

MEHR ALS NUR EIN KLEINER SCHAUER

Klimainformationen aus
dem Regentropfen

von Katharina Methner &
Andreas Mulch

Das Zusammenspiel von Topografie und Temperatur kann zu orkanartigen Niederschlägen tief im Inneren des nordamerikanischen Kontinents führen. Die Isotopenzusammensetzung des Niederschlags – heute wie in der Vergangenheit – verändert sich je nach Temperatur, Niederschlagsmenge und Herkunft der Luftmassen. Im Bild: Toadstool Park, Nebraska, USA.

Nahmen bei einem globalen Temperaturanstieg die Niederschläge über einer bestimmten Region zu oder ab? Waren Warmphasen also Trockenphasen oder brachten sie mehr Niederschläge? Bei der Beantwortung solcher Fragen helfen Klimarekonstruktionen. Mit neuen Analysemethoden fanden Wissenschaftler zur Klärung dieses Rätsels.

Das Zusammenspiel unterschiedlicher Klimaparameter wie Temperatur, Niederschlag und Atmosphärenzirkulation prägt maßgeblich unseren Planeten. Es bestimmt, wo wir fruchtbare Böden, Wüsten oder Regenwälder auf der Erde finden. Die Verteilung von Niederschlägen ist einer der wichtigsten Parameter in Klimastudien. Um den aktuellen Klimawandel und seine Auswirkungen besser zu verstehen, hilft es uns sehr, wenn wir die Verteilung von Niederschlägen in der Vergangenheit rekonstruieren.

Kalknollen als Archive

Wir brauchen also ein „Archiv“, das uns zuverlässige Informationen über die Niederschläge in der geologischen Vergangenheit liefert und diese über lange Zeiträume unverändert speichert. Das trifft auf pedogene Karbonate zu. Diese Kalkkonkretionen entstehen in den Böden arider bis subhumider Regionen. Sie sind weit verbreitet und zudem gut untersucht, sodass wir unsere Ergebnisse mit denen anderer Studien in Bezug setzen können. Die Bildung dieser Klimaarchive aus Bodenkarbonaten ist an eine ausgeprägte Saisonalität der Niederschläge gebunden. Allein ihre Anwesenheit in geologischen Profilen zeigt uns, dass es Niederschläge und Trockenphasen gegeben haben muss.

Dem Regen vor 40 Millionen Jahren auf der Spur

Aber wie lassen sich diese Archive lesen? Isotopenmessungen ermöglichen es uns, ihnen die gespeicherten Temperaturinformationen zu entlocken. Sauerstoff- und Wasserstoffisotope im Niederschlag liefern uns Informationen über Verteilung und



In zahlreichen Sedimentbecken innerhalb und entlang der nordamerikanischen Kordillere (im Bild: Utah) finden sich fossile Böden, die wir in Kooperation mit Kollegen der Stanford University beproben.

Menge der Niederschläge. Die Verhältnisse der „schweren“ Sauerstoff- (^{18}O) und Wasserstoffisotope (D = Deuterium) gegenüber den „leichten“ Isotopen (^{16}O und H = Hydrogen) ändern sich nämlich systematisch mit einer Vielzahl von Parametern. Dazu zählen (Umgebungs-) Temperatur, Herkunft des Niederschlags, Verdunstung und besonders die Höhe bzw. Topografie der Erdoberfläche. Entlang eines Höhengradienten ändern sich die Isotopenverhältnisse von Sauerstoff (ausgedrückt als $\delta^{18}\text{O}$) und Wasserstoff (δD) im Niederschlag systematisch: $\delta^{18}\text{O}$ - und δD -Werte im Regen nehmen mit der Höhe ab. Aus den Isotopenverhältnissen der aus diesem Niederschlag entstandenen Karbonatknollen erhalten wir also auch Informationen darüber, in welcher Höhe sie entstanden sind.

Isotope als Paläothermometer

Nicht nur die Anwesenheit bestimmter Isotope ist aufschlussreich für uns. Auch wie die Isotope sich zueinander verhalten, lässt auf die Temperaturbedingungen zur Zeit ihrer Entstehung rückschließen: So gehen die Isotope ^{18}O und ^{13}C bevorzugt bei niedrigen Temperaturen Bindungen miteinander ein. Diese Eigenschaft nutzen wir für ein neuartiges Analyseverfahren, die „Clumped Isotope“-Thermometrie (Δ_{47} ; s.

Infobox I). Die Anordnung schwerer Sauerstoff- und Kohlenstoffisotope (^{18}O und ^{13}C) innerhalb der Karbonate ist abhängig von der Temperatur. Die miteinander verbundenen, quasi verklumpten ^{18}O - und ^{13}C -Isotope können wir also nutzen, um die Temperaturen zu rekonstruieren, unter denen sie entstanden sind.

Gebirgsketten steuern Niederschläge

Eine Interpretation der „Höheninformation“ in den gemessenen Isotopenwerten ist nicht trivial, denn Gebirgszüge haben einen beträchtlichen Einfluss auf die Verteilung von Niederschlägen. Sie beeinflussen die großräumige Luftzirkulation auf der Erde erheblich. Typischerweise blockieren sie Luftmassen, die sich dann aufstauen und abregnen, oder sie leiten Luftmassen um, sodass diese das Gebirge umfließen müssen. Das Abregnen entlang einer Gebirgsfront bewirkt, dass oftmals nur sehr „trockene“ Luftmassen über ein Gebirge hinwegziehen und sich hinter diesem ein sogenannter Regenschatten bildet. Es entsteht ein arides Gebiet, eine Wüste im Lee des Gebirges. Hierzu zählt zum Beispiel die nordamerikanische Mojave-Wüste, die im Windschatten der Rocky Mountains von den feuchten Luftmassen des Pazifiks abgeschirmt ist. ▾

Verklumpte Isotope

Die „Clumped-Isotope“-Thermometrie

Die „Clumped Isotope“-Thermometrie ist eine neuartige Analyseverfahren in der Paläoklimaforschung. Mit ihr können wir Bildungstemperaturen von Karbonaten bestimmen. Dazu nutzen wir die Temperaturabhängigkeit, mit der sich schwere Sauerstoff- und Kohlenstoffisotope (^{18}O und ^{13}C) innerhalb der Karbonate anordnen: ^{18}O und ^{13}C gehen bei niedrigen Temperaturen bevorzugt Bindungen miteinander ein. Da man die Häufigkeit dieser Bindungen im Mineral allerdings nicht direkt messen kann, werden die Karbonate zunächst in Phosphorsäure aufgelöst. Dabei entsteht CO_2 , das nach mehreren Reinigungsschritten (Entfernung von Wasser und organischen Rückständen) in einem Isotopen-Gasmassenspektrometer analysiert wird. Hierbei vergleicht man die Häufigkeit des „schweren“, seltenen CO_2 -Isotopologs (^{13}C - ^{18}O - ^{16}O mit Masse 47) mit den doppelt substituerten schweren Isotopen (^{18}O und ^{13}C) mit dem „leichten“, häufigen CO_2 -Isotopolog (^{12}C - ^{16}O - ^{16}O mit Masse 44). Dieses Verhältnis ist direkt temperaturabhängig und wird durch den Δ_{47} -Wert beschrieben. Die „Clumped Isotope“-Thermometrie hat viele Bereiche der Paläoklimaforschung revolutioniert. Unter Federführung der Goethe-Universität Frankfurt ist es gemeinsam gelungen, diese analytisch herausfordernde Technologie als einer der ersten Standorte in Europa zu etablieren.



Diese ca. 35 Mio. Jahre alten Paläoböden im Toadstool Park, Nebraska, USA, dienen als Klimaarchive. Unter bestimmten klimatischen Bedingungen bilden sich in ihren Horizonten Bodenkarbonate, die Informationen über Bodentemperaturen und Isotopenzusammensetzung des lokalen Niederschlags enthalten.



Klimaarchiv „Pedogene Karbonate“. Solche Karbonatknollen bilden sich unter ariden bis subhumiden Bedingungen. Sie speichern Temperatur- und Niederschlagsinformationen über Jahrmillionen hinweg (im Bild: Muddy Creek Basin, Montana).

Eozäne Klimadynamik in Nordamerika

Im frühen Känozoikum, dem Eozän vor 45 bis 40 Millionen Jahren, waren CO₂-Gehalt der Atmosphäre und globale Temperaturen verglichen mit heute deutlich erhöht. Gleichzeitig war der Temperaturgradient zwischen Äquator und Polen kleiner und die Verteilung der Landmassen unterschied sich noch deutlich von der heutigen.

Zu dieser Zeit herrschte im Westen Nordamerikas über Jahrmillionen hinweg ein relativ trockenes und saisonales Klima, das in zahlreichen Sedimentbecken die Bildung pedogener Karbonate ermöglichte. Viele dieser Sedimentbecken entstanden innerhalb und entlang der nordamerikanischen Kordillere während des Eozäns vor 34 bis 56 Millionen Jahren vor heute und enthalten somit wichtige Informationen über die nordamerikanische Klimageschichte dieser Zeit.

In langjähriger Zusammenarbeit mit Senckenberg-Preisträger Professor C. Page Chamberlain von der Stanford University untersuchten wir eine Vielzahl dieser Langzeitklimaarchive systematisch. Zusammen erlauben die dabei gewonnenen Isotopendaten Aussagen über die topografische Entwicklung der nordamerikanischen Kordillere. So zeigte sich, dass während des Eozäns ein großräumiges Plateau mit Höhen zwischen 3000 und 4000 Metern weite Teile der westlichen USA überspannte (Chamberlain et al. 2012). Es lag – ähnlich wie die heutigen Rocky Mountains – als Barriere quer zu den großräumigen Strömungen pazifischer Luftmassen und beeinflusste damit die

Atmosphärenzirkulation in der nördlichen Hemisphäre.

Sind Warmzeiten auch Feuchtzeiten?

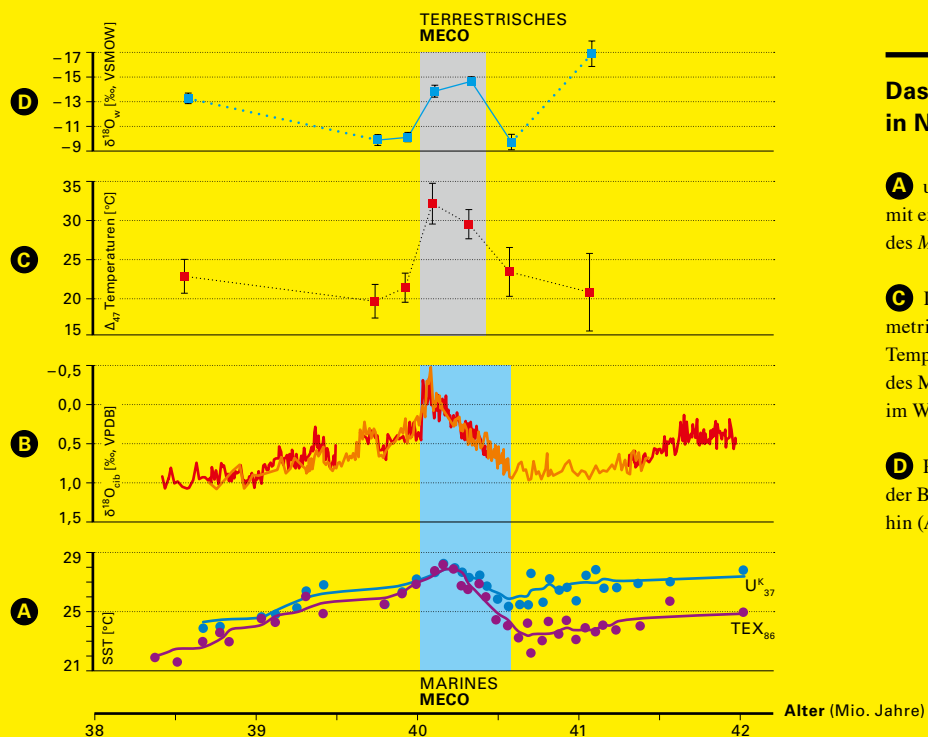
Das Eozän war von deutlichen Klimaschwankungen geprägt. Das „Klimaoptimum des mittleren Eozäns“ (*Middle Eocene Climatic Optimum*, kurz: MECO) ist eine kurze globale Warmphase vor rund 40 Millionen Jahren, deren Temperaturextreme innerhalb der Kontinente bisher nicht bekannt waren. Isotopenanalysen ($\delta^{18}\text{O}$, Δ_{47}) von fossilen Bodenkarbonaten (Sage Creek-Becken, Montana, USA) und Seesedimenten (Elko-Becken, Nevada, USA) zeigen für diese Episode eine Temperaturschwankung von nahezu 10 Grad Celsius, die mit veränderten Niederschlagsmustern einhergeht. Parallel zu einem deutlichen Anstieg der Temperaturen deuten die niedrigeren $\delta^{18}\text{O}$ -Werte in den Bodenkarbonaten auf erhöhte Niederschläge hin (s. Abb. unten; Methner et al. 2016; Mulch et al. 2015). Die höheren Temperaturen und Niederschläge stehen möglicherweise mit einem veränderten Einflussbereich des nordamerikanischen Monsunsystems in Zusammenhang. Mithilfe isotopengeochemischer Daten ließe sich folgendes

Das MECO-Klimaereignis in Nordamerika

A und **B** zeigen marine Temperaturkurven mit einem deutlichen Temperaturanstieg während des *Middle Eocene Climatic Optimum* (MECO).

C Der mittels „Clumped Isotope“-Thermometrie (Δ_{47}) an Bodenkarbonaten ermittelte Temperaturverlauf verdeutlicht, dass es während des MECO zu einer beträchtlichen Erwärmung im Westen Nordamerikas kam.

D Parallel dazu deuten niedrigere $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Bodenkarbonate auf erhöhte Niederschläge hin (Abb. nach Methner et al. 2016).



Als eine von nur wenigen Einrichtungen in Europa ermöglicht das Isotopenlabor von Goethe-Universität und BiK-F Messungen der „Clumped Isotope“-Temperaturen.

Szenario ableiten: Der nordamerikanische Monsun dehnte sich während der MECO-Warmphase weiter nach Norden aus, sodass es während des mittleren Eozäns in Nordamerika nicht nur wärmer, sondern auch (saisonal) feuchter wurde.

Am Ende des Eozäns kam es zu einer globalen, intensiven Abkühlung, die zur ersten permanenten Vereisung der Antarktis führte. Viele Säugetiere in Europa und Asien kamen mit diesen Bedingungen nicht zurecht und starben aus. Dieser Faunenwechsel ging als „Grand Coupure“ in die Literatur ein.

In Nordamerika hingegen scheinen die meisten Säugetiere nicht oder nur kaum betroffen gewesen zu sein. Kombinierte isotopengeochemische und paläontologische Paläoumweltrekonstruktionen

zeigen, dass die nordamerikanische Säugetierfauna durch das Leben unter kühleren Bedingungen in größeren Höhen, also auf eben jenem eozänen Plateau, bereits an kühlere Temperaturen angepasst war. Die Tiere konnten entlang des ausgeprägten Klimagradienten längs der Gebirgsflanken wandern und sich so im Gegensatz zu ihren europäischen Verwandten, die vom Klimawandel „kalt erwischt“ wurden, langsam an die veränderten Umweltverhältnisse anpassen.

Isotopengeochemische Untersuchungen in Kombination mit paläobiologischen Analysemethoden vollziehen daher einen wichtigen Schritt hin zum Verständnis der vielfältigen Wechselwirkungen zwischen Biodiversität und geologischen Prozessen. **✎**

Literatur

- Chamberlain, C. P., Mix, H. T., Mulch, A., Hren, M. T., Kent-Corson, M. L., Davis, S. J., Horton, T. W., Graham & S. A. (2012): The Cenozoic climatic and topographic evolution of the western North American Cordillera. – *American Journal of Science*, 312(2), 213–262, doi:10.2475/02.2012.05.
- Eronen, J. T., Janis, C. M., Chamberlain, C. P. & Mulch, A. (2015): Mountain uplift explains differences in Palaeogene patterns of mammalian evolution and extinction between North America and Europe. – *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 282(1809), doi:10.1098/rspb.2015.0136.
- Methner, K., Mulch, A., Fiebig, J., Wacker, U., Gerdes, A., Graham, S. A. & Chamberlain, C. P. (2016): Rapid Middle Eocene temperature change in western North America. – *Earth and Planetary Science Letters*, 450, 132–139, http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2016.05.053.
- Mulch, A., Chamberlain, C. P., Cosca, M. A., Teyssier, C., Methner, K., Hren, M. T. & Graham, S. A. (2015): Rapid change in high-elevation precipitation patterns of western North America during the Middle Eocene Climatic Optimum (MECO). – *American Journal of Science*, 315(4), 317–336, doi:10.2475/04.2015.02.

DIE AUTOREN



Dr. Katharina Methner promovierte 2016 am Senckenberg Biodiversität und Klima Forschungszentrum (BiK-F) in enger Zusammenarbeit mit der Goethe-Universität und der Stanford University. Seitdem arbeitet sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Senckenberg Forschungsinstitut und Naturmuseum Frankfurt. Ihr Forschungsinteresse gilt Klimarekonstruktionen in den westlichen USA und der europäischen Alpenregion mittels geochemischer Analysen.

Prof. Dr. Andreas Mulch ist Direktor des Senckenberg Forschungsinstituts und Naturmuseums Frankfurt sowie seit 2010 Professor an der Goethe-Universität Frankfurt und dem BiK-F. Zusammen mit Prof. Dr. Jens Fiebig leitet er das Isotopenlabor von Goethe-Universität und BiK-F. Seit seiner Zeit als Postdoc an der University of Minnesota und der Stanford University beschäftigt er sich mit der Rekonstruktion von Niederschlagsmustern und der Topografie.

Kontakt: Dr. Katharina Methner, Senckenberg Biodiversität und Klima Forschungszentrum, Georg-Voigt-Str. 14–16, D-60325 Frankfurt am Main, katharina.methner@senckenberg.de