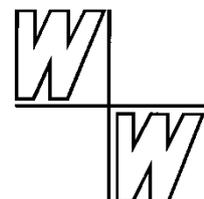


**ZUR ENTWICKLUNG UND  
GÜLTIGKEIT DER RADIOKARBON-  
ZEITSKALA:  
SKALENBEREICH 55.000 – 10.000  
KALIBRIERTE <sup>14</sup>C-JAHRE BP**

Michael Kotulla



März 2024



**Titelbild:**

Beschleuniger-Massenspektrometer des AMS-Laboratoriums des *Horia Hulubei National Institute for Physics and Nuclear Engineering* (IFIN-HH) in Rumänien. Es handelt sich um einen 1MV-Tandetron-Beschleuniger. Mit solchen Anlagen werden u. a. die Verhältnisse  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  ermittelt. Foto: © IFIN-HH (freundl. Zurverfügungstellung).

W+W Special Paper G-24-1

Herausgegeben von der Studiengemeinschaft Wort und Wissen e. V.

Verfügbar online als PDF unter: <https://www.wort-und-wissen.org/artikel/>

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Fragestellung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Einführung</b> .....	<b>1</b>
2.1	Radiokarbon-Datierung .....	1
2.2	Radiokarbon-Überlieferung, Radiokarbon-Alter und Radiokarbon-Zeitskala .....	5
2.1	Kalibrierung der Radiokarbon-Zeitskala .....	5
2.2	Kalibrierung: Mutmaßung oder Faktum? .....	8
<b>3</b>	<b>Beschreibung, Analyse und Diskussion ausgewählter „Radiokarbon“-Arbeiten</b> .....	<b>8</b>
3.1	Korallen .....	9
3.1.1	Atlantischer und Pazifischer Ozean .....	9
3.1.1.1	BARD et al. (1990) .....	9
3.1.1.2	BARD et al. (1992) .....	12
3.1.1.3	BARD et al. (1993) .....	14
3.1.1.4	BARD et al. (1998) .....	14
3.1.1.5	CUTLER et al. (2004) .....	18
3.1.1.6	FAIRBANKS et al. (2005) .....	19
3.1.1.7	DURAND et al. (2013) .....	21
3.1.1.8	Nachtrag .....	21
3.2	Foraminiferen .....	23
3.2.1	Cariaco-Becken (Karibisches Meer, offshore Venezuela) .....	23
3.2.1.1	HUGHEN et al. (1998a, b) .....	23
3.2.1.2	HUGHEN et al. (2000) .....	26
3.2.1.3	HUGHEN et al. (2004a) .....	28
3.2.1.4	HUGHEN et al. (2004b) .....	28
3.2.1.5	HUGHEN et al. (2006) .....	31
3.2.1.6	HUGHEN & HEATON (2020) .....	33
3.2.2	Westiberischer Kontinentalrand (Atlantischer Ozean) und Makran- Kontinentalhang (Arabisches Meer) .....	36
3.2.2.1	BARD et al. (2004a) .....	36
3.2.2.2	BARD et al. (2013) .....	37
3.3	Pflanzliche Überreste .....	39

---

3.3.1	Suigetsu-See (Japan) .....	39
3.3.1.1	KITAGAWA & VAN DER PLICHT (1998a, b) .....	39
3.3.1.2	BRONK RAMSEY et al. (2012) .....	41
3.3.1.3	SCHLOLAUT et al. (2018) .....	54
3.3.1.4	BRONK RAMSEY et al. (2020) .....	55
3.4	Höhlenminerale (Speläotheme) .....	56
3.4.1	Sagittarius Blue Hole (Bahamas) .....	56
3.4.1.1	BECK et al. (2001) .....	56
3.4.1.2	HOFFMANN et al. (2010) .....	56
3.4.2	Hulu Cave (China) .....	57
3.4.2.1	WANG et al. (2001) .....	57
3.4.2.2	SOUTHON et al. (2012) .....	62
3.4.2.3	CHENG et al. (2018) .....	63
<b>4</b>	<b>Vom Methodentest zur U-Th-Kalibration .....</b>	<b>70</b>
4.1	Radiokarbon-Datierung: eine getestete Datierungsmethode .....	70
4.1.1	1960: Nobelpreis für Radiokarbon-Datierung .....	70
4.1.2	Jenseits 5000 Jahre vor heute: annehmbare Datierungsergebnisse? .....	72
4.2	Radiokarbon-Zeitskala: weitere Tests .....	75
4.2.1	Stand um 1980 .....	75
4.2.1.1	STUIVER (1978) .....	75
4.2.1.2	VOGEL (1980, 1983) .....	78
4.3	Radiokarbon-Kalibrationskurven: U-Th-basiert .....	79
4.3.1	Entwicklung nach 1990 .....	79
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>81</b>
	<b>Anhang I: Berechnung konventioneller Radiokarbon-Alter .....</b>	<b>84</b>
	<b>Anhang II: Die Konstruktion wissenschaftlicher Fakten .....</b>	<b>85</b>
	<b>Glossar mit Verzeichnis der Abkürzungen .....</b>	<b>86</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>90</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>90</b>
	<b>Danksagung .....</b>	<b>91</b>
	<b>Literatur .....</b>	<b>92</b>
	<b>Impressum .....</b>	<b>101</b>

# 1 Fragestellung

„Die Radiokarbondatierung ist die am häufigsten verwendete Methode für die Datierung der letzten 55.000 Jahre (...)“, so heißt es in einer Pressemitteilung des Alfred-Wegener-Instituts.<sup>1</sup>

Dieser Beitrag geht der Kernfrage nach, ob die Radiokarbon-Datierung *tatsächlich* gültige (valide) Alter liefert. Das Hauptaugenmerk gilt der Entwicklung der Radiokarbon-Zeitskala zu einer Kalender-Zeitskala. Von besonderem Interesse ist, ob und gegebenenfalls wie diese Zeitskalen verifiziert wurden bzw. werden. Des Weiteren wird untersucht, ob bei dieser Entwicklung – im Sinne von LATOUR & WOOLGAR (1986) – wissenschaftliche Fakten konstruiert worden sind.

Nachdem sich der Verfasser bereits kritisch mit dem jüngeren, dendrokalibrierten Teil der Radiokarbon-Zeitskala befasst hat (KOTULLA 2019), beschränkt sich dieser Beitrag hauptsächlich auf den älteren Teil, den Skalenabschnitt von 55.000 bis etwa 10.000 kalibrierten <sup>14</sup>C-Jahren BP (vor 1950).

## 2 Einführung

### 2.1 Radiokarbon-Datierung

Die Radiokarbon-Datierung kommt insbesondere in Archäologie und Paläoanthropologie sowie den Geo- und Umweltwissenschaften zur Anwendung. Sie ist dem Alfred-Wegener-Institut zufolge „die am häufigsten verwendete Methode für die Datierung der letzten 55.000 Jahre“.<sup>2</sup> Mit „Jahre“ sind Kalender- bzw. Real-Jahre gemeint.

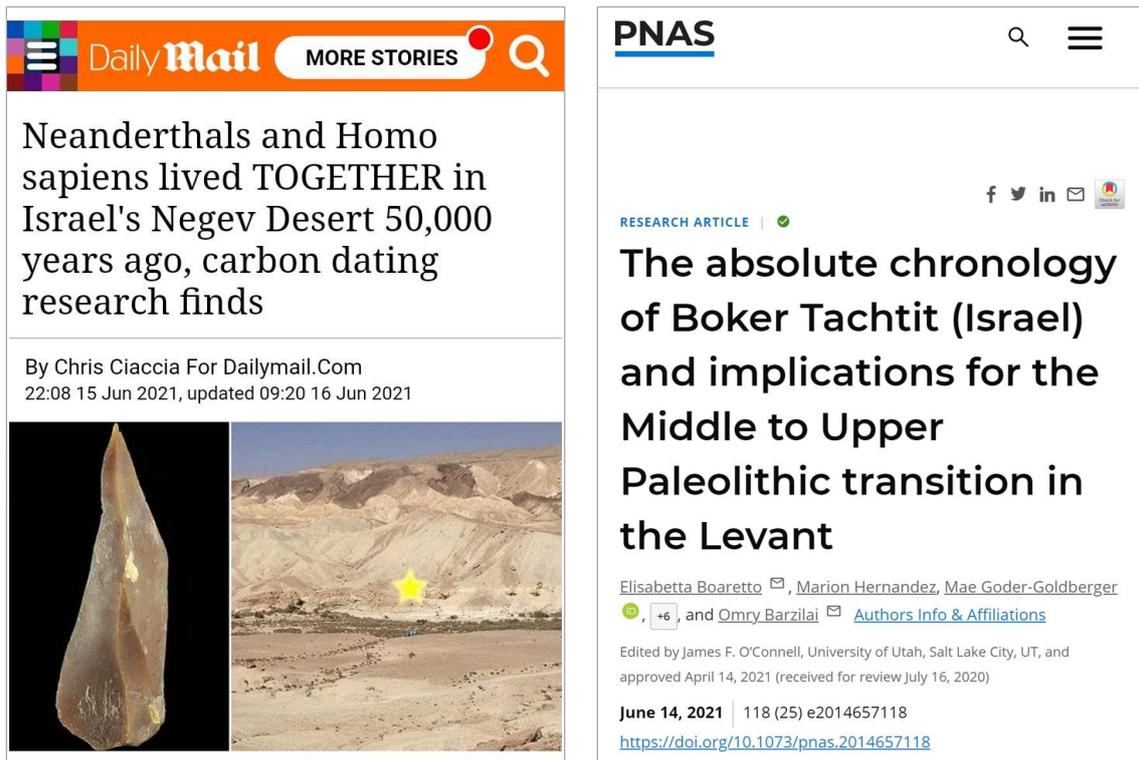
Die moderne Kommunikation von Forschungs- bzw. Datierungsergebnissen an die (interessierte) Öffentlichkeit erfolgt u. a. durch den Wissenschaftsjournalismus, zunehmend über Online-Artikel. Dabei wird das „Alter“, hier das mit der Radiokarbonmethode ermittelte Alter, mitunter prominent herausgestellt, wie einige der nachfolgenden Beispiele zeigen:

- „Neandertaler sammelten schon vor 55.000 Jahren Jagdtrophäen in Höhle“ (APA 2023; Fachartikel: BAQUEDANO et al. 2023).
- „50.000 Jahre alt: Forschende erwecken unbekannte Viren aus dem Permafrost“ (HOFFMANN 2022, *GEO*; Fachartikel: ALEMPIC et al. 2022).
- „Neanderthals and Homo sapiens lived TOGETHER in Israel's Negev Desert 50,000 years ago, carbon dating research finds“ (CIACCIA 2021, *Daily Mail*; Fachartikel: BOARETTO et al. 2021). – Abb. 1.
- „Fadenwurm überlebt 46.000 Jahre im Eis“ (PODBREGAR 2023b, *scinexx*; Fachartikel: SHATILOVICH et al. 2023). – Abb. 2.

---

<sup>1</sup> Alfred-Wegener-Institut (Bremerhaven), Pressemitteilung vom 12. 8. 2020.

<sup>2</sup> Siehe Fußnote 1.



**Abb. 1** „Vor 50.000 Jahren“.

Screenshots (teilweise Ausschnitte). Links: Populärwissenschaftlicher Artikel zu BOARETTO et al. (2021); *Daily Mail* (dailymail.com) vom 15./16. Juni 2021 (CIACCIA 2021). Rechts: Fachartikel zu dem „Aufeinandertreffen“ von Neandertaler und *Homo sapiens* in der Negev-Wüste (Israel) in *PNAS* (BOARETTO et al. 2021), publiziert am 14. Juni 2021.

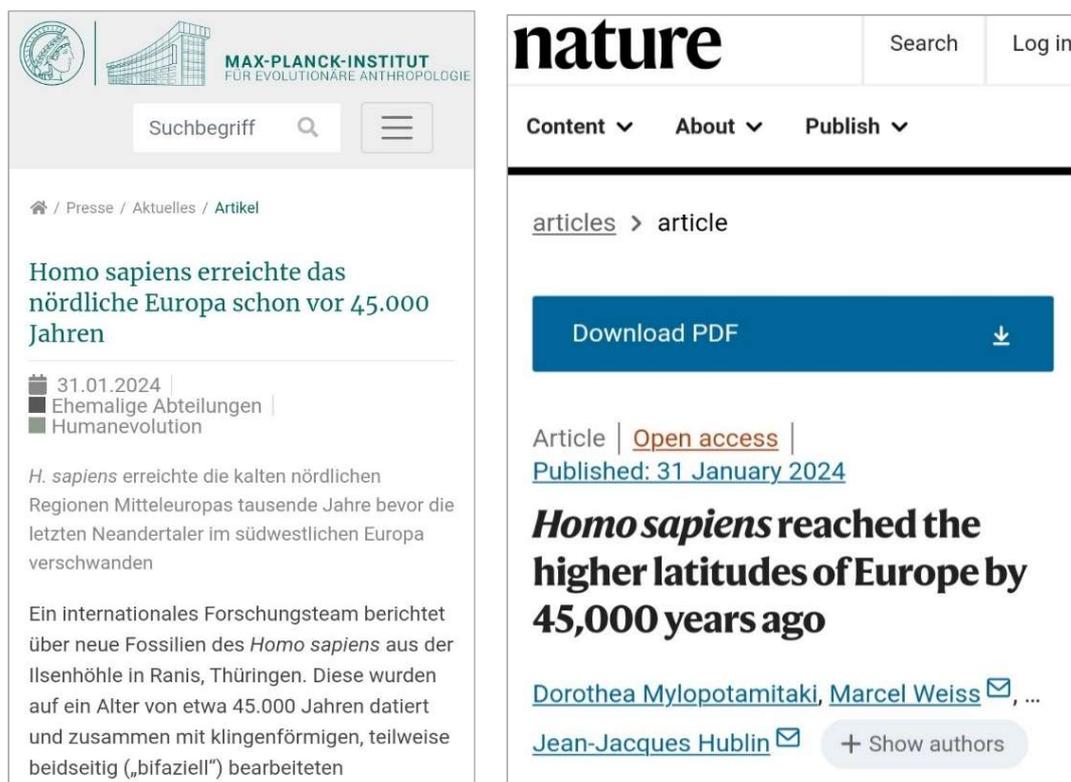
- „Der moderne Mensch erreichte das nördliche Europa schon vor 45.000 Jahren“ (MPI 2024; Fachartikel: u. a. MYLOPOTAMITAKI et al. 2024). – Abb. 3.
- „42.000 Jahre alte sub-fossile Bäume ermöglichen genauere Analyse der letzten Umpolung des Erdmagnetfelds“ (AWI 2021; Fachartikel: COOPER et al. 2021).
- „Steinzeitjäger: Säbelzahn tiger lebte bis vor 28.000 Jahren in Europa“ (KARBERG 2017, *Tagesspiegel*; Fachartikel: PAIJMANS et al. 2017).
- „35.000 Jahre altes ‚Eiszeit-Pferd‘ ist keins“ (PODBREGAR 2023a, *scinexx*).
- „Urzeitliches Magalithbauwerk: Die älteste Pyramide der Welt könnte 25.000 Jahre alt sein“ (BERGMAYR 2023, *Der Standard*; Fachartikel: NATAWIDJAJA et al. 2023).
- „Studie bestätigt: Älteste Fußabdrücke Nordamerikas sind 23.000 Jahre alt“ (MDR 2023; Fachartikel: BENNETT et al. 2021, PIGATI et al. 2023). – Abb. 4.
- „Älteste Felsmalerei Australiens: Dieses Känguru wurde vor 17.000 Jahren gezeichnet“ (GARMS 2021, *GEO*; Fachartikel: FINCH et al. 2021). – Abb. 5.

Für den Ausweis des Alters in Kalender-Jahren werden die jeweils aktuellen Radiokarbon-Kalibrationskurven angewendet (s. u.). Der Ausweis in Fachartikeln erfolgt verkürzt als „cal BP“ für kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP (before present, vor 1950) bzw. Kalender-Jahre BP (gleich Jahre BP). In populärwissenschaftlichen Artikeln erfolgt der Ausweis einfach – und konsequent – als „Jahre“. Wie mittels Radiokarbonanalysen zunächst die unkalibrierten, konventionellen  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP ermittelt werden, ist in Anhang I dargelegt.



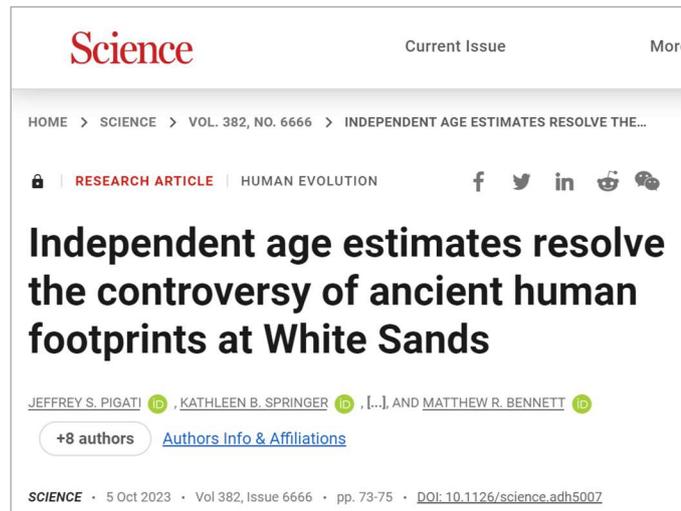
**Abb. 2** „46.000 Jahre“.

Screenshots (teilweise Ausschnitte). Links: Populärwissenschaftlicher Artikel zu SHATILOVICH et al. (2023); *scinexx* (scinexx.de) vom 28. Juli 2023 (PODBREGAR 2023b). Rechts: Fachartikel zu dem Fadenwurm aus dem sibirischen Permafrost in *PLOS Genetics* (SHATILOVICH et al. 2023), publiziert am 27. Juli 2023.



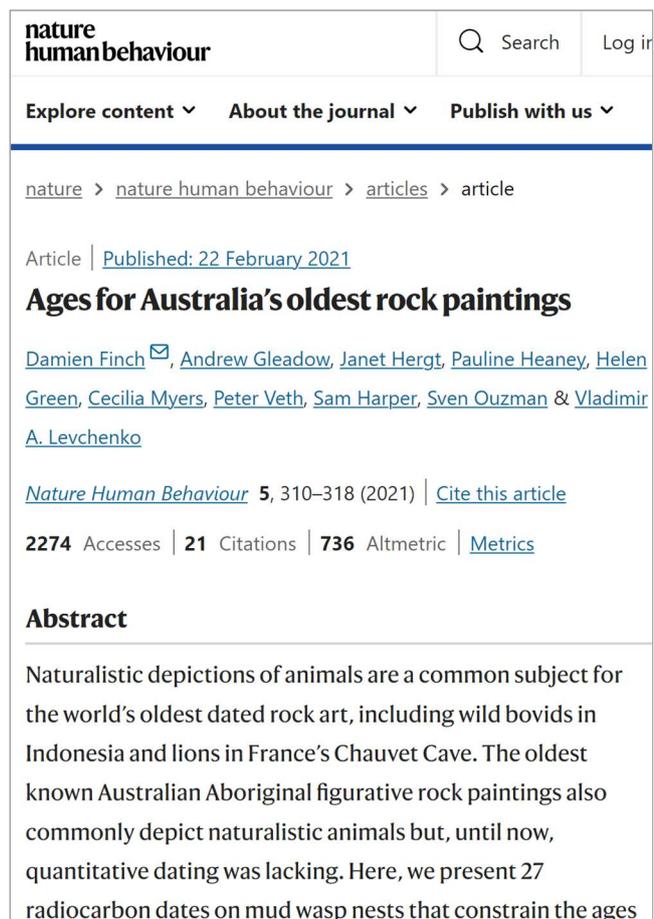
**Abb. 3** „45.000 Jahre“.

Screenshots (teilweise Ausschnitte). Links: Populärwissenschaftlicher Artikel (Pressemitteilung) des Max-Planck-Instituts (das an der Studie hauptsächlich beteiligte Institut) u. a. zu MYLOPOTAMITAKI et al. (2024). Rechts: Einer der drei Fachartikel zum *Homo sapiens* vor „45.000 Jahren“ in der heutigen Ilsenhöhle in Ranis (Thüringen); in *Nature* (MYLOPOTAMITAKI et al. 2024), publiziert am 31. Januar 2024.



**Abb. 4** „23.000 Jahre alt“.

Screenshots (teilweise Ausschnitte). Links: Populärwissenschaftlicher Artikel zu PIGATI et al. (2023); MDR (mdr.de) vom 6. Oktober 2023. Rechts: 2. Fachartikel zu den alten menschlichen Fußspuren in den White Sands (New Mexico) in *Science* (PIGATI et al. 2023), publiziert am 5. Oktober 2023.



**Abb. 5** „Vor 17.000 Jahren“.

Screenshots (teilweise Ausschnitte). Links: Populärwissenschaftlicher Artikel zu FINCH et al. (2021); GEO (geo.de) vom 23. Februar 2021 (GARMS 2021, *dpa*). Rechts: Fachartikel über Australiens älteste Felsmalereien in *Nature Human Behaviour* (FINCH et al. 2021), publiziert am 22. Februar 2021.

## 2.2 Radiokarbon-Überlieferung, Radiokarbon-Alter und Radiokarbon-Zeitskala

Das Kohlenstoffisotop  $^{14}\text{C}$  ist radioaktiv und wird deshalb auch als Radiokarbon bezeichnet. Die Halbwertszeit beträgt nach LIBBY (1955) 5.568 Jahre, nach GODWIN (1962) – aktueller –  $5.730 \pm 40$  Jahre. Radiokarbon entsteht in der Stratosphäre und verbreitet sich durch Austauschprozesse in der Atmosphäre, Hydrosphäre und Biosphäre und des Weiteren in der Pedosphäre und Lithosphäre. Mit dem Tod von Organismen endet die organische Aufnahme von Kohlenstoff; das vorhandene  $^{14}\text{C}$  zerfällt.

Eine quasi-kontinuierliche Überlieferung des atmosphärischen Radiokarbon-Niveaus der Vergangenheit soll zum Beispiel in der Sedimentfolge des Suigetsu-Sees (Japan) bewahrt sein. Dort sind an über 800 Proben pflanzlicher Überreste bis zu einer Sedimenttiefe von 41 m Radiokarbonbestimmungen vorgenommen worden (BRONK RAMSEY et al. 2012; Abschnitt 3.3.1.2). Die grafische Aufbereitung der Analyseergebnisse zeigt, dass die Radiokarbonkonzentrationen (percent modern carbon, pMC; Anhang I) – hier ausgedrückt als konventionelle  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP (s. u.) – mit der Tiefe grundsätzlich abnehmen (Abb. 6), wobei ab Tiefe 27 m eine zunehmende Streuung vorliegt.

Mit dieser Art des Ausweises repräsentiert die X-Achse von Abb. 6 die Radiokarbon-Zeitskala bezogen auf konventionelle  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP. Bei der Berechnung konventioneller Radiokarbon-Alter – unter Zugrundelegung der Halbwertszeit – wird u. a. vorausgesetzt (Anhang I, Gleichung 1): „Die Annahme der Konstanz des atmosphärischen  $^{14}\text{C}$ -Gehalts während der Vergangenheit.“ Demnach muss des Weiteren auch eine Konstanz der Produktionsrate in der Stratosphäre angenommen werden. Die Produktionsrate beispielsweise könnte aber mit der Zeit variieren oder langfristigen Trends unterliegen, einer Zu- oder Abnahme der  $^{14}\text{C}$ -Konzentration. Insofern hätte Gleichung 1 in Anhang I keine Gültigkeit; Kalender-Alter könnten nicht ermittelt werden. Dies ist ein Grund dafür, nach Möglichkeiten einer Kalibrierung von Radiokarbon-Altern und der Radiokarbon-Zeitskala als Ganzes zu suchen (s. Abschnitt 2.1).

Die Radiokarbon-Zeitskala in Abb. 6 ist demnach keine Kalender-Zeitskala. Die konventionellen  $^{14}\text{C}$ -Jahre können nicht – wie dargelegt – *per se* mit Kalender-Jahren (Real-Jahren) gleichgesetzt werden. Immerhin ist festzuhalten, dass in Abb. 6 eine stratigraphische Konsistenz vorliegt: das konventionelle  $^{14}\text{C}$ -Alter nimmt mit der Tiefe grundsätzlich zu.

Der Suigetsu-Sedimentkern umfasst die komplette Reichweite nachweisbarer Radiokarbonkonzentrationen. Übertragen auf die Radiokarbon-Zeitskala bedeutet dies den Skalenabschnitt von 50.000 bis 0 konventionellen  $^{14}\text{C}$ -Jahren BP.

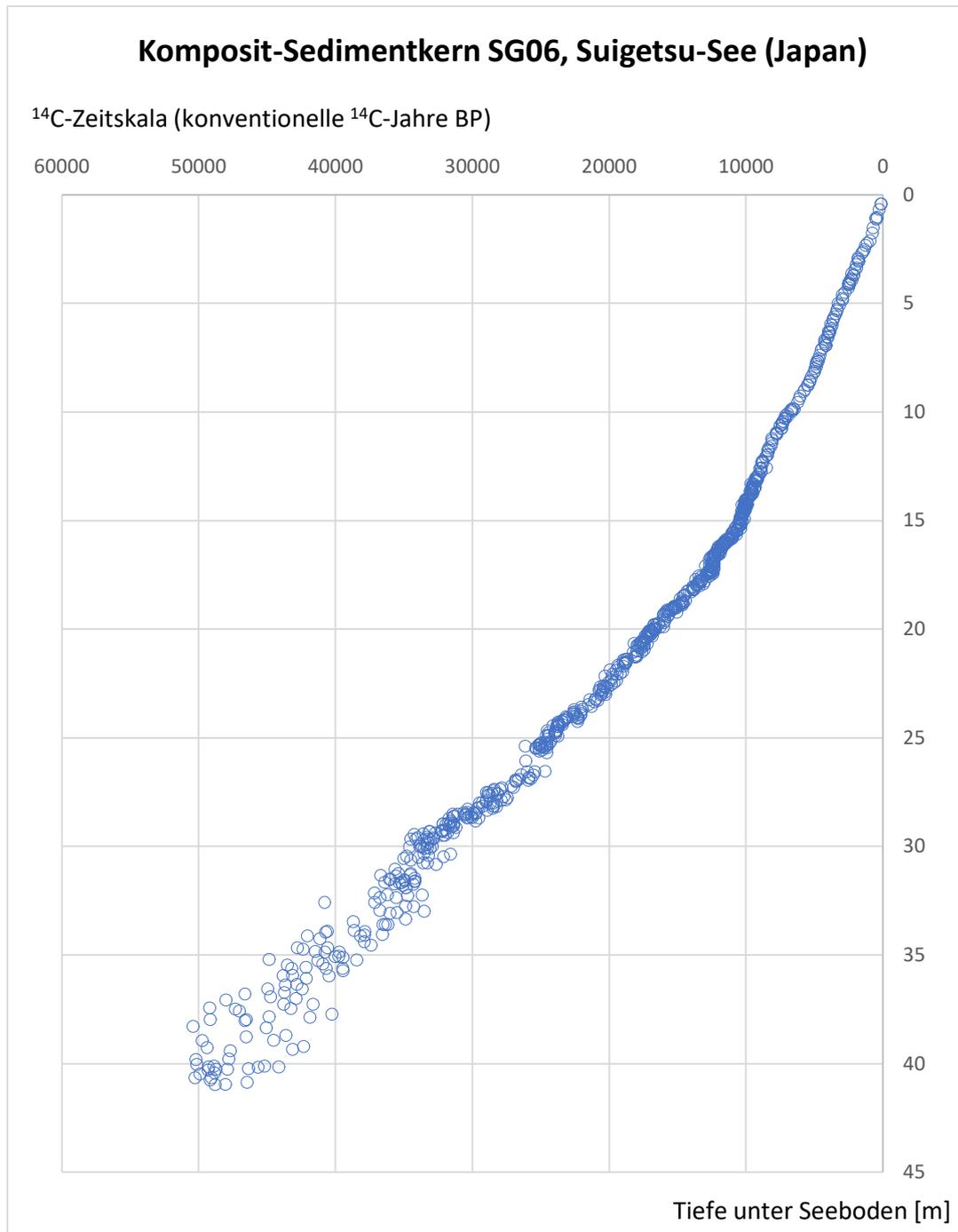
## 2.1 Kalibrierung der Radiokarbon-Zeitskala

In den 1960er-Jahren sind erste Versuche unternommen worden, die Radiokarbon-Zeitskala zu kalibrieren.<sup>3</sup> Seit 2004 gibt die Kalibrations-Arbeitsgruppe (IntCal Working Group; IntCal,

---

<sup>3</sup> STUIVER & SUESS (1966); in der Folge z. B. STUIVER (1978).

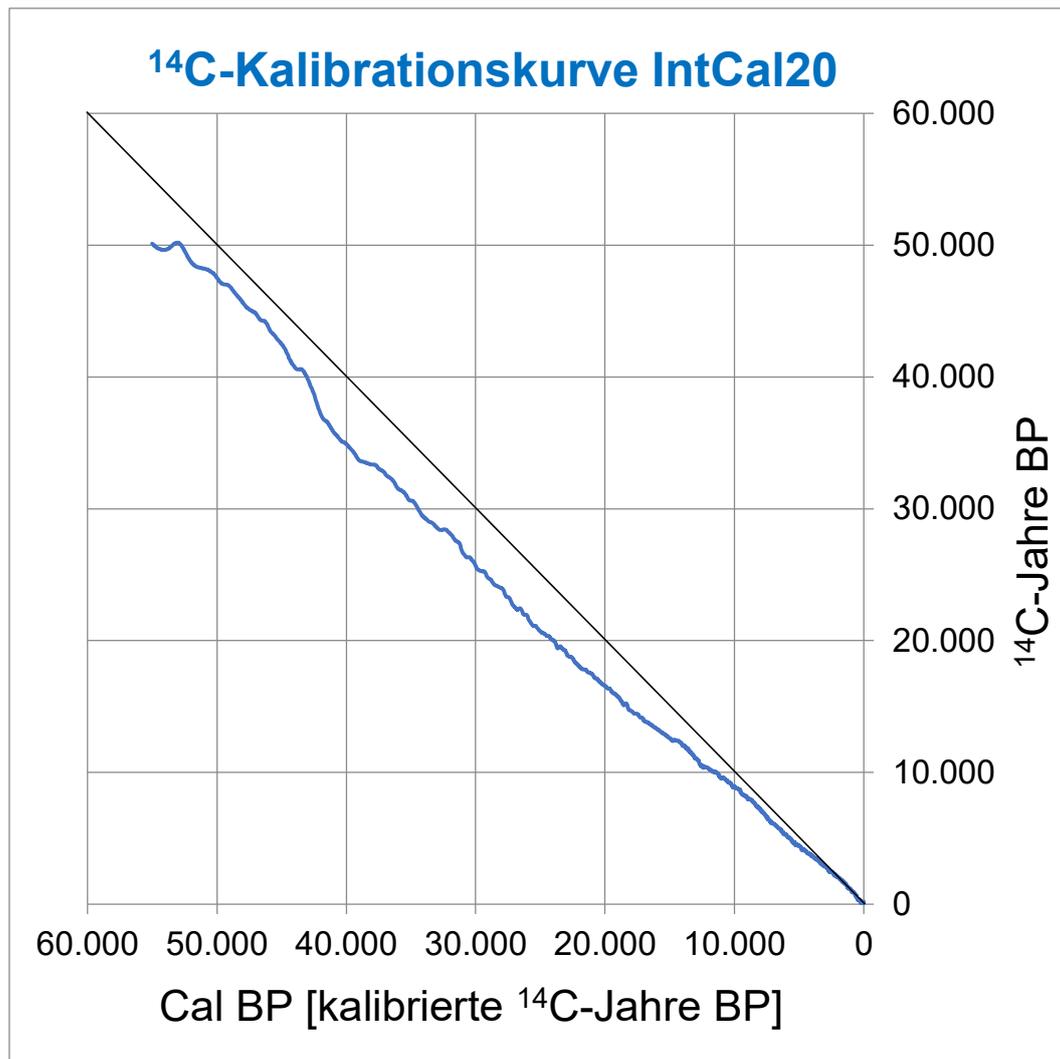
international calibration) in recht regelmäßigen Intervallen die „offiziellen“ Radiokarbon-Alterskalibrationskurven heraus. Die jeweiligen Neuausgaben sind als aktuell beste Annäherung zu verstehen.<sup>4</sup>



**Abb. 6** Komposit-Sedimentkern SG06 (Suigetsu-See): Alters-zu-Tiefen-Beziehung I.

Punkt-/Kreisdarstellung,  $N=804$ . Grundsätzliche Abnahme der Radiokarbonkonzentration (pMC), hier ausgedrückt als konventionelle <sup>14</sup>C-Jahre BP, mit der Tiefe (zunehmendes Relativalter). Die <sup>14</sup>C-Datenreihe enthält Duplikate und als Ausreißer qualifizierte Werte. Daten aus BRONK RAMSEY et al. (2012), jeweils ohne Unsicherheiten.

<sup>4</sup> BARD et al. (2004, 205) drücken es so aus: „The visible result of this international scientific effort is the periodic release of an ‘official’ calibration curve representing a state-of-the-art consensus on this issue.“



**Abb. 7** Radiokarbon-Kalibrationskurve IntCal20.

Skalenbereich von 55.000 bis 0. kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP. Punktdarstellung (blau), Mittelwerte ohne Unsicherheiten,  $N=9501$ ; aufgrund der hohen Punktdichte scheinbare Linie. Die Winkelhalbierende (schwarze Linie) dient zur Orientierung; sie repräsentiert eine theoretische 1:1-Beziehung. Die Abweichungen zwischen konventionellen  $^{14}\text{C}$ -Alter und kalibrierten  $^{14}\text{C}$ -Alter für den Skalenbereich  $> 13.900$  kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Alter betragen punktuell maximal 23 %. Daten zu REIMER et al. (2020). Datenquelle: <https://www.intcal.org/data.html>.

REIMER et al. (2013a) begründen die Kalibrierung der Radiokarbon-Zeitskala wie folgt (in Übersetzung): „Es ist inzwischen gut bekannt, dass  $^{14}\text{C}$ -Jahre nicht direkt mit Kalender-Jahren übereinstimmen (de Vries 1958; Stuiver & Suess 1966; Reimer et al. 2009), da die atmosphärische  $^{14}\text{C}$ -Konzentration aufgrund von Änderungen der Produktionsrate, die durch geomagnetische und solare Modulation des kosmischen Strahlungsflusses verursacht werden, und des Kohlenstoffzyklus im Laufe der Zeit schwankt. Daher ist eine Kalibrierung erforderlich, die, um genau und präzise zu sein, idealerweise auf einer absolut datierten Aufzeichnung beruhen sollte, bei der der Kohlenstoff direkt aus der Atmosphäre zum Zeitpunkt der Entstehung aufgenommen wurde.“<sup>5</sup>

<sup>5</sup> Im Original: „It is now well known that  $^{14}\text{C}$  years do not directly equate to calendar years (de Vries 1958; Stuiver and Suess 1966; Reimer et al. 2009) because atmospheric  $^{14}\text{C}$  concentration varies through time due to changes in the production rate, caused by geomagnetic and solar modulation of the cosmic-ray flux, and

Aktuell liegt für die nördliche Hemisphäre die Kalibrationskurve IntCal20 vor (REIMER et al. 2020; Abb. 7). Sie ist eine Zusammenstellung aus Datensätzen unterschiedlicher Herkunft. Die Datenbasis bezogen auf das Probenmaterial bilden:

- Skalenbereich von ca. 13.900 bis 0 kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP: Baumringe.
- Skalenbereich von ca. 55.000 bis ca. 13.900 kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP: Makrofossilien des Suigetsu-Sees (Japan), Foraminiferen von marinen Sedimenten, Baumringe sowie Speläotheme (Höhlenminerale) und Korallen.

Das pflanzliche Material – Baumstämme (Baumringe) und Blätter (im Seesediment) – gilt *bona fide* als Überlieferung des atmosphärischen  $\text{CO}_2$  (REIMER et al. 2013a).

In diesem Beitrag wird hauptsächlich der ältere Teil der Radiokarbon-Zeitskala behandelt, der Skalenabschnitt von 55.000 bis etwa 10.000 kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP.

## 2.2 Kalibrierung: Mutmaßung oder Faktum?

Die Radiokarbon-Zeitskala ist im Laufe der Zeit vollumfänglich zu einer Kalender-Zeitskala entwickelt worden. Diesbezüglich stellt sich die Frage, ob diese Kalender-Zeitskala *tatsächlich* gültige (valide) Alter liefert. Von besonderem Interesse ist, ob und gegebenenfalls wie die mutmaßlich zugrunde liegenden „absolut datierten Aufzeichnungen“ (s. o. REIMER et al. 2013a) verifiziert wurden bzw. werden. Des Weiteren wird untersucht, ob bei der Entwicklung der Kalibrierung – im Sinne von LATOUR & WOOLGAR (1986) – möglicherweise wissenschaftliche Fakten konstruiert worden sind (s. Anhang II).

## 3 Beschreibung, Analyse und Diskussion ausgewählter „Radiokarbon“-Arbeiten

Die für diesen Hauptteil des Beitrags ausgewählten Arbeiten stimmen zu einem großen Teil mit den Arbeiten überein, die REIMER et al. (2020) – zur Ausgabe von IntCal20 – in ihrem Supplementary Material 6 als Referenzen zu ihrer Table S2 listen. Die Arbeiten umfassen den Zeitraum ab 1990, als begonnen wurde, die Radiokarbon-Zeitskala über den dendrokalibrierten Teil hinaus zu kalibrieren.

Die Gliederung dieses Kapitels erfolgt hierarchisch nach Probenmaterial, das für die Radiokarbonbestimmungen verwendet wurde, Fundort und Publikationsdatum. Zahlreiche Querverweise stellen Beziehungen der Fachpublikationen zueinander her.

---

the carbon cycle. Hence, a calibration is required, which, to be accurate and precise, should ideally be based on an absolutely dated record that has carbon incorporated directly from the atmosphere at the time of formation“ (REIMER et al. 2013a, 1870).

## 3.1 Korallen

### 3.1.1 Atlantischer und Pazifischer Ozean

#### 3.1.1.1 BARD et al. (1990)

Vor der Südküste von Barbados sind 1988 mit dem Forschungsschiff *Ranger* 16 Bohrkern (Kürzel: RGF<sup>6</sup>) von untermeerischen Terrassen aus Korallen-Riffkalken gewonnen worden (FAIRBANKS 1988, 1989; Abb. 8). Die maximale Tiefenposition liegt bei über 140 m relativ zum heutigen Meeresspiegel. Für die Kerne RGF-7, RGF-12 und RGF-9 liefert FAIRBANKS (1989) <sup>14</sup>C-Alter hauptsächlich von Individuen der Steinkoralle *Acropora palmata*<sup>7</sup> (siehe Fig. 1; vgl. Abb. 8). BARD et al. (1990) weisen zu den <sup>14</sup>C-Altern zusätzlich <sup>230</sup>Th-Alter aus (Abb. 9), mit welchen sie die Radiokarbon-Zeitskala nun für die „vergangenen 30.000 Jahre“ kalibrieren.<sup>8</sup>

BARD et al. (1990) verifizieren ihre <sup>230</sup>Th-Zeitskala wie folgt:

- Skalenabschnitt ca. 900 bis 0 <sup>230</sup>Th-Jahre BP: Eine Bestätigung der Genauigkeit des U-Th-Chronometers sei für sehr junge Korallen gegeben; mit Verweis auf EDWARDS (1988) – siehe Abschnitt 3.4.2.1 – und EDWARDS et al. (1988).
- Skalenabschnitt ca. 9.280 bis ca. 7.460 <sup>230</sup>Th-Jahre BP (jeweils 3 Wertepaare): Die <sup>230</sup>Th-Alter, 9.280 ± 100, 8.450 ± 50 und 7.460 ± 80 <sup>230</sup>Th-Jahre BP, seien in guter Übereinstimmung mit den Dendro-Altern von 9.420–8.979, 8.970–8.380 und 7.440–7.140 Dendro-Jahre BP (Unsicherheiten einbezogen); Alter gemäß Kalibrationskurve in STUIVER et al. (1986a), „marine mixed layer“ (Figs. 110–115), sowie pers. Mittlg. M. STUIVER.
- Skalenpunkt ca. 11.500 <sup>230</sup>Th-Jahre BP: Ca. 10.000 konventionelle <sup>14</sup>C-Jahre BP (Grenze Jüngere Dryas/Präboreal, auch Grenze Pleistozän/Holozän); das Alter sei in guter Übereinstimmung mit den dendrochronologischen Schätzungen von ≥ 11.300 Dendro-Jahre BP (nach BECKER & KROMER 1986).
- Skalenabschnitt > 11.500 <sup>230</sup>Th-Jahre BP: keine Verifizierung.

## Diskussion

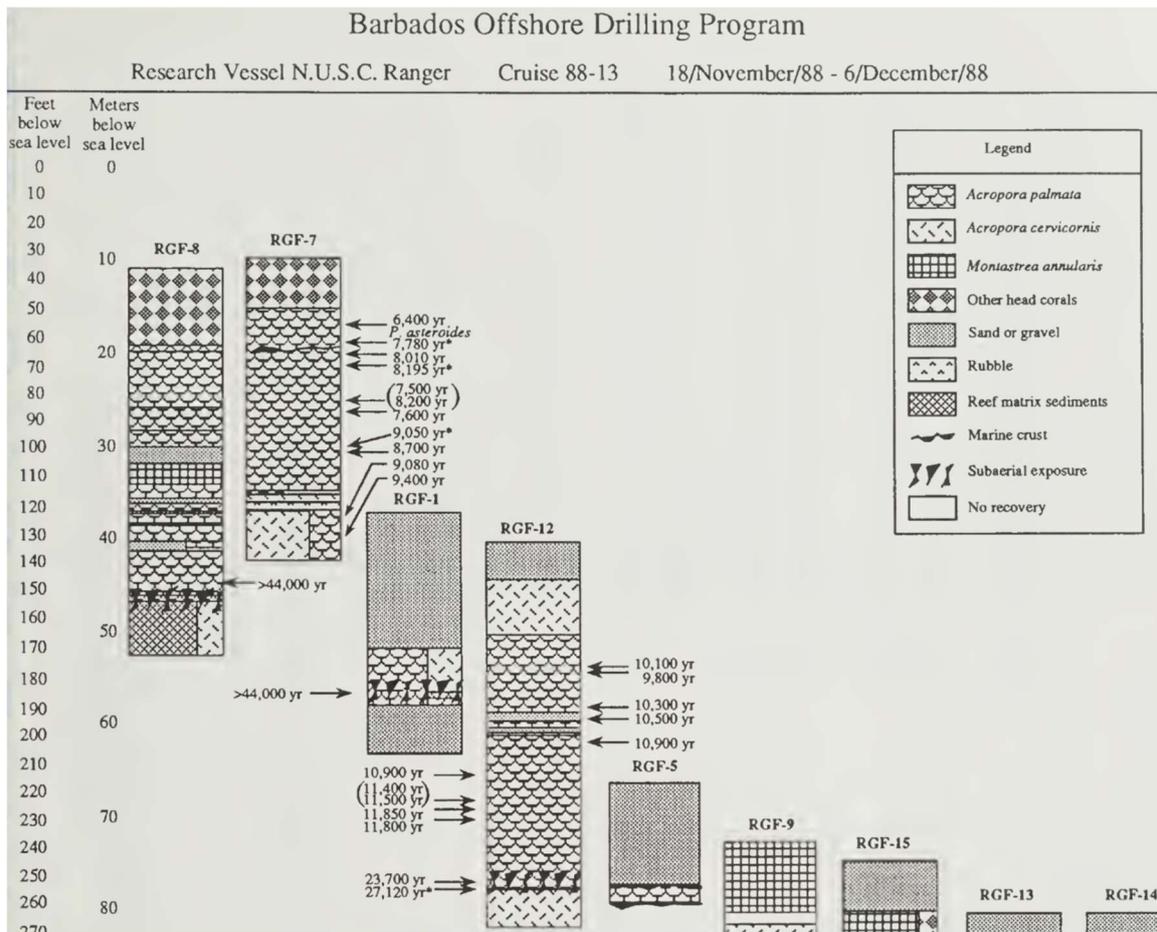
BARD et al. (1990) stellen heraus, dass der Vergleich von U-Th-Altern mit <sup>14</sup>C-Altern an holozänen Proben gezeigt habe, dass die U-Th-Alter genau (und valide) seien, weil sie mit der dendrochronologischen Kalibration übereinstimmten.<sup>9</sup> Mit anderen Worten: 1 <sup>230</sup>Th-Jahr = 1 Kalender-Jahr. Demzufolge gehen sie davon aus, dass die U-Th-Alter der älteren Proben (Oberpleistozän) ebenfalls genau (und valide) sind. So werde der Weg begangen, die Radiokarbon-Zeitskala jenseits der dendrochronologischen Kalibration (Skalenabschnitt > 9.000 kalibrierte <sup>14</sup>C-Jahre BP) mit U-Th-Altern zu kalibrieren.

<sup>6</sup> RGF: wohl die Abkürzung für Richard G. FAIRBANKS.

<sup>7</sup> Da der Lebensraum der Koralle regulär max. 5 m Wassertiefe beträgt, ist die Position relativ zum heutigen Meeresspiegel ein Anzeiger für Meeresspiegelschwankungen der Vergangenheit. FAIRBANKS (1988, 1): „*Acropora palmata* growth is restricted to shallow water, generally less than five meters water depth (...).“

<sup>8</sup> Siehe Titel ihres Artikels: „Calibration of the <sup>14</sup>C timescale over the past 30,000 years (...).“

<sup>9</sup> „Comparison of the U-Th ages with <sup>14</sup>C ages obtained on the Holocene samples shows that the U-Th ages are accurate, because they accord with the dendrochronological calibration“ (BARD et al. 1990, 405).



**Abb. 8** Sedimentkerne von Korallen-Riffkalken südlich Barbados.

Stratigraphie und konventionelle  $^{14}\text{C}$ -Alter BP ausgewählter Proben. Wiedergabe der Abbildung „Composite Core Stratigraphy“ (Ausschnitt) aus FAIRBANKS (1988), *Cruise Report: Barbados Offshore Drilling Program*.

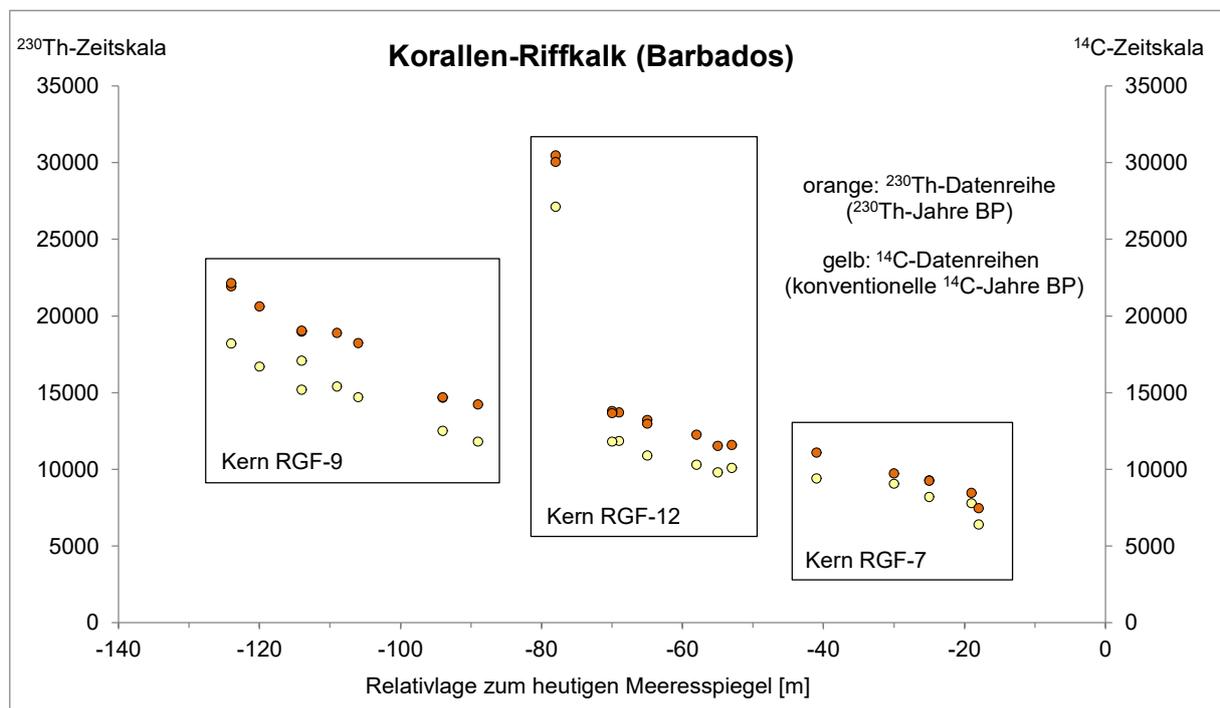
Die Autoren argumentieren, dass ihre Annahme – „unsere U-Th-Alter sind wahre ‚Kalendar‘-Alter“ – für das Oberpleistozän vernünftig sei,<sup>10</sup> basierend auf allen verfügbaren geophysikalischen Informationen („Dendrochronologie, Warvendatierung und Paläomagnetismus“).<sup>11</sup> Diese „geophysikalischen Informationen“ werden im Folgenden kurz beschrieben und kommentiert.

**Dendrochronologie.** Hinsichtlich der dendrochronologischen Kalibration der Radiokarbon-Zeitskala verweisen BARD et al. (1990) auf „STUIVER & KRA (1986)“; damit ist allerdings der gesamte Band 2B von Volume 28 des *Radiocarbon-Journals* gemeint (S. 805–1030). Die dendrochronologische Kalibration endet etwa bei Skalenpunkt 9150 kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP (STUIVER et al. 1986a, Fig. 7). Die gute Übereinstimmung von drei  $^{230}\text{Th}$ -Altern mit Dendro-Altern (s. Punkt 2 oben; BARD et al. 1990, Fig. 2) im Skalenabschnitt von ca. 9200 bis 7200  $^{230}\text{Th}$ -Jahre BP (folglich: 1  $^{230}\text{Th}$ -Jahr = 1 Dendro-Jahr) verifiziert die  $^{230}\text{Th}$ -Alter nicht. Denn implizit

<sup>10</sup> „Before the Holocene, we cannot yet demonstrate that our U-Th ages are true 'calendar' ages, but we will argue below that this is a reasonable assumption“ (BARD et al. 1990, 407).

<sup>11</sup> „(...); nevertheless, all geophysical information available (dendrochronology, varve dating and palaeomagnetism) suggests that our U-Th results are reasonable and that they may be used as a first-order tool to calibrate the radiocarbon timescale beyond the range of the high-resolution dendrochronological comparison“ (BARD et al. 1990, 409).

liegt hier die Annahme zugrunde, dass für diesen Skalenabschnitt 1 Dendro-Jahr = 1 Kalenderjahr ist. Diese 1:1-Beziehung gilt wohl (bereits) als ein „erwiesenes angenommenes Faktum, das keiner (weiteren) unterstützenden Referenz bedarf“ (Typ-5-Aussage nach LATOUR & WOOLGAR 1986, s. Anhang II). Allerdings ist festzustellen, dass die langen Baumringchronologien durch Dritte nicht überprüfbar sind (unzureichende Publikation, insbesondere keine oder unzureichende Zurverfügungstellung von Roh- und Konstruktionsdaten) und eine unabhängige Validierung der langen Teile der Baumringchronologien bisher nicht vorgelegt worden ist (KOTULLA 2019). Es ist also – mit Bezug auf eine 1:1-Beziehung (s. o.) – in unzulässiger Weise eine Tatsache produziert worden.



**Abb. 9** Korallen-Riffkalke (Barbados):  $^{230}\text{Th}$ - und  $^{14}\text{C}$ -Datenreihen.

Punkt-/Kreisdarstellung, jeweils ohne Unsicherheiten. Die  $^{14}\text{C}$ -Alter sind gegenüber den  $^{230}\text{Th}$ -Alter nominal etwa < 1000 bis zu etwa 3500 „Jahre“ geringer; die Differenz wird mit zunehmender Tiefe größer. Zur Stratigraphie der Kerne s. Abb. 8. Die konventionellen  $^{14}\text{C}$ -Alter sind Reservoir-korrigiert (Abzug von 400 [ $^{14}\text{C}$ -] Jahren). Daten aus BARD et al. (1990), ihre Table 1.

**Warvendatierung (Lake of the Clouds, Minnesota).** Kernbohrungen in den Untergrund des Lake of the Clouds haben gezeigt, dass nur im tiefsten Teil des Sees (Wassertiefe: ca. 30 m) die Sedimente laminiert vorliegen. STUIVER (1971) zufolge zählte A. CRAIG an einem 1968 gewonnenen, 5 m langen, kontinuierlich laminierten Kern ungefähr 9500 Warven ab. Die an organischem Kernmaterial ermittelten  $^{14}\text{C}$ -Alter setzt STUIVER (S. 61ff) in Beziehung zu einer abschließenden Warvenchronologie (inklusive einer Korrektur von mutmaßlich 600 fehlenden Warven) (vgl. Fig. 6 in STUIVER 1970 sowie Table 1 in STUIVER 1971). Demnach stimmen die  $^{14}\text{C}$ -Alter mit der Warvenchronologie überein, wenn diese entsprechend auf die atmosphärischen  $^{14}\text{C}$ -Schwankungen der Baumringchronologien korrigiert werden. Offensichtlich, so STUIVER (1971), seien die Warven für das Intervall der „letzten 7400 Jahre“ jährliche Bildungen (folglich: 1

Warven-Jahr = 1 Kalender-Jahr).<sup>12</sup> In STUIVER et al. (1986a, 970) werden schließlich die Warvenkalibrierten  $^{14}\text{C}$ -Alter des Lake of the Clouds bis 10.200 kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP für die Kalibration der Radiokarbon-Zeitskala berücksichtigt, da ihre  $\Delta^{14}\text{C}$ -Werte für den Skalenabschnitt von 9200 bis 8400 kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP in guter Übereinstimmung mit den  $\Delta^{14}\text{C}$ -Werten der deutschen Eichenchronologie seien (ihre Figs. 6 und 7; vgl. BARD et al. 1990, Fig. 2). Allerdings ist kein Nachweis darüber erbracht worden, dass es sich bei den ausgewiesenen Warven tatsächlich um jahreszeitliche Bildungen handelt. Die dargelegte Offensichtlichkeit (s. o.), der Beweis, dass 1 Warvenjahr = 1 Kalenderjahr ist, ist irreleitend. In einer Diskussion beim 12. Nobel-Symposium 1969 in Uppsala zur Warvenchronologie des Lake of the Clouds konstatiert M. STUIVER, dass es sich bei der „jährlichen Warvenablagerung“ um eine Basisannahme handelt(e).<sup>13</sup> Eine entsprechende Deklaration fehlt in STUIVER et al. (1986a). Somit beziehen sich BARD et al. (1990) auf eine fälschlicherweise als Faktum präsentierte Jahresschichten-Chronologie.

**Paläomagnetismus.** BARD et al. (1990) konvertieren eine paläomagnetische Überlieferung (geomagnetischer Dipol) der letzten „40.000 Jahre“ (Daten aus MCELHINNY & SENANAYAKE 1982) in  $^{14}\text{C}$ -Produktions-Zeitserien und schließlich in atmosphärische  $\Delta^{14}\text{C}$ -Zeitserien. Demnach liegen alle  $\Delta^{14}\text{C}$ -Werte der Baumring-Kalibration und der Lake-of-the-Clouds-Kalibration und ein Großteil der  $\Delta^{14}\text{C}$ -Werte der U-Th-/ $^{14}\text{C}$ -Altersbeziehung (Korallen) in einem konstruierten  $\Delta^{14}\text{C}$ -Korridor (BARD et al. 1990, ihre Fig. 3b). Allerdings sind die paläomagnetischen Daten  $^{14}\text{C}$ - oder U-Th-datiert; insofern liegt mit dieser Konstruktion keine unabhängige Alters-Verifizierung insbesondere der  $^{230}\text{Th}$ -Alter vor.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass es sich bei den sogenannten „geophysikalischen Informationen“ um zu Fakten gemachte Interpretationen handelt. Die mutmaßlich unabhängigen Chronologien sind nicht-validierte Chronologien („Dendrochronologie“, „Warvenchronologie“) oder, da  $^{14}\text{C}$ - und  $^{230}\text{Th}$ -basiert, abhängige Chronologien („Paläomagnetismus“). Insofern ist die Annahme, „U-Th-Alter sind wahre ‚Kalender‘-Alter“ (jenseits der dendrochronologischen Kalibrierung), von BARD et al. (1990) *nicht* oder *unwirksam* plausibilisiert.

GOSLAR et al. (1992) vermelden, dass in der Community noch einige Zweifel über die Zuverlässigkeit („reliability“) der U-Th-Methode für Kalibrationszwecke bestünden.<sup>14</sup>

### 3.1.1.2 BARD et al. (1992)

BARD et al. (1992) publizieren aktualisierte Isotopen-Alter der Barbados-Proben sowie ergänzend Isotopen-Alter von Korallen-Proben des Mururoa-Atolls und der Insel Isabela

<sup>12</sup> „The varve  $\text{C}^{14}$  ages generally agree within about 100 years with the varve counts when corrected for atmospheric  $\text{C}^{14}$  deviations known from the tree ring chronology. Evidently the varves are annual over at least a 7400-year interval“ STUIVER (1971, 62).

<sup>13</sup> „(...) one gets the basic assumption of annual varve deposition“ (BUCHA et al. 1970, 221).

<sup>14</sup> „Bard et al. (1990) used U/Th dates of Barbados corals as an independent time scale to reconstruct the trend of  $\Delta^{14}\text{C}$  changes to ca. 30,000 cal BP. New results on corals from Mururoa Atoll and replicates of previous measurements (Bard et al. 1991) seem to support previous estimates. However, relatively few samples were dated, and some doubts still exist about the reliability of this method for calibration purposes“ GOSLAR et al. (1992, 826).

(Galapagos).

Die Autoren zeigen, dass die Diskrepanzen zwischen  $^{14}\text{C}$ -Alter und  $^{230}\text{Th}$ -Alter nicht lokaler Natur sind (Barbados; s. o. BARD et al. 1990), sondern in gleicher Ausprägung auch im Pazifik vorkommen (vgl. Abb. 10). Des Weiteren führen sie aus, dass die  $^{230}\text{Th}$ -Alter der acht jüngsten Proben der Barbados-Kollektion (Skalenabschnitt von ca. 10.200 bis ca. 6.500 konventionelle  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP) in „exzellenter Übereinstimmung“ mit den Kalenderaltern der Hohenheim-Baumringchronologien sind,<sup>15</sup> wenn die Lücke zwischen „absolut-datierter“ Eichenchronologie und schwimmender Kiefernchronologie (mit Bezug auf KROMER & BECKER 1991<sup>16</sup>) um 150 [Dendro-] Jahre vergrößert werde (BARD et al. 1992, Figs. 2 und 3).

## Diskussion

Die umfangreichere Übereinstimmung von  $^{230}\text{Th}$ -Altern und Dendro-Altern (entspricht Kalender-Altern)<sup>17</sup> bewerten BARD et al. (1992) als weitere Unterstützung für die Genauigkeit und Präzession (also die Validität) der Messung der Zeit mit der U-Th-TIMS-Methode (s. hierzu Diskussion in Abschnitt 3.1.1.1).<sup>18</sup> Während die Autoren die Y-Achse ihrer Figs. 2–3 mit „True age (?) cal yr BP“ beschriften (nominal für den Skalenabschnitt von 7.000–13.000), also noch ein Fragezeichen setzen, ob U-Th-Alter und Kalender-Alter gleichsetzbar sind, verwenden sie im Textteil nur den Ausdruck „true ages“, also ohne eine Einschränkung.<sup>19</sup> Im Lehrbuch *Altersbestimmung (...)* von WAGNER (1995) werden mit Bezug auf die Datierung der Korallenproben U-Th-Alter und Kalender-Alter bereits uneingeschränkt gleichgesetzt (Typ-4-Aussage).<sup>20</sup>

Die schwimmende Hohenheim-Kiefernchronologie wird später von SPURK et al. (1998) revidiert. U. a. wird sie mit  $^{14}\text{C}$ -Daten- und Wiggle-Matching gegenüber der Hohenheim-Eichenchronologie neu positioniert; der dadurch verursachte Versatz (in Richtung Vergangenheit) umfasst hauptsächlich eine Spanne von 200 bis 243 Dendro-Jahren (Table 2; im Vergleich zu BECKER 1993 bzw. KROMER & BECKER 1993, die sich auf den Stand in KROMER & BECKER 1992<sup>21</sup> beziehen). Insofern nähert sich dieser Versatz dem Ansatz von BARD et al. (1992) – 150 [Dendro-] Jahre in Richtung Vergangenheit, s. o. – an. Es ist nicht auszuschließen, dass sich SPURK et al. (1998) an der  $^{230}\text{Th}$ -Zeitskala ausgerichtet haben.

<sup>15</sup> „In particular it is shown that for the eight youngest samples of the Barbados collection there is an excellent agreement between the calendar ages and the  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  age determinations“ (BARD et al. 1992, 103).

<sup>16</sup> „KROMER & BECKER (1991)“ ist KROMER & BECKER (1992).

<sup>17</sup> Mit Blick auf die Ausgangssituation (BARD et al. 1990) schreiben (BARD et al. 1992, 104): „Because the three youngest samples gave U-Th ages in agreement with their calibrated  $^{14}\text{C}$  ages, we preliminarily concluded that the TIMS U-Th determinations were not only precise but also accurate and that this  $^{14}\text{C}$  versus Th-U data set could be considered as a tool for a first order  $^{14}\text{C}$  calibration.“

<sup>18</sup> „This brings further support for the accuracy and precision of measurement of time by means of the  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  thermal ionization mass spectrometric technique“ (BARD et al. 1992, 104).

<sup>19</sup> „It is shown again that the  $^{14}\text{C}$  ages are systematically younger than the true ages during most of the radiocarbon application range (...)“ (BARD et al. 1992, 109).

<sup>20</sup> „Durch AMS-Datierungen an Proben aus über 100 m tiefen Bohrkernen vom Barbadosriff wurde der Meeresspiegelanstieg um maximal 131 m seit 18200 a BP nachgezeichnet (FAIRBANKS 1989). Parallele massenspektrometrische  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ -Daten an den Korallen sind bis zu 3500 a älter. Durch diesen Altersvergleich (Abb. 45) wird versucht, die  $^{14}\text{C}$ -Zeitskala zwischen 9 und 20 ka zu eichen (BARD et al. 1990b, 1992)“ (WAGNER 1995, 98).

<sup>21</sup> Siehe Fußnote 16.

### 3.1.1.3 BARD et al. (1993)

BARD et al. (1993) publizieren  $^{14}\text{C}$ -AMS-Alter der Barbados-Proben (zuvor Beta-Zählung, FAIRBANKS 1989, 1990; s. o. BARD et al. 1990) sowie ergänzend  $^{14}\text{C}$ -AMS- und  $^{230}\text{Th}$ -Alter von Korallen-Proben des Mururoa-Atolls (s. Abschnitt 3.1.1.4) (vgl. Abb. 10).

Die Autoren folgern u. a., dass auf Basis der verfügbaren Daten die Kalenderdauer der Holozän-Epoche (10.000 bis 0 konventionelle  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP) 11.200 bis 11.500 Kalender-Jahre umfasst.<sup>22</sup> Dies war bereits in BARD et al. (1992) vorgebracht worden.<sup>23</sup>

## Diskussion

Mit dem Datenbestand<sup>24</sup> von BARD et al. (1993) wird die Radiokarbon-Kalibrationskurve von 1993 (CALIB-Programm, Version 3.0) über den dendrokalibrierten Abschnitt hinaus (bis 11.400 kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP) auf 21.950 kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP ausgeweitet (STUIVER & REIMER 1993). Insofern werden die U-Th-Alter (im Rahmen ihrer Unsicherheiten) von der Radiokarbon-Community als Kalender-Alter akzeptiert.<sup>25</sup>

### 3.1.1.4 BARD et al. (1998)

BARD et al. (1998) präsentieren eine aktualisierte und erweiterte Datenbasis zur Kalibration der Radiokarbon-Zeitskala mit U-Th-Altern jenseits des Skalenpunktes 11.900 kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP. Grundlage sind neue  $^{14}\text{C}$ -AMS-Bestimmungen an dem Kernmaterial bzw. den Proben von Barbados (vgl. BARD et al. 1990) sowie zusätzlich die Einbeziehung von  $^{14}\text{C}$ -/ $^{230}\text{Th}$ -Altern von Steinkorallen von Tahiti und des Mururoa-Atolls (teilweise in BARD et al. 1993 publiziert). Insgesamt liegen nun für den Skalenabschnitt von 24.000 bis 11.900  $^{230}\text{Th}$ -Jahren BP  $^{14}\text{C}$ -/ $^{230}\text{Th}$ -Wertepaare von 29 Proben vor.

Die Autoren legen (nochmals) dar, dass die Differenz zwischen den  $^{14}\text{C}$ - und  $^{230}\text{Th}$ -Altern nicht lokaler Natur ist (Barbados), sondern sich auch in den Tahiti- und Mururoa-Proben zeigt (ihre Figs. 1 und 2; Abb. 10). Für Alter jenseits der Grenze Jüngere Dryas/Präboreal (10.000 konventionelle  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP) geben sie für die Kalibration folgende Näherungs-Gleichungen an:

- „[cal BP] = 1.168 x [ $^{14}\text{C}$  age BP]“ oder „noch besser“
- „[cal BP] = -3.0126 x 10<sup>-6</sup> x [ $^{14}\text{C}$  age BP]<sup>2</sup> + 1.2896 x [ $^{14}\text{C}$  age BP] – 1005“

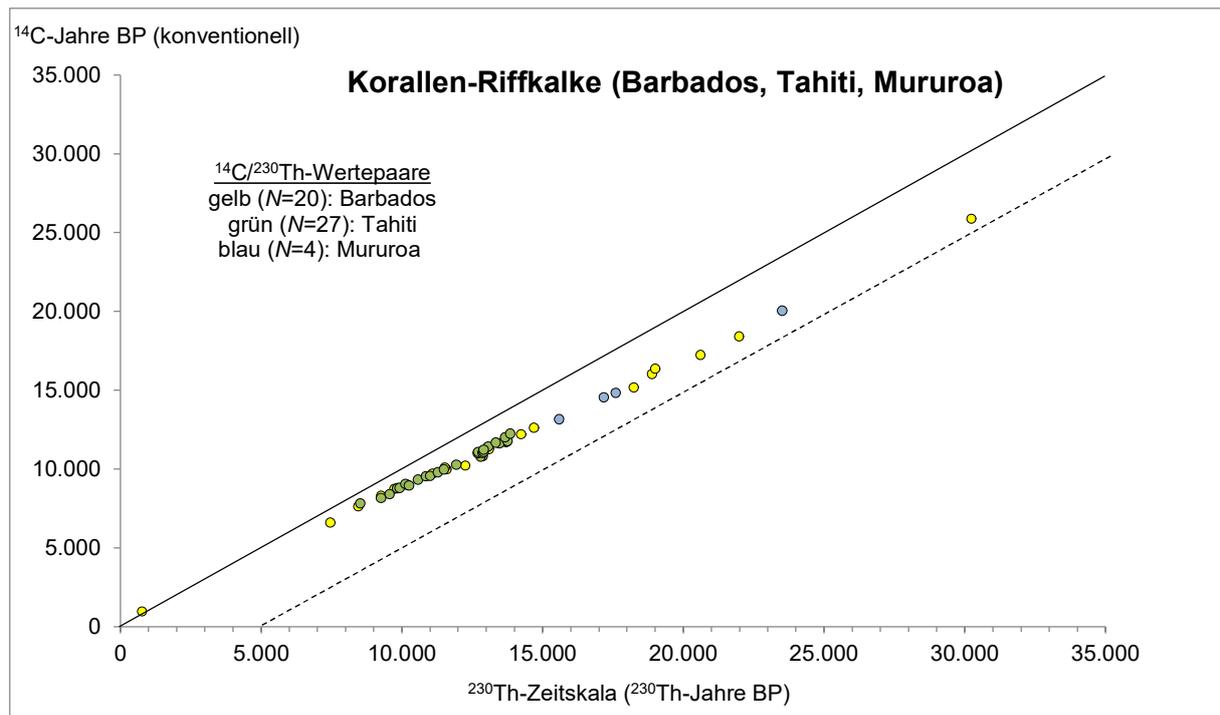
mit: cal BP, kalibriertes  $^{14}\text{C}$ -Alter BP (entspricht  $^{230}\text{Th}$ -Alter BP, implizit Kalender-Alter BP);  $^{14}\text{C}$  age BP, konventionelles  $^{14}\text{C}$ -Alter BP.

<sup>22</sup> „On the basis of available data, it is clear that the calendar duration of the Holocene chronozone (0–10,000  $^{14}\text{C}$  yr BP) ranges from 11,200 to 11,500 cal yr (...)“ (BARD et al. 1993, 198).

<sup>23</sup> „However based on the available data it seems inescapable that the calendar duration of the Holocene chronozone (0–10,000  $^{14}\text{C}$  yr BP) ranges from 11,200 to 11,500 cal yr (...)“ BARD et al. (1992, 109).

<sup>24</sup> Es handelt sich nach Table 1A/1B lediglich um maximal 16 Datenpaare: Barbados (14) und Mururoa (2).

<sup>25</sup> „U/Th and  $^{14}\text{C}$  dating of corals provide  $^{14}\text{C}$  age calibration beyond 10,000  $^{14}\text{C}$  yr BP (Bard et al. 1993)“ (STUIVER & REIMER 1993, 223).



**Abb. 10** Korallenproben I: Beziehung <sup>14</sup>C-Alter zu <sup>230</sup>Thorium-Alter.

Punkt-/Kreisdarstellung, jeweils ohne Unsicherheiten. Orientierungslinien: schwarz, durchgezogenen: 1:1-Beziehung; schwarz, gestrichelt: Versatz um 5.000 „Jahre“. Die konventionellen <sup>14</sup>C-Alter sind Reservoir-korrigiert (Abzug von 400 [<sup>14</sup>C-] Jahren für Barbados und 300 [<sup>14</sup>C-] Jahren für Tahiti und Mururoa). Daten aus BARD et al. (1998), ihre Table 1; weitere Informationen dort. BARD et al. (1998) bezeichnen in einer vergleichbaren Darstellung (ihre Fig. 1) ihre X-Achse mit „cal BP“, kalibrierte <sup>14</sup>C-Jahre BP; hierzu s. Textteil.

BARD et al. (1998, 1089ff) vergleichen ihre Kalibration mit vorherigen Kalibrationen (<sup>230</sup>Th-Jahre BP werden mit kalibrierten <sup>14</sup>C-Jahren BP gleichgesetzt):

- 1) Skalenbereich 11.900 bis 10.000 <sup>230</sup>Th-Jahre BP (ihre Fig. 3): „exzellente Übereinstimmung“ mit der Kalibration durch die Hohenheim-Kiefernchronologie (KROMER & SPURK 1998).
- 2) Skalenbereich 12.000 bis 9.500 <sup>230</sup>Th-Jahre BP: in Übereinstimmung mit den Daten der warvierten Sedimente des Gosciarz-Sees (Westpolen) (GOSLAR et al. 1995).
- 3) Skalenbereich ≤ 12.500 <sup>230</sup>Th-Jahre BP: Die Cariaco-Kalibrationskurve sei in exzellenter Übereinstimmung mit den [eigenen] „Korallendaten“ (mit Verweis auf HUGHEN et al. 1998a, insbesondere ihre Fig. 3b).
- 4) Skalenbereich ca. 12.000 bis ca. 10.000 <sup>230</sup>Th-Jahre BP: Ein unabhängiger Check der Korallen-<sup>14</sup>C-<sup>230</sup>Th-Kalibration könne durch die Identifizierung vulkanischer Aschenlagen in den Jahreslagen-abgezählten Grönland-Eiskernen erfolgen. A) Saksunarvatn-Asche: 10.180 ± 60 [Eiskern-] Jahre BP (GRÖNVOLD et al. 1995) vs. 8.960 ± 140 konventionelle <sup>14</sup>C-Jahre BP (BIRKS et al. 1996). B) Vedde-Asche: 11.980 ± 80 [Eiskern-] Jahre BP (GRÖNVOLD et al. 1995) vs. 10.330 ± 60 konventionelle <sup>14</sup>C-Jahre BP (BARD et al. 1994, BIRKS et al. 1996).<sup>26</sup>

BARD et al. (1998) resümieren (in Übersetzung): „Die Daten für diese beiden vulkanischen

<sup>26</sup> Bezieht sich auf den GRIP-Eiskern; s. Glossar. Siehe auch KOTULLA (2022).

Ereignisse [s. Punkt 4, MK] zeigen deutlich die Kompatibilität der deutschen Kiefern-Baumringchronologie, der  $^{230}\text{Th}$ -Alter von Korallen, der Gosciuz-Warven und der GRIP-Jahreszählungen im Zeitbereich um die Jüngere Dryas/Präboreal-Grenze<sup>27</sup>, die auf ca. 11.500 cal [kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre, MK] BP datiert wird.“<sup>28</sup>

## Diskussion

Zunächst ist festzuhalten, dass im Vergleich zu den früheren Arbeiten (BARD et al. 1990, 1992, 1993) eine Transformation vollzogen worden ist: War zuvor bei der Darstellung der  $^{14}\text{C}$ -/ $^{230}\text{Th}$ -Wertepaare die jeweilige Bezugsachse mit „U-Th-Alter (Jahre BP)“ bezeichnet worden (Fig. 2 in BARD et al. 1990, jeweils Fig. 1 in BARD et al. 1992, 1993), wird sie nun (Fig. 1 in BARD et al. (1998) mit „cal BP“, kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP bezeichnet.  $^{230}\text{Th}$ -Jahre werden also mit kalibrierten  $^{14}\text{C}$ -Jahren gleichgesetzt; demnach gilt 1  $^{230}\text{Th}$ -Jahr = 1 kalibriertes  $^{14}\text{C}$ -Jahr = 1 Kalender-Jahr.

BARD et al. (1998) unternehmen nicht den Versuch,  $^{230}\text{Th}$ -Alter für den Skalenbereich > 12.500  $^{230}\text{Th}$ -Jahre BP zu verifizieren. Sie gehen wohl von der Annahme aus, dass  $^{230}\text{Th}$ -Alter dieses Skalenbereichs reale Alter (also Kalender-Jahre) repräsentieren (vgl. ihre Argumentation in BARD et al. 1990, 1992, Abschnitte 3.1.1.1 und 3.1.1.2, sowie Punkte 1–4 oben).

**Zu Punkt 1.** Die Hohenheim-Baumringchronologien sind durch SPURK et al. (1998) teilrevidiert, erweitert und synchronisiert worden. Nach dieser Aktualisierung sei die schwimmende Hohenheim-Kiefernchronologie – so KROMER & SPURK (1998) – „in enger Übereinstimmung“ mit den Kalibrationsdatensätzen des präborealen Abschnitts, die von Warvenchronologien und Korallen stammten.<sup>29</sup> Hier könnte eine zielgerichtete Passung vorliegen.

**Zu Punkt 2.** GOSLAR et al. (1995) verankern ihre schwimmende Gosciuz-Warvenchronologie (Länge:  $9.662 \pm 90$  Warven) über  $^{14}\text{C}$ -Daten- und Wiggle-Matching auf die deutsche Hohenheim-Eichenchronologie (Stand KROMER & BECKER 1993). Damit datieren die Autoren die Grenze Jüngere Dryas/Präboreal in dem Gosciuz-Seesediment auf  $11.440 \pm 120$  [kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre] BP. Sie resümieren u. a. (Co-Autor ist E. BARD), dass für den Skalenbereich, der den oberen Teil des Alleröd und die Jüngere Dryas umfasst, die Radiokarbon-Daten der Gosciuz-Makrofossilien (ihre Fig. 2) im Allgemeinen die U-Th-Kalibration bestätigen (mit Verweis auf BARD et al. 1993 und EDWARDS et al. 1993).<sup>30</sup> Konkret handelt es sich – mit Bezug auf BARD et al. (1993) – lediglich um fünf  $^{14}\text{C}$ -/ $^{230}\text{Th}$ -Wertepaare, die in ihrer Fig. 2 eingetragen sind und zum Spline-Kurvenverlauf der Gosciuz-Daten passen. Dass vier der fünf  $^{14}\text{C}$ -/ $^{230}\text{Th}$ -Wertepaare (Skalenabschnitt von 11.600 bis 9.800 [Kalender-] Jahre BP) zu den Hohenheim-Kalibrationsdaten passen (ebenfalls Stand KROMER & BECKER 1993), zeigten bereits BARD et al. (1993) in ihrer Fig. 2. Insofern handelt es sich nicht um eine *unabhängige* Bestätigung der U-Th-Kalibration durch die Gosciuz-Daten,

<sup>27</sup> Siehe Tab. 3 (Glossar).

<sup>28</sup> „The data for these two volcanic events clearly demonstrate the compatibility of the German pine tree-ring chronology,  $^{230}\text{Th}$  ages of corals, Gosciuz varves and GRIP annual counts in the time range around the Younger Dryas/Preboreal boundary dated at ca. 11,500 cal BP“ (BARD et al. 1998, 1091).

<sup>29</sup> „The calibration data set based on the floating German pine is now in close agreement with the Preboreal part of  $^{14}\text{C}$  calibration series obtained from most varve chronologies and corals“ (KROMER & SPURK 1998, 1117).

<sup>30</sup> „In the late Allerød and Younger Dryas, the radiocarbon dates of Gościuz macrofossils (Fig. 2) generally confirm the U/Th calibration (...)“ GOSLAR et al. (1995, 416).

sondern lediglich um eine Übertragung durch die Verankerung der schwimmenden Gosciawarvenchronologie mit der Hohenheim-Eichenchronologie.<sup>31</sup>

**Zu Punkt 3.** Nach Fig. 3b (HUGHEN et al. 1998a) stimmen die Cariaco-Datensätze mit den Korallen-Datensätzen überwiegend überein (sogar ab Skalenpunkt ca. 14.500 [Warven- bzw. <sup>230</sup>Th-] Jahre BP). HUGHEN et al. (1998a) beziehen sich allerdings auf eine Verankerung ihrer Cariaco-Warvenchronologie an die Hohenheim-Kiefernchronologie (Stand KROMER & BECKER 1993); s. Punkt 1. Entscheidend ist aber, dass HUGHEN et al. (1998a, b) eine jahreszeitliche Prägung der laminierten Sedimente des Cariaco-Beckens – also das Vorliegen von Warven (Jahresschichten) – nicht nachweisen können (s. Abschnitt 3.2.1.1).

**Zu Punkt 4.** Bemerkenswert ist der „unabhängige Check der Korallen-<sup>14</sup>C-<sup>230</sup>Th-Kalibration“ für den Skalenbereich von ca. 12.000 bis ca. 10.000 <sup>230</sup>Th-Jahre BP durch die GRIP-Eiskernchronologie. Zunächst gilt es dem Weg der Verweise zu folgen: Hinsichtlich der GRIP-Eiskernchronologie verweist GRÖNVOLD et al. (1995) auf JOHNSON et al. (1992). JOHNSON et al. (1992) weisen in ihrer Table 1 für die Grenze Jüngere Dryas/Präboreal (Tiefe 1623,60 m) ein GRIP-Alter von 11.550 ± 70 [Eiskern-] Jahre BP aus (vorläufige Zeitskala; Bohrfortschritt bis Ende 1991). DANSGAARD et al. (1993, 219) vermelden nach Abschluss der GRIP-Bohrkampagne, dass die GRIP-Chronologie mit zwei (übernommenen) zeitlichen Ankerpunkten erstellt wurde: Ende der Jüngeren Dryas mit 11.500 [kalibrierten <sup>14</sup>C-] Jahren BP (mit Verweis auf JOHNSON et al. 1992 sowie BARD et al. „in the press“) und Beginn der Weichsel-Kaltzeit (MIS 5d) mit 110.000 [radiometrischen] Jahren (mit Verweis auf MARTINSON et al. 1987). Es verbleibt also BARD et al. (*Radiocarbon*, „in the press“); dabei kann es sich nur um BARD et al. (1993) handeln (s. o.).

BARD et al. (1993) weisen – „auf Basis der verfügbaren Daten“ (primär ihre eigenen <sup>14</sup>C-/<sup>230</sup>Th-Ergebnisse) – für den Beginn des Holozän bzw. die Grenze Jüngere Dryas/Präboreal ein Alter von 11.200–11.500 kalibrierte <sup>14</sup>C-Jahre BP aus. Den höheren Wert haben DANSGAARD et al. (1993) von BARD et al. (1993) übernommen, obgleich in BARD et al. (1990) sowie BARD et al. (1992) bereits diese Kalibration vorlag. Insofern liegt kein „unabhängiger Check“ vor; BARD et al. (1998) verweisen indirekt letztendlich auf ihre eigene „Korallen-Kalibration“.

Zusätzlich ist zu erkennen, dass sich hier bereits andeutet, dass <sup>230</sup>Th-Alter für die Radiokarbon-Kalibration eine führende, autoritative Rolle einnehmen.

<sup>31</sup> Zu den „jährlich-laminierten“ Seesedimenten verweisen GOSLAR et al. (1995) auf GOSLAR et al. (1993). Dort heißt es (S. 289), dass der jährliche Charakter der Lamination – mit Verweis auf GOSLAR et al. (1992) und RALSKA-JASIEWICZOWA et al. (1992) – bestätigt wurde durch die mikroskopische Untersuchung von a) Dünnschliffen (unterer Teil der Seesedimente) und b) „tape-peel“-Trägern (oberer Teil der Seesedimente). Letzteres wird nicht weiter ausgeführt. GOSLAR et al. (1992, 827) schreiben, dass sie das „Jahres-Muster der Lamination durch die Datierung von einer Reihe Gesamtproben\* vorläufig etabliert haben“ (mit Verweis auf PAZDUR et al. 1987). PAZDUR et al. (1987) analysieren erste Radiokarbonbestimmungen von Sedimentproben des 1985 gewonnenen Sedimentkerns G85 (0–15,5 m). Danach „zeigt das Ergebnis für den oberen Teil des Kerns G85 [0–9,65 m; MK] eine strikte 1:1-Korrespondenz zwischen kalibrierter Radiokarbon-Zeitskala und der Anzahl der Couplets an, und liefert damit indirekt den Beweis, dass die Couplets wirklich jährliche Zuwächse repräsentieren“ (S. 144). Mit anderen Worten: Die mutmaßliche „jahreszeitliche Prägung“ der laminierten Sedimente des Gosciawarven-Sees ist eine Zuweisung, die sich aus den kalibrierten <sup>14</sup>C-Altern ergibt. Ein *unabhängiger* Nachweis für das Vorliegen von Warven (Jahresschichten) ist damit nicht erbracht worden (weitere Arbeiten, z. B. GOSLAR 1998 oder BONK et al. 2021, werden hier nicht diskutiert). Auch RALSKA-JASIEWICZOWA et al. (1992, 259) verweisen wie GOSLAR et al. (1992) auf PAZDUR et al. (1987). – \*Im Original: „bulk sample“. Damit ist wohl eine Sedimentprobe gemeint, für deren organische und Karbonatfraktion separate Radiokarbonbestimmungen durchgeführt worden sind.

**Fazit.** BARD et al. (1998) vergleichen ihre Ergebnisse mit anderen Chronologien. Da aber direkt oder indirekt Synchronisationen und/oder Zeitskalen-Übertragungen vorliegen, taugen sie nicht für eine *unabhängige* Bestätigung der U-Th-Kalibration. Im Fall der behaupteten *unabhängigen* Bestätigung durch die GRIP-Eiskernchronologie handelt es sich um einen Zirkelschluss. Denn die GRIP-Eiskernchronologie ist mit Verweis auf BARD et al. („in the press“, 1993?) mit dem U-Th-Korallen-Datum der Grenze Jüngere Dryas/Präboreal (Pleistozän/Holozän) konstruiert worden.

Mit dem Datenbestand von BARD et al. (1998) wird die Radiokarbon-Kalibrationskurve von 1998 (INTCAL98) über den dendrokalibrierten Abschnitt hinaus (bis 11.850 kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP) auf 24.000 kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP ausgeweitet (STUIVER et al. 1998a). Dort heißt es (S. 1047; in Übersetzung): „Die  $^{14}\text{C}$ -Alter von dendrodatierten Baumringen ergeben zusammen mit  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ -datierten Korallen schließlich die  $^{14}\text{C}$ -Altersachse der INTCAL98-Kurve.“<sup>32</sup> Damit sind die U-Th-Alter zur Radiokarbon-Kalibration – nach einer erstmaligen Verwendung für die 1993er-Kurve – fest etabliert.<sup>33</sup>

### 3.1.1.5 CUTLER et al. (2004)

CUTLER et al. (2004) liefern eine Kalibrierung von einzelnen Abschnitten der Radiokarbon-Zeitskala mit paarweisen  $^{14}\text{C}/^{230}\text{Th}$ -Alterswerten von Korallen von Espiritu Santo (Vanuatu) und Huon (Papua-Neuguinea). Die Korallenproben stammen von sechs Onshore-Bohrkampagnen der Jahre 1988–1997. Mit über 70 Korallen-Analysen legen die Autoren – im Vergleich zu vorhergehenden Studien – für bestimmte Skalenabschnitte mehr oder erstmals überhaupt paarweise Datierungsergebnisse vor (Abb. 11).

## Diskussion

Insgesamt bestätigen CUTLER et al. (2004) im Wesentlichen die bisherigen Ergebnisse: Im Skalenabschnitt von ca. 7.000 bis ca. 30.000  $^{230}\text{Th}$ -Jahre BP nehmen die  $^{14}\text{C}$ -Alter im Verhältnis zu den  $^{230}\text{Th}$ -Altern zunehmend ab. Allerdings beträgt die Differenz bei CUTLER et al. (2004) nominal (ohne Unsicherheiten) bis zu etwa 6.800 „Jahre“ (Abb. 11); bei BARD et al. (1998) sind es nominal (ohne Unsicherheiten) bis zu etwa 4.800 „Jahre“ (Abb. 10).

CUTLER et al. (2004) zufolge ist die Verwendung von  $^{230}\text{Th}$  für hochauflösende  $^{14}\text{C}$ -Kalibrationen zuerst von EDWARDS et al. (1998) vorgeschlagen und getestet worden.<sup>34</sup> Zur Überprüfung der Genauigkeit der  $^{230}\text{Th}$ -Alter wenden CUTLER et al. (2004) für die Korallen-Kalibration erstmals die  $^{231}\text{Pa}$ -Datierungsmethode an. Diese „strenge zweite Überprüfung“ erhöhe das Vertrauen in die Abschnitte der Kalibrierung, für die die Proben übereinstimmende  $^{230}\text{Th}$ -Alter und  $^{231}\text{Pa}$ -Alter aufweisen (insbesondere Skalenabschnitt 23.000 bis 51.000  $^{230}\text{Th}$ -Jahre BP).

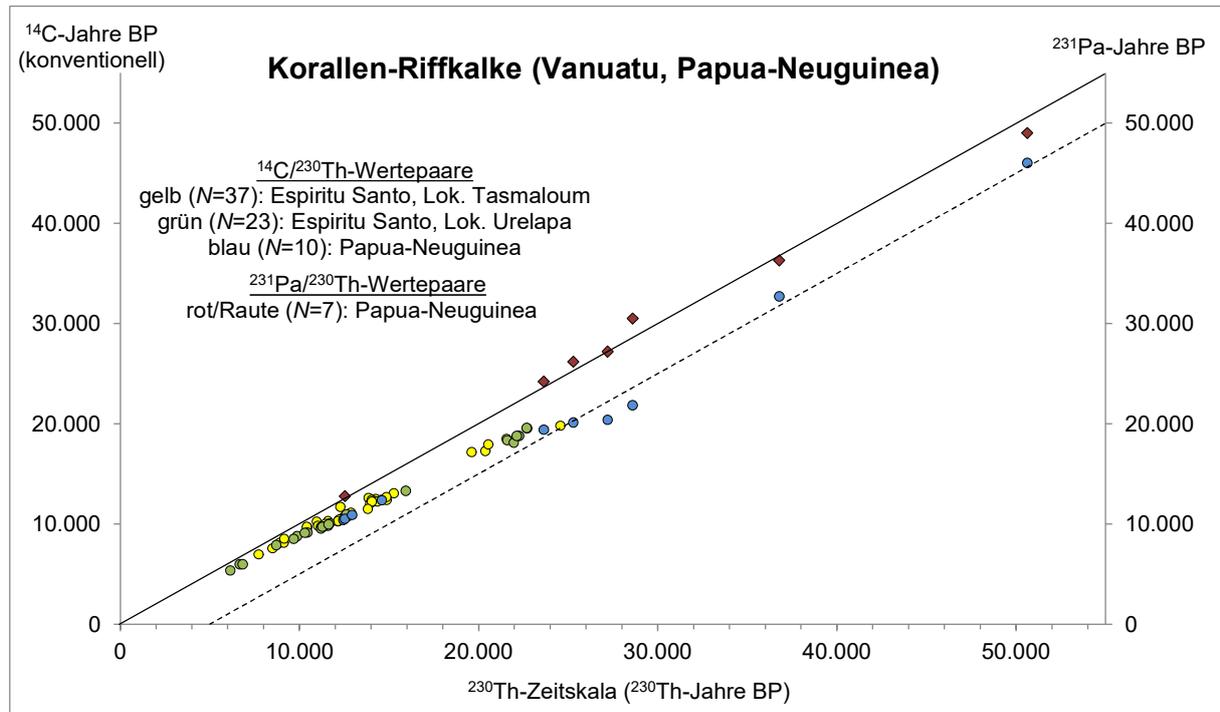
<sup>32</sup> „The  $^{14}\text{C}$  ages of dendrodated tree-rings, together with  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ -dated corals, ultimately yield the  $^{14}\text{C}$  age axis of the INTCAL98 curve“ (STUIVER et al. 1998a, 1047).

<sup>33</sup> Lediglich eine Basisannahme findet Erwähnung: „The corals are assumed to be ideal closed systems with regard to  $^{14}\text{C}$ ,  $^{234}\text{U}$  and  $^{234}\text{Th}$  exchange“ (STUIVER et al. 1998a, 1048).

<sup>34</sup> „The use of  $^{230}\text{Th}$  for high-resolution  $^{14}\text{C}$  calibrations was first proposed and tested by Edwards et al. (1988)“ CUTLER et al. (2004, 1128).

Dies ist nach ihrer Table 1 für 7 von 11 Proben der Fall (s. Abb. 11), bezogen auf eine (geringe) Abweichung von  $\leq 2.000$  „Jahren“. Es werden allerdings keine Angaben dazu gemacht, wie die  $^{231}\text{Pa}$ -Alter validiert worden sind.<sup>35</sup>

Aus dem Datenbestand von CUTLER et al. (2004) werden 35 Wertepaare für die Radiokarbon-Kalibrationskurve von 2004 (IntCal04) verwendet. IntCal04 ist auf 26.000 kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP ausgeweitet worden (REIMER et al. 2004).



**Abb. 11** Korallenproben II: Beziehung  $^{14}\text{C}$ -Alter und  $^{231}\text{Pa}$ -Alter zu  $^{230}\text{Th}$ -Alter.

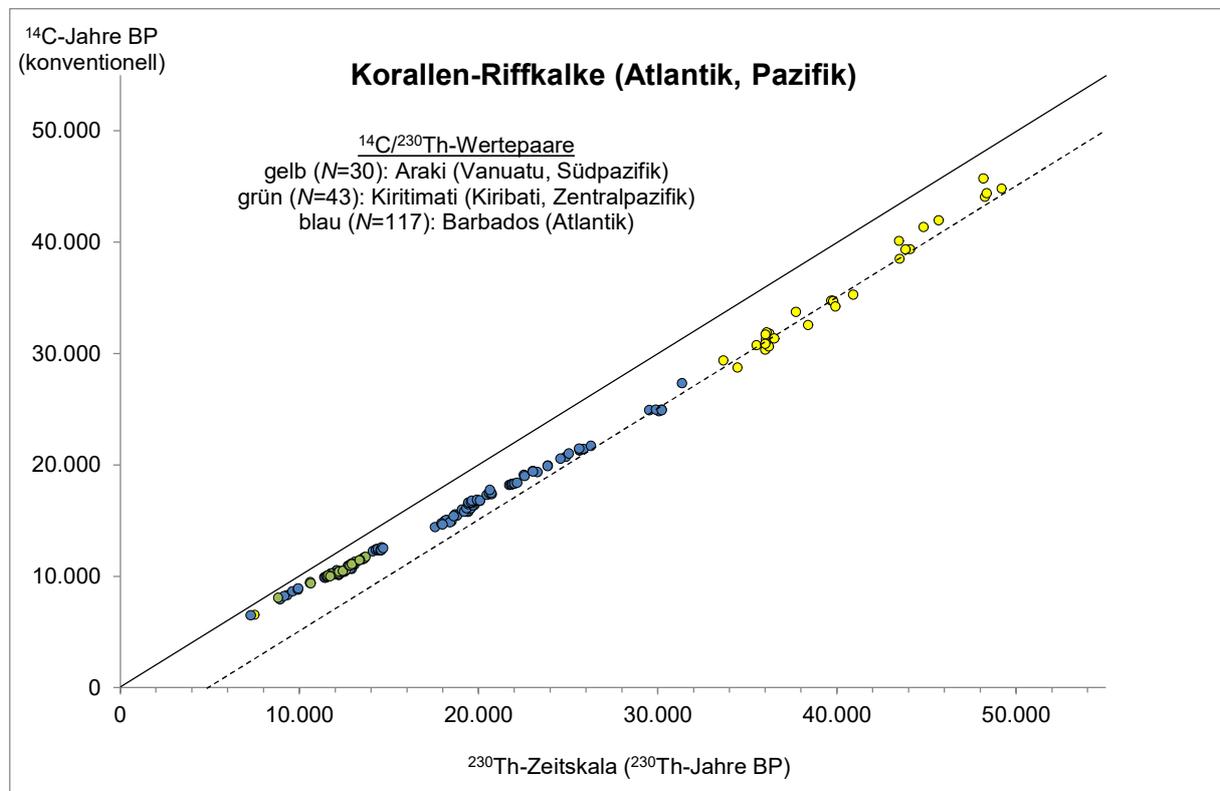
Punkt-/Kreis- bzw. Punkt-/Rautendarstellung, jeweils ohne Unsicherheiten.  $^{231}\text{Pa}$ -Alter und  $^{230}\text{Th}$ -Alter stimmen im Wesentlichen überein, während  $^{14}\text{C}$ -Alter gegenüber  $^{230}\text{Th}$ -Alter nominal etwa  $< 1.000$  bis zu etwa 6.800 „Jahre“ abweichen (Trend von Skalenpunkt ca. 6.000 bis Skalenpunkt ca. 28.000  $^{230}\text{Th}$ -Jahre BP). Orientierungslinien: schwarz, durchgezogen: 1:1-Beziehung; schwarz, gestrichelt: Versatz um 5000 „Jahre“. Daten aus CUTLER et al. (2004), ihre Table 1; weitere Informationen dort. Die konventionellen  $^{14}\text{C}$ -Alter sind Reservoir-korrigiert (Abzug von 400 [ $^{14}\text{C}$ ] Jahren für Papua-Neuguinea und Urelapa, Espiritu Santo, und 500 [ $^{14}\text{C}$ ] Jahren für Tasmaloum, Espiritu Santo). Bei den Probenergebnissen aus Papua-Neuguinea sind nur solche in der Grafik einbezogen worden, die nach CUTLER et al. (2004) „alle Screening-Kriterien erfüllt haben“ (vgl. hierzu auch ihre Fig. 7). CUTLER et al. (2004) bezeichnen ihre X-Achse (ihre Figs. 6–12) mit „Calendar age (kyr BP)“, Kalender-Alter (1000 Jahre BP). Lok., Lokalität.

### 3.1.1.6 FAIRBANKS et al. (2005)

FAIRBANKS et al. (2005) präsentieren eine eigene, alleinstehende Radiokarbon-Kalibrationskurve für den kompletten Skalenabschnitt von 50.000 bis 0 kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP. Ihr

<sup>35</sup> Zur Methodik verweisen CUTLER et al. (2004, 1131) wie folgt: „ $^{231}\text{Pa}$  methods are those of Shen et al. (2003) and Edwards et al. (1997), which are modifications of those of Pickett et al. (1994).“ Die Kalkulation erfolgt anhand folgender Gleichung (Fußnote k zur Table 1): „ $^{231}\text{Pa}$  ages are calculated from the equation  $T = -\ln[1 - (^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U})/\lambda_{231}] / \lambda_{231}$ , where  $\lambda_{231} = 2.11583 \times 10^{-5} \text{ yr}^{-1}$  (Robert et al. 1969).“

Hauptbeitrag ist eine Erweiterung der Radiokarbon-Kalibrationskurve<sup>36</sup> für den Skalenabschnitt von 50.000 bis 12.000 kalibrierte <sup>14</sup>C-Jahre BP mit paarweisen <sup>14</sup>C/<sup>230</sup>Th-Alterswerten von Korallen des Pazifik und Atlantik (Abb. 12).



**Abb. 12** Korallenproben III: Beziehung <sup>14</sup>C-Alter zu <sup>230</sup>Thorium-Alter.

Punkt-/Kreisdarstellung, jeweils ohne Unsicherheiten. Die <sup>14</sup>C-Alter sind gegenüber den <sup>230</sup>Thorium-Altern nominal etwa < 1.000 bis zu etwa 6.000 „Jahre“ geringer. Orientierungslinien: schwarz, durchgezogen: 1:1-Beziehung; schwarz, gestrichelt: Versatz um 5.000 „Jahre“. Daten aus FAIRBANKS et al. (2005), ihre „Supplementary Data“; weitere Informationen dort. Die konventionellen <sup>14</sup>C-Alter sind Reservoir-korrigiert (Abzug von 365 [<sup>14</sup>C-] Jahren für Araki und Barbados und 350 [<sup>14</sup>C-] Jahren für Kiritimati). FAIRBANKS et al. (2005) bezeichnen ihre X-Achse (ihre Figs. 1–4) bzw. die Spaltenüberschrift der <sup>230</sup>Thorium-Jahre BP mit „Calendar age (years BP)“, Kalender-Alter (Jahre BP).

## Diskussion

Im Vergleich zu BARD et al. (1998) und CUTLER et al. (2004) ist die Korallen-Datenbasis von FAIRBANKS et al. (2005) nochmals erheblich vergrößert und auf den gesamten Skalenbereich der Radiokarbon-Zeitskala erweitert worden. Von Skalenpunkt ca. 8.000 bis Skalenpunkt ca. 30.000 <sup>230</sup>Thorium-Jahre BP zeigt sich im Wesentlichen der gleiche Trend wie bei den Korallen-Bearbeitern zuvor: Die <sup>14</sup>C-Alter sind gegenüber den <sup>230</sup>Thorium-Altern nominal etwa < 1.000 bis zu etwa 6.000 „Jahre“ geringer (Abb. 12).

Erneut wird die Validität der <sup>230</sup>Thorium-Alter (implizit Kalender-Alter) mit einer Übereinstimmung der dendrochronologischen Kalibrierung (bis Skalenabschnitt ≤ 11.900 kalibrierte

<sup>36</sup> Der angegebene Link zur Nutzung des Programms funktioniert nicht (Stand: 2023): „Our radiocarbon calibration program is publicly accessible at: <http://www.radiocarbon.LDEO.columbia.edu/> along with full documentation of the samples, data, and our statistical calibration model“ (FAIRBANKS et al. 2005, 1781).

$^{14}\text{C}$ -Jahre BP; IntCal04) sowie mit übereinstimmenden, assoziierenden  $^{231}\text{Pa}$ -Altern begründet (u. a. mit Verweis auf CUTLER et al. 2004);<sup>37</sup> zu Letzterem s. Abschnitt 3.1.1.5.

In IntCal04 (REIMER et al. 2004) sind für den Skalenabschnitt von ca. 25.900 bis ca. 12.400 kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP (=  $^{230}\text{Th}$ -Jahre BP) 130 Wertepaare der Datenbasis von FAIRBANKS et al. (2005) einbezogen worden.<sup>38</sup>

### 3.1.1.7 DURAND et al. (2013)

DURAND et al. (2013)<sup>39</sup> liefern eine weitere Anzahl von paarweisen  $^{14}\text{C}$ - und  $^{230}\text{Th}$ -Altern von Korallen vor der Küste Tahitis, aus Kernbohrungen in Wassertiefen von 42–117 m. Das Korallen-Probenmaterial ist 2005 vom Integrated Ocean Drilling Program (IODP), Expedition 310, gewonnen worden und stammt von drei Lokalitäten (Faaa, Tiarei, Maraa) aus insgesamt 21 von 37 Bohrlöchern (Abb. 13).

## Diskussion

Die paarweisen  $^{14}\text{C}$ - und  $^{230}\text{Th}$ -Alter liegen für den Skalenabschnitt von ca. 10.000 bis ca. 36.000  $^{230}\text{Th}$ -Jahre BP vor (ihre Table 1), die in Abb. 14 dargestellt sind. Damit stellen die Autoren einen weiteren Korallen-Datensatz zur Kalibrierung der Radiokarbon-Zeitskala bereit, der insbesondere – das Tahiti-Probenmaterial betreffend und mit Bezug auf BARD et al. (1998, 2010) – über den Skalenabschnitt von 13.900  $^{230}\text{Th}$ -Jahre BP hinausgeht.

Insgesamt bestätigen DURAND et al. (2013) die Beziehung der  $^{14}\text{C}$ -Alter zu den  $^{230}\text{Th}$ -Altern, die bereits andere Korallen-Bearbeiter festgestellt haben (s. Abschnitte zuvor).

### 3.1.1.8 Nachtrag

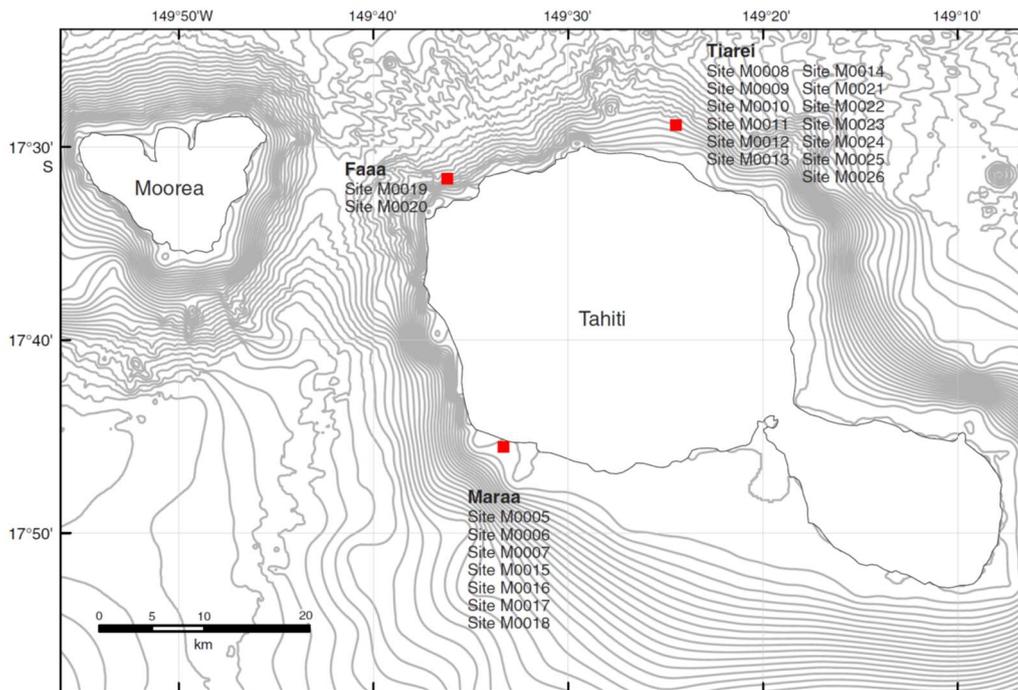
Die Kalibrationskurve IntCal20 verwendet im Vergleich zur Kalibrationskurve IntCal13 keine Korallen-Daten, für welche Alter größer 25.000 kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP ausgewiesen wurden (REIMER et al. 2020, 15). Mit dieser Maßnahme sollen potentiell fehlerhafte Daten ausgeschlossen werden. Diese Korallen-Daten würden im Vergleich zur IntCal20 eine mitunter starke Streuung zeigen (ihre Fig. 2), die möglicherweise durch Diagenese verursacht sein könnte.

---

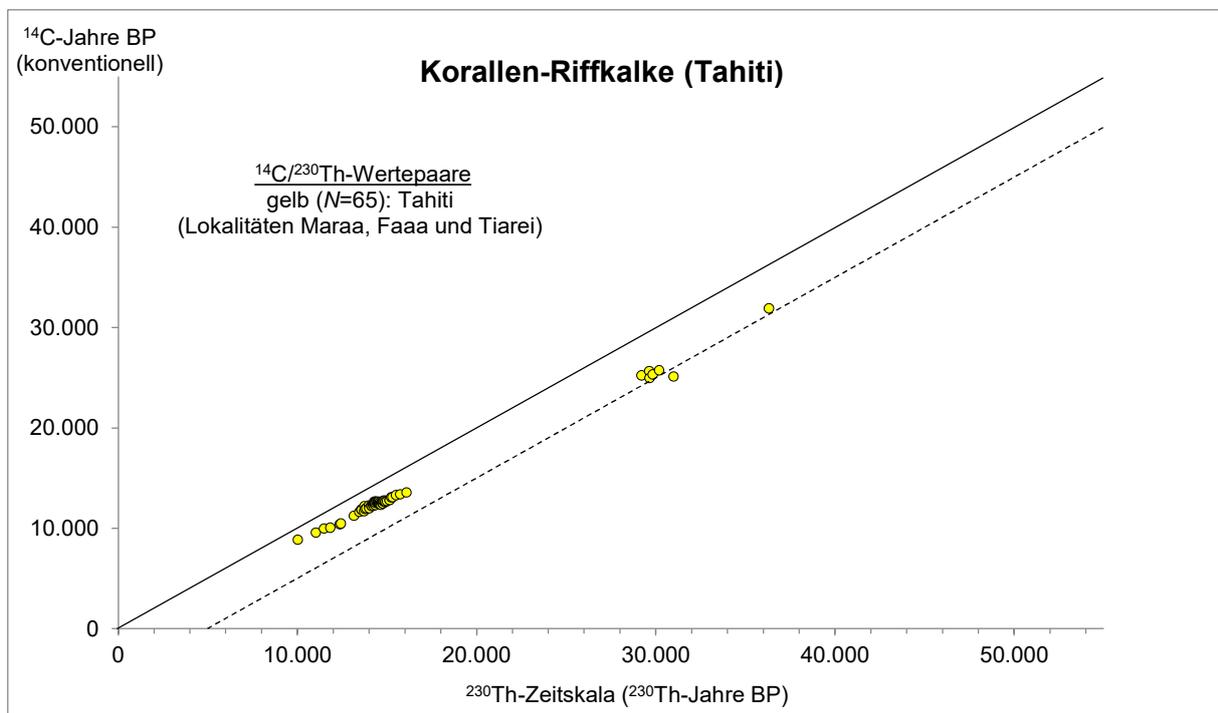
<sup>37</sup> „In addition, the accuracy and precision of our calibration data set can be tested by: (a) measuring samples that overlap the tree ring calibration (Fig. 2); (b) making paired  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  and  $^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$  ages on select samples (Pickett et al., 1994; Edwards et al., 1997; Cutler et al., 2004; Mortlock et al., 2005); and (c) through  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ,  $^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$  and  $^{14}\text{C}$  measurements of our interlaboratory calibration samples that are a subset of our calibration data“ (FAIRBANKS et al. 2005, 1783f).

<sup>38</sup> REIMER et al. (2004) geben keine Empfehlung ab zur Kalibration über den Skalenpunkt von 26.000 kalibrierten  $^{14}\text{C}$ -Jahren BP hinaus. Jede „Kalibration“ darüber hinaus sei nicht als eine Kalibration der „internationalen Community“ zu verstehen. Sie schreiben (S. 1031): „We do not make a recommendation for calibration beyond 26 cal kyr BP because disparities between  $^{14}\text{C}$  data sets are large and have not been resolved. (...) We actively discourage the use of subjectively assembled “calibration” curves from disparate data sets; these are not recognized as “calibration” by the international community and should not be published as such.“

<sup>39</sup> Co-Autor ist u. a. E. BARD.



**Abb. 13** Kernbohrungen in Korallen-Riffkalken vor der Küste Tahitis. Bathymetrische Karte mit den drei Bohrlokalitäten um Tahiti – Faaa, Tiarei und Maraa. Jede Lokalität kann mehrere Standorte (sites), jeder Standort (site) mehrere Bohrlöcher (holes) umfassen. Wiedergabe der Fig. 2 aus Expedition 310 Scientists (2007) in *Proceedings of the Integrated Ocean Drilling Program, Volume 310*.



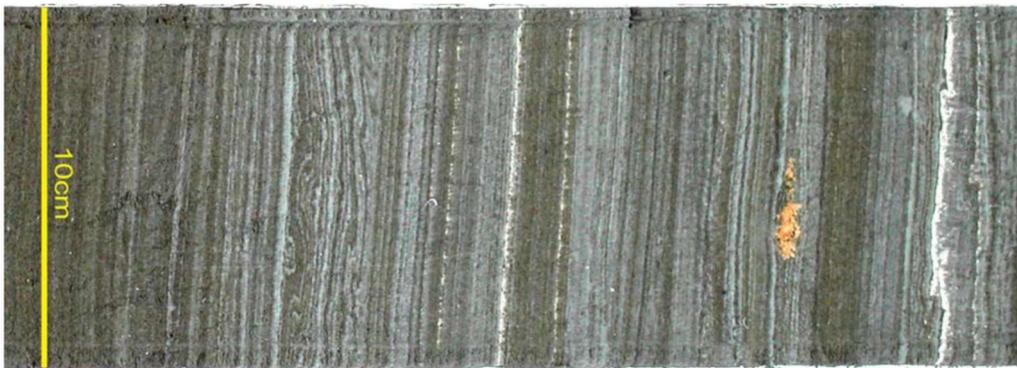
**Abb. 14** Korallenproben IV: Beziehung <sup>14</sup>C-Alter zu <sup>230</sup>Thorium-Alter. Punkt-/Kreisdarstellung, jeweils ohne Unsicherheiten. Orientierungslinien: schwarz, durchgezogen: 1:1-Beziehung; schwarz, gestrichelt: Versatz um 5.000 „Jahre“. Daten aus DURAND et al. (2013), ihre Table 1; weitere Informationen dort. Die konventionellen <sup>14</sup>C-Alter sind Reservoir-korrigiert (Abzug von 300 [<sup>14</sup>C-] Jahren). DURAND et al. (2013) bezeichnen ihre X-Achse (ihre Figs. 4 und 7) mit „Calendar age (ky B.P.)“, Kalender-Alter (1000 Jahre BP).

## 3.2 Foraminiferen

### 3.2.1 Cariaco-Becken (Karibisches Meer, offshore Venezuela)

#### 3.2.1.1 HUGHEN et al. (1998a, b)

HUGHEN et al. (1998b) liefern für den Skalenabschnitt von 14.500 bis 10.000 kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP erstmals Radiokarbon-Kalibrationsdatensätze von laminierten Sedimentfolgen des Cariaco-Beckens vor der Küste Venezuelas (Abb. 15 und Abb. 18). Die laminierten Sedimente werden als „warviert“ interpretiert. Demzufolge sollen die Ablagerungen im Jahresrhythmus entstanden sein, also Jahresschichten repräsentieren.



**Abb. 15** Laminierte Sedimente des Cariaco-Beckens.

Der Kernausschnitt stammt von Bohrlokalisierung MD03-2619 (ohne Angabe der Sedimenttiefe). Wassertiefe: 949 m. Koordinaten: 10°39.05 N, 064°54.80 W. Die Position ist 28,9 km OSO der Bohrlokalisierung ODP-1002D auf dem östlichen Teil des untermeerischen Sattels (vgl. Abb. 18, s. Abschnitt 3.2.1.4). Die MD132-Expedition mit *R/V Marion Dufresne* fand 2003 statt. Wiedergabe von Fig. 2 aus LAY (2004) in *MD132–P.I.C.A.S.S.O IMAGES XI, Crusie Report*.

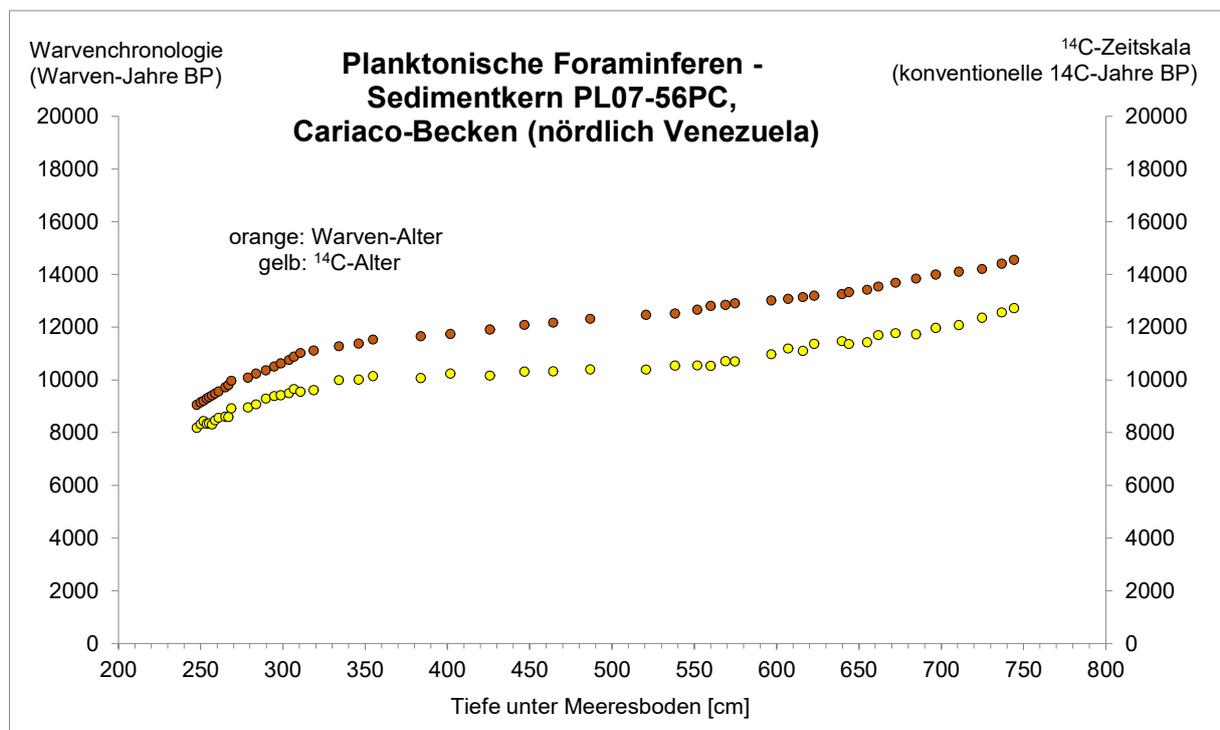
Die Grundlage der Untersuchung bilden 60 Proben planktonischer Foraminiferen der Art *Globigerina bulloides*, die aus 1,5–2,0 cm mächtigen Sedimentproben der Kerne PL07-39PC und PL07-56PC (Tiefe: 247–755 cm) stammen und an welchen Radiokarbon-Bestimmungen vorgenommen wurden. Die  $^{14}\text{C}$ -Alter des 56PC-Kerns (50 Proben) reichen von 12.720 bis 8.180 konventionelle  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP (ohne Unsicherheiten).<sup>40</sup> Die schwimmende, 5.500 Warven-Jahre lange Cariaco-Warvenchronologie ist – zur Bestimmung eines „absolut-datierten“ Ankerpunkts – über ein  $^{14}\text{C}$ -Daten- und -Wiggle-Matching zeitlich auf die deutsche Hohenheim-Kiefernchronologie (Stand: KROMER & BECKER 1993) synchronisiert. Demnach korrespondieren zur o. a. Spanne konventioneller  $^{14}\text{C}$ -Alter die Warven-Alter von 14.553 bis 9.051 Warven-Jahre BP (HUGHEN et al. 1998a; Abb. 16). Die so verankerten Warven-Alter werden mit Kalender-Altern gleichgesetzt (HUGHEN et al. 1998b, ihre Fig. 2).

## Diskussion

Die schwimmende Warvenchronologie konstruieren HUGHEN et al. (1998a) für das Sedimentintervall des PL07-56PC-Kerns, das die Spanne von 12.600 bis 8.000 konventionelle  $^{14}\text{C}$ -Jahre

<sup>40</sup> Reservoir-korrigiert (Abzug von 420 [ $^{14}\text{C}$ -] Jahren).

BP umfasst (Tiefe: 755–247 cm). Das laminierte Sediment bestünde aus alternierenden hellen (Plankton-reichen) und dunklen (Mineral-reichen) Laminen. Ein Hell/Dunkel-Laminenpaar (Couplet) soll die Sedimentablagerung eines Jahres repräsentieren; demzufolge wird der Begriff Warve verwendet. Den Laminen-Materialwechsel interpretieren HUGHEN et al. (1996b, 52) mit der heute zu beobachtenden jährlichen Nord-Süd-Migration der Innertropischen Konvergenzzone. Diese bedingt bei Südlage im Winter weniger Niederschläge und strenge Passatwinde, die zu Auftrieben des Tiefenwassers führen können, bei Nordlage im Sommer fehlen die Passatwinde und die Niederschläge sind hoch (Regensaison). Demnach seien die hellen, biogenen Laminen Ablagerungen der Wintersaison (erhöhte biologische Produktion) und die dunklen, terrigenen Laminen Ablagerungen der Sommersaison. HUGHEN et al. (1996a) liefern licht- und elektronenmikroskopische<sup>41</sup> Detailaufnahmen der laminierten Sedimente (ihre Figs. 7–14; Tiefen 435, 529, 607, 747 und 749 cm), die den klimatostratigraphischen Einheiten Bölling/Alleröd und Jüngere Dryas, also bereits dem Pleistozän, zugerechnet werden.



**Abb. 16** Sedimentkern PL07-56PC (Cariaco-Becken): Alters-zu-Tiefen-Beziehung.

Punkt-/Kreisdarstellung,  $N=50$ , jeweils ohne Unsicherheiten. Die <sup>14</sup>C-Alter sind im Verhältnis zu den Warven-Altern nominal kleiner. Mit zunehmender Tiefe erhöht sich die Differenz von ca. 800 „Jahren“ auf ca. 2.000 „Jahre“. Die Probenabstände variieren; durchschnittlich erfolgte die Beprobung etwa in 10-cm-Intervallen. Daten: Table der Supplementary Information zu HUGHEN et al. (1998a).

HUGHEN et al. (1996a) legen dar, dass das laminierte Sediment des Kastenkerens PL07-81BC<sup>42</sup> eine jahreszeitliche Prägung aufweist: In den obersten 25 cm des ansonsten laminierten Sediments sind zwei Turbidite eingeschaltet, bei Tiefe 8–15,5 cm und bei Tiefe 18–21 cm. Für die Turbidit-überlagernden, laminierten Sedimente sind an der jeweiligen Basis <sup>210</sup>Pb-Alter von 93

<sup>41</sup> BSEI, backscatter electron imagery.

<sup>42</sup> Die Endung „BC“ steht für box core, Kastenkern.

$\pm 5$   $^{210}\text{Pb}$ -Jahren (ca. 18 cm Tiefe) und  $58 \pm 4$   $^{210}\text{Pb}$ -Jahren (ca. 8 cm Tiefe) errechnet worden, bezogen auf das Entnahmejahr 1990.<sup>43</sup> Turbidite sind Ablagerungen von Suspensionsströmen, also Ereignislagen. Die Autoren vermuten, dass die Suspensionsströme von historisch bekannten Erdbeben ausgelöst wurden: Venezolanisches Erdbeben von 1900 sowie Cumana-Erdbeben von 1929. Demnach ergeben sich Alter von 90 bzw. 61 Jahren vor 1990. Diese passen zu den  $^{210}\text{Pb}$ -Altern. Darüber hinaus zählen die Autoren unter Einbeziehung aller Kastenkerne (zusätzlich -78BC und -84 BC) 59 Warven-Jahre für den Abschnitt von 0–8 cm Tiefe sowie 30 Warven-Jahre für den Abschnitt 15,5–18 cm Tiefe.<sup>44</sup> Auch dies passt – unter Einbeziehung der Unsicherheiten – zu den  $^{210}\text{Pb}$ -Altern. Dies bestätige, so HUGHEN et al. (1996a), dass die Laminaen-Couplets tatsächlich jährlich abgelagerte Warven sind.<sup>45,46</sup>

Zur Warven-Interpretation und zur Warvenchronologie werden angemerkt:

- HUGHEN et al. (1996a, b) legen keine Beschreibung der laminierten Sedimente der Kastenkerne vor (Tiefe 0–25 cm), und folglich keinen Vergleich der obersten laminierten Sedimente mit denen der Kolbenkerne aus größerer Tiefe (PL07-56PC: 247–755 cm). Insofern ist fraglich, ob das Sedimentationsmodell für den obersten Teil der Sedimentsäule auch auf tiefere Abschnitte übertragbar ist. Des Weiteren liegen die Bohrlokalitäten der Kastenkerne 25–35 km von den Bohrlokalitäten der Kolbenkerne entfernt.
- Das Sedimentationsmodell für den obersten Teil der Sedimentsäule ist nicht anhand einer mehrjährigen Sedimentfallen-Studie überprüft worden.<sup>47</sup>
- Die  $^{210}\text{Pb}$ -Alter der Sedimentproben des Kastenkerne PL07-81BC sind nicht validiert worden. Dies hätte beispielsweise durch die Identifikation des  $^{137}\text{Cs}$ -Peaks von 1963 geschehen können.<sup>48,49</sup> Darüber hinaus ist kein Nachweis darüber erbracht worden, dass die

<sup>43</sup> Das natürliche Radionuklid  $^{210}\text{Pb}$  wird u. a. durch Zerfall von atmosphärischem  $^{222}\text{Rn}$  erzeugt. Die Halbwertszeit von diesem sog. Überschuss- $^{210}\text{Pb}$  beträgt 22,2 Jahre. Insofern findet die  $^{210}\text{Pb}$ -Sedimentdatierung Anwendung für die letzten 100–200 Jahre (SWARZENSKI 2015).

<sup>44</sup> Im Original (HUGHEN et al. 1996a, 179): „(...) equalled 59 and 30 pairs (...)“. Die Einzelergebnisse der 3 Zählungen werden nicht mitgeteilt. Dies wäre aber eine wichtige Information zur Beurteilung der mutmaßlichen Warvierung.

<sup>45</sup> „This confirms that the laminae couplets are in fact annually deposited varves“ (HUGHEN et al. 1996a, 179; Text zu ihrer Fig. 15).

<sup>46</sup> HUGHEN et al. (1996b, 52): „Previous work with  $^{210}\text{Pb}$  and historical records has confirmed that the laminae couplets over the last century are annually deposited varves“, mit Verweis auf HUGHEN et al. (1996a).

<sup>47</sup> Solcherart Studien haben z. B. MARTINEZ et al. (2007) und ROMERO et al. (2009) vorgelegt, mit in der Wassersäule platzierten Sedimentfallen (Wassertiefen: 275, 455, 930 und 1255 m). Allerdings ist der Sammelzeitraum von zwei Jahren noch viel zu kurz. Ein vorläufiges Ergebnis von MARTINEZ et al. (2007) ist, dass der Fluss (Input) terrigenen Materials (gemessen in  $\text{g}/\text{m}^2/\text{d}$ ) keine klare saisonale Variation zeigt. Die terrigene Konzentration aber variiere in Abhängigkeit von dem Fluss (Input) biogenen Materials. Letzterer zeigt zwar gemäß ihrer Fig. 2 höhere Peaks in der „Trockensaison“, die Durchschnittswerte für fünf aufeinanderfolgende Saisons liegen allerdings dicht beieinander, in einer Spanne von 0,23 bis 0,28  $\text{g}/\text{m}^2/\text{d}$ .

<sup>48</sup> Zur Validierung der  $^{210}\text{Pb}$ -Daten – zumindest für die letzten Jahrzehnte – schlägt APPLEBY (1998, 12f) zusätzlich die Messung von Konzentrationen künstlicher Radionuklide in dem Sediment vor. Die  $^{137}\text{Cs}$ -Aktivität beispielsweise habe 1963 einen deutlichen Ausschlag, der von einem maximalen Fallout atmosphärischer Tests nuklearer Waffen herrühre. Ein zweiter  $^{137}\text{Cs}$ -Peak stamme von der Reaktorkatastrophe in Tschernobyl 1986. Eine Validierung älterer  $^{210}\text{Pb}$ -Daten – bezogen auf das späte 19. und frühe 20. Jahrhundert – bleibe aber ein großes Problem.

<sup>49</sup> SCHIMMELMANN et al. (2016) listen in ihrer Table 1 (Zusammenstellung mariner, laminiertes Sedimente des Quartärs) das Cariaco-Becken als eine Lokalität (Nr. 28), wo „Warven validiert worden sind“. Für das Cariaco-Becken führen sie eine durchgeführte  $^{137}\text{Cs}$ -Analyse an. Insgesamt verweisen sie – mit Bezug auf die in der

zwei eingeschalteten Turbidite tatsächlich durch die Erdbeben von 1900 und 1929 entstanden sind; es handelt sich um Zuweisungen. Folglich ist nicht nur das Sedimentationsmodell, sondern auch die jahreszeitliche Prägung der Sedimente (Warvierung) abschließend nicht nachgewiesen.

- Die schwimmende PL07-56PC-Warvenchronologie ist nicht vollumfänglich publiziert. Ihre Konstruktion kann nicht nachvollzogen bzw. reproduziert werden. Später wird z. B. mitgeteilt, dass etwa 35 % der Warven undeutlich ausgebildet seien (s. Abschnitt 3.2.1.3).

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass HUGHEN et al. (1996a, b; 1998a, b) eine jahreszeitliche Prägung der laminierten Sedimente für den Skalenabschnitt von 12.720 bis 8.180 konventionellen  $^{14}\text{C}$ -Jahren BP abschließend nicht nachgewiesen haben und die Konstruktion der Warvenchronologie nicht nachvollziehbar ist.

Der Datenbestand von HUGHEN et al. (1998b) wird schließlich verwendet, um die „Korallen-Information“ für den Skalenabschnitt 14.500 bis 11.700 kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP der Radiokarbon-Kalibrationskurve von 1998 (IntCal98) zu festigen.<sup>50,51</sup> Insofern werden die konstruierten Warven-Jahre von der Radiokarbon-Community als Kalender-Jahre akzeptiert (vgl. Abschnitt 3.1.1.3).

### 3.2.1.2 HUGHEN et al. (2000)

HUGHEN et al. (2000) präsentieren  $^{14}\text{C}$ -Daten für Proben des Cariaco-Kerns PL07-58PC. Im Vergleich zu den Kernen PL07-39PC und PL07-56PC (HUGHEN et al. 1998b) liegt nun eine dichtere Beprobung in 1,5-cm-Intervallen vor (zuvor 10-cm-Intervalle). Die Autoren verankern ihre aktualisierte, schwebende Cariaco-Warvenchronologie mittels  $^{14}\text{C}$ -Daten- und Wiggle-Matching auf die „absolut-datierte“, revidierte und erweiterte Hohenheim-Kiefernchronologie (Stand: KROMER & SPURK 1998). Die schwebende Hohenheim-Kiefernchronologie wiederum ist mittels  $^{14}\text{C}$ -Daten- und Wiggle-Matching auf die „absolute“, teilrevidierte Hohenheim-

---

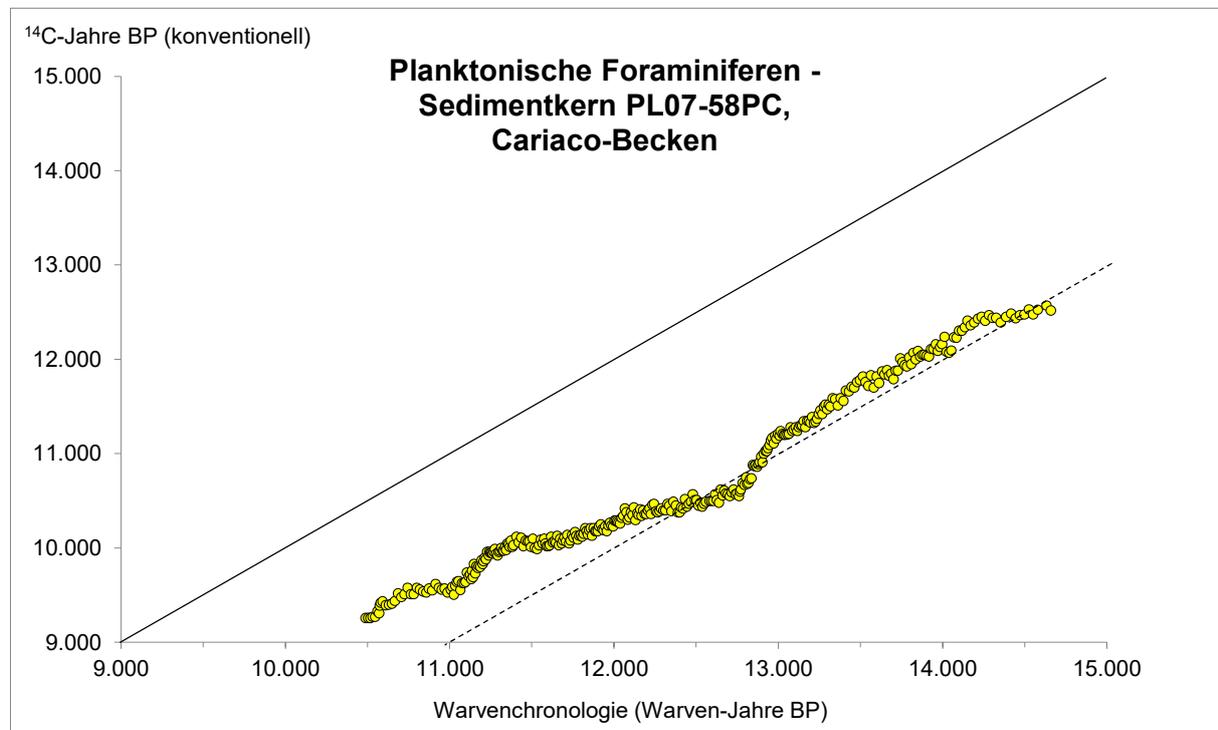
Tabelle gelisteten Informationen – auf HUGHEN et al. (1996a), MARTINEZ et al. (2007) und RIBOULLEAU et al. (2014). Der Verfasser konnte zu einer  $^{137}\text{Cs}$ -Analyse des Meeresbodens weder einen Beitrag in den aufgeführten Arbeiten noch darüber hinaus finden. Eine aktuelle Metastudie zur Sedimentkern-Datierung mittels Fallout von Radiocäsium liefern FOUCHER et al. (2021). Sie analysierten 537 Artikel, die von 1977 bis 2020 publiziert worden waren. Auch hier findet das Cariaco-Becken keine Erwähnung.

<sup>50</sup> „Terrestrial varve chronologies, to be discussed in a future issue of *RADIOCARBON*, have not been used for construction of INTCAL98. A floating marine varve chronology, however, was used to strengthen the coral information from the 14,500-11,700 cal BP interval. To fix absolute time, the younger varve  $^{14}\text{C}$  ages were matched with tree-ring  $^{14}\text{C}$  ages (normalized on marine  $^{14}\text{C}$  level)“ (STUIVER et al. 1998a, 1042).

<sup>51</sup> Die „absolute Zeitskala“ der Warvenchronologie von HUGHEN et al. (1998b) ist bei der Konstruktion der IntCal98 um 40 Jahre reduziert worden: „Marine sediments of the Cariaco Basin in the Atlantic Ocean (at the northern continental margin of Venezuela) yield a  $^{14}\text{C}$ -varve count sequence (Hughen et al. 1998) useful for INTCAL98 construction. The floating chronology is tied to the absolute time scale by matching marine  $^{14}\text{C}$  ages to the INTCAL98 tree-ring data (the tree-ring data are increased by 500 and 400  $^{14}\text{C}$  yr for, respectively, 12–10 and 10–8 ka cal BP). The best fit between the  $^{14}\text{C}$  ages of the adjusted tree-ring record and the Cariaco Basin is shown in Figure 4. The absolute time scale produced in this manner for the floating varves reduces the Hughen et al. (1998) varve count time scale by 40 yr. The latest tree-ring and R adjustments cause this minor difference“ (STUIVER et al. 1998a, 1050).

Eichenchronologie verankert worden; ein dendrochronologischer Link wird als vorläufig betrachtet (SPURK et al. 1998).

Zusammenfassend legen HUGHEN et al. (2000) eine höher-auflösende, Warven-kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Datenreihe für den Skalenbereich von ~14.800 bis 10.500 kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP vor (ihre Fig. 2; Abb. 17).<sup>52</sup>



**Abb. 17** Kern PL07-58PC: Beziehung  $^{14}\text{C}$ -Alter zu Warven-Alter.

Punkt-/Kreisdarstellung,  $N=349$  (inkl. Duplikate), jeweils ohne Unsicherheiten. Orientierungslinien: schwarz, durchgezogen: 1:1-Beziehung; schwarz, gestrichelt: Versatz um 2000 „Jahre“. Die konventionellen  $^{14}\text{C}$ -Alter sind Reservoir-korrigiert (Abzug von 420 [ $^{14}\text{C}$ ] Jahren). HUGHEN et al. (2000) bezeichnen ihre X-Achse (ihre Figs. 1–2) mit „Calendar age (yr BP)“, Kalender-Alter (Jahre BP). Daten: [https://www.ncsl.noaa.gov/pub/data/paleo/contributions\\_by\\_author/hughen2000/cariaco2000\\_pc58\\_14c.txt](https://www.ncsl.noaa.gov/pub/data/paleo/contributions_by_author/hughen2000/cariaco2000_pc58_14c.txt); Probennummern und Tiefenangaben fehlen.<sup>53</sup>

## Diskussion

Die methodische Vorgehensweise ist verglichen mit HUGHEN et al. (1998b) unverändert. Die Warvenchronologie ist leicht angepasst.<sup>54</sup> Für den Skalenbereich von ca. 11.800 bis ca. 10.500 kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP stimmen die Datensätze (konventionelle  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP zu kalibrierten  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP) der verankerten Cariaco-Warvenchronologie und der verankerten Hohenheim-Kiefernchronologie (PPC) – interpoliert zu einer 5-Jahres-Auflösung – optisch gut überein

<sup>52</sup> „The anchored Cariaco Basin varve chronology provides radiocarbon calibration at high resolution from ~14.8 to 10.5 cal kyr B.P. (Fig. 2) (...)“ (HUGHEN et al. 2000, 1952).

<sup>53</sup> Die Daten zum Artikel (HUGHEN et al. 2000, Endnote 40) werden unter *Science Online* (Web table 1; Link: [www.sciencemag.org/cgi/content/full/290/5498/1951/](http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/290/5498/1951/)) gegenwärtig nicht zur Verfügung gestellt.

<sup>54</sup> „For this work, the varve chronology is largely the same as that used for core 56PC (7). Varves have been re-counted during periods of particular importance, such as the overlap with tree rings and the onset of the Younger Dryas, as well as the deepest, oldest laminations that are less distinct“ (HUGHEN et al. 2000, 1951). – (7) = Endnote 7.

(HUGHEN et al. 2000, ihre Fig. 1).

Die Warvierung gilt als nachgewiesen und wird nicht mehr thematisiert. Die verankerte Cariaco-Warvenchronologie gilt als quasi-„absolut-zeitlich“, mit einer Verankerungs-Unsicherheit von „ $\pm 30$  Jahren“. So bezeichnen HUGHEN et al. (2000) ihre X-Achse (ihre Figs. 1–2) mit „Calendar age (yr BP)“, Kalender-Alter (Jahre BP).

### 3.2.1.3 HUGHEN et al. (2004a)

HUGHEN et al. (2004a) liefern mit dieser Arbeit ihre finalen „Cariaco-58PC“-Kalibrationsdatensätze für IntCal04 (ihre Table 1). Die schwebende Cariaco-58PC-Warvenchronologie (4.200 Warvenjahre) ist nunmehr mittels  $^{14}\text{C}$ -Daten- und Wiggle-Matching auf die „absolut-datierte“, erneut revidierte und erweiterte Hohenheim-Kiefernchronologie (FRIEDRICH et al. 2004) verankert worden (ihre Fig. 5).

Die Datensätze umfassen den Skalenbereich von 12.540 bis 9.260 konventionelle  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP<sup>55</sup> bzw. 14.673 bis 10.503 kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP (ohne Unsicherheiten). Die Beprobung des Kerns PL07-58PC erfolgte für den Tiefenbereich von 423,75 bis 945,25 cm in 1,5-cm-Intervallen (vgl. HUGHEN et al. 2000); insgesamt sind 388 Radiokarbon-Bestimmungen (inklusive Duplikate) durchgeführt worden (ihre Table 1).

Im Vergleich zur Cariaco-Warvenchronologie-2000 (HUGHEN et al. 2000) sei die aktuelle Chronologie um 14 „Jahre“ (Richtung älter) verschoben worden. Das Alter der Grenze Jüngere Dryas/Präboreal liege in der Cariaco-Chronologie nun bei 11.580 kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP (zuvor 11.565).

## Diskussion

Für die Cariaco-Warvenchronologie-2004 treffen die in Abschnitt 3.2.1.1 und 3.2.1.2 gemachten Feststellungen gleichermaßen zu. HUGHEN et al. (2004a, 1163; Beschriftung zu ihrer Fig. 2) liefern eine neue Information: Etwa 35 % der Warven sollen undeutlich ausgebildet sein. Dies ermöglicht einen weiten Interpretationsspielraum.

### 3.2.1.4 HUGHEN et al. (2004b)

HUGHEN et al. (2004b) präsentieren eine  $^{14}\text{C}$ -Aufzeichnung und -Kalibration für die „vergangenen 50.000 Jahre“. Zugrunde liegen Bohrkern des Ocean Drilling Program (ODP) der Lokalität 1002 im Cariaco-Becken (Abb. 18) unweit der Lokalität, von welcher die PL07-Kerne (HUGHEN 1996a, b) stammten.

Die  $^{14}\text{C}$ -Aufzeichnung bezieht sich auf die oberen 30 m der Sedimentkerne 1002D und 1002E und umfasst 280 Radiokarbon-Bestimmungen an planktonischen Foraminiferen.<sup>56</sup> Über eine

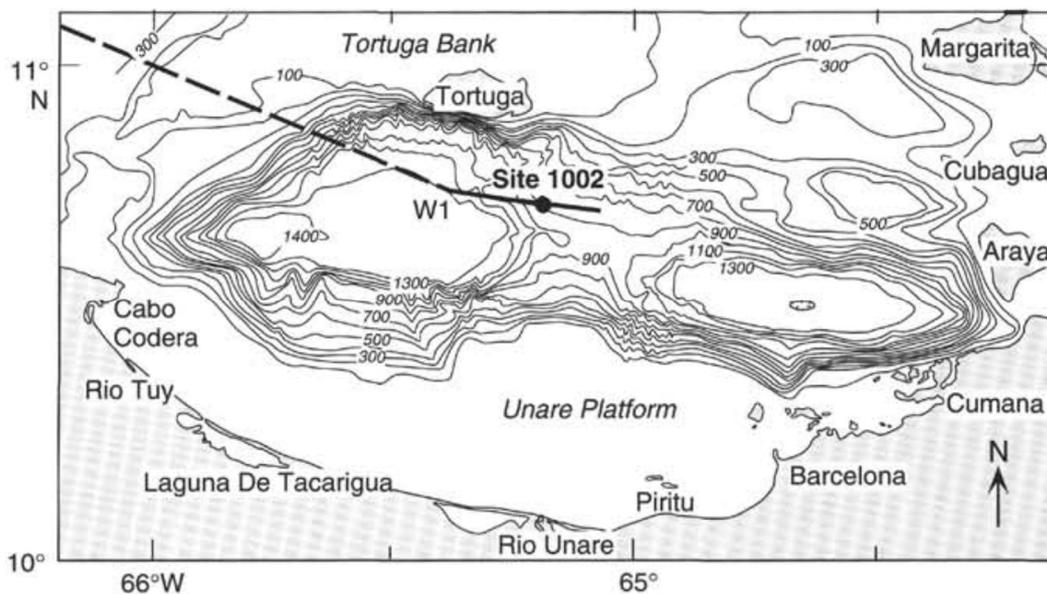
---

<sup>55</sup> Reservoir-korrigiert (Abzug von 420 [ $^{14}\text{C}$ ] Jahren).

<sup>56</sup> Die Kerne stammten aus einer Wassertiefe von 893 m. Kern 1002C hat eine Gesamtlänge von 170,1 m, Kern 1002D 166,8 m und Kern 1002E von 164,0 m. Die Kurzbeschreibung des Sediments lautet (SIGURDSSON et al.

Korrelation der 550-nm-Aufzeichnung der Sediment-Oberflächenreflexion (Kern 1002C) mit der  $\delta^{18}\text{O}$ -Aufzeichnung des GISP2-Eiskerns übertragen die Autoren das Eiskern-Altersmodell auf den Cariaco-Sedimentkern (ihre Fig. S2, Abb. 19).

Die  $^{14}\text{C}$ -Kalibration stimme zurück bis Skalenpunkt 24.000 kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP – und darüber hinaus punktweise bis Skalenpunkt 41.000 kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP – gut mit zahlreichen  $^{230}\text{Th}/^{14}\text{C}$ -Alterspaaren von Korallen überein. Sie sei des Weiteren auch in allgemeiner Übereinstimmung mit vorherigen Aufzeichnungen, die auf marinen Sedimenten basieren (mit Verweis auf VÖLKER et al. 2000 und VAN KREFELD et al. 2000). Zur  $^{14}\text{C}$ -Kalibration der Sedimente des Suigetsu-Sees (KITAKAWA & VAN DER PLICHT 2000, s. Abschnitt 3.3.1.1) sowie des Bahamas-Speläothems (BECK et al. 2001, s. Abschnitt 3.4.1.1) lägen teilweise größere Versätze vor.



**Abb. 18** Cariaco-Becken vor der Küste Venezuelas.

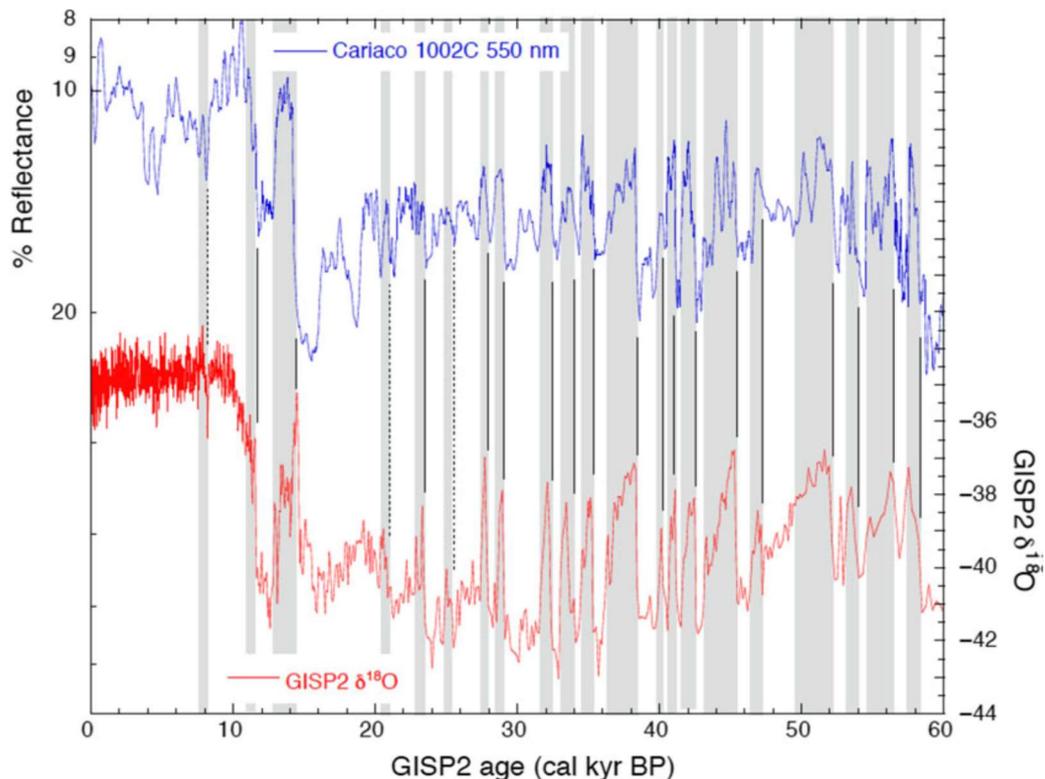
Bathymetrische Karte, die die Bohrlokation 1002 (ODP) auf dem zentralen untermeerischen Sattel zeigt. Die durchgezogene Linie ist die Vermessungslinie der *JOIDES Resolution* von 1996, die an Punkt W1 beginnt. Die Linie war bereits 1990 bei der PLUME-Expedition 7 (*R/V Thomas Washington*) abgefahren bzw. vermessen worden. Hiervon stammen die PL07-Kerne (siehe Textteil). Wiedergabe von Fig. 1 aus SIGURDSSON et al. (1997) in *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports*, Vol. 165.

## Diskussion

HUGHEN et al. (2004b) unternehmen den Versuch, eine „Kalender-Chronologie“ („calendar age chronology“) für die Cariaco-Sedimentkerne der Lokalität ODP-1002 auf Basis einer stratigraphischen Korrelation mit dem GISP2-Eiskern zu erstellen. Dass die Profile der sehr unterschiedlichen Proxy-Aufzeichnungen – Sediment-Oberflächenreflexion (550 nm) des 1002C-Kerns und  $\delta^{18}\text{O}$  des GISP2-Eiskerns – gemäß der Darstellung in Abb. 19 im Wesentlichen übereinstimmen, ist bemerkenswert. Allerdings liegt keine stratigraphische Kontrolle vor, wie sie im Nordatlantik möglich ist (z. B. durch die Identifizierung und Korrelation von vulkanischen Aschenlagen).

---

1997, 359f): „Siltiger Ton mit Nannofossilien und Foraminiferen, toniges Diatomeen-Nannofossil-Mischsediment, Ton, Nannofossil-reicher siltiger Ton.“



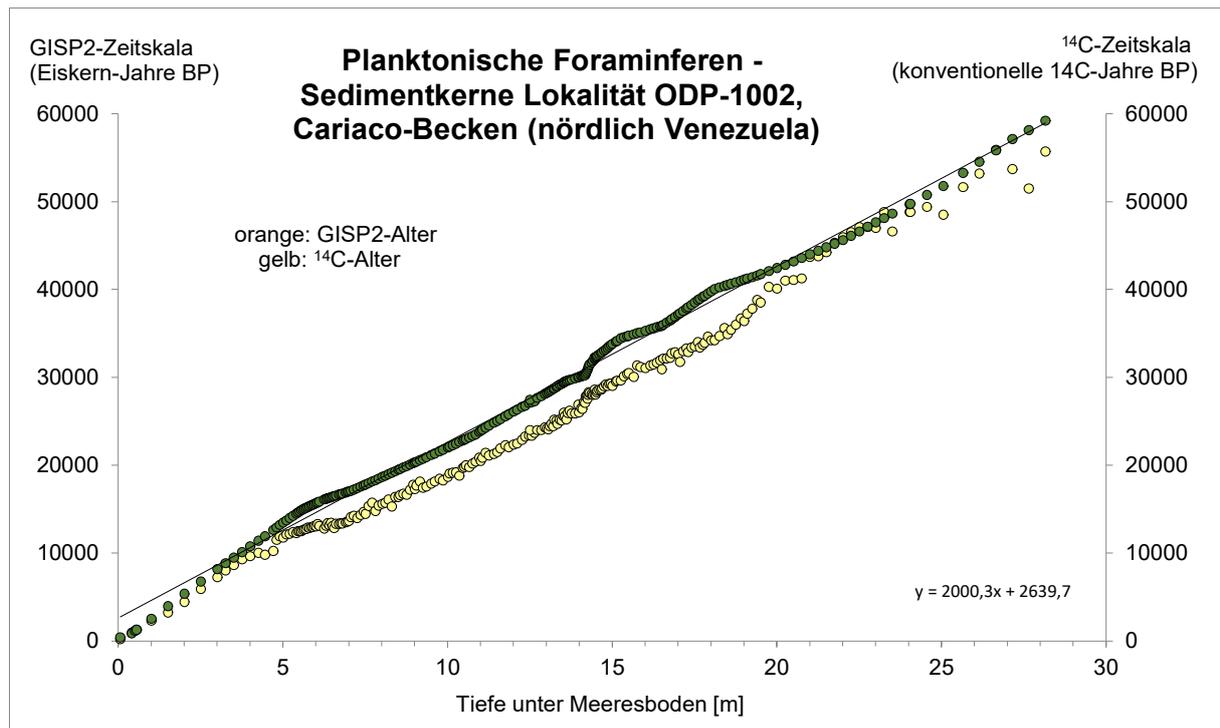
**Abb. 19** Korrelation I: GISP2-Eiskern und Cariaco-Sedimentkern.

Die Aufzeichnungen umfassen den Skalenbereich von 60.000 bis 0 [Eiskern-] Jahre BP (GISP2-Zeitskala, MEESE et al. 1997), die als Kalenderjahre („cal kyr BP“) aufgefasst und auch so ausgewiesen werden. Blaue Kurve (oben): 550-nm-Aufzeichnung der Sediment-Oberflächenreflexion (Kern 1002C, PETERSON et al. 2000b). Rote Kurve (unten):  $\delta^{18}\text{O}$ -Aufzeichnung (GISP2-Eiskern). Graue vertikale Linien: Korrelationslinien; Ankerpunkte sind der Beginn sog. Dansgaard-Oeschger-Ereignisse, mutmaßliche abrupte Erwärmungsereignisse (Anstieg der  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte). Die Sedimentkerne 1002C, 1002D und 1002E sind auf Grundlage zahlreicher Proxy-Daten zeitlich synchronisiert worden. Wiedergabe von Fig. 1 aus HUGHEN & HEATON (2020) in *Radiocarbon*; CC BY 4.0. Entspricht Fig. S2 in HUGHEN et al. (2004b).

HUGHEN et al. (2004b) legen dar, dass die durch Jahresschichtenzählung aufgebaute GISP2-Chronologie („annual-layer counted chronology“) genau („accurate“) ist. Als Hauptargument führen sie die „radiometrische Datierung korrelierender Aufzeichnungen“ an.<sup>57</sup> So sei nahelegend, dass (auch) die Kalibration genau sei.<sup>58</sup> Zu einigen Punkten ihres Hauptarguments wird auf die Diskussion zu WANG et al. (2001), Abschnitt 3.4.2.1, verwiesen.

<sup>57</sup> „Accuracy of the GISP2 layer-counting chronology is supported by radiometric dating of correlative records. Calcite  $\delta^{18}\text{O}$  from Hulu Cave in eastern China (20) and  $\delta^{13}\text{C}$  from Villars Cave in southwest France (21) show distinct millennial-scale events during the last glacial period that can be reliably correlated with the GISP2 record. U/Th dates for both caves agree within errors with GISP2 layer counts for the interval from 10 to 40 cal. ka B.P. (20, 21). In addition, records of cosmogenic nuclide flux in GISP2 and Greenland Ice Core Project (GRIP) ice cores show large peaks in  $^{10}\text{Be}$  and  $^{36}\text{Cl}$  (22) that occurred at  $\sim 41$  cal. ka B.P. and  $\sim 34$  cal. ka B.P., according to the GISP2 age model. These have been correlated with marine sedimentary evidence of geomagnetic field intensity minima identified as the Laschamp and Mono Lake excursions, respectively (23). Published K-Ar and Ar-Ar dates for the Laschamp excursion [(24) and references therein] vary widely about a mean of  $\sim 45$  cal. ka B.P. However, recent Ar-Ar dates on Laschamp-correlative tephras yielded ages of  $39.4 \pm 0.1$  (25) and  $41.1 \pm 2.1$  cal. ka B.P. (24), in closer agreement with the GISP2 age“ (HUGHEN et al. 2004b, 203). – In Klammern die jeweiligen Endnoten (hier Referenzen).

<sup>58</sup> „Independent radiometric dating of events correlated to GISP2 suggests that the calibration is accurate“ (HUGHEN et al. 2004b, 202).



**Abb. 20** Alters-zu-Tiefen-Beziehung, Sedimentkerne ODP-1002.

Punkt-/Kreisdarstellung,  $N=230$ , jeweils ohne Unsicherheiten. Die <sup>14</sup>C-Alter sind mittels der Korrelation „paläoklimatischer“ Aufzeichnungen (s. Abb. 19) zum Altersmodell des GISP2-Eiskerns (MEESE et al. 1997) in Beziehung gesetzt. Demnach beträgt die durchschnittliche Sedimentationsrate 0,5 mm/Eiskern-Jahr (schwarze Linie; lineare Trendlinie nach Excel mit Formel unten rechts). Daten: Table S1 aus HUGHEN et al. (2004b).

Schließlich ändern HUGHEN et al. kurzerhand ihre Strategie zur Erstellung einer „Kalender-Chronologie“. In HUGHEN et al. (2006) wird hierzu die <sup>230</sup>Thorium-basierte Hulu-Stalagmiten-Zeitskala verwendet (s. Abschnitt 3.2.1.5). Als Begründung für den Wechsel von der GISP2-Zeitskala zur Hulu-Stalagmiten-Zeitskala werden genannt (S. 3216): a) drastische Zunahme der GISP2-Altersunsicherheiten für den Skalenabschnitt > 40.000 [Eiskern-] Jahre BP (mit Bezug auf SOUTHERN 2004); b) ungeklärte, signifikante Differenzen zwischen der GISP2-Eiskernchronologie (MEESE et al. 1997) und der GRIP(sea)-Eiskernchronologie (nach JOHNSEN et al. 2001). Die Autoren wenden sich also unmittelbar einer Chronologie zu, die auf „absoluten“ radiometrischen Altern basiert.<sup>59</sup>

### 3.2.1.5 HUGHEN et al. (2006)

HUGHEN et al. (2006) liefern für die Cariaco-Sedimentkerne der Bohrlokalisierung ODP-1002 (vgl. HUGHEN et al. 2004b) eine um 187 Radiokarbon-Bestimmungen erweiterte Datenbasis und übertragen die <sup>230</sup>Th-Chronologie der Hulu-Speläotheme (WANG et al. 2001) auf die aktualisierte <sup>14</sup>C-Cariaco-Chronologie. Die Übertragung erfolgt durch Korrelation definierter stadialer und interstadialer Übergänge der  $\delta^{18}O$ -Aufzeichnung (Hulu-Höhle) mit den Aufzeichnungen

<sup>59</sup> „These discrepancies have led us to seek an alternative calendar age model based on absolute radiometric ages“ (HUGHEN et al. 2006, 3216).

der 550-nm-Oberflächenreflexion sowie der Grauskalierung (Kern 1002D); insgesamt liegen 46 Ankerpunkte vor (ihre Fig. 1; Prinzip s. Abb. 22).

Im Ergebnis stimmen die Muster der Alters-zu-Tiefen-Beziehungen des Cariaco-Sedimentkerns 1002D bezogen auf die Kalibrierung mit Hulu-<sup>230</sup>Th-Altern (Abb. 21) und GISP2-Jahresschichten-Altern (Abb. 20) bis zu einer Tiefe von ca. 21 m (40.000 <sup>14</sup>C-Jahre BP) weitgehend überein. Für den Abschnitt > 21 m sind bei der Hulu-<sup>230</sup>Th-Kalibration die <sup>14</sup>C-Alter nominal kleiner, während sie bei der GISP2-Jahresschichten-Kalibration nominal gleich groß oder nahezu gleich groß sind.

Die Autoren resümieren, dass sie mit dieser Vorgehensweise einen „verbesserten marin-basierten Kalibrations-Datenbestand für die letzten 50.000 Jahre“ bereitgestellt haben.<sup>60</sup>

## Diskussion

HUGHEN et al. (2006) orientieren sich wohl an SHACKELTON et al. (2004, 1519), die zur Verbesserung der MIS-3-Zeitskala (ca. 57.000 bis 29.000 [„Kalender“-] Jahre BP) u. a. vorschlagen, eine Anknüpfung an die „hoch-auflösenden und präzise datierten Speläothem-Aufzeichnungen“ zu verfolgen. Diese autoritative „Validierung“ zeigt, dass die <sup>230</sup>Th-Datierung für die Hulu-Stalagmiten und folglich ihre <sup>230</sup>Th-Zeitskala (= Kalender-Zeitskala) bereits anerkannt war.

Die Grundlage der „Anknüpfung“ (s. o.) der Hulu-Speläotheme an die Cariaco-ODP-Sedimentkerne ist ihre stratigraphische Korrelation. Die weitgehende Übereinstimmung markanter Punkte der Profile der Zeit-kalibrierten Proxy-Aufzeichnungen gemäß Abb. 22 ist bemerkenswert, zumal es sich um unterschiedliche Aufzeichnungen ( $\delta^{18}\text{O}$  vs. Sediment-Oberflächenreflexion) handelt und die Lokalitäten über 15.000 km voneinander entfernt liegen. Allerdings fehlen bei der Hulu-Aufzeichnung mangels Überlieferung die Werte des Skalenbereichs von 10.000 bis 0 kalibrierte <sup>14</sup>C-Jahre BP (vgl. Abschnitt 3.4.2.1). Des Weiteren ist – im Vergleich zu Eis- und Sedimentkernen – eine „harte“ stratigraphische Kontrolle nicht möglich. Eis- und Sedimentkerne können mitunter z. B. durch die Identifizierung von vulkanischen Aschenlagen punktuell korreliert werden.

HUGHEN et al. (2006) führen zur Absicherung ihrer Ergebnisse an: „Die Konvergenz unabhängiger Kalibrierungsdaten aus dem marinen Cariaco-Becken/Hulu-Höhle, von fossilen Korallen (BARD et al. 2004; CUTLER et al. 2004; FAIRBANKS et al. 2005) und von terrestrischen Speläothemen (mindestens zurück bis 33 ka; BECK et al. 2001) unterstützt die Genauigkeit der Aufzeichnungen und deutet darauf hin, dass eine zuverlässige Kalibrierung bis an die Grenzen der Radiokarbondatierung möglich ist.“<sup>61</sup> In allen Fällen (siehe Abschnitte dieser Arbeit) handelt es sich um U-Th-Alter; das „unabhängig“ bezieht sich wohl auf unterschiedliche Gesteinskörper, Entstehungsprozesse und Lokalitäten. Insgesamt scheint sich ein Trend dahingehend abzuzeichnen, dass <sup>230</sup>Th-Alter bzw. <sup>230</sup>Th-Chronologien jenseits der Dendro-Kalibration die

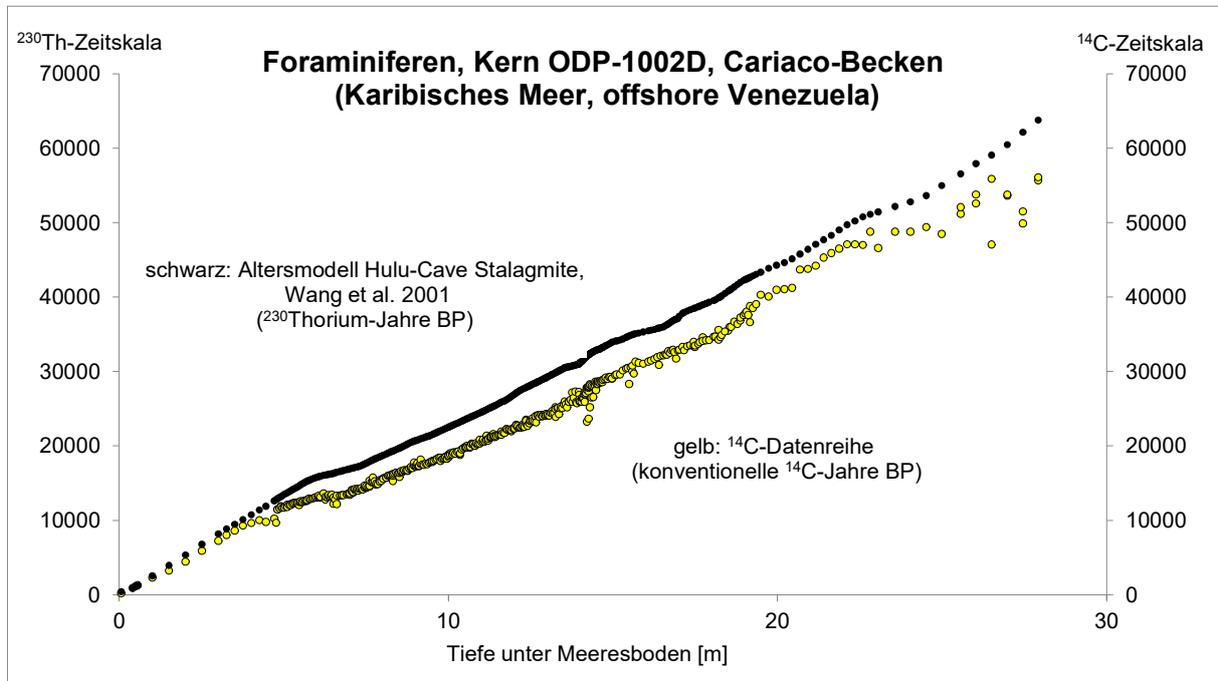
---

<sup>60</sup> „The new Cariaco Basin <sup>14</sup>C record linked to Hulu Cave radiometric ages provides an improved marine-based calibration data set for the past 50,000 years“ (HUGHEN et al. 2006, 3226).

<sup>61</sup> „The convergence of independent calibration data from marine Cariaco Basin-Hulu Cave, fossil corals (Bard et al., 2004; Cutler et al., 2004; Fairbanks et al., 2005) and terrestrial speleothems (at least back to 33 ka; Beck et al., 2001) supports the accuracy of the records and suggests that reliable calibration is possible back to the limits of radiocarbon dating“ (HUGHEN et al. 2006).

führend Rolle zur Radiokarbon-Kalibration einnehmen.

Die Datensätze von HUGHEN et al. (2006) werden schließlich verwendet, um die Radiokarbon-Kalibrationskurve über den Skalenpunkt von 26.000 kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP hinaus (IntCal04) bis Skalenpunkt 50.000 kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP (IntCal09) zu erweitern.



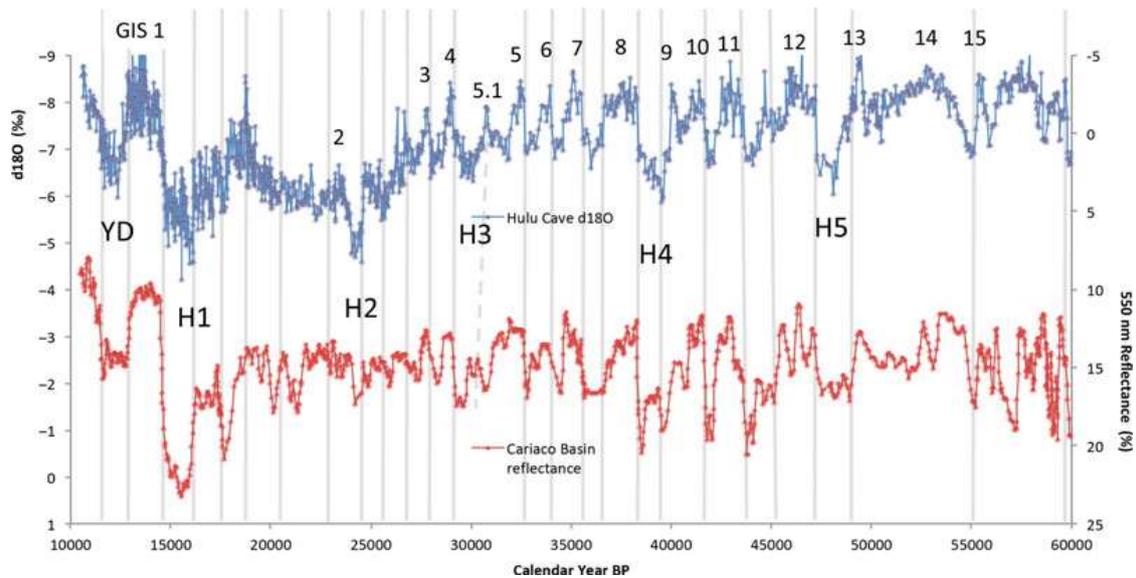
**Abb. 21** Alters-zu-Tiefen-Beziehung, Sedimentkern ODP-1002D.

Punkt-/Kreisdarstellung,  $N=467$  (inklusive Duplikate), jeweils ohne Unsicherheiten. Die  $^{14}\text{C}$ -Alter sind mittels der Korrelation „paläoklimatischer“ Aufzeichnungen (s. Abb. 22) zum Altersmodell der Stalagmite der Hulu-Höhle (WANG et al. 2001) in Beziehung gesetzt; mit Ausnahme der Werte  $< 11.380$   $^{230}\text{Th}$ -Jahre. Daten: Supplementary data zu HUGHEN et al. (2006).

### 3.2.1.6 HUGHEN & HEATON (2020)

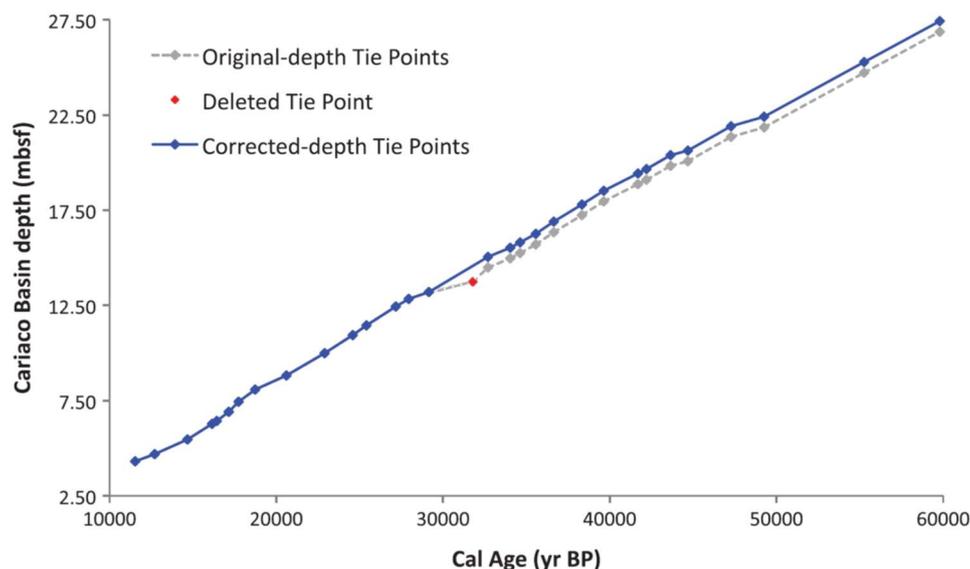
HUGHEN & HEATON (2020) präsentieren für den Skalenabschnitt von 60.000 bis 0 kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP neue Updates zur Kalender-Chronologie und zur  $^{14}\text{C}$ -Chronologie des Sedimentkerns 1002D des Cariaco-Beckens. Die aktualisierten Cariaco-Datensätze fließen in die Konstruktion der Radiokarbon-Kalibrationskurve-2020 (IntCal20) ein.

Zur Erstellung der Kalender-Chronologie ist – wie zuvor (HUGHEN et al. 2006; Abschnitt 3.2.1.5) – das  $^{230}\text{Th}$ -Altersmodell der Hulu-Speläotheme auf die Sedimentfolge übertragen worden, nun aber mit aktuelleren Werten von CHENG et al. (2016, 2018). Zu diesem Zweck haben die Autoren abrupte Wechsel der  $\delta^{18}\text{O}$ -Aufzeichnung (Hulu-Höhle) mit abrupten Wechseln der 550-nm-Aufzeichnung der Sediment-Oberflächenreflexion (Kern 1002D) korreliert (Abb. 22). Insgesamt werden 30 Verankerungspunkte verwendet (Abb. 23). Darüber hinaus sind – im Vergleich zu früheren Arbeiten – einzelne Korrekturen vorgenommen worden (für z. B. fehlendes Kernmaterial).



**Abb. 22** Korrelation II: Hulu-Stalagmiten und Cariaco-Sedimentkern.

Die Aufzeichnungen umfassen den Skalenbereich von 60.000 bis etwa 10.000 [ $^{230}\text{Th}$ ] Jahre BP (Zeitskala Hulu-Speläotheme); hier als Kalenderjahre („Calendar Year BP“) ausgewiesen. Oben:  $\delta^{18}\text{O}$ -Aufzeichnung (Hulu-Höhle) mit Interpretation der Grönland-Interstadiale GIS 1 bis GIS 15 (wohl hauptsächlich gemäß WANG et al. 2001, ihre Fig. 1; dort Vergleich mit  $\delta^{18}\text{O}$ -Aufzeichnung des GISP2-Eiskerns). Niedrigere  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte (in der Grafik oben) sollen feuchtere und höhere  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte (in der Grafik unten) trockenere klimatische Konditionen anzeigen. Unten: 550-nm-Aufzeichnung der Sediment-Oberflächenreflexion (Kern 1002D). Niedrigere Reflexionswerte (in der Grafik oben) sollen Perioden größerer Windigkeit und höhere Reflektionswerte (in der Grafik unten) Perioden größeren Regenfalls anzeigen. Die grauen vertikalen Linien sind Korrelationslinien (26 von insgesamt 30); hier ist das jeweilige  $^{230}\text{Th}$ -Alter auf die Cariaco-Reflexionskurve übertragen worden (zeitliche Verankerungspunkte). YD, Jüngere Dryas; H1 bis H5, sog. Heinrich-Ereignisse. Wiedergabe von Fig. 2 aus HUGHEN & HEATON (2020) in *Radiocarbon*; CC BY 4.0.

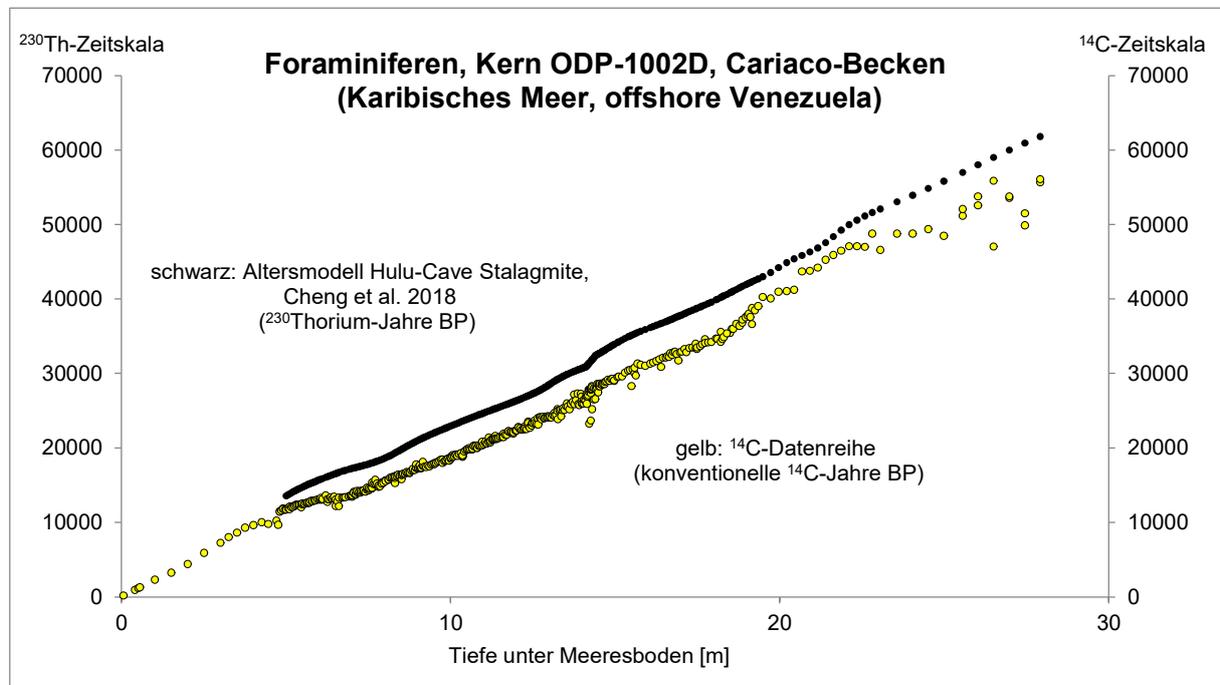


**Abb. 23** Verankerungspunkte.

Alters-zu-Tiefen-Modelle Cariaco–Hulu. Blaue Linie, blaue Rauten: neues Modell, mit korrigierten Tiefen-Verankerungspunkten (Rauten). Rot: gelöschter Tiefen-Verankerungspunkt. Grau: ursprüngliches Alters-zu-Tiefen-Modell und Tiefen-Verankerungspunkte. Wiedergabe von Fig. 4 aus HUGHEN & HEATON (2020) in *Radiocarbon*; CC BY 4.0.

## Diskussion

Die Cariaco-Chronologien-2020 unterscheiden sich nicht wesentlich von den Cariaco-Chronologien-2006. Dies zeigt der Vergleich der Wertepaar-Reihen der Alters-zu-Tiefen-Beziehungen – Hulu-getunte „Kalender“-Alter (=  $^{230}\text{Th}$ -Alter) versus  $^{14}\text{C}$ -Alter – von Abb. 24 mit Abb. 21 sowie der Vergleich der „Verankerungspunkte“ in Abb. 23.



**Abb. 24** Cariaco-Sedimentkern 1002D: Alters-zu-Tiefen-Beziehung.

Punkt-/Kreisdarstellung,  $N=467$  (inklusive Duplikate), jeweils ohne Unsicherheiten. Die  $^{14}\text{C}$ -Alter sind mittels der Korrelation „paläoklimatischer“ Aufzeichnungen (s. Abb. 22) zum Altersmodell der Stalagmiten der Hulu-Höhle (CHENG et al. 2016, 2018) in Beziehung gesetzt. Daten: Table 1 aus HUGHEN & HEATON (2020).

HUGHEN & HEATON (2020) verwenden mehrmals die Begriffe „tuning“<sup>62</sup> oder „tuned“<sup>63</sup>. Der Begriff Tuning (Einphasung, Einpassung, Einzeitung) wird von MULLER & MACDONALD (2000, 143) wie folgt erklärt: „Tuning ist der Prozess der Verfeinerung einer Zeitskala unter Ausnutzung bekannter Periodizitäten von Proxy-Signalen.“ Hier wird die Cariaco- $^{14}\text{C}$ -Chronologie (Zeitskala) nicht verfeinert, sondern kalibriert. Insofern könnte in einem weiteren Sinne der Begriff „Einzeitung“ passen. Wie auch immer, das System des „Kalibrations-Tunings“ ist voll etabliert. Auch hier gilt: 1  $^{230}\text{Th}$ -Jahr = 1 Kalender-Jahr = 1 kalibriertes  $^{14}\text{C}$ -Jahr.

<sup>62</sup> „Here, we present the results of tuning Cariaco Basin sediment reflectance data to revised, high resolution Hulu Cave  $\delta^{18}\text{O}$  records (Cheng et al. 2016) with updated U/Th chronologies (Cheng et al. 2018)“ (HUGHEN & HEATON 2020, 2).

<sup>63</sup> „In Hughen et al. (2006), the Cariaco record, including transitions both into and out of millennial events, was tuned to analogous hydrological changes in U/Th-dated  $\delta^{18}\text{O}$  speleothem records from Hulu Cave (Wang et al. 2001)“ (HUGHEN & HEATON 2020, 2).

## 3.2.2 Westiberischer Kontinentalrand (Atlantischer Ozean) und Makran-Kontinentalhang (Arabisches Meer)

### 3.2.2.1 BARD et al. (2004a)

BARD et al. (2004a) unternehmen den Versuch, ermittelte  $^{14}\text{C}$ -Alter von planktonischen Foraminiferen mit Altersmodellen grönländischer Eiskerne zu kalibrieren. Zugrunde liegen der Tiefsee-Bohrkern MD95-2042<sup>64</sup> (Profiltiefe 458–1582 cm), der 1995 vor der Iberischen Halbinsel gewonnen wurde, sowie der GRIP-Eiskern und der GISP2-Eiskern. Die Übertragung der Eiskern-Altersmodelle auf den Tiefsee-Bohrkern erfolgte anhand von stratigraphischen Matches ( $\delta^{18}\text{O}$ -Profile und weitere) und ausgewählten Ankerpunkten (ihre Fig. 2). Es handelt sich also prinzipiell um die gleiche Vorgehensweise wie bei HUGHEN et al. (2004b), s. Abschnitt 3.2.1.4.

Für den Skalenabschnitt > 20.000 kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP resümieren BARD et al. (2004a), dass die kalibrierten  $^{14}\text{C}$ -Alter der Foraminiferen-Proben der Polynomkurve folgen, die zuvor von BARD et al. (1998) anhand der paarweisen  $^{14}\text{C}$ - und  $^{230}\text{Th}$ -Alter an Korallen-Proben erstellt worden war (Abschnitt 3.1.1.4).<sup>65</sup> Des Weiteren würden die kalibrierten  $^{14}\text{C}$ -Foraminiferen-Alter – trotz teilweise deutlicher Abweichungen von abschnittsweise einigen Tausend  $^{14}\text{C}$ -Jahren – mehr mit den kalibrierten  $^{14}\text{C}$ -Altern des Bahamas-Speläothems (BECK et al. 2001, s. Abschnitt 3.4.1.1) übereinstimmen als mit den kalibrierten  $^{14}\text{C}$ -Altern der Warven des Suisetsu-Sees (KITAGAWA & VAN DER PLICHT 1998, s. Abschnitt 3.3.1.1).

## Diskussion

BARD et al. (2004a) betrachten die Zeitskalen grönländischer Eiskerne als kalendarische Zeitskalen („calendar time scale“). Nur unter dieser Maßgabe ist eine  $^{14}\text{C}$ -Kalibration möglich: „Solche [Kalibrations-; MK] Kurven erhält man durch den Vergleich der rohen  $^{14}\text{C}$ -Alter mit echten Kalenderaltern, die von unabhängigen Datierungsmethoden abgeleitet wurden.“<sup>66</sup> Mit anderen Worten (und im Rahmen der Unsicherheiten): 1 Eiskern-Jahr = 1 Kalender-Jahr oder 1 reales Jahr.

Allerdings räumen die Autoren in ihrer Arbeit weiter unten ein, dass unklar sei, ob die Eiskernchronologien „sehr genau“ seien; dies sei durch Replikation noch nicht nachgewiesen. Die GISP2-Chronologie basiere auf der Zählung von Jahresschichten bis 40.000 [Eiskern-] Jahre BP zurück, die GRIP-Chronologie dagegen basiere hauptsächlich auf einem Eisflussmodell. Schließlich bleibe ihre  $^{14}\text{C}$ -Kalibration versuchsweise und vorläufig.

Die später publizierte, zusammenfassende Grönland-Eiskernchronologie-2005 (VINTHER et al. 2006, SVENSSON et al. 2008) kann lediglich bis 775 n. Chr. verifiziert werden (KOTULLA 2022). Insofern kann die Eiskernchronologie gesamthaft nicht einfach als Kalender-Chronologie

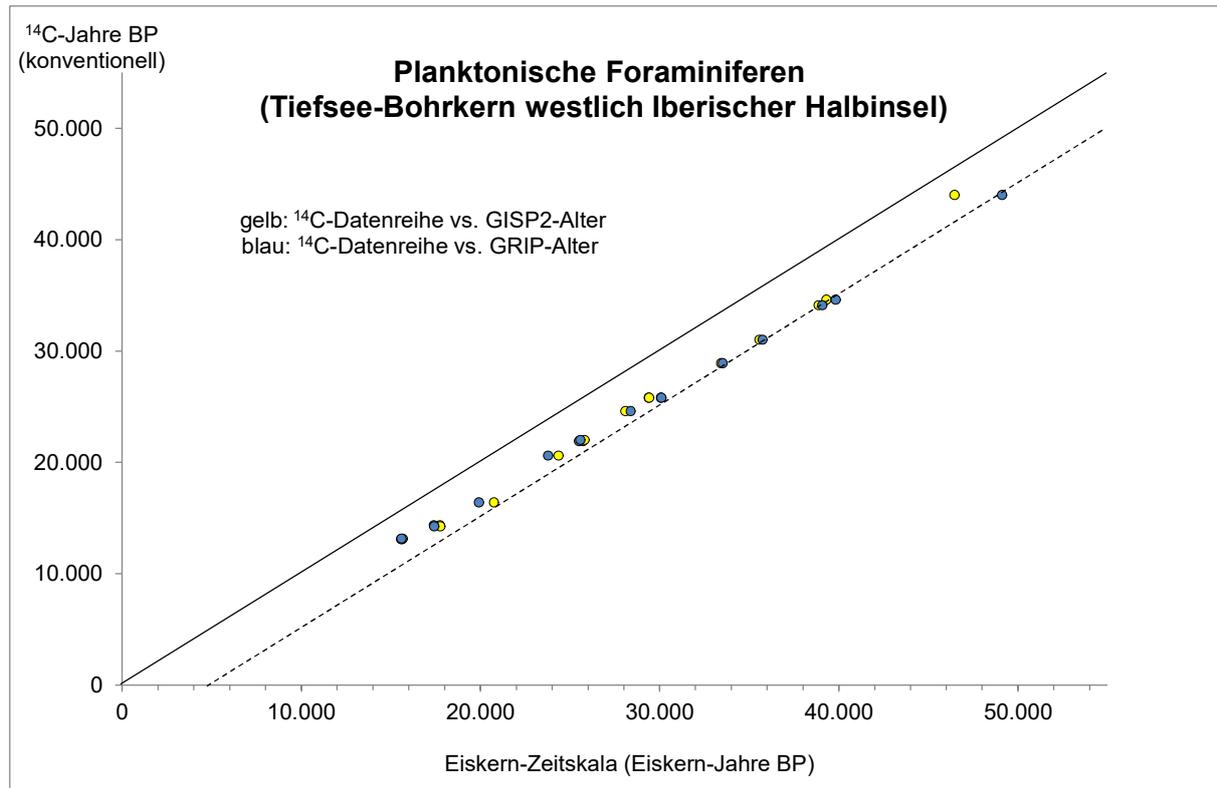
---

<sup>64</sup> Tiefe des Meeresbodens: 3146 m.

<sup>65</sup> BARD et al. (2004b) publizieren mit Bezug auf BARD et al. (2004a)  $^{14}\text{C}$ -Bestimmungen weiterer Foraminiferen-Proben sowie aktualisierte konventionelle  $^{14}\text{C}$ - und GRIP-Alter. Auf ihre Gesamtergebnisse hat dies keinen Einfluss. Hinsichtlich des GRIP-Eiskerns kommt nun die Zeitskala in der Version von JOHNSON et al. (2001) zum Tragen.

<sup>66</sup> „Such curves are obtained by comparing the raw  $^{14}\text{C}$  ages with true calendar ages derived from independent dating methods“ (BARD et al. 2004a, 204).

aufgefasst werden.



**Abb. 25** Foraminiferen: Beziehung  $^{14}\text{C}$ -Alter zu Eiskern-Alter.

Punkt-/Kreisdarstellung,  $N=16$ , jeweils ohne Unsicherheiten. Die Verteilung der Wertepaare ( $^{14}\text{C}$ -Alter gegenüber den Eiskern-Altern im Verlauf bis zu etwa 5000 „Jahre“ geringer) entspricht dem Muster der Abb. 10 (BARD et al. 1998; Abschnitt 3.1.1.4). Orientierungslinien: schwarz, durchgezogen: 1:1-Beziehung; schwarz, gestrichelt: Versatz um 5.000 „Jahre“. Daten aus BARD et al. (2004a), ihre Table 1; weitere Informationen dort. Die konventionellen  $^{14}\text{C}$ -Alter sind Reservoir-korrigiert (Abzug von 400 [ $^{14}\text{C}$ -] Jahren). BARD et al. (2004a) bezeichnen ihre X-Achse (ihre Fig. 2) mit „Calendar age (cal yr B.P.)“, Kalender-Alter (kalibrierte Jahre BP). Hinsichtlich der Eiskern-daten verweisen die Autoren auf CROSS (1997).

### 3.2.2.2 BARD et al. (2013)

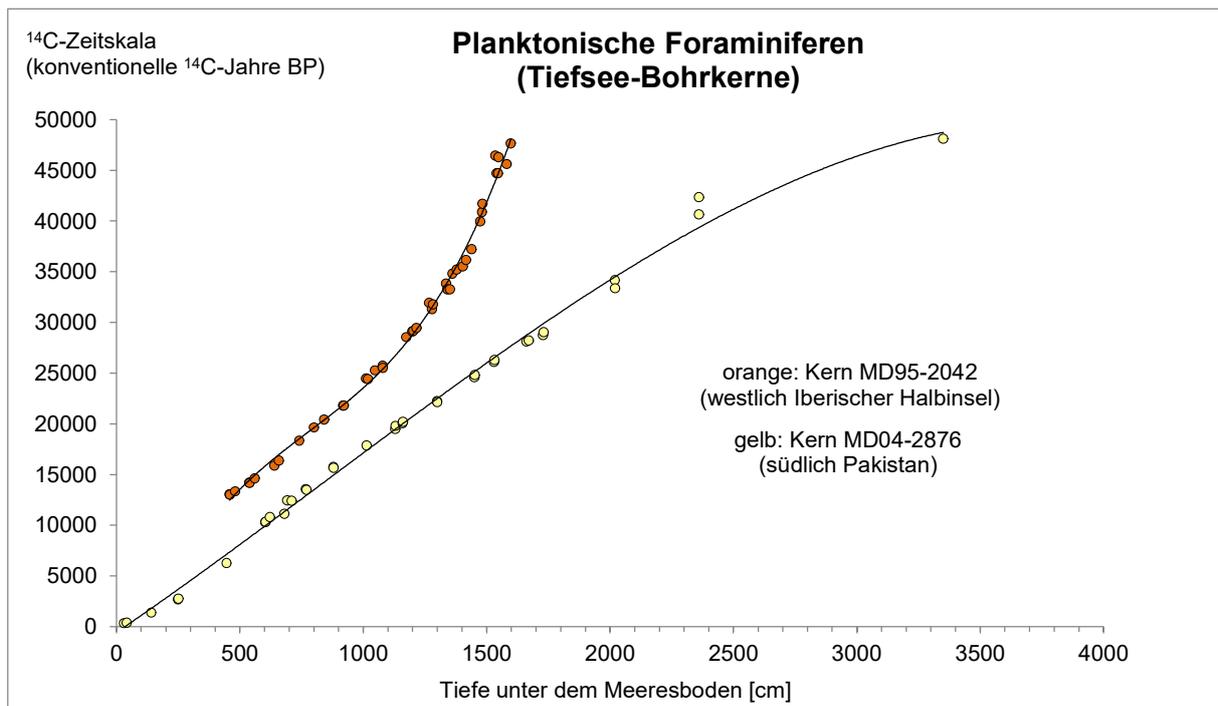
BARD et al. (2013) vermelden  $^{14}\text{C}$ -Alter von planktonischen Foraminiferen aus Bohrkern MD04-2876<sup>67</sup> vom Makran-Kontinentalhang (Arabisches Meer, Wassertiefe 882 m) und Bohrkern MD95-2042 vom westiberischen Kontinentalrand (Abb. 26). Letztere erweitern die bestehende Datenbasis (BARD et al. 2004a; Abschnitt 3.2.2.1). Der Makran-Sedimentkern hat eine Länge von 25 m. Die Sedimentfolge besteht aus Tonen mit variierenden Gehalten an  $\text{CaCO}_3$  (5–40 Gew.-%), die abschnittsweise laminiert oder massig (bioturbat) vorliegen (PICHEVIN et al. 2007, 4).

Auf die Sedimentfolgen ist – im Gegensatz zu BARD et al. (2004a) – die Zeitskala der Hulu-Stalagmiten (China; Hulu2-Zeitskala nach EDWARDS et al. 2013) übertragen worden. Dieses geänderte Prozedere wird u. a. mit einer besseren Korrelation geochemischer

<sup>67</sup> MD 143/CHAMAK Cruise mit *RV Marion Dufresne*, 22.09. – 16.10.2004; französische ozeanographische Kampagne.

(paläoklimatischer) Datenreihen, der absolut-datierten Stalagmiten (s. Abschnitt 3.4.1) und nicht zuletzt mit einer Empfehlung von SHACKELTON et al. (2004) begründet. – Hier ist die Vorgehensweise analog HUGHEN et al. (2006), s. Abschnitt 3.2.1.5.

Im Ergebnis liegt – unter Einbindung einer zweiten Lokalität und mit Erweiterung der Datenbasis für den Skalenabschnitt > 20.000 kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP – im Wesentlichen das gleiche Beziehungs- bzw. Kalibrations-Muster wie zuvor vor (vgl. BARD et al. 2004a; Abb. 27 versus Abb. 25).



**Abb. 26** MD-Tiefseekerne: Beziehung  $^{14}\text{C}$ -Alter zu Tiefe.

Punkt-/Kreisdarstellung,  $N=42/N=36$ , jeweils ohne Unsicherheiten. Die konventionellen  $^{14}\text{C}$ -Alter sind Reservoirkorrigiert (Abzug von 560 [ $^{14}\text{C}$ -] Jahren für MD04-2876 und 640 [ $^{14}\text{C}$ -] Jahren für MD95-2042). Die Datenbasis des Kerns MD04-2876 enthält 12 Quasi-Dubletten. Schwarze Linie: Polynomkurve 3. Grades (Excel). Durchschnittliche Sedimentationsrate (cm/konventionelle  $^{14}\text{C}$ -Jahre): MD95-2014: ab Tiefe ca. 11 m abnehmend; MD04-2876: bis Tiefe ca. 25 m etwa gleichbleibend. MD, Forschungsschiff *Marion Dufresne*. Daten aus BARD et al. (2013), ihre Table 1, jeweils ohne Unsicherheiten; weitere Informationen dort.

## Diskussion

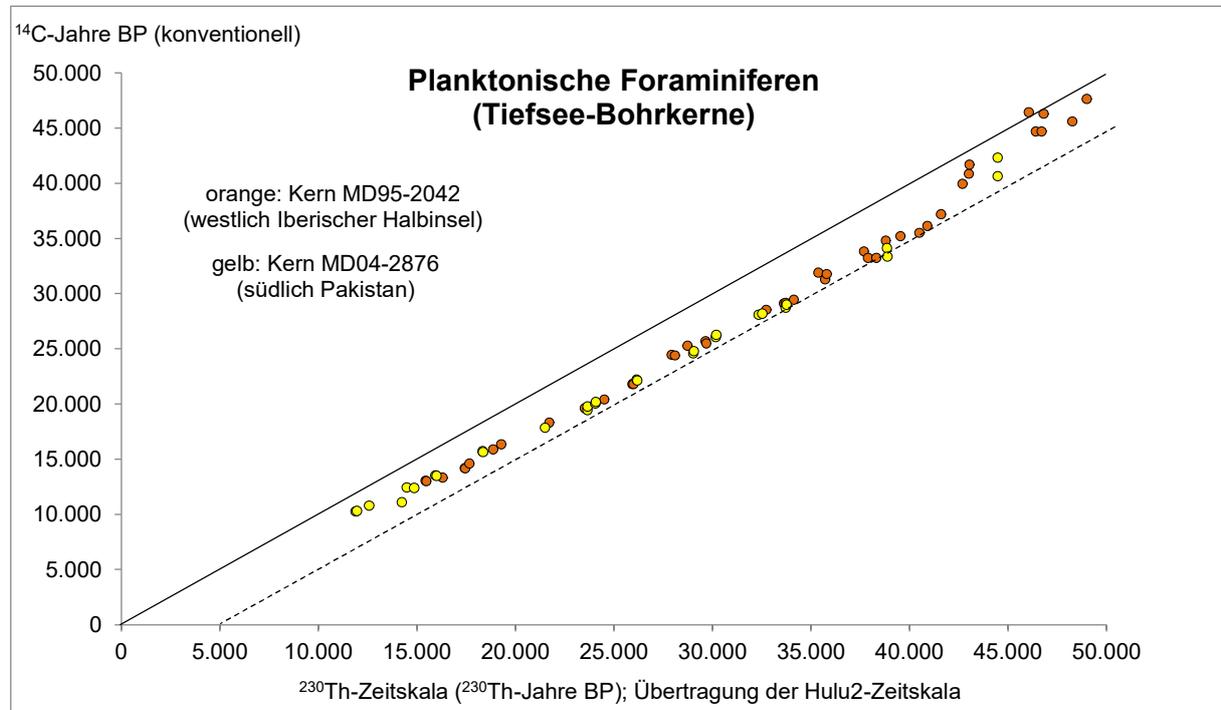
BARD et al. (2013) zufolge ist die für die zwei Sedimentfolgen konstruierte „kalendarische Zeitskala“ valide. Denn die Stalagmiten der Hulu-Höhle seien mit der U-Th-Methode genau datiert worden (mit Verweis auf WANG et al. 2001, SOUTHON et al. 2012 und EDWARDS et al. 2013 [eingereicht]<sup>68</sup>).<sup>69</sup> Zusätzlich seien die U-Th-Alter absolute Alter, unabhängig von den

<sup>68</sup> Der eingereichte Artikel ist wohl nicht publiziert worden. In späteren Artikeln zu Stalagmiten der Hulu-Höhle (z. B. CHENG et al. 2018) wird eine „Hulu2“-Zeitskala nicht erwähnt. BARD et al. (2013, 2014) schreiben, dass sie ihre „Hulu2“-getunten Datensätze bereits am 1. November 2010 für die kommende Kalibrationskurve Int-Cal13 geliefert hätten.

<sup>69</sup> „To build a calendar age scale for core MD04-2876, we matched its climate record to the oxygen isotopic ( $\delta^{18}\text{O}$ ) profile of Hulu Cave stalagmites that have been accurately dated by U-Th (Wang et al. 2001; Southon et al. 2012; Edwards et al., submitted)“ (BARD et al. 2013, 1999).

fortlaufenden Revisionen der Grönland-Eiskernchronologien.<sup>70</sup> So taugen die übertragenen  $^{230}\text{Th}$ -Alter und die anschließenden interpolierten [ $^{230}\text{Th}$ -] Alter zur Kalibration der konventionellen  $^{14}\text{C}$ -Alter.

Erneut werden  $^{230}\text{Th}$ -Jahre mit Kalender-Jahren bzw. realen Jahren gleichgesetzt. Eine Verifizierung erfolgt durch die Autoren nicht mehr.



**Abb. 27** MD-Tiefseekerne: Beziehung  $^{14}\text{C}$ -Alter zu  $^{230}\text{Th}$ -Alter.

Punkt-/Kreisdarstellung,  $N=42/N=36$ , jeweils ohne Unsicherheiten. Die  $^{14}\text{C}$ -Alter sind im Verhältnis zu den  $^{230}\text{Th}$ -Alter bis auf 2 Wertepaare nominal kleiner. Die Differenz erhöht sich von Skalenpunkt ca. 12.000  $^{230}\text{Th}$ -Jahre BP bis Skalenpunkt ca. 42.000  $^{230}\text{Th}$ -Jahre BP von ca. 1.000 auf ca. 4.000–5.000 „Jahre“. Orientierungslinien: schwarz, durchgezogen: 1:1-Beziehung; schwarz, gestrichelt: Versatz um 5.000 „Jahre“. Daten aus BARD et al. (2013), ihre Table 1; weitere Informationen dort.

### 3.3 Pflanzliche Überreste

#### 3.3.1 Suigetsu-See (Japan)

##### 3.3.1.1 KITAGAWA & VAN DER PLICHT (1998a, b)

KITAGAWA & VAN DER PLICHT (1998a) präsentieren erstmals eine atmosphärische Kalibrierung der Radiokarbon-Zeitskala, d. h. auf der Grundlage terrestrischer pflanzlicher und tierischer

<sup>70</sup> „Shackleton et al. (2004) proposed to use an alternative target curve for the tuning: the  $\delta^{18}\text{O}$  record of the Hulu Cave stalagmite, which has been accurately dated by U-Th (Wang et al. 2001). The advantage of using the Hulu record is that its chronology is precise and accurate, being equivalent to U-Th ages measured on corals also used for  $^{14}\text{C}$  calibration purposes since 1993 (Stuiver and Reimer 1993; Bard et al. 1993). In addition, U-Th ages are absolute ages, independent of the successive revisions of the Greenland ice-core chronologies“ (BARD et al. 2013, 2009).

Überreste (ihre Fig. 1A). Der Skalenbereich umfasst die komplette Reichweite der Datierungsmethode, < 45.000 kalibrierte <sup>14</sup>C-Jahre BP (Stand 1998).<sup>71</sup> Die Überreste stammen aus den Sedimenten des Suigetsu-Sees (Japan, Abb. 28), von einer Serie von Kernbohrungen bis 75 m Tiefe, die 1991 und 1993 gewonnen wurde (SG93). Insgesamt liegen über 250 <sup>14</sup>C-Alter vor.

Das Altersmodell der Seesedimente basiert auf einer schwebenden, 29.100 [Warven-] Jahre umfassenden Warvenchronologie (Tiefenabschnitt von 10,42 bis 30,45 m), die über ein <sup>14</sup>C-Wiggle-Matching mit der <sup>14</sup>C-Kalibrierungskurve der Hohenheim-Eichenchronologie sowie der Hohenheim-Kiefernchronologie synchronisiert bzw. zeitlich verankert wurde (ihre Fig. 1B).<sup>72</sup> Demnach reicht das „absolute Kalenderalter“ für den Tiefenabschnitt von 10,42 bis 30,45 m von 8.830 bis 37.930 kalibrierte [<sup>14</sup>C-] Jahre BP.<sup>73</sup> Die [Kalender-] Alter jenseits Skalenpunkt 37.930 kalibrierte [<sup>14</sup>C-] Jahre BP sind durch Extrapolation – unter der Annahme einer konstanten Sedimentationsrate – gewonnen worden. Der kumulierte Fehler bei der Zählung der Warven liege bei Skalenpunkt 40.000 kalibrierte [<sup>14</sup>C-] Jahre BP bei weniger als ~2.000 [Warven-] Jahre.

Die Resultate würden übereinstimmen mit europäischen und marinen warvierten Sedimenten (mit Bezug auf GOSLAR et al. 1995, BJÖRCK et al. 1996, HUGHEN et al. 1998a) sowie kombinierten U-Th- und <sup>14</sup>C-Datierungen von Korallen (BARD et al. 1990, 1993, 1996, sowie EDWARDS et al. 1993) bis zum letzten glazialen Maximum (LGM, hier etwa 20.000 kalibrierte <sup>14</sup>C-Jahre BP).

Die Einzeldaten der <sup>14</sup>C-Chronologie sowie der Warvenchronologie sind in KITAGAWA & VAN DER PLICHT (1998b, Appendix) veröffentlicht.

## Diskussion

KITAGAWA & VAN DER PLICHT (1998a, b) erbringen keinen Nachweis darüber, dass die laminierten Sedimente des Suigetsu-Sees jahreszeitlich geprägt sind, also Jahresschichten (Warven) vorliegen. Die Beschreibungen zu den „Warven“, insbesondere zu ihrer Abgrenzung und folglich zu ihrer Zählung sind unklar. Gegenüber KITAGAWA et al. (1995) sei die Warvenchronologie aufgrund von Falschzählungen der Anzahl von Warven aktualisiert worden.<sup>74</sup>

Es scheint, als sei für den Skalenabschnitt von 37.930 bis 8.830 Warven-Jahre (implizit kalibrierte <sup>14</sup>C-Jahre, = Kalender-Jahre) eine Anzahl „Warven“ (29.100) ausgewiesen worden, die der mutmaßlichen Anzahl (kalibrierter) <sup>14</sup>C-Jahre entspricht (KITAGAWA & VAN DER PLICHT 1998a, Fig. 1A, unter Berücksichtigung der Korallen-Daten von BARD et al. 1990, 1993, 1996).

---

<sup>71</sup> „Here we present a high-resolution atmospheric radiocarbon calibration from annually laminated sediments for the total range of the radiocarbon dating method [<45,000 cal yr B.P. (10)]“ (KITAGAWA & VAN DER PLICHT 1998a, 1187).

<sup>72</sup> Zuvor wurde eine zeitliche Verankerung über die U-Oki-Aschenlage (10.650 ± 250 kalibrierte <sup>14</sup>C-Jahre BP, Position etwa 11,63–11,66 m Tiefe) unternommen (KITAGAWA et al. 1995, 374 und Table 1).

<sup>73</sup> „(...) resulting in an absolute calendar age covering the time span from 8830 to 37,930 cal yr B.P. (...)“ (KITAGAWA & VAN DER PLICHT 1998a, 1187f).

<sup>74</sup> „Based on a more detailed analysis of the varve sediments, the previous chronology obtained mainly from the short piston cores (Kitagawa et al. 1995) is revised for two reasons: 1) a more precise matching of the floating Lake Suigetsu varve chronology to the available dendrochronologies with a high-resolution AMS <sup>14</sup>C data set, and 2) an updated varve chronology due to previous miscounting of varve numbers“ (KITAGAWA & VAN DER PLICHT 1998b, 505).

Der Suigetsu-Datenbestand von KITAGAWA & VAN DER PLICHT (1998a, b) ist in der Folge nicht zu einer Erweiterung der Radiokarbon-Kalibrationskurve – hier: > 25.000 kalibrierte <sup>14</sup>C-Jahre BP – herangezogen worden (IntCal04, IntCal09). Dies gilt auch für den erweiterten Datenbestand mit 333 <sup>14</sup>C-Bestimmungen, den KITAGAWA & VAN DER PLICHT (2000) zwei Jahre später publizieren. REIMER et al. (2002) begründen dies einmal mit einer „nicht ausreichenden Kohärenz“,<sup>75</sup> ein andermal (REIMER et al. 2009) etwas konkreter mit „fehlenden Warven und/oder Hiaten in den Sedimentkernen“<sup>76</sup>. Zwischenzeitlich war das Projekt „Suigetsu Varves 2006“ initiiert worden, bei welchem 2006 neue Bohrkern gewonnen wurden (s. Abschnitt 3.3.1.2).

### 3.3.1.2 BRONK RAMSEY et al. (2012)

BRONK RAMSEY et al. (2012) publizieren eine komplette terrestrische Radiokarbon-Überlieferung für den Skalenabschnitt 52.800 bis 11.200 [kalibrierte <sup>14</sup>C-] Jahre BP,<sup>77</sup> deren Datensätze nun auch in die Neuauflage der Radiokarbon-Kalibrationskurve (IntCal13) einfließen (REIMER et al. 2013a, 1871).

Mit dem Projekt „Suigetsu-Warven 2006“ (NAKAGAWA et al. 2012) sind die Sedimente des Suigetsu-Sees (Japan) erneut gekernt worden (Abb. 28). Im Vergleich zur Bohrkampagne 1991/93 (s. Abschnitt 3.3.1.1) wurden zur Vermeidung von Kernverlusten vier parallele Kerne gezogen. Das Kompositprofil erfasst die Seesedimente von 0 bis 73,19 m (Komposit-) Tiefe. Die 808 <sup>14</sup>C-Bestimmungen an pflanzlichen Überresten des (Komposit-) Tiefenabschnitts von 0,42 bis 40,98 m decken – nach dem Altersmodell – den Skalenbereich von 182 bis 52.824 [kalibrierte <sup>14</sup>C-] Jahre BP ab (Abb. 29). Auffallend in Abb. 29 ist, dass die konventionellen <sup>14</sup>C-Alter im Tiefenabschnitt > 30 m stark streuen.

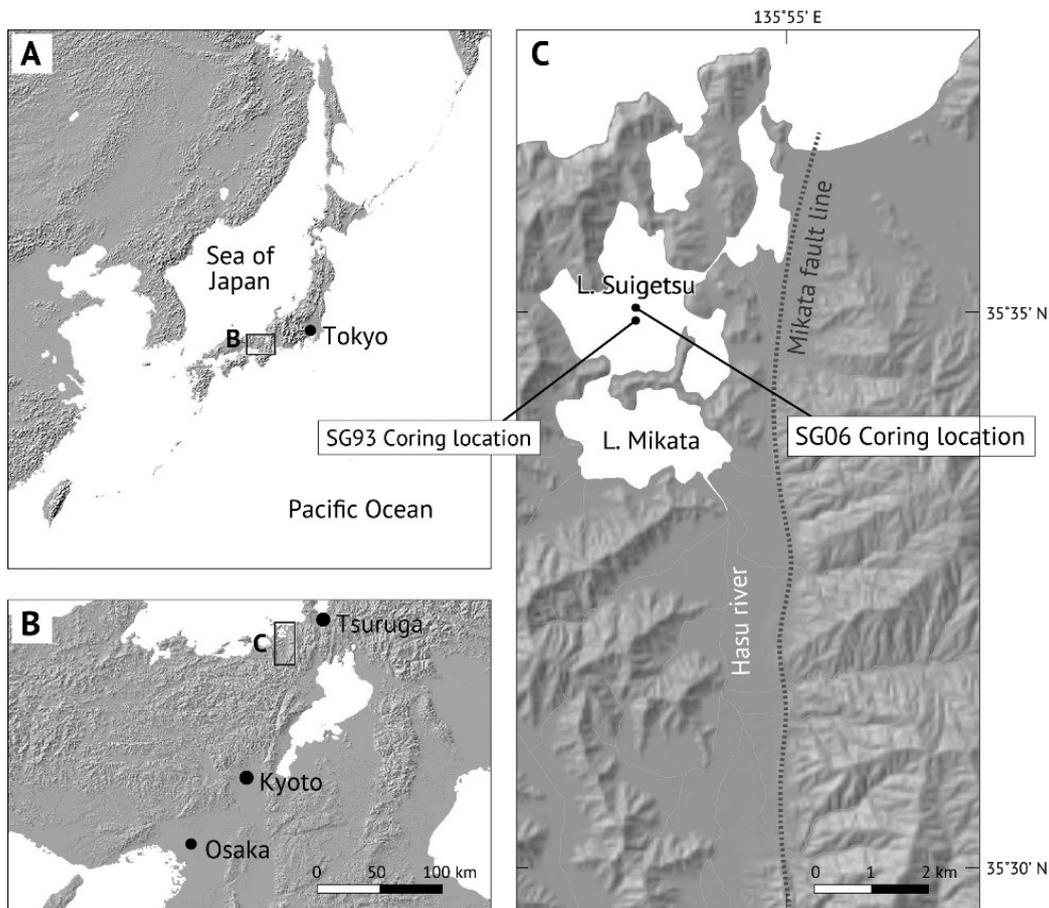
BRONK RAMSEY et al. (2012) unterscheiden eine Suigetsu-Warvenchronologie („SG06<sub>2012</sub> varve“) und eine Suigetsu-Kalenderchronologie („SG06<sub>2012</sub> modelled“). Demnach basiert die Warvenchronologie für den Tiefenabschnitt von 12,88 bis 31,67 m auf eine Warvenzählung (optisch und/oder technisch modelliert), für den Tiefenabschnitt von 31,67 bis 40,98 m auf eine Extrapolation. Der Tiefenabschnitt < 12,88 m ist nicht warviert. Die (noch) schwimmende Warvenchronologie wird bei der Ereignislage in Tiefe 13,974 m über ein <sup>14</sup>C-Wiggle-Matching mit der Radiokarbon-Kalibrationskurve IntCal09 (vgl. STAFF et al. 2013) zeitlich verankert. Die kumulative Zählunsicherheit soll bei Tiefenposition 31,67 m etwa 6 % betragen. Die Kalenderchronologie basiert auf einer Übertragung der U-Th-Zeitskalen der Speläotheme H82 (Skalenabschnitt 26.850 bis 11.241 [<sup>230</sup>Th-] Jahre BP; s. Abschnitt 3.4.2.2) und GB-89-25-3 (Skalenabschnitt 43.853 bis 28.005 [<sup>230</sup>Th-] Jahre BP; s. Abschnitt 3.4.1.2) auf die Suigetsu-Radiokarbon-Überlieferung und einer Verknüpfung mit der Warvenzählung des Tiefenabschnitts von 12,88

<sup>75</sup> In REIMER et al. (2002, 659) heißt es u. a. mit Bezug auf KITAGAWA & VAN DER PLICHT (2000): „However, these records are not sufficiently coherent that we can recommend a single calibration for this time period.“

<sup>76</sup> „Unfortunately, early work on some key records (e.g. Swedish varves, Lake of the Clouds, and Lake Suigetsu) encountered problems with missing varves and/or hiatuses in the sediment cores (Stuiver 1971; Kitagawa and van der Plicht 1998, 2000; Wohlfarth and Possnert 2000)“ (REIMER et al. 2009, 1113).

<sup>77</sup> Entnommen von ihrem Titel in dem Wissenschaftsmagazin *Science*: „A Complete Terrestrial Radiocarbon Record for 11.2 to 52.8 kyr B.P.“

bis 31,67 m.<sup>78</sup> Der Skalenabschnitt > 43.853 [<sup>230</sup>Th-] Jahre BP wird extrapoliert. Kalenderchronologie und Warvenchronologie stimmen im Wesentlichen überein (Abb. 30).



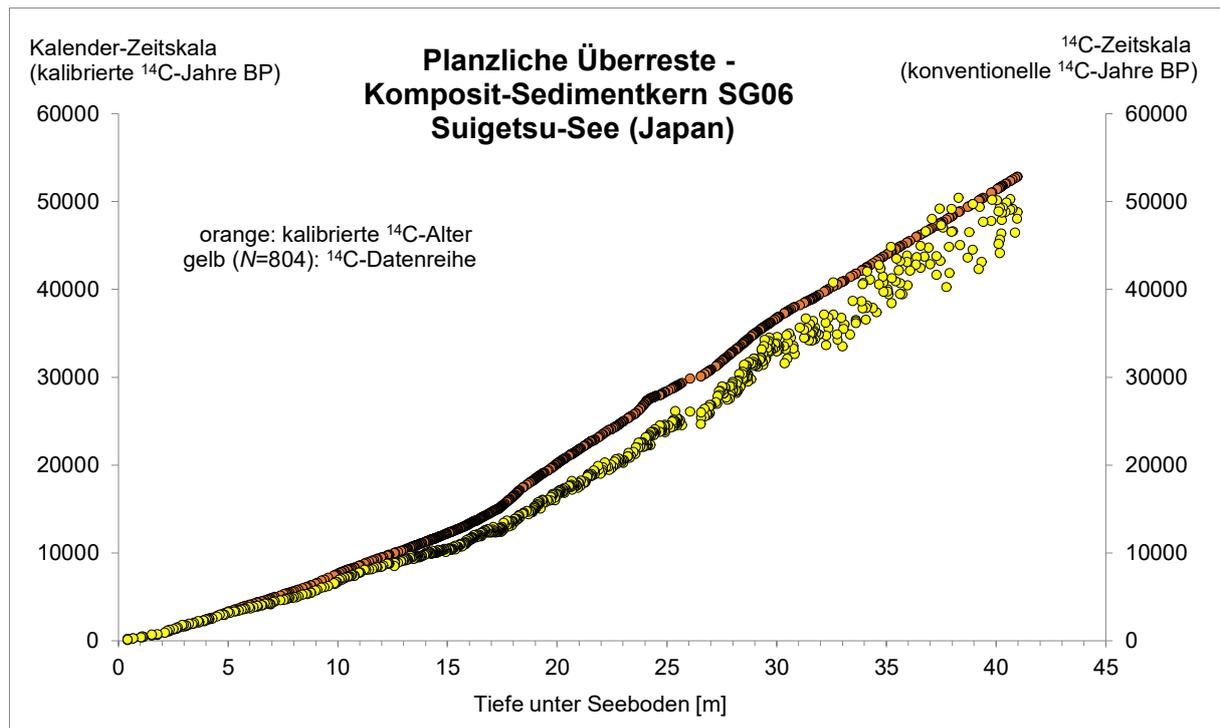
**Abb. 28** Lage des Suigetsu-Sees.

Die Bohrlokalitäten der Bohrkampagnen von 1991/93 (SG93) und 2006 (SG06) befinden sich in der Mitte des Sees. Östlich des See-Systems befindet sich die Mikata-Störung (gepunktete Linie in C). Abbildung: Wiedergabe der Fig. 3 aus NAKAGAWA et al. (2021) in *Global and Planetary Change*; CC BY 4.0.

## Diskussion I

Der erste Teil behandelt die Frage, ob bei den laminierten Sedimentabschnitten ein jahreszeitliche Prägung (Warvierung) identifiziert bzw. nachgewiesen wurde. Hierzu wird hauptsächlich die Arbeit von SCHLOLAUT et al. (2012) diskutiert. Der zweite Teil behandelt die Frage, ob die Warvenchronologie unabhängig vom U-Th-kalibrierten <sup>14</sup>C-Altersrahmen konstruiert worden ist. Hierzu werden hauptsächlich die Arbeiten von SCHLOLAUT et al. (2012) und MARSHALL et al. (2012) diskutiert. Bei beiden Arbeiten ist C. BRONK RAMSEY einer der Co-Autoren. Beide Arbeiten beziehen sich auf den Tiefenabschnitt 18,15 bis 12,88 m. Dieser Abschnitt wird klimatostratigraphisch dem Übergang Spätglazial zu Interglazial (Late Glacial-Interglacial Transition, LGIT) zugeordnet. Da die Interpretation einer Jahresrhythmik diskutiert wird, wird vom Verfasser zur Klarstellung der Begriff „Warve“ häufig in Anführungszeichen gesetzt.

<sup>78</sup> BRONK RAMSEY et al. (2012, 372) schreibt in diesem Zusammenhang von einer „U-Th-moderierten Zeitskala“: „This greatly reduces the uncertainty in the absolute chronology of the age-depth profile (Fig. 1A and table S1) and ensures that the SG06 data are on a U-Th-moderated time scale.“



**Abb. 29** Komposit-Sedimentkern SG06 (Suigetsu-See): Alters-zu-Tiefen-Beziehung II.

Punkt-/Kreisdarstellung, jeweils ohne Unsicherheiten. Die <sup>14</sup>C-Datenreihe enthält Duplikate und als Ausreißer qualifizierte Werte. Die korrespondierenden kalibrierten <sup>14</sup>C-Alter basieren auf: Tiefenabschnitt < 13,97 m: Int-Cal09; Tiefenabschnitt 13,97 bis etwa 35,0 m: (übertragene) U-Th-Alterswerte; Tiefenabschnitt von etwa 35,0 m bis 41,0 m: Extrapolation. Die Unterbrechung in der Beprobung bei Tiefenposition 26,0 m ist wohl der mehrere Dezimeter mächtigen AT-Tephra geschuldet. Daten aus BRONK RAMSEY et al. (2012). Diskussion s. Textteil.

### ***Lamination und Interpretation: Zur Grundfrage einer Jahresrhythmik***

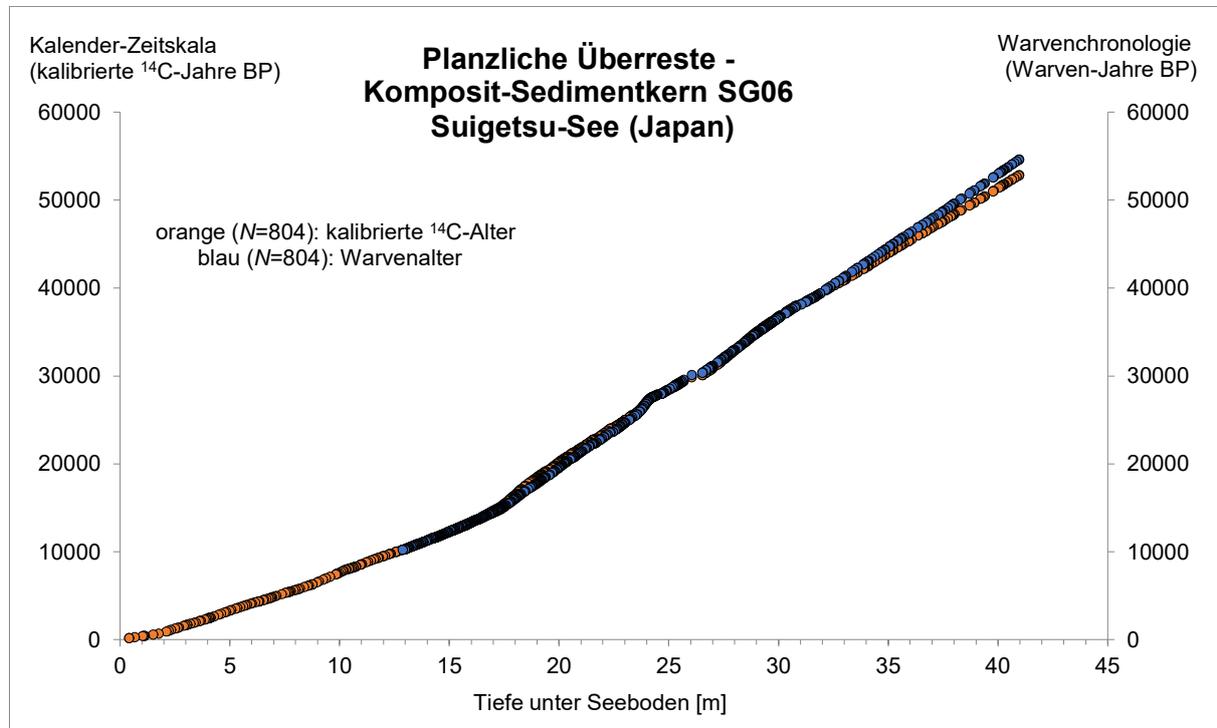
SCHLOLAUT et al. (2012) konstruieren einen jahreszeitlichen Idealzyklus bestehend aus sieben Sublaminae:

- (1) Sideritlage<sup>79</sup> (Frühjahr);
- (2) Diatomeenlage (Aulacoseira spp.), teilweise Siderit führend (Frühjahr);
- (3) Detritische Siltlage aus Quarz und Feldspat (Frühjahr);
- (4) Helles amorphes organisches Material (Sommer);
- (5) Diatomeenlage (Encyonema), teilweise als Basis der Sideritlage, wiederholend auftretend nur im LGIT-Bereich (Herbst);
- (6) Sideritlage (Herbst);
- (7) Tonlage, teilweise partiell überlappend mit Sideritlage (Herbst bis Winter).

Daneben werden gemischte, homogene Lagen („mixed layers“) im Submillimeter-Bereich bis 12 mm Mächtigkeit beschrieben, die aus Diatomeen sowie organischem, detritischem und diffus-sideritischem Material bestehen. Die konstruierte, idealisierte „Warven“struktur mit diesen 7 Lagentypen wird allerdings nicht beobachtet: „[Ein] Auffinden von mehr als drei der sieben Typen saisonaler Lagen zusammen ist selten“ (SCHLOLAUT et al. 2012, 55; Text zu Fig. 2).

<sup>79</sup> Siderit: Eisencarbonat, FeCO<sub>3</sub>.

Die am häufigsten auftretende Kombination bestehe aus Sideritlagen<sup>80</sup>, die durch gemischte Lagen voneinander getrennt seien. Die [Jahreslagen-] Zählung erfolge zuerst basierend auf Sideritlagen, wenn diese nicht erkennbar seien, auf Basis alternativer saisonaler Lagen.



**Abb. 30** Komposit-Sedimentkern SG06 (Suigetsu-See): Alters-zu-Tiefen-Beziehung III. Punkt-/Kreisdarstellung, jeweils ohne Unsicherheiten. Kalenderchronologie (orange Kreise) und Warvenchronologie (blaue Kreise). Die grobe Darstellung zeigt, dass beide Chronologien im Wesentlichen übereinstimmen. Zur Natur der Übereinstimmung s. Diskussion. Daten aus BRONK RAMSEY et al. (2012).

Unter Zugrundelegung beider Bohrkampagnen können aus den bisher veröffentlichten Informationen folgende Feststellungen getroffen werden:

- Die Beschreibungen der Hell/Dunkel-Laminationen (mikroskopische Dünnschliff-Auswertung) differieren signifikant zwischen KITAGAWA et al. (1995) und SCHLOLAUT et al. (2012).
- KITAGAWA et al. (1995) weisen einen Jahreszyklus von 2 Lagen mit Einschaltungen von Pyrit und Siderit aus während SCHLOLAUT et al. (2012) einen Idealzyklus aus 7 Lagen konstruieren. Im Gegensatz zu KITAGAWA et al. (1995) könnten die Lagen (2) und (7) von SCHLOLAUT et al. (2012) als Hauptbestandteile, die restlichen Lagen als Nebenbestandteile bzw. als sekundär auftretend interpretiert werden.
- Der Ausweis bzw. die Zählung der Warven erfolgt bei KITAGAWA et al. (1995) primär anhand der hellen Kieselalgenlagen, bei SCHLOLAUT et al. (2012) dagegen primär anhand der (dunklen) Sideritlagen.

Ob überhaupt eine Jahresrhythmik vorliegt, wird bei beiden Autorenguppen nicht

<sup>80</sup> MARSHALL et al. (2012, 74) beschreiben das Vorherrschen der Sideritlagen so: „All seasonal layers are variable in occurrence, with siderite laminae being the most consistently occurring.“

diskutiert. SCHLOLAUT et al. (2012) gehen von einem prä-anthropogenen dimiktischen Seesystem aus, d. h. einer bis zu zweimaligen Durchmischung der Wassersäule (Herbst und Frühjahr) während eines Kalenderjahres. Ausgehend von einer durch eine Vollzirkulation gesteuerten Sideritbildung als saisonale Markerlage im Herbst wird die jeweilige Saisonalität der anderen Lagen abgeleitet (S. 56): „Ohne diese [Durchmischung, MK] war die Ablagerung der verschiedenen Sedimentkomponenten nicht saisonal aufgeteilt (...).“<sup>81</sup> Die jahreszeitliche Interpretation der Sideritbildung von SCHLOLAUT et al. (2012) wird nachfolgend betrachtet:

Die „dominierenden“ Sideritlagen, vgl. (1)<sup>82</sup> und (6), werden als teilweise lateral (seitlich) nicht aushaltend (sich nicht fortsetzend) beschrieben. In den Textabbildungen (ihre Figs. 2 b–d und 6 a–d) erscheinen die wiederkehrenden Sideritansammlungen als wolkige Gebilde, die sowohl vereinzelt (auch in den Diatomeenlagen), linsenartig als auch lagig gehäuft auftreten. SCHLOLAUT et al. (2012) interpretieren die „jährliche“ Bildung von Siderit unter Bezugnahme auf BHRIG (1988, 155)<sup>83</sup> im Zusammenhang mit einem See-Overturn (Vollzirkulation), der sauerstoffreiches Wasser dem Seeboden zuführt.<sup>84</sup> Unter Zugrundelegung von Herbststürmen leiten sie so (mit Verweis auf BHRIG 1988) ihr Siderit-„Herbstbildungsmodell“ ab. Allerdings gilt es hier zwischen der vulkanischen und tektonischen Entstehung eines Beckens zu unterscheiden. Denn „die episodische bis rhythmische Ausfällung“ von Siderit im Laacher Seebecken erklärte BHRIG (1985) mit CO<sub>2</sub>-reichen Quellen vulkanischen Ursprungs. Werden alle Modelle von BHRIG (1985<sup>85,86</sup>, 1988, 1989) zur Sideritbildung und die jeweiligen Milieus und Rahmenbedingungen betrachtet, scheint es für den Suigetsu-See wahrscheinlicher, dass sich eine frühdiagenetische Bildung innerhalb der Sediment/Wasser-Grenze vollzog (vgl. BHRIG 1989). Die für die wiederholte Bildung von Siderit notwendigen Intervalle von begünstigender Porenwasserchemie kann durch „saisonale“ Wechsel am Seeboden induziert werden. Doch BHRIGS<sup>87</sup>

<sup>81</sup> „Without this the deposition of the different sediment components was not seasonally separated (...)“ (SCHLOLAUT et al. 2012, 56).

<sup>82</sup> Darüber hinaus ist festzuhalten, dass die Siederitlagen im „Frühjahr“ (1) eine mehr als untergeordnete Rolle spielen, denn nach MARSHALL et al. (2012, 75) „repräsentieren sie nur einen unwesentlichen Anteil von allen Sideritlagen“.

<sup>83</sup> „Dynamic model: (...) At times of turnover, oxygen was added to the hypolimnion by mixing of the water masses.“ BHRIGS favorisiertes Erklärungsmodell (dynamisch) war weder ein „Modell für eine jährliche Sideritbildung“, wie sich SCHLOLAUT et al. (2012) formulieren, noch wurde es von ihm als solches bezeichnet. Er interpretierte die ältesten laminierten Sedimente des Laacher-See-Beckens (oberstes Pleistozän/Holozän; Dryas 3/Preborial) als Warvensilte; primär ging es aber um die physikochemischen Bedingungen („formation under these conditions“) und die Quellen der beteiligten Agenzien.

<sup>84</sup> „The observation that siderite layers are related to lake overturn is supported by Bhrig (1988), whose suggested model for annual siderite formation requires mixing of the water body“ (SCHLOLAUT et al. 2012, 54).

<sup>85</sup> BHRIG (1985, 209) zu den Sideritbildungen in den „Warvensilten“ der „älteren Sand-Silt Einheit“: „Die (...) erläuterten Argumente lassen darauf schließen, dass es schon in dieser Entwicklungsphase CO<sub>2</sub>-reiche Quellen am Seeboden gab. Das aufsteigende CO<sub>2</sub> konnte sich aufgrund der großen Tiefe des Sees im Hypolimnion akkumulieren und führte zu episodischen bis rhythmischen Ausfällung des Fe als Siderit während der Stagnationsphase.“

<sup>86</sup> BHRIG (1985) gliedert ausschließlich im dem Profil „Lot 3“ (Beckenfazies), einem 3,1 m langen Sedimentkern, in einer Tiefe von etwa 2,1 bis 2,35 m und 2,5 bis 3,1 m „Warvensilte“ aus (insgesamt etwa 0,85 m). „Die Lamination beruht auf einem Wechsel von hellen Grobsilt- und dunklen Feinsiltlagen“, wobei ein Zyklus etwa 1,3 mm umfasst. Er deutet die Lagencouplets als Warven. Siderit tritt im oberen Teil der Grobsiltlage auf; BHRIG interpretiert als Zeitraum der Bildung Frühjahr/Sommer. – Eine Diskussion der Warvierung erfolgt hier nicht.

<sup>87</sup> BHRIG (1989, 146): „(...) which may be related to seasonal changes at the lake bottom (...)“.

Kann-Aussage sagt nichts über einen Zeitpunkt oder die Häufigkeit aus. Eine notwendige Wiederkehr begünstigender Porenwasserchemie (Ereignis) ergibt sich aus dem häufigen Auftreten der Sideritansammlungen selbst. In Verbindung mit den anderen „Ereignis-Beobachtungen“ (s. u.) spricht dies für eine irreguläre, mehrmals im Jahr erfolgte Teil- oder Vollzirkulation, also für einen polymiktischen und nicht für einen dimiktischen See.

Weiter werden von SCHLOLAUT et al. (2012) die Encyonema-Horizonte (5) als Sturmeinträge, die detritischen Siltlagen (3) als Fluteinträge und die Aulacoseira-Lagen (2) als saisonal-ungebundene, primär durch Blüten generierte Einträge interpretiert, sodass diese Lagen allesamt Ereignisse dokumentieren. Die Häufigkeit jedes dieser Ereignisse ist nicht auf einmal pro Kalenderjahr beschränkt, vielmehr ist im Gesamtkontext davon auszugehen, dass diese Ereignisse mehrmals in einem Kalenderjahr stattgefunden haben. Die Konzentrationen von Aulacoseira-Schalen (2) in nahezu monospezifischen Lagen (vgl. SCHLOLAUT et al. 2012, Anhang 2-2, Fig. 07 und Fig. 08, bzw. Anhang 2-3, Fig. 01 bis Fig. 06) belegen episodische, irreguläre Massenentfaltungen der Kieselalge mit hohen Reproduktionsraten. Die amorphe Lage (4) wird nur unzureichend beschrieben. Die Tonlagen (7) können aufgrund der filternden Natur von zwei vorgelagerten Seen (mit Zuflüssen) auch als Ereignislagen interpretiert werden, beispielsweise, wenn Fluteinträge durch heftige Regenereignisse vorwiegend nur das tonige Material in den Suigetsu-See eingeschwemmt haben.

Für ein besseres Verständnis der Beckenentwicklung und der Sedimentationsgeschichte des Suigetsu-Sees ist eine Kenntnis der Seegenese der benachbarten Seen unerlässlich. Denn ob, wann und in welchem Ausmaß der südlich anschließende Prä-Mikata-See (Abb. 28; mit Zuflüssen, u. a. Prä-Hasu) und/oder der östlich anschließende Prä-Sugako-See (Zuflüsse aus östlicher Richtung) mit dem Suigetsu-See in Verbindung standen und durch Bodenbarrieren eine Filterfunktion wahrgenommen haben, ist nicht bekannt. Aufgrund der tektonischen Entstehung der Seen und der Lage unmittelbar westlich der aktiven Mikata-Störung muss von tektonischen Bewegungen und Seespiegelschwankungen ausgegangen werden, die auf Materialtransport und Sedimentation Einfluss hatten. Insofern müssten im Mikata-See und Sugako-See Ergänzungsbohrungen vorgenommen werden.

Fazit: Insgesamt lassen die Beobachtungen und Beschreibungen von SCHLOLAUT et al. (2012) keinen streng saisonal gesteuerten Wechsel von Stagnation und Zirkulation (dimiktisches Seesystem) erkennen. Vielmehr scheint auf Basis der vorliegenden Informationen ein irreguläres Zirkulationsmuster (polymiktisch) vorzuliegen. Das Sedimentationsmuster ist von rasch aufeinander folgenden, unterschiedlichen Ereignissen bestimmt, die vermutlich mehrmals im Jahr aufgetreten sind: Diatomeenblüten, heftige und Starkniederschläge, Stürme. Wenn keine jahreszeitliche Prägung vorliegt, kann auch keine Zählung von Jahresschichten unternommen werden.

### ***Warvenchronologie: Zur Frage einer unabhängigen Konstruktion***

Übereinstimmend beschreiben die Kernbearbeiter eine Lückenhaftigkeit der Profile und die

Notwendigkeit von Korrekturen.<sup>88,89</sup> Um jedoch einem Zirkelschluss vorzubeugen, dass mit den <sup>14</sup>C-Datierungen die (rohe) Warvenchronologie korrigiert und anschließend diese korrigierte Warvenchronologie zur Kalibrierung der <sup>14</sup>C-Zeitskala eingesetzt wird, folgern SCHLOLAUT et al. (2012, 53; in Übersetzung): „Deshalb kann keine Information, die auf die <sup>14</sup>C-Chronologie basiert, benutzt werden, um die Warvenzählung zu komplementieren, denn die Warvenchronologie muss vollkommen unabhängig sein.“<sup>90</sup> Für die Analyse des Profilabschnitts von 12,88 m bis 18,15 m werden zwei „unabhängige“ Methoden dargestellt: automatisierte Methode der „Warveninterpolation“ (SCHLOLAUT et al. 2012) und hochauflösende  $\mu$ -XRF und X-Radiographie (MARSHALL et al. 2012).

„**Warveninterpolationsmethode**“. Die Autoren nehmen an, dass hauptsächlich die gemischten, homogenen Lagen (< 1 mm bis 12 mm Mächtigkeit) mehr als ein Jahr repräsentieren. SCHLOLAUTS neu entwickelte „Warveninterpolationsmethode“ soll zur objektivierten Abschätzung der Bildungsdauer dieser Lagen auf Basis der Sedimentationsraten über- und unterliegender „Warven“ dienen. Für den Profilabschnitt von 12,88 m bis 18,15 m werden so etwa 3.300 mikroskopisch ausgezählte Roh-„Warven“ modelliert und zu etwa 6.100 „Warven“jahren gestreckt; d. h. der interpolierte Anteil beträgt zusätzlich etwa 2.800 „Warven“ (vgl. SCHLOLAUT et al. 2012, Fig. 7). Demnach wären nur etwa 50 % der „Warven“ (bzw. „Warven“jahre) mikroskopisch unterscheid- und damit erkennbar gewesen. Ihr Ergebnis fassen sie wie folgt zusammen (S. 68, in Übersetzung): „Im Hinblick auf das Ziel des SG06-Projekts, die atmosphärische Radiokarbon-Kalibrierungskurve bis 50 ka cal BP zu erweitern, ist gezeigt worden, dass die Genauigkeit der Interpolation für eine Periode von  $\approx$  2.500 Jahren innerhalb des 68,2 % Wahrscheinlichkeitsbereiches kalibrierter <sup>14</sup>C [-Alter] liegt und deshalb als geeignetes Datenmaterial für die Ausweitung der reinen terrestrischen Kalibrierungskurve weiter zurück in die Zeit angesehen wird.“<sup>91</sup> Damit ist die „Warven“chronologie in die führende U-Th-kalibrierte <sup>14</sup>C-Chronologie eingepasst worden.

**Mikroröntgenfluoreszenzanalyse und Röntgenradiographie.** Mit der Mikroröntgenfluoreszenzanalyse ( $\mu$ -RFA,  $\mu$ -XRF) wird der Sedimentkern in einer Auflösung im Mikrometer-Bereich abgerastert. Die ermittelten Elementkonzentrationen werden in Elementprofilen dargestellt. Nach MARSHALL et al. (2012) zeichnen sich Sideritlagen durch Fe- und Mn-Signale, detritische Lagen durch Ti-, K-, Pb- und gelegentlich Zr-Signale und Tonlagen durch Ti-, K- und Pb-Signale aus. Mit der X-Radiographie wird ein Grauskalen-Profil entlang des Sedimentkerns

---

<sup>88</sup> „Die mikroskopische Analyse zeigte, dass die warvierte Sedimentfolge durch eine unvollständige Ausbildung oder Erhaltung von jährlichen Laminae eingeschränkt ist und eine Interpolation notwendig macht“ (SCHLOLAUT et al. 2012, 52; in Übersetzung).

<sup>89</sup> „Unglücklicherweise ist die Erhaltung der jährlichen Schichtung von Suigetsu nicht perfekt (NAKAGAWA et al. 2012) und es ist notwendig gewesen, Interpolation anzuwenden, um eine ‚komplette‘ SG06-Warvenchronologie zu erhalten“ (STAFF et al. 2012, 2; in Übersetzung).

<sup>90</sup> Im Original: „Therefore no information based on the <sup>14</sup>C chronology can be used to complement the varve count as the varve chronology must be completely independent“ (SCHLOLAUT et al. 2012, 53)

<sup>91</sup> Im Original: „With respect to the aim of the SG06 project, to extend the atmospheric radiocarbon calibration curve to 50 ka cal BP, it was shown that the accuracy of the interpolation is within the 68.2% probability range of calibrated <sup>14</sup>C for a  $\approx$ 2500 year period, and therefore is considered a suitable dataset for extension of the purely terrestrial calibration curve further back in time“ (SCHLOLAUT et al. 2012, 68).

erstellt. Dabei erzeugen hellere Lagen entsprechend ihrem Grad der Oberflächenreflexion Positiv-Ausschläge.

Für die XRF-Zählung orientierten sich die Autoren an den „Herbst“-Sideritlagen.<sup>92</sup> Für denselben Profilabschnitt von 12,88 m bis 18,15 m Tiefe (vgl. oben) werden gegenüber der mikroskopischen Rohzählung (3.300 „Warven“) zusätzlich 2.921 Zähler (unter Berücksichtigung aller Qualitätsstufen 1–4) mehr ausgewiesen, in Summe also etwa 6.200 (ihre Fig. 5). Nach Modell-Korrekturen werden abschließend etwa 6.100 „Warven“-jahre ausgewiesen; die Anzahl deckt sich bemerkenswert gut mit SCHLOLAUT et al. (2012). Als Hauptgrund der Differenz (+ 88 %) wird angegeben, dass die kleineren Spitzen geochemischer Signale im Submillimeter-Bereich keine Entsprechung in den Dünnschliffen besitzen.<sup>93</sup> Aber: Auf die gemischten, homogenen Lagen wird nicht eingegangen (vgl. oben); insbesondere nicht darauf, wie diese Lagen sich im geochemischen Profil präsentieren.

Die Autoren resümieren über ihre Methode (S. 79, in Übersetzung): „Wir betrachten es nicht als eine unabhängige alternative Warvenzählmethode zur Dünnschliff-Mikroskopie, weil, selbst wenn eine perfekte Bildung und Erhaltung der Warven vorliegt, es wirklich keinen Ersatz zur Dünnschliff-Mikroskopie gibt, um warvierte Sedimente genau zu charakterisieren und ihre physische Beschaffenheit zu verstehen.“<sup>94</sup> Mit anderen Worten: Nur durch eine zielgerichtete Vorgabe und einer damit verbundenen Auflösungseinstellung der Apparatur<sup>95</sup> kann das gewünschte Ergebnis erzielt werden. Und auch der methodische Hinweis unter der Rubrik „Terminologie“ sollte nicht überlesen werden (S. 75): „Mit Bezugnahme auf die Terminologie muss klargestellt werden, dass die Methode nicht Warven oder saisonale Schichten, sondern Elementausschläge zählt, die saisonalen Schichten zugeordnet werden.“<sup>96</sup>

Auffallend ist, dass MARSHALL et al. (2012) im Textteil ihres Artikels nicht einmal die Gesamtzahl ihrer XRF-Zähler für den untersuchten Profilabschnitt nennen. Diese lassen sich nur indirekt unter Zuhilfenahme von SCHLOLAUT et al. (2012) oder durch Abzählen an den grafischen Abbildungen ermitteln. Erst durch einen Vergleich der Fig. 11a mit Fig. 5 (MARSHALL et al. 2012) wird deutlich, dass zwischen der Suigetsu-Chronologie auf Basis der mikroskopischen Zählung

---

<sup>92</sup> „As autumn siderite layers are the most frequently occurring seasonal layer, and are easily distinguishable in the XRF, X-radiographic and optical signals, counting is mainly based on these“ (MARSHALL et al. 2012, 74).

<sup>93</sup> „At a sub-mm scale it became clear that low-magnitude geochemical peaks often have no visible counterpart in the thin sections (Fig. 4) and are thus the primary cause for the count differences“ (MARSHALL et al. 2012, 77).

<sup>94</sup> Im Original: „We do not consider it a stand-alone alternative varve counting method to thin-section microscopy because, even with perfect varve formation and preservation, there really is no substitute to thin-section microscopy to properly characterise and understand the physical properties of varved sediments“ (MARSHALL et al. 2012, 79).

<sup>95</sup> „Pilot studies were carried out to determine the optimum settings of the scanner for this project. The same SG06 core interval was repeatedly XRF-scanned using a number of different measurement intervals (200, 100, 60, 20 mm), count times (20, 10, 6, 5 and 4 s), voltage (60, 50, 40, 30 kV), and current (40, 30 mA) settings. Two different detector nozzles (8 and 4mm perpendicular to the main core axis) were also trialled. (...) According to the results from Kitagawa and van der Plicht (1998a, 1998b) varve thickness in the Suigetsu core varies between approximately 610 µm (in the Glacial) and 1200 µm (in the Holocene), and hence a 60 µm step size achieved the first criterion without any significant increase in the signal : noise ratio“ (MARSHALL et al. 2012, 72).

<sup>96</sup> „With respect to the terminology, it must be made clear that the method does not count varves or seasonal layers, but elemental peaks that are related to seasonal layers.“

der „Warven“ und der  $^{14}\text{C}$ -Kalibrierungskurve (IntCal09, REIMER et al. 2009) eine Diskrepanz von 2.900 „Jahren“ bestand (vgl. 15,5 m Tiefe). Exakt um diese Größe wurde die Suigetsu-Chronologie in diesem Tiefenbereich durch die Modellanwendung „Warveninterpolation“ (SCHLOLAUT et al. 2012) und die Signalinterpretation der Elementprofile der Mikroröntgenfluoreszenzanalyse (MARSHALL et al. 2012) angepasst.

Der gewählte LGIT-Bereich (oberstes Pleistozän/Holozän) ist nicht von ungefähr. Ziel war es, im Endbereich der dendrokalierten  $^{14}\text{C}$ -Kurve (etwa Skalenabschnitt von 10.500 bis 12.550 kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP) eine Synchronisation mit IntCal09 herzustellen und methodisch die vorgenommenen Anpassungen auf die folgenden älteren Abschnitte zu übertragen. Der vermeintlich ungewollte Zirkelschluss<sup>97</sup> allerdings ist faktisch ein echter Zirkelschluss, auf zwei Ebenen: Ohne Kenntnis der „Warven“-Natur der Sedimente (Ist die Interpretation korrekt? Liegt eine Über- oder Unterzählung vor?) ist eine Vorgabe notwendig. Diese ergibt sich zwangsläufig „nur“ aus den kalibrierten  $^{14}\text{C}$ -Datierungsergebnissen. Das auf diese Weise mit dieser Vorgabe gewonnene Ergebnis wird mit dem „Master“ verglichen und – was zu erwarten war – eine Übereinstimmung festgestellt.

Das Vorgehen bei der Chronologie-Erstellung liest sich aber so, als seien die  $^{14}\text{C}$ -Datierungsergebnisse in eine unabhängige<sup>98</sup>, von der „Warvenzählung“ (und den Modellierungen, s. o.) abgeleitete Zeitskala eingebunden worden; so BRONK RAMSEY (2012, 370): „(...) 651  $^{14}\text{C}$ -Datierungen (...) angebunden an eine Zeitskala, die von der Warvenzählung und zeitlicher Eingrenzungen anderer Berichte abgeleitet wurde.“<sup>99</sup>

## **Fazit**

Die Untersuchung der Bohrkern war theorie- und zielgeleitet, der Projektname „Lake Suigetsu 2006 Varved Sediment Core“<sup>100</sup> Programm. Der Nachweis einer jahreszeitlichen Prägung der laminierten Sedimente des Suigetsu-Sees ist weder für den Kern SG93 noch für den Kern SG06 erbracht worden. Ein jahreszeitlich induziertes Sedimentationsmuster lässt sich aus den vorliegenden Beschreibungen nicht erkennen. Vielmehr sind die Laminen als eine Folge irregulärer Sedimentationsereignisse eines polymiktischen Sees zu deuten. Da demzufolge keine (echten) Warven ausgewiesen werden können, können auch keine Jahre abgezählt werden.

Die konstruierte Warvenchronologie ist nicht unabhängig entwickelt worden; sie wurde in den U-Th-kalibrierten  $^{14}\text{C}$ -Altersrahmen eingepasst.

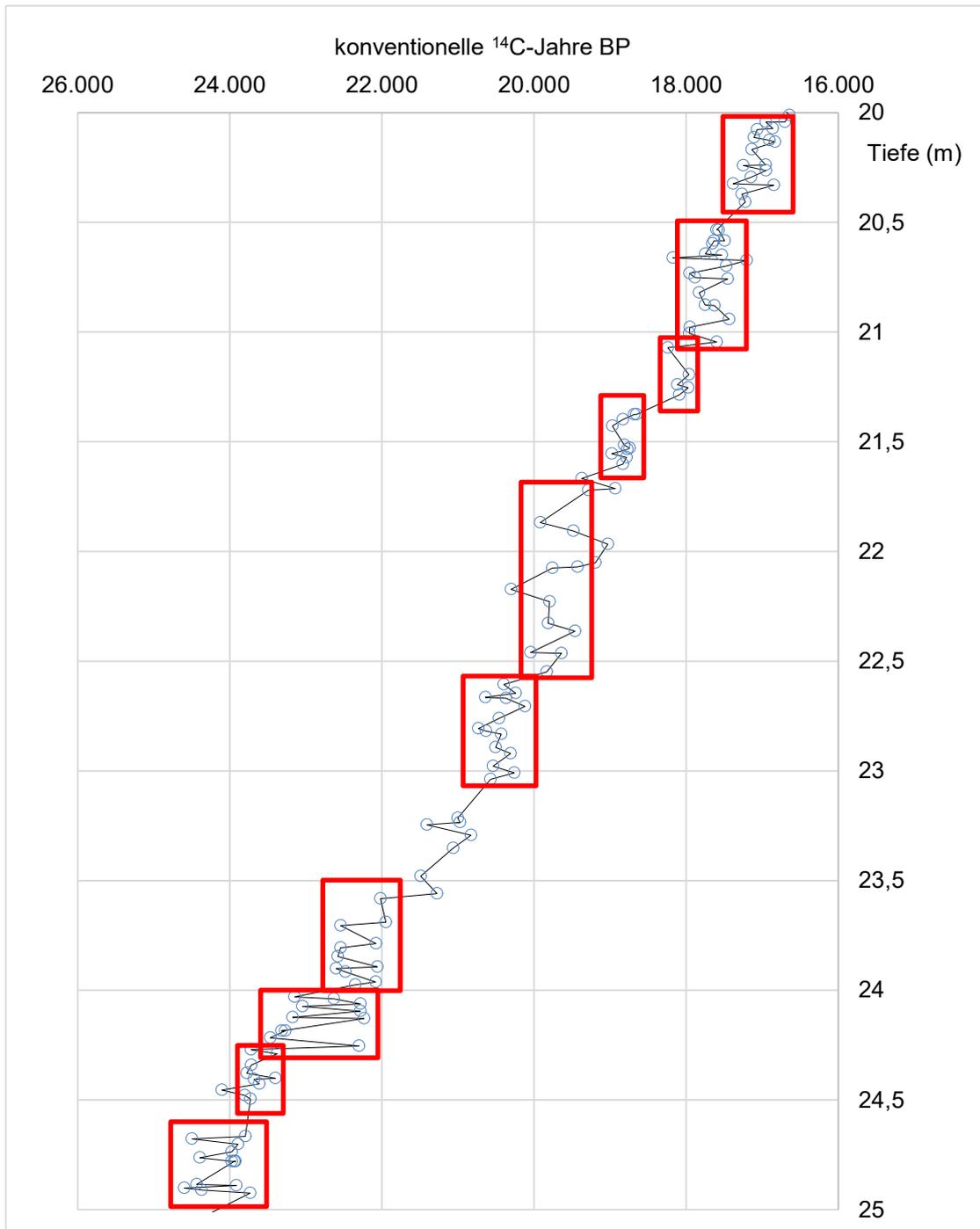
---

<sup>97</sup> „The accuracy of this new dual counting approach can be tested by comparison of the combined, final varve model (with errors) to the radiocarbon chronology (Staff et al., 2011) calibrated (but not modelled, as constraining the chronology using varve counts would invite circularity) to the limit of the dendrochronologically dated part of the IntCal09 curve.“ (MARSHALL et al. 2012, 79)

<sup>98</sup> „It provides good relative chronological precision and has the advantage of being independent of other dating techniques“ (BRONK RAMSEY 2012, 370).

<sup>99</sup> „Here, we report 651  $^{14}\text{C}$  measurements covering the period between 11.2 and 52.8 thousand years before the present (kyr B.P.) tied to a time scale derived from varve counting and temporal constraints from other records“ (BRONK RAMSEY 2012, 370). – Die Zeitskala ist nicht ausschließlich von der „Warvenzählung“ abgeleitet; er liest sich aber so, als sei es die hauptsächliche Grundlage.

<sup>100</sup> <http://www.suigetsu.org/#:~:text=Suigetsu%20%3E%20Home,central%20Japan%2C%20in%20summer%202006.>

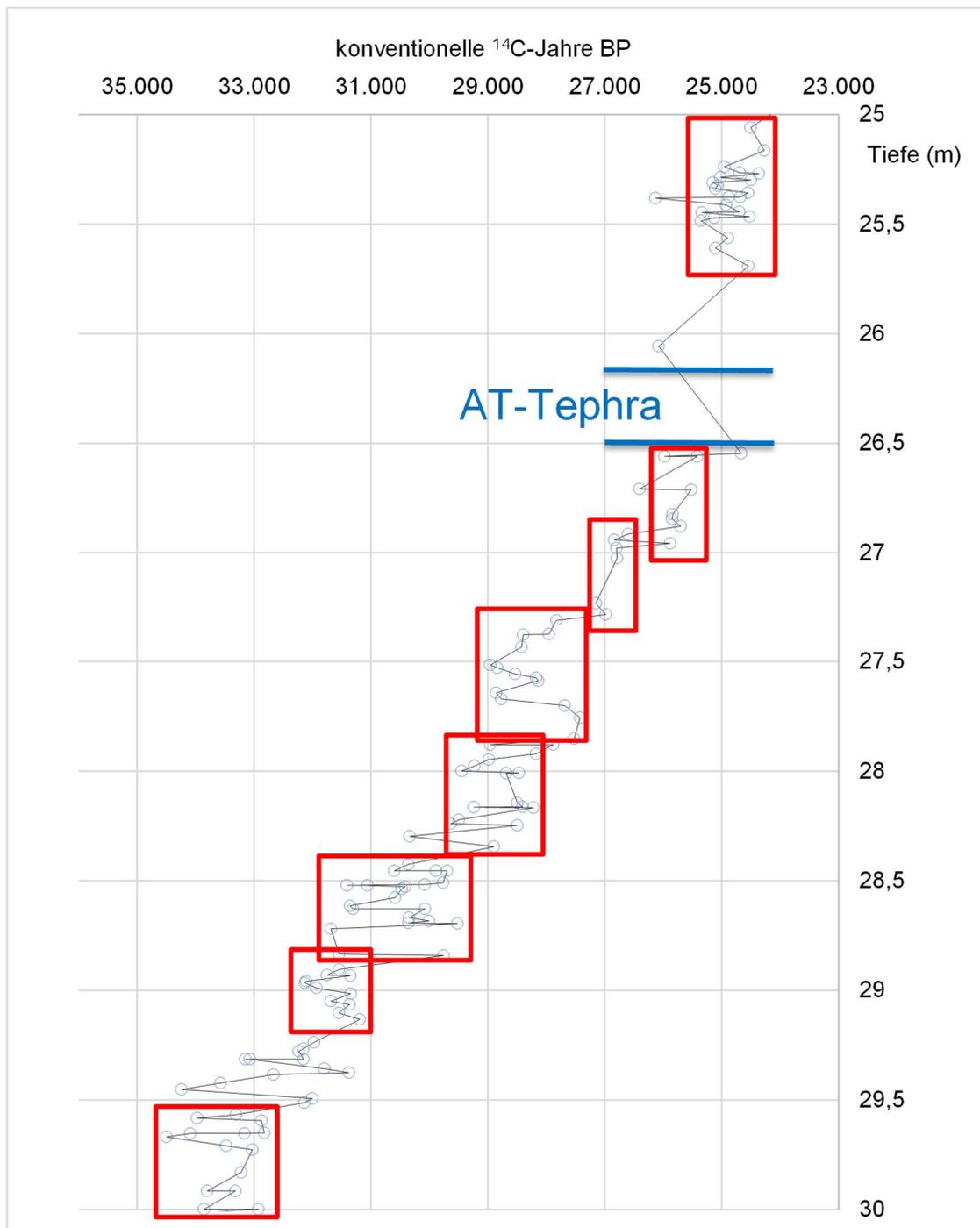


**Abb. 31** Komposit-Sedimentkern SG06 (Suigetsu-See): Alters-zu-Tiefen-Beziehung IV. Punkt-/Kreis- und Liniendarstellung,  $N=134$ . Ausschnitt für den Tiefenbereich 20–25 m (vgl. Abb. 6, dort gesamtes Profil). Abschnitte „quasi-gleichen Radiokarbon-Alters“ sind durch rote Rechtecke markiert. Diskussion s. Textteil. Daten aus BRONK RAMSEY et al. (2012), jeweils ohne Unsicherheiten. Die  $^{14}\text{C}$ -Datenreihe enthält Duplikate und als Ausreißer qualifizierte Werte.

## Diskussion II

Eine grafische Detail-Betrachtung der Alters-zu-Tiefen-Beziehung des Komposit-Sedimentkerns SG06 zeigt eine auffallende Eigentümlichkeit, die hier beispielhaft für die Tiefenabschnitte 20–25 m (Abb. 31) und 25–30 m (Abb. 32) angeführt ist: Abschnittsweise verharren die konventionellen  $^{14}\text{C}$ -Alter in unterschiedlichen Bandbreiten auf gleichem Niveau. Für den

Tiefenabschnitt 20–25 m (Abb. 31) sind neun solcher Abschnitte durch rote Rechtecke markiert, für den Tiefenabschnitt 25–30 m (Abb. 32) sind es acht. Die Länge der Abschnitte reicht von ca. 30 bis 85 cm.



**Abb. 32** Komposit-Sedimentkern SG06 (Suigetsu-See): Alters-zu-Tiefen-Beziehung V. Punkt-/Kreis- und Liniendarstellung,  $N=129$ . Ausschnitt für den Tiefenbereich 25–30 m (vgl. Abb. 6, dort gesamtes Profil). Abschnitte „quasi-gleichen Radiokarbon-Alters“ sind durch rote Rechtecke markiert. Blau: Position der AT-Tephra; für diesen Abschnitt liegen keine Radiokarbonanalysen vor. Diskussion s. Textteil. Daten aus BRONK RAMSEY et al. (2012), jeweils ohne Unsicherheiten. Die  $^{14}\text{C}$ -Datenreihe enthält Duplikate und als Ausreißer qualifizierte Werte.

Da die Radiokarbonanalysen an in den See eingetragenen Pflanzenmaterial vorgenommen wurden, könnte das quasi-gleiche Radiokarbon-Alter darauf hindeuten, dass die entsprechenden Sedimentintervalle (gekennzeichnet durch die roten Rechtecke) in kurzer Zeit entstanden sind. Das Sedimentationsmodell wäre episodisch: rasche Sedimentschüttungen, die immer wieder durch Sedimentationspausen unterbrochen werden.

SARNTHEIM et al. (2020) allerdings interpretieren diese Eigentümlichkeit als „Plateaus und Sprünge in der atmosphärischen Radiokarbon-Überlieferung“. Diese u. a. als „stratigraphische ‚Sprossenleiter‘“ bezeichnete Struktur reflektiere Änderungen in der atmosphärischen  $^{14}\text{C}$ -Produktionsrate, in dem Ozean-Atmosphäre- $^{14}\text{C}$ -Austausch und in der Durchmischung der Ozeane.<sup>101</sup>

### Diskussion III: Wissenschaftskommunikation

Für das Projekt „Suigetsu-Warven 2006“ ist eine eigene Website eingerichtet (suigetsu.org) und noch aktiv.<sup>102</sup> Unter der Rubrik „News“ werden die Kanäle und Reaktionen gelistet, die die Hauptpublikation von BRONK RAMSAY et al. (2012) vom 19. Oktober 2012 in *Science* begleiteten. Dazu zählen offizielle Pressemitteilungen von sieben beteiligten Universitäten und Forschungszentren sowie – diese teilweise aufnehmend/antizipierend – über 100 Erwähnungen in Medien, in „mainstream science and popular science outlets“: darunter 45 in englischer, 14 in japanischer, 16 in deutscher und 12 in spanischer Sprache.

Mit Blick auf die deutschen „Vertriebsstellen“ thematisieren die gewählten Überschriften häufig die Verbesserung der Radiokarbon-Datierung, so auch die Pressemitteilung des beteiligten Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ vom 19. Oktober 2012: *Ein schärferer Blick zurück für die Archäologie und Klimaforschung*.<sup>103</sup> Im Textteil heißt es, dass die Ablagerungen des Suigetsu-Sees „mit einer jahreszeitlichen Auflösung bis über 50000 Jahre zurück reichen“.<sup>104</sup> Oder: „Die Kenntnis dieses saisonalen Rhythmus der Sedimentation war Grundlage der genauen Jahreslagenzeitskala.“ Die Pressemitteilung enthält also zahlreiche Fakten-Aussagen.

Wie der Verfasser zuvor dargelegt hat, handelt es sich bei den ausgewiesenen Jahreslagen („jahreszeitliche Auflösung“, „Jahreslagenzeitskala“, „jahreszeitlich laminierte Sedimente“<sup>105</sup>)

<sup>101</sup> SARNTHEIM et al. (2020, 2547) beziehen auch die planktonische Radiokarbon-Überlieferung ein: „The fine structure of jumps and plateaus in atmospheric and planktic radiocarbon ( $^{14}\text{C}$ ) concentration reflects changes in atmospheric  $^{14}\text{C}$  production, ocean–atmosphere  $^{14}\text{C}$  exchange, and ocean mixing. Plateau boundaries in the atmospheric  $^{14}\text{C}$  record of Lake Suigetsu, now tied to Hulu Cave U/Th model ages instead of optical varve counts, provide a stratigraphic ‘rung ladder’ of up to 30 age tie points from 29 to 10 cal ka for accurate dating of planktic oceanic  $^{14}\text{C}$  records.“

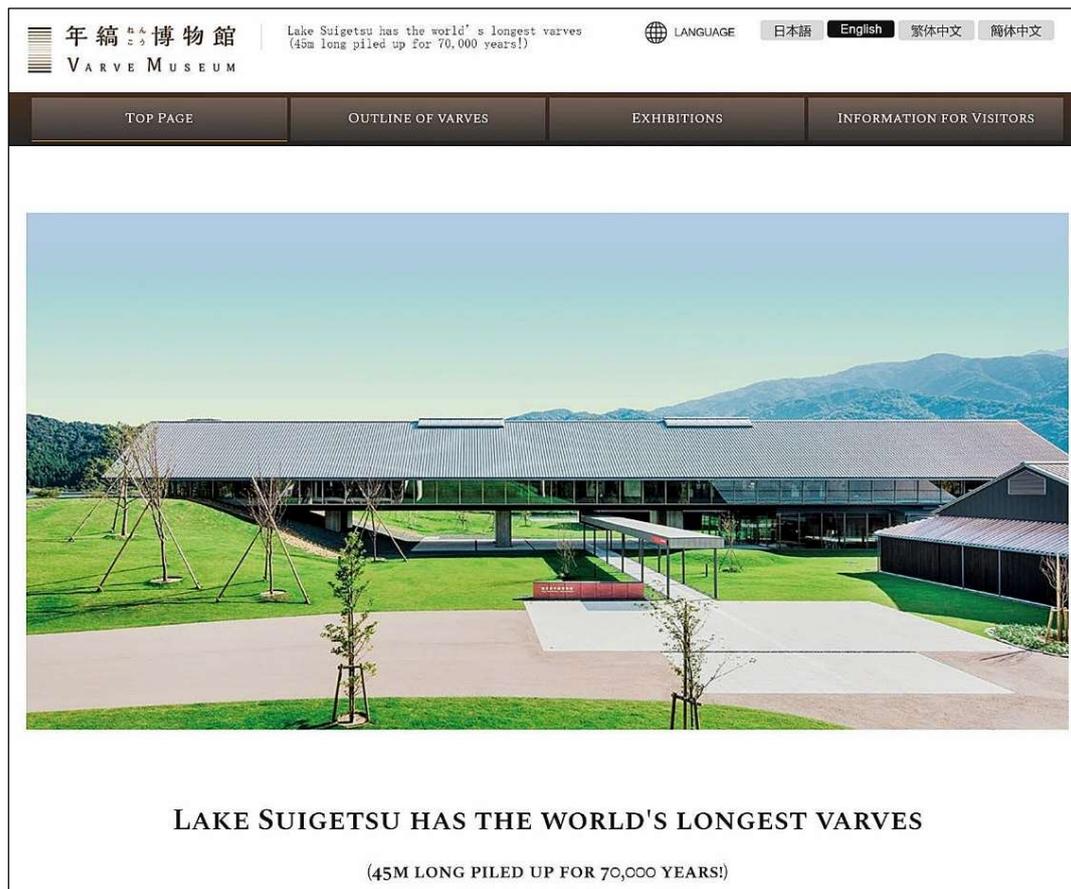
<sup>102</sup> Stand Februar 2024.

<sup>103</sup> Noch verfügbar unter: <https://www.gfz-potsdam.de/presse/meldungen/detailansicht/ein-schaerferer-blick-zurueck-fuer-die-archaeologie-und-klimaforschung>

<sup>104</sup> „Eine sehr weit zurück reichende Kalibrierung gelang nun mit den Daten aus dem bei Mikata am Japanischen Meer gelegenen Suigetsu-See. Hier konnte ein Bohrkern aus den Sedimenten gezogen werden, die mit einer jahreszeitlichen Auflösung bis über 50000 Jahre zurück reichen“ (GFZ-Pressemitteilung vom 19. Oktober 2012).

<sup>105</sup> Oder auch die einführenden Sätze: „Mithilfe einer neuen Messreihe von Radiokohlenstoffdaten an jahreszeitlich laminierten Sedimenten aus dem Suigetsu-See in Japan ist in Zukunft eine präzisere Kalibrierung von Radiokohlenstoffdatierungen möglich. In Kombination mit einer genauen Zählung der saisonal geschichteten

um eine Interpretation. Es ist abschließend kein Nachweis darüber erbracht worden, dass es sich bei den laminierten Sedimenten um Jahreslagen (Warven) handelt. Des Weiteren hat der Verfasser aufgezeigt, dass die verschiedenen Erscheinungen (Sublaminae) als Ereignislagen interpretiert werden können. Die „50.000 Jahre“ basieren nicht auf eine Abzählung von (echten) Jahresschichten bzw. einer jahreszeitlichen Auflösung. Die „50.000 Jahre“ werden von den kalibrierten  $^{14}\text{C}$ -Jahren abgeleitet und folglich als Kalender-Jahre ausgewiesen. Insofern liegen hier nach LATOUR & WOOLGAR (1986) Typ-5-Aussagen vor (Anhang I).



**Abb. 33** Homepage (Screenshot) des Warven-Museums in Wakasa-cho, Japan.

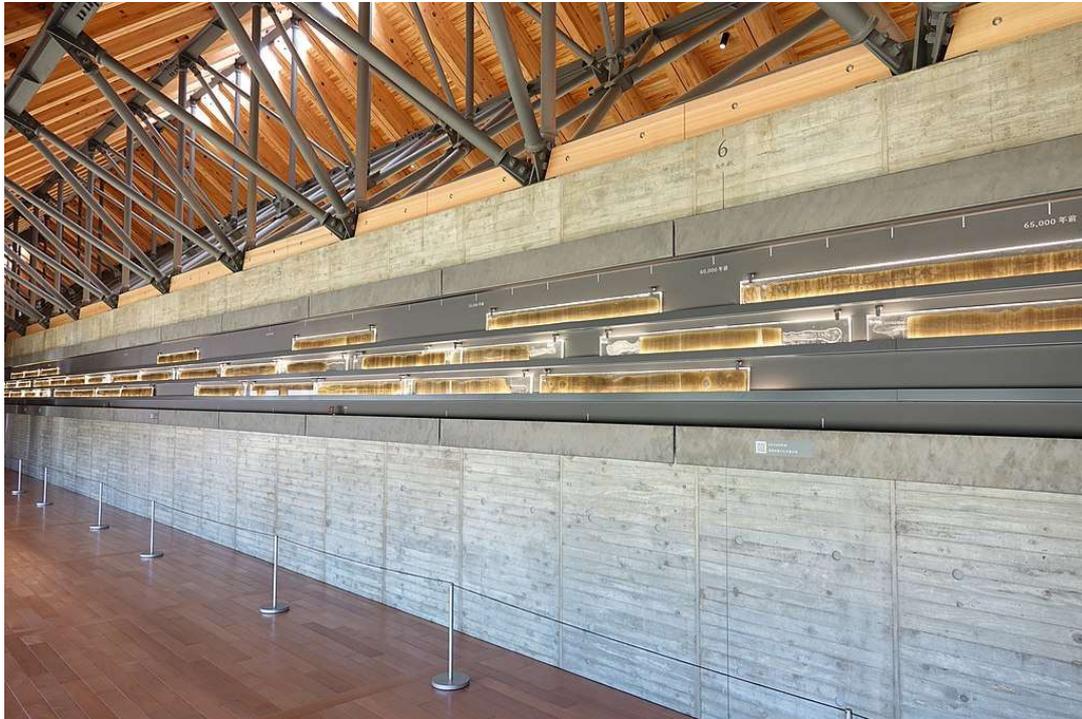
Die Kernbotschaft: „[Der] Suigetsu-See hat die längste Warvenabfolge der Welt. (45 m lang – in 70.000 Jahren aufeinandergeschichtet!).“ Zugriff Dez. 2023; <http://varve-museum.pref.fukui.lg.jp/en/>

Ähnlich sind die faktischen Aussagen der Website des 2018 eröffneten Warven-Museums (Abb. 33 und Abb. 34) in der Nähe des Suigetsu-Sees: „[Der] Suigetsu-See hat die längste Warvenabfolge der Welt. (45 m lang – in 70.000 Jahren aufeinandergeschichtet!)“ (Abb. 33). Und weiter: „(...) Die Warven im Suigetsu-See sind ein weltweites Standardmaß für die Altersbestimmung. Sedimente mit Warven, die sich seit 70.000 Jahren kontinuierlich am Seegrund aufschichteten, geben Aufschluss über Geheimnisse der Frühgeschichte. Warven sind Sedimente mit charakteristischen, jährlich wiederkehrenden Schichtungen, die sich am Seegrund

---

Ablagerungen im See ergab sich eine bisher unerreichte Präzision der bekannten  $^{14}\text{C}$ -Methode, mit der es jetzt möglich ist, auch ältere Objekte der Klimaforschung oder der Archäologie genauer zu datieren, als es bisher möglich war“ (GFZ-Pressemitteilung vom 19. 10. 2012).

anhäufen. Jedes Jahr bildet sich eine neue Schicht aus hellen und dunklen Streifen, und dieses Streifenmuster wird abwechselnd aufgeschichtet.“<sup>106</sup> Dem Leser bzw. Besucher wird suggeriert, dass 70.000 Warven vorliegen, die 70.000 Jahre repräsentieren.



**Abb. 34** Warven-Museum, Wakasa-cho, Japan.

Das weltweit erste Museum dieser Art. Ausgestellt werden bis zu 1 m lange Groß-Dünnschliffe der laminierten Sedimente des Suigetsu-Sees. Die Bohrkernstämme stammen von der Bohrkampagne 2014 (SG14), s. YAMADA et al. (2017) und Website des Museums. Foto: Phonon.b (Wikimedia Commons CC-BY-SA-4.0); File:Varve of Lake Suigetsu in Varve Museum.jpg

### 3.3.1.3 SCHLOLAUT et al. (2018)

SCHLOLAUT et al. (2018) präsentieren eine erweiterte und revidierte Suigetsu-Warvenchronologie für den Skalenbereich von „~50 bis ~10 Tausend Jahre BP“ mit der technischen Bezeichnung SG06<sub>2018</sub>. Demnach repräsentiert der Tiefenabschnitt von 12,88 bis 40,41 m die Altersspanne von 10.167 bis 47.867 SG06<sub>2018</sub>-Warvenjahre BP (zuvor: 10.219 bis 53.648 SG06<sub>2012</sub>-Warvenjahre BP).<sup>107</sup> „Das warvendatierte Intervall umfasst etwa 38.000 Jahre“,<sup>108</sup> so die

<sup>106</sup> Top Page der Website (englische Version): „The world's first museum of varves opened in Wakasa-cho, Fukui Prefecture. The varves in Lake Suigetsu are a global standard measure for age determination. Sediments with varves piled up continuously in the lake bed for 70,000 years unravel mysteries of ancient history. Varves refer to the sediment with characteristic annually laminated sediment piled up in the lake bed. One new layer made up of light and dark colored stripes is formed each year and this striped pattern is piled up alternately. The color difference arises from different types of sediment depending on the season.“

<sup>107</sup> Chronologie mit Alters-zu-Tiefen-Relation in 0,1-cm-Intervallen siehe <http://www.suigetsu.org/SG06%202018%20Varve%20Chronology.txt>

<sup>108</sup> „Compared to other varve chronologies the varve based 2018 Suigetsu chronology is unique in two ways. Firstly, it is by far the longest continuous chronology based on varve dating. The varve dated interval spans approximately 38,000 years“ (SCHLOLAUT et al. 2018, 364).

Autoren, und basiert auf etwa 19.000 „Rohwarven“ und weiteren 19.000 interpolierten, also zusätzlich modellierten, „Warven“.

Die Konstruktion der Warvenchronologie-2018 erfolgte – im Vergleich zur Konstruktion von 2012 (SCHLOLAUT et al. 2012) – ausschließlich mit der „Warveninterpolationsmethode“ (Programm-Version 3.0). Die Warvenchronologien (2018 vs. 2012) überlappen bis Tiefe 31,7 m im Rahmen ihrer Unsicherheiten (SCHLOLAUT et al. 2018, ihre Fig. 10B).

## Diskussion

SCHLOLAUT et al. (2018) bezeichnen die Suigetsu-Warvenchronologie-2018 – wegen des hohen Anteils von 50 % interpolierten Warven – als „Suigetsu-warvenbasierte-Chronologie“.<sup>109</sup>

Die Autoren können erneut nicht nachweisen, dass die jeweiligen als Warven interpretierten Laminensequenzen tatsächlich Bildungen eines Kalenderjahres sind.<sup>110</sup> Dies betrifft die ausgewiesenen 19.000 (Roh-) „Warven“. Des Weiteren legen sie nicht dar, wie mutmaßlich fehlende Warven (nicht gebildet oder erhalten) ohne eine zeitliche Rahmenvorgabe anzahlmäßig bestimmt werden können. Dies betrifft die ausgewiesenen 19.000 interpolierten (= modellierten) „Warven“.

Es wird von SCHLOLAUT et al. (2018) *nicht* geltend gemacht, dass die Suigetsu-Warvenchronologie-2018 eine unabhängige Chronologie sei und die Kalenderchronologie-2012 verifiziere.

### 3.3.1.4 BRONK RAMSEY et al. (2020)

BRONK RAMSEY et al. (2020) liefern für die Radiokarbon-Überlieferung der Sedimente des Suigetsu-Sees (SG06) eine aktualisierte Kalender-Zeitskala und stellen diese für die Konstruktion der nächsten Radiokarbon-Kalibrationskurve (hier: IntCal20) bereit. Ihre Revision bezieht sich auf zwei zwischenzeitlich aktualisierte Basiselemente des Suigetsu-Altersmodells (s. Abschnitt 3.3.1.2): Suigetsu-Warvenchronologie (SCHLOLAUT et al. 2018, Abschnitt 3.3.1.3) und Speläothem-Zeitskala der Hulu-Höhle (CHENG et al. 2018, Abschnitt 3.4.2.3).

## Diskussion

BRONK RAMSEY et al. (2020) haben zur Erstellung der Suigetsu-Zeitskala-2020 die nunmehr verfügbaren U-Th-Alterswerte bzw. U-Th-Zeitskalen der Hulu-Speläotheme für den Skalenbereich 54.000 bis 10.600 kalibrierte [<sup>14</sup>C-] Jahre BP (SOUTHON et al. 2012, Abschnitt 3.4.2.2; CHENG et al. 2018) auf den SG06-Bohrkern übertragen. Die U-Th-Methode liefere die „absolute Datierungspräzision“.<sup>111</sup> Insofern unterscheiden sich die U-Th-basierten Suigetsu-Zeitskalen – 2012 versus 2020 – nicht grundsätzlich.

<sup>109</sup> „Since the Suigetsu varve count requires a relatively high interpolation rate of about 50%, we refer to the chronology as ‘varve based’ rather than just as ‘varve’ chronology“ (SCHLOLAUT et al. 2018, 352).

<sup>110</sup> In diesem Zusammenhang verwenden sie den Begriff „Interpretation“ in keiner Weise.

<sup>111</sup> „In order to make use of the relative dating strength of varves, and the absolute dating precision of U-Th methods, we have set out to provide a revised preliminary calendar timescale for Lake Suigetsu core SG06“ (BRONK RAMSEY et al. 2020, 991)

## 3.4 Höhlenminerale (Speläotheme)

### 3.4.1 Sagittarius Blue Hole (Bahamas)

#### 3.4.1.1 BECK et al. (2001)

BECK et al. (2001)<sup>112</sup> präsentieren <sup>14</sup>C- und <sup>230</sup>Th-Datenreihen von einem Stalagmiten der Sagittarius Blue Hole (Grand Bahama). Der 62 cm lange Stalagmit mit der Bezeichnung GB-89-24-1 wurde 1989 in einer Wassertiefe von 14,4 m geborgen. Die <sup>230</sup>Th-Alter, implizit Kalenderalter<sup>113</sup>, reichen von 45.000 bis 11.000 <sup>230</sup>Th-Jahre BP (ihre Fig. 1). Mit zunehmendem <sup>230</sup>Th-Alter nimmt die Differenz zwischen <sup>230</sup>Th-Altern und konventionellen <sup>14</sup>C-Altern<sup>114</sup> nominal zu: sie beträgt bei Skalenpunkt 11.000 <sup>230</sup>Th-Jahre BP etwa 2000 „Jahre“, bei Skalenpunkt 26.000 <sup>230</sup>Th-Jahre BP etwa 5000 „Jahre“ und bei Skalenpunkt 34.000 <sup>230</sup>Th-Jahre BP etwa 7000 „Jahre“ (ihre Fig. 3). Insgesamt sind 81 U-Th- und 278 Radiokarbonbestimmungen durchgeführt worden. Die Datensätze sind mit Ausnahme der grafischen Darstellung nicht veröffentlicht.

BECK et al. (2001) vergleichen ihre Reihe <sup>230</sup>Th-kalibrierter Radiokarbonalter u. a. mit den Reihen von Barbados, Mururoa und Papua-Neuguinea (BARD et al. 1998, Abschnitt 3.1.1.4; YOKOYAMA et al. 2000), dem Suigetsu-See (KITAGAWA & VAN DER PLICHT 1998, Abschnitt 3.3.1.1) und der Islandsee (VOELKER et al. 2018) (u. a. ihre Fig. 3A). Demzufolge würden die <sup>14</sup>C-Alter des Stalagmits GB-89-24-1 für den Skalenabschnitt von 26.000 bis 11.000 <sup>230</sup>Th-Jahre BP gut übereinstimmen, für den Skalenabschnitt > 30.000 <sup>230</sup>Th-Jahre BP nicht übereinstimmen.<sup>115</sup>

## Diskussion

Es ist festzustellen, dass auch BECK et al. (2001) <sup>230</sup>Th-Jahre und Kalender-Jahre gleichsetzen. Ein Teil der Datensätze wird in IntCal13 (REIMER et al. 2013a, 1872) – unter Einbeziehung einer Korrektur – aufgenommen.

#### 3.4.1.2 HOFFMANN et al. (2010)

HOFFMANN et al. (2010)<sup>116</sup> liefern <sup>14</sup>C- und <sup>230</sup>Th-Datenreihen für einen weiteren Speläothem der Sagittarius-Blue-Unterwasserhöhle (Grand Bahama). Dieser als GB89-25-3 bezeichnete Stalagmit besteht aus sechs Bruchstücken, die insgesamt 96 cm lang sind; ein mittleres Teil fehlt allerdings. Die Datenbasis besteht aus 80 U-Th- und 271 Radiokarbonaltern (ihre Supplementary Tables). Die <sup>230</sup>Th-Alter umfassen etwa 44.000 bis 27.500 (basale 70 cm) und etwa 15.000 bis 11.000 (oberste 26 cm) <sup>230</sup>Th-Jahre BP. Die <sup>230</sup>Th-kalibrierten <sup>14</sup>C-Alter für den

<sup>112</sup> Co-Autor ist u. a. R. L. EDWARDS.

<sup>113</sup> „Calendar age (or <sup>230</sup>Th) chronology“ (BECK et al. 2001, 2453).

<sup>114</sup> Die konventionellen <sup>14</sup>C-Alter sind um eine „dead carbon fraction“ (DCF) korrigiert (Abzug von 1450 ± 470 [<sup>14</sup>C-] Jahren).

<sup>115</sup> „DCF-corrected <sup>14</sup>C ages for GB-89-24-1 show good agreement with other records between 11 and 26 ka (Fig. 3A), although before 30 ka, none of these records are in accord with each other“ (BECK et al. 2001, 2454).

<sup>116</sup> Co-Autor ist u. a. J. W. BECK (siehe BECK et al. 2001).

Skalenabschnitt 44.000 bis 28.000  $^{230}\text{Th}$ -Jahre BP zeigten eine grundsätzliche Übereinstimmung mit den von Foraminiferen gewonnenen  $^{14}\text{C}$ -Datenreihen des Cariaco-Beckens (HUGHEN et al. 2006, Abschnitt 3.2.1.5) sowie des westiberischen Kontinentalrandes (BARD et al. 2004a, Abschnitt 3.2.2.1).

Die Autoren liefern des Weiteren 14 neue  $^{14}\text{C}$ -Analysen von Stalagmit GB89-24-1 für den Skalenabschnitt 44.000 bis 41.000  $^{230}\text{Th}$ -Jahre BP. Sie ermitteln im Vergleich zu BECK et al. (2001, Abschnitt 3.4.1.1) höhere und mit Stalagmit GB89-25-3 übereinstimmende  $^{14}\text{C}$ -Alter (ihre Fig. 5). Dieser Diskrepanz lägen wahrscheinlich Probleme beim Abzug des  $^{14}\text{C}$ -Labor-Untergrunds (blank) zugrunde.<sup>117</sup>

## Diskussion

HOFFMANN et al. (2010) zeigen auf, dass die zwei Stalagmiten der Sagittarius Blue Hole – hier  $^{230}\text{Th}$ -kalibriert – im Wesentlichen übereinstimmende Ergebnisse mit anderen kalibrierten Radiokarbonaufzeichnungen liefern. Dies war nach der Analyse des ersten Stalagmiten und der Interpretation der Daten in Teilen nicht der Fall (BECK et al. 2001). Unverständlich bleibt, warum der Labor-Untergrund nicht ausgewiesen wird und warum es sich *nur* „wahrscheinlich“ um ein Problem mit dem Labor-Untergrund handelte. Insofern sind solche Analysen nicht vollumfänglich nachvollziehbar.

Ein Großteil der Datensätze zu GB89-25-3 wird in IntCal13 (REIMER et al. 2013a) – unter Einbeziehung einer Korrektur – aufgenommen.

## 3.4.2 Hulu Cave (China)

### 3.4.2.1 WANG et al. (2001)

WANG et al. (2001)<sup>118</sup> legen von fünf Stalagmiten der Hulu-Höhle (28 km östlich Nanjing, China) – mit den Bezeichnungen MSD, MSL, PD, YT und H82 –  $\delta^{18}\text{O}$ -Reihenanalysen (Abb. 35) sowie insgesamt 59  $^{230}\text{Th}$ -Alter vor. Die ermittelten Alter liegen im Skalenabschnitt 74.875 bis 10.933  $^{230}\text{Th}$ -Jahre BP (ohne Unsicherheiten); das Altersmodell des  $\delta^{18}\text{O}$ -Hulu-Kompositprofils zeigt Abb. 36.

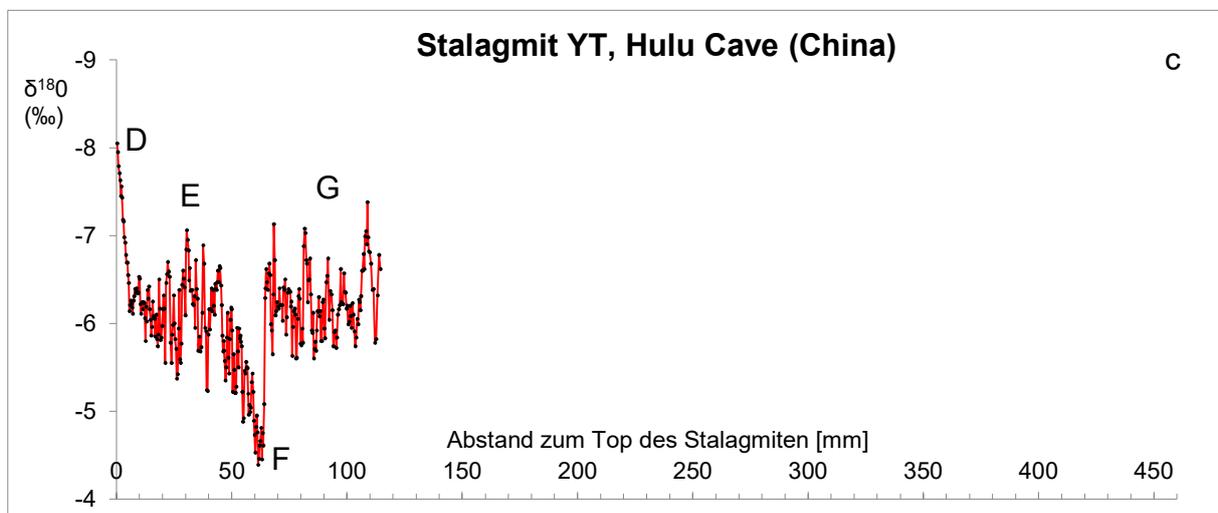
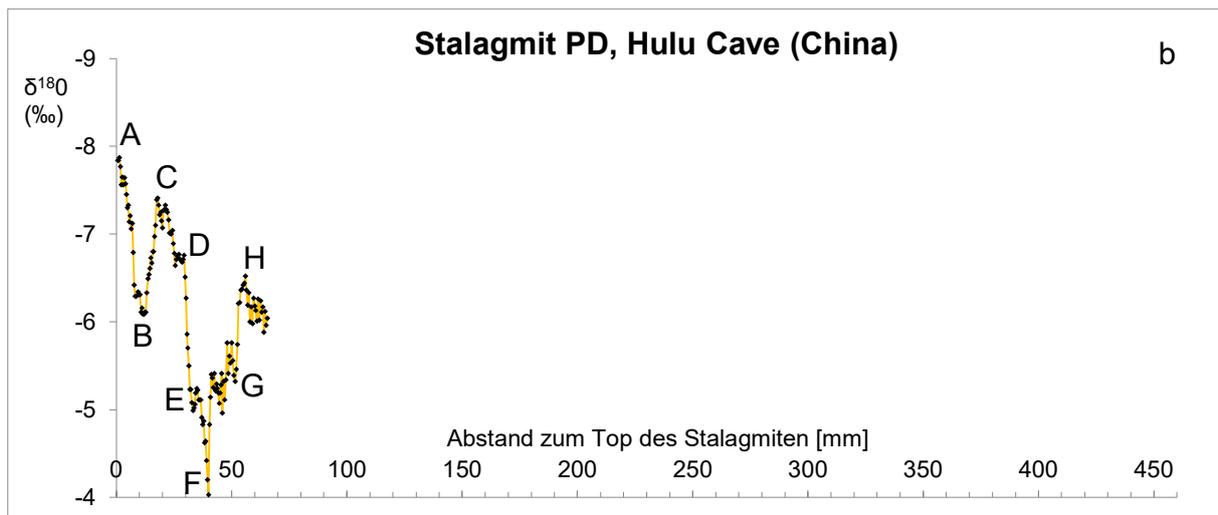
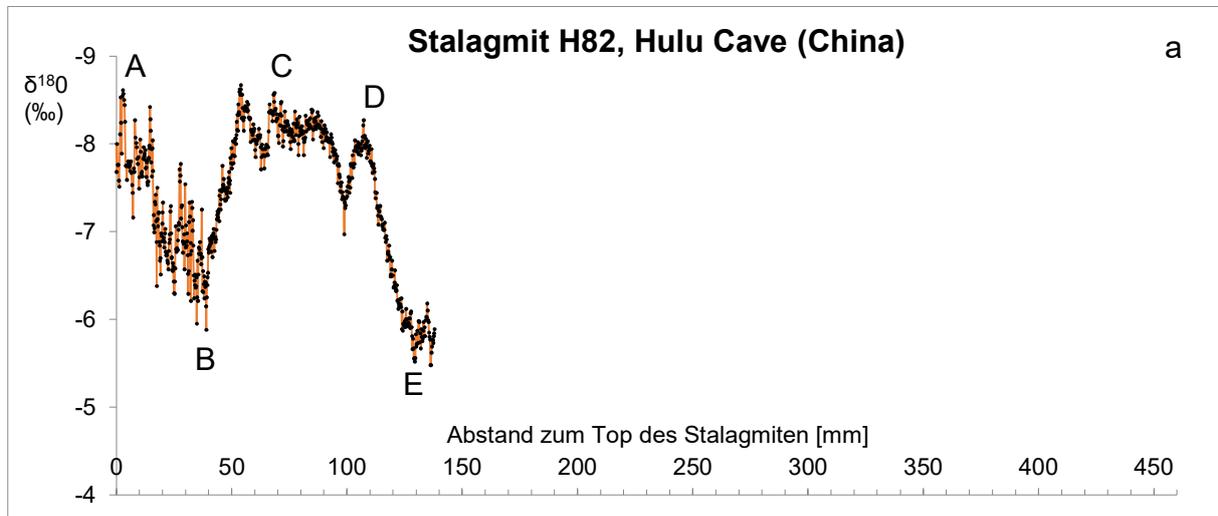
Die Autoren stellen eine „bemerkenswerte Ähnlichkeit“ der  $\delta^{18}\text{O}$ -Aufzeichnung der fünf Stalagmiten (kompiliert) und der  $\delta^{18}\text{O}$ -Aufzeichnung des GISP2-Eiskerns fest (ihre Fig. 1).<sup>119</sup> Die  $\delta^{18}\text{O}$ -Aufzeichnung für den Skalenabschnitt von 30.000 bis 11.000 [ $^{230}\text{Th}$ -] Jahre BP wird dahingehend interpretiert, dass die Zeitpunkte der Veränderungen des Monsuns im

<sup>117</sup> „These data are however in conflict with a previously published  $^{14}\text{C}$  data set for a stalagmite record from the Bahamas – GB-89-24-1 (Beck et al., 2001), which likely suffered from  $^{14}\text{C}$  analytical blank subtraction issues in the older part of the record“ (HOFFMANN et al. 2010, 1).

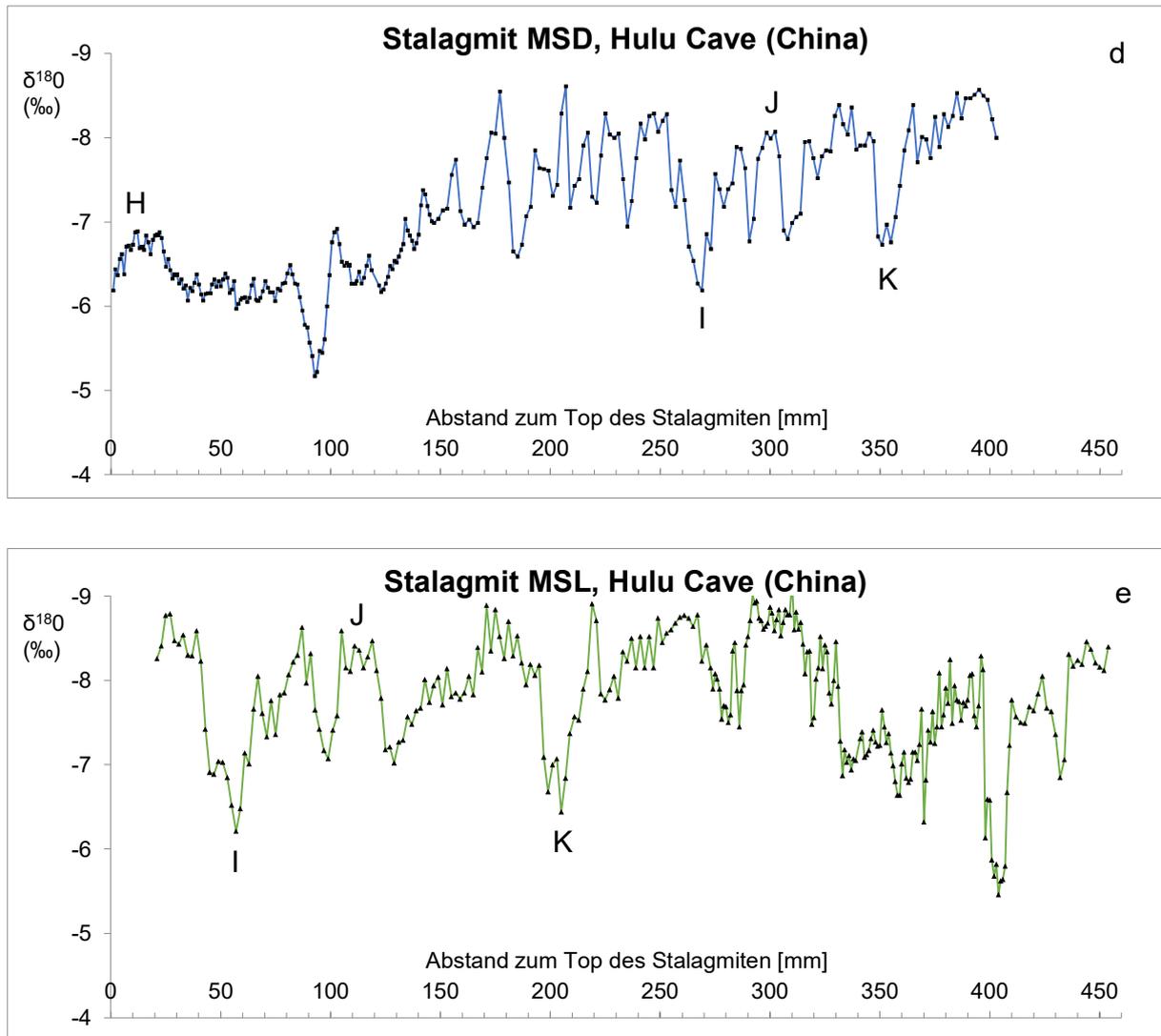
<sup>118</sup> Co-Autor ist u. a. R. L. EDWARDS.

<sup>119</sup> „Oxygen isotope records of five stalagmites from Hulu Cave near Nanjing bear a remarkable resemblance to oxygen isotope records from Greenland ice cores, suggesting that East Asian Monsoon intensity changed in concert with Greenland temperature between 11,000 and 75,000 years before the present (yr. B.P.)“ (WANG et al. 2001, 2345).

Allgemeinen mit den Zeitpunkten der Temperaturveränderungen des GISP2-Eiskerns übereinstimmen. Demnach werde für diesen Skalenabschnitt die GISP2-Chronologie durch die „absolut-datierte“ Hulu-Stalagmiten-Chronologie unterstützt.



(Beschriftung der Abbildungen: s. nächste Seite)



**Abb. 35**  $\delta^{18}\text{O}$ -Wertereihen der Stalagmiten der Hulu-Höhle.

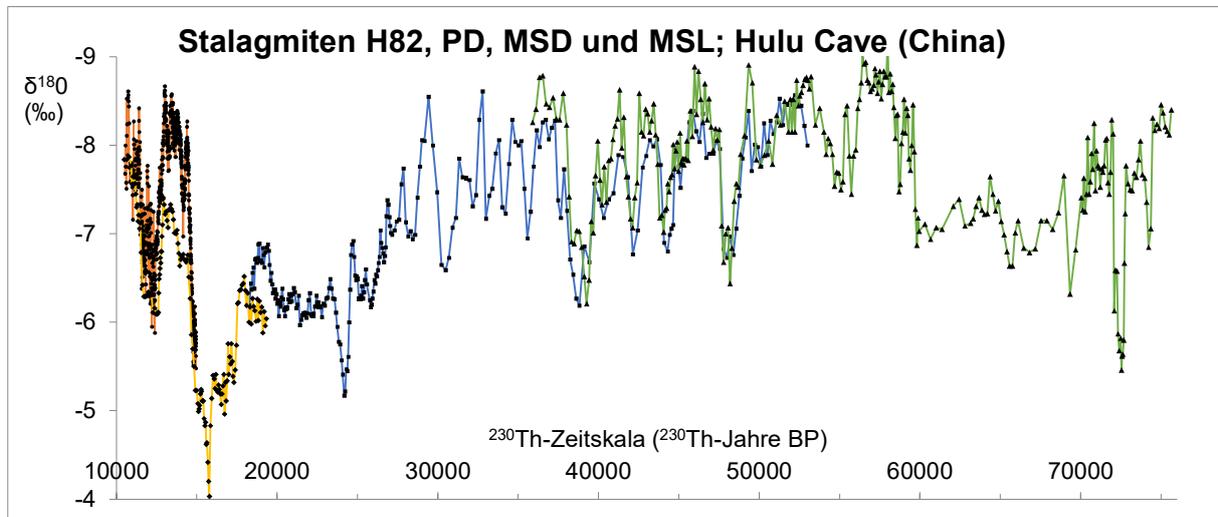
Punkt-/Liniendarstellung:  $\delta^{18}\text{O}$ -Reihen von fünf Stalagmiten in Beziehung zur Tiefe. a) H82 ( $N=723$ ); b) PD ( $N=149$ ); c) YT ( $N=338$ ); d) MSD ( $N=268$ ); e) MSL ( $N=285$ ). Zu beachten: Werte der Y-Achse liegen in umgekehrter Reihenfolge vor. – WANG et al. (2001) erstellen anhand überlappender  $\delta^{18}\text{O}$ -Profilabschnitte der Stalagmiten PD, MSD und MSL ein  $\delta^{18}\text{O}$ -Hulu-Kompositprofil (ihre Fig. 1). Insgesamt werden folgende Abschnitte chemostratigraphisch korreliert (ihre Fig. 1; hier Grafiken a bis e; Abschnittsmarkierungen A–K durch den Verfasser): Stalagmite H82 bis PD: Abschnitte A–E; PD–YT: Abschnitte D–G; PD–MSD: Abschnitt H; MSD–MSL: Abschnitte I–K. Ein Teil der Korrelationen ist wohl erst durch die (relativ-) zeitliche Zuordnung ( $^{230}\text{Th}$ -Jahre; s. Abb. 36) unterlegt worden. Visuell ist z. B. die Korrelation der  $\delta^{18}\text{O}$ -Profile der Stalagmiten PD und MSD nicht erkennbar (der überlappende Abschnitt ist zu kurz). Daten: [https://www.ncei.noaa.gov/pub/data/paleo/speleothem/china/hulu\\_2001.txt](https://www.ncei.noaa.gov/pub/data/paleo/speleothem/china/hulu_2001.txt)

$^{14}\text{C}$ -Datenreihen präsentieren WANG et al. (2001) nicht. Diese werden für Stalagmit H82 später von SOUTHON et al. (2012) geliefert (Abschnitt 3.4.2.2).

## Diskussion

**Hulu- $\delta^{18}\text{O}$ -Kompositprofil.** Das  $\delta^{18}\text{O}$ -Kompositprofil setzt sich aus den  $\delta^{18}\text{O}$ -Reihen der Stalagmiten PD, MSD und MSL zusammen (WANG et al. 2001, ihre Fig. 1; mit  $^{230}\text{Th}$ -Altersmodell). Visuell ist z. B. die Korrelation der  $\delta^{18}\text{O}$ -Profile der Stalagmiten PD und MSD nicht erkennbar;

der überlappende Abschnitt ist zu kurz (vgl. Abb. 35b/d und Abb. 36). Ein Teil der Korrelationen erfolgte wohl erst über eine (relativ-) zeitliche Zuordnung ( $^{230}\text{Th}$ -Jahre; s. Abb. 36).



**Abb. 36** Altersmodell der  $\delta^{18}\text{O}$ -Wertereihen der Stalagmiten der Hulu-Höhle.

Punkt-/Liniendarstellung: Kreise/orange Linie: H82 ( $N=723$ ); Rauten/goldene Linie: PD ( $N=149$ ); Vierecke/blau Linie: MSD ( $N=268$ ); Dreiecke/grüne Linie: MSL ( $N=285$ ). Zu den  $\delta^{18}\text{O}$ -Wertereihen und ihre Korrelation s. Abb. 35 (Stalagmit YT ist hier nicht dargestellt, da nur der Skalenabschnitt von 17.234 bis 14.439  $^{230}\text{Th}$ -Jahre BP abgedeckt wird). Altersmodell gemäß WANG et al. (2001) auf Basis von insgesamt 59  $^{230}\text{Th}$ -Alterswerten; die Autoren setzen  $^{230}\text{Th}$ -Jahre und Kalenderjahre gleich, sie bezeichnen ihre X-Achse mit „Age (yr. B.P.)“ (ihre Figs. 1–3). Zu beachten: Werte der Y-Achse liegen in umgekehrter Reihenfolge vor.

Daten: [https://www.ncei.noaa.gov/pub/data/paleo/speleothem/china/hulu\\_2001.txt](https://www.ncei.noaa.gov/pub/data/paleo/speleothem/china/hulu_2001.txt).

**Korrelation der  $\delta^{18}\text{O}$ -Aufzeichnungen: Hulu-Stalagmiten und GISP2-Eiskern.** Die „bemerkenswerte Ähnlichkeit“ der  $\delta^{18}\text{O}$ -Aufzeichnung der Hulu-Stalagmiten und der  $\delta^{18}\text{O}$ -Aufzeichnung des GISP2-Eiskerns (ihre Fig. 1) kann vom Verfasser visuell nicht nachvollzogen werden. Die Hulu- $\delta^{18}\text{O}$ -Aufzeichnung ist unvollständig: Es fehlt der Skalenbereich von ca. 10.000 bis 0  $^{230}\text{Th}$ -Jahre BP bzw. die Anknüpfung an die Gegenwart. Insofern ist unklar, ob vor (= jünger) der ersten ausgewiesenen  $\delta^{18}\text{O}$ -Maximum-Periode (Hulu) – korrespondierend mit einer  $\delta^{18}\text{O}$ -Minimum-Periode (GISP2) –, die hier der Jüngeren Dryas zugeordnet wird, weitere  $\delta^{18}\text{O}$ -Maximum-Perioden vorliegen. Des Weiteren zeigen korrelierte Abschnitte abschnittsweise keine synchron verlaufende  $\delta^{18}\text{O}$ -Aufzeichnung. Insgesamt aber ist – gemäß der Darstellung in Fig. 1 – eine gewisse Ähnlichkeit vorhanden, insbesondere wenn hauptsächlich die korrelierten  $\delta^{18}\text{O}$ -Peaks der Grönland-Interstadiale GIS 1 bis GIS 21 betrachtet werden. Möglicherweise bezieht sich das „Bemerkenswert“ auch darauf, dass die Lokalitäten etwa 8.500 km voneinander entfernt liegen.

**Altersmodell und Validierung.** Die Hulu-Stalagmiten gelten WANG et al. (2001) zufolge als „absolut-datiert“<sup>120</sup>, demnach ist 1  $^{230}\text{Th}$ -Jahr = 1 Kalender-Jahr. Die Autoren belegen das „absolut-datiert“ nicht. Hinsichtlich einer „präzisen Datierung“ anorganischen Calcits verweisen sie (S. 2346) auf LI et al. (1989), LUDWIG et al. (1992) und EDWARDS et al. (1987).

<sup>120</sup> Siehe Titel ihrer Arbeit: „A high-resolution absolute-dated Late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China.“

LI et al. (1989) berichten über U-Th-Bestimmungen an einem ertrunkenen Speläothem (Bezeichnung: DWBAH) der Bahamas. Die an dem 12 cm mächtigen „flowstone“ ermittelten  $^{230}\text{Th}$ -Alter reichen von 39.000 bis 274.000 [ $^{230}\text{Th}$ -] Jahre BP (ohne Unsicherheiten; ihre Fig. 2 und Table 1b). Die Alter werden in Jahren angegeben; implizit werden also  $^{230}\text{Th}$ -Jahre und Kalender-Jahre gleichgesetzt. Zur Validität der Alter gibt es keine Aussage.

LUDWIG et al. (1992) berichten über U-Th-Bestimmungen an dem 36 cm langen Kern DH-11 aus einer Wand des wassergefüllten Teils der Devils-Höhle in Nevada. Die 21 ermittelten  $^{230}\text{Th}$ -Alter reichen von ca. 60.300 (1 mm unter der Oberfläche) bis ca. 566.000 (357,5 mm unter der Oberfläche) [ $^{230}\text{Th}$ -] Jahre BP (gewichtete Durchschnittsalter ohne Unsicherheiten; ihre Table 2). Die Autoren machen eine kontinuierliche Calcit-Akkumulation geltend und weisen eine durchschnittliche Rate von 0,7 mm/1000 [ $^{230}\text{Th}$ -] Jahre aus. Auch hier werden die Alter in Jahren angegeben; implizit werden also  $^{230}\text{Th}$ -Jahre und Kalenderjahre gleichgesetzt. Zur Validität der Alter gibt es keine Aussage.

EDWARDS et al. (1987) berichten über U-Th-Bestimmungen an rezenten und fossilen Korallen von Vanuatu (Pazifik) sowie Barbados und der Dominikanischen Republik (Atlantik). Die Alter von acht Proben werden in ihrer Table 5 gelistet: Von Probe TAN-E-1g (Esperitu Santo),  $180 \pm 5$  [ $^{230}\text{Th}$ -] Jahre, liegt zusätzlich ein abgezähltes Alter anhand von (jährlichen) Wachstumsbändern vor: 176–182 [Zähl-] Jahre (S. 188; EDWARDS 1988, 280). Von den Proben CWS-F-1 (Esperitu Santo, Van.),  $845 \pm 8$  [ $^{230}\text{Th}$ -] Jahre, und CH-8 (Dom. Rep.),  $845 \pm 8$  [ $^{230}\text{Th}$ -] Jahre, liegen zusätzlich  $^{14}\text{C}$ -Alter vor:  $980 \pm 120$  (konventionelle) bzw. 780–1.010 (korrigierte/kalibrierte) und  $8.990 \pm 120$  (konventionelle) bzw.  $\sim 10.000$  (korrigierte/kalibrierte)  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP. Die Alter der Proben AFS-12 A-C (Barbados), ca. 122–125 Tausend [ $^{230}\text{Th}$ -] Jahre, sowie E-T-2 und E-L-3 (Efate, Van.), ca. 126–130 Tausend [ $^{230}\text{Th}$ -] Jahre, werden nicht verifiziert bzw. validiert. Für die durch Zählung von Wachstumsbändern validierten  $^{230}\text{Th}$ -Alter – das sind drei Proben mit bis zu 182 [Zähl-] Jahren vor Probennahme – resümiert EDWARDS (1988, in Übersetzung): „Es gibt also keinen Grund zu der Annahme, dass das  $^{230}\text{Th}$ -Alter von dem tatsächlichen Alter dieser Korallen abweicht.“<sup>121</sup> Für das gesamte Holozän ist solch ein Resümee bei EDWARDS (1988) allerdings nicht zu finden. EDWARDS et al. (1987) geben alle Alter in Jahren an; auch hier werden implizit  $^{230}\text{Th}$ -Jahre und Kalender-Jahre gleichgesetzt. Ihre Arbeit ist schließlich mit „(...) die präzise Zeitmessung über die letzten 500.000 Jahre“ überschrieben.

In keinem der drei Verweise wird der Ausdruck „absolut-datiert“ verwendet. Allerdings setzen alle Autorengruppen  $^{230}\text{Th}$ -Jahre und Kalender-Jahre für den Skalenbereich  $> 10.000$  bis nahezu 600.000  $^{230}\text{Th}$ -Jahre BP gleich; wie aber diese  $^{230}\text{Th}$ -Alter validiert worden sind, wird nicht behandelt.

Des Weiteren führen WANG et al. (2001) an, dass die Chronologie des Stalagmiten YT und der größte Teil der Chronologie des Stalagmiten H82 durch „Jahresbänder“ fixiert seien (Beschriftung zu ihrer Fig. 2). Mit anderen Worten, dass für bestimmte Stalagmitenabschnitte die Anzahl der  $^{230}\text{Th}$ -Jahre mit der Anzahl der gezählten „Jahresbänder“ übereinstimme.<sup>122</sup> WANG

<sup>121</sup> „There is, therefore, no reason to suspect that the  $^{230}\text{Th}$  ages are different from the true ages of these corals“ (EDWARDS 1988, 240).

<sup>122</sup> „Sample YT has visible banding throughout, and three  $^{230}\text{Th}$  ages with errors of 660 to 690 years. Numbers of bands are equal to differences in age between dated sub-samples, indicating that the banding is annual. We

et al. (2001) liefern aber für diese Beziehung keine Daten bzw. keine nachvollziehbare Dokumentation.<sup>123</sup>

WU et al. (2009), Co-Autor ist u. a. Y. WANG, führen für den Stalagmiten H82 für den (weiteren) Abschnitt von 165–280 mm Tiefe ebenfalls eine „jahres-gebänderte Struktur“ an. Allerdings könne eine Chronologie auf Basis einer Lagenzählung nicht erstellt werden, da teilweise kammartige Strukturen vorlägen, also die Schichtung aussetzen würde.<sup>124</sup>

Darüber hinaus ist festzustellen, dass WANG et al. (2001) ihre Hulu-<sup>230</sup>Th-Chronologie nicht mit der GISP2-Chronologie verifizieren. Der Hulu/GISP2-Vergleich dient zum Aufzeigen von Gemeinsamkeiten und Differenzen der  $\delta^{18}\text{O}$ -Aufzeichnungen und Chronologien. Zu Letzterem bildet die Hulu-<sup>230</sup>Th-Chronologie, da „absolut-datiert“, den Master – und damit die Kalender-Zeitskala.<sup>125</sup>

Zu einer weiteren Diskussion s. unter „CHENG et al. (2018)“, Abschnitt 3.4.2.3.

### 3.4.2.2 SOUTHON et al. (2012)

SOUTHON et al. (2012) liefern für das 35 cm lange Speläothem H82 der Hulu-Höhle (s. WANG et al. 2001<sup>126</sup>; Abschnitt 3.4.2.1) umfangreiche <sup>14</sup>C- und <sup>230</sup>Th-Datenreihen. Mit zunehmendem Abstand vom Top des Stalagmiten nehmen die Alter – beginnend mit  $10.734 \pm 180$  <sup>230</sup>Th-Jahre BP – zu, wobei die Differenz zwischen <sup>230</sup>Th-Altern und <sup>14</sup>C-Altern nominal (ohne Unsicherheiten) kontinuierlich von 1000 (Top) auf 4.000–4.500 „Jahre“ (nahe der Basis) ansteigt (Abb. 37). Die Autoren setzen <sup>230</sup>Th-Jahre mit Kalenderjahren gleich (u. a. ihre Fig. 2). Sie geben durchschnittliche Wachstumsraten von 6 mm/1000 [<sup>230</sup>Th-] Jahre (Abschnitt 310–260 mm) und 30 mm/1000 [<sup>230</sup>Th-] Jahre (Abschnitt 260–0 mm) an.

Ein Vergleich mit anderen <sup>14</sup>C-Kalibrationsdaten zeige, so die Autoren, dass eine „gute generelle Übereinstimmung“ vorliege: Bahamas-Speläothem (BECK et al. 2001), insbesondere für den Skalenbereich von 21.000 bis 15.000 kalibrierte <sup>14</sup>C-Jahre BP; Cariaco-Becken (HUGHEN et al. 2006), punktuell mit Differenzen von „300–400 Jahren“; Suigetsu-See (KITAGAWA & VAN DER PULCHT 2000), mit Differenzen von „mehreren Hundert Jahren“ > Skalenpunkt 16.000 kalibrierte <sup>14</sup>C-Jahre BP; Foraminiferen (BARD et al. 2004), punktuell mit Differenzen von „400 Jahren“; Korallen (CUTLER et al. 2004; FAIRBANKS et al. 2005), abschnittsweise mit Differenzen von 350–500 bzw. 100–250 <sup>14</sup>C-Jahren.

Ein Großteil der Datensätze wird in IntCal13 (REIMER et al. 2013a) aufgenommen.

---

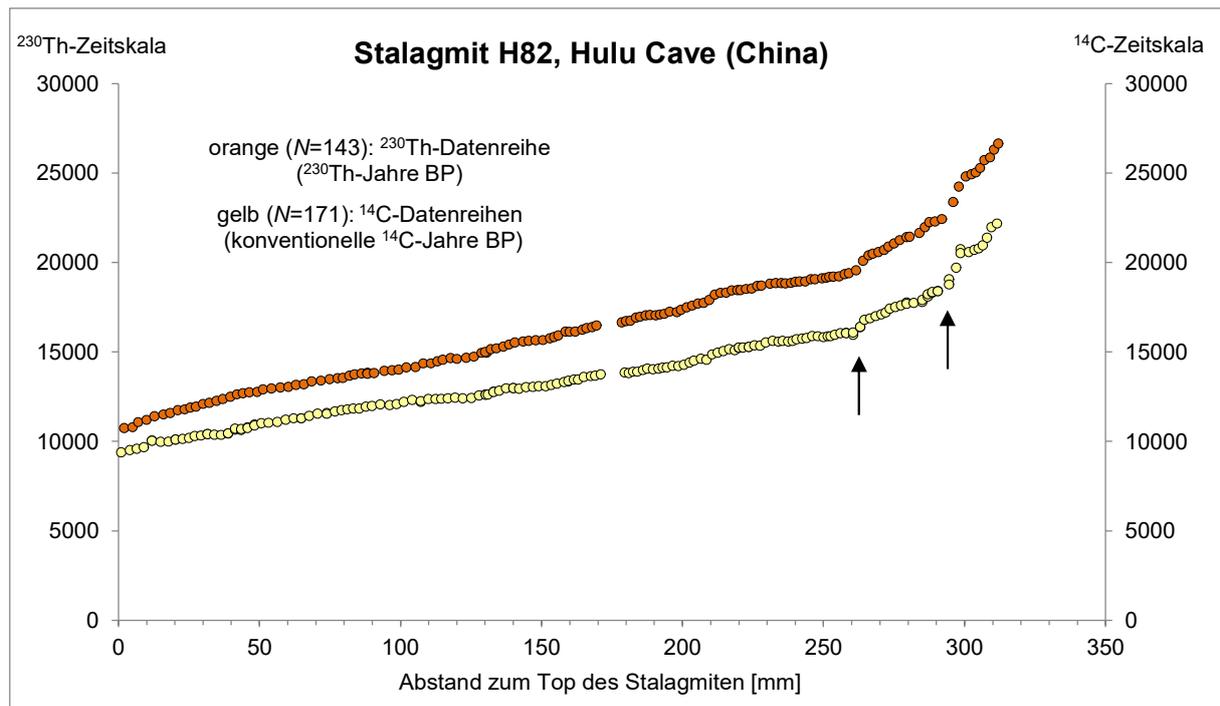
established the time scale for sample H82 with two <sup>230</sup>Th ages (Fig. 2) (14 [Endnote, MK; siehe Fußnote 123]), by matching its oxygen isotope record to YT's at 14.6 thousand years ago (ka), and by band counting between 11.0 and 11.8 ka and between 13.0 and 14.6 ka“ (WANG et al. 2001, 2346).

<sup>123</sup> Möglicherweise enthält das in ihrer Endnote 14 ausgewiesene Dokument solche Informationen: „14. Supplemental data are available at *Science Online* at [www.sciencemag.org/cgi/content/full/294/5550/2345/DC1](http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/294/5550/2345/DC1).“ Allerdings steht in *Science Online* ein „supplemental data“ nicht zur Verfügung (Stand März 2023).

<sup>124</sup> Wu et al. (2009, 362) nennen beispielhaft: „For example, a very low growth rate (17  $\mu\text{m}/\text{a}$ ) between 190–210 mm depth ( $18294 \pm 98$ – $17128 \pm 86$  a BP) indeed suggests the loss of annual layers because of the comb-like structure.“

<sup>125</sup> „With these correlations, we assign times to Greenland events with Hulu ages“ (WANG et al. 2001, 2346).

<sup>126</sup> Im Vergleich zu WANG et al. (2001) handelt es sich um einen anderen Quadranten des H82-Speläothems.



**Abb. 37** Stalagmit H82: Alters-zu-Tiefen-Beziehung.

Punkt-/Kreisdarstellung, jeweils ohne Unsicherheiten. Die konventionellen  $^{14}\text{C}$ -Alter sind um eine „dead carbon fraction“ (DCF) korrigiert (Abzug von 450 [ $^{14}\text{C}$ -] Jahren). SOUTHON et al. (2012, 35) interpretieren die Versätze bei den Positionen 263 und 295 mm (schwarze Pfeile) als Phasen sehr langsamen Stalagmitenwachstums oder als Phasen einer Wachstumsunterbrechung (Hiaten). Bei Position 172 mm fehlen drei mm Calcit; demzufolge sind die Datenreihen unterbrochen. Daten aus SOUTHON et al. (2012). Diskussion s. Textteil.

## Diskussion

SOUTHON et al. (2012) präsentieren erstmals  $^{14}\text{C}$ - und  $^{230}\text{Th}$ -Datenreihen für einen quasi-kontinuierlich gebildeten Gesteinskörper (Speläothem-Calciumcarbonat-Akkumulation) – im Vergleich zu den mehr punktuell gewonnenen Korallendaten (Abschnitt 3.1). Allerdings wird nur der Skalenabschnitt von etwa 25.000 bis 10.000  $^{230}\text{Th}$ -Jahre BP abgedeckt (Abb. 37). Die Speläothem-Ergebnisse – mit Bezug auf das Verhältnis der  $^{14}\text{C}$ -Alter zu den  $^{230}\text{Th}$ -Altern – entsprechen im Wesentlichen denen der Korallenproben (z. B. FAIRBANKS et al. 2005, Abschnitt 3.1.1.6).

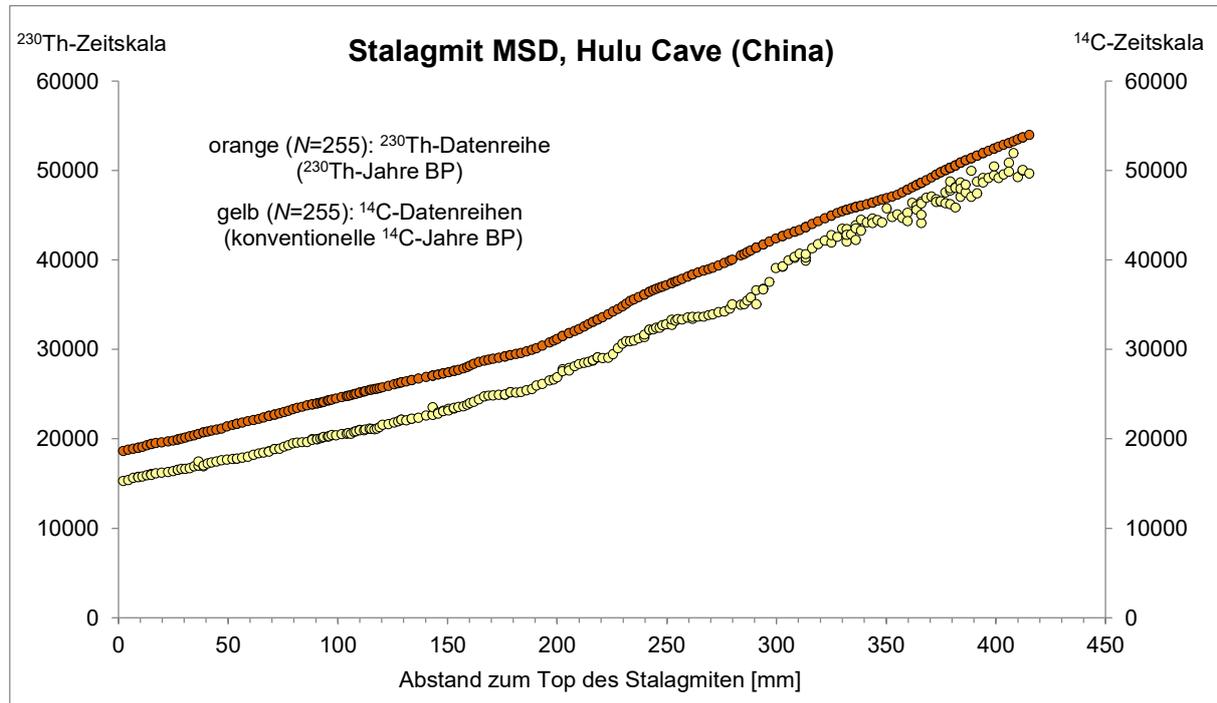
Die Autoren thematisieren eine Validierung der U-Th-Alter nicht. Denn mit der U-Th-Methode könne eine absolute Chronologie zugewiesen werden.<sup>127</sup>

### 3.4.2.3 CHENG et al. (2018)

CHENG et al. (2018) präsentieren ~300 paarweise ermittelte  $^{14}\text{C}$ - und  $^{230}\text{Th}$ -Alter von zwei Stalagmiten (MSD, MSL) der Hulu-Höhle, die den Skalenabschnitt von 54.000 bis 18.500  $^{230}\text{Th}$ -Jahre BP umfassen. Sie folgern, dass damit eine präzise Aufzeichnung des atmosphärischen

<sup>127</sup> „Speleothems are cave calcite deposits precipitated from drip water, that represent a potential source of temporally well constrained atmospheric  $^{14}\text{C}$  records, because an absolute chronology can be assigned using U-Th series dating with a correction for any detrital Th initially incorporated into the crystal matrix“ (SOUTHON et al. 2012, 33).

$^{14}\text{C}$  vervollständigt worden sei, die den gesamten Bereich der  $^{14}\text{C}$ -Datierungsmethode abdecke ( $\sim 54.000$  [kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -] Jahre).<sup>128</sup>



**Abb. 38** Stalagmit MSD (Hulu-Höhle): Alters-zu-Tiefen-Beziehung.

Punkt-/Kreisdarstellung, jeweils ohne Unsicherheiten. Die konventionellen  $^{14}\text{C}$ -Alter sind um eine „dead carbon fraction“ (DCF) korrigiert (Abzug von 450 [ $^{14}\text{C}$ -] Jahren). Die  $^{14}\text{C}$ -Datenreihe enthält Duplikate und als Ausreißer qualifizierte Werte. Daten aus CHENG et al. (2018), jeweils ohne Unsicherheiten. Diskussion s. Textteil.

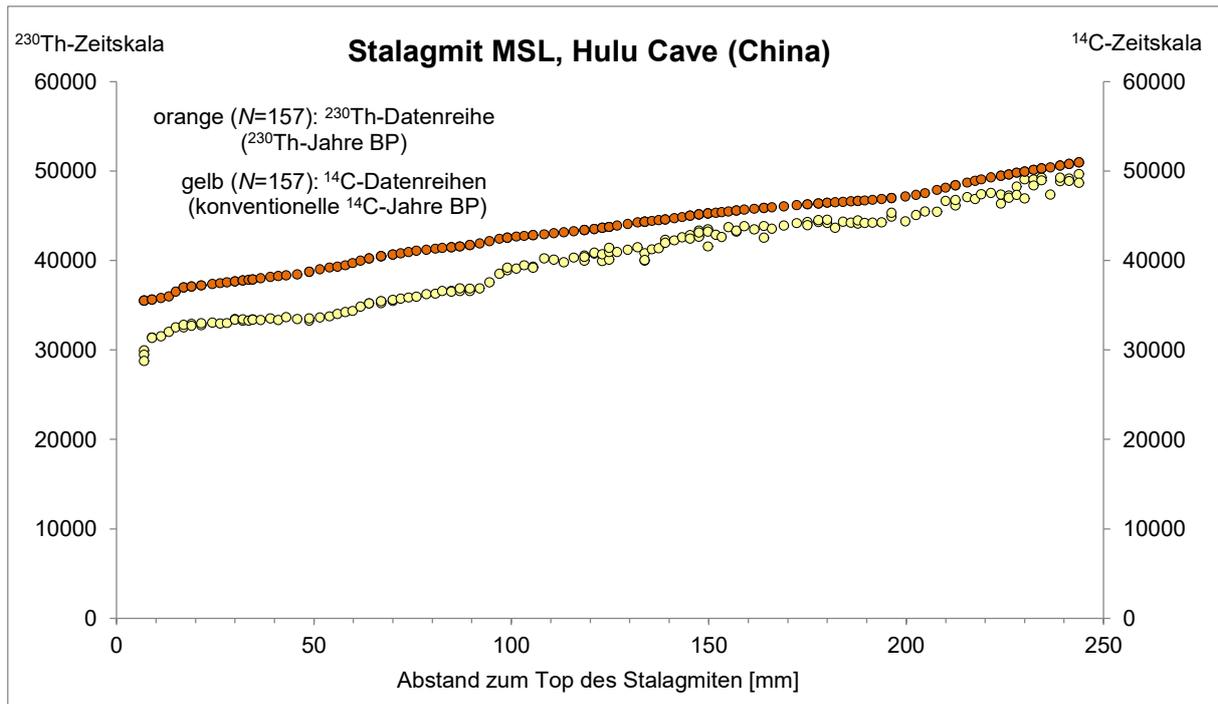
Die Alters-zu-Tiefenbeziehungen der Stalagmiten MSD und MSL zeigen Abb. 38 und Abb. 39. Übereinstimmend nähern sich die  $^{14}\text{C}$ -Werte ab Skalenpunkt  $> 37.000$   $^{230}\text{Th}$ -Jahre BP mit größeren Schwankungen nominal den  $^{230}\text{Th}$ -Werten an (Abb. 40). Während CHENG et al. (2018) in ihrem Zusatzmaterial in entsprechenden Grafiken die X-Achse mit „ $^{230}\text{Th}$ -Alter (kyr, BP)“ bezeichnen (ihre Figs. S1, S6, S10), wird diese im Artikel mit „Age (ka B.P.)“ benannt. Demzufolge ist ein  $^{230}\text{Th}$ -Jahr gleich ein [Kalender-] Jahr.

Zur Genauigkeit („accuracy“) der  $^{14}\text{C}$ -Aufzeichnung – dies bezieht auch die zeitliche Kalibrierung mit ein – werden von CHENG et al. (2018) folgende Argumente vorgetragen:<sup>129</sup>

- 1) Der jüngere Abschnitt der H82-Aufzeichnung stimme mit der dendrochronologischen Aufzeichnung überein (mit Verweis auf SOUTON et al. 2012).
- 2) Die überlappenden Abschnitte der drei Stalagmiten (H82, MSD, MSL) seien intern konsistent.
- 3) Einer der höchsten Werte der Aufzeichnung –  $\Delta^{14}\text{C} = 700$  ‰;  $\sim 39.850$  [kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -] Jahre – stimme mit einem unabhängigen Datenpunkt überein: Holz in Verbindung mit dem Kampanischen Ignimbrit (Ar-Ar-Datierung; GIACCIO et al. 2017).

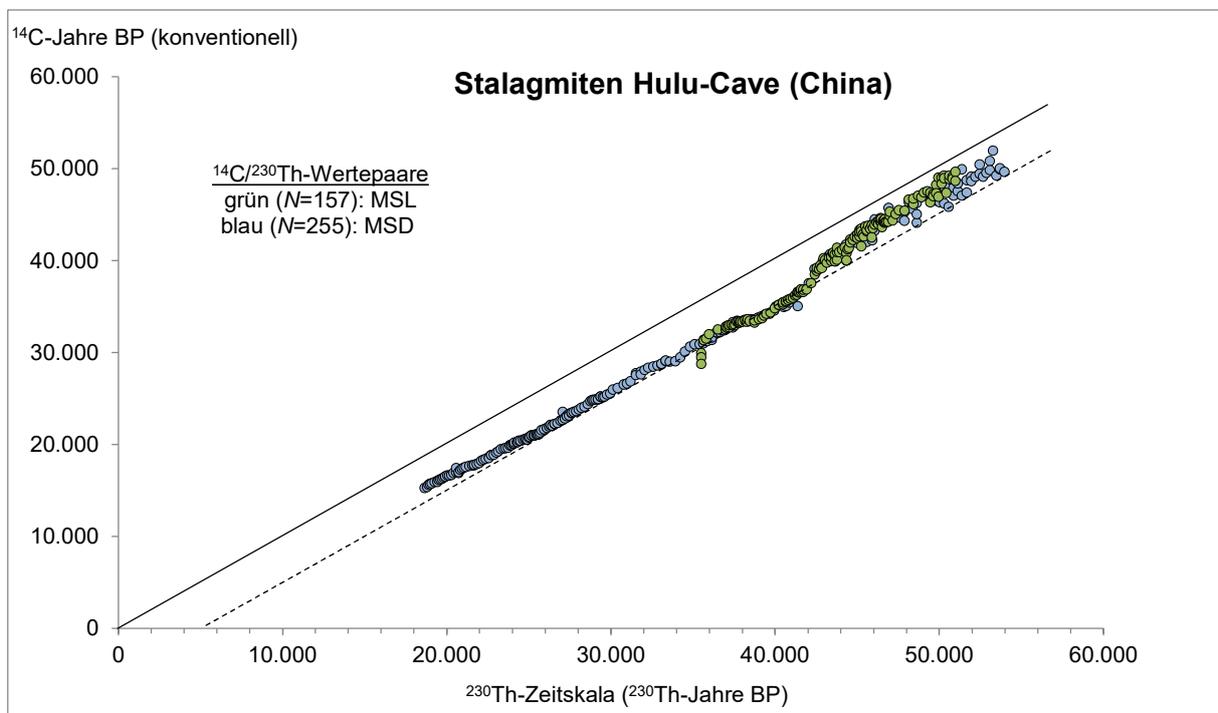
<sup>128</sup> „Paired measurements of  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  and  $^{230}\text{Th}$  ages from two Hulu Cave stalagmites complete a precise record of atmospheric  $^{14}\text{C}$  covering the full range of the  $^{14}\text{C}$  dating method ( $\sim 54,000$  years)“ (CHENG et al. 2018, 1293).

<sup>129</sup> „A number of arguments support the accuracy of the record“ (CHENG et al. 2018, 1293).



**Abb. 39** Stalagmit MSL (Hulu-Höhle): Alters-zu-Tiefen-Beziehung.

Punkt-/Kreisdarstellung, jeweils ohne Unsicherheiten. Die konventionellen  $^{14}\text{C}$ -Alter sind um eine „dead carbon fraction“ (DCF) korrigiert (Abzug von 450 [ $^{14}\text{C}$ -] Jahren). Die  $^{14}\text{C}$ -Datenreihe enthält Duplikate und als Ausreißer qualifizierte Werte. Daten aus CHENG et al. (2018). Diskussion s. Textteil.



**Abb. 40** Stalagmiten der Hulu-Höhle: Beziehung  $^{14}\text{C}$ -Alter zu  $^{230}\text{Th}$ -Alter.

Punkt-/Kreisdarstellung, jeweils ohne Unsicherheiten. Orientierungslinien: schwarz, durchgezogen: 1:1-Beziehung; schwarz, gestrichelt: Versatz um 5.000 „Jahre“. Die konventionellen  $^{14}\text{C}$ -Alter sind um eine „dead carbon fraction“ (DCF) korrigiert (Abzug von 450 [ $^{14}\text{C}$ -] Jahren). Die  $^{14}\text{C}$ -Datenreihe enthält Duplikate und als Ausreißer qualifizierte Werte. Daten aus CHENG et al. (2018). Diskussion s. Textteil.

- 4) Zwei schwimmende Dendrochronologien (TURNERY et al. 2010, 2016) könnten auf die Hulu-Kalibration so platziert werden, dass die allgemeinen Trends und die feineren Merkmale mit der Hulu-Kurve übereinstimmen.

Hierzu wird angemerkt:

**Zu Punkt 1.** Die Übereinstimmung bei SOUTHON et al. (2012) bezieht sich auf den IntCal09-Baumringdatensatz (Skalenabschnitt von ca. 10.700 bis 12.550 kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP; REIMER et al. 2009) sowie die Erweiterung bis Skalenpunkt 13.900 kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP durch eine Verankerung der schwimmenden, spätglazialen (europäischen) Kiefernchronologie (KROMER et al. 2004, SCHAUB et al. 2008) über eine tasmanische Kiefernchronologie (Brückenkonstruktion, HUA et al. 2009) mittels  $^{14}\text{C}$ -Wiggle-Matching. Diese Brückenkonstruktion ist allerdings in mehrfacher Weise fragwürdig (s. KOTULLA 2019).

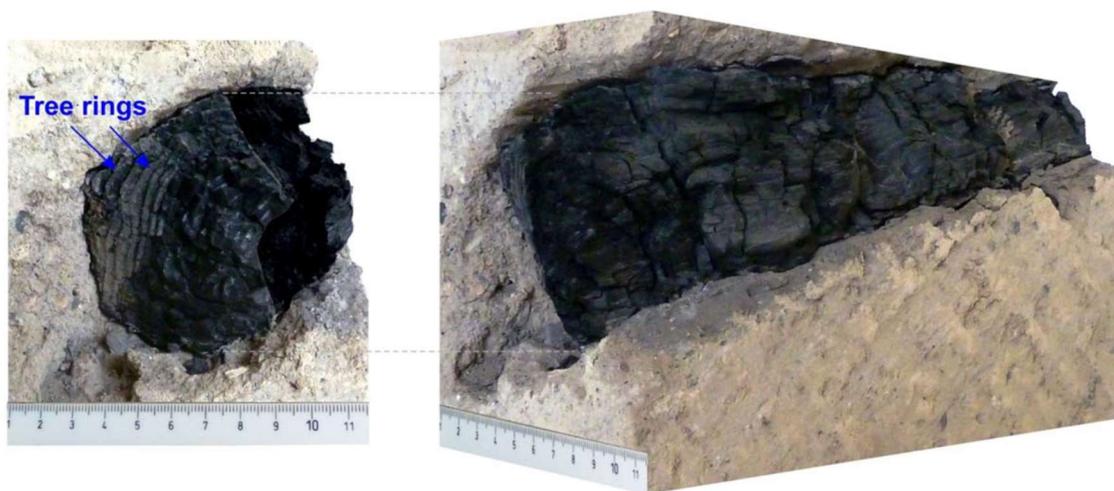
**Zu Punkt 2.** Die interne Konsistenz bezieht sich wohl auf das Verhältnis der  $^{14}\text{C}$ -Werte zu den  $^{230}\text{Th}$ -Werten, insbesondere wenn die  $\Delta^{14}\text{C}$ -Werte zugrunde gelegt werden (CHENG et al. 2018, ihre Fig. S6). Ein Vergleich der Stratigraphie der Stalagmiten bzw. der chemostratigraphischen Wertereihen (z. B.  $\delta^{18}\text{O}$ ) wird nicht angeführt. Die in ihrer Fig. 4D ausgewiesene Hulu- $\delta^{18}\text{O}$ -Kompositkurve für den Skalenabschnitt von 55.000 bis 0 [ $^{230}\text{Th}$ ] Jahre BP entstammt CHENG et al. (2016). Dort wird u. a. auf die Arbeiten von WANG et al. (2001) und YUAN et al. (2004) verwiesen. Zu WANG et al. (2001) s. Abschnitt 3.4.2.1.

**Zu Punkt 3.** GIACCIO et al. (2017) vermelden für ein verkohltes Stück Holz, das im Gelben Tuff des Kampanischen Ignimbrits (Italien) eingeschlossen ist, ein gewichtetes, mittleres  $^{14}\text{C}$ -Alter von  $34.290 \pm 90$  konventionellen  $^{14}\text{C}$ -Jahren BP (Basis: 7 Proben). Des Weiteren vermelden sie für aus den pyroklastischen Strömen extrahierte Sanidin-Kristalle (3 Fundlokalitäten) ein „konsolidiertes“  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -Alter von  $39.850 \pm 140$   $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -Jahren [vor heute] (Basis: 49 Proben). Diese Ergebnisse, so die Autoren, lieferten ein robustes Paar von  $^{14}\text{C}$ - und  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -Altern zur Verfeinerung der Radiokarbon-Kalibrierungskurve und der spätpleistozänen Zeitskala bei ca. 40.000 [kalibrierten  $^{14}\text{C}$ -] Jahren [vor heute].<sup>130</sup> Dieses „ $^{14}\text{C}$ - und  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -Alters-Paar“ bei Skalenpunkt 34.000 konventionelle  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP passt hinsichtlich einer Kalibrierung – nominal ein Plus von etwa 5000–6000 „Jahren“ – zwar zu anderen Versuchen (z. B. FAIRBANKS et al. 2005, Abb. 12). Aber es ist nicht bekannt, ob die  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -Alter valide sind. Eine Ar-Ar-Datierung an Sanidin-Kristallen des historisch dokumentierten Ausbruchs des Vesuv im Jahre 79 n. Chr. war nicht korrekt (RENNE et al. 1997).<sup>131</sup> GIACCIO et al. (2008) weisen in einer früheren Arbeit für den basalen Teil (Bims) des Kampanischen Ignimbrits ein  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -Alter von  $40.160 \pm 210$  und  $41.020 \pm 260$  [ $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ] Jahre BP aus, für den überlagernden Teil der pyroklastischen Ströme  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -Alter von  $39.690 \pm 120$  (Gelber Tuff),  $39.170 \pm 70$  (Grauer Tuff) und  $39.429 \pm 106$  (Brekzien) [ $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ] Jahre BP (ihre Fig. 1c; Werte aus DE VIVO et al. 2001). Da

<sup>130</sup> „These results provide a robust pair of  $^{14}\text{C}$  and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages for refining both the radiocarbon calibration curve and the Late Pleistocene time-scale at ca. 40 ka“ (GIACCIO et al. 2017, 1).

<sup>131</sup> RENNE et al. (1997) datieren Sanidin-Kristalle des historisch dokumentierten Ausbruchs des Vesuv im Jahre 79 n. Chr. und liefern ein übereinstimmendes Ergebnis: Ein  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -Alter von  $1925 \pm 94$  Jahren vor heute im Vergleich zu kalendarisch 1918 Jahren vor heute (jeweils bezogen auf 1997). Dieses prominent ausgewiesene  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -Alter aber war zuvor korrigiert worden, nämlich um einen überschüssigen Argon-Anteil, der sich aus dem bekannten (wirklichen) Alter der Probe ermitteln ließ. Ohne diese Korrektur hätte das  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -Verhältnis einem Alter von  $3300 \pm 500$  Jahren entsprochen.

es sich genetisch wohl um *ein* Ausbruchereignis handelt – wahrscheinlich mit einer Dauer von mehreren Tagen – passt eine gemittelte Differenz von ca. 1000 [ $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -] Jahren zwischen den Fallablagerungen der Basis und den aufliegenden Stromablagerungen nicht zur *Real*-Situation; denn implizit gilt: 1  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -Jahr = 1 Kalender-Jahr.<sup>132</sup> Ältere Datierungsversuche liegen u. a. vor von DEINO et al. (1994),  $37.100 \pm 400$  [ $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -] Jahre BP, RAMRATH et al. (1999),  $36.000 \pm 1000$  [ $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -] Jahre BP (Aschenlage im Lago Grande di Monticchio), und ZOLITSCHKA & NEGENDANK (1996), 32.970 [Warven-] Jahre BP [implizit Kalenderjahre] (Lago Grande di Monticchio, „Warven“-zählung).<sup>133</sup> Insgesamt ist ein Trend zu nominal höheren Ar-Ar-Alterswerten zu beobachten, der auffällig dazu passt, dass frühere  $^{14}\text{C}$ -Alter, die als Kalender-Alter aufgefasst worden sind, im Laufe der Zeit als zu niedrig interpretiert worden sind bzw. werden (s. hierzu auch Kapitel 4).



**Abb. 41** Verkohltes Holz im Gelben Tuff des Kampanischen Ignimbrits.

Das Stück Holz ist etwa 25 cm lang und hat einen maximalen Durchmesser von 8 cm; etwa 15 Jahrringe (tree rings) sind erkennbar. Es stammt aus einem Steinbruch in der Nähe der Ortschaft Dugenta (etwa 40 km NO des Ausbruchsortes, den Phlegräischen Feldern bei Neapel). In Dugenta sind die Ablagerungen des pyroklastischen Stroms etwa 15 m mächtig. Die Autoren gehen davon aus, dass das Baumfragment zur Oberflächenvegetation gehörte, die durch die vulkanische Eruption zerstört wurde. Demzufolge ist das Ablagerungsalter des verkohlten Holzes gleich dem Eruptionsalter (das biologische Alter des Baumes ist vernachlässigbar). Wiedergabe von Fig. S1 aus GIACCIO et al. (2017) in *Scientific Reports*; CC BY 4.0.

Dem „unabhängigen“ Vergleich mit dem Ignimbrit-Wertepaar  $34.290 \pm 90$  konventionelle  $^{14}\text{C}$ -Jahre/ $39.850 \pm 140$   $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -Jahre BP (s. o.) liegen wohl die Hulu-Wertepaare mit  $34.560$  konventionelle  $^{14}\text{C}$ -Jahre/ $39.927$   $^{230}\text{Th}$ -Jahre BP (Probe A-h, MSD-Reihe;  $\Delta^{14}\text{C} = 695$  ‰) und  $34.360$  konventionelle  $^{14}\text{C}$ -Jahre/ $39.707$   $^{230}\text{Th}$ -Jahre BP (Probe LB-o, MSL-Reihe;  $\Delta^{14}\text{C} = 692$  ‰) zugrunde (vgl. CHENG et al. 2018, Fig. 2). Auf Basis der konventionellen  $^{14}\text{C}$ -Jahre liegt nominal

<sup>132</sup> DE VIVO et al. (2001, 56) ist diese Diskrepanz bewusst. Sie schreiben mit Bezug auf die Proben des basalen Teils von „scheinbaren Altern“. Die Proben enthielten, so ihre Interpretation, sehr geringe Mengen kontaminierter Sanidine, möglicherweise von der älteren Taurano-Tuffserie ( $> 157.000$  [ $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -] Jahre BP). Deshalb seien diese Alter auch nicht in die Berechnung des gewichteten, mittleren Alters des Kampanischen Ignimbrits einbezogen worden.

<sup>133</sup> Aufzählung nach FEDELE et al. (2003, 304).

eine Koinzidenz vor; diese besagt aber nicht, dass  $1^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}\text{-Jahr} = 1^{230}\text{Th}\text{-Jahr} = 1\text{ Kalender-Jahr}$  ist.

**Zu Punkt 4.** CHENG et al. (2018) beziehen sich mit Verweis auf TURNEY et al. (2010, 2016) auf  $^{14}\text{C}$ -Datenreihen von zwei schwimmenden Baumringchronologien für neuseeländische Kauri-Bäume (*Agathis australis*). Diese seien auf die Hulu-Radiokarbon-Kalibrationskurve so platziert bzw. so eingephasst (getuned) worden, dass ihre „Gesamtrends und feineren Skalenmerkmale“ mit der  $^{14}\text{C}$ -Hulu-Kurve übereinstimmten (ihre Figs. 1, 2 und S10).<sup>134,135</sup> Mit Bezug auf die Genauigkeit der  $^{14}\text{C}$ -Aufzeichnung und der zeitlichen Kalibration soll dies wohl auch auf die Anzahl der „Jahre“ zutreffen: Die Anzahl der ausgewiesenen kalibrierten  $^{14}\text{C}$ -Jahre (= Kalender-Jahre) passen für zwei Abschnitte der Hulu- $^{230}\text{Th}$ -Zeitskala (= Kalender-Zeitskala) zu der Anzahl der Jahrringe der Baumringchronologien. Demzufolge würden die Baumringchronologien die Kalibration bzw. die Genauigkeit der Kalibration – jedenfalls für zwei Abschnitte mit einer Dauer von 1.350 vs. 1.100 bzw. 2.000 vs. 2.100 „Jahren“ (s. u.) – bestätigen.

Im Fall der  $^{14}\text{C}$ -älteren Baumringchronologie handelt es sich um Kauri-Bäume der Lokalität Mangawhai Heads, ca. 70 km N Auckland. Nach TURNEY et al. (2010) ist die schwimmende Chronologie mit sechs Jahrringbreiten-Reihen, die von sechs unterschiedlichen Bäumen stammten, mittels Kreuzdatierung konstruiert worden: Sie umfasst 1.410 Jahrringe (Dendro-Jahre); die konventionellen  $^{14}\text{C}$ -Alter reichen von 40.900 bis 38.300  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP.<sup>136</sup> In der „Supplementary Information“ zu TURNEY et al. (2010) werden hierzu zwei  $^{14}\text{C}$ -Datenreihen von unterschiedlichen Laboratorien aufgeführt, die sich auf jeweils 13 Proben eines gleichen Segments der Mangawhai-Bäume 4 und 13 beziehen. TURNEY et al. (2010) passen diese  $^{14}\text{C}$ -datierte Mangawhai-Sequenz (1.350 Jahrringe) mittels „Wiggle-Matching“ ein in die Radiokarbon-Kalibrationskurve IntCal09 sowie in die an die Hulu- $^{230}\text{Th}$ -Zeitskala angepasste Cariaco-Chronologie (HUGHEN et al. 2006, Abschnitt 3.2.1.5). Die Übereinstimmung mit IntCal09 sei schwach, mit Cariaco exzellent. Die Mangawhai-Sequenz „belegt“ die Circa-Skalenabschnitte von 44.300 bis 43.100 (IntCal09) bzw. von 43.900 bis 42.700 kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP (Cariaco) (TURNEY et al. 2010, Figs. 2 und 3). Bei CHENG et al. (2018, Fig. S10), die in ähnlicher Weise vorgehen, „belegt“ die Mangawhai-Sequenz den Circa-Skalenabschnitt von 43.200 bis 42.100 kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP, also einen Abschnitt von etwa 1.100 kalibrierten  $^{14}\text{C}$ -Jahren.<sup>137</sup>

Im Fall der  $^{14}\text{C}$ -jüngeren Baumringchronologie handelt es sich um einen Kauri-Baum der Lokalität Finlayson Farm (ca. 130 km NNO Auckland) mit der Bezeichnung Finlayson 8. An einer

<sup>134</sup> „Finally, two floating dendrochronology sections (14, 15) can be placed on the Hulu calibration in such a way that overall trends and finer-scale features match the Hulu curve (11) (Figs. 1 and 2 and fig. S10)“ (CHENG et al. 2018, 1). – In Klammern Endnoten des Artikels.

<sup>135</sup> „The floating tree ring  $\Delta^{14}\text{C}$  datasets (purple) (14, 15) are tuned to the Hulu  $^{14}\text{C}$  record (11)“ (CHENG et al. 2018, 2; Beschriftung zu ihrer Fig. 1). – In Klammern Endnoten des Artikels.

<sup>136</sup> TURNEY et al. (2010) verweisen bezüglich der „Mangawhai“-Baumringchronologie auf LORREY et al. (2005, 2007). Allerdings sind diese Arbeiten nicht allgemein zugänglich. Dies trifft auch auf die Dissertation von LORREY (2008) zu.

<sup>137</sup> PALMER et al. (2015) berichten ebenfalls von Kalibrationen der schwimmenden „Mangawhai“-Baumringchronologie (1410 Ringe, 13  $^{14}\text{C}$ -Alter) mit nachfolgenden Radiokarbon-Datensätzen (ihre Table 1): 42.710 – 42.600 kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP (IntCal13, Reimer et al. 2013a); 42.900 – 42.490 kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP (Suigetsu-See, BRONK RAMSEY et al. 2012); 43.020 – 42.880 kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP (Cariaco-Becken, HUGHEN et al. 2006).

Stammscheibe dieses Baumes sind 2.061 Jahrringe abgezählt worden.<sup>138</sup> TURNEY et al. (2016) liefern für die Abfolge von 2.020 Jahrringen – anhand 101 bidekadischer Proben<sup>139</sup> – eine umfangreiche <sup>14</sup>C-Datenreihe ( $N=115$ , inklusive 14 Doppelte); die <sup>14</sup>C-Alter reichen von 27.780 bis 25.210 konventionellen <sup>14</sup>C-Jahren BP. Eine Kalibrierung der schwimmenden Jahrringfolge erfolgt durch Einphasung in die Radiokarbon-Datensätze des Cariaco-Beckens (HUGHEN et al. 2006) sowie des Suigetsu-Sees (BRONK RAMSAY et al. 2012). Dabei „belegt“ die Finlayson-8-Sequenz die Skalenabschnitte von 30.209 bis 28.754 (Cariaco) bzw. von 31.505 bis 29.505 kalibrierte <sup>14</sup>C-Jahre BP (Suigetsu, Abb. 42 unterer Teil) (TURNEY et al. 2016, Supplementary Data). Im Cariaco-Fall sei die Übereinstimmung exzellent, allerdings hätten die 2.000 „Kauri-Jahre“ nur auf „1.460 Cariaco-Jahre“ (Kalender-Zeitskala) angeglichen werden können. Dies impliziere, so TURNEY et al. (2016) weiter, dass die Kalender-Zeitskala der Cariaco-Überlieferung um etwa 500 Jahre gestaucht sei. Im Suigetsu-Fall sei die Übereinstimmung noch besser; hier hätte zunächst auf 1.792 „Suigetsu-Jahre“ (Kalender-Zeitskala) angeglichen werden können. Im Rahmen der Chronologie-Unsicherheiten sei aber ein Slot gleicher Dauer gefunden worden. Schließlich weisen TURNEY et al. (2017) mit Bezug auf die Cariaco-Überlieferung eine Belegung des Skalenabschnitts von 32.250 bis 30.110 kalibrierte <sup>14</sup>C-Jahre BP aus (Abb. 42 oben). Bei CHENG et al. (2018, Fig. S10) „belegt“ die Finlayson-8-Sequenz den Circa-Skalenabschnitt von 31.700 bis 29.600 kalibrierte <sup>14</sup>C-Jahre BP, also einen Abschnitt von etwa 2.100 kalibrierten <sup>14</sup>C-Jahren.

Die ausführliche Auflistung der Kalibrierungsversuche der zwei schwimmenden Baumringchronologien soll zeigen, dass die Kalibrierungsergebnisse unterschiedlich ausfallen. Insofern kann eine anzahlmäßige Circa-Übereinstimmung wie sie von CHENG et al. (2018) geltend gemacht wird (s. o.) zufällig sein. Insbesondere ist aber zu bedenken, dass in dieser Sache mindestens zwei Annahmen vorliegen: 1) Bei den ausgewiesenen Kauri-Jahrringen handelt es sich tatsächlich um Jahrringe. Aber: BOSWIJK et al. (2019) zum Beispiel machen auf Dichte-Fluktuationen bei Kauri-Bäumen aufmerksam, die als Jahrringe missinterpretiert werden können (u. a. ihre Fig. 2c).<sup>140</sup> 2) Es liegt keine „Störung“ in der Radiokarbon-Überlieferung vor. Aber: Eine Verfälschung kann zum Beispiel durch aktiven Vulkanismus verursacht sein.

**Fazit.** CHENG et al. (2018) nennen zwei Argumente, die auf eine punktuelle oder abschnittsweise (externe) Validierung des älteren Teils der Hulu-<sup>230</sup>Th-Zeitskala abzielen: Erstens eine Übereinstimmung mit dem Alterspaar  $34.290 \pm 90$  konventionelle <sup>14</sup>C-Jahre BP/ $39.850 \pm 140$  <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar-Jahre (implizit: Kalender-Jahre) der Datierungen des Kampanischen Ignimbrits (Italien). Allerdings ist nicht bekannt, ob das <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar-Alter valide ist. Zweitens, nach Einphasung, eine (grobe) Übereinstimmung mit zwei schwimmenden, neuseeländischen Baumringchronologien, hinsichtlich Dauer, Trends und weiterer Merkmale. Allerdings kann die Übereinstimmung zufällig sein; des Weiteren ist nicht bekannt, ob die Interpretation der Wachstumsinkremente als Jahrringe korrekt ist und ob die Radiokarbon-Überlieferung im nördlichen Teil Neuseelands eventuell Störungen zum Beispiel durch Vulkanismus ausgesetzt war.

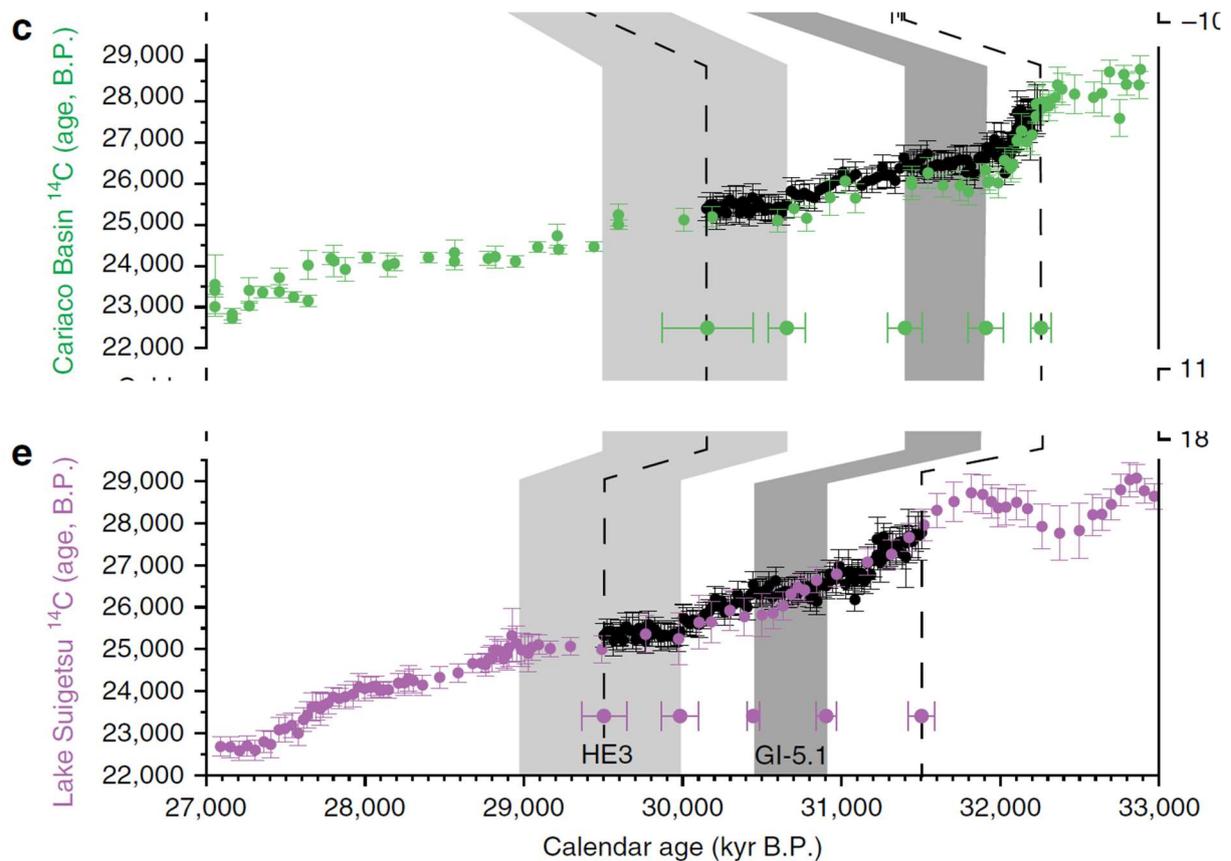
---

<sup>138</sup> Siehe Datei finlayson08.rwl (Rohdaten Jahrringbreite):

<https://www.ncei.noaa.gov/pub/data/paleo/radiocarbon/finlayson08.rwl>

<sup>139</sup> Proben, die 20 Jahrringe umfassen.

<sup>140</sup> Zu weiteren „dendrochronologischen Problemen“ siehe z. B. auch DUNWIDDIE (1979).



**Abb. 42** Kalibrierung der Baumring-Sequenz Finlayson 8.

Einphasung der  $^{14}\text{C}$ -Datenreihe der schwimmenden Finlayson-8-Sequenz in die kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Überlieferung des Cariaco-Beckens (oberer Teil „c“) sowie die kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Überlieferung des Suigetsu-Sees (unterer Teil „e“). Datenreihen: schwarze Punkte mit Unsicherheiten: Finlayson 8, gleitende 3-Punkte-Mittelwerte; grüne Punkte mit Unsicherheiten: Cariaco-Becken; lila Punkte mit Unsicherheiten: Suigetsu-See. Y-Achse: konventionelle  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP; X-Achse: kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP (= Kalender-Jahre BP). Demnach beginnt das Wachstum des Baums Finlayson 8 32.250 kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP (Cariaco-Kalibration) oder 31.505 kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP (Suigetsu-Kalibration). Diskussion siehe Textteil. Wiedergabe von Teilen der Fig. 1 aus TAYLOR et al. (2017) in *Nature Communications*; CC BY 4.0.

## 4 Vom Methodentest zur U-Th-Kalibration

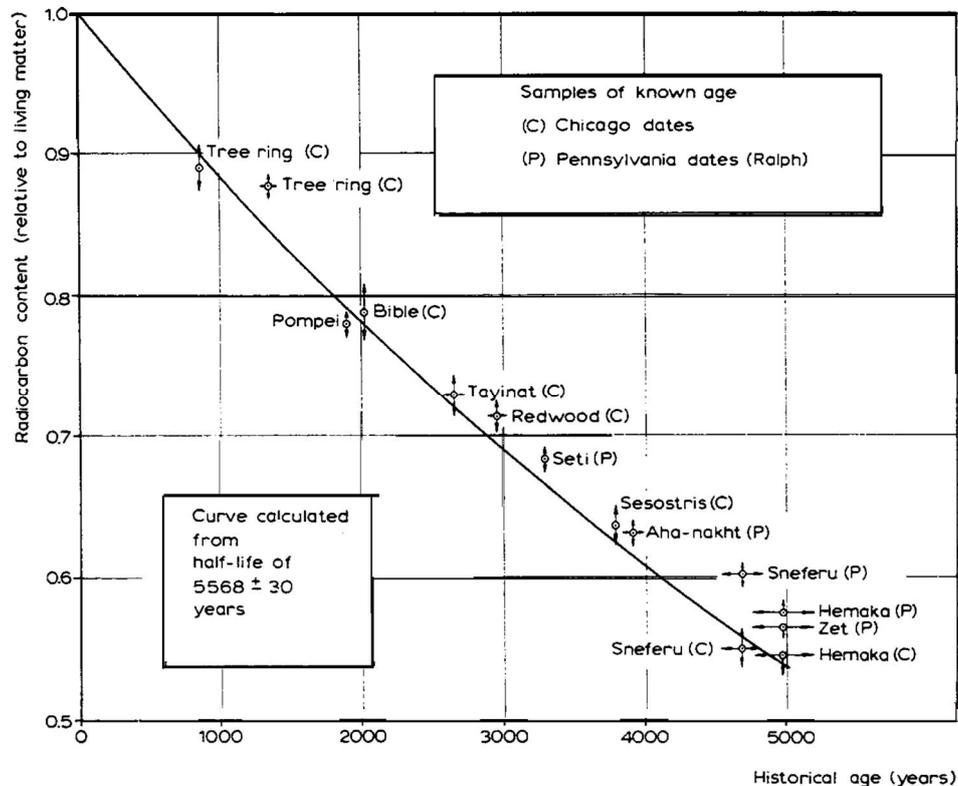
### 4.1 Radiokarbon-Datierung: eine getestete Datierungsmethode

#### 4.1.1 1960: Nobelpreis für Radiokarbon-Datierung

1960 erhielt Williard F. LIBBY den Nobelpreis für Chemie. Die Begründung lautete: „für seine Methode der Anwendung von Kohlenstoff-14 zur Altersbestimmung in Archäologie, Geologie, Geophysik und anderen Zweigen der Wissenschaft“.<sup>141</sup> Mit dieser Auszeichnung war zweifellos ein großer, zusätzlicher Vertrauensgewinn in die Altersbestimmungsmethode verbunden – sowohl in der Wissenschaftsgemeinschaft als auch der interessierten Öffentlichkeit.

<sup>141</sup> Siehe <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1960/libby/facts/> (Zugriff Dez. 2023).

In seiner Nobel-Vorlesung vom 12. Dezember 1960 legt LIBBY u. a. dar, wie getestet (verifiziert) wurde, ob mit Radiokarbonbestimmungen überhaupt eine Datierung historischer und prähistorischer Objekte möglich ist.<sup>142</sup>



**Abb. 43** Radiokarbonbestimmungen an Proben bekannten Alters.

Sogenannte „Curve of Knowns“ (Kurve des Bekannten); aus LIBBY (1960). Nach dieser Grafik liegen die an Proben ermittelten Radiokarbonkonzentrationen nahe bei der theoretischen Soll-Kurve. Diskussion s. Textteil. Legende (nach LIBBY 1960): (C): Messungen durch W. F. LIBBY und weiteren, University of Chicago; (P): Messungen durch Frau RALPH, University of Pennsylvania; Pompeji-Probe: Messungen durch E. A. OLSEN und W. S. BROECKER, Lamont Geological Observatory. Zu den Proben: Holzproben aus den Gräbern von Hemaka und Zet, Sakkara: 1. ägyptische Dynastie; Holzprobe der oberen Kammer der südlichen Pyramide des Snefru, Dahschur: 4. ägyptische Dynastie; Holzprobe von einem Teil des Decks des Totenschiffs vom Grab Sesostris III: 12. ägyptische Dynastie; Holzprobe des äußeren Sarkophags von Aha-nakht, El Bersheh: 12. ägyptische Dynastie; Redwood „Centennial Stump“, Kalifornien, gefällt 1874, mittleres Alter  $2928 \pm 51$  Jahre; Holzprobe eines Hauses von [Tell] Tayinat, Kleinasien, niedergebrannt 675 BC; Leinenumhüllung einer Schriftrolle vom Toten Meer, „Bible“; Verkohlttes Brot aus einem Haus im Pompeji, das 79 n. Chr. von vulkanischer Asche begraben wurde; Holzproben, die mit der Douglas-Baumringtechnik datiert wurden, „Tree ring“.

Die ursprüngliche Idee war, Artefakte bekannten Alters bis 30.000 Jahre zurück zu datieren und die Ergebnisse in einer Grafik dazustellen. Allerdings mussten LIBBY und seine Mitarbeiter – „geschockt“ – feststellen, dass historisch dokumentierte Geschichte nur bis 5.000 Jahre zurückreicht. Alle Altersangaben über 5.000 Jahre hinaus waren nicht genau bekannt.<sup>143</sup> Zur

<sup>142</sup> „After the study of the natural occurrence of radiocarbon, the next stage was to see whether we had a method of dating artifacts of a known age“ (LIBBY 1960, 599)

<sup>143</sup> „The first shock Dr. Arnold and I had was when our advisors informed us that history extended back only to 5,000 years. We had thought initially that we would be able to get samples all along the curve back to 30,000 years, put the points in, and then our work would be finished. You read statements in books that such and such a society or archeological site is 20,000 years old. We learned rather abruptly these numbers, these

„Curve of Knowns“ (Abb. 43) resümiert LIBBY (1960, 603; in Übersetzung): „Nimmt man alle diese Proben zusammen, scheint die Übereinstimmung mit dem vorhergesagten Radiokohlenstoffgehalt zufriedenstellend zu sein.“<sup>144</sup>

Zum „prähistorischen“ Teil: Der Test bestand darin, zu sehen, ob die gewonnenen Daten in den großen Perioden der Vorgeschichte annehmbar bzw. vernünftig („reasonable“) waren.<sup>145</sup> Diese Perioden werden nicht weiter konkretisiert. Zu den aufgeführten Altersbestimmungen zählen: Letzter Eisvorstoß im Norden der USA: „11.400 Jahre  $\pm$  200 Jahre“; menschliche Besiedlung im Mittelmeerraum: zurück bis „50.000 Jahre“ (soweit wie die Radiokarbon-Datierungstechnik reiche); Lascaux-Höhlenmalereien, Frankreich: „vermutlich älter als 15.000 Jahre“. Der „prähistorische“ Teil wird nicht mit einem Resümee – z. B. „zufriedenstellend“ wie bei dem historischen Teils (s. o.) – abgeschlossen.

Zusammenfassend stellt LIBBY (S. 609f) fest (in Übersetzung): „Anhand der Ergebnisse kann man sich eine Meinung über die allgemeine Zuverlässigkeit und die allgemeinen Schwächen der Methode bilden. (...) die Methode [hat] unsere größten Hoffnungen erfüllt.“<sup>146</sup> Die „allgemeinen Schwächen“ bezieht LIBBY hauptsächlich auf das Probenmaterial, das verunreinigt sein kann, und die notwendige, sorgfältige Probenvorbehandlung.<sup>147</sup>

#### 4.1.2 Jenseits 5000 Jahre vor heute: annehmbare Datierungsergebnisse?

Wird der Gesamtbeurteilung von LIBBY (1960) gefolgt (s. o.), scheinen für den prähistorischen Teil (Vorgeschichte) insgesamt annehmbare bzw. vernünftige Datierungsergebnisse vorzuliegen (Stand 1960). In diesem Sinne ist der Test positiv; mit anderen Worten: Die Radiokarbonmethode eignet sich zur Datierung auch prähistorischer Proben bis zu ihrer Altersreichweite von „50.000 Jahren“.

Dennoch ist festzustellen, dass LIBBY (1960) für den prähistorischen Teil eine gewisse Vorsicht walten lässt. Nach JOHNSON (in LIBBY 1969, Übersetzung von LIBBY 1955) „ergeben geologische [Zeit-, MK] Abschätzungen von Ereignissen im Pleistozän Fehler von  $\pm$  30 % und mehr“ (S. 172). Für archäologische Folgen lägen unterschiedliche Zeitvorstellungen und für das

---

ancient ages, are not known accurately; in fact, it is at about the time of the First Dynasty in Egypt that the first historical date of any real certainty has been established. So we had, in the initial stages, the opportunity to check against knowns, principally Egyptian artifacts, and in the second stage we had to go into the great wilderness of prehistory to see whether there were elements of internal consistency which would lead one to believe that the method was sound or not“ (LIBBY 1960, 600).

<sup>144</sup> Bei JOHNSON (in LIBBY 1969, Übersetzung von LIBBY 1955) heißt es (S. 173): „Die Übereinstimmung zwischen vorausgesagten und beobachteten Radioaktivitäten bei einer Reihe von Proben bekannten Alters (Figur 1) [„Curve of Knowns“, MK] ist ein starker Hinweis auf die Richtigkeit der Methode.“

<sup>145</sup> „Following the test of the Curve of Knowns, the next step in the research was to test in the great periods of prehistory to see whether the dates obtained were reasonable“ (LIBBY 1960, 604).

<sup>146</sup> „We now have several thousand radiocarbon dates throughout the fields of archeology, geology, meteorology, oceanography, and other areas. From the examination of the results, it is possible to form an opinion as to the general reliability and general weaknesses of the method. I am sure that Dr. Arnold would agree with me in saying that it has lived up to our fondest hopes“ (LIBBY 1960, 609f).

<sup>147</sup> Der spätere *Science*-Artikel „Accuracy of radiocarbon dates“ (LIBBY 1963) – in Übersetzung: „Genauigkeit von Radiokarbonaten“ – bezieht sich im Wesentlichen nur auf den historischen Teil, d. h. nach LIBBY bis etwa 5200 Jahre vor heute.

Pleistozän verschiedene Chronologien vor.<sup>148</sup> So passen die drei oben aufgeführten Altersbestimmungen in das Rahmenwerk damals bestehender (absoluter) Zeitskalen für die Nacheiszeit (Postglazial) und das Diluvium (Pleistozän), die einerseits auf die schwedische Warvenchronologie von DE GEER (1912, 1934, 1940) – bis 15.000 [Warven-] Jahre vor heute – und andererseits auf die Strahlungskurven von MILANKOVITCH (1920, 1930, 1941) – bis 600.000 [astronomische] Jahre vor heute – basierten. Dies wird exemplarisch mit Tab. 1 und Tab. 2 gezeigt:

- **Letzter Eisvorstoß im Norden der USA: „11.400 Jahre ± 200 Jahre“.** Alterswert harmonisiert mit der Zeittabelle von SCHWABEDISSEN (1951)<sup>149</sup> (Tab. 2), hier Spätglazial (oberstes Pleistozän), aber auch mit den Zeittabellen von VAYSON DE PRADENNE (1940) und ALBRIGHT (1948), jeweils Mesolithikum (Tab. 1).
- **Lascaux-Höhlenmalereien, Frankreich: „vermutlich älter als 15.000 Jahre“.**<sup>150</sup> Alterswert harmonisiert mit der Zeittabelle von z. B. VAYSON DE PRADENNE (1940), der die jüngste oberpaläolithische Kultur – Magdalénien – vor 14.000 v. Chr. ansetzt. Harmonisiert des Weiteren mit den Zeittabellen von WEINERT (1943), ALBRIGHT (1948) und ZEUNER (1946).

nach Weinert (1943)			Albright (1948) <sup>A</sup> [Nahe Osten]	Vayson de Pradenne (1940) <sup>B</sup>	
Kulturstufen	Zeitalter	Jahre (jeweils Beginn)	Jahre (jeweils Beginn)	Jahre (jeweils Beginn)	Menschen-Fossilien
Metallzeit		2.000 v. Chr.	ca. 3.000 v. Chr.	ca. 3.000 v. Chr.	
Neolithikum	Nacheiszeit	5.000 v. Chr.	vor 6.000 v. Chr.		
Mesolithikum		15.000 v. Chr.	vor 10.000 v. Chr.	nach 14.000 v. Chr.	
Jung-Paläolithikum	Jung-Diluvium	60.000 v. h.	nach 100.000 v. h.		Homo sapiens
Mittel-Paläolithikum	Mittel-Diluvium	200.000 v. h.	ca. 150.000 v. h.	mindestens 30-50.000 v. h.	Homo neanderthalensis
Alt-Paläolithikum	Alt-Diluvium	600.000 v. h.	> 200.000 v. h.	älter als Würm-Vereisung	u. a. Homo heidelbergensis
keine Kultur	Tertiär (Pliozän)				

**Tab. 1** Zeittabelle für die Vor- bzw. Urgeschichte, Stand vor 1947.

Gliederung nach WEINERT (1943, Tabelle S. 717) in HEBERERS *Die Evolution der Organismen* (1943). WEINERT schreibt dazu (S. 717). „Diese vereinfachte Zeittabelle soll nur einen Anhalt für die großen zeitlichen und kulturellen Stufen geben.“ Die Jahreszahlen von ALBRIGHT (1948, 88ff) und VAYSON DE PRADENNE (1940, 139ff) sind größenordnungsmäßig mit WEINERT (1943) vergleichbar, aber nicht so konkret. Legende: Diluvium = Eiszeit (bzw. Eiszeitalter), aktueller chronostratigraphischer Begriff: Pleistozän; v. h. = vor heute. <sup>A</sup>) Zweiter Druck der 2. Auflage von 1946. <sup>B</sup>) Übersetzung von *La Préhistoire* (1938). Diskussion s. Textteil.

<sup>148</sup> JOHNSON (1969, 74): „Die Erfahrung lehrt, daß archäologische Folgen, die nicht durch eine Methode der Zeitählung, etwa durch die Baumring-Datierung, kontrolliert wurden, längere oder kürzere Zeiträume zugeordnet worden sind, in dem Maße, wie verschiedene Meinungen an Popularität zu- und abgenommen haben oder wenn neue Daten vorgelegt wurden. Ähnlich verhält es sich in der Geologie, wo es verschiedene Chronologien für das Pleistozän gibt, die verschieden begründet werden und angesehene Verfechter haben, die sich der Stärke und Schwäche ihrer Position voll bewußt sind. Im Hinblick darauf müssen offensichtliche Schlußfolgerungen, die die Richtigkeit oder den Fehler einer einzelnen oder einer Folge von Radiokohlenstoffdaten betreffen, äußerst sorgfältig gezogen werden.“

<sup>149</sup> Siehe z. B. auch NILSSON (1935) und OVERBECK & SCHNEIDER (1938).

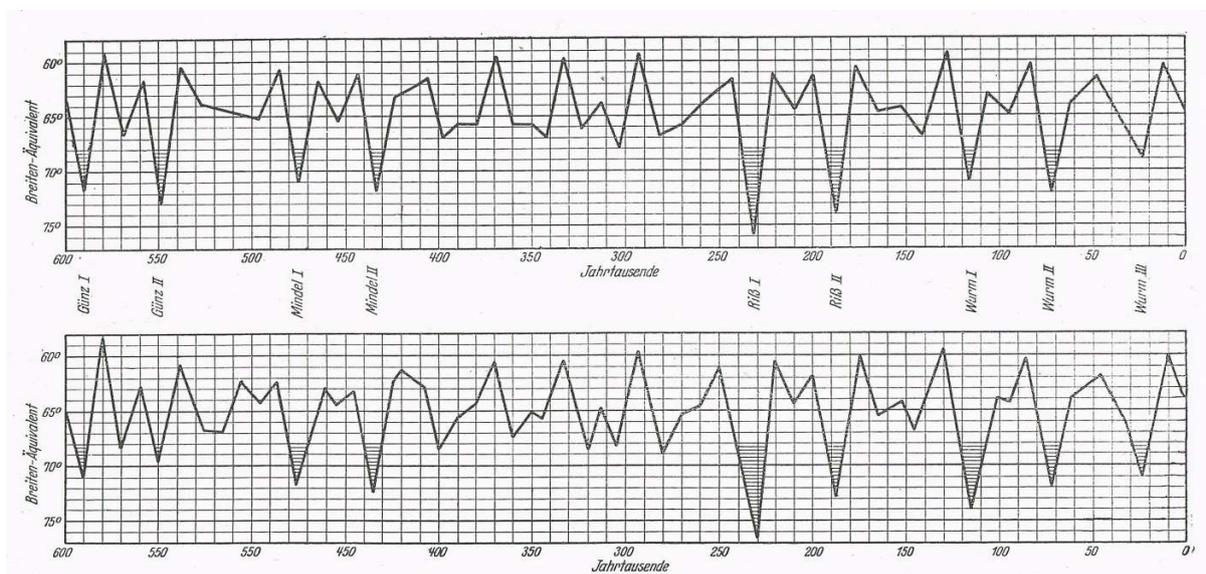
<sup>150</sup> Bezieht sich möglicherweise auf Probe 406 (Lascaux-Höhle, Holzkohle; entnommen 1949 von Abt H. BREUIL und S. BLANC) in LIBBY (1952, 72); dort wird für die Probe ein Alter von „15.516 ± 900 Jahren“ ausgewiesen.

- **Menschliche Besiedlung im Mittelmeerraum: zurück bis „50.000 Jahre“.** Alterswert harmoniert mit der Zeittabelle von z. B. VAYSON DE PRADENNE (1940), der Funde von *Homo sapiens* und *Homo neanderthalensis* auf mindestens 30.000 – 50.000 Jahre vor heute ansetzt.

Archäologische Gliederung nach Vayson de Pradenne (1940) <sup>A</sup>	Zeuner (1935, 1946)	Vayson de Pradenne (1940) <sup>A</sup>	Schwabedissen (1951)	
	Jahre (Beginn oder Spanne)	Jahre (jeweils Beginn)	Jahre (Beginn oder Spanne)	Geologie <sup>B</sup>
Neolithikum	7.500 v. Chr.			Postglazial
Mesolithikum	15.000 v. Chr.	nach 14.000 v. Chr.	8000 v. Chr.	
	Magdalénien	65-18.000 v. Chr.	bis 8.000 v. Chr. (Spät-Magdalénien) <sup>C</sup>	Spätglazial ab 15.000 v. Chr.
Ober-Paläolithikum	Solutreen			
	Aurignacien u. Perigordien			
		keine Jahreszahlen		

**Tab. 2** Zeittabelle für die Vor- bzw. Urgeschichte II.

Gliederung nach VAYSON DE PRADENNE (1940, 141). Mit Fokus auf das Magdalénien und die Grenze Spätglazial/Postglazial bzw. Paläolithikum/Mesolithikum. Legende: <sup>A</sup>) Übersetzung von *La Préhistoire* (1938). <sup>B</sup>) Geologie nach der DE GEERSchen Gliederung: Postglazial inklusive Finiglazial; Spätglazial = Gotiglazial. <sup>C</sup>) Für den Raum Norddeutschland. Diskussion s. Textteil.



**Abb. 44** MILANKOVITCHS Kurve der sommerlichen Bestrahlung, 65° nördliche Breite.

Strahlungskurve theoretisch rückgerechnet über „600 Jahrtausende“ und Korrelation mit der Eiszeitgliederung der Alpen; Bezugsgröße ist 65° nördliche Breite. Aus MILANKOVITCH (1941, 544, Fig. 48); oben: Diagramm von 1920 (vgl. MILANKOVITCH 1920), unten: neues Diagramm von 1941 mit aktualisierten Berechnungen. Nach seiner Fig. 51 (S. 549) beginnt das Diluvium „800 Jahrtausende“ vor heute. – Nach PENCK & BRÜCKNER (1909, 1169) ist „die Dauer des gesamten Eiszeitalters auf mehrere hunderttausend Jahre zu veranschlagen“. Es bestand also bereits zu diesem Zeitpunkt eine konkrete Langzeit-Vorstellung, zu welcher MILANKOVITCHS Strahlendiagramme später passen sollten.

Allerdings haben weder DE GEER noch MILANKOVITICH nachweisen können, dass ihre absoluten Chronologien korrekt oder annäherungsweise korrekt sind. Im Falle von DE GEER (1912, 1934, 1940) fehlt der Jahresschichten-Nachweis – der Nachweis darüber, dass ein Couplet der laminierten Bändertone (eine „Warve“) *tatsächlich* während eines Jahres gebildet wurde (KOTULLA 2020, Blatt 3-10). Im Falle von MILANKOVITICH (1920, 1930, 1941) handelt es sich um eine theoretische Rückrechnung der astronomischen Bewegungen der Erde. Die so ermittelten Strahlungskurven korrelierte er mit der diluvialen (pleistozänen) Eiszeitgliederung der Alpen (Abb. 44). Es lag die Mutmaßung zugrunde, dass Variationen der Erdumlaufbahn die Eiszeiten gesteuert haben sollen. Diese sogenannte Milankovitch-Theorie ist aber nicht bewiesen. Dies trifft sowohl auf die damalige als auch auf die moderne (aktuelle) Ausprägung der Theorie zu. Denn ein Nachweis darüber, dass die geologisch-stratigraphische Überlieferung durch eine lang-periodische Orbitalsteuerung (Milankovitch-Zyklen) beeinflusst wurde, ist bisher nicht erbracht worden (KOTULLA 2015).

Demnach existierten in den 1950er- und zu Beginn der 1960er-Jahren keine *wirklich* verwertbaren Zeitskalen – auch nicht unter Berücksichtigung von Fehlern „von  $\pm 30\%$  und mehr“ (s. o.), mit welchen die Radiokarbon-Datierungsergebnisse  $> „5000\text{ Jahre}“$  hätten getestet (verifiziert) werden können. Insofern lagen (Stand heute, im Rückblick) – mit Ausnahme einer stratigraphischen Konsistenz – *keine* „annehmbaren“ Datierungsergebnisse vor.

## 4.2 Radiokarbon-Zeitskala: weitere Tests

### 4.2.1 Stand um 1980

#### 4.2.1.1 STUIVER (1978)

STUIVER (1978) überschreibt seinen *Nature*-Artikel mit (in Übersetzung): „Prüfung der Radiokarbon-Zeitskala anhand von magnetischen und anderen Datierungsmethoden.“<sup>151</sup> Er präsentiert u. a. das Testergebnis, dass die Radiokarbon-Zeitskala im Skalenbereich von 32.000 bis 9.000 [konventionellen  $^{14}\text{C}$ -] Jahren BP um maximal 2.000 Jahre vom Real-Alter abweiche. Dem Test liegt ein Vergleich von Radiokarbon-Altern mit Altern zugrunde, die von  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ -, Thermolumineszenz- und magnetischen Datierungen abgeleitet sind (sein „Vergleichsdiagramm“ Fig. 3).<sup>152</sup>

Zu dem Testergebnis wird angemerkt:

**Magnetische Datierung.** STUIVER (1978) bezieht sich zunächst auf magnetische Untersuchungen der Sedimente des Lake Windermere in England (mit Verweis auf MACKERETH 1971). Demnach sollen Oszillationen in der Deklination der remanenten Magnetisierung eine Periode von 2.810 Jahren haben (seine Fig. 4). Dann bezieht sich STUIVER (1978) auf magnetische Untersuchungen eines Sedimentkerns des Schwarzen Meeres (mit Verweis auf CREER 1974). Auch

<sup>151</sup> „Radiocarbon timescale tested against magnetic and other dating methods“.

<sup>152</sup> „By matching radiocarbon ages with ages derived from  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ , thermoluminescence and magnetic dating, the  $^{14}\text{C}$  timescale is shown to deviate by a maximum of 2,000 yr over the 9,000–32,000 yr BP interval“ (STUIVER 1978, 271).

dort läge unterhalb der Profiltiefe von 55 cm eine Periodizität vor. Mit einer Übernahme der Periodizität von 2.810 Jahren (Lake Windermere) in Verbindung mit einer  $^{14}\text{C}$ -Interpolation bei Profiltiefe 55 cm (6040 [ $^{14}\text{C}$ -] Jahre) ermittelt STUIVER (1978) die älteren „magnetischen Alter“ ( $M$ ) mit nachfolgender Gleichung:  $M = 6600 + 2810S$  ( $M$ : magnetic ages;  $S$ : magnetic cycles, magnetische Zyklen). Sein Vergleich der vier weiteren vorliegenden  $^{14}\text{C}$ -Alter (Profiltiefen: 120, 330, 580 und 1120 cm;  $8.600 \pm 150$ ,  $13.850 \pm 210$ ,  $16.900 \pm 270$  und  $22.830 \pm 800$   $^{14}\text{C}$ -Jahre BP) mit den zu den jeweiligen Profiltiefen korrespondierenden magnetischen Altern (Zyklen: 0,82, 2,7, 4,0 und 6,2; 8.900, 14.200, 17.800 und 24.100 [magnetischen] Jahren) zeigt, dass eine maximale Abweichung von etwa 1.300 „Jahren“ vorliegt (ohne Berücksichtigung der Unsicherheiten).<sup>153</sup> Damit ist die Radiokarbon-Zeitskala – hier bis ca. 23.000 (konventionelle)  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP – aber nicht durch eine *unabhängige* Methode verifiziert worden. Denn die „magnetischen Alter“ sind von  $^{14}\text{C}$ -Altern abgeleitet worden:

MACKERETH (1971) liefert für zwei 6 m mächtige Sedimentkerne des Lake Windermere Hunderte Magnetometer-Messungen sowie neun Radiokarbonanalysen. Das Komposit-Profil für den Tiefenabschnitt 0 bis 3,4 m umfasst stratigraphisch die gesamte Spanne von der Gegenwart bis zum Ende des Alleröd. Das magnetische Profil dieses Tiefenabschnitts (Punktdarstellung, siehe Fig. 2) soll vier Oszillationen aufweisen. MACKERETH (1971) gibt für die Oszillationen eine Periode von ungefähr „2.700 Jahren“ an (von STUIVER 1978 auf „2.810 Jahre“ abgeändert). Diese ermittelt er, indem er die mutmaßliche Gesamtzeit (11.000 [ $^{14}\text{C}$ -] Jahre; mit Verweis auf VAN DER HAMMEN et al. 1967) durch 4 dividiert. Der Zeitpunkt „Ende Alleröd“ ist  $^{14}\text{C}$ -datiert;<sup>154</sup> insofern ist die ermittelte Durchschnittsperiode eine  $^{14}\text{C}$ -*abhängige* „Einheit“. So ist dann auch eine gute Übereinstimmung der „magnetischen Alter“ mit den  $^{14}\text{C}$ -Altern zu erwarten.<sup>155</sup> Es gilt zu ergänzen, dass die „vier Oszillationen“ eine Interpretation von MACKERETH (1971) sind. Die Punktdarstellung (siehe Fig. 2) ist diesbezüglich nicht eindeutig; darüber hinaus zeigt der Profilschnitt von etwa 3,4 bis 5,2 m keine Schwankungen (Oszillationen) wie im oberen Abschnitt.

Auch CREER (1974) leitet die Periode geomagnetischer Variationen von Radiokarbon-Altersbestimmungen ab.<sup>156</sup> Er ermittelt eine Periode von „ungefähr 2.800 Jahren“.

**Thermolumineszenz-Datierung.** STUIVER (1978) führt Thermolumineszenz-Studien hawaiianischer Basalte an (mit Verweis auf BERRY 1973). Die spezifische Thermolumineszenz von Lavaströmen von Mauna Loa und Kilauea korreliert linear mit  $^{14}\text{C}$ -Altern von Pflanzenmaterial, das von den Laven eingeschlossen wurde.

BERRY (1973) liefert für acht Proben hawaiianischer Lavaströme „bekanntes Alter“ von „12 bis 17.360 Jahren“ (zwei historische Alter, sechs  $^{14}\text{C}$ -Alter) Werte spezifischer Thermolumineszenz, die sie in Beziehung zum Alter setzt (siehe Fig. 2). Dabei liegen vier der acht Datenpunkte

<sup>153</sup> STUIVER (1978, 273) selbst führt allerdings an, dass die Annahme einer konstanten Periodizität ein schwacher Punkt sei.

<sup>154</sup> Siehe VOGEL & ZAGWIJN (1967, 79), die Co-Autoren von VAN DER HAMMEN et al. (1967): „As for Late-glacial, [radiocarbon, MK] dates now available give the following dating of boundaries: End of Late Dryas, ca. 10,300-10,000 B.P.; Allerod Interstadial, 11,800-11,000 B.P.; Bolling Interstadial, 12,400-12,000 B.P.“

<sup>155</sup> „Oscillations in the declination of the remanent magnetisation have a period of about 2700 yr and ‘magnetic’ dates derived from this observation are in good agreement with  $\text{C}^{14}$  dating“ (MACKERETH 1971, 338).

<sup>156</sup> „The magnetic inclination exhibits variations with a period of approximately 2800 yr deduced from five radiocarbon age determinations along the core“ (CREER 1974, 34).

nahezu auf einer Geraden, die anderen vier liegen deutlich abseits. Die Ergebnisse legten nahe, so folgert BERRY (1973) in ihrem Abstract – auch wenn sie nicht schlüssig seien –, dass Thermolumineszenz (TL) zu einer Technik zur Datierung holozäner Basalte entwickelt werden könne.<sup>157</sup> Die Ergebnisse sind allerdings nicht überzeugend: BERRY (1973, 6865) schreibt (in Übersetzung): „Obwohl die Ergebnisse dieser Studie alles andere als schlüssig sind (...).“ Und: „Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse war in dieser Studie ein gewisses Problem“ (S. 6866). Letztlich seien es „vorläufige Ergebnisse“, die andere Forscher als hilfreich oder ermutigend finden mögen.<sup>158</sup>

Die zwei „TL“-Wertepaare, die STUIVER (1978, seine Fig. 3) verwendet sind: 10.100 <sup>14</sup>C-Jahre BP/ca. 10.100 „Jahre“ BP; 17.400 <sup>14</sup>C-Jahre BP/ ca. 18.600 „Jahre“ BP. Unklar ist aber, wie STUIVER (1978) das „TL-Alter“, ermittelt hat. Denn BERRY (1973) weist keine Thermolumineszenz-Zeitskala bzw. keine Thermolumineszenz-Alter aus. Für BERRY (1973) sind die Radiokarbon-Alter „bekannte Alter“ wie „historische Alter“, also Kalender-Alter (im Rahmen ihrer Unsicherheiten). Das – wie auch immer von STUIVER (1978) – ermittelte „TL-Alter“ basiert auf unsicheren Ergebnissen von BERRY (1973) und letztendlich auf <sup>14</sup>C-Altern. Damit ist aber die Radiokarbon-Zeitskala – hier im Skalenabschnitt von ca. 17.400 bis 10.100 (konventionellen) <sup>14</sup>C-Jahren BP – nicht durch eine *unabhängige* Methode verifiziert worden.

**<sup>230</sup>Th/<sup>234</sup>U-Datierung.** STUIVER (1978) weist in seinem „Vergleichsdiagramm“ (seine Fig. 3) für den Abschnitt von etwa 22.000 bis 32.000 (konventionelle) <sup>14</sup>C-Jahre BP sieben Datenpunkte aus, die von Altersbestimmungen von Sedimentproben des Searles Lake<sup>159</sup> in Kalifornien abgeleitet sind (mit Verweis auf PENG et al. 1978).<sup>160</sup> Die korrespondierenden <sup>14</sup>C- und <sup>230</sup>Th-Alter liegen nahe beieinander; sie weichen nicht um mehr als 2.000 „Jahre“ voneinander ab. STUIVER (1978) folgert (in Übersetzung): „Wir kommen zu dem Schluss, dass eine derartige Übereinstimmung nur dann erzielt werden kann, wenn beide Methoden ein Alter ergeben, das dem tatsächlichen Ablagerungsalter nahe kommt.“<sup>161</sup>

PENG et al. (1978) hatten die Übereinstimmung der korrigierten <sup>230</sup>Th-Alter und der korrigierten <sup>14</sup>C-Alter zuvor als „exzellent“ bewertet. Die <sup>230</sup>Th-Alter reichten von 2.400 „Jahre“ höher bis 4.400 „Jahre“ niedriger als die <sup>14</sup>C-Alter. Die durchschnittliche Altersdifferenz sei Null.<sup>162</sup> Der Vergleich zeige, so folgern PENG et al. (1977), dass die <sup>230</sup>Th-Datierung von salzhaltigem Material sehr zuverlässig sei.

<sup>157</sup> „The results suggest that TL can be developed into a technique for dating Holocene basalts“ (BERRY 1973, 6863).

<sup>158</sup> „In spite of these difficulties and uncertainties it appears that TL is a promising technique for dating young basalts. Much experimental work needs to be done before the technique can be used routinely, but, in the meantime, other investigators may find these preliminary results useful and encouraging“ (BERRY 1973, 6863).

<sup>159</sup> Die Proben stammen von der stratigraphische Einheit „Lower Salt“ (Tiefenabschnitt von etwa 24 bis 36 m).

<sup>160</sup> Zur „Ableitung“ schreibt VOGEL (1980, 210): „More recently, Peng, Goddard, and Broecker (1978) and Stuiver (1978) have compared <sup>14</sup>C and <sup>230</sup>Th dates on sediments from Searles Lake. After applying corrections to both sets of data, Peng, Goddard, and Broecker conclude that there is no observable difference between them, while Stuiver, apparently using a different correction for the <sup>14</sup>C dates and the correct half-life, finds them to be about 700 years younger on the average.“

<sup>161</sup> Im Original: „We conclude that this type of agreement can only be obtained if both methods give ages close to the actual age of deposition“ (STUIVER 1978, 272).

<sup>162</sup> „Comparison of <sup>14</sup>C and <sup>230</sup>Th ages is summarized in Table 5. The agreement between the corrected <sup>230</sup>Th and the corrected <sup>14</sup>C ages is excellent. The <sup>230</sup>Th ages range from 2400 years higher to 4400 years lower than the

Mit Bezug auf den Schluss von STUIVER (1978) besteht dennoch die Möglichkeit, dass beide Methoden zwar (weitgehend) übereinstimmende nominale Alterswerte liefern, aber dass diese Alterswerte vom realen Alterswert signifikant abweichen. Die U-Th-Methode ist zwar eine *unabhängige* Methode, aber  $^{230}\text{Th}$ -Alter dieser Größenordnung sind nicht validiert.

**Fazit.** STUIVER (1978, 274) hat in seinem Artikel „die besten Beispiele“ anderer Datierungsmethoden verwendet ( $^{230}\text{Th}$ -, Thermolumineszenz- und magnetische Datierung), um die Zuverlässigkeit der  $^{14}\text{C}$ -Datierung zu überprüfen. Die auf diese Weise gewonnenen Informationen würden das Konzept einer zuverlässigen Zeitskala zurück bis „32.000 Jahre BP“ unterstützen (mit einem maximalen Fehler von etwa „2.000 Jahren“).<sup>163</sup>

Zusammenfassend ist dazu anzumerken: In den Beispielen „magnetische Datierung“ und „Thermolumineszenz-Datierung“ sind die magnetischen Alter und Thermolumineszenz-Alter von  $^{14}\text{C}$ -Altern abgeleitet worden. Insofern liegt für keines dieser Beispiele ein unabhängiger Test bzw. eine unabhängige Verifizierung vor. Im Beispiel „ $^{230}\text{Th}$ -Datierung“ liegen zwar unabhängige  $^{230}\text{Th}$ -Alter vor, die aber ihrerseits nicht validiert sind. Eine weitgehende Übereinstimmung von  $^{14}\text{C}$ - und  $^{230}\text{Th}$ -Alterswerten bedeutet nicht zwangsläufig, dass es sich um reale Alter handeln muss.

#### 4.2.1.2 VOGEL (1980, 1983)

Die Arbeiten von VOGEL (1980, 1983) sind für diesen Kontext nur beispielhaft ausgewählt.

VOGEL (1980) stellt fest, dass es jenseits der Holozän/Pleistozän-Grenze (10.000 konventionelle  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP) zunehmend schwieriger werde, die Gültigkeit der Radiokarbon-Daten zu verifizieren.<sup>164</sup> Die Datierung der Kalkablagerungen des fossilen Lisan-Sees<sup>165</sup> („Vorgänger“ des Totes Meeres) zeige bezogen auf den Skalenabschnitt von 15.000 bis etwa 37.000 konventionellen  $^{14}\text{C}$ -Jahren BP (siehe Fig. 2) eine Diskrepanz von  $10 \pm 3\%$  zwischen den  $^{14}\text{C}$ - und  $^{230}\text{Th}$ -Alterswerten. Diese Diskrepanz würde damit erklärt werden können, so VOGEL (1980), zu postulieren, dass die Halbwertszeit von  $^{230}\text{Th}$  von 75.200 Jahren 10 % zu hoch sei, oder anzunehmen, dass der  $^{14}\text{C}$ -Gehalt der Atmosphäre während des Peniglazials („mittlere Weichsel-Kaltzeit“) viel höher war als in neuerer Zeit. VOGEL (1980) schlägt vor, weitere vergleichende  $^{14}\text{C}$ -/ $^{230}\text{Th}$ -Studien durchzuführen. Hierbei scheine die parallele Datierung von Korallen oder Speläothemen am vielversprechendsten zu sein (vgl. Kapitel 3).

VOGEL (1983) selbst liefert  $^{14}\text{C}$ - und  $^{230}\text{Th}$ -Daten zu einem Stalagmiten der Cango-Höhlen (Südafrika). Demnach seien die  $^{14}\text{C}$ -Alter während einiger Phasen des oberen Pleistozäns um

---

<sup>14</sup>C ages. Most of the differences are within the experimental error of the  $^{230}\text{Th}$  dating method. The average age difference is about zero“ (PENG et al. 1978, 327).

<sup>163</sup> „It has been standard practice in geochronology to compare other dating methods with  $^{14}\text{C}$  dating mainly to prove the reliability of these other methods. Here, the best examples of these other methods ( $^{230}\text{Th}$ , thermoluminescence and magnetic dating) are used to check on the reliability of  $^{14}\text{C}$  dating. The information thus obtained supports the concept of a reliable  $^{14}\text{C}$  timescale back to 32,000 yr BP, within a maximum error of about 2,000 yr“ (STUIVER 1978, 274).

<sup>164</sup> „Beyond this time, it becomes increasingly difficult to verify the validity of radiocarbon dates“ (VOGEL 1980, 210).

<sup>165</sup> VOGEL (1980) verweist hinsichtlich der  $^{230}\text{Th}$ -Datierungsergebnisse auf KAUFMAN (1971).

einige Tausend [<sup>14</sup>C-] Jahre zu jung.

VOGEL (1980, 1983) ist zunächst zu entnehmen, dass die Radiokarbon-Daten des Holozän verifizierbar seien und verifiziert worden sind. Während 1980 noch eine Unsicherheit besteht, welche der beiden Zeitskalen, <sup>14</sup>C- oder <sup>230</sup>Th-Zeitskala, für den oberpleistozänen Bereich maßgeblich (= absolut) ist, ist dieser Punkt 1983 zugunsten der <sup>230</sup>Th-Zeitskala quasi entschieden.

## 4.3 Radiokarbon-Kalibrationskurven: U-Th-basiert

### 4.3.1 Entwicklung nach 1990

Mit den in Kapitel 3 vorgestellten Arbeiten wird eine Entwicklung hin zu einer U-Th-basierten Kalibrierung des langen, älteren Teils der Radiokarbon-Zeitskala deutlich.

Diese Entwicklung zeigt sich auch in den sechs maßgeblichen Publikationen zu den jeweiligen Neuauflagen der Radiokarbon-Kalibrationskurve (1993–2020). Daraus werden im Folgenden kurze Passagen zitiert (in Übersetzung) und kommentiert.

**1993 (22.000 – 0 kalibrierte [<sup>14</sup>C-] Jahre BP).** „U/Th- und <sup>14</sup>C-Datierungen von Korallen ermöglichen eine <sup>14</sup>C-Alterskalibrierung über 10.000 <sup>14</sup>C Jahre BP hinaus (BARD et al. 1993)“;<sup>166</sup> nämlich bis 18.400 <sup>14</sup>C Jahre BP (= 22.000 kalibrierte <sup>14</sup>C-Jahre BP). – Kommentar: Die Gültigkeit der U/Th-Datierungen wird nicht diskutiert; sie wird implizit vorausgesetzt. Die faktische Aussage ist eine Typ-5-Aussage (s. Anhang I); die Erwähnung von „BARD et al. 1993“ dient der Nennung der Herkunft des Kalibrierungsdatensatzes, nicht der Unterstützung einer vorgeschlagenen Beziehung (Typ-3-Aussage). Demnach gilt: 1 U/Th-Jahr = 1 kalibriertes <sup>14</sup>C-Jahr = 1 Kalender-Jahr (Real-Jahr).

**IntCal98 (24.000 – 0 kalibrierte [<sup>14</sup>C-] Jahre BP).** „(...) die Bestimmung der Kalender-Zeitskala differiert. Die Holzproben (zurück bis 11.850 kalibrierte [<sup>14</sup>C-] Jahre BP) werden durch dendrochronologische Methoden datiert, die Korallen durch U-Th-Bestimmungen und die marinen Sedimente durch <sup>14</sup>C-Matching von (schwimmenden) Warven- und Baumringchronologien.“<sup>167</sup> – Kommentar: Die Aussage ist, dass mit allen drei Methoden – ohne Einschränkung – Abschnitte der Kalender-Zeitskala konstruierbar sind und folglich konstruiert wurden. Demnach gilt (wenn überlappend): 1 U/Th-Jahr = 1 Dendro-Jahr = 1 Warven-Jahr = 1 kalibriertes <sup>14</sup>C-Jahr = 1 Kalender-Jahr (Real-Jahr). Die Methoden werden nicht problematisiert.

**IntCal04 (26.000 – 0 kalibrierte [<sup>14</sup>C-] Jahre BP).** „Von 12,4–26 Tausend Jahre BP basiert IntCal04 auf marinen Datensätzen mit ortsspezifischen Reservoir-Korrekturen. Korallen-

<sup>166</sup> „U/Th and <sup>14</sup>C dating of corals provide <sup>14</sup>C age calibration beyond 10,000 <sup>14</sup>C yr BP (Bard et al. 1993)“ (STUIVER & REIMER 1993, 223).

<sup>167</sup> „The atmospheric INTCAL 98 curve consists of two segments, each derived from diverse materials and techniques. The materials used are wood (tree rings), coral and marine sediment. The <sup>14</sup>C activity measurement is common to all but the cal BP time scale determination differs. The wood samples (back to 11,850 cal BP) are dated through dendrochronological means, the corals through U-Th determinations, and the marine sediment through <sup>14</sup>C matching of (floating) varve and tree-ring chronologies. Marine coral and varve data, normalized on atmospheric levels, yield a 24,000–11,850 cal BP extension of the directly measured atmospheric values“ (STUIVER et al. 1998, 1051).

Aufzeichnungen liefern Kalibrierungsdaten für den Zeitraum von 12,4 bis 26 Tausend kalibrierte [<sup>14</sup>C-] Jahre BP (BARD et al. 1998; FAIRBANKS et al., in Kürze; CUTLER et al., diese Ausgabe; BURR et al., diese Ausgabe), Foraminiferen-Aufzeichnungen [zusätzlich] für den Zeitraum von 12,4 bis 14,7 Tausend kalibrierte [<sup>14</sup>C-] Jahre BP (HUGHEN et al., in dieser Ausgabe b).<sup>168,169</sup> – Kommentar: Die Methoden der Datengenerierung werden – da etabliert(?) – nicht (mehr) genannt. Es wird die Herkunft neuer und aktualisierter Datensätze mitgeteilt.

Anzumerken ist, dass zuvor von REIMER et al. (2002) erstmals „offizielle“ Kriterien für die Einbeziehung von Datensätzen in die internationale Radiokarbon-Kalibrierungskurve publiziert worden sind. Diese beziehen sich auf das Probenmaterial und die Datierung, klassifiziert nach: Baumringen<sup>170</sup>, Korallen, Nicht-Korallen-Karbonate, Zählung von Nicht-Dendro-Lagen. – Hier werden sog. „wahre ‚Kalibrierungs‘-Datensätze“ definiert, das sind solche, bei denen die Alter auf der Kalender-Achse (X-Achse) sehr präzise bekannt sind. Dazu zählen die „dendrochronologisch datierten Baumringe und die U/Th-datierten, nicht-alterierten Korallen“ (S. 653).

**IntCal09 (50.000 – 0 kalibrierte [<sup>14</sup>C-] Jahre BP).** „Die U-Th-Datierung kann genaue und unabhängige Zeitskalen für Korallen und Speläotheme liefern, und Foraminiferen in warvierten Sedimenten können manchmal durch Zählung der Warven genau datiert werden.“<sup>171</sup> Und: „Zusätzliche marine und terrestrische Datensätze sind verfügbar, deren Zeitskalen übertragen wurden durch eine klimatische Korrelation mit einer unabhängig datierten Aufzeichnung (z. B.  $\delta^{18}\text{O}$  von Eisbohrkernen oder U-Th-datierte Speläotheme) und/oder Verknüpfungspunkte wie unabhängig datierte Tephra.“<sup>172</sup> – Kommentar: U-Th-Zeitskalen und Eiskern-Zeitskalen sind – faktisch – Kalender-Zeitskalen; dies gilt für Warvenchronologien nicht mehr bzw. nur unter bestimmten Voraussetzungen. Insgesamt scheint sich abzuzeichnen, dass die U-Th-Zeitskala als faktische Kalender-Zeitskala direkt oder indirekt eine führende Rolle bei der Kalibration der Radiokarbon-Zeitskala (> 12.500 kalibrierte [<sup>14</sup>C-] Jahre BP) einnimmt.

**IntCal13 (50.000 – 0 kalibrierte [<sup>14</sup>C-] Jahre BP).** „Insbesondere haben wir Daten von nicht-warvierten, marinen Foraminiferen genutzt, die [zwar] große Kalender-Alter-Unsicherheiten aufweisen, aber ein Rückgrat für die atmosphärische [<sup>14</sup>C-] Kurve liefern, sowie U-Th-datierte Korallen und Speläotheme, die beide genaue Kalender-Alter haben (...).“<sup>173</sup> – Kommentar: Erneut werden die U-Th-Alter als Kalender-Alter herausgestellt. Die neu inkorporierten

<sup>168</sup> „From 12.4–26 kyr BP, IntCal04 is based on marine data sets with site-specific reservoir corrections. Coral records provide calibration data for the period from 12.4 to 26 cal kyr BP (Bard et al. 1998; Fairbanks et al., forthcoming; Cutler et al., this issue; Burr et al., this issue) with foraminifera records included for the period from 12.4 to 14.7 cal kyr BP (Hughen et al., this issue b)” (REIMER et al. 2004, 1033).

<sup>169</sup> Weiter unten (s. 1036) wird einmal erwähnt, dass die Korallen U-Th-datiert sind: „U/Th-dated coral“.

<sup>170</sup> Zu einer Diskussion dieser Kriterien und ihrer Einhaltung bzw. Nicht-Einhaltung s. KOTULLA (2019).

<sup>171</sup> „U-Th dating can provide accurate and independent timescales for corals and speleothems and foraminifera in varved sediments can sometimes be dated accurately by varve counting, but all have reservoir (or dead carbon fraction) correction issues“ (REIMER et al. 2009, 1113).

<sup>172</sup> „Additional marine and terrestrial data sets are available that have timescales transferred through climatic correlation with an independently dated record (such as  $\delta^{18}\text{O}$  of ice cores or U-Th dated speleothems) and/or tie-points, such as independently dated tephra“ (REIMER et al. 2009, 1113).

<sup>173</sup> „Specifically, we have exploited non-varved marine foraminifera data, which have large calendar age uncertainties but provide a backbone for the atmospheric curve, and U-Th-dated corals and speleothems, both of which have precise calendar ages (...)“ (REIMER et al. 2013, 1870).

Datensätze (BRONK RAMSEY et al. 2012, HOFFMANN et al. 2010, SOUTHON et al. 2012, DURAND et al. 2013, BARD et al. 2013; s. entsprechende Abschnitte dieses Beitrags) basieren alle direkt oder indirekt auf U-Th-Alter. Dies wird auch von REIMER et al. (2013) entsprechend vorgebracht.<sup>174</sup>

**IntCal20 (55.000 – 0 kalibrierte [<sup>14</sup>C-] Jahre BP).** „Da der ältere Teil der neuen Kurve direkt oder indirekt auf der U-Th-Zeitskala basiert (...).“<sup>175</sup> – Kommentar: Diese Entwicklung hatte sich abgezeichnet. Die Kalibrierung der Radiokarbon-Zeitskala mit der U-Th-Zeitskala (implizit Kalender-Zeitskala) – jenseits des dendrokalibrierten Teils – ist aktuell Konsensus und Standard.

## 5 Zusammenfassung

- (1a) Die Radiokarbon-Zeitskala ist eine Zeitskala, die aktuell nachfolgende Skalenbereiche umfasst:
- i) 50.000 – 0 konventionelle <sup>14</sup>C-Jahre BP.
  - ii) 55.000 – 0 kalibrierte <sup>14</sup>C-Jahre BP.
- Es gilt im Sinne der Herausgeber der Kalibrationskurve, der „IntCal Working Group“ (Kalibrations-Arbeitsgruppe): Die [IntCal-] kalibrierte Radiokarbon-Zeitskala ist Kalender-Zeitskala. Mit anderen Worten: Kalibrierte Radiokarbon-Alter sind Kalender-Alter (Real-Alter).
- (1b) Im Prozess der Radiokarbon-Datierung werden die ermittelten Radiokarbon-Konzentrationen (pMC) zunächst als konventionelle <sup>14</sup>C-Jahre BP ausgedrückt und schließlich unter Anwendung der Alterskalibrationskurve als Kalender-Alter (kalibrierte <sup>14</sup>C-Jahre) ausgewiesen.
- (1c) Eine quasi-kontinuierliche, vollumfängliche Radiokarbon-Überlieferung mit der Zeit können bestimmte See- und Meeressedimentfolgen und mitunter Speläothem-Akkumulationen liefern. Bestimmte einzelne Baum-Jahrringabfolgen und Abfolgen von Korallen-Riffkalken können dagegen nur abschnittsweise oder punktuell Radiokarbon-Daten liefern.
- (2a) Von 1993 bis 2020 ist die Reichweite der Radiokarbon-Kalibrationskurve sukzessive erweitert worden: zunächst bis 22.000 (1993), dann 26.000 (IntCal04) und, über mehrere Zwischenschritte, schließlich 55.000 kalibrierte <sup>14</sup>C-Jahre BP (IntCal20).
- (2b) Die Datenbasis bezogen auf das Probenmaterial bilden für den Skalenbereich von 55.000 bis 13.900 kalibrierte <sup>14</sup>C-Jahre BP (jenseits der Dendrokalibration):

<sup>174</sup> Zum Beispiel: „The SG06 varve chronology and its link to U-series-dated speleothem chronologies is detailed by Bronk Ramsey et al. (2012) (...)“ (REIMER et al 2013, 1872)

<sup>175</sup> „The largest changes in the IntCal20 calibration curve are during the last glacial period, particularly older than 30 cal kBP. Because the older portion of the new curve is based directly or indirectly on the U-Th timescale, a transfer function to the ice core GICC05 timescale will be possible (ADOLPHI et al. 2018)“ (REIMER et al. 2020, 23).

Makrofossilien des Suigetsu-Sees (Japan), Foraminiferen von marinen Sedimenten, Baumringe sowie Speläotheme (Höhlenminerale) und Korallen.

- (3a) Im Laufe der Erweiterung der Radiokarbon-Kalibrationskurve ist zunehmend der Versuch unternommen worden, die Radiokarbon-Zeitskala durch andere, mutmaßlich unabhängige und absolute Zeitskalen oder Chronologien zu kalibrieren.
- (3b) Diese Zeitskalen oder Chronologien gründen auf Stratigraphien (Gesteinsabfolgen), die aufgrund bestimmter Merkmale (z. B. Proxy-Daten) korrelier- und synchronisierbar sind.
- (3c) Auf die „Cariaco-Sedimentkerne“ (Venezuela) ist 2004 zunächst die Chronologie des GISP2-Eiskerns (Grönland), dann 2006 die U-Th-Zeitskala der Speläotheme der Hulu-Höhle (China) übertragen worden. Auf die „Suigetsu-Sedimentkerne“ (Japan) sind 2012 die U-Th-Zeitskalen des Hulu-Speläothems H82 und des Bahamas-Speläothems GB-89-25-3 übertragen worden.
- (3d) U-Th-Alter werden von der Kalibrations-Arbeitsgruppe und anderen als absolute Alter betrachtet. Demzufolge ist eine U-Th-Zeitskala eine Kalender-Zeitskala.
- (4a) Schließlich hat es sich zu einem Standard entwickelt, den älteren Teil der Radiokarbon-Kalibrationskurve (Punkt 2b) direkt oder indirekt auf die U-Th-Zeitskala zu basieren (vgl. IntCal20).
- (4b) Die U-Th-Zeitskala ist – aus Sicht des Verfassers – im Wesentlichen eine *nicht-verifizierte* Zeitskala.
  - i) Eine unabhängige Verifizierung bestätigt die Gültigkeit zurück bis einige Jahrhunderte.
  - ii) Die Verifizierung durch ältere, dendrokalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Alter ist nur eine scheinbare. Denn die älteren Abschnitte der langen Baumringchronologien, die den größten Anteil am dendrokalibrierten Teil der Kalibrationskurve ausmachen, sind nicht unabhängig validiert (KOTULLA 2019).
  - iii) Für den Skalenbereich  $> 14.000$   $^{230}\text{Th}$ -Jahre BP sind keine Vorschläge einer systematischen Verifizierung präsentiert worden. CHENG et al. (2018) führen für einen Punkt und zwei Abschnitte der Skala eine externe Verifizierung an, allerdings ist nicht bekannt, ob dieses eine externe Alter (ein  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -Alter) bzw. die zwei Altersspannen (Baumjarring-Sequenzen) kalendarisch valide sind.
- (5) Die Kalibration des älteren Teils der (konventionellen) Radiokarbon-Zeitskala mit der (einer) *nicht-verifizierten* U-Th-Zeitskala bedeutet, dass dieser Teil der kalibrierten Radiokarbon-Zeitskala damit auch nicht verifiziert ist. Insofern ist nicht bekannt, ob der Skalenabschnitt von 55.000 – 13.900 kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre BP tatsächlich Kalender-Alter repräsentiert.
- (6a) Es sind andere Methoden verwendet worden, die Radiokarbon-Zeitskala (unkalibriert oder kalibriert) direkt oder indirekt in ihrer Größenordnung zu validieren – aber ohne Erfolg. Hierzu gehören:

- (6b) Grönländische Eiskernchronologien. Die Grönland-Eiskernchronologie-2005 umfasst den Skalenabschnitt von 60.000 bis 0 [Eiskern-] Jahre b2k (vor 2000). Eine unabhängige Verifizierung – u. a. durch die Identifizierung von vulkanischen Aschenlagen historisch bekannten Alters – hat bislang eine Bestätigung der Gültigkeit zurück bis in das 8. nachchristliche Jahrhundert ergeben. Für den Skalenbereich > 1225 [Eiskern-] Jahre b2k ist die Gültigkeit der Grönland-Eiskernchronologie – nach Ansicht des Verfassers – nicht bekannt (KOTULLA 2022).
- (6c) Warvenchronologien. Für die Warvenchronologien „Cariaco-Becken“ und „Suigetsu-See“ ist eine jahreszeitliche Prägung (eine Warvierung) – Grundlage einer Jahres-schichten-Zählung – abschließend nicht nachgewiesen worden. Insofern sind sie für die Erstellung von Kalender-Chronologien nicht geeignet.
- (7a) Die Radiokarbon-Datierung ist „die am häufigsten verwendete Methode für die Datierung der letzten 55.000 Jahre“.<sup>176</sup> Die Radiokarbon-Alter werden häufig einfach als „Jahre“ ausgewiesen. Dies ist eingangs an einigen Beispielen gezeigt worden. Dieser Ausweis ist allerdings nicht differenzierend und irreführend.
- (7b) Die „Jahres“zahlen der Radiokarbon-Alter sind stratigraphisch und relativ-zeitlich (also mit Bezug auf eine Nacheinanderfolge) konsistent. Allerdings ist nicht bekannt, ob diese „Jahres“zahlen absolut gültig sind, also ob beispielsweise „50.000 Jahre vor heute“ *tatsächlich* „50.000 Jahre vor heute“ ist (bzw. war).
- (7c) Es wird deshalb vorgeschlagen (Punkt 7b), Radiokarbon-Alter in jedem Fall klar zu deklarieren:
- Zum Beispiel: 50.000 IntCal20-<sup>14</sup>C-Jahre BP (ggf. mit Spanne/Unsicherheit).

---

<sup>176</sup> Siehe Fußnote 1.

## Anhang I: Berechnung 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>177</sup>; Libby-Zerfallskonstante<sup>178</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>179</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).“

Des Weiteren ist definiert:

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

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

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

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

<sup>177</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>178</sup> Deshalb auch als Libby-Alter bezeichnet.

<sup>179</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 (Friedman et al, 1982).“

## Anhang II: Die Konstruktion wissenschaftlicher Fakten

LATOUR & WOOLGAR (1986, 76f) haben ein Prozedere entwickelt, das dazu verwendet werden kann, zu überprüfen und gegebenenfalls nachzuverfolgen, wie aus Mutmaßungen oder Spekulationen Fakten (Tatsachen) erwachsen. Dem Prozedere liegt eine hierarchische Klassifikation wissenschaftlicher Aussagen (statements) zugrunde. Es wird der Zusammenfassung von MIALI & MIALI (2004, 36) gefolgt (in Übersetzung):

- „Typ 1: Vermutungen und Spekulationen
- Typ 2: Behauptungen über Beziehungen oder Aussagen über vorläufige Beziehungen zwischen wissenschaftlichen Fakten/Prozessen
- Typ 3: Aussagen, die Verweise auf frühere Arbeiten enthalten, um eine vorgeschlagene Beziehung zu unterstützen
- Typ 4: Lehrbuchartige Aussagen über etablierte Fakten oder Beziehungen
- Typ 5: Als erwiesen angenommene [oder selbstverständliche, MK] Fakten, die keiner unterstützenden Referenz bedürfen“

Bei einer Analyse gelte es festzustellen, wann „Prämissen als unproblematisch produziert“ wurden und durch weitere Anwendung dieser Praktiken ein Beitrag zur „Transformation in Fakten“ geleistet worden sei. FUCHS (1992, 48) schreibt (in Übersetzung): „[Damit eine Aussage, MK] zum Faktum wird, muss eine Aussage die Konditionen bestimmen, unter welchen andere Aussagen, die von anderen Leuten gemacht werden, möglich sind. Das heißt, eine wissenschaftliche Aussage muss von anderen Wissenschaftlern als Basis oder Startpunkt ihrer eigenen Arbeit akzeptiert werden. (...) Je mehr andere Wissenschaftler eine Aussage als Prämisse nutzen, auf welche sie ihre eigenen Aussagen aufbauen, umso mehr wandeln sie diese Aussage in eine unproblematische Black Box und zu einer unbestrittenen Grundlage weiterer wissenschaftlicher Arbeit. Wissenschaftler tun dies bis zu einem Ausmaß, von dem sie überzeugt sind, dass ihre eigene Arbeit von einer Aussage abhängt. Wie Latour & Woolgar (1986, 259) ausführten: ‚Die Aktivität der Schaffung Schwarzer Boxen [Black Boxes, MK], der Wiedergabe der Elemente des Wissens separiert von den Umständen ihrer Erschaffung, ist genau das, was Wissenschaftler den Großteil der Zeit beschäftigt‘.“<sup>180</sup>

---

<sup>180</sup> „To become a fact, a statement must determine the conditions under which other statements made by other people are possible. That is, a scientific statement must be accepted by other scientists as the basis or starting point for their own work. The more other scientists use a statement as the premise on which to build their own statements, the more they turn that statement into an unproblematic black box and an unquestioned foundation for subsequent scientific work. Scientists do this to the extent to which they are convinced that their own work depends on a statement. As Latour and Woolgar (1986, p. 259) stated: “The activity of creating black boxes, of rendering items of knowledge distinct from the circumstances of their creation, is precisely what occupies scientists the majority of the time” (FUCHS 1992, 48).

## Glossar mit Verzeichnis der Abkürzungen

**Abb.:** Abbildung.

**Allerød:** Eine Phase der klimatostratigraphisch gegliederten, jüngeren Abschnitte des Quartär in NW-Europa. Die nachfolgenden relativen Kalt-/Warmphasen sind: → Jüngere Dryas (oberstes Pleistozän) und Präboreal (Holozän). Siehe Tab. 3.

**AMS:** Accelerator mass spectrometry, Beschleuniger-Massenspektrometrie.

**Ar:** Argon.

**Ar-Ar-Alter:** andere Bezeichnung:  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -Alter.

**Baumringchronologie (engl.: tree-ring chronology, dendrochronology):** Auch Dendrochronologie, Jahrringchronologie oder Jahrringkalender. Bezieht sich hier hauptsächlich auf die mit Baumringen (Jahrringen) konstruierten, langen (mehrtausendjährigen), ununterbrochenen und bis zur Gegenwart reichenden Chronologien. Generell: Chronologie aus  $n$  Jahrringabfolgen von  $n$  Bäumen.

**BP:** Before present, vor 1950 (Bezugsjahr).

**Cal:** Abkürzung für „calibrated“; hier für „kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -Jahre“ oder Kalender-Jahre.

**Chronologie:** Allgemein: Abfolge definierter Ereignisse, hier im engeren Sinne: „jahr“-genaue Chronologie durch Datierung der Ereignisse.

**Chronostratigraphie:** „Jener Teil der Stratigraphie, der sich mit den relativen Zeitbeziehungen und Alter der Gesteinskörper beschäftigt“ (SALVADOR 1994, 77) oder anders ausgedrückt mit „der relativen Zeitgliederung anhand von Gesteinskörpern“ (STEININGER & PILLER 1999, 4). Hier bezogen auf die formale Gliederung des Quartär (Tab. 3).

**$\delta^{18}\text{O}$ :** → Sauerstoffisotopenverhältnis.

**Dendro(-):** Als Vorsilbe oder verkürzt für → Dendrochronologie verwendet.

**Dendrochronologie:** Zusammengesetzt aus den griechischen Wörtern für Baum, Zeit und Lehre. Allgemein: Studium der chronologischen Sequenz jährlicher Wachstumsringe in Bäumen (nach STOKES & SMILEY 1968). Konkret (als Altersbestimmungsmethode): die Konstruktion einer lückenlosen Chronologie mit Baumjahrringen (→ Baumringchronologie) von der Gegenwart bis möglichst weit zurück in die Vergangenheit; synonym: Jahrringdatierung.

**Dansgaard-Oeschger-Ereignisse (DO-Ereignisse):** Abrupte  $\delta^{18}\text{O}$ -Anstiege, interpretiert als warm-klimatische Ereignisse (auch als Grönland-Interstadiale bezeichnet, → Interstadial); benannt nach Willi DANSGAARD und Hans OESCHGER.

**Eis(bohr)kern:** Erbohrter Eiszylinder mit einem Durchmesser von (meistens) etwa 10 cm.

**Eiskernchronologie:** Abfolge definierter Ereignisse im Eiskern, hier im engeren Sinne: „jahr“-genaue Chronologie durch Datierung der Ereignisse.

**Eiszeit:** Definierter relativ kälterer Zeitabschnitt (Kaltzeit, Glazial) während eines → Eiszeitalters. Die Betrachtung ist abhängig vom geographischen Ort (vgl. Sahara und Südpol). U. a. durch die Ausbreitung von Gletschern und Inlandeis charakterisiert.

**Eiszeitalter:** Zeitabschnitt, in welcher mindestens einer der Pole vergletschert ist (war). Der Zeitabschnitt soll durch einen Wechsel von Kalt- und Warmzeiten gekennzeichnet sein.

**Fig.:** Figure; hier: Abbildung.

Chronostratigraphie		Klimato-, Chemo- und Ereignisstratigraphie			
Serie/ Epoche	Stufe/ Alter	Terrestrisch	Terrestrisch	Eiskern (Grönland)	Marin
		Glazial- Gliederung NW-Europa	Kalt-/Warm- schwankungen "Klimato- stratigraphie" NW-Europa	Ereignis- Stratigraphie	Isotopen- stufen (MIS)
Holozän	Meghalayum	Postglazial (Warmzeit)	Subatlantikum Subboreal Atlantikum Boreal Präboreal		MIS 1 (w)
	Northgrippium				
	Grönlandium				
Pleistozän	Ober-	Weichsel- Kaltzeit	Jüngere Dryas (k) Alleröd (w) <b>LST</b> Ältere Dryas (k) Bölling (w)	G. Stadial 1 (GS-1)  G. Interstadial 1 (GI-1)	MIS 2 - MIS 5d
			(weitere)	(weitere bis GS/GI-25)	.....
	Chibanium	Eem- Warmzeit	Gliederung nicht ausgewiesen		MIS 5e (w)
		Saale- Kaltzeit (-Komplex)			MIS 6 - MIS 10 [7d]
		Holstein- Warmzeit			MIS 11 [7e] (w)
(...)	(weitere)	(weitere)			

**Tab. 3** Gliederung der jüngeren Abschnitte des Quartär und Eis/Land/Meer-Korrelation.

Legende: LST, Laacher-See-Tephra; (w), relativ wärmer; (k), relativ kälter; G = Grönland. [] vormalige MIS-Zuordnungen. Wiedergabe von Tabelle 2 aus KOTULLA (2022).

**Foraminiferen:** Kammerlinge, gehäusetragende Einzeller; die Mehrzahl der Formen besitzt ein Gehäuse aus  $\text{CaCO}_3$ .

**GISP2:** Greenland Ice Sheet Project 2 (Grönland-Eisschildprojekt 2), Bohrkampagne 1989–1993; s. KOTULLA (2022).

**Ggf.:** gegebenenfalls.

**Grönland-Interstadiale (GI):** Definierte Interstadiale der Grönland-Eismasse für die Weichsel-Kaltzeit (durchnummeriert, s. Abb. 22 und Tab. 3). → Interstadiale; → Dansgaard-Oeschger-Ereignisse; → Stadiale.

**GRIP:** Greenland Ice Core Project (Grönland-Eiskernprojekt), Bohrkampagne 1990–1992; s. KOTULLA (2022).

**Heinrich-Ereignisse:** Einschaltung dünner, gröberer Sedimentlagen (Korngröße: Sand bis Feinkies) in Ton/Silt-Feinsand-Wechselfolgen, die der letzten Kaltzeit (Weichsel-Kaltzeit, s. Tab.

3) zugerechnet werden. Die Detritus-Komponenten werden als „ice rafted detritus“ (IRD), durch Treibeis transportiert und beim Schmelzen freigesetzt, interpretiert. Es liegen insgesamt sechs solcher groben, nach Hartmut HEINRICH benannten Lagen (Ereignissen) vor: H1–H6. Das Sedimentations-Ereignis wiederum wird als Periode beschleunigter Eisfluss-Schübe interpretiert.

**Hohenheimer Jahrringkalender:** Nach Aussage der Konstrukteure rund 12.500 [Dendro-] Jahre lange, ununterbrochene Baumjahrringchronologie; bestehend aus **Hohenheim-Eichenchronologie** und **Hohenheim-Kiefernchronologie**. Siehe KOTULLA (2020), Blatt 5-23.

**Inkrement:** Zuwachs; schrittweise Erhöhung einer Größe (hier Durchmesser des Baums).

**IntCal:** International calibration. Die Abkürzung, zusätzlich mit einer zweistelligen Jahreszahl versehen, bezieht sich auf die herausgegebene atmosphärische  $\rightarrow$  ( $^{14}\text{C}$ -) Kalibrationskurve.

**Interstadiale:** Definierte kurzzeitige, relativ-wärmere Phasen zwischen zwei definierten  $\rightarrow$  Stadien.

**„Jahr“, „Jahresschicht“, „Jahresschichtenzählung“, „jahr genau“:** Mitunter in Anführungszeichen, um deutlich zu machen, dass es sich um fragliche Kalender-Jahre handelt.

**Jahrring(ab)folge, Jahrringbreiten-Reihe:** Eine einzelne, vermessene Abfolge von Jahrringen (Breiten) eines Baumquerschnitts oder einer Kernprobe; eine Jahrringabfolge ist eine Zeitreihe.

**Jüngere Dryas:** Eine Phase der klimatostratigraphisch gegliederten, jüngeren Abschnitte des Quartär in NW-Europa, stratigraphisch nach der relativen Warmphase  $\rightarrow$  Allerød; oberstes Pleistozän. Siehe Tab. 3.

**Kalibration, kalibrieren:** Eichung, eichen. Hier das Eichen (Ausrichten) der Radiokarbon-Zeitskala ( $\rightarrow$  Kalibrationskurve).

**Kalibrationskurve,  $^{14}\text{C}$ -Kalibrationskurve:** Hier die von der Kalibrations-Arbeitsgruppe (IntCal Working Group, IWG) jeweils herausgegebene atmosphärische  $^{14}\text{C}$ -Kalibrationskurve. Sie gilt als international anerkannt.

**Konventionelle  $^{14}\text{C}$ -Alter:** Errechnete  $^{14}\text{C}$ -Alter nach Gleichung 1 (Anhang I), nicht kalibriert.

**Komposit-Sedimentkern:** Zusammengesetzter, lückenloser Sedimentkern einer Bohrlokalität, von welcher mehrere nebeneinander liegende, Sedimentkerne gewonnen wurden (zur Überbrückung von Kernverlusten etc.); Master-Sedimentkern.

**Kreuzdatierung (engl.: cross-dating):** Der interpretative Vollzug einer zeitlichen Synchronisation oder Korrelation von zwei Jahrringabfolgen oder Jahrringbreiten-Mittelwertreihen bzw. einer Kombination von beiden auf Grundlage ihrer Muster von breiten und schmalen Jahrringen. Die Interpretation erfolgt visuell und/oder mit statistischen Methoden. Siehe KOTULLA (2020), Blatt 5-13.

**Laminae:** Mehrzahl von Lamina (Lamine), Laminen. Hier feine Schichtlagen mit Mächtigkeiten bis maximal 1 cm.

**LGIT:** Letzter Glazial/Interglazial-Übergang (oberstes Pleistozän/Holozän); umfasst im Konkreten das LGIT-Interstadial, Äquivalent zum nordatlantischen Bölling/Allerød und das LGIT-Stadial, Äquivalent zur nordatlantischen Jüngeren Dryas.

**Marin:** Das Meer betreffend; bezieht sich auf im (oder durch das) Meer (verursachte) ablaufende Prozesse und Bildungen.

**MIS, marine Isotopenstufen (engl.: Marine Isotope Stage):** Auch Sauerstoff-Isotopenstufen (OIS); Gliederung der abstrahierten Sauerstoffisotopen-Chronologie in Stufen (Oszillationen interpretiert als relativ wärmere bzw. relativ kältere Perioden) von der Gegenwart bis über die Grenze des Pleistozän/Pliozän hinaus (Grenze: ungefähr bei Stufe 103), aktueller Standard LR04 (LISIECKI & RAYMO 2005).

**Pa:** Protactinium.

**Paläoklima:** Das Klima der Vorzeit. Nach IPCC (2007): „Das *Klima* in Zeiten vor der Entwicklung von Messinstrumenten, einschließlich historische und geologische Zeiträume, für die nur [→] Proxy-Klimamessreihen verfügbar sind.“

**Pedosphäre:** Der Bereich der Erdoberfläche, der von Böden eingenommen wird.

**Proxy-Daten:** „Stellvertreter“-Daten. Interpretation von Datenreihen (z. B. aus Eisbohrkernen) als indirekte Anzeiger des → (Paläo-) Klimas, bspw. das → Sauerstoffisotopenverhältnis.

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

**Remanente Magnetisierung:** Fähigkeit von Mineralien (Gesteinen), das erdmagnetische Feld zur Zeit der Sediment- oder Gesteinsbildung (oder einer nachträglichen Erhitzung) in Form einer bleibenden (remanenten) Magnetisierung aufzuzeichnen und zu konservieren.

**$\sigma$ :** Standardabweichung (der Grundgesamtheit) bzw. Unsicherheit; verkürzt:  $1\sigma = 68,3$  %;  $2\sigma = 95,4$  %.

**s.:** siehe.

**S.:** Seite.

**Sauerstoffisotopenverhältnis:** Verhältnis von schweren zu leichten Isotopen in Relation zu einem internationalen Standard,  $\delta^{18}\text{O} = (((18\text{O}/16\text{O})_{\text{Probe}} / (18\text{O}/16\text{O})_{\text{Standard}}) - 1) \times 1000$  ‰; in Eiskernen werden höhere  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte als im Verhältnis wärmer, niedrigere  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte als im Verhältnis kälter interpretiert.

**Schwimmend (engl.: floating):** Hier eine „schwebende/nicht-verankerte“, (noch) nicht → „absolut-datierte“ Jahrringabfolge bzw. Baumringchronologie oder Warvenchronologie; auch als floatend bezeichnet.

**Stadiale:** Definierte kältere Phasen während eines definierten → Glazials oder → Interglazials.

**Stratigraphie:** Stratigraphie gilt der Beschreibung aller Gesteinskörper, die die Erdkruste aufbauen (auch der nicht geschichteten).

**Terrestrisch:** Das Land betreffend; bezieht sich auf Prozesse, Kräfte und Bildungen, die auf dem Festland auftreten.

**TIMS:** Thermal ionization mass spectrometry; Thermo-Ionen-Massenspektrometrie.

**Thermolumineszenz:** Prozess, bei welchem ein Material nach Bestrahlung (Wärmezufuhr) Photonen emittiert (Leuchterscheinungen).

**Turbidit:** Ein aus einem turbulent fließenden Trübe- oder Suspensionsstrom (turbidity current) gebildetes Sediment(gestein); die Sedimentkonzentration des Stroms beträgt 1–23 Volumenprozent. Es handelt sich um ein rasches Sedimentationsereignis.

**U-Th:** Uran-Thorium.

**U-Th-Alter:** andere Bezeichnungen:  $^{230}\text{Th}$ -Alter,  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ -Alter.

**Vs.:** versus; gegen(übergestellt), hier: bei Vergleichen.

**Warve:** (Fein)laminierte Sedimentablagerungen eines Jahres. Der Begriff Warve leitet sich von „varvig lera“ (schwedisch; im übertragenen Sinne „periodische Schichtung“) ab. Die moderne Definition von „Warve“ ist inhaltlich identisch mit „Jahresschicht“ oder „Jahreslage“; dementsprechend bedeutet „warviert“ jahreszeitlich geschichtet.

**Warvenchronologie:** Eine Zeitabfolge, die sich aus → Warven, d. h. aus 1-Jahres-Intervallen zusammensetzt.

**Wiggle-Matching:** An- oder Einpassung (Tuning) einer Radiokarbon-Mittelkurve einer → schwimmenden Chronologie auf die einer → „absolut-datierten“ Standardchronologie. Mit dieser Art vollzogenen Korrelation bzw. Synchronisation wird die schwimmende Chronologie „absolut-zeitlich“ verankert. Eine möglicherweise dadurch verlängerte Standardchronologie ist für diesen Abschnitt Radiokarbon-kalibriert.

**Zeit- bzw. Altersangaben:** Einfügungen in eckigen Klammern dienen – unter Inkaufnahme einer Verschlechterung der Lesbarkeit – zur Konkretisierung oder Klarstellung. Z. B. [<sup>14</sup>C-], [<sup>230</sup>Th-], [Eiskern-], [Dendro-] oder [Warven-] Jahre bzw. Alter.

## Tabellenverzeichnis

<b>Tab. 1</b> Zeittabelle für die Vor- bzw. Urgeschichte, Stand vor 1947. ....	73
<b>Tab. 2</b> Zeittabelle für die Vor- bzw. Urgeschichte II. ....	74
<b>Tab. 3</b> Gliederung der jüngeren Abschnitte des Quartär und Eis/Land/Meer-Korrelation. ....	87

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abb. 1</b> „Vor 50.000 Jahren“ .....	2
<b>Abb. 2</b> „46.000 Jahre“ .....	3
<b>Abb. 3</b> „45.000 Jahre“ .....	3
<b>Abb. 4</b> „23.000 Jahre alt“ .....	4
<b>Abb. 5</b> „Vor 17.000 Jahren“ .....	4
<b>Abb. 6</b> Komposit-Sedimentkern SG06 (Suigetsu-See): Alters-zu-Tiefen-Beziehung I. ....	6
<b>Abb. 7</b> Radiokarbon-Kalibrationskurve IntCal20. ....	7
<b>Abb. 8</b> Sedimentkerne von Korallen-Riffkalken südlich Barbados. ....	10
<b>Abb. 9</b> Korallen-Riffkalke (Barbados): <sup>230</sup> Th- und <sup>14</sup> C-Datenreihen. ....	11
<b>Abb. 10</b> Korallenproben I: Beziehung <sup>14</sup> C-Alter zu <sup>230</sup> Thorium-Alter. ....	15
<b>Abb. 11</b> Korallenproben II: Beziehung <sup>14</sup> C-Alter und <sup>231</sup> Pa-Alter zu <sup>230</sup> Thorium-Alter. ....	19
<b>Abb. 12</b> Korallenproben III: Beziehung <sup>14</sup> C-Alter zu <sup>230</sup> Thorium-Alter. ....	20
<b>Abb. 13</b> Kernbohrungen in Korallen-Riffkalken vor der Küste Tahitis. ....	22
<b>Abb. 14</b> Korallenproben IV: Beziehung <sup>14</sup> C-Alter zu <sup>230</sup> Thorium-Alter. ....	22
<b>Abb. 15</b> Laminierte Sedimente des Cariaco-Beckens. ....	23
<b>Abb. 16</b> Sedimentkern PL07-56PC (Cariaco-Becken): Alters-zu-Tiefen-Beziehung. ....	24

<b>Abb. 17</b>	Kern PL07-58PC: Beziehung $^{14}\text{C}$ -Alter zu Warven-Alter. ....	27
<b>Abb. 18</b>	Cariaco-Becken vor der Küste Venezuelas. ....	29
<b>Abb. 19</b>	Korrelation I: GISP2-Eiskern und Cariaco-Sedimentkern.....	30
<b>Abb. 20</b>	Alters-zu-Tiefen-Beziehung, Sedimentkerne ODP-1002. ....	31
<b>Abb. 21</b>	Alters-zu-Tiefen-Beziehung, Sedimentkern ODP-1002D. ....	33
<b>Abb. 22</b>	Korrelation II: Hulu-Stalagmiten und Cariaco-Sedimentkern.....	34
<b>Abb. 23</b>	Verankerungspunkte. ....	34
<b>Abb. 24</b>	Cariaco-Sedimentkern 1002D: Alters-zu-Tiefen-Beziehung.....	35
<b>Abb. 25</b>	Foraminiferen: Beziehung $^{14}\text{C}$ -Alter zu Eiskern-Alter. ....	37
<b>Abb. 26</b>	MD-Tiefseekerne: Beziehung $^{14}\text{C}$ -Alter zu Tiefe. ....	38
<b>Abb. 27</b>	MD-Tiefseekerne: Beziehung $^{14}\text{C}$ -Alter zu $^{230}\text{Th}$ -Alter.....	39
<b>Abb. 28</b>	Lage des Suigetsu-Sees. ....	42
<b>Abb. 29</b>	Komposit-Sedimentkern SG06 (Suigetsu-See): Alters-zu-Tiefen-Beziehung II.....	43
<b>Abb. 30</b>	Komposit-Sedimentkern SG06 (Suigetsu-See): Alters-zu-Tiefen-Beziehung III.....	44
<b>Abb. 31</b>	Komposit-Sedimentkern SG06 (Suigetsu-See): Alters-zu-Tiefen-Beziehung IV. ....	50
<b>Abb. 32</b>	Komposit-Sedimentkern SG06 (Suigetsu-See): Alters-zu-Tiefen-Beziehung V. ....	51
<b>Abb. 33</b>	Homepage (Screenshot) des Warven-Museums in Wakasa-cho, Japan.....	53
<b>Abb. 34</b>	Warven-Museum, Wakasa-cho, Japan. ....	54
<b>Abb. 35</b>	$\delta^{18}\text{O}$ -Wertereihen der Stalagmiten der Hulu-Höhle.....	59
<b>Abb. 36</b>	Altersmodell der $\delta^{18}\text{O}$ -Wertereihen der Stalagmiten der Hulu-Höhle. ....	60
<b>Abb. 37</b>	Stalagmit H82: Alters-zu-Tiefen-Beziehung.....	63
<b>Abb. 38</b>	Stalagmit MSD (Hulu-Höhle): Alters-zu-Tiefen-Beziehung.....	64
<b>Abb. 39</b>	Stalagmit MSL (Hulu-Höhle): Alters-zu-Tiefen-Beziehung.....	65
<b>Abb. 40</b>	Stalagmiten der Hulu-Höhle: Beziehung $^{14}\text{C}$ -Alter zu $^{230}\text{Th}$ -Alter.....	65
<b>Abb. 41</b>	Verkohltes Holz im Gelben Tuff des Kampanischen Ignimbrits. ....	67
<b>Abb. 42</b>	Kalibrierung der Baumring-Sequenz Finlayson 8.....	70
<b>Abb. 43</b>	Radiokarbonbestimmungen an Proben bekannten Alters.....	71
<b>Abb. 44</b>	MILANKOVITCHS Kurve der sommerlichen Bestrahlung, $65^\circ$ nördliche Breite. ....	74

## Danksagung

Für eine Durchsicht des Manuskripts und wertvolle Hinweise danke ich Dr. Martin ERNST, Dr. Reinhard JUNKER und Dr. Rafael SCHÄFFER.

## Literatur

- ADOLPHI F, BRONK RAMSEY C, ERHARDT T, EDWARDS RL, CHENG H, TURNEY CS, COOPER A, SVENSSON A, RASMUSSEN SO, & FISCHER H (2018) Connecting the Greenland ice-core and U/Th timescales via cosmogenic radionuclides: testing the synchronicity of Dansgaard–Oeschger events. *Climate of the Past* 14, 1755–1781.
- ALBRIGHT WF (1948) *From the Stone Age to Christianity*. Baltimore, 2nd edition, 2nd printing.
- ALEMPIC J-M, LARTIGUE A, GONCHAROV AE, GROSSE G, STRAUSS J, TIKHONOV AN, FEDOROV AN, POIROT O, LEGENDRE M, SANTINI S, ABERGEL C & CLAVERIE J-M (2022) An update on eukaryotic viruses revived from ancient perma-frost. bioRxiv, preprint: <https://doi.org/10.1101/2022.11.10.515937>
- Alfred-Wegener-Institut (2020) Forschende erstellen neuen internationalen Kohlenstoff-Datierungsstandard. Pressemitteilung vom 12. August 2020.
- APA (2023) Neandertaler sammelten schon vor 55.000 Jahren Jagdtrophäen in Höhle. Meldung der Austria Presse Agentur vom 26. Januar 2023.
- APPLEBY PG (1998) Dating recent sediments by  $^{210}\text{Pb}$ : problems and solutions. In: ILUS E (ed.) *Dating of sediments and determination of sedimentation rates. Proceeding of a seminar held in Helsinki, 2-3 April 1979*, 7–24.
- AWI (2021) 42.000 Jahre alte sub-fossile Bäume ermöglichen genauere Analyse der letzten Umpolung des Erdmagnetfelds. Alfred-Wegener-Institut, Pressemitteilung vom 18. Februar 2021.
- BAHRIG B (1985) Sedimentation und Diagenese im Laacher Seebecken (Osteifel). *Bochumer geol. U. geotechn. Arb.* 19, 1–231.
- BAHRIG B (1988) Paleo-environment information from deep water siderite (Lake of Laach, W. Germany). In: FLEET AJ, KELTS K & TALBOT MR (eds.) *Lacustrine Petroleum Source Rocks*. Geol. Soc. London, Spec. Publ. 40, 153–158.
- BAHRIG B (1989) Stable Isotope Composition of Siderite as an Indicator of the Palaeoenvironmental History of Oil Shale Lakes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 70, 139–151.
- BAQUEDANO E, ARSUAGA JL, PEREZ-GONZALEZ A, LAPLANA C, MARQUEZ B, HUGUET R, GOMEZ-SOLER S, VILLAESCUSA L, GALINDO-PELLICENA MA, RODRIGUEZ L, GARCIA-GONZALES E, ORTEGA M-C, MARTIN-PEREA DM, ORTEGA AI, HERNANDEZ-VIVANCO L, RUIZ-LISO G, GOMEZ-HERNANZ J, ALONSO-MARTIN JI, ABRUNHOSA A, MOCLAN A, CASADO AI, VEGARA-RIQUELME M, ALVAREZ-FERNANDEZ A, DOMINGUEZ-GARCIA AC, ALVAREZ-LAO DJ, GARCIA N, SEVILLA P, BLAIN H-A, RUIZ-ZAPATA B, GIL-GARCIA MJ, ALVAREZ-VENA A, SANZ T, QUAM R & HIGHAM T (2023) A symbolic Neanderthal accumulation of large herbivore crania. *Nature Human Behaviour* 7, 342–352.
- BARD E, ARNOLD M, FAIRBANKS RG & HAMELIN B (1993)  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  and  $^{14}\text{C}$  ages obtained by mass spectrometry on corals. *Radiocarbon* 35, 191–199.
- BARD E, ARNOLD M, HAMELIN B, TISNERAT-LABORDE N & CABIOCH G (1998) Radiocarbon calibration by means of mass spectrometric  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  and  $^{14}\text{C}$  ages of corals: an updated database including samples from Barbados, Mururoa and Tahiti. *Radiocarbon* 40, 1085–1092.
- BARD E, ARNOLD M, MANGERUD M, PATERNE M, LABEYRIE L, DUPRAT J, MELIERES MA, SONSTEGAARD E & DUPLESSY JC (1994) The North Atlantic atmosphere-sea surface  $^{14}\text{C}$  gradient during the Younger Dryas climatic event. *Earth and Planetary Science Letters* 126, 275–287.
- BARD E, FAIRBANKS RG, ARNOLD M & HAMELIN B (1992)  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  and  $^{14}\text{C}$  ages obtained by mass spectrometry on corals from Barbados (West Indies), Isabela (Galapagos) and Mururoa (French Polynesia). In: BARD E & BROECKER WS (eds) *The Last Deglaciation: Absolute and Radiocarbon Chronologies*, 103–112.
- BARD E, HAMELIN B, ARNOLD M, MONTAGGIONI L, CABIOCH G, FAURE G & ROUGERIE F (1996) Deglacial sea-level record from Tahiti corals and the timing of global meltwater discharge. *Nature* 382, 241–244.
- BARD E, HAMELIN B, FAIRBANKS RG & ZINDLER A (1990) Calibration of the  $^{14}\text{C}$  timescale over the past 30,000 years using mass spectrometric U-Th ages from Barbados corals. *Nature* 345, 405–410.
- BARD E, MÉNOT-COMBES G & ROSTEK F (2004b) Present status of radiocarbon calibration and comparison records based on Polynesian corals and Iberian Margin sediments. *Radiocarbon* 46, 1189–1202.
- BARD E, MÉNOT G, ROSTEK F, LICARI L, BÖNING P, EDWARDS RL, CHENG H, WANG YJ & HEATON TJ (2013) Radiocarbon calibration/comparison records based on marine sediments from the Pakistan and Iberian Margins. *Radiocarbon* 55, 1999–2019.
- BARD E, ROSTEK F & MÉNOT-COMBES G (2004a) Radiocarbon calibration beyond 20,000  $^{14}\text{C}$  yr B.P. by means of planktonic foraminifera of the Iberian Margin. *Quaternary Research* 61, 204–214.
- BECKER B (1993) An 11,000-year German oak and pine dendrochronology for radiocarbon calibration. *Radiocarbon* 35, 201–213.
- BECKER B & KROMER B (1986) Extension of the Holocene dendrochronology by the Preboreal pine series, 8800 to 10,100 BP. *Radiocarbon* 28, 964–968.

- BENNETT MR, BUSTOS D, PIGATI JS, SPRINGER KB, URBAN TM, HOLLIDAY VT, REYNOLDS SC, BUDKA M, HONKE JS, HUDSON AM, FENERTY B, CONELLY C, MARTINEZ PJ, SANTUCCI VL & ODESS D (2021) Evidence of humans in North America during the Last Glacial Maximum. *Science* 373, 1528–1531.
- BERGMAYR T (2023) Urzeitliches Megalithbauwerk: Die älteste Pyramide der Welt könnte 25.000 Jahre alt sein. *Der Standard* (derstandard.de), 11. November 2023.
- BERRY AL (1973) Thermoluminescence of Hawaiian basalts. *Journal of Geophysical Research* 78, 6863–6867.
- BIRKS HH, GULLIKSEN S, HAFLIDASON H, MANGERUD J & POSSNERT G (1996) New radiocarbon dates for the Vedde Ash and the Saksunarvatn Ash from western Norway. *Quaternary Research* 45, 119–127.
- BJÖRCK S, KROMER B, JOHNSEN S, BENNIKE O, HAMMARLUND D, LEMDAHL G, POSSNERT G, RASMUSSEN TL, WOHLFARTH B, HAMMER CU & SPURK M (1996) Synchronized terrestrial-atmospheric deglacial records around the North Atlantic. *Science* 274, 1155–1160.
- BOARETTO E, HERNANDEZ M, GODER-GOLDBERGER M, ALDEIAS V, REGEV L, CARACUTA V, MCPHERRON SP, HUBLIN J-J, WEINER S & BARZILAI O (2021) The absolute chronology of Boker Tachtit (Israel) and implications for the Middle to Upper Paleolithic transition in the Levant. *PNAS* 118, <https://doi.org/10.1073/pnas.2014657118>
- BONK A, MÜLLER D, RAMISCH A, KRAMKOWSKI MA; NORYSKIEWICZ AM, SEKUDEWICZ I, GASIOROWSKI M, LUBERDA-DURNAS K, STOWINSKI M, SCHWAB M, TJALLINII R, BRAUER A & BLASZKIEWICZ M (2021) Varve microfacies and chronology from a new sediment record of Lake Goszcz (Poland). *Quaternary Science Reviews* 251, 106715.
- BOSWIJK G, JOHNS D & HOGG A (2019) Dendroarchaeology in New Zealand: assessing potential to extend the suite of useful tree species beyond kauri (*Agathis australis*). *Journal of Pacific Archaeology* 10, 33–44.
- BRONK RAMSEY C, HEATON TJ, SCHLOLAUT G, STAFF RA, BRYANT CL, LAMB HF, MARSHALL MH & NAKAGAWA T (2020) Reanalysis of the atmospheric radiocarbon calibration record from Lake Suigetsu, Japan. *Radiocarbon* 62, 989–999.
- BRONK RAMSEY C, STAFF RA, BRYANT CL, BROCK F, KITAGAWA H, VAN DER PLICHT J, SCHLOLAUT G, MARSHALL MH, BRAUER A, LAMB HF, PAYNE RL, TARASOV PE, HARAGUCHI T, GOTANDA K, YONENOBU H, YOKOYAMA Y, TADA R & NAKAGAWA T (2012) A Complete Terrestrial Radiocarbon Record for 11.2 to 52.8 kyr B.P. *Science* 338, 370–374.
- BUCHA V (1970) General discussion of C14 and varve chronology. In: OLSSON IU (ed.) *Radiocarbon Variations and Absolute Chronology*. Proceedings of the Twelfth Nobel Symposium held at the Institute of Physics at Uppsala University, 219–230.
- CHENG H, EDWARDS RL, SINHA A, SPÖTL C, YI L, CHEN S, KELLY M, KATHAYAT G, WANG X, LI X, KONG X, WANG Y, NING Y & ZHANG H (2016) The Asian monsoon over the past 640,000 years and ice age terminations. *Nature* 534, 640–648.
- CHENG H, EDWARDS RL, SOUTHON J, MATSUMOTO K, FEINBERG JM, SINHA A, ZHOU W, LI H, LI X & XU Y (2018) Atmospheric  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  changes during the last glacial period from Hulu Cave. *Science* 362, 1293–1297.
- CIACCIA C (2021) Neanderthals and Homo sapiens lived TOGETHER in Israel's Negev Desert 50,000 years ago, carbon dating research finds. *Daily Mail* (dailymail.com), 15./16. Juni 2021.
- COOPER A, TURNEY CSM, PALMER J, HOGG A, MCGLONE M, WILMSHURST J, LORREY AM, HEATON TJ, RUSSELL JM, MCCRACKEN K, ANET JG, ROZANOV E, FRIEDEL M, SUTER I, PETER T, MUSCHELER R, ADOLPHI F, DOSSETO A, FAITH JT, FENWICK P, FOGWILL CJ, HUGHEN K, LIPSON M, LIU J, NOWACZYK N, RAINSLY E, BRONK RAMSEY C, SEBASTIANELLI P, SOUILMI Y, STEVENSON J, THOMAS Z, TOBLER R & ZECH R (2021) A global environmental crisis 42,000 years ago. *Science* 371, DOI:10.1126/science.abb8677
- CREER KM (1974) Geomagnetic variations for the interval 7000–25,000 yr B.P. as recorded in a core of sediment from station 1474 of the Black Sea cruise of “Atlantis II”. *Earth and Planetary Science Letters* 23, 34–42.
- CROSS M (compiler) (1997) Greenland summit ice cores. National Snow and Ice Data Center, University of Colorado at Boulder, in association with the World Data Center for Paleoclimatology at NOAA-NGDC, and the Institute of Arctic and Alpine Research. CD-ROM. [aktuell verfügbar als Download unter: <https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.870454>; GRIP/GISP (1997) The Greenland Summit Ice Cores CD-ROM GISP2/GRIP].
- CUTLER KB, GRAY SC, BURR GS, EDWARDS RL, TAYLOR FW, CABIOCH G, BECK JW, CHENG H & MOORE J (2004) Radiocarbon calibration to 50 kyr BP with paired  $^{14}\text{C}$  and  $^{230}\text{Th}$  dating of corals from Vanuatu and Papua New Guinea. *Radiocarbon* 46, 1127–1160.
- DANSGAARD W, JOHNSEN SJ, CLAUSEN HB, DAHL-JENSEN D, GUNDESTRUP NS, HAMMER CU, HVIDBERG CS, STEFFENSEN JP, SVEINBJÖRNDOTTIR AE, JOUZEL J & BOND G (1993) Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature* 364, 218–220.
- DEINO AL, SOUTHON J, TERRASI F, CAMPATOLA L & ORSI G (1994)  $^{14}\text{C}$  and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of the Campanian Ignimbrite, Phlegrean Fields, Italy. Abstracts, ICOG 1994, CA, Berkeley.
- Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ (2012) Schärfere Blick zurück für die Archäologie und Klimaforschung. Pressemitteilung vom 19. 10. 2012.
- DE GEER G (1912) A geochronology of the last 12000 years. *Congr. Géol. Int. Stockholm* 1910, 241–253.
- DE GEER G (1934) Geology and geochronology. *Geogr. Annaler* 1, 1–52.
- DE GEER G (1940) *Geochronologia Suecia Principes*. K. Svenska Vetenskapsakad. Handl. 18 (6).

- DE VIVO B, ROLANDI G, GANS PB, CALVERT A, BOHRSON WA, SPERA FJ & BELKIN HE (2001) New constraints on the pyroclastic eruptive history of the Campanian volcanic Plain (Italy). *Mineralogy and Petrology* 73, 47–65.
- DE VRIES H (1958) Variation in concentration of radiocarbon with time and location on earth. *Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie Van Wetenschappen Series B* 61, 94–102.
- DUNWIDDIE PE (1979) Dendrochronological studies of indigenous New Zealand trees. *New Zealand Journal of Botany* 17, 251–266.
- DURAND N, DESCHAMPS P, BARD E, HAMELIN B, CAMOIN G, THOMAS AL, HENDERSON GM, YOKOYAMA Y & MATSUZAKI H (2013) Comparison of  $^{14}\text{C}$  and U-Th in corals from IODP #310 cores offshore Tahiti. *Radiocarbon* 55, 1947–1974.
- EDWARDS RL (1988) High Precision Thorium-230 Ages of Corals and the Timing of Sea Level Fluctuations in the Late Quaternary. Diss., California Institute of Technology.
- EDWARDS RL, BECK JW, BURR GS, DONAHUE DJ, CHAPPELL JMA, BLOOM AL, DRUFFEL ERM & TAYLOR FW (1993) A large drop in atmospheric  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  and reduced melting in the Younger Dryas, documented with  $^{230}\text{Th}$  ages of corals. *Science* 260, 962–968.
- EDWARDS RL, CHEN JH & WASSERBURG GJ (1987)  $^{238}\text{U}$ - $^{234}\text{U}$ - $^{230}\text{Th}$ - $^{232}\text{Th}$  systematics and the precise measurement of time over the past 500,000 years. *Earth and Planetary Science Letters* 81, 175–192.
- EDWARDS RL, CHENG H, MURRELL MT & GOLDSTEIN SJ (1997) Protactinium-231 dating of carbonates by thermal ionization mass spectrometry: implications for Quaternary climate change. *Science* 276, 782–786.
- EDWARDS RL, TAYLOR FW & WASSERBURG GJ (1988) Dating earthquakes with high-precision thorium-230 ages of very young corals. *Earth and Planetary Science Letters* 90, 371–381.
- Expedition 310 Scientists (2007) Expedition 310 summary. In: CAMOIN GF, IRYU Y, MCINROY DB & the Expedition 310 Scientists. Proc. IODP, 310: Washington, DC (Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc.). doi:10.2204/iodp.proc.310.101.2007.
- FAIRBANKS RG (1988) Barbados Offshore Drilling Program – Cruise Report. Columbia University, New York. <https://archive.org/details/barbadosoffshore00fair>
- FAIRBANKS RG (1988) A 17,000-year glacio-eustatic sea level record: influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep-ocean circulation. *Nature* 342, 637–642.
- FAIRBANKS RG, MORTLOCK RA, CHIU TC, CAO L, KAPLAN A, GUILDERSON TP, FAIRBANKS TW, BLOOM AL, GROOTES PM & NADEAU MJ (2005) Radiocarbon calibration curve spanning 0 to 50,000 years BP based on paired Th-230/U-234/U-238 and C-14 dates on pristine corals. *Quaternary Science Reviews* 24, 1781–1796.
- FEDELE FG, GIACCIO B, ISAIA R & ORSI G (2003) The Campanian Ignimbrite eruption, Heinrich event 4 and the Palaeolithic change in Europe: a high-resolution investigation. In: ROBOCK A & OPPENHEIMER C (eds.) *Volcanism and Earth's Atmosphere*. AGU Geophysical Monograph 139, 301–325.
- FINCH D, GLEADOW A, HERGT J, HEANEY P, GREEN H, MYERS C, VETH P, HARPER S, OUZMAN S & LEVCHENKO VA (2021) Ages for Australia's oldest rock paintings. *Nature Human Behaviour* 5, 310–318.
- FOUCHER A, CHABOCHE P-A, SABATIER P & EVRARD O (2021) A worldwide meta-analysis (1977–2020) of sediment core dating using fallout radionuclides including  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ . *Earth System Science Data* 13, 4951–4966.
- FRIEDMAN I, O'NEIL J & CEBULA G (1982) *Geostandards Newsletter* 6, 11–12.
- 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.
- FUCHS S (1992) *The Professional Quest for Truth: A Social Theory of Science and Knowledge*. Albany, NY.
- GARMS A (2021) Dieses Känguru wurde vor 17.000 Jahren gezeichnet. *GEO (geo.de)*, 23. Februar 2021.
- GIACCIO B, HAJDAS I, ISAIA R, DEINO A & NOMADE S (2017) High-precision  $^{14}\text{C}$  and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of the Campanian Ignimbrite (Y-5) reconciles the time-scales of climatic-cultural processes at 40 ka. *Scientific Reports* 7, 45940; doi: 10.1038/srep45940.
- GIACCIO B, ISAIA R, FEDELE FG, DI CANZIO E, HOFFECKER J, RONCHITELLI A, SINITSYN AA, ANIKOVICH M, LISITSYN SN & POPOV VV (2008) The Campanian Ignimbrite and Codola tephra layers: Two temporal/stratigraphic markers for the Early Upper Palaeolithic in southern Italy and eastern Europe. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 177, 208–226.
- GODWIN H (1962) Half-life of Radiocarbon. *Nature* 195, 984.
- GOSLAR T (1998) Chronological base - reconstruction of yearly cycles in the Lake Gościąg youngest sediments. In: RALSKA-JASIEWICZOWA M, GOSLAR T, MADEYSKA T & STARKEL L (eds.) *Lake Gościąg, Central Poland. A Monographic Study. Part I*, 301–309. Kraków.
- GOSLAR T, ARNOLD M, BARD E, KUC T, PAZDUR MF, RALSKA-JASIEWICZOWA M, ROZANSKI K, TISNERAT N, WALANUS A, WICIK B & WICKOWSKI K (1995) High concentration of atmospheric  $^{14}\text{C}$  during the Younger Dryas cold episode. *Nature* 377, 414–417.

- GOSLAR T, KUC T, PAZDUR MF, RALSKA-JASIEWICZOWA M, ROZANSKI, K, SZEROCZYFFSKA K, WALANUS A, WICIK B, WIECKOWSKI K, ARNOLD M & BARD E (1992) Possibilities of reconstruction of radiocarbon level changes during the Late Glacial by laminated sequence of the Gosciak Lake. *Radiocarbon* 34, 826–832.
- GOSLAR T, KUC T, RALSKA-JASIEWICZOWA M, RÓŻAŃSKI K, ARNOLD M, BARD E, VAN GEEL B, PAZDUR MF, SZEROCZYŃSKA K, WICIK B, WIECKOWSKI K & WALANUS A (1993) High-resolution lacustrine record of the Late Glacial/Holocene transition in Central Europe. *Quaternary Science Reviews* 12, 287–294.
- GRIP Members (1993) Climate instability during the last interglacial period recorded in the GRIP ice core. *Nature* 364, 203–207.
- GRÖNVOLD K, ÓSKARSSON N, JOHNSEN SJ, CLAUSEN HB, HAMMER CU, BOND G & BARD E (1995) Ash layers from Iceland in the Greenland GRIP ice core correlated with oceanic and land sediments. *Earth and Planetary Science Letters* 135, 149–155.
- HEBERER G (Hrsg.) (1943) *Die Evolution der Organismen*. Jena.
- HOFFMANN DL, BECK, JW, RICHARDS DA, SMART PL, SINGARAYER JS, KETCHMARK T & HAWKESWORTH CJ (2010) Towards radiocarbon calibration beyond 28ka using speleothems from the Bahamas. *Earth and Planetary Science Letters* 289, 1–10.
- HOFFMANN S (2022) 50.000 Jahre alt: Forschende erwecken unbekannte Viren aus dem Permafrost. GEO (Geo.de), 29. November 2022.
- HOLDEN NE (1990) Total half-lives for selected nuclides. *Pure & Appl. Chem.* 62, 941–958.
- HUA Q, BARBETTI M, FINK D, KAISER KF, FRIEDRICH M, KROMER B, LEVCHENKO VA, ZOPPI U, SMITH AM & BERTUCH F (2009) Atmospheric  $^{14}\text{C}$  variations derived from tree rings during the early Younger Dryas. *Quaternary Science Reviews* 28, 2892–2900.
- HUGHEN KA & HEATON TJ (2020) Updated Cariaco Basin  $^{14}\text{C}$  calibration dataset from 0–60 cal kyr BP. *Radiocarbon* 62, 1001–1043.
- HUGHEN KA, LEHMAN S, SOUTHON J, OVERPECK J, MARCHAL O, HERRING C & TURNBULL J (2004b)  $^{14}\text{C}$  activity and global carbon cycle changes over the past 50,000 years. *Science* 303, 202–207.
- HUGHEN KA, OVERPECK JT, LEHMAN SJ, KASHGARIAN M, SOUTHON J & PETERSON LC (1998b) A new  $^{14}\text{C}$  calibration data set for the last deglaciation based on marine varves. *Radiocarbon* 40, 483–494.
- HUGHEN KA, OVERPECK JT, LEHMAN SJ, KASHGARIAN M, SOUTHON J, PETERSON LC, ALLEY R & SIGMAN DM (1998a) Deglacial changes in ocean circulation from an extended radiocarbon calibration. *Nature* 391, 65–68.
- HUGHEN KA, OVERPECK JT, PETERSON LC & ANDERSON RF (1996a) The nature of varved sedimentation in the Cariaco Basin, Venezuela, and its palaeoclimatic significance. In: KEMP AES (ed.) *Palaeoclimatology and Palaeoceanography from Laminated Sediments*. Geological Society Special Publication 116, 171–183.
- HUGHEN KA, OVERPECK JT, PETERSON LC & TRUMBORE S (1996b) Rapid climate changes in the tropical Atlantic region during the last deglaciation. *Nature* 380, 51–54.
- HUGHEN K, SOUTHON JR, BERTRAND CJH, FRANTZ B & ZERMENO P (2004a) Cariaco Basin calibration update: revisions to calendar and  $^{14}\text{C}$  chronologies for Core PL07-58PC. *Radiocarbon* 46, 1161–1187.
- HUGHEN K, SOUTHON J, LEHMAN S, BERTRAND C & TURNBULL J (2006) Marine-derived  $^{14}\text{C}$  calibration and activity record for the past 50,000 years updated from the Cariaco Basin. *Quaternary Science Reviews* 25, 3216–3227.
- HUGHEN KA, SOUTHON JR, LEHMAN SJ & OVERPECK JT (2000) Synchronous radiocarbon and climate shifts during the last deglaciation. *Science* 290, 1951–1954.
- JOHNSEN SJ, DAHL-JENSEN D, GUNDESTRUP N, STEFFENSEN JP, CLAUSEN HB, MILLER H, MASSON-DELMOTTE V, SVEINBJONSDOTTIR AE & WHITE J (2001) Oxygen isotope and paleotemperature records from six Greenland ice-core stations: Camp Century, Dye-3, GRIP, GISP 2, Renland, and NorthGrip. *Journal of Quaternary Science* 16, 299–307.
- JOHNSEN SJ, DANSGAARD W, CLAUSEN HB, LANGWAY CC JR (1972) Oxygen Isotope Profiles through the Antarctic and Greenland Ice Sheets. *Nature* 235, 429–434.
- JOHNSON F (1969) Betrachtungen über die Bedeutung und Zuverlässigkeit von Radiokohlenstoffdatierungen. In: LIBBY WF (1969) *Altersbestimmung mit der  $\text{C}^{14}$ -Methode*. Mannheim, 172–191.
- KARBERG S (2017) Steinzeitjäger: Säbelzähntiger lebte bis vor 28.000 Jahren in Europa. *Tagesspiegel* (tagesspiegel.de), 20. Oktober 2017.
- KAUFMAN A (1971) U-series dating of Dead Sea basin carbonates. *Geochim et Cosmochim Acta* 35, 1269–1281.
- KITAGAWA H, FUKUSAWA H, NAKAMURA T, OKAMURA M, TAKEMURA K, HAYASHIDA A & YASUDA Y (1995) AMS  $^{14}\text{C}$  dating of varved sediments from Lake Suigetsu, central Japan and atmospheric  $^{14}\text{C}$  change during the late Pleistocene. In: COOK GT, HARKNESS DD, MILLER BF & SCOTT EM (eds.) *Proceedings of the 15th International  $^{14}\text{C}$  Conference*. *Radiocarbon* 37, 371–378.
- KITAGAWA H & VAN DER PLICHT J (1998a) A 40,000-year varve chronology from Lake Suigetsu, Japan: extension of the  $^{14}\text{C}$  calibration curve. *Radiocarbon* 40, 505–515.
- KITAGAWA H & VAN DER PLICHT J (1998b) Atmospheric radiocarbon calibration to 45,000 yr BP: late glacial fluctuations and cosmogenic isotope production. *Science* 279, 1187–1190.

- KITAGAWA H & VAN DER PLICHT J (2000) Atmospheric radiocarbon calibration beyond 11,900 cal BP from Lake Suigetsu laminated sediments. *Radiocarbon* 42, 369–380.
- KOTULLA M (2015) Sedimentfolgen und ihre Interpretation: Zyklusstratigraphie und das Milankovich-Zyklus-Syndrom. W+W Special Paper G-15-1, Bayersbronn; [https://www.wort-und-wissen.org/wp-content/uploads/g-15-1\\_zyklusstratigraphie\\_und\\_milankovich-zyklen.pdf](https://www.wort-und-wissen.org/wp-content/uploads/g-15-1_zyklusstratigraphie_und_milankovich-zyklen.pdf)
- 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)
- KOTULLA M (2020) Gültigkeit und Grenzen geologischer Zeitbestimmung. Online-Loseblattsammlung, 2. Ergänzungslieferung. <https://www.wort-und-wissen.org/publikationen/geologie-loseblattsammlung/>
- KOTULLA M (2022) Grönländische Eisbohrkerne und ihre Interpretation: Absolute Datierung durch Zählung von Jahresschichten? 3., erweiterte und überarbeitete Auflage. W+W Special Paper G-22-2, Bayersbronn. [https://www.wort-und-wissen.org/wp-content/uploads/g-22-2\\_datierung\\_eiskerne.pdf](https://www.wort-und-wissen.org/wp-content/uploads/g-22-2_datierung_eiskerne.pdf)
- KROMER B & BECKER (1992) Tree-ring  $^{14}\text{C}$  calibration at 10.000 BP. In: BARD E & BROECKER WS (eds.) *The Last Deglaciation: Absolute and Radiocarbon Chronologies*, 3–11.
- KROMER B & BECKER B (1993) German oak and pine  $^{14}\text{C}$  calibration, 7200–9439 BC. *Radiocarbon* 35, 125–135.
- KROMER B & SPURK M (1998) Revision and tentative extension of the tree-ring based  $^{14}\text{C}$  calibration, 9200–11,855 cal BP. *Radiocarbon* 40, 1117–1125.
- KROMER B, FRIEDRICH M, HUGHEN KA, KAISER F, REMMELE S, SCHAUB M & TALAMO S (2004) Late glacial  $^{14}\text{C}$  ages from a floating, 1382-ring pine chronology. *Radiocarbon* 46, 1203–1209.
- LATOUR B & WOOLGAR S (1986) *Laboratory Life: The Construction of Scientific Knowledge*. 2nd ed., Princeton, NJ.
- LAY C (2004) MD132–P.I.C.A.S.S.O IMAGES XI, Crusie Report. Institut Polaire Francais, Plouzané.
- LIBBY WF (1952) *Radiocarbon Dating*. Chicago.
- LIBBY WF (1955) *Radiocarbon Dating*. 2<sup>nd</sup> ed., Chicago.
- LIBBY WF (1960) Radiocarbon dating. Nobel Lecture, December 12, 1960.
- LIBBY WF (1963) Accuracy of radiocarbon dates. *Science* 140, 278–280.
- LIBBY WF (1969) Altersbestimmung mit der  $\text{C}^{14}$ -Methode. Mannheim.
- LISIECKI LE & RAYMO ME (2005) A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic  $\delta^{18}\text{O}$  records, *Paleoceanography* 20, PA1003, doi: 10.1029/2004PA001071.
- LI W-X, LUNDBERG J, DICKIN AP, FORD DC, SCHWARCZ HP, MCNUTT R & WILLIAMS D (1989) High-precision mass-spectrometric uranium-series dating of cave deposits and implications for paleoclimate studies. *Nature* 339, 534–536.
- LORREY AM (2008) The Late Quaternary Palaeoclimate Record in Kauri Tree Rings. Unpublished PhD thesis, School of Geology, Geography, and Environmental Science, University of Auckland, New Zealand.
- LORREY AM, PALMER J, HOGG A & TURNEY C (2005) Tree-Ring Analysis of Sub-Fossil Kauri (*Agathis australis*) from Black Swamp Road, Mangawhai, New Zealand. New Zealand Tree-ring Site Report 23, School of Geography and Environmental Science Working paper 33.
- LORREY AM, PALMER J, TURNEY C & HOGG A (2007) Tree-ring Analysis of Sub-Fossil Kauri (*Agathis australis*) from Colin Payne's Farm, Mangawhai, New Zealand. New Zealand Tree-ring Site Report 25, School of Geography and Environmental Science Working paper 34.
- LUDWIG KR, SIMMONS KR, SZABO BJ, WINOGRAD IJ, LANDWEHR JM, RIGGS AC & HOFFMAN RJ (1992) Mass-spectrometric  $^{230}\text{Th}$ - $^{234}\text{U}$ - $^{238}\text{U}$  dating of the Devils Hole calcite vein. *Science* 258, 284–287.
- MACKERETH FH (1971) On the variation in direction of the horizontal component of remanent magnetisation in lake sediments. *Earth and Planetary Science Letters* 12, 332–338.
- MARSHALL M, SCHLOLAUT G, BRAUER A, NAKAGAWA T, STAFF RA, BRONK RAMSEY C, LAMB H, GOTANDA K, HARAGUCHI T, YOKOYAMA Y, YONENOBU H, TADA R & SG06 project members (2012) A novel approach to varve counting using mXRF and Xradiography in combination with thin-section microscopy, applied to the Late Glacial chronology from Lake Suigetsu, Japan. *Quaternary Geochronology* 13, 70–80.
- MARTINEZ N, MURRAY RW, THUNELL RC, PETERSON LC, MULLER-KARGER FE, ASTOR Y & VARELA R (2007) Modern climate forcing of terrigenous deposition in the tropics (Cariaco Basin, Venezuela). *Earth and Planetary Science Letters* 264, 438–451.
- MARTINSON DG, PISIAS NG, HAYS JD, IMBRIE JD, MOORE TC & SHACKLETON NJ (1987) Age Dating and the orbital theory of the ice ages: development of a high-resolution 0 to 300,000-year chronostratigraphy. *Quaternary Research* 27, 1–29.
- MC ELHINNY MW & SENANAYAKE WE (1982) Variations in the Geomagnetic Dipole 1: The Past 50,000 Years. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity* 34, 39–51.

- MDR (2023) Studie bestätigt: Älteste Fußabdrücke Nordamerikas sind 23.000 Jahre alt. Mitteldeutscher Rundfunk (mdr.de), 6. Oktober 2023.
- MEESE DA, GOW AJ, ALLEY RB, ZIELINSKI GA, GROOTES PM, RAM M, TAYLOR KC, MAYEWSKI PA & BOLZAN JF (1997) The Greenland Ice Sheet Project 2 depth-age scale: Methods and results. *Journal of Geophysical Research* *102*, C12, 26411–26423.
- MIALL AD & MIALL CE (2004) Empiricism and model-building in stratigraphy: Around the hermeneutic cycle in the pursuit of stratigraphic correlation. *Stratigraphy* *1*, 27–46.
- MILANKOVITCH M (1920) Théorie mathématique des phénomènes thermiques produits par la radiation solaire. Acad. Yougoslave Sci. Arts, Zagreb.
- MILANKOVITCH M (1930) Mathematische Klimalehre und astronomische Theorie der Klimaschwankungen. In: KÖPPEN W & GEIGER R (Eds.) *Handbuch der Klimatologie*. Berlin, 1–176.
- MILANKOVITCH M (1941) Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem. Ed. Spec. Acad. Royale Serbe, Belgrad.
- MPI (Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie) (2024) Der moderne Mensch erreichte das nördliche Europa schon vor 45.000 Jahren. Pressemitteilung vom 31. Januar 2024.
- MULLER RA & MACDONALD GJ (2000) *Ice Ages and Astronomical Causes. Data, spectral analysis and mechanisms*. Berlin Heidelberg New York.
- MYLOPOTAMITAKI D, WEISS M, FEWLASS H, ZAVALA EI, ROUGIER H, SÜMER AP, HAJDINJAK M, SMITH GM, RUEBENS K, SINET-MATHIOT V, PEDERZANI S, ESSEL E, HARKING FS, XIA H, HANSEN J, KIRCHNER A., LAUER T, STAHLSCHEIDT M, HEIN M, TALAMO S, WACKER L, MELLER H, DIETL H, ORSCHIEDT J, OLSEN JV, ZEBERG H, PRÜFER K, KRAUSE J, MEYER M, WELKER F, MCPHERRON SP, SCHÜLER T & HUBLIN J-J (2024) *Homo sapiens* reached the higher latitudes of Europe by 45,000 years ago. *Nature*, <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06923-7>.
- NAKAGAWA T, GOTANDA K, HARAGUCHI T, DANHARA T, YONENOBU H, BRAUER A, YOKOYAMA Y, TADA R, TAKEMURA K, STAFF RA, PAYNE R, BRONK RAMSEY C, BRYANT C, BROCK F, SCHLOLAUT G, MARSHALL M, TARASOV P & LAMB H (2012) SG06, a fully continuous and varved sediment core from Lake Suigetsu, Japan: stratigraphy and potential for improving the radiocarbon calibration model and understanding of late Quaternary climate changes. *Quaternary Science Reviews* *36*, 164–176.
- NATAWIDJAJA DH, BACHTIAR A, NURHANDOKO BEB, AKBAR A, PURAJATNIKA P, DARYONO MR, WARDHANA DD, SUBANDRIYO AS, KRISYUNIANTO A, TAGYUDDIN, ONTOWIRY B & MAULANA Y (2023) Geo-archaeological prospecting of Gunung Padang buried prehistoric pyramid in West Java, Indonesia. *Archaeological Prospection*, 1–25. DOI:10.1002/arp.1912
- NILSSON T (1935) Die pollenanalytische Zonengliederung der spät- und postglazialen Bildungen Schonens. *Geol. Fören. I Stockholm Förhandl.* *57*, 385–562.
- OVERBECK F & SCHNEIDER S (1938): Mooruntersuchungen bei Lüneburg und bei Bremen und die Reliktnatur von *Betula nana* L. in Nordwestdeutschland. *Zeitschrift für Botanik* *33*, 1–54.
- PAIJMANS JLA, BARNETT R, GILBERT MTP, ZEPEDA-MENDOZA ML, REUMER JWF, DE VOS J, ZAZULA G, NAGEL D, BARYSHNIKOV GF, LEONARD JA, ROHLAND N, WESTBURY MV, BARLOW A & HOFREITER M (2017) Evolutionary History of Saber-Toothed Cats Based on Ancient Mitogenomics. *Current Biology* *27*, 3330–3336.
- PAZDUR A, PAZDUR MF, WICIK B & WIECKOWSKI K (1987) Radiocarbon chronology of annually laminated sediments from the Gosciąz Lake. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Earth Sciences* *35*, 139–145.
- PENCK A & BRÜCKNER E (1909) *Die Alpen im Eiszeitalter*. 3 Bände, Leipzig.
- PENG T-H, GODDARD JG & BROECKER WS (1978) A direct comparison of <sup>14</sup>C and <sup>Th</sup> 230 ages at Searles Lake, California. *Quaternary Research* *9*, 319–329.
- PETERSON LC, HAUG GH, HUGHEN KA & RÖHL U (2000b) Rapid Changes in the Hydrologic Cycle of the Tropical Atlantic During the Last Glacial. *Science* *290*, 1947–1951.
- PETERSON LC, HAUG GH, MURRAY RW, YARINCIK KM KING JW, BRALOWER TJ, KAMEO K, RUTHERFORD SD & PEARCE RB (2000a) 4. Late Quaternary stratigraphy and sedimentation at site 1002, Cariaco Basin (Venezuela). In: LECKIE RM, SIGURDSSON H, ACTON GD & DRAPER G (Eds.) *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, Vol. 165*, 85–99.
- PICHEVIN L, BARD E MARTINEZ P & BILLY I (2007) Evidence of ventilation changes in the Arabian Sea during the late Quaternary: Implication for denitrification and nitrous oxide emission. *Global Biogeochemical Cycles* *21*, GB4008, doi:10.1029/2006GB002852.
- PICKETT DA, MURRELL MT & WILLIAMS RW (1994) Determination of femtogram quantities of protactinium in geologic samples by thermal ionization mass spectrometry. *Analytical Chemistry* *66*, 1044–1049.
- PIGATI JS, SPRINGER KB, HONKE JS, WAHL D, CHAMPAGNE MR, ZIMMERMAN SRH, GRAY HJ, SANTUCCI VL, ODESS D, BUSTOS D & BENNETT MR (2023) Independent age estimates resolve the controversy of ancient human footprints at White Sands. *Science* *382*, 73–75.
- PODBREGAR N (2023a) 35.000 Jahre altes „Eiszeit-Pferd“ ist keins. *Scinexx* (scinexx.de), 27. Juli 2023.
- PODBREGAR N (2023b) Fadenwurm überlebt 46.000 Jahre im Eis. *Scinexx* (scinexx.de), 28. Juli 2023.

- RALSKA-JASIEWICZOWA M, WICIK B & WIECKOWSKI K (1987) Lake Goszczak – a site of annually laminated sediments covering 12000 years. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Earth Sciences* 35, 127–137.
- RAMRATH A, ZOLITSCHKA B, WULF S & NEGENDANK JFW (1999) Late Pleistocene climatic variations as recorded in two Italian maar lakes (Lago di Mezzano, Lago Grande di Monticchio). *Quaternary Science Reviews* 18, 977–992.
- 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, KUDSK S, 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 TP, HAJLIDASON H, HAJDAS I, HATTE C, HEATON TJ, HOFFMANN DL, HOGG AG, HUGHEN KA, KAISER FE, KROMER B, MANNING SW, NIU M, REIMER RW, RICHARDS DA, SCOTT EM, SOUTHON JR, STAFF RA, TURNEY CSM & VAN DER PLICHT J (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, GUILDERSON TP, HAJLIDASON 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, TURNEY 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.
- 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, GUILDERSON 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, GUILDERSON TP, HAJDAS 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.
- REIMER PJ, HUGHEN KA, GUILDERSON TP, MCCORMAC G, BAILLIE MGL, BARD E, BARRATT P, BECK JW, BUCK CE, DAMON PE, FRIEDRICH M, KROMER B, BRONK RAMSEY C, REIMER RW, REMMELE S, SOUTHON JR, STUIVER M & VAN DER PLICHT J (2002) Preliminary report of the first workshop of the IntCal04 radiocarbon calibration/comparison working group. *Radiocarbon* 44, 653–661.
- RENNE PR, SHARP WD, DEINO AL, ORSI G & CIVETTA L (1997)  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating into the historical realm: calibration against Pliny the Younger. *Science* 277, 1279–1280.
- RIBOULLEAU A, BOUT-ROUMAZELLES V & TRIBOVILLARD N (2014) Controls on detrital sedimentation in the Cariaco Basin during the last climatic cycle: insight from clay minerals. *Quat. Sci. Rev.* 94, 62–73.
- ROBERT J, MIRANDA CF & MUXART R (1969) Mesure de la période du protactinium-231 par microcalorimétrie. *Radiochimica Acta* 50, 104–108.
- ROMERO OE, THUNELL RC, ASTOR Y & VARELA R (2008) Seasonal and interannual dynamics in diatom production in the Cariaco Basin, Venezuela. *Deep-Sea Research I* 56, 571–581.
- SALVADOR A (1994) (Ed.) *International Stratigraphic Guide*. 2<sup>nd</sup> ed.
- SARNTHEIN M, KÜSSNER K, GROOTES PM, AUSIN B, EGLINTON T, MUGLIA J, MUSCHELER R & SCHLOLAUT G (2020) Plateaus and jumps in the atmospheric radiocarbon record – potential origin and value as global age markers for glacial-to-deglacial paleoceanography, a synthesis. *Climate of the Past* 16, 2547–2571.
- SCHAUB M, KAISER KF, FRANK DC, BÜNTGEN U, KROMER B & TALAMO S (2008) Environmental change during the Allerød and younger Dryas reconstructed from Swiss tree-ring data. *Boreas* 37, 74–86.
- SCHIMMELMANN A, LANGE CB, SCHIEBER J, FRANCOUS P, OJALA AEK & ZOLITSCHKA B (2016) Varves in marine sediments: a review. *Earth-Science Reviews* 159, 215–246.
- SCHLOLAUT G, MARSHALL MH, BRAUER A, NAKAGAWA T, LAMB HF, STAFF RA, BRONK RAMSEY C, BRYANT CL, BROCK F, KOSSLER A, TARASOV PE, YOKOYAMA Y, TADA R, HARAGUCHI T & Suigetsu 2006 project members (2012) An automated method for varve interpolation and its application to the Late Glacial chronology from Lake Suigetsu, Japan. *Quaternary Geochronology* 13, 52–69.
- SCHLOLAUT G, STAFF RA, BRAUER A, LAMB HF, MARSHALL MH, BRONK RAMSEY C & NAKAGAWA T (2018) An extended and revised Lake Suigetsu varve chronology from ~50 to ~10 ka BP based on detailed sediment micro-facies analyses. *Quaternary Science Reviews* 200, 351–366.

- SCHWABEDISSEN (1951) Das Vorkommen des Magdalénien im nordwesteuropäischen Flachland. *Eiszeitalter und Gegenwart* 1, 152–165.
- SHACKELTON NJ, FAIRBANKS RG, CHIU T-C & PARRENIN F (2004) Absolute calibration of the Greenland time scale: implications for Antarctic time scales and for  $\Delta^{14}\text{C}$ . *Quaternary Science Reviews* 23, 1513–1522.
- SHATILOVICH A, GADE VR, PIPPEL M, HOFFMEYER TT, TCHESUNOV AV, STEVENS L, WINKLER S, HUGHES GM, TRAIKOV S, HILLER M, RIVKINA E, SCHIFFER PH, MYERS EW & KURZCHALIA TV (2023) A novel nematode species from the Siberian permafrost shares adaptive mechanisms for cryptobiotic survival with *C. elegans* dauer larva. *PLoS Genet* 19(7), e1010798. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1010798>
- SHEN CC, CHENG H, EDWARDS RL, BRADLEY MORAN S, EDMONDS HN, HOFF JA & THOMAS RB (2003) Measurement of attogram quantities of  $^{231}\text{Pa}$  in dissolved and particulate fractions of seawater by isotope dilution thermal ionization mass spectroscopy. *Analytical Chemistry* 75, 1075–1079.
- SIGURDSSON H, LECKIE RM, ACTON GD et al. (1997) Site 1002. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports*, Vol. 165, 359–373.
- SOUTHON J, NORONHA AL, CHENG H, EDWARDS RL & WANG YJ (2012) A high-resolution record of atmospheric C-14 based on Hulu Cave speleothem H82. *Quaternary Science Reviews* 33, 32–41.
- SPURK M, FRIEDRICH M, HOFMANN J, REMMELE S, FRENZEL B, LEUSCHNER H-H, KROMER B (1998) Revisions and extensions of the Hohenheim oak and pine chronologies – new evidence about the timing of the Younger Dryas/Preboreal transition. *Radiocarbon* 40, 1107–1116.
- STAFF RA, BRONK RAMSEY C, BRYANT C.L, BROCK F, PAYNE RL, SCHLOLAUT G, MARSHALL MH, BRAUER A, LAMB HF, TARASOV P, YOKOYAMA Y, HARAGUCHI T, GOTANDA K, YONENOBU H, NAKAGAWA T & Suigetsu 2006 Project Members (2011) New  $^{14}\text{C}$  determinations from Lake Suigetsu, Japan: 12,000 to 0 cal BP. *Radiocarbon* 53, 511–528.
- STAFF RA, NAKAGAWA T, SCHLOLAUT G, MARSHALL MH, BRAUER A, LAMB H, BRONK RAMSEY C, BRYANT CL, BROCK F, KITAGAWA H, VAN DER PLICHT J, PAYNE RL, SMITH VC, MARK DF, MACLEOD A, BLOCKLEY SPE, SCHWENNINGER JL, TARASOV P, HARAGUCHI T, GOTANDA K, YONENOBU H, YOKOYAMA Y & Suigetsu 2006 project members (2013) The Multiple Chronological Techniques Applied to the Lake Suigetsu (SG06) Sediment Core. *Boreas* 42, 259–266.
- STEININGER FF & PILLER WE (1999) (Hrsg.) Empfehlungen (Richtlinien) zur Handhabung der stratigraphischen Nomenklatur. *Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg* 209, 1-19.
- 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.
- STOKES MA & SMILEY TL (1968) An introduction to tree-ring dating. Chicago London. [Die Ausgabe von 1996 ist unverändert.]
- STUIVER M (1970) Long-term C14 variations. In: OLSSON IU (ed.) *Radiocarbon Variations and Absolute Chronology*. Proceedings of the Twelfth Nobel Symposium held at the Institute of Physics at Uppsala University, 197–214.
- STUIVER M (1971) Evidence for the variation of atmospheric  $\text{C}^{14}$  content in the late Quaternary. In: TUREKIAN KK (ed.) *The Late Cenozoic Glacial Ages*, 57–70.
- STUIVER M (1978) Radiocarbon timescale tested against magnetic and other dating methods. *Nature* 273, 271–274.
- STUIVER M & KRA RS (eds.) *Proceedings of the 12th International  $^{14}\text{C}$  Conference*. *Radiocarbon* 28, 805–1030.
- STUIVER M, KROMER B, BECKER B & FERGUSON CW (1986a) Radiocarbon age calibration back to 13,300 years BP and the  $^{14}\text{C}$  age matching of the German oak and US bristlecone pine chronologies. In: STUIVER M & KRA RS (eds.) *Proceedings of the 12th International  $^{14}\text{C}$  Conference*. *Radiocarbon* 28, 969–997.
- STUIVER M, PEARSON GW & BRAZIUNAS TF (1986b) Radiocarbon age calibration of marine samples back to 9000 cal yr BP. *Radiocarbon* 28, 980–1021.
- STUIVER M & POLLACH HA (1977) Discussion: Reporting of  $^{14}\text{C}$  data. *Radiocarbon* 19, 355–363.
- STUIVER M, REIMER PR, BARD E, BECK JW, BURR GS, HUGHEN KA, KROMER B, MCCORMAC G, VAN DER PLICHT J & SPURK M (1998a) INTCAL98 radiocarbon age calibration, 24,000–0 cal BP. *Radiocarbon* 40, 1041–1083.
- STUIVER M, REIMER PR & BRAZIUNAS TF (1998b) High-precision radiocarbon age calibration for terrestrial and marine samples. *Radiocarbon* 40, 1127–1151.
- STUIVER M & SUESS HE (1966) On the relationship between radiocarbon dates and true sample ages. *Radiocarbon* 8, 534–540.
- SVENSSON A, ANDERSEN KK, BIGLER M, CLAUSEN HB, DAHL-JENSEN D, DAVIES SM, JOHNSEN SJ, MUSCHELER R, PARRENIN F, RASMUSSEN SO, RÖTHLISBERGER R, SEIERSTAD I, STEFFENSEN JP & VINSTER BM (2008) A 60000 year Greenland stratigraphic ice core chronology. *Clim. Past* 4, 47–57.
- SWARZENSKI PW (2015)  $^{210}\text{Pb}$  dating. In: RINK WJ & THOMPSON J (eds.) *Encyclopedia of Scientific Dating Methods*, 626–636.
- TURNER CSM, FIFIELD LK, HOGG AG, PALMER JG, HUGHEN K, BAILLIE MGL, GALBRAITH R, OGDEN J, LORREY A, TIMS SG & JONES RT (2010) Using New Zealand kauri (*Agathis australis*) to test the synchronicity of abrupt climate change during the Last Glacial Interval (60,000–11,700 years ago). *Quaternary Science Reviews* 29, 3677–3682.

- TURNEY CSM, JONES RT, PHIPPS SJ, THOMAS Z, HOGG AG, KERSHAW AP, FOGWILL CJ, PALMER JG, BRONK RAMSEY C, ADOLPHI F, MUSCHELER R, HUGHEN KA, STAFF RA, GROSVENOR M, COLLEDGE NR, RASMUSSEN SO, HUTCHISON DK, HABERLE S, LORREY A, BOSWIJK G & COOPER A (2017) Rapid global ocean-atmosphere response to Southern Ocean freshening during the last glacial. *Nature Communications*, DOI: 10.1038/s41467-017-00577-6.
- TURNEY CS, PALMER J, RAMSEY CB, ADOLPHI F, MUSCHELER R, HUGHEN KA, STAFF RA, JONES RT, THOMAS ZA & FOGWILL CJ (2016) High-precision dating and correlation of ice, marine and terrestrial sequences spanning Heinrich Event 3: Testing mechanisms of interhemispheric change using New Zealand ancient kauri (*Agathis australis*). *Quaternary Science Reviews* 137, 126–134.
- VAN DER HAMMEN Z, MAARLEVELD GC, VOGEL JC & ZAGWIJN WH (1967) Stratigraphy, climatic succession and radiocarbon dating of the last glacial in the Netherlands. *Geologie Mijnbouw* 46, 79–95.
- VAN KREFELD S, SARNTHEIM M, ERLKENKEUSER H, GROOTES P, JUNG S, NADEAU MJ, PFLAUMANN U & VOELKER A (2000) Potential links between surging ice sheets, circulation changes, and the Dansgaard-Oeschger Cycles in the Irminger Sea, 60–18 Kyr. *Paleoceanography* 15, 425–442.
- VAYSON DE PRADENNE A (1938) *La Préhistoire*. Paris.
- VAYSON DE PRADENNE A (1940) *Prehistory*. London.
- VINTHER BM, CLAUSEN HB, JOHNSEN SJ, RASMUSSEN SO, ANDERSEN KK, BUCHARDT SL, DAHL-JENSEN D, SEIERSTAD IK, SIGGAARD-ANDERSEN M-L, STEFFENSEN JP, SVENSSON A, OLSEN J & HEINEMEIER J (2006) A synchronized dating of three Greenland ice cores throughout the Holocene. *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2005JD006921.
- VOELKER AHL, GROOTES PM, NADENAU M-J & SARNTHEIM M (2000) Radiocarbon levels in the Iceland Sea from 25–53 kyr and their link to the Earth's magnetic field intensity. *Radiocarbon* 42, 437–452.
- VOELKER AHL, SARNTHEIM M, GROOTES PM, ERLKENKEUSER H, LAJ C, MAZAUD A, NADEAU M-J & SCHLEICHER M (1998) Correlation of marine <sup>14</sup>C ages from the Nordic seas with the GISP2 isotope record: implications for radiocarbon calibration beyond 25 ka. *Radiocarbon* 40, 517–534.
- VOGEL JC (1980) Accuracy in the radiocarbon time scale beyond 15,000 BP. *Radiocarbon* 22, 210–218.
- VOGEL JC (1983) <sup>14</sup>C variations during the Upper Pleistocene. *Radiocarbon* 25, 213–218.
- VOGEL JC & ZAGWIJN WH (1967) Groningen radiocarbon dates VI. *Radiocarbon* 9, 63–106.
- WAGNER GA (1995) Altersbestimmung von jungen Gesteinen und Artefakten. *Physikalische und chemische Uhren in Quartärgeologie und Archäologie*. Stuttgart.
- WANG YJ, CHENG H, EDWARDS RL, AN ZS, WU JY, SHEN CC & DORALE JA (2001) A high-resolution absolute-dated Late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China. *Science* 294, 2345–2348.
- WEINERT H (1943) Die geistigen Grundlagen der Menschwerdung. In: HEBERER G (Hrsg.) *Die Evolution der Organismen*, 707–734. Jena.
- WU JY, WANG YJ, CHENG H & EDWARDS RL (2009) An exceptionally strengthened East Asian summer monsoon event between 19.9 and 17.1 ka BP recorded in a Hulu stalagmite. *Science in China, Series D Earth Sciences* 52, 360–368.
- YAMADA K, NAKAGAWA T, STAFF RA, KITABA I & KITAGAWA J (2017) Tectonic events recorded in the varved sediments of Lake Suigetsu, Fukui, central Japan. *JpGU-AGU Meeting 2017, Abstract SSS12-20*.
- YUAN D, CHENG H, EDWARDS RL, DYKOSKI CA, KELLY MJ, ZHANG M, QING J, LIN Y, WANG Y, WU J, DORALE JA, AN Z & CAI Y (2004) Timing, Duration, and Transitions of the Last Interglacial Asian Monsoon. *Science* 304, 575–578.
- YOKOYAMA Y, ESAT TM, LAMBECK K & L FIFIELD KL (2000) Last Ice Age Millennial Scale Climate Changes Recorded in Huon Peninsula Corals. *Radiocarbon* 42, 383–401.
- ZEUNER FE (1935) The Pleistocene chronology of Central Europe. *Geological Magazine* 72, 350–376.
- ZEUNER FE (1946) *Dating the Past. An Introduction to Geochronology*. London.
- ZOLITSCHKA B & NEGENDANK JFW (1996) Sedimentology, dating and palaeoclimatic interpretation of a 76.3 ka record from Lago Grande di Monticchio, southern Italy. *Quaternary Science Reviews* 15, 101–112.

Anmerkung: Die Übersetzung der verwendeten Zitate erfolgte durch den Verfasser.

## **Impressum**

Studiengemeinschaft Wort und Wissen e. V.

Geschäftsstelle

Peter-Stein-Straße 4, 72250 Freudenstadt

Tel.: 07441-5202705

E-Mail: [sg@wort-und-wissen.de](mailto:sg@wort-und-wissen.de)

Internet: [www.wort-und-wissen.org](http://www.wort-und-wissen.org)