

Jahrringdaten archäologischer Holzfunde als Klima- und Umweltarchiv

Jährlich aufgelöste Klimarekonstruktionen, basierend auf den Jahrringanalysen rezenter Bäume, historischer Bauhölzer, subfossiler Bäume und archäologischer Hölzer, bilden eine der wichtigsten Grundlagen in der aktuellen Debatte zum globalen Klimawandel. Für Abschätzungen von Klimafolgen und für Modellierungen bedarf es präziser Kenntnisse der Klimaänderungen im Holozän (ab 11 700 Jahre vor heute; Wanner et al. 2008).

Instrumentelle Klimamessdaten decken lediglich die Entwicklung der letzten ~150 Jahre und damit einen Zeitraum ab, der in etwa mit dem Beginn der globalen Erhöhung der Oberflächentemperaturen als Folge der Industrialisierung zusammenfällt. Weiter zurückreichende Messdaten fehlen. Um die Klimabedingungen vor der Zeit instrumenteller Wetterdatenmessungen zu rekonstruieren, muss auf so genannte Proxy-Daten, indirekte Klimainformationen, zurückgegriffen werden. Hierbei handelt es sich um Klimazeiger oder Klimazeugen, die Rückschlüsse auf vergangene Zustände der Atmosphäre und des Klimas zulassen. Der weitaus wichtigste Klimaproxy für das ganze Holozän sind Jahrringdaten, da sie mit inter- und intra-annuellen Jahrringparametern wie Jahrringbreite, holzanatomischen Merkmalen und Holzdicke zeitlich und räumlich hoch aufgelöste jahrgenau datierbare Informationen liefern.

Jahrringdaten haben sich insbesondere als Proxy für die letzten 2 500 Jahre vielfach bewährt (Jones et al. 2009) und bilden heute die primäre Grundlage für Klimarekonstruktionen und globale Klimamodelle. Die Erkenntnisse aus der Kopplung von klimageschichtlichen mit humanökologischen Fragestellungen liefern auch für aktuelle und zukünftige Klimafolgenabschätzungen einen wertvollen Beitrag (Dearing et al. 2006, Pfister 2010).

Für statistisch valide dendroklimatologische Rekonstruktionen über große Zeiträume hinweg sind möglichst viele Jahrringserien erforderlich (Büntgen et al. 2012). Die dendrochronologische Untersuchung von archäologischen Holzbefunden hat in den vergangenen 40 Jahren zehntausende datierter Jahrringserien erbracht, die jetzt als Klima- und Umweltarchiv für interdisziplinäre Untersuchungen zur Verfügung stehen (vgl. Abb. 1). In diesem Beitrag zeigen wir, wie aus den Jahrringdaten sehr unterschiedlicher Epochen Klima rekonstruiert werden kann und wie sich aus archäologischen Holzkonstruktionen Informationen zu Chronologie und Umwelt ziehen lassen: von den ältesten Holzbauwerken der Menschheit, einem Ensemble jungsteinzeitlicher Brunnen aus Mitteleuropa, bis hin zu Großmengen römischer Hölzer von verschiedenen Fundorten in Ostfrankreich.

Dendroarchäologie

Neben den in den Jahrringen archivierten Klimainformationen erlauben die Untersuchungen archäologischer Holzfunde Einblick in die Geschichte des Waldes und die intensive Beziehung zwischen Mensch, Holz und Wald. Die dendrochronologischen Datierungen zeigen ein Bild der sich wandelnden Bau- und Siedlungsgeschichte über viele Epochen hinweg, die mit wechselnden Umweltbedingungen und sozio-ökonomischen Prozessen in Verbindung gebracht werden können (Billamboz 2006, Büntgen et al. 2011a). Dieser Forschungsansatz wird als Dendroarchäologie bezeichnet. Die Dendroarchäologie verbindet die Analyse von äußeren und inneren Merkmalen archäologischer Holzfunde: Werkzeugspuren auf den Holzoberflächen und die Holzquerschnitte geben Aufschluss über die Holzbearbeitung, die Jahrringe ermöglichen die dendrochronologische Datierung und liefern anhand holzanatomischer Merkmale paläoökologische Aussagen (Schweingruber 1993). Archäologische Holzfunde sind eine vielschichtige Quelle, deren dendrochronologische Daten in Verbindung mit archäologischen Funden und Befunden zur Lösung historischer Fragestellungen beitragen können.

Holzfunde aus dem Neolithikum

Holzgewinnung und -verarbeitung waren wesentliche Faktoren für die Sesshaftwerdung des Menschen im Frühneolithikum. Zum Wohnen, Aufstallen von Haustieren und zur Vorrathaltung benötigte der Mensch dauerhafte Gebäude aus Holz. Um sesshaft zu werden, waren daher Innovationen in Waldnutzung, Werkzeugherstellung und Holzbearbeitungstechniken erforderlich, um die benötigte Siedlungsinfrastruktur aufzubauen. Die neu entwickelten Strategien der Rohstoffnutzung trugen nicht zuletzt zur Formung und Entwicklung von Gesellschaft und Kultur bei.

Dass die Neolithisierung nun dendroarchäologisch untersucht werden kann, ist einzigartigen Holzbefunden der frühneolithischen Bandkeramischen Kultur (~5500-4900 v. Chr.) zu verdanken. In den Dörfern dieser ersten mitteleuropäischen Ackerbauern standen bis zu 40 m lange Langhäuser aus Holz, von denen jedoch nur Bodenverfärbungen erhalten sind. Erst in

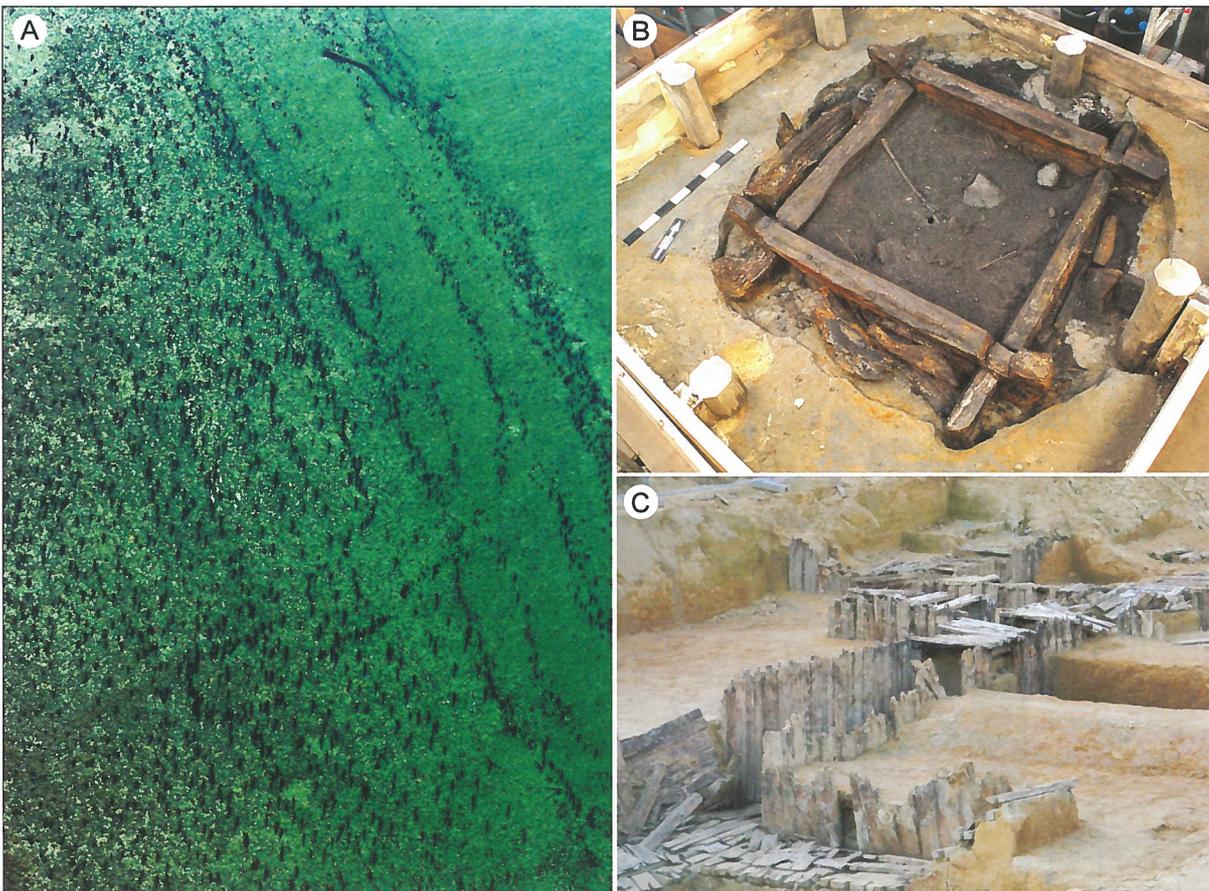


Abb. 1: Beispiele archäologischer Holzbefunde

A) Luftaufnahme tausender Eichenpfähle im Flachwasser des Bodensees (Ausschnitt, Pfahlfeld insgesamt: 4,2 ha). Die Pfahlreihen stammen von Häuserzeilen und Palisaden der spätbronzezeitlichen Siedlung von Unteruhldingen (Baden-Württemberg), um 900 v. Chr.
B) Ältester datierter Holzbau der Welt: frühneolithischer Brunnen von Altscherbitz (Sachsen), 5102 v. Chr.
C) Moderner Holzbau: Stollenverbau aus dem Ersten Weltkrieg (1915) aus Carspach (Dep. Haut-Rhin), Frankreich

Quelle: A) Landesamt für Denkmalpflege Baden-Württemberg, Foto: *Otto Braasch*; B) Landesamt für Archäologie Sachsen, Foto: *Rengert Elburg*; C) Pôle d'archéologie interdépartemental Rhénan, Foto: *W. Tegel*

jüngerer Zeit wurden auch Brunnen entdeckt, deren Holzeinfassungen unter dem Grundwasserspiegel hervorragend konserviert waren (vgl. *Abb. 1B*). Die für die Brunnen genutzten Bäume wurden nach den dendrochronologischen Untersuchungen zwischen 5200 und 5098 v. Chr. gefällt (*Tegel et al. 2012*).

Die Analysen der Bearbeitungsspuren an den Holzoberflächen und die bautechnischen Holzverbindungen zeigten, dass die ersten Bauern auch die ersten Zimmerleute waren. Mit quergeschäfteten Steinbeilen fertigten die Siedler ausgeklügelte Eckverbindungen für die Blockbaukonstruktionen der Brunneneinfassungen, die allen statischen Anforderungen genügten (*Tegel et al. 2012*). Die archäologisch ausgegrabenen und dendrochronologisch datierten hölzernen Brunnenkonstruktionen bieten eine holistische Perspektive auf Waldnutzung und Holzbearbeitungstechniken im Kontext von Vegetations- und Klimageschichte des mitteleuropäischen Frühneolithikums.

Generell sind Bauholzfunde aus dem frühen und mittleren Neolithikum (5500-4200 v. Chr.) sehr selten. Erst mit dem jüngeren Neolithikum (ab ca. 4200 v. Chr.) wurde die Uferzone der zirkumalpinen Seen besiedelt (*Nicolussi et al. 2013*), wo große Bauholzmengen der Pfahlbauten erhalten geblieben sind (vgl. *Abb. 1A*). Die Eichenhölzer der frühneolithischen Brunnen sind deshalb sehr wichtig für

den Aufbau holozäner Jahrringchronologien und ihre für dendroklimatologische Studien erforderliche dichte Belegung. Noch ist die Probendichte zu schwach, um das holozäne Klimaoptimum, das über verschiedene andere Proxies rekonstruiert wurde (vgl. *Abb. 2*), auch dendroklimatologisch zu fassen und somit jährlich aufzulösen. Zur Zeit der Neolithisierung haben milde und feuchte Bedingungen zusammen mit nur geringen Schwankungen im globalen Klimasystem die Produktivität des Ökosystems positiv beeinflusst. Dies würde den landwirtschaftlichen Erfolg der ersten Bauern erklären, der umfangreiche Rodungsaktivitäten und Bauholzgewinnung mit sich brachte (*Kreuz 1990, Lüning 2000*).

Archäologische Holzfunde aus der Römerzeit

Im Gegensatz zu den seltenen Holzfunden des Frühneolithikums stehen die Fundmassen aus der Römerzeit. In den Gebieten Mittel- und Westeuropas, welche vor 2000 Jahren zu römischen Provinzen wurden, sorgte ein wahrer Bauboom für große Mengen hölzerner Hinterlassenschaften im archäologischen Befund. 1702 Eichen-Jahrringserien aus 76 Fundstellen in Nordostfrankreich konnten dendrochronologisch datiert werden. Es handelt sich meist um Bauhölzer wie Pfähle, Bohlen, Balken und Bretter von Hauskon-

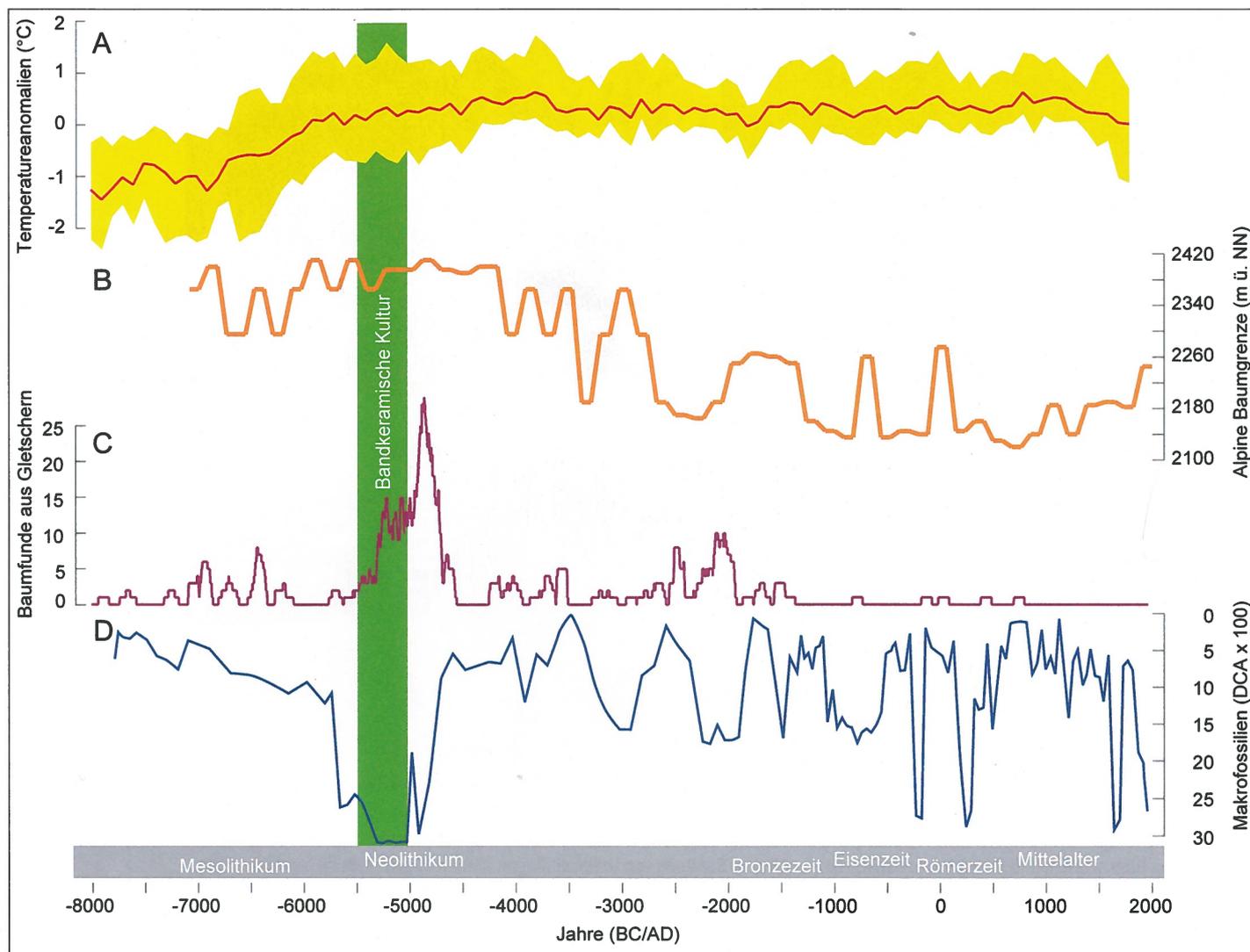


Abb. 2: Umweltveränderungen während des europäischen Neolithikums (aus Tegel et al. 2012; Entwurf: U. Büntgen)

A) Temperaturekonstruktion aufgrund von Pollen (nach Davis et al. 2003)

B) Rekonstruktion der alpinen Baumgrenze aufgrund dendrotierter subfossiler Stämme (Nicolussi 2009)

C) zeitliche Verteilung von 95 Stammfunden aus Alpenglaciers (Nicolussi 2009)

D) hydroklimatische Rekonstruktion aufgrund von Makrofossilien aus Mooren Großbritanniens (nach Barber et al. 2004)

struktionen, Mauerfundamentierungen oder Uferbefestigungen von Brunnen- und Brückenkonstruktionen, die wertvolle Informationen zu chronologischen und technikgeschichtlichen Fragen liefern. Gerade in der Menge der römischen Holzfunde liegt ihr besonderes Informationspotential.

Die präzise bestimmten Fälljahre sind unmittelbare Indikatoren für Bautätigkeit in Nordgallien zwischen Eisenzeit und Spätantike (vgl. Abb. 3). Aus der Zeit von 500 v. Chr. bis 500 AD ließen sich die Baujahre und Reparaturen von 216 Holzkonstruktionen jahrgenau datieren. Eine Zusammenstellung der Konstruktionsdaten ermöglicht eine quantitative Beurteilung der Bauaktivitäten über die Zeit in den Regionen Champagne (Datensatz West), Lothringen (Datensatz Mitte) und Elsass (Datensatz Ost; vgl. Abb. 3D).

Nach einer Phase zwischen ~500 und ~200 v. Chr. ohne archäologische Bauholzfunde lassen sich zu Beginn des zweiten vorchristlichen Jahrhunderts erstmals wieder Baumaßnahmen dendrochronologisch datieren. Im ersten Jahrhundert vor Christus sind in

der Champagne und in Lothringen zahlreiche Bauaktivitäten trotz der römischen Eroberung Galliens belegt. Im benachbarten Elsass und in Süddeutschland gibt es für diese Zeit keine Fälldaten. In der Regierungszeit des Augustus (27 v. Chr. bis 14 AD) nehmen die Baumaßnahmen in der Champagne stark zu. Die Baukonjunktur hält im Westen bis fast in die Mitte des ersten nachchristlichen Jahrhunderts an. Um die Mitte des dritten Jahrhunderts AD gehen die Bauaktivitäten in Nordgallien deutlich zurück. Dies ist die Zeit der römischen Reichskrise, die in den Grenzprovinzen von Barbareneinfällen und bürgerkriegsähnliche Auseinandersetzungen geprägt war.

Holz war der wichtigste Rohstoff und Energielieferant vor der Industrialisierung. Die Waldnutzung stand deshalb mit der Menschheitsgeschichte immer in einem engen Zusammenhang. Aufgrund dieses historischen Sachverhaltes hat das vielschichtige Informationspotential archäologischer Holzfunde eine große Bedeutung über die Paläoklimaforschung hinaus und kann für Fragen der Umwelt-, Technik-, und

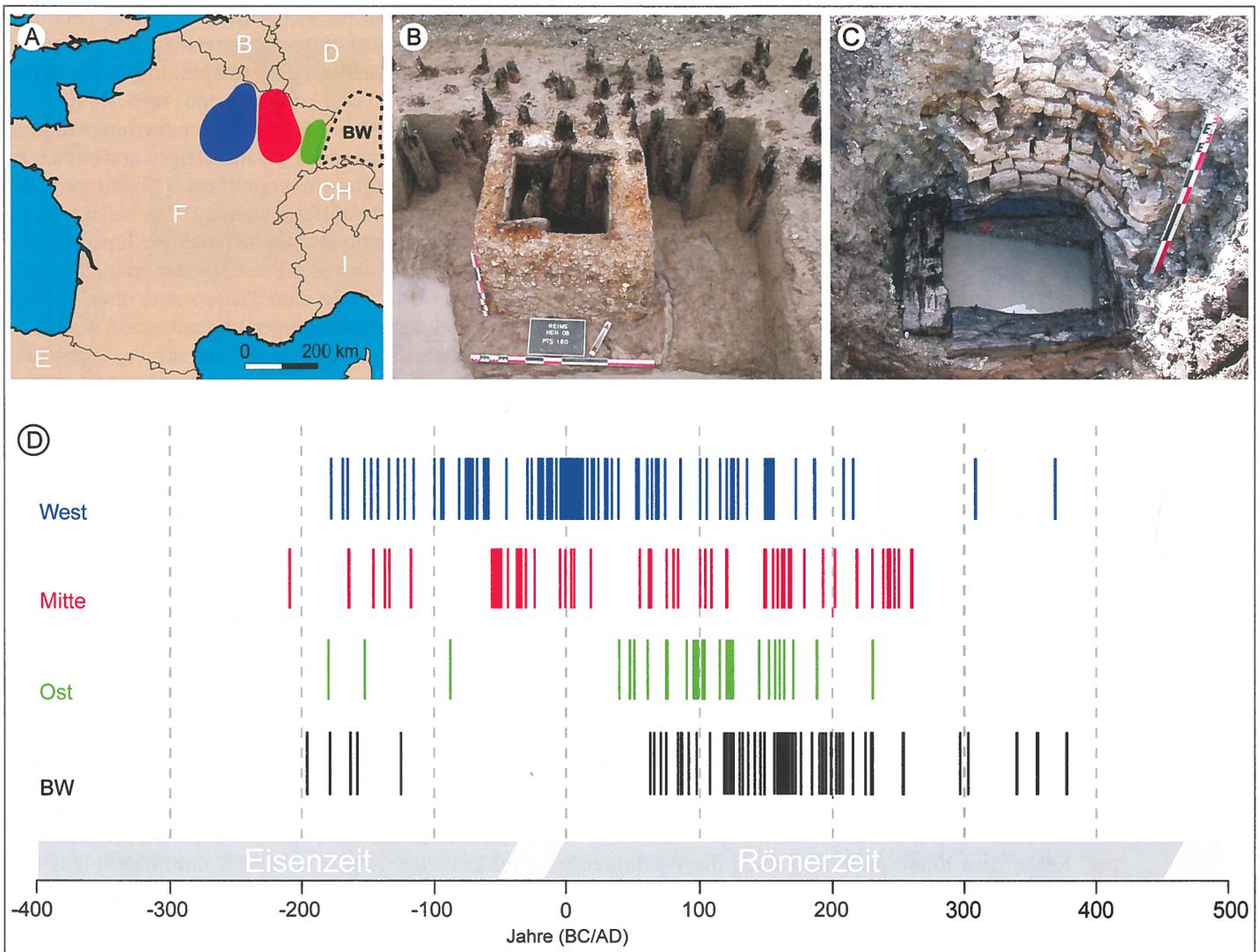


Abb. 3: Eisenzeitliche und römische Bauholzfunde aus Nordostfrankreich
A) Verbreitung der drei Datensätze West (blau), Mitte (rot) und Ost (grün) sowie der Bauholzfunde aus dem benachbarten Baden-Württemberg
B) Pfahlfundament unter einer römischen Gebäudemauer aus Reims (Dep. Marne)
C) römisches Brunnenfundament aus Troyes (Dep. Aube)
D) datierte Holzkonstruktionen der Eisen- und Römerzeit, Datensätze West (blau), Mitte (rot), Ost (grün) sowie die Schlagdaten aus Baden-Württemberg (schwarz, Daten aus Billamboz 2009)

Grafik: D. Hakelberg, W. Tegel

Wirtschaftsgeschichte herangezogen werden. Auf diese Weise können Jahringdaten zu einem umfassenden Gesamtbild vom Menschen in seiner Umwelt beitragen.

Dendroklimatologie

Die Dendroklimatologie ist eine Teildisziplin der Dendrochronologie (von griech. dendron ‚Baum‘, chronos ‚Zeit‘, logos ‚Kunde‘), die aufgrund der Zeitreihen von Jahringbreite und Jahringdichte Wachstums-Klimabeziehungen analysiert und das vergangene Klima rekonstruiert. Über die Korrelation und Kalibration von Jahringserien lebender Bäume mit Daten von Klimamessstationen wird ein Klima-Zuwachs-Modell (Aktualmodell) erstellt, das zur Klimarekonstruktion verwendet werden kann. Auf der Basis der relativ gut dokumentierten modernen Klimaverhältnisse kann das Klima in der Zeit vor den instrumentellen Klimamessungen in einer jährlichen Auflösung mithilfe

von Jahringparametern rekonstruiert werden. Über nieder- und mittelfrequente Trendkomponenten im Jahringmuster können dekadische bis mehrhundertjährige Perioden klimatischer Schwankungen ermittelt werden (zum Beispiel das mittelalterliche Klimaoptimum oder die Kleine Eiszeit). Die Analysen hochfrequenter jährlicher Variationen erlauben dagegen Rückschlüsse auf klimatische Extremereignisse. Die Klimaschwankungen und Extreme während der letzten Jahrtausende können so in den Kontext moderner Klimaverhältnisse gestellt werden.

Bei den bisherigen dendroklimatologischen Untersuchungen Europas lag der Schwerpunkt bei den Analysen von Nadelhölzern an borealen und alpinen Waldgrenzstandorten. Der limitierende Faktor für den Jahringzuwachs dieser Bäume ist die Lufttemperatur während der Hauptwachstumsperiode (Juni-August). Dies führt zu einem relativ klar identifizierbaren Temperatursignal sowohl in der Jahringbreite als auch in

der maximalen Spätholzdichte, was Temperaturrekonstruktionen ermöglicht (Büntgen 2006, Grudd 2008).

Über subfossile Baumfunde aus Gletschervorfeldern, Seen und Mooren in den Ostalpen konnte in den letzten Jahren eine nahezu das gesamte Holozän abdeckende, derzeit bis 8072 v. Chr. zurückreichende Nadelholzchronologie erstellt werden, die Eastern Alpine Conifer Chronology (Nicolussi et al. 2009, 2013; vgl. auch den Beitrag Nicolussi et al. in diesem Heft). Die Bäume der Tieflagen und teilweise auch der Mittelgebirge reagieren dagegen niederschlagssensitiv, das heißt der wachstumslimitierende Faktor ist hier Niederschlag. Für Niederschlags- bzw. Trockenheitsrekonstruktionen spielt die Eiche eine Schlüsselrolle. Eichenholz war über Jahrtausende das am häufigsten verwendete Bauholz, daher liegt für diese Baumart eine einzigartige, aus archäologischen Holzfinden gewonnene große Datenmenge vor (Büntgen et al. 2011a). Subfossile Eichenstämme aus den Schottern der mitteleuropäischen Flüsse ermöglichten den Aufbau einer Eichenchronologie, die bis 8480 v. Chr. zurückreicht (Becker 1982, Friedrich et al. 2004). In den Jahrringbreitenserien mittel- und nordeuropäischer Eichen (*Quercus robur* und *Q. petraea*) spiegeln sich eine Kombination von Frühjahrsniederschlagsmengen (April, Mai und Juni) und standortdynamischen Prozessen wider (Cufar et al. 2008; Büntgen et al. 2010, 2011a; Wilson et al. 2012).

Statistische Methoden der Klimarekonstruktion

Neben dem Klima hinterlässt auch die Waldnutzung durch den Menschen eine erkennbare Signatur in den Jahrringdaten (Haneca et al. 2009, Billamboz 2006). Für Klimarekonstruktionen ist dies nachteilig, da das Klimasignal überlagert oder gestört wird. Neue statistische Methoden bei der Datenbehandlung und Strategien bei der Probennahme erleichtern mittlerweile die Differenzierung von Klima- und Walddynamik im Jahrringmuster (Tegel et al. 2010). Voraussetzung für Klimarekonstruktionen ist, dass nicht-klimatische Einflüsse auf die Jahrringbildung erkannt und eliminiert werden.

Zur Erkennung, Betonung oder Bereinigung von Wachstumstrends gibt es eine Vielzahl von statistischen Standardisierungsverfahren (Fritts 1976, Cook und Kairiukstis 1990). Allen Verfahren liegt zu Grunde, dass über die Anwendung von Ausgleichsfunktionen, gleitenden Mittelwerten oder Filtern der gemeinsame, zeitspezifische externe Steuerungsfaktor (z.B. Klima) in verschiedenen Wellenlängen (hoch-, mittel- oder niederfrequent) erhalten bleibt.

Hydroklimatische Bedingungen der letzten 2 500 Jahre

Auf der Basis von rund 9000 untersuchten Eichen aus den Tieflagen und Nadelhölzern der Hochlagen aus den letzten 2500 Jahre ließen sich die hydroklimatischen Bedingungen im Frühsommer (April-Juni) und die Sommertemperatur (Juni-August) mit einer jährlichen Auflösung berechnen (vgl. Abb. 4B). Die Ergebnisse zeigen, dass nach einer klimatisch relativ sta-

bilien Phase während der Römerzeit in der Spätantike ab rund 250 AD kühlere Sommer folgten, verbunden mit erhöhten Niederschlagsschwankungen bis hin zu einer trockenen und kühlen Periode im 6. Jh. AD.

Frühjahrsniederschläge und Sommertemperaturen begannen am Ende des 6. Jh. anzusteigen und erreichten zu Beginn des 8. Jhs. ein vergleichbares Niveau wie in der Römerzeit; die darauffolgenden 500 Jahre bis zum 14. Jh. werden gemeinhin als Mittelalterliches Klimaoptimum bezeichnet. Mit Ausnahme relativ hoher Frühjahrsregensmengen im 10. Jh. ist diese Phase warm, ohne stärkere Niederschlagsschwankungen und auf einem ähnlichen Niveau wie im 20. Jahrhundert. Die sich daran anschließende mehrhundertjährige Periode durchschnittlich kühlerer Temperaturen und hoher Klimavariabilität ist als Kleine Eiszeit bekannt (~1300-1850 AD). Abgelöst wird sie durch den Erwärmungstrend während der letzten ~150 Jahre. Die ansteigenden Sommertemperaturen des späten 20. und frühen 21. Jhs. können nun präzise im Kontext von Temperaturschwankungen der letzten 2500 Jahre betrachtet werden und verdeutlichen den rezenten Erwärmungsprozess (vgl. Abb. 4C). Ein Trend zu abnehmenden Niederschlagsmengen ist bisher in Mitteleuropa nicht zu beobachten.

Extreme in der Klimageschichte

Neben der niederfrequenten Variabilität im Bereich von Jahrzehnten bis Jahrhunderten ist das Auftreten von interannuellen Extremen ein wichtiger klimageschichtlicher Aspekt, der sich unmittelbar auf den Menschen auswirken kann. Extreme Kälteeinbrüche oder Trockenheit während der Vegetationsperiode, Starkregenfälle und Überflutungen können Ernterträge beeinträchtigen und Infrastruktur zerstören.

Ausmaß und Häufigkeit von Extremen spiegeln sich auch in den Jahrringserien wider. Untersuchungen an rezenten Eichen in Westeuropa haben gezeigt, dass die winterliche Westwinddrift über dem Nordatlantik zu einer erhöhten Bodenfeuchtigkeit während der Vegetationsperiode führt und sich damit positiv auf das Baumwachstum auswirkt (Kelly et al. 2002). Extrem negatives Eichenwachstum wird dagegen durch Sommertrockenheit verursacht (Büntgen et al. 2010, Cufar et al. 2008, Kelly et al. 2002). So reagierten beispielsweise die meisten Eichen nördlich der Alpen auf den sehr heißen und trockenen Sommer von 1976 mit einem extrem geringen Jahrringzuwachs.

Extreme in Jahrringserien sind definitionsbedürftig. Für positive und negative Extreme kann die 1,5- bzw. 2-fache Standardabweichung der mittleren Jahrringbreite als Schwellenwert definiert werden. Alle Werte, die über die Schwelle hinausgehen, werden als Extreme angesehen (Battipaglia et al. 2010). Zur Validierung der so ermittelten Extremjahre können diese mit Witterungsaufzeichnungen aus historischen Quellen der letzten 1000 Jahre verglichen werden (Büntgen et al. 2011b). Für mitteleuropäische Eichen und Tannen gibt es Übereinstimmungen mit historisch dokumentierten Niederschlagsextremen von April bis Juni. Aufgrund der Witterungsaufzeichnungen wurden niederschlags-

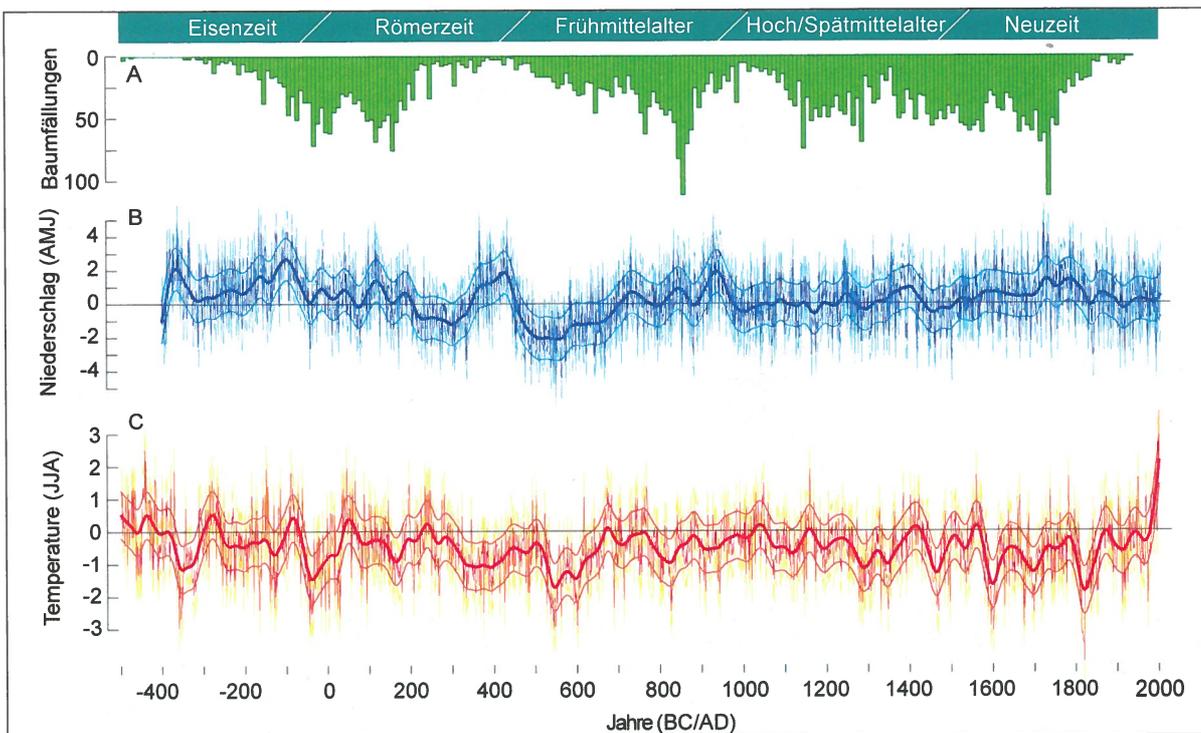


Abb. 4: A) Dendrochronologisch ermittelte Fällungen von Eichenbauholz über die letzten 2 500 Jahre; B) Niederschlagsrekonstruktion aufgrund von Eichen-Jahringdaten; C) Temperaturrekonstruktion aufgrund von Nadelhölzern der alpinen Waldgrenze; nach Büntgen et al. 2011).

Entwurf: U. Büntgen

reiche Bedingungen mit Tiefdruckzellen assoziiert und kalibriert. Dürre wurde mit Hochdruck in Verbindung gebracht. Eine relativ gleichmäßige Verteilung der hydroklimatischen Extreme erstreckt sich über das mittelalterliche Klimaoptimum, die Kleine Eiszeit und die moderne Phase der globalen Erwärmung.

Für frühere Epochen, aus denen es wenige oder keine Witterungsaufzeichnungen gibt, sind Jahrringserien der am besten geeignete Proxy zur Ermittlung klimatischer Extremjahre. Für die Römerzeit wurden Untersuchungen basierend auf der dendrochronologischen Auswertung von 1702 Eichen-Jahrringserien archäologischer Holzfunde aus Nordostfrankreich, den Regionen Champagne-Ardenne (West), Lothringen (Mitte) sowie dem Elsass (Ost) durchgeführt (vgl. Abb. 3A). Die Intensität und zeitliche Verteilung von insgesamt 113 Extremjahren im Eichenwachstum Nordostfrankreichs zwischen 350 v. Chr. und 500 AD wurden berechnet (vgl. Abb. 5). Bei 59 Jahren lagen die jährlichen Zuwächse über der doppelten negativen, bei 54 Jahren über der doppelten positiven Standardabweichung. Die Anzahl negativer und positiver Extremjahre ist somit über den Untersuchungszeitraum von 850 Jahren relativ ausgeglichen. Im Jahrringmuster zeichnete sich das Jahr 154 AD als negatives Extrem am deutlichsten ab, das Jahr 101 AD am deutlichsten als positives Extrem. Auffallend sind in allen drei regionalen Jahrringchronologien West, Mitte und Ost die Jahre 91 und 90 v. Chr., die aufeinanderfolgend einen sehr geringen Zuwachs zur Folge hatten, ebenso wie die Jahre 23 v. Chr. und 98 AD.

Die römerzeitliche Warmphase, das „Optimum der Römerzeit“ ist heute allgemein akzeptiert und durch Studien belegt (McCormick et al. 2012, PAGES 2k Consor-

tium 2013). Klimatisch ausgesprochen günstige Verhältnisse bestanden in Mitteleuropa von der späten Eisenzeit bis in die Spätantike. In den Alpen zogen sich die Gletscher zurück und die Wald- und Baumgrenze erreichte höherer Lagen als heute (Nicolussi 2009). Ab etwa 250 AD wurden die Sommer kühler, verbunden mit erhöhten Niederschlagsschwankungen bis hin zu einer trockenen und kühlen Periode zu Beginn des Frühmittelalters im 6. Jh. AD (vgl. Abb. 4 sowie Büntgen et al. 2011a).

Die aus den Jahrringserien errechneten Extremjahre der Römerzeit ermöglichen neue Aussagen über hydroklimatische Extreme im Untersuchungsgebiet, die indirekt auch Hinweise zur Prosperität der Landwirtschaft geben können (Tegel et al. 2013). Als eine Phase mit häufigen positiven Extremjahren konnte die Zeit von der Mitte des 3. Jh. bis in die Mitte 2. Jh. v. Chr. ermittelt werden (vgl. Abb. 5). Ob solche Häufungen positiver Extreme auch zu einer Steigerung der landwirtschaftlichen Erträge im Untersuchungsgebiet geführt haben, lässt sich jedoch nicht unmittelbar nachweisen. Festzustellen ist aber, dass in dieser Zeit eine rege Bautätigkeit einsetzte und zahlreiche Siedlungen gegründet wurden (vgl. Abb. 3 sowie Laurelut et al. 2002).

Im Mittelwert positiver und negativer Extreme pro Jahrhundert zeichnet sich eine klimatische Gunstphase für das 2. Jh. v. Chr. und eine ungünstigere Phase für das 2. und 3. Jh. AD ab (vgl. Abb. 5b). Deutlich wird, dass während der Spätantike ausgesprochen wenige hydroklimatische Extremjahre zu verzeichnen sind. Die ermittelten Extremjahre deuten darauf hin, dass die Landwirtschaft Galliens zu einer Zeit mit Trockenextremen konfrontiert war, in der das Römische Reich seine Blütezeit erlebte.

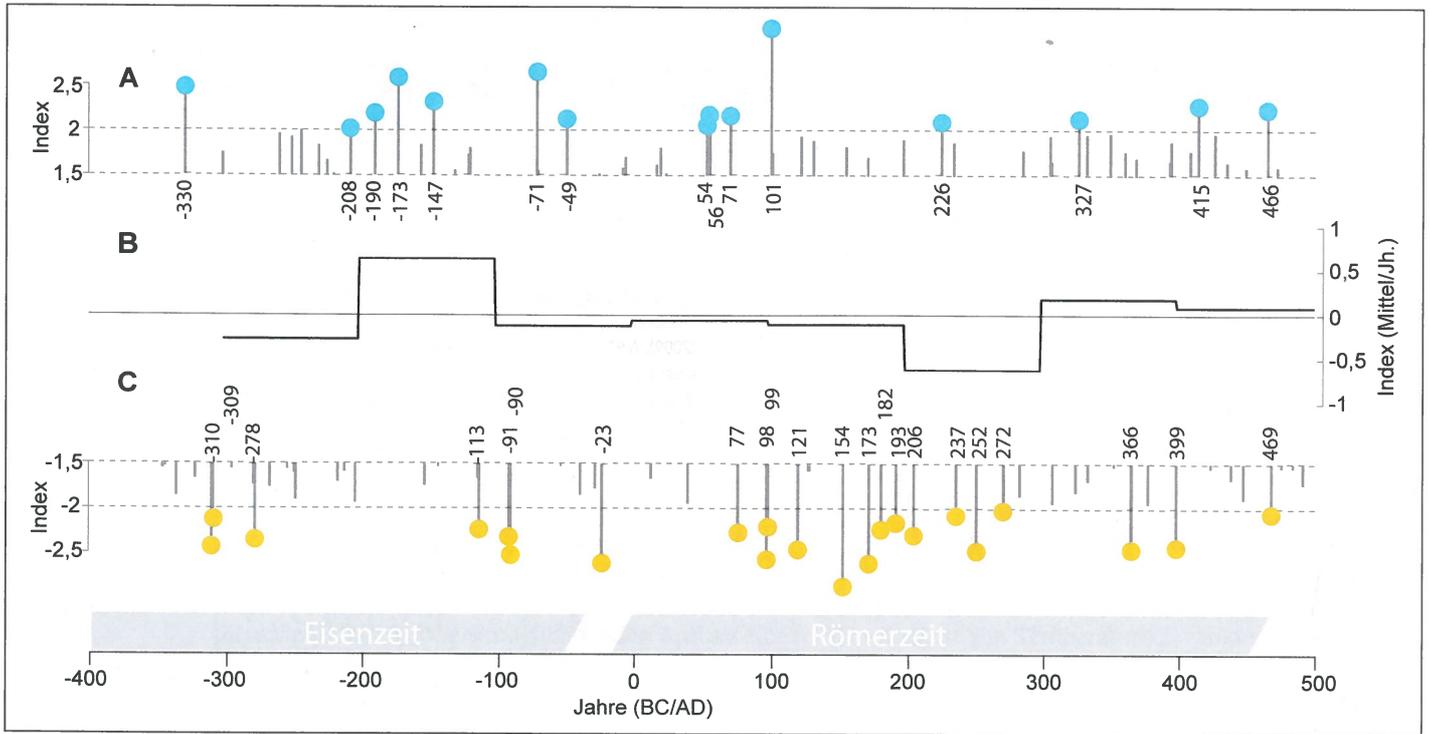


Abb. 5: Rekonstruktion der hydroklimatischen Extremjahre während der Eisen- und Römerzeit in Nordostfrankreich aufgrund standardisierter Jahringdaten.

- A) Positive Extreme über der Schwelle der 1,5- und 2-fachen Standardabweichung;
- B) Mittelwert positiver und negativer Extremjahre pro Jahrhundert (Quelle: Institut national de recherches archéologiques préventives, Reims);
- C) negative Extreme unter der Schwelle der 1,5- und 2-fachen negativen Standardabweichung (Quelle: Institut national de recherches archéologiques préventives, Châlons-en-Champagne sowie nach Tegel et al. 2013)

Grafik: D. Hakelberg, W. Tegel

Vergleichsweise häufig sind positive Extremjahre in der ersten Hälfte des 2. Jh. v. Chr. und gegen Ende des 1. Jh. AD (vgl. Abb. 5a). Darauf folgt eine Periode von über 100 Jahren mit einer deutlichen Zunahme von negativen Extremjahren. Sowohl das Ende der Blütephase des Römischen Reichs als auch der Beginn der Reichskrise sind begleitet durch zahlreiche sehr trockene Sommer. Für die Zeit danach, mit Beginn der Völkerwanderung und bis zur Auflösung des Weströmischen Reichs, wurden von 272 AD bis 500 AD nur noch drei negative und drei positive Extreme ermittelt.

Perspektiven für die Forschung

In Anbetracht der Verfügbarkeit zeitlich weit zurückreichender Proxy-Datenmengen stellt sich in der Forschung verstärkt die Frage, wie, wann und wie stark das Klima auf sozioökonomische und kulturelle Prozesse Einfluss nahm. Wissenschaftsgeschichtlich gesehen ist die Frage nicht neu. Bereits Ende des 19. Jhs. waren die unmittelbaren Auswirkungen der Klimavariabilität auf den Menschen ein Thema (Mauelshagen 2010).

Es wird heute allgemein davon ausgegangen, dass historische Agrargesellschaften weitaus empfindlicher auf klimatische Extreme reagierten als moderne Industriegesellschaften. Es ist verlockend, Krisenzeiten mit klimatischer Ungunst zu erklären, Koinzidenz mit Kausalität gleichzusetzen und Konjunkturen mit Klimavariabilität zu synchronisieren. Klima wird so zum allein bestimmenden Faktor menschlichen Verhaltens und

gesellschaftlicher Entwicklungsprozesse reduziert und dient als simplizistische Erklärung komplexer historischer Phänomene (Hulme 2011). Für die Erforschung von mutmaßlichen Niedergangs- bzw. Blütezeiten in der Vergangenheit aus klimahistorischer Perspektive sind daher unvoreingenommene, vielseitige und differenzierende Forschungsansätze gefragt (Carey 2012).

Die Dendroarchäologie nutzt die (klimagesteuerte) Jahringbreitenserie für die Datierung und liefert mehrtausendjährige Chronologien und große Probenmengen, aus denen die Dendroklimatologie die Klimainformation extrahiert und auswertet. Beide Disziplinen sind wechselseitig bezogen, denn die Dendroklimatologie gibt präzise datierte paläoklimatologische Informationen an die historischen Wissenschaften zurück. III

AUTOREN

Dr. WILLY TEGEL, geb. 1962
tegel@dendro.de
Arbeitsgebiete/Forschungsschwerpunkte:
Dendrochronologie, Archäologie, Kultur- und
Klimageschichte

Dr. DIETRICH HAKELBERG, geb. 1969
dietrich.hakelberg@iww.uni-freiburg.de
Arbeitsgebiete/Forschungsschwerpunkte:
Dendrochronologie, Archäologie, Kulturgeschichte,
Buch- und Bibliotheksgeschichte

Professur für Waldwachstum (IWW), Universität Freiburg,
Tennenbacher Straße 4, 79106 Freiburg

LITERATUR

- Barber, K., B. Zolitschka, P. Tarasov und A.F. Lotter (2004): Atlantic to Urals – The Holocene Climatic Record of Mid-Latitude Europe. In: R. Battarbee, F. Gasse und C.E. Stickley (Hrsg.): Past Climate Variability through Europe and Africa. Dordrecht, S. 417–442
- Battipaglia, G., D. Frank, U. Büntgen, P. Dobrovolsky, R. Brázdil, C. Pfister und J. Esper (2010): Five centuries of Central European temperature extremes reconstructed from tree-ring density and documentary evidence. *Global and Planetary Change* 72, S. 182–191. doi:10.1016/j.gloplacha.2010.02.004
- Becker, B. (1982): Dendrochronologie und Paläoökologie subfossiler Baumstämme aus Flussablagerungen. Ein Beitrag zur nacheiszeitlichen Auenentwicklung im südlichen Mitteleuropa. Wien (Mitteilungen der Kommission für Quartärforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften 5)
- Billamboz, A. (2006): Dendroarchäologische Untersuchungen in den neolithischen Ufersiedlungen Hornstaad-Hörnle. In: B. Dieckmann, A. Harwath und J. Hoffstadt (Hrsg.): Hornstaad-Hörnle IA. Siedlungsarchäologie im Alpenvorland. Stuttgart, S. 297–414 (Forschungen und Berichte zur Vor- und Frühgeschichte in Baden-Württemberg 98)
- Billamboz, A. (2009): Der Stand der Dendrochronologie für die Römerzeit in Baden-Württemberg. In: J. Biel, J. Heiligmann und J. Krausse (Hrsg.): Landesarchäologie. Festschrift für Dieter Planck zum 65. Geburtstag. Stuttgart, S. 655–676 (Forsch. u. Ber. zur Vor- und Frühgesch. Baden-Württemberg 100)
- Büntgen, U., D. Frank, D. Nievergelt und J. Esper (2006): Summer Temperature Variations in the European Alps, A.D. 755–2004. *Journal of Climate* 19, S. 5606–5623
- Büntgen, U., V. Trouet, D. Frank, H.H. Leuschner, D. Friedrichs, J. Luterbacher und J. Esper (2010): Tree-ring indicators of German summer drought over the last millennium. *Quaternary Science Reviews* 29, S. 1005–1016
- Büntgen, U., W. Tegel, K. Nicolussi, M. McCormick, D. Frank, V. Trouet, J. Kaplan, F. Herzog, U. Heussner, H. Wanner, J. Luterbacher und J. Esper (2011a): 2500 years of European climate variability and human susceptibility. *Science* 331, S. 578–582
- Büntgen, U., R. Brázdil, K.-U. Heussner, J. Hofmann, K. Kontic, T. Kyncl, C. Pfister, K. Chromá und W. Tegel (2011b): Combined dendro-documentary evidence of Central European hydroclimatic springtime extremes over the last millennium. *Quaternary Science Reviews* 30 (2011), S. 3947–3959
- Büntgen, U., W. Tegel, K.-U. Heussner, J. Hofmann, R. Kontic, T. Kyncl und E.R. Cook (2012): Effects of sample size in dendroclimatology. *Climate Research* 53, S. 263–269
- Carey, M. (2012): Climate and history: a critical review of historical climatology and climate change historiography. *WIREs Clim Change* 2012 (3), S. 233–249. doi: 10.1002/wcc.171
- Cook, E. und A. Kairiukstis (1990): Methods of dendrochronology. Applications in the environmental sciences. Dordrecht
- Cufar, K., M. de Luis, D. Eckstein und L. Kajfež-Bogataj (2008): Reconstructing dry and wet Summers in SE Slovenia from Oak Tree-Ring Series. *International Journal of Biometeorology* 52, S. 607–615
- Davis, B.A.S. et al. (2003): The temperature of Europe during the Holocene reconstructed from pollen data. *Quat Sci. Rev* 22, S. 1701–1716
- Dearing, J., R. Battarbee, R. Dikau, L. Larocque und F. Oldfield (2006): Human-environment interactions: learning from the past. *Regional Environmental Change* 6, S. 1–16
- Friedrich, M., S. Remmele, B. Kromer, J. Hofmann, M. Spurk, K.K. Felix, C. Orzel und M. Küppers (2004): The 12.460 year Hohenheim oak and pine tree-ring chronology from Central Europe – a unique annual record for radiocarbon calibration and palaeoenvironment reconstruction. *Radiocarbon* 46 (3), S. 1111–1122
- Fritts, H. (1976): Tree rings and climate. London u.a.
- Grudd, H. (2008): Torneträsk tree-ring width and density AD 500–2004: A test of climatic sensitivity and a new 1500-year reconstruction of north Fennoscandian summers. *Climate Dynamics* 31, S. 843–857
- Haneca, K., K.C. Cufar und H. Beeckman (2009): Oaks, tree-rings and wooden cultural heritage: a review of the main characteristics and applications of oak dendrochronology in Europe. *Journal of Archaeological Science* 36 (1), S. 1–11
- Hulme, M. (2011): Reducing the Future to Climate: A Story of Climate Determinism and Reductionism. *Osiris* 26, S. 245–266. doi: 10.1086/661274
- Jones, P.D. et al. (2009): High-resolution palaeoclimatology of the last millennium: a review of current status and future prospects. *Holocene* 19, S. 3–49
- Kelly, P.M., H.H. Leuschner, K.R. Briffa und I.C. Harris (2002): The climatic interpretation of pan-European signature years in oak ring-width series. *Holocene* 12, S. 689–694
- Kreuz, A. (1990): Die ersten Bauern Mitteleuropas – eine archäobotanische Untersuchung zu Umwelt und Landwirtschaft der Ältesten Bandkeramik. Leiden
- Laurelut, C., W. Tegel und J. Vanmoerkerke (2002): Repères dendrochronologiques et aspects de la technologie du bois pour le fin de l'Âge du fer dans les bassins de la Meuse et de la Moselle. *Charleville-Mézières*, S. 15–22 (Société Archéologique Champenoise, Mémoire 16, Supplément. Actes du XXVe Colloque de l'AFEAF. Repas des vivants et nourriture pour les morts en Gaule)
- Lüning, J. (2000): Steinzeitliche Bauern in Deutschland. Die Landwirtschaft im Neolithikum. Bonn
- Mauelshagen, F. (2010): Klimageschichte der Neuzeit. Darmstadt
- McCormick, M., U. Büntgen, M.A. Cane, E.R. Cook, K. Harper, P. Huybers, T. Litt, S.W. Manning, P.A. Mayewski, A.F.M. More, K. Nicolussi und W. Tegel (2012): Climate Change during and after the Roman Empire: Reconstructing the Past from Scientific and Historical Evidence. *Journal of Interdisciplinary History* 43 (2), S. 169–220
- Nicolussi, K., M. Kaufmann, T.M. Melvin, J. van der Plicht, P. Schiefling und A. Thurner (2009): A 9111 year long conifer tree-ring chronology for the European Alps: a base for environmental and climatic investigations. *The Holocene* 19 (6), S. 909–920
- Nicolussi, K., I. Matuschik und W. Tegel (2013): Klimavariabilität und Siedlungsdynamik am Beispiel der Feuchtbodensiedlungen im Raum Oberschwaben, Bodensee und Nordostschweiz 4400–3400 BC. *Dendro-Chronologie, -Typologie, -Ökologie*. Festschrift für André Billamboz zum 65. Geburtstag. Freiburg, S. 69–85
- PAGES 2k Consortium (2013): D.S. Kaufman et al.: Continental-scale temperature variability during the past two millennia. *Nature Geoscience* 6, S. 339–346. doi.org/10.1038/ngeo1797
- Pfister, C. (2010): The vulnerability of past societies to climatic variation: a new focus for historical climatology in the twenty-first century. *Climatic Change* 100, S. 25–31
- Schweingruber, F.H. (1993): Trees and wood in dendrochronology. Morphological, anatomical, and tree-ring analytical characteristics of trees frequently used in dendrochronology. Berlin, Heidelberg
- Tegel, W., J. Vanmoerkerke und U. Büntgen (2010): Updating historical tree-ring records for climate reconstruction. *Quaternary Science Reviews* 29, S. 1957–1959
- Tegel, W., R. Elburg, D. Hakelberg, H. Stäuble und U. Büntgen (2012): Early Neolithic Water Wells Reveal the World's Oldest Wood Architecture. *PLoS ONE* 7 (12): e51374. doi: 10.1371/journal.pone.0051374
- Tegel, W., D. Hakelberg, J. Vanmoerkerke und U. Büntgen (2013): Jahringe als Quellen für Baukonjunktur und Niederschlag in Nordgallien 500 BC–500 AD. In: *Dendro-Chronologie, -Typologie, -Ökologie*. Festschrift für André Billamboz zum 65. Geburtstag. Freiburg, S. 145–156
- Wanner, H., J. Beer, J. Bütikofer, T.J. Crowley und U. Cubasch et al. (2008): Mid- to Late Holocene climate change: an overview. *Quat Sci Rev* 27, S. 1791–1828. doi: 10.1016/j.quascirev.2008.06.013
- Wilson, R., D. Miles, N.J. Loader, T. Melvin, L. Cunningham, R. Cooper und K. Briffa (2012): A millennial long March–July precipitation reconstruction for southern-central England. *Climate Dynamics* 40 (3–4), S. 997–1017

SUMMARY

Tree-Ring Data from Archeological Woods as Climate and Environmental Archives

by Willy Tegel, Dietrich Hakelberg

Man-made wooden artefacts can survive under waterlogged conditions over thousands of years. Archaeological wood can be dated annually precise by its tree-ring series, which are used for establishing Holocene tree-ring chronologies. Dendroarchaeology researches into the interdependency between man, wood and woodland in the course of history. Beyond the tree-ring calendar, tree-rings are also a valuable proxy for climate reconstructions. Typical tree-ring patterns of narrower and wider rings mirror the climate-growth relationship of the trees in the past. Dendroclimatology studies climate conditions in the past and explores also periods with no instrumental climate measurements. Climate reconstructions and precise dendrochronological datings allow archaeologists and historians a better understanding of former living conditions, and to critically assess environmental impacts on economy and society. In this way, modern climate change can be considered retrospectively in its Holocene context.