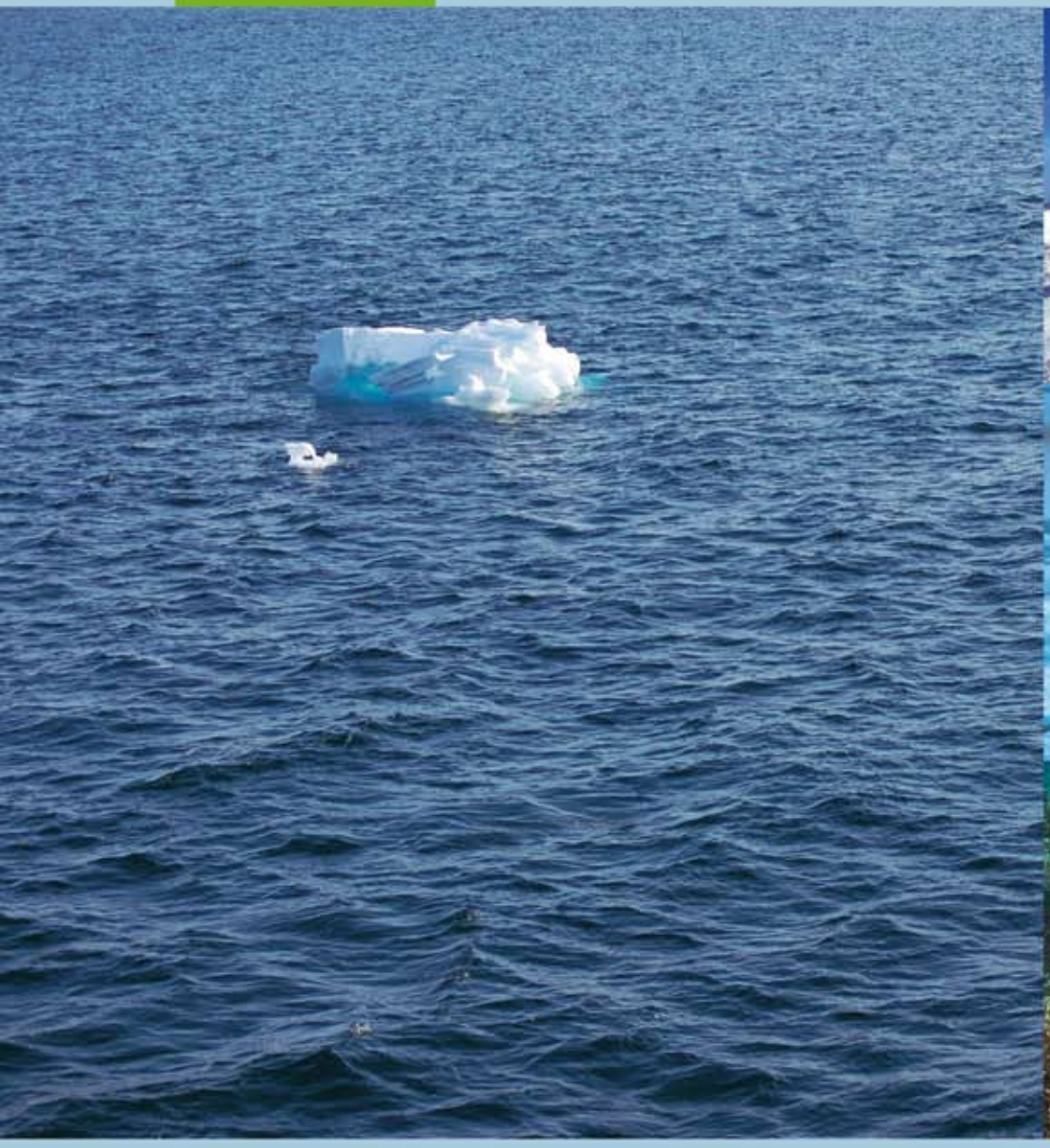
In Kooperation mit GEO

Wissenschaftliche Auswertungen



WARNSIGNAL KLIMA

Meer schützen - durch mehr Klimaschutz

Die Meere der Zukunft

Eine ausführliche Behandlung der hier angerissenen Themen kann in folgendem Buch gelesen werden:
WARNSIGNAL KLIMA: Die Meere - Änderungen & Risiken
(384 Seiten - Mehr Informationen auf S. 19)

WARNSIGNAL KLIMA: Die Meere der Zukunft

Inhalt

Vorwort	3
Die Meere	4
Bedeutung der Meere für den Kohlenstoffkreislauf	5
Das Klima und die Meeresströmungen	6
• Die thermohaline Zirkulation	6
• El Niño/Southern Oscillation (ENSO)	6
Nordatlantische Oszillation (NAO)	7
Das Meer im anthropogenen Klimawandel	8
• Das Meer zu warm ...	8
• Das Meer zu hoch ...	8
• Das Meer zu sauer ...	8
• Folgen für die marine Flora und Fauna	10
• Folgen für unsere Gesellschaft	12
• Ist die Stabilität des marinen Permafrosts und der Gashydrate gefährdet?	13
• Erwärmung der Meere und die Intensivierung des Wasserkreislaufs	13
• Das Meereis als Barometer der Erwärmung	14
• Die Schifffahrt: Gewinner des arktischen Klimawandels?	14
Was tun?	15
• Mehr Meeresschutz weniger Risiken in der Zukunft	15
• CO_2-Lagerung unter dem Meeresboden	15
• Eisendüngung?	16
• Das Schiff der Zukunft	16
• Die Zeit für den Beginn einer klimaverträglichen Gesellschaft ist gekommen	16
• Klimagerechtigkeit	17
Buchreihe: Warnsignale	18

Herausgeber

Dr. José l. Lozán
Prof. Dr. Hartmut Graßl
Prof. Dr. Karsten Reise

Gestaltung

GEO-Magazin, Hamburg und Büro: Wissenschaftliche Auswertungen

Bildnachweis

Titelseite: Meereis (Photo: D. Notz, Hamburg), Sturm vor Sylt (Photo: H. Sterr), *Lettuce corals*, Maratua Island, East Kalimantan, Indonesia (Photo: M. Nugues), Eisbären (Photo: J. Thomassen Trondheim).

Druck

Gedruck auf 100% Recyclingpapier

Bestellung

Für den Versand überweisen Sie bitte EUR 2.50 (Schulklassen EUR 1,-)
Bankverbindung: Postbank (Köln) BLZ 37010050 KtoNr. 304199507
• e-Mail JLLozan@t-online.de oder Lozan@uni-hamburg.de
• Tel. 040/4304038 - 040/33424614
• Fax 040/54765097
Herunterladen unter: • www.warnsignale.uni-hamburg.de - www.lozan.de

Vorwort

Mit ihren großen Wassermassen und Strömungen bestimmen die Meere in Wechselwirkung mit der Atmosphäre maßgeblich das Klima der Erde; sie bedecken fast drei Viertel der Erdoberfläche. Ohne die Meere würde die Erde ganz anders aussehen und höchstwahrscheinlich unbewohnbar sein. Die Meeresströmungen transportieren Wärme aus den tropischen in die kalten Regionen; die wirtschaftliche Entwicklung Mittel- und Nordeuropas ist dem Wärmetransport des Nordatlantischen Strömungssystems zu verdanken. Seit rund 200 Jahren verändern wir durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre und verstärken damit den natürlichen Treibhauseffekt, was zu einer Erwärmung der untere Atmosphäre und der Erdoberfläche führt. Eine der Folgen ist die Schrumpfung des Meereises in der Arktis, die eine globale Auswirkung auf das Klima hat, da sich das Rückstrahlvermögen (die Albedo) der Erde verringert und damit eine Verstärkung der Erderwärmung zur Folge hat. Auch die Gletscher schmelzen. Das Schmelzwasser und die Ausdehnung des Meerwassers bei Erwärmung führen zum Anstieg des Meeresspiegels, der gefährliche Höhe erreichen wird, wenn wir nicht konsequent Klimaschutz betreiben. Fast ein Drittel der Weltbevölkerung lebt in Küstennähe und viele müssten in der Zukunft weichen, wenn die Emission des Kohlendioxids nicht gemindert wird. Das zusätzliche Kohlendioxid aus der Atmosphäre diffundiert in die Meere und das Meerwasser wird in Richtung sauereres Wasser getrieben, was für die Kalk bildenden Tiere – wie Korallen, Muscheln und Schnecken und viele Planktonalgen – schädlich ist.

Mit dem Ausstieg aus der Nutzung der Atomenergie und dem Einstieg in die erneuerbaren Energien – schlagen wir ein neues Kapitel in der Energienutzung in Richtung Nachhaltigkeit ein. Mit dieser Energiewende eröffnen sich neue Chancen Klimaschutz und damit Meeresschutz zu betreiben.

Mit der vorliegenden Broschüre wird unsere Arbeit unter dem Motto »Wissenschaftler informieren direkt« fortgesetzt. Inzwischen sind sechs Broschüren erschienen: »Das Klima des 21. Jahrhunderts (in vier Sprachen)«, »Warnsignale aus dem Meer«, »Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle?«, »Warnsignale aus den Polarregionen« und »Warnsignal Klima: Was wird aus Pflanzen, Tieren und Menschen?« – Alle diese Hefte können als pdf kostenlos herunter geladen (www.lozan.de oder www.warnsignale.uni-hamburg.de) oder für 2,50 EUR (=Versandkosten) in gedruckter Form bestellt werden. Sie werden zur Gestaltung des Schulunterrichts oft verwendet. Diese Broschüren zusammen mit den 12 Bänden der Buchreihe Warnsignale (s. Seite 18) stellen einen wesentlichen Beitrag von rund 1.500 Wissenschaftlern aus rund 350 Institutionen zum Umwelt- und Klimaschutz dar.

Die Herausgeber

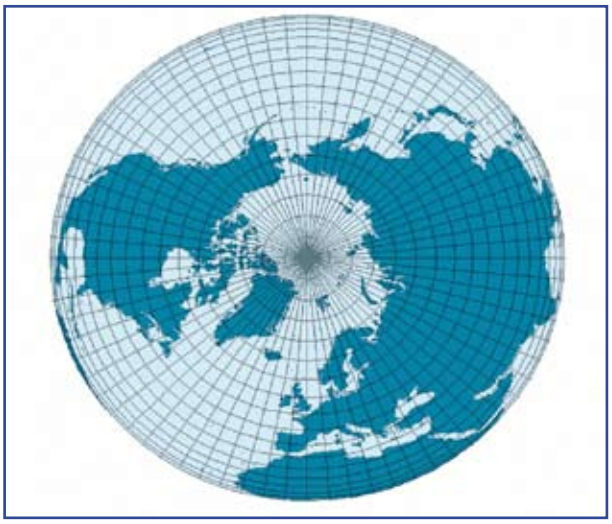
Die Meere

Die Meere bedecken 71% der Oberfläche unserer Erde. Mit einer mittleren Tiefe von etwa 3.800 m und einem Wasservolumen von rund 1.500 Mio. km³ bestimmen die Meere das Aussehen des Planeten ganz wesentlich. Er wird daher zu Recht der »Blaue Planet« genannt. Nur im Meer, unter dem Schutz des Wassers vor dem lebensgefährlichen Anteil der UV-Strahlung, konnte sich das Leben auf der Erde entwickeln. Vor über 2 Mrd. Jahren begannen photosynthetische Bakterien (Cyanobakterien, sogenannte Blaualgen) Sauerstoff zu produzieren. Nach Anreicherung im Meerwasser diffundierte Sauerstoff in die Atmosphäre und durch Oxidation eines winzigen Teils davon bildete sich die stratosphärische Ozonschicht. Erst nach Ausbildung dieses Schutzschirmes gegen den gefährlichen Teil der UV-Strahlung konnte sich auch Leben auf den Kontinenten etablieren. Der Planet Erde ist einem ständigen Wandel unterworfen. Durch Bewegung tektonischer Platten ändern Kontinente und Meere in Jahrmillionen ihre Position und Konturen. Von den Urmeeren sind nur wenige Überreste erhalten. Heute werden diese Bewegungen mm-genau gemessen. Im zentralen Atlantik nimmt z.B. der Abstand zum amerikanischen Kontinent ca. 25 mm/Jahr zu; im Ostpazifik beträgt die Spreizungsrate bis zu 150 mm/Jahr.

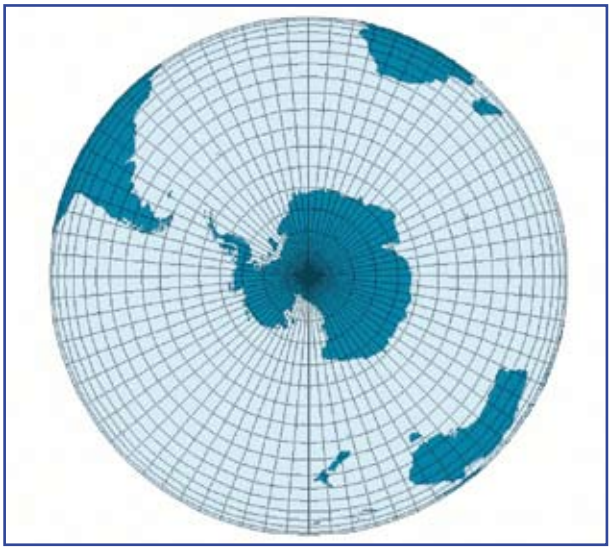
Mit Hilfe von über 7 Mio. gemessenen Temperaturprofilen haben Wissenschaftler den Wärmegehalt der Weltmeere zeitlich rekonstruiert. Dabei wurde ein Anstieg der gespeicherten Wärme um 15×10^{22} Joule von 1955 bis 1998 bzw. eine Wärmeaufnahme von ca. 0,2 Watt/m² festgestellt. Von 1993 bis 2003 betrug sie sogar 0,6 Watt/m². Das zeigt, dass die Erde zur Zeit infolge des anthropogenen Treibhauseffekts mehr Sonnenenergie aufnimmt, als sie wieder abstrahlt (WBGU 2006).

Global ist die Erwärmung der Meeresoberfläche trotz der höheren Wärmekapazität geringer als die der Landfläche. Das liegt daran, dass der oberen Ozean durchmischt ist. Die global gemittelte Erwärmung über die ganze Wassersäule beträgt nur etwa 0,04°C seit 1955. Der Grund dafür ist, dass sich nur die durchmischte Schicht von wenigen 100 m Tiefe bis jetzt wesentlich erwärmt hat und die mittlere Ozeantiefe 3.800 m beträgt. Die heute bekannte thermische Expansion des Meerwassers ist daher nur ein Bruchteil der gesamten Ausdehnung, die Jahrhunderte andauern wird.

Die nördliche Erdhalbkugel
39% Land - 61% Meer



Die südliche Erdhalbkugel
19% Land - 81% Meer

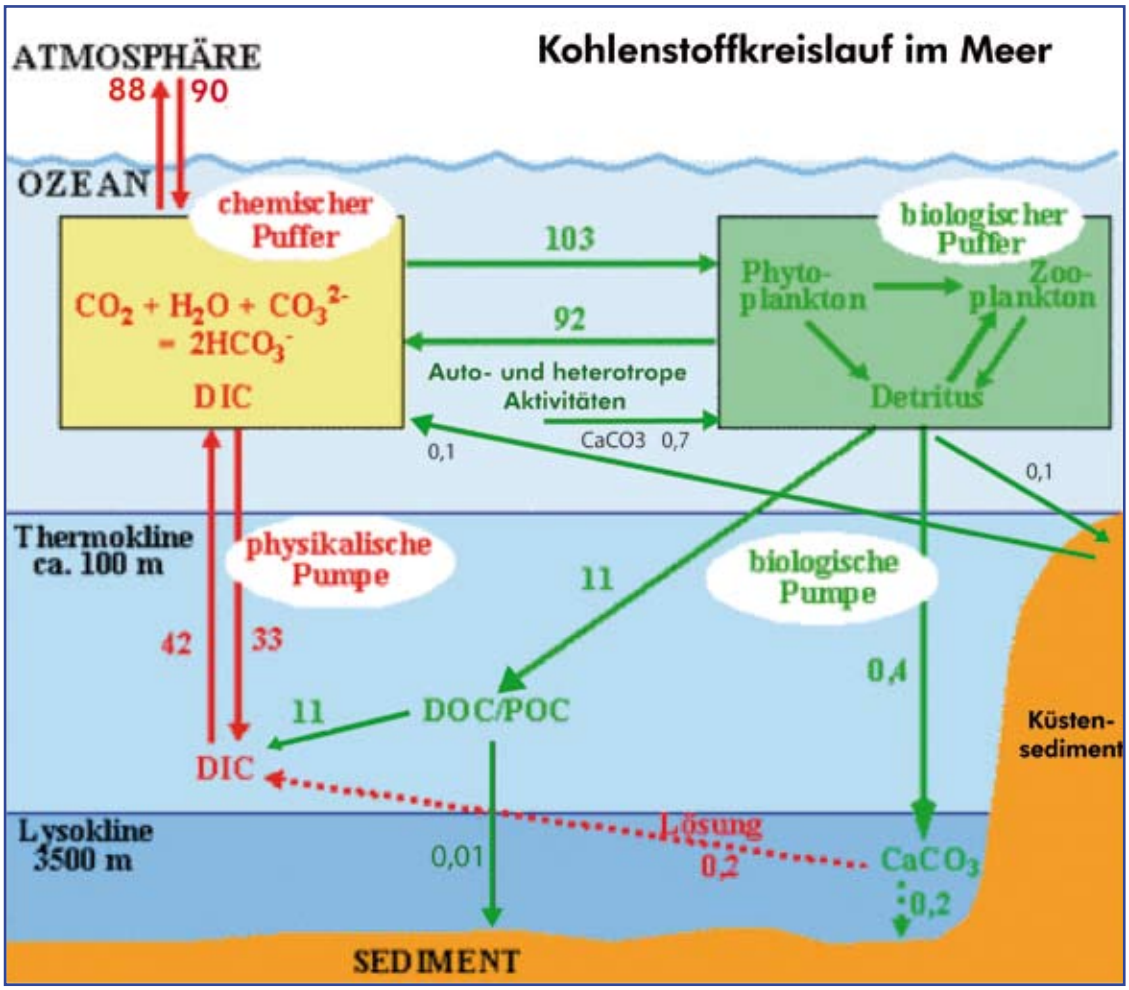


Bilder by Stefan Kühn aus de.wikipedia.org. Creative-Commons-Lizenzen (www.creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/).

Bedeutung der Meere für den Kohlenstoffkreislauf

Etwa 40.000 Milliarden Tonnnen Kohlenstoff sind im Meerwasser gelöst. Das ist knapp 50mal mehr Kohlenstoff als in der Atmosphäre (zur Zeit 846 Gt Kohlenstoff bei 387 ppm CO_2). Zwischen der oberen Wasserschicht der Meere und der Atmosphäre findet ein ständiger Gasaustausch und damit auch des Kohlendioxids statt. Je kälter das Wasser ist, desto höher ist die Löslichkeit für Kohlendioxid. Vom Menschen werden jährlich zur Zeit schon etwa 30 Gt CO_2 emittiert. Davon werden etwa ein Viertel durch die Meere aufgenommen. Ähnlich viel wird in der Biosphäre an Land gespeichert und knapp die Hälfte bleibt in der Atmosphäre. Der Anteil im Meer führt dort zur Senkung des pH-Wertes des Meerwassers mit weitreichenden Folgen für viele marine Organismen. Der Transport des Kohlenstoffes in tiefere Wasserschichten erfolgt hauptsächlich in den Polarregionen und im südlichen Ozean überwiegend durch Absinken von kaltem und damit schwerem Oberflächenwasser in die Tiefsee, aber auch durch turbulente Mischung. Im Ozean verteilen Strömungen die Kohlenstoffverbindungen über Jahrhunderte, bis sie überwiegend in Auftriebsgebieten an den Kontinentalrändern und am Äquator wieder als Kohlendioxid in die Atmosphäre entweichen. Seit Beginn der Industrialisierung schätzt man, dass das Meer etwa 120 Gt Kohlenstoff aufgenommen hat, was fast der Hälfte der gesamten bisherigen Emissionen aus Öl, Gas, Kohle und Zementproduktion entspricht.

Vor allem in Wechselwirkung mit der Atmosphäre bestimmen die Meere maßgeblich das Klima der Erde. Neben Hydrosphäre und Atmosphäre enthält das Klimasystem der Erde noch weitere wichtige Teile: Die Kryosphäre (das grönländische und antarktische Inlandeis, kleine Eiskappen, die Gebirgsgletscher, das Meereis sowie den Schnee und gefrorenen Boden), die Lithosphäre (die Erdkruste, z.B. die Kontinente mit den Vulkanen, aber auch die Erdkruste unter den Ozeanen), die Biosphäre (Bakterien, Pflanzen und Tiere) sowie die Anthroposphäre (der Mensch mit seinen Aktivitäten).



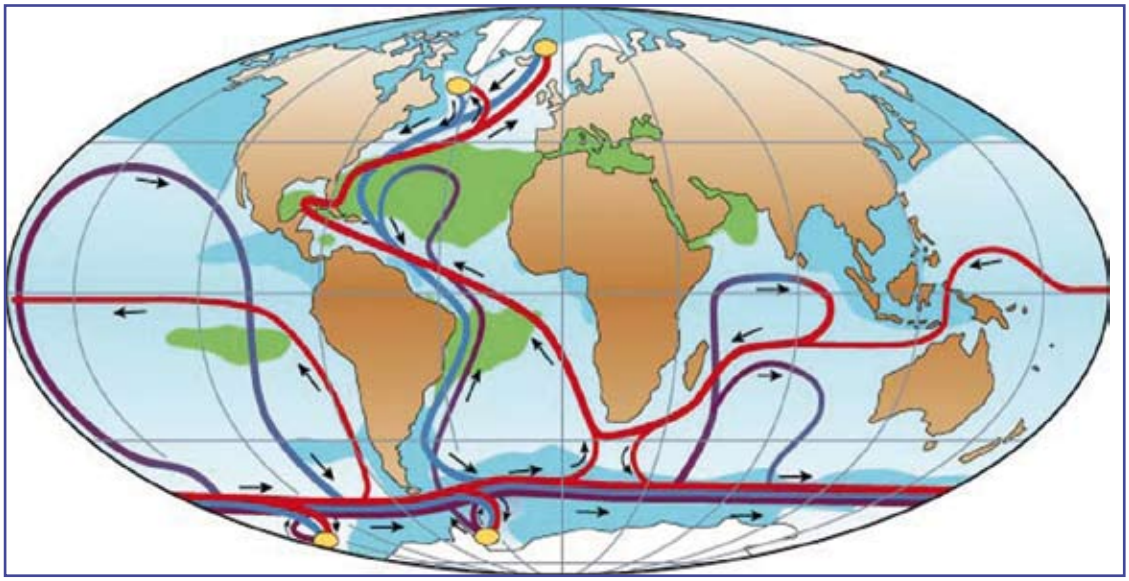
Die physikalische Pumpe basiert auf der Löslichkeit von CO_2 im Ozean. Je kälter das Oberflächenwasser, umso höher die Löslichkeit. Die biologische Pumpe ist die CO_2-Aufnahme durch Photosynthese des Phytoplanktons. Der Verbrauch wird durch Gasaustausch mit der Atmosphäre wieder ausgeglichen. Je stärker die Photosynthese desto größer die CO_2-Aufnahme. Nach Absterben des Planktons wird das organisch gebundene CO_2 teilweise durch Mikroben remineralisiert. Ein sehr kleiner Anteil sedimentiert als $CaCO_3$; ein weiterer Anteil wird durch die Fischerei aus dem Meer entnommen (Eigene Darstellung (D. Kasang) nach IPCC 2001).

Das Klima und die Meeresströmungen

Die Meeresströmungen transportieren Wärme aus den tropischen in die kälteren Regionen. Dank dieser ausgleichenden Wirkung auf das Erdklima ist unter anderem in Europa eine wirtschaftliche Entwicklung bis weit nach Norden möglich.

Die thermohaline Zirkulation

Die untere Abbildung zeigt die Weltkarte mit der thermohalinen Zirkulation (THZ) und den gegenwärtigen Tiefenwasserbildungsregionen (Kreise). Diese Umwälz-Zirkulation ist vom Wind und der Dichtestruktur des Wassers bestimmt, die sich wiederum aus dem Salzgehalt und der Temperatur ergibt. Im Atlantik z.B. fließt warmes und salzreiches Wasser aus südlichen Regionen in den oberen Meeresschichten nach Norden, wo es sich im Winter abkühlt und folglich dichter wird. Dieses Wasser sinkt vorwiegend zum Ende des Winterhalbjahres ab und wird zu Tiefenwasser mit einer mittleren Tiefe von etwa zwei Kilometern. Die Lufttemperatur über dem Europäischen Nordmeer wird durch diese Meeresströmung etwa um 10°C gegenüber dem Breitenkreismittel erhöht. Insgesamt kann die thermohaline Zirkulation vom Absinken bis zur Wiederkehr bis zu etwa 1.000 Jahre dauern. Vor Beginn der jetzigen Zwischeneiszeit (Holozän) gab es mehrere abrupte regionale Klimaänderungen - die sogenannten Dansgaard-Oeschger- und Heinrich-Ereignisse -, die mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit auf Änderungen der thermohalinen Zirkulation beruhten.



Weltkarte mit Thermohaliner Zirkulation und den gegenwärtigen Tiefenwasserbildungsregionen (Kreise) (Rahmstorf 2002).

El-Niño/ Southern-Oscillation (ENSO)

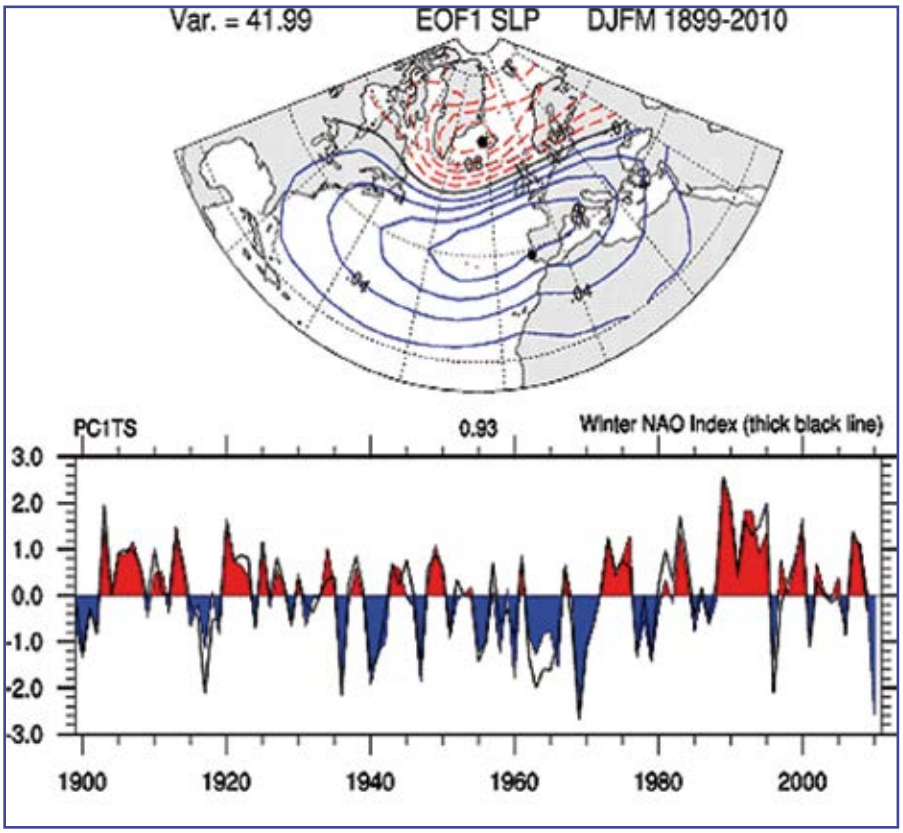
Während die Dichte des Wassers die treibende Kraft für die THZ ist, führt eine Schwächung der Passatwinde im Pazifik zum El-Niño-Phänomen. Es ist daher eng mit atmosphärischen Vorgängen verbunden. Das südostasiatische Tiefdruckgebiet und das südostpazifische Hochdruckgebiet bestimmen die Stärke der Passatwinde im tropischen Pazifik. Das Wechselspiel zwischen diesen Druckgebieten wird als Südliche Oszillation bezeichnet. Durch eine Eigenschwingung des gekoppelten Systems Ozean-Atmosphäre können diese Hoch- und Tiefdruckgebiete ihre Positionen tauschen und damit ändert sich auch die Stärke des Passatwindes. Aufgrund der engen Kopplung zwischen El-Niño und südlicher Oszillation spricht man heute vom ENSO-Phänomen. In normalen Jahren entsteht vor der südamerikanischen Küste durch den Einfluss der Passatwinde und der Erdrotation ein großes Auftriebgebiet mit relativ kaltem Wasser an der Oberfläche. Im Westpazifik hingegen ist die Meeresoberflächentemperatur mit bis zu 30°C relativ hoch. Wenn die Passatwinde sich schwächen, verkleinert sich das Auftriebsgebiet drastisch. Dann erwärmt sich der Ostpazifik, wo die Temperatur an der Meeresoberfläche einige Grade steigen kann.

Das ENSO-Phänomen führt zu Dürren und Bränden in Südostasien, Teilen Australiens und Brasiliens. Es verursacht starke Niederschläge im westlichen Südamerika und ruft sogar signifikante Klimaanomalien über Nordamerika hervor. Besonders starke ENSO-Ereignisse sind sogar bis Europa zu spüren. El-Niño und das Gegenstück mit sehr starken Passatwinden „La-Niña“ beeinflussen außerdem die vertikale Windscherung über dem tropischen Atlantik und gehen häufig mit einer relativ schwachen (starken) Hurrikan-Aktivität in dieser Region einher.

Nordatlantische Oszillationen

Ein weiteres Beispiel für die Wechselwirkung Meer-Atmosphäre ist die Nordatlantische Oszillation (NAO): sie ist als die Luftdruckdifferenz zwischen Azorenhoch und Islandtief definiert. Bei ausgeprägter Differenz (positiver NAO-Index) sorgt das verstärkte Islandtief für kalte und trockene Winter in Grönland. Der nordatlantische Strahlstrom (das Band starker westlicher Winde in der oberen Troposphäre) ist stärker und verläuft weiter im Norden. Dadurch ziehen Tiefdruckgebiete auf nördlicheren Zugbahnen über den Atlantik und bringen dem Norden Europas mehr Niederschlag, stärkere Winde und höhere Temperaturen sowie häufigere Extremereignisse (Orkane, Starkregenfälle). Der Süden Europas ist kühler, bedingt durch die Advektion kalter kontinentaler Luftmassen. Die atlantischen Passatwinde nehmen an Stärke zu. Bei negativem NAO-Index sind die Winter in Grönland wärmer und feuchter. Der nordatlantische Strahlstrom ist schwächer und verläuft weiter südlich. Der Norden Europas wird von weniger Tiefdruckgebieten erreicht und gerät öfter unter kontinentalen Hochdruckeinfluss. Weniger Niederschlag, weniger Stürme und niedrigere Temperaturen sind die Folge. Der Süden Europas wird dagegen häufiger von Regen bringenden atlantischen Tiefdruckgebieten erreicht. Die atlantischen Passatwinde sind gegenüber einer Phase mit positiven NAO-Index schwächer.

Auf der Wechselwirkung zwischen der Atmosphäre und dem Meer basieren auch die über Jahrzehnte verlaufenden Schwankungen der atlantischen Meeresoberflächentemperatur. Ein Phänomen, das seinen Ursprung und Auswirkung vermutlich im Bereich des subpolaren Atlantiks hat. Da unklar ist, ob es sich dabei wirklich um eine Oszillation mit wohl definierter Periode handelt, wird sie auch als Atlantische Multidekadische Variabilität bezeichnet. Ein Beispiel für ihre Bedeutung ist die hohe Korrelation zwischen der Lufttemperatur über Westeuropa(5°W–10°E und 35–60°N) und der Meerestemperatur im nördlichen Atlantik. Beide zeigen ausgeprägte langfristige Schwankungen, mit Warmphasen Ende des vorletzten und Mitte des letzten Jahrhunderts sowie bisher in diesem Jahrhundert. Die Schwankungen der atlantischen Meeresoberflächentemperatur über Jahrzehnte spiegeln sich auch in anderen Klimaparametern wieder. Sowohl der Niederschlag in der afrikanischen Sahelzone als auch die atlantische Hurrikan-Aktivität weisen ähnliche multidekadische Schwankungen auf und praktisch keinen Trend während des 20. Jahrhunderts. Man findet auch einen Zusammenhang mit der Verbreitung von Fischarten. Bei hohen Wassertemperaturen erweitern Sardinen und Sardellen sowie Kabeljau und Schellfisch ihre Verbreitungsgrenzen in der Nordsee nach Norden. Ähnliche Schwankungen gibt es auch im Pazifik, die einen entscheidenden Einfluss auf den dortigen Meeresspiegel haben.



Das Muster (**oben**) und die Zeitreihe (**unten**) der 1. Empirischen Orthogonalfunktion (EOF) des Oberflächendrucks im Winter (DJFM) in der NAE Region, welche ca. 40% der Varianz erklärt, berechnet für die Periode 1899-2008. Die schwarze Kurve zeigt den aus Stationsdaten berechneten Index (Korrelation: 0,93). Quelle: http://www.cgd.ucar.edu/cas/jhurrell/indices.info.html#naopcdjfm.

Die Meere im anthropogenen Klimawandel

Die direkte Folgen des aktuellen Klimawandels für die Meere wurde von dem seit 1992 bestehenden Wissenschaftlichen Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) in seinem Bericht von 2006 durch drei Sätze charakterisiert: Das Meer wird zu warm, zu hoch und zu sauer. Diese drei Veränderungen haben weitreichende Konsequenzen für Pflanzen, Tiere und Menschen sowie das globale Klima.

Das Meer zu warm ...

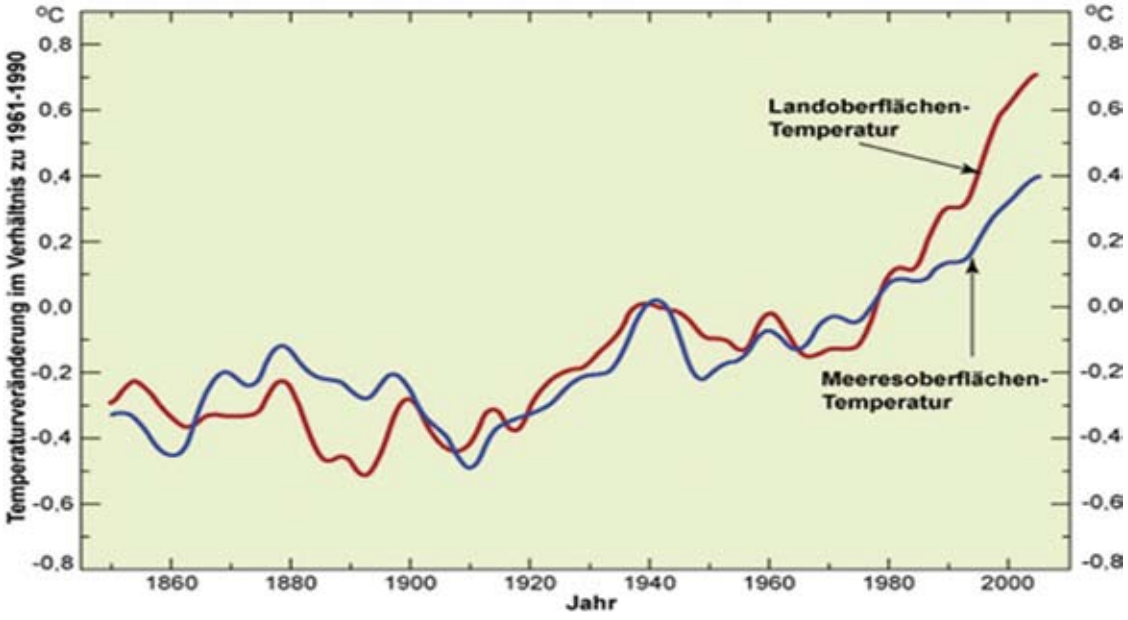
Von 1900 bis 2005 betrug die globale Erwärmung der bodennahen Atmosphäre 0,76°C und an der Meeresoberfläche 0,4°C (IPCC 2007). In der Nordsee wurde an der Oberfläche bei Helgoland eine Erwärmung von 1,7°C in den letzten 45 Jahren festgestellt, was zum Teil sicherlich eine Auswirkung der globalen Erwärmung ist. Diese rasche Temperaturerhöhung wirkt sich direkt auf Fortpflanzung, Wachstum und Verhalten mariner Organismen aus. Sie wirken aber auch indirekt z.B. durch sich ändernde Strömungsmuster. Wir wissen, dass sich die Hydrographie der Nordsee sehr verändert hat und dass die Variabilität dieser Signale häufig mit der Nordatlantischen Oszillation verbunden ist. Als Folge wird eine deutliche Änderung in der Verteilung beispielsweise von Nährtieren und Fischarten beobachtet. Einige wärmeliebende Arten sind in die Nordsee eingewandert. Viele davon haben sich dort etabliert und vermehren sich bereits. Kälteliebende Arten haben ihre Verbreitung nach Norden (Kabeljau) oder in die Tiefe (Scholle) verlagert. Der Rückgang in der Bestandsgröße des Nordsee-Kabejaus ist nicht nur Folge des Fischereidrucks sondern auch Folge der Erwärmung der Meere. An der Küste fällt auf, dass aus wärmeren Überseegebieten in die Nordsee eingeschleppte Arten besonders von der Erwärmung profitieren. Im Wattenmeer haben Pazifische Austern den Miesmuscheln den Rang als bedeutendste Filtrierer abgenommen.

Das Meer zu hoch ...

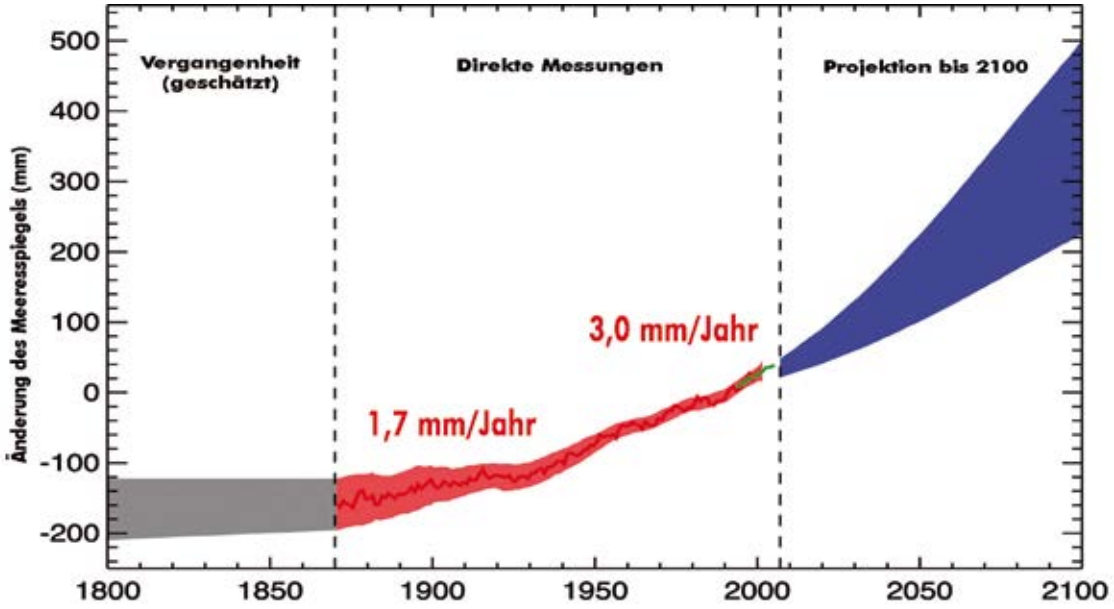
Über die letzten Jahrtausende stieg der Meeresspiegel nur sehr langsam. Diese Situation hat sich etwa seit Beginn der letzten hundert Jahre gewandelt. Rekonstruktionen auf Basis von Pegeldaten deuten für das 20. Jh. auf einen mittleren Anstieg des globalen Meeresspiegels von 1.7 mm/Jahr hin. Eine fast globale Abdeckung von Beobachtungen des Meeresspiegels gibt es erst seit Beginn satellitengestützter Messungen, aus denen sich ein deutlich größerer Anstieg des Meeresspiegels von 3,1 mm/Jahr ableiten lässt, der auch von gleichzeitigen Pegelmessungen bestätigt wird. Etwa die Hälfte der Zunahme beruht auf der Ausdehnung des Meerwassers aufgrund der Erwärmung. Die andere Hälfte stammt aus dem Abschmelzen der Gebirgsgletscher und dem Festlandeis auf Grönland und der Antarktis. Die Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs wird wahrscheinlich zunehmen und sich über mehrere Jahrhunderte fortsetzen. Genaue Angaben sind jedoch noch nicht möglich, da insbesondere einige dynamische Prozesse im polaren Inlandeis noch nicht ausreichend verstanden werden. Die unausweichlichen Auswirkungen eines über die kommenden Jahrhunderte schneller ansteigenden Meeresspiegels auf flache Küstenbereiche werden heute noch weitgehend verdrängt. Besonders gefährdet sind Deltaregionen, die aufgrund von Flussregulierungen schon heute unter Sedimentmangel leiden und dadurch unter den Meeresspiegel sinken.

Das Meer zu sauer ...

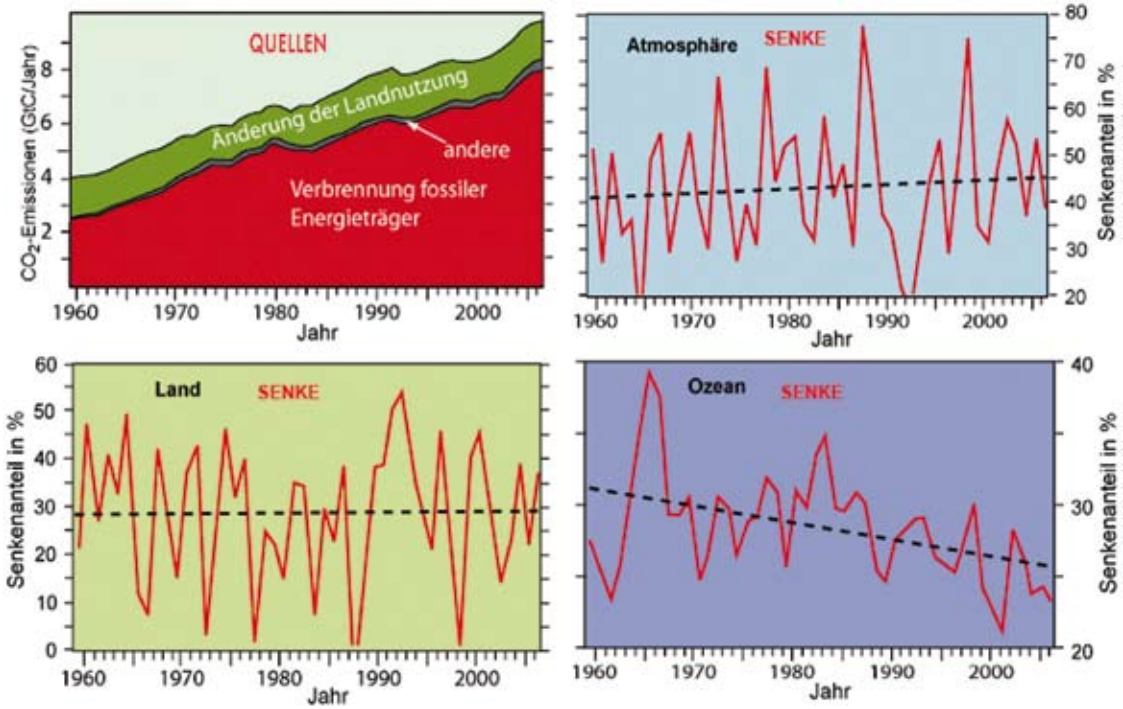
Der zunehmende Ausstoß von anthropogenem CO_2 beeinflusst auch die Chemie der Ozeane. Seit Beginn der industriellen Revolution ist der pH-Wert im Oberflächenozean im Mittel schon um 0,1 Einheiten gesunken. Der Grund ist, dass CO_2 und H_2O im Meer überwiegend HCO_3^- und H^+ bilden. Je mehr H^+ im Meerwasser frei vorliegt, desto niedriger fällt der pH-Wert, der auf logarithmischer Skala den Säuregrad angibt. Auch bleibt mehr Kalzit und Aragonit in Lösung, so dass diese beiden Formen des Kalzium-Karbonats von den Meeresorganismen nicht mehr so leicht für ihre Kalkstrukturen verwendet werden können. Bei unverminderter CO_2-Emission wird der pH-Wert im Verlauf dieses Jahrhunderts mit Auswirkungen auf zahlreiche Gruppen mariner Organismen weiter sinken, für die $CaCO_3$ das wichtigste Baumaterial ist. Es wird für den Aufbau von Skeletten, Schalen und anderen schützenden Strukturen verwendet. Die Folge ist u.a. eine verminderte Kalzifizierungsrate. Für einige Organismengruppen heißt das Verformung der Kalkstrukturen und dünnere Schalen und bei anderen eine reduzierte Überlebensrate während der larvalen Entwicklung. Ein niedriger pH-Wert verstärkt auch den Prozess der Kalklösung in den Korallenriffen, den bisher größten Bauwerken lebender Organismen auf der Erde.



Gegenüberstellung der globalen Erwärmung. Seit Ende des 19. Jhs hat sich das Land um ca. 0,9 °C erwärmt, das Meer um ca. 0,6 °C. Als Referenz wird der Mittelwert 1961–1990 genommen (Quelle: Eigene Darstellung (D. Kasang) nach IPCC 2007).



Anstieg des Meeresspiegels: Nach etwa 1,7 mm/Jahr im 20. Jahrhundert hat er auf 3 mm/Jahr zugenommen. Diese Beschleunigung wird sich fortsetzen, wenn die CO_2-Emission nicht gebremst wird. Die Projektion bis zum Jahr 2100 ist noch unsicher (aus IPCC 2007).



Quellen und Senken des Kohlendioxids: Die Verbrennung fossiler Energieträger, Änderungen in der Landnutzung sowie die Zementindustrie sind die wichtigsten Quellen. Etwa 1/4 der Emissionen werden durch das Meer aufgenommen und eher mehr durch die Biosphäre, so dass knapp die Hälfte in der Atmosphäre bleibt. Die Aufnahme durch das Meer nimmt langfristig u.a. aufgrund der Erwärmung des Meerwassers ab (Quelle: Eigene Darstellung (D. Kasang) nach Canadell et al. 2007).

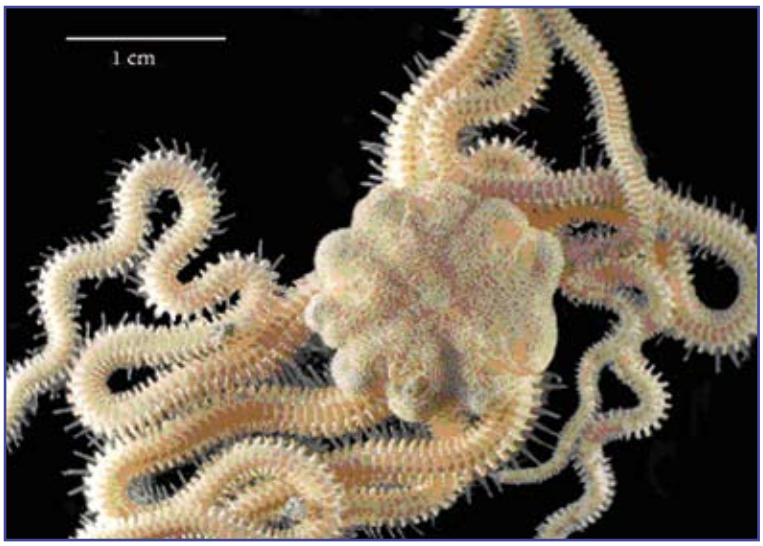
Folgen für die marine Flora und Fauna

Es ist allgemein bekannt, dass auch marine Ökosysteme vielseitig durch die natürlichen Klimaänderungen beeinflusst werden. Während diese auf Zeitskalen von Jahrtausenden bis Jahrmillionen wirken, ist die aktuelle rasche Erwärmung anthropogenen Ursprungs. Die ökologischen Folgen davon sind im Meer noch nicht absehbar. Die Verteilung der marinen Organismen wie Plankton und Fische ändert sich bereits deutlich. Sie werden durch die Meeresströmungen relativ schnell und über sehr weite Distanzen transportiert. Im Vergleich dazu verlaufen die Vegetationsveränderungen auf dem Land viel langsamer. Besorgniserregend sind die möglichen Folgen für Lebensgemeinschaften wie die der Korallenriffe, die ihren Lebensraum nicht rasch verlagern können. Besonders gefährdet sind die Kalk bildenden Organismen wie Muscheln, Schnecken, Foraminiferen und mikroskopische Kalkalgen durch eine verminderte Kalzifizierungsrate im Meerwasser bei niedrigem pH-Wert. Im Labor zeigen dadurch einige dieser Arten während der larvalen Phase eine hohe Sterblichkeit. Andere Organismen wie Quallen vermehren sich dagegen in einigen Gebieten massenhaft, was eine Folge der Erwärmung sein könnte.

Die oberen Wasserschichten in den Tropen sind leicht alkalisch, mit einem über lange Zeit im Holozän recht stabilem pH-Wert von ca. 8.2. Dieser Wert ist in den letzten Jahrzehnten auf 8.1 gesunken, was wegen der logarithmischen Skala +30% bei der Wasserstoffionen (H^+) entspricht. Dadurch wird die Kalkbildung geschwächt. Riffstrukturen sind also schwieriger aufzubauen bzw. aufrecht zu erhalten. Die Lebensgemeinschaften in den tropischen und subtropischen Korallenriffen sind nicht nur durch den sinkenden pH-Wert sondern auch durch die Erwärmung und den Meeresspiegelanstieg gefährdet. Die Verbreitung der Korallenriffe deckt sich mit einem Temperaturbereich, innerhalb dessen die Korallen nahe ihrem oberen Temperaturlimit existieren. Wird dieses überschritten, kommt es zum Ausstoßen ihrer symbiontischen Algen (Zooxanthellen). Diese Reaktion zeigen auch andere zooxanthellenhaltige Organismen wie Schwämme, Hohltiere, Muscheln, Manteltiere u.a.. Die kritische Temperaturschwelle ist regional unterschiedlich – z.B. 27°C bei der Osterinsel und 35°C im Persischen Golf – und reflektiert das jeweilige Temperaturregime, an das die dort lebenden Korallen angepasst sind. Steigt die Temperatur um wenige Grade über den Schwellenwert für einige Tage, geraten die miteinander gekoppelten Hell- und Dunkelreaktionen der Photosynthese aus dem Takt und schädigen die Algenzellen. Der Korallenpolyp stößt die nun »wertlos« gewordenen Symbionten aus. Da danach das weiße Kalkskelett durch die nun farblosen Polypen hindurch scheint, heißt das Phänomen Korallenbleiche (Coral-Bleaching).

Neu angesiedelte Korallen; sie stocken auf einem abgestorbenen Kolonierest, dessen Basis weitgehend zermürbt ist und demnächst kollabieren wird (Photo W. Loch)

Die nächste Frage ist: Können Korallenriffe mit dem steigenden Meeresspiegel Schritt halten? Ein Blick zurück in die Erdgeschichte macht zunächst Hoffnung. Nach der letzten Eiszeit stieg der Meeresspiegel rasch an. Korallenriffe hielten hiermit insbesondere dann Schritt, wenn sie sich auf einem pleistozänen Untergrund »treppenartig« aufbauen konnten. Erhebliche Zweifel bestehen, ob dieser und andere Mechanismen auch in Zukunft greifen werden. Das Korallenmaterial, welches in dieser Zeit zum Erhalt der Riffe zur Verfügung stand, stammt noch aus einer »heilen Welt« – einer Zeit, in der Korallenbleichen, geringer pH-Wert, Sedimenteinträge und Krankheiten noch nicht gleichzeitig die Korallengemeinschaft bedrängt haben.



Arten der Roten Liste und die Erwärmung der Meere. Der langarmige Schlangenstern hat möglicherweise aufgrund der Erwärmung sein Areal auch auf flachere Bereiche ausgeweitet (Photo: K. Boos, Osterholz-Scharmbeck).

Von den Meerestieren der Roten Liste gibt es bei uns in der Nord- und Ostsee Arten – wie die meisten seltenen arktisch-borealen Arten – die bei anhaltender Klimaerwärmung höchstwahrscheinlich bestandsgefährdet sind. Andere Arten wie der langarmige Schlangenstern, *Acrocnida brachiata* (Montagu, 1804), kommt seit einigen Jahren in weiten Bereichen der Nordsee vor. Er hat sein Areal auch auf flachere Bereiche ausgeweitet, was durch die Erwärmung unserer Meere zu erklären ist. Die Art ist dementsprechend im Gegensatz zu der Bewertung von 1998 nicht mehr gefährdet. Es ist anzunehmen, dass die bei uns vom Aussterben bedrohte Europäische Auster (*Ostrea edulis*) ihre im Wattengebiet lebenden Bestände früher durch Brutschübe aus dem Sublitoral erneuern konnte. Heute sind sämtliche Austernbänke im Sublitoral auch durch Übernutzung verschwunden. Im Wattenmeer macht sich nun die Pazifische Auster (*Crassostrea gigas*) breit und verhindert als starker Konkurrent wahrscheinlich jegliche Wiederansiedlung der heimischen Auster. Möglicherweise werden auch Miesmuscheln (*Mytilus edulis*) durch den Neubürger bedrängt.

Flohkrebse. Die häufigste Tiergruppe, die den Lebensraum unterhalb des Eises besiedelt (Photo Iris Werner)

Das Meereis ist ein wichtiger Lebensraum. Die meisten Organismen sind in den unteren Schichten des Eises konzentriert. Daher herrschen dort fast immer gute Nahrungsbedingungen vor. In der Arktis gibt es unter dem Eis sogar mehrere Meter lange fädige Kieselalgen. Der Rückgang des Meereises, ebenso ein Ölunfall, hat für diesen Lebensraum weitreichende Konsequenzen, da die ganze Nahrungskette davon abhängt.

Eisbären (Photo J. Tromassen).

Können Eisbären ohne Meereis überleben? Die Vorhersagen für den gesamten Eisbärenbestand der Erde sehen nicht gut aus. Es wurde prognostiziert, dass bereits um 2050 die Gesamtpopulation um zwei Drittel dezimiert sein könnte, wenn der Verlust des arktischen Meereises so fortschreitet wie bisher. Man geht davon aus, dass der Eisbär als hochspezialisierte Art sich in kurzer Zeit wohl kaum an die verränderten Meereisbedingungen anpassen kann. Sollte er doch auf das Land als Lebensraum ausweichen, so würde er dort in weiten Teilen auf den Braunbären treffen, der diese Nische bereits erfolgreich ausfüllt. Neuere Untersuchungen haben ergeben, dass der Eisbär in manchen Regionen tatsächlich bereits gelernt hat, im Frühsommer auf andere Nahrungsquellen auszuweichen. Die frühere jähreszeitliche Rückkehr der Eisbären vom Meer auf das Land gibt den Eisbären beispielsweise die Möglichkeit, sich von Eigelegen der Schneegans zu ernähren. Allerdings wird der Eisbär nicht dauerhaft ohne Meereis überleben können.

Bild: Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg

Folgen für unsere Gesellschaft

Aufgrund der hohen Wärmekapazität des Meerwassers und seiner Durchmischung ist das Klima an der Küste ausgeglichener als im Landesinneren, die Sommer sind weniger heiß und die Winter weniger kalt. Dies führt auch dazu, dass etwa 1/3 der Weltbevölkerung in Küstennähe konzentriert ist. Flache Küsten sind nicht nur überproportional dicht besiedelt, sondern auch wichtige Wirtschaftsräume. Sie sind in Wechselwirkung mit einem nur sehr langsam steigenden Meeresspiegel in den letzten 6.000 Jahren entstanden. Eine Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs stellt daher grundsätzlich eine neue Situation dar und kann zur größten Herausforderung werden. Insbesondere Küstenbevölkerungen in Entwicklungsländern wie in Bangladesh sind von Flussüberschwemmungen nach starken Monsunregenfällen und Meeresüberschwemmungen durch intensivere Wirbelstürme doppelt bedroht. Sie sind am stärksten betroffen und haben am wenigsten zum Klimawandel beigetragen. Notwenige Anpassungsmaßnahmen müssen daher von der gesamten Staatengemeinschaft finanziert werden.

Viele Inseln und Inselstaaten im Pazifik, Atlantik sowie im Indischen Ozean sind auch bei Einhaltung der 2°C Grenze gefährdet (Photo: J. Lozán).

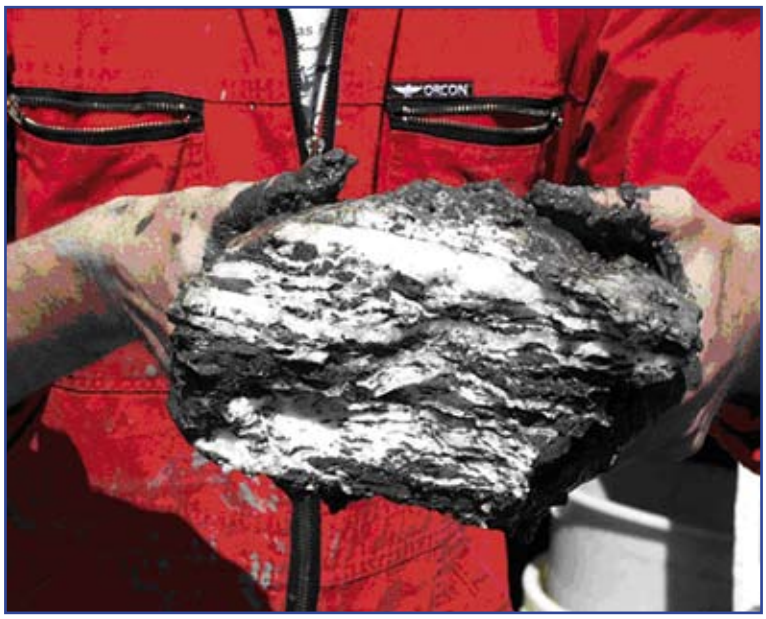
Ebenfalls gefährdet sind Inseln und Staaten im Pazifik wie die Marshall Inseln, Kiribati, Tuvalu, Tonga, die Föderierten Staaten von Mikronesien und Cook Inseln, im Atlantik Antigua und Nevis sowie im Indischen Ozean die Malediven. Tuvalu, Takelau und die Marschall Inseln könnten wegen ihrer geringen Höhe noch im Verlauf dieses Jahrhunderts weitgehend verschwinden.

Die Anzahl der starken tropischen Wirbelstürme nimmt wahrscheinlich zu. Hurrikan Katrina am 28.8.2005 (http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Katrina-noaa-GOES12.jpg).

Wetterextreme wie tropische Wirbelstürme stellen aufgrund ihrer starken Zerstörungskraft auch eine Bedrohung auf See und an den Küsten dar. Sie treten in den tropischen Regionen aller drei Ozeane mit Ausnahme des Südatlantiks auf. Im Atlantik heißen sie Hurrikane, im Pazifik Taifune, im nördlichen Indischen Ozean Zyklone. Sie werden wohl nicht häufiger aber aufgrund der Erwärmung der Meere stärker.

Ist die Stabilität des marinen Permafrosts und der Gashydrate gefährdet?

Die Stabilität von Permafrost am Grunde des arktischen Schelfmeeres ist vor allem von der Wassertemperatur und dem hydrostatischen Druck abhängig. Viele Untersuchungen haben gezeigt, dass große Mengen Kohlenstoff im Permafrost gespeichert sind. Marine Permafrostgebiete befinden sich in der Regel noch weitgehend im thermischen Gleichgewicht mit dem Meerwasser. Aufgrund des aktuellen Klimawandels führen steigende Bodenwassertemperaturen unweigerlich zu deren Destabilisierung. Eine massive Freisetzung der Methanvorkommen, die im submarinen Permafrost über tausende Jahre fixiert waren, würde einen wesentlichen Einfluss auf das jährliche Methanbudget mit globalen Auswirkungen haben.



Ein Brocken Gashydrat, geborgen aus den Sedimenten des Hydratrückens vor Oregon, USA. Bildquelle: IFM-GEOMAR.

Fast weltweit bilden sich am Kontinentalabhang Gashydrate, wenn eine Temperatur von 0 bis 4°C und ein hydrostatischer Druck von mindestens 500 m Wassersäule herrschen. In Regionen mit niedrigeren Temperaturen, wie in der Arktis, schon ab 300 m. Das Methan in den Methanhydraten ist das Stoffwechselprodukt von Bakterien, die organisches Material nutzen. Die Gashydratevorkommen sind – trotz Unsicherheiten – um das vielfache höher als die aller anderen fossilen Energieformen (Kohle, Erdgas und Erdöl). Am ehesten werden durch die globale Erwärmung höchstwahrscheinlich diejenigen Gashydrate betroffen sein, die sich heute nahe ihrer Stabilitätsgrenze befinden. Studien aus der sibirischen Laptev See und den Kontinentalrändern bei Spitzbergen berichten schon jetzt von starken Methanaustritten aus dem Meeresboden. Auch das frei werdende Methan wird überwiegend bakteriell (anaerob oder aerob) abgebaut. Die Frage ist, wie stark diese bakterielle Barriere bei stärkerer Emission wirkt.

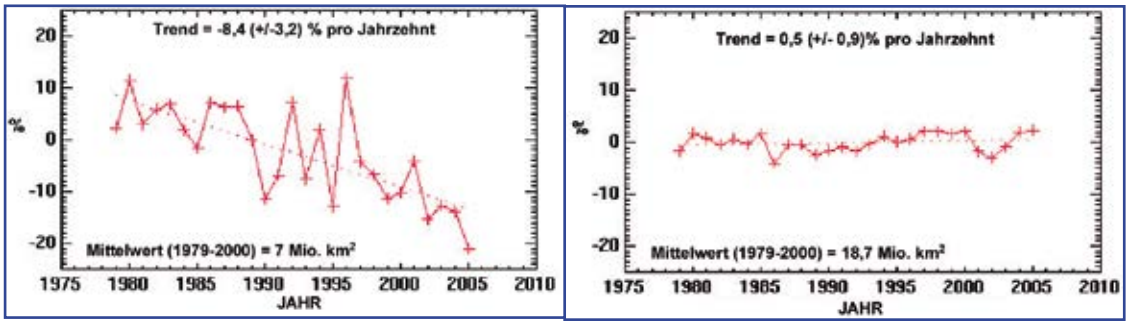
Erwärmung der Meere und die Intensivierung des Wasserkreislaufs

Von den 110.000 km³ Niederschlag über den Kontinenten stammen 40.000 km³ vom Wasserdampftransport von den Meeren auf die Kontinente. Mit der Erwärmung der Meere wird eine Zunahme der Verdunstung erwartet und nach der Clausius-Clapeyron'schen Gleichung ist mit einem Anstieg des atmosphärischen Wasserdampfgehalts von etwa 7% pro Grad Lufttemperatur zu rechnen. Damit könnte eine ähnliche Zunahme aller Elemente des Wasserkreislaufes, also von Niederschlagsintensitäten und -häufigkeiten ebenso wie Veränderungen der räumlichen Verteilungsmuster verbunden sein, wenn nicht andere Prozesse wie erhöhte Lufttrübung diese Werte senken. Über den Landmassen können diese Veränderungen relativ gut gemessen werden, auch wenn es immer noch Regionen mit wenigen Messstationen gibt. Über den Meeren stehen jedoch so gut wie keine direkten Niederschlags-Messstationen zur Verfügung. Trotz der Fortschritte bei der Nutzung von Satellitendaten ist die Ableitung von Niederschlagstrends über dem globalen Ozean noch immer nicht möglich.

Bild: D. Notz, Hamburg

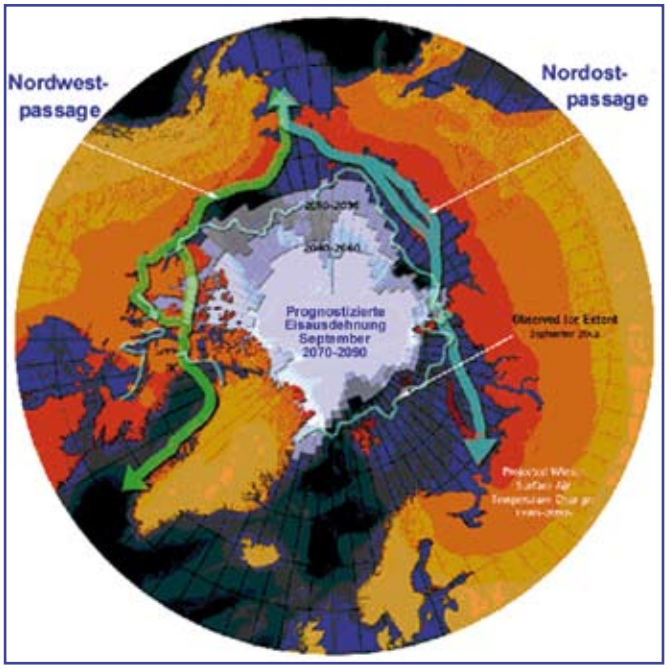
Das Meereis als Barometer der Erwärmung

Im Gegensatz zum Inlandeis auf Grönland und der Antarktis liegt auf großen Teilen der polaren Meeresregionen das Meereis als nur dünne Schicht. Es verändert das globale Klima weit über diese Regionen hinaus. Die Größe der am Ende des Sommers vorhandenen Fläche des Meereises ist ein Indikator für den Klimawandel. Lag sie in den 1950/60er Jahren in der Arktis noch bei etwa 8 Mio. km², so ist sie in den letzten Jahren auf teilweise unter 5 Mio. km² zurückgegangen. Die Meereisausdehnung im Jahr 2007 von nur knapp über 4 Mio. km² war besorgniserregend. Die Albedo des Meerwassers beträgt ca. 0,1 und die des Meereises >0,5. Daraus ergibt sich eine sich selbst verstärkende Entwicklung in den Polarregionen: weniger Meereis erhöht dort die Wärmeaufnahme und die wiederum lässt das Eis schneller schmelzen. Dagegen ist im Meer um die Antarktis bisher kein signifikanter Trend erkennbar.



Ausdehung der Meereisfläche auf der nördlichen (**links**) und südlichen Halbkugel (**rechts**) (Aus: Warnsignale aus den Polarregionen Kap. Haas)

Die Schifffahrt: Gewinner des arktischen Klimawandels?



Nordwest- und Nordostpassage (Aus: Warnsignale aus den Polarregionen Kap. Kassens et al.).

Die transarktische Schifffahrt scheint sich aufgrund der schrumpfenden Meereisbedeckung etablieren zu können. Eine Route direkt über den Nordpol wird aber auch im Sommer kaum möglich sein. Auf den Nordost- und Nordwestrouten werden die sommerlichen »Passage-Fenster« zwar größer, allerdings werden Unsicherheiten und damit erhöhte Kosten bleiben. Parallel zum Schiffsverkehr durch die Nordwest- und Nordostpassage werden die ökologischen Risiken für die Region steigen, da die Verschmutzung mit Öl und Müll fast unvermeidbar ist. Ein Tankerunfall würde in dieser fragilen Region große ökologische Schäden verursachen, die infolge der niedrigen Temperatur viele Jahrzehnte für eine Erholung benötigen würden.

Was Tun?

Mehr Meeresschutz weniger Risiken in der Zukunft

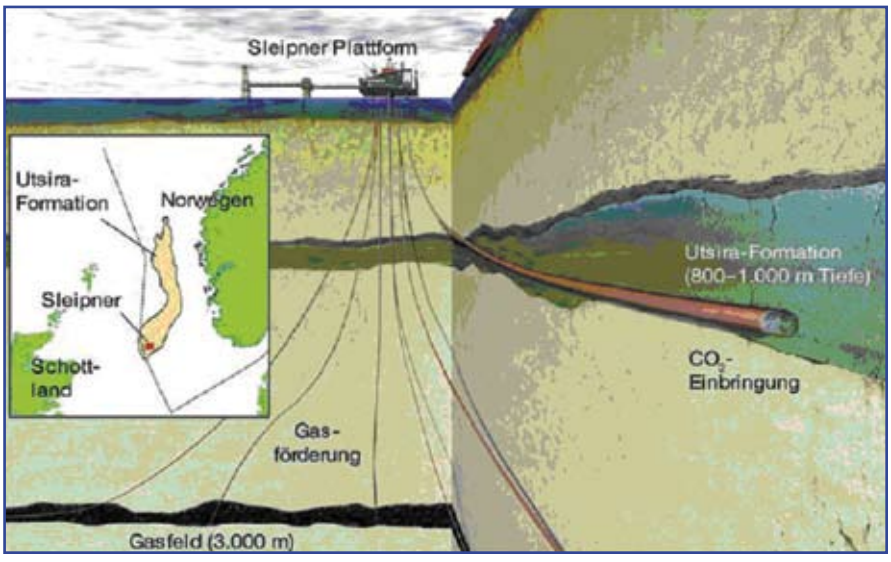
Der Klimawandel ist nicht die alleinige Bedrohung des Lebens im Meer. Die heutige Belastung der Meere ist ohnehin durch zwar erlaubte, aber ökologisch nicht immer verträgliche Nutzungen sehr hoch. Hierzu gehören die Fischerei mit einer zu starken Ausbeutung der Fischbestände und zerstörerischen Fangmethoden, die Förderung von Öl und Gas mitsamt immer mehr Pipelinetrassen und von Mineralien vom tiefen Meeresboden, Sand- und Kiesgewinnung in den Randmeeren, die Verbreitung fremder Arten durch Aquakultur und Schiffe in die Küstengewässer, die Energiegewinnung auf und im Meer, die Schifftransporte, die Verklappung schädlicher Stoffe sowie Einträge von giftigen und düngenden Substanzen über die Atmosphäre und durch die Flüsse, Kunststoffmüll einschließlich der sogenannten Mikroplastik-Partikeln, rasant zunehmende Infrastrukturen direkt am Meer für Häfen, Kraftwerke und Tourismus und vieles andere mehr. Mit dem Klimawandel kommen die globale Erwärmung, ein beschleunigter Meerespiegelanstieg und ein erniedrigter pH-Wert hinzu. Diese bedeutenden Veränderungen werden vor allem in flachen Küstenregionen gravierende Auswirkungen haben. All dies ruft nach einer deutlichen Ausweitung der Meeresschutzgebiete und der Naturschutzgebiete entlang der Küsten sowie deren Vernetzung. Entsprechend der Beschlüsse des UN-Weltgipfels für nachhaltige Entwicklung im Jahr 2002 ist das internationale Ziel, an Küsten und Meeren jeder marinen Ökoregion 10% der Fläche als repräsentative Netzwerke effektiv verwalteter Meeresschutzgebiete auszuweisen. Dies hilft auch die Folgen des Klimawandels in der Meeresumwelt zu kompensieren und die marinen Ökosysteme durch Schonung geschwächter Bestände und Renaturierung von Küstenstreifen widerstandsfähiger zu halten.

Zur Bewältigung des Klimawandels sind sowohl eine nachhaltige Klimapolitik, eine Steigerung der Energieeffizienz, eine schnelle Energiewende zur Nutzung von erneuerbaren Energieformen und eine Anpassung an die schon unvermeidbar gewordenen Folgen erforderlich.

CO_2-Lagerung unter dem Meeresbodens

Die Verpressung von CO_2 in geologische Formationen tief unter dem Meeresboden könnte als Übergangslösung angesehen werden. Sie ist jedoch nicht unproblematisch, da ein Entweichen des CO_2 nicht ausgeschlossen werden kann. Dies kann Folge von technischen Mängeln, Unfällen bei Transport-, Injektions- und Lagerungsprozessen sein oder aufgrund ungeeigneter geologischer Formationen auftreten. Die Abscheidung des CO_2 und der Transport sind sehr energieaufwändige Verfahren und dürften mit dem Ausbau der Nutzung alternativer Energieträger bald nicht mehr ökonomisch sein. Die Einbringung von CO_2 in die Wassersäule und auf den Meeresboden wird strikt abgelehnt, da diese keine nachhaltige Lösung ist.

Die Speicherung von CO_2 im Meeresboden wird trotz der o.g. möglichen Gefahren als eine ergänzende Übergangsoption angesehen, wenn deren Einsatz begrenzt und reguliert wird. Das Sleipner-Projekt in der Nordsee, läuft seit 1996. Bis Anfang 2005 wurden in der Utsira-Sandsteinformation mehr als 7 Mio. t CO_2 gelagert. Die begleitenden Forschungsarbeiten berichten, dass das Deckstein gegen CO_2 dichtet. Simulationen für die nächsten 100.000 Jahre ergeben, dass sich das CO_2 im Porenwasser löst und in gelöster Form nach unten sinkt. Diese Menge ist jedoch minimal, so dass dieser Speicher die geforderten Rückhaltezeit von mehr als 100.000 Jahren und eine Leckagerate von weniger als 0.01% pro Jahr erfüllen kann. Dies muss jedoch noch wissenschaftlich besser abgesichert werden.



Das Sleipner Projekt: Bei der Erdgasförderung 250 km vor der norwegischen Küste wird das abgetrennte CO2 vor Ort in die Utsira-Sandsteinformation (800 m unter dem Meeresboden) verbracht. Quelle: IPCC 2005, Staatoil 2005, WBGU 2006).

Eisendüngung?

Zur Eisendüngung der Meere als effektive Maßnahme zur Bekämpfung des Klimawandels liefern die derzeitigen Forschungsergebnisse begründeten Zweifel. Gegenwärtig gibt es keine gesicherten Erkenntnisse dafür, dass die Eisendüngung der Ozeane in der Lage ist, den atmosphärischen CO_2-Gehalt in einem für das Klima relevanten Ausmaß zu reduzieren, ohne gleichzeitge Schäden auf Meeresökosysteme zu verursachen. Es bestehen auch erhebliche Zweifel an der ausreichenden Langfristigkeit der Speicherung und an der Effizienz der Methoden. Unerwünschte und schädliche Auswirkungen sind sehr wahrscheinlich, da die Meeresdüngung in sehr komplexe marine Nahrungsnetze und biogeochemische Kreisläufe eingreift. Künftige Eisendüngungsexperimente sollten insbesondere die Auswirkungen auf tiefere Wasserschichten, auf die Sedimente und bodenlebenden Organismen untersuchen. Zusätzlich ist eine Klimabilanz unter Berücksichtigung aller externen Kosten (Herstellung, Transport, Ausbringung des Düngers), Auswirkungen des »nutrient robbing«, Produktion anderer Treibhausgase und alle Folgekosten für Mensch und Umwelt erforderlich.

Die Schiffe der Zukunft

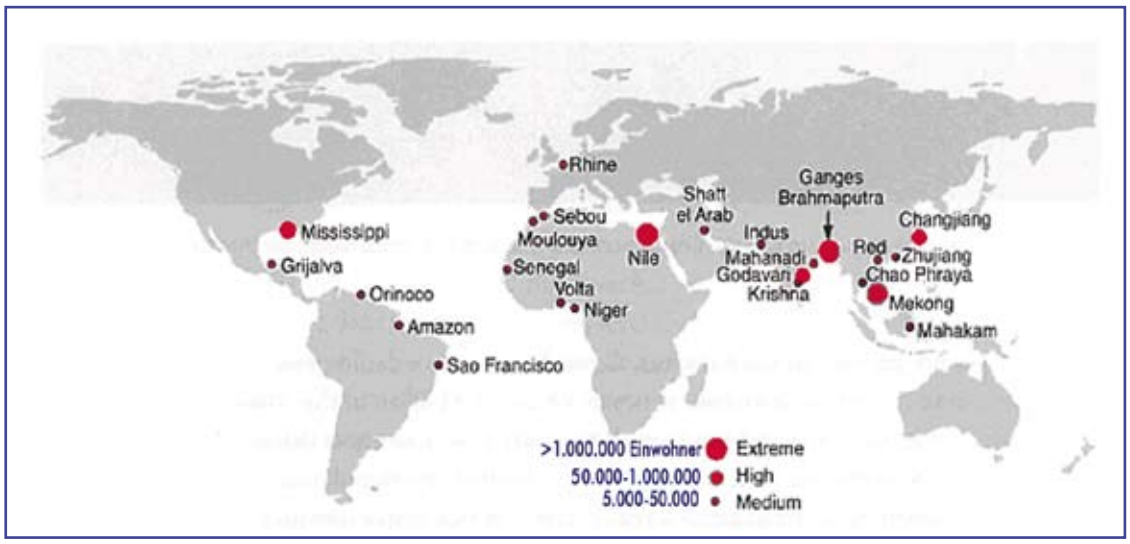
Mit der fortschreitenden Globalisierung hat auch der internationale Warenaustausch rasant zugenommen. Über 80% des weltweiten Warenhandels, bezogen auf das Volumen, wird derzeit über den Seeweg abgewickelt. Und dieser Anteil wird höchstwahrscheinlich weiter wachsen. Die Schifffahrt ist daher für etwa 1,12 Mrd. t CO_2 pro Jahr verantwortlich; das ist etwa 3,8% der anthropogenen CO_2-Emissionen. Der Seeverkehr weist zwar einen geringeren CO_2-Ausstoß als andere Verkehrsmodi pro Tonnen-Kilometer auf, aber aufgrund der extrem schlechten Qualität der als Treibstoff verwendeten Rückstandsöle entlassen die Schiffe einen äußerst schädlichen Gas-Partikel-Cocktail. In Hafenstädten wie Hamburg (europäische Umwelthauptstadt 2011) liegen u.a. aufgrund des Schiffverkehrs die Messwerte für Stickdioxids weit über der EU-Grenze. Trotz ihres relativ kleinen CO_2-Ausstoßes pro Tonnenkilometer hat die Schifffahrt infolge der bisherigen geringen Regulierung von allen Transportmodi das größte Reduktionspotenzial. Die Möglichkeiten der Energieeinsparung reichen von simplen operativen Verbesserungen, über bauliche Veränderungen bis zu neuen Konzepten für Schiffsneubauten.

Der Schifftransport nimmt weltweit weiter zu (Photo: Elke Körner)

Die Zeit für den Beginn einer klimaverträglichen Gesellschaft ist gekommen.

Die Zeit ist reif für eine einschneidende Veränderung zu einer klimaverträglichen Gesellschaft. Nicht nur aufgrund des Fukushima-Unfalls in einem hochentwickelte Land wie Japan sondern weil die Gefahr die Grenze der 2°C-Erwärmung nicht einhalten zu können, sehr groß ist. Die nicht-Einhaltung dieser Erwärmungsgrenze bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit für unkontrollierte Klimaveränderungen stark steigt. Gefährliche Klimaveränderungen bedeutet beispielsweise Dürren, Überschwemmungen und Missernten. Der Meeresspiegel würde so ansteigen, dass Städte umgesiedelt werden müssten. Rund ein Drittel der Bevölkerung lebt in Küstennähe. Das ganze wäre für die Welt ökonomisch nicht tragbar. Auch Rezesion, Arbeitslosigkeit, Migration etc. wären die wahrscheinlichen Folgen.

Studien zeigen, dass ein Klimaschutz ohne Kernenergie möglich ist. Die Voraussetzung dafür ist ein massiver Ausbau der erneuerbaren Energien und der dafür erforderlichen Infrastruktur. Effizienzsteigerung und Vermeidung von Energieverschwendung in allen Sektoren der Industrie- und den Schwellenländern muss die Prämisse sein. Deutschland und andere Länder mit starker Wirtschaft und als hohen Exportanteil sollten diesen Wandel vorantreiben.



Im Deltabereich vieler Flüsse wird die Gefahr von Überschwemmung mit dem Anstieg des Meeresspiegels überdurchschnittlich zunehmen, so dass eine Umsiedlung der Bevölkerung erforderlich sein wird. Die Abbildung unterscheidet heute aufgrund der Einwohnerzahl zwischen extremen, hohen und mittleren verwundbaren Orten (aus Archer & Rahmstorf 2010).

Klimagerechtigkeit

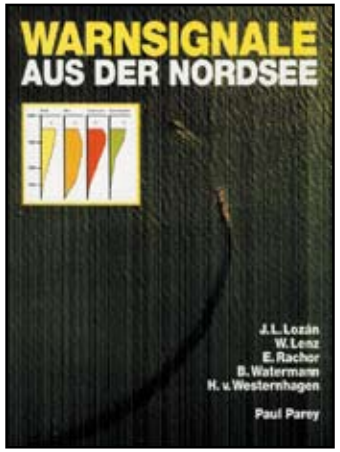
Länder und Bevölkerungsgruppen werden unterschiedlich von den Auswirkungen des Klimawandels tangiert. Die Fähigkeit zur Bewältigung der Folgen sind vor allem abhängig von den jeweiligen finanziellen Ausgangsbedingungen. Sie sind meistens am ungünstigsten bei denen, die am wenigsten zum Klimawandel beigetragen haben. Insbesondere bei den weitreichenden Anpassungen an einen höheren Meeresspiegel werden generationenübergreifende Gerechtigkeitsfragen entstehen. Betroffen vom weltweiten Meeresspiegelanstieg sind z.B. viele Küstenstädte und dort insbesondere jene, die an großen Flussmündungen liegen wie Dacca, Bangkok oder New Orleans. Infrastrukturelle Anpassungsmaßnahmen gegen Meeresspiegelerhöhungen sind kostspielig. Arme Länder erwarten gerechte Kompensationsleistungen.

Tropische Wirbelstürme, die sich wahrscheinlich als Folge der globalen Erwärmung verstärken, werden zu einer neuen Qualität von Sturm- und Flutkatastrophen führen. Betroffen werden vor allem der Golf von Mexiko und die Karibik sowie Länder im Süden Asiens wie Bangladesh, Myanmar, Thailand und Vietnam mit vielen Millionen Einwohnern in tief gelegenen Küstengebieten sein. Die Geographie von Bangladesh ist durch das ausgedehnte Mündungsdelta der großen Flüsse Ganges und Brahmaputra geprägt. Große Bereiche des Landes sind weitgehend eben oder erheben sich nur wenige Meter über den Meeresspiegel.

Viele kleine Inselstaaten sind durch den Meeresspiegelanstieg so bedroht, dass sie im Verlauf dieses und des nächsten Jahrhunderts verschwinden können. Die Hälfte der Bevölkerung der karibischen und pazifischen Inselstaaten lebt in einem schmalen Küstenstreifen direkt am Meer. Damit stellen sich sehr grundsätzliche Gerechtigkeitsfragen in der Weltgesellschaft, auf die das Völkerrecht bisher keine Antworten gibt. Haben die bedrohten Bevölkerungen einen Schutzanspruch? Müssen sie von den Verursachern des Klimawandels kompensiert werden und welche Größenordung der Entschädigung wäre angemessen? Wohin können die Menschen, die ihre Heimat verlieren, fliehen?

Während sich die reichen Länder einigermaßen vor den Folgen des Klimawandels schützen können, sind die armen Länder von der internationalen finanziellen Unterstützung abhängig. Das Bild zeigt, dass Kinder in Chittagong (Bangladesh) bereits heute bei ungünstigem Wetter durch ein überschwemmtes Gebiet gehen müssen, um die Schule zu erreichen (Photo: Jashim Salam, Marine Photobank)

Buchreihe: Warnsignale (www.lozan.de)

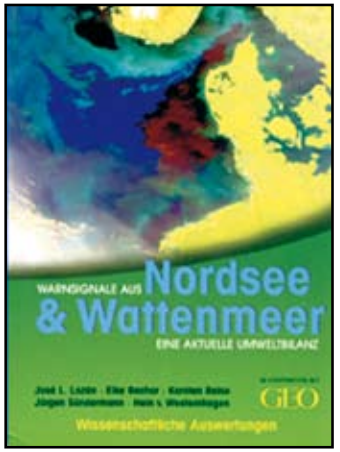


Warnsignale aus der Nordsee (1990): 428 S. mit 186 Abb., 54 Tab. und 4 Tafeln.
Hrsg.: José L. Lozán • Walter Lenz • Eike Rachor • Burkard Watermann • Hein v. Westernhagen

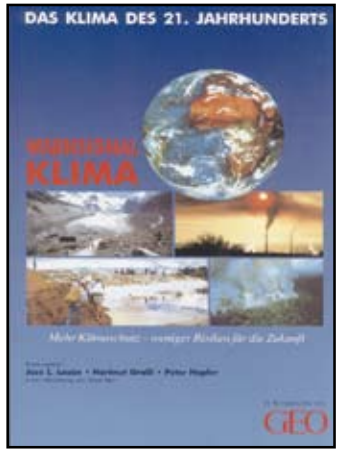
Warnsignale aus dem Wattenmeer (1994): 387 S. mit 205 Abb.,4 Tab. und 4 Tafeln.
Hrsg.: José L. Lozán • Eike Rachor Karsten Reise • Hein v. Westernhagen • Walter Lenz

Warnsignale aus der Ostsee (1996): 385 S. mit 210 Abb., 47 Tab. und 15 Tafeln.
Hrsg.: José L. Lozán • Reinhard Lampe Wolfgang Matthäus • Eike Rachor • Heye Rumohr • Hein v. Westernhagen

Warnsignale aus Flüssen und Ästuaren (1996): 398 S. 160 Abb., 60 Tab. und 4 Tafeln.
Hrsg.: José L. Lozán • Hartmut Kausch



Warnsignale aus Nordsee & Wattemeer (2003): 448 S. mit 251 Abb., 50 Tab. und 8 Tafeln. 25,- EUR
Hrsgs.: José L. Lozán • Eike Rachor Karsten Reise • Jürgen Sündermann • Hein v. Westernhagen

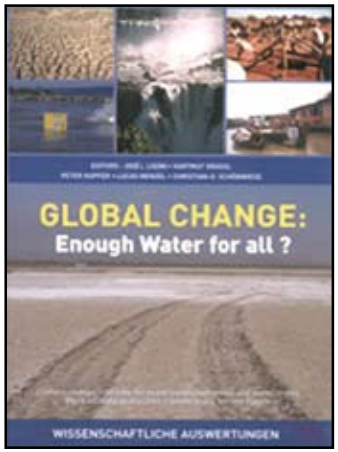


Warnsignal Klima – Das Klima des 21.Jh. (1998): 464 S. mit 195 Abb., 46 Tab. und 10 Tafeln.
Hrsg: José L. Lozán • Hartmut Graßl • Peter Hupfer

CLIMATE OF THE 21st CENTURY: Changes & Risks (2001) 448 S. m. 207 Abb., 66 Tab. und 12 Tafeln (Englisch). 30,- EUR
Hrsg.: José L. Lozán • Hartmut Graßl • Peter Hupfer

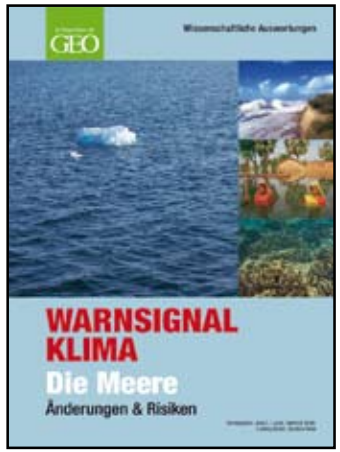
Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle? (2005): 400 S. mit 160 Abb. 71 Tab. und 15 Tafeln. 35,- EUR
Hrsgs.: José L. Lozán • Hartmut Graßl • Peter Hupfer • Lucas Menzel • Christian-D. Schönwiese

Warnsignale aus der Polarregionen (2006): 352 S. mit 218 Abb., 21 Tab. und 7 Tafeln. 35,- EUR
Hrsgs.: José L. Lozán • Hartmut Graßl • Hans-W. Hubberten • Peter Hupfer • Ludwig Karbe • Dieter Piepenburg



GLOBAL CHANGE: Enough Water for all? (2007): 384 S. mit 160 Abb., 71 Tab. und 15 Taf. (Eng). 35,- EUR
Hrsgs.: José L. Lozán • Hartmut Graßl • Peter Hupfer • Lucas Menzel • Christian-D. Schönwiese

Warnsignal Klima – Gesundheitsrisiken: Gefahren für Pflanzen, Tiere und Menschen (2008): 384 S. 192 Abb. 37 Tab. 7 Tafeln,35,- EUR
Hrsg: José L. Lozán • Hartmut Graßl • Gerd Jendritzky • Ludwig Karbe • Karsten Reise



Warnsignal Klima – Die Meere - Änderungen & Risiken (2011): 384 S. mit 195 Abb., 46 Tab. und 10 Tafeln.
Hrsg: José L. Lozán • Hartmut Graßl • Karsten Reise u.a.

José L. Lozán • Hartmut Graßl • Ludwig Karbe • Karsten Reise (Hrsg.)

Warnsignal Klima: Die Meere - Änderungen & Risiken

(2011) 384 Seiten mit 192 Abbildungen • 15 Tabellen • 7 Tafeln • Broschiert • EUR 40,- • ISBN 978-39809668-5-2

Die Meere bedecken fast drei Viertel der Erde. Mit ihren gewaltigen Wassermassen und Strömungen bestimmen sie in Wechselwirkung mit der Atmosphäre maßgeblich das Klima der Erde. Ohne die Meere wäre die Erdgeschichte ganz anders verlaufen. Die Meeresströmungen transportieren Wärme aus den tropischen in die kalten Regionen; die wirtschaftliche Entwicklung Mittel- und Nordeuropas ist dem Wärmetransport des Nordatlantischen Strömungssystems zu verdanken. Seit Beginn der Industrialisierung verändert der Mensch durch den Verbrauch fossiler Energieträger die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre und verstärkt damit den natürlichen Treibhauseffekt, was zu einer Erwärmung der unteren Atmosphäre und der Erdoberfläche einschließlich des oberen Ozeans führt. Das bewirkt die Schrumpfung des Meereises, was eine Verstärkung der globalen Erderwärmung zur Folge hat, da sich die Albedo der Erde verringert. Auch die Gletscher schmelzen. Das Schmelzwasser und die thermische Ausdehnung des Meerwassers führen zum Meeresspiegelanstieg, der gefährliche Höhe erreichen wird, wenn wir das Klima nicht konsequent schützen. Fast ein Drittel der Weltbevölkerung lebt in Küstennähe und muss in der Zukunft weichen, wenn die Emission des Kohlendioxids nicht gemindert wird. Durch die Aufnahme des Kohlendioxids durch die Meere sinkt der pH-Wert des Meerwassers, was für viele Meeresorganismen – vor allem Kalk bildende Tiere – wie Korallen, Muscheln und viele Planktonalgen schädlich ist. Mit diesen und anderen Folgen für Pflanzen, Tiere und Menschen befassen sich rund 100 Fachleuten im vorliegenden Buch. Die Beiträge wurden leicht verständlich verfasst.

José L. Lozán • Hartmut Graßl • Gerd Jendritzky • Ludwig Karbe • Karsten Reise (Hrsg.)

Warnsignal Klima: Gesundheitsrisiken - Gefahren für Pflanzen, Tiere und Menschen

(2008) 384 Seiten mit 192 Abbildungen • 37 Tabellen • 7 Tafeln • Broschiert • EUR 35,- • ISBN 978-39809668-4-9

Wir werden in diesem Jahrhundert - trotz der Bemühungen, das Klima zu schützen - in einem warmen Klima mit Temperaturwerten leben, die die Menschheit noch nicht erlebt hat. Die Konsequenzen für unsere Gesellschaft sowie für das Ökosystem Erde sind noch nicht in ihrer vollen Komplexität abschätzbar. Dieses Buch fasst das heutige Wissen über die Auswirkungen auf Pflanzen, Tiere und Menschen in leicht verständlicher Form zusammen. Ein Beispiel für das Ausmaß potenzieller Effekte ist die hohe Zahl von mehr als 50.000 zusätzlichen Sterbefällen während der Hitzewellen im Sommer 2003 in Europa. Seit mehreren Jahren ist eine Ausbreitung von Krankheitsüberträgern wie Zecken zu beobachten und die durch diese übertragenen Krankheiten (Frühsommer-Meningoenzephalitis und Lyme-Borelliose) nehmen entsprechend zu. In vielen Ländern nehmen Allergien zu. In Deutschland sind ca. 20–30% der Bevölkerung betroffen. Weltweit nimmt die Fläche der Malaria-Risikogebiete zu. Der Klimawandel wird die regionale Verteilung und Häufigkeit von Pflanzen und Tieren ändern. Arten an der oberen Temperaturgrenze ihrer Verbreitungsgebiete werden am meisten leiden. In Europa gilt dies für die Fichte, für die es an vielen Standorten in Mitteleuropa schon jetzt zu warm ist.

José L. Lozán • Hartmut Kausch

Angewandte Statistik für Naturwissenschaftler

(2007) 304 S. mit 55 Abb. • 43 Tab.• 130 Beispielen Broschiert • 34,-EUR • ISBN 978-3-9809668-3-2

Bestellung:
Büro: »Wissenschaftliche Auswertungen«
Basselweg 5 • D-22527 Hamburg • Deutschland
Tel. (+49) (0)40-4304038
Tel. (+49) (0)40-33424614
Fax (+49) (0)40-54765097
Mobil: 0176-49261792
JLLozan@t-online.de
www.lozan.de

Wissenschaftler informieren direkt

Mit freundlicher Unterstützung von:

CSC Climate Service Center Germany
Eine Einrichtung des Helmholtz-Zentrums Geesthacht

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

KlimaCampus

ZMK
Freunde und Förderer des Zentrums für Meeres- und Klimaforschung e.V.

Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland
BUND
FREUNDE DER ERDE

Max-Planck-Institut für Meteorologie

DEEPWAVE e.V.
Die Meeresschutzorganisation

Helmholtz-Zentrum Geesthacht
Zentrum für Material- und Küstenforschung

Universität Hamburg - Biologie

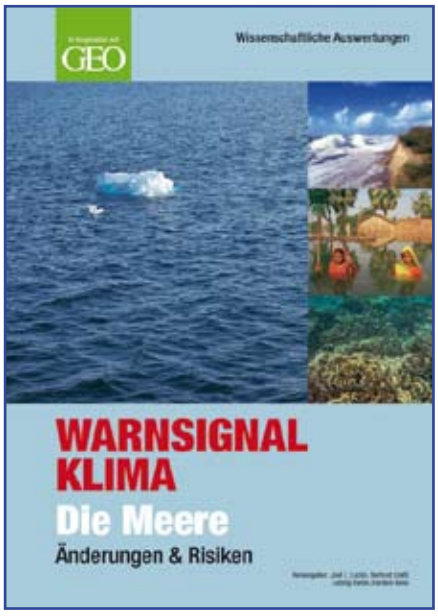
DGM
Deutsche Gesellschaft für Meeresforschung

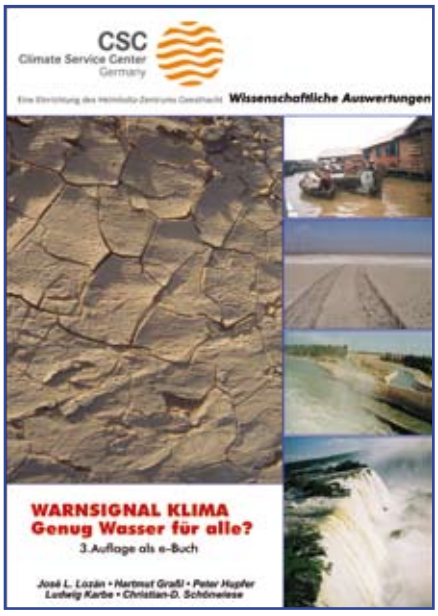
BEATRICE NOLTE STIFTUNG
FÜR NATUR- UND UMWELTSCHUTZ

www.mundumaris.org
Mundus maris
Wissenschaften und Künste für Nachhaltigkeit

UH Universität Hamburg

Buchreihe WARNSIGNALE





Vollständig überarbeitete Neuauflage zum Downloaden unter www.climate-service-center.de/warnsignale