

Katastrophismus – Aktualismus und die Entwicklung von Klima und Lebensräumen der Erde

Kontinuität und Wandel in der Klimageschichte der Erde, abgeleitet aus marinen Sedimenten

(vorgetragen in der Plenarsitzung am 9. Mai 2008)

GEROLD WEFER

Einleitung

Das Klima früherer Zeiten wird studiert, um die Prozesse, die das Klima der Erde beeinflussen, besser verstehen zu können und so Hinweise auf zukünftige Klimaentwicklungen zu erhalten. Durch die Analyse von Sedimenten und Gesteinen ist es möglich, Klimazustände zu erforschen, die völlig anders als die heutigen sind, die aber in der fernen Zukunft auftreten könnten. Mit den Dokumenten über das frühere Klima können wir ferner die Qualität und Aussagekraft von Klimamodellen testen; dies ist nur im Vergleich mit früheren Klimazuständen möglich.

Im globalen Klimageschehen spielt der Ozean eine große Rolle. Er bestimmt die Umverteilung von Wärme und die Aufnahme und Abgabe von Treibhausgasen der Atmosphäre, z. B. Wasserdampf, Kohlendioxid und Methan. Das Bild der Meeresströmung in den Ozeanbecken wird durch riesige Wirbel geprägt, die sich auf der Nordhalbkugel im Uhrzeigersinn und auf der Südhalbkugel gegen den Uhrzeigersinn drehen. Angetrieben werden diese Wasserbewegungen hauptsächlich durch die Passatwinde. Unter einer dünnen, warmen und stabilisierenden Wasserschicht befinden sich mehrere (Meeres-)Stockwerke (Abbildung 1). Besondere Bedeutung für die globale



Gerold Wefer, Professor für Allgemeine Geologie am MARUM-Zentrum für Marine Umweltwissenschaften der Universität Bremen, O. Mitglied der Göttinger Akademie seit 2008

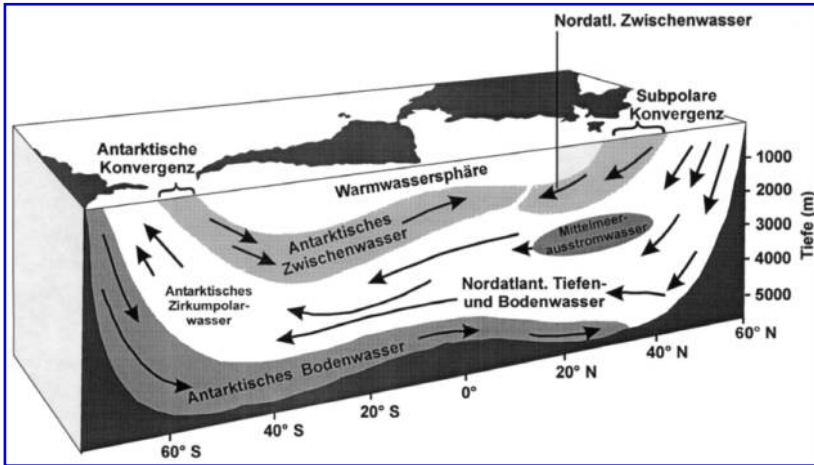


Abbildung 1: Struktur der Wasserkörper im Atlantischen Ozean

Zirkulation hat das unterste Stockwerk. Es enthält Tiefen- und Bodenwasser und entsteht in wenigen bestimmten Regionen, so in der Grönländisch-Norwegischen See und im Antarktischen Weddellmeer. Das kühle und salzhaltige Oberflächenwasser ist so schwer, dass es durch alle Meeresstockwerke zum Boden absinken kann. Im Weddellmeer wird ein großer Teil des antarktischen Bodenwassers gebildet, das sich in alle drei Ozeane ausbreitet. Im Norden ist das in der Grönländisch-Norwegischen See gebildete Tiefenwasser für die Belüftung des Atlantischen Ozeans zuständig.

Als Global Conveyor Belt (Fließbandzirkulation) wird das Zusammenspiel zwischen Oberflächenströmung und vertikaler Wasserschichtung bezeichnet. Angetrieben wird die Fließbandzirkulation durch die Bildung von Tiefenwasser im nördlichen Atlantik und im Weddellmeer. Ihre Wirkung reicht weit über den Atlantik hinaus. Zusätzlich zur Sonnenstrahlung wird die Erdoberfläche durch die Treibhausgase aufgeheizt, wodurch die Erde erst lebensfreundlich wird. Die durchschnittliche Temperatur an der Oberfläche der Erde läge ohne die Treibhausgase in der Atmosphäre heute um ungefähr 30°C niedriger. Diesen natürlichen Treibhauseffekt verstärkt der Mensch seit etwa 100 Jahren durch die Abgabe von Treibhausgasen, insbesondere CO₂ und Methan, an die Atmosphäre. Bei der Regulierung der Treibhausgase spielt der Ozean eine große Rolle, da er einen wesentlichen Teil der zusätzlichen Treibhausgase aufnimmt.

Dokumentation des Klimas

Das Klima der Vorzeit ist in Sedimenten der Ozeane, der Seen, der Gesteine, aber auch in Baumringen und im Eis der Polkappen gespeichert. Aus den Sedimenten können Mikropaläontologen anhand der Schalen von Mikroorganismen das frühere Klima rekonstruieren (Abbildung 2). Bestimmte Arten bevorzugen Temperatur- und Produktionsbedingungen im Oberflächenwasser. Nach dem Absterben der Organismen lagern sich die Schalen am Boden ab und werden in das Sediment integriert. Zu diesen Mikrofossilien gehören Foraminiferen, Radiolarien, Coccolithophoriden und Diatomeen. Neben der Artenzusammensetzung werden auch chemische Gehalte und isotopische Zusammensetzungen des Schalenmaterials genutzt. Bei der Rekonstruktion des Klimas werden unterschiedliche Methoden angewendet, die ihren Ursprung in der Chemie, der Physik und der Biologie haben. Moderne statistische Methoden kommen zur Anwendung bei der Interpretation der umfangreichen und komplexen Datensätze. Die Modellierung nimmt einen immer größeren Raum bei der Erforschung des Klimas der Vorzeit ein. Eine enge Zusammenarbeit zwischen Datenproduzenten und Modellierern ist deshalb Voraussetzung für Erfolge in der Klimaforschung.

Die früheren Umweltbedingungen sind in den Schalen planktonischer Organismen gespeichert, z. B. dokumentiert das ^{16}O - zu ^{18}O -Verhältnis in den Kalkschalen frühere Temperaturbedingen und die Menge an Wasser, die im Eis der Polkappen während früherer Zeiten abgelagert war. Wie in den Sedimenten, so variieren auch die Sauerstoffisotope im Eis aufgrund

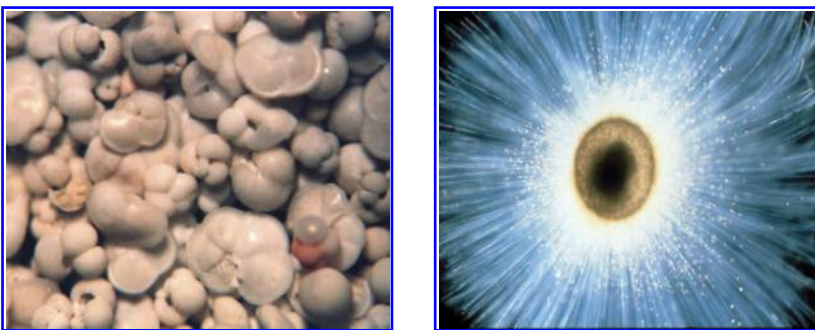


Abbildung 2: Fossilien zur Rekonstruktion früherer Klimabedingungen. Gehäuse planktonischer Foraminiferen aus einer Sedimentprobe der Tiefsee (links). Lebende Foraminifere aus dem Oberflächenwasser (rechts). Fotos: B. Donner (MARUM) und J. Bijma (AWI).

der unterschiedlichen Eisbedeckung der Erde mit der Zeit. Die hohen Ablagerungsraten des Eises liefern eine gute zeitliche Auflösung und damit wertvolle Hinweise über die Geschwindigkeit der Klimaänderungen.

In diesem Aufsatz wird zuerst kurz auf die Klimaentwicklung im Tertiär eingegangen, anschließend werden die gravierenden Klimaänderungen in den letzten 2 Millionen Jahren behandelt, und es wird zudem der Zusammenhang zwischen Klima und Treibhausgasen beschrieben.

Kreide-Tertiär-Grenze

Im Gegensatz zur Kreidezeit, die durch ein warmes Weltmeer charakterisiert war, das sich über den gesamten tropischen Bereich erstreckte, war das Tertiär durch einen generellen Abkühlungstrend geprägt. Es begann vor 65 Millionen Jahren mit einem großen Meteoriteneinschlag. Die Kreide/Tertiär-Grenze ist weltweit in vielen Bohrungen dokumentiert. Gravierende Wechsel in der Artzusammensetzung, insbesondere des Planktons der Ozeane, fanden statt. Die Ursache war die Kollision eines Meteoriten mit einem Durchmesser von etwa 10 km mit der Erde, der im Gebiet der heutigen Yucatán-Halbinsel in Mexiko (Chicxuluk-Krater) eingeschlagen ist. Dokumentiert wird der Einschlag durch erhöhte Iridiumgehalte, die auf extraterrestrisches Material hindeuten, und durch Hochdruckmodifikationen des Quarzes (Abbildung 3).

Das Klima im Tertiär war durch eine generelle Abkühlung gekennzeichnet, die nicht kontinuierlich, sondern in Schüben stattfand. Dokumentiert wird der Klimaverlauf in den Sauerstoffisotopenwerten benthischer Foraminiferen (Abbildung 4). Bis ca. 50 Millionen Jahre vor heute, im Paläozän und im älteren Eozän, waren die Temperaturen ähnlich hoch wie in der Kreide. Danach setzte eine kontinuierliche Abkühlung ein, die zu einer Vereisung des antarktischen Kontinents führte. Es gab jedoch auch wärmere Perioden, z. B. im jungen Oligozän oder im Miozän.

Vereisungszyklen im Quartär

Die letzten 2 Millionen Jahre sind durch den Auf- und den Abbau von riesigen Eismassen in polnahen Gebieten und damit durch große Meeresspiegelschwankungen geprägt. Heute ist der Meeresspiegel so hoch wie nie in den letzten 2 Millionen Jahren. Er ist etwa 120 m höher als während des Glazialen Maximums vor ca. 20.000 Jahren. Wir befinden uns heute in einer außergewöhnlichen Zeit: in der Warmphase eines Eiszeitalters. Wenn die Eismassen auf der Antarktis und auf Grönland auch noch abschmelzen,



Abbildung 3: Dokumentation des Meteoriteneinschlags an der Kreide-/Tertiär-Grenze vor 65 Millionen Jahren. Die grüne Lage zeigt die Auswurfmassen, die aus aufgeschmolzenem Material und Staub mit hohen Iridiumgehalten besteht. Die Bohrlokation liegt etwa 1000 km vom Chicxulub-Krater auf der Halbinsel Yucatán in Mexico entfernt. Der Bohrkern stammt aus dem Bohrkernlager des Integrated Ocean Drilling Program, MARUM, Universität Bremen.

würde der Meeresspiegel um weitere 70 m ansteigen. Die Vereisung der Nordhalbkugel hat gewaltige Klimazyklen ausgelöst, die von regelmäßigen Schwankungen in der Neigung der Erdachse und von Veränderungen in der Beziehung zwischen Jahreszeiten und Exzentrizität der Erdumlaufbahn um die Sonne angetrieben wurden.

Die letzten 2 Millionen Jahre kann man in eine frühe und eine späte Phase aufteilen (Abbildung 5). Im frühen Quartär schwankte das Klima über zwanzigmal zwischen einer mehr oder weniger großen Eiszeit und einer Zwischeneiszeit. Die Zyklen dauerten jeweils etwa 40.000 Jahre. Vor etwa 0,9 Millionen Jahren fand ein Umschwung statt, und die Zyklusdauer erhöhte sich auf etwa 100.000 Jahre, so dass im späten Quartär nur etwa 10 große Vereisungen nachzuweisen sind. Diese Änderungen sind in den Sauerstoffisotopenverhältnissen planktischer Foraminiferen belegt, wobei ein sägezahnähnliches Muster entsteht, da der Aufbau von Eiskappen wesentlich länger dauert als der Abbau (Abbildung 5).

Der Eisaufbau dauert jeweils rund 80.000 Jahre. Bis das Eis wieder geschmolzen ist, vergehen dagegen im Schnitt nur 20.000 Jahre. Überla-

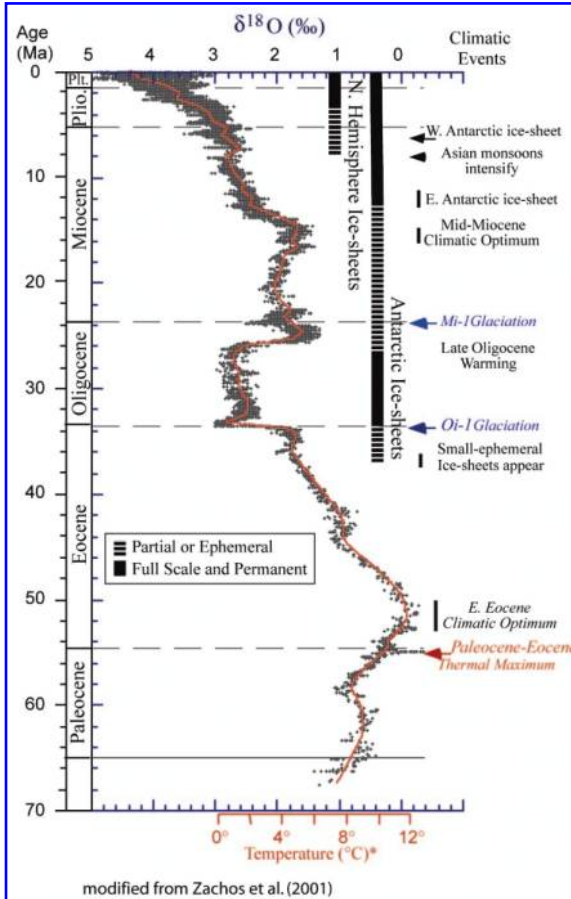


Abbildung 4: Abkühlung im Tertiär, dokumentiert in den Sauerstoffisotopen-Verhältnissen benthischer Foraminiferen (Zachos et al., 2001). Bereits etwa an der Grenze Eozän/Oligozän vereisten die Antarktis und vor ca. 2 Millionen Jahren Grönland und während Kaltzeiten Skandinavien und Nordamerika.

gert wird der generelle Klimaverlauf durch kurzfristige Erwärmungs- und Abkühlungsereignisse, die etwa alle 7.000 Jahre auftreten und als Dansgaard-Oeschger-Zyklen bezeichnet werden. Sie zeigen beträchtliche Schwankungen in den Verhältnissen der Sauerstoffisotope im Eis. Auch in Tiefseesedimenten des Nordatlantiks sind diese Klimavariationen in Lagen von Gletschern dokumentiert, die reich an Gesteinsmehl und Grus sind. Diese Lagen, sogenannte Heinrich-Lagen, passen zeitlich genau auf die Dansgaard-

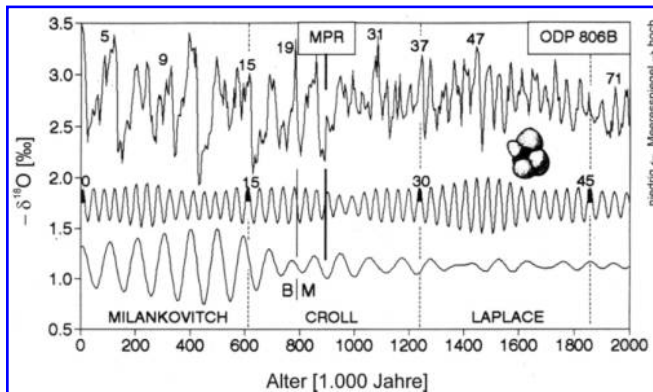


Abbildung 5: Klimaentwicklung im Quartär, gezeigt in Sauerstoffisotopenwerten einer im Oberflächenwasser lebenden planktischen Foraminifere. Die Daten stammen von einem Bohrkern aus dem östlichen Pazifik, Ontong Java Plateau. Oben: gemessene $\delta^{18}\text{O}$ -Werte, versetzt um 1,5 ‰. Die Nummern bezeichnen Isotopenstadien. Mit statistischen Verfahren wurden die dominierenden 100.000- und 41.000-Jahre-Zyklen ermittelt. Mitte: Erdschiefe-Komponente (41.000 Jahre). Unten: Exzentrizitäts-Komponente (100.000 Jahre). B/M: Brunhes/Matuyama-Grenze (bei 790.000 Jahren), MPR: Mid Pleistocene Revolution (Klimaänderung bei 900.000 Jahren) (aus Berger und Wefer, 1992).

Oeschger-Zyklen. Sie entstehen während Perioden, in denen sich viele Eisberge vom Inlandeis gelöst haben.

Treibhausgase und Klima

Durch die Untersuchung von eingeschlossener Luft im Eis der polaren Eiskappen ist belegt, dass ein enger Zusammenhang zwischen Treibhausgasen und dem Klima besteht. Die CO_2 - und die Methanvariationen laufen etwa parallel zu den Schwankungen der Temperatur und des Meeresspiegels. Die Warmzeiten haben hohe CO_2 -Gehalte (etwa 280 ppm) und Kaltzeiten relativ niedrige (ca. 180 ppm). Die Kurven in Abbildung 6 zeigen, dass die Erde in den letzten etwa 800.000 Jahren den CO_2 -Gehalt immer zwischen 180 und 280 ppm gehalten hat. Die Unterschiede zwischen den Warm- und den Vereisungszeiten waren nur 100 ppm, und um etwa diesen Wert hat der Mensch den CO_2 -Gehalt der Atmosphäre im letzten Jahrhundert erhöht. Er liegt heute etwa bei 385 ppm. Die Frage, warum der CO_2 -Gehalt mit dem Klima parallel verläuft, ist noch nicht endgültig beantwortet. Man nimmt an, dass CO_2 -Gehalt und Klima in einem komplizierten System von Rückkopplungen eng zusammenhängen.

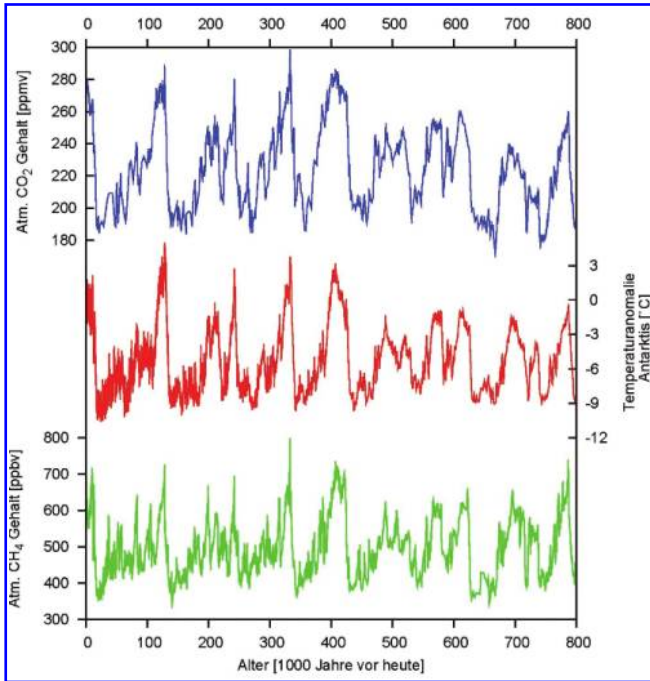


Abbildung 6: Temperatur, CO₂- und Methan-Gehalte während der letzten ca. 800.000 Jahre, rekonstruiert aus dem Eis der Antarktis anhand von CO₂- und Methan-Messungen an eingeschlossenen Luftbläschen und Isotopenmessungen.

Direkte Klimaaufzeichnungen gibt es erst seit etwa 150 Jahren (Abbildung 7). Für davorliegende Zeiten sind wir auf Klimarekonstruktionen angewiesen. Als Ausläufer der sogenannten Kleinen Eiszeit waren die Temperaturen bis Anfang des 20. Jahrhunderts kälter als zwischen ca. 1940 und 1975. Danach steigen die Temperaturen kontinuierlich an, und dieser Anstieg wird aufgrund von Modellergebnissen auf den menschlichen Einfluss zurückgeführt, weil er nicht mehr mit der natürlichen Klimavariabilität erklärt werden kann.

Die Klimageschichte liefert eine Fülle von Situationen und Ereignissen, die gänzlich anders als unser heutiges System sein können. Sie zeigen aber auch, dass sich zumindest in den letzten Millionen Jahren die Änderungen in einem festen Rahmen abspielten und gewisse Grenzen nicht überschritten wurden. Diese regelmäßig wiederkehrenden Klimazustände waren durch bestimmte Ereignisse gekennzeichnet, z. B. war der Eisaufbau stets mit einer Abnahme der Spurengase in der Atmosphäre verbunden,

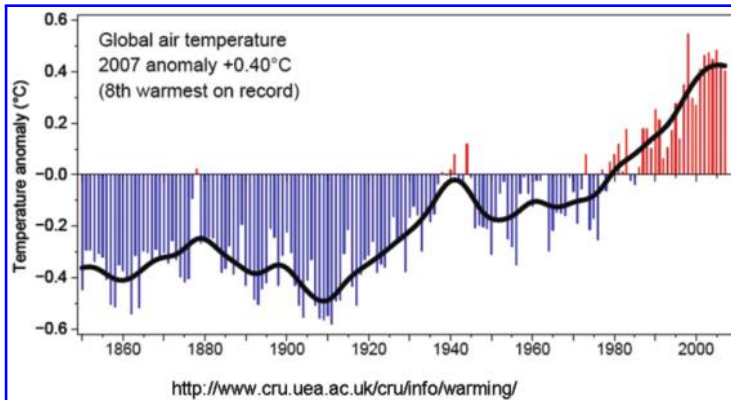


Abbildung 7: Verlauf der Lufttemperaturen auf der Erde zwischen 1860 und 2000. In diesen 140 Jahren nahmen die Temperaturen global um ca. 0,6 $0,2^{\circ}\text{C}$ zu (IPCC 2007).

zumindest in den letzten 800.000 Jahren (Abbildung 6). Seit einigen Jahrzehnten haben wir jedoch den natürlichen Rahmen verlassen. Der Spurengasgehalt ist deutlich erhöht. Wir befinden uns in einem System, für das es kein geschichtliches Beispiel gibt. Wichtig ist auch, zu wissen, wie schnell das Klima auf Störungen reagiert und ob das Klima auf positive oder negative Rückwirkungen reagiert. Eine positive Rückkopplung findet zurzeit in der Arktis beim Rückgang der Eisbedeckung statt. Bei kleinerer Eisfläche wird weniger Sonnenenergie zurückgestrahlt; das Wasser erwärmt sich und führt zu einer verstärkten Abschmelzung des Meereises. Dadurch werden die mit Wasser bedeckten Gebiete vergrößert, was wiederum zu einer erhöhten Energieaufnahme führt.

Trotz vieler Unsicherheiten beschert uns die Klimaforschung durch Klimabeobachtungen und Experimenten mit verbesserten Computermodellen ein immer besseres Verständnis der Klimazusammenhänge. Gelernt haben wir, dass

- es zur heutigen Zeit keine Anlogsituation in der Vergangenheit gibt. Dies macht eine Vorhersage außerordentlich schwierig.
- die vom Menschen verursachte Erwärmung auch verstärkt Treibhausgas aus natürlichen Quellen freisetzt. Dies ist ein zusätzliches Argument für eine Reduzierung des Ausstoßes an Treibhausgasen.
- die Erwärmung regional unterschiedlich auftritt, ebenso die Niederschläge. Es ist bisher nicht bekannt, ob sich die Pflanzen den veränderten Bedingungen anpassen können.

- die Fruchtbarkeit im Ozean generell zurückgehen wird. Davon sind insbesondere Länder betroffen, die auf Fischfang angewiesen sind.

Diese Einsichten stammen aus der Erforschung von marinen Sedimenten, Eiskernen und Seesedimenten. Mit vielfältigen Methoden und in unterschiedlicher zeitlicher Auflösung lassen sich Umweltänderungen rekonstruieren. Temperaturen lassen sich mit relativ hoher Genauigkeit ermitteln, in Annäherung auch die Fruchtbarkeit des Ozeans oder Niederschläge. Die Informationen zur Rekonstruktion der Umwelt finden sich in den Resten von Organismen früherer Zeiten.

Literatur

- Berger, W. H. und G. Wefer, 1992. Klimageschichte aus Tiefseesedimenten – Neues vom Ontong-Java-Plateau (Westpazifik). *Die Naturwissenschaften*, 79: 541–550.
- Fischer, G. and G. Wefer, 1999. *Use of Proxies in Paleoceanography: Examples from the South Atlantic*. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 735 pp.
- IPCC 2007 – Intergovernmental Panel on Climate Change. *Assessment Report*.
- Zachos, J., M. Pagani, L. Sloan, K. Billups, and E. Thomas, 2001. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science*, 292: 686–693.