

Tim Nahtz, Philipp Römer, Jan Esper

Baumjahrringe als Indikatoren von Umweltveränderungen

Baumjahrringe sind wertvolle Indikatoren, die detaillierte Einblicke in vergangene Umweltveränderungen ermöglichen und sich an der Schnittstelle verschiedener Wissenschaftsdisziplinen etabliert haben. Neben klassischen Stellvertreterdaten (Proxies) wie der Jahrringbreite und maximalen Spätholzdichte finden zunehmend neue Proxies aus der mikroskopischen Holz Anatomie und der Isotopenchemie Anwendung, um Rückschlüsse auf frühere Umweltzustände zu ziehen. In diesem Beitrag geben wir einen Überblick über aktuelle Fragestellungen und Messmethoden dendrochronologischer Forschung.

Mit hoher Gewissheit war 2023 der wärmste nord-hemisphärische Sommer der letzten 2000 Jahre (Esper et al. 2024). Solche Aussagen unter Einbezug von Zeiträumen vor Beginn instrumenteller Aufzeichnungen können nur anhand von Umweltarchiven getroffen werden. Zu den klimatologisch bedeutendsten Archiven gehören Eisbohrkerne, Korallen, Stalagmiten, See- und Ozeansedimente sowie Baumjahrringe. Während all diese natürlichen Klimaarchive wertvolle Informationen über die Umweltbedingungen zur Zeit ihrer Entstehung speichern, ermöglichen Baumjahrringe die Rekonstruktion vergangener Umweltzustände mit jährlicher Auflösung.

Fenster zur Erdgeschichte

Bäume, die außerhalb der Tropen wachsen, bilden in der Regel jährlich einen Jahrring aus. Zu Beginn der Vegetationsperiode entsteht das sogenannte Frühholz, das durch große Zellen mit dünnen Zellwänden gekennzeichnet ist und den Wassertransport sicherstellt. Im späteren Verlauf der Wachstumsphase wird das sogenannte Spätholz gebildet, das aus kleineren Zellen mit dickeren Zellwänden besteht und die mechanische Stabilität des Baums unterstützt. Wenn die Mindestanforderungen an Temperatur, wie etwa im mitteleuropäischen Winter, unterschritten werden, kommt das Wachstum zum Erliegen. Die jahreszeitlich bedingten Veränderungen der Witterungsbedingungen führen zu einer scharfen Abgrenzung zwischen den kleinlumigen Zellen

des Spätholzes und den großlumigen Zellen des Frühholzes im Folgejahr (Schweingruber 2012).

Das Wachstum eines Baumes und die Beschaffenheit eines Jahrrings hängen von den Klima- und Umweltbedingungen an seinem Standort ab. Günstige Wachstumsbedingungen führen in der Regel zu breiten, ungünstige zu schmalen Jahrringen (Schweingruber 2012). In großen Höhenlagen und hohen Breiten ist das Baumwachstum insbesondere von der Temperatur abhängig, während in ariden Gebieten, die Abhängigkeit von Wasser am stärksten ausgeprägt ist. Daher eignen sich „Extremstandorte“ besonders gut zur Rekonstruktion wachstumslimitierender Klimavariablen. An solchen Standorten beeinflusst das gleiche Klimaelement alle Bäume erheblich. Dies führt zur Ausprägung einheitlicher Wachstumsmuster, welche die Synchronisierung individueller Wachstumskurven ermöglichen (Schweingruber 2012).

Diese Synchronisierung ist ein Kernelement der Dendrochronologie (griechisch *déndron* = Baum) und zielt darauf ab, jedem Jahrring sein genaues Entstehungsjahr zuzuordnen (Cherubini et al. 2004). Dazu werden zunächst die Jahrringbreiten jeder Probe gemessen. Die resultierende Abfolge ergibt ein spezifisches Muster, das dem Wachstumsmuster der Bäume entspricht. Anhand dieses Musters kann auch totes oder subfossiles Holz datiert werden, wodurch sich Zeitreihen deutlich über die eigentliche Lebensspanne der Bäume hinaus, teilweise über mehrere Jahrtausende, erweitern lassen. Aus den synchronisierten Einzelkurven wird dann mithilfe statistischer Verfahren eine für den Standort oder die Region repräsentative Kurve, die sogenannte Chronologie, gebildet. Solche Chronologien ermöglichen es, Schwankungen des limitierenden Wachstumsfaktors zu rekonstruieren, je nach Länge der Chronologie über mehrere Jahrhunderte bis Jahrtausende (Esper et al. 2024).

Vielfalt der Baumringe

Der wichtigste und am schnellsten messbare Proxy in der Dendrochronologie ist die Jahrringbreite. Nach der Entnahme kleiner Holzkerne (vgl. Abb. 1a), wird die Jahrringbreite durch Bildvergrößerungsverfahren wie Mikroskopie oder hochauflösende Scans in Kombination mit computergestützter Software für jeden Jahrring einer Holzprobe bestimmt. Um eine höhere saisonale Auflösung zu

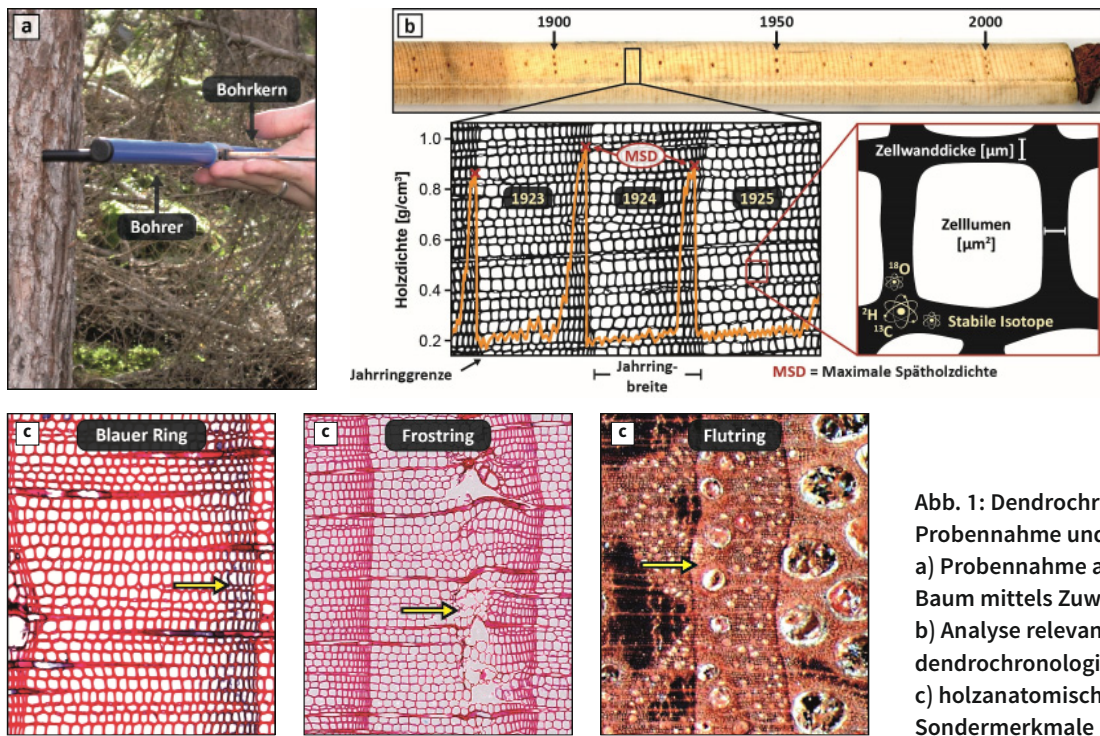


Abb. 1: Dendrochronologische Probenahme und Analyse. a) Probenahme am lebenden Baum mittels Zuwachsbohrer, b) Analyse relevanter dendrochronologischer Proxies, c) holzanatomische Sondermerkmale

erzielen, können zusätzlich die Breiten von Früh- und Spätholz einzeln gemessen werden.

Ein wesentlich aufwendigerer und entsprechend kostspieliger Prozess ist die Erfassung von Dichteparametern, wie z. B. die maximale Spätholzdichte (vgl. Abb. 1b). Zur Messung der Spätholzdichte werden die Proben zunächst im korrekten Faserwinkel zu Plättchen verarbeitet, um einen optimalen Querschnitt durch den Stamm zu garantieren, bevor sie geröntgt werden. Anschließend wird die Dichte der Holzproben anhand von Röntgenbildern bestimmt. Dichtemessungen weisen meist höhere Korrelationen mit Temperaturen auf als Jahringbreite, was sie zu einem wertvollen Proxy innerhalb der Dendroklimatologie macht. In der jüngeren Vergangenheit wurden zudem günstigere Methoden zur Dichtebestimmung entwickelt, wie die Blau-Intensitäts-Methode. Hierbei werden hochaufgelöste Scans der Kerne erstellt und mittels spezieller Software wird die Menge des reflektierten blauen Lichts gemessen.

Die relativ neue Methode der quantitativen Holzanatomie erlaubt Analysen auf Zellebene. Anhand von Dünnschnitten und mindestens 20-fach vergrößerter Scans können computergestützte Analysen an einzelnen Holzproben durchgeführt werden, um die Zellanzahl, die Zellwanddicke, die Größe des Zellinnenraums oder andere hochaufgelöste Parameter zu bestimmen. Diese detaillierten Informationen ermöglichen die Bearbeitung spezifischer ökologischer oder klimatologischer Fragestellungen (Björklund et al. 2023).

Ein weiteres, zunehmend wichtiger werdender dendrochronologischer Proxy sind stabile Isotope. Im Gegensatz zu radioaktiven haben stabile Isotope einen beständigen Atomkern und zerfallen nicht, wodurch ihre Mengenverhältnisse Um-

weltinformationen über Jahrtausende speichern können. Darüber hinaus bieten sie den Vorteil, dass sie standortunabhängiger sind als die zuvor genannten Proxies. Stabile Isotope können dekadisch sowie inter- und intra-annuell bestimmt werden. Für die beiden letzteren Varianten wird jeder Jahring individuell separiert, entweder als Ganzes oder nur bestimmte Frühholz- bzw. Spätholzbereiche. Anschließend werden die Verhältnisse verschiedener Isotope mittels Massenspektrometrie bestimmt. Besonders interessant sind dabei stabile Kohlenstoff- ($\delta^{13}\text{C}$) und Sauerstoffisotope ($\delta^{18}\text{O}$), da sie sich gut für klimatologische Rekonstruktionen eignen (Torbensohn et al. 2023a, Büntgen et al. 2021).

Zusätzlich gibt es Sondermerkmale, die vor allem in der Landschaftsrekonstruktion genutzt werden. Bei ringporigen Laubbaumarten wie Eichen oder Eschen können Überflutungen während der Wachstumsphase zur Ausbildung sogenannter Flutringe führen (vgl. Abb. 1c). Kommt es bei Hochwasser zu einer Entlaubung des Baumes, beginnt die Ringbildung während der Vegetationsperiode von neuem, und es entsteht eine neue Reihe großer Tracheen, die für den Wassertransport zuständig sind. Steht der Baum hingegen über längere Zeit im Wasser, bilden sich deutlich kleinere Tracheen aus (St. George und Nielsen 2000). Starke Kälteeinbrüche während der Wachstumsphase können Frostringe erzeugen, da frostbedingte Schäden im Kambium die Zellentwicklung stören (vgl. Abb. 1c). Ein weiteres Sondermerkmal sind sogenannte blaue Ringe. Ein plötzlicher Kälteeinbruch zum Ende der Vegetationsperiode kann dazu führen, dass Zellen im Spätholz nicht lignifiziert werden. Bei der Einfärbung von Dünnschnitten, die für die



Abb. 2: Interdisziplinäre Wissenschaftsfelder der Dendrochronologie

Grafik: Tim Nehtz, Mainz

quantitative Holzanatomie benötigt werden, erscheint dieser Ring dann anstatt wie erwartet rot in blauer Farbe (Piermattei et al. 2015).

Beispiele aus der Baumringforschung

Um den Anwendungsbereich von Jahrringen als Indikatoren für natürliche und anthropogene Umweltveränderungen zu veranschaulichen, werden im Folgenden drei Beispiele zum Einfluss langjähriger Luftverschmutzung, historischer Hochwasser und agrarklimatischer Veränderungen vorgestellt.

Luftverschmutzung und Waldsterben in Sibirien
 In einer Studie von Kirdeyanov et al. (2020) wurden Jahrringe von borealen Nadelbäumen genutzt, um das Ausmaß und die Ausbreitung der Verschmutzung durch die Schwerindustrie im russischen Norilsk zu ermitteln (vgl. Abb. 3). Der menschliche Einfluss hat dort dazu geführt, dass bis zu 100 % der Bäume auf einer Fläche von 24000 km² abgestorben sind. Die hohe lokale Luftverschmutzung seit den 1940er-Jahren schwächt die Sonneneinstrahlung und führt zu einer reduzierten Photosyntheseaktivität, einem Phänomen, das großräumig als „arktische Verdunklung“ bekannt ist.

Die Autorinnen und Autoren haben um die sibirische Stadt Norilsk (vgl. Abb. 3a), die für ihre metallverarbeitende Schwerindustrie bekannt ist, lebende sowie tote Bäume beprobt. Anschließend haben sie die Jahrringe vermessen und synchronisiert, um die Sterbejahre der Bäume zu bestimmen. Dabei konnte festgestellt werden, dass das Baumsterben im Jahr 1938, dem ersten Jahr der Nickelverhüttung, begann. Die Sterblichkeit nahm mit der Eröffnung einer neuen Mine in der zweiten Hälfte der 1960er-Jahre und dem damit verbundenen Anstieg der Schwefeldioxidemissionen deutlich zu. Bis schließlich zu Beginn der 1980er-Jahre alle Lärchen innerhalb eines Streifens von bis zu 69 km südöstlich von Norilsk abgestorben waren (vgl. Abb. 3b, c). Mit zunehmender Entfernung und außerhalb dieses Streifens stieg der Anteil lebender Bäume. Die beprobten Standorte westlich der Stadt blieben weitgehend unbeeinflusst, da die Verschmutzung aufgrund der vorherr-

Dendroklimatologie	Rekonstruktion vorinstrumenteller Klimabedingungen durch Analyse unterschiedlicher Jahrringparameter wie Jahrringbreite oder Spätholzdicke (Esper et al. 2024)
Dendroarchäologie	Präzise Datierung von Reliktholz zum Beispiel aus alten Gebäuden oder Musikinstrumenten anhand von Jahrringmustern (Schweingruber 2012)
Dendrovulkanologie	Datierung und Rekonstruktion großer Vulkanausbrüche über Wachstumsreduktionen durch verringerte Sonneneinstrahlung oder verschüttete Bäume, wie beispielsweise die Laacher-See-Eruption vor 13081 Jahren (±9) (Reinig et al. 2021)
Dendrogeomorphologie	Rekonstruktion gravitativer Massenbewegungen wie Murgänge oder Lawinen durch Datierung von Verletzungen und durch Schrägstellung gebildetes Reaktionsholz an betroffenen Bäumen (Schweingruber 2012)
Dendroökologie	Untersuchungen zu historischer Landschaftsentwicklung oder zu Interaktionen zwischen Wald und Forstwirtschaft mithilfe von Jahrringanalysen (Schweingruber 2012)
Dendroentomologie	Analyse von Insektenausbrüchen und deren Auswirkungen auf das Ökosystem; beim zyklisch auftretenden Lärchenwickler z. B. anhand schmaler Jahrringe mit geringem Spätholzanteil durch reduzierte Photosyntheseaktivität (Büntgen et al. 2020)
Dendropyrologie	Rekonstruktion von Waldbränden anhand überwallter feuerbedingter Narben (Margolis et al. 2022)
Dendroglaziologie	Dokumentation von Gletscherveränderungen über direkte (Überfahung) oder indirekte (klimatologische Veränderungen) Baumreaktionen auf Eisvorstöße oder -rückgänge (Schweingruber 2012)
Dendrohydrologie	Rekonstruktion historischer Flussläufe oder auch Hoch- und Niedrigwasser durch Korrelation von Jahrringbreite mit Abflussdaten oder die Analyse von „Flutringen“ (Torbenso et al. 2023b, St. George und Nielsen 2002)

Interdisziplinäre Wissenschaftsfelder der Dendrochronologie (vgl. auch Abb. 2)

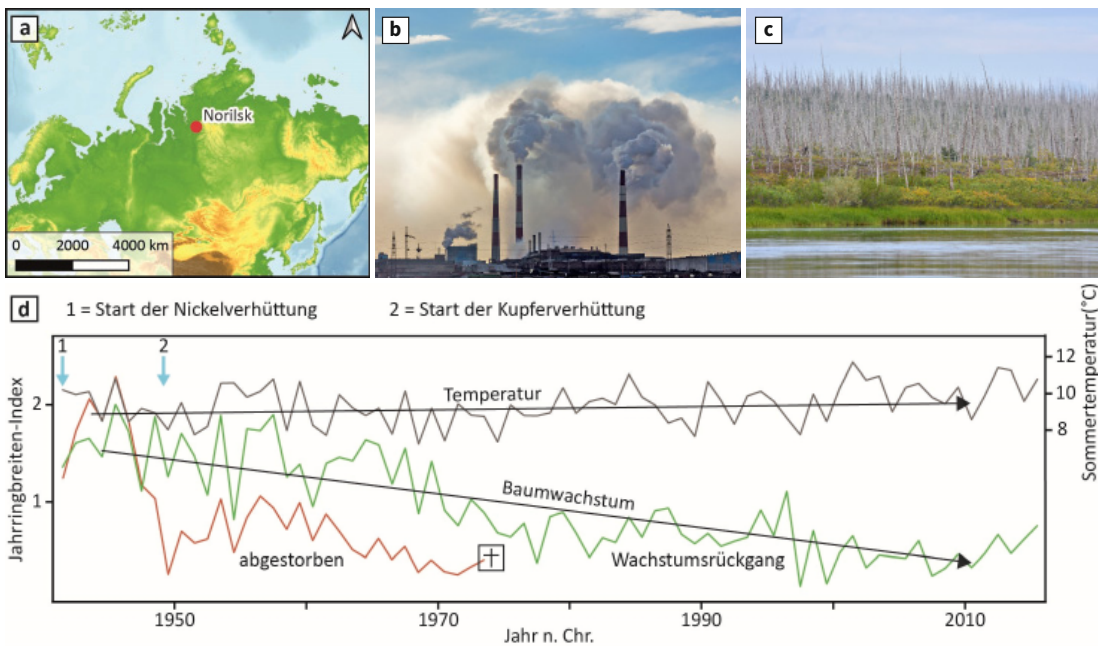


Abb. 3: Auswirkungen der Luftverschmutzung auf das Wachstum und die Vitalität borealer Wälder. a) Übersichtskarte, b) Fabriksschloten in Norilsk, c) abgestorbener Wald östlich von Norilsk, d) Zusammenhang zwischen Sommertemperaturen und Jahrringbreiten von 1938 bis 2014 östlich (rot) und westlich (grün) von Norilsk. Man beachte die divergierenden Trends zwischen Temperatur (positiv) und Baumwachstum (negativ)

schenden Westwinde hauptsächlich in Richtung Osten transportiert wird.

Die Autorinnen und Autoren konnten die verminderten Wachstumsraten und letalen Effekte auf die reduzierte Sonneneinstrahlung aufgrund der Verschmutzung zurückführen. Dazu simulierten sie das Baumwachstum mithilfe eines Computermodells und stellten fest, dass das tatsächliche Baumwachstum vor Beginn der Nickelverhüttung gut mit der Simulation übereinstimmte. Nach dem Start der Verhüttung jedoch sank die tatsächliche Wachstumsrate, während die berechnete Wachstumsrate unverändert blieb. Reduziert man die am Boden eintreffende Sonneneinstrahlung im Modell, gleichen sich die Wachstumsraten wieder an. Da die erhöhte Aerosolbelastung in der Luft durch die Schwerindustrie in Norilsk verursacht wird und dies die Sonneneinstrahlung verringert, konnte ein kausaler Zusammenhang zwischen dem lokalen Baumsterben und der Luftverschmutzung hergestellt werden. Baumjahre weisen sich in diesem Fall als ideale Indikatoren für anthropogen verursachte Umweltveränderungen, da sie das Wachstum und somit die Verschmutzung über Jahre hinweg detailliert und großräumig dokumentieren.

Abflussmengen des Arkansas River

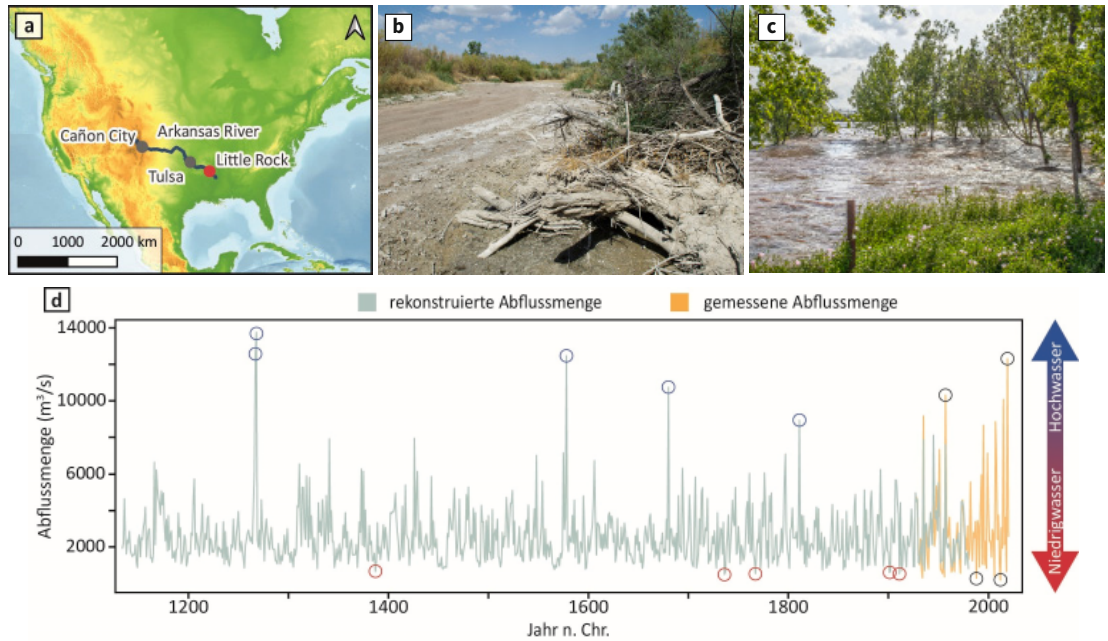
In der Studie von Torbenson et al. (2023b) wurden Jahre als Grundlage für die Rekonstruktion der sommerlichen Abflussmengen des Arkansas River in Nordamerika genutzt (vgl. Abb. 4). Die instrumentellen Abflussmessungen begannen am Oberlauf in den 1890er-Jahren und am Unterlauf in den 1920er-Jahren. Der kurze Messzeitraum von 100 bis 130 Jahren schränkt das Wissen über die natürliche Variabilität von Hoch- und Niedrigwasserphasen erheblich ein. Zusätzlich verstärkt wird dies durch eine intensive menschliche Bauaktivität entlang des Flusses sowie direkte Eingrif-

fe in den Flusslauf, insbesondere durch den Bau von Staumauern. Um jedoch effektiven Hochwasserschutz zu gewährleisten und wirtschaftliche sowie strukturelle Schäden zu minimieren, ist es wichtig, die natürliche Variabilität des Flusses zu verstehen. Aus diesem Grund haben Torbenson et al. (2023b) die Abflussmengen an drei Standorten mit vorhandenen Messstationen mithilfe von Jahrringbreitenmessungen aus dem Einzugsgebiet des Flusses rekonstruiert und so extreme Hoch- und Niedrigwasserereignisse identifiziert (vgl. Abb. 4a-d). Hierfür wurden alle verfügbaren Jahrringchronologien aus einem Umkreis von 250 bis 500 km rund um die jeweiligen Stationen zusammengetragen und mit den gemessenen Abflussdaten korreliert. Von insgesamt 170 vorausgewählten Chronologien wurden 78 in die Studie einbezogen, die eine signifikante Korrelation ($r > 0,4$) aufwiesen. Mithilfe dieser Zeitreihen konnten die Abflussmengen entlang des Flusslaufs rekonstruiert werden: Für Juni an der oberen Station, für Mai an der mittleren Station und für Juni bis Juli sowie September an der unteren Station.

Durch die Rekonstruktion konnten für alle drei Messstationen zuverlässige Abflussmengen über einen langen Zeitraum zurück, für die Station Little Rock sogar bis ins Jahr 1134, rekonstruiert werden (vgl. Abb. 4d). Dabei wurde gezeigt, dass natürliche Hoch- und Niedrigwasserereignisse deutlich stärker ausfielen als bisher mit Messdaten erfasst. So lagen die Abflussmengen im Jahr 1268, dem stärksten rekonstruierten Hochwasser, 537 % über dem langjährigen Mittel. Im Vergleich dazu erreichte das stärkste Hochwasser seit Beginn der Messzeitperiode im Jahr 2019 Abflussmengen, die 480 % über dem langjährigen Mittel lagen. Dieses Wissen über die langfristige, natürliche Variabilität der Abflussmengen des Arkansas

Abb. 4: Rekonstruktion der sommerlichen Abflussmengen des Arkansas River, a) Übersichtskarte, b) trockenes Flussbett und c) überflutete Uferbereiche am Arkansas River, d) Rekonstruktion der Abflussmengen des Arkansas River über die letzten 900 Jahre anhand von Baumjahren

Foto und Grafik: a) Tim Nahtz, Mainz
 b) mauritius images GmbH, Mittenwald; Melanie Blanding/Alamy/Alamy Stock Photos
 c) Shutterstock.com, New York; Vineyard Perspective
 d) Tim Nahtz, Mainz; nach Torbenson et al. 2023b



River kann als Grundlage für die Entwicklung verbesserter Hochwasserschutzmaßnahmen und eines angepassten Wassermanagements dienen, was einen wichtigen Beitrag zur Sicherheit der Bevölkerung und zur Stabilität der regionalen Wirtschaft leisten kann.

Agrarklima im Wandel: Zentraleuropa

Als drittes Beispiel dient eine Rekonstruktion des zentraleuropäischen Agrarklimas über die vergangenen 2000 Jahre (vgl. Abb. 5), durchgeführt von Torbenson et al. (2023a, 2024). Von zentraler Bedeutung für die Bewertung des Agrarklimas ist die sommerliche Wasserbilanz, die sich aus dem Niederschlag abzüglich der potenziellen Evapotranspiration ergibt. Zusätzlich wurden die kumulierten Temperatursummen an Tagen, die wärmer als 10 °C sind, berücksichtigt (Trnka et al., 2011). Diese beiden Klimaparameter konnten anhand der stabilen Sauerstoff- ($\delta^{18}O$) und Kohlenstoffisotopenverhältnisse ($\delta^{13}C$) von Eichen aus Südostdeutschland und Tschechien rekonstruiert werden, wobei $\delta^{18}O$ die Temperatursummen und $\delta^{13}C$ die Wasserbilanz widerspiegelt. Für die Rekonstruktion des zentraleuropäischen Agrarklimas wurden lebende, subfossile und archäologische Holzproben verwendet, und für jeden Jahrring das Sauerstoff- und Kohlenstoffisotopenverhältnis aus der Spätholz-Zellulose bestimmt.

Insgesamt wurden für einen Zeitraum von 2110 Jahren 27 000 Isotopenmessungen durchgeführt und in zwei Chronologien zusammengeführt (Büntgen et al., 2021). Die Studienregion (vgl. Abb. 5a) wurde auf Basis existierender Schwellenwerte in klimatologische Produktivitätskategorien eingeteilt. Diese Kategorien beziehen sich auf die in der Region potenziell wachsenden Feldfrüchte, wie Mais, Wein und Zuckerrüben, oder Weideland. Regionen mit warmen und feuchten Bedingungen, die sich beispielsweise für den Zu-

ckerrübenanbau eignen, wurden als ideal und damit hochproduktiv eingestuft.

Anhand der berechneten, messbasierten Daten wurden die beiden Isotopenchronologien mithilfe eines Regressionsmodells kalibriert und anschließend validiert. Neben den zwei Rekonstruktionen für Zentraleuropa wurden auch räumlich deutlich höher aufgelöste Zeitreihen erstellt, die eine detaillierte Analyse der räumlichen Veränderungen des Agrarklimas über die Zeit ermöglichen. Dabei traten teilweise erhebliche Unterschiede in der Verteilung der Produktivitätskategorien während der vergangenen Jahrhunderte zutage. So gab es beispielsweise Regionen in Zentralschweien, in denen vor 1500 Jahren aus klimatischer Sicht lediglich Weidhaltung möglich war, die heute jedoch für den Anbau von Getreide und Kartoffel geeignet sind. Im Laufe der vergangenen zwei Jahrtausende war das Agrarklima also keineswegs konstant, landwirtschaftlich günstige Phasen wechselten sich mit ungünstigeren ab, und der Anteil an hochproduktiven Agrarflächen unterlag zum Teil erheblichen Schwankungen (vgl. Abb. 5b–d).

In einer Studie haben Torbenson et al. (2024) die beschriebenen Rekonstruktionen der sommerlichen Wasserbilanz und kumulierten Temperatursummen mit zukünftigen Klimamodellen verglichen. Dabei konnte gezeigt werden, dass es seit Beginn der Zeitrechnung keine Periode gab, indem das Agrarklima so warm und trocken war, wie es sich voraussichtlich bis zum Ende dieses Jahrhunderts entwickeln wird (vgl. Abb. 5c, d). Zwar erlebte Zentraleuropa im 8. Jahrhundert eine Phase mit einem ähnlich niedrigen Anteil an hochproduktiven Agrarflächen, jedoch war diese durch wesentlich kältere Bedingungen geprägt. Klimamodelle projizieren für das Ende des 21. Jahrhunderts in Zentraleuropa somit Bedingungen, die mit hoher Gewissheit außerhalb der natürlichen Klimavariabilität der letzten 2000 Jahre liegen werden.

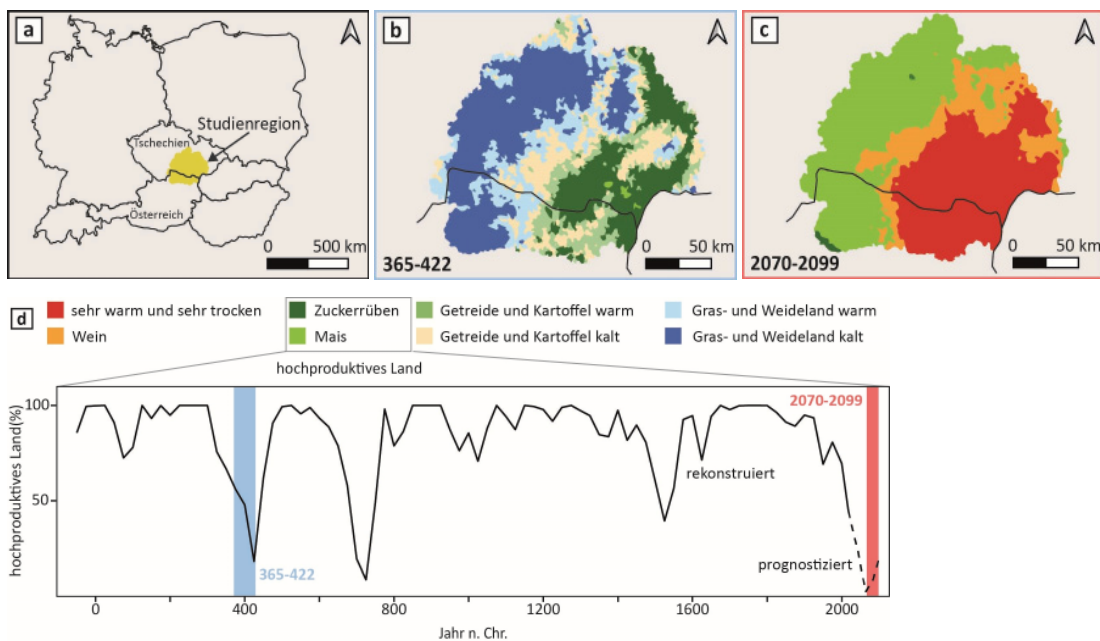


Abb. 5: Rekonstruktion des zentraleuropäischen Agrarklimas. a) Übersichtskarte, b) rekonstruierte landwirtschaftliche Produktivitätsregionen von 365–422, c) projizierte Produktivitätsregionen für 2070–2099, d) Anteil hochproduktiver Landwirtschaftsfläche (Zuckerrüben und Mais) an der Gesamtfläche über die letzten zwei Jahrtausende

Grafik: a) Tim Nahtz, Mainz; b) Tim Nahtz, Mainz; nach Torbenson et al 2023a; c) Tim Nahtz, Mainz; nach Torbenson et al 2024, d) Tim Nahtz, Mainz; nach Torbenson et al 2024

Zusammenfassung und Ausblick

Baumjehringe stellen ein vielseitiges Archiv dar, das zahlreiche Proxies umfasst und in verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen Anwendung findet. Sie speichern Informationen über wachstumsrelevante Umweltveränderungen wie Feuer, Kälte, Insektenausbrüche, Hochwasser oder Luftverschmutzung. Die Dendrochronologie versucht, diese in Baumjehringen gespeicherten Informationen mit geeigneten Methoden zu isolieren und in statistisch validierte Rekonstruktionen vergangener Umweltbedingungen zu transformieren.

Als dynamische wissenschaftliche Disziplin entwickelt sich die Dendrochronologie stetig weiter und wird künftig durch den Einsatz verbesserter Bildgebungsverfahren tiefere Einblicke in baumphysiologische Prozesse ermöglichen. Zudem eröffnet die Nutzung künstlicher Intelligenz die Möglichkeit, immer größere Datenmengen zu analysieren und neuartige Analysemethoden anzuwenden. Dabei zeigt sich die besondere Relevanz von Baumjehringen vor allem darin, dass sie das Wissen über Messzeiträume hinaus jahrgenau erweitern und so einen wichtigen Beitrag zum Verständnis der natürlichen Variabilität der Umweltsysteme leisten. Diese Informationen können zudem verwendet werden, um Simulationen, wie etwa Klimamodelle, zu validieren und Vorhersagen zu präzisieren, was angesichts der tiefgreifenden Veränderungen durch den anthropogenen Klimawandel von großer Bedeutung ist. ■

LITERATUR

- Björklund, J. et al. (2023): Fennoscandian tree-ring anatomy shows a warmer modern than medieval climate. *Nature* 620 (7972), S. 97–103
- Büntgen, U. et al. (2020): Return of the moth: Rethinking the effect of climate on insect outbreaks. *Oecologia* 192 (2), S. 543–552

- Büntgen, U. et al. (2021): Recent European drought extremes beyond Common Era background variability. *Nature Geoscience* 14 (4), S. 190–196
- Cherubini, P. et al. (2004): Jahrringe als Archive für interdisziplinäre Umweltforschung. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*
- Esper, J. et al. (2024): 2023 summer warmth unparalleled over the past 2,000 years. *Nature* 631 (8019), S. 94–97
- Kirdyanov, A. V. et al. (2020): Ecological and conceptual consequences of Arctic pollution. *Ecology Letters* 23 (12), S. 1827–1837
- Margolis, E. Q. et al. (2022): The North American tree-ring fire-scar network. *Ecosphere* 13 (7), e4159
- Piermattei, A. et al. (2015): The “blue ring”: Anatomy and formation hypothesis of a new tree-ring anomaly in conifers. *Trees* 29 (2), S. 613–620
- Reinig, F. et al. (2021): Precise date for the Laacher See eruption synchronizes the Younger Dryas. *Nature* 595 (7865), S. 66–69
- Schweingruber, F. H. (2012): *Der Jahrring: Standort, Methodik, Zeit und Klima in der Dendrochronologie* (Reprint der Ausgabe von 1983). Remagen-Oberwinter
- St. George, S. und E. Nielsen (2000): Signatures of high-magnitude 19th-century floods in *Quercus macrocarpa* tree rings along the Red River, Manitoba, Canada. *Geology* 28 (10)
- Torbenson, M. C. A. et al. (2023a): Central European Agroclimate over the Past 2000 Years. *Journal of Climate* 36 (13), S. 4429–4441
- Torbenson, M. C. A. et al. (2023b): Pre-instrumental perspectives on Arkansas River cross-watershed flow variability. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 59 (1), S. 1–15
- Torbenson, M. C. A. et al. (2024): Past and future climate-driven changes of agricultural land in central Europe. *Communications Earth & Environment*
- Trnka, M. et al. (2011): A 200-year climate record in Central Europe: Implications for agriculture. *Agronomy for Sustainable Development* 31 (4), S. 631–641

AUTOREN

Tim Nahtz, Institut für Geographie, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, nahtz@geo.uni-mainz.de

Dr. Philipp Römer, Institut für Geographie, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, phiro-eme@uni-mainz.de

Prof. Dr. Jan Esper, Institut für Geographie, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Global Change Research Institute of the Czech Academy of Sciences, Brno, Tschechien, esper@uni-mainz.de