

Klimaentwicklung und zeitlich verg



ng räumlich leichen



Klimaarchive – Aus der Vergangenheit für die Zukunft lernen S. 120

⇒ Wann kommt die nächste Eiszeit? S. 124

⇒ Bäume vergessen nie S. 126

Klimaveränderungen sind ein maßgeblicher Faktor für die Dynamik von Landschaften. Isotopenforscher und Geowissenschaftler des UFZ analysieren deshalb Baumjahresringe und Seesedimente mithilfe von Isotopenmethoden, um das Klima ausgewählter Regionen wie beispielsweise Nord- und Mitteleuropa sowie ausgewählter Zeitperioden zu rekonstruieren. Das umfasst Perioden von wenigen Monaten bis zu Tausenden von Jahren. Um zu erfahren, wie Klimaveränderungen den Wasserhaushalt von Kontinenten beeinflussen, werden südamerikanische und japanische Seen in die Fernerkundungskampagnen einbezogen.

Sprecher des Forschungsthemas „Klimaentwicklung im räumlichen und zeitlichen Vergleich“:
Dr. Stephan Weise, Leiter des Departments Isotopenhydrologie

Stephan Weise, Tatjana Böttger, Walter Geller und Tilo Arnhold

Klimaarchive – aus der Vergange für die Zukunft ler

Wir erleben seit mehreren Jahrzehnten eine zunehmende globale Erwärmung. Das bedeutet höchstwahrscheinlich: verstärkte Wüstenbildung, Anstieg des Meeresspiegels, der in absehbarer Zukunft bereits Inselstaaten verschwinden lassen wird, und extreme Klima-Ereignisse wie Wirbelstürme bisher ungekannten Ausmaßes, die ganze Landstriche verwüsten und Hunderttausende obdachlos machen. Um sinnvolle Gegenmaßnahmen ergreifen zu können, müssen die Prozesse, die das Klima bestimmen, von der lokalen bis zur globalen Skala verstanden werden. Mit aufwändigen Computermodellrechnungen sind schon seit Jahren Prognosen zum Klimawandel möglich. Ihr Aussagewert hängt allerdings vollständig vom Verständnis dieser Klima bestimmenden Prozesse und Entwicklungen ab. Wenn also neue Berechnungen immer mal wieder für Verwirrung sorgen, dann liegt das auch daran, dass die Klimageschichte und damit die wissenschaftliche Grundlage für diese Klimamodelle noch voller Lücken ist, die erst langsam geschlossen werden. Das Klima gehört sicherlich zu den komplexesten „Maschinen“, mit denen sich die Menschheit je auseinandergesetzt hat.

Das Gedächtnis unserer Erde

In natürlichen „Archiven“ wie beispielsweise Sedimenten von Ozeanen und Seen oder Baumjahresringen sind Informationen über die Klimabedingungen zum Zeitpunkt des Entstehens gespeichert. Die Kunst besteht darin, diese Informationen zu entschlüsseln. Um das Klima-Puzzle zu verstehen, sind viele Spezialisten wie Geologen, Botaniker, Dendrochronologen, Isotopenchemiker oder Archäologen notwendig. Denn erst durch das Zusammensetzen der vielen Puzzleteilchen ergibt sich ein Bild.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Natur in der Vergangenheit auch ohne den Einfluss des Menschen Klimaveränderungen erlebt hat, die weit über das Geschehen der vergangenen Jahrzehnte und das bisher für die nächsten hundert Jahre prognostizierte hinausgehen. Es liegt daher nahe, zu versuchen, diese „Natur-Experimente“ der Vergangenheit verstehen zu lernen, um die aktuelle Klima-Entwicklung korrekt bewerten zu können. Deshalb erforschen Hydrologen, Isotopenforscher und Geowissenschaftler des UFZ in Kooperation mit

Wissenschaftlern des GeoForschungs Zentrums Potsdam (GFZ) und des Forschungszentrums Jülich (FZJ) an Sedimentkernen von Seen und an Baummaterial die klimatischen Verhältnisse im Verlaufe verschiedener Phasen innerhalb der letzten etwa 140.000 Jahre. In diesem Zeitabschnitt liegen zwei ausgeprägte Warmzeiten, das so genannte Eem vor etwa 120.000 Jahren und das aktuelle, seit zirka 10.000 Jahren andauernde Holozän sowie mehrere Kaltzeiten.

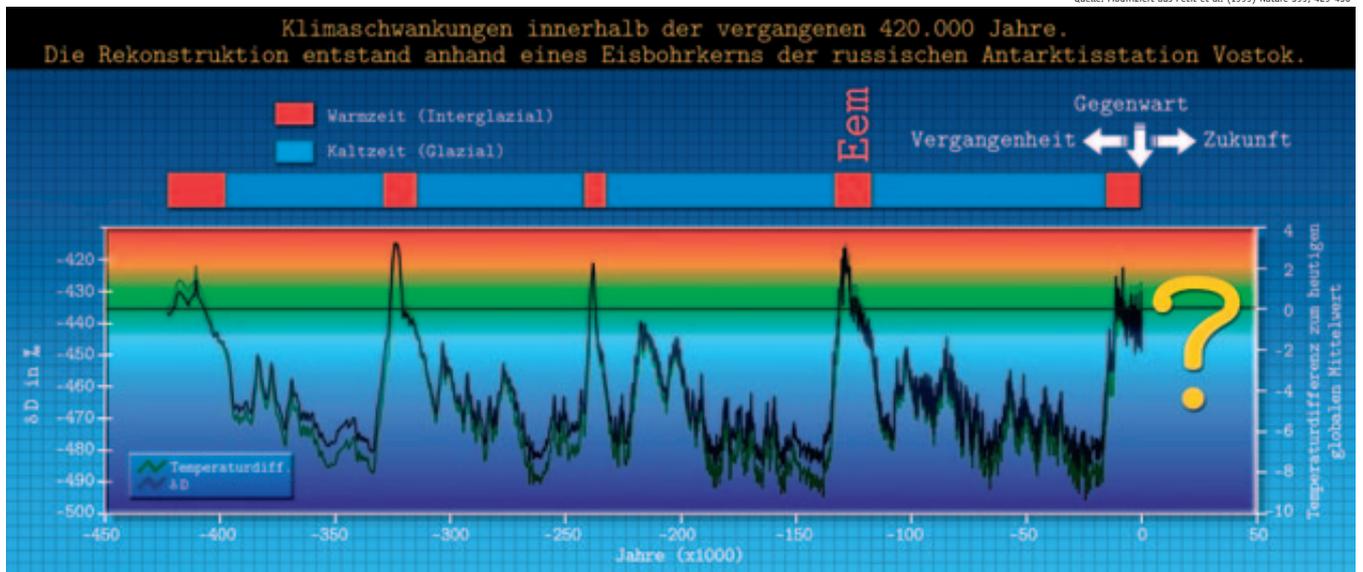
Alte Bäume und neue Methoden

Das Ansteigen des klimaschädlichen Kohlendioxid-Gehalts in der Atmosphäre gilt als der größte Anteil des Menschen am Klimawandel. Eine Ursache dafür ist die Verbrennung fossiler Energieträger. Aber gerade diese könnte indirekt auch helfen, die Klimageschichte zu verstehen. Denn bei der Suche nach Braunkohle sind in Deutschland viele Klimaarchive zu Tage gefördert worden. Wichtige Untersuchungsplätze sind verbunden mit Namen von Tagebauen wie Reichwalde in der Lausitz und Grotzsch in der Nähe von Leipzig. Dort wurden fossile Bäume gefunden, deren Baum-

Foto: Photodisc by Getty Images



nheit
nen



ringe jetzt mit modernen Isotopenmethoden untersucht werden. So können die Forscher des UFZ in enger Zusammenarbeit mit der Sächsischen Akademie der Wissenschaften den Verlauf des Klimas hier bis zurück in die letzte Warmzeit – das Eem – und davor verfolgen. Bei Reichwalde in der Lausitz wurde ein „Paläowald“ erschlossen, der aus der Übergangsphase der letzten Kaltzeit zur heutigen Holozän-Warmzeit stammt, die bereits seit etwa elftausend Jahren anhält.

Direkte Auswirkungen des Menschen auf seine Umwelt finden sich in Bäumen wieder, die beprobt worden sind, um die relativen Klima-Informationen der etwa 14.000 Jahre alten Kiefern mit denjenigen der heutigen Zeit zu vergleichen. Aus dem Verhältnis der stabilen Kohlenstoff-Isotope $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ in der Jahrringzellulose lässt sich erkennen, dass der Kohlenstoff-Haushalt der Bäume, die in der Abluft-Fahne von Braunkohle-Kraftwerken stehen, offensichtlich durch den Schwefeldioxid-Ausstoß der Kraftwerke stark beeinflusst ist. Möglicherweise kann die Isotopenmethodik daher für eine regionale Schadstoffbelastungskontrolle eingesetzt werden.

Seen als Spiegel des Wetters

Globale Klimaänderungen können regional unterschiedliche Konsequenzen haben. Zu den Untersuchungsgebieten in Deutschland werden daher Referenzobjekte in anderen Regionen



herangezogen. Mit Standorten in Polen und Russland ist entlang eines europäischen West-Ost-Transekts anhand von Seesedimenten die kontinentale Klimaentwicklung im Zusammenhang mit der Eem-Warmzeit erkundet worden.

Die Mechanismen der Klimaentwicklung unterscheiden sich signifikant zwischen der Kontinent-dominierten Nordhalbkugel der Erde und ihrer ozeanisch dominierten Südhalbkugel. Für ein umfassendes Verständnis des Klimageschehens ist daher der Blick auf die andere Seite des Globus wichtig. Für

den Vergleich zwischen Nord- und Südhemisphäre werden Sedimente herangezogen, die durch Kernbohrungen im Boden chilenischer Seen gewonnen werden konnten. Nach bisherigen Erkenntnissen lassen sich mit diesen Sedimentkernen mindestens die letzten 10.000 Jahre erfassen. Die chilenischen Seen werden zusammen mit argentinischen Seen auch untersucht, um die aktuellen klimatischen Veränderungen zu beobachten. Sie ziehen sich perlenkettenartig in Nord-Süd-Richtung an den Anden entlang und repräsentieren das Spektrum gemäßigter Zonen.

WISSENSWERTES

Mithilfe von **Baumringen**, die bereits von der Struktur her ein Abbild saisonaler Klimaschwankungen wiedergeben, kann regional das Klima bis zum Ende der letzten Eiszeit vor zirka 12.000 Jahren zurückverfolgt werden. Moderne Techniken, basierend auf stabilen Isotopen, sind die Grundlage dieser Forschung.

Foto: Photodisc Environmental Concerns



Im Forschungsmittelpunkt der Magdeburger UFZ-Seenforscher stehen wegen ihrer besonderen Eigenschaften so genannte warm-monomiktische Seen der Süd- und Nordhalbkugel. Weil sich dort keine Eisdecke bildet, kann sich das Wasser der Seen einmal im Jahr in Form einer Vollzirkulation durchmischen. Die Temperaturen des Tiefenwassers entsprechen dann den Temperaturen der Gesamtwassersäule am Ende der

Vollzirkulationsperiode im Spätwinter. Die Tiefentemperaturen werden umso weniger beeinflusst von kurzzeitigen Änderungen, die sich aus dem aktuellen Wetterverhalten ergeben, je tiefer die betreffenden Seen sind. An mehreren langjährig untersuchten Seen Europas wie dem Bodensee, den Schweizer Mittellandseen und oberitalienischen Voralpenseen wurden übereinstimmend bereits Anstiege der Tiefentemperaturen

beobachtet. Am langjährigen Verlauf der Temperaturen wird so auch der Verlauf der Klima-Oszillationen wie des Golfstroms im Nordatlantik und des El Niño im Südpazifik direkt beobachtbar. ■

Der Physiker Dr. Stephan Weise leitet das Department Isotopenhydrologie. Der Biologe Prof. Walter Geller leitet die Departments Seenforschung und Fließgewässerökologie (letzteres kommissarisch).



Sedimentbohrungen am Lago Caviahue in Argentinien

Juri Kononov vom Moskauer Institut für Geografie der Russischen Akademie der Wissenschaften (RAS) bei der Entnahme von Baumproben auf der Kola-Halbinsel am Polarkreis.

Tatjana Böttger und Tilo Arnholt

Wann kommt die nächste Eiszeit?

Was sich vor rund 118.000 Jahren abgespielt hat, muss dramatisch gewesen sein: Innerhalb von kurzer Zeit fielen die Temperaturen deutlich. Damals gingen neben den Temperaturen auch die Niederschläge drastisch zurück. Die Lindenbäume verschwanden. Aus Mitteleuropa wurde eine Kältesteppe wie heute die sibirische Tundra. Die letzte Warmzeit vor der heutigen Warmzeit ging zu Ende. Das belegen Untersuchungen von Sedimenten verlandeter Seen von der Eifel bis nach Russland. Die Arbeiten wurden im

Rahmen des nationalen Klimaforschungsprogramms DEKLIM durchgeführt, an dem das UFZ beteiligt ist. Bohrkerne aus der Antarktis zeigen, dass unsere Erde in der Vergangenheit grob alle 100.000 Jahre von einer Warmzeit in eine Kaltzeit fällt. Rein statistisch gesehen wären „demnächst“ also wieder sinkende Temperaturen an der Reihe. Nur wann ist das und was sind die ersten Anzeichen dafür? Oder werden diese natürlichen Effekte durch den menschlichen Einfluss einfach überdeckt? Welche Prozesse sind überhaupt dafür verantwortlich?



Europäisches Netzwerk ISONET. Rot markiert sind die Standorte, die vom UFZ untersucht werden.

Isotope – Schlüssel zur Vergangenheit

Klar ist bisher nur, bevor das Klima kippte, begann es, instabil zu werden. Kleinere Schwankungen könnten also auf einen großen Umbruch hinweisen. Deshalb werden die letzten 400 Jahre der Klimageschichte Europas genauer unter die Lupe genommen. In diesen Zeitraum fällt auch die so genannte Kleine Eiszeit im 17. Jahrhundert. Neben Aufzeichnungen gibt es noch viele alte Bäume aus dieser Zeit, die objektive Informationen über das Wetter gespeichert haben. Im Fokus des EU-Projektes ISONET stehen Kiefern und Eichen, weil sie typische, weit verbreitete Laub- und Nadelbaumarten sind. Zum ersten Mal ermöglicht ein einheitliches Untersuchungsnetz es, den Einfluss der regionalen Umweltbedingungen auf die Verhältnisse der stabilen Isotope in den Jahresringen systematisch zu untersuchen und so die Klimaänderungen im europäischen Maßstab zu rekonstruieren. Die unterschiedlich schweren Isotope von Kohlenstoff, Sauerstoff und Wasserstoff folgen physikalischen Gesetzmäßigkeiten: Abhängig von Temperaturen und Niederschlägen werden sie während der Wachstumsphase unterschiedlich stark in die Biomasse eingelagert. Von Skandinavien bis zum Mittelmeer und von der Iberischen Halbinsel bis zu den Alpen wird in den Baumjahresringen nach den Spuren gesucht, die die verschiedenen

klimatischen Einflüsse hinterlassen haben. Im Labor wird dazu die Zellulose extrahiert und massenspektrometrisch analysiert. So werden die Isotopenverhältnisse bestimmt. Die Daten für die letzten 100 Jahre sind besonders wichtig, weil sie mit den seit dieser Zeit vorhandenen instrumentalen meteorologischen Daten verglichen werden können. Diese Vergleiche sind zwar kompliziert, aber sie sind der Schlüssel, um mithilfe von noch älteren Bäumen auch jene Klimaphasen zu rekonstruieren, als der Mensch noch nicht Tagebuch über das Wetter führte. Es geht also auch darum, die Methodik zu schärfen, um genauere Ergebnisse zu erhalten. Das UFZ ist inzwischen das Standardlabor für alle ISONET-Partner geworden.

Interessante Erkenntnisse haben die UFZ-Forscher bereits herausgefunden: Die Baumjahresringe auf der Kola-Halbinsel an der russisch-finnischen Grenze sind ein sensibler Indikator für die Reichweite des Golfstroms. Am äußersten Ende jener Wärmepumpe, die das Klima in Europa prägt, lassen sich Temperaturschwankungen am besten beobachten. Um das Klima besser zu verstehen, muss es in solchen Schlüsselregionen untersucht werden. Die Ergebnisse werden helfen, die Veränderungen des Klimas der letzten 400 Jahre zu interpretieren und so genauere Prognosen für die Zukunft zu erstellen. ■

Die Isotopenchemikerin Dr. Tatjana Böttger ist wissenschaftliche Mitarbeiterin im Department Isotopenhydrologie.

WISSENSWERTES

Isotope und Klima – Isotope eines chemischen Elements sind Atome, die verschieden sind in ihrer Masse, nicht aber in ihren chemischen Eigenschaften. Für Kohlenstoff beispielsweise gibt es die zwei stabilen Isotope ^{12}C und ^{13}C , die sich nur durch ein zusätzliches Neutron im Atomkern des ^{13}C von einander unterscheiden. Der Massenunterschied macht sich allerdings bei verschiedensten Prozessen wie beispielsweise dem Stoffwechsel von Bäumen bemerkbar: Kohlendioxid (CO_2) mit dem leichteren Kohlenstoffisotop wird bevorzugt während der Photosynthese verwendet, wobei der Grad der Bevorzugung in gewissem Maße von Klimafaktoren wie Temperatur, Luftfeuchte und dem CO_2 -Gehalt der Atmosphäre abhängt. Da diese Abhängigkeit nicht 100%ig ist, können die Isotopengehalte relative Aussagen liefern. Sie werden deshalb – neben anderen Indikatoren auch – als Klimaproxies bezeichnet.

Tatjana Böttger und Tilo Arnhold

Bäume vergessen nie

Fossiler Stamm eines Nadelbaumes (*Dolioroboxylon priscum*) im Tagebau Groitzscher Dreieck. Der Fund hat ein Alter von etwa 37 Millionen Jahren. Damals befand sich hier ein Flussdelta. Durch den Luftabschluss wurde das Holz konserviert.

Das Spätglazial ist für die Forscher noch eine sehr mystische Epoche. Mit dieser Übergangsphase von kalt zu warm endete die Vergletscherung großer Teile Europas und der Wald kam zurück. Die Neandertaler waren vermutlich schon seit mehreren Tausend Jahren ausgestorben. Stattdessen nahm jetzt

der moderne Mensch Mitteleuropa in Besitz. Die Jäger und Sammler wurden langsam sesshaft und begannen Tiere zu zähmen. Das Agrarzeitalter brach an. Ein Beispiel dafür, wie ein Klimawandel nicht nur das Bild der Landschaft, sondern auch die menschliche Kultur geprägt hat.

Mumien

Normalerweise verrottet abgestorbenes Holz relativ schnell. Fehlt aber Sauerstoff, weil das Holz unter einer dichten Erdschicht oder im Wasser liegt, dann bleibt es erhalten. So geschehen im Tagebau Reichwalde in der nördlichen Oberlausitz. Dort sind viele Bäume aus der Allerød-Zeit – einer warmen Phase im Spätglazial – unter einer Torfschicht erhalten geblieben. Spezialisten aus vielen verschiedenen Disziplinen (Archäologie, Geologie, Dendrochronologie, Botanik, Ökologie und Isotopengeochemie) arbeiten im DFG-Projekt „Paläowald Reichwalde“ zusammen, um die spätglaziale Landschaftsgeschichte mit einzelnen Phasen der Waldentwicklung und Vermoorung zu untersuchen. Durch die Verknüpfung von Untersuchungen an Baumjahresringen und Sedimenten lässt sich hier das Klima besonders gut rekonstruieren. 3000 Proben haben die Forscher dazu gesammelt und ausgewertet. Aus den Pollen- und Großrestanalysen geht hervor, dass



Foto: Stephan Weise, UFZ



Dr. Achim Brauer vom GFZ Potsdam bei der Präparation eines Sedimentkerns aus dem Eem im Tagebau Gröbern. Ein Gemeinschaftsprojekt der Sächsischen Akademie der Wissenschaften (SAW), des GFZ Potsdam und des UFZ Leipzig-Halle.

WISSENSWERTES

Das **Allerød** ist eine kurze warme Phase am Ende der letzten Eiszeit, bevor die Holozän-Warmzeit begann. Mit dieser nach einem dänischen Ort benannten Klimaphase endet die **Weichseliszeit**, bei der vor etwa 115.000 bis 14.000 Jahren weite Teile Nordeuropas vergletschert waren. Das Eis reichte damals bis ins heutige Brandenburg. Mit dem Rückzug der Gletscher und dem Durchbruch zwischen Ostsee und Atlantik begann die jüngste Epoche der Erdgeschichte: Das **Holozän**, eine Warmzeit, die bis heute anhält. Zwischen 1540 und 1850 gab es eine so genannte **Kleine Eiszeit**. Damals war es durchschnittlich knapp 2 Grad kälter als heute.

der Birken-Kiefernwald schon seit etwa 14.000 vor heute existiert hat. Baumbefunde in Reichwalde sind über einen Zeitraum von etwa 800 Jahren erhalten. Ein einmaliger Blick in eine große Erwärmung unseres Planeten. Stabile Phasen, aber auch mehrere Störungen in der Waldentwicklung haben die Forscher nachgewiesen. Schuld daran waren Temperaturänderungen, stark schwankende Grundwasserstände und Waldbrände vor allem im Spätsommer. Denn an den Baumjahresringen ist jede Saison zu erkennen. Sie liefern wesentlich genauere Daten als alle anderen Klimaarchive. Die Beschaffenheit des Jahresringes gibt Auskunft darüber, wie gut der Baum wachsen konnte – also ob es warm, kalt, feucht oder trocken war. Damals müssen in der Oberlausitz Bedingungen geherrscht haben, wie wir sie heute in Nordskandinavien vorfinden. Später wird aus dem Wald wieder ein Moor. Etwa 400 Jahre nach den letzten Baumbefunden hat sich die Region in eine Tundra verwandelt, bevor die aktuelle Warmzeit begann.

Lebende

Zum Vergleich haben die UFZ-Forscher auch Proben von heutigen Bäumen genommen. Dabei stießen sie auf überraschende Ergebnisse: Die Isotopensignatur der Kiefern änderte sich ab den 90er Jahren deutlich. Dafür gibt es nur eine Erklärung: Alte Braunkohlekraftwerke wurden zu dieser Zeit abgeschaltet oder mit Filtern versehen. Die Wissenschaftler hatten einen neuen Schadstoffmonitor entdeckt. Die Entdeckung löste aber nur verhaltene Freude aus. Denn dieser Effekt ist ein zusätzlicher Risikofaktor für die Messungen. Die Isotopensignaturen werden also nicht nur von Temperatur und Feuchtigkeit beeinflusst, sondern auch von Schadstoffen in der Luft. Und damit ist klar: Es bleibt auch in naher Zukunft schwierig, die Klimainformationen aus den Baumjahresringen zu entschlüsseln. ■

Die Isotopenchemikerin Dr. Tatjana Böttger ist wissenschaftliche Mitarbeiterin im Department Isotopenhydrologie.