

Ausbruch des Laacher-See-Vulkans

Zwei neue Radiokarbon-Alter eines verschütteten Baumes

Der Ausbruch des Laacher-See-Vulkans soll sich etwa vor 12.900 Jahren ereignet haben. Diese Jahreszahl leitet sich primär von einem kalibrierten Radiokarbon-Alter ab. – Was aber bedeuten so bezeichnete Alter? Können sie mit Kalenderjahren gleichgesetzt werden? Zwei aktuelle Radiokarbon-Bestimmungen eines unmittelbar vom Vulkanausbruch verschütteten Baumes bilden den Ausgangspunkt, um diese Fragen zu diskutieren.

Michael Kotulla

Laacher-See-Vulkan: explosiver Ausbruch

Der Laacher-See-Vulkan hat bei seinem explosiven Ausbruch am Ende der Eiszeit enorme Mengen an Bims, Asche und Gesteinsfragmenten gefördert (detaillierte Beschreibung siehe z.B. SCHMINCKE 2014). Im Nahbereich ist das Material hauptsächlich aus Tephrawolken* ausgefallen oder durch heiße Massenströme zur Ablagerung gekommen. Dabei ist örtlich eine spärliche Vegetation verschüttet und konserviert worden. Die Hauptphase des Ausbruchs dauerte wahrscheinlich nur wenige Tage. Seit mindestens 2000 Jahren werden die Tephraablagerungen – heute als Laacher-See-Tephra (LST) bezeichnet – abgebaut.

Verkohlte Baumstämme: Fund und Beprobung

Der Verfasser hat 2016 zwei verkohlte Baumstämme in einer Bimsabbaugrube am Ortsrand von Nickenich entdeckt, etwa 5 km östlich vom Ausbruchspunkt Laacher See (Abb. 2).

Die etwa 60 cm (Baumstamm 1) bzw. 90 cm (Baumstamm 2) langen und bis zu 20 cm breiten verkohlten Stammelemente sind von Aschen der mittleren Laacher-See-Tephra (LST) umschlossen

Abb. 1 Beschleuniger-Massenspektrometer des AMS-Laboratoriums des Horia Hulubei National Institute for Physics and Nuclear Engineering (IFIN-HH) in Rumänien. Mit dieser Anlage wurde für Probe NCK-1b (Holzkohle) die ^{14}C -Konzentration gemessen. Es handelt sich um einen 1MV-Tandetron-Beschleuniger. (Foto: © IFIN-HH, freundliche Zurverfügungstellung)

Dieser Artikel ist im Wesentlichen ein Extrakt des Special Papers *Verkohlte Baumstämme in Tephra-Ablagerungen des Laacher-See-Vulkans: Neue Radiokarbon-Bestimmungen und ihre Altersinterpretation* (KOTULLA 2019).

Kompakt

Die Radiokarbon-Methode ist eine weit verbreitete Methode zur Altersbestimmung archäologischer und quartärgeologischer Objekte. Hier werden zwei aktuelle Radiokarbon-Bestimmungen von einem Baum präsentiert, der beim Ausbruch des Laacher-See-Vulkans verschüttet wurde. Die Radiokarbon-Konzentrationen und die daraus herkömmlicherweise abgeleiteten Radiokarbon-Alter stimmen mit bisherigen Veröffentlichungen überein: um 11.050 konventionelle bzw. um 12.900 kalibrierte ^{14}C -Jahre (Proben Baumstamm 1).

Die Radiokarbon-Zeitskala ist im Skalenbereich 13.900 bis 0 kalibrierte ^{14}C -Jahre durch Baumringchronologien geeicht (kalibriert); für diesen Skalenbereich gilt kalibriertes ^{14}C -Jahr gleich Kalenderjahr (Realjahr). Es wird aufgezeigt, dass für den Skalenabschnitt > 3000 kalibrierte ^{14}C -Jahre (vor dem ersten vorchristlichen Jahrtausend) die Grundlage für solch eine Altersinterpretation fehlt. Unter anderem sind für diesen Abschnitt die Baumringchronologien nicht System-extern validiert. Sie sind nicht ausschließlich mit der dendrochronologischen Methode (Kreuzdatierung) konstruiert, sondern durchweg direkt oder indirekt auf der Basis von ^{14}C -Vordatierungen (Quasi-Zirkelschluss). Und sie sind nicht reproduzierbar, da die Rohdaten und Konstruktionsdaten nicht publiziert sind. Das *reale* Alter von Baumstamm 1 – das Datum der Verschüttung durch Laacher-See-Tephra – lässt sich deshalb mit dem derzeitigen Konzept der Dendrokalibration nicht bestimmen. Es ist nicht bekannt.



Abb. 2 Der Laacher See, etwa 40 km südlich Bonn. Blickrichtung etwa nach Süden, im Vordergrund der Lydia-Turm. Das wassergefüllte Loch entstand durch ein explosives vulkanisches Eruptionsereignis; die Hauptphase dauerte vermutlich nur wenige Tage. Der See ist etwa 2 km lang und bis zu 51 m tief. Foto: © Thilo PÖRLING, www.poerling-immobilien.de (freundl. Zurverfügungstellung).

Tab. 1 Altersinterpretation der Proben NCK-1 und Vergleich mit den Ergebnissen von BAALES et al. (2002); Erläuterung siehe Textteil. Poz, Poznań Radiocarbon Laboratory in Poznań, Polen; RoAMS, RoAMS-Laboratorium des Horia Hulubei National Institute for Physics and Nuclear Engineering (IFIN-HH) in Rumänien; Hd, damals ^{14}C -Laboratorium im Institut für Umweltphysik der Universität Heidelberg.

und von weiteren Lapilli*- und Aschenlagen der mittleren LST überlagert (Abb. 3); insgesamt ist die Abbauwand etwa 6 m hoch. Die aufrechte Position der Baumstämme lässt auf eine Einbettung an ihrem ursprünglichen Standort schließen. Allerdings sind die liegenden Abschnitte – untere LST und ehemalige Oberfläche mit Verwurzelungszone – nicht aufgeschlossen.

Von jedem Baumstamm ist eine kleinere Probenmenge für mögliche spätere Untersuchungen entnommen worden (Proben NCK-1 und NCK-2). Ein Teil des Probenmaterials von Baumstamm 1 wurde schließlich 2018 für Radiokarbon-Bestimmungen an zwei Laboratorien versendet (NCK-1a, NCK-1b). Die Beauftragung erfolgte im Namen und im Auftrag der Studiengemeinschaft Wort und Wissen e.V., Baiersbronn.

Ergebnisse: Radiokarbon-Alter

Die Laboratorien weisen die Ergebnisse der Radiokarbon-Bestimmungen nicht in Form von Radiokarbon-Konzentrationen aus, sondern unmittelbar als konventionelle Radiokarbon-Alter (Herleitung siehe Kasten 1). Demnach beträgt das konventionelle Radiokarbon-Alter der Probe NCK-1a 10.999 ± 60 ^{14}C -Jahre BP und das der Probe NCK-1b 11.099 ± 68 ^{14}C -Jahre BP (Tab. 1, Pos. 1 und 2; BP, before present, vor heute mit Bezugsjahr 1950). Im Rahmen ihrer 1σ -Unsicherheiten sind die konventionellen ^{14}C -Alter der Proben des verkohlten Baumstamms 1 nicht unterscheidbar.

Das kalibrierte ^{14}C -Alter kann unter Verwendung des Programms OxCal (BRONK RAMSEY 2017) ermittelt werden (zur Art und Weise der Kalibration* s.u.). Nach diesem Programm, mit dem Kalibrationsdatensatz von IntCal13 (REIMER et al. 2013a; IntCal, international calibration, s.u.), liegt das Alter bei Probe NCK-1a zwischen 13.017 und 12.727 und bei Probe NCK-1b zwischen 13.091 und 12.794 kalibrierten ^{14}C -Jahren BP (Tab. 1, Pos. 1 und 2). Das kalibrierte Alter wird bezogen auf den Ausgangswert mit einer Wahrscheinlichkeit von 95,4% in Form einer Altersspanne ausgewiesen. Das Programm OxCal bietet auch eine Visualisierung der Kalibration (Abb. 4).

Hinsichtlich der Fundsituation – von den Auswurfprodukten der Laacher-See-Eruption verschüttete, aufrecht stehende Baumstämme – bietet sich ein Vergleich mit den Arbeiten von

Pos.	Probe	Laborcode und -nummer	Baumringjahr/Position	Alter [konventionelle ^{14}C -Jahre BP $\pm 1\sigma$]	Alter [kalibrierte ^{14}C -Jahre]		
					OxCal-Programm (IntCal13-Kurve, „95%-Spanne“)		IntCal13-Wertreihe
					BC	BP	BP
Kotulla (2019)							
1	NCK-1a	Poz-101138	nicht bestimmbar	10999 ± 60	11068-10778	13017-12727	12817,5
2	NCK-1b	RoAMS 696.93	nicht bestimmbar	10999 ± 68	11142-10845	13091-12794	13005
3	Mittelwert			11049			12920
Baales et al. (2002)							
4	Kruft 9	Hd-19098	1-20	11063 ± 30			
5	Kruft 9	Hd-19092	21-30	11066 ± 28			
6	Kruft 9	Hd-18622	31-40	11073 ± 33			
7	Kruft 9	Hd-19037	41-50	11075 ± 28			(eigener
8	Kruft 9	Hd-18438	äußerste	11065 ± 22			Ansatz:)
9	Mittelwert			11062 ± 11			12916

BAALES et al. (1998, 2002) an. BAALES et al. (1998) hatten 1996 bei Krufft, etwa 5 km südlich des Fundpunktes Nickenich, in einer Bimsabbau-grube aus der mittleren Laacher-See-Tephra verkohlte Bäume freigelegt und u. a. ^{14}C - und dendrochronologische Analysen veranlasst.

Neue Radiokarbon-Alter passen zu bisherigen Ergebnissen.

Der Vergleich zeigt, dass die relativen ^{14}C -Konzentrationen der verkohlten Baumstämme der Lokaltäten Krufft und Nickenich – hier ausgedrückt als konventionelle ^{14}C -Alter BP – im Rahmen ihrer 1σ -Unsicherheiten (Alter) nicht unterscheidbar sind (Tab. 1, Pos. 1–2 sowie 4–8). Dasselbe gilt auch für die kalibrierten ^{14}C -Alter bezogen auf die jeweiligen Mittelwerte: 12.920 und 12.916 kalibrierte ^{14}C -Jahre BP (Tab. 1, Pos. 3 und 9; ohne Unsicherheiten); zu der Kalibration von BAALES et al. (2002) siehe auch KOTULLA (2016). Insofern stimmen die Ergebnisse von KOTULLA (2019) und BAALES (2002) überein. Kalibrierte ^{14}C -Jahre in diesem Skalenbereich werden mit Kalenderjahren gleichgesetzt (s. u.). Folglich passen die Radiokarbon-Alter von KOTULLA (2019) auch zu dem ausgewiesenen Ausbruchdatum von etwa „12.900 Jahren vor heute“.

Diskussion

Kalibration der Radiokarbon-Zeitskala mit Baumringchronologien

Eine Kalibration der Radiokarbon-Zeitskala ist erforderlich, weil – so REIMER et al. 2013a – „atmosphärische ^{14}C -Konzentrationen mit der Zeit variieren“. Die von der Kalibrations-Arbeitsgruppe (IntCal Working Group) herausgegebene sog. atmosphärische Kalibrationskurve – aktuell IntCal13 – ist eine Zusammenstellung aus Datensätzen unterschiedlicher Herkunft. Die Datenbasis für den Skalenbereich 13.900 bis 0 kalibrierte ^{14}C -Jahre BP bilden Baumringe; sie gelten *bona fide* als Überlieferung des atmosphärischen CO_2 .

Das Proben- und Datenmaterial von Baumringchronologien (Dendrochronologien*) ist wie folgt zusammengestellt (siehe Kasten 2):

- Für den Skalenbereich 7150–1900 kalibrierte ^{14}C -Jahre BP: hauptsächlich Belfast-Eichenchronologie und Hohenheim-Eichenchronologie.
- Für den Skalenbereich 12.580–7150 kalibrierte ^{14}C -Jahre BP: Hohenheim-Eichenchronologie und Hohenheim-Kiefernchronologie.
- Für den Skalenbereich 13.900–12.580 kalibrierte ^{14}C -Jahre BP: „Radiokarbon-kalibrier-



te“ schwimmende, spätglaziale Kiefernchronologie (Deutschland und Schweiz).

Die jeweiligen Proben werden i. d. R. aus 10 oder 20 aufeinanderfolgenden Jahrringen einer Sequenz gebildet; sie sind einerseits dendrochronologisch absolut- oder „Radiokarbon-kalibriert“-datiert sowie andererseits ^{14}C -datiert (konventionell). Von diesen gelieferten und ausgewählten Rohdatensätzen (Wertepaare: kalibriertes Alter BP, ^{14}C -Alter BP $\pm 1\sigma$) wird eine statistisch geglättete Kalibrationskurve erzeugt, von dieser dann ein Kalibrationsdatensatz (Wertepaare wie oben) in Schritten von 5 oder 10 kalibrierten ^{14}C -Jahren.

Die Bearbeiter der Jahrringchronologien reklamieren – sofern die Chronologie vom Startpunkt bis zur Gegenwart mit dem dendrochronologischen Überbrückungsverfahren erstellt ist –, eine jahrgenaue, absolute Skala ohne jegliche Unsicherheit geschaffen zu haben.

Abb. 3 Reste eines verkohlten Baumstamms in Laacher-See-Tephra (LST), etwa 5 km östlich Laacher See (mittig); Bimsabbau-grube Nickenich. Die Abbauwand ist über 6 m hoch. Der untere Teil der Laacher-See-Tephra ist nicht aufgeschlossen, der obere Teil erodiert oder zuvor abgetragen. Der verkohlte, aufrecht stehende Baumstamm ist von feinkörnigen Aschen (sog. Hauptbritzbank) umschlossen. Die Probe NCK-1 stammt von diesem Baumstamm. Länge des Trekkingstocks: 95 cm. Foto: M. KOTULLA, 24. 9. 2016.

Glossar

Cal: Abkürzung für „calibrated“. Hier für „kalibrierte ^{14}C -Jahre“; sie werden von der Kalibrations-Arbeitsgruppe mit Kalenderjahren gleichgesetzt.

Dendrochronologie: Zusammengesetzt aus den griechischen Wörtern für Baum, Zeit und Lehre. Allgemein: Studium der chronologischen Sequenz jährlicher Wachstumsringe in Bäumen; konkret (als Altersbestimmungsmethode): die Konstruktion einer lückenlosen Chronologie mit Baumjahren (Jahrringkalender) von der Gegenwart bis möglichst weit zurück in die Vergangenheit. Baumringchronologie und Dendrochronologie werden synonym verwendet.

Jüngere Dryas: Eine Phase der klimostratigraphisch gegliederten, jüngeren Abschnitte des Quartärs in NW-Europa, stratigraphisch nach der relativen Kalt-/Warmphase Allerød (beide oberstes Pleistozän).

Kalibration: Eichung; hier Eichung der ^{14}C -Zeitskala.

Lapilli: Tephra-Komponenten mit einer Korngröße von 2–64 mm.

Radiokarbon: Auch Radiokohlenstoff, ^{14}C ; natürlich vorkommendes, radioaktives Isotop des Kohlenstoffs. Natürliche Häufigkeit (gegenwärtig): ^{14}C , $< 10^{-9}\%$, zum Vergleich: ^{12}C , 98,9%; ^{13}C , 1,1%.

Tephra: Pyroklastika; Auswurfprodukte einer explosiven vulkanischen Eruption; nach zunehmender Korngröße: Asche, Lapilli sowie Blöcke und Bomben.

Wiggle-Matching: An- oder Einpassung (Tuning) einer Radiokarbon-Mittelkurve (oder -Trendkurve) einer schwimmenden Chronologie auf die einer absolutdatierten Standardchronologie (Absolutchronologie). Durch diese (interpretative) Synchronisation bzw. Korrelation wird die schwimmende Chronologie durch Verankerung mit der Standardchronologie datiert.

So schreiben z.B. FRIEDRICH et al. (2004): „Die absolut-datierte Baumringchronologie erstreckt sich nun bis 12.410 cal BP (10.461 BC). Folglich reicht die Baumring-basierte ^{14}C -Kalibration nun bis in die zentrale Jüngere Dryas* zurück.“ Diese Baumringchronologie (zusammengesetzt aus Hohenheim-Eichen- und Hohenheim-Kiefernchronologie) wird auch als Hohenheimer Jahrringkalender bezeichnet. Implizit wird die (konstruierte) Dendro-Zeitskala in

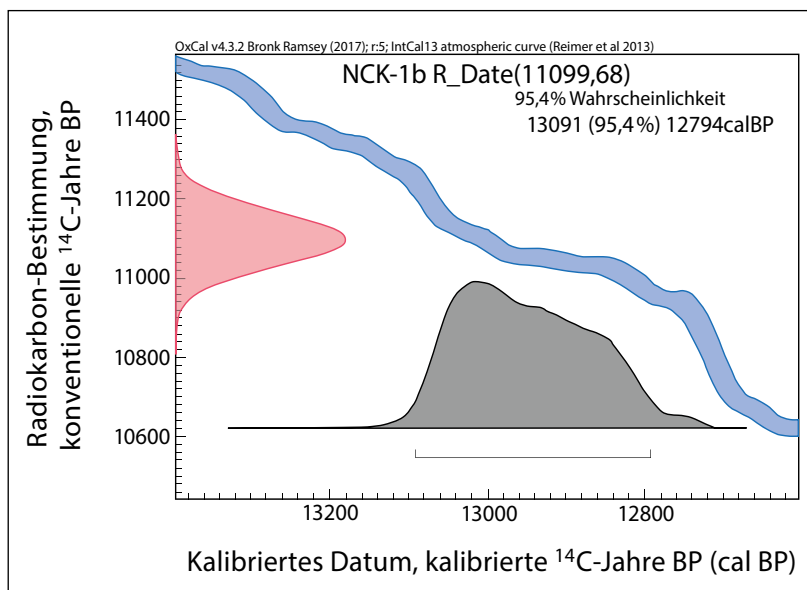


Abb. 4 Kalibration des konventionellen ^{14}C -Alters der Probe NCK-1b. Mit dem Programm OxCal (BRONK RAMSEY 2017) erfolgt unter Zugrundelegung der atmosphärischen Kalibrationskurve IntCal13 (lila mit blauem Rand; REIMER et al. 2013a) eine Umrechnung und graphische Darstellung. Hier: 11.099 ± 68 konventionelle ^{14}C -Jahre BP (Ausgangswert in Klammern neben „Date“ mit 1σ -Unsicherheit), dargestellt in vertikaler Achse (rot), zu einem kalibrierten Radiokarbon-Alter zwischen 13.091 und 12.794 kalibrierten ^{14}C -Jahren BP (horizontale Achse, grau; mit einer Wahrscheinlichkeit von 95,4% bezogen auf den Ausgangswert). Zur Methode der Kalibration siehe Textteil. BP, before present; vor heute, Bezugsjahr 1950.

Dendrojahren (hier 12.410) 1:1 auf eine Real-Zeitskala in Kalenderjahren projiziert und mit ihr gleichgesetzt; dadurch ist die Baumringkalibrierte ^{14}C -Zeitskala ebenfalls dieser Real-Zeitskala gleichgesetzt, mit Kalenderjahren als Einheit.

Konstruktion langer Baumringchronologien

Die Konstruktion langer Baumchronologien wird beispielhaft an zwei Grafiken dargelegt.

SCHMIDT (1981) unterscheidet „absolut datierte Chronologien“ (graue Balken in Abb. 5) und „schwimmende, konventionell ^{14}C -datierte Chronologien“ (weiße Balken). Das zeigt, dass die Baumindividuen unbekannten Alters ^{14}C -(vor)datiert und gegebenenfalls nach Bildung von Teilchronologien auf einer Dendro-Zeitskala entsprechend positioniert werden.

Die von BECKER (1982) erstellte „t-Eichenchronologie“ besteht sogar aus drei Teilen; Stand 1982 (Abb. 6):

1. Kalenderjahrgenau bis „2685 v. Chr.“: Kombination aus historischer Chronologie, ^{14}C -Vordatierungen und Synchronisationen deutscher Regionalchronologien untereinander.

2. Vier Radiokarbon-kalibrierte Teilchronologien von „2630 bis 7200 v. Chr.“: Korrelation mit der Borstenkiefernchronologie (s. Kasten 2) über Vergleiche der Radiokarbon-Mittelkurven (Wiggle-Matching*), „korrigierte Absolutalter bis 7200 v. Chr.“.

3. Konventionell ^{14}C -datierte Sequenzen von „8650 bis 8150 ^{14}C -Jahre v. h.“: ^{14}C -Vordatierungen, aufgrund der ^{14}C -Skala außerhalb der Borstenkiefernchronologie.

Lange Baumringchronologien sind durchweg Radiokarbon-vordatiert.

Demnach erfolgt eine Positionierung von Teilchronologien oder einzelnen Jahrring-Reihen jenseits der Standardchronologie (Skalenabschnitt vor 2685 BC) auf der Dendro-Zeitskala – jahrgenau oder grob – durch ^{14}C -Vordatierungen in Kombination mit Wiggle-Matching oder durch ^{14}C -Vordatierungen alleine. Darüber hinaus wird hier der maßgebliche Einfluss der Borstenkiefernchronologie auf die Hohenheim-Eichenchronologie deutlich.

Die Eichenchronologie wurde schließlich weiter zurück verlängert, indem die schwimmenden Teilchronologien mit der Standardchronologie dendrochronologisch verknüpft wurden. Zu Methoden der Dendrochronologie siehe Kasten 2.

Eine „Lücke“ in der irischen Belfast-Chronologie (BLC) bei Dendro-Skalenpunkt 948 BC wird mit einem englischen Chronologie-Segment überbrückt (BROWN et al. 1986). Diese Konstellation haben OSSOWSKI LARSSON & LARSSON (2012) mit den veröffentlichten Rohdatensätzen nachgebaut, insbesondere unter Einbeziehung weiterer Funde. Sie schließen, dass die originäre Verknüpfung falsch ist. Demnach handelt es sich nicht um eine überbrückte (geheilte) Lücke, sondern um einen Bruch in der Chronologie. Diese Unterbrechung macht die Belfast-Chronologie im Sinne eines absoluten, jahrgenaue Kalenders für den Skalenabschnitt vor (älter) 947 BC im Grunde genommen wertlos.

Die schwimmende, spätglaziale Kiefernchronologie (LGP) ist über eine Brückenkonstruktion mit der Hohenheim-Kiefernchronologie (PPC) verknüpft und damit zeitlich verankert (HUA et al. 2009). Die Verankerung mit der Methode des Wiggle-Matchings, der An- bzw. Einpassung (Tuning) von Radiokarbon-Mittelkurven, in Verbindung mit einer Brückenchronologie aus Kiefern in Tasmanien (südöstlich von Australien), ist allerdings in mehrfacher Weise fragwürdig. So sind z.B. mehrere Möglichkeiten der Ringbreiten-Synchronisation der vier tasmanischen Kiefern möglich.

REIMER et al. (2013b, 1934) führen erstmals konkrete methodische Anforderungen für den Fall auf, dass Proben bzw. Datensatz-Reihen der Dendrochronologen für die Kalibrationskurve berücksichtigt bzw. verwendet werden sollen. Zum Beispiel sei neben der „Etablierung absoluter Alter“ die „Konstruktion unabhängiger“ Lang-Chronologien ausschlaggebend. Sie schreiben u.a.: „Der entscheidende Beweis für eine absolut-datierte Dendrochronologie ist die externe Validierung durch unabhängig etablierte Jahrringchronologien mittels signifikanter Kreuzdatierung (...).“ Beispielhaft für solch erfolgreich erbrachte Nachweise werden die europäischen Eichenchronologien genannt, mit

1 | Theorie und Praxis der Radiokarbon-Altersbestimmung

Das (konventionelle) Radiokarbon-Alter errechnet sich aus folgendem, einfachen Term:

$$(\text{Term 1}) \quad t = -8033 \ln (A_{SN} / A_{ON}^*)$$

mit: t , Alter; A_{SN} , Aktivität der Probe (S = sample); A_{ON} , Aktivität des Standards (O = für Oxalsäure); tiefgestelltes N , normalisiert (bezogen auf $\delta^{13}C$); *, in 1950.

Nach STUIVER & POLLACH (1977, 356) setzt der Term voraus:

- „Die Verwendung der Halbwertszeit [von ^{14}C , MK] von 5568 a (mittlere Lebensdauer von 8033 a)“; Libby-Zerfallskonstante: $\lambda_L = 1/8033 \text{ a}^{-1}$.
- „Die Annahme der Konstanz des atmosphärischen ^{14}C -Gehalts während der Vergangenheit“.
- „Die Verwendung von Oxalsäure (direkt oder indirekt) als Standard“.
- Eine „Normalisierung der Isotopenfraktionierung aller Probenaktivitäten zur Basis von $\delta^{13}C = -25\text{‰}$ (relativ zum

$^{13}C/^{12}C$ -Verhältnis von PDB [Pee-Dee-Belemnite, MK]“. Anmerkungen: neuer Standard ist VPDB; $\delta^{13}C = (((^{13}C/^{12}C)_{\text{Probe}} / (^{13}C/^{12}C)_{\text{Standard}}) - 1) 1000\text{‰}$.

– „Das Jahr 1950 ist automatisch das Basisjahr, mit Altersangaben in Jahre BP (d. h. heute [oder Gegenwart, MK] ist AD 1950).“

Die relative Aktivität beschreibt folgender Term:

$$(\text{Term 2}) \quad pMC = (A_{SN} / A_{ON}) 100\%$$

mit: pMC, percent Modern Carbon (Prozent moderner Kohlenstoff); 100 pMC ist definiert als ^{14}C -Konzentration der Atmosphäre im Jahr 1950.

Die Beziehung normalisierte/nicht-normalisierte Aktivität ist wie folgt:

$$(\text{Term 3}) \quad A_{SN} = A_S (1 - (2((25 + \delta^{13}C)/1000)))$$

mit: A_S , Aktivität Probe; $-25/1000$, postulierter Mittelwert terrestrischen Holzes; $\delta^{13}C$ (PDB), gemessener Wert der Probe.

Verweis auf PILCHER et al. (1984) und SPURK et al. (1998).

Diese Referenz-Beispiele erfüllen die Voraussetzung einer Unabhängigkeit (auch als tertiäre Replikation bezeichnet, s. Kasten 2) allerdings nicht. Die langen Eichenjahrring-Chronologien – Belfast, Hohenheim, Köln und Göttingen – sind unmittelbar oder mittelbar untereinander abgestimmt und bilden einen Chronologie-Komplex. LEUSCHNER (1992) schreibt: „Während die Hohenheim-, Belfast- und Köln-Serien in enger Kooperation aufgebaut wurden, wurde die Göttinger Torfeichenchronologie weitgehend unabhängig aufgebaut.“ So heißt es einige Jahre zuvor, dass die norddeutsche Torfeichenchronologie von Göttingen auf die süddeutsche Auwaldeichenchronologie von Göttingen synchronisiert wurde (LEUSCHNER & DELORME 1984). Letztere wiederum ist im Austausch mit der süddeutschen (Auwaldeichen-)Chronologie von Hohenheim

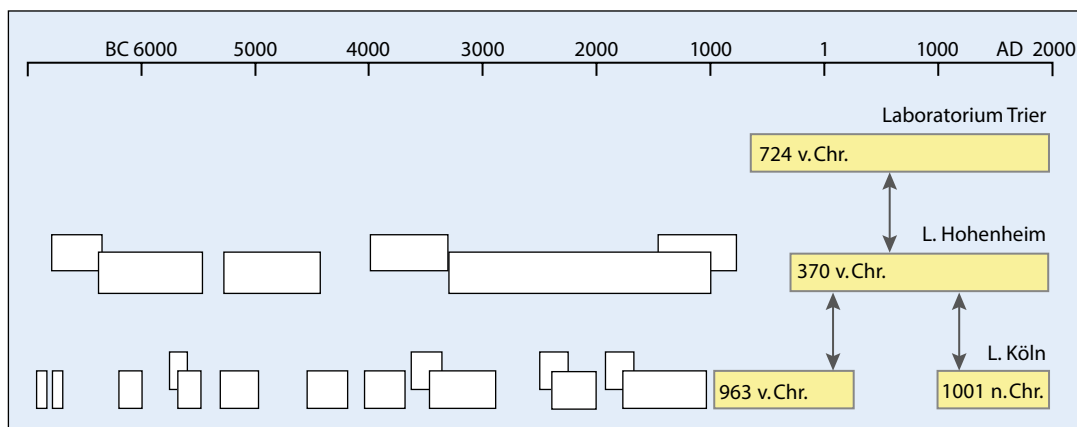
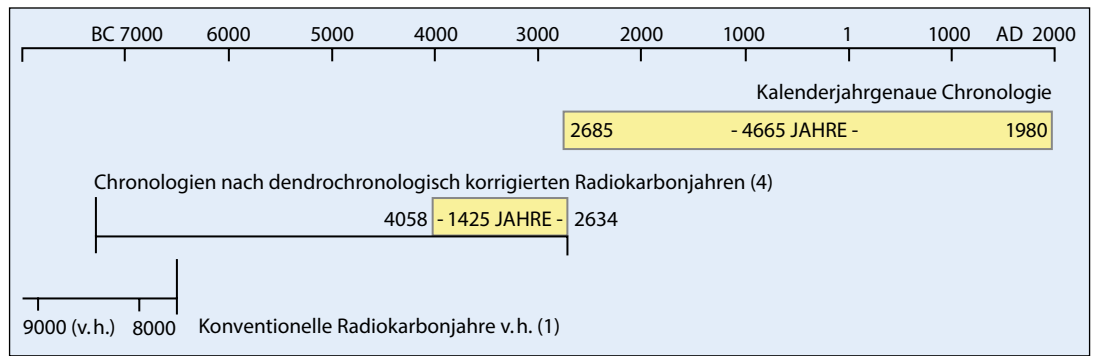


Abb. 5 Konstruktion der Eichen-Langchronologien der Laboratorien von Hohenheim und Köln mittels ^{14}C -Vordatierungen, Stand 1981. Nach SCHMIDT (1981), seine Abb. 2 (schematisch umgezeichnet). Legende (nach SCHMIDT 1981): Gelbe Balken: „Chronologien absolut datiert“; weiße Balken: „schwimmende Chronologien C^{14} datiert (konventionell)“; überlappende weiße Balken: „Chronologien zeitlich überlappend“; Pfeil: „Synchronlage“; L: Laboratorium.

Abb. 6 Konstruktion der Eichen-Langchronologie des Laboratoriums Hohenheim u. a. mittels ^{14}C -Vordatierungen, Stand 1982. Nach BECKER (1982), seine Abb. 6, unterer Teil (schematisch umgezeichnet). Beschriftung zu BECKERS Abb. 6 (S. 17): „Derzeitiger Stand der postglazialen Eichen-Jahrringchronologie in Südmitteleuropa. Die in Hohenheim erstellte Chronologie besteht aus einem kalendergenauen Teil (bis 2685 v. Chr.), vier Radiokarbonkalibrierten Teilchronologien (zwischen 2630 bis 7200 v. Chr.) sowie einer noch älteren Sequenz, die nach konventionellen ^{14}C -Alten von 8650 bis 8150 v. h. datiert.“ Anmerkung: Einzelelemente (oberer Teil der Originalabbildung) sind in dieser Abbildung des Verfassers nicht eingetragen.



entstanden (DELORME & LEUSCHNER 1983). Diese Aussagen zeigen beispielhaft, dass die Chronologien nicht unabhängig voneinander konstruiert wurden. Selbst nur eine einzige Abstimmung führt zu einer Abhängigkeit; einschränkende Aussagen wie „weitgehend unabhängig“ sind in diesem Sinne wertlos.

Es ist evident, dass Chronologien, die nicht unabhängig voneinander konstruiert wurden (bzw. werden), nicht zu einer gegenseitigen Validierung (Bestätigung) verwendet werden können (Zirkelschluss). Offenbar liegt bis dato keine extern validierte, absolut-datierte, lange Dendrochronologie vor.

Lange Baumringchronologien sind nicht wirklich validiert.

Zu den weiteren Anforderungen von REIMER et al. (2013b, 1934) und unter der Prämisse – Dendrochronologie als Wissenschaft – ist für den wissenschaftlich-methodischen Teil insbesondere festzuhalten:

1. Die von REIMER et al. (2013b) aufgestellten Anforderungen sind unzureichend. Die langen Dendrochronologien müssen nicht nur theoretisch und aussagegemäß nachvollziehbar, sondern auch praktisch überprüfbar sein. Sie müssen reproduzierbar sein. Zwar heißt es (S. 1934): „(...) für Proben der Kalibrationskurve ist es zwingend erforderlich, dass die Dendrochronologie gut erstellt und vollständig publiziert ist.“ Die dendrochronologischen Rohdaten und Konstruktionsdaten der Hohenheim-Chronologien sind bis dato aber nicht veröffentlicht. KUNIHOLM (2002, 67) bewertet nicht veröffentlichte Daten und Informationen wie folgt: „Wir müssen bedenken, dass unveröffentlichte Informationen nahezu wertlos sind.“

2. Es bedarf einer *wirklich* unabhängigen Validierung der langen Chronologien. Die sog. „externe Validierung“ im Sinne von REIMER et al. (2013b, s. o.) ist nicht System-extern, sondern System-intern. Eine unabhängige Validierung wäre z.B. durch Objekte bzw. Ereignisse bekannten Alters gegeben. Für die maßgeblichen langen Jahrringchronologien von West- und

Mitteleuropa ist eine unabhängige Validierung vor dem ersten vorchristlichen Jahrtausend – z.B. durch römische Bauwerke – gegenwärtig nicht gegeben.

3. Es liegt – insbesondere ab dem ersten vorchristlichen Jahrtausend – eine wechselseitige und abhängige Beziehung zwischen Radiokarbon-Alter und Dendro-Alter vor (u.a. ^{14}C -Vordatierungen). Mit einer Prädeterminierung von Dendro-Alter durch Radiokarbon-Alter ist eine unabhängige Dendro-Zeitskala nicht gegeben, mit welcher wiederum die Radiokarbon-Zeitskala kalibriert werden soll.

4. Die Konstruktion einer mutmaßlich ununterbrochenen Lang-Chronologie ist mit zahlreichen individuellen und persönlichen Faktoren der Bearbeiter behaftet: Sie ist u.a. selektiver, subjektiver und interpretativer Natur. Jede Kreuzdatierung ist eine Interpretation. Einer Lang-Chronologie aus Hunderten oder Tausenden Einzelelementen liegen ebenso viele Interpretationen zugrunde. Bei diesem Komplex von Interpretationen handelt es sich zudem um eine abhängige Nacheinander-Verkettung. Anstelle von Interpretation wird allerdings fast ausschließlich der Begriff „absolut-datiert“ verwendet.

Mit den gleichen Rohdaten kommen andere Bearbeiter möglicherweise zu anderen Ergebnissen oder auch zu gar keinen Ergebnissen. D. BROWN (2010) hat diesen Sachverhalt – unter erstmaliger Verwendung des Begriffs „interpretieren“ – so formuliert: „Es mögen auf Grundlage der gleichen Kollektion von Ringmustern andere Lösungen existieren, abhängig von der vom Analytisten getroffenen Wahl, die dann als gesehene Übereinstimmung interpretiert werden kann.“

Zusammengefasst: Die Konstrukteure der hier diskutierten langen Chronologien haben die Gültigkeit (Validität) und Unabhängigkeit ihrer Chronologien weder aufgezeigt noch belegt; die Beweislast aber liegt auf ihrer Seite.

Schließlich besteht gegenwärtig ein eklatantes Missverhältnis zwischen aufwendiger, hochtechnisierter Radiokarbon-Bestimmung (Abb. 1) und einer Quasi-Black-Box konstruierter, langer Baumringchronologien.

2 | Lange Baumringchronologien und ihr Aufbau

Kurzcharakteristik langer Baumring-chronologien (s. auch Tab. 2)

Kalifornische Borstenkiefernchronologie

Chronologie für Borstenkiefern der kalifornischen White Mountains (um 3000 m ü. M.), neben lebenden Individuen hauptsächlich Reste bzw. Fragmente umgefallener und erodierter Stämme. Zum Teil komplizierte, schwer interpretierbare Wuchsverläufe. Umfasst 7104 Dendrojahre (FERGUSON 1969) bzw. 8681 Dendrojahre (FERGUSON & GAYBRILL 1983); Material unbekannten Alters ¹⁴C-(vor)datiert. Bildete über viele Jahre das Rückgrat der ¹⁴C-Dendrokalibration; seit Mitte der 1990er-Jahre sind Proben- und Datensätze der Borstenkiefernchronologie allerdings ausgeschlossen. Dendrochronologische Rohdaten und Konstruktionsdaten nicht veröffentlicht.

Belfast-Eichenchronologie

Chronologie 1984 abgeschlossen, umfasst 7272 Dendrojahre (PILCHER et al. 1984, BROWN et al. 1986). Material von (subfossilen) Mooreichen, hauptsächlich von der Landwirtschaft geborgen und in Haufen zusammengetragen. Dendro-Skalenabschnitt 5289–116 BC bezieht 658 Bäume ein. Material unbekannten Alters ¹⁴C-(vor)datiert. Dendrochronologische Rohdaten der Queens-Universität Belfast (> 9000 Datensätze) nach einer Entscheidung des *Bearbeiters für Information* 2010 (zwangs-)veröffentlicht, Konstruktionsdaten allerdings nicht.

Hohenheim-Chronologien

Hohenheim-Eichenchronologie. Von BECKER (bis 1993) konstruiert und etabliert und von FRIEDRICH et al. (2004) abgeschlossen. Aus regionalen Eichenchronologien von Süd- und

Ostdeutschland sowie ausgewählten Daten historischer Gebäude, archäologischen Holzes und lebender Bäume zusammengesetzt. Das Baum-Material stammt hauptsächlich aus nacheiszeitlichen Flussablagerungen, die subfossile Auwaldeichen bergen (BECKER 1982). Das Durchschnittsalter der 6775 beprobten subfossilen Eichen beträgt 176 Jahre. Umfasst bis AD 2002 ununterbrochen 10.482 Dendrojahre.

Hohenheim-Kiefernchronologie

Geht ebenfalls auf BECKER (bis 1993) zurück, u. a. von FRIEDRICH et al. (2004) fortgeführt; mit dem älteren Ende der Hohenheim-Eichenchronologie dendrochronologisch verknüpft. Material hauptsächlich aus nacheiszeitlichen Flussablagerungen von Donau und Rhein, aus Ostdeutschland und der Schweiz. Umfasst (Stand 2004) auf Grundlage von 515 synchronisierten Kiefern 2520 Dendrojahre. Beide Chronologien bilden den ununterbrochenen Hohenheimer Jahrringkalender[#]; dendrochronologische Rohdaten und Konstruktionsdaten nicht veröffentlicht. Material unbekannten Alters ¹⁴C-(vor)datiert.

Methoden der Dendrochronologie

Replikation

Prinzip in der Dendrochronologie; nach BAILLIE (1995, 28): *Primäre* Replikation ist der Vorgang, individuelle Jahrringabfolgen einer Lokalität zu vergleichen; sie bilden ggf. eine lokale Chronologie. *Sekundäre* Replikation ist der Vorgang, unabhängige lokale Chronologien zu vergleichen; lokale Chronologien sind länger und robuster als individuelle Jahrringabfolgen. *Tertiäre* (oder *externe*) Replikation ist der Vorgang, Chronologien unabhängiger Bearbeiter zu vergleichen; als „ultimativer Test“

bezeichnet. – Der Begriff Replikation kann den Vorgang als auch den (interpretativen) Vollzug einer Synchronisation meinen. Primäre und sekundäre Replikation werden auch als *interne* Replikation zusammengefasst.

Überbrückungsverfahren

Das „schrittweise Übereinanderlegen von Jahrringkurven“ zum Aufbau einer Baumringchronologie wird auch als Überbrückungsverfahren bezeichnet (ECKSTEIN & WROBEL 2005)[#].

Kreuzdatierung (engl.: cross-dating)

Der (interpretative) Vollzug einer Synchronisation von zwei Jahrringabfolgen. Die Interpretation erfolgt visuell und mit statistischen Hilfsmitteln, z. B. der Kreuzkorrelationsanalyse.

Kreuzkorrelationsanalyse

Korrelationsanalyse zweier Stichproben-Zeitreihen a_i und b_i , wobei die Reihe b_i gegenüber der Reihe a_i (oder umgekehrt) verschoben wird; es wird versucht, die Zeitverschiebung(en) zu ermitteln, die den (die) höchsten Wert(e) für den (Kreuz-) Korrelationskoeffizienten r aufweisen. Zur Dendrochronologie: Der Korrelationskoeffizient ist allerdings von der Länge der zu vergleichenden Jahrringabfolgen abhängig; deshalb wird in Erweiterung auch der sog. t-Wert ermittelt und verwendet. – Der t-Test zur Ermittlung des t-Wertes ist „ein eher ziemlich grober Routinetest (...) als ein strenger statistischer Test“ (PILCHER et al. 1984); „die Werte für t können nicht in Wahrscheinlichkeiten überführt werden, da eine Berücksichtigung der Autokorrelation nicht möglich ist.“

[#] Siehe https://botanik.uni-hohenheim.de/archaeo-palaeo_dendro_hoh-jahrringkalender.

Pos.	Baumringchronologie	Abkürzung (englisch)	Dendro-Zeitskala [Dendrojahre BP]		Länge (Dendrojahre)	absolut-datiert? (den Bearbeitern zufolge)
			Start	Ende		
1	Belfast-Eichenchronologie	BLC	7238	-34	7272	ja, mit Überbrückung
2	Hohenheim-Eichenchronologie	HOC	10429	-52	10482	ja, ununterbrochen
3	Hohenheim-Kiefernchronologie	PPC	12325	9891	2435	dendro-verlinkt mit Pos. 2
4	Hohenheim-Chronologien, gesamt		12325	-52	12378	ja, ununterbrochen
5	Spätglaziale Kiefernchronologie	LGP	13978	12597	1382	schwimmend, ¹⁴ C-verlinkt mit Pos. 3

Tab. 2 Baumringchronologien, die Proben- und Datensätze für die Dendrokalibration liefern. Pos. 1: PILCHER et al. (1984), BROWN et al. (1986); Pos. 2: FRIEDRICH et al. (2004); Pos. 3: FRIEDRICH et al. (2004), REINIG et al. 2018; Pos. 5: HUA et al. (2009). Wegen des Bezugsdatums BP (= 1950) sind die damaligen Daten „bis Gegenwart“ rechnerisch negativ; z. B.: -34 entspricht AD 1984.

Fazit

Die Altersinterpretation für den Skalenbereich 13.900 bis 0 kalibrierte ¹⁴C-Jahre BP gründet auf eine Kalibration der ¹⁴C-Zeitskala durch lange Baumringchronologien. Die Macher der atmosphärischen Kalibrationskurve haben bisher nicht nachweisen können, dass die der Kurve zugrundeliegenden konstruierten

Baumringchronologien vor dem ersten vorchristlichen Jahrtausend valide sind. Demzufolge können kalibrierte ¹⁴C-Jahre nicht mit Kalenderjahren (Realjahren) gleichgesetzt werden. Das heißt konkret, das auch nicht bekannt ist, in welchem Verhältnis bzw. in welcher Beziehung 12.000 oder 13.000 kalibrierte ¹⁴C-Jahre [BP] zu Kalenderjahren (Realjahren) stehen.

Schlussfolgerung

Das *reale* Alter von Baumstamm 1 – das Datum der Verschüttung durch Laacher-See-Tephra – lässt sich mit dem derzeitigen Konzept der Dendrokalkulation nicht bestimmen. Es lässt sich auch nicht bestimmen über Ergebnisse der warvenchronologischen Methode oder der Argon/Argon-Methode; beide Ergebnisse sind auf bereits kalibrierte ^{14}C -Alter synchronisiert worden (KOTULLA 2016). Daraus folgt schließlich, dass das *reale* Alter von Baumstamm 1 gegenwärtig unbekannt ist.

Die langen Baumringchronologien verifizieren (bestätigen) die ^{14}C -Zeitskala vor dem ersten vorchristlichen Jahrtausend nicht. Es sind Baumringchronologien konstruiert worden, die sich aus ^{14}C -datierten Jahrring-Sequenzen zusammensetzen.

Eine Voraussetzung zur Berechnung von Radiokarbon-Alter ist „die Annahme der Konstanz des atmosphärischen ^{14}C -Gehalts während der Vergangenheit“ (STUIVER & POLLACH 1977, 356; siehe Kasten 1). Allerdings liegen zwei Variablen vor, der Gehalt an ^{14}C und ^{12}C ; das ist mindestens eine Unbekannte zu viel. Der einfache Berechnungsterm (siehe Kasten 1) beschreibt wahrscheinlich nur einen Sonderfall der Vergangenheit.

Literatur

BAALES M, BITTMANN F & KROMER B (1999) Verkohlte Bäume im Trass der Laacher See-Tephra bei Krufft (Neuwieder Becken). Ein Beitrag zur Datierung des Laacher See-Ereignisses und zur Vegetation der Allerød-Zeit am Mittelrhein. *Archäologisches Korrespondenzblatt* 28, 191–204.

BAALES M, JÖRIS O, STREET M, BITTMANN F, WENINGER B & WIETHOLD J (2002) Impact of the Late Glacial eruption of the Laacher See volcano, Central Rhineland, Germany. *Quaternary Research* 58, 273–288.

BECKER B (1982) Dendrochronologie und Paläoökologie subfossiler Baumstämme aus Flussablagerungen. Ein Beitrag zur nacheiszeitlichen Auenentwicklung im südlichen Mitteleuropa. *Mitteilungen der Kommission für Quartärforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften*, Band 5. Wien.

BRONK RAMSEY C (2017). Methods for Summarizing Radiocarbon Datasets. *Radiocarbon* 59, 1809–1833.

BROWN D (2010) QUB Dendrochronology raw data. http://www.chrono.qub.ac.uk/bennett/dendro_data/dendro.html.

BROWN DM, MUNRO MAR, BAILLIE MGL & PILCHER JR (1986) Dendrochronology – the absolute Irish standard. *Radiocarbon* 28, 279–283.

DELORME A & LEUSCHNER H-H (1983) Dendrochronologische Befunde zur jüngeren Flußgeschichte von Main, Lahn und Oker. *Eiszeitalter u. Gegenwart* 33, 45–57.

ECKSTEIN D & WROBEL S (2005) Dendrochronologie. In: PINGEL V & HAUPTMANN A (eds.) *Archäometrie – eine Querschnittswissenschaft. Methoden und Anwendungsbeispiele naturwissenschaftlicher Verfahren in der Archäometrie*. Stuttgart, 154–170.

FERGUSON CW (1969) A 7104-year annual tree-ring chronology for bristlecone pine, *Pinus aristata*, from the White Mountains, California. *Tree-Ring Bulletin* 29, 3–29.

FERGUSON CW & GRAYBILL DA (1983) Dendrochronology of bristlecone pine: a progress report. *Radiocarbon* 25, 287–288.

FRIEDRICH M, REMMELE S, KROMER B, HOFMANN J, SPURK M, KAISER KF, ORCEL C & KÜPPERS M (2004) The 12,460-year Hohenheim oak and pine tree-ring chronology from Central Europe – a unique annual record for radiocarbon calibration and paleoenvironment reconstructions. *Radiocarbon* 46, 1111–1122.

HUA Q, BARBETTI M, FINK D, KAISER KF, FRIEDRICH M, KROMER B, LEVCHENKO VA, ZOPPI U, SMITH AM & BERTUCH F (2009) Atmospheric ^{14}C variations derived from tree rings during the early Younger Dryas. *Quaternary Science Reviews* 28, 2982–2990.

KOTULLA M (2016) Die explosive Eruption des Laacher-See-Vulkans. *Stud. Integr. J.* 23, 111–116.

KOTULLA M (2019) Verkohlte Baumstämme in Tephra-Ablagerungen des Laacher-See-Vulkans: neue Radiokarbon-Bestimmungen und ihre Altersinterpretation. W+W Special Paper G-19-1, Baidersbronn; https://www.wort-und-wissen.de/artikel/sp/g-19-1_radiokarbon.pdf

KUNIHOLM PI (2002) Archaeological dendrochronology. *Dendrochronologica* 20, 63–68.

LEUSCHNER H-H (1992) Subfossil trees. In: BARTHOLIN T (ed.) *Tree-rings and environment. Proceedings of the International Dendrochronological Symposium*, Ystad, South Sweden, Lundqua Report 34, 193–197.

LEUSCHNER H-H & DELORME A (1984) Verlängerung der Göttinger Eichenjahrringchronologien für Nord- und Süddeutschland bis zum Jahr 4008 v. Chr. *Forstarchiv* 55, 3–5.

OSSOWSKI LARSSON P & LARSSON L-A (2012) Dating and linkage of the long Belfast BC chronology – an error in one of the key links. <http://www.cybis.se/forfun/dendro/hollstein/belfast/index.php>.

PILCHER JR, BAILLIE MGL, SCHMIDT B & BECKER B (1984) A 7272-year tree-ring chronology from Western Europe. *Nature* 312, 150–152.

REIMER PJ, BARD E, BAYLISS A, BECK JW, BLACKWELL PG, BRONK RAMSEY C, BUCK CE, CHENG H, EDWARDS RL & FRIEDRICH M (2013a) IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0–50,000 years cal BP. *Radiocarbon* 55, 1869–1887.

REIMER PJ, BARD E, BAYLISS A, BECK JW, BLACKWELL PG, BRONK RAMSEY C, BUCK CE, EDWARDS RL, FRIEDRICH M, GROOTES PM, GUILDERTSON TP, HAFIDASON H, HAJDAS I, HATTÉ C, HEATON TJ, HOGG AG, HUGHEN KA, KAISER KF, KROMER B, MANNING SW, REIMER RW, RICHARDS DA, SCOTT EM, SOUTHON JR, TURNER CSM & VAN DER PLICHT J (2013b) Selection and treatment of data for radiocarbon calibration: an update to the International Calibration (IntCal) criteria. *Radiocarbon* 55, 1923–1945.

REINIG F, NIEVERGELT D, ESPER J, FRIEDRICH M, HELLE G, HELLMANN L, KROMER B, MORGANTE S, PAULY M, SOOKDEO A, TEGEL W, TREYDTE K, VERSTEGE A, WAKER L & BÜNTGEN U (2018) New tree-ring evidence for the Late Glacial period from the northern pre-Alps in eastern Switzerland. *Quaternary Science Reviews* 186, 215–224.

SCHMIDT B (1981) Beitrag zum Aufbau der holozänen Eichenchronologie in Mitteleuropa. *Archäologisches Korrespondenzblatt* 11, 361–363.

SCHMINCKE H-U (2014) *Vulkane der Eifel. Aufbau, Entstehung und heutige Bedeutung*. 2. Auflage, Darmstadt.

Anschrift des Verfassers:

Michael Kotulla, SG Wort und Wissen, Rosenbergweg 29, 72270 Baidersbronn; E-mail: m.kotulla@wort-und-wissen.de