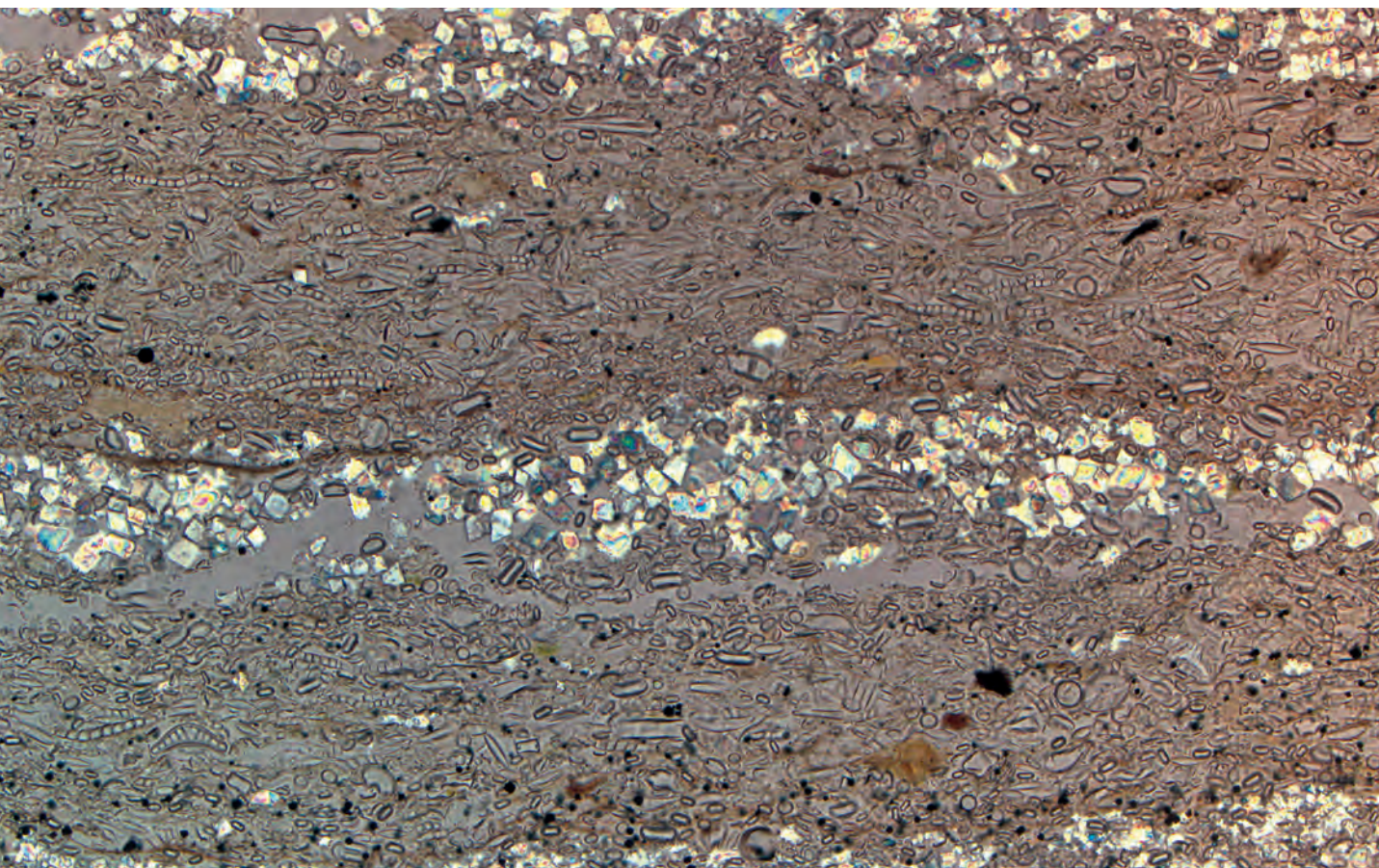


Abrupte Klimawechsel und Sedimentarchive

Achim Brauer

Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

Abrupt change is a major challenge for climate research because understanding the processes of rapid high-amplitude climate shifts is crucial for a better assessment of the likelihood of such changes in future. However, we still lack crucial knowledge about the triggers and dynamics of such shifts as well as about their impacts. It is even not clear yet if there are prognostic symptoms preceding abrupt changes which eventually might aid early warning. Since abrupt shifts in climate did not occur in historical times the only source of information are high resolution geological archives. First evidences show that in geological time scales abrupt climate shifts are more common than expected but mainly occurred during glacial periods. Annually layered lake sediments allow a precise year-by-year measure of the velocity of change and to decipher the underlying processes. In sediments from Lake Meerfelder Maar the rapid temperature decline at the onset of the Younger Dryas 12 700 years ago was decoded using a novel methodology integrating microscope analyses with high resolution element scanning. A distinct shift in the sediment deposition from one year to the next reflects a sudden increase in storminess indicating a re-organisation of atmospheric circulation as a likely trigger. Hence, annually laminated lake records contribute to creating sophisticated knowledge about the nature of rapid climate changes including their triggering mechanisms, velocity, and impact on the human habitat.



Ein abrupter Klimawechsel würde heute eine besondere Herausforderung für die Menschheit darstellen, weil für komplexe Gesellschaften die Zeit, sich auf neue Klima- und Umweltbedingungen einzustellen, sehr kurz wäre und zudem die Vulnerabilität moderner Gesellschaften sehr hoch ist. Deshalb ist dieses Thema sowohl in der wissenschaftlichen als auch der gesellschaftlichen Diskussion von großem Interesse. Noch bestehen große Unsicherheiten, ob wir uns derzeit an der Schwelle zu einem plötzlichen Klimawechsel befinden und was die möglichen Konsequenzen wären. Selbst der Begriff „abrupter“ Klimawandel ist nicht eindeutig definiert und wird oft unterschiedlich ausgelegt. Die Akademie der Wissenschaften der USA hat zwei mögliche Definitionen vorgeschlagen, die verschiedene Aspekte eines abrupten Klimawandels berücksichtigen (National Research Council, 2002):

- (1) Klimawandel, bei dem das Ausmaß größer ist, und der schneller verläuft als der auslösende Antrieb.
- (2) Klimawandel, der so massiv und schnell ist, dass menschliche Gesellschaften nicht schnell genug reagieren können.

Während (2) eine sozialwissenschaftliche Sichtweise hat, die das Wissen impliziert, wie schnell moderne Gesellschaften auf Klimawandel reagieren können, stehen bei (1) die physikalischen Mechanismen für abrupten Klimawandel im Zentrum der Betrachtung. Beide Definitionen implizieren Kenntnisse, über die wir heute noch nicht in ausreichendem Maß verfügen. Das betrifft sowohl die Geschwindigkeit, mit der sich Klimawechsel vollziehen können, als auch die Amplituden, Ursachen und Schwellenwerte, sowie die Auswirkungen auf Ökosysteme und Oberflächenprozesse wie Bodenerosion und Häufigkeiten von extremen Wetterereignissen. Auch wenn der Begriff „abrupt“ impliziert, dass es sich um einen unvermittelten Vorgang ohne Vorwarnung handelt, ist nicht klar, ob es nicht doch prognostische Symptome gibt, die auf einen bevorstehenden Regimewechsel im Klimasystem hinweisen. Ein entscheidender Grund für die bestehenden Wissenslücken ist, dass es in historischen Zeiten keinen plötzlichen Klimawandel gegeben hat und somit präzise Beobachtungen oder gar Messdaten

fehlen. Die einzig mögliche Informationsquelle sind daher geologische Archive, die solche Klimawechsel in der Vergangenheit aufgezeichnet haben. GFZ-Forscherinnen und Forscher stellen sich dieser Herausforderung und nutzen ihre Expertise über hochauflösende Seesedimentarchive um mit modernsten Methoden die Geheimnisse abrupter Klimawechsel zu entschlüsseln und damit einen Beitrag zu einer der wichtigsten Zukunftsfragen unserer Gesellschaft zu liefern.

Hinweise aus Grönland

Die meisten Informationen zu abrupten Klimawechseln stammen von stabilen Sauerstoffisotopen in grönländischen Eiskernen. Diese Daten belegen, dass abrupte Klimawechsel in geologischen Zeiträumen häufiger auftreten als gemeinhin vermutet. Hier sind vor allem die sogenannten Dansgaard-Oeschger-Events zu nennen, die sich zwischen etwa 115 000 und 20 000 Jahren vor heute insgesamt 25 Mal ereignet haben. Dabei kam es in Grönland zu Erwärmungen von 8 bis 16 °C innerhalb einer Dekade und einer daran anschließenden allmählichen Abkühlung. Eine mögliche Erklärung für die Abkühlungsphasen ist der Zustrom von Gletscherschmelzwasser in den Nordatlantik, der die Ozeanzirkulation und damit den Wärmetransport aus den Tropen und Subtropen in den Nordatlantik unterbrochen hat. Das würde auch erklären, dass solch abrupte Klimawechsel nur während eiszeitlicher Klimabedingungen auftreten, während der seit 11 600 Jahren bis heute andauernde warmzeitliche Klimamodus vergleichsweise stabil ist. Für die sehr schnellen Erwärmungen zu Beginn eines Dansgaard-Oeschger-Events gibt es jedoch bis heute keine Erklärung. Da die zugrunde liegenden physikalischen Mechanismen nicht bekannt sind, können auch Klimamodelle Erwärmungen in diesen kurzen Zeiträumen nicht nachbilden. Neue Ergebnisse aus Eiskernen anhand einer neuen Messgröße (Deuterium-Überschuss) zeigen, dass auch Abkühlungsereignisse viel schneller als bisher angenommen verlaufen. Steffensen et al. (2008) konnten in Grönland extreme Klimawechsel innerhalb eines Jahres nachweisen und schließen daraus auf sehr kurzfristige Umstellungen der atmosphärischen Zirkulation in hohen Breiten. Wenn auch bisher nur für polare Regionen und glaziales Klima gezeigt, ist festzuhalten, dass Klimaänderungen innerhalb weniger Jahre möglich sind. Kaum bekannt ist, ob und in welcher Form ähnlich schnelle Klimaänderungen auch in von Menschen besiedelten Regionen auftreten können. Um dieser Frage nachzugehen, bedarf es geologischer Klimaarchive mit vergleichbarer zeitlicher Auflösung wie jahreszeitlich geschichtete Seeablagerungen.

Links: Dünnschliffaufnahme (50 % polarisiertes Licht) von Kalzitwarven aus dem Lago Grande di Monticchio-Sedimentprofil, Süditalien (Alter: 128 000 Jahre)

Left: Thin section image (50 % polarized light) of calcite varves from the Lago Grande di Monticchio sediment record (age 128 000 years)



Kontakt: A. Brauer
(achim.brauer@gfz-potsdam.de)

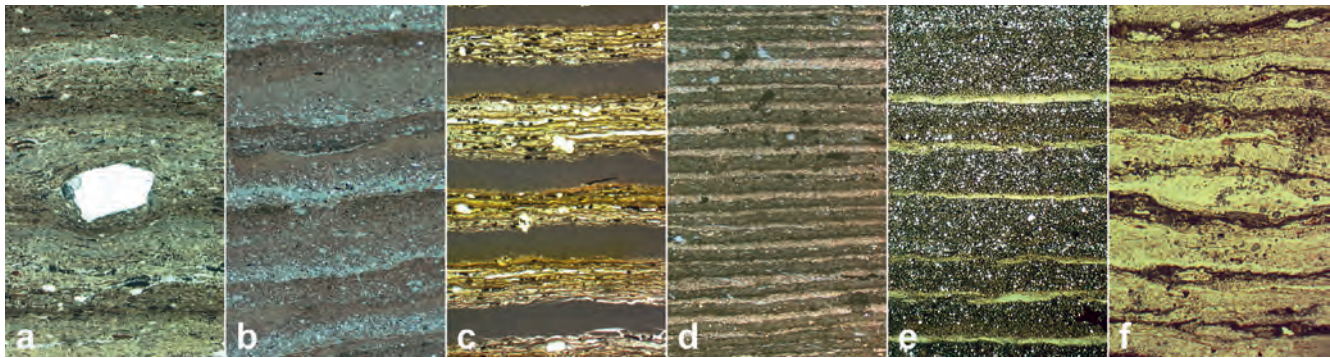


Abb. 1: Mikroskopaufnahmen von varvierten Seesedimenten: (a) Kalzitwarven mit Dropstone, ca. 127 000 Jahre v. h., Bispingen, Paläosee; (b) jährliche Schneeschmelzlagen, ca. 12 500 Jahre v. h., Meerfelder Maar; (c) evaporitische Aragonitwarven, ca. 9000 Jahre v. h., Bajan Nuur, Mongolei; (d) Kalzitwarven, ca. 127 000 Jahre v. h., Lago Grande di Monticchio; (e) Periglazialwarven, ca. 19 000 Jahre v. h., Holzmaar; (f) Sideritwarven, 12 800 Jahre v. h., Meerfelder Maar.

Fig. 1: Microscopic images of varved lake sediments: (a) calcite varves with dropstone, ca. 127 000 years BP, Bispingen palaeolake; (b) annual snow melt layers, ca. 12 500 years BP, Meerfelder Maar; (c) evaporitic aragonite varves, ca. 9000 years BP, Bajan Nuur, Mongolia; (d) calcite varves, ca. 127 000 years BP, Lago Grande di Monticchio; (e) periglacial varves, ca. 19 000 years BP, Holzmaar; (f) siderite varves, 12 800 years BP, Meerfelder Maar.

Jahresgeschichtete Seesedimente

Jahresgeschichtete (warvierte) Seesedimente (Abb. 1) haben ein großes Potential zur Rekonstruktion von Klima- und Umweltveränderungen der Vergangenheit (Brauer, 2004). Diese Sedimente liefern Informationen aus dem Lebensraum des Menschen und ermöglichen durch die Analyse saisonaler Schichten Proxydaten selbst über jahreszeitliche Veränderungen weit zurück liegender geologischer Zeiträume zu generieren. Ein wichtiger Aspekt ist auch die Möglichkeit einer präzisen Datierung durch Auszählung der Jahreslagen. Damit kann nicht nur der genaue Zeitpunkt einer Klimaänderung bestimmt werden, sondern vor allem auch die Dauer und damit die Geschwindigkeit des Wandels. Die Entstehung saisonal bedingter Feinschichtung ist abhängig vom Jahresgang des Klimas, der ebenso die biochemischen und physikalischen Prozesse in einem See steuert, wie auch die Erosionsbedingungen in seinem Einzugsgebiet und damit die externen Sedimenteinträge. Damit die fragile Warven-Feinschichtung nach der Ablagerung erhalten bleibt, dürfen die Sedimente nicht durch windinduzierte Wasserzirkulation oder durch Bodenlebewesen (Bioturbation) durchmischt werden. Mit modernen Analyseverfahren können sehr detaillierte Änderungen der jahreszeitlichen Ablagerung festgestellt werden, aus denen sich dann ein genaues Bild der Klima- und Umweltbedingungen rekonstruieren lässt.

Methoden

Die Untersuchung warvierter Seeablagerungen erfordert aufgrund der geringen Breiten der Jahreslagen von meist weniger als 1 mm spezielle höchstauflösende Analyseverfahren. Am

GFZ wurde deshalb ein neuer integrierter Methodenansatz entwickelt, bei dem mikroskopische Analysen mit geochemischen Scanner-Verfahren kombiniert werden. Dazu werden zunächst 10 cm lange Sedimentblöcke gefriergetrocknet und mit einem speziellen Kunstharz vergossen, um dauerhafte Proben für die weitere Analyse zu erzeugen. Die eingegossenen Proben (Tränklinge) werden der Länge nach in zwei Hälften geschnitten, so dass von einer Hälfte ein Dünnschliff für polarisationsmikroskopische Analysen angefertigt werden kann und parallel dazu an der anderen Hälfte Hauptelementverhältnisse mit einem Mikro-Röntgenfluoreszenz-Scanner (μ -XRF) gemessen werden können (Abb. 2). So werden optische Informationen über Aufbau und Struktur der Jahreslagen mit elementgeochemischen Daten direkt verknüpft. Die μ -XRF Spektrometer-Messungen werden in einer Vakuumkammer durchgeführt, um Strahlungsabsorption in der Luft zu vermeiden. Der Durchmesser des Messstrahls von nur 50 μ m erlaubt es, die Sedimentation eines Jahrs mit bis zu 40 Datenpunkten zu belegen. Mit diesem neuartigen Verfahren ist es möglich, selbst extrem kurzfristige Wechsel im Sedimentationsregime jahreszeitengenau zu detektieren.

Abrupte Abkühlung zu Beginn der Jüngeren Dryas

Die letzten abrupten Klimasprünge ereigneten sich vor etwa 13 000 Jahren am Ende der letzten Eiszeit. Rund 2000 Jahre nach einer schnellen Erwärmung kam es zu einem starken Temperaturabfall, der den Beginn der 1100 Jahre andauernden Kaltphase der Jüngeren Dryas markierte. Anhand von Sauerstoffisotopen an Muschelkrebse aus dem Ammersee wurde ein Temperaturrückgang von etwa 5 °C festgestellt

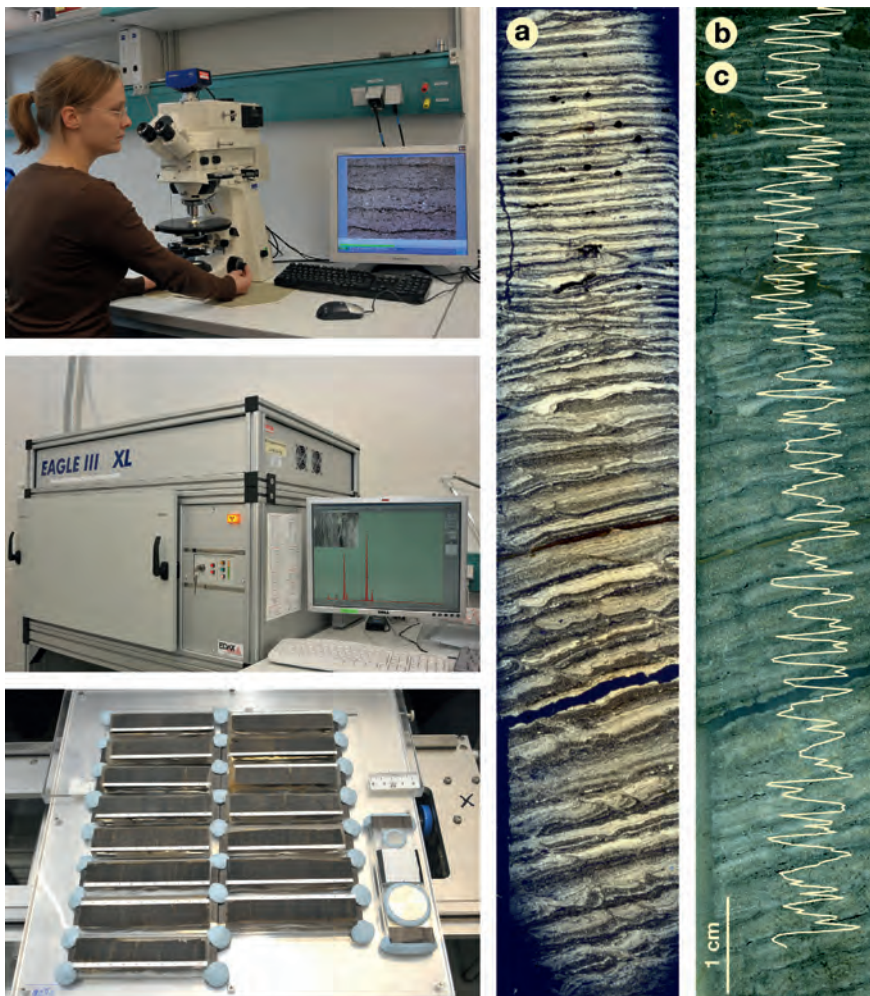


Abb. 2: Mikrofaziesanalyse an 10 cm langen Dünnschliffen (a) (hier: Kalzitwarven in polarisiertem Licht) kombiniert mit Mikro-Röntgenfluoreszenz-Scanning an parallelen Kunstharz-impregnierten Sedimenten (b, c) (hier: Variationen im Kalziumgehalt)

Fig. 2: Micro-facies analyses on 10 cm long thin sections (a, here shown: calcite varves in polarized light) combined with micro X-ray fluorescence scanning on parallel impregnated sediments (b, c) (here: variations in calcium concentration)

(von Grafenstein et al., 1999). Als Ursache für die Abkühlung wird ein plötzlicher Schmelzwasserzufluss in den Nordatlantik angenommen, obwohl bis heute trotz intensiver Suche keine Spuren eines katastrophalen Schmelzwassereintruchs nachgewiesen werden konnten. Für eine detaillierte Untersuchung der klimatischen Veränderungen dieser Zeit haben sich warvierte Sedimente des Meerfelder Maars in der Eifel aufgrund der windgeschützten Lage des Sees 180 m tief in einem Vulkankrater als besonders geeignet erwiesen (Abb. 3). Vor 12 680 Jahren verfünffachte sich plötzlich die Breite der Jahreslagen innerhalb weniger Jahre. Mikrostrukturen sowie die chemische und mineralogische Zusammensetzung der einzelnen Jahreslagen geben Aufschluss über die Ursachen und Prozesse zur Zeit der Abkühlung. Das Sedimentationsgeschehen im See schlägt in kürzester Zeit um von einem anoxischen Milieu mit geringer Zirkulation des Seewassers und der Bildung von Sideritwarven hin zu einem gut durchmischten, produktiven See mit intensiver Wasserzirkulation vor allem im Frühjahr. Für die Zunahme der Warvenbreiten gibt es zwei Gründe:

(1) Massenblüten von Kieselalgen nach dem Eisaufruch im Frühjahr aufgrund einer starken Nährstofffreisetzung aus

dem Sediment infolge starker windgetriebener Durchmischung des Wasserkörpers

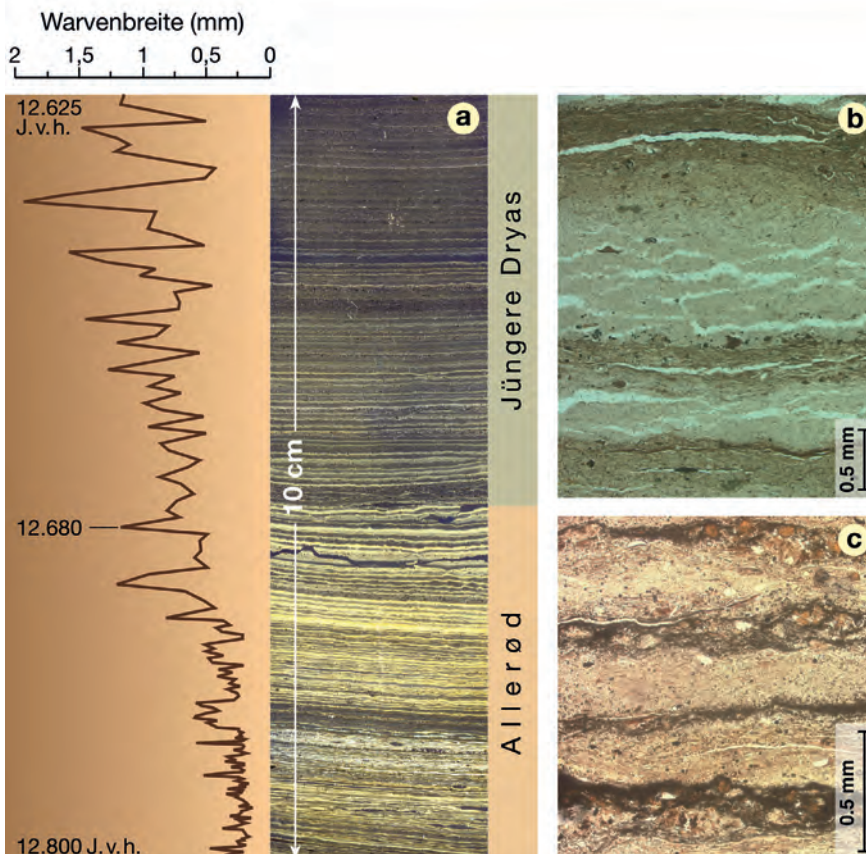
(2) Umlagerung von Sedimenten aus der Uferzone in tiefere Bereiche durch starke Wellentätigkeit bei sinkendem Meeresspiegel

Beides weist deutlich auf plötzlich einsetzende starke Windaktivität hin und damit auf eine Umstellung der atmosphärischen Zirkulation, ähnlich wie es von Steffensen et al. (2008) für Grönland gezeigt wurde. Allerdings ereignete sich nach unabhängigen Datierungen die Veränderung des Windregimes in Grönland 180 Jahre früher als in der Eifel. Da dieser Zeitversatz im Fehlerbereich der Altersbestimmungen liegt, ist noch unklar, ob es sich um zeitversetzte regionale Änderungen handelt, oder um eine isochrone überregionale Änderung. Diese Frage ist von zentraler Bedeutung sowohl für das generelle Verständnis der Mechanismen als auch für eine mögliche Früherkennung abrupter Klimawechsel. Deshalb sind weitere Verbesserungen der Datierung und eine präzise Synchronisation geologischer Archive zwingend erforderlich.



Abb. 3: Oben: Meerfelder Maar mit Bohrplattform (Foto: Dirk Sachse). Unten: Änderung der Warvenbreiten am Beginn der Jüngeren Dryas-Kaltphase, (a) Dünnschliff-Scan (polarisiert) des Übergangs vom warmen Allerød (helle Sideritwarven) in die Jüngere Dryas; Mikroskopaufnahmen (Durchlicht) von Warven der Jüngeren Dryas (b) und des Allerød (c)

Fig. 3: Top: Coring platform on Lake Meerfelder Maar. Bottom: Varve thickness changes at the onset of the Younger Dryas cold phase, (a) Thin section scan (polarized) showing the transition from the warm Allerød (light siderite varves) into the Younger Dryas; microscopic images (plain parallel light) of Younger Dryas varves (b) and Allerød varves (c)



Ausblick

Mit jahresgeschichteten Seesedimenten können Dynamik und Auswirkungen abrupter Klimawechsel im Lebensraum des Menschen genau rekonstruiert werden. Erste Ergebnisse belegen, dass sich starke Klimasprünge in wenigen Jahren ereignen können, und dass dabei die atmosphärische Zirkulation eine größere Rolle spielt als bislang angenommen. Noch sind die vorliegenden Daten jedoch nicht ausreichend, um die Mechanismen abrupter Klimawechsel vollständig zu entschlüsseln. Vor allem die regionale Abdeckung der Daten ist zu dünn, um regionale Änderungen hinreichend sicher zu einem großräumigen Bild zusammen zu führen. Neben der Suche nach geeigneten Sedimenten ist auch eine genaue Synchronisation der Geoarchive notwendig. Dazu bedarf es hochpräziser Datierungen, was eine besondere methodische Herausforderung darstellt. Mit verlässlichen Proxydaten können Klimamodelle geprüft werden, denn erst wenn Modelle in der Lage sind, abrupte Klimasprünge adäquat wiederzugeben, wird es eine Antwort geben, ob wir heute an der Schwelle zu einem schnellen Klimawechsel stehen.

Literatur

- Brauer, A. (2004): Annually laminated lake sediments and their palaeoclimatic relevance - In: Fischer, H., Kumke, T., Lohmann, G., Flöser, G., Miller, H., von Storch, H., Negendank, J. F. W. (Eds.), *The Climate in Historical Times : Towards a Synthesis of Holocene Proxy Data and Climate Models*, (GKSS School of Environmental Research), Springer, 109-128.
- Brauer, A., Haug, G. H., Dulski, P., Sigman, D. M., Negendank, J. F. W. (2008): An abrupt wind shift in western Europe at the onset of the Younger Dryas cold period. - *Nature Geoscience*, 1, 8, 520-523, [10.1038/ngeo0263](https://doi.org/10.1038/ngeo0263).
- National Research Council (2002): *Abrupt Climate Change: Inevitable Surprises*, Washington, DC, xii, 230 p.
- Steffensen, J. P., Andersen, K. K., Bigler, M., Clausen, H. B., Dahl-Jensen, D., Fischer, H., Goto-Azuma, K., Hansson, M., Johnsen, S. J., Jouzel, J., Masson-Delmotte, V., Popp, T., Rasmussen, S. O., Röthlisberger, R., Ruth, U., Stauffer, B., Siggaard-Andersen, M.-L., Sveinbjörnsdóttir, Á. E., Svensson, A., White, J. W. C. (2008): High-resolution Greenland ice core data show abrupt climate change happens in few years. - *Science*, 321, 5889, 680-684, [10.1126/science.1157707](https://doi.org/10.1126/science.1157707).
- von Grafenstein, U., Erlenkeuser, H., Brauer, A., Jouzel, J., Johnsen, S. J. (1999): A mid-European decadal isotope-climate record from 15,500 to 5,000 years B.P. - *Science*, 284, 5420, 1654-1657, [10.1126/science.284.5420.1654](https://doi.org/10.1126/science.284.5420.1654)