

Baumjahresringe als chemisch-physikalischer Datenträger für Umwelt- und Klimainformationen der Vergangenheit

Gerhard Helle und Ingo Heinrich
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

Trees are a substantial part of the human environment. As long living plants, tree growth is governed by environmental and climate changes within their habitat. The growth rings of their wood record the temporal dynamics of tree physiological reactions to these changes. Physical and chemical analyses of tree rings provide exactly dated and annually resolved data of environmental and climate variability of the past 14.000 years. The wide distribution of trees over various regions of the world, including those with greatest population densities and also marginal areas allows to gain information about local and regional consequences of global climate change. Tree rings of oak planks from a Neolithic wooden well discovered and excavated near Erkelenz in the Lower Rhine Embayment were analysed for their ratios of carbon and oxygen isotopes ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) for the time period 5320 to 5081 BC. The climate reconstruction derived from the tree-ring isotope records revealed that the average air temperature of the vegetation period decreased constantly by ca. 2 °C during a period of 95 years between 5270 to 5175 BC. Furthermore, abrupt temperature changes of 1.5 to 2 °C within 5 to 10 year periods were reconstructed, which coincided with considerable changes in moisture conditions, especially during the 20 – 30 years prior to the construction of the wooden well.



Die Analyse der in den Jahrringen von Bäumen gespeicherten Klimainformationen erlaubt es in einzigartiger Weise, die zeitliche Dynamik bestimmter Veränderungen des Klimas über Zeiträume von bis zu mehreren tausend Jahren zu erfassen. Um die Informationen von Klimaarchiven zu erschließen, werden am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ zahlreiche chemisch-physikalische Methoden genutzt. Es werden nicht nur die wechselnden Mächtigkeiten von Seeablagerungen (vgl. Beitrag von Brauer in diesem Heft) oder Abfolgen schmaler und breiter Baumjahre analysiert, sondern auch verschiedene stabile Varianten des Kohlenstoffs und des Sauerstoffs untersucht. Kohlenstoff kommt in zwei unterschiedlichen stabilen Isotopen vor. Atmosphärisches Kohlendioxid enthält 1,1% des nicht radioaktiven Isotops ^{13}C und 98,9% des Isotops ^{12}C . Das Verhältnis dieser stabilen Kohlenstoffisotope $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ in pflanzlichem Material unterscheidet sich stark von dem im atmosphärischen Kohlendioxid (CO_2), mit dessen Hilfe die Pflanzen ihr organisches Material aufbauen. Der Unterschied geht im Wesentlichen auf Isotopenverschiebungen (Fraktionierungen) zurück, die direkt mit der photosynthetischen CO_2 -Aufnahme der Blätter in Verbindung stehen. Die CO_2 -Aufnahme, aber auch die Abgabe von Wasser durch die Transpiration, geschieht im Wesentlichen durch die Blattoffnungen, die sogenannten Spaltöffnungen. Pflanzen können die blattinterne CO_2 -Konzentration beeinflussen, indem sie die Spaltöffnungen z. B. bei hohen Temperaturen bzw. niedrigen Feuchten nur wenig öffnen, um Wasserverluste zu minimieren. Andererseits muss die Öffnung jedoch so groß sein, dass ausreichend Kohlendioxid für die Photosynthese zur Verfügung steht. Die Weite der Spaltöffnungen ist für das Verhältnis der Kohlenstoffisotope im aufgebauten organischen Material verantwortlich.

Vereinfacht und auf witterungsbedingte Faktoren reduziert heißt dies: Geringe Spaltöffnungsweiten stehen meist für niedrige Feuchten bzw. hohe Temperaturen und wegen der damit einhergehenden geringen internen CO_2 -Konzentration für geringe Isotopenverschiebungen. Hohe Feuchten bzw. niedrige Temperaturen führen dagegen meist zu großer Öffnungsweite, mit hohen internen CO_2 -Konzentrationen und entsprechend starker Isotopenverschiebung durch die CO_2 -fixierenden Enzyme (Schleser, 1995).

Auch Sauerstoffisotope des organischen Materials zeigen Variationen, die mit Veränderungen von Umwelteinflüssen korrelieren. Der Anteil des ^{18}O -Isotops liegt in der Natur etwa bei 0,2 %, der von ^{16}O bei 99,76 %. Da der Sauerstoff des organischen Materials nicht aus atmosphärischem CO_2 stammt, sondern bei der photosynthetischen Wasserspaltung freige-

setzt wird, ist die $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -Signatur durch das über die Wurzeln aufgenommene Bodenwasser geprägt. Bei der Interpretation von Sauerstoffisotopendaten aus Jahrringen ist die Herkunft des bei der Photosynthese genutzten Wassers entscheidend. Wird das Bodenwasser vom Niederschlag dominiert und die Wurzeln haben praktisch keinen Zugriff auf das Grundwasser, spiegeln die Sauerstoffisotopenwerte die kurzfristigen Temperaturschwankungen auf Jahresbasis wider. Findet die Wasseraufnahme im Wesentlichen aus dem Grundwasser statt, werden eher langfristige Temperaturschwankungen aufgezeichnet.

Im Allgemeinen werden die Verhältnisse der stabilen Isotope relativ zu einem international festgelegten Standard, als sogenannte δ -Werte, dargestellt. Da die Isotopenverschiebungen in der Regel sehr gering sind, werden die δ -Werte in Promille angegeben. Zur Verknüpfung von $\delta^{18}\text{O}$ -Werten mit Lufttemperaturen wird im folgenden Beispiel aus dem nordwestdeutschen Tiefland der von Dansgaard (1964) vorgeschlagene Temperaturkoeffizient von etwa 0,7 ‰/°C verwendet. Für einen Baumjahrring bedeutet dies, dass sich der $\delta^{18}\text{O}$ -Wert gegenüber dem Vorjahresring um ca. 1,4 ‰ erhöht, wenn z. B. nach einem kalten, feuchten Jahr ein Sommer folgt, dessen mittlere Lufttemperatur um 2 °C höher lag als im Sommer des Vorjahrs.

Neolithischer Brunnen von Erkelenz-Kückhoven

Der Fund eines jungsteinzeitlichen Brunnens aus der Kulturperiode der linksrheinischen älteren Bandkeramik (etwa 5320-5081 v. Chr., Weiner 1998) bei Erkelenz-Kückhoven legte die Frage nahe, ob es möglich ist, anhand der beim Brunnenbau verwendeten Eichenhölzer Aussagen über die klimatischen Bedingungen zu machen, die vor dem Bau des Brunnens in dieser Region herrschten. Die mächtigen, gut erhaltenen Eichenbohlen (Abb. 1) bieten mit bis zu 170 Jahrringen hervorragendes Material für die Rekonstruktion klimatischer Verhältnisse auf Basis von Kohlenstoff- und Sauerstoffisotopen.

Die Analysen am GFZ wurden an zehn astfreien, geradschäftigen Eichenholzbohlen durchgeführt, die zuvor am Institut für Ur- und Frühgeschichte der Universität zu Köln datiert wurden. Die Jahrringe der Holzproben wurden mit einem Skalpell unter einem Stereomikroskop abgetrennt, bei 60 °C getrocknet, zerkleinert und homogenisiert. Anschließend wurden die Verhältnisse der stabilen Kohlenstoff- und Sauerstoffisotope mit Hilfe eines Isotopenverhältnismassenspektrometers bestimmt (Abb. 2).

Absolute Isotopenwerte hängen vor allem von den lokalen Standortbedingungen eines Baums ab. Die regionale Witterung überlagert diese Werte. Auf der Basis ermittelter Einheitsskalen für Kohlenstoff und Sauerstoff stellen die Kurven in Abbildung 2 die Mittelwerte der Isotopendaten aller sich jeweils zeitlich überlappenden Bäume dar. Sie lassen somit nur



Kontakt: G. Helle
(gerd.helle@gfz-potsdam.de)



Abb. 1: Fundsituation und archäologische Aufnahme des neolithischen Brunnens von Erkelenz-Kückhoven. Der Brunnen bestand aus mehreren Brunnenkästen, welche aus einer Vielzahl von behauenen Eichenbohlen in Blockbauweise errichtet wurden. (Foto: Th. Vogt, LVR-Amt für Bodendenkmalpflege im Rheinland)

Fig. 1: Excavation site of the neolithic wooden well of Erkelenz, Lower Rhine Embayment, NW-Germany. The well structure consisted of different almost square well casings made of wooden beams from oak trees that grew in the vicinity of a village.

Aussagen über Veränderungen des Witterungsgeschehens zu, erlauben jedoch keine Angaben über absolute Klimagrößen wie beispielsweise die Temperatur.

Das gesamte Zeitintervall von knapp 240 Jahren zeigt für den Verlauf der Kohlenstoffisotope drei voneinander abweichende Intervalle. Im ältesten Abschnitt von 5320 bis etwa 5190 v. Chr. schwanken die Werte im Wesentlichen um einen Mittelwert. Auffallend sind lediglich vier kurze Phasen in den Zeitabschnitten um 5320, 5275, 5220 und 5195, die im Vergleich zum Gesamtintervall für die Vegetationsperiode überdurchschnittliche Feuchten vermuten lassen. Es folgt bis 5150 v. Chr. eine witterungsbedingt eher ruhige Phase. Im letzten Intervall treten auffallend große Schwankungen auf mit zwei deutlichen Minima und zwei Maxima – die stärksten Fluktuationen dieses Vierteljahrtausends. Bemerkenswert sind die innerhalb von weniger als einer Generation auftretenden Umschwünge von vermutlich eher trockenen zu feuchten Verhältnissen von etwa 5126 bis 5113 und 5106 bis 5098 v. Chr. Ähnlich dramatisch könnte eine jeweils unmittelbar anschließende starke Abnahme der Niederschläge verlaufen sein. Mit einiger Sicherheit waren in diesem Zeitabschnitt die witterungsbedingten Veränderungen der Vegetationsperiode an den Baumstandorten von erheblichem Ausmaß. Betrachtet man die Temperaturkurve, so dürfte z. B. in den Jahren 5105 bzw. 5106 v. Chr. unter den vermutlich stark trockenen Verhältnissen mit hohen Temperaturen (obere Kurve der Abb. 2) ein ausgesprochenes Trocken-, eventuell sogar Dürrejahr geherrscht haben.

Der natürliche Standort der Bäume auf einem Lößplateau lässt den Schluss zu, dass die Eichen ihr Wasser im Wesentlichen über Wurzeln aus dem Oberflächen- bzw. Niederschlagswasser bezogen haben. Daher gibt der Sauerstoffisotopenverlauf einen Hinweis auf die Temperaturvariationen in dem untersuchten Zeitabschnitt. Geht man in erster Näherung von dieser

Annahme aus, so dürfte, dem Isotopenverlauf zufolge, von etwa 5270 bis 5175 v. Chr. die Temperatur in der Vegetationsperiode sukzessive abgenommen haben. Die Schwankungen während dieses möglichen Abfalls sind dabei eher gering und die Temperaturabnahme könnte in der Größenordnung von knapp 2 °C gelegen haben. Ab etwa 5150 v. Chr. treten auch bei den Sauerstoffisotopen größere Schwankungen auf, die auf eine Zunahme der Variationsbreite in den Temperaturen der nachfolgenden Vegetationsperioden hinweisen. Offensichtlich gab es deutliche Witterungsschwankungen in den etwa 50 bis 70 Jahren ab 5150 v. Chr. Daraus lässt sich schließen, dass auch die Grundwasserganglinie in diesem Zeitabschnitt erheblich schwankte. Nach den Isotopenkurven für 5105 bzw. 5106 v. Chr. könnte die Grundwasserganglinie einen sehr niedrigen Wert besessen haben und in der nachfolgenden eher feuchten Periode wieder gestiegen sein. Kurzfristige, nur wenige Jahre andauernde Veränderungen des Grundwasserstands um mehrere Meter sind auch aus den letzten Dekaden des 20. Jahrhunderts bekannt.

Die Isotopenkurven weisen darauf hin, dass besonders die Jahre unmittelbar vor dem Bau des Brunnens (5150 bis 5089 v. Chr.) sehr starken klimatischen Schwankungen unterworfen waren, mit sich kurzfristig abwechselnden feuchten und trockenen Perioden. Ein extremes Dürrejahr ist z. B. um 5106/5105 v. Chr. anzunehmen, wo hohe Temperaturen innerhalb der Vegetationsperiode bei gleichzeitig niedrigen Feuchten bzw. Niederschlägen aufgetreten sein könnten.

Ausblick

Die entschlüsselten Klimainformationen der Jahrringe des bandkeramischen Brunnens von Erkelenz-Kückhoven im nordwestdeutschen Tiefland geben für einen relativ kurzen Zeit-

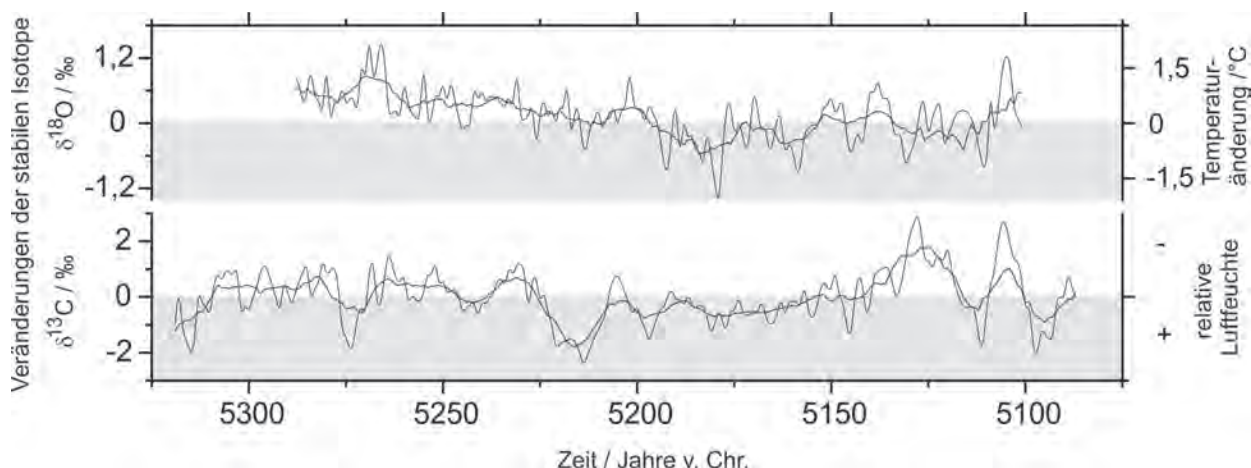


Abb. 2: Variationen der Kohlenstoff- und Sauerstoffisotope als Ausdruck witterungsbedingter Schwankungen kurz vor Errichtung des neolithischen Brunnens von Erkelenz

Fig. 2: Variability of stable carbon and oxygen isotopes from tree rings of oak planks from the Neolithic wooden well of Erkelenz

raum von 239 Jahren einen Einblick in die Schwankungsbreite und Geschwindigkeit der natürlichen Klimadynamik unserer Region. Es hat sich gezeigt, dass die mittlere Temperatur der Wachstumsperiode in einem Zeitraum von 95 Jahren (5270 bis 5175 v. Chr.) um etwa 2 °C abgenommen hat. Daneben konnten auch Klimasprünge festgestellt werden, bei denen innerhalb von 5 bis 10 Jahren Temperaturschwankungen von 1,5 bis 2 °C aufgetreten sind. Solche starken Temperaturveränderungen verbunden mit erheblichen Schwankungen der Luftfeuchte sind u. a. auch für die letzten 20 bis 30 Jahre vor dem Brunnenbau rekonstruiert worden.

Die vorliegende Studie macht einmal mehr deutlich, dass bei der Beurteilung der gegenwärtigen Erderwärmung die natürliche Klimavariabilität bislang unterschätzt wurde (von Storch et al. 2004; vgl. hierzu auch Glaser, 2001). Nur die präzise Kenntnis des Klimas der Vergangenheit kann die Frage beantworten, ob und wie weit die Grenzen der natürlichen Klimadynamik heute bereits durchbrochen sind und welchen Anteil menschliche Treibhausgasemissionen haben.

Die Jahrringe der Eichenbohlen des Erkelenzer Brunnens sind ein kleiner, aber wichtiger Teil eines weltweiten Netzwerks von Klimaarchiven (Baumjahresringe, See- und Meeresablagerungen, Eisbohrkerne). Die Daten dieser Klimaarchive sind eine wichtige Grundlage, um die lokalen und regionalen Auswirkungen der globalen Erwärmung abzuschätzen und Anpassungsstrategien für die moderne Gesellschaft entwickeln zu können. Dem Klimaarchiv „Baumjahresringe“ kommt innerhalb dieses Netzwerks eine besondere Bedeutung zu, da es als direkte Schnittstelle zum menschlichen Lebensraum den einzigartigen Vorteil bietet, Klimainformationen über Regionen mit hoher Bevölkerungsdichte bzw. großer wirtschaftlicher Bedeutung liefern zu können.

Danksagung

Die Verfasser danken G. Reiß, M. Schrimpf, M. Forge, S. Allhoff und D. Pfeffer für ihre Unterstützung bei den umfangreichen Laboruntersuchungen. Besonderer Dank gilt B. Schmidt (Ur- und Frühgeschichte, Univ. Köln) und J. Weiner (LVR-Amt für Bodendenkmalpflege im Rheinland, Bonn, Außenstelle Niedeggen) für ihre Diskussionsbereitschaft.

Literatur

- Dansgaard, W. (1964): Stable isotopes in precipitation. - *Tellus*, 16, 4, 437-468, 10.1111/j.2153-3490.1964.tb00181.x.
- Glaser, R. (2001): *Klimageschichte Mitteleuropas : 1000 Jahre Wetter, Klima, Katastrophen*, Darmstadt, VIII, 227 p.
- Helle, G., Schleser, G. H. (1998): Die Eichenbohlen des neolithischen Brunnens von Erkelenz-Kückhoven als Klimaarchive. - In: Koschik, H. (Ed.), *Brunnen der Jungsteinzeit : internationales Symposium in Erkelenz, 27. bis 29. Oktober 1997*, (Materialien zur Bodendenkmalpflege im Rheinland ; 11), Köln, 271-277.
- Storch, H. von, Zorita, E., Jones, J. M., Dimitriev, Y., González-Rouco, F., Tett, S. F. B. (2004): Reconstructing past climate from noisy data. - *Science*, 306, 5696, 679-682, 10.1126/science.1096109.
- Weiner, J. (1998): Drei Brunnenkästen, aber nur zwei Brunnen: eine neue Hypothese zur Baugeschichte des Brunnens von Erkelenz-Kückhoven. In: Koschik, H. (Ed.), *Brunnen der Jungsteinzeit : internationales Symposium in Erkelenz, 27. bis 29. Oktober 1997*, (Materialien zur Bodendenkmalpflege im Rheinland ; 11), Köln, 95-112.