

## 6-11 Theorie und Praxis der Radiokarbon-Altersbestimmung

### Die Kalibration der Radiokarbon-Zeitskala durch die „IntCal-Arbeitsgruppe“ hat sich zu einem Standard entwickelt

#### Ermittlung konventioneller Radiokarbon-Alter

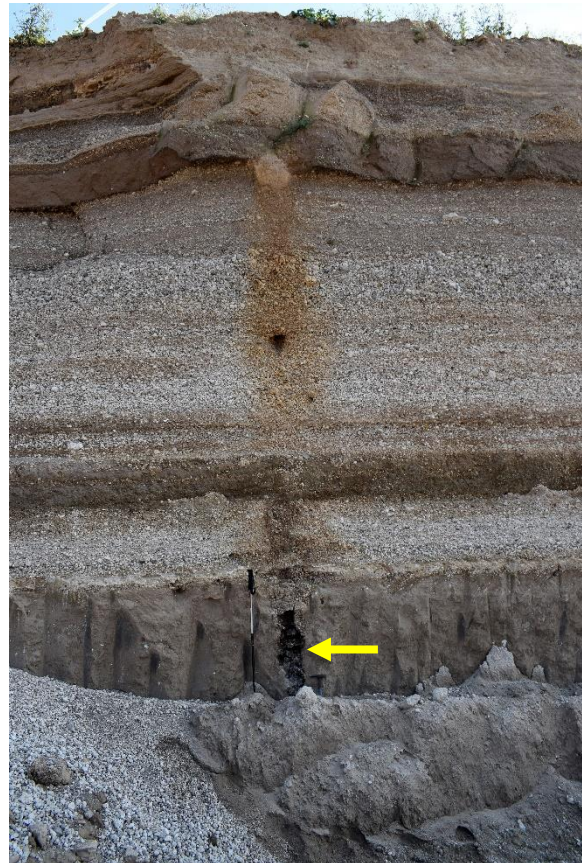
Das konventionelle Radiokarbon-Alter errechnet sich aus folgender Gleichung 1:

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

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

Nach STUIVER & POLLACH (1977, 356) setzt Gleichung 1 voraus:

- „Die Verwendung der Halbwertszeit [von  $^{14}\text{C}$ , MK] von 5568 a (mittlere Lebensdauer von 8033 a)<sup>1</sup>; Libby-Zerfallskonstante<sup>2</sup>:  $\lambda_L = 1/8033 \text{ a}^{-1}$ .
- „Die Annahme der Konstanz des atmosphärischen  $^{14}\text{C}$ -Gehalts während der Vergangenheit“.
- „Die Verwendung von Oxalic Acid (direkt oder indirekt) als Standard“.
- Eine „Normalisierung der Isotopenfraktionierung aller Probenaktivitäten zur Basis von  $\delta^{13}\text{C} = -25 \text{ ‰}$  (relativ zum  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis von PDB<sup>3</sup> [Pee-Dee-Belemnite, MK]“.
- „Das Jahr 1950 ist automatisch das Basisjahr, mit Altersangaben in Jahre *BP* (d. h. heute [oder Gegenwart, MK] ist *AD* 1950).“



**Abb. 1** Verkohlter Baumstamm, Bimsabbaugrube Nicke-nich (s. KOTULLA 2019). Die Abbauwand hat eine Höhe von über 6 m. Der untere Teil der Laacher-See-Tephra ist nicht aufgeschlossen, der obere Teil ist erodiert oder zuvor abgetragen worden. Der verkohlte, aufrecht stehende Baumstamm (gelber Pfeil) ist von feinkörnigen Aschenlagen (Hauptbritzbank) umschlossen, die Verfärbungen darüber sind möglicherweise Hinweise auf einen Entgasungskanal. Länge des Trekkingstocks: 95 cm. Foto: M. KOTULLA, 2016.

<sup>1</sup> Nach Bestimmungen von LIBBY (1955). Die neuere Cambridge-Halbwertszeit von  $5730 \pm 40$  Jahren (GODWIN 1962) wird aus Gründen der Vergleichbarkeit mit älteren Messungen nicht verwendet. HOLDEN (1990, 925) empfiehlt die Verwendung einer Halbwertszeit von  $5715 \pm 30$  Jahren (ungewichteter Durchschnitt zuvor publizierter Werte). – Es wird davon ausgegangen, dass mit der Kalibration der Radiokarbon-Alter die unterschiedlichen Halbwertszeiten keinen Einfluss auf das kalibrierte Ergebnis haben.

<sup>2</sup> Deshalb auch als Libby-Alter bezeichnet.

<sup>3</sup> Der Standard wurde zwischenzeitlich geändert, siehe z. B. STENSTRÖM et al. (2011, 5): „The original standard

material was carbonate from a marine fossil collected from the Pee Dee Formation in South Carolina, USA. The fossil originated from an extinct squid-resembling organism called a Belemnite. This material, called PDB (Pee Dee Belemnite), had the  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratio of 1.12372%. The high value reflects the marine origin of the material. The use of this standard therefore gives most natural materials negative  $\delta^{13}\text{C}$  values. The PDB material has been exhausted and replaced by the limestone standard VPDB (NBS19), which was manufactured from marble of unknown origin (...).“

Pos.	Probe	Laborcode und -nummer	$\delta^{13}\text{C}$ [0/00]	konventionelle $^{14}\text{C}$ -Jahre BP ( $\pm 1\sigma$ )	$1\sigma$ [0/0]
1	NCK-1a	Poz-101138	-27	10999 $\pm$ 60	$\pm$ 0,59
2	NCK-1b	RoAMS 696.93	-4,1	11099 $\pm$ 68	$\pm$ 0,61

**Tab. 1** Radiokarbon-Alter der Proben NCK-1a und NCK-1b I. Legende: Pos., Position;  $\delta^{13}\text{C}$ , Kohlenstoffisotopenverhältnis; Laborcodes: Poz: Poznan Radiocarbon Laboratory, A. Mickiewicz University, Polen; RoAMS: Horia Hulubei National Institute of Physics and Nuclear Engineering - IFIN HH, RoAMS Laboratory, Rumänien.

Die relative Aktivität beschreibt folgende Gleichung 2:

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

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

Die Beziehung normalisierte/nicht-normalisierte Aktivität ist wie folgt (Gleichung 3):

$$A_{\text{SN}} = A_{\text{S}} (1 - (25 + \delta^{13}\text{C})/1000)); \quad (\text{Gleichung 3})$$

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

### Ein Beispiel aus der Praxis: verkohlter Baumstamm in Tephra-Ablagerungen des Laacher-See-Vulkans (KOTULLA 2019)

Von Probenmaterial eines verkohlten Baumstamms in Tephra-Ablagerungen<sup>4</sup> des Laacher-See-Vulkans bei Nickenich (Abb. 1) sind von zwei Laboratorien Radiokarbon-Bestimmungen durchgeführt worden.

Die Ergebnisse der Radiokarbon-Bestimmungen wurden nicht in Form von  $^{14}\text{C}$ -Konzentrationen ausgewiesen, sondern unmittelbar als konventionelle Radiokarbon-Alter BP. Demnach beträgt das konventionelle Radiokarbon-Alter der Probe NCK-1a 10.999  $\pm$  60  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP und das der Probe NCK-1b 11.099  $\pm$  68  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP (Tab. 1). Im Rahmen ihrer  $1\sigma$ -Unsicherheiten sind die konventionellen  $^{14}\text{C}$ -Alter der Proben des verkohlten Baumstamms nicht unterscheidbar.

Über eine Rückrechnung kann die relative Aktivität ermittelt werden: Für Probe NCK-1b mit  $t = 11.099$  ergibt der Quotient  $A_{\text{SN}}/A_{\text{ON}}$  (Gleichung 1 oben), definiert als pMC (percent modern carbon, s. Gleichung 2), 25,12 %. Mit Gleichung 3 kann schließlich die nicht-normalisierte Aktivität bestimmt werden. Auf Anfrage ist die  $^{14}\text{C}$ -Konzentration ohne Weiteres mitgeteilt worden, hier für Probe NCK-1a: 25,43  $\pm$  0,19 pMC.

Die  $^{14}\text{C}$ -Konzentration der Proben – 25,43 und 25,12 pMC – unterscheiden sich im Rahmen ihrer  $1\sigma$ -Unsicherheiten nicht, wenn für Probe NCK-1b ebenfalls ein Wert von  $\pm$  0,19 pMC angenommen wird.

### Kalibrierte Radiokarbon-Alter

Ein Laboratorium hat unter Verwendung des Programms OxCal (BRONK RAMSEY 2017) zusätzlich ein kalibriertes  $^{14}\text{C}$ -Alter BP ausgewiesen. Nach diesem Programm, mit dem Kalibrationsdatensatz von IntCal13 (REIMER et al. 2013; IntCal, international calibration), 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  $^{14}\text{C}$ -Jahren BP (Tab. 2). Das kalibrierte Alter wird bezogen auf den Ausgangswert (inklusive der  $1\sigma$ -Unsicherheit) für eine Wahrscheinlichkeit von 95,4 % in Form einer Alterspanne ausgewiesen.

Die kalibrierten  $^{14}\text{C}$ -Alter sind im Verhältnis zu den konventionellen  $^{14}\text{C}$ -Alter ausgehend von den einzelnen Wertepaaren der IntCal13-Wertreihe nominal 1819 und 1906 Einheiten bzw. 16,5 und 17,2 % höher. Der Mittelwert von 11.049 konventionellen  $^{14}\text{C}$ -Jahren BP (Tab. 2, Pos. 3) kann gemäß der IntCal13-Wertreihe zu 12.920

<sup>4</sup> Auswurfprodukte der explosiven Eruption des Laacher-See-Vulkans (Laacher-See-Tephra) am Ende der Eiszeit; stratigraphisch dem Alleröd zugerechnet. Die

Tephra hat vereinzelte Bäume an Ort und Stelle begraben.

kalibrierten  $^{14}\text{C}$ -Jahren BP transformiert werden (ohne Berücksichtigung der  $1\sigma$ -Unsicherheit).

Die kalibrierten  $^{14}\text{C}$ -Jahre werden als Realkalibrierung aufgefasst; so formuliert z. B. BAALES (2008): „Vor etwa 13 000 Jahren ist der Laacher See-Vulkan im nördlichen Rheinland-Pfalz ausgebrochen.“ Insofern ist das arithmetische Mittel von

12.910 kalibrierten  $^{14}\text{C}$ -Jahren BP (Tab. 2, Pos. 3; bezogen auf 13062 bis 12758 kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP) dem von BAALES et al. (2002) bestimmten 12.916 kalibrierten  $^{14}\text{C}$ -Jahren BP quasi gleich. Zu einer Diskussion der Validität des Ergebnisses siehe KOTULLA (2019).

Pos.	Probe	Laborcode und -nummer	konventionelle $^{14}\text{C}$ -Jahre BP ( $\pm 1\sigma$ )	kalibrierte $^{14}\text{C}$ -Jahre		
				OxCal-Programm (IntCal13-Kurve, "95%-Spanne")		IntCal13-Wertreihe
				BC	BP	BP
1	NCK-1a	Poz-101138	10999 $\pm$ 60	11068-10778	13017-12727	12817,5
2	NCK-1b	RoAMS 696.93	11099 $\pm$ 68	11142-10845	13091-12794	13005
3	Mittelwert		11049 $\pm$ 64		13062-12758	12920

**Tab. 2** Radiokarbon-Alter der Proben NCK-1a und NCK-1b II. OxCal-Programm, s. BRONK RAMSEY (2009, 2017); Kalibrationsdatensatz und -kurve IntCal13, s. REIMER et al. (2013); IntCal13-Wertreihe ohne Berücksichtigung der  $1\sigma$ -Unsicherheit.

## Internationale Kalibration der Radiokarbon-Zeitskala

Erste Versuche der Kalibration der Radiokarbon-Zeitskala gehen bis auf SUESS (1965) zurück. Mit STUIVER et al. (1986, 1998) sind erste systematische Kalibrationskurven erstellt worden. Schließlich sind mit der Etablierung der „IntCal-Arbeitsgruppe“ (IntCal Working Group) international abgestimmte, einheitliche Kurven veröffentlicht worden, die sich zu einem Standard entwickelt haben (REIMER et al. 2004, 2009, 2013, 2020); → 6-41.

## Literatur

BAALES M (2008) Eiszeitliches Pompeji am Mittelrhein. *Archäologie in Deutschland* 5, 6-11.  
 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. *Quat. Res.* 58, 273-288.  
 BRONK RAMSEY C (2009) Bayesian Analysis of Radiocarbon dates. *Radiocarbon* 51, 337-360.  
 BRONK RAMSEY C (2017) Methods for summarizing Radiocarbon datasets. *Radiocarbon* 59, 1809-1833.  
 GODWIN H (1962) Half-life of Radiocarbon. *Nature* 195, 984.  
 HOLDEN NE (1990) Total half-lives for selected nuclides. *Pure & Appl. Chem.* 62, 941-958.  
 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, Bayersbronn.

[https://www.wort-und-wissen.org/wp-content/uploads/g-19-1\\_radiokarbon.pdf](https://www.wort-und-wissen.org/wp-content/uploads/g-19-1_radiokarbon.pdf)

LIBBY WF (1955) Radiocarbon Dating. Chicago, 2<sup>nd</sup> ed.

REIMER PJ, AUSTIN WEN, BARD E, BAYLISS A, BLACKWELL PG, BRONK RAMSEY C, BUTZIN M, CHENG H, EDWARDS RL, FRIEDRICH M, GROOTES PM, GUILDERSON TP, HAJDAS I, HEATON TJ, HOGG AG, HUGHEN KA, KROMER B, MANNING SW, MUSCHELER R, PALMER JG, PEARSON C, PLICHT J VAN DER, REIMER RW, RICHARDS DA, SCOTT EM, SOUTHON JR, TURNEY CSM, WACKER L, ADOLPHI F, BÜNTGEN U, CAPANO M, FAHRNI SM, FOGTMANN-SCHULZ A, FRIEDRICH R, KÖHLER P, KUDSKS, MIYAKE F, OLSEN J, REINIG F, SAKAMOTO M, SOOKDEO A & TALAMO S (2020) The IntCal20 northern hemisphere radiocarbon age calibration curve.(0-55 cal kBP). *Radiocarbon*, DOI: <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41>

REIMER PJ, BARD E, BAYLISS A, BECK JW, BLACKWELL PG, BRONK RAMSEY C, BUCK CE, CHENG H, EDWARDS RL, FRIEDRICH M, GROOTES PM, GUILDERSON HP, HAFLIDASON H, HAJDAS I, HATTÉ C, HEATON TJ, HOFFMANN DL, HOGG AG, HUGHEN KA, KAISER KF, KROMER B, MANNING SW, NIU M, REIMER RW, RICHARDS DA, SCOTT EM, SOUTHON JR, STAFF RA, TURNEY CSM & VAN DER PLICHT J (2013) IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves 0-50,000 Years Cal BP. *Radiocarbon* 55, 1869-1887.

REIMER PR, BAILLIE MGL, BARD E, BAYLISS A, BECK JW, BERTRAND CJH, BLACKWELL PG, BUCK CE, BURR GS, CUTLER KB, PAUL E, DAMON PE, EDWARDS RL, FAIRBANKS RG, FRIEDRICH M,

- GUILDERTSON HP, HOGG AG, HUGHEN KA, KROMER B, MCCORMAC G, MANNING S, RAMSEY CB, REIMER RW, REMMELE S, SOUTHON JR, STUIVER M, TALAMO S, TAYLOR FW, VAN DER PLICHT J & WEYHENMEYER CE (2004) IntCal04 Terrestrial Radiocarbon Age Calibration, 0–26 cal kyr BP. *Radiocarbon* 46, 1029-1058.
- REIMER PR, BAILLIE MGL, BARD E, BAYLISS A, BECK JW, BLACKWELL PG, BRONK RAMSEY C, BUCK CE, BURR GS, EDWARDS RL, FRIEDRICH M, GROOTES PM, GUILDERTSON TP, HAYDAS I, HEATON TJ, HOGG AG, HUGHEN KA, KAISER KF, KROMER B, MCCORMAC FG, MANNING SW, REIMER RW, RICHARDS DA, SOUTHON JR, TALAMO S, TURNEY CSM, VAN DER PLICHT J & WEYHENMEYER CE (2009) INTCAL09 and MARINE09 Radiocarbon Age Calibration Curves, 0–50,000 years cal BP. *Radiocarbon* 51, 1111-1150.
- STENSTRÖM KE, SKOG G, GEORGIADOU E, GENBERG J & JOHANSSON (2011) A guide to radiocarbon units and calculations. Internal Report LUNFD6(NFFR-3111)/1-17/(2011), Lund University.
- STUIVER M, KROMER B, BECKER B & FERGUSON CW (1986) Radiocarbon age calibration back to 13,300 years BP and the <sup>14</sup>C age matching of the German oak and US bristlecone pine chronologies. *Radiocarbon* 28, 969-979.
- STUIVER M & POLLACH HA (1977) Discussion: Reporting of <sup>14</sup>C data. *Radiocarbon* 19, 355-363.
- STUIVER M, REIMER PJ, BARD E, BECK JW, BURR GS, HUGHEN KA, KROMER B, MCCORMAC G, VAN DER PLICHT J & SPURK M (1998) INTCAL98 radiocarbon age calibration 24,000-0 cal BP. *Radiocarbon* 40, 1041-1083.
- SUESS HE (1965) Secular variations of the cosmic-ray produced carbon 14 in the atmosphere and their interpretations. *Journal of Geophysical Research* 70, 5937-5952.

→ und Blattnummer: Verweis auf andere Beiträge der Online-Loseblattsammlung.

Zur Ergänzung → 5-01, 6-01.