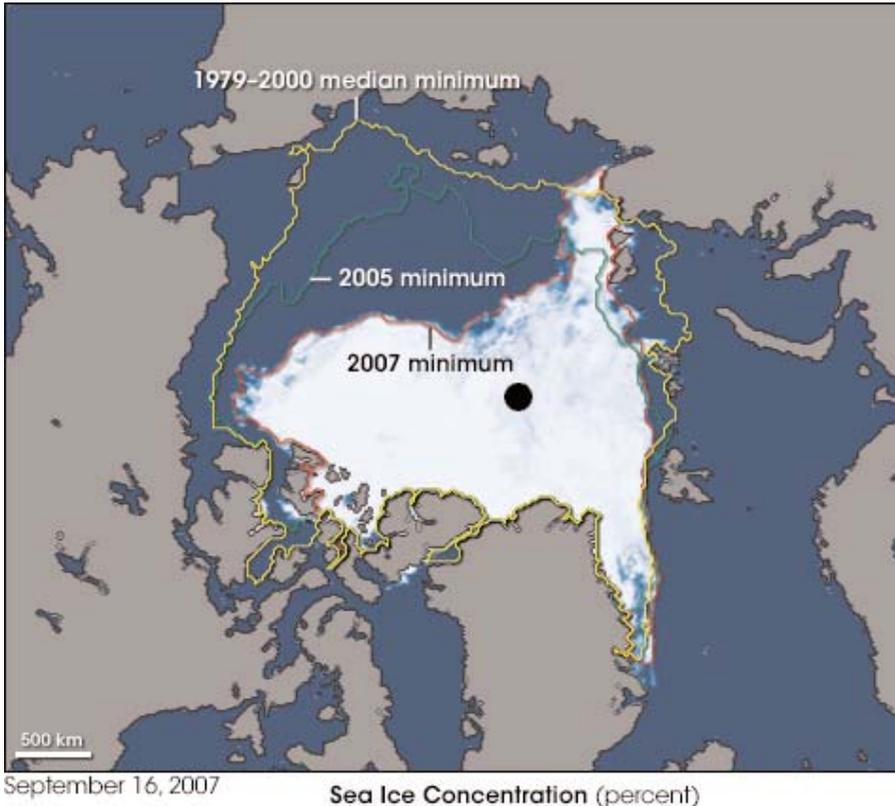


Abb. 9: Das Meereis-Minimum im September 2007 im Vergleich zum früheren Rekordminimum 2005 und den mittleren Minima 1979 bis 2000 (Quelle: [134]).

Die Situation in der Antarktis ist weniger eindeutig. Die Ausdehnung des antarktischen Meereises zeigt weiterhin jährliche Schwankungen sowie örtlich begrenzte Veränderungen, aber keine statistisch signifikanten Trends [10].

Das Abschmelzen des Meereises ist nicht nur in der Arktis, sondern auch in vielen Gebieten der Ostsee ein Problem. Im Winter sind durchschnittlich 216 x 109 km der Ostsee von Eis bedeckt. Innerhalb der nächsten 30 Jahre wird sich diese Fläche nach Hochrechnungen um bis zu 83 Prozent – auch die Dauer der „Eis-Saison“ und die Dicke der Eisschicht – verringern [58].

Folgen

Die Randregionen des arktischen Meereises sind der wichtigste Lebensraum für die arktische Pflanzen- und Tierwelt. An der Unterseite der Eisschollen existieren einzellige Algen, von denen wenige Zentimeter lange Krebse leben, die wiederum als Futter unter anderem für den Polardorsch dienen, der die Hauptnahrungsquelle für Ringelrobben ist. Für Eisbären sind die Eisrandregionen das natürliche Jagdrevier, in dem sie auf Robbenjagd gehen. Die Verringerung der Ausdehnung des arktischen Meereises wird die auf dem Eis lebenden Säuger, wie Eisbär und Ringelrobbe, unmittelbar in ihren Ernährungsgewohnheiten und bei der Aufzucht der Jungen, die auf dem Eis erfolgt, beeinträchtigen [59].

Der Rückgang des Packeises betrifft auch Seevogelarten, wie die Elfenbeinmöwe und den Krabbentaucher, denn sie sind bestens an die bisherigen vorherrschenden Bedingungen angepasst. Die Elfenbeinmöwe nistet an steilen Steinklippen und fliegt zur Futtersuche aufs Meereis hinaus. Durch die Eisschmelze wächst der Abstand zwischen ihrem Nistplatz und der Eisfläche. Fachleute beobachteten bereits eine deutliche Abnahme ihrer Populationen [60]. Diese Beispiele zeigen, wie einschneidend klimabedingte Veränderungen im Lebensraum Eis bis auf die höchste trophische Ebene wirken können.

Eine Unterart der Ringelrobbe, die Ostsee-Ringelrobbe, lebt in den kalten Bereichen der Ostsee, an den Küsten Schwedens, Finnlands und Estlands. Derzeit leben noch etwa 7.000 bis 10.000 Tiere in der Ostsee, die bereits auf der Roten Liste der Internationalen Naturschutzunion (IUCN) stehen [61, 62]. Die Tiere sind an das Leben im Eismeer angepasst und graben sich auf dem Eis Schneehöhlen, in denen sie ihre Jungen zur Welt bringen und 5 bis 7 Wochen säugen. Dieser Unterschlupf dient als Schutz vor Fraßfeinden und Wärmeschutz für die Jungen. Wenn nicht genügend Schnee und Eis zur Verfügung stehen oder der Schnee zu früh schmilzt, sind die Jungen Kälte und Räubern schutzlos ausgesetzt, und ihr Überleben ist gefährdet. Die Länge der Eissaison ist daher für die Aufzucht der Ringelrobbenjungen von zentraler Bedeutung [63].

Der Winter 2008 war der eisärmste seit dem Beginn der Aufzeichnungen des Finnischen Instituts für Meeresforschung in den Jahren 1719/1720. Nur 49.000 km² der Ostsee waren mit Eis bedeckt. Die Eisbedeckung konzentrierte sich fast ausschließlich auf den Bottnischen Meerbusen. Für die Populationen der Ostsee-Ringelrobbe in der Rigabucht und im Finnischen Meerbusen gab es daher im Jahr 2008 keine normalen Bedingungen für die Aufzucht der Jungen, so dass der größte Teil der Jungtiere nicht überlebte.

Die Berechnungen zweier globaler Klimamodelle und zweier IPCC Szenarien sagen einen drastischen Rückgang der Dauer der Eisbedeckung in den überlebenswichtigen Gebieten der Ostsee-Ringelrobbe voraus. Vermutlich verringern sich die Verbreitungs- und Aufzuchtgebiete der Ostsee-Ringelrobbe so weit, dass künftig nur noch im Bottnische Meerbusen ein geeignetes Gebiet für diese vorhanden ist [58].

3.3 Anstieg des Meeresspiegels

Die globale Erwärmung bedingt durch zweierlei Prozesse den Meeresspiegelanstieg: Erstens führt der Anstieg der Wassertemperaturen dazu, dass die Dichte des Wassers sinkt, das folglich mehr Volumen einnimmt (thermische Ausdehnung). Zweitens führen gestiegene Lufttemperaturen zum Abschmelzen von Gletschern oder Eisschilden an Land, was zusätzliches Wasser in die Ozeane bringt.

Der Meeresspiegelanstieg ist seit Jahren ein viel diskutiertes Thema. Er lässt sich wegen der natürlichen Schwankungen trendmäßig nur schwer schätzen [64]. Nach Angaben des 4. IPCC-Sachstandsberichts stieg der mittlere globale Meeresspiegel in der Zeit von 1961 bis 2003 durchschnittlich um 1,8 [1,3 bis 2,3] Millimeter (mm) pro Jahr und von 1993 bis 2003 sogar um durchschnittlich etwa 3,1 [2,4 bis 3,8] mm pro Jahr [10]. Seit 1993 sind 57 Prozent der gesamten geschätzten Einzelbeiträge zum Meeresspiegelanstieg auf die thermische Ausdehnung der Ozeane zurückzuführen. Schmelzende Gletscher und Eiskappen steuerten etwa 28 Prozent bei und die Verluste polarer Eisschilde den Rest. Nach zwei Modellrechnungen des IPCC ist in Abhängigkeit der Entwicklung der Treibhausgasemissionen ein mittlerer globaler durchschnittlicher Anstieg um 18 bis 38 cm (B1-Szenario) beziehungsweise 26 bis 59 cm (A1FI-Szenario) bis zum Ende des 21. Jahrhunderts (2090 bis 2099) wahrscheinlich [10].

Folgen

Welche Wirkungen der Anstieg des Meeresspiegels voraussichtlich auf die Küstengebiete entfaltet, hängt in erster Linie von der Art und der Zahl der betroffenen natürlichen Systeme ab, wie Flussdeltas, tiefliegende Küstenebenen, Koralleninseln und Atolle, Barriere-Inseln und Lagunen, Strände, Küstenfeuchtgebiete und Ästuare. Zwei besonders relevante Ökosystemtypen sind Korallenriffe und Mangrovenwälder, die eine große biologische Vielfalt aufweisen und gleichzeitig eine wichtige Rolle für den Küstenschutz spielen.

Hartkorallen bilden Skelette durch Einlagerung von Kalk, wodurch massive Bauwerke, wie Korallenbänke und -riffe, entstehen. Das durchschnittliche vertikale Wachstum der Korallenriffe seit der letzten Eiszeit geben Fachleute mit maximal 10 mm pro Jahr an [65]. Sollte der Meeresspiegel schneller steigen als die Korallen wachsen können, gelangt nicht mehr genügend Licht zu den symbiontischen Algen. Sie können dann nicht mehr ausreichend Photosynthese betreiben und sterben. Mit ihnen sterben auch die Korallen.

Etwa 8 Prozent der weltweiten Küstenlinie säumen heute Mangroven. Dass der Anstieg des Meeresspiegels lokal Einfluss auf die Verbreitung der Mangroven hat, zeigt eine Studie über die Veränderungen der Mangrovenürtel im Amazonasgebiet [66]. Demzufolge drängt der Anstieg des Meeresspiegels die küstennahen Mangrovenürtel in Zukunft weiter landeinwärts, wo sie in Konkurrenz mit der intensiven Landnutzung des Menschen geraten. Nicholls (2004) bewertete

unter den verschiedenen IPCC-Szenarien mit Hilfe eines Modells die Sensibilität der Küstenregionen gegenüber Überflutungen [67, 68]. Demnach hat der Meeresspiegelanstieg in jedem Szenario den Verlust an Feuchtgebieten zur Folge.

Eine zusätzliche Belastung für Küstenökosysteme sind die durch den Meeresspiegelanstieg bedingten Änderungen des Tidenhubs und der Hochwasserhöhe. Die Folge sind veränderte Wassertiefen, Licht- und Temperaturverhältnisse, Strömungsgeschwindigkeiten und eine Verschiebung der Süß- und Salzwasserverteilung. Dies kann zu physiologischen Belastungen für einige Tier- und Pflanzenarten führen und für diese einen Habitatwechsel erfordern. Studien zeigen, dass bereits ein geringes Einfließen von Meerwasser in süßwasser geprägten Küstenseen zu großen Störungen in der Zusammensetzung und Vielfalt der Zooplanktonpopulationen führen kann. Kleine Änderungen des Salzgehaltes können einen Rückgang in der Biodiversität der Küstenökosysteme zur Folge haben [69]. Das Funktionieren und die Erhaltung von Ökosystemen sind also nicht nur durch die Überflutungen wegen des Meeresspiegelanstieges bedroht, sondern auch durch Änderungen der Häufigkeit und Menge des einfließenden Meerwassers.



Abb. 10: Blick über eine Salzwiesenlandschaft auf Borkum
(Quelle: [135]).

Insbesondere für flache Küsten, wie im Wattenmeer, ist eine dauerhafte Wasserstandserhöhung ein potenzielles Überflutungsrisiko für das niedrig gelegene Land und damit auch ein Risiko für den Verlust des dortigen Lebensraums. Das gilt vor allem für das vor den Deichen liegende Vorland (zum Beispiel Salzwiesen) (siehe

Abb. 10). Der Weltklimarat prognostiziert einen Verlust der globalen Küstenfeuchtgebiete (einschließlich Salzmarschen und Mangroven) von circa 30 Prozent ab einer Veränderung der globalen mittleren Jahrestemperatur von $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ [10].

Dies betrifft vor allem Gebiete, in denen keine künstlichen oder natürlichen Barrieren vorhanden sind. Ein Teil des heutigen Gezeitenbereichs ist dann voraussichtlich permanent mit Seewasser bedeckt und ehemals flache Gewässer (zum Beispiel in Ästuaren) nehmen an Tiefe zu, was für aquatische Pflanzen und Tiere veränderte Lichtverhältnisse und eventuellen Lebensraumverlust zur Folge hat.

In den meisten Fällen dürften die schwersten Folgen des Meeresspiegelanstiegs im vermehrten Auftreten von Extremwetterereignissen, zum Beispiel Sturmfluten, bestehen. Das führt voraussichtlich, abhängig von der Beschaffenheit der Küste, zu stark ausgeprägten Erosionsprozessen. Die Küstenlinie verändert sich durch das Abtragen von Sand, Schlamm und Gestein. Für viele im Küsten- und Gezeitenbereich lebenden Organismen würde dies einen grundlegenden Wandel bis zum Verlust des Habitats bedeuten.

Für das Wattenmeer sagen Fachleute - beispielsweise wegen erhöhter Bodenerosion - folgende Änderungen voraus [70, 71]:

- ▶ veränderte Bodenfauna (Rückgang von Arten der Feinsedimente),
- ▶ intensive Planktonblüten durch erhöhte Nährstoffeinträge in die Küstengewässer,
- ▶ Abnahme des Tidengebiets durch zunehmende Überflutung der derzeit noch trocken fallenden Wattflächen,
- ▶ demzufolge ein Rückgang von Watvögeln, da diesen weniger Zeit und Fläche für die Nahrungsaufnahme zur Verfügung steht und
- ▶ Abnahme der Enten- und Gänsebestände durch verstärkte Überflutungen der Brutgebiete.

Weitere Wirkungen sind voraussichtlich:

- a) Einhergehend mit einer steigenden Zahl an Sturmflutereignissen, kommt es zu größeren Schwankungen des Salzgehalts. Dies wird vor allem Arten, die bereits an ihrer Salzgehaltstoleranzgrenze leben (zum Beispiel Brackwasserarten der Ostsee) negativ beeinträchtigen.
- b) Die Felsküsten im Gezeitenbereich ändern sich durch das Wirken der Wellen. Dies beeinträchtigt Bestände der Makroalgen, Seepocken und Muscheln, die fest am Bodensubstrat verankert sind und nicht oder nur schlecht ausweichen können.
- c) Wegen größerer Instabilität und Variabilität innerhalb eines Ökosystems, vor allem in Küstennähe, sind an weite Temperatur- und Salzgehaltsspektren angepasste Arten im Vorteil.
- d) Arten, die lange Fortpflanzungsphasen haben, haben in einem sehr instabilen Habitat wegen mangelnder Zeit zwischen zwei Sturmflutereignissen weniger Reproduktionserfolg als jene mit kurzen Reproduktionszyklen.

3.4 Versauerung

Die Weltmeere sind nicht nur ein bedeutender Kohlendioxid (CO₂)-Speicher, sondern auch langfristig die wichtigste CO₂-Senke. Rund 38.000 Gigatonnen Kohlenstoff¹, 50mal mehr als in der Atmosphäre, lagern dort. Der Ozean nimmt jährlich 2 Gigatonnen Kohlenstoff (Gt C) auf, das sind etwa 30 Prozent der anthropogenen CO₂-Emission [72, 73]. Insgesamt absorbierten die Ozeane zwischen 1800 und 1995 etwa 118 ± 19 Gt C. Bereits seit einigen Jahrzehnten ist eine Zunahme der CO₂-Konzentrationen in den oberen Meeresschichten nachweisbar [72].

Das Meerwasser ist mit einem pH-Wert um 8 leicht basisch. Der pH-Wert schwankt lokal in Abhängigkeit von der Temperatur des Wassers, dem lokalen Auftrieb kohlendioxidreichen Tiefenwassers sowie der biologischen Produktivität. Gelöstes CO₂ führt zu einer Absenkung des pH-Werts, das heißt zu einer Versauerung des Meerwassers. In der Literatur schwanken die Angaben sowohl für den vorindustriellen als auch für den heutigen durchschnittlichen pH-Wert des Meerwassers leicht. Zurückzuführen ist dies auf die Umrechnung des für ideal verdünnte Lösungen definierten pH-Wertes auf Meerwasser, was durch drei verschiedene Verfahren mit unterschiedlichen Skalen erfolgen kann.

Eine Übersicht der National Science Foundation (NSF), der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) und dem United States Geological Survey (USGS) kommt zu dem Schluss, dass vor der Industrialisierung der durchschnittliche pH-Wert bei 8,16 lag, während er heute 8,05 beträgt [74]. Einer Studie der Stanford University zufolge, die einen vorindustriellen pH-Wert des oberflächennahen Meerwassers von durchschnittlich 8,25 annimmt, soll sich der pH-Wert durch die Aufnahme des CO₂ auf den heutigen Wert von durchschnittlich 8,14 verringert haben [75]. In beiden Fällen beziffern die Fachleute die Versauerung mit 0,11 pH-Einheiten. pH-Werte sind logarithmisch definiert und eine Differenz von 0,11 bedeutet eine Veränderung der Ionenkonzentration von fast 30 Prozent.

Auch nach Angaben des 4. IPCC-Sachstandsberichts (2007) führte die Aufnahme anthropogenen Kohlenstoffs seit dem Jahr 1750 – bei einer durchschnittlichen Abnahme des pH-Wertes von 0,1 Einheiten – zu einer zunehmenden Versauerung des Ozeans [10]. Basierend auf verschiedenen CO₂-Emissionsmodellen könnte eine Senkung des pH-Wertes im Meer bis zum Jahr 2100 zwischen 0,17 und 0,46 Einheiten und in den nächsten 300 Jahren bis zu 1,4 Einheiten betragen [76, 77].

Der CO₂-Eintrag ins Meer führt zu Verschiebungen im Karbonatsystem des Meerwassers und zu einer Absenkung des pH-Werts. Diese Versauerung der Meere betrifft alle Komponenten mariner Nahrungsnetze und entfaltet verschiedene Wirkungen.

¹ 1 Tonne Kohlenstoff entspricht 4 Tonnen Kohlendioxid

3.4.1 Wirkungen auf Meeresorganismen

Experimentelle Arbeiten zeigen, dass stark erhöhte CO_2 -Konzentrationen zu sehr verschiedenen physiologischen Veränderungen bei Meeresorganismen führen können, zum Beispiel Wirkungen auf die Produktivität der Algen, die Stoffwechselraten des Zooplanktons und der Fische, die Reproduktion von Muscheln oder die Aufnahme von Metallen. Viele dieser Experimente wurden jedoch mit CO_2 -Konzentrationen durchgeführt, die weit über denen liegen, die bei heutigen Szenarien bis zum Jahr 2100 zu erwarten sind.

Ein niedrigerer pH-Wert kann die Verfügbarkeit der Nährstoffe verändern oder eine vermehrte Verfügbarkeit von Toxinen (zum Beispiel Algen, die solche produzieren) mit sich bringen. Auch die Mobilität der Schwermetalle könnte sich durch niedrige pH-Werte erhöhen und deren vermehrte Aufnahme durch Lebewesen begünstigen.

Um Biomasse aufzubauen, benötigen Algen CO_2 zur Photosynthese. Bei steigender CO_2 Konzentration und ausreichender Nährstoffverfügbarkeit (zum Beispiel Stickstoff und Phosphor) ist daher ein vermehrtes Phytoplanktonwachstum zu erwarten. Experimentelle Analysen zeigen jedoch, dass eine Verdoppelung der gegenwärtigen CO_2 -Konzentration bei vielen Phytoplanktonarten nur zu einer relativ geringen Erhöhung der Photosyntheserate um etwa 10 Prozent führt [78]. Da die Zusammenhänge zwischen Photosynthese und Primärproduktion des Phytoplanktons noch von einer Vielzahl anderer Faktoren (Temperatur, Licht- und Nährstoffversorgung, Räuber) abhängen, lassen sich bisher keine eindeutigen Schlüsse für die Wirkungen der Versauerung auf Wachstum und Zusammensetzung des Phytoplanktons ziehen.

3.4.2 Auswirkungen auf kalkbildende Organismen

Die größte Bedrohung für Meeresorganismen durch Versauerung hängt mit der Löslichkeit des Kalziumkarbonats zusammen. Viele Meeresorganismen verwenden für ihre Skelett- oder Schalenstruktur Kalk (Kalziumkarbonat), den sie aus dem Meerwasser extrahieren. Dies ist nur bei einer Übersättigung des Meerwassers mit Kalziumkarbonat möglich, weswegen die zunehmende CO_2 -Konzentration und der absinkende pH-Wert die Kalkbildung erschweren [78]. Kalk tritt als Baumaterial für Organismen in verschiedenen kristallinen Formen auf: Aragonit und Kalzit sind die beiden wichtigsten. Aragonit ist die leichter lösliche Variante des Kalziumkarbonats. Korallen und bestimmte Planktonarten verwenden es beispielsweise. Die Versauerung hat Einfluss auf alle kalkbildenden marinen Arten (siehe Tab. 1).

a) Coccolithophoriden

Coccolithophoriden sind zum Phytoplankton gehörende einzellige Algen (Prymnesiophyceen), die sich mit winzigen Plättchen aus Kalk umgeben (siehe Abb. 11). Diese Kalkflagellaten leisten einen großen Beitrag zum Transport des Kalzi-

Organismengruppe	betreiben sie Photosynthese?	Kristallform des Kalks	Lebensgemeinschaft
Foraminiferen	Ja (einige)	Kalzit Kalzit	Benthos Plankton
Coccolithophoriden	ja	Kalzit	Plankton
Makroalgen*	ja	Aragonit oder Kalzit	Benthos
Warmwasserkorallen Kaltwasserkorallen	ja (in Symbiose) nein	Aragonit Aragonit	Benthos Benthos
Flügelschnecken	nein	Aragonit	Plankton
andere Mollusken*	nein	Aragonit oder Kalzit	Benthos oder Plankton
Krebstiere*	nein	Kalzit	Benthos oder Plankton
Stachelhäuter	nein	Kalzit	Benthos

Tab. 1: Gruppen kalkbildender Meeresorganismen (Quelle: [78]); * nicht alle Arten der Gruppe sind Kalkbildner.

umkarbonates in die Tiefsee und spielen damit eine wesentliche Rolle im globalen Kohlenstoffkreislauf [79].

Coccolithophoriden sind in der gesamten Nordsee beheimatet, erreichen aber ihre größte Häufigkeit in den subpolaren Meeren, zum Beispiel dem Nordatlantik [80, 81]. In diesen Gebieten können Coccolithophoriden, meistens die Art *Emiliana huxleyi*, 80 bis 90 Prozent der Primärproduktion des betreffenden

Gebietes ausmachen. Ein Ausbleiben oder eine Verringerung der Häufigkeit dieser Organismen hätte deshalb erhebliche Folgen für die dortigen Nahrungsnetze. So könnten zum Beispiel Diatomeen eine größere Bedeutung als Primärproduzenten erlangen.

Die Entstehung von Diatomeen- statt Coccolithophoridenblüten ist bereits aus der Beringsee bekannt und hatte dort Auswirkungen auf das gesamte Nahrungsnetz, inklusive kommerzieller Fischbestände (zum Beispiel Lachs) [82]. Im Unterschied zur Nordsee sind in der Ostsee Coccolithophoriden sehr sel-

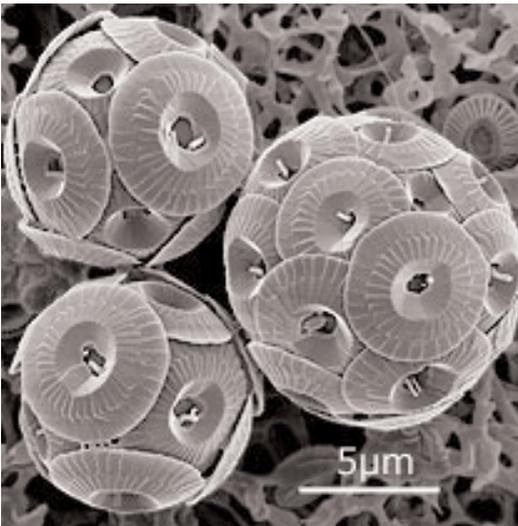


Abb. 11: Beispiel einer Coccolithophoridenart (Quelle: [136]).

ten, da bereits bei den heutigen CO_2 -Konzentrationen vor allem im Winter keine ausreichende Sättigung des Wassers mit Kalzit besteht [83].

Experimente mit Coccolithophoriden-Monokulturen und natürlichen Phytoplanktongesellschaften zeigen, dass eine erhöhte CO_2 -Konzentration erheblichen Einfluss hat: Während sich die Photosynthese-Aktivität erhöht, schwächt sich die Kalkbildung deutlich ab [79, 84, 85]. Das Verhältnis von Kalkbildung zu Photosynthese nimmt also mit steigenden CO_2 -Konzentrationen ab.

b) Korallen

Korallen reagieren als Aragonitproduzenten besonders empfindlich auf die Versauerung. Unterschreitet die Konzentration der Karbonationen einen kritischen Wert von $66 \mu\text{mol pro kg}$, so ist das Meerwasser nicht mehr gegenüber Aragonit gesättigt, das heißt, Meeresorganismen können keine Aragonitschalen mehr bilden. Die Gefahr einer Aragonituntersättigung in der Meeresoberflächenschicht ist insbesondere im Südlichen Ozean gegeben, wo die gegenwärtige Karbonatkonzentration im Mittel nur $105 \mu\text{mol pro kg}$ beträgt [86].

Simulationen von Guinotte et al. (2003) weisen darauf hin, dass bei einer atmosphärischen CO_2 -Konzentration von knapp 520 ppm nahezu alle heutigen Riffstandorte der Warmwasserkorallen wegen zu geringer Aragonitsättigung kaum noch für Korallenwachstum geeignet wären [87]. Im Jahr 2005 betrug die atmosphärische CO_2 -Konzentration bereits 379 ppm. Unter bestimmten Bedingungen kann bis zum Jahr 2100 ein Anstieg auf 740 ppm erfolgen [10].

Weniger bekannt, aber gleichermaßen gefährdet, sind Kaltwasserkorallen, die in den tiefen, lichtlosen Kaltwasserzonen unserer Weltmeere vorkommen. Große Riffe finden sich zum Beispiel in der nördlichen Nordsee (vor der Küste Norwegens) und im Atlantik westlich von Schottland (zum Beispiel Porcupine Basin). Kaltwasserkorallenriffe sind, was ihre Biodiversität und ihre genaue Verteilung angeht, noch ungenügend erforscht. Sie können in geringen bis in große Tiefen auftreten und benötigen Temperaturen, die zwischen 4 und $12 \text{ }^\circ\text{C}$ liegen [88]. Die Biodiversität des Lebensraums der Kaltwasserkorallen ist geringer als die der tropischen Korallen, sie formen aber dennoch ein Habitat für Hunderte von Wirbellosen, Algen und Fischen [89].

c) Makroalgen

Koralline Makroalgen sind eine Gruppe kalzifizierender Organismen innerhalb des marinen Benthals und kommen in tropischen bis hin zu polaren Regionen vor [90]. Sie spielen als Schlüsselorganismen in Korallenriffen eine zentrale Rolle, da sie zum Beispiel Karbonatfragmente zementieren und somit in massive Riffstrukturen verwandeln [91]. Kuffner et al. (2007) wiesen experimentell nach, dass es bei einer Verringerung des pH-Wertes zu einer Hemmung der Reproduktions- und Wachstumsraten koralliner Algen kommt [92].

Benthische Organismen konkurrieren teilweise stark um Hartsubstrate [92]. So können zum Beispiel manche Arten der Braunalge *Fucus* nur schlecht auf koral-

linen Untergründen haften. Wo koralline Algen und Korallenriffe durch Versauerung geschwächt werden, siedeln sich möglicherweise andere Makroalgen an. Die Versauerung der Ozeane könnte also zu einem Wandel und zu einer erheblichen Veränderung der Zusammensetzung benthischer Lebensgemeinschaften führen.

d) Mollusken

Mollusken bewohnen alle Bereiche der Meere, von Watt und Felswatt bis Pelagial, und kommen sowohl als Pflanzenfresser, Aasfresser, Filtrierer als auch Räuber im marinen Nahrungsnetz vor. Experimentelle Studien zeigen, dass erhöhte CO₂-Konzentrationen eine Störung des Kalzifizierungsprozesses wirtschaftlich wichtiger Arten, wie Miesmuschel (*Mytilus edulis*) und Pazifische Auster (*Crassostrea gigas*), auslösen. Dieser Effekt wurde in Laborversuchen, sowohl an ausgewachsenen Tieren [93] als auch an Larven [94, 95] nachgewiesen. Sollte die atmosphärische CO₂-Konzentration, wie in einem bestimmten Szenario des IPCC angenommen, bis zum Jahr 2100 auf 740 ppm steigen, könnte die Kalzifizierungsrate der Miesmuschel um 25 Prozent und die der Pazifischen Austern um 10 Prozent abnehmen.

e) Stachelhäuter (Seesterne und Seeigel)

Stachelhäuter (zum Beispiel Seesterne und Seegurken) sind durch die Versauerung besonders gefährdet, da ihre Kalzitstrukturen viel Magnesium enthalten und daher noch leichter löslich sind als Aragonit [96].

Große Unsicherheiten bestehen über die Kapazitäten kalkbildender Meeresorganismen, sich an diese Veränderungen anzupassen, da bisher nur wenige Ergebnisse aus Langzeitexperimenten vorliegen [78]. Kalkbildende Meeresorganismen sind wichtige Bestandteile mariner Ökosysteme, so dass ihre Gefährdung einen nicht tolerierbaren erheblichen Eingriff in das Ökosystem Erde darstellen würde.

4 WELCHE FOLGEN HAT DIE DURCH DEN KLIMAWANDEL VERURSACHTE VERÄNDERUNG VON MEERESÖKOSYSTEMEN AUF DIE NUTZUNG DES MEERES?

Die Meere spielen eine wichtige Rolle für den Menschen. Sie sind eine bedeutende Nahrungsquelle und dienen zunehmend auch der Entwicklung neuer Wirkstoffe, zum Beispiel für die Medizin („Blaue Biotechnologie“). Darüber hinaus erfüllen die Meere zahlreiche Funktionen: Als Transportweg, Rohstoff- und Energielieferant, Erholungsraum sowie regulierendes Element für das Weltklima. Der ökonomische Wert dieser Leistungen ist nicht einfach zu beziffern. Eine ungefähre Schätzung der „Ökosystemdienste“ liegt – hochgerechnet auf die Weltozeane – im Mittel bei einem Wert von jährlich 33 Trillionen (10^{12}) US-Dollar [97].

Der menschliche Einfluss auf die Meeresökosysteme ist groß: Überfischung, einschließlich illegaler und unregulierter Fischerei, Eutrophierung, Schadstoffeinträge, Degradation und Zerstörung mariner und Küstenhabitats sowie die Verbreitung invasiver Arten haben die Weltmeere an die Grenzen ihrer Belastbarkeit gebracht. Zukünftig wird auch der Klimawandel als zusätzlicher Faktor die marinen Ökosysteme beeinflussen und die Nachhaltigkeit ihrer Nutzung gefährden. Im Folgenden finden sich beispielhaft mögliche Folgen für einzelne Nutzungsarten.

4.1 Fischerei

Fisch spielt bei einer gesunden und ausgewogenen Ernährung eine wichtige Rolle, vor allem als zentrale Proteinquelle für mehr als eine Milliarde Menschen. Laut Untersuchungen der Welternährungsorganisation (FAO) hat sich der durchschnittliche Fischverbrauch pro Person in den letzten 50 Jahren mehr als verdoppelt und liegt heute bei circa 16,6 kg pro Jahr und Kopf der Weltbevölkerung. Die weltweite Fischproduktion stagniert trotz stetig verbesserter Technik seit Jahren bei circa 100 Millionen Tonnen, wovon allerdings circa 43 Prozent aus Zuchtanlagen stammen [98].

Überfischung und Missmanagement der Fischereien führten nach Angaben der FAO dazu, dass mittlerweile 52 Prozent der von der Organisation überwachten Bestände sich an der Grenze der Belastbarkeit befinden. Weitere 17 Prozent sind überfischt. Sieben Prozent der Fischbestände sind bereits zusammengebrochen [98].

Wie bereits in Kapitel 3 dargestellt, verursacht der Klimawandel künftig erhebliche zusätzliche Belastungen für die marinen Ökosysteme [1, 65] und beeinflusst als weiterer „Stressfaktor“ die Fischbestände.

Nach Angaben des IPCC (2007) sind infolge fortschreitender Erwärmung bei der Verbreitung und Produktion bestimmter Fischarten regionale Veränderungen – mit projizierten nachteiligen Auswirkungen für Aquakulturen und Fischereien – zu erwarten [10]. Eine genaue Schätzung der Folgen des Klimawandels auf die Fischerei ist jedoch schwierig und mit großen Unsicherheiten behaftet. Wirtschaftlich nutzbare Fischpopulationen reagieren zwar bereits heute auf die klimatischen Änderungen, sind jedoch in einem sehr viel höheren Maß von fischereiwirtschaftlichen Aktivitäten abhängig.

Dabei dürften durch Überfischung drastisch reduzierte Bestände für Klimaänderungen anfälliger sein als nachhaltig genutzte [99]. Genetisch vielfältige Populationen und artenreiche Ökosysteme haben ein größeres Potenzial, sich dem Klimawandel anzupassen [100]. Gesunde Bestände mit großer Population von Fischlarven können zudem besser auf Populationsverschiebungen und Veränderungen der Ökosystemstrukturen reagieren. Bei durch Überfischung stark verkleinerten Beständen wird die für den Bestandserhalt erforderliche Mindestzahl an reproduktionsfähigen Tieren leichter unterschritten [1].

In vielen Teilen der Meere ist eine Zunahme von Massenentwicklungen von Quallen zu beobachten. Quallen konkurrieren nicht nur mit vielen Fischlarven um die Nahrung, das Zooplankton [101], sondern ernähren sich zum Teil direkt von Fischeiern und -larven. Natürliche Feinde der Quallen, wie Meeresschildkröten, Thunfische und Schwertfische, sowie Nahrungskonkurrenten, wie Sardinen und Hering, sind durch die Fischerei stark dezimiert. Wegen des verringerten Fraßdrucks, der erhöhten Nahrungsverfügbarkeit und dem Anstieg der Wassertemperaturen könnte das massenhafte Auftreten von Quallen weiter zunehmen [102, 103]. Sie hätten dann das Potenzial, die Biodiversität, sowohl des Planktons als auch des Nektons (hier vor allem der Fische), zu verändern.

Ein häufiges Vorkommen an Quallen kann für die Fischerei erhebliche ökonomische Verluste bedeuten. Dies zeigte die Einschleppung der Rippenqualle *M. leidyi* Anfang der 80er Jahre des letzten Jahrhunderts aus dem Golf von Mexiko in das Schwarze Meer. *M. leidyi* dezimierte dort den Sardinen-Bestand um 90 Prozent. Auch für Aquakulturen können Quallenschwärme problematisch sein. So beobachteten im Jahr 2007 Fachleute ein massenhaftes Auftreten aus dem Mittelmeer stammender Leuchtquallen (*Pelagia noctiluca*) in britischen und irischen Gewässern. Die Quallen trieben durch die Meeresströmung in die Netzkäfige einer Lachsfarm und töteten 140.000 Fische durch das starke Gift ihrer Nesselkapseln [104].

Auch in Nord- und Ostsee beeinflussen Klimaänderungen voraussichtlich mittel- und langfristig die marine Ökosystemstruktur und die dort stattfindende intensive Fischerei. Während dort heimische Arten mit einer Verlagerung ihres Lebensraumes in kühlere Regionen reagieren, wandern bisher in südlicheren Meeresgebieten beheimatete Arten, begünstigt durch die Erwärmung des Wassers, zunehmend in die Nord- und Ostsee ein [1, 105]. Einwandernden Arten, wie Streifenbarbe und Sardine, etablieren sich wahrscheinlich in Nord- und Ostsee. Unklar ist jedoch, ob sie kurz- und mittelfristig auch für kommerzielle Fänge in Frage kommen.

4.1.1 Nordsee

Die Nordsee gehört zu den am stärksten befischten Meeren der Welt. Schätzungsweise 25 Millionen Tonnen Fisch und Meeresfrüchte holen die Fangflotten jährlich aus der Nordsee. Einnahmen aus der Nordseefischerei machten im Jahr 2001 knapp eine Milliarde Euro aus [2]. Viele Fischbestände sind akut bedroht, vor allem Kabeljau, Wittling, Scholle und Seezunge.

Wie bereits in Kapitel 3.1 „Erwärmung“ geschildert, sind, neben der Überfischung, steigende Temperaturen in der südlichen Nordsee die Ursache für eine Abnahme der Kabeljaubestände. Kabeljau benötigt zum Laichen im Winter Temperaturen unter 4 bis 5 °C, die im kältesten Monat des Jahres, dem Februar, nicht mehr erreicht werden. Zudem treten die Larven des Kabeljaus umso früher auf, je wärmer das Wasser im Winter ist. Das kann zu einer zeitlichen Entkopplung zwischen den Kabeljaularven und ihrer Nahrung führen. Die Hauptnahrung, Ruderfußkrebse (Copepoden), befindet sich in warmen Jahren zum Zeitpunkt des Abbleichens und Schlüpfen der Kabeljaularven noch auf dem Minimum ihres Jahresvorkommens. Als Folge können die Larven verhungern [41]. Beaugrand et al. (2003) zeigten, dass der Rückgang des Kabeljaus signifikant mit der veränderten Artenzusammensetzung, der Bestandsabnahme und der kleineren mittleren Körpergröße des Zooplanktons korreliert, was wahrscheinlich ebenfalls auf Klimaänderungen zurückzuführen ist.

Auch andere Studien zeigen, dass wärmere Umgebungen den Reproduktionserfolg des Kabeljaus beeinträchtigen. So nimmt die Zahl einjähriger Exemplare in der Population in Korrelation mit gestiegenen Oberflächentemperaturen des Wassers im vorangegangenen Frühling ab [106]. Als Folge kommt es voraussichtlich zu einer weiteren Abnahme der Kabeljaubestände in der südlichen Nordsee. In Zukunft verschwindet der Kabeljau wahrscheinlich ganz aus diesem Gebiet [2]. Nördliche Verbreitungsgebiete, wie die Barentssee, gewinnen für den Kabeljau dann an Bedeutung [107, 108].

Gleichzeitig wandern Warmwasserarten in die Nordsee. Meldungen von Funden und Fängen, die tropisch-subtropischen Faunenkreisen zuzurechnen sind, häufen sich. Oft sind aber Einzelfunde, wie die von Meeresschildkröten oder Mondfischen, eher Folgen extremer Wetterlagen. Der Nachweis einer Faunenverschiebung infolge der Klimaänderung erfordert Langzeitdatenserien. Diese bestätigen ein zunehmendes Auftreten südlicher Arten in der Deutschen Bucht. Stark ins Gewicht fallen vor allem die vielen milden Winter, die es diesen Arten ermöglichen, in der Nordsee zu überwintern [109]. So entwickelte sich zum Beispiel die aus dem Mittelmeer stammende Streifenbarbe (*Mullus surmuletus*) seit Beginn dieses Jahrhunderts zu einer Handelsart der Nordsee: Ihre Fangmenge stieg von 10 Tonnen im Jahr 1985 auf 700 Tonnen im Jahr 2005 [110]. Südlich von Helgoland kommen bereits regelmäßig laichreife Sardellen vor. Fischereibiologen vermuten, dass zukünftig neben Sardine und Meeräsche auch Anchovis und Wolfsbarsch häufiger in der Nordsee zu finden sind [111]. In den Niederlanden rüstete der erste Fischer sein Fanggeschirr auf Kalmare um und fischt jetzt mit Jigs (Lampen und hakenbewährten Leinen) den Gemeinen Kal-

mar (*Loligo vulgaris*), der in zunehmendem Maße aus Mittelmeer und Atlantik in die Nordsee wandert.

Seit 1958 beobachten Fachleute einen kontinuierlichen Anstieg des Auftretens von Quallen und Rippenquallen in der zentralen Nordsee [112]. Diese Zunahme hängt eng mit dem Einströmen von Atlantikwasser in die nördliche Nordsee zusammen. Durch die gestiegene Wassertemperatur und die Tatsache, dass das Wasser vor allem im Winter deutlich wärmer geworden ist, können Arten überleben, die es früher nicht gegeben hat, wie beispielsweise die amerikanische Rippenqualle *Mnemiopsis leidyi*. Ein übermäßiges Auftreten der Quallen könnte Konsequenzen für das pelagische Ökosystem und die Fischerei haben, da sich die in der Nordsee ansässigen Quallen hauptsächlich von Zooplankton, einschließlich Fischlarven und -eiern, ernähren [112].

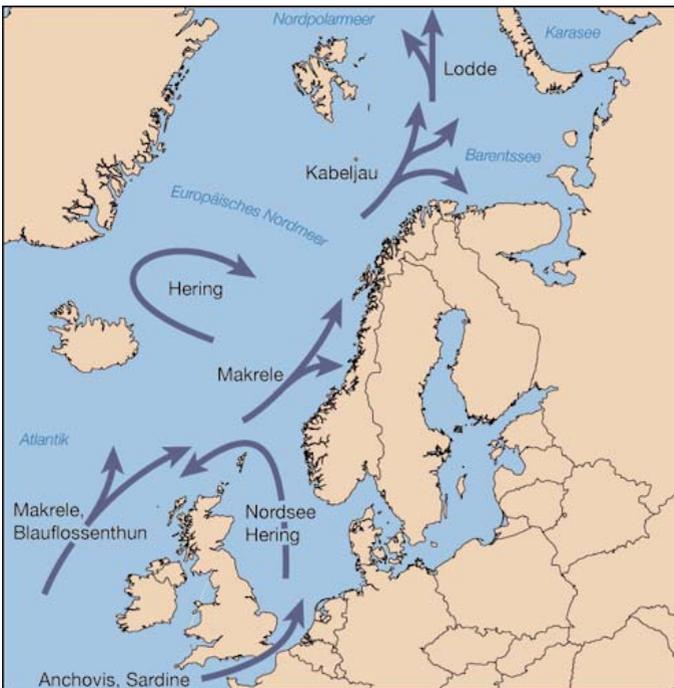


Abb. 12: Voraussichtliche Verschiebung der Lebensräume einiger wichtiger kommerziell befischter Arten bei weiterer Erwärmung der Meere. (Quelle: [1])

Zusammenfassend beobachteten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in der Nordsee über den Zeitraum von 1925 bis 2004 grundlegende Veränderungen des pelagischen Ökosystems, die durch eine deutliche Verschiebung vieler Populationen nach Norden und der Einwanderung südlicher Arten [1, 113] charakterisiert ist (siehe Abb. 12). Diese systematischen Langzeitrends korrelieren

mit einer steigenden Meerestemperatur. Die Beobachtungen in der Nordsee lassen den Schluss zu, dass ein weiterer Temperaturanstieg zusätzliche, im Detail kaum zu prognostizierende Änderungen von Artenzusammensetzung und Ökosystemstruktur verursachen und damit erheblichen Anpassungsdruck auf die kommerzielle Fischerei ausüben würde [114].

4.1.2 Ostsee

Satellitenbilder zeigen für den Zeitraum 1990 bis 2005 eine Zunahme der Ostsee-Oberflächenwassertemperatur um durchschnittlich 0,8 °C. Eine Erwärmung spiegelte sich auch in der Abnahme der Zahl kalter Wintertage, der zeitlichen Länge der Eisbedeckung und Eisdicke sowie in einer Zunahme der Länge frostfreier Tage wider. Wegen erhöhter Niederschläge in der Region findet ein stärkerer Abfluss über die Flüsse in die Ostsee statt, wodurch sich dort der durchschnittliche Salzgehalt verringert sowie es zu einem höheren Eintrag von Nährstoffen kommt. Zusammen mit der steigenden Wassertemperatur gibt es bereits heute sichtbare Effekte auf wirtschaftlich wichtige Fischarten der Ostsee.

Das Leben im Brackwassermilieu der Ostsee stellt erhöhte Anforderungen an die Regulation des Osmose- und Salzwasserhaushaltes der Organismen. Sowohl limnische als auch marine Organismen leben in der Ostsee an ihren halinen Toleranzgrenzen. Deshalb können schon geringfügige Änderungen der Umweltbedingungen Verschiebungen der Artenzusammensetzung und der räumlichen Verbreitung für Pflanzen und Tiere haben. Hydrographische (schmaler Zufluss aus der Nordsee und flache Becken) und ökologische Bedingungen (Brackwasser) machen die Ostsee besonders empfindlich gegenüber äußeren Einflüssen.

Die kommerzielle Ostsee-Fischerei dominieren zu 95 Prozent Fänge von Sprotte, Hering und Dorsch. Während in den letzten beiden Jahrzehnten der Dorschbestand von einem historischen Hoch (in den frühen 1980er Jahren) auf den geringsten aufgezeichneten Stand (zu Beginn der 1990er) sank, vergrößerte sich der Sprottenbestand während der 1990er Jahre [115]. Mögliche Ursachen für diese gegensätzliche Entwicklung sind:

- ▶ hoher Fischereidruck auf den Dorsch und relativ geringer Fischereidruck auf die Sprotte,
- ▶ verringerter Beutedruck auf die Sprotte nach dem Rückgang der räuberischen Dorschbestände und vor allem
- ▶ schlechter Fortpflanzungserfolg des Dorsches, guter Fortpflanzungserfolg der Sprotte.

Die Entwicklung der Dorsch-, Herings- und Sprottenbestände innerhalb der letzten 20 Jahre bringen Fachleute zudem mit salzbedingter Änderung der Zooplanktongemeinschaft in Verbindung, die die Futtergrundlage der dominanten Fischarten der Ostsee sind.

In der Ostsee bestimmt hauptsächlich der Salzgehalt die Biodiversität des Zooplanktons. Die Verschiebung der Verteilung mariner Copepodenarten (Ruderfußkrebse) in Richtung Norden steht eindeutig damit im Zusammenhang. So beobachteten Fachleute zwischen 1980 und 1990 wegen des geringen Salzgehaltes einen Bestandsrückgang des Copepoden *Pseudocalanus acuspes*, wohingegen sich der Ruderfußkreb *Acartia* *ssp.* in den 1990er Jahren wegen erhöhter Wassertemperaturen stark vermehrte [115].

Die Klimaänderungen haben direkte und indirekte Folgen auf die Überlebensrate des Nachwuchses von Dorsch und Sprotte sowie das Wachstum der Bestände von Hering und Sprotte. Das Klima beeinflusst einerseits den Salzgehalt und die Sauerstoffverhältnisse durch das Ein- und Ausströmen des Nordseewassers und andererseits die Wassertemperatur durch die direkte Wechselwirkung von Luft und Meer.

Veränderungen der Salz- und der Sauerstoffverhältnisse wirken sich direkt auf die Überlebensrate der Dorscheier und damit auf den Dorschbestand aus. Dorscheier entwickeln sich nur bei einem bestimmten Salzgehalt des umgebenden Wassers. Wird dieser unterschritten, sinken die Eier in sauerstoffverarmte oder -freie Wasserschichten und sterben. Seit Beginn der 1980er Jahre führte die vom Klima induzierte Veränderung der hydrographischen Bedingungen (Abnahme des Salzgehaltes, Zunahme der Wassertemperatur, Abnahme der Sauerstoffkonzentration in tieferen Gewässern) zu einer erhöhten Sterblichkeitsrate des Dorschrogen (vor allem im Gdansk Tief und Gotland Becken). Gleichzeitig bewirken die verringerten Salz- und Sauerstoffgehalte einen Rückgang des Ruderfußkrebsses *Pseudocalanus acuspes* und damit eine Nahrungsknappheit für die Dorschlarven [115].

Hingegen hängt die Zunahme des Sprottenbestands in den 1990er Jahren mit dem reduzierten Fraßdruck durch den räuberischen Dorsch sowie der Verbesserung der Umweltbedingungen für die Sprotte zusammen. Infolge des leichteren spezifischen Gewichts der Sprotteneier schwimmen diese näher an der Wasseroberfläche. Ihr Überleben ist daher im Gegensatz zum Dorschrogen weniger von den geringeren Sauerstoffkonzentrationen in tieferen Wasserschichten abhängig. Zusätzlich beeinflussen Wassertemperaturen unter 4 °C die Entwicklung der Sprotteneier und -larven negativ. Das Fehlen kalter Wintertemperaturen seit dem Jahr 1986/87 verbesserte die Reproduktionsbedingungen für die Sprotte. Im Unterschied zu den Dorschlarven ernähren sich die Sprottenlarven hauptsächlich von dem Ruderfußkrebs *Acartia spp.* Die hohen Wassertemperaturen während der 1990er Jahre, insbesondere im August, bewirkten eine positive Bestandsentwicklung dieses Ruderfußkrebsses und damit eine Verbesserung der Futtersituation für die Sprottenlarven. Beide Faktoren führten gemeinsam wahrscheinlich zu den ungewöhnlich hohen Sprottenbeständen während der 1990er Jahre [115].

Der verringerte Bestand des Ruderfußkrebsses *Pseudocalanus acuspes* und der zunehmende Konkurrenzdruck durch den vergrößerten Sprottenbestand wirken sich negativ auf die Wachstumsrate und die Fitness der Heringbestände aus. Wegen des starken Konkurrenzdruckes innerhalb des großen Sprottenbestands reagieren die Tiere mit einem verlangsamten Wachstum.

Eine Ursache für die Änderungen der Fischbestände im Ökosystem der Ostsee zu finden, ist schwierig, da anthropogen verursachte, nicht-klimatische Stressfaktoren (zum Beispiel Überdüngung, Überfischung, Schiffsverkehr, Schadstoffeinleitung) mögliche Effekte des Klimawandels überlagern.

Obwohl die Wirkungsweise und Intensität der globalen Klimaänderung für das 21. Jahrhundert nicht oder nur schwer präzise vorhersagbar sind, ist jedoch sicher, dass voraussichtlich die Zunahme der Temperatur im Zusammenhang mit Wind und Niederschlägen einen entscheidenden Einfluss auf die Biosphäre in der Ostsee haben. Dies trifft vor allem die Artenzusammensetzung und -verteilung sowie deren bisher nur teilweise verstandenen Interaktionen [115].

4.2 Tourismus

Jedes Jahr verbringen Millionen von Menschen ihren Urlaub am Meer auf der Suche nach Sonne, Strand und klarem Wasser. Für die meisten Küstenregionen spielt der Tourismus eine dominante Rolle und bietet besonders den ländlichen Regionen ein nicht zu unterschätzendes Entwicklungspotential. So beträgt der touristische Umsatz in Schleswig-Holstein circa 4,5 Mrd. Euro. Insgesamt 130.000 Einwohner beziehen ihr Einkommen vollständig aus dem Tourismus [116]. Auch in Mecklenburg-Vorpommern hat der Tourismus mittlerweile einen Anteil von mehr als 10 Prozent an der wirtschaftlichen Gesamtleistung des Bundeslandes [117].

Mit dem Klimawandel steht die Tourismuswirtschaft vor einer neuen Herausforderung. Die Attraktivität einzelner Urlaubsregionen wird sich dauerhaft verändern und in den nächsten Jahren regionale und saisonale Verschiebungen der nationalen und internationalen Touristenströme verursachen. Der Tourismus ist, unabhängig vom Klimawandel, starken Schwankungen und Veränderungen unterworfen, die im Zusammenhang mit Änderungen in den sozioökonomischen Rahmenbedingungen, der Altersstruktur, im Lebensstil und der internationalen Sicherheitslage stehen. Welchen Einfluss dabei ein Wandel der marinen Ökosysteme hat, ist schwer zu sagen. Es ist jedoch wahrscheinlich, dass Touristinnen und Touristen, wenn sie ihren ungestörten Urlaub als nicht mehr gewährleistet sehen, sich neue Zielorte suchen oder zu Hause bleiben – mit allen wirtschaftlichen Folgen für die betroffenen Regionen.

Im Folgenden stehen daher mögliche Folgen für den Tourismus im Vordergrund, die im Zusammenhang mit den durch Klimaänderungen verursachten Wirkungen auf die Meeresökosysteme stehen.

4.2.1 Quallenplagen

Seit mehreren Jahren häufen sich Berichte über Quallenplagen, besonders soweit diese mit Strandsperrungen in der Badesaison verbunden sind. So leiden vor allem die beliebten Urlaubsziele des Mittelmeeres sowie der Nord- und Ostsee unter dem massenhaften Auftreten der gallertartigen Meerestiere. Wie bereits im Kapitel 4.1 Fischerei erläutert, führen Fachleute diese immer öfter auftretenden Phänomene hauptsächlich auf zwei Gründe zurück: Wegen Überfischung haben die Quallen kaum noch natürliche Feinde, wie Thunfisch,

Schwertfisch oder Schildkröten. Zudem begünstigt das infolge des Klimawandels erwärmte Wasser die Vermehrung und Verbreitung.

An den Stränden Spaniens kommt noch eine meteorologische Komponente dazu. Bislang wurden die Quallen durch kühles Süßwasser aus den Flüssen als natürliche Barrieren ferngehalten. Folgen der Übernutzung des Süßwassers, zum Beispiel für landwirtschaftliche Zwecke, und klimatische Veränderungen, wie trockene Winter und regenarme Frühjahrsperioden, sind verringerte Süßwasserabflüsse in das Meer. In Folge dessen nähern sich die Tiere zunehmend mehr als die üblichen 10 bis 20 Seemeilen an die Küste an.

In Europa sind die meisten Quallenarten für den Menschen ungefährlich und sind vor allem ein Wahrnehmungsproblem. Viele Strandbesucherinnen und -besucher empfinden die Tiere als eklig und unberechenbar. Die häufigste, in Massen vorkommende Art in der Nord- und Ostsee ist die Ohrenqualle *Aurelia aurita* (siehe Abb. 13). Diese bis zu 30 cm große Meduse tritt besonders häufig im Sommer auf, wenn Licht und Wärme die Vermehrung des Zooplanktons fördern. Sie ist für Badende ungefährlich, kann jedoch für Schifffahrt und Industrieanlagen Probleme verursachen. So legten Ohrenquallen im Jahr 1976 ein Kernkraftwerk in Schweden lahm, als sie mit dem Kühlwasser tonnenweise angesaugt wurden. Manche stark nesselnden Quallen, wie die Feuerqualle oder die Blaue Nesselqualle, sind sehr unangenehm und lösen bei Hautkontakt kurzzeitige Rötungen und Juckreiz aus. Schwindel, Übelkeit und Kopfschmerzen können folgen [118].



Abb. 13: Ansammlung von Ohrenquallen im Hafen von Eckernförde (Quelle [134]).

Anders sieht es in den tropischen Meeren aus, wo die Nesselkapseln, zum Beispiel der Portugiesischen Galeeren und Seewespen, bei ausbleibender sofortiger medizinischer Versorgung innerhalb weniger Minuten im schlimmsten Fall zu Herz- und Atemstillstand führen können. Die australische Seewespe ist das giftigste im Meer lebende Tier.

Quallenplagen können Urlauberinnen und Urlauber das Badevergnügen verderben. Mit unangenehmer Erinnerung an den Urlaub fahren die Gäste dann nach Hause und kommen vielleicht nicht mehr zurück. Für viele Urlaubsregionen stehen somit große Verluste durch ausbleibende Besucherinnen und Besucher auf dem Spiel.

Die Zahl und Orte von Quallenplagen variieren von Jahr zu Jahr erheblich. Da Wind und Strömung die Tiere je nach Wetterlage an verschiedene Strände spülen können, gibt es keine zuverlässigen und langfristigen Prognosen über ihr Auftreten an bestimmten Küsten. Auch Studien zu den Wanderbewegungen der Quallen, die ebenfalls von Wind und Strömungen abhängen, sind schwierig, da die oft durchsichtigen Tiere auf Satellitenfotos kaum zu erkennen sind. Fachleute berichten über eine Zunahme der Massenentwicklungen bei Quallen, jedoch fehlen Langzeitdaten und Laborversuche [119].

4.2.2 Algenblüten und Fischsterben

In der Ostsee treten im Sommer vermehrt großflächige Blaualgenblüten (Cyanobakterienblüten) auf (siehe Abb. 14). Blaualgenmatten sehen nicht nur unappetitlich aus, sie können bei empfindlichen Menschen auch zu Hautreizungen führen. Einige Blaualgenarten entlassen für Menschen und Tiere gefährliche Nervengifte (Neurotoxine) ins Wasser. Diese greifen das Nervensystem an und können es schädigen (vgl. Kapitel 4.3 Gesundheit). Die Toxizität dieser Blaualgen beeinträchtigt die Nutzung der Gewässer, insbesondere für den Tourismus. Wenn Meeresabschnitte für den Badebetrieb zeitweilig gesperrt werden müssen, hat das ökonomische Auswirkungen für die Region.



Abb. 14: Satellitenbild einer Cyanobakterienblüte in der Ostsee am 06.07.2006 (Quelle: [137]).

Derartige Maßnahmen betrafen im August 2003 Heiligendamm, Usedom und Hiddensee, im August 2006 Strandabschnitte zwischen Barendorf und Steinbeck (Nordwestmecklenburg) sowie den Strand bei Grömitz (Ostküste Schleswig-Holstein) [120]. Da Cyanobakterien sehr Wärme liebend sind, würde die Erderwärmung ihr vermehrtes Auftreten noch fördern. Andererseits bevorzugen diese Bakterien geringe CO₂-Konzentrationen und hohe pH-Werte. In dieser Hinsicht dürften sie bei zunehmender Erhöhung der weltweiten Temperatur Nachteile gegenüber ihren Konkurrenten haben. Das ökologische Wirkungsgefüge ist sehr komplex und macht Prognosen schwierig [120].

In der Nordsee ist zu befürchten, dass mit zunehmender Wassertemperatur Algenblüten der Dinoflagellate - wie *Akashiwo sanguinea* und eventuell *Gymnodinium chlorophorum* - vermehrt auftreten (siehe Abb. 15) [2]. Diese Algenarten verfärben bei Massenvorkommen wegen ihrer hohen Zelldichte das Meerwasser. Andererseits könnten die Algenblüten anderer, an kalte Temperaturen angepasster Algen, wie die Schaumalge *Phaeocystis globosa*, an Bedeutung verlieren [121].

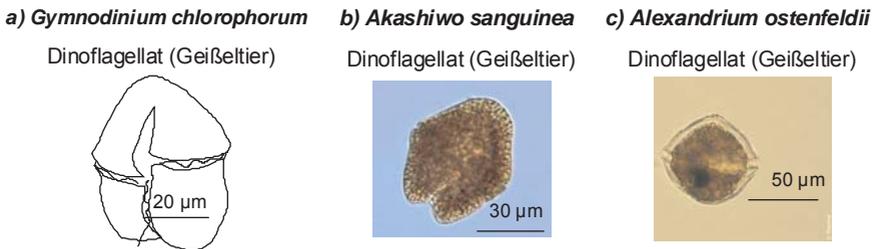


Abb. 15: Giftige und Blüten formende Mikroalgen (a-c) (Quelle: [2]).

Treten die Algenblüten sehr stark auf, können mikrobielle Abbauprozesse der Algenbiomasse einen Sauerstoffmangel im Wasser hervorrufen. Dies kann bei Fischen und am Boden lebenden Tieren zum Erstickungstod führen. Außerdem können Fäulnisprozesse entstehen, die Geruchsbelästigungen verursachen.

Die Frage, ob es wegen des Klimawandels zu einer langfristigen Zunahme der Intensität der Algenblüten kommen wird, ist schwierig zu beantworten. Experten sehen die übermäßige Nährstoffzufuhr (Eutrophierung) in die Meere als eigentliche Hauptursache. Generell lässt sich feststellen, dass Algenblüten nicht nur ein ästhetisches Problem – wegen des Schaum der Algen am Strand und sogar sterbender Fische - sind, sondern auch ein ernstzunehmendes Risiko für Mensch und Umwelt darstellen können, wodurch sich die Attraktivität vieler Strände für den Tourismus erheblich verringert.

4.2.3 Korallensterben



Abb. 16: Tropisches Korallenriff (Quelle: [129])

Sie haben prachtvolle Farben, beherbergen eine Vielfalt bunter Fischen und bieten vor allem zahlreichen Touristen einen schönen Anblick: die Korallenriffe (siehe Abb. 16). Korallenriff-Regionen – etwa in Indonesien – sind auch Ziel von Tauchreiseveranstaltungen. Die Einnahmen aus dem Tauchtourismus sind für viele Menschen die einzige Lebensgrundlage.

Korallen reagieren auf eine zunehmende Erwärmung und Versauerung des Meerwassers mit Korallenbleiche und allmählichem Auflösen der Kalkskelette. Es bleiben unansehnliche „Schutthaufen“ auf dem Meeresboden zurück, die an Attraktivität verlieren und vor allem einen Lebensraumverlust vieler Lebewesen bedeuten.

4.3 Gesundheit

Giftige Algenblüten treten oft in nährstoffreichen, küstennahen Gebieten auf. Die Küsten gehören zu den bevölkerungsreichsten Gebieten der Erde. Insbesondere im asiatischen Raum werden die küstennahen Gewässer mehr und mehr zur Aqua- beziehungsweise Marinekultur – einschließlich Muschelzucht – genutzt. Da viele der in nährstoffreichen Küstengewässern vermehrt auftretenden Algen giftig sind, ist mit diesen Blüten ein erhöhtes Gesundheitsrisiko für die Menschen verbunden.

Besonders der toxinbildende Dinoflagellat *Alexandrium ostenfeldii* könnte in Zukunft ein Risiko darstellen (siehe Abb. 15). *A. ostenfeldii*-Zellen sind nicht nur selbst giftig, sondern geben auch in geringem Maße Neurotoxine in das umgebende Wasser ab. *A. ostenfeldii* hat eine weite Verbreitung und wurde außer in Island auch an der russischen Pazifikküste [122], in Kanada [123], Neuseeland, Norwegen und Dänemark [124] gefunden. Seit 2006 kam diese Art einige Male in der Nordsee, einschließlich der Wattenmeerküste vor [2]. Auch seine Neurotoxine wurden bereits in der Nordsee nachgewiesen. In der Ostsee ist diese Art bisher noch nicht bekannt, jedoch werden die Zellen in Routineuntersuchungen oft übersehen.

Im Mittelmeer - insbesondere vor Genua - trat in den vergangenen Jahren vermehrt der tropische Dinoflagellat *Ostreopsis ovata* auf. Im Juli 2005 kamen 180 Touristen mit Fieber, Atembeschwerden sowie Bauchkrämpfen ins Krankenhaus, nachdem sie gebadet oder sich am Wasser aufgehalten hatten.

Zusätzlich zu den direkten Gefahren für die menschliche Gesundheit kann das Auftreten dieser Blüten Probleme für Aquakulturen und die fischverarbeitende Industrie verursachen. In den Niederlanden, Spanien und Frankreich müssen schon jetzt nach dem Auftreten giftiger Algenblüten - zum Beispiel des Dinoflagellaten *Dinophysis* - die geernteten Tiere aus Muschel- und Austernfarmen vor dem Verkauf gereinigt werden [2]. Dies geschieht mit der Überführung der Tiere in riesige Durchfluss-Systeme, in denen die Tiere so lange sauberes Wasser filtern, bis keine Algentoxine mehr im Gewebe nachzuweisen sind [125]. Dieser Prozess kann mehrere Wochen in Anspruch nehmen und verursacht hohe Kosten. Wegen der potenziellen Vergiftungsgefahr für den Menschen ist in vielen europäischen Küstenregionen eine arbeits- und deshalb kostenintensive Überwachung des Wassers und der zu verkaufenden Tiere notwendig. In den USA belaufen sich die durch giftige Algenblüten verursachten Kosten auf ungefähr 80 Millionen Dollar pro Jahr. Das entspricht etwa 55 Millionen Euro [2].

4.4 Naturstoffforschung

Die Erforschung biogener Wirk- und Wertstoffe befindet sich zwar erst in den Anfängen, gewinnt aber als Wirtschaftszweig zunehmend an Bedeutung. Ziel ist es, von marinen Organismen ausgeschiedene Substanzen - wie Enzyme - zu finden und als Wirkstoffe für neue Arzneien einzusetzen. Im Meer gibt es eine

Vielzahl an Organismen, deren Stoffe für die pharmazeutische Industrie bedeutsam sind [126]. Von besonderem Interesse sind die an extreme Lebensräume angepassten Organismen wie Tiefsee- und Wärme liebende Bakterien sowie Algen, Krill, marine Pilzarten, Schwämme und methanotrophe Mikroorganismen. Die meisten dieser Lebensformen besitzen spezielle Enzyme, Schutz- und Wirkstoffe, um sich an Stressfaktoren ihrer Umgebung - etwa Kälte, hohe Temperaturen, hohe Salzgehalte sowie hohe Metallionenkonzentration - anzupassen oder vor Fraß zu schützen.

Enzyme Kälte liebender Bakterien beispielsweise bieten die Möglichkeit, industrielle Prozesse bei sehr niedriger Temperatur - das bedeutet kosten- und energiesparend - durchzuführen. Auch in der Lebensmittel- und Kosmetikindustrie finden Produkte aus dem Meer immer öfter Anwendung. So werden in vielen Milchprodukten Alginat als Geliermittel benutzt. Diese Substanzen werden aus Makroalgen - wie *Laminaria* - gewonnen. In Frankreich, wo *Laminaria* häufig vorkommt, werden jährlich ungefähr 75.000 Tonnen natürlich wachsende *Laminaria* geerntet und zusätzlich, um den Bedarf zu decken, in speziellen Aquakulturfarmen angebaut. Auch kleinere Betriebe an Nord- und Ostsee bauen *Laminaria* an, um eine Vielzahl an Produkten herzustellen oder um nach Substanzen für neue Arzneien zu suchen [2, 127].

Ein Verlust an mariner Biodiversität - zum Beispiel wegen des Klimawandels - kann zu einem Verlust kommerziell nutzbarer Pflanzen und Tiere für die marine Naturstoffforschung führen. Ein Beispiel hierfür ist die eingewanderte Makroalge *Sargassum muticum*, die an der spanischen Nordküste bereits begonnen hat einheimische Arten zu verdrängen, die bei der Produktion von Geliermitteln zum Einsatz kommen [128].

Natürlich könnte sich mit der Einwanderung nicht heimischer Arten auch die Biodiversität in einem Gebiet erhöhen und so potenziell die Grundlage für neue nutzbare Naturstoffe bilden.

5 ABSCHLIEßENDE BEMERKUNGEN

Marine Organismen konnten sich über lange Zeiträume an die Gegebenheiten ihres Lebensraumes im Meer anpassen. So haben sich in verschiedenen biogeographischen Provinzen des Ozeans typische Lebensgemeinschaften mit wiederkehrenden und doch variablen Mustern - wie Saisonalität, Artendominanz und rückgang - entwickelt [129]. Diese Lebensgemeinschaften werden in komplexer und vielfach kaum verstandener Weise durch physikalische, chemische und biologische Rahmenbedingungen und ihre Variabilität in Raum und Zeit bedingt.

Im Zuge des globalen Klimawandels sich ergebende Änderungen dieser Rahmenbedingungen haben bereits zu Verschiebungen in marinen Ökosystemen geführt und werden dies auch künftig tun. Die Erderwärmung hat für eine Vielzahl mariner Organismen Folgen für den Fortbestand ihrer Art. Während die einen die Veränderungen zum Vorteil nutzen könnten, müssen andere weichen. Die Anpassungsfähigkeit eines jeden Organismus hat Grenzen [8]. Es ist zu befürchten, dass der vom Menschen verursachte Klimawandel die physikalische und chemische Umwelt für marine Organismen derart schnell verändert, dass sich die Arten nicht schnell genug anpassen können.

Komplizierte Wechselwirkungen zwischen den physikalischen, chemischen und biologischen Rahmenbedingungen und der biologischen Vielfalt mariner Lebensgemeinschaften, die begrenzte Aussagekraft der Klimamodelle und nicht zuletzt die methodischen Grenzen experimenteller Untersuchungsmethoden erschweren eine genaue Vorhersage der zu erwartenden Änderungen in marinen Ökosystemen. Viele der in diesem Bericht vorgestellten Forschungsergebnisse beruhen auf Einzelstudien. Dies betrifft sowohl die Beschreibung häufig noch wenig bekannter Ökosysteme - wie Kaltwasserkorallen - als auch Wechselbeziehungen zwischen Organismen und abiotischen Faktoren. Toleranzbereiche der Meeresorganismen gegenüber Temperatur, Salzgehalt und pH Wert sind messbar und erlauben es, die theoretisch mögliche Verbreitung einer Art zu beschreiben sowie Vorhersagen einer künftigen Verbreitung bei sich ändernden Umweltbedingungen zu machen. Wie aber in einem Gebiet heimische Arten auf „Neuankömmlinge“ oder auf vermehrtes Aufkommen anderer heimischer Arten reagieren, ist erheblich schwerer vorherzusagen, da zum Teil neue Wechselbeziehungen zwischen Organismen entstehen, die noch unbekannt sind [2]. Trotz der Aktualität der „Klimaproblematik“ ist zu beachten, dass der Klimawandel für die Meere nur ein - wenn auch bedeutender - Stressfaktor unter vielen ist.

Obwohl dieser Bericht nicht alle Fragen im Zusammenhang mit den Auswirkungen der globalen Klimaänderung auf die Meeresumwelt beantwortet, macht er deutlich, dass der Klimawandel bereits heute beobachtbare Effekte auf die Verbreitung mariner Organismen und die Artenzusammensetzung der Meeresökosysteme hat. Forscher haben Klimawirkungen für alle Ebenen des Ökosystems beschrieben - von Phytoplankton über das Zooplankton und die Fische bis hin zu den Vögeln und großen Säugetieren.

Trotz vieler offener Fragen und Unsicherheiten müssen wir heute Vermeidungs- und Anpassungsmaßnahmen planen und initiieren, auch um dem Vorsorgeprinzip Rechnung zu tragen. Viele der durch den Klimawandel verursachten Änderungen im Meer vollziehen sich nur sehr langsam und sind nicht kurzfristig reversibel - wie die Versauerung der Meere. Der Klimawandel wird als bedeutender Faktor die marinen Ökosysteme beeinflussen und die Nachhaltigkeit ihrer Nutzung gefährden. Die Zukunft der marinen Umwelt wird entscheidend davon abhängen, ob sich die menschengemachte Störung des Klimasystems auf ein tolerierbares Maß begrenzen lässt.

6 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] WBGU - Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (2006): Die Zukunft der Meere – zu warm, zu hoch, zu sauer. Sondergutachten. Berlin.
- [2] Kraberg, A.C., Husmann, G., Brennholt, N., Lücke, N., Ehmen, S., Wiltshire, K.H. (2008): Konsequenzen des Klimawandels für die Biodiversität der Meere. Biologische Anstalt Helgoland (BAH) des Alfred-Wegener-Instituts für Polar- und Meeresforschung (AWI). Gutachten im Auftrag des Umweltbundesamtes „Wie wirkt der Klimawandel auf die Biodiversität der Meere?“. Dessau.
- [3] Census of Marine Life. URL: <http://www.coml.org/> [Stand 24.09.2008].
- [4] Conversi, A., Piontkovski, S. et al. (2001): Seasonal and interannual dynamics of *Calanus finmarchicus* in the Gulf of Maine (Northeastern US shelf) with reference to the North Atlantic Oscillation. Deep-Sea research II 48: 519-530.
- [5] Begon, M., Harper, J. L. et al. (1990): Ecology: Individuals populations and communities. Oxford, Blackwell Scientific Publications.
- [6] Davenport, J., Davenport, J. L. (2007): Interaction of thermal tolerance and oxygen availability in the eurythermal gastropods *Littorina littorea* and *Nucella lapillus*. Marine Ecology Progress Series 332: 167-170.
- [7] Beukema, J. J., Dekker, R. (2005): Decline of recruitment success in cockles and other bivalves in the Wadden Sea: possible roles of climate change, predation on postlarvae and fisheries. Marine Ecology Progress Series 287: 149-167.
- [8] Poertner, H. O., Knust, R. (2007): Climate change affects marine fishes through the oxygen limitation of thermal tolerance. Science 315(5808): 95-97.
- [9] Freund, J., Mieruch, S. et al. (2007): Bloom dynamics in a seasonally forced phytoplankton-zooplankton model: Trigger mechanisms and timing effects. Ecological complexity 3(2): 129-139.
- [10] IPCC (2007): Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: Klimaänderung 2007: Wissenschaftliche Grundlagen. Beitrag der Arbeitsgruppe I zum 4. Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC), Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z.Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor und H. L. Miller. Eds., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Deutsche Übersetzung durch ProClim-, österreichisches Umweltbundesamt, deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bern/ Wien/Berlin.
- [11] Levitus, S., Antonov, J. und Boyer, T.P. (2005): Warming of the world ocean, 1955-2003. Geophysical Research Letters 32, L02604, doi:10.1029/2004GL021592.

- [12] Boelens, R., Minchin, D. et al. (2005): Climate change. Implications for Ireland's marine environment and resources. *Marine Foresight series 2*: 40.
- [13] Kirby, R. R., Beaugrand, G. et al. (2007): Climate effects and benthic-pelagic coupling in the North Sea. *Marine Ecology Progress Series 330*: 31-38.
- [14] MacKenzie, B. R., Schiedek, D. (2007): Daily ocean monitoring since the 1860s shows record warming of northern European seas. *Global change biology 13*(7): 1335-1347.
- [15] Spektrum direct: Klimawandel raubt Fischen den Sauerstoff. URL: <http://www.wissenschaft-online.de/artikel/861595&z=859070> [Stand 24.09.2008].
- [16] n-tv.de: Fundsache, Nr. 135 Fisch-Wachstum verändert. URL: http://www.n-tv.de/Fundsache_Nr_135_FischWachstum_veraendert/230420070023/793958.html [Stand 24.09.08].
- [17] Thresher, R.E., Koslow, J.A., Morison, A.K., Smith, D.C. (2007): Depth-mediated reversal of the effects of climate change on long-term growth rates of exploited marine fish. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO). URL: <http://www.pnas.org/content/104/18/7461.full.pdf> [Stand 24.09.08].
- [18] Hoegh-Guldberg, O. (1999): Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. *Marine & Freshwater Research 50*(8): 839-866.
- [19] Spiegel Online (2007): Aus Fischern werden Wasser-Bauern. URL: <http://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/0,1518,522554,00.html> [Stand 24.09.08].
- [20] Dethier, M. N., Williams, S. L. et al. (2005): Seaweeds under stress: Manipulated stress and herbivory affect critical life-history functions. *Ecological monographs 75*(3): 403-418.
- [21] Bartsch, I., Kuhlenkamp, R. (2000): The marine macroalgae of Helgoland (North Sea): an annotated list of records between 1845 and 1999. *Helgoland Marine Research 54*(4): 160-189.
- [22] Bartsch I., Kuhlenkamp R., Boos K., Gehling C. (2006): Praxistest für das Makrophyten- und Miesmuschel-Monitoring bei Helgoland im Rahmen der WRRL: Küstengewässertyp Helgoland (N5). 60 Seiten + Anhang.
- [23] Fortes M. D., Lüning K (1980): Growth rates of North Sea macroalgae in relation to temperature, irradiance and photoperiod. *Helgol Meeresunters 34*:15-29.
- [24] Bolton J. J., Lüning K (1982): Optimal growth and maximal survival temperatures of Atlantic *Laminaria* species (Phaeophyta) in culture. *Mar Biol 66*:89-94.
- [25] tom Dieckl (1992): North Pacific and North Atlantic digitate *Laminaria* species (Phaeophyta): hybridization experiments and temperature responses. *Phycologia 31*:147-163.

- [26] Breeman, A.M. (1988): Relative importance of temperature and other factors in determining geographic boundaries of seaweeds: experimental and phenological evidence. *Helgol. Meeresunters.* 42: 199-241.
- [27] Walther, G. R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T.J.C., Fromentin, J.M., Guldborg, O.H. & Bairlein, F (2002): Ecological responses to recent climate change. *Nature* 416: 389-395.
- [28] Parmesan, C., Yohe, G. (2003): A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* 421: 37-42.
- [29] Parmesan, C., Gaines, S. et al. (2005): Empirical perspective on species borders: from traditional biogeography to global change. *Oikos* 108: 58-75.
- [30] Hoppe, H.-G., Breithaupt, P., Walther, K., Koppe, R., Bleck, S., Sommer, U., Jürgens, K.S. (2008): Climate warming during winter affects the coupling between phytoplankton and bacteria during the spring bloom: Results from a mesocosm study. *Aquatic Microbial Ecology (AME)*, in press, 2008.
- [31] Greve, W., Reiners, F. et al. (1996): Biocoenotic changes of the zooplankton in German Bight: the possible effects of eutrophication and climate. *ICES J. mar. Sci.* 53: 951-956.
- [32] Wiltshire, K. H., Manly, B. F. J. (2004): The warming trend at Helgoland Roads, North Sea: phytoplankton response. *Helgoland Marine Research* 58: 269-273.
- [33] Greve, W., Prinage, S. et al. (2005): On the phenology of North Sea ichthyoplankton. *Journal of Marine Sciences* 62: 1216-1223.
- [34] Edwards, M., Richardson, A. J. (2004): Impact of climate change on marine pelagic phenology and trophic mismatch. *Nature* 430: 881-884.
- [35] Durant, J. M., Hjermmann, D. O. et al. (2005): Timing and abundance as key mechanisms affecting trophic interactions in variable environments. *Ecology Letters* 8: 952-958.
- [36] Sullivan, v. K., Clancy (2001): Timing and size of blooms of the ctenophore *Mnemiopsis leidyi* in relation to temperature in Narragansett Bay, RI. *Hydrobiologia* 451: 113-120.
- [37] Sullivan, B. K., Costello, J. H. et al. (2007): Seasonality of the copepods *Acartia hudsonica* and *Acartia tonsa* in Narragansett Bay, RI, USA during a period of climate change. *Estuarine Coastal And Shelf Science* 73(1-2): 259-267.
- [38] Reid, P. C., Borges, M. F. et al. (2001): A regime shift in the North Sea circa 1988 linked to changes in the North Sea horse mackerel fishery. *Fisheries Research* 50(1/2): 163-171.
- [39] Reid, P. C., Edwards, M. et al. (2003): Periodic changes in the zooplankton of the North Sea during the twentieth century linked to oceanic inflow. *Fisheries Oceanography* 12(4-5): 260-269.
- [40] Southward, A. J. (1995): The importance of long time-series in understanding the variability of natural systems. *Helgolander Meeresuntersuchungen* 49(1): 329-333.

- [41] Beaugrand, G., Brander, K. M. et al. (2003): Plankton effect on cod recruitment in the North Sea. *Nature* 426: 661-664.
- [42] Fromentin, J.-M., Planque, B. (1996): *Calanus* and environment in the eastern North Atlantic. II. Influence of the North Atlantic oscillation on *C. finmarchicus* and *C. helgolandicus*. *Marine Ecology Progress Series* 134(1-3): 111-118.
- [43] Planque, B., Fromentin, J.-M. (1996): *Calanus* and environment in the eastern North Atlantic. I. Spatial and temporal patterns of *C. finmarchicus* and *C. helgolandicus*. *Marine Ecology Progress Series* 134: 101-109.
- [44] Frederiksen, M., Edwards, M., Richardson, A.J., Halliday, N.C., Wanless, S. (2006): From plankton to top predators: bottom-up control of a marine food web across four trophic levels. *Journal of Animal Ecology* 75 (6): 1259-1268.
- [45] Gollasch, S., Macdonald, E. et al. (2002): Life in ballast tanks. Invasive aquatic species of Europe: distribution, impacts and management. S. Gollasch and S. Olenin. Dordrecht, Kluwer.
- [46] Hülsmann, G. (2002): Protists - a dominant component of the ballast - transported biota. invasive aquatic species of europe: 20-26.
- [47] Drake, L. A., Doblin, M. A. et al. (2007): Potential microbial bioinvasions via ships' ballast water, sediment, and biofilm. *Marine Pollution Bulletin* 55(7-9): 333.
- [48] Leppakoski, E., Gollasch, S. et al. (2002): The Baltic - a sea of invaders. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 59(7): 1175-1188.
- [49] Nehls, G., Diederich, S., Thieltges, D.W., Strasser, M. (2006): Wadden Sea mussel beds invaded by oysters and slipper limpets: competition or climate control?. *Helgoland Marine Research* 60 (2).
- [50] Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (2008): Kurzfassungen Meeresumwelt-Symposium 27. bis 28. Mai 2008. Vortrag Georg Nehls und Heike Büttger. Die Pazifische Auster im Wattenmeer – Ein schutzwürdiger Alien?. URL: http://www.bsh.de/de/Das_BSH/Veranstaltungen/MUS/2008/Kurzfassungen.pdf [Stand 24.09.08].
- [51] Thieltges, D. W (2005): Benefit from an invader: American slipper limpet *Crepidula fornicata* reduces star fish predation on basibiont European mussels. *Hydrobiologia* 541 (1): 241-244.
- [52] Thieltges, D. W., Strasser, M., Reise, K. (2006): How bad are invaders in coastal waters? The case of the American slipper limpet *Crepidula fornicata* in western Europe. *Biological Invasions* 8 (8): 1673-1680.
- [53] Loebel, M., van Beusekom, J. E. E., Reise, K. (2006): Ist spread of the neophyte *Spartina anglica* recently enhanced by increasing temperatures?. *Aquatic Ecology* 40 (3): 315-324.
- [54] Wikipedia: Salz-Schlickgras. URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Spartina_anglica [Stand 24.09.08].

- [55] Boersma, M., Malzahn, A. M. et al. (2007): The first occurrence of the ctenophore *Mnemiopsis leidyi* in the North Sea. *Helgoland Marine Research* 61(2): 153-155.
- [56] Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (2008): Kurzfassungen Meeresumwelt-Symposium 27. bis 28. Mai 2008. Vortrag Lutz Postel. Rippenqualle – *Mnemiopsis* in der Ostsee – Neue Erkenntnisse. URL: http://www.bsh.de/de/Das_BSH/Veranstaltungen/MUS/2008/Kurzfassungen.pdf [Stand 24.09.08].
- [57] Entwurf des Kabinettsberichts zur Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel, Umweltbundesamt 2008.
- [58] Meier, H.E.M., Döscher, R. und Halkka, A. (2004): Simulated distributions of Baltic sea-ice in warming climate and consequences for the winter habitat of the Baltic ringed seal. *Ambio* 33 (4-5), 249-256.
- [59] ACIA – Arctic Climate Impact Assessment (2005): Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- [60] Gaston, A.J., Gilchrist, H.G., Hipfner, J.M. (2005): Climate change, ice conditions and reproduction in an Arctic nesting marine bird: Brunnich's guillemot (*Uria lomvia* L.). *Journal of Animal Ecology* 74 (5): 832-841.
- [61] Tierdoku.com: Ostsee-Ringelrobbe. URL: <http://tierdoku.com/index.php?title=Ostsee-Ringelrobbe> [Stand 24.09.08].
- [62] IUCN: IUCN Red List of Threatened Species. URL: <http://www.iucnredlist.org/search/details.php/41673/summ> [Stand 24.09.08].
- [63] Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (2008): Kurzfassungen Meeresumwelt-Symposium 27. bis 28. Mai 2008. Vortrag Cathrin Münster und Antti Halkka. Klimawandel – Das Ende der Ringelrobbe in der Ostsee?. URL: http://www.bsh.de/de/Das_BSH/Veranstaltungen/MUS/2008/Kurzfassungen.pdf [Stand 24.09.08].
- [64] Lenton, T. M. (2006): Climate change to the end of the millennium. *Climatic Change* 76: 7-29.
- [65] IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2001b): Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the IPCC. Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- [66] Cohen, M.C.L. and Lara, R.J. (2003): Temporal changes of mangrove vegetation boundaries in Amazonia: application of GIS and remote sensing techniques. *Wetlands Ecology and Management* 11: 223-231.
- [67] Nicholls, R.J. (2004): Coastal flooding and wetland loss in the 21st century: changes under the SRES climate and socio-economic scenarios. *Global Environment Change* 14: 69-86.
- [68] IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2000): Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge, New York; Cambridge University Press.

- [69] Schallenberg, M., Hall, C.J. und Burns, C.W. (2003): Consequences of climate-induced salinity increases on zooplankton abundance and diversity in coastal lakes. *Marine Ecology Progress Series* 251: 181-189.
- [70] Naturschutzgesellschaft Schutzstation Wattenmeer e.V.: Meeresspiegelanstieg – Der anthropogene Klimawandel und seine Auswirkungen auf den Meeresspiegel. URL: <http://www.watt.ikzm-d.de/main.php?page=125,start> [Stand 24.09.08]
- [71] Reise, K., van Beusekom, J. E. E. (2008): Interactive effects of global and regional change on a coastal ecosystem. *Helgoland Marine Research* 62 (1): 85-91.
- [72] Sabine, C.L., Feely, R.A., Gruber, N., Key, R.M., Lee, K., Bullister, J.L., Wanninkhof, R., Wong, C.S., Wallace, D.W.R., Tilbrook, B., Millero, F.J., Peng, T.-H., Kozyr, A., Ono, T. und Rios, A.F. (2004): The oceanic sink for anthropogenic CO₂. *Science* 305: 367-371.
- [73] IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2001a): *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC*. Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- [74] NSF, NOAA und USGS (2006): *Impacts of Ocean Acidification on Coral Reefs and Other Marine Calcifiers: A Guide for Future Research*. URL: http://www.ucar.edu/communications/Final_acidification.pdf [Stand 24.09.08].
- [75] Jacobson, Mark Z. (2005): Studying ocean acidification with conservative, stable numerical schemes for nonequilibrium air-ocean exchange and ocean equilibrium chemistry, in: *Journal of Geophysical Research* 110, D07302.
- [76] Caldeira, K., Wickett, M. E. (2003): Oceanography - Anthropogenic carbon and ocean pH. *Nature* 6956: 365.
- [77] Caldeira, K., Wickett, M. E. (2005): Ocean model predictions of chemistry changes from carbon dioxide emissions to the atmosphere and ocean. *Journal of Geophysical Research. C. Oceans* 110(9).
- [78] Raven, J., Caldeira, K., Elderfield, H., Hoegh-Guldberg, O., Liss, P., Riebesell, U., Shepherd, J., Turley, C. und Watson, A.J. (2005): *Ocean Acidification Due to Increasing Atmospheric Carbon Dioxide. Policy Document 12/5*. London: The Royal Society.
- [79] Riebesell, U., Zondervan, I. et al. (2000): Reduced calcification of marine plankton in response to increased atmospheric CO₂. *Nature* 407(6802): 364-367.
- [80] Maranon, E., Gonzalez, N. (1997): Primary production, calcification and macromolecular synthesis in a bloom of the coccolithophore *Emiliania huxleyi* in the North Sea. *Marine Ecology Progress Series* 157: 61-77.
- [81] Burkill, P. H., Archer, S. D. et al. (2002): Dimethyl biogeochemistry within a coccolithophore bloom (DISCO): an overview. *Deep Sea Research (Part II, Topical studies in oceanography)* 49(15): 2863-2885.

- [82] Merico, A., Tyrrell, T. et al. (2003): Analysis of satellite imagery for *Emiliania huxleyi* blooms in the Bering Sea before 1997. Geophysical research letters: article number 13371337.
- [83] Tyrrell, T., Schneider, B. et al. (2007): Coccolithophores and calcite saturation state in the Baltic and Black Seas. Biogeosciences discussions 4: 3581-3605.
- [84] Rost, B., Riebesell, U. (2004): Coccolithophores and the biological pump: responses to environmental changes. Coccolithophores-From molecular processes to global impact, Springer: 76-99.
- [85] Riebesell, U. (2004): Effects of CO₂ enrichment on marine phytoplankton. Journal of Oceanography 60: 719-729.
- [86] Orr, J. C., Fabry, V. J. et al. (2005): Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. Nature 437(7059): 681-686.
- [87] Guinotte, J., Buddemeier, R. W. und Kleypas, J. (2003): Future coral reef habitat marginality: temporal and spatial effects of climate change in the Pacific basin. Coral Reefs 22: 551-558.
- [88] Roberts, J. M., Wheeler, A. J. et al. (2006): Reefs of the deep: The biology and geology of cold-water coral ecosystems. Science 312(5773): 543-547.
- [89] Hain, S., Corcoran, E. et al. (2004): The status of the cold-water coral reefs of the world in: Status of coral reefs of the world. C. Wilkinson ed. Volume 1.
- [90] Adey, W. H., Macintyre, I. G. (1973): Crustose coralline algae: A re-evaluation in the geological sciences. Geol. Soc. Am. Bull. 84: 883-904.
- [91] Adey, W. H. (1998): Coral reefs: Algal structured and mediated ecosystems in shallow, turbulent, alkaline waters. J. Phycol. 34: 393-406.
- [92] Kuffner, I. B., Andersson, A. J. et al. (2007): Decreased abundance of crustose coralline algae due to ocean acidification. Nature geoscience advance online publication 23 December 2007, doi: 10.1038/ngeo100.
- [93] Gazeau, F. e. a. (2007): Impact of elevated CO₂ on shellfish calcification. Geophysical research letters 34
- [94] Green, M. A., Jones, M. E. et al. (2004): Dissolution mortality of juvenile bivalves in coastal marine deposits. Limnology and Oceanography 49(3): 727-734.
- [95] Kurihara, H., Kato, S. et al. (2007): Effects of increased seawater pCO₂ on early development of the oyster *Crassostrea gigas*. Aquatic Biology 1: 91-98.
- [96] Shirayama, Y., Thornton, H. (2005): Effects of increased atmospheric CO₂ on shallow water marine benthos. Journal of Geophysical Research 110, C09S08.
- [97] Constanza, R. et al. (1997): The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature 387: 253-260.

- [98] FAO – Food and Agriculture Organisation (2006): The State of the Worlds Fisheries and Aquaculture 2006. Rome: FAO, URL: <http://www.fao.org/docrep/009/a0699e/A0699E00.HTM> [Stand: 26.10.2008].
- [99] FAO – Food and Agriculture Organisation (2004): The State of the Worlds Fisheries and Aquaculture 2004. Rome: FAO
- [100] Secretariat of the Convention on Biological Diversity (2003): Interlinkages between biological diversity and climate change – advice on the integration of biodiversity considerations into the implementation of the United Nations Framework Convention on Climate Change and its Kyoto Protocol. CBD Technical Series No. 10.
- [101] Barz, K., Hirche, H.-J. (2007): Abundance, distribution and prey composition of scyphomedusae in the southern North Sea. *Marine Biology* 151(3): 1021-1033.
- [102] Purcell, J. E. (2004): Predation on zooplankton by large jellyfish, *Aurelia labiata*, *Cyanea capillata* and *Aequorea*, in Prince William Sound, Alaska. *Marine Ecology Progress Series* 246: 137-152.
- [103] Purcell, J. E. (2005): Climate effects on formation of jellyfish and stenophore blooms. *Journal of the Marine Biological Association of the UK* 85: 461-476.
- [104] Spiegel.de (2007): Tödlicher Angriff - Quallen sollen Lachsfarm vernichtet haben. URL: <http://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/0,1518,518856,00.html> [Stand: 26.10.2008].
- [105] JRC (2006): Marine and Coastal Dimension of Climate Change in Europe – A report to the European Water Directors. N. Hoepffner, European Communities 2006. URL: http://www.sahfos.ac.uk/climate%20encyclopaedia/pdfs/ccreport_final9.pdf [Stand 26.10.2008].
- [106] Neat & Righton (2007): Warm water occupancy by North Sea cod. *Proceedings of the Royal Society Part B* 274: pp. 789-798.
- [107] Drinkwater, K. F. (2005): The response of Atlantic cod (*Gadus morhua*) to future climate change. *ICES Journal of Marine Science* 62(7): 1327-1337.
- [108] Kell, L. T., Pilling, G. M. et al. (2005): Implications of climate change for the management of North Sea cod (*Gadus morhua*). *ICES Journal of Marine Science* 62(7): 1483-1491.
- [109] Ehrlich, S., Stein, M. (2005): Fisch und Klima. Bundesforschungsanstalt für Fischerei. *Forschungsbereich 1/2005*. URL: http://www.bmelv-forschung.de/fileadmin/sites/FR-Texte/2005/R9_2005-1_0007.pdf [Stand 26.10.2008].
- [110] Generaldirektion Fischerei und Maritime Angelegenheiten der Europäischen Kommission (2007):– Klimawandel: Wie wirkt sich der Klimawandel auf die Fischerei aus?. *Fischerei und Aquakultur in Europa*, Nr. 35, URL:

http://ec.europa.eu/fisheries/publications/magaz/fishing/mag35_de.pdf
[Stand 26.10.2008].

- [111] Deutschlandfunk (2007): Sardine statt Hering – Klimawandel wirkt sich auf Nordseefische aus. URL: <http://www.dradio.de/dlf/sendungen/umwelt/712363/> [Stand 26.10.2008].
- [112] Attrill, M. J., Wright, J. et al. (2007): Climate-related increases in jellyfish frequency suggest a more gelatinous future for the North Sea. *Limnology and Oceanography* 52(1): 480-485.
- [113] Beare, D. J., Burns, F., Greig, A., Jones, E. G., Peach, K., Kienzle, M., McKenzie, E. und Reid, D. G. (2004): Long-term increases in prevalence of North Sea fishes having southern biogeographic affinities. *Marine Ecology Progress Series* 284: 269-278.
- [114] Perry, A. L., Low, P. J., Ellis, J. R. und Reynolds, J. D. (2005): Climate change and distribution shifts in marine fishes. *Science* 308: 1912-1915.
- [115] HELCOM (2007): Climate Change in the Baltic Sea Area. Baltic Sea Environment Proceedings No. 111. HELCOM Thematic Assessment in 2007. URL: <http://www.helcom.fi/stc/files/Publications/Proceedings/bsep111.pdf> [Stand 26.10.2008].
- [116] Ministerium für Soziales, Gesundheit, Familie, Jugend und Senioren Schleswig-Holstein (2008): Baden in Schleswig-Holstein – Jahresüberblick für die Badesaison 2008. URL: <http://badewasserqualitaet.schleswig-holstein.de/> [Stand 26.10.2008].
- [117] Daschkeit, A., Sterr, H. (2002): Aktuelle Ergebnisse der Küstenforschung, 20. AMK-Tagung Kiel, 30.05.- 01.06.2002. Berichte, Forschungs- und Technologiezentrum Westküste d. Univ. Kiel, Nr. 28, 234 S., Büsum 2003. URL: http://www.eucc-d.de/infos/AMK2002_Dolch_Schernewski.pdf [Stand 26.10.2008].
- [118] Focus.de (2007): Die phantastische Plage. URL: http://www.focus.de/panorama/reportage/reportage-die-phantastische-plage_aid_221090.html [Stand 26.10.2008].
- [119] Tagesspiegel.de (2008): Qual mit Quallen. URL: <http://www.tagesspiegel.de/weltspiegel/Quallen;art1117,2566874> [Stand 26.10.2008].
- [120] Wasmund, N. (2007): Cyanobakterienentwicklung in der Ostsee. *Wasser-Abwasser*. 148 (7-8): 543-547.
- [121] Peperzak, L. (2003): Climate change and harmful algal blooms in the North Sea. *Acta Oecologica* 24: S139-S144.
- [122] Selina, M. S., Konovalova, G. V. et al. (2006): The genus *Alexandrium* Halim, 1960 (Dinophyta) at the Pacific coast of Russia: species composition, distribution, dynamics. *Biologiya morya* 32(6): 384-394.
- [123] Maclean, C., Cembella A. D., et al. (2003): Effects of light, salinity and inorganic nitrogen on cell growth and spiroside production in the marine dinoflagellate *Alexandrium ostenfeldii*. *Botanica Marina* 46: 466-476.

- [124] Jensen, M. O., Moestrup, O. (1997): Autecology of the toxic dinoflagellate *Alexandrium ostenfeldii*: Life History and growth at different temperatures and salinities. *European Journal of Phycology* 32(1): 9-18.
- [125] Bagoeien, E. (1996): Cultivation of blue mussel in Spain and problems due to red tides. *SMR RAPP* 24: pp 26.
- [126] Blunden, G. (2001): Biologically Active compounds from marine organisms. *Phytotherapy research* 15(2): 89-94.
- [127] Ocean Cosmetics (2008): Natürliche Pflege aus dem Meer. URL: <http://www.ocean-cosmetics.de/> [Stand 26.10.2008].
- [128] Sanchez, I., Fernandez, C. (2005): Impact of the invasive seaweed *Sargassum muticum* (Phaeophyta) on an intertidal macroalgal assemblage. *Journal of Phycology* 41(5): 923-930.
- [129] Longhurst, A. (1998): *Ecological geography of the sea*, Academic Press.
- [130] BMU (2007): Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt. Reihe Umweltpolitik. URL: http://www.bmu.de/naturschutz_biologische_vielfalt/downloads/doc/40333.php [Stand 26.10.2008].
- [131] Glynn, P.W. (1984): Widespread coral mortality and the 1982/83 El Nino warming event. *Environmental Conservation* 11: 133-146.

Quellenverzeichnis Fotos

- [132] <http://de.wikipedia.org/wiki/Korallenbleiche>; download am 26.10.2008
- [133] http://www.nationalpark-wattenmeer.niedersachsen.de/master/C35161407_N35162582_L20_D0_I5912119.html; download am 26.10.2008
- [134] http://earthobservatory.nasa.gov/Newsroom/NewImages/images.php3?img_id=17800; download am 26.10.2008
- [135] www.pixelio.de; download am 26.10.2008
- [136] www.geo.uni-bremen.de/cocco; download am 26.10.2008
- [137] http://www.smhi.se/oceanografi/oce_info_data/BAWS/images/MODIS_TERRA_20060706.jpg; download am 26.10.2008

Titelbild : Claussen U., Umweltbundesamt

7 GLOSSAR

(Quelle: verändert [2, 130], www.wikipedia.org).

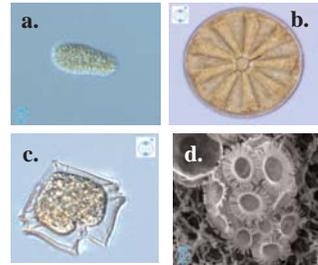
abiotisch	unbelebte Faktoren, zum Beispiel Licht, Temperatur, Wasser, Gase, Nährstoffe, Wind und mechanische Einflüsse
Abundanz	Zahl der Individuen einer Art bezogen auf eine bestimmte Fläche oder in einem bestimmten Volumen
Adultus	Tier in der letzten Stufe der Individualentwicklung; Es hat die heranwachsende (juvenile) Phase abgeschlossen und ist ein erwachsenes Individuum.
Algenblüte	das relativ plötzliche, massenhafte Auftreten von Mikroalgen
anthropogen	durch den Menschen verursacht
Aquakultur	kontrollierte Aufzucht von im Wasser lebenden Organismen - wie Fische, Muscheln, Krebstiere und Pflanzen, vor allem Algen
Benthal, benthisch	Lebensbereich (Biotop) auf und im Boden des offenen Meeres und im Küstenbereich (zum Beispiel Watt, Felswatt), benthisch = am oder im Meeresboden lebend
Benthos	das „Bodenlebende“, alle im und am Meeresboden (Benthal) lebenden Pflanzen und Tiere
Biodiversität	Oberbegriff für die Vielfalt der Ökosysteme, der Lebensgemeinschaften, der Arten und der genetischen Vielfalt innerhalb einer Art
Biomasse	Gesamtheit der biochemisch synthetisierten Masse aller Lebewesen, d. h. die Masse aller Lebewesen, der abgestorbenen Organismen und der organischen Stoffwechselprodukte
biotisch	Synonym: organisch; Umweltfaktoren, bei denen Lebensvorgänge sowie Interaktionen zwischen Organismen verschiedener Arten beteiligt sind
Eutrophierung	Anreicherung von Nährstoffen, die zu Veränderungen in einem Ökosystem oder Teilen davon führt; häufig verwendeter Begriff für die Überdüngung von Oberflächengewässern und Meeren durch natürliche oder künstliche Nährstoffanreicherung
globales Förderband	auch als thermohaline Zirkulation bezeichnet; ozeanographischer Begriff für eine Kombination von Meeresströmungen, die vier der fünf Ozeane miteinander verbinden und sich dabei zu einem Kreislauf globalen Ausmaßes vereinen
Herbivor	Tiere, die sich von Pflanzen oder deren Teilen ernähren
Karbonathaushalt der Meere	Der in den Meeren gespeicherte Kohlenstoff liegt in unterschiedlichen chemischen Formen vor. Ein kleiner Teil ist in der Biosphäre und in organischen Verbindungen gespeichert, der weit überwiegende Teil ist dagegen in anorganischen Verbindungen enthalten. Von diesen Verbindungen ist jedoch nur ein Prozent direkt im Wasser gelöstes CO ₂ , 91 Prozent liegen als Hydrogenkarbonat (HCO ₃ ⁻) vor und acht Prozent als Karbonat

	<p>(CO_3^{2-}). Diese drei Verbindungen stehen über eine Gleichgewichtsreaktion in Beziehung: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_3^{2-} \leftrightarrow 2 \text{HCO}_3^-$.</p> <p>Mit dem Eintrag von CO_2 wird der Partialdruck von CO_2 im Meerwasser erhöht, gleichzeitig verschiebt sich das Gleichgewicht zu Gunsten von Hydrogencarbonat und zu Ungunsten von Karbonat. Klima „durchschnittliches Wetter“;</p> <p>Der Begriff beschreibt den mittleren Zustand der Atmosphäre über ein bestimmtes Gebiet und den charakteristischen Ablauf der Witterung in einem bestimmten Zeitrahmen - wie Monaten bis zu tausenden Jahren. Die klassische Periode einer Klimabeobachtung sind 30 Jahre. Die wichtigsten Faktoren sind Temperatur, Luftdruck, Windrichtung und -stärke, Niederschläge, Luftfeuchtigkeit, Bewölkung und Sonnenscheindauer.</p>
Klimawandel	Klimaänderung auf der Erde über einen längeren Zeitraum beziehungsweise die zu unserer Lebenszeit stattfindende globale Erwärmung
Kohlendioxid (CO_2)	<p>natürlich vorkommendes Gas, das während der Photosynthese zu organischem Material umgewandelt wird;</p> <p>CO_2 ist ein Beiprodukt bei der Verbrennung fossiler Energieträger, der Landnutzung, industrieller Prozesse und entsteht bei der Atmung von Lebewesen. Es gilt als eines der wichtigsten Gase des anthropogenen Treibhauseffektes.</p>
Korallen	sessile, koloniebildende Nesseltiere
Larve	Zwischenform in der Entwicklung vom Ei zum Erwachsenenstadium; tritt bei Tieren auf, die eine Metamorphose durchlaufen
Match-Mismatch	zeitliche Kopplung/Entkopplung von Räuber und Beute
Mangrove	<p>von Wäldern salztoleranter Mangrovenbäume im Gezeitenbereich tropischer und subtropischer Küsten gebildetes Ökosystem;</p> <p>Mangrovenbäume sind verholzende Salzpflanzen unterschiedlicher botanischer Zugehörigkeit.</p>
Nahrungsnetz	Die Gesamtheit der Wechselbeziehungen - zum Beispiel Räuber-Beute-Beziehungen - zwischen den verschiedenen Organismen der biologischen Gemeinschaft eines Ökosystems wird als komplexes Netz betrachtet, in dem die gegenseitige Abhängigkeit der Lebewesen über die Nahrung definiert wird.
Nekton	Gesamtheit der pelagischen Tiere in Ozeanen und Binnengewässern, die zu einer kontrollierten Horizontalbewegung fähig ist, also zu einem aktiven, strömungsunabhängigen Schwimmen
Nesseltiere	einfach gebaute, vielzellige Tiere, die die Küsten, den Grund und das offene Wasser der Weltmeere und einige Süßgewässer bewohnen und durch den Besitz von Nesselkapseln gekennzeichnet sind
Ökosystem	Gesamtheit der Lebewesen und ihres Lebensraums mit allen Wechselbeziehungen
Pelagial, pelagisch	Lebensraum im uferfernen Freiwasserbereich oberhalb der Bodenzone (Benthal)

pH-Wert negativer, dekadischer Logarithmus der Wasserstoffionenkonzentration; Maß für die Stärke der sauren beziehungsweise basischen Wirkung einer wässrigen Lösung

Photosynthese Erzeugung organischer Substanz durch Lebewesen unter Zuhilfenahme von Lichtenergie; folgende Reaktion findet statt:
 $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{Licht} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + \text{O}_2$

Phytoplankton pflanzliche einzellige Algen, die Photosynthese betreiben; Hauptbestandteil des Planktons sind:
 (a.) Grünalgen,
 (b.) Diatomeen,
 (c.) Dinoflagellaten
 (d.) und andere Flagellaten (Coccolithophoriden)



Plankton im Wasser schwebende Organismen, die keine oder nur extrem begrenzte Möglichkeiten der eigenständigen Fortbewegung haben, zum Beispiel verschiedene Mikroorganismen wie Kieselalgen und Geißeltierchen, aber auch größere Tiere wie Quallen

Population Gesamtheit der Individuen einer Art, die in einem (mehr oder weniger abgeschlossenen) Lebensraum leben und eine natürliche Fortpflanzungsgemeinschaft bilden

Primärproduktion Neubildung organischer Substanzen aus anorganischen Materialien; Pflanzen nutzen CO_2 und Wasser für die Bildung organischer Substanzen wie Zucker: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{Licht} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + \text{O}_2$.

Salinität Salzgehalt eines Gewässers, Wasserkörpers beziehungsweise Wassers

Qualle auch Meduse; Lebensstadium von Nesseltieren (Cnidaria); gallertartige Organismen, die zu rund 99 Prozent aus Wasser bestehen; schwimmen durch eine sich zusammenziehende Bewegung ihres Schirmes

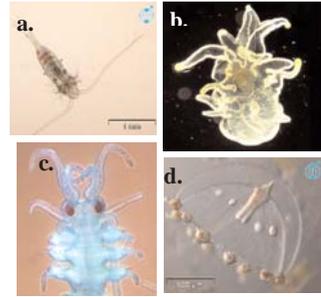
Treibhausgas(e) gasförmige Stoffe, die zum Treibhauseffekt beitragen und sowohl einen natürlichen als auch anthropogenen Ursprung haben können; Sie absorbieren einen Teil der vom Boden abgegebenen Infrarotstrahlung, die sonst in das Weltall entweichen würde. Ein Teil dieser Energie wird zurück auf die Erdoberfläche gestrahlt. Zu Treibhausgasen gehören unter anderem Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4), Distickstoffoxid (Lachgas, N_2O), teilhalogenierte und perfluorierte Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW/HFCs) und Schwefelhexafluorid (SF_6).

Trophie Nährstoffversorgung/-gehalt eines Ökosystems; verschiedene Ebenen in der Nahrungskette

Versauerung der Meere Abnahme des pH-Wertes des Meerwassers durch die Aufnahme von Kohlendioxid aus der Erdatmosphäre

Zooplankton

Alle planktischen Organismen, die keine Photosynthese betreiben, sondern sich von anderen Organismen ernähren; das Zooplankton wird in Organismen unterteilt, die ihr ganzes Leben als Plankton verbringen zum Beispiel (a) Ruderfußkrebse und (d) Quallen und solche, die nur als Larve im Plankton leben zum Beispiel (b) Seesterne, Seeigel und (c) Borstenwürmer.



Kontakt:

Umweltbundesamt

Postfach 14 06

06844 Dessau-Roßlau

Telefax: (0340) 21 03 22 85

E-Mail: info@umweltbundesamt.de

Internet: www.umweltbundesamt.de

Gedruckt auf Recyclingpapier aus 100% Altpapier.

© 2009 Umweltbundesamt