

G. LOHMANN

Meteorologische Interpretation geologischer Daten – Neue Wege in der Paläoklimaforschung

1 Einleitung

Geologie ist die Wissenschaft von der Entstehung, der Geschichte und dem Aufbau der Erde sowie den Prozessen, die sie formten und auch heute noch formen (WIKIPEDIA ENZYKLOPÄDIE 2002). Den Begriff Geologia findet man bereits 1473 bei Richard de Bury, dort jedoch als Abgrenzung gegenüber der Theologie. Die Bezeichnung Geologie im heutigen Sinn wurde zuerst von Jean-André de Luc (1727-1817) im Jahr 1778 verwendet und von Horace-Bénédict de Saussure (1740-1799) im Jahr 1779 als feststehender Begriff eingeführt.

Heute sieht man die Geologie in das übergeordnete Fachgebiet der Geowissenschaften eingeordnet, das alle wissenschaftlichen Disziplinen umfasst, die sich mit der Entstehung und der Veränderung der Erde einschließlich ihrer atmosphärischen Hülle befassen. Ansätze geowissenschaftlicher Beobachtungen gehen auf Naturphilosophen in der Antike um etwa 600 v. Chr.

zurück (Thales von Milet, Anaximander). Der griechische Philosoph Xenophanes (etwa 570 bis etwa 480 v. Chr.) deutete Fossilien von Meerestieren als Zeugen früherer Überschwemmungen des Landes. Um aus der heutigen Situation Rückschlüsse auf die Vergangenheit ziehen zu können, bedienen sich die Geologen des Prinzips des Aktualismus, das durch Karl von Hoff (1771-1837) und Charles Lyell (1797-1875) formuliert wurde. Als Grundlage gilt die Annahme, dass Kräfte und Erscheinungen der geologischen Vorzeit mit den heute zu beobachtenden gleichartig sind, so dass unmittelbare Rückschlüsse vom beobachtbaren Erscheinungsbild auf frühere Bildungsvorgänge möglich werden. Oder anders gesagt: Der Schlüssel zur Vergangenheit ist die Gegenwart. Dieser Beitrag legt dar, wie dieses Prinzip auf neuartige geologische Zeitreihen angewendet werden kann, die eine genaue zeitliche Datierung und eine hohe zeitliche Auflösung haben. Archive für rezente und vergangene Klimavariationen werden u. a. von Sedimenten in Seen und am Meeresboden, von Eiskernen, Baumringen und Korallen gelie-

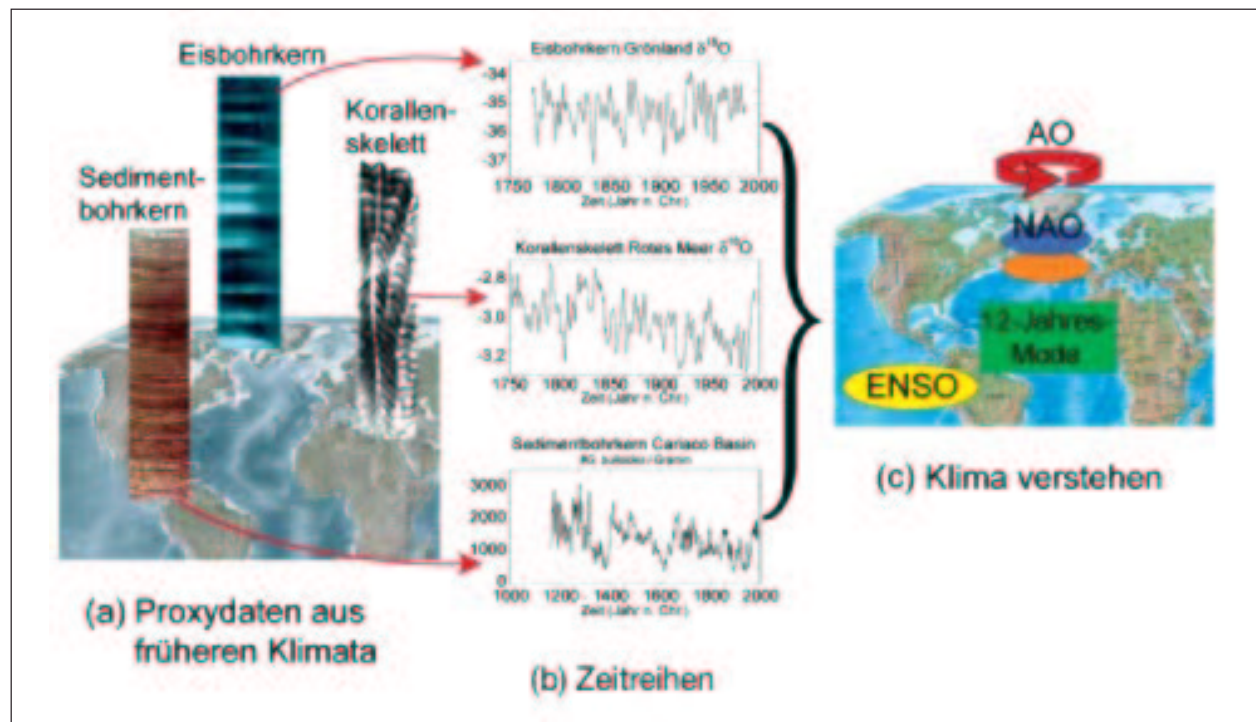


Abb. 1: (a) Schema zur Interpretation von geologischen Daten mit jahresgenauer zeitlicher Datierung am Beispiel von Eiskernen (WHITE et al. 1997), Meeressedimenten (BLACK et al. 1999) und einer Korallenchronologie (FELIS et al. 2000) (b). Um hochfrequentes Rauschen in den Daten zu unterdrücken, wurde ein 3-Jahres Filter angewendet. In (c) sind einige bekannte Klimamodern schematisch dargestellt: AO (Arktische Oszillation), NAO (Nordatlantische Oszillation), quasi-dekadische Schwingung im Atlantik, ENSO (El Niño-Southern Oszillation).

fert. Durch Abzählen von Jahreslagen sind die Informationen zum Teil jahrgenau bestimmbar. Den Schlüssel zum Verständnis der zugrunde liegenden Mechanismen liefert dabei die statistische Datenanalyse. Hierbei werden assoziierte Muster der atmosphärischen Zirkulation, der Meeresoberflächentemperatur und des Niederschlags mit Hilfe von meteorologischen und historischen Daten bestimmt.

Die Analyse dieser langen Datenreihen, wie sie z. B. aus der Geologie stammen, geht jedoch über das Interesse an der Rekonstruktion vergangener Klimata hinaus. Angesichts der Unsicherheit der künftigen Klimaentwicklung ist die Frage nach langfristigen Trends und Klimaschwankungen von extremer Wichtigkeit. Die Paläoklimatologie liefert dabei eine ausgezeichnete Möglichkeit, Klimainformationen der instrumentellen Periode (seit etwa 1840) in einen langfristigen Kontext zu stellen. Rekonstruierte Klimainformationen beruhen dabei auf so genannten Stellvertreterdaten (Proxydaten), die in verschiedenen Komponenten des Klimasystems archiviert sind und die in der Regel physikalische Größen nur indirekt widerspiegeln. Die in den Archiven aufgezeichneten Variationen gilt es zu verstehen und zu interpretieren, sei es durch Modelle oder durch statistische Analysen und durchzuführende Vergleiche mit bekannten Klimaphänomenen (s. Abb. 1).

2 Analyse einer Koralle aus dem Roten Meer

Als erstes Beispiel für ein Paläoklimaarchiv soll hier eine Korallenchronologie betrachtet werden, die die Periode 1750-1995 umfasst (FELIS et al. 2000). Korallenriffe sind temperaturlimitiert und nur in Regionen des Oberflächenozeans zu finden, in denen die Jahresmitteltemperatur ihres Lebensraumes nicht unter 24 °C beträgt und die mittlere Wintertemperatur nicht unter 18 °C

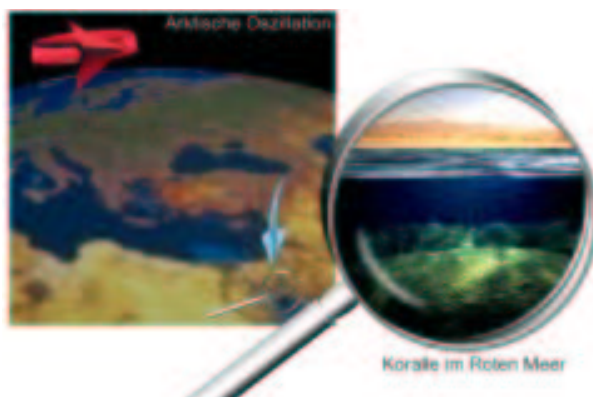


Abb. 2: Lokation und Bild der Koralle im Roten Meer. Die schematischen Pfeile deuten Windrichtungen in 10 km Höhe (rot) und oberflächennah (blau) an und sind im Text erläutert.

absinkt. Deshalb befinden sich die meisten Korallenriffe in den Tropen (COLE et al. 1993, CHARLES et al. 1997, URBAN et al. 2000). Zu den wenigen subtropischen Regionen, in denen Korallenriffe vorkommen, gehört das Rote Meer. Als ein Beispiel für die Methode, die Variationen der so genannten Proxydaten verständlich macht, wird eine Zeitreihe von Sauerstoffisotopen aus Korallendaten im nördlichen Roten Meer betrachtet, siehe dazu Abb. 2.

Die von FELIS et al. (2000) untersuchte massive Koralle ist etwa 2,50 m groß, und die Wachstumsrate der noch lebenden Koralle beträgt etwa 1 cm pro Jahr. Das Sauerstoffisotopenverhältnis $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ wird in das Kalkskelett der Koralle während ihres Wachstums eingebaut. Dieses Verhältnis, im Folgenden als $\delta^{18}\text{O}$ beschrieben, wird im Wesentlichen durch die lokale Temperatur und das $\delta^{18}\text{O}$ des umgebenden Wassers bestimmt. Die zeitlichen Variationen von $\delta^{18}\text{O}$ im Korallenskelett sind daher direkt mit Variationen im Klima und der Ozeanzirkulation verbunden. Das Korallenskelett mit einer zugehörigen lokalen $\delta^{18}\text{O}$ -Kurve wird in Abb. 3 gezeigt. Sechs Proben pro Jahr sorgen dabei für einen zeitlich gut aufgelösten Jahresgang.

Für eine Interpretation der rekonstruierten Zeitreihe ist die Kenntnis der lokalen Strömungsverhältnisse im Ozean und in der Atmosphäre nötig. Der Ozean strömt im Roten Meer entgegen der vorherrschend nach Süden weisenden Windrichtung: Oberflächennahes Wasser wird nach Norden in die Region um die Sinai-Halbinsel transportiert, sinkt dort aufgrund hoher Wärmeflüsse und der daraus resultierenden Abkühlung und Dichteerhöhung ab und wird als Zwischen- oder Tiefenwasser nach Süden zurücktransportiert (CEMBER 1988). Obwohl die Strömungsverhältnisse im Roten Meer eine deutlich andere Struktur und Skala als im Atlantik aufweisen, hat die Umwälzbewegung im

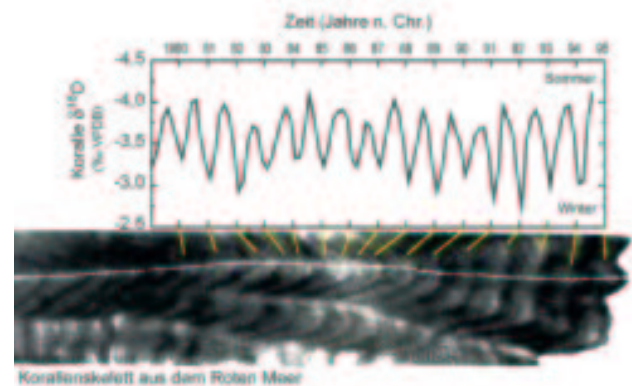


Abb. 3: Röntgenaufnahme eines Teils der massiven Koralle aus dem nördlichen Roten Meer (FELIS et al. 2000). Massive Korallen produzieren jährliche Dichtebänder in ihrem Karbonatskelett. Das Skelett beinhaltet isotopische und geochemische Signale, die für die Rekonstruktion von Meeresoberflächentemperaturen und dem hydrologischen Zyklus genutzt werden können.

Roten Meer Ähnlichkeiten mit der Umwälzbewegung im Atlantischen Ozean, die als ozeanisches Förderband bezeichnet wird (BROECKER 1991, BRÜNING und LOHMANN 1999).

Die Tiefen- und Zwischenwasserbildung im nördlichen Roten Meer ist mit aus dem Norden kommenden winterlichen Kaltluftausbrüchen verbunden (ESHEL und NAIK 1997) und wird außerdem begünstigt, wenn das aus dem Süden heranströmende Wasser schon eine hohe Dichte aufweist (Präkonditionierung). Letzteres hängt eng mit der Verdunstungsrate über dem Roten Meer zusammen, die sensitiv von der Windrichtung, Temperatur und Feuchtigkeit der Luftmassen beeinflusst wird. Da die vertikale Schichtung im nördlichen Roten Meer sehr empfindlich auf Kaltluftausbrüche reagiert¹, können relativ kleine Änderungen der atmosphärischen Zirkulation einen erheblichen Effekt auf die Tiefen- und Zwischenwasserbildung (ESHEL und NAIK 1997) und somit auf die lokale Oberflächentemperatur des Meerwassers und damit auf das $\delta^{18}\text{O}$ Verhältnis der Koralle haben.

In der Tat kann die Korallenchronologie zur Rekonstruktion eines großskaligen Klimamodes, der Arktischen Oszillation (THOMPSON und WALLACE 1998, 2000) herangezogen werden. Dazu nimmt man die Januar/Februar- $\delta^{18}\text{O}$ Werte der Koralle eines jeden Jahres und eliminiert den Trend aus den Daten (vgl. Abb. 1b). Die resultierende Zeitreihe wird auf Standardabweichung 1 normiert (Abb. 4c). Zur statistischen Analyse wird diese Zeitreihe mit dem in den NCEP/NCAR Reanalysen (KALNAY et al. 1996) bereitgestellten bodennahen Luftdruck für die Periode 1948-

1995 korreliert. Für diese Größe werden ebenfalls die Januar/Februar-Werte verwendet und der lineare Trend abgezogen. Dieses Feld hat eine horizontale Auflösung von $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ (KALNAY et al. 1996). Die resultierende Korrelationskarte ist in Abb. 4a dargestellt, wobei alle Werte über bzw. unter $\pm 0,3$ auf dem Konfidenzintervall 95 % statistisch signifikant sind. Abb. 4b zeigt die entsprechende Korrelationskarte für den Index der Arktischen Oszillation (THOMPSON und WALLACE 1998, 2000). Die Ähnlichkeit der räumlichen Muster (Abb. 4a und b) sowie die ähnlichen zeitlichen Verläufe der Arktischen Oszillation und der $\delta^{18}\text{O}$ Werte der Koralle (Abb. 4c) legen den Schluss nahe, dass das Phänomen der Arktischen Oszillation in der Korallenzeitreihe aufgezeichnet wird. Es bleibt zu erwähnen, dass das Ergebnis bezüglich der verwendeten meteorologischen Datensätze robust ist (RIMBU et al. 2001, 2002).

Das Luftdruckmuster (Abb. 4a) vermittelt einen Einblick in die meteorologische Situation, die die $\delta^{18}\text{O}$ Variationen im Korallenskelett bestimmt: In einer positiven Phase der Arktischen Oszillation (verstärktes Islandtief und Azorenhoch) gibt es vermehrt Westwinde über Nord- und Mitteleuropa, die für relativ milde Winter sorgen. Über dem Roten Meer gibt es vermehrt kalte und trockene Bedingungen, hervorgerufen durch Advektion von aus Norden stammenden kontinentalen Luftmassen (schematisch angedeutet in Abb. 2). Das hat eine erhöhte Verdunstung und kalte Meeresoberflächentemperaturen im Roten Meer zur Folge, wodurch die Dichte des Meerwassers erhöht, das Absinken von Oberflächenwasser bewirkt und damit schließlich für relativ hohe $\delta^{18}\text{O}$ Werte der Koralle gesorgt wird (ESHEL et al. 2000, FELIS et al. 2000, RIMBU et al. 2001).

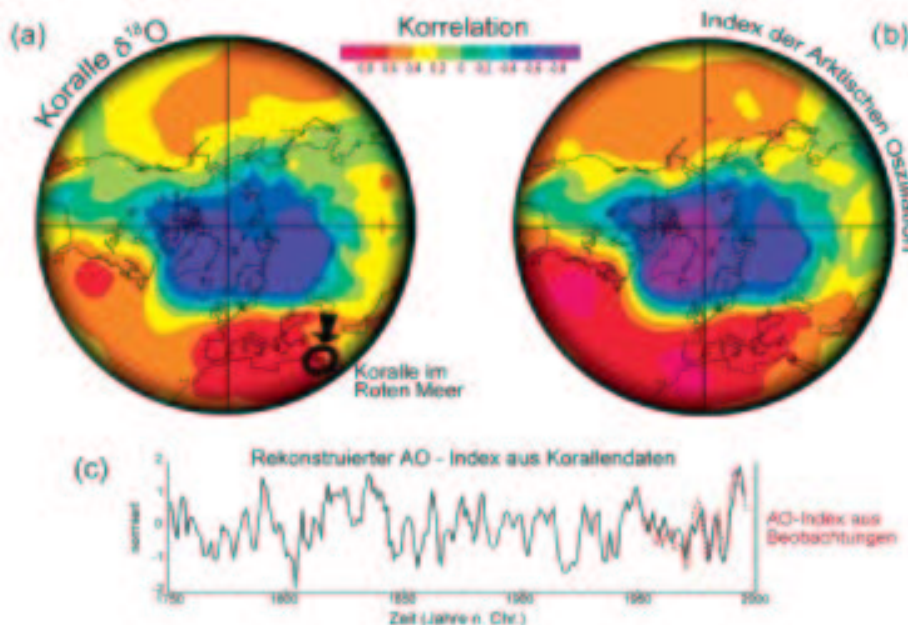


Abb. 4: Korrelationskarten der Januar-Februar $\delta^{18}\text{O}$ Werte der Koralle (a) und des Index der Arktischen Oszillation (b) mit dem Bodenluftdruck aus der NCEP/NCAR Reanalyse (KALNAY et al. 1996). Die zugehörigen Zeitreihen sind in (c) gezeigt. Für alle Analysen wurde ein 3-Jahre-Filter benutzt und der Trend aus den Daten eliminiert.

1 Der Ertrag der Apfelsinenernte in Israel wird ebenso von diesen Ereignissen beeinflusst.

3 Aufgezeichnete Klimamoden in Eiskernen und Meeressedimenten

Als weiteres Beispiel werden die Variationen in Eiskernen (WHITE et al. 1997) und Meeressedimenten (BLACK et al. 1999), die in Abb. 1b gezeigt wurden, untersucht. Eine Spektralanalyse der Zeitreihen zeigt eine dominante 12-jährige Schwingung. Für diese Zeitskala ist aus Beobachtungsdaten eine Klimaschwingung im Nordatlantik bekannt, die sich auf Wechselwirkungsprozesse zwischen atmosphärischer Zirkulation und Ozeanströmungen im Nordatlantik zurückführen lässt (DESER und BLACKMON 1993, DIMA et al. 2001). Es soll hier angedeutet werden, wie diese Klimavariation in den Proxydaten aufgespürt werden kann. Die Zeitreihe der stabilen Sauerstoffisotope ($\delta^{18}\text{O}$) ist aus einer Kombination von Daten mehrerer Eiskerne abgeleitet worden, die im Rahmen der Tiefbohrprojekte GRIP und GISP auf dem zentralen grönländischen Inlandeis gewonnen wurden (WHITE et al. 1997). Es wird angenommen, dass die Zeitreihe sowohl die Temperatur im nördlichen Nordatlantik als auch den Niederschlag über Grönland widerspiegelt.

Die andere Zeitreihe wurde aus einem Meeressediment im Cariaco Becken (11° N, 65° W, vor Venezuela) aus 395 Meter Tiefe gewonnen, indem die Anzahl der Individuen von *Globigerina bulloides*, einer planktischen Foraminifere, pro Gramm Sediment gezählt wurde. Das Altersmodell für diesen Kern basiert auf einer Kombination von gezählten Varven (Sedimentschichtungen) und ^{14}C -Altern, die durch Massenspektrometernanalysen gewonnen wurden. Die Variationen der Anzahl der Individuen von *Globigerina bulloides* werden mit Änderungen im Wassermassenauftrieb an dieser Lokation in Zusammenhang gebracht (BLACK et al. 1999).

Die Zeitreihen werden mittels der Singular Spectrum Analysis in einzelne Bestandteile zerlegt, siehe dazu: VAUTARD und GHIL (1989), VON STORCH und

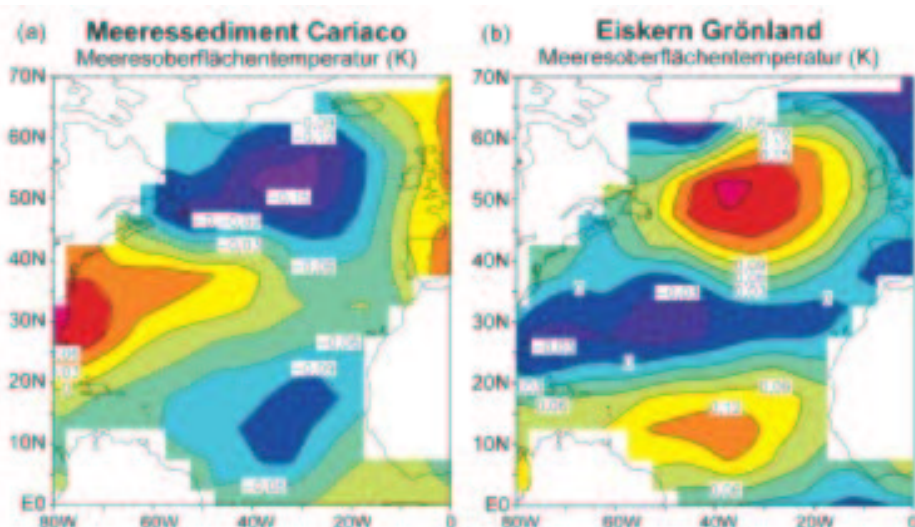
ZWIERS (1999). Dieses Verfahren ist im Wesentlichen eine Empirische Orthogonal-Funktionszerlegung in der Zeit (analog zur Fourieranalyse). Die zugehörige Amplitude der etwa 12-jährigen Schwingung wird benutzt, um das assoziierte Muster in den Meeresoberflächentemperaturen festzustellen. Für die Meeresoberflächentemperaturen wurde ein auf Beobachtungen basierter Datensatz (KAPLAN et al. 1998) verwendet, der auf die Periode 1856 bis 2000 n. Chr. erweitert wurde (siehe in LOHMANN et al. 2002, RIMBU et al. 2003). Abb. 5 zeigt eine typische Temperaturvariation (Composite map) für diese quasi-dekadische Klimaschwingung.

Ein möglicher Mechanismus für diese Schwingung wird in DESER und BLACKMON (1993) und DIMA et al. (2001) beschrieben: Eine anfänglich positive Meeresoberflächentemperaturanomalie in den Tropen beeinflusst die Intensität der Konvektion in der Intertropischen Konvergenzzone und der Hadley-Zirkulation. Dadurch kann das Signal in mittlere Breiten gelangen. Die induzierten atmosphärischen Bedingungen sorgen für eine negative Meeresoberflächentemperaturanomalie in der Golfstromregion. Diese negative Anomalie wird mit einer Zeitverzögerung von 5-7 Jahren in tropische Regionen des Nordatlantiks mit dem ozeanischen Strömungssystem transportiert und vermittelt den negativen Rückkopplungsmechanismus, der für die quasi-dekadische Schwingung notwendig ist. Die wesentliche Idee dieses Mechanismus für dekadische oder längerfristige Fluktuationen geht bereits auf BJERKNES (1964) zurück, der Änderungen in der Stärke und Position des subtropischen Hochs als Ursache für Variationen im ozeanischen Subtropenwirbel ansah.

Weitere Analysen zeigen, dass auch andere Klimaschwingungen im Nordatlantik in den Eiskernen (WHITE et al. 1997) und Meeressedimenten (BLACK et al. 1999) detektiert werden können, worauf hier aber nicht näher eingegangen werden soll. Man kann sich die Frage stellen, welche Archive für eine Rekonstruk-

Abb. 5:

Analyse des 12-jährigen Klimamodes im Nordatlantik anhand der Zeitreihen aus Eiskernen (WHITE et al. 1997) und Meeressedimenten (BLACK et al. 1999), welche in Abb. 1 dargestellt sind. Gezeigt ist die „Composite map“ in Kelvin als Indikator für eine typische Temperaturanomalie auf quasi-dekadischer Zeitskala. Mit Ausnahme des Vorzeichens, welches durch die Art der Proxydaten bestimmt wird ($\delta^{18}\text{O}$ bzw. Anzahl einer Foraminiferenart pro Gramm Sediment), stimmen die Muster sehr gut überein.



tion von Klimazuständen und -schwingungen geeignet sind. Geeignete Archive sind in der Regel diejenigen, die eine sensitive Antwort auf Änderungen der Temperatur oder anderer meteorologischer Größen liefern. So kann man Klimaübergänge wie in den 1970er Jahren in vielen Proxydaten finden (RIMBU et al. 2003) und somit Klimaumschwünge in einen längerfristigen Kontext einordnen. Aus Periodizitäten kann sogar auf eine gewisse Vorhersagbarkeit geschlossen werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Aufgrund des physikalischen Verständnisses der großskaligen Prozesse nimmt die statistische Analyse von Proxydaten einen zentralen Platz in der Paläoklimaforschung ein. Die Rekonstruktion von Klimamoden geschieht dabei über das sogenannte „Upscaling“-Verfahren, in dem Feldkorrelationen und typische Zirkulationsmuster mit Hilfe von Modell- oder historischen Daten identifiziert werden (siehe z. B. APPENZELLER et al. 1998, RIMBU et al. 2001, RIMBU et al. 2002). Die grundlegende Idee ist, dass man die analogen Situationen in instrumentellen Aufzeichnungen feststellt. Damit können die großskaligen Prozesse, welche die zeitlichen Variationen in den Proxydaten der Klimaarchive bestimmen, herausgefunden werden. Im Idealfall liefert dieses Verfahren eine Rekonstruktion von Klimamoden und ordnet die instrumentellen Daten der letzten 50-150 Jahre in einen langfristigen Kontext ein.

Dieses Verfahren kann auf geologische Zeitspannen, in denen die klimatischen und geografischen Bedingungen ähnlich den heutigen sind, angewendet werden. So kann man annehmen, dass die Klimamoden und deren räumliche Muster für die letzten 7000 Jahre und z. B. in der letzten Warmzeit (Eem, etwa 130.000 bis 120.000 Jahre vor heute) mit den heutigen Bedingungen vergleichbar sind. Die Korrelationen für andere geologische Zeiten, in denen die Land-See-Verteilung oder die Verteilung der großen Eisschilde anders als heute gewesen sind, können nicht aus der Gegenwart erschlossen werden. Einen Zugang zur Interpretation geologischer Daten können wahrscheinlich nur numerische Modelle mit entsprechend spezifizierten Randbedingungen liefern.

Die Rekonstruktion von Klimamoden ist auch zur Nachweisbarkeit von Klimaänderungen nützlich. Die Arktische Oszillation (THOMPSON und WALLACE 1998) und ihr Verwandter, die Nordatlantische Oszillation (HURRELL 1995), sind bestimmende Faktoren für das Klima in Europa. Ein Teil der beobachteten Temperaturtrends der letzten Dekaden kann auf eine Verstärkung dieser Klimamoden zurückgeführt werden (HURRELL 1995, FYFE et al. 1999, THOMPSON und WALLACE 1998, 2000). Daher sind sowohl ein Verständnis der Physik dieser Klimaschwingungen (PERLWITZ und GRAF 1995, BALDWIN und

DUNKERTON 1999), als auch Rekonstruktion und statistische Interpretation (RIMBU et al. 2003, LOHMANN et al. 2002) dieses Phänomens von außerordentlicher Wichtigkeit. Neben der Korallenchronologie aus dem Roten Meer, wo Klimavariationen durch den kontinentalen Einfluss bestimmt werden, zeichnen Eiskerne (WHITE et al. 1997) und Meeressedimente (BLACK et al. 1999) interannuale bis interdekadische Klimavariationen auf. Diese Schwankungen maskieren den Trend im 20. Jahrhundert (SCHÖNWIESE und RAPP 1997). Da Proxydaten die vorindustrielle Periode umfassen, sind sie ein wichtiges Hilfsmittel zur Abschätzung der natürlichen Klimavariabilität.

Das Verfahren der hier vorgestellten Mustererkennung lässt sich in das allgemeine Prinzip wissenschaftlicher Entdeckungen einordnen (DERRY 2001). Derry bezeichnet die Suche nach Mustern als Schlüssel zu einer Entdeckung und erhebt sie zu einem wissenschaftlichen Prinzip, welches bereits von Henri POINCARÉ (1913) formuliert wurde:

„... nur zu beobachten reicht nicht aus. Wir müssen unsere Beobachtungen gebrauchen, und dazu müssen wir verallgemeinern. ... Ein Wissenschaftler muss Ordnung schaffen. Wissenschaft ist aus Fakten gebaut wie ein Haus aus Steinen. Aber eine Sammlung von Fakten ist ebenso wenig Wissenschaft wie ein Steinhäufen ein Haus ist.“

Ziel der Wissenschaft ist es daher, aus den zur Verfügung stehenden Daten, die durch Beobachtungen, Modellstudien und Rekonstruktionen gewonnen wurden, Zusammenhänge und Gesetzmäßigkeiten, die in der Natur vorkommen, zu erkennen. Solche charakteristischen Muster zu finden ist einer der Schlüsselprozesse wissenschaftlicher Entdeckung in der Paläoklimaforschung. Dies ist vergleichbar mit einem Puzzle, dessen Teile den richtigen Platz finden, sobald man das Bild erkannt hat, welches das Puzzle ergeben soll.

Danksagungen

Lisa Könnecke, Thomas Felis, Norel Rimbu, Mihai Dima und Klaus Grosfeld wird für ihre Unterstützung zu dieser Arbeit gedankt. Die vorliegende Studie wurde im Rahmen des deutschen Klimaforschungsprogramms DEKLIM vom BMBF gefördert.

Literatur

- APPENZELLER, C., T. F. STOCKER, M. ANKLIN, 1998: North Atlantic Oscillation dynamics recorded in Greenland ice cores. *Science* **282**, 446-449.
- BALDWIN, M. P., T. J. DUNKERTON, 1999: Propagation of the Arctic Oscillation from stratosphere to troposphere. *J. Geophys. Res.* **104**, 30937-30946.
- BJERKNES, J., 1964: Atlantic air-sea interaction. *Adv. Geophysics* (Academic Press) **10**, 1-82.

- BLACK, D. E., L. C. PETERSON, J. T. OVERPECK, A. KAPLAN, M. N. EVANS, M. KASHGARIAN, 1999: Eight centuries of North Atlantic ocean-atmosphere variability. *Science* **286**, 1709-1713.
- BROECKER, W. S., 1991: The great ocean conveyor. *Oceanography* **4** (2), 79-89.
- BRÜNING, R., G. LOHMANN, 1999: Charles S. Peirce on creative metaphor: A case study of the conveyor belt metaphor in Oceanography. *Foundations of Science* **4** (4), 389-403.
- CEMBER, R. P., 1988: On the sources, formation, and circulation of Red Sea deep water. *J. Geophys. Res.* **93** (C7), 8175-8191.
- CHARLES, C. D., D. E. HUNTER, R. G. FAIRBANKS, 1997: Interaction between the ENSO and the Asian monsoon in a coral record of tropical climate. *Science* **277**, 925-928.
- COLE, J. E., R. G. FAIRBANKS, G. T. SHEN, 1993: Recent variability in the Southern Oscillation: Isotopic results from a Tarawa Atoll coral. *Science* **260**, 1790-1793.
- DERRY, G. N., 2001: *Wie Wissenschaft entsteht*. Primus Verlag, Darmstadt, 374 S. (deutsche Übersetzung von: Derry, G. N., 2000: *What Science Is and How It Works*, Princeton University Press, Princeton, USA, 328 S.).
- DESER, C., M. L. BLACKMON, 1993: Surface Climate Variations over the North Atlantic Ocean during Winter: 1900-1989. *J. Clim.* **6**, 1743-1753.
- DIMA, M., N. RIMBU, S. STEFAN, I. DIMA, 2001: Quasi-decadal variability in the Atlantic basin involving tropics-mid-latitudes and ocean-atmosphere interactions. *J. Clim.* **14**, 823-832.
- ESHEL, G., N. H. NAIK, 1997: Climatological coastal jet collision, intermediate water formation, and the general circulation of the Red Sea. *J. Phys. Oceanogr.* **27**, 1233-1257.
- ESHEL, G., D. P. SCHRAG, B. F. FARRELL, 2000: Troposphere-planetary boundary layer interactions and the evolution of ocean surface density: lessons from Red Sea corals. *J. Clim.* **13**, 339-351.
- FELIS, T., J. PÄTZOLD, Y. LOYA, M. FINE, A. H. NAWAR, G. WEFER, 2000: A coral oxygen isotope record from the northern Red Sea documenting NAO, ENSO, and North Pacific teleconnections on Middle East climate variability since the year 1750. *Paleoceanography* **15**, 679-694.
- FYFE, J. C., G. J. BOER, G. FLATO, 1999: The Arctic and Antarctic Oscillations and their projected changes under global warming. *Geophys. Res. Lett.* **26**, 1601-1604.
- HURRELL, J. W., 1995: Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation. *Science* **269**, 676-679.
- KALNAY, E. M. et al. 1996: The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **77**, 437-471.
- KAPLAN, A., M. CANE, Y. KUSHNIR, A. CLEMENT, M. BLUMENTHAL, B. RAJAGOPALAN, 1998: Analyses of global sea surface temperature 1856-1991. *J. Geophys. Res.* **103**, 18,567-18,589.
- LOHMANN, G., N. RIMBU, M. SCHULZ, 2002: Potential influence of astronomical and solar variations on decadal and centennial climate variability. The KIHZ project: towards a synthesis of Holocene proxy data and climate models, H. Fischer, G. Lohmann et al. (Hrsg.), *Springer-Verlag*, Berlin, im Druck.
- PERLWITZ, J., H.-F. GRAF, 1995: The statistical connection between tropospheric and stratospheric circulation of the Northern Hemisphere in winter. *J. Clim.* **8**, 2281-2295.
- POINCARÉ, H., 1913: *The Foundations of Science*. Science Press, New York, 127 S.
- RIMBU, N., G. LOHMANN, T. FELIS, J. PÄTZOLD, 2001: Arctic Oscillation signature in a Red Sea coral. *Geophysical Research Letters* **28**, 2959-2962.
- RIMBU, N., G. LOHMANN, T. FELIS, J. PÄTZOLD, 2002: Detection of climate modes as recorded in a seasonal-resolution coral record covering the last 250 years. The KIHZ project: towards a synthesis of Holocene proxy data and climate models, H. Fischer, G. Lohmann et al. (Hrsg.), *Springer-Verlag*, Berlin, im Druck.
- RIMBU, N., G. LOHMANN, T. FELIS, J. PÄTZOLD, 2003: Shift in ENSO teleconnections recorded by a Red Sea coral. *J. Clim.* (im Druck).
- SCHÖNWIESE, C.-D., J. RAPP, 1997: *Climate Trend Atlas of Europe – Based on Observations 1891-1990*. Kluwer, Dordrecht, 224 S.
- VON STORCH, H., F. ZWIERS, 1999: *Statistical Analysis in Climate Research*. Cambridge University Press, Cambridge, 484 S.
- THOMPSON, D. W. J., J. W. WALLACE, 1998: The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophys. Res. Lett.* **25**, 1297-1300.
- THOMPSON, D. W. J., J. W. WALLACE, 2000: Annular modes in the extratropical circulation. Part I: month-to-month variability. *J. Atmos. Sci.* **13**, 1000-1016.
- URBAN, F. E., J. E. COLE, J. T. OVERPECK, 2000: Influence of mean climate change on climate variability from 155-year tropical Pacific coral record. *Nature* **407**, 989-993.
- VAUTARD, R., M. GHIL, 1989: Singular spectrum analysis in nonlinear dynamics with applications to paleoclimatic time series. *Physica D* **35**, 395-424.
- WHITE, J. W. C., L. K. BARLOW, D. FISHER, P. M. GROOTES, J. JOUZEL, S. J. JOHNSEN, M. STUIVER, H. B. CLAUSEN, 1997: The climate signal in the stable isotopes of snow from Summit, Greenland: Results of comparisons with modern climate observations. *J. Geophys. Res.* **102**, 26425-26439.
- WIKIPEDIA, die freie Enzyklopädie, 2002, verfügbar auf <http://de.wikipedia.org/>. Stichwort Geologie.

Anschrift des Autors:

Dr. Gerrit Lohmann
 Fachbereich Geowissenschaften
 Universität Bremen
 Postfach 33 04 40
 28334 Bremen

gerrit@palmod.uni-bremen.de
<http://www.palmod.uni-bremen.de/~gerrit>

Dr. Gerrit Lohmann ist Leiter der Forschergruppe „Erdsystemmodellierung und Analyse“, die im Rahmen der Nachwuchsförderung zur deutschen Klimaforschung eingerichtet wurde.