REGIO BASILIENSIS 63/1 2022 S. 35-44

Paläoklimarekonstruktionen an Stalagmiten aus der Schweiz

Dominik Fleitmann, Stéphane Affolter & Anamaria Diana Häuselmann

Zusammenfassung
Stalagmiten sind ein recht junges Klimaarchiv, das uns erlaubt, das Klima des Quartärs (<2.66 Millionen Jahre vor heute) mit hoher Genauigkeit zu erforschen. Die Forschungsgruppe Quartärgeologie des Departement Umweltwissenschaften der Universität Basel hat seit ihrer Entstehung vor nahezu drei Jahren neue Labore aufgebaut und innovative analytische Methoden entwickelt, um Stalagmiten aus Höhlen in Europa, dem Mittleren Osten und Asien zu untersuchen. Anhand von zwei Stalagmiten aus der Milandre-Höhle im schweizerischen Jura zeigen wir, wie Schwankungen in der Jahresmitteltemperatur mit Hilfe von Flüssigkeitseinschlüssen rekonstruiert werden können. Die neue Temperaturkurve reicht bis 14'000 Jahre vor heute zurück und zeigt deutlich, dass die heutigen Temperaturen aufgrund der Klimaerwärmung bereits deutlich erhöht sind.

1 Einleitung: Bedeutung der Paläoklimatologie

Das globale Klimasystem ist komplex, und der Einfluss von externen (z. B. Erdbahnparameter, solare Aktivität, Vulkanismus) und internen Antriebsfaktoren (z. B. Treibhausgase, Ozeanzirkulation, Landoberfläche) auf unser Klima ist immer noch nicht vollständig erforscht. Die Rekonstruktion von regionalen bis globalen Klimaschwankungen spielt eine entscheidende Rolle, um unser komplexes Klimasystem besser zu verstehen und um zu beurteilen, inwieweit der Mensch für die jetzigen Klimaveränderungen verantwortlich ist. Detaillierte und lang in der Zeit zurückreichende Klimarekonstruktionen spielen zudem eine wichtige Rolle, um die Genauigkeit von Klimamodellen zu überprüfen. Präzise und detaillierte Klimarekonstruktionen sind außerdem wichtig, um die komplexen Wechselwirkungen zwischen Mensch und Umwelt zu verstehen und zu beurteilen, inwieweit Klimaschwankungen zur Evolution des Menschen oder zum Aufstieg und Fall von Zivilisationen beigetragen haben.

Instrumentelle Wetterdaten erfassen in der Regel die letzten 100 bis 150 Jahre und sind somit viel zu kurz, um die gesamte Bandbreite von Klimaschwankungen zu erfassen. Somit ist es notwendig, Klimainformationen aus sogenannten Klimaarchiven zu gewinnen. Die Paläoklimatologie benutzt hierfür verschiedene Klimaarchive wie zum Beispiel Bäume, See- und Ozeansedimen-

Adresse der Autoren und der Autorin: Dominik Fleitmann, Stéphane Affolter und Anamaria Diana Häuselmann, Quartärgeologie, Departement Umweltwissenschaften, Universität Basel, Bernoullistrasse 32, CH-4056 Basel; E-Mail: dominik.fleitmann@unibas.ch

te, Eisbohrkerne und eben auch Stalagmiten. Diese Archive können klimarelevante Informationen liefern und somit wesentlich zum besseren Verständnis von Klimavariabilität auf kurzen (1–1'000 Jahre) und langen (>1'000 Jahre) Zeitskalen beitragen. Außerdem können diese biologischen, physikalischen und geologischen Archive helfen, extreme Wettereignisse wie Fluten oder Dürren aufzuzeichnen, und erlauben es somit herauszufinden, wie sich die Häufigkeit dieser Ereignisse mit der Zeit verändert hat. Allerdings ist es nicht einfach, präzise Klimadaten aus diesen Klimaarchiven zu gewinnen, und die chemischen und physikalischen Analysemethoden sind zeitaufwendig. Dennoch ist die Paläoklimatologie immer noch ein wichtiger Forschungsbereich, um die Antriebsfaktoren von Klimaschwankungen genau zu kennen. In diesem Beitrag möchten wir anhand eines Beispiels darlegen, wie man Klima- und Umweltbedingungen mit Hilfe von Stalagmiten rekonstruieren kann.

2 Klimarekonstruktionen an Stalagmiten

Es klingt paradox, aber man kann Tropfsteine (Speläotheme) wie z. B. Stalagmiten benutzen, um das Klima an der Oberfläche zu rekonstruieren. Stalagmiten werden gebildet, wenn der Niederschlag versickert und bei seinem Weg durch die Bodenzone mit Kohlendioxid angereichert wird. Durch diesen Prozess wird das Wasser zu einer schwachen Säure, die den im Gestein befindlichen Kalk löst. Wenn es schließlich als Tropfwasser in die Höhle gelangt, kommt es zur Entgasung des im Wasser gelösten Kohlendioxids, so dass schließlich Kalk ausgefällt wird und mit der Zeit ein Stalagmit entsteht. Je nach den klimatischen Bedingungen oberhalb und innerhalb der Höhle schwankt die Wachstumsrate von Stalagmiten zwischen ca. 0.001 und 1 mm pro Jahr.

Wie es der bekannte Schweizer Klimaforscher und Geograph Professor Heinz Wanner in seinem Buch "*Klima und Mensch – Eine 12'000-jährige Geschichte*" in einer Überschrift treffend beschreibt: "*Stalagmiten – wenn das Klima in die Höhle tropft*". In der Tat haben sich Stalagmiten in den letzten Jahren als ein wichtiges Klimaarchiv in der Paläoklimaforschung etabliert (*Fleitmann* et al. 2008). Die Forschungsgruppe Quartärgeologie am Departement Umweltwissenschaften an der Universität Basel ist eine der weltweit führenden Gruppen auf dem Gebiet der Speläothemforschung und hat seit ihrer Gründung Mitte 2019 hochmoderne geologische und geochemische Labore etabliert, um Klima- und Umweltrekonstruktionen an Stalagmiten durchzuführen. Die FG Quartärgeologie forscht zur Zeit hauptsächlich in der Schweiz, in Frankreich, dem Balkan (Serbien und Montenegro) und Mittleren Osten (Türkei, Irak, Iran, Saudi Arabien, Jemen und Oman). In Zusammenarbeit mit internationalen Partnern forscht die Gruppe ebenfalls an Stalagmiten aus Asien (China und Georgien) und Südamerika (Brasilien).

In der Regel enthält nur ein kleiner Teil der Höhlen geeignete Stalagmiten, wobei die besten Proben hoch sind und eine gerade, säulenartige Form haben sollten (Abb. 1). Höhlen kann man, je nach Region und Land, mit Hilfe von Datenbanken und Berichten finden. Weitere Informationen zu Höhlen kann man oftmals von Bauern und Nomaden bekommen, da diese meist eine hervorragende Kenntnis der Region haben. Die Probenahme von Stalagmiten ist denkbar einfach, und es genügen in der Regel Hammer und Meißel, um den Stalagmiten entweder als Ganzes oder in handlichen Stücken mitzunehmen. Hohe und schwere Stalagmiten mit einem größeren Durchmesser werden mit einem starken Akkubohrer beprobt, mit dem ein Bohrkern von bis zu 6 cm Durchmesser und einer Länge von bis zu 2 m genommen werden kann. Im Labor wird der Stalagmit dann entlang der Wachstumsachse aufgesägt und poliert, um die feine Laminierung hervorzuheben und mögliche Wachstumslücken zu erkennen.

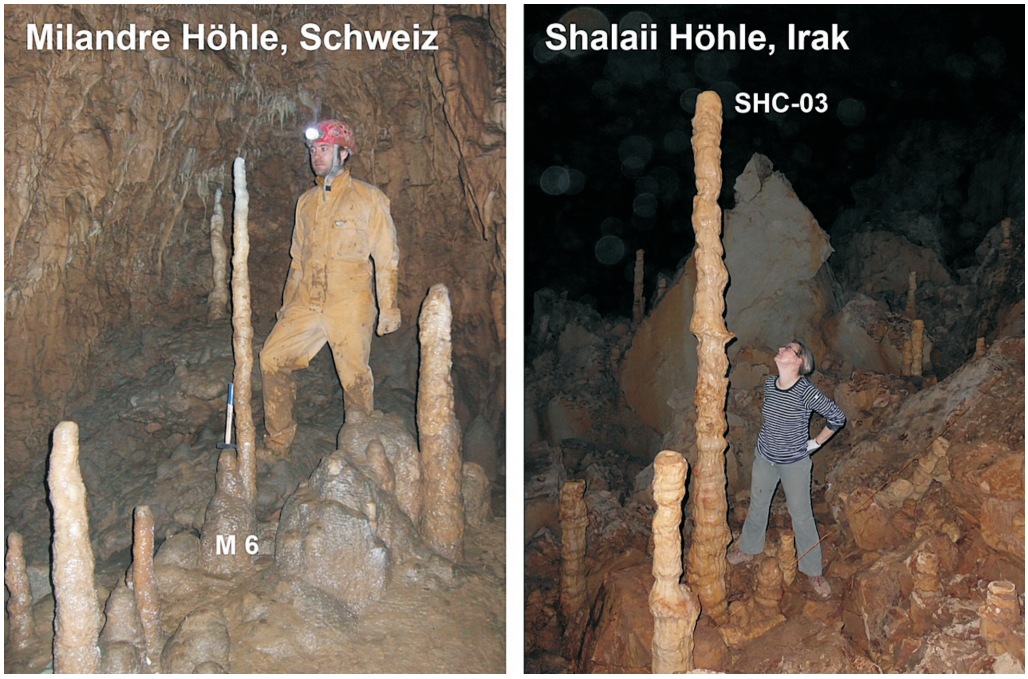

Abb. 1 Stalagmiten aus der Milandre- und Shalaii-Höhle, beide Stalagmiten eignen sich aufgrund ihrer regelmäßigen Form besonders gut für Paläoklimarekonstruktionen.

Danach können an den Stalagmiten eine Reihe von chemischen und physikalischen Untersuchungen mit modernsten Analysemethoden durchgeführt werden (Abb. 2). In einem ersten Schritt gilt es herauszufinden, über welchen Zeitraum der Stalagmit gewachsen ist. Dazu werden Proben für die Altersdatierung entlang der zentralen Wachstumsachse genommen. Für die Datierung von Stalagmiten benutzt man die sogenannte Uran-Thorium-Datierungsmethode, welche auf dem radioaktiven Zerfall von Uran-Isotopen zu Thorium beruht. Mit dieser Methode können bis zu

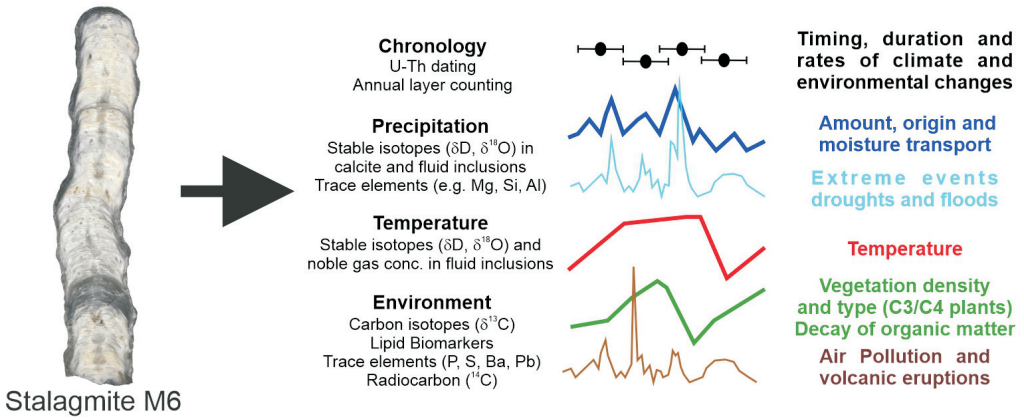

Abb. 2 Schematischer Überblick, wie Klima- und Umweltbedingungen mit Hilfe von Stalagmiten bestimmt werden können.

600’000 Jahre alte Stalagmiten mit einer Genauigkeit von 0.2 bis 2 % datiert werden. Noch ältere Stalagmiten kann man mit der Uran-Blei-Datierungsmethode bestimmen. Die ältesten jemals von uns beprobten Stalagmiten sind 5.5 Millionen Jahr alt und wurden in Saudi-Arabien gefunden (*Fleitmann* et al. 2004). Je nach Länge des Stalagmiten müssen bis zu 100 Datierungen durchgeführt werden. In einem nächsten Arbeitsschritt werden in Abständen von 0.5 bis 5 mm Kalzitproben für die massenspektrometrische Messung von Sauer- und Kohlenstoffisotopen ($\delta^{18}O$ bzw. $\delta^{13}C$) mit einem Mikrobohrer genommen, wobei die Probenmenge zwischen 80 und 500 µg schwankt. Mit Hilfe von Sauer- und Kohlenstoffisotopenverhältnissen am Kalzit können Informationen zum Klima (Temperatur und Regen) gemacht werden und zusätzlich Informationen über klimabedingte Vegetationsveränderungen gewonnen werden (*Fleitmann* et al. 2009).

In vielen Stalagmiten kann man auch dünne jährliche Lagen erkennen, welche man mit einem digitalen Mikroskop (z. B. Keyence VHX-7000) zählen kann, um die Uran-ThoriumDatierungen zu verfeinern. Außerdem wird die Dicke jeder jährlichen Lage bestimmt, wobei diese – wie bei Baumringen – Aufschluss über die Tropfrate bzw. Niederschlagsmenge oberhalb der Höhle geben kann (*Fleitmann* et al. 2004; *Flohr* et al. 2017). Im Weiteren werden an den Stalagmiten die Konzentrationen von bestimmten Spurenelementen mit modernsten Analyseverfahren gemessen, wie z. B. der sogenannten laser ablation-multicollector-inductively coupled plasma-mass spectometry (LA-ICP-MS). So hängt die Konzentration einiger Spurenelemente wie z. B. Strontium, Magnesium und Uran von der Niederschlagsmenge und der Verweildauer des Grundwassers im Karstaquifer ab (*Flohr* et al. 2017). Andere Spurenelemente wie Schwefel oder Brom können aber auch als Indikator für vulkanische Eruptionen benutzt werden (*Badertscher* et al. 2014). Viele Stalagmiten enthalten ausserdem auch organisches Material wie Huminsäuren, Lipid-Biomarker und sogar alte DNA (*Stahlschmidt* et al. 2019). Diese organischen Substanzen können ebenfalls benutzt werden, um klimabedingte Veränderungen von Ökosystemen oberhalb und innerhalb der Höhlen zu dokumentieren.

Seit wenigen Jahren werden auch verstärkt stabile Isotope an Flüssigkeitseinschlüssen in Stalagmiten gemessen (Abb. 3). Im Rahmen des SNF Sinergia Projektes “STALCLIM” wurde von uns eine neue Methode entwickelt, um Wasserisotope an kleinsten Mengen von Wasser (0.4–2 µl), welches aus Flüssigkeitseinschlüssen in den Stalagmiten extrahiert wird, zu messen

Abb. 3 Dünnschliffbild von Flüssigkeitseinschlüssen in Stalagmit M8 aus der Milandre-Höhle.

(*Affolter* et al. 2014, 2015). Diese neue Methode erlaubt uns, die Temperatur zu dem Zeitpunkt zu bestimmen, als das Tropf- bzw. Regenwasser im Kalzit des Stalagmiten eingeschlossen worden ist. Für diese Isotopenmessungen werden kleine Probenblöcke mit einem Gewicht von ca. 1.5 gr mit einer Diamantdrahtsäge aus dem Stalagmiten geschnitten. Diese werden dann in einem Kupferrohr an eine Extraktionslinie angeschlossen, die zu einem sogenannten Cavity Ring-Down Spectrometer (CRDS; Picarro L-2140i) führt. Daraufhin wird die Probe im Kupferrohr bei ca. 140 °C mit Stickstoff "gespült", um die Probe zu trocknen. Nach ca. 1 Stunde wird dann das Stück Stalagmit mit einer Hydraulikpresse zu einem Pulver zerdrückt, und das "befreite" Wasser aus den Flüssigkeitseinschlüssen wird schließlich mit Hilfe des Transportgases Stickstoff zum CRDS überführt, wo dann sowohl Deuterium als auch Sauerstoffisotope gemessen werden. Diese Messungen geben dann direkte Informationen über die Isotopenverhältnisse im Niederschlag und Tropfwasser, als der Stalagmit gewachsen ist. Mit Hilfe dieser neuen analytischen Methode können Paläotemperaturen mit einer hohen Genauigkeit bestimmt werden.

3 Stalagmiten aus der Milandre-Höhle im Jura

In der Schweiz gibt es hunderte bekannte Höhlen (Abb. 4), wobei viele dieser Höhlen während der letzten Eiszeit unter Gletschern begraben worden sind. Allerdings waren die Stalagmiten in den Höhlen vor glazialer Erosion geschützt. Somit können Stalagmiten gefunden und untersucht werden, die einige hunderttausend Jahre alt sind. Die Forschungsgruppe Quartärgeologie am Departe-

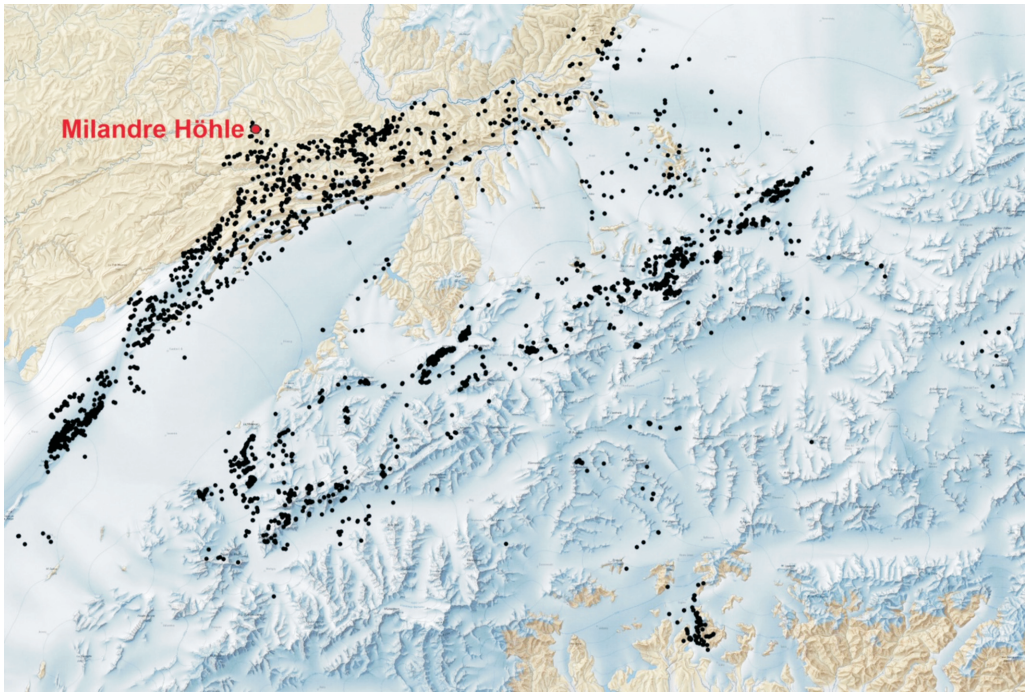

Abb. 4 Karte der Schweiz während des letzteiszeitlichen Maximums (Quelle: Bundesamt für Landestopografie swisstopo, Wabern) vor ca. 21'000 Jahren vor heute. Bekannte Höhlen sind als schwarze Punkte dargestellt. Der rote Punkt zeigt die Position der Milandre-Höhle.

ment Umweltwissenschaften, Universität Basel, hat während der letzten Jahre Stalagmiten aus mehreren Höhlen in der Schweiz beprobt, um die Klima- und Umweltbedingungen in der Schweiz für verschiedene Zeitintervalle zu rekonstruieren. In vielen Höhlen wurden außerdem Datenlogger installiert, die sowohl die Höhlentemperatur als auch Tropfrate aufzeichnen. Diese Arbeit ist wichtig, um herauszufinden, wie schnell und sensitiv die Höhlen auf Temperatur- und Niederschlagsänderungen reagieren. Zusätzlich können auch die Faktoren identifiziert werden, die die geochemischen Eigenschaften von Stalagmiten beeinflussen.

In diesem Beitrag präsentieren wir neue paläoklimatische Rekonstruktionen aus der Milandre Höhle, um exemplarisch zu zeigen, wie Stalagmiten als Klimaarchiv benutzt werden können. Die Milandre Höhle ist eine ehemalige Schauhöhle und liegt in der Nähe von Boncourt nahe der französischen Grenze. Die Höhle enthält im tieferen Teil viele Stalagmiten, die sich hervorragend als Klimaarchiv eignen. Daher wurden bereits mehrere Stalagmiten beprobt, unter anderem auch die Stalagmiten M6 und M8 (siehe Abb. 7). Uran-Thorium-Datierungen zeigen, dass beide Stalagmiten während der letzten 14’000 Jahre gewachsen sind und somit den Übergang von einer Eiszeit in eine Warmzeit (Holozän) erfassen. An diesen Stalagmiten wurden daher sowohl mehr als 3’500 Isotopenmessungen am Kalzit als auch an den Flüssigkeitseinschlüssen gemessen, um Temperaturschwankungen während der letzten 14’000 Jahre zu bestimmen.

Abb. 5 Mitglieder der Forschungsgruppe bei der Probenahme in der Milandre-Höhle. Hier wird eine neue Stalagmitenprobe mit Hilfe eines Akkubohrers genommen. *Bild: Christian Flierl; UNINOVA 136/2020*

4 Wasserisotope im Niederschlag in der Schweiz

Das Verhältnis von schweren und leichten Isotopen des Wasserstoffes (H/D oder Deuterium) und Sauerstoff ($^{16}O/^{18}O$) im Niederschlag hängt von meteorologischen und klimatischen Faktoren ab. Jeder Niederschlag hat somit einen "isotopischen Fingerabdruck", der unter anderem von der Lufttemperatur, der Menge und der Herkunft des Niederschlags abhängig sein kann. Diese Informationen werden dann in Tropfsteinen gespeichert, da sich diese aus Grundwasser bzw. Regenwasser bilden. Vereinfacht gesagt ist ein Stalagmit versteinertes Regenwasser.

Systematische Beprobung und Untersuchungen an Niederschlägen in der Schweiz zeigen, dass die Isotopenzusammensetzung des Niederschlags stark von der Lufttemperatur beeinflusst wird (*Schotterer* et al. 2010). Eigene Messungen von Niederschlägen an der meteorologischen Station Fahy, ca. 8 km von der Milandre-Höhle entfernt, zeigen in der Tat eine deutliche Abhängigkeit von der Lufttemperatur zum Zeitpunkt des Niederschlags (Abb. 6; *Affolter* et al. 2019). Diese Informationen werden dann im Grundwasser gespeichert, wobei die Isotopenzusammensetzung des Wassers im Karstaquifer oberhalb der Milandre-Höhle einem mehrjährigen Mittelwert aller Niederschlagsereignissen oberhalb der Höhle entspricht, wobei die Grundwasserneubildung von Herbst bis Frühjahr am höchsten ist. Daher sind die stabilen Isotope in den Flüssigkeitseinschlüssen der Stalagmiten aus der Milandre-Höhle ein guter Indikator für die gemittelte Jahrestemperatur und können mit Hilfe der linearen Abhängigkeit zwischen Wasserisotopen im Regen und der Lufttemperatur berechnet werden.

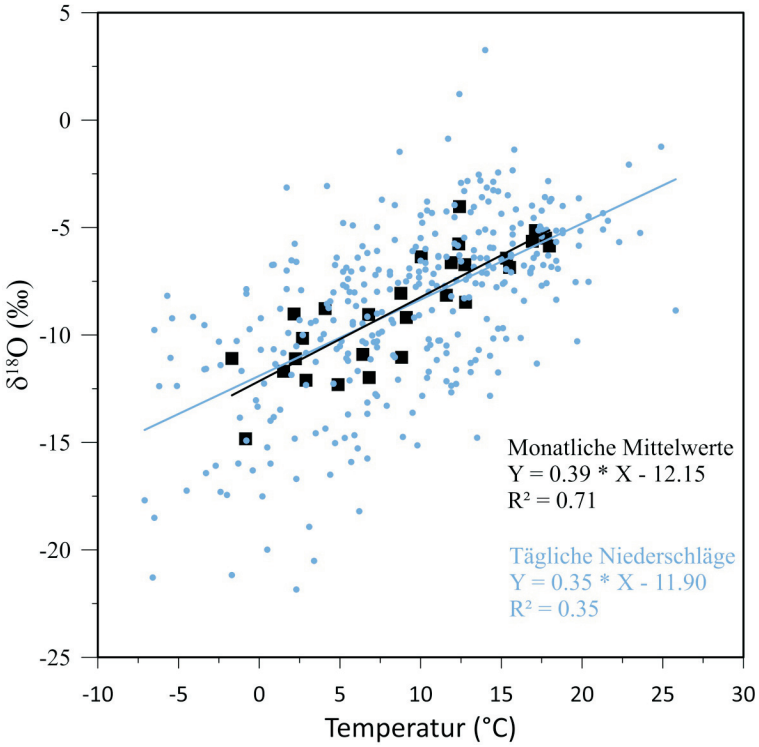

Abb. 6 Korrelation von Wasserisotopen (hier $\delta^{18}O$) in Regen mit Temperatur für Fahy in der Nähe der Milandre-Höhle (nach *Affolter* et al. 2015).

5 Temperaturschwankungen der letzten 14'500 Jahre in der Westschweiz

Mit Hilfe von Deuteriummessungen an den Flüssigkeitseinschlüssen konnten dank der temperaturabhängigen Fraktionierung im Niederschlag die Paläotemperaturen für die letzten 14'000 Jahre berechnet werden. Die Rekonstruktion ist in Abb. 7 als sogenannter MC-FIT (Milandre Cave-Fluid Inclusion Temperature) dargestellt. Im Gegensatz zu anderen auf biologischen Faktoren (Baumringe, Pollen oder Mückenlarven) beruhenden Temperaturrekonstruktionen, welche es nur erlauben, Sommertemperaturen zu ermitteln, ist der neue MC-FIT-Datensatz ein Indikator für die Jahresmitteltemperatur.

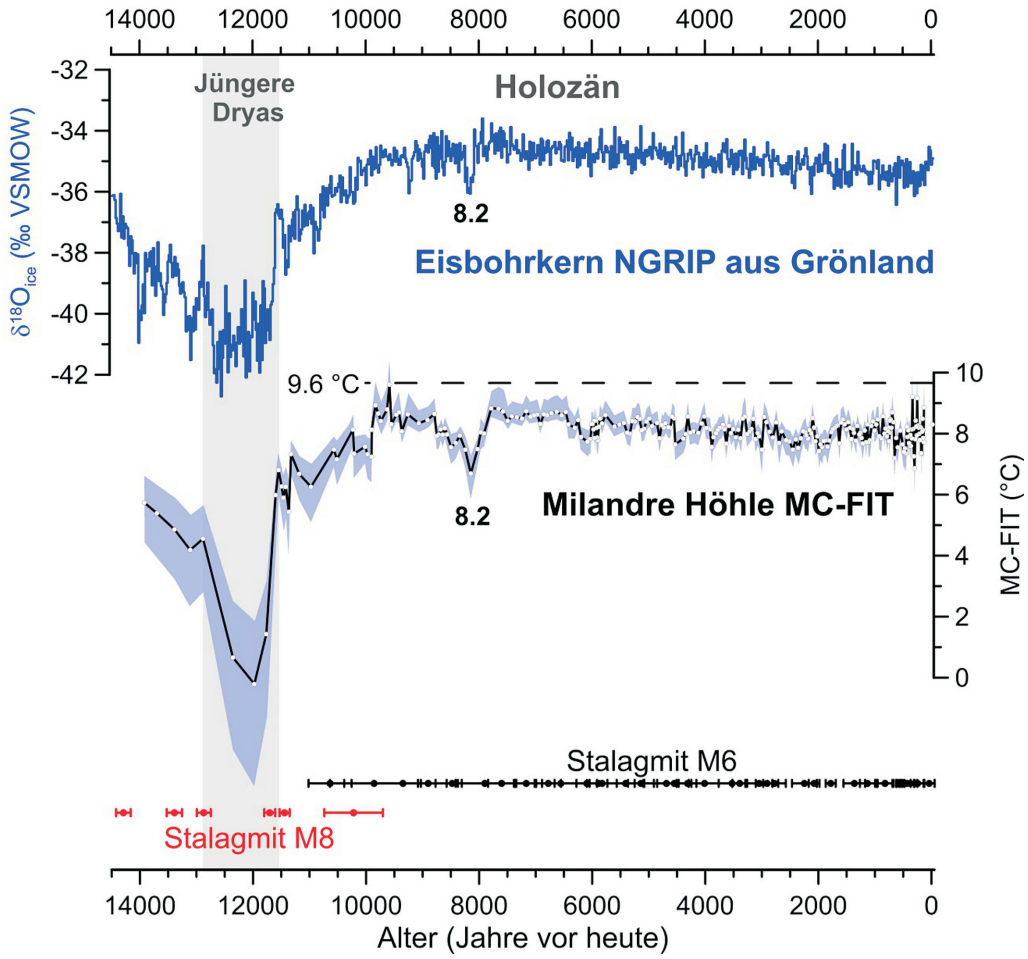

Abb. 7 Rekonstruktion der Jahresmitteltemperatur der letzten 14'000 Jahren vor heute über der Milandre-Höhle. Der blaue Bereich zeigt die Unsicherheiten an. Die gestrichelte Linie markiert die heutige Jahresmitteltemperatur oberhalb der Höhle. Die Punkte mit Fehlerbalken zeigen die Uran-Thorium-Alter mit ihren Datierungsfehlern (2-sigma). Zum Vergleich ist auch die Sauerstoffisotopenkurve des NGRIP Eisbohrkernes aus Grönland gezeigt (nach *Johnsen* et al. 2001).

Gemäß der Datierungen begannen beide Stalagmiten vor ca. 14'000 Jahren zu wachsen, also nach dem Höhepunkt der letzten Eiszeit zwischen 26'000 und 19'000 Jahren vor heute. Mit dem Abschmelzen der großen Eispanzer auf der nördlichen Hemisphäre stiegen die Temperaturen rasch an. Gemäß unserer MC-FIT-Kurve lag die gemittelte Jahrestemperatur vor bis ca. 12'600 Jahren vor heute zwischen 6 und 4.5 °C. Zwischen ca. 12'700 und 11'570 Jahren ist eine deutliche Abnahme der Temperatur um ca. 4 bis 5 °C erkennbar. Dieser Zeitintervall markiert die sogenannte "Jüngere Dryas", die durch einen abrupten Kälterückfall und erneutes Wachstum der Gletscher auf der nördlichen Halbkugel charakterisiert ist. Diese erneute Kältephase wurde durch eine Abschwächung der sogenannten Thermohalinen Zirkulation im Nordatlantik hervorgerufen, wodurch weniger Wärme durch den Golfstrom nach Norden transportiert wurde. Nach heutigem Kenntnisstand ist die Jüngere Dryas durch den abrupten Eintrag von einem großen Volumen an Schmelzwasser in den Nordatlantik verursacht worden. Diese Abkühlung findet man ebenfalls in Eisbohrkernen in Grönland (Abb. 7), wo die Temperaturen während der Jüngeren Dryas um ca. 12 °C einbrachen (*Johnsen* et al. 2001). Nach dem Ende der Jüngeren Dryas steigen die Temperaturen jedoch rasch an, und die Jahresmitteltemperatur erreicht einen Wert von ca. 8 °C um 10'000 Jahren vor heute. Zwischen 10'000 und 6'500 Jahren, dem sogenannten Holozänen Klimaoptimum, schwankt die Jahresmitteltemperatur um einen Wert von 8.5 °C. Allerdings gibt es vor 8'200 Jahren vor heute nochmals eine abrupte Abkühlung von ca. 1.5 °C, den sogenannten "8'200 year cold event" (*Alley* et al. 1997). Wie die Jüngere Dryas wurde auch dieses ca. 160 Jahre andauernde Klimaereignis durch eine Abschwächung der Thermohalinen Zirkulation im Nordatlantik als Folge eines katastrophalen Eintrags von Schmelzwasser in den Nordatlantik ausgelöst. Dieses Klimaereignis führte auf der gesamten Nordhalbkugel zu einer Abkühlung von 2 bis 3 °C innerhalb von ca. 4 bis 5 Jahren (*Cheng* et al. 2009). Ab ca. 6'500 Jahren vor heute ist eine kontinuierliche Abnahme der Jahresmitteltemperatur um ca. 1 °C zu beobachten. Dieser langfristige Trend ist ebenfalls im Eisbohrkern NGRIP aus Grönland sichtbar und wird durch Veränderungen in den Erdbahnparametern und der damit verbundenen Umverteilung der Sonneneinstrahlung auf der nördlichen Hemisphäre hervorgerufen. Unsere neue MC-FIT-Kurve zeigt ebenfalls, dass die heutige Jahresmitteltemperatur von ca. 9.6 °C (1960–2019) zu keinem Zeitpunkt während der letzten 14'000 Jahren erreicht worden ist. Es wird somit klar, dass der Klimawandel auch die Schweiz besonders hart getroffen hat und die jetzige Erwärmung nicht mehr im Bereich der natürlichen Klimaschwankungen liegt, zumindest nicht im Vergleich zu den letzten 14'000 Jahren.

Literatur

Affolter S., Fleitmann D. & Leuenberger M. 2014. New-on-line method for water isotope analysis of speleothem fluid inclusions using laser absorption spectroscopy (WS-CRDS). *Climate of the Past* 10: 1291–1304.

Affolter S., Häuselmann A.D., Fleitmann D., Häuselmann P. & Leuenberger M. 2015. Triple isotope (δD, $\delta^{17}O$, $\delta^{18}O$) study on precipitation, drip water and speleothem fluid inclusions for a central European cave (NW Switzerland). *Quaternary Science Reviews* 127: 73–89.

Affolter S., Häuselmann A., Fleitmann D., Edwards L.R., Cheng H. & Leuenberger M. 2019. Central Europe temperature constrained by speleothem fluid inclusion water isotopes over the past 14,000 years. *Science Advances.* doi: 10.1126/sciadv.aav3809.

Alley R.B., Mayewski P.A., Sowers T., Stuiver M., Taylor K.C. & Clark P.U. 1997. Holocene climatic instability: A prominent, widespread event 8200 yr ago. *Geology* 25: 483–486.

Badertscher S., Borsato A., Frisia,S., Cheng H., Edwards R. L., Tüysüz O. & Fleitmann D. 2014. Speleothems as sensitive recorders of volcanic eruptions – the Bronze Age Minoan eruption recorded in a stalagmite from Turkey. *Earth and Planetary Science Letters* 392: 58–65.

Cheng H., Fleitmann D., Edwards R.L., Wang X.F., Cruz F.W., Auler A.S., Mangini A., Wang Y.J., Burns S.J. & Matter A. 2009. Timing and structure of the 8.2 ky event inferred from $\delta^{18}O$ records of stalagmites from China, Oman and Brazil. *Geology* 37. doi: 10.1130/G30126A.1.

Fleitmann D., Burns S. J., Neff U., Mudelsee M., Mangini A. & Matter A. 2004. Paleoclimatic interpretation of high-resolution oxygen isotope profiles derived from annually laminated speleothems from Southern Oman. *Quaternary Science Reviews* 23: 935–945.

Fleitmann D., Cheng H. Badertscher S., Göktürk O.M., Mudelsee M., Fankhauser A., Pickering R., Edwards R.L., Matter A., Kramers J. & Tüsyüz O. 2009. Timing and climatic imprint of Dansgaard-Oeschger events in stalagmites from Northern Turkey, *Geophysical Research Letters*. doi:10.1029/2009 GL040050.

Fleitmann D., Treble P., Cruz Jr. F., Cole J. & Cobb K. 2008. White paper on "Speleothem-based climate proxy records". *Paleoclimate Uncertainties Workshop*, Trieste 2008. Online erhältlich: https://www.researchgate.net/publication/25124 2681_White_paper_on_Speleot hem-based_clima te_proxy_records [Eingesehen am 12.03.2022]

Flohr P., Fleitmann D., Zorita E., Sadekov A., Cheng H., Bosomworth M., Edwards L., Matthews W. & Matthews R. 2017. Late Holocene droughts in the Fertile Crescent recorded in a speleothem from northern Iraq. *Geophysical Research Letters* 44. doi: 10.1002/2016GL071786.

Johnsen S.J., Dahl-Jensen D., Gundestrup N., Steffensen J.P., Clausen H.B., Miller H., Masson-Delmotte V., Sveinbjornsdottir A.E. & White J. 2001. Oxygen isotope and palaeotemperature records from six Greenland ice-core stations: Camp Century, Dye-3, GRIP, GISP2, Renland and NorthGRIP. *Journal of Quaternary Science* 16: 299–307.

Schotterer U., Schürch M., Rickli R. & Stichler W. 2010. Wasserisotope in der Schweiz. *Gas-Wasserfach, Wasser-Abwasser* 12: 1073–1081.

Stahlschmid M.C., Collin T.C., Fernandes D.M., Bar-Oz G., Belfer-Cohen A., Gao Z., Jakeli N., Matskevich Z., Meshveliani T., Pritchard J.K., McDermott F. & Pinhasi R. 2019. Ancient Mammalian and Plant DNA from Late Quaternary Stalagmite Layers at Solkota Cave, Georgia. *Scientific Reports* 9: 6628.