

Molekulare Indikatoren für die Wasser- und Kohlenstoffkreisläufe der Erde

Dirk Sachse

Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

The water cycle is of paramount importance to human society: shortage of water and intensive droughts have been linked to the downfall of ancient civilizations. At the same time water is an important agent of change on the Earth's surface, removing and transporting vast amounts of sediments from their source to marine sinks. As such, water is the basis of life as well as a pacemaker of the biogeochemical cycles, such as the carbon cycle. Short-term, abrupt changes (10^1 to 10^3 years) in the water cycle have the potential to threaten human societies directly, while long-term changes can affect the global biogeochemical cycles, in particular the carbon cycle. In the Organic Surface Geochemistry Lab (Section Geomorphology) of GFZ we are using biomarker based molecular methods a) to understand the drivers of change in the short-term water cycle during past, abrupt climatic changes; and b) to investigate processes that determine the erosion, transport and burial of organic carbon into long-term geological sinks – processes which are responsible for the relatively stable climatic conditions which have allowed the sustainment of life on Earth. By combining paleoclimatic, geomorphological and organic-geochemical approaches we gain new insights into the stabilizing and destabilizing factors, that control the water and the carbon cycles over various geological timescales.



Der Wasserkreislauf ist von entscheidender Bedeutung für die menschliche Zivilisation. Die Verfügbarkeit von Wasser war seit jeher die Grundvoraussetzung für die Besiedlung von Regionen. Der Niedergang ganzer Gesellschaften, z. B. der Maya in Mittelamerika, wird in Verbindung mit ausgedehnten Dürreperioden gebracht. Zugleich formt Wasser die Erdoberfläche über geologische Zeiträume: es transportiert große Mengen an Sediment und ist somit ein Antreiber der Erosion und der globalen Kreisläufe. Beispielsweise bewegen die Flusssysteme der Erde große Mengen an organischem Kohlenstoff von ihrer Quelle (Pflanzen und Böden) in geologische Senken (marine Sedimente), wo dieser Kohlenstoff unter Umständen für Millionen von Jahren festgelegt werden kann. Das Gleichgewicht zwischen Kohlenstoffproduktion, z. B. in der Biosphäre oder durch die Emission von Kohlendioxid bei Vulkanausbrüchen, und Kohlenstoffspeicherung während der Gesteinsverwitterung und in marinen Senken ist letztlich dafür verantwortlich, dass die Temperatur auf der Erde stabil genug für die Entstehung und Etablierung von Leben war. Aus diesen Beispielen wird deutlich, dass Veränderungen im Wasserkreislauf der Erde sowohl unsere direkten Lebensgrundlagen auf kurzen Zeitskalen (10^1 bis 10^3 Jahre) als auch die globalen Kreisläufe auf langen Zeitskalen (10^6 Jahre) verändern können.

Trotz dieser immensen Bedeutung des Wasserkreislaufs sind Vorhersagen über mögliche Veränderungen in Niederschlagsmustern als Konsequenz des globalen Klimawandels noch recht ungenau. Aufgrund der steigenden CO_2 -Emissionen wird die Temperatur auf der Erde steigen. Wenn es um den Wasserkreislauf geht, speziell regionale Veränderungen aufgrund der Temperaturveränderungen, sind die Modelle in vielen Regionen noch zu unsicher, um klare Empfehlungen für vorbeugende Maßnahmen auszusprechen. Dies bedeutet, dass wichtige Mechanismen noch nicht komplett verstanden sind, die den Wasserkreislauf über geologische Zeitperioden bestimmen. Im organischen Geochemielabor der Sektion „Geomorphologie“ am GFZ arbeiten wir zum einen daran, ein besseres Verständnis der kurzzeitigen Mechanismen von Veränderungen im Wasserkreislauf anhand abrupten, vergangener Klimawechsel zu erreichen. Zum anderen erforschen wir die Prozesse, die die Erosion, den Transport und die Einlagerung von organischem Kohlenstoff in geologische Senken bestimmen und damit eine gewisse Stabilität des Erdklimas über geologische Zeiträume gewährleisten.

Links: Beprobung von Wasser und Sedimenten eines aktiven Mäanders des Rio Bermejo in Nordwestargentinien (Foto: N. Hovius, GFZ)

Left: Sampling sediment and water in an active meander of the Rio Bermejo in northwestern Argentina



Kontakt: D. Sachse
(dirk.sachse@gfz-potsdam.de)



Abb 1: Blätter der auf der Pazifikinsel Hawaii endemischen Pflanze Metrosideros Polymorpha mit ausgeprägter Wachsschicht (Foto: D. Sachse, GFZ)

Fig. 1: Leaves of the hawaiian native plant Metrosideros Polymorpha with a thick wax layer

Dazu verwenden wir neue, molekulare Methoden, um das in Sedimenten von Seen und Flüssen abgelagerte organische Material zu charakterisieren. Die substanzspezifische Messung stabiler Isotope an organischen Substanzen, z. B. den Blattwachsen höherer Pflanzen, erlauben uns paläohydrologische Veränderungen aus Seesedimenten zu rekonstruieren und den Ursprung terrestrischen organischen Materials in Flusssedimenten zu bestimmen.

Molekulare Fossilien als Regenmesser

Durch die Analyse polarer Eiskerne, mariner und terrestrischer Sedimentarchive ist die generelle und langfristige Klimageschichte der Erde gut bekannt. Hingegen ist unsere Kenntnis der regionalen Auswirkungen globaler Klimaveränderungen lückenhaft. Durch die Analyse verschiedenster Parameter an Seesedimenten, der sogenannten „Proxies“, können Informationen über Veränderungen in der Vegetation oder der Temperatur im Einzugsgebiet eines Sees rekonstruiert werden. Aufgrund fehlender direkter Niederschlagsproxies werden hydrologische Veränderungen oft indirekt rekonstruiert: beispielsweise liefern in Sedimenten enthaltene Pollen von Landpflanzen indirekte Informationen über trockenere oder feuchtere Bedingungen. Allerdings können speziell bei abrupten Klimaveränderungen Jahrzehnte vergehen, bis die Vegetation auf solche Änderungen reagiert. Am GFZ nutzen wir Biomarker als direkten hydrologischen Proxy, also organische Substanzen von Algen und Landpflanzen, die im Sediment über geologische Zeiträume erhalten bleiben. Diese „molekularen Fossilien“ können aufgrund ihrer Struktur auf bestimmte Organismengruppen zurückgeführt werden. Beispielsweise sind langkettige Kohlenwasserstoffe, sog. n-Alkane, Hauptbestandteile der Blattwaxse höherer Landpflanzen (Abb. 1).

Das Isotopenverhältnis der stabilen Wasserstoffe (^1H und ^2H oder D, als δD -Wert angegeben) dieser aus Wasserstoff und Kohlenstoff bestehenden n-Alkane spiegelt die Wasserstoffisotopie des Niederschlagswassers wider, welches die Pflanze aufgenommen hat wie auch den Einfluss der Evapotranspiration (Abb. 2). Das Wasserstoffisotopenverhältnis im Niederschlag ist wiederum ein direkter Indikator für die Prozesse und Flüsse des Wasserkreislaufs. In enger Zusammenarbeit mit Pflanzenphysiologen konnten die pflanzenphysiologischen und biochemischen Prozesse beim Einbau des Wasserstoffs in die organischen Substanzen besser bestimmt werden und bilden nun die Grundlage für eine robuste Interpretation sedimentärer Proxies. Als solches können Biomarker δD -Werte aus Seesedimenten als direkter Proxy für hydrologische Veränderungen im Seeinzugsgebiet herangezogen werden.

Verzögerte Reaktion des hydrologischen Kreislaufs auf Abkühlung während Kaltphase der Jüngeren Dryas vor 12 700 Jahren

Mit dieser oben vorgestellten Methode konnte erstmals gezeigt werden, dass eine Abkühlung und die hydrologische Veränderung am Ende der letzten Eiszeit vor 12 700 Jahren nicht zeitgleich abliefen. In den Isotopenverhältnissen grönländischer Eiskerne ist diese Abkühlung aufgezeichnet. Die δD -Werte von Biomarkern aus jahreszeitlich geschichteten und somit exzellent datierbaren Seesedimenten des Meerfelder Maars in der Eifel (Abb. 3) lieferten Hinweise darauf, dass erst 170 Jahre nach Beginn der Abkühlung eine starke Trockenheit in Westeuropa einsetzte (Rach et al. 2014). Aufgrund der Abkühlung dehnte sich die Packeisbedeckung im Nordatlantik weiter südwärts

aus, wodurch sich atmosphärische Zirkulationsmuster veränderten. Die resultierende Trockenheit bedingte letztlich die in der Vegetationsbedeckung nachweisbaren, massiven Umweltveränderungen, die als Jüngere Dryas in West- und Mitteleuropa bekannt sind. Dieses Beispiel macht deutlich, dass signifikante zeitliche und räumliche Unterschiede auch für zukünftige Klimawandelszenarien in der Reaktion des Klimasystems auf eine externe Einwirkung zu erwarten sind. Genaue zeitliche und räumliche Vorhersagen dieser Szenarien sind immens wichtig, um vorhandene Ressourcen optimal zur Vorbeugung einzusetzen. Am GFZ werden wir in den kommenden fünf Jahren im Rahmen des vom Europäischen Forschungsrat (European Research Council, ERC) finanzierten Projekts STEEPclim regionale hydrologische Unterschiede während der letzten abrupten Klimawechsel am Ende der Eiszeit, vor 15 000 bis 11 000 Jahren, über den gesamten europäischen Kontinent quantifizieren, um Mechanismen hydrologischer Veränderungen besser zu verstehen und bestimmte, besonders gefährdete Regionen zu identifizieren.

Blattwache und deren Isotopenzusammensetzung als Tracer für globale Kohlenstoffflüsse

Die stabile Wasserstoffisotopenzusammensetzung dieser Biomarker für terrestrische Organik kann nicht nur als Paläohydrologieproxy eingesetzt werden. In hydrologisch sehr heterogenen Einzugsgebieten oder entlang hydrologischer Gradienten, wie z. B. an den Rändern großer Gebirge, erlauben diese Analysen auch die Bestimmung der Herkunft der Substanzen innerhalb des Gebiets.

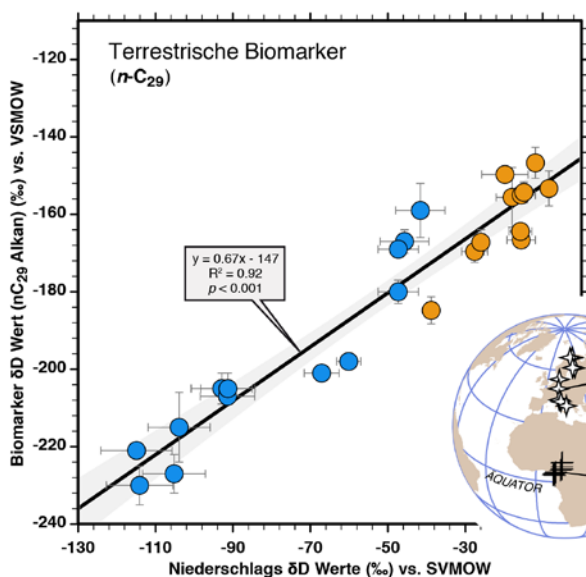


Abb. 2: Wasserstoffisotopenverhältnisse (δD -Wert) eines langkettigen n-Alkanes ($n\text{C}_{29}$) in Seesedimenten aus verschiedenen Klimazonen. Der δD -Wert des aus den Blattwachsen höherer Pflanzen stammenden Kohlenwasserstoffs ist linear mit dem δD -Wert des Wassers, welches die Pflanze aufgenommen hat, korreliert und ermöglicht somit paläohydrologische Rekonstruktionen. (Abb.: GFZ; Daten aus Sachse et al., 2004 (Europäischer Transekt) und Garcin et al., 2012 (Kamerun-Transekt))

Fig. 2: Hydrogen isotope ratios (expressed as δD values) of a long-chain n-alkane ($n\text{C}_{29}$) in modern lake sediments from different climate zones. The δD values of these compounds, originating from the leaf waxes of higher terrestrial plants, are linearly correlated to the δD value of plant source water (i. e. rain) and as such enable paleohydrological reconstructions. (Data from Sachse et al., 2004 (European transect) and Garcin et al., 2014 (Cameroon transect))

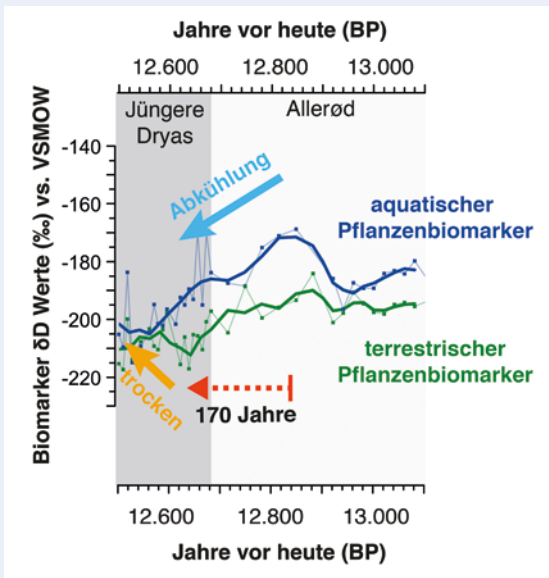


Abb. 3: Verlauf der δD -Werte verschiedener Biomarker zu Beginn der Kaltperiode der Jüngeren Dryas aus jahreszeitlich geschichteten (varvierten) Sedimenten des Meerfelder Maars in der Eifel. Die einsetzende Trockenheit, etwa 170 Jahre nach Beginn der Abkühlung, war für massive Veränderungen im terrestrischen Ökosystem verantwortlich. (Abb.: GFZ; Daten aus Rach et al., 2014)

Fig. 3: δD values of aquatic and terrestrial biomarkers during the onset of the Younger Dryas cold period from annually laminated (varved) sediments of lake Meerfelder Maar in the Eifel region, Western Germany. The onset of dryer conditions occurred ca. 170 years after the onset of cooling and was responsible for massive changes in terrestrial ecosystems. (Dwata from Rach et al., 2014)

Bedingt durch die niedrigere Temperatur, die trockeneren Bedingungen und die unterschiedliche Vegetationsbedeckung in den hochgelegenen Gebieten der Anden oder des Himalaya, haben dort biosynthetisierte Blattwaxe eine andere Wasserstoff- und Kohlenstoff-Isotopensignatur als in den oft feuchten und warmen Gebieten am Fuße der Gebirge. Die Analyse der δD -Werte der terrestrischen Biomarker in vom Fluss abgelagerten Sedimenten am Fuße der Berge erlaubt, unter Kenntnis der modernen Isotopenmuster-Verteilung, Rückschlüsse auf den räumlichen Ursprung der Substanzen. In der Sektion „Geomorphologie“ am GFZ setzen wir klassische und neue geomorphologische Analysen, Fernerkundungsdaten in Kombination mit Biomarker-Isotopenanalysen sowie weitere organisch-geochemische Analysemethoden ein, um die Herkunft des terrestrischen organischen Materials in den großen Flusssystemen der Anden und des Himalaya zu klären (Abb. 4). Zugleich analysieren wir saisonale Unterschiede und versuchen sie mit wechselnden meteorologischen und klimatologischen Bedingungen (z.B. Regen- und Trockenzeit, Schneeschmelze etc.) in Beziehung zu setzen. In weiteren Studien untersuchen wir, ob und wie sich organisches Material während des Transports in diese Flusssystemen verändert, ob beispielsweise unter bestimmten Klimabedingungen die mikrobielle Degradation ein relevanter Prozess ist.

Diese Untersuchungen liefern neue Erkenntnisse über die Prozesse und deren Steuerungsfaktoren, die organischen Kohlenstoff von der Quelle (Vegetation, Boden) in ihre geologische Sen-



Abb 4: Schräggestellte Ablagerungen eines Flusssystemes, das im Miozän (vor etwa 6 bis 7 Mio. Jahren) die sich hebenden nordwest-argentinischen Anden entwässerte (Foto: D. Sachse, GFZ)

Fig. 4: Tilted sedimentary deposits of a river system that drained the northwest Argentinian Andes during the Miocene (6-7 Ma years ago)

ke (marine Sedimente) überführen. Das resultierende moderne Prozessverständnis kann dann genutzt werden, Veränderungen im Budget und in den Flüssen des Kohlenstoffkreislaufs über geologische Zeiträume zu quantifizieren, beispielsweise durch Untersuchung fluvialer Ablagerungen aus der geologischen Vergangenheit während der Hebung eines Gebirges (Abb. 4). In Kombination mit paläohydrologischen und anderen paläoklimatologischen Rekonstruktionen, z. B. an lakustrinen Archiven, können dann die steuernden klimatologischen Faktoren identifiziert werden. Durch die Kombination von paläoklimatischen, geomorphologischen und organisch-geochemischen Daten gewinnen wir neue Erkenntnisse sowohl zu den stabilisierenden als auch zu den destabilisierenden Faktoren, die den globalen Kohlenstoffkreislauf über geologische Zeiträume bestimmen können.

Literatur

- Garcin, Y., Schwab, V. F., Gleixner, G., Kahmen, A., Todou, G., Séné, O., Onana, J.-M., Achoundong, G., Sachse, D. (2012): Hydrogen isotope ratios of lacustrine sedimentary n-alkanes as proxies of tropical African hydrology: Insights from a calibration transect across Cameroon. - *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 79, p. 106–126.
- Rach, O., Brauer, A., Wilkes, H., Sachse, D. (2014): Delayed hydrological response to Greenland cooling at the onset of the Younger Dryas in western Europe. - *Nature Geoscience*, 7, 2, p. 109–112.
- Sachse, D., Radke, J., Gleixner, G. (2004): Hydrogen isotope ratios of recent lacustrine sedimentary n-alkanes record modern climate variability. - *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68, 23, p. 4877–4889.
- Sachse, D., Billault, I., Bowen, G. J., Chikaraishi, Y., Dawson, T. E., Feakins, S. J., Freeman, K. H., Magill, C. R., McInerney, F. A., van der Meer, M. T. J., Polissar, P., Robins, R. J., Sachs, J. P., Schmidt, H.-L., Sessions, A. L., White, J. W. C., West, J. B., Kahmen, A. (2012): Molecular Paleohydrology: Interpreting the Hydrogen-Isotopic Composition of Lipid Biomarkers from Photosynthesizing Organisms. - *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 40, p. 221–249.