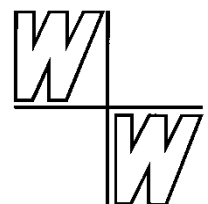


GÜLTIGKEIT UND GRENZEN GEOLOGISCHER ZEITBESTIMMUNG

Michael Kotulla



Stand: Oktober 2020



Titelbild:

Laacher See, Eifel. © Thilo PÖRLING, www.poerling-immobilien.de (freundl. Zurverfügungstellung)

Geologie Loseblattsammlung

Die Online-Loseblattsammlung „Gültigkeit und Grenzen geologischer Zeitbestimmung“ ist eine systematische Sammlung von kurzen Einzelbeiträgen, die fortlaufend ergänzt und aktualisiert wird. Die Einzelbeiträge dürfen kostenlos vervielfältigt und weitergegeben werden.

Blatt	Titel	Download	Stand
2-01	Stratigraphie – Übersichtsblatt	PDF	10/2020
2-02	Stratigraphische Methoden Klare Trennung von Daten und Interpretation	PDF	10/2020
2-03	Geochronologie und geologische Zeitskala Prinzipiell kann jedes Altersmodell mit der globalen chronostratigraphischen Tabelle verknüpft werden	PDF	10/2020
2-20	James Hutton: Mythos Siccar Point „Speed Time“ anstelle „Deep Time“	PDF	10/2020
2-21	Lyell – aus Prinzip? Mit den Lyell'schen Prinzipien kann die Vorzeit nicht entschlüsselt werden.	PDF	10/2020
2-22	The Art of Charles Darwin: Unermessliche Zeit und unvollständige Fossilüberlieferung Annahmen und Argumente Darwins aus heutiger Perspektive	PDF	10/2020
2-32	Lyell's Versuch einer Geochronologie Die Vorzeit wird zu 12 Zyklen à 20 Millionen Jahre konstruiert	PDF	10/2020
2-35	Pferdeevolution und Messung der Zeit Das „Paradepferd“ der Entwicklungslehre kann keinen realen Beitrag zum Problem des Alters der Erde leisten	PDF	10/2020
2-36	Die Konstruktion von Jahrmillionen Versuch einer indirekten Verifizierung radiometrischer Altersbestimmung	PDF	10/2020
2-41	Holozän und „Anthropozän“ Die Gliederung des Holozän steht strukturell in einem Missverhältnis zur Vorstellung eines geologischen „Langzeit“	PDF	10/2020

Blatt	Titel	Download	Stand
3-01	Warvenchronologische Methode (Warvenchronologie) – Übersichtsblatt	PDF	10/2020
3-10	De Geer's Warvenchronologie Weder Jahresschichtung noch lückenlose Chronologie noch 12.000 Jahre nachgewiesen	PDF	10/2020
3-20	Laminierte Sedimente des Toten Meeres Warvierung nicht schlüssig nachgewiesen	PDF	10/2020
3-21	Die laminierten Sedimente des Suigetsu-Sees, Japan Weder Nachweis von Jahresschichten noch von 50.000 Kalenderjahren – modellierte „Warven“chronologie in ^{14}C -Altersrahmen eingepasst	PDF	10/2020
3-40	Das Eckfelder Maar und seine laminierten Sedimentgesteine Weder Jahresschichtung noch 250.000 Jahre Bildungsdauer der Seesedimente nachgewiesen	PDF	10/2020
4-01	Radiometrische Methode – Übersichtsblatt	PDF	10/2020
4-03	U-Pb-Altersbestimmung - Übersichtsblatt	PDF	10/2020
4-09	Konkordia-Diagramm Ein Werkzeug des Geochronologen, aber weder eine Datierungsmethode noch eine Methode zur Verifizierung der radiometrischen Methode	PDF	10/2020
4-10	Die Grundfrage radiometrischer Altersbestimmung Im Grunde genommen ist nicht bekannt, in welcher Beziehung radiometrische Alter zum realen Alter stehen	PDF	10/2020
4-21	Radiometrische Methode quasi amtlich Unterkommission des US-amerikanischen Nationalen Forschungsrats löst das Problem des Alters der Erde mit der radiometrischen Altersbestimmungsmethode	PDF	10/2020
4-22	Radiometrische Methode nicht verifizierbar Die geologische Zeitskala ist eine nicht verifizierte Zeitskala	PDF	10/2020
4-23	Geochronologie: absolutes Alter und radiometrisches Alter Arthur Holmes: „Absolutes Alter“ ist ein bedeutungsloser Begriff	PDF	10/2020

Blatt	Titel	Download	Stand
5-01	Dendrochronologische Methode (Dendrochronologie) – Übersichtsblatt	PDF	10/2020
5-13	Kreuzdatierung, Synchronisation und Replikation „Die letzte Entscheidung trifft der Dendrochronologe“	PDF	10/2020
5-14	Statistische Methoden Die Akzeptanz niedriger Ähnlichkeitswerte erhöht das Potenzial für dendrochronologische Kreuzdatierungen	PDF	10/2020
5-21	Kalifornische Borstenkiefernchronologie (bristlecone pine chronology) Die Gültigkeit des langen Teils der Borstenkiefernchronologie ist nicht bekannt – eine unabhängige Validierung ist bislang nicht erfolgt	PDF	10/2020
5-22	Belfast-Chronologie (irische Eichenchronologie) Die Gültigkeit des langen Teils der Belfast-Chronologie ist nicht bekannt – eine unabhängige Validierung ist bislang nicht erfolgt	PDF	10/2020
5-23	Hohenheimer Jahrringkalender Die Gültigkeit des langen Teils des Hohenheimer Jahrringkalenders ist nicht bekannt – eine unabhängige Validierung ist bislang nicht erfolgt	PDF	10/2020
6-01	Radiokarbonmethode – Übersichtsblatt	PDF	10/2020
6-11	Theorie und Praxis der Radiokarbon-Altersbestimmung Die Kalibration der Radiokarbon-Zeitskala durch die „IntCal-Arbeitsgruppe“ hat sich zu einem Standard entwickelt	PDF	10/2020
6-41	IntCal20: Neue Kurve zur Kalibrierung der Radiokarbon-Zeitskala veröffentlicht Veröffentlichung von dendrochronologischen Rohdaten und Konstruktionsdaten für Baumringchronologien als Ziel formuliert – auch die neue Kalibrationskurve operiert mit einer nicht unabhängig validierten dendrochronologischen Datenbasis (ca. > 3000 kalibrierte ¹⁴ C-Jahre BP)	PDF	10/2020
7-01	Magnetostratigraphie – Übersichtsblatt	PDF	10/2020
8-01	Eiskernchronologische Methode – Übersichtsblatt	PDF	10/2020

Blatt	Titel	Download	Stand
8-10	Das bislang älteste Eis 800.000 Jahre oder 800.000 radiometrische Jahre? – Auf den Unterschied kommt es an	PDF	10/2020
9-01	Astrochronologische Methode (Astrochronologie) – Übersichtsblatt	PDF	10/2020
A-01	Chronologie der Loseblatt-Lieferungen	PDF	10/2020

2-01 Stratigraphie – Übersichtsblatt

Sinngehalte und verwandte Begriffe

Schicht(en)beschreibung, Schichtenkunde.

Ziel

Versuch, „unter Heranziehung der Lagerungsverhältnisse sowie des Fossil- und Gesteinsinhaltes, die relative Alterfolge der einzelnen Gesteinsserien zu ermitteln“.¹

Grundlagen

Der außergewöhnlich differenzierte Aufbau der Erdkruste mit einem hohen Anteil an fossilführenden Sedimentgesteinen in Verbindung mit einer ausgeprägten Topographie (Aufschlussverhältnisse).

Vorgehensweise

1. Beobachtung: Beschreibung (Erfassung, Aufnahme) und Aufbereitung von Gelände- oder Bohrdaten.
 2. Interpretation: Gliederung der Schichtenfolge; Deutung der Bildung einzelner Komponenten sowie gesamthaft der Schichtenfolge; Paläogeographie.
 3. Interpretation: Erstellung lokaler, regionaler und globaler stratigraphischer Chronologien (Tabellen), insbesondere durch Leitfossilien; Anwendung zeitlicher Abstraktion.
 4. Interpretation: Konzept der geologischen Zeit, Konzept der Evolution (Entwicklung des Organismenreiches), Konzept der Erd- und Lebensgeschichte (historische Geologie).
- In der Praxis sind die Punkte 1 bis 4 sehr miteinander verwoben. Selbst Beschreibung und Terminologie sind nicht frei von Interpretation.

Basisannahme(n)

1. Gültigkeit des „Lagerungsgesetzes“ (bei ungestörten Lagerungsverhältnissen).
2. Das Vorliegen von (isochronen) Zeitmarken einerseits und ihre Korrelierbarkeit andererseits (als Grundlage zum Aufbau einer überregionalen Stratigraphie).

Historie

STENO (1669), WERNER (1787), SMITH (1817), WALTHER (1893-1894).

Anwendung

Geologie, Archäologie (Prinzip).

Angabe/Größenordnung der Ergebnisse

Im Verhältnis zu den unterlagernden bzw. überlagernden Einheiten, z. B.:

- präkambrische oder devonische oder pleistozäne Ablagerungen
- *Polygnathus costatus partitus*-Zone, Eifel-Stufe (Devon), Eifel
- Hochheim-Formation (ehemals Mittlere Cerithien-Schichten), Oberoligozän (Tertiär), Oberrheingraben

Altersbestimmungsverfahren

Unabhängig, relativ.

Eichung

Die internationale (chrono)stratigraphische Tabelle (→ 2-02) sowie regionale und nationale Tabellen erhalten auf Basis ermittelter Isotopenalter an Gesteinen und Mineralien bekannter stratigraphischer Einstufung ihr numerisches (i. d. R. radiometrisch-begründetes) Zeitgerüst (→ 2-03, 4-01).

Gültigkeit

a) Relative Altersbestimmung

Gegeben. Zum Aufbau einer regionalen und überregionalen Stratigraphie müssen die Basisannahmen erfüllt sein.

b) Absolute Altersbestimmung

Nicht zutreffend.

Grenzen

Für die Historische Geologie ist die Zeit-relative (hochabstrahierte) stratigraphische Tabelle Werk und Instrument zugleich mit dem Anspruch, die „Grundlage für die Rekonstruktion der Geschichte der Erde und des Lebens zu bilden“². – Doch de facto ist die Urkundenlage in signifikanten Bereichen sehr lückenhaft (Festlandsgebiete, Fossilüberlieferung, alte Ozeanböden etc.), sodass die Grundlagen für eine umfassende Rekonstruktion nicht oder nur einschränkend gegeben sind. In der Hauptsache wird die Geschichte (Entwicklung) von Sedimentbecken (Sedimentdepots) geschrieben.

Literatur

MURAWSKI H & MEYER W (2010) Geologisches Wörterbuch. 12. Auflage, Heidelberg.

SMITH W (1817) Stratigraphical system of organized fossils, with reference to the specimens of the original geo-logical collection in the British Museum explaining their state of preservation and their use in identifying the British strata. London.

¹ MURAWSKI & MEYER (2010, 6).

² MURAWSKI & MEYER (2010, 159).

STENO N (1669) De solido intra solidum naturaliter contento dissertationis prodromus. Florenz. Dtsch.

Übers. (1923): Vorläufige Mitteilung einer Dissertation über feste Körper, die auf natürliche Weise in andere feste Körper eingeschlossen sind. Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften, Bd. 209.

WALTHER J (1893-1894) Einleitung in die Geologie als historische Wissenschaft. Bd. 1-3, Jena.

WERNER AG (1787) Kurze Klassifikation und Beschreibung der verschiedenen Gebirgsarten. Dresden.

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

Zur Ergänzung → 2-20, 2-21, 2-22, 2-32, 2-35, 2-36, 2-41.

2-02 Stratigraphische Methoden

Klare Trennung von Daten und Interpretation

Der Internationale Stratigraphische Leitfaden

Der *Internationale Stratigraphische Leitfaden* (SALVADOR 1994) unterscheidet hauptsächlich drei stratigraphische Methoden, Litho-, Bio- und Chronostratigraphie, sowie Geochronologie. Die sorgfältigen Beschreibungen und Definitionen der Begriffe und Prozeduren machen deutlich: Es gilt zu unterscheiden zwischen den (1) materiellen Gesteinskörpern (mitsamt den Fossilien), also den empirischen Daten, und (2) deren Interpretationen, z. B. ihre Entstehung, Umwelt (Environment) oder geologische Geschichte.

Stratigraphie

Stratigraphie gilt der Beschreibung aller Gesteinskörper, die die Erdkruste aufbauen, auch der nicht geschichteten (SALVADOR 1994, 13).

Lithostratigraphie

Lithostratigraphie ist jener „Teil der Stratigraphie, der sich mit der Beschreibung und der systematischen Gliederung der Gesteinsabfolgen der Erdkruste beschäftigt (...)“ (SALVADOR 1994, 31). Die lithostratigraphische Klassifikation gliedert „Gesteinskörper aufgrund ihrer lithologischen Eigenschaften in Einheiten“. Die formalen lithostratigraphischen Einheiten sind, hierarchisch aufsteigend: Bank oder Lage (bed), Subformation (member), Formation (formation), Gruppe (group). Die Formation ist die „ Grundeinheit“ der lithostratigraphischen Klassifikation, insbesondere als kartierbare Einheit und zur Beschreibung und Interpretation der Geologie einer Region (SALVADOR 1994, 33).

„Beobachtbare lithologische Merkmale“ können u. a. „sedimentologischer, petrologischer, mineralogischer, paläontologischer, chemischer, physikalischer, morphologischer“ Natur sein (STEININGER & PILLER 1999, 6). Auch den Fossilinhalt gilt es zu berücksichtigen, aber als rein lithologisches Merkmal.

Biostratigraphie

„Jener Teil der Stratigraphie, der sich mit der Verteilung der Fossilien in der stratigraphischen Überlieferung sowie mit der Gliederung der Schichtenfolgen in Einheiten auf Basis ihrer enthaltenen Fossilien beschäftigt“ (SALVADOR 1994, 55). Die biostratigraphische Basiseinheit ist die „biostratigraphische Zone“ oder abgekürzt „Biozone“.

Chronostratigraphie

Chronostratigraphie ist „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).

Die chronostratigraphische Klassifikation gliedert „die Gesteine der Erdkruste aufgrund ihres Alters oder der Zeit ihrer Entstehung in Einheiten“ (relativ, s. o.). Ihr Ziel ist es, „die Gesteine der Erdkruste in benannte Einheiten (chronostratigraphische Einheiten) zu gliedern, die Intervallen der geologischen Zeit (geochronologische Einheiten) entsprechen; [sie] dienen als eine Basis für eine Zeitkorrelation und ein Referenzsystem, um Ereignisse der geologischen Geschichte zu verzeichnen.“ Als „spezifische Zielsetzungen“ gelten „a) die Bestimmung lokaler [relativer] Zeitbeziehungen“ (die einfache Bestimmung der relativen Alterfolge von Schichten in lokalen Profilen, ohne Bezug zu chronostratigraphischen Einheiten) sowie „b) die Schaffung einer Standardisierten Globalen Chronostratigraphischen Tabelle“ (auch als Internationale Chronostratigraphische Tabelle bezeichnet; Abb. 1). Diese Tabelle „ist eine vollständige und systematisch angeordnete Hierarchie definierter und benannter chronostratigraphischer Einheiten mit regionaler und weltweiter Geltung. Eine derartige Hierarchie fungiert als Standard-Rahmenwerk, um das [relative] Alter von Gesteinskörpern auszudrücken und alle Gesteine der Erdgeschichte miteinander in Beziehung zu setzen. Die benannten Einheiten jeder Ebene dieser Standardisierten Globalen

Chronostratigraphischen Tabelle umfassen, als Ganzes, die komplette stratigraphische Abfolge – ohne Lücken und ohne Überlappungen“ (SALVADOR 1994, 77f).

Die chronostratigraphische Einheit ist „ein Gesteinskörper, der alle Gesteine umfasst, die während eines bestimmten geologischen Zeitintervalls gebildet wurden. (...) Chronostratigraphische Einheiten werden von synchronen Flächen begrenzt. Das relative Ausmaß dieser Einheiten und ihre Stellung in der chronostratigraphischen Hierarchie hängen von der Länge des Zeitintervalls ab (...) und nicht von ihrer physikalischen Dicke“ (SALVADOR 1994, 78). Etwas anders ausgedrückt: Chronostratigraphische Einheiten sind „Gliederungen von Gesteinskörpern auf der Grundlage der geologischen Zeit“ (SALVADOR 1994, 103). Und als weitere Funktion: Sie bilden die Grundlage für eine weltweite Kommunikation und Verständigung (SALVADOR 1994, 103).

Die formalen chronostratigraphischen Einheiten sind, hierarchisch aufsteigend: Stufe („Grundeinheit“), Serie, System, Ära, Äon (Abb. 1, jedoch ohne Stufe).

Chronostratigraphischer Horizont (Chronohorizont)

Ein chronostratigraphischer Horizont „ist eine stratigraphische Fläche, die isochron ist, d. h. überall dasselbe Alter hat“ (STEININGER & PILLER 1999, 4). Zu den Chronohorizonten gehören demnach „viele Fossilhorizonte, Bentonitlagen vulkanischer Herkunft, Phosphoritlagen, Kohleflöze, seismische Reflektoren, Lagen magnetischer Umkehrungen (Reversals), usw.“

Abb. 1 Internationale Chronostratigraphische Tabelle. Mit Zuweisung geschätzter numerischer Alter des GTS2012-Altersmodells in Millionen [radiometrischen] Jahren (Mra) ohne Unsicherheiten; rechte Spalte. Nach Version v2020/01 der *Internationalen Stratigraphischen Kommission* (ICS) mit teilweise aktualisierten Alterswerten. Deutsche Bezeichnungen nach STDK2012 (Stratigraphische Tabelle von Deutschland Kompakt). Grafik: F. MEYER.

Äonothem /Äon	Ära <them </them /Ära	System/ Periode	Serie/ Epoche	Numme- risches Alter (Mra)	
PHANEROZOIKUM	KÄNOZOIKUM	QUARTÄR	HOLOZÄN	0,0117	
			PLEISTOZÄN	2,58	
			PLIOZÄN	5,333	
		NEOGEN	MIOZÄN	23,03	
			OLIGOZÄN	33,9	
		PALÄO- GEN	EOZÄN	56,0	
			PALÄOZÄN	66,0	
			MESOZOIKUM	KREIDE	OBERKREIDE
		UNTERKREIDE			~ 145,0
	JURA	OBERJURA		163,5	
		MITTELJURA		174,1	
		UNTERJURA		201,3	
	TRIAS	OBERTRIAS		~ 237	
		MITTELTRIAS		247,2	
		UNTERTRIAS		251,902	
		LOPINGIUM		259,1	
	PERM	GUADALUPIUM		272,95	
		CISARALIUM		298,9	
		KARBON	PENNSYLVANIUM	323,2	
			MISSISSIPPIUM	358,9	
		PALÄOZOIKUM	DEVON	OBERDEVON	382,7
	MITTELDEVON			393,3	
	UNTERDEVON			419,2	
	SILUR		PRIDOLI	423,0	
			LUDLOW	427,4	
			WENLOCK	433,4	
			LLANDOVERY	443,8	
	ORDOVI- ZIUM		OBERORDOVIZIUM	458,4	
			MITTELORDOVIZIUM	470,0	
		UNTERORDOVIZIUM	485,4		
	KAM- BRIUM	FURONGIUM	~ 497		
		SERIE 3	~ 509		
		SERIE 2	~ 521		
		TERRENEUVIUM	541,0		
		NEO- PROTERO- ZOIKUM	EDIACARIUM	~ 635	
„PRÄKAMBRIMUM“	KRYOGENIUM	~ 720			
	TONIUM	1000			
	Auslassung von Proterozoikum (Teile) und Archaikum			4000	
HADAIKUM			~ 4600		



Abb. 2 Präkambrium/Kambrium-Grenze, Fortune Head (Neufundland).

Die Basis des Kambriums ist 1992 formal definiert worden, am Fortune Head mit dem ersten Auftreten (der ersten fossilen Überlieferung) des Spurenfossils *Phycodus pedum* (BRASIER et al. 1992), nunmehr *Treptichnus pedum*. – *T. pedum* als globaler stratigraphischer Marker hat sich allerdings nicht bewährt; das lokale „Ersterscheinen“ soll „zeitlich“ erheblich schwanken und am Referenzpunkt ist das Fossil inzwischen auch einige Meter unterhalb der Grenze im Ediacarium gefunden worden. Eine Neufestlegung der Grenze ist in Diskussion (BABCOCK et al. 2014). Foto: Liam HERRINGSHAW, 2012 (Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0).

Grenz-Definition der chronostratigraphischen Einheit (GSSP-Konzept)

Jeweils die Basis einer (globalen) chronostratigraphischen Einheit ist (wird) durch einen globalen Grenz- oder Referenzpunkt definiert; durch formale Festlegung eines Grenzstratotypus-Punktes in einem Grenzstratotypus-Profil (Global Boundary Stratotype Section and Point, GSSP; SALVADOR 1994, 90f; Abb. 2). Eine Anforderung an solch einen Punkt ist ein hohes Korrelationspotential, möglichst weltweit.

Damit wird die Globale Chronostratigraphische Tabelle letztlich durch einer Folge von Grenzpunkten definiert; mit anderen Worten: Das „Konzept behandelt und definiert lediglich die Grenzen der Einheiten, aber nicht den Inhalt der Einheit [selbst]. In einem chronologischen Sinn liefert es die abstrakte Dauer der Einheiten, aber nicht deren Inhalt. Es definiert eine Abstraktion in der Zeit und nicht eine materielle Gesteinseinheit“ (GRADSTEIN et al. 2012, 34).

Methodologisch ist es scheinbar die einzig denkbare, konstruktive Möglichkeit; denn ein

Punkt kann weder eine Lücke noch eine Überlappung besitzen (s. o.). Demzufolge kommt der (globalen) Korrelation die höchste Bedeutung zu. Ob allerdings eine vermeintlich vorgenommene Korrelation tatsächlich eine Synchronität darstellt, ist nicht oder nur selten überprüfbar. „Ohne Korrelation“, so machen GRADSTEIN et al. (2012, 36) deutlich, „sind stratigraphische Einheiten und ihre konstituierenden Grenzen nicht von viel Nutzen und ohne Bedeutung für die Erdgeschichte“.

Literatur

- BABCOCK LE, PENG S, ZHU M, XIAO S & AHLBERG P (2014) Proposed reassessment of the Cambrian GSSP. *Journal of African Earth Sciences* 98, 3-10.
BRASIER M, COWIE J & TAYLOR M (1992) Decision on the Precambrian-Cambrian boundary stratotype. *Episodes* 17, 3-8.
GRADSTEIN FM, OGG JG, SCHMITZ MD & OGG GM (Eds.) (2012) *The Geologic Time Scale 2012*. Volume 1/2, Oxford Amsterdam.

SALVADOR A (1994) (Ed.) International Stratigraphic Guide, 2nd ed.

STEININGER FF & PILLER WE (1999) (Hrsg.) Empfehlungen (Richtlinien) zur Handhabung der stratigraphischen Nomenklatur. Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg 209, 1-19.

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

Zur Ergänzung → 2-01, 2-03.

2-03 Geochronologie und geologische Zeitskala

Prinzipiell kann jedes Altersmodell mit der globalen chronostratigraphischen Tabelle verknüpft werden

Geochronologie

Nach dem *Internationalen Stratigraphischen Leitfa-den* (→ 2-02) beschäftigt sich die Geochronologie mit der „Datierung und Bestimmung der zeitlichen Abfolge von Ereignissen in der Geschichte der Erde“ (SALVADOR 1994, 16).

Die geochronologische Einheit ist eine Einheit der geologischen Zeit; „Zeit, die durch geologische Methoden bestimmt wird“. Die geochronologische Einheit ist „kein Gesteinskörper und deshalb keine stratigraphische Einheit“ (SALVADOR 1994, 16); sie ist immateriell. Die formalen geochronologischen Einheiten sind, hierarchisch aufsteigend: Alter, Epoche, Periode, Ära, Äon (→ 2-02, Abb. 1). Die konkreten Bezeichnungen allerdings sind identisch mit denen der Chronostratigraphie: Das geochronologische Äquivalent zu Kreide (System, chronostratigraphisch) ist Kreide (Periode).

Konstruktion einer geologischen Zeitskala

Die Konstruktion einer geologischen Zeitskala – hier am Beispiel der GTS2012 (s. u.) – vollzieht sich in vier Schritten (GRADSTEIN 2012, 4):

- „Schritt 1: Konstruiere für die Gesteinsüberlieferung der Erde eine aktualisierte, globale chronostratigraphische Tabelle.
- Schritt 2: Identifiziere für die chronostratigraphische Tabelle entscheidende, lineare Alters-Kalibrierungsniveaus unter Verwendung radiogener Isotopenaltersdaten und/oder wende astronomisches Tuning auf zyklische Sedimentation¹ an oder skaliere und interpoliere (annähernd) lineare Segmente von Sequenzen stabiler Isotope².

- Schritt 3: Interpoliere die kombinierte chronostratigraphische und chronometrische Skala (...).
- Schritt 4: Kalkuliere oder schätze Fehlerbalken der kombinierten chronostratigraphischen und chronometrischen Information, um eine geologische Zeitskala mit Unsicherheitsschätzungen zu den Grenzaltern und der Dauer der Einheiten zu gewinnen.“

Zu Schritt 1 und 2: Die abstrakte, Zeit-relative chronostratigraphische Tabelle existiert unabhängig von einem chronologischen Altersmodell (Schritt 1). So kann prinzipiell jedes Altersmodell mit der chronostratigraphischen Tabelle verknüpft werden (vgl. → 2-32). Die Geologische Zeitskala 2012 (*Geologic Time Scale 2012*, GTS2012) ist das Ergebnis der Verknüpfung der chronostratigraphischen Tabelle (Skala) mit dem Altersmodell von GRADSTEIN et al. (2012) (primär Schritt 2) (→ 2-02, Abb. 1).³ Das etablierte (radio-metrische) Altersmodell für das Phanerozoikum in der Version von 2012 beruht auf etwas mehr als 260 ausgewählten, interpretierten Alterswerten von geologischen Objekten bekannter stratigraphischer Stellung.

Funktion und Bedeutung der geologischen Zeitskala (aktuell GTS2012)

In der Einführung zur GTS2012 heißt es zu Beginn (GRADSTEIN 2012, 1): „Die geologische Zeitskala (GTS) ist das Rahmenwerk für die Entschlüsselung der *langen* und komplexen Geschichte unseres Planeten (...)“ (kursiv durch den Verfasser). Dieser einleitende Satz ist unmissverständlich: *Die geologische Zeitskala 2012 ist einzig*

¹ Bezieht sich auf Kapitel 4 „Cyclostratigraphy and Astrochronology“ (HINNOV & HILGEN 2012; Zyklostratigraphie und Astrochronologie) des 1. Bandes von *The Geologic Time Scale 2012* (GRADSTEIN et al. 2012); zu dieser Methodik siehe KOTULLA (2015).

² Bezieht sich auf die Kapitel 7 bis 11 (Strontium-, Osmium-, Schwefel-, Sauerstoff- und Kohlenstoff-Isotopenstratigraphie) des 1. Bandes von *The Geologic Time Scale 2012* (GRADSTEIN et al. 2012).

³ SMITH et al. (2015, 38) merken an, dass *The Geologic Time Scale 2012* (GRADSTEIN et al. 2012) kein offizielles Dokument der *International Commission on Stratigraphy* (ICS) sei: „However, though GTS2012 is an invaluable compendium of stratigraphic data, it is not an official document of the International Commission on Stratigraphy (ICS) and it does not deal with many of the issues raised in this paper.“

das Rahmenwerk.⁴ Hier liegt eine Tatsachenaussage vor, obwohl die Geologie von einer *langen* Geschichte (folglich einer *langen* Zeitskala) nur *ausgeht*: „Sie [Die Geologie, MK] geht davon aus, dass das heutige Erscheinungsbild der Erde das Ergebnis einer *langen* und wechselvollen Entwicklung ist (...)“ (LOTZE 1968, 7; kursiv durch den Verfasser).

Diesem Altersmodell, dieser Interpretation, muss aber nicht gefolgt werden. Im *Internationalen Stratigraphischen Leitfaden* heißt es: „Einzelne, Organisationen oder Nationen sollen sich nicht verpflichtet fühlen, ihm [dem Leitfaden, MK] oder einem Teil daraus zu folgen, es sei denn, dass sie von seiner Logik und seinem Wert überzeugt sind“ (SALVADOR 1994, 4).

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

Zur Ergänzung → 2-01.

Literatur

- GRADSTEIN FM (2012) Introduction. In: GRADSTEIN FM, OGG JG, SCHMITZ MD & OGG GM (Eds.) The Geologic Time Scale 2012. Volume 1, 1-30. Oxford Amsterdam.
- GRADSTEIN FM, OGG JG, SCHMITZ MD & OGG GM (Eds.) (2012) The Geologic Time Scale 2012. Volume 1/2, Oxford Amsterdam.
- HINNOV LA & HILGEN FJ (2012) Cyclostratigraphy and Astrochronology. In: GRADSTEIN FM, OGG JG, SCHMITZ MD & OGG GM (Eds.) The Geologic Time Scale 2012. Volume 1, 63-84. Oxford Amsterdam.
- KOTULLA M (2015) Sedimentfolgen und ihre Interpretation: Zyклоstratigraphie und das Milankovitch-Zyklen-Syndrom. W+W Special Paper G-15-1, Baiersbronn.
https://www.wort-und-wissen.org/wp-content/uploads/g-15-1_zyklostratigraphie_und_milankovitch-zyklen.pdf
- LOTZE F (1968) Geologie. Sammlung Götschen, Band 13/13a, Berlin.
- SALVADOR A (1994) (Ed.) International Stratigraphic Guide. 2nd ed.
- SMITH AG, BARRY T, BOWN P, COPE J, GALE A, GIBBARD P, GREGORY J, HOUNSLOW M, KEMP D, KNOX R, MARSHALL J, OATES M, RAWSON P, POWELL J & WATERS C (2015) GSSPs, global stratigraphy and correlation. In: SMITH DG, BAILEY RJ, BURGESS PM & FRASER AJ (eds) Strata and Time: Probing the Gaps in Our Understanding. Geological Society, London, Special Publication 404, 37-67.

⁴ Die Ausgabe von 2004 lautet *A Geologic Time Scale 2004*. In der Ausgabe von 2012 ist also bewusst eine Veränderung von „A“ (Eine) auf „The“ (Die) vollzogen worden.

2-20 James Hutton: Mythos Siccar Point

„Speed Time“ anstelle „Deep Time“ – Erosion und Sedimentation hochenergetisch anstatt langsam und graduell

Nicht das berühmteste, aber das wichtigste geologische Naturmonument der Welt

Siccar Point, „arguably the most important geological site in the world.“ So die Hinweistafel an der Kissing Gate, unmittelbar oberhalb der sonst so unbedeutenden Landspitze an der schottischen Ostküste (Abb. 1). Seit Generationen pilgern Studenten zu einem natürlichen Aufschluss, der, der Tafelbeschreibung folgend, James HUTTON (1726-1797) im Jahre 1788 die abschließende Bestätigung für seine Behauptung gab, dass die Erde Äonen alt sei.¹ Damit steht Siccar Point wie kein anderes Naturmonument für das unvorstellbare Ausmaß von Zeit, das geologische Prozesse ausmachen soll. – Ein genauerer Blick auf Siccar Point zeigt allerdings, dass die anstehenden Ablagerungen eine derartige Interpretation nicht zulassen. Vielmehr bezeugen die Sedimentgesteine eine sehr rasche Erosion und Sedimentation.

Die „Hutton-Diskordanz“

Am Siccar Point werden steil stehende, ältere Sedimentgesteine von leicht schräggeneigten, jüngeren Sedimentgesteinen überlagert. Die Lagerung der Gesteinsverbände zueinander ist somit diskordant, d. h. sie steht in einem „Missklang“. Dabei ist ein deutlicher Winkel ausgebildet (Abb. 2 und 3). So hat sich für solche Phänomene der deskriptive Begriff Winkeldiskordanz (angular

unconformity) durchgesetzt.



Abb. 1 Siccar Point. Etwa 55 km östlich Edinburgh, Schottland; Koordinaten: 55° 55' 53" N, 2° 18' 5" W. Foto: Landsat-8-Aufnahme vom 4. Juni 2018 (Credit: NASA/Joshua Stevens).

In HUTTONS Hauptwerk *Theory of the Earth* findet Siccar Point nur eine einzige Erwähnung. Nicht in der „Erstausgabe“ von 1788, wo HUTTON hauptsächlich sein Theorie-Regelwerk vorstellt, sondern in der Erweiterungs- bzw. Ergänzungsausgabe von 1795 (Vol. 1), in welchem er weitere „Beweise“ für seine Theorie präsentiert. Vom Boot aus hatten HUTTON und seine Begleiter die gesuchten diskordanten Lagerungsverhältnisse besonders gut ausgeprägt am Siccar Point (aus der Ferne) beobachtet². Heute ist Siccar Point

stone turn up near the Pease burn, lifting towards the schistus. We found the junction of that schistus with the red sand-stone and marly strata on the shore and sea bank, at St. Helens, corresponding in general with what we had observed in the burns to the westward. But, at Siccar Point, we found a beautiful picture of this junction washed bare by the sea. The sand-stone strata are partly washed away, and partly remaining upon the ends of the vertical schistus; and, in many places, points of the schistus strata are seen standing up through among the sand-stone, the greatest part of which is worn away. Behind this again we have a natural section of those sand-stone strata, containing fragments of the schistus“ HUTTON (1795, Chap. VI., Sect I). – Schistus =

¹ Die NASA machte mit ihrem „Bild des Tages“ vom 14. August 2018 auf James HUTTON und seine Ideen aufmerksam. Der NASA-Beitrag zum Bild, überschrieben mit „Der Abgrund der Zeit“, erklärt die zentrale Doktrin der Geologie, ein Konzept, das Uniformitarismus genannt wird: Die Idee, dass zahlreiche geologische Prozesse, die wir heute beobachten, in der gleichen Weise und mit der gleichen Intensität auch in der Vergangenheit wirkten. Mit James HUTTON sei diese Doktrin der Geologie begründet worden; er habe „unser Verständnis über das Alter der Erde verändert“ und habe geholfen, „die Wissenschaft der Geologie zu etablieren.“

² „Having taken boat at Dunglass burn, we set out to explore the coast; and, we observed the horizontal sand-

auch unter der Bezeichnung „Hutton-Diskordanz“ bekannt.



Abb. 2 Aufschluss Siccar Point, schottische Ostküste.

Beobachtung und Interpretation

HUTTON betrachtete die Schichten am Siccar Point im Lichte seiner eigenen Naturbeobachtungen einer extrem langsamen Abtragung im schottischen Hügelland.^{3,4} Am Siccar Point lieferten die älteren (herausgehobenen und steilgestellten) Sedimentgesteine, ehemals Meeresablagerungen, das Material für die jüngeren Sedimentgesteine.⁵ Doch, so folgerte HUTTON, auch die älteren Sedimentgesteine benötigten einen Sedimentlieferanten; also bedurfte es noch älterer Gesteine eines ehemaligen Festlandes, die abgetragen wurden. Und auch diese Festlandsgesteine wiederum waren ehemals Meeresablagerungen und so fort.⁶ Es verhält sich wie eine endlose Kette oder anders ausgedrückt wie ein fortwährender Zyklus, ein immerwährender Gesteinskreislauf. So endet schließlich HUTTONs Werk mit dem bekannten Wort: „(...) wir finden keine Spur eines Anfangs, keine Aussicht auf eine Ende.“⁷

ältere Gesteinskomplex (Grauwacken), red sand-stone = jüngere Gesteinskomplex (Brekzien und Sandsteine).

³ „The immense time necessarily required for this total destruction of the land (...)“ HUTTON (1788, 215).

⁴ „With regard again to the effect of time. Though the continuance of time may do much in those operations which are extremely slow, where no changes, to our observation, had appeared to take place; yet, where it is not in the nature of things to produce the change in question, the unlimited course of time would be no more effectual, than the moment by which we measure events in our observations“ HUTTON (1788, 226).

A) Der ältere Gesteinskomplex – silurische Grauwacken

Die steilstehenden Sedimentgesteine sind Grauwacken, die mit Tonschiefern alternieren (Abb. 3). Die Grauwacken sind graue Sandsteine, die sich aus Komponenten von gröberem Sand bis zu feinerem Ton aufbauen, also im Ganzen schlecht bis gar nicht sortiert sind. Bezeichnend ist ihr hoher Anteil kantiger Gesteinsbruchstücke. Innerhalb der Grauwackenbänke ist eine Gradierung (von grob nach fein) ausgeprägt; teilweise ist auch Schrägschichtung erkennbar. Aufgrund dieser Charakteristika werden die Grauwacken-Sequenzen als Ablagerungen von Trübeströmen (turbidity currents) interpretiert. Solcherart sedimenthaltige Ströme an untermeerischen Hängen sind schnellfließend und repräsentieren kurzzeitige Ereignisse. Eine Grauwacken-Sequenz entstand so möglicherweise innerhalb von Minuten. Die lateral (seitlich) aushaltenden Bänke, die Abfolge von Dutzenden solcher Sequenzen ohne erkennbare Sedimentationsunterbrechung und das große Verbreitungsgebiet lassen insgesamt auf eine großräumige und rasche Sedimentation und damit auch Erosion schließen.

B) Die Diskordanz

Die Diskordanz ist die Kontaktfläche zwischen den beiden Gesteinskomplexen; sie ist nahezu eben (Abb. 3). Im Vergleich zur gegenwärtigen Exposition, wo die Grauwacken nicht überdeckt sind, kann ein bankweise stark zergliedertes Relief (Verwitterung) beobachtet werden (Abb. 4). Dies lässt darauf schließen, dass zwischen Erosion des Grauwackenkomplexes und Ablagerung des oberen Gesteinskomplexes keine große Zeitspanne liegen kann. Aus der auffällig ebenen Erosionsfläche kann ein flächenhafter, rascher Abtrag („Abrasion“) gefolgert werden,

⁵ „(...) but here we further learn, that the indurated and erected strata, after being broken and washed by the moving waters, had again been sunk below the sea, and had served as a bottom or basis on which to form a new structure of strata“ HUTTON (1795, Chap. VI., Sect I).

⁶ „By thus admitting a primary and secondary in the formation of our land, the present theory will be confirmed in all its parts. For, nothing but those vicissitudes, in which the old is worn and destroyed, and new land formed to supply its place, can explain that order which is to be perceived in all the works of nature“ HUTTON (1795, Chap. VI., Sect II, letzter Absatz).

⁷ HUTTON (1788, 304).

ansonsten hätte sich ein klein- wie großräumiges Relief ausgebildet.

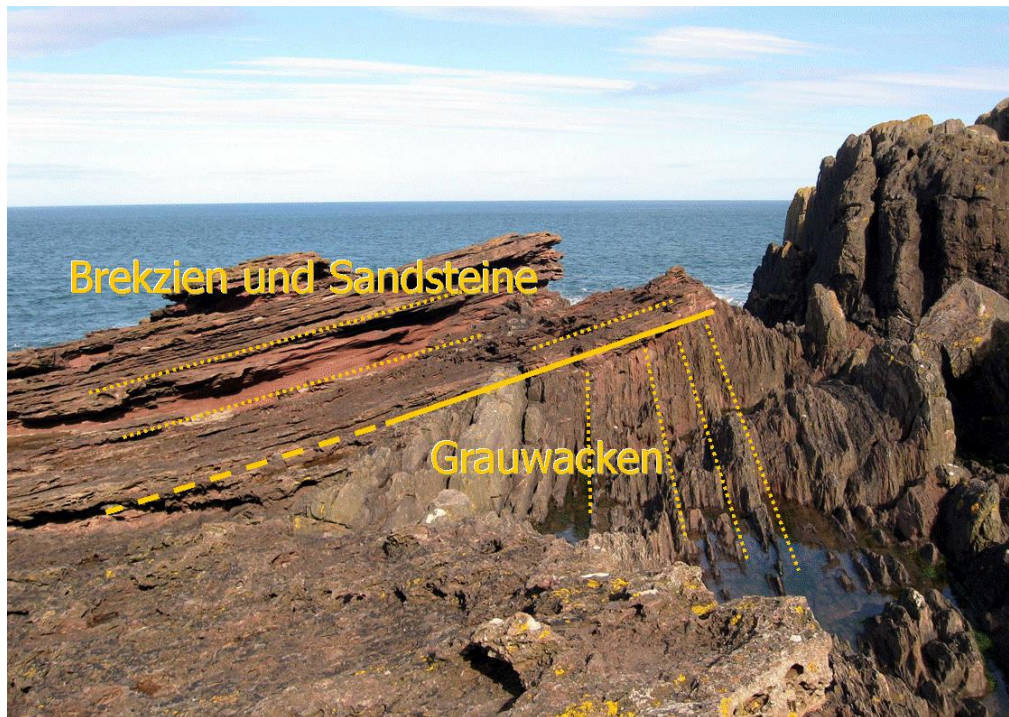


Abb. 3 Winkeldiskordanz am Siccar Point. Steilstehende Grauwacken werden von nahezu horizontalen Brekzien und Sandsteinen überlagert. Linienlegende: durchgezogen = Winkeldiskordanz, gestrichelt = Fortsetzung der Winkeldiskordanz unter Brekzien-bedeckung, gepunktet = Nachzeichnung der Lagerung der Gesteinskomplexe.

Der steilgestellte und herausgehobene Grauwackenkomplex weist keinerlei Bruchstrukturen auf. Dies legt die Annahme nahe, dass die Sedimente in noch „weichem“ und wasserreichen, also plastischen Zustand verformt wurden. Jede Diskordanz zeigt eine Sedimentationsunterbrechung an. Diese allerdings kann nicht von sehr langer Dauer gewesen sein. Denn die Verkettung der Prozesse von der Sedimentation über anschließender Heraushebung und Steilstellung bis zur unmittelbaren Erosion deutet auf eine Folge rascher Großereignisse (tektonisch hochaktives Milieu, hochmobiler Sedimentationstrog).

C) Der jüngere Gesteinskomplex – devonische Old-Red-Sandsteine

Der überlagernde rötliche Gesteinskomplex besteht aus einer basalen Brekzie und sich anschließenden Sandsteinen mit Kreuzschichtung sowie eingelagerter Brekzienhorizonte (Abb. 3). Die Brekzie besteht aus einer sandigen Grundmasse und Grauwackentrümmern. Diese Komponenten sind kantig, teilweise abgeflacht und dachziegelartig gelagert. Sie werden als rasche Ablagerung

schnell fließender Oberflächenströme (Hochenergie-Milieu) interpretiert. Die großflächige Verbreitung und Mächtigkeit dieser Ablagerungen zeugen von einer gewaltigen katastrophischen Erosion.

D) Zwischenfazit

Siccar Point, aus der Nähe betrachtet, im Lichte moderner Sedimentologie und dynamischer Prozessabläufe, bezeugt katastrophische Ereignisse rascher Erosion und Sedimentation in einer Dimension, wie wir sie heute nicht beobachten. HUTTON hat sich von einer Idee, nicht aber von den Befunden leiten lassen.

Zusammenfassung und Ausblick

HUTTONS „Unermesslichkeit der vergangenen Zeit“, seine Idee eines immerwährenden, nahezu unendlichen Stoffkreislaufes verknüpft mit seiner damaligen Beobachtung eines (aktuell) extrem langsamen Erosionsprozesses, kann dem Befund am Siccar Point nicht entnommen werden.

Im Gegenteil. Beide Gesteinskomplexe zeugen von einer raschen Erosion als auch Sedimentation. Selbst die Sedimentationsunterbrechung (Diskordanz) kann nicht von sehr langer Dauer gewesen sein.



Abb. 4 Ebene Erosionsfläche (Diskordanz) und exponierte, verwitterte Grauwacken (gepunktet).

HUTTONS Ideen sind von LYELL (1830-33), insbesondere in Form des Uniformitarianismus (häufig „verkürzt“ als: Die Gegenwart ist der Schlüssel zur Vergangenheit, → 2-21), DARWIN (1859, → 2-22), HOLMES (1961) und vielen anderen wohlwollend aufgegriffen und zementiert worden. Die „Unermesslichkeit der vergangenen Zeit“ hat durch die von MCPHEE (1983, 127) kreierte Wortprägung „Deep Time“ (Tiefenzeit) in neuem Kleide erneut Einzug in die Geologie genommen. Stephen J. GOULD hat HUTTON und die Geologie scharf analysiert. „Zu dieser Vaterschaft⁸ ist Hutton gekommen, weil eine englische Tradition in ihm den ursprünglichen Entdecker der Tiefenzeit sehen wollte – und die Geologen wissen alle ganz genau, dass es in unserer Disziplin nichts gibt, was eine ähnliche Bedeutung hätte“ (GOULD 1992, 98f). Die Tiefenzeit ist für die Mehrheit der Geologen das höchste Gut. Aber aufgrund des ganz anderen Befundes – nämlich „Speed Time“ anstelle „Deep Time“ – muss mit

dem Mythos Siccar Point auch der Mythos Tiefenzeit fallen.

Folgen wir weiter der Hinweistafel am Kissing Gate, so scheint HUTTON ein weiterer „Verdienst“ noch viel höher angerechnet zu werden: „Hutton’s theory released science and philosophy from limitations of the biblical age of the earth (6000 years old). Though bitterly disputed at that time, it is now accepted as a fundamental of science.“ So doch HUTTONS Theorie auf Sand gegründet war, was wird mit dem ganzen Bau passieren? „Als nun ein Wolkenbruch kam und die Wassermassen heranfluteten, als die Stürme tobten und an dem Haus rüttelten, da stürzte es ein und wurde völlig zerstört.“⁹

Literatur

- DARWIN C (1859) The Origin of Species. 6th edition 1872, reprint 1993, Random House, New York.
- GOULD SJ (1990) Die Entdeckung der Tiefenzeit. Zeitpfeil oder Zeitzyklus in der Geschichte unserer Erde. München Wien.
- HOLMES A (1961) Principles of Physical Geology. London.
- HUTTON J (1788) Theory of the Earth; or an Investigation of the Laws Observable in the Composition, Dissolution, and Restoration of Land upon the Globe. Transactions of the Royal Society of Edinburgh 1(2), 209-304.
<http://www.uwmc.uwc.edu/geography/hutton/hutton.htm>; Zugriff 12.03.2012.
- HUTTON J (1795) Theory of the Earth, with Proofs and Illustrations. In four parts. Edinburgh. Vol. 1 (of 4).
<http://www.gutenberg.org/files/12861/12861-h/12861-h.htm>; Zugriff 12.03.2012.
- LYELL C (1830-33) Principles of Geology. Being an Attempt to Explain the Former Changes of the Earth’s Surface by Reference to Cause Now in Operation. London.
- MCPHEE J (1983) Annals of the Former World. Book 1: Basin and Range. New York.
- NASA (2018) <https://earthobservatory.nasa.gov/images/92598/the-abyss-of-time>.

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

Zur Ergänzung → 2-01, 2-02, 2-03.

⁸ Vater der Geologie; Anmerkung des Verfassers: Das vermeintliche Mutterland der Geologie hat seinen vermeintlichen Vater (HUTTON) gekürt.

⁹ Die Bibel: Matthäus-Evangelium, Kap. 7, Vers 27.

Bildnachweis

Foto (Abb. 2-4): Dave SOUZA (Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0);

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Siccar_Point_red_capstone_closeup.jpg;

Eintragungen durch den Verfasser.

2-21 Lyell – aus Prinzip?

Mit den Lyell'schen Prinzipien kann die Vorzeit nicht entschlüsselt werden

The present is the key to the past?

Die Gegenwart ist der Schlüssel zur Vergangenheit. – Kein Satz von Charles LYELL.

Die bekannte Redewendung wurde von GEIKIE (1905), lange nach LYELL (1797-1875), geschaffen. Sie erfasst, obschon einfach und prägnant, nicht ganz den Kern von LYELLS Prinzipienwerk. In Kürze und notwendigerweise ebenfalls vereinfacht: LYELL ließ für die Deutung der Vergangenheit als einzige Erfahrungsquelle nur zu beobachtende gegenwärtige geologische Vorgänge zu. Und: Nur durch strikte Befolgung dieser Methodologie sei die geologische Wahrheit zu ermitteln (GOULD 1990, 155). Die Methodologie selbst ist ein kompliziertes, geschickt verwobenes Konstrukt verschiedener Ausprägungen von Uniformität (Gleichförmigkeit).¹ Der die Methodologie LYELLS zusammenfassende Begriff Uniformitarismus² stammte nicht von LYELL, er selber hatte keinen Namen dafür, sondern wurde 1832 von einem seiner Rezensenten, William WHEWELL, eingeführt.³

Programm und Bedeutung für die Geologie

LYELLS Programm liest sich bereits im Untertitel seines erstmals 1830-33 erschienenen Hauptwerkes *Principles of Geology: Ein Versuch, die früheren Veränderungen der Oberfläche der Erde unter Bezug auf Ursachen, die gegenwärtig im Gange sind, zu erklären*. Oder sprachlich moderner: (...) *durch heute wirkende Ursachen zu erklären*.

LYELL hat für die Geologie ein so fundamentales wie auch umstrittenes Werk hinterlassen, dass sich inzwischen Generation von Philosophen, Geowissenschaftlern und Theologen damit auseinandergesetzt haben (beispielweise WHEWELL 1872; HOOYKAAS 1963, 1970; HUBERT 1967;

SIMPSON 1970; HENNINGSEN 2009). Nach ENGELHARDT & ZIMMERMANN (1982) wird „das regulative Prinzip der Uniformität insbesondere in der Form des Aktualismus (...) auch heute noch als die wichtigste Grundlage der geowissenschaftlichen Forschung angesehen.“⁴ Das scheint gegenwärtig, fast 40 Jahre später, noch immer im Wesentlichen zu gelten.⁵

AGER (1993) bezeichnet LYELL als Hohepriester des Uniformitarismus (S. 82). An einer Vielzahl von Beispielen zeigt AGER auf, dass der „substantivische Uniformitarismus“ (gleichförmige Raten oder Bedingungen) zahlreiche unterschiedliche geologische Erscheinungen nicht erklären kann. Im Gegenteil: Der stratigraphische Bericht sei voll von Beispielen von Prozessen, welche weit davon entfernt seien als „normal“ bezeichnet werden zu können. Denn die Sedimentation in der Vergangenheit sei sehr oft rasch und sehr unregelmäßig gewesen (S. 70). Bis zu dieser Erkenntnis, so räumt AGER ein, wirkte das LYELLSche System wie eine Gehirnwäsche:

„(...) ich habe versucht zu zeigen, wie ich denke, dass die Geologie in die Hände von Theoretikern fiel, die mehr von der sozialen und politischen Geschichte ihrer Zeit bestimmt waren als von Beobachtungen im Feld. So war es – wie es Steve Gould formulierte –, dass Charles Lyell es bewerkstelligte, zukünftige Generationen von Geologen davon zu überzeugen, dass ihre Wissenschaft mit ihm⁶ begonnen hatte‘.

Mit anderen Worten, wir haben uns erlaubt, uns einer Gehirnwäsche zu unterziehen, einer Vermeidung jeglicher Interpretation der Vergangenheit, die extreme Prozesse involviert und die als ‚kataklysmisch‘ bezeichnet werden können“ (AGER 1993, 70).

¹ GOULD (1990) identifiziert und unterscheidet Uniformität des Gesetzes, Uniformität des Prozesses, Uniformität des Tempos oder Gradualismus, Uniformität des Zustandes oder Neoprogressionismus und Uniformität der Geschwindigkeit.

² Im Deutschen häufiger als Uniformitarismus, seltener als Uniformismus, bezeichnet.

³ Nach GOULD (1990, 155).

⁴ Es gibt einige Versuche, das Aktualitätsprinzip durch Neufassungen oder Neuinterpretationen aufrecht zu erhalten; vgl. z. B. KÖTTER (2001).

⁵ Vgl. KOTULLA (2018).

⁶ So beginnt beispielsweise LYELLS Werk mit: „Geologie ist die Wissenschaft (...)“

Beispiele der Auseinandersetzung mit dem Uniformitarismus

I) Lake-Missoula-Flut

Mehr als 40 Jahre, von 1923 bis 1965, dauerte es, bis der Geologe J. H. BRETZ seine Fachkollegen davon überzeugen konnte, dass das Scanneled Scabland im Osten des Bundesstaates Washington durch ein gewaltiges spätglaziales Flutereignis gebildet wurde (ALLEN et al. 1986, BRETZ 1969).⁷

In seiner Empfangsrede zum Erhalt der Penrose-Ehrenmedaille im Alter von 96 Jahren sagte BRETZ: „Es kann mir zugeschrieben werden, den legendären Katastrophismus wiederbelebt und entmystifiziert zu haben und einen zu rigorosen Uniformitarismus in Frage gestellt zu haben.“

II) Gigantische Salzvorkommen im Untergrund des Mittelmeeres

Auswertungen von Kernbohrungen in Sedimenten des Mittelmeeres decken umfangreiche Evaporit-Vorkommen⁸ auf. HSÜ et al. (1973) schlagen eine Entstehung der Evaporit-Vorkommen durch Abschnürung des Paläo-Mittelmeeres vom Atlantik vor, die eine Austrocknung in einer Beckentiefe von 1500-2500 m bewirkte sowie eine anschließende Auffüllung des Beckens mit Meerwasser über eine „Gibaltarkaskade“ innerhalb von bis zu 1000 Jahren.⁹ In ihrer Überzeugung dieser non-uniformitarischen Vorgänge ringen sie mit dem „substanziellen Uniformitarismus“ und flüchten in „das Konzept des seltenen (und unwahrscheinlichen) Ereignisses“ (GRETENER 1967).

HSÜ et al. (1973) schreiben: „(...) und wir können kaum erwarten [statistisch betrachtet], eine moderne [heutige] Salzpflanze zu finden, die so groß ist wie das Mittelmeer, um die Forderung der substanziellen Uniformitarianer zu erfüllen.“ Und weiter: „Bohraktivitäten haben das Unwahrscheinliche aufgedeckt – dass ein Gebiet so groß wie das Mittelmeer von Salzablagerungen unterlegt ist. Das Messinische Ereignis ist ein unwahrscheinliches Ereignis, ungeachtet dessen, ob das

Becken tief oder flach war, Tiefwasser oder ausgetrocknet. Welche Erklärung wir auch immer anbieten, sie würde als unwahrscheinlich scheinen. Andererseits ist unwahrscheinlich nicht unmöglich. Es scheint angemessen, dass wir unsere Geschichte mit einem Zitat eines Meisterdetektives schließen: Arthur Conan Doyle, alias Sherlock Holmes: „Es ist eine alte Maxime meinerseits, dass, wenn du das Unmögliche ausgeschlossen hast, was bleibt, wie unwahrscheinlich auch immer, muss die Wahrheit sein.““

III) Einbruch des Atlantiks in das Mittelmeer

Ein durch Bohrungen und Seismik rekonstruierter 200 km langer Kanal mit 250 m tiefen Einschnitten am Boden der Gibraltarstraße und weiter westlich ins Mittelmeer hinein veranlassen GARCIA-CASTELLANOS et al. (2009), für den Eintritt atlantischer Wasser in das [vermeintlich, MK¹⁰] leere (ausgetrocknete) Mittelmeer am Ende der „messinischen Salinitätskrise“ einen katastrophischen Einbruch anzunehmen. Anstelle einer begrenzt wirkenden „Gibaltarkaskade“ (HSÜ et al. 1973, vgl. oben) weist die Seebodenmorphologie auf ein extremes Erosionsereignis und die Ausbildung einer Art Rampe in das Mittelmeer hinein. Errechnete maximale Fluss- bzw. Abflussraten sind um eine Größenordnung höher als bei der Lake-Missoula-Flut (hier: 10⁸ m³s⁻¹); die Maximalgeschwindigkeiten werden mit etwa 140 km/h angegeben, die Einschnittrate mit 0,4 m pro Tag. – Eine Auseinandersetzung mit dem Uniformitarismus erfolgt nicht (mehr).

GARCIA-CASTELLANOS et al. (2009) schreiben: „(...) unsere Resultate lassen darauf schließen, dass 90 % des Wassers in einer kurzen Periode zwischen einigen Monaten und zwei Jahren transferiert wurde. Diese extreme, schlagartige Flut mag Spitzenwerte des Seespiegelanstieges des Mittelmeeres um mehr als 10 Meter pro Tag bedingt haben.“

IV) Sedimentäre Ablagerungsräume

REINECK & SINGH (1980, 503) schreiben in ihren Schlussbemerkungen ihres Lehrbuches

⁷ Siehe auch KOTULLA (2014): *Megafluten*.

⁸ Evaporite: Salzgesteine; hier Chloridgesteine, hauptsächlich aus den Mineralen Halit (NaCl) und Sylvin (KCl) aufgebaut, und Sulfatgesteine, hauptsächlich aus dem Mineral Calciumsulfat (CaSO₄) aufgebaut.

⁹ Zu einer Diskussion dieser Vorstellung siehe KOTULLA (2017).

¹⁰ Siehe Fußnote 9.

Depositional Sedimentary Environments [Sedimentäre Ablagerungsräume]:

„(1) Verfügen wir über moderne Analogien oder Sedimentationsmodelle, die auf alle ehemaligen Umgebungen [Ablagerungsräume, MK] anwendbar sind? (2) Ist es immer möglich, eine ehemalige Umgebung im Lichte rezenter Analogien zu erkennen? Obgleich diese Fragen logisch sind, sie sind schwierig zu beantworten; und wenn wir gefragt würden, sie kategorisch zu beantworten, würden wir auf Basis unseres derzeitigen Wissensstandes ein ‚Nein‘ wählen.“

Und weiter unten: „Nichtdestotrotz ist das Prinzip des Uniformitarismus (Prinzip des Aktualismus) natürlich in groben Zügen gültig. Durch den Vergleich ehemaliger und rezenter Sedimente ist seit langem etabliert, dass die physikalischen und chemischen Gesetze, die die Sedimentation steuern, während der gesamten geologischen Geschichte konstant geblieben sind. Unter gegebenen hydrodynamischen Konditionen haben sich die gleichen primären Strukturen in ehemaligen und rezenten Sedimenten gebildet.“

Als Vorbemerkung hätten diese Aussagen sicherlich noch mehr Leser erreicht.

V) Impakt-Ereignis an der Kreide/Tertiär-Grenze

ALVAREZ (2009, 146) schreibt zum Impakt-Ereignis an der Kreide/Tertiär-Grenze¹¹ (Entdeckung der Iridium-Anomalie 1979, vgl. ALVAREZ et al. 1979, 1980):

„Der K/T-Impakt, zuerst erkannt bei Gubbio [Italien, MK], war ein wirklich katastrophisches Ereignis, dessen Geschichte im Detail in den Gesteinsbericht geschrieben ist. Er korreliert mit dem großen Massenaussterben vor 65 Millionen [radiometrischen, MK] Jahren und verursachte es möglicherweise. Nach eineinhalb Jahrhunderten war LYELLS kompromissloser uniformitarischer Gradualismus tot.“

Zusammenfassung und Handlungsbedarf

Die selektiv-qualitative Zusammenstellung soll ergänzend zu den oben verwiesenen Schriften betont zeigen, dass ein regulatives Prinzip der LYELL'schen Art eine Suche und Annäherung an die Wahrheit behindert und darüber hinaus über

150 Jahre in eine falsche Richtung gelenkt hat. Es ist das Verdienst einzelner Wissenschaftler, dass sie aus diesem System, wenn auch mit unterschiedlicher Ausprägung und Vorsicht, ausgebrochen sind, beharrlich ihren Weg verfolgten und damit zu Wegbereitern einer (möglichen) Kurskorrektur wurden. Die Akzeptanz katastrophischer Vorgänge (Hochenergie-Milieus) in der Erdvergangenheit, aber ausschließlich limitiert auf seltene Vorkommnisse (Stichworte: „moderner Katastrophismus“; „Konzept des seltenen Ereignisses“, vgl. GRETENER 1967) oder eine moderate Ereignisstratigraphie zeigen die nach wie vor starke Imprägnation mit LYELL'schen Gedankengut.

Fazit

Mit den LYELL'schen Prinzipien kann die Erdvergangenheit nicht entschlüsselt werden. Es ist in jedem Einzelfall zu prüfen, ob heute zu beobachtende Phänomene, Gesetzmäßigkeiten und Prozesse auf die Vergangenheit übertragen werden können. In diesem Sinne ist die aktuogeologische Forschung ein essentieller Baustein der historischen Geologie.

Literatur

- AGER DV (1993) The nature of the stratigraphical record. Chichester.
- ALLEN JE & BURNS M, mit SARGENT SC (1986) Cataclysms on the Columbia. Portland, Oregon.
- ALVAREZ W, ALVAREZ LW, ASARO F & MICHEL HV (1979) Anomalous iridium levels at the Cretaceous/Tertiary boundary at Gubbio, Italy: Negative results of tests for a supernova origin. In: CHRISTENSEN WK & BIRKELUND T (Eds) Cretaceous-Tertiary Boundary Events Symposium; II. Proceedings, 50-53. University of Copenhagen.
- ALVAREZ LW, ALVAREZ W, ASARO, F & MICHEL HV (1980) Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction. *Science* 208, 1095-1108.
- ALVAREZ W (2009) The historical record in the Scaglia limestone at Gubbio: magnetic reversals and the Cretaceous-Tertiary mass extinction. *Sedimentology* 56, 137-148.
- BRETZ JH (1969) The Lake Missoula Floods and the Channeled Scabland. *Journal of Geology* 77, 503-543.

¹¹ Nach aktueller chronostratigraphischer Klassifikation: Kreide/Paläogen-Grenze.

VON ENGELHARDT W & ZIMMERMANN J (1982) Theorie der Geowissenschaft. Paderborn München Wien Zürich.

GARCIA-CASTELLANOS D, ESTRADA F, JIMÉNEZ-MUNT I, GORINI C, FERNÁNDEZ M, VERGÉS J & DE VICENTE R (2009) Catastrophic flood of the Mediterranean after the Messinian salinity crisis. *Nature* 462, 778-782.

GOULD SJ (1990) Die Entdeckung der Tiefenzeit. Zeitpfeil oder Zeitzyklus in der Geschichte unserer Erde. München Wien.

GEIKIE A (1905) The founders of geology. London.

GRETENER PE (1967) Significance of the rare event in geology. *Bull. Am. Assoc. Petrol. Geologists* 51, 2197-2206.

HENNINGSSEN D (2009) Aktualismus in den Geowissenschaften – Die Gegenwart als Schlüssel zur Vergangenheit. *Naturwissenschaftliche Rundschau*, 62, 229-232.

HOOYKAAS R (1963) The Principle of Uniformity in Geology, Biology, and Theology. Leiden.

HOOYKAAS R (1970) Catastrophism in Geology, Its Scientific Character in Relation to Actualism and Uniformitarianism. *Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen, afd. Letterkunde, Med. (n.r.)* 33, 271-316.

HSÜ KJ, CITA MB & RYAN WBF (1973) The origin of the Mediterranean evaporites. *Init. Rep. Deep Sea Drilling Project 13*, 1203-1235, US Government Printing Office.

HUBERT MK (1967) Critique of the Principle of Uniformity. In: ALBRITTON CC (ed.) *Uniformity and Simplicity*. *Geol. Soc. Amer. Spec. Paper* 89, 3-33.

KÖTTER R (2001) Zur methodologischen Struktur des Aktualismusprinzips. *Z. d. dt. geol. Gesellschaft* 152, 129-141.

KOTULLA M (2014) Megafluten. *Studium Integrale Journal* 21, 4-11.
<http://www.si-journal.de/jg21/heft1/sij211-1.pdf>

KOTULLA M (2017) Salzlagerstätten: War das Mittelmeer einst ausgetrocknet? *Studium Integrale Journal* 24, 22-30.
<http://www.si-journal.de/jg24/heft1/sij241-3.pdf>

KOTULLA M (2018) Geologisches Weltbild: Aktualismus von Wiederbelebung der Katastrophentheorie gefährdet? *Studium Integrale Journal* 25, 117-118.
<http://www.si-journal.de/jg25/heft2/sij252-k.pdf>

LYELL C (1830-33) *Principles of Geology. Being an Attempt to Explain the Former Changes of the Earth's Surface by Reference to Cause Now in Operation*. London.

LYELL C (1867-1868) *Principles of Geology*. 2 vols., 10th ed., London.

REINECK H-E & SINGH IB (1980) *Depositional Sedimentary Environments*. Berlin Heidelberg New York.

SIMPSON GG (1970) Uniformitarianism. An Inquiry into Principle, Theory, and Method in Geohistory and Biohistory. In: HECHT MK & STEERE WC (eds.) *Essays in Evolution and Genetics in Honor of Theodosius Dobzhansky*. New York, 43-96.

WHEWELL W (1872) *The Two Antagonist Doctrines of Geology. History of Inductive Sciences from the Earliest to the Present Time, Vol. 2*. New York, 586-598.

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

Zur Ergänzung → 2-01, 2-02, 2-20.

2-22 The Art of Charles Darwin: Unermessliche Zeit und unvollständige Fossilüberlieferung

Annahmen und Argumente Darwins aus heutiger Perspektive

**„As this whole volume
is one long argument (...)”¹**

Der Naturforscher und Geologe Charles DARWIN (1809-1882) lieferte für seine Theorie der „Entstehung der Arten durch natürliche Zuchtwahl“^{2,3} die K.o.-Kriterien gleich mit: Die Notwendigkeit unermesslich langer Zeiträume und die Notwendigkeit der Lückenhaftigkeit der Fossilüberlieferung. Sie scheinen weitaus stärker zu wiegen als der postulierte Modus Operandi der „natürlichen Zuchtwahl“ (natürlichen Selektion) selbst. Seine Beobachtungen der „Veränderlichkeit“ durch Domestizierung hatte DARWIN einfach in die Vergangenheit extrapoliert bis er über eine weitere der Extrapolation innewohnenden Analogie zu seinem Startpunkt gelangte: „(...) so that all organisms start from a common origin“ (DARWIN 1872, 642).

DARWINs Abstammungs- und Entwicklungstheorie gründet demnach auf drei fundamentalen Annahmen:

1. Der „Modifikationsprozess“ („laws of variation“), abgeleitet von den Züchtungsergebnissen, wirkte (auch) fortwährend in der Vergangenheit. Er wirkte dergestalt, dass sich eine Entwicklung von einem (einfachen) Prototyp zur Vielfalt der Organismenwelt inklusive des Menschen vollzog.

2. Die verflossene Zeit war von großer, schier unermesslicher Dauer („the great lapse of time“). Die Vergangenheit war lange genug, dass alle [notwendigen] Veränderungen und Entwicklungen haben stattfinden können.

3. Die geologische Überlieferung, insbesondere die Fossilüberlieferung, ist extrem unvollständig („extreme imperfection of the geological

record“). Zwischenglieder („intermediate links“, „transitional links“, „transitional forms“), die den „Modifikationsprozess“ Schritt für Schritt mit der Zeit dokumentiert hätten, sind geologisch nicht überliefert.

Im Rahmen dieses Beitrags werden primär die geologisch basierten Annahmen 2 und 3 diskutiert.

Unermessliche Dauer der verflossenen Zeit

Der Zeit – in ihrer unermesslichen Dauer – kommt in der DARWIN’schen Theorie nicht nur eine bedeutende Rolle zu, sondern sie ist eine fundamentale Voraussetzung. Eine kurze Zeitskala würde seiner Theorie vollkommen die Grundlage entziehen; dies erschließt sich u. a. aus folgender Aussage: „Die Vorstellung, dass Arten unveränderliche Erzeugnisse waren, war geradezu unvermeidlich, solange die Geschichte der Welt als kurz anzusehen war (...)“.⁴ Mit Ausgang des 18. Jahrhunderts aber hatten sich von einer kurzen Zeitskala befreiende Vorstellungen etabliert, hin zu einer quasi zeitlosen [langen] Skala: Die „Unermesslichkeit der vergangenen Zeit“ (HUTTON 1788, → 2-20). Diese Vorstellungen sind insbesondere von Charles LYELL methodisch untermauert worden (→ 2-21); von ihm und seinen *Principles of Geology* (1830-33) scheint DARWIN maßgeblich beeinflusst worden zu sein.

Die Zeitfrage hat an Stellenwert nicht verloren, im Gegenteil: Für GOULD⁵ (1990) ist die unermessliche Zeit, die er auch als *Tiefenzeit* bezeichnet, das Bedeutendste für den Geologen überhaupt.⁶ LETTRA (2010) beschreibt in seiner Einführung zu *Time Matters* die Bedeutung des

¹ DARWIN (1872, 612).

² Auch mit „Züchtung“ übersetzt, siehe DARWIN (1860); dem Original folgend eigentlich mit „Selektion“ zu übersetzen, DARWIN (1859).

³ Kurzform von DARWINs Werk: *Origin of Species*, 1859 ff.

⁴ „The belief that species were immutable productions was almost unavoidable as long as the history of the world was thought to be of short duration (...)“ (DARWIN 1872, 638).

⁵ Stephen Jay GOULD (1941-2002), einflussreicher Paläontologe und Evolutionsbiologe.

⁶ „Zu dieser Vaterschaft ist Hutton gekommen, weil eine englische Tradition in ihm den ursprünglichen Entdecker der Tiefenzeit sehen wollte – und die Geologen wissen alle ganz genau, dass es in unserer Disziplin nichts gibt, was eine ähnliche Bedeutung hätte“ (GOULD 1992, 98-99).

Faktors Zeit so: In einer gedehnten Zeitskala ist nichts mehr außergewöhnlich. Anders ausgedrückt: Nicht nur wird alles möglich, alles scheint ganz gewöhnlich. So ist das eigentliche „Schlachtfeld“ unterschiedlicher Vorstellungen über die Erdgeschichte nicht das Stoffliche, die Abfolge der Gesteine und deren Fossilinhalt, sondern die Zeit.⁷

Was sind nun DARWINS (1872, 408-414) konkreten Argumente für eine schier unermessliche vergangene Zeit? In diesem Zusammenhang schreibt er von Fakten, „Fakten“, die den Verstand leiten, die „lapse of time“ annähernd zu begreifen.⁸

- a) Zunächst ein Verweis auf LYELLS großartiges Werk der *Principles of Geology*. Rhetorisch leitet DARWIN ein, dass jeder, der dieses Werk gelesen habe und nicht einge-stehe, wie unermesslich die vergangenen Zeitperioden gewesen waren, sofort dieses sein Buch schließen möge.⁹
- b) Ein weiterer Verweis auf LYELL, auf zu beobachtende wirkende Agenzien der Abtragung. Aktuell zu beobachtende, geringe Abtragungs- und Sedimentationsraten werden einfach in die Vergangenheit extrapoliert: „When thus impressed with the slow rate at which the land is worn away through subaerial and littoral action (...).“
- c) Errechnete (uniforme) Abtragungszeit von 1.000 Fuß festen Gesteins in 6 Millionen Jahren (gemäß Mr. Croll); vgl. Punkt b.
- d) Aufaddierte Maximaldicken der Schichtgesteine seit dem Kambrium von 73.000 Fuß in Großbritannien (gemäß Prof. Ramsay). Diese sind insgesamt signifikant zu erhöhen, da einzelne Schichtglieder auf dem europäischen Kontinent um das Tausendfache mächtiger ausgebildet seien.

e) Zwischen jeweils aufeinanderfolgenden Formationen¹⁰ leere (Zeit-) Perioden unermesslicher Dauer.

f) DARWINS (1859, 1860) eigene Abschätzung der Entstehung des Weald-Tals in England. Er errechnet eine Abtragungsdauer von etwa 300 Millionen Jahre (in der 1. und 2. Auflage seines Werkes).

DARWIN (1872, 438-9) geht weiter der Frage der Kritiker nach, ob eine bewohnbare (habitable) Erde für all diese Veränderungen lange genug existiert habe. Er schlägt alle bisher unternommenen Schätzungen für die Bildung der Schichtgesteine aus: 60 Millionen Jahre seit dem Kambrium – zu kurz, verglichen mit der geringen organischen Veränderung seit Beginn der Glazial-Epoche. 140 Millionen Jahre für das Präkambrium – kaum ausreichend, um die Organismen hervorgebracht haben zu können, die im Kambrium bereits existierten. Selbst die von Sir W. THOMPSON maximal errechneten 400 Millionen Jahre seit Formung der Kruste¹¹ erscheinen DARWIN zu kurz. In seiner *Recapitulation* erachtet er diese Einwände (bis dato auf Zehner oder Hunderte Millionen Jahre limitierte Schätzungen) in der Tat erneut als schwerwiegend und entgegnet mit Nicht-Wissen: Weder sei die Artveränderungsrate bekannt (gemessen in Jahren) noch die Konstitution des Universums, um sichere Aussagen über die Dauer der Vergangenheit der Erde unternehmen zu können. Insgesamt scheint es, dass es DARWIN (1872) nicht (mehr) auf konkrete Zahlen als solche ankommt, sondern vielmehr darum, dem Leser eine Vorstellung von der Größenordnung der Zeit zu vermitteln: „Few of us, however, know what a million really means“ (S. 413). Ergänzend argumentiert DARWIN immer wieder mit der geologischen Faktenlage.¹²

⁷ „The amount of time for something to occur usually increases the possibility of it happening or the frequency at which it can take place. If time scales are short, changes and variations become more important; but as time scales increase, it is possible for the unusual to become, if not the norm, at least unexceptional. This is why time has been an almost constant battleground for centuries and why, even now, it plays an important part in how different groups of people think about Earth Science“ (LETTRA 2010, 1).

⁸ „(...) the facts leading the mind feebly to comprehend the lapse of time“ DARWIN (1872, 408).

⁹ „He who can read Sir Charles Lyell's grand work on the *Principles of Geology*, which the historian will recognise as having produced a revolution in natural science, and yet does not admit how vast have been

the past periods of time, may at once close this volume“ (DARWIN 1872, 408).

¹⁰ Es handelt sich nach heutiger Klassifikation im Wesentlichen um die chronostratigraphische Einheit „System“.

¹¹ THOMPSONS (Lord Kelvin) Berechnung der Abkühlungszeit der Erde bezog sich auf die Annahme, dass der Ausgangszustand der Erde ein vollkommen geschmolzener Körper gewesen sei. DARWIN (1872, 438): „Sir W. Thompson concludes that the consolidation of the crust can hardly have occurred less than 20 or more than 400 million years ago, but probably not less than 98 or more than 200 million years.“

¹² „All geological facts tell us plainly (...)“ (DARWIN 1872, 419).

Aber haben DARWINs Argumente Substanz? Der LYELL'sche Uniformitarismus (vgl. Punkte a-c) ist theoriegeladen und mit Feldbeobachtungen überhaupt nicht verträglich (z. B. AGER 1993); er ist nicht geeignet, die Erdvergangenheit zu entschlüsseln (→ 2-21). Im Lichte moderner Sedimentologie erweist sich, dass die Mächtigkeit einer Schichtfolge nicht von der verfloßenen Zeit, sondern insbesondere von den jeweiligen energetischen Bedingungen abhängig ist. Es gilt nicht, dass eine mächtigere Schichtfolge mehr Zeit repräsentiert als eine vergleichsweise geringmächtigere Schichtfolge. Insofern ist die bloße Demonstration von „beeindruckenden“ Schichtmächtigkeiten nichtssagend und irreleitend, eine Aufaddieren von Maximalmächtigkeiten sogar „doppelt“ irreleitend (vgl. Punkt d). Das gleiche gilt für die Erosion. Und dort, wo zwischen „Formationen“ Schichtlücken bestehen (vgl. Punkt e) sind anderswo kontinuierliche Übergänge ausgebildet. Für seine eigene Kalkulation (vgl. Punkt f) erntete DARWIN viel Kritik; selbst den Uniformisten war der Wert um einen Faktor 300 zu hoch. Hier trat DARWIN den „geordneten Rückzug“ an; seine „entsetzlich naive“¹³ Schätzung fehlte ab der 3. Auflage seines Werkes.

Unvollständigkeit der geologischen Überlieferung

Der möglicherweise offensichtlichste und schwerwiegendste Einwand gegen seine Theorie, so DARWIN selbst, ist das Fehlen von Zwischengliedern in der geologischen (fossilen)

Überlieferung; sie werden von ihm als „intermediate links“, „transitional links“ oder „transitional forms“ bezeichnet.¹⁴ Ein zusätzliches, für seine Theorie fatales „Faktum“ wäre, analog zur Zeitfrage (s. o.), wenn zahlreiche Arten, die zur selben Gattung oder Familie gehören, geradezu plötzlich in das Leben eintreten würden.¹⁵

Mit der Unvollständigkeit der geologischen Überlieferung bzw. der Lückenhaftigkeit der Fossilüberlieferung erklärt DARWIN folgende Aspekte:

- Das Fehlen zahlreicher Zwischenvarietäten (Zwischenglieder) in jeder einzelnen Formation.¹⁶
- Das plötzliche Auftreten ganzer Gruppen verwandter Arten innerhalb einer Formation.¹⁷
- Das plötzliche Auftreten ganzer Gruppen verwandter Arten in den untersten bekannten fossilführenden Schichten (Kambrium, z. B. Trilobiten). Konsequenterweise postuliert er eine präkambrische Zeitspanne, die möglicherweise länger andauerte als das gesamte Phanerozoikum.¹⁸

Dass es sich hierbei nicht nur um eine Erklärung, sondern ebenfalls um eine fundamentale Annahme handelt, zeigt u. a. folgende Textpassage: „Meinerseits, LYELLs Metapher folgend, betrachte ich die geologische Überlieferung als eine Geschichte der Welt, die unvollständig erhalten und in einem wechselnden Dialekt geschrieben ist; von dieser Geschichte besitzen wir alleine den letzten Band, der sich nur auf zwei oder drei Länder bezieht.“¹⁹

¹³ „(...) appallingly naïve“ (BURCHFIELD 1974, 303).

¹⁴ „Why then is not every geological formation and every stratum full of such intermediate links? Geology assuredly does not reveal any such finely-graduated organic chain; and this, perhaps, is the most obvious and serious objection which can be urged against the theory. The explanation lies, as I believe, in the extreme imperfection of the geological record“ (DARWIN 1872, 406).

¹⁵ „If numerous species, belonging to the same genera or families, have really started into life at once, the fact would be fatal to the theory of evolution through natural selection“ (DARWIN 1872, 432).

¹⁶ „What geological research has not revealed, is the former existence of infinitely numerous gradations, as fine as existing varieties, connecting together nearly all existing and extinct species. But this ought not to be expected (...)“ (DARWIN 1872, 429).

¹⁷ „The abrupt manner in which whole groups of species suddenly appear in certain formations, has been argued by several palaeontologists – for instance, by Agassiz, Pictet, and Sedgwick – as a fatal objection to

the belief in the transmutation of species“ (DARWIN 1872, 432).

¹⁸ „Consequently, if the theory be true, it is indisputable that before the lowest Cambrian stratum was deposited long periods elapsed, as long as, or probably far longer than, the whole interval from the Cambrian age to the present day; and that during these vast periods the world swarmed with living creatures“ (DARWIN 1872, 438).

¹⁹ „For my part, following out Lyell's metaphor, I look at the geological record as a history of the world imperfectly kept, and written in a changing dialect; of this history we possess the last volume alone, relating only to two or three countries. Of this volume, only here and there a short chapter has been preserved; and of each page, only here and there a few lines. Each word of the slowly-changing language, more or less different in the successive chapters, may present the forms of life, which are entombed in our consecutive formations, and which falsely appear to have been abruptly introduced. On this view, the difficulties above

Wie wird die geologische Überlieferung heute beurteilt? Grundsätzlich hat sich das paläontologische Bild im Verlauf der letzten 150 Jahre nicht verändert. In ihrer erstmaligen Überlieferung („erstmaliges Erscheinen“) treten neue Gruppen von Lebewesen relativ abrupt und vielgestaltig auf – nicht in Form einer allmählichen Steigerung der Formenvielfalt. Die präkambrisch-kambri-sche Diskontinuität ist noch viel ausgeprägter als DARWIN (1872, 437-443) sie wahrgenommen und beschrieben hat; eine hochdifferenzierte Organismenwelt aus allen bekannten Tierstämmen, die Hartteile besitzen, ist in kambrischen Sedimentgesteinen urplötzlich und vielfältig vertreten („kambrische Explosion“²⁰).

Zur Lückenhaftigkeit der Fossilüberlieferung, im Kern zu den Lücken zwischen den Bauplänen, stellte der Paläontologe SCHINDEWOLF (1950, 126) nüchtern fest: „(...) die einzelnen Baupläne stehen ohne wirkliche Zwischenformen gesondert neben- bzw. hintereinander.“ Und weiter (S. 129): „Es sollte aber doch zu denken geben, dass trotz unermüdlicher Nachsuche sich darunter [bezieht sich auf neue Fossilfunde, MK] niemals die erhofften Reihen von Bindegliedern, die sprichwörtlichen ‚missing links‘ gefunden haben.“ Danach wären die „Lücken“ in der Fossilüberlieferung real, anders ausgedrückt, die Datenlage (Fossilüberlieferung) weitestgehend vollständig. Im evolutionstheoretischen Kontext interpretierte SCHINDEWOLF diesen „Datenbericht“ als sprunghafte Umbildungen (Typostrophismus), d. h. die von DARWIN angenommenen Zwischenformen wären auch gar nicht zu erwarten gewesen.²¹ Diese „Interpretation“ aber ist reine Fiktion.

SCHINDEWOLFS Einschätzung zur Datenlage teilen nicht alle Paläontologen. Die Fossilüberlieferung wird heute – aus Sicht evolutionstheoretischer Überlegungen und je nach Betrachtungsweise – sowohl als weitestgehend vollständig als auch (weiterhin) extrem lückenhaft aufgefasst (vgl. BENTON 2003, der eine mittlere Position mit Tendenz zu vollständig einnimmt). BENTON et al. (2000) sehen auch keine Anzeichen für einen Rückgang der Qualität der Fossilüberlieferung

mit zunehmenden geologischen Alter.²² RUDWICK (2014, 293) beurteilt die Fossilüberlieferung des Phanerozoikum als „fairly complete and continuous“.

Die Unvollständigkeit der geologischen Überlieferung wird von DARWIN nicht aus dem Feldbefund gefolgert, sondern ist theoriegeleitet; sie ist eine notwendige Annahme, um seine Theorie aufrechterhalten zu können. Die Fossilüberlieferung ist also einerseits extrem unvollständig, andererseits für seine Theorie ausreichend. Aber: Ist die Fossilüberlieferung nur mäßig vollständig, müsste dies zur Ablehnung seiner Theorie führen: „He who rejects this view of the imperfection of the record, will rightly reject the whole theory“ (DARWIN 1872, 478). Diese Zurückweisung erfolgt – rhetorisch geschickt – aber nur auf Einzelfallbasis („He“); denn er weiß, dass die Mehrheit der Geologen und insbesondere LYELL Vertreter einer stark lückenhaften Überlieferung sind. Daher erachtet er seine Theorie als nicht gefährdet.

Aber weder eine ziemlich unvollständige noch eine ziemlich vollständige Fossilüberlieferung führen zwangsläufig zu einer Entwicklungs- oder Abstammungsvorstellung.

Eine Geschichte des Lebens erzählen die Fossilien nicht

Jes RUSTs (2011) Monographie *Fossilien – Meilensteine der Evolution* gibt Einblick in die „moderne paläontologische Evolutionsforschung“²³. Im Grundlagenteil des Buches kann das Zusammenspiel von Daten, Interpretation, Theorie und Weltanschauung gut herausgelesen werden: An den Fossilien (Daten) selbst kann bezüglich der Entstehung der betreffenden Arten *nichts* direkt beobachtet werden. Die Fossilüberlieferung (die Summe aller Daten) erfährt durch die Paläontologie²⁴ „eine theoriegeleitete, biologisch orientierte Analyse“, eine „sorgfältige Interpretation, z. B. im Rahmen von evolutionsbiologischen, stammesgeschichtlichen, ökologischen, genetischen oder geologischen Hypothesen (...)“.

discussed are greatly diminished, or even disappear“ (DARWIN 1872, 443).

²⁰ Die „kambrische Explosion“ ist ein interpretativer Begriff, der evolutionstheoretisch belegt ist: eine rasche, explosionsartige (makro-) evolutive Entwicklung, über deren Zeitpunkt, Zeitdauer und Ursache spekuliert wird.

²¹ GOULD hat mit dem Punktualismus („punctuated equilibria“, unterbrochenes Gleichgewicht) Ideen von

SCHINDEWOLF aufgegriffen, siehe ELDREDGE & GOULD (1972).

²² „Finally, there is no evidence for a decline in the quality of the fossil record back through geological time (BENTON et al. 2000).“

²³ Ein Ausdruck RUSTs (2011, 10).

²⁴ Personifiziert: einem Großteil der Paläontologen.

Eine Geschichte des Lebens indes erzählen die Fossilien nicht. Dies lässt sich von RUSTs (2011, 10) Aussagen klar ableiten: „Ohne evolutionäres Denken und eine zugrunde liegende Theorie der Evolution bleiben die Fossilien lediglich interessante und für die Altersbestimmung nützliche Überreste von Organismen vergangener Zeiten. Eine ‚Geschichte des Lebens‘ erzählen sie ohne die Einsicht, dass der beobachtbare Wandel auf Evolution beruht, indes nicht.“

Manche mögen „evolutionär denken“ und diese Einsicht gewonnen haben; beides, das „evolutionäre Denken“ als auch die Einsicht, leiten sich aber nicht zwangsweise und schlüssig aus den Daten ab, sondern sind willentliche persönliche Entscheidungen.

Fazit

DARWINS Argumentationsagglomerat, „As this whole volume is one long argument (...)“, ist unterlagert von einem gewaltigen, vielschichtigen Theoriengebäude. Eine Schicht sind die dem Leser jeweils zu Beginn dargelegten Sollbruchstellen seiner Theorie, eine geschickte Rhetorik. An ihnen können u. a. die wesentlichen Annahmen DARWINS abgeleitet werden.

DARWIN hat die quasi-dimensionslose geologische Zeit mit Inhalt aufgeladen: Einer [theoretischen] Entwicklung der Organismenwelt über unvorstellbar lange Zeitperioden von einem gemeinsamen Ursprung zu einer reichen Vielfalt; sie zeigt sich in der fossilen Überlieferung und der heutigen Lebewelt. Seine Argumente für eine lange Zeitskala wiederum basieren auf weiteren hypothetischen, nicht verifizierbaren Annahmen.

Es scheint, als sei DARWINS unermesslicher Zeitbedarf durch die Größenordnung radiometrischer Altersbestimmungswerte posthum „befriedigt“ und sein Zeitdilemma²⁵ gelöst worden. Aber nur scheinbar. Denn auch die radiometrische Methode gründet auf fundamentale Annahmen: Schließlich ist nicht bekannt, in welcher Beziehung radiometrische Alter zum realen Alter stehen (→ 4-01, 4-10).

Der große Zugewinn an Fossilien der letzten 150 Jahre hat keine klar identifizierbaren

makroevolutiven Zwischenglieder zu Tage gebracht, auch wenn immer wieder solche Zuweisungen versucht werden. Aus heutiger Sicht hat sich interessanterweise DARWINS (zukünftige) Einschätzung hierzu bestätigt²⁶; aber aus einer als *unvollständig* interpretierten *Fossilüberlieferung* leitet sich nicht zwangsläufig eine (Makro-) Evolution ab.

Es gilt festzuhalten: Unermessliche Zeit und unvollständige Fossilüberlieferung bleiben fundamentale Annahmen der Abstammungs- und Entwicklungstheorie DARWINS.

Literatur

- AGER DV (1993) The nature of the stratigraphical record. Chichester.
- BENTON MJ (2003) The quality of the fossil record. In: DONOGHUE PCJ & SMITH MP (eds.) Telling the Evolutionary Time: molecular clocks and the fossil record. Abingdon, 66-90.
- BENTON MJ, WILLS MA & HITCHIN R (2000) Quality of the fossil record through time. *Nature* 403, 534-537.
- BURCHFIELD JD (1974) Darwin and the Dilemma of Geological Time. *Isis* 65, 300-321.
- DARWIN C (1859) On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life. London. [http://darwin-online.org.uk/converted/pdf/1859_Origin_F373.pdf]
- DARWIN C (1859) On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life. 2nd ed., London. [http://darwin-online.org.uk/converted/pdf/1860_Origin_F376.pdf]
- DARWIN C (1860) Über die Entstehung der Arten im Thier- und Pflanzen-Reich durch natürliche Züchtung, oder Erhaltung der vervollkommenen Rassen im Kampfe um's Daseyn. (Nach der zweiten [englischen] Auflage mit einer geschichtlichen Vorrede und anderen Zusätzen des Verfassers für diese deutsche Ausgabe aus dem Englischen übersetzt und mit Anmerkungen versehen von Dr. H. G. Bronn). Stuttgart. [<http://caliban.mpiz-koeln.mpg.de/darwin/arten2/index.html>]

²⁵ „It was to be more than twenty years after Darwin's death before radioactivity would provide the answer that he hoped for and thus resolve the dilemma. But, in the mean-time, the majority of biologists followed his lead, confident that however long it had taken, natural selection had played a critical role in the

successive appearance of new species“ (BURCHFIELD 1974, 321).

²⁶ „If then the geological record be as imperfect as many believe, and it may at least be asserted that the record cannot be proved to be much more perfect, the main objections to the theory of natural selection are greatly diminished or disappear“ (DARWIN 1872, 481).

DARWIN C (1872) *The Origin of Species*. 6th edition, reprint 1993, New York.

ELDRIDGE N & GOULD SJ (1972) Punctuated equilibria: An alternative to phyletic gradualism. In: SCHOPF TJM (ed) *Models in paleobiology*. San Francisco, 305-332.

GOULD SJ (1990) *Die Entdeckung der Tiefenzeit. Zeitpfeil oder Zeitzyklus in der Geschichte unserer Erde*. München Wien.

LETTRA M (2010) *Time Matters: Geology's Legacy to Scientific Thought*. Hoboken, USA.

LYELL C (1830-33) *Principles of Geology. Being an Attempt to Explain the Former Changes of the Earth's Surface by Reference to Cause Now in Operation*. London.

RUDWICK MJS (2014) *Earth's deep history. How it was discovered and why it matters*. Chicago, London.

RUST J (2011) *Fossilien – Meilensteine der Evolution*. Darmstadt.

SCHINDEWOLF OH (1950) *Grundfragen der Paläontologie*. Stuttgart.

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

Zur Ergänzung → 2-01, 2-02, 2-03.

2-32 Lyells Versuch einer Geochronologie

Die Vorzeit wird zu 12 Zyklen zu je 20 Millionen Jahre konstruiert

Ein später Versuch

Erst in der 10. Auflage seiner populären *Principles of Geology* (1867-68), über 30 Jahre nach deren Ersterscheinung (1830-33), unternimmt LYELL (1797-1875)¹ den Versuch, die aufgespannte Unermesslichkeit vergangener Zeit zu quantifizieren. Seine Schätzung für den Abschnitt Kambrium bis Gegenwart (Phanerozoikum) erfolgt quasi beiläufig auf den Seiten 310 und 311 des 2. Bandes.

Die Konstruktion

Die Berechnung bezieht sich auf die britische Tafel (stratigraphische Tabelle) fossilführender Schichten (LYELL 1867-68, 139) mit den dort ausgewiesenen, abstrahierten geologischen Epochen und wird – wie eine Bedienungsanleitung – Schritt für Schritt vollzogen (ergänzend siehe Tab. 1 und Tab. 2):

1. Die Annahme, dass die Eiszeit 1 Million Jahre² angedauert habe. – Diese Annahme beruht auf einer Zuweisung, dass ein rückgerechnetes Exzentrizitätsmaximum³ vor etwa 950.000 Jahren den Beginn der Eiszeit markiert (S. 291-300).

2. LYELLS „Beobachtung“, dass sich die rezenten Muscheln („marine testacea“) der nördlichen Hemisphäre im Vergleich zu den Muscheln zum Zeitpunkt des Beginns der Eiszeit um 95 % gleichen.

3. Die Folgerung aus (1) und (2), dass diese Veränderungsrate von 5 % einer Periode von 1 Million Jahre gleichkommt.

4. Die Annahme, dass 1 Million Jahre der zwanzigste Teil einer kompletten Artenrevolution (organischen Revolution) entspricht. – Der Vorstellung organischer Revolutionen liegt die DARWIN'sche Entwicklungslehre („the theory of development or transmutation of species“) zugrunde, die, so LYELL, eine sehr langsame Veränderungsrate erfordere. Implizit weist LYELL jeder geologischen Epoche eine organische Revolution zu.

5. Die Annahmen, a) dass das Intervall vom Beginn des Eozäns bis zum Ende des Unteren Miozäns zwei organische Revolutionen umfasst und b) dass eine entsprechende Revolution für das Intervall Oberes Miozän bis rezent stattgefunden hat. Daraus folgend, dass, auch wenn die Grenzen nicht ganz passen, für jede der drei Perioden Eozän, Miozän und Pliozän eine Dauer von 20 Millionen Jahre zu fordern ist.

6. Die Zuweisungen, dass Kreide, Jura und Trias im Vergleich zu den tertiären Epochen gleichwertig („epochs of equal importance“), gleich lang andauernd, sind.

7. Die Durchführung zweier Korrekturen, a) die beobachtete Lücke zwischen Kreide und Eozän, im Umfang einer organischen Revolution, und b) das Auffüllen des Perms um eine Lücke zwischen Perm und Trias zu einer Dauer von 20 Millionen Jahren.

¹ Mit seinen regelmäßig, neu aufgelegten Werken *Principles of Geology*, *Elements of Geology* (Studierausgabe für Studenten) und *Geological Evidences of the Antiquity of Man* sowie zahlreichen Vorlesungen und Vorträgen hatte LYELL zu Lebzeiten und hat er maßgeblich bis heute einen prägenden Einfluss darauf, wie in der Geologie die Vergangenheit zu deuten ist. Diese vorherrschende methodische Vorgehensweise, das regulative Prinzip des Uniformitarismus (Uniformität), ist aber fehlerbehaftet und irreleitend (→ 2-21, → 2-36).

² 1 Million Jahre = 1 geologische Periode (LYELLS „Einheit“), im Sinne einer Glazialen Periode. Nach TASCH (1977) schätzte Lyell 1852 für die Dauer des Karbons nahezu 24 geologische Perioden, also möglicherweise 24 Millionen Jahre; hier nun modifiziert zu 20 Millionen Jahre.

³ Maß für die Abweichung einer Ellipse von der Kreisbahn, hier bezogen auf die elliptische Umlaufbahn der Erde um die Sonne. Die Umlaufbahn der Erde unterliegt leichten Schwankungen (Exzentrizität zwischen 0,06 und nahezu Null), die sich rechnerisch (bei Kenntnis aller Einflussgrößen) auf eine nahezu beliebig lange (theoretische) Vergangenheit zurückrechnen lassen. – Im uniformitarischen Entwurf der Zeit wurden (und werden) epochale Klimaschwankungen postuliert, deren Ursache zur Zeit LYELLS und erneut ab den 1970er-Jahren in den zuvor erwähnten Orbitalschwankungen (z. B. Milankovitch-Zyklen) gesucht werden. Dabei liegt als weitere Annahme zugrunde, dass diese Schwankungen die Insolation (Sonneneinstrahlung) und damit das Klima auf der Erde maßgeblich steuerten und/oder beeinflussten (zu Milankovitch-Zyklen siehe KOTULLA 2015).

Nr.	Fossilführende Schichten (Britische Gliederung)	Perioden	Dauer
1	Recent	Post-Tertiär	
2	Post-Pliocene		
3	Newer Pliocene	Pliozän	20 Mio. Jahre
4	Older Pliocene		
5	Upper Miocene	Miozän	20 Mio. Jahre
6	Lower Miocene		
7	Upper Eocene	Eozän	20 Mio. Jahre
8	Middle Eocene		
9	Lower Eocene		
	"Great Gap"	"große Lücke"	20 Mio. Jahre
10	Maestricht Beds	Kreide	20 Mio. Jahre
11	White Chalk		
12	Upper Greensand		
13	Gault		
14	Lower Greensand		
15	Wealden		
16	Purbeck Beds	Jura	20 Mio. Jahre
17	Portland Stone		
18	Kimmeridge Clay		
19	Coral Rag		
20	Oxford Clay		
21	Great or Bath Oolite		
22	Inferior Oolite		
23	Lias		
24	Upper Trias	Trias	20 Mio. Jahre
25	Middle Trias		
26	Lower Trias		
27	Permian	Perm (inkl. Perm/Trias-Lücke)	20 Mio. Jahre
28	Coal-Measures	Karbon	20 Mio. Jahre
29	Carboniferous Limestone		
30	Upper Devonian	Devon	20 Mio. Jahre
31	Middle Devonian		
32	Lower Devonian		
33	Upper Silurian	Silur	20 Mio. Jahre
34	Middle Silurian		
35	Lower Silurian		
36	Upper Cambrian	Kambrium	20 Mio. Jahre
37	Lower Cambrian		
38	Upper Laurentian	Laurentium	ohne präkambrische Schichten
39	Lower Laurentian		
		Summe (12 Perioden)	240 Mio. Jahre

Tab. 1 Generalisierte Tafel fossilführender Schichten und Dauer der Perioden (Epochen). Nach LYELL (1867-68), S. 139 (Tab.) und S. 301-302. Mio. = Millionen.

Annahmen	Verhältniszahl	Dauer
Dauer der Eiszeit (= 1 geologische Periode)		1 Mio. Jahre
Beobachtung: 95% der rezenten Muscheln gleichen den Muscheln zu Beginn der Eiszeit [entspricht 1/20 einer organischen Revolution]	20	
Dauer einer (organischen) Revolution		20 Mio. Jahre
Anzahl der Revolutionen (Kambrium bis Pliozän)	12	240 Mio. Jahre
Dauer Phanerozoikum		240 Mio. Jahre

Tab. 2 Zeitabschätzung durch Bildung von Verhältniszahlen (Annahmen siehe Textteil). Nach LYELL (1867-68), S. 301-302.

Zusammenfassung

„Wenn demgemäß jede der 12 Perioden 20 Millionen Jahre repräsentiert, basierend auf den zuvor erklärten Prinzipien, dann sollten wir ein Total von zweihundertundvierzig Millionen für die gesamte Serien von Jahren haben, die seit dem Beginn der kambrischen Periode vergangen sind.“

Nüchtern präsentiert LYELL (S. 301) sein Ergebnis. Auf ersten Anschein ist es ein simplizistischer Entwurf mit einer leicht zu merkenden Formel (12×20), der mit physikalischen und biologischen Parametern operiert. Die Konzeption allerdings ist eine geschickte Integration einer damals inzwischen weitgehend anerkannten, gerichteten Evolution ($\rightarrow$ 2-22) in seine uniformitaristische Prinzipienwelt ($\rightarrow$ 2-21): stete, langsame Veränderungsrate der Organismen bis eine organische Revolution vollendet ist und eine neue beginnen kann; so sich fortlaufend ereignende Zyklen (eine Sonderform des Uniformitarismus). – Doch keine der Annahmen kann verifiziert werden; sie sind willkürlich und rein spekulativ.

Fazit

Die Zeitkonstruktion von LYELL ist kein Versuch einer Rekonstruktion der Vergangenheit, sondern Ausdruck seines uniformitaristischen Theoriegebäudes. Hierfür scheinen LYELL die 240 Millionen Jahre als Größenordnung zu genügen. Es fällt auf – und kann kein Zufall sein –, dass der aktuelle nominale Wert für die Spanne Kambrium bis heute (Phanerozoikum) von 541 Millionen [radiometrischen] Jahren (GRADSTEIN

et al. 2012) nur um das Zwei- bis Zweieinhalbfache höher liegt ($\rightarrow$ 2-02, $\rightarrow$ 2-03).⁴

Literatur

- GRADSTEIN FM, OGG JG, SCHMITZ MD & OGG GM (2012) The Geologic Time Scale 2012. Volume 1/2, Oxford Amsterdam.
- KOTULLA M (2015) Sedimentfolgen und ihre Interpretation: Zyklusstratigraphie und das Milankovitch-Zyklen-Syndrom. W+W Special Paper G-15-1, Bayersbronn.
https://www.wort-und-wissen.org/wp-content/uploads/g-15-1_zyklusstratigraphie_und_milankovitch-zyklen.pdf
- LYELL C (1830-33) Principles of Geology. Being an Attempt to Explain the Former Changes of the Earth's Surface by Reference to Cause Now in Operation. London.
- LYELL C (1867-68) Principles of Geology. 2 vols., 10th ed., London.
- TASCH P (1977) Lyell's Geochronological Model: Published Year Values for Geological Time. Isis 68, 440-442.

$\rightarrow$ und Blattnummer: Verweis auf andere Beiträge der Online-Loseblattsammlung.

Zur Ergänzung $\rightarrow$ 2-01, 2-20, 2-35, 2-36.

⁴ Hierzu TASCH (1977, 442): „That value [240 Millionen Jahre, MK] is lower than the modern [1977, MK] one determined by radioactive dating ($600 \pm \times 10^6$ years) by a

factor of 2.50.“ Dass die Werte in ihrer Größenordnung so nahe beieinanderliegen, überrascht TASCH anscheinend nicht.

2-35 Pferdeevolution und Messung der Zeit

Das „Paradepferd“ der Entwicklungslehre kann keinen realen Beitrag zum Problem des Alters der Erde leisten

Historische Geologie – eine Wissenschaft ohne Zeitskala¹

„Die Geologie als historische Wissenschaft hat bis jetzt ihr erstes Problem noch nicht gelöst.“ – Mit dieser Feststellung beginnt MATTHEW (1914) seinen Artikel in der Zeitschrift *Science* und schiebt gleich nach: „Es gibt bislang keinen zufriedenstellenden Weg, das Alter der Erde und die Länge der geologischen Perioden abzuschätzen. Die verschiedenen Methoden, die erdacht wurden, es zu berechnen, unterliegen alle solch großen Faktoren der Unsicherheit, [zudem] von fragwürdigen Annahmen abhängig, dass man bestenfalls geltend machen kann, dass sie auf die Größenordnung der Zahlen hindeuten, welche den geologischen Perioden zugewiesen werden sollten. Die relative Länge dieser Perioden zueinander kann normalerweise weiteraus sicherer bestimmt werden. Die Übersetzung in Jahre aber ist eine Sache des weiten Auseinanderlaufens von Überzeugungen und keine reale Prüfung, dass irgendeines der Resultate auch nur annäherungsweise korrekt ist.“²

Was aber ist nun MATTHEWS Beitrag zum Problem des Alters der Erde?³ Er schlägt eine mögliche Messung vor, die, und das war damals neu, von der organischen Evolution abgeleitet werde. Sie sei ebenfalls nur eine Annäherung und relativ und basiere, wie auch die anderen Methoden, auf Annahmen, die nicht geprüft werden können.



Abb. 1 Aus verfestigten vulkanischen Aschen herauspräparierte Wirbeltiere, 1) †*Teleoceras* (Nashorn), 2) †*Cormohipparion*; Ashfall Fossil Beds State Nebraska Park. Dort sind Pferde mit fünf Gattungen belegt: die jeweils dreizehigen *Pseudhipparion*, *Cormohipparion* und *Neohipparion* sowie die einhufigen *Pliohippus* und *Protohippus*. Die Größen variieren stark, im Vergleich von der Größe eines Hundes bis zu der eines Hirsches. – Ein Fundpunkt, der neben anderen auf ein kompliziertes Netzwerk statt einer Evolutionsreihe hinweist. Foto: Ammodramus, Wikimedia Commons (CC0 1.0).

Von der Idee zur Methode

Dem ausgewiesenen Wirbeltierpaläontologen galt sein Augenmerk der Evolution der Säugetiere, die in tertiären Ablagerungen im Westen der USA gut dokumentiert sei. Insgesamt zeige die Klasse „eine konstante Maximalrate progressiver Evolution“⁴, die Evolution einzelner Stämme habe sich durch „die Kumulation winziger Inkremente struktureller Veränderung“⁵

¹ Es handelt sich hier um einen wissenschaftshistorischen Beitrag; eine ältere Version dieses Blatts ist von einigen Lesern nicht in dieser Weise aufgefasst worden.

² In Übersetzung; MATTHEW (1914, 232) fährt mit einer bemerkenswerten Analyse weiter fort. „It is quite true that various estimates have been made by geologists and physicists resulting in figures which are of the same order of magnitude and in reasonable agreement, although derived from independent sources. This might be taken as evidence that the age probably lies within these limits. But in fact it does not prove any such thing, for it rests in every case upon the assumption that the

activities, whose accumulated results are the measure of the length of time that they have been in action, have proceeded in past times at the same pace at the present. This is not only unproved, there are strong reasons for believing it widely different from the fact.”

³ Siehe Titel des Artikels von MATTHEW (1914).

⁴ „(...) I have been impressed with the fact that they seem to have a fairly constant maximum rate of evolution“ (S. 233). Es wird in diesem Zusammenhang auf das Wort Faktum („fact“) hingewiesen.

⁵ „I must rest on the assertion that twenty years study, in field and laboratory, of American fossil mammals, has

ereignet.

Als relatives Maß definiert er die strukturellen Veränderungen, wobei er keine genauen Definitionen und Grenzen angibt. So unterscheidet sich eine Gattung von der nächsten um das 10-Fache verglichen damit, wie sich eine Art zu ihrer Nachbarart unterscheidet. MATTHEW (1914) gründet seine Methode auf eine rein qualitative Abschätzung. Eine quantitative Analyse struktureller Unterschiede, die Tausende von Messungen für jede zu vergleichende Art oder Gattung erfordern würde, sei nicht lohnenswert. Dabei geht er davon aus, dass sich die Ergebnisse zwischen quantitativer und qualitativer Abschätzung maximal um einen Faktor 2 (höher oder niedriger) unterscheiden würden.

Als Beispiel wählt er die Evolution der Pferde (vgl. Text zu Abb. 1). Von der Gegenwart bis zurück zum Beginn des Pleistozäns sieht er keine, während des Pleistozäns nur eine geringe evolutive Veränderung (vielleicht 1/10 der strukturellen Veränderungen, die *Equus* von *Hipparion* (Basis Pleistozän bis Basis Pliozän) unterscheidet). *Hipparion* wiederum unterscheidet sich von *Merychippus* gleichermaßen wie von *Equus* (je 10 Einheiten). So erhält er für den Zeitraum vom Eozän aufwärts etwa 85 Einheiten (in seiner Tabelle auf S. 234 weist er dagegen nur 81 Einheiten aus) und ergänzt das Paläozän um weitere 15 [korrigiert 19, MK] Einheiten zu insgesamt 100 Einheiten für das Känozoikum.

Das Ergebnis

MATTHEW (1914) weist dem Pleistozän eine Grundzahl (1 Einheit) zu, weil für die Dauer des Pleistozäns bereits verschiedene Schätzungen vorliegen, u. a.: WRIGHT, 25.500 Jahre; WALCOTT, 100.000 Jahre; PENCK, 1,5 Millionen Jahre. So ermittelt er die jeweilige Dauer des Känozoikums (damals mit Tertiär gleichbedeutend) und über weitere Verhältniszahlen auch die jeweiligen Spannen für das Mesozoikum und das Paläozoikum (Tab. 1, → 2-32). Durch die zuvor getroffene geschickte Auswahl, Niedrig-/Mittel-/Hoch-Ansatz, zeigt sich MATTHEW nun der Mitte zugeneigt; die Spannen von 10 Millionen Jahre für das Tertiär und 40 Millionen Jahre für das

Mesozoikum erscheinen ihm nicht unangemessen („does not seem unreasonable“).

Ganz geschickt nutzt LOTZE (1922) in *Jahreszahlen der Erdgeschichte* u. a. die Verhältniszahlen von MATTHEW, um die bislang angewendeten summarischen Methoden der Zeitbestimmung mit der von ihm favorisierten, radiometrischen Methode zu harmonisieren. Im Gegensatz zu MATTHEW übernimmt er von PENCK als Dauer der Eiszeit 0,5-1 Million Jahre, die er aufgrund weiterer Annahmen auf einen Mittelwert von 0,5 Millionen Jahre reduziert. Mit diesem Schätzwert und dem Faktor 100 von MATTHEW berechnet LOTZE die Dauer des Tertiärs über diesen Weg zu 50 Millionen Jahre (Tab. 1). Das ist seine gewählte Obergrenze. Über alle drei seiner eingeschlagenen Wege wählt er abschließend für die Dauer des Tertiärs den „Mittelwert“ von 30 Millionen Jahre und erhält über weitere Extrapolationen für die Spanne des Phanerozoikums eine Bandbreite von 200-600 Millionen Jahre, in die sich die 500 Millionen [radiometrischen] Jahre positiv einpassen lassen (→ 2-36). Dass MATTHEW seine Methode selbst für spekulativ hielt, erwähnt LOTZE nicht, auch nicht, dass er signifikant andere Ergebnisse als MATTHEW ausweist (S. 43-45).

SCHUCHERT (1931, 61ff, Tabelle S. 62) nutzt die Aufstellung von MATTHEW für seine Harmonisierung mit der radiometrischen Methode (→ 4-21). Durch Abänderungen und Ergänzungen (siehe Tab. 1) erhält er für das Tertiär 60 Millionen Jahre (Faktor 6 im Vgl. zu MATTHEW) und entwickelt für das Phanerozoikum seine Verhältniszahlen von 1 : 2 : 5 für Känozoikum zu Mesozoikum zu Paläozoikum (MATTHEW im Vgl.: 1 : 4 : 5).

Fazit

Der Versuch von MATTHEW (1914)⁶, das Alter der Erde über die organische Evolution zu schätzen, reiht sich ein in die zahlreichen, nicht verifizierbaren Versuche anderer Autoren. Auch MATTHEW ist nicht frei von der der geologischen Zeit gebührenden Größenordnung, wenn er sagt: „(...) dass sie [die Methoden, MK] auf die Größenordnung der Zahlen hindeuten, welche den geologischen Perioden zugewiesen werden sollten.“ Damit waren die

brought me to the conclusion that the evolution of their phyla took place through the cumulation of minute increments of structural change, at a rate which, whether concentrated upon one feature or distributed over many, presents some approach to a uniform maximum” (S. 233).

⁶ Die morphologischen Umbildungsbeträge wurden von SIMPSON (1947, 18) korrigiert. Nach SCHINDEWOLF (1950, 20) bietet die organische Entwicklung keine tragfähige Grundlage zur Herleitung absoluter Zeitwerte; dies folgert er aus Überschlagsrechnungen unter Zugrundelegung radiometrischer Alterswerte.

Jahrmillionen gemeint.

						Schuchert	Lotze
Equidae (direkte Phylum)	Relativer Betrag struktureller Dif- ferenzen zur vorhergehenden Stufe (Verhält- niszahl)	Geologische Epoche	Basis: Länge Pleistozän 25,5 ka (Wright)	Basis: Länge Pleistozän 100 ka (Walcott)	Basis: Länge Pleistozän 1500 ka (Penck)	Schätzungen in ka (der Epo- chen)	Länge Pleistozän 500 ka
			[ka]	[ka]	[ka]		
<i>Equus caballus, etc.</i>	↓ 1	Rezent -	25,5	100	1.500		500
<i>Equus scotti, etc.</i>	↓ 10	Pleistozän	255	1.000	15.000	2.000	
<i>Hipparion</i>	↓ 10	Pliozän --	255	1.000	15.000	15.000	
<i>Merychippus</i>	15	Miozän	383	1.500	22.500	20.000	
<i>Parahippus</i>	5	Miozän -	128	500	7.500		
<i>Miohippus</i>	5	Oligozän	128	500	7.500	10.000	
<i>Meshippus</i>	15	Oligozän -	383	1.500	22.500		
<i>Epihippus</i>	10	Eozän	255	1.000	15.000	13.000	
<i>Orohippus</i>	↓ 10	Eozän	255	1.000	15.000		
<i>Eohippus</i>		Eozän -					
	<u>max. 19</u>	Paläozän	<u>484,5</u>	<u>1.900</u>	<u>28.500</u>		
Einheiten	100						x 100
Känozoikum	= Tertiär	Summe [ka]	2.500	10.000	150.000	60.000	50.000
			[Ma]	[Ma]	[Ma]	[Ma]	[Ma]
Känozoikum	= Tertiär		2,5	10	150	60	50
Mesozoikum	= 4 Tertiär- Perioden		10	40	600	120	
Paläozoikum	= Mesozoikum + 1 Tertiär-Peri- ode		12,5	50	750	300	
Phanerozoikum		Summe	25	100	1.500	480	

Tab. 1 MATTHEWS (1914) Versuch einer Altersbestimmung der geologischen Perioden (Epochen, Ären) auf Basis einer angenommenen organischen Evolution am Beispiel der Evolution der Pferde (S. 234, Tabelle). Im unteren Teil eine Abschätzung über Verhältniszahlen für das gesamte Phanerozoikum. MATTHEW schienen 10 Millionen Jahre für das Känozoikum und 40 Millionen Jahre für das Mesozoikum (jeweils fett) „nicht als unangemessen“. Zu den Verhältniszahlen (100 Einheiten etc.) siehe Textteil; ka = 1.000 Jahre, Ma = 1 Million Jahre. Blaue Pfeile: Richtung der Unterscheidungsmerkmale; Rote Klammern: Lesart und Berechnungsweg. SCHUCHERT (1931) und LOTZE (1922) wiederum nutzen MATTHEWS „Methode“ für eigene Kalkulationen. Zum heutigen Kenntnisstand über die Equiden, insbesondere dem gleichzeitigen Mit- und Nebeneinander anstelle des in der Tabelle ausgewiesenen, einstmals erdachten Übereinander, siehe Abb. 1 und z. B. JUNKER & SCHERER (2013).

Literatur

LOTZE R (1922) Jahreszahlen der Erdgeschichte. Stuttgart.

MATTHEW WD (1914) Time ratios in the evolution of mammalian phyla. A Contribution to the problem of the age of the earth. Science 40, 232-235.

JUNKER R & SCHERER S (Hg.) (2013) Evolution – ein kritisches Lehrbuch. Gießen.

SCHINDEWOLF OH (1950) Der Zeitfaktor in der Geologie und Paläontologie. Stuttgart.

SCHUCHERT C (1931) Geochronology, or the Age of the Earth on the Basis of Sediments and Life. In: Physics of the Earth IV. The Age of the

Earth. Bulletin of the National Research Council 80, 10-64.

SIMPSON GG (1947) Tempo and mode in Evolution. New York.

Anmerkung: Zu allen drei Autoren – A. PENCK, C. D. WALCOTT und C. F. WRIGHT – finden sich bei MATTHEW (1914) keine Referenzen (keine Publikationsdaten).

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

Zur Ergänzung → 2-01, 2-02, 2-03.

2-36 Die Konstruktion von Jahrmlionen

Versuch einer indirekten Verifizierung radiometrischer Altersbestimmung

Der Geologe und seine Aufgabe

„(...) der Geologe [als Erdgeschichtler, MK]: In unendlich ferne Vergangenheit muss er zurückgreifen, um die Geschichte unserer Erde zu schreiben. Seine Urkunden sind die Gesteine; aus ihrer Beschaffenheit liest er die Umstände ihrer Entstehung heraus, und mit den Lebewesen, deren Reste er in ihnen vorfindet, bevölkert er in seiner Phantasie Länder und Meere längst vergangener Zeiten. Die Schichten der Erdrinde fasst er zu großen Formationen zusammen. Ihre Aufeinanderlagerung von unten nach oben gibt ihm zugleich die zeitliche Reihenfolge ihrer Entstehung und damit der Geschichte der Erdoberfläche. Nach der Entwicklung des Lebens, die er in den einzelnen Formationen beobachtet, kommt er zur Aufstellung großer Perioden, die als Urzeit, Frühzeit, Altzeit, Mittelzeit und Neuzeit der Erdgeschichte betrachtet werden können. So entstand schließlich die geologische Formationstafel (...), die zugleich eine Geschichtstafel ist.“¹

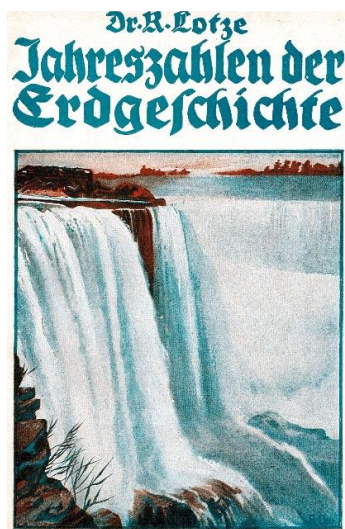


Abb. 1 Umschlagbild.

LOTZES allgemeinverständlicher Aufsatz *Jahreszahlen der Erdgeschichte* erschien 1922 als

Buchbeilage zu den *Kosmos*-Naturfreudeheften und war an ein breites Publikum gerichtet (Abb. 1). Er ist ein für den deutschen Sprachraum – aus wissenschaftshistorischer als auch wissenschaftstheoretischer Perspektive – wichtiger Beitrag zum Verständnis geologischer Zeitvorstellung und geologischer Zeitbestimmung.

Mit großem Engagement wird LOTZE seiner selbstdefinierten Aufgabe gerecht. Mit Argumentationsgeschick führt er den Leser in eine Jahrmlionen-Welt, die sich in Zukunft durch die Methode der radiometrischen Altersbestimmung am sichersten quantifizieren lasse. Im Kontext dieses Beitrages werden ausgewählte Passagen vorgestellt und diskutiert.

Das Zeitmaß, mit dem der Geologe rechnet – Abtragung durch den Neckar

LOTZES erstes zahlenmäßiges Beispiel (S. 12-15) bezieht sich auf die geologische Arbeit des Neckars unterhalb Heilbronn. Eine quantitative Studie durch SCHÜRMANN ermittelte den Betrag von 1,584 Millionen Tonnen fester Stoffe, die der Fluss während eines Jahres aufnimmt und wegführt. Die Stoffmenge von etwa 600.000 m³ (bei einem spezifischen Gewicht von 2,5) entspricht auf der Basis eines Einzugsgebietes von 12.340 km² einer Abtragsleistung von etwa 0,05 mm pro Jahr. Bei gleichförmiger Rate, „wenn also der Neckar sein ganzes Flussgebiet gleichmäßig erniedrigen würde (...)“, würde der Fluss in 20 Jahren eine Schicht von 1 mm Dicke, in 20.000 Jahren eine von 1 m und in 2 Millionen Jahren eine von 100 m abtragen. Demzufolge habe die Abtragung des schwäbischen Stufenlandes von 200-300 m seit der Bildung der vulkanischen Röhren² (Obermiozän) etwa 4-6 Millionen Jahre gedauert. LOTZE stellt fest (S. 14): „Damit sind wir zum ersten Mal auf das Zeitmaß gekommen, mit dem der Geologe rechnet, und an das sich auch der Leser gewöhnen muss, die Jahrmlionen.“

¹ LOTZE (1922, 6).

² Mit der obermiozänen „Vulkankatastrophe“, auf welche sich LOTZE bezieht, ist das Gebiet der mittleren

schwäbischen Alb um Kirchheim und Urach gemeint; heute sind über 350 Ausbruchsstellen (Diatreme) des Schwäbischen Vulkans bekannt.

Weiter ermittelt LOTZE die jährlichen Abtragungs- und Aufschüttungsraten der ganzen Erde und wendet sie auf die Gesamtmenge der im Verlauf der Erdgeschichte gebildeten Sedimente an. Auf diesem Wege wären 245 Millionen Jahre notwendig gewesen, um die Gesamtmenge der Sedimente zu bilden, oder 320 Millionen Jahre für die Gesamtmenge irdischer Kalkschichten. Als Zwischenstand resümiert er: „Haben wir gleich zu Anfang nachgewiesen, dass geologisch recht junge Ereignisse bereits einige Millionen Jahre zurückliegen müssen, so zeigen uns die Berechnungen über Abtragung und Aufschüttung, dass es sich für die Zeit, in der die Gesamtheit der Schichtgesteine gebildet wurde, jedenfalls schon um mehr als hundert Jahrmlionen handelt“ (S. 19).

Geologische Zeitabschätzungen durch Bildung von Verhältniszahlen und Extrapolation – Hinführung zur radiometrischen Methode (absoluten Altersbestimmung)

Als weitere Schätzmethode zur Beantwortung der Dauer geologischer Zeiträume trägt LOTZE eine mehrstufige Kombination aus Verhältniszahlen und Extrapolationen vor. Sie reicht „von der Eiszeit bis zum Beginn des Kambriums.“

Dauer der Eiszeit. In der Abschätzung der Dauer der Eiszeit folgt LOTZE hauptsächlich PENCK. Ausgehend von dem Maß der geleisteten Aufschüttungsarbeit der Flüsse und der Verwitterung in der Spät- und Nacheiszeit (seit dem Böhlevorstoß; entspricht der Grundeinheit) bildet PENCK Verhältniszahlen: Erstens, für die Zwischeneiszeiten insgesamt das 18-Fache der Dauer der Nacheiszeit (Riss-Würm, Dreifaches; Mindel-Riss, Zwölffaches; Günz-Mindel, Dreifaches). Zweitens, für die Eiszeiten das Sechs- bis Achtfache der Dauer der Nacheiszeit. Die verstrichene Zeit nach dem Böhlevorstoß (geschätzte 20.000 Jahre; mal 25 Einheiten) ergibt demnach 500.000 Jahre für die Dauer der Eiszeit (Tab. 1).

Dauer des Tertiärs. LOTZE stellt drei Autoren gegenüber. Jeweils im Vergleich zur Dauer der Eiszeit werden Verhältniszahlen für die tertiären Formationen vom Pliozän bis Paläozän ausgewiesen, auf Basis geologischer Arbeit und der Entwicklung der Lebewesen (PENCK, Faktor 27-

36), auf Basis der Aussterberate von Muschelarten (LYELL, Faktor 60) und auf Basis der Evolutionsrate der Pferde (MATTHEW, Faktor 100; → 2-35).

Für die Dauer der Eiszeit setzt LOTZE für alle drei Autoren den Basiswert von 0,5 Millionen Jahren an (s. o.) und erhält für das Tertiär so die engere Mittelwert-Schwankungsbreite von 15 bis 50 Millionen Jahre (Tab. 2). Als Zwischenergebnis hält LOTZE (S. 45) fest: „Immerhin können wir mit ziemlich großer Wahrscheinlichkeit sagen, dass die Zeitdauer des Tertiärs jedenfalls schon nach Zehnern von Jahrmlionen zu bemessen ist. Mit 20-40 Millionen Jahren werden wir von der Wahrheit nicht allzu weit entfernt sein.“

Dauer des Phanerozoikums. Die Dauer der restlichen Formationen des Phanerozoikums entwickelt LOTZE hauptsächlich aus der Dauer des Tertiärs, für das er einen Mittelwert von 30 Millionen Jahre zu Grunde legt, sowie drei unterschiedlichen Verhältnisreihen (Tab. 3).³ Nach DANA dauerten Kreide, Jura und Trias ebenso lang wie das Tertiär, desgleichen Perm und Karbon, das Devon dagegen war zweimal so lang und Silur und Kambrium jeweils viermal so lang wie das Tertiär. Mit diesen insgesamt 16 Tertiäreinheiten ermittelt LOTZE für das Phanerozoikum rechnerisch eine Dauer von 480 Millionen Jahre. WALCOTT wählte Verhältniszahlen von 1 : 2,5 : 6 für Tertiär zu Mesozoikum zu Paläozoikum. Die sich daraus ergebenden 9,5 Einheiten führen zu LOTZES unterem Wert von 285 Millionen Jahren. Schließlich führt Lotze HÄCKELS Methode auf. HÄCKEL definierte die Zeit seit dem Beginn des Lebens mit 100 Einheiten, wovon 52 auf das Präkambrium entfielen. Die restlichen 48 Einheiten verhielten sich wie 3 : 11 : 34 für Tertiär zu Mesozoikum zu Paläozoikum, wobei der Eiszeit als Grundeinheit 0,1 Einheiten zugewiesen wurden. Die 480 Eiszeit-Einheiten entsprechen somit 480 Millionen Jahren. Nach Abwägung aller Unsicherheiten, so LOTZE, werde die Wahrheit zum Schluss doch ungefähr in der Mitte liegen (S. 46): „So können wir mit ziemlicher Sicherheit für das Alter des Kambriums einige Hunderte von Jahrmlionen ansetzen. Wir kennen noch nicht die genaue Größe selber, aber doch die Größenordnung der seit dem Kambrium verflossenen Zeit.“

³ LOTZE (S. 45) erwähnt LYELLS Zahlen (→ 2-32), zieht diese aber für seine Betrachtung nicht weiter in Erwägung: „Schon Lyell, der Begründer der modernen Geologie, hat diesen weiteren Schritt gewagt. Er erhielt für

das Unterkarbon ein Alter von 160 Millionen Jahren, für das Unterkambrium ein solches von 240 Millionen Jahren.“

Schätzung der Dauer der Eiszeit		Penck			Lotze
Annahmen	Verhältniszahl	Dauer [Tsd. a]			Dauer [Tsd. a]
Eisrückzug Schonen bis Eisscheide, nach Lotze einzige sichere Grundlage für die Berechnung (Anschluss zur Gegenwart und in die geologische Vergangenheit)					5
Basiswert: Zeit nach dem Bühlvorstoß (Nacheiszeit), Schätzung	1	20			
Basis: geologische Arbeit (Dauer aller Zwischeneiszeiten x 18), Dauer der Eiszeiten (x 6-8)	25	500			
Dauer Eiszeit		500			

Tab. 1 Schätzungen für die Dauer der Eiszeit auf Basis von Verhältniszahlen und Extrapolationen. Nach LOTZE (1922), Erklärungen siehe Textteil; Tsd. a = Tausend Jahre.

Schätzungen der Dauer des Tertiärs		Penck	Lyell	Matthew	Lotze
Annahmen	Verhältniszahl	Dauer [Mio. a]	Dauer [Mio. a]	Dauer [Mio. a]	Dauer [Mio. a]
Basiswert: Dauer der Eiszeit (nach Penck)	1	0,5			
Basis: geologische Arbeit/Entwicklung der Lebewesen	27-36	13,5-18			
Basiswert: Zeit bis zum Beginn der Eiszeit	1		0,5		
Basis: 'Aussterberate' Muschelarten Eozän bis rezent	60		30		
Basiswert: E. scotti --> E. caballus = 1 Einheit/Beginn Eiszeit	1			0,5	
Basis: Entwicklungsreihe der Pferde	100			50	
Dauer Tertiär, Mittelwert		15	30	50	30
Dauer Tertiär, Grenzwerte (Basis Eiszeit 0,2 - 1 Mio. a)		5,4-36	12-60	20-100	5,4-100

Tab. 2 Schätzungen für die Dauer des Tertiärs auf Basis von Verhältniszahlen und Extrapolationen. Nach LOTZE (1922), Erklärungen siehe Textteil, Fortsetzung zu Tab. 1; Mio. a = Millionen Jahre.

Schätzungen der Dauer des Phanerozoikums		Dana	Walcott	Häckel	Lotze
Annahmen	Verhältniszahl	Dauer [Mio. a]	Dauer [Mio. a]	Dauer [Mio. a]	Dauer [Mio. a]
Basiswert: Dauer des Tertiärs	1	30			
Basis: Mesozoikum (x3), Paläozoikum (x12)	16	480			
Basiswert: Dauer des Tertiärs	1		30		
Basis: Mesozoikum (x2,5), Paläozoikum (x6)	9,5		285		
Basis 1: Zeit seit dem Beginn des Lebens	100				
Basis 2: Zeit bis zum Beginn des Kambriums	48				
Basiswert: Eiszeit (Dauer 1 Mio. a)	0,1			480	
Dauer Phanerozoikum, Mittelwert		480	285	480	285-480
Wahrscheinlicher Wert nach Lotze					200-600
Dauer des Phanerozoikums, Grenzwerte (Basis Eiszeit 0,2 - 1 Mio. a)					40-1600

Tab. 3 Schätzungen für die Dauer des Phanerozoikums (Kambrium bis heute) auf Basis von Verhältniszahlen und Extrapolationen. Nach LOTZE (1922), Erklärungen siehe Textteil, Fortsetzung zu Tab. 2; Mio. a = Millionen Jahre.

Radiometrische Methode (absolute Altersbestimmung) – Die Größenordnung passt

„Ja, wenn uns die Möglichkeit gegeben wäre, weit draußen in der grauen Ferne geologischer Vergangenheit auch nur einen Punkt fest zu bestimmen und mit absoluter Sicherheit sein Alter anzugeben, dann wären wir über alle Schwierigkeiten der Schätzung und der Extrapolation mit einem Schlage hinaus. Mit der Bestimmung jenes Punktes wäre uns ein fester Rahmen gegeben, in den wir die gesamte geologische Geschichte einspannen könnten. Und diese Möglichkeit besteht!“⁴

LOTZE erklärt zunächst das Phänomen der Radioaktivität⁵ und schildert die Grundlagen der Altersbestimmung radioaktiver Mineralien.⁶ Sodann legt er die methodischen Prüfkriterien fest (S. 64): „Die neue Methode [auf Grund radioaktiver Vorgänge, MK] muss zeigen, dass sie auch vor einer strengen Kritik bestehen kann. Ihre unmittelbare Nachprüfung, die sich auf Millionen von Jahren erstrecken müsste, ist nun allerdings nicht möglich, und so muss sie in erster Linie durch die innere Folgerichtigkeit und Widerspruchslosigkeit ihrer Ergebnisse für sich sprechen.“ Für Letzteres nennt er drei Bedingungen (S. 64):

- „Wir müssen zuerst von den zu erhaltenden Alterszahlen verlangen, dass sie sich dem Altersrahmen, den wir aus den früher besprochenen geologischen Methoden gewonnen haben, ohne Zwang einfügen.“
- „Weiter muss von den radioaktiven Methoden der Altersbestimmung verlangt werden, dass ihre Ergebnisse mit dem sicher festgelegten, relativen Alter der Gesteine übereinstimmen.“

- „Schließlich muss sich bei Altersbestimmungen von verschiedenen Mineralien aus ein und demselben Gestein, also etwa aus einem einheitlichen Granitblock, für alle dasselbe Alter ergeben (...)“.

Zur Überprüfung werden insgesamt 20 von HOLMES (1913) und LAWSON (1917) veröffentlichte Altersbestimmungsergebnisse präsentiert: 10 Ergebnisse der Bleimethode⁷ mit Werten zwischen 260 und 1.500 Millionen [radiometrischen]⁸ Jahren, darunter Einzelwerte des Karbon (320 Millionen [radiometrische] Jahre), des Mitteldevon (340 Millionen [radiometrische] Jahre) und Untersilur (400 Millionen [radiometrische] Jahre) sowie 10 Ergebnisse der Heliummethode⁹ mit Werten zwischen 0,1 und 600 Millionen [radiometrischen] Jahren. Bei fünf Mineralen sind sowohl Helium- als auch Blei-Messungen vorgenommen worden; die Helium-Alter sind um den Faktor 2,1-7,3 niedriger („im Allgemeinen nur ungefähr der dritte Teil“). Dies erklärt LOTZE mit einer Entweichung des Heliumgases. Insgesamt zeigen beide Aufstellungen eine Zunahme des Gehaltes der Endprodukte (Blei, Helium), die mit einer Zunahme des relativen geologischen Alters der Muttergesteine korrespondiert. Und 9 Analysen an einem Granitgestein aus Norwegen zeigen nur geringe Schwankungen des Bleigehaltes zwischen 12 und 14 %. LOTZE (S. 67) fasst sodann zusammen: „So erfüllt tatsächlich die neue Methode alle Anforderungen, die an ihre Ergebnisse gestellt werden müssen.“ Im Grunde genommen wiederholt LOTZE nur bereits in diesem Sinne (bezogen auf die methodischen Prüfkriterien) veröffentlichte Ergebnisse; seine Darstellung und Aufarbeitung der Materie wirkt allerdings so überzeugend, als hätte er eine eigene unabhängige Überprüfung vorgenommen.

Schließlich folgert LOTZE, dass durch die physikalisch-chemische Messung die sichere

⁴ LOTZE (1922, 47).

⁵ Zur Konstanz der Zerfallsgeschwindigkeit (S. 54): „Der Zerfall geht mit einer solchen inneren Notwendigkeit vor sich, dass seine Geschwindigkeit durch keinerlei äußere Einwirkungen auch nur im geringsten verändert werden kann. Man hat strahlende Substanzen einem Druck von 24400 Atmosphären ausgesetzt, den Einfluss von Temperaturen von -240° bis zu 2500° untersucht, die stärksten elektrischen und magnetischen Felder auf sie wirken lassen, ohne dass sich die Zerfallsgeschwindigkeit auch nur im mindesten verringert oder vermehrt hätte.“

⁶ Zur Bildung der Uranmineralien (S. 62): „Die bekannten Uranmineralien kommen in der Hauptsache in ehemals feuerflüssigen Gesteinen vor. Als ein solches Gestein

einst als glutflüssiger Brei aus dem Erdinneren hervorbrach, enthielt es noch keine einzelnen Mineralien; alle Stoffe waren vielmehr gleichmäßig verteilt in dem Gesteinsbrei enthalten. Als das Gestein dann allmählich erkaltete, da fingen die verschiedenen Stoffe an, sich zusammenzufinden und auszukristallisieren. (...) Es kann als so gut wie sicher angenommen werden, dass das Uran bei der Ausscheidung aus dem feuerflüssigen Gesteinsbrei in chemisch reiner Form, also ohne Zerfallsprodukte, in den Aufbau des Minerals eingetreten ist.“

⁷ Sog. „Uran-Blei-Datierung“ auf Basis der Uran-Zerfallsreihe(n).

⁸ [radiometrisch] ist eine Einfügung durch den Verfasser.

⁹ Gleiche Zerfallsreihe wie Fußnote 7.

zeitliche Festlegung mehrerer Punkte in früher geologischer Zeit erreicht sei (siehe Eingangszeit) und nunmehr vom Extrapolieren (s. o.) zum Interpolieren übergegangen werden könne. Als zuverlässige Ankerpunkte nennt er Alter für das Karbon (320 Millionen [radiometrische] Jahre), das Untersilur (400 Millionen [radiometrische] Jahre) sowie das Mittel-Präkambrium (1000 bis 1300 Millionen [radiometrische] Jahre); in diesem Rahmen gelte es, die übrigen Ereignisse der Erdgeschichte schätzungsweise einzufügen. Das ergibt für einen der wichtigsten Punkte, dem Beginn des Kambriums, als wahrscheinliche Zahl 500 Millionen [radiometrische] Jahre.¹⁰

Diskussion

LOTZES geologische Methoden zur Berechnung der Dauer der geologischen Perioden liegt das uniformitaristische Prinzip zu Grunde, das als einzige Erfahrungsquelle nur die durch menschliche Beobachtung gegenwärtigen, geologisch langsam wirkenden und niedrig-energetischen Prozesse zulässt (vgl. BAKER 2002, S. 2379). Diese substanzielle Annahme, die wirksame kataklysmische¹¹ Ereignisse ablehnt, ist aber der Logik der Naturwissenschaft zuwider (BAKER 2009, S. 6-4).

Dies zeigt sich bereits am Beispiel der Abtragungsleistung des Neckars. Ein aktueller Jahreswert wird – dem regulativen Prinzip folgend – in die Vergangenheit extrapoliert.¹² So wird „das Zeitmaß, mit dem der Geologe rechnet“, Jahrmillionen, offenkundig, vielmehr noch, es ist damit nachgewiesen worden, „(...) dass geologisch recht junge Ereignisse bereits einige Millionen Jahre zurückliegen müssen (...)“.

LOTZE hat zwar richtig gerechnet, hierfür teilt er zum Zwecke der Nachvollziehbarkeit alle notwendigen Zahlen und Rechenschritte mit, worauf er aber seine Annahme begründet („Wenn also der Neckar sein ganzes Flussgebiet gleichmäßig erniedrigen würde (...)“), schreibt er nicht. Sie ist wie eine Tatsache selbstverständlich in den Text eingebunden. Fünf Seiten weiter wird das Ergebnis der Rechnung erneut aufgegriffen und

die Größenordnung von Millionen Jahren einfach als „nachgewiesen“ deklariert.

Nach Abschluss der Jahrmillionen-Konstruktionen stellt LOTZE (S. 46) zu Recht selbst fest: „Ein gewisses Unbehagen können wir aber trotz allem bei der nunmehr bis zum Ende durchgeführten Methode der Extrapolation nicht los werden. Die einzige ganz sichere Grundlage für die Berechnung sind eben allein die 5000 Jahre, die das Eis zu seinem Zurückweichen von Schonen¹³ bis zur Eisscheide brauchte. Von dieser Zahl aus mussten wir nach der einen Seite den nicht unmittelbar gegebenen Anschluss an die Gegenwart finden, nach der anderen Seite hin zurück in die geologische Vergangenheit schließen.“ Diese Überleitung zur radiometrischen Methode enthält essentielle, methodische Aussagen, insbesondere über ein willkürliches (unzulässiges) Maß an Extrapolationen. Selbst diese „einzige ganz sichere Grundlage“ von 5.000 „Jahren“, die LOTZE (S. 31) von DE GEERS „Warvenchronologie“ übernimmt, war nicht gegeben, denn DE GEER hatte für die laminierten Sedimente (Bändertone) in Schweden den Nachweis einer Warvierung (jahreszeitlichen Prägung) in Wirklichkeit nie erbracht (→ 3-10).

Die von LOTZE selektierten und teils modifizierten Methoden zur Berechnung der Dauer der geologischen Perioden sind spekulativ und können keiner realen Prüfung unterzogen werden. Sie können deshalb auch nicht auf Größenordnungen hindeuten, die im Bereich von Zehner und Hunderte Millionen Jahre liegen.

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

LOTZE stellt die wahrscheinlichsten Ergebnisse für den Zeitraum bis zum Beginn des Kambriums gegenüber:

- a) Bildungsdauer der Sedimentgesteine (Sedimentationsuhr): mindestens 200 Millionen Jahre.
- b) Geologische Vorgänge der Nacheiszeit; Entwicklung von Verhältniszahlen und

¹⁰ Die radiometrische Methode bestätige die geologischen Schätzmethode (S. 67): „Auf diesen Zeitraum verteilen sich die zehn Formationen des Geologen, deren jede etwa 40-80 Millionen Jahre zu ihrer Bildung beansprucht haben mag. Für das Tertiär wird ein Wert in der Nähe der unteren Grenze anzusetzen sein, ein Ergebnis, das unsere frühere Schätzung aufs Schönste bestätigt.“

¹¹ Hoch-energetisch, katastrophisch.

¹² Denn (S. 21): „Die Erde befindet sich durchaus nicht in einer Periode besonderer Ruhe; wesentlich stärker können in der Vorzeit die geologischen Kräfte nicht gewirkt haben, als sie es auch heute noch tun.“ Aber schwächer, siehe Zusammenfassung.

¹³ Schonen: historische Provinz in Südschweden.

Extrapolation in die Vergangenheit: 200 bis 600 Millionen Jahre.

- c) Radioaktive (radiometrische) Methode (Uranuhr): ca. 500 Millionen [radiometrische] Jahre.

Es ist offensichtlich keine Frage der Größenordnung (→ 4-10), sondern vielmehr eine der Harmonisierung („Wie lassen sich nun all diese Ergebnisse vereinigen?“, S. 72). Nach LOTZE widersprechen sich die Ergebnisse von (a) und (b) nicht, des Weiteren auch nicht die von (c) und (b). Dagegen sieht er „tatsächlich“ einen Widerspruch zwischen (a) und (c). Diesen löst er dahingehend auf, dass er die Sedimentationsuhr heute um das Zwei- bis Dreifache rascher ablaufen lässt als in der Vorzeit.¹⁴

Zu Aussagen des Alters der Erde aufgrund radiometrischer Alterswerte aber rät LOTZE zur Vorsicht, so (S. 71): „Wir tun am besten, mit unseren Versuchen absoluter Altersbestimmungen nicht weiter zurückzugehen als bis zu einem Zeitpunkt, den wir noch mit erprobten Methoden erfassen können.“ Das heißt, dass für den Zeitraum bis zur Basis des Kambriums¹⁵ „erprobte Methoden“ vorliegen – hier können nur (a) und (b) gemeint sein –, die die radiometrischen Alterswerte verifizieren (unabhängig bestätigen). Der offensichtliche Harmonisierungsversuch, dass (a), (b) und (c) nicht im Widerspruch stehen, kulminiert letztendlich in dem indirekten Versuch, einen Nachweis für die Gültigkeit der radiometrischen Methode erbracht zu haben.

LOTZES Jahreszahlen der Erdgeschichte ist ein rhetorisches Meisterwerk, eine wort-, zahlen- und bildgewaltige Komposition. Werden aber den geologischen Methoden (a) und (b) ihre spekulativen Annahmen entzogen, steht die radiometrische Methode (c) ohne Unterstützung da.

Literatur

BAKER VR (2002) The Study of Superfloods. Science 295, 2379-2380.

BAKER VR (2009) The Channeled Scabland – a retrospective. Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences 37, 6.1–6.19.

DE GEER G (1912) Geochronologie der letzten 12000 Jahre. Geologische Rundschau 3, 457-471.

HOLMES A (1913) The Age of the Earth. London.

LAWSON RW (1917) Über absolute Zeitmessung in der Geologie auf Grund der radioaktiven Erscheinungen. Naturwissenschaften, 5. Jahrg.

LOTZE R (1922) Jahreszahlen der Erdgeschichte. Stuttgart.

PENCK A & BRÜCKNER E (1901-09) Die Alpen im Eiszeitalter. 3 Bände, Leipzig.

Anmerkung: Zu den Autoren J. D. DANA, E. HÄCKEL, W. D. MATTHEW, C. LYELL, C. D. WALCOTT, SCHÜRRMANN und C. F. WRIGHT werden von LOTZE keine Referenzen aufgeführt. Es könnte sich u. a. handeln um:

LYELL C (1867-68) Principles of Geology. 2 vols., 10th ed., London.

MATTHEW WD (1914) Time ratios in the evolution of mammalian phyla. Science 40, 232-235.

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

Zur Ergänzung → 2-01, 2-32.

¹⁴ Denn (S. 73): „Die Annahme, dass der Zerfall früher schneller vor sich gegangen sei, kann in keiner Weise begründet oder auch nur wahrscheinlich gemacht werden; sie würde bedeuten, dass Naturgesetze nicht

unveränderlich wären, sondern sich im Verlauf geologischer Zeiträume ändern könnten.“ (→ 4-10)

¹⁵ Nach LOTZE auch für das Präkambrium.

2-41 Holozän und „Anthropozän“

Die Gliederung des Holozän steht strukturell in einem Missverhältnis zur Vorstellung eines geologischen „Langzeit“

Holozän formal dreigegliedert

2018 ist der oberste Abschnitt der internationalen chronostratigraphischen Tabelle (→ 2-02) um drei nicht leicht auszusprechende und nur schwer zu merkende Namen ergänzt worden (Abb. 1):

- Meghalayum
- Northgrippingium
- Grönlandium

Sie bilden die Stufen/Alter des Holozän (WALKER et al. 2018).

„Anthropozän“

Die Arbeitsgruppe „Anthropozän“ der Subkommission für Quartärstratigraphie (SQS) hat bislang keinen formalen Vorschlag eingereicht, ein „Anthropozän“ als eine dem Holozän folgende Serie bzw. Epoche einzuführen.¹ Gegenwärtig

werden u. a. mögliche Referenzereignisse und -punkte (GSSP's) diskutiert (→ 2-02). Mit einem Vorschlag ist jedoch in den nächsten Jahren zu rechnen.

Hinter „Anthropozän“ steht das Konzept, dass „die Menschen geologische Prozesse des sog. Systems Erde so weitreichend verändert haben, dass sie einen planetaren Wechsel zu einer neuen Periode geologischer Zeit verursachen“. Es sei eindeutig ein reales Ereignis innerhalb des Tiefenzeit-Kontextes [der geologischen Zeit bzw. „Langzeit“, MK], und es würde geologische Signaturen produzieren (Anthropocene Working Group 2014).

Zu diesen Signaturen werden u. a. anthropogene Ablagerungen, „Technofossilien“ (z. B. Plastik) und Verbrennungsrückstände gezählt; als untere Grenze der neuen Epoche wird die Mitte des 20. Jahrhunderts als für geeignet erachtet (WATERS et al. 2016).

Äonothem /Äon	Ärathem /Ära	System/ Periode	Serie/ Epoche	Stufe/ Alter	Numerisches Alter (Mra)
PHANEROZOIKUM	KÄNOZOIKUM	QUARTÄR	HOLOZÄN	Meghalayum	0,0042
				Northgrippingium	0,0082
				Grönlandium	0,0117
			PLEISTOZÄN	Ober-	0,126
				Mittel-	0,781
				Calabrium	1,80
				Gelasium	2,58

Abb. 1 Internationale chronostratigraphische Tabelle des Quartär; rechts mit Zuweisung geschätzter numerischer Alter des GTS2012-Altersmodells (GRADSTEIN et al. 2012) bzw. Meldungen der ICS-Subkommissionen in Millionen radiometrischen Jahren (Mra). Nach Version v2018/08 der Internationalen Stratigraphischen Kommission (ICS). Grafik: F. MEYER.

¹ Status siehe: <http://quaternary.stratigraphy.org/working-groups/anthropocene/>

Holozäne Serie und Stufen im Vergleich „extrem“ kurz

Die internationale chronostratigraphische Tabelle ist eine Universaltafel mit konstruierten, lückenlos aufeinander folgenden, in hohem Maße abstrahierten Einheiten aus „Gestein und Zeit“.² Chronostratigraphische Einheiten (z. B. Serie und Stufe) haben ihre Äquivalente in geochronologischen Einheiten (Epoche und Alter) mit jeweils identischen Namen (z. B. Holozän und Grönlandium, Abb. 1).

Die Einheiten können als eine Folge von relativen „Zeitscheiben“ unbekannter Dauer betrachtet werden. Der Tabelle wird schließlich ein Altersmodell zugewiesen.

Auf Grundlage des aktuellen radiometrischen Altersmodells (GTS2012³, GRADSTEIN et al. 2012) und den Ergänzungen nach 2012 können aus den zugewiesenen Altern die radiometrische Dauer der Einheiten ermittelt und zueinander in Beziehung gesetzt werden. Demnach dauert eine phanerozoische Stufe (geochronologisch: Alter) im Mittel etwa 5,6 Millionen radiometrische Jahre (Basis dieser Angabe sind die Stufen von der Gelasium-Stufe des Pleistozän bis zur Fortunium-Stufe des Kambrium; insgesamt 96 Stufen). Dabei reichen die Werte für die Dauer der einzelnen Stufen von etwa 1 Million radiometrischen Jahren (z. B. Piacenzium-Stufe des Pliozän oder Hirnantium-Stufe des Ordovizium) bis zu etwa 14 Millionen radiometrischen Jahren (z. B. Emisium-Stufe des Devon).

Die holozänen Stufen (Alter), Grönlandium und Northgripium, dagegen dauern etwa 0,0035 bzw. 0,0040 Millionen radiometrische Jahre. Das ist um einen Faktor 1400-1600 kürzer als das errechnete Mittel der anderen Stufen. Eine strukturelle, Langzeit-orientierte Kontinuität der Chronostratigraphie bis zu den oberen Stufen des Quartärs ist demnach nicht mehr gewahrt.

Gegenwärtig wird diskutiert, ob ein „Anthropozän“ formal eingeführt wird (s. o.). Ungeachtet dessen, ob für diese potentielle neue Serie bzw. Epoche ein Beginn um 1850 oder um 1950 definiert werden könnte, würde die Einführung definitionsgemäß das Holozän beenden. Ein Vergleich der möglichen Dauer des Holozäns mit der mittleren Dauer der anderen phanerozoischen Serien, 0,0117 zu 16,3 Millionen radiometrische Jahre (33 Serien), ergibt ein ebenso eklatantes Missverhältnis wie der „Stufen-Vergleich“: Das

Holozän wäre – auf Grundlage des radiometrischen Altersmodells – um einen Faktor 1400 kürzer.

Gedanklich könnte die radiometrische Dauer einer holozänen Stufe als „zeitlicher“ Maßstab für das gesamte Phanerozoikum (Kambrium bis heute) dienen – das wäre ein alternatives Altersmodell. Das ergäbe rein rechnerisch eine Dauer von rund 400.000 radiometrischen Jahren für das gesamte Phanerozoikum (Basis 100 Stufen ab Kambrium). Zur Quantifizierung der vergangenen Zeit war solch eine Projektion prinzipiell die Vorgehensweise von LYELL (1868, 310). Den Primäreinheiten der stratigraphischen Tabelle wurden schon früh eine gleiche Dauer zugeschrieben. So ist die Dauer der Vorzeit bezogen auf die fossilführenden Schichten (übertragbar: Kambrium bis heute) von LYELL (1868) zu 12 Zyklen (Perioden) zu je 20 Millionen Jahre (→ 2-32) und von HOLMES (1927) zu 20 geologischen Zyklen zu je 30 Millionen Jahre konstruiert worden.

Literatur

- Anthropocene Working Group (2014) The Anthropocene: an update. *GeoQ* 12, 22.
- GRADSTEIN FM, OGG JG, SCHMITZ MD & OGG GM (2012) The Geologic Time Scale 2012. Volume 1/2, Oxford Amsterdam.
- HOLMES A (1927) The Age of the Earth. London.
- LYELL C (1868) Principles of Geology, vol. 2, 10th ed., London.
- WALKER M, HEAD MJ, BERKELHAMMER M, BJÖRCK S, CHENG H, Cwynar L, FISHER D, Gkinis V, LONG A, LOWE J, NEWNHAM R, RASMUSSEN SO & WEISS H (2018) Formal ratification of the subdivision of the Holocene Series/Epoch (Quaternary System/Period): two new Global Boundary Stratotype Sections and Points (GSSPs) and three new stages/subseries. *Episodes* 41, DOI: 10.18814/epiugs/2018/018016.
- WATERS CN, ŻALASIEWICZ J, SUMMERHAYES C, BAR-NOSKY AD, POIRIER C, GAŁUSZKA A, CEARRETA A, EDGEWORTH M, ELLIS EC, ELLIS M, JEANDEL C, LEINFELDER R, MCNEILL JR, DE RICHTER DB, STEFFEN W, SYVITSKI J, VIDAS D, WAGREICH M, WILLIAMS M, ZHISHENG A, GRINEVALD J, ODADA E, ORESKES N, WOLFE AP (2016) The Anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the Holocene. *Science* 351, 137.

² Aktuelle Tabelle siehe: <https://stratigraphy.org/icschart/ChronostratChart2020-03.jpg>

³ Radiometrische Jahre werden implizit mit Kalenderjahren gleichgesetzt.

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

Zur Ergänzung → 2-01, 4-01.

3-01 Warvenchronologische Methode (Warvenchronologie) – Übersichtsblatt

Sinngleiche und verwandte Begriffe

Bänderton, Bändertondatierung, Warven, Warvierung, Warvendatierung, Jahresschichtenzählung.

Ziel

Versuch, an einer laminierten Sedimentfolge jährliche Sedimentzuwächse zu identifizieren und auszugliedern und dadurch eine absolute Chronologie (jahrgenau bzw. in Jahre aufgelöst) aufzubauen:

- Von der Sedimentoberfläche eines Beckens (Gegenwart) in die Tiefe (Vergangenheit) rückwärts.
- Für einen Teilabschnitt einer Sedimentfolge jeweils unterhalb oder oberhalb zu einem bekannten Datum in der Sedimentfolge.

Grundlagen

Der wiederkehrende Wechsel von hellen und dunklen feinelaminierten Lagen (Lagencouplet, deskriptiv Warve) in Sedimentfolgen – also das Erscheinungsbild, gleichsam Jahresringen von Bäumen – war inspirierend für die Idee einer Jahresschichtung.

Vorgehensweise

Lagengenaue Profilaufnahme und -auswertung (visuelle Beschreibung, Dünnschliffe, physikalische und chemische Reihenmessungen); ggf. Korrelation Hunderter Einzelprofile (Typ „Bänderton“, Abb. 1).

Basisannahme(n)

1. Kontinuierliche jahreszeitliche Prägung der Ablagerungen.
2. Lückenlose, ungestörte Sedimentabfolge.

Historie

Bändertone, Warven (DE GEER 1912; → 3-10). Methode seit 1970 erneut verbreitet; insbesondere Seesedimente.

Anwendung

Geologie, Paläoklimatologie.

Angabe/Größenordnung des Ergebnisse

Die konstruierten Warvenchronologien erstrecken sich über einen Abschnitt von einigen 10^2 bis 10^4 Warvenjahre.

Bekannte Einschränkungen/Probleme

Mangelnde Kenntnis über die Beckenentwicklung und die Sedimentationsbedingungen;

Nicht-Erkennen von Sedimentationsereignissen, Sedimentationsunterbrechungen und Erosion.

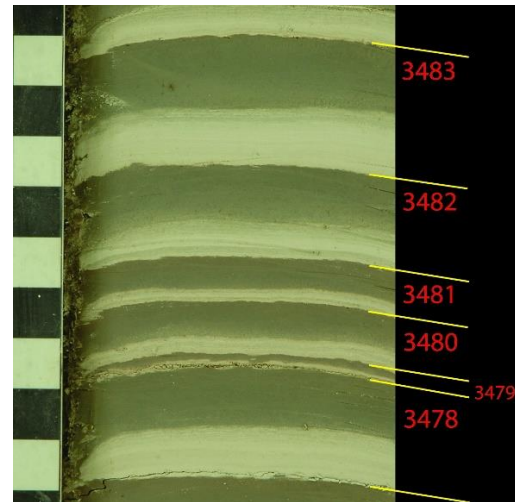


Abb. 1 Bänderton, Connecticut Valley, USA.

Maßstab: Zentimeter-Skalierung; Warvenjahre 3478 bis 3483 (schwebend), (neue) Nordamerikanische Warvenchronologie (NAVC); radiokarbondatiert etwa 17.300 ^{14}C -Jahre; eine helle und eine dunkle Lage werden als Ablagerung eines Kalenderjahres interpretiert. Abbildung: RIDGE, J.C. (April 19, 2013) The North American Glacial Varve Project. Retrieved from <http://eos.tufts.edu/varves>.

Altersbestimmungsverfahren

Anspruch: Unabhängig und absolut.

Eichung

In wesentlichen Teilen durch die Radiokarbonmethode (→ 6-01).

Gültigkeit (der Ergebnisse)

a) Relative Altersbestimmung

Gegeben.

b) Absolute Altersbestimmung

- Einschränkend gegeben für kurze Warvenchronologien (Hunderte Jahre), wenn eine strenge Saisonalität unabhängig (Ereignisse bekannten historischen Alters) bestätigt wird.
- Nicht gegeben für lange Warvenchronologien: Die Basisannahme (1) ist bisher nicht schlüssig nachgewiesen worden. Vielmehr werden die Warvenjahre in einen durch andere Altersbestimmungsmethoden (i. d. R. ^{14}C -Methode) gewonnenen Altersrahmen eingepasst; z. B. durch entsprechende Höher-Auflösung der Lamination und/oder Ausweis oder Hinzu-Modellierens vermeintlich fehlender Lagen. Es ist nicht

bekannt, in welchem Verhältnis diese Warvenalter zum realen Alter stehen.

Kritik und Handlungsbedarf

Die Warvenchronologie präsentiert sich als eine unabhängige und absolute Datierungsmethode. Die Lang-Warvenchronologie ist jedoch ein ^{14}C -geeichtetes Pseudo-Jahresschichtenkonstrukt. Unter diesem Umstand ist die Methode weder unabhängig noch ist sie in der Lage, eine absolute Aussage über das Alter zu machen.

Der breiten Öffentlichkeit werden diese Warvenalter fast ausnahmslos als reale Alter, nämlich abgezahlter (echter) Jahre („Jahresschichtenzählung“), dargestellt und kommuniziert. Dies ist in Anbetracht der unsicheren Erkenntnisse (fehlender Nachweis, ^{14}C -Eichung) eine deutliche Grenzüberschreitung.

Literatur

DE GEER G (1912) Geochronologie der letzten 12000 Jahre. Geologische Rundschau 3, 457-471.

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

Zur Ergänzung → 3-20, 3-21.

3-10 De Geers Warvenchronologie

Weder Jahresschichtung noch lückenlose Chronologie noch 12.000 Jahre nachgewiesen

Die Geologie – eine Geschichte ohne Jahreszahlen

DE GEER hat die Warvenchronologie begründet. Mit dem Titel *Geochronologie der letzten 12000 Jahre* präsentierte er an seine Fachkollegen aus dem Ausland erstmals 1910 auf dem Geologenkongress in Stockholm seine Untersuchungen. Bemerkenswert ist sein einleitender programmatischer Satz: „Die Geologie ist die Geschichte der Erde, aber bis jetzt war sie eine Geschichte ohne Jahreszahlen.“ In seiner Einführung fährt er weiter fort, dass es angezeigt sein mag, „(...) eine neue exakte Untersuchungsmethode darzulegen, nach der es möglich ist, durch tatsächliches Zählen von Jahresschichten eine richtige Erdchronologie herzustellen für einen Zeitraum, der von der Gegenwart aus ungefähr 12000 Jahre zurückreicht. Als Basis für diese Chronologie sind gewisse spätglaziale und postglaziale, periodisch geschichtete Sedimente benutzt, in den der Absatz eines jeden einzelnen Jahres unterschieden werden kann“ (S. 457).

Beobachtung und Interpretation – Faszination Warve, wie Jahresringe von Bäumen

In seinem Aufsatz tritt DE GEER allerdings keinen Nachweis dafür an, dass es sich bei den von ihm bezeichneten Warven tatsächlich um einen Zyklus von in einem Jahr erfolgter Ablagerungen handelt. Vielmehr erachtet er es einfach als die für sich beste Erklärung, wie nachfolgende Auszüge zeigen.

- „(...) ein glazimariner Ton, der ‚varvig lera‘, sogenannten nach seinen Warven oder seiner periodischen Schichtung, verschiedenen an Farbe und Struktur“ (S. 458).
- „(...) war ich überrascht von der Regelmäßigkeit dieser Schichten, die sehr an die Jahresringe von Bäumen erinnerten“ (S. 458).

DE GEER, Gerad Jakob. Schwedischer Geologe (1858-1943).

Warve(n). Laminierter Sedimentfolge, deren Hell/Dunkel-Lagencouplets Bildung eines Kalenderjahres repräsentieren (1 Warvenjahr = 1 Kalenderjahr). Eine jeweilige jahreszeitliche Prägung ist nachzuweisen. DE GEER allerdings hat einen Nachweis einer Jahresschichtung nicht erbracht. Seine „Warven“ sind deshalb bis auf Weiteres als laminiertes Sediment anzusprechen.

Warvenchronologie. Hier DE GEERS Versuch, durch Abzählung der „Warven“ (durch Korrelation an über 800 teils geringmächtigen „Warven“-Profilen in Süd- und Mittelschweden) eine spät- und nacheiszeitliche, im Wesentlichen lückenlose Geochronologie bis zur Gegenwart zu erstellen. Dies ist DE GEER nicht gelungen.

Geochronologie. Eine absolute, exakte (geologische) Zeitbestimmung in Jahren; hier der Versuch durch Abzählung von „Jahresschichten“.

Glazial. Bezieht sich auf die Weichsel-Kaltzeit.

- „Es zeigte sich, dass die Schichten so regelmäßig und so kontinuierlich waren, dass sie kaum irgend einer anderen, weniger regelmäßigen Periodizität zugeschrieben werden konnten, als der des Jahreslaufs“ (S. 458).
- „(...) dass ich in meiner Auffassung dieser Schichten als wirklicher Jahresschichten wesentlich bestärkt war (...)“ (S. 458).
- „Die große Ausdehnung zusammen mit ihrer regelmäßigen Struktur zeigte endgültig, dass sie [die Warven, MK] keiner lokalen oder gelegentlichen Ursache und keiner Ursache von geringerer Bedeutung oder weniger ausgesprochener Periodizität

ihre Entstehung verdanken können, als der klimatischen Periode des Jahres“ (S. 461).

- „Jedes einzelne der scharf gezeichneten Warven irgendeiner hypothetischen und jedenfalls unbestimmt begrenzten Serie von mehreren Jahren zuzuschreiben, scheint ebenfalls unmöglich, zumal es dann gar keine Registrierung der tatsächlich so scharf akzentuierten Periode des einzelnen Jahres aufzeigen würde. In der Tat scheint es mir ebenso unwahrscheinlich, dass die Jahresperiode des Schmelzens des Landeises den jährlichen Sedimenten ihren Stempel nicht aufgedrückt hätte, als dass dies bei der jährlichen Vegetationsperiode in Bezug auf die Jahresringe der Bäume nicht der Fall wäre“ (S. 461).
- „(...) wobei wir die Kontinuität und den guten Erhaltungszustand der Schichtlagen konstatierten, die unverkennbar die Sedimentbildung eines Jahres darstellten“ (S. 470).

Die jahreszeitliche Periodizität, die sich DE GEER vorstellte, war der Transport von klastischem Material durch Schmelzwässer, die sich während des Sommers an der Oberfläche des Inlandeises bildeten; insbesondere durch Sonnenbestrahlung. Feinsande und Tone kamen distal (weiter entfernt) im Meer (stehendes Wasser) zum Absatz, zunächst das gröbere Material, dann, nach Ablassen der hydrodynamischen Energie, das feinere, bis der Zyklus gänzlich stoppte, weil keine Schmelzwässer mehr gebildet wurden (Winter, Winterfrost). Im Gesamtkontext erklärt DE GEER (S. 462): „Die natürlichen Bedingungen, auf die sich der Plan für die gesamte Untersuchung gründete, waren folgende: Als die letzte Inlandeisdecke sich aus Schweden zurückzog, lagen die tieferen Teile des Landes noch unter dem Meeresspiegel; jedes Jahr während des Sommers sank das Schmelzwasser von der Oberfläche der Inlandeisdecke durch ihre Schrunden in die Tiefe und floss am Grunde des Eises entlang. (...) Jede folgende Sommerszeit brachte einen neuen Eisrückzug und die Bildung eines neuen Fächers von Geröll, Sand und Ton.“ Die Bildung der Warven auf andere Ursachen zurückzuführen als die eines (einförmigen) jahreszeitlichen Temperaturrhythmus, beispielsweise die Folge einzelner Ereignisse, zieht DE GEER hier nicht in Betracht.

Lückenhafte Chronologie, zahlreiche Altersschätzungen und Extrapolationen

Aus unterschiedlichen Textpassagen ist zu erschließen, wie sich die 12.000 Jahre Chronologie zusammensetzen: Aus einer spätglazialen Periode von 5.000 Jahren und einer postglazialen Periode von 7.000 Jahren. Zur Konstruktion der Chronologie wurden in der Hauptsache über eine im Wesentlichen Süd-Nord verlaufenden Strecke von 800 km, ausgehend von Stockholm, etwa in einem Abstand von 1 km, 800 Bänderton-Profile aufgenommen, die sukzessive von Süd nach Nord über ihre Mächtigkeitssignatur korreliert wurden. Darüber hinaus wurden weitere Profile aufgenommen. DE GEER kann aber weder eine vollständige noch eine an die Gegenwart anschließende Chronologie aufbauen; es werden zahlreiche Schätzungen und Extrapolationen vorgenommen:

- „Im östlichen Schonen wurde die Untersuchungslinie nicht ganz soweit ausgedehnt (...) und hier habe ich Extrapolationen angewandt. Dasselbe geschah am nördlichsten Ende der Linie in unmittelbarer Nähe der Eisscheide (...)“.
- „(...) wenn wir die ganze gotiglaziale Subepoche (...) auf annähernd aber auch nicht mehr als 3000 Jahre ansetzen.“
- „Das Ende der letzten Eiszeit, oder die finiglaziale Epoche kann auf dieselbe Weise auf nahezu 2000 Jahre geschätzt werden.“
- „(...) dass die beiden letzten Subepochen der letzten Rückzugsperiode des Eises also die gotiglaziale und finiglaziale, zusammen etwa 5000 Jahre erreichen (...)“ (S. 468). – [Anmerkung: spätglazial ohne ‚daniglazial‘ an der Basis.]
- Profil am Rugandasee: „(...) etwa 700 etwas weniger scharf akzentuierte Lagen eines schwarz gebänderten postglazialen Fjordtons“, [darüber, MK] „gut ausgezeichnete Jahreslagen von abwechselnd feinem, sandigen Sediment und Schlamm;“ (S. 470). – [Anmerkung: ohne Angabe von Anzahl der Lagen.]
- Profil am Rugandasee: „Doch ergibt zur Zeit die Extrapolation für die ganze postglaziale Schichtenserie etwa 7000 Jahre, ein Resultat, das sich vermutlich als in der Hauptsache richtig herausstellen wird, obgleich es natürlich zunächst nur als vorläufig angesehen werden kann. (...) Es wird so schnell wie möglich durch fortgesetzte

Aufnahme eine Kontrolle des Resultats versucht werden“ (S. 470). – [Anmerkung: Die Basis der Zuordnung der Tonlagen zu spät- bzw. postglazial wird nicht diskutiert.]

Untersuchungen am Walensee (Schweiz) – Zweifel an der Interpretation, eine Warve entspreche der Ablagerung eines Jahres

Die DE GEERSchen Bodenströme (bottom currents) können in Anwendung moderner Terminologie als Trübetiefenströme (turbidity underflows) bezeichnet werden. LAMBERT & HSÜ (1979) untersuchten solche Suspensionsströme im Walensee (Schweiz), u. a. um die Zuverlässigkeit von Warven als Werkzeug der Geochronologie beurteilen zu können. Das Ergebnis ihrer Untersuchungen ist, dass sedimentgeladene Flutwasser Trübetiefenströme generieren können, die „Warven“ erzeugen, ziehen aber in Zweifel, dass „Warven“ oder warvenähnliche Sedimente notwendigerweise jährlich gebildet werden. Für den Walensee stellten sie für die Periode ab 1811 etwa zwei „Warven“ pro Jahr fest; für die letzten Jahrzehnte konnten sie im Durchschnitt zwei bedeutende Schwebelast-Impulse in den Walensee aufzeigen. Sie bestätigen damit DE GEERS erste Interpretation, der Genese der Sedimentlagen durch „Bodenströme“, bezweifeln aber seine zweite Interpretation, eine Warve entspreche der Ablagerung eines Jahres.

Ereignislagen schnell fließender Tiefenströme (Hochenergie-Milieu)

Die Möglichkeit anderer Ursachen als die eines jahreszeitlichen Temperaturrhythmus, wie bereits oben erwähnt, zieht DE GEER nicht in Betracht.

Hochenergetische (katastrophische) Ereignisse im Zuge des Abschmelzens der Eisschilde zeugen von außergewöhnlichen Extrem-Bedingungen und gigantischen Wassermengen und -bewegungen, die nicht mit heutigen Schmelzwasserbildungen vergleichbar sind.¹ Viel wahrscheinlicher sind Ereignisse signifikanter Warmluft bzw. Warmmassen-Zufuhr sowie Regen- oder Starkregen-Ereignisse, die den Abschmelzprozess nicht nur initiierten, sondern

verstärkten und beschleunigten. Ein weitverzweigtes Strömungsnetz am Grunde des Eises mit schießenden Wassern wird die Eismassen zusätzlich von unten erodiert und aufgelöst haben. Diese Ereignisse könnten mehrmals im Jahr stattgefunden haben, in ihrer Ergänzung oder Wechselwirkung möglicherweise einige Dutzende Mal pro Jahr. Bei beispielsweise 36 dieser Ereignisse in einem Kalenderjahr wäre die Relation 36 „Warven“ = 1 Jahr.

Fazit – seit 100 Jahren Absolutheitsanspruch, ohne Nachweise erbracht zu haben

Gleichgültig welches Lehrbuch aufgeschlagen, welches Lexikon bemüht, welche Website angeklickt wird, seit DE GEERS „Geo“- bzw. Warvenchronologie (1912) werden (unechte) Warven mit Kalenderjahren gleichgesetzt (was wie eine Warve aussieht ist eine Warve) und diese Art der „Jahresschichtenzählung“ als absolute Datierungsmethode ausgelobt. DE GEER aber hat einen Jahresschichten-Nachweis nicht erbracht; mangels Unkenntnis über die Bildungsdauer der „Warven“ können – unabhängig von der lückenhaften Chronologie – auch keine 12.000 Jahre ausgewiesen werden. Im Lichte moderner Sedimentologie sind die einzelnen Lagen vielmehr als Ereignislagen zu deuten. Wie häufig diese Ereignisse in einem Kalenderjahr stattgefunden haben, ist nicht bekannt; im Kontext des Gesamtgeschehens scheint eine Größenordnung bis zu mehreren Dutzend Mal pro Jahr (Hochphase) wahrscheinlich.

Literatur

- BRETZ JH (1969) The Lake Missoula Floods and the Channeled Scabland. *Journal of Geology* 77, 503-543.
- DE GEER G (1912) Geochronologie der letzten 12000 Jahre. *Geologische Rundschau* 3, 457-471.
- GUPTA S, COLLIER JS, PALMER-FELGATE A & POTTER G (2007) Catastrophic flooding origin of shelf valley systems in the English Channel. *Nature* 448, 342-5.
- KOTULLA M (2014) Megafluten. *Studium Integrale Journal* 21, 4-11.
- LAMBERT A & HSÜ KJ (1979) Non-annual cycles of varve-like sedimentation in Walensee, Switzerland. *Sedimentology* 26, 453-461.

oder Bildung des Englischen Kanals (GUPTA et al. 2007). Siehe auch *Megafluten* (KOTULLA 2014).

¹ U. a. Dammbrüche von Glazialseen, sog. glacial lake outburst floods; z. B. Lake-Missoula-Flut (BRETZ 1969)

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

Zur Ergänzung → 3-01.

3-20 Lamierte Sedimente des Toten Meeres

Warvierung nicht schlüssig nachgewiesen

Der Sedimentkern von Ein Gedi¹

1997/98 wurden mit dem Ziel der Rekonstruktion des Paläoklimas und der Paläoseismizität an vier Lokationen (Ein Feshkha, Ein Gedi, Hever und Ze'elim) entlang der rezenten Uferlinie der Westküste des Toten Meeres (Abb. 1) Kernprofile, teilweise bis in 21 m Tiefe, entnommen (MIGOWSKI 2001).

Im Ein-Gedi-Profil besteht der oberste Teil aus einer Abfolge alternierender Mergel- und Aragonitlagen mit gelegentlichen Einschaltungen von Gipslagen, die MIGOWSKI als „obere Aragonit-reiche Sequenz“ bezeichnet. In einem Teilbereich dieser Folge, in einer Tiefe von 0,78 m bis 3,04 m, sind weitestgehend durchgängig feine Hell-/Dunkellagen ausgebildet. Sie werden von MIGOWSKI als Warven (Warvierung) angesprochen; final zählt sie für diesen schwebenden Abschnitt 1505 „Warven“, die sie mit 1505 Kalenderjahren gleichsetzt.

Interpretation

Aufgrund der petrographischen Merkmale interpretiert MIGOWSKI (S. 46f) die Sedimentbildungsbedingungen am Beckenrand des Toten Meeres als Winter-Flutereignisse aus den unmittelbar angrenzenden Wadis. Dabei wird Detritus in den See transportiert und als klastische Lage sedimentiert; die evaporitischen Lagen entstehen in Abhängigkeit des Ioneneintrags des Frischwassers sowie der Evaporationsrate. Reine Aragonit- und Gipslagen werden als Fällungsprodukte der niederschlagsfreien Monate angesehen. Die auftretenden Kombinationen (Muster) von klastischen Lagen, Aragonit- und Gipslagen (weniger häufig) ordnet sie jeweils einem Jahr zu, wobei nie mehr als drei Lagen ein Jahr bilden (Tab. 1). So wird beispielsweise einer Abfolge aus klastischer Lage und Aragonitlage, die von einer klastischen Lage überdeckt wird, dem ersten Lagenpaar ein Jahr zugewiesen. Folgt dagegen eine Gipslage, bilden alle drei Lagen zusammen ein

Jahr. Definitionsgemäß beginnt jeweils ein Jahr mit einer klastischen Lage. Zwei gut ausgeprägte, unmittelbar übereinanderliegende klastische Lagen werden als zwei Flutereignisse innerhalb eines Jahres interpretiert.

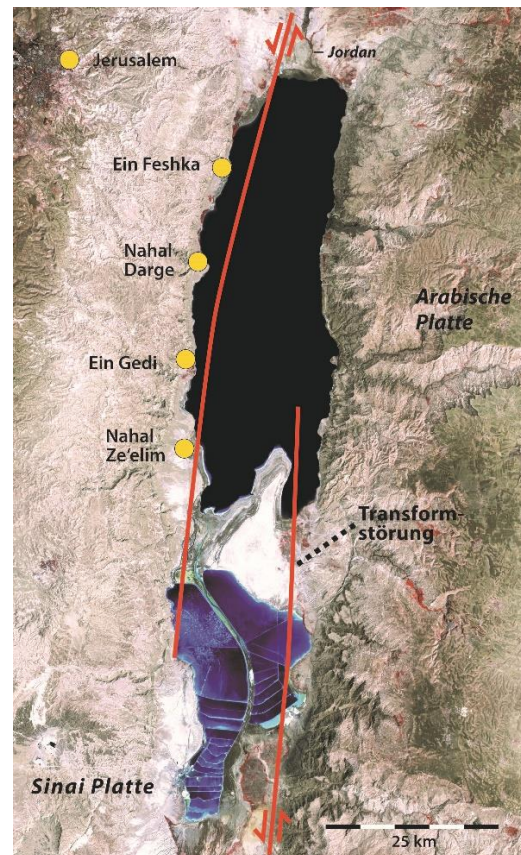


Abb. 1 Satellitenaufnahme des Toten Meeres. Eingefügt sind die Orte der Entnahme der Bohrkerne an der Westküste sowie der Verlauf der Transformstörung. Foto: NASA; Eintragungen durch den Verfasser.

Die Überleitung von einem Flutereignis zu einer Jahresschichtung wird von MIGOWSKI allerdings nicht ausreichend vertieft und begründet. Einerseits beobachtet und folgert sie (S. 35-36): „Die Hypothese der unmittelbaren Ausfällung von Aragonit als Folge von Ioneneintrag durch Flutereignisse (STEIN et al. 1997, BARKAN et al. 2001) wird von der Beobachtung gestützt, dass

¹ Dieser Beitrag ist im Wesentlichen ein Auszug aus *Das Erdbeben bei der Kreuzigung Jesu* (KOTULLA 2013).

bei den Abschnitten mit alternierender Ablagerung von klastischen und evaporitischen Lagen die Basis der Aragonitlagen unter dem Mikroskop häufig als dichtkristallisiert, von klastischem Material verunreinigt erscheint. Das bedeutet, dass die Ausfällung und Ablagerung des Aragonits bereits erfolgt, während sich der feinkörnige klastische Eintrag noch absetzt.“ Andererseits fährt sie unmittelbar fort: „Bei der Ausfällung und anschließenden Ablagerung reiner Evaporitlagen, meist Aragonit, spielt zusätzlich die Verdunstung eine große Rolle. Im Verlauf des Jahres, wenn die Temperaturen und somit auch die Verdunstung hoch genug sind, lagert sich Aragonit als reine Phase ab.“

Muster	Lagen (Basisabfolge)			Lagen (Wiederholung, nur erste Lage)			Abgrenzung 1 zu 2 Jahre	
	klastisch	Aragonit	Gips	klastisch	Aragonit	Gips	1	2
1a	X			X			X	
1b	X	(X)		X				X
2a	X	X		X				X
2b	(X)	X			X		X	
3a	X	X	X	X				X
3b	X		X	X				X
4a (revers 3a)	X	X ₂	X ₁	X				X
4b	X	X ₂	X ₁			X		X
äolisch							-	-

Tab. 1 Muster der Lagenabfolgen und Interpretation als Jahreslagen (Couplets bzw. Triplets). Die Tabelle zeigt insbesondere bei Wiederholung der Lagen, wie eine Abgrenzung abgeschlossenes Jahr/neues Jahr vorgenommen wird. Datenbasis: MIGOWSKI (2001).

Diskussion

NEEV & EMERY (1967) jedoch zeigten bereits, dass die Bildung von „Aragonit-Warven“ nicht auf die sommerlichen Ausfällereignisse (dem sogenannten „whitening“) zurückzuführen sind. Und die oben erwähnten BARKAN et al. (2001) folgern aufgrund ihrer Untersuchungen, dass zumindest ein Großteil der Aragonitausfällungen durch „Winterfluten“ (Jordan und Wadis) bedingt sind (HCO³⁻-Ioneneintrag des Frischwassers in den Ca²⁺-reichen hypersalinen See). Sie widersprechen damit auch der weithin akzeptierten Auffassung, dass die „Aragonitwarven“ des Lisan-Sees (dem Vorgängersee des Toten Meeres)

während der Sommermonate zu Zeiten erhöhter Evaporation gebildet wurden.

MIGOWSKI entwickelt die Flutereigniskette nicht zu Ende, insbesondere ob die reine(re) Aragonitlage nämlich als Abschluss des Flutereignisses zu interpretieren ist, nachdem sich der feinkörnige klastische Eintrag abgesetzt hat. Demzufolge wäre die nächste Sequenz, die mit einer klastischen Lage beginnt, nicht als Beginn eines neuen Jahres zu interpretieren, sondern zunächst einmal als ein nächstes Flutereignis. Weder werden die Ausfällgeschwindigkeiten für Aragonit noch die Ausfällvolumina diskutiert. Vor allem wird nicht auf den Umstand von mehr als zwei Flutereignissen (ausgelöst durch heftige Regenergüsse) in der niederschlagsreichen Herbst-/Winter-/Frühlings-Saison eingegangen. Denn mehrere, in der Anzahl schwankende Flutereignisse (oder auch keine) pro Regen-Saison würden das Konzept der Jahresschichtung bzw. der jahrgenauen Auflösung der Sedimentfolge unwahrscheinlich machen.

Hinsichtlich des Nachweises einer jahreszeitlichen Schichtung weiß MIGOWSKI um die „Komplexität des Systems“, denn „nach welchen Mechanismen die alternierende Ablagerung (...) erfolgt, ist noch nicht vollständig geklärt.“ Die Analyse wird zudem durch den anthropogenen Einfluss in den letzten Jahrzehnten (stark reduzierter Jordanzufluss) erschwert, „demzufolge erlaubt die heutige Situation am Toten Meer keine Rückschlüsse auf vergangene Verhältnisse.“

HEIM (1997) aber, so MIGOWSKI, soll Warven nachgewiesen haben. Er beschreibt aus mehreren, bis knapp 4 m tiefen Bohrkernen der Beckenmitte des Toten Meeres warvenähnliche Abfolgen. Nach seiner Beobachtung entwickelte sich die Laminierung durch alternierende Ausfällung von Aragonit oder Gips und der Sedimentation klastischen und organischen Materials, welches durch episodische Flutereignisse in den See transportiert wurde. Er kennt aber die Ergebnisse von BARKAN et al. (2001) noch nicht und konstruiert eine Jahresschichtung: „Thus the pollen data confirms that the dark layers formed in autumn-winter-spring while the light layers were deposited during summer.“

Radiokarbonegeichte Warvenchronologie

Ungeachtet der unsicheren und umstrittenen Sachlage erachtet MIGOWSKI (S. 52) als Ergebnis ihrer Arbeit den Nachweis einer Warvierung aber als erbracht: „Die Übereinstimmung der

Sedimentationsraten beider Modelle (Warven- und ^{14}C -Chronologie) bestätigt die Richtigkeit des jährlichen Ablagerungscharakters für die ausgezählten Abschnitte des Profils. Auf der Basis des in dieser Arbeit aufgestellten Sedimentationsmodells kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass in allen Profilabschnitten, in denen eine Ausbildung von reinen karbonatisch-evaporitischen Lagen alternierend mit klastischen Lagen vorherrscht, eine Warvierung des Sedimentprofils vorliegt.“ Wird allerdings die Vorgehensweise nachverfolgt, so kann festgestellt werden, dass die „Warven-Chronologie“ und die daraus folgende Berechnung der Sedimentationsraten nicht unabhängig von der „ ^{14}C -Chronologie“ entwickelt wurde. MIGOWSKI beschreibt (S. 48), wie sie in einer Voruntersuchung anhand von Detailaufnahmen zunächst die Lagen zwischen den ^{14}C -Daten der Tiefen 2,50 m und 0,22 m in Schritten von 0,5 mm vermessen und gezählt hat. Die Zählung ergab für diesen zuvor ^{14}C -datierten Zeitraum von 1190-1450 Jahren (2σ) 1303 ausgezählte Einzellagen, darunter 432 Aragonitlagen, die mit 432 (Warven)jahren gleichzusetzen sind (in diesem Sinne wären nur etwa ein Drittel der Jahre repräsentiert). Sie stellt fest, dass im Vergleich mit den ^{14}C -datierten Zeitraum von 1190-1450 Jahren eine Diskrepanz vorliegt und „die Identifikation der einzelnen Lagen nur anhand der Farben auf dem Foto nicht ausreicht“. Dies veranlasste sie, eine größere Auflösung vorzunehmen. Anschließend wurde der Abschnitt zwischen den ^{14}C -Daten der Tiefen 3,04 m und 0,78 m nunmehr in Schritten von 0,1 mm gezählt. Diese Zählung ergab für den ebenfalls zuvor ^{14}C -datierten Zeitraum von 1130-1500 Jahre (2σ) 2690 Lagen; das Ergebnis (S. 48): „Die zugehörige Anzahl von Jahren (^{14}C -Datierung) beläuft sich für diesen Abschnitt auf 1130-1500 Jahre, was dem Zählergebnis von 1505 Jahren relativ nahe kommt.“ Später heißt es (S. 51): „Da es sich bei dem aus der Zählung des warvierten Abschnittes resultierenden Alters-Tiefen-Modell um eine schwebende Chronologie handelt, wurde sie in die anhand der AMS- ^{14}C -Datierungen erstellten Alters-Tiefen-Kurve eingehängt (Abb. 5.6)“ Die Beschriftung zu Abb. 5.6 lautet sodann: „Das durch die Warvenvermessung aufgestellte Alters-Tiefen-Modell stimmt mit den AMS- ^{14}C -Daten innerhalb ihrer 2σ -Bereiche relativ gut überein.“ Hier wird eine von ^{14}C -Datierungen unabhängig erstellte Warven-Chronologie suggeriert,

was aber anhand der zuvor erwähnten Voruntersuchung nicht der Fall ist.

Fazit

Die laminierten Sedimente in dem diskutierten Profilabschnitt werden vom Verfasser als Ereignislagen interpretiert. Eine Saisonalität im Sinne einer Warvierung ist nicht nachgewiesen. Ein Ereignis (heftiger Regenfall, Springflut) könnte mehrmals in einem Jahr stattgefunden haben oder auch ausgeblieben sein. Die Validität der ^{14}C -Datierung an organischem Material und Karbonaten im Milieu des Toten Meeres ist nicht bekannt. Somit erfährt MIGOWSKIs „Warven-Chronologie“ durch die ^{14}C -Datierung keine Bestätigung. Andererseits kann die „Warven-Chronologie“, da sehr wahrscheinlich keine Jahresschichtung vorliegt, nicht die ^{14}C -Datierung validieren. Vielmehr wurde sie vom zeitlichen Rahmen der unsicheren ^{14}C -Datierung abgeleitet.

Literatur

- BARKAN E, LUZ B & LAZAR B (2001) Dynamics of the carbon dioxide system in the Dead Sea. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 65, 355-368.
- HEIM C, NOWACZYK NR, NEGENDANK JFW, LEROY SAG & BEN-AVRAHAM Z (1997) Near East desertification: Evidence from the Dead Sea. *Naturwissenschaften* 84, 398-401.
- KOTULLA M (2013) Das Erdbeben bei der Kreuzigung Jesu. Ereignis in Ablagerungen des Toten Meeres nachgewiesen? *Studium Integrale Journal* 20, 25-33.
<http://www.si-journal.de/jg20/heft1/sij201-4.pdf>
- MIGOWSKI C (2001) Untersuchungen lamierter holozäner Sedimente aus dem Toten Meer. Rekonstruktionen von Paläoklima und -seismizität. Potsdam.
- NEEV D & EMERY KO (1967) The Dead Sea, depositional processes and environments of evaporites. *Geol. Surv. Israel Bull.* 41, 1-147.
- STEIN M, STARINSKY A, KATZ A, GOLDSTEIN SL, MACHLUS M & SCHRAMM A (1997) Strontium isotopic, chemical, and sedimentological evidence for the evolution of Lake Lisan and the Dead Sea. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61, 3975-3992.

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

Zur Ergänzung → 3-01.

3-21 Die laminierten Sedimente des Suigetsu-Sees, Japan

Weder Nachweis von Jahresschichten noch von 50.000 Kalenderjahren – modellierte „Warven“chronologie in ¹⁴C-Altersrahmen eingepasst

Suigetsu-Seesedimente – Ablagerungen im Jahresrhythmus?

In einer Pressemitteilung des Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ vom 19. 10. 2012 wird von einer in 2006 durchgeführten Bohrkampagne im japanischen Suigetsu-See (Abb. 1 und 2) berichtet. Dessen laminierte¹ Seesedimente werden als Jahresschichten interpretiert. Die geschichteten Ablagerungen sollen „mit einer jahreszeitlichen Auflösung bis über 50.000 Jahre zurück reichen.“ Das Hauptziel des Projektes „Suigetsu Varves 2006“ war, eine genauere Eichung der Radiokarbon-Zeitskala für den Skalenabschnitt von etwa 12.500 bis 50.000 (kalibrierten) ¹⁴C-Jahren jenseits der dendrochronologischen Kalibrierung zu ermöglichen.²

Es stellt sich die Frage, ob eine jahreszeitliche Prägung der laminierten Sedimente (Warvirung) nachgewiesen wurde und ob die Schichtenzeitskala unabhängig, frei von anderen Altersbestimmungsmethoden, entwickelt wurde.



Abb. 1 Suigetsu-See bei Mikata am Japanischen Meer. Foto: Achim BRAUER/GFZ.

Die Bohrkampagne 1991/1993

Der Bohrkampagne in 2006 (SG06) war bereits eine Bohrkampagne in 1991/1993 (SG93)

vorausgegangen, die mehrere Sedimentkerne bis in eine Tiefe von 75 m förderte (KITAGAWA et al. 1995, KITAGAWA & VAN DER PLICHT 1998a, 1998b, 2000).

Suigetsu-See kompakt

Lokalität: Honshu Insel, Japan.

Koordinaten: 35°35'N, 135°53' E.

Größe: ca. 2 km Ø; 4,3 km².

Höhe über Meeresspiegel: 0 m.

Wassertiefe (WT_{max}): 34 m.

Entstehung: tektonisch.

Geologisches [radiometrisches] Alter

(Stand nach SG06): > 150 ka (¹⁴C, K-Ar (> 89 ka) + Extrapolation).

Bohrkampagnen: 2; 1991/93 (SG93), 2006 (SG06).

Bohrkampagne 2006 (SG06)

Kompositprofil: 73,19 m.

Tephralagen: 30.

Laminierter Abschnitt: ca. 0,2 m - 46,01 m.

Geologisches [radiometrisches] Alter (nur laminierter Abschnitt): ca. 70 ka (¹⁴C + Extra-/Interpolation).

„Warven“zählung: 12,88 – 31,67 m (ca. 10,2-40 ka BP, radiometrisch); Anzahl „Warven“ allerdings nicht genannt. Vgl. SG93 (10,42 – 30,45 m, 29.100 „Warven“).

Verankerung der schwebenden „Warven“chronologie: 13,97 m (Tephralage), 11.271 ± 17 cal ¹⁴C-Jahre BP.

„Warven“zählung, Teilbereich: 12,88 – 18,15 m; ca. 3.300 „Warven“, modelliert zu ca. 6.100 „Warven“jahre.

Den laminierten Abschnitt beschrieben KITAGAWA et al. (1995) als einen ausgeprägten Hell/Dunkel-Wechsel von Feinlagen, die sie jeweils einer Saison des Jahres zuordneten: „Die Laminae bestehen aus zwei Lagen; die tonminerale und diatomeenreiche hellfarbige Lage (korrespondierend mit der Diatomeenblüte im

¹ Feinschichtung mit Einzellagen (Laminen), deren Dicke (Stärke) häufig im Bereich zwischen 0,1 und 1 mm liegt.

² Zur dendrochronologischen Kalibrierung (verkürzt: Dendrokalibrierung) siehe KOTULLA (2019).

Frühjahr) und die tonmineral- und organisch-reiche dunkelfarbige Lage (korrespondierend mit den Ablagerungen im Herbst/Winter). Auch sind Siderit (FeCO_3) und Pyrit (FeS_2) zwischen den zwei Lagen konzentriert (...).“

Weißer Lagen von Diatomeenansammlungen konnten sie unter dem Mikroskop klar erkennen und abzählen. Die typische Dicke eines Paares weißer und dunkler Lagen wurde mit etwas weniger als 1 mm angegeben.

Einen Nachweis der Warvierung erachteten KITAGAWA et al. (1995) durch folgende Feststellungen als erbracht: „Wir bestätigten den jahreszeitlichen Charakter der Feinschichtungen mit: 1) detailliertem Studium der saisonalen Wechsel in der Diatomeen- und Mineralzusammensetzung, 2) mikroskopischen Untersuchung von Dünnschliffen und 3) Beobachtungen an selektierten Lagen mit dem Rasterelektronenmikroskop.“ Dies sind aber lediglich Untersuchungsbausteine. Dieser Aussage (Zitat oben) schloss sich der o. a. Lagenbeschreibung an und es scheint, als erfolgte die saisonale Zuordnung einer selbstverständlichen Regel.

Weitere für die Fragestellung wichtige Daten und ihre Interpretation werden wie folgt zusammengefasst:

- In dem Tiefenbereich 10,42 m bis 30,45 m wurden insbesondere unter Auswertung von 1.500 hochauflösenden Digitalbildern 29.100 „Warven“ ausgewiesen. Details zur „Warven“chronologie sind allerdings nicht veröffentlicht worden.
- Über die in den Ablagerungen zahlreich vorkommenden Pflanzenreste konnte der gesamte Sedimentkern ^{14}C -datiert werden (> 250 Proben). Der obere (jüngere) Teil der schwebenden „Warven“chronologie wurde über die U-Oki-Aschenlage ($10.650 \pm 250 \text{ cal.}^3$ ^{14}C -Jahre BP, etwa 11,63-11,66 m) in die „absolute“ dendrokalibrierte ^{14}C -Zeitskala eingehängt.
- Den 29.100 „Warven“jahren stehen 27.200 ^{14}C -Jahre gegenüber (Tiefe 10,42 m, ca. 7.800 ^{14}C -Jahre BP; Tiefe 30,45 m, ca. 35.000 ^{14}C -Jahre BP); eine Abweichung um bis zu etwa 2000 Modelljahren.
- Die errechneten Sedimentationsraten wurden als jeweils einheitlich beschrieben; für das Holozän 1,2 mm/Jahr, für das Glazial 0,62 mm/Jahr; für den Bereich unterhalb 30,45 m bis 75 m wurde die Sedimentationsrate des Glazials fortgeschrieben. So

ergaben sich rein rechnerisch etwa 110.000 [radiometrische] Jahre (^{14}C und extrapoliert).

Fazit: Der Nachweis einer Warvierung wurde nicht erbracht. Größenordnungsmäßig passt die Anzahl der ausgewiesenen „Warven“ zu den ^{14}C -Jahren.



Abb. 2 Bohrplattform auf dem Suigetsu-See, 2006. Foto: Achim BRAUER/GFZ.

Die Bohrkampagne 2006

Die eingangs erwähnte Pressemitteilung bezieht sich auf eine bereits in 2006 durchgeführte, neuere Bohrkampagne, deren Ergebnisse nun von dem Forschungsteam sukzessive veröffentlicht werden (u. a. BRONK RAMSEY et al. 2012, NAKAGAWA et al. 2012, SCHLOLAUT et al. 2012, KOSSLER et al. 2011, MARSHALL et al. 2012, STAFF et al. 2013). Im Gegensatz zu 1993 sind zur Vermeidung von Kernverlusten vier parallele Kerne gezogen und für eine hochauflösende ^{14}C -Datenreihe insgesamt über 800 ^{14}C -bestimmungen vorgenommen worden. Die nachfolgenden Ausführungen konzentrieren sich hauptsächlich auf die Beschreibung und Interpretation der Feinlamination sowie der Konstruktion der „Warven“chronologie für den Kernbereich von 12,88 m bis 18,15 m Tiefe (SCHLOLAUT et al. 2012, MARSHALL et al. 2012).

I) Beschreibung und Interpretation der Feinlamination – Kein Nachweis von Jahresschichten

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

³ cal.: kalibriert.

- a) Sideritlage⁴ (Frühjahr);
- b) Diatomeenlage (*Aulacoseira* spp.), teilweise Siderit führend (Frühjahr);
- c) Detritische Siltlage aus Quarz und Feldspat (Frühjahr);
- d) Helles amorphes organisches Material (Sommer);
- e) Diatomeenlage (*Encyonema*), teilweise als Basis der Sideritlage, wiederholend auftretend nur im LGIT-Bereich⁵ (Herbst);
- f) Sideritlage (Herbst);
- g) Tonlage, teilweise partiell überlappend mit Sideritlage (Herbst bis Winter).

Daneben werden gemischte, homogene Lagen („mixed layers“) im Submillimeter-Bereich bis 12 mm Dicke beschrieben, die aus Diatomeen sowie organischem, detritischem und diffus-sideritischem Material bestehen. Die konstruierte, idealisierte „Warven“struktur mit 7 Lagentypen wird allerdings nicht beobachtet (S. 55, Text zu Fig. 2): „[Ein, MK] Auffinden von mehr als drei der sieben Typen saisonaler Lagen zusammen ist selten.“ Die am häufigsten auftretende Kombination besteht aus Sideritlagen⁶, die durch gemischte Lagen voneinander getrennt werden. Die Zählung erfolgt zuerst basierend auf Sideritlagen, wenn diese nicht erkennbar sind, auf Basis alternativer saisonaler Lagen.

Vergleich mit KITAGAWA et al. (1995)

Unter Zugrundelegung beider Bohrkampagnen können aus den bisher veröffentlichten Informationen für die Fragestellung 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. weisen einen Jahreszyklus von 2 Lagen mit Einschaltungen von Pyrit

und Siderit aus während SCHLOLAUT et al. einen Idealzyklus aus 7 Lagen konstruieren. Im Gegensatz zu KITAGAWA et al. könnten die Lagen (b) und (g) von SCHLOLAUT et al. als Hauptbestandteile, die restlichen Lagen als Nebenbestandteile bzw. als sekundär auftretend interpretiert werden.

- Der Ausweis/die Zählung der Warven erfolgt bei KITAGAWA et al. primär anhand der hellen Kieselalgenlagen, bei SCHLOLAUT et al. dagegen primär anhand der (dunklen) Sideritlagen.

Zur Grundfrage einer Jahresrhythmik

Ob überhaupt eine Jahresrhythmik vorliegt, wird bei beiden Autorengruppen nicht diskutiert. SCHLOLAUT et al. (2012) gehen von einem präanthropogenen 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 (...)“⁷ Die jahreszeitliche Interpretation der Sedimentbildung von SCHLOLAUT et al. wird nachfolgend diskutiert:

Die „dominierenden“ Sideritlagen, vgl. (a)⁸ und (f), werden als teilweise lateral (seitlich) nicht aushaltend beschrieben. In den Textabbildungen (vgl. SCHLOLAUT et al., ihre Fig. 2 b-d und 6 a-d) erscheinen die wiederkehrenden Sideritan-sammlungen als wolkige Gebilde, die sowohl vereinzelt (auch in den Diatomeenlagen), linsenartig als auch lagig gehäuft auftreten. SCHLOLAUT et al. interpretieren die „jährliche“ Bildung von Siderit unter Bezugnahme auf BAHRIG (1988, 155)⁹ im Zusammenhang mit einem See-

⁴ Siderit: Eisencarbonat, FeCO₃.

⁵ LGIT: Letzter Glazial/Interglazial-Übergang (oberstes Pleistozän/Holozän); umfasst im Konkreten das LGIT-Interstadial, Äquivalent zum nordatlantischen Bölling/Alleröd und das LGIT-Stadial, Äquivalent zur nordatlantischen Jüngeren Dryas.

⁶ 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.“

⁷ „Without this the deposition of the different sediment components was not seasonally separated (...)“ (SCHLOLAUT et al. 2012, 56).

⁸ Darüber hinaus ist festzuhalten, dass die Sideritlagen im „Frühjahr“ (a) eine mehr als untergeordnete Rolle spielen, denn nach MARSHALL et al. (2012, 75) „repräsentieren sie nur einen unwesentlichen Anteil von allen Sideritlagen.“

⁹ „Dynamic model: (...) At times of turnover, oxygen was added to the hypolimnion by mixing of the water masses.“ BAHRIGs favorisiertes Erklärungsmodell (dynamisch) war weder ein „Modell für eine jährliche

Overturn (Vollzirkulation), der sauerstoffreiches Wasser dem Seeboden zuführt.¹⁰ Unter Zugründelegung von Herbststürmen leiten sie so (mit Verweis auf BAHRIG 1988) ihr Siderit-„Herbstbildungsmodell“ ab. Allerdings gilt hier zwischen der vulkanischen und tektonischen Entstehung eines Beckens zu unterscheiden. Denn „die episodische bis rhythmische Ausfällung“ von Siderit im Laacher Seebecken erklärte BAHRIG (1985) mit CO₂-reichen Quellen vulkanischen Ursprungs. Werden alle Modelle von BAHRIG (1985^{11,12}, 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. BAHRIG 1989). Die für die wiederholte Bildung von Siderit notwendigen Intervalle von begünstigender Porenwasserchemie kann durch „saisonale“ Wechsel am Seeboden induziert werden. Doch BAHRIGs¹³ 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 nicht für einen dimiktischen sondern einen polymiktischen See.

Weiter werden von SCHLOLAUT et al. die *Encyonema*-Horizonte (e) als Sturmeinträge, die detritischen Siltlagen (c) als Fluteinträge und die *Aulacoseira*-Lagen (b) als saisonal-ungebundene, primär durch Blüten generierte Einträge interpretiert, sodass diese Lagen allesamt Ereignisse dokumentieren. Die Häufigkeit jedes dieser Ereignisse ist nicht auf ein Kalenderjahr beschränkt, vielmehr ist im Gesamtkontext davon

auszugehen, dass diese Ereignisse mehrmals im Jahr stattgefunden haben.

Die Konzentrationen von *Aulacoseira*-Schalen (b) 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 (d) wird nur unzureichend beschrieben. Die Tonlagen (g) 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 (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

Sideritbildung“, wie sich SCHLOLAUT et al. (2012) formulieren, noch wurde es von ihm als solches bezeichnet. Er interpretierte die ältesten laminierten Sedimente des Laacher Seebeckens (oberstes Pleistozän/Holozän; Dryas 3/Preboreal) als Warvensilte; primär ging es aber um die physikochemischen Bedingungen („formation under these conditions“) und die Quellen der beteiligten Agenzien.

¹⁰ „The observation that siderite layers are related to lake overturn is supported by Bahrig (1988), whose suggested model for annual siderite formation requires mixing of the water body“ (SCHLOLAUT et al. 2012, 54).

¹¹ BAHRIG (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 CO₂-reiche Quellen am Seeboden gab. Das aufsteigende CO₂

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.“

¹² BAHRIG (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 Lagen-couplets als Warven. Siderit tritt im oberen Teil der Grobsiltlage auf; BAHRIG interpretiert als Zeitraum der Bildung Frühjahr/Sommer. – Eine Diskussion der Warvierung erfolgt hier nicht.

¹³ BAHRIG (1989, 146): „(...) which may be related to seasonal changes at the lake bottom (...)“.

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. Da keine jahreszeitliche Prägung vorliegt, kann demgemäß auch keine Zählung von Jahresschichten unternommen werden kann.

II) Einpassung der „Warven“chronologie in den radiometrischen ^{14}C -Altersrahmen

Übereinstimmend beschreiben die Kernbearbeiter die Lückenhaftigkeit der Profile^{14,15} und die Notwendigkeit einer Korrektur. Um jedoch einem Zirkelschluss vorzubeugen, dass mit den ^{14}C -Datierungen die Warvenchronologie korrigiert und anschließend diese korrigierte Warvenchronologie zur Kalibrierung der ^{14}C -Methode eingesetzt wird, schlussfolgern SCHLOLAUT et al. (2012, 53): „Deshalb kann keine Information, die auf die ^{14}C -Chronologie basiert, benutzt werden, um die Warvenzählung zu komplementieren, denn die Warvenchronologie muss vollkommen unabhängig sein.“¹⁶ Für den Profilabschnitt von 12,88 m bis 18,15 m werden zwei „unabhängige“ Methoden dargestellt.

Automatisierte Methode der „Warven“interpolation (SCHLOLAUT et al. 2012)

Die Autoren nehmen an, dass hauptsächlich die gemischten, homogenen Lagen (< 1 mm bis 12 mm Dicke) mehr als ein Jahr repräsentieren. SCHLOLAUTS neu entwickelte „Warven“interpolationsmethode soll zur objektivierten Abschätzung der Bildungsdauer dieser Lagen auf Basis der Sedimentationsraten über- und unterliegenden „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: „Unter Bezugnahme auf das Ziel des SG06-Projektes, die atmosphärische Radiokarbonkalibrierungskurve auf 50 ka cal BP zu erweitern, ist gezeigt worden, dass die Genauigkeit der Interpolation für eine Periode von ≈ 2500 Jahren innerhalb des 68,2 % Wahrscheinlichkeitsbereiches kalibrierter ^{14}C liegt und deshalb als geeignetes Datenmaterial für die Ausweitung der reinen terrestrischen Kalibrierungskurve weiter zurück in die Zeit angesehen wird.“ Damit ist die „Warven“chronologie in die führende ^{14}C -Chronologie eingepasst worden.

Hochauflösende μ -XRF und X-Radiographie (MARSHALL et al. 2012)

Mit der Mikroröntgenfluoreszenzanalyse (μ -RFA, μ -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 erstellt. Dabei erzeugen hellere Lagen entsprechend ihrem Grad der Oberflächenreflexion Positiv-Ausschläge.

Für die XRF-Zählung orientierten sich die Autoren an den „Herbst“-Sideritlagen.¹⁷ 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

¹⁴ „Die mikroskopische Analyse zeigte, dass die warvierte Sedimentfolge durch eine unvollständige Ausbildung oder Erhaltung von jährlichen Laminæ eingeschränkt ist und eine Interpolation notwendig macht“ (SCHLOLAUT et al. 2012).

¹⁵ „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).

¹⁶ „Therefore no information based on the ^{14}C chronology can be used to complement the varve count as the varve chronology must be completely independent“ (SCHLOLAUT et al. 2012, 53)

¹⁷ „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).

Qualitätsstufen 1-4) mehr ausgewiesen, in Summe also etwa 6.200 (vgl. MARSHALL et al., Fig. 5). Nach Modell-Korrekturen werden abschließend etwa 6.100 „Warven“-jahre ausgewiesen; die Anzahl deckt sich bemerkenswert gut mit SCHLOLAUT et al. Als Hauptgrund der Differenz (+ 88 %) wird angegeben, dass die kleineren Spitzen geochemischer Signale im Submillimeter-Bereich keine Entsprechung in den Dünnschliffen besitzen.¹⁸ 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): „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.“¹⁹ Dies ist ein recht schwaches Bekenntnis zu der Tatsache, dass nur durch eine zielgerichtete Vorgabe und einer damit verbundenen Auflösungseinstellung der Apparatur²⁰ das gewünschte Ergebnis erzielt werden kann. So wirkt auch der methodische Hinweis unter der Rubrik „Terminologie“ seltsam und geht im Artikel unter (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.“²¹

III) Zirkelschluss

Auffallend ist, dass MARSHALL et al. (2012) im Textteil ihres Artikels nicht einmal die Gesamtzahl ihrer XRF-Zähler für den untersuchten Profilschnitt 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 Abbildung 11a mit Abbildung 5 (MARSHALL et al.) wird deutlich, dass zwischen der Suigetsu-Chronologie auf Basis der mikroskopischen Zählung der „Warven“ und der ¹⁴C-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.) und die Signalinterpretation der Elementprofile der Mikroröntgenfluoreszenzanalyse (MARSHALL et al.) angepasst.

Der gewählte LGIT-Bereich (oberstes Pleistozän/Holozän) ist nicht von ungefähr. Ziel war es, im Endbereich der dendrokalibrierten ¹⁴C-Kurve (etwa Skalenabschnitt von 10.500 bis 12.550 kalibrierte ¹⁴C-Jahre BP) eine Synchronisation mit IntCal09 herzustellen und methodisch die vorgenommenen Anpassungen auf die folgenden älteren Abschnitte zu extrapolieren.

Der vermeintlich ungewollte Zirkelschluss²² 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“

¹⁸ „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).

¹⁹ „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).

²⁰ „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).

²¹ „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.“

²² „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)

aus den ^{14}C -Datierungsergebnissen. Das auf diese Weise mit dieser Vorgabe gewonnene Ergebnis wird mit dem „Master“ verglichen und – was zu erwarten war – eine Übereinstimmung festgestellt: „Um die Zuverlässigkeit der Technik zu überprüfen wird das Ergebnis mit der ^{14}C -Chronologie verglichen; der Vergleich zeigt, dass die Genauigkeit der Interpolation innerhalb der 68,2 % der kalibrierten ^{14}C -Daten liegt und dass es deshalb in Betracht kommen kann für eine Kalibrierung jenseits des bestehenden Baumringlimits.“

In einer Abstraktions-Stufe werden sodann die ^{14}C -Datierungsergebnisse in eine vermeintlich unabhängige²³, von der „Warvenzählung“ und den Modellierungen (s. o.) abgeleitete Zeitskala (Suigetsu-Chronologie) eingehängt; so BRONK RAMSEY (2012, 370): „(...) 651 ^{14}C -Datierungen (...) angebunden an eine Zeitskala, die von der Warvenzählung und zeitlicher Eingrenzungen anderer Berichte abgeleitet wurde.“

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Die Untersuchung der Bohrkern war theorie- und zielgeleitet, der Projektname „Lake Suigetsu 2006 Varved Sediment Core“²⁴ 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 polymikten Sees zu deuten. Da demzufolge keine (echten) Warven ausgewiesen werden können, können auch keine Jahre abgezählt werden.

Die konstruierte „Warven“chronologie ist nicht unabhängig entwickelt worden; sie wurde in den ^{14}C -Altersrahmen eingepasst. Die „50.000 Jahre“ basieren nicht auf eine Abzählung von (echten) Jahresschichten bzw. einer jahreszeitlichen Auflösung. Die „50.000 Jahre“ werden von den ^{14}C -Jahren abgeleitet und mit Kalenderjahren gleichgesetzt, obwohl nicht bekannt ist, in welchem Verhältnis ^{14}C -Alter dieser Größenordnung zu realem Alter stehen.

Literatur

- 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.
- 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.
- Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ (2012) Schärferer Blick zurück für die Archäologie und Klimaforschung. Pressemitteilung vom 19. 10. 2012.
<https://www.gfz-potsdam.de/medien-kommunikation/meldungen/detailansicht/article/einschaerferer-blick-zurueck-fuer-die-archaeologie-und-klimaforschung/>
- KITAGAWA H, FUKUSAWA H, NAKAMURA T, OKAMURA M, TAKEMURA K, HAYASHIDA A & YASUDA Y (1995) AMS ^{14}C dating of varved sediments from Lake Suigetsu, central Japan and atmospheric ^{14}C change during the late Pleistocene. In: COOK GT, HARKNESS DD, MILLER BF & SCOTT EM (eds.) *Proceedings of the 15th International ^{14}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}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.
- KOSSLER A, TARASOV P, SCHLOLAUT G, NAKAGAWA T, MARSHALL M, BRAUER A, STAFF R, BRONK RAMSEY C, BRYANT C, LAMB H, DEMSKE D, GOTANDA K, HARAGUCHI T, YOKOYAMA Y,

²³ „It provides good relative chronological precision and has the advantage of being independent of other dating techniques“ (BRONK RAMSEY 2012, 370).

²⁴ <http://www.suigetsu.org/#:~:text=Suigetsu%20%3E%20Home,central%20Japan%2C%20in%20summer%202006.>

- YONENOBU H & TADA R (2011) Onset and termination of the lateglacial climate reversal in the high-resolution diatom and sedimentary records from the annually laminated SG06 core from Lake Suigetsu, Japan. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 306, 103-115.
- KOTULLA M (2019) Verkohlte Baumstämme in Tephra-Ablagerungen des Laacher-See-Vulkans: neue Radiokarbon-Bestimmungen und ihre Altersinterpretation. W+W Special Paper G-19-1, Baidersbronn.
https://www.wort-und-wissen.org/wp-content/uploads/g-19-1_radiokarbon.pdf
- 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.
- 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.
- NAKAGAWA T, KITAGAWA H, YASUDA Y, TARASOV PE, GOTANDA K & SAWAI Y (2005) Pollen/event stratigraphy of the varved sediment of Lake Suigetsu, central Japan from 15,701 to 10,217 SG kyr BP (Suigetsu varve years before present): description, interpretation, and correlation with other regions. *Quaternary Science Reviews* 24, 1691-1701.
- Schlola 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.
- 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.
- und Blattnummer: Verweis auf andere Beiträge der Online-Loseblattsammlung.
- Zur Ergänzung → 3-01, 3-10, 3-20, 5-01, 6-01.

3-40 Das Eckfelder Maar und seine laminierten Sedimentgesteine

Weder Jahresschichtung noch 250.000 Jahre Bildungsdauer der Seesedimente nachgewiesen

Fossilfundstätte Eckfelder Maar

Seit über 30 Jahren werden im Eckfelder Trockenmaar (Abb. 1), 3 km nordöstlich Manderscheid (Eifel), durch naturkundliche Grabungen exzellent erhaltene Fossilien geborgen, neben zahlreichen Pflanzen und Wirbellosen auch Fische, Amphibien, Reptilien, Vögel und Säuger. Die biostratigraphische Alterseinstufung der Fossilfundstätte erfolgt nach der Gliederung auf Basis des „Evolutionstandes der Urpferde“. Mit der Bergung eines vollständigen Skeletts einer trächtigen „Ur“-pferd-Stute (*Propalaeotherium voighti*) in 1991 wird das isolierte Eckfelder Tertiär-Vorkommen entsprechend der europäischen Landsäugetier-Stratigraphie in die Zone MP13 gestellt (oberes Geiseltalium, mittleres Eozän). Nach dieser Gliederung ist es jünger als das ebenfalls isolierte mittel-eozäne Messel¹-Vorkommen (MP11, unteres Geiseltalium). Das namengebende Geiseltal, die bekannte Braunkohlen- und Fossilagerstätte westlich Leipzig, umfasst die Stufen MP11 bis MP13 (FRANZEN 2005).

Besonders bemerkenswert ist, dass (die) eine radiometrische Datierung an einem Alkalibasalt aus 64,7 m Bohrtiefe (Bohrung 1996) ein $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -Alter von $44,3 \pm 0,4$ Millionen [radiometrische] Jahre lieferte (MERTZ et al. 2000) und damit das biostratigraphisch geschätzte Alter der Fossilfundstätte von 44-45 Millionen [radiometrischer]² Jahre bestätigte (FRANZEN 1993).

Die durch phreatomagmatische Explosion(en) katastrophisch entstandene trichterförmige Hohlform wurde während oder unmittelbar nach der Eruption teilverfüllt. Das so entstandene Becken (Durchmesser etwa 1000 m, Tiefe etwa 200 m) wurde rasch mit Wasser aufgefüllt.

Aufgrund seiner Morphologie und Instabilität wurde es zu einer Sediment- und Organismen-falle bis es schließlich verlandete.



Abb. 1 Eckfelder Maar. Grabungsfeld 2009. Foto: Unokorno (Wikimedia Commons, CC-BY-SA-3.0), Ausschnitt.

Die Bohrung von 1996 – Kein Nachweis von Jahresschichten

In einer Bohrkampagne 1996 wurde das Eckfelder Maar im Beckenzentrum bis 123 m erschlossen. MINGRAM (1994, 1997, 1998) sowie VOS & MINGRAM (2002) halten eine Warvenbildung, eine jahreszeitlich geprägte Sedimentation, im ehemaligen Eckfeld-See für wahrscheinlich.³ Unter dieser Annahme würde sich bei der erbohrten Mächtigkeit der Laminitfolge von ca. 40 m und einer Dicke einer Hell-Dunkel-Wechselfolge von etwa 0,4 bis 0,5 mm eine theoretische Sedimentationsdauer von etwa 80.000 Jahren⁴, bei einer angenommenen Gesamtmächtigkeit (zzgl. des erodierten Anteils) von etwa 100 m eine theoretische

¹ Zum Messeler Ölschiefer und der Fragestellung einer jahreszeitlich geprägten Ablagerung siehe KOTULLA (2015).

² Der Verfasser nimmt an, dass dieser Schätzung eine Interpolation auf Basis radiometrischer Datierungen zu Grunde liegt.

³ Auf der Website <http://www.eckfelder-maar.de/> heißt es: „Der Ölschiefer wurde im Jahresrhythmus gebildet.“

Bei seiner feinen, durchschnittlich 0,4 mm dicken Hell-Dunkel-Schichtung handelt es sich um sogenannte Warven, die jeweils ein Jahr repräsentieren“ (Zugriff 08/2020).

⁴ Vgl. auch <http://www.maarmuseum.de/Eckfeld.htm> und <http://www.maarmuseum.de/pdf/eckfeld.pdf> (Zugriff 08/2020).

Sedimentationsdauer von etwa 250.000 Jahren ergeben.

Die Untersuchungen von BULLWINKEL (2003), der das Kernprofil sedimentologisch, mikrofaziell und organisch-petrologisch bearbeitete, ergaben dagegen „keine Hinweise auf ein jahreszeitlich induziertes Sedimentationsmuster im ehemaligen Eckfeld-See.“⁵ Er interpretiert die Sedimentationsprozesse insbesondere im Lichte einer post-eruptiven Krater- und Beckengenese. Die fünf von ihm ausgewiesenen lithologischen Einheiten (im oberen Teil mit drei entsprechenden lithofaziellen⁶ Zonen) entsprechen somit auch fünf Entwicklungsphasen (Tab. 1).

BULLWINKEL (2003) zieht u. a. folgende Schlüsse:

- „In den (...) Lithofazieszonen 1 und 2 sind die Seeablagerungen durch einen signifikanten siliziklastischen Eintrag und häufige Resedimentationsereignisse gekennzeichnet. Das Sedimentationsgeschehen wurde in dieser frühen Seephase maßgeblich durch eine noch steile Beckenmorphologie und die Nähe eines un- oder lediglich spärlich bewachsenen Tephrawalls als Sedimentquelle gesteuert. Es ist somit von einer starken Überprägung möglicher Klimasignale durch chaotisch periodische Sedimenteinschüttungen auszugehen“ (S. 94).
- „Insgesamt belegen die sedimentologischen und organisch petrologischen Befunde den sich kontinuierlich verringern den Eintrag von organischem Detritus und Fremdgesteinsfragmenten. Dieses kann auf eine fortschreitende Stabilisierung der Kraterwände durch eine geschlossene Pflanzendecke zurückgeführt werden (BULLWINKEL & RIEGEL 2001). (...) Innerhalb der MFZ 3d äußert sich der progressive Reliefausgleich ebenfalls in der Zusammensetzung des überlieferten Pollenspektrums. Der regelmäßige Nachweis von Chloranthaceen-, Restionaceen- und Cyperaceen-Pollen spricht für eine Besiedlung der Seeränder durch eine teils

krautige Ufervegetation (NICKEL, frdl. schriftl. Mitt. 2001)“ (S. 93).

- „Auch für die mitteleozänen Seeablagerungen von Eckfeld lässt die vertikale Verteilung weder der Primärproduzenten noch der Sporomorphen Rückschlüsse auf eine Jahresrhythmik zu (NICKEL 1996, CLAUSING 2001)“ (S. 96).
- „Die mikrofaziellen und organisch-petrologischen Untersuchungen ergaben keine Hinweise auf ein jahreszeitlich induziertes Sedimentationsmuster im ehemaligen Eckfeld-See. Vielmehr scheinen die Alternationen aus Diatomeenlagen und organisch-reichen Tonhorizonten innerhalb der MFZ 3b: Aulacoseira-Fazies [1,4 m mächtig; nur für diesen Teilabschnitt hält er ein klimagesteuertes Sedimentationsmuster für möglich, MK], eine supersaisonale Zyklizität im Wechsel von regenreichen und regenarmen Jahren abzubilden“ (S. 104).

Kurze Bildungsdauer der Seesedimente

BULLWINKELS Interpretation der Beckengenese und der Sedimentationsgeschichte des Eckfelder Maars lässt indirekt auf eine kurze Dauer der Sedimentbildung, möglicherweise auch bis zur Verlandung, schließen. Eine erste (nachhaltige) Besiedlung der Seeränder durch krautige Ufervegetation (MFZ 3d) ist mit dem unteren Teil der Lithofazieszone 3 (vgl. Phase V in Tab. 1) korreliert; ein von Wald umstandener See (MFZ 3e) erst mit dem mittleren Teil der Lithofazieszone 3. In dem angenommenen tropischen/subtropischen Klima ist davon auszugehen, dass solch eine geschlossene Pflanzendecke in Jahren bis Jahrzehnten entsteht. Ein im Wesentlichen andauernder hoher klastischer Sedimenteintrag ergibt sich aus den hohen Niederschlägen mit Regen- bzw. Starkregen-Ereignissen (Auswaschung des Kraterandes und Tephrawalls), Bergsturz-Ereignissen durch weiter auftretende (im Vergleich kleiner dimensionierter) Uferabbrüche infolge von Kraterinstabilitäten und einer

⁵ Ein gleiches Ergebnis bei NICKEL (1996, 2): „Die Verteilung der Palynomorphen in hellen und dunklen Lagen weist auf genetische Zusammenhänge mit den turbiditischen Bereichen des Profils hin. Die relative Anreicherung der Botryococcus-Kolonien in den hellen Laminæ ist daher, besonders in Bezug auf die on der palynofaziellen Untersuchung des Profils Eckfeld 3 erzielten Ergebnisse, nicht als Algenblüte zu verstehen. Damit

kann eine jahresrhythmische Bildung der hier bearbeiteten Laminite so gut wie ausgeschlossen werden.“

⁶ Fazies: Charakterisierende Ausbildung; lithofazielle Zone: Ausgliederung von Gesteinseinheiten mit in der Nacheinanderfolge (Zone) charakteristischen, wiedererkennenden Merkmalen.

⁷ MFZ = Mikrofazieszone; Ausgliederung durch vorwiegend mikroskopische Beobachtung und Beschreibung, beispielsweise an Gesteinsdünnschliffen.

temporären (?) Anbindung an ein Gewässernetz (Phase V). Der organische Detritus resultiert hauptsächlich von Diatomeenblüten. Diese Ereignisse können dutzend- bis hundertfach pro Jahr stattgefunden haben. Die unterschiedliche Ausprägung der Sedimente (Resedimente,

Turbidite, Turbidit-Laminite/Laminite⁸) im Beckeninneren erklärt sich aus bodennahen Transport (Trümmer- und Trübestrome) und Transport in Suspension (Niederschläge) und deren Wechselwirkungen und Überlagerungen.

Teufe [m] E1/96	Gliederung Beschreibung (B) Interpretation (I): See bzw. Becken (S), Umgebung (U) [...]¹: nach Fischer (1999)	Phase
5,00 - 33,15	"Biogene Laminite" (Lithofazieszone 3), [Schwarzpelit]¹ B: Abnahme siliziklastischer Einschaltungen, deutlicher Anstieg der organischen Sedimentkomponente; diatomeenreiche Horizonte ab Bohrmeter 31,8 I (U): fortschreitende Stabilisierung der Kraterwände durch geschlossene Pflanzendecke; periodische Anbindung an ein Gewässernetz (Funde von Flußmuscheln und Schnecken)	V
33,15 - 37,67	"Übergangsschichten" (Lithofazieszone 2), [Laminite, minerogen]¹ B: pyritreiche Sedimente, organisch-reiche Laminite und Konglomerat (2,6 m mächtiges Resediment); erster Nachweis huminitischen Detritus I (S): meromiktische Seephase, in Initialphase offensichtlich lebensfeindliches Habitat I (U): spärliche Besiedlung des Tephrawalls, periodische Uferabbrüche teils erheblichen Ausmaßes	IV
37,67 - 41,30	"Minerogene Laminite" (Lithofazieszone 1), [Laminite, minerogen]¹ B: vorwiegend grobklastische Resedimente (70%); äußerst seltener Nachweis organischer Partikel I (S): subaquatisch; grobkörnige Ereignislagen und feinkörnige Sedimentsuspension; millimeter- bis zentimetermächtige Turbidite (Feinschichtung) I (U): unbewachsener Tephrawall, hohe Reliefenergie entlang der steilen, instabilen Kraterinnenwände, Auswaschung des Kraterandes durch starke Regenfälle (Pirring 1998), Winderosion	III
41,3 - 71,2	B: ca. 30 m Nebengesteinsreiche Brekzien mit zwischengeschalteten gradierten Kies/Pelit-Lagen, [Gradierungen und Schutt]¹ I (S): subaerische Schuttströme, subaquatisch (Zwischenschichten, Anteil ca. 10%)	II
71,2 - 123,1	B: ca. 50 m matrixfreie, devonklastenreiche Brekzien, [lithologisch variable (bis 113 m)/monotone (ab 133 m) Breccien, Schutt]¹ I (S): subaerische Fall- und Trümmerstromablagerungen (Pirring 1998, Fischer 1999), vermutlich syneruptiv I (U): Hohe Instabilität des Kraters, gravitativ gesteuerte Massenverlagerungen (Büchel 1993)	I

Tab. 1 Eckfelder Maar: Gliederung, Lithologie, Beckengenese und Sedimentationsgeschichte (Bohrung E1/96), zusammengestellt nach BULLWINKEL (2003), Phasen durch Verfasser ergänzt.

Fazit

Die laminieren Sedimente des Eckfelder Maars sind Ereignis-induziert; sie zeigen keine jahreszeitliche Prägung (Warvierung, Warvenbildung). Die Beckenverfüllung in Korrelation mit der Vegetationsentwicklung des Seeumlandes lässt auf eine kurze Sedimentbildungsdauer schließen, die um Größenordnungen geringer ist im Vergleich zu den ausgewiesenen zehntausenden bis hunderttausenden Jahren.

Literatur

BÜCHEL G (1993): Maars of the Westeifel, Germany.
In: NEGENDANK J F W & ZOLTITSCHKA B (eds.)
Paleolimnology of European Maar Lakes.

Lecture Notes in Earth Sciences 49, 1-13.

BULLWINKEL V (2003) Organische Petrologie und Mikrofazies der mitteleozänen Seesedimente des Eckfelder Maars (Südwesteifel). Diss., Göttingen.

BULLWINKEL V & RIEGEL W (2001): The Laminated Lake Sediments of the Eckfeld Maar (Middle Eocene, Germany): Types of Stratification and Role of Organic Matter. *Facies* 45, 165-176.

CLAUSING A (2001) Primärproduktion und Laminationsbildung ausgewählter lakustriner Environments im Tertiär und Permokarbon Deutschlands. – Hallesches Jahrb. Geowiss., Reihe B, Beiheft 14, 1-183.

FISCHER C (1999) Grobklastika im mitteleozänen Eckfelder Maar (Südwesteifel): Sedimentologische und petrographische Analyse. *Mainzer naturwiss. Archiv* 37, 21-54.

⁸ NICKEL (1996, 102) interpretiert die Laminite als höchsten Teil einer Bouma-Sequenz (Turbidit-Sequenz); analog LUTZ (1993).

- FRANZEN JL (1993) Das biostratigraphische Alter der Fossilagerstätte Eckfelder Maar bei Manderscheid (Eifel). Mainzer naturwiss. Archiv 31, 201-214.
- FRANZEN JL (2005) Warum Geiseltalium? Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg 255, 77-79.
- KOTULLA M (2015) War der Messelsee ein Kurzzeitsee? Studium Integrale Journal 22, 106-110.
<http://www.si-journal.de/jg22/heft2/sij222-9.pdf>
- MERTZ DF, SWISHER CC, FRANZEN JL, NEUFFER FO & LUTZ H (2000) Numerical dating of the Eckfeld maar fossil site, Eifel, Germany: a calibration mark for the Eocene time scale. Naturwissenschaften 87, 270-274.
- MINGRAM J (1994): Sedimentologie und Zyklizität laminierter eozäner Ölschiefer von Eckfeld/Eifel. In: NEUFFER FO, GRUBER G & LUTZ H (Hrsg.) Fossilagerstätte Eckfelder Maar. Mainzer naturwiss. Archiv, Beiheft 16, 55-86.
- MINGRAM J (1997): Eckfeld Dry Maar Sediments. Terra Nostra 8: 7th International Symposium on Paleolimnology, Excursion Guide: B60-B65.
- MINGRAM J (1998): Laminated Eocene maar-lake sediments from Eckfeld (Eifel region, Germany) and their short-term periodicities. Palaeogeogr., Palaeoclimat., Palaeoecol. 140, 289-305.
- NICKEL B. (1996): Die mitteleozäne Mikroflora von Eckfeld bei Manderscheid/Eifel. – Mainzer naturwiss. Archiv, Beiheft 18, 1-146.
- PIRRUNG BM (1998): Zur Entstehung isolierter alttertiärer Seesedimente in Zentraleuropäischen Vulkanfeldern. Mainzer naturwiss. Archiv, Beiheft 20, 1-117.
- VOS H & MINGRAM J (2002): Solare Fingerabdrücke in eozänen Laminiten aus dem Eckfelder Maar. GEO 2002, Programm und Kurzfassungen. Schrifter. Dtsch. Geol. Ges. 21, 342.

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

Zur Ergänzung → 3-01, 3-10, 3-20, 3-21.

4-01 Radiometrische Methode – Übersichtsblatt

(langlebige radioaktive Isotope)

Sinngleiche und verwandte Begriffe

Radiometrische Datierung, radiometrische Altersbestimmung, Langzeitdatierung.

Ziel

Versuch, den radioaktiven Zerfall ausgewählter Radioisotope zur Altersbestimmung geologischer Objekte zu nutzen; z. B. Bestimmung der verfloßenen Zeit seit Bildung eines Minerals.

Grundlagen

Verständnis des Phänomens Radioaktivität; Messbarkeit der beteiligten Größen.

Vorgehensweise

Ermittlung der für das jeweilige Verfahren maßgeblichen Isotopenmengen und Isotopenverhältnisse sowie Auswertung. Mit Kenntnis der mittleren (aktuellen) Zerfallsrate bezogen auf die jeweilige Ausgangsmenge (Zerfallskonstante, Halbwertszeit) Berechnung des jeweiligen Isotopenalters.

Die für die *Geologic Time Scale 2012* (GTS2012, GRADSTEIN et al. 2012; → 2-03) anerkannten Methoden sind das U-Pb-, das $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ - und das Re-Os-Verfahren (Tab. 1).

Basisannahme(n)

1. Unveränderlichkeit der Zerfallskonstante während der gesamten Vergangenheit und in jeder Umgebung.
2. Kenntnis der Ausgangsbedingungen, u. a. der initialen Isotopenmengen und Isotopenverhältnisse (bei der Bildung eines Minerals).
3. Vorliegen eines geschlossenen Systems; keine Veränderung der Isotopenmengen als durch den spezifischen radioaktiven Zerfall selbst.

Historie

Entdeckung der Radioaktivität (BECQUEREL 1896); erste publizierte radiometrische Datierungen (BOLTWOOD 1907); Begründer und Protagonist der geologischen Zeitskala (HOLMES 1913 ff).

Anwendung

Geologie. Zeitliche Eichung der Internationalen Chronostratigraphischen Tabelle anhand ausgewählter radiogener Isotopenalter; Konstruktion der geologischen Zeitskala (GTS).

Angabe/Größenordnung der Ergebnisse

Die ermittelten Isotopenalter für die GTS2012 liegen vorwiegend in einem Bereich von Millionen oder Milliarden Isotopenjahren. Beispiel: Perm/Trias-Grenze (Meishan, China); Zirkone von zwei vulkanischen Aschenlagen unmittelbar über und unter der Grenze (BURGESS et al. 2014):

- Gewichtete mittlere $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ -Alter von $251,941 \pm 0,037$ sowie $251,880 \pm 0,031$ Millionen [Isotopen-] Jahre (untere bzw. obere Lage).

Altersbestimmungsverfahren

Anspruch: Unabhängig und absolut.

Gültigkeit (der Ergebnisse)

a) Absolute Altersbestimmung

Nicht bekannt. Es ist nicht bekannt, in welchem Verhältnis die radiometrischen Alter zum realen Alter stehen.

Der Nachweis der Basisannahme (1) konnte bisher nicht erbracht werden.¹ Die Unkenntnis der Ausgangsbedingungen wird umgangen durch Annahme von Bildungskonditionen (u. a. visualisiert im Isochronen-Diagramm), diese Konstruktion allerdings kann Basisannahme (2) nicht ersetzen bzw. erfüllen. Auch Basisannahme (3) kann abschließend nicht überprüft werden; für die unterschiedlichen Fallkonstellationen haben sich zahlreiche Interpretationsmuster etabliert.

Des Weiteren kann die radiometrische Methode nicht durch ein anderes unabhängiges Altersbestimmungsverfahren verifiziert (bestätigt) werden. Punktuell kann aufgezeigt werden, dass die radiometrisch begründete Bildungsdauer von Sedimentgesteinsfolgen um 6-7 Größenordnungen höher ist als die geologisch-sedimentologisch begründete Bildungsdauer (KOTULLA 2020).²

b) Relative Altersbestimmung

Eingeschränkt gegeben.

Unter strenger Beachtung der Probenentnahme und ihrer stratigraphischen Stellung scheint eine Relation Zunahme des relativen Alters zu Zunahme des Isotopenalters gegeben.

¹ Beobachtungen und Stress-Untersuchungen haben bisher keine signifikanten Veränderungen der rezenten Zerfallskonstanten gezeigt.

² Geologisch-sedimentologische Indikation nach Interpretation des Verfassers. Unter der Voraussetzung, dass z. B. U-Pb-Alter „absolute Zeit“ (SCHMITZ 2012), d. h. Real-Zeit in Kalenderjahren repräsentieren.

Radioisotop	Zerfalls-konstante λ	$\pm$ Unsicher-heit*	Referenz	$\pm$ Unsicher-heit	Halbwerts-zeit** $T_{1/2}$	$\pm$ Unsicher-heit*
	[Ga ⁻¹]	[Ga ⁻¹]		[in Prozent]	[Ga]	[Ga]
²³⁸ U	0,155125	0,00016		0,1031	4,468314	0,004609
²³⁵ U	0,98571	0,00012	Mattinson (2010) Schoene et al. (2006)	0,0122	0,703196	0,000086
²³⁵ U (nicht mehr benutzt)	0,98485	0,00134	Jaffey et al. (1971)	0,1361	0,703810	0,000958
⁴⁰ K (total)	0,5463	0,0107		1,9586	1,268803	0,024851
¹⁸⁷ Re	0,016689	0,000031		0,1858	41,533176	0,077148

Tab. 1 Angewendete (aktuelle) Zerfallskonstanten in GTS2012 zur Berechnung radiometrischer Alter (nach GRADSTEIN et al. 2012, Table 6.2, und ergänzt). Ga = Gigajahre = 10⁹ Jahre; * 2-sigma (95 % Konfidenz); ** Umrechnung nach $T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$.

Kritik und Handlungsbedarf

Die Isotopenalter werden von der geowissenschaftlichen Gemeinschaft inzwischen fast ausnahmslos als reale Alter bzw. reale Zeitrahmen dargestellt und kommuniziert; dies ist in Anbetracht der unsicheren Erkenntnisse (s. o.) eine gravierende Grenzüberschreitung. Bei der Kommunikation der Alterswerte gegenüber dem Bildungswesen und der breiten Öffentlichkeit ist auf wissenschaftlich korrekte Darstellung zu achten, insbesondere sind Angaben zu den konkreten Datierungsmethoden, Einheiten, Bedingungen, Annahmen, Schlüssen etc. vorzunehmen. Wegen den weitreichenden Auswirkungen auf das gesellschaftliche Leben sind Entscheidungsträger und Öffentlichkeit aktiv und vollumfänglich über die Gültigkeit der Ergebnisse radiometrischer Altersbestimmungen aufzuklären.

Literatur

- BECQUEREL AH (1896) Émission de radiation nouvelles par l'uranium métallique. Comptes Rendus de l'Académie des sciences 122, 1086-1088.
- BOLTWOOD B (1907) The Ultimate Disintegration Products of the Radio-active Elements. Part II. The disintegration products of uranium. American Journal of Science 134, 77-88.
- BURGESS SD, BOWRING S & SHEN S (2014) High-precision timeline for Earth's most severe extinction. PNAS 111, 3316-3321.
- GRADSTEIN FM, OGG JG, SCHMITZ MD & OGG GM (2012) The Geologic Time Scale 2012. Volume 1/2, Oxford Amsterdam.
- HOLMES A (1913) The Age of the Earth. London.
- HOLMES A (1927) The Age of the Earth. London.
- HOLMES A (1937) The Age of the Earth. Enlarged and rewritten, second ed., London.
- JAFFEY AH, FLYNN KF, GLENDENIN LE, BENTLEY WC & ESSLING AM (1971) Precision measurement of half-lives and specific activities of ²³⁵U and ²³⁸U. Physical Review C 4, 1889-1906.
- KOTULLA M (2020) Bentonit-Horizonte in paläozoischen Sedimentfolgen: Tephrostratigraphie und

U-Pb-Altersbestimmungen mit magmatogenen Zirkonen. W+W Special Paper G-20-1, Baidersbrunn.

https://www.wort-und-wissen.org/wp-content/uploads/Bentonit-Horizonte_G-20-1.pdf

MATTINSON JM (2010) Analysis of the relative decay constant of ²³⁵U and ²³⁸U by multi-step CA-TIMS measurements of closed-system natural zircon samples. Chemical Geology 275, 186-198.

SCHMITZ MD (2012) Radiogenic Isotopic Geochronology. In: GRADSTEIN FM, OGG JG, SCHMITZ MD & OGG GM (Eds.) (2012) The Geologic Time Scale 2012. Volume 1/2, Oxford Amsterdam, 115-126.

SCHOENE B, CROWLEY J, CONDON D, SCHMITZ M & BOWRING S (2006) Reassessing the uranium decay constants for geochronology using ID-TIMS U-Pb data. Geochimica et Cosmochimica Acta 70, 426-445.

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

Zur Ergänzung → 4-03, 4-09, 4-10, 4-21, 4-22.

4-03 U-Pb-Altersbestimmung – Übersichtsblatt

Vorbemerkung: Dieses Blatt bezieht sich auf eine für die Erstellung der Geologischen Zeitskala 2012 (GTS2012; GRADSTEIN et al. 2012) relevante Methode. Die Zusammenstellung basiert in Teilen auf FAURE & MENSING (2005) und SCHOENE (2014). Zu einer Diskussion von U-Pb-Altersbestimmungen siehe KOTULLA (2020).

System

U-(Th)-Pb-System.

Ziel, Grundlage, Vorgehensweise,

Basisannahme(n)

→ 4-01; Anhang 1 (unten).

Historie (Anwendung für geologische Zeitskala)

HOLMES (1911, 1913), U-Pb- und U-He-Alter (geochemische Gesamtgesteinsanalysen).

Altersbestimmungsverfahren

Anspruch: unabhängig und absolut.

Natürlich vorkommende Uranisotope

^{238}U (99,27%), ^{235}U (0,72%), ^{234}U (0,0055%) und ^{236}U (Spuren).

Natürlich vorkommende Bleisotope

^{204}Pb (1,4%), $^{206}\text{Pb}^*$ (24,1%), $^{207}\text{Pb}^*$ (22,1%) und $^{208}\text{Pb}^*$ (52,4%); *mit radiogener Komponente aus dem (unabhängigen) Zerfall von ^{238}U , ^{235}U und ^{232}Th .

Zerfallsmechanismus (Kurzform)

$^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb} + 8\alpha + 6\beta^- + \text{Q}$; Q = 47,4 MeV/Atom.

$^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb} + 7\alpha + 4\beta^- + \text{Q}$; Q = 45,2 MeV/Atom.

Jeweils unter der Voraussetzung eines geschlossenen Systems und eines Dauergleichgewichtes.

(Aktuelle) Zerfallskonstanten

Letztes Zählexperiment: JAFFEY et al. (1971); → 4-09.

U-Pb-Datum und -Alter

Die durch die Gleichungen (3) und (4) (→ 4-09) ermittelten $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ -, $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - und abgeleitet $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ -Daten werden erst durch (geologische) Interpretation zu Altern (z. B. Kristallisations-, Eruptions- oder Abkühlungsalter).¹

Anwendung

Terrestrische und extraterrestrische Minerale (und Gesteine).

Bevorzugte (uranhaltige) Analyse-Minerale

Zirkon (ZrSiO_4 ; für $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$), untergeordnet

Monazit (ThPO_4 ; für $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$); für das Phanerozoikum primär aus (umgewandelten) vulkanischen Aschenlagen gewonnen, die Sedimentfolgen zwischengeschaltet sind (z. B. KOTULLA 2020).

Zirkon-Kristallisation

Ggf. Substitution von Zr durch U und Th (ähnliche Ionenradien): Zr^{4+} (0,87 Å), U^{4+} (1,05 Å), Th^{4+} (1,10 Å). Eine Substitution durch Pb^{2+} (1,32 Å) wird ausgeschlossen², Pb^{4+} allerdings hat einen vergleichbaren Ionenradius (0,78-0,94 Å).

Messtechniken

- Thermo-Ionen-Massenspektrometrie (TIMS, thermal ionization mass spectrometry) in Verbindung mit Isotopenverdünnung (isotope dilution, ID-TIMS) oder chemischer Abradierung (chemical abrasion, CA-TIMS).
- Sekundär-Ionen-Massenspektrometrie (SIMS, secondary ion mass spectrometry).
- Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma nach Laserablation (LA-ICPMS, laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry).

Unsicherheiten (nichtanalytisch, „geologisch“)

Diskordanz-Phänomene (synonym mit Verhalten im offenen System); Ursachen häufig nicht bekannt): Vermengung unterschiedlicher „Alters“-Domänen (z. B. zonar aufgebauter Zirkon mit einem „älteren“ Kern); Pb-Verlust; Ungleichgewicht der Zwischenprodukte (Fraktionierung während der Kristallisation oder bei partieller Aufschmelzung); initiales Pb; Mobilität des Urans unter oxidierenden Konditionen (Wasserlöslichkeit der Uranyl-Ionen, $[\text{UO}_2]^{2+}$).

Regulative

Stratigraphie (relative Altersfolge der Gesteinskörper); globale und korrelierbare (isochrone) Zeitmarken (i. d. R. biostratigraphische Bindung).

Bildung. Wegen seines folglich hohen U/Pb-Verhältnisses eigne es sich für Datierungen.

¹ SCHOENE (2014, 358f).

² Ionenradien von FAURE & MENSING (2005, 221); deshalb enthalte Zirkon sehr wenig Blei zum Zeitpunkt der

Reproduzierbarkeit (des Ergebnisses)

Abhängig von der Bewertung der Präzision und weiterer Kriterien. Häufig gering; jedes publizierte Alter hat einen individuellen Werdegang einer Interpretation und einen einzigartigen Set von Unsicherheiten.

Anwendungsspanne in GTS2012

Mit zwei Ausnahmen Santonium-Stufe (Oberkreide) und älter (> ca. 83 Mio. [radiometrische] Jahre); fast ausnahmslos $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ -Alter.

Anhang I: Die Annahmen in FAURE & MENSING (2005)

Nach FAURE & MENSING (2005) ist die Interpretation des numerischen Wertes der Gleichung 2, eines Datums der Vergangenheit, von gewissen Annahmen über die geologische Geschichte des zu datierenden Gesteins oder Minerals sowie den in der Kalkulation angewendeten numerischen Werten D_0 und λ abhängig.

$$D = D_0 + N(e^{\lambda t} - 1) \quad (1)$$

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{D-D_0}{N} + 1 \right) \quad (2)$$

D = Anzahl der Tochteratome (D für daughter, Tochter); D_0 = Anzahl initialer Tochteratome; N = Anzahl verbleibender Mutteratome (N für nuclide, Nuklid); λ = (aktuelle) Zerfallskonstante; t = Datum in der Vergangenheit.

Die Annahmen sind:

1. Keine Abgänge (Verluste) oder Zugänge (Gewinne) von Mutter- oder Tochteratomen außer durch den Zerfall der Mutter zur stabilen Tochter.
2. Die Zerfallskonstante des Mutternuklids ist zeitinvariant, physisch nicht beeinflussbar und genau bekannt.
3. Für D_0 wird ein angemessener Wert verwendet; entweder auf Basis der chemischen Eigenschaften des Tochterelements oder seiner isotopischen Zusammensetzung in dem terrestrischen Reservoir, von welchem das Gestein oder Mineral stammt.
4. Die gemessenen Werte von D und N sind genau; sie sind repräsentativ für das zu datierende Gesteine oder Mineral.

Anhang II: Online-Lehrmaterial

Inzwischen gibt es zahlreiches Lehrmaterial, das die gesamte Prozesskette von der Beprobung über die Probenaufbereitung bis zur finalen Analyse visualisiert – „Virtual Labs for Teaching“. Die nachfolgende Tabelle weist auf Material des Isotope Geology Laboratory der Boise State University, Dr. Mark SCHMITZ, hin (Zugriffe 11/2019).

Slide shows <https://www.boisestate.edu/earth-isotope/education-and-outreach/how-its-done-u-pb-geochronology-slide-shows/>

Analyse-App: „ZirChron“ <https://www.boisestate.edu/earth-isotope/education-and-outreach/zirchron-virtual-zircon-analysis-app/>

Data Reduction Software <https://www.boisestate.edu/earth-isotope/labshare/data-reduction-software/>

Videos „U-PB ZIRCON GEOCHRONOLOGY BY ID-TIMS: CLEANING DISSOLUTION VESSELS“ (07.09.2013; 5:05 Min.): <https://youtu.be/H7w05Wpy7mQ>

„U-PB ZIRCON GEOCHRONOLOGY BY ID-TIMS: CHEMICAL ABRASION & DISSOLUTION“ (07.09.2013; 14:13 Min.): <https://youtu.be/ChZhd2jpDIQ>

„U-PB ZIRCON GEOCHRONOLOGY BY ID-TIMS: COLUMN CHEMISTRY SEPARATION“ (07.09.2013; 8:45 Min.): <https://youtu.be/NSm8UiTm5c8>

Handbücher <https://www.boisestate.edu/earth-isotope/labshare/laboratory-handbooks/>

Literatur

- FAURE G & MENSING TM (2005) Isotope Principle and Applications. 3rd Edition, Hoboken, N. J.
- HOLMES A (1911) The association of lead with uranium in rock-minerals, and its application to the measurement of geological time. Proceedings of the Royal Society, Ser. A, 85, 248-256.
- HOLMES A (1913) The Age of the Earth. London.
- JAFFEY AH, FLYNN KF, GLENDENIN LE, BENTLEY WC & ESSLING AM (1971) Precision measurement of half-lives and specific activities of ^{235}U and ^{238}U . Physical Review C 4, 1889-1906.

KOTULLA M (2020) Bentonit-Horizonte in paläozoischen Sedimentfolgen: Tephrostratigraphie und U-Pb-Altersbestimmungen mit magmatogenen Zirkonen. W+W Special Paper G-20-1, Bayersbronn.

https://www.wort-und-wissen.org/wp-content/uploads/Bentonit-Horizonte_G-20-1.pdf

SCHOENE B (2014) U-Th-Pb Geochronology. In: RUDNICK RL (ed.) Treatise on Geochemistry, Volume 4, 2nd edition, 341-378.

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

Zur Ergänzung → 4-10, 4-21, 4-22.

4-09 Konkordia-Diagramm

Ein Werkzeug des Geochronologen, aber weder eine Datierungsmethode noch eine Methode zur Verifizierung der radiometrischen Methode

Einführung

Zum Problem diskordanter (nicht übereinstimmender) Daten im U-Pb-System (→ 4-03) präsentierte WETHERILL bereits 1956 eine (graphische) Prozedur zur Ableitung und Interpretation dieser Daten (insbesondere Bleiverlust) im Verhältnis zu einer theoretischen Konkordanz (Übereinstimmung). Seine Darstellung hatte sich schnell zu einem bis heute genutzten Standard der Präsentation von Isotopendaten etabliert.

Struktur des Wetherill-Diagramms

In dem zweidimensionalen Diagramm (WETHERILL 1956, seine Fig. 1 und Fig. 2; vgl. Abb. 1) wird das Verhältnis von $^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ (Ordinate) zu $^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$ (Abszisse) derselben Analyse¹ dargestellt.² Als Bezugskurve der Datenpunkte gilt die Konkordia. Sie ist die Kurve, bei welcher die Verhältnisse von $^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ und $^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$ zu dem gleichen Datum korrespondieren, also $t_0 = t_1 = t_2$ gilt (siehe Gleichungen 1-4). Liegen die Proben auf oder nahe der Kurve, werden sie als konkordant oder quasi-konkordant bezeichnet, liegen sie dagegen (deutlich) neben der Kurve als diskordant.

$$t_1 = \frac{1}{\lambda_{238}} \ln \left(\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}} + 1 \right) \quad (1)$$

$$t_2 = \frac{1}{\lambda_{235}} \ln \left(\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{235}\text{U}} + 1 \right) \quad (2)$$

$$\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}} = e^{\lambda_{238} t_0} - 1 \quad (3)$$

$$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{235}\text{U}} = e^{\lambda_{235} t_0} - 1 \quad (4)$$

Die Annahmen WETHERILLS

Als konkordant definiert WETHERILL konkret die Altersgleichheit, „die Alter gelten als

„konkordant“, als diskordant die Altersungleichheit. Zwei kalkulierte Alter sind zueinander gleich und gleich dem wahren Alter des Minerals, wenn nachfolgende Annahmen erfüllt sind:

- Geschlossenes System I: Keine Abgänge (Verluste) oder Zugänge (Gewinne) von Uran oder Blei während der gesamten Zeit seit Entstehung des Systems.
- Geschlossenes System II: Keine Abgänge (Verluste) oder Zugänge (Gewinne) der Zwischenglieder der radioaktiven Zerfallsreihen, z. B. Radon oder Ionium.
- Korrekturen: Für die initialen Konzentrationen von ^{206}Pb und ^{207}Pb sind angemessene Korrekturen vorgenommen worden.
- Die chemischen Analysen sind exakt durchgeführt und die korrekten („correct“) Zerfallskonstanten λ_1 (^{238}U) und λ_2 (^{235}U) angewendet worden.

Das Versagen der Annahmen (a) bis (c) bezeichnet WETHERILL als „intrinsische Diskordanz“, das der Annahme (d) als „technische Diskordanz“.

Die graphische Prozedur WETHERILLS

Die von WETHERILL vorgeschlagene Prozedur bezieht sich primär auf das mögliche Versagen der Annahme (a), des Weiteren werden die Annahmen (b) und (c) diskutiert; dies alles unter der Voraussetzung, dass Annahme (d) erfüllt ist.

Verlust von Blei oder Uran oder der Gewinn von Uran. Eine Mineralprobe, die alle vier Annahmen erfüllt, würde auf der Konkordiakurve liegen (gedachter Punkt P₁). Hat dieses Mineral (während einer geologisch kurzen Periode) Blei oder Uran verloren oder Uran gewonnen (auch als U-Pb-Fraktionierung bezeichnet), so liegt es außerhalb (und unterhalb) der Konkordiakurve (gedachter Punkt P₂). Eine Gerade durch diese zwei Punkte P₁ und P₂ ergibt die Diskordia. Bei

¹ I. d. R. handelt es sich um wenige Proben.

² * = radiogenes Blei.

nur einem (Störungs-) Ereignis liegen weitere Mineralproben (desselben Gesteins) mit gleicher geologischer Geschichte ebenfalls auf der Diskordia. Der obere Schnittpunkt der Diskordia mit der Konkordia ergibt (definitionsgemäß) das Schließungsalter (Beginn des geschlossenen Systems). Der untere Schnittpunkt der Diskordia mit der Konkordia zeigt das Alter des (Störungs-) Ereignisses (z. B. Metamorphose) an. Gleichermaßen können auch mehrere Fraktionierungen graphisch hergeleitet werden; jedes dieser Ereignisse hat eine eigene Diskordia.

Exkurs: Beispiel Anhang I (Abb. 1, s. u.). Das Daten-Set besteht aus 10 Fraktionen; die resultierenden Datenpunkte, rote Ellipsen (da inkl. Fehler), sind im Wetherill-Diagramm eingetragen. Die blaue Linie ist die Konkordia (ausschnittsweise, leicht gekrümmt) mit abgetragenen Werten (226 bis 258) in Millionen [radiometrischen] Jahren. 9 der 10 Datenpunkte liegen dicht bei der Konkordia (ca. 251 Millionen [radiometrische] Jahre), sie sind quasi-konkordant. Ein Datenpunkt liegt deutlich entfernt (unterhalb etwa 230 Millionen [radiometrische] Jahre). Die gestrichelte blaue Linie durch diesen einen Datenpunkt und die Gruppe von 9 Datenpunkten ist die Diskordia. Definitionsgemäß gilt der obere (ältere) Schnittpunkt ($256 \pm 2,4$ Millionen [radiometrische] Jahre) als Zeitpunkt der (Mineral-) Bildung (Schließung des geschlossenen Systems), der untere Schnittpunkt (nicht dargestellt) als Zeitpunkt des Eintritts der Störung (ca. -2 ± 42 Millionen [radiometrische] Jahre).

Die Gültigkeit der graphischen Prozedur. Im Wesentlichen kann WETHERILL die graphische Lösung auch mathematisch herleiten. Es zeigt sich, dass nur ein Nettoeffekt betrachtet wird: Denn es kann nicht unterschieden werden zwischen einem Mutter-Verlust und einem Tochter-Gewinn oder einem Mutter-Gewinn und einem Tochter-Verlust. Für konkrete Versagen der Annahmen (b) und (c) zeigt WETHERILL Wege einer mathematischen Behandlung auf.

WETHERILLS abschließende Bemerkungen

Mit der Nutzung der graphischen Prozedur – bezogen auf ein Versagen der Annahmen (a) bis (c) – können nach WETHERILL die diskordanten Alter einer gegebenen Geschichte eindeutig kalkuliert werden. Aber: Wenn die diskordanten Alter

gegeben sind, ist es nicht möglich, daraus eine eindeutige [geologische] Geschichte abzuleiten. Die graphische Prozedur wird als nützlich empfunden werden, auf mögliche Geschichten einer geologischen Einheit zu folgern und in einigen Fällen auf die wahrscheinliche Geschichte.

WETHERILLS Annahme (d) – korrekte Zerfallskonstanten

Es ist festzustellen, dass WETHERILL im Verlauf seines Artikels auf Annahme (d), insbesondere Teil 2 („korrekte Zerfallskonstanten“) nicht weiter eingeht. Mit der Operation inkorrektter Zerfallskonstanten wäre seiner graphischen und mathematischen Behandlung jegliche Grundlage entzogen; „true ages“, wahre System-Alter ließen sich nicht mehr herleiten.

WETHERILLS Annahme allerdings ist grundsätzlicher Natur. Sie schließt auch veränderliche Zerfallskonstanten ein. Er zählt diese Voraussetzung nicht zu den intrinsischen (inneren) Faktoren. Insofern sind alle seine Ausführungen als System-immanent zu verstehen, nämlich für das System, dem die aktuell (ermittelten) Zerfallskonstanten zu Grunde liegen (→ 4-10).

Weitere Konkordia-Diagramme

Eine Variante des Wetherill-Konkordia-Diagramms ist von TERA & WASSERBURG (1972) eingeführt worden (Abb. 2). Bei ihrer Darstellung sind die Verhältnisse von $^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ (Ordinate) zu $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ (Abszisse) maßgeblich. Darüber hinaus gibt es weitere, auch dreidimensionale Ansätze.

Aktuelle Praxis und Bedeutung

In der U-Pb-Geochronologie ist „Konkordanz“ für die Beurteilung eines geschlossenen Systemverhaltens wichtig. Allerdings ist Konkordanz für den primär fossilführenden Abschnitt des Phanerozoikums (Kambrium bis rezent) wegen der relativen Linearität der Konkordiakurve kein effektives Werkzeug zur Abschätzung des Bleiverlustes oder subtiler Alterserbschaft.³

³ „Unfortunately, the relative linearity of the concordia curve in the Phanerozoic renders concordance an

ineffective tool for assessing Pb-loss or subtle inheritance“ (SCHMITZ 2012, 116).

Fazit

Konkordia-Diagramme sind Visualisierungen radiogener Isotopendaten und ihrer Beziehungen zueinander in einem definierten Rahmen systemisch-wahrer Alter auf Basis aktuell ermittelter Zerfallskonstanten. In diesem Rahmen werden radiogene Isotopendaten auf innere (intrinsische) Übereinstimmung (Konkordanz) überprüft und diskordante Daten interpretiert.⁴ Denn für die radiometrische Kalibrierung der Internationalen Chronostratigraphischen Tabelle sowie der Erstellung der Geologischen Zeitskala ist die Verwendung von intrinsisch konkordanten radiogenen Isotopendaten ein kritisches Kriterium (→ 2-02, 2-03).

Konkordia-Diagramme sind geochronologische Werkzeuge; sie stellen keine eigene Datierungsmethode dar und werden nicht dazu verwendet, um die radiometrische Methode zu verifizieren.

Anhang 1: Beispiel eines Wetherill- und Tera-Wasserburg-Diagramms

Die unten aufgeführten Daten und Diagramme sind dem Demonstrationsbeispiel von *Isoplot* (Version 4.15) entnommen. Dieses Analyse- und Präsentations-Tool für radiogene Isotopendaten wird als Add-in für Microsofts Excel® von Kenneth R. LUDWIG (2008) und dem Berkeley Geochronology Center zur Verfügung gestellt.

LUDWIG hat die Daten-Sets der Arbeit von KAMO et al. (1996) entnommen und adaptiert. Der jeweils 10. Datensatz bildet den einzigen diskordanten Punkt. Rechnerisch (und graphisch) wird als eine Lösung der obere Schnittpunkt mit $256,4 \pm 2,4$ Millionen [radiometrischen] Jahren angegeben. Durch die Wahl (Auswahl) der quasi-konkordanten Punkte sowie der statistischen Verfahren sind weitere Lösungen möglich, die sich aber nur marginal unterscheiden. Erläuterung des Beispiels siehe oben.

207Pb /235U	2σ %err	206Pb /238U	2σ %err	rho
.2819	.254	.03985	.201	0.79
.2814	.655	.03980	.201	0.31
.2814	.592	.03978	.503	0.85
.2812	.432	.03976	.252	0.58
.2814	.308	.03972	.201	0.65
.2811	.573	.03971	.504	0.88
.2813	.473	.03967	.202	0.43
.2810	.407	.03966	.303	0.74
.2816	.308	.03974	.201	0.65
.2554	.318	.03607	.277	0.87

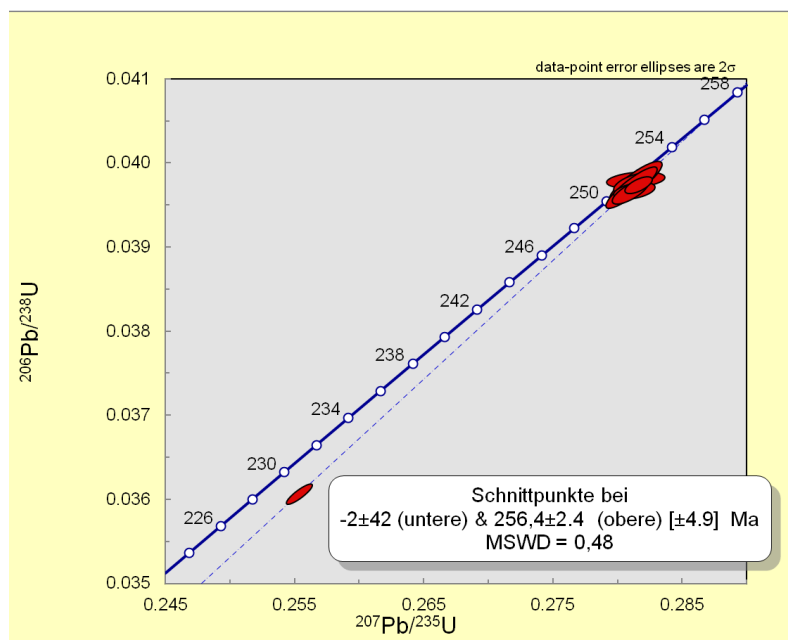


Abb. 1 Beispiel für ein Wetherill-Konkordia-Diagramm. Links: Wertetabelle; rechts: Grafik. Legende: MSWD (mean standard weighted deviation), mittlere gewichtete Standardabweichung; Ma = Millionen Jahre; 2σ = Standardabweichung etwa 95,4 %, Werte innerhalb der Streuintervalle.

Zu KAMO et al. (1996)

Die Autoren untersuchten die sibirische Flutbasalt-Provinz bei Noril'sk. Von einer gabbroiden

Intrusion (Noril'sk I), die das untere Drittel der insgesamt rasch gebildeten 3500 m mächtigen Lavadecken schneidet, entnahmen sie zwei Proben (je 20 kg) und gewannen daraus Zirkon- (ZrSiO_4)

⁴ Zur relativen Häufigkeit vgl. z. B. MÖLLER (1986, 265): „Da die Randbedingungen für die Concordia-Kurve

nur in den seltensten Fällen erfüllt werden, werden diskordante Alter weit häufiger gefunden.“

und Baddeleyitminerale (ZrO_2), die sie auf 10 Fraktionen aufteilten (siehe Tabellen der Abb. 1 und Abb. 2). Ihrer Analyse und Interpretation zufolge beträgt das durchschnittliche $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ -Alter $251,2 \pm 0,3$ Millionen Jahre (9 der 10 Fraktionen)⁵, welches sie als Minimum-Alter der Flutbasalte deuten. Im (Wetherill)-Konkordia-Diagramm präsentieren sie als oberen Schnittpunkt den rechnerisch ermittelten Wert von $256,5 \pm 2,6/-2,0$ Millionen [radiometrischen] Jahre, den sie

(definitionsgemäß) als maximales Alter interpretieren (vgl. Abb. 1 und Abb. 2). Das Minimum-Alter entspräche dem der Perm/Trias-Grenze in Meishan in Südchina ($251,1 \pm 3,6$ Millionen [radiometrische] Jahre); somit könnte der sibirische Vulkanismus ein möglicher Beitragender des [postulierten] Massenaussterbens an der Perm/Trias-Grenze gewesen sein.

$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$	2σ %err	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2σ %err
25.09	.201	.05131	.156
25.13	.201	.05128	.623
25.14	.503	.05131	.312
25.15	.252	.05129	.351
25.18	.201	.05139	.234
25.18	.504	.05134	.273
25.21	.202	.05143	.428
25.21	.303	.05139	.272
25.16	.201	.05140	.233
27.72	.277	.05135	.156

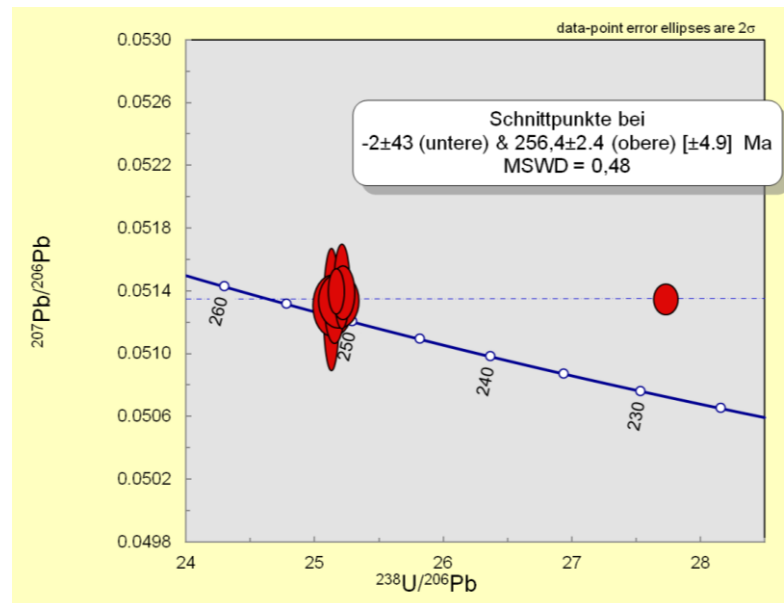


Abb. 2 Beispiel für ein Tera-Wasserburg-Konkordia-Diagramm. Links: Wertetabelle; rechts: Grafik. Legende: MSWD (mean standard weighted deviation), mittlere gewichtete Standardabweichung; Ma = Millionen Jahre; 2σ = Standardabweichung etwa 95,4 %, Werte innerhalb der Streuintervalle.

Literatur

- GRADSTEIN FM, OGG JG, SCHMITZ MD & OGG GM (Eds.) (2012) The Geologic Time Scale 2012. Volume 1/2, Oxford Amsterdam.
- KAMO SL, CZAMANSKE GK & KROGH TE (1996) A minimum U-Pb age of the Siberian flood-basalt volcanism. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60, 3505-3511.
- LUDWIG KR (2008) User's Manual for Isoplot 3.70. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Special Publication No. 4. Berkeley, CA.
[aktuelle, letzte Version: 4.15, unter:
http://www.bgc.org/isoplot_etc/isoplot.html]
- MÖLLER P (1986) Anorganische Geochemie. Eine Einführung. Berlin, Heidelberg.

- SCHMITZ MD (2012) Radiogenic Isotope Geochronology. In: GRADSTEIN FM, OGG JG, SCHMITZ MD & OGG GM (Eds.) (2012) The Geologic Time Scale 2012. Volume 1/2, Oxford Amsterdam, 115-126.
- TERA F & WASSERBURG GJ (1972) U-Th-Pb systematics in three Apollo 14 basalts and the problem of initial Pb in lunar rocks. *Earth and Planetary Science Letters* 14, 281-304.
- WETHERILL GW (1956) Discordant Uranium-Lead Ages, I. *Transactions of the American Geophysical Union* 37, 320-326.

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

Zur Ergänzung → 4-01, 4-21, 4-22.

⁵ Die Korrekturen für gewöhnliches Blei variieren von 0 bis 335 Millionen [radiometrische] Jahre: „This correction can be considered valid, given that the amount of this common Pb is highly variable among the analyses,

varying from a zero $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ age correction (points 2 and 6) to a 15 Ma correction (point 3), to the largest correction of 335 Ma (point 7), and still the data plot in a tight, concordant grouping“ (KAMO et al. 2006, 3509).

4-10 Die Grundfrage radiometrischer Altersbestimmung

Im Grunde genommen ist nicht bekannt, in welcher Beziehung radiometrische Alter zum realen Alter stehen

Von der Radioaktivität zur geologischen Zeitskala

1896 gibt BECQUEREL die Entdeckung der Radioaktivität bekannt. RUTHERFORD & SODDY schlagen 1902 vor, dass Radioaktivität eine Eigenschaft bestimmter Atome ist und die Zerfallsrate sich proportional zu der Anzahl der bestehenden Atome verhält.¹ 1907 publiziert BOLTWOOD erste radiometrische Alter. HOLMES (1913) sieht in der radioaktiven Uhr eine Lösung für das Zeitproblem in der Geologie²; er wird zum Chefarchitekt einer radiometrisch geeichten geologischen Zeitskala. Die geologische Zeitskala wird im Laufe der Zeit als eine Grundlage der Naturwissenschaft akzeptiert (aktuelle Version siehe GRADSTEIN et al. 2012).

Die Grundfrage – Konstanz des radioaktiven Zerfalls?

Für die Beurteilung der Validität der Ergebnisse radiometrischer Altersbestimmungen³ ist es entscheidend, der einen Grundfrage nachzugehen: Ist die Zerfallsrate radioaktiver Substanzen während der gesamten Erdgeschichte (4.600.000.000 [radiometrische] Jahre) und in jeder Umgebung gleich geblieben?

Über den Umgang mit der Grundfrage ...

Die Frage nach der Konstanz des radioaktiven Zerfalls beschäftigte die Wissenschaft von Anbeginn. Anhand einer kleinen Auswahl von Protagonisten – HOLMES, LOTZE, FAURE – wird der Umgang mit dieser Grundfrage exemplarisch aufgezeigt und erörtert.

I) HOLMES

Bereits 1913 präsentiert HOLMES seine Ideen in dem bemerkenswerten Werk *The Age of the Earth*. Mit rhetorischer Brillanz versucht er die Überlegenheit der neuen, physikalisch begründeten Datierungsmethode darzustellen, arbeitet alle Annahmen und Bedenken ab, so auch die letzte nach der Konstanz des radioaktiven Zerfalls (S. 168):

„Er [Joly⁴, MK] fragt: Ist es sichergestellt, dass die Muttersubstanz, Uran, in der Vergangenheit immer mit der gleichen Rate zerfallen ist wie sie aktuell mit ihrer mittleren Halbwertszeit gemessen wird? Soweit wir wissen, ist die Zerfallsgeschwindigkeit [rate of decay, MK] von Substanzen mit schneller Umwandlung [kurzlebige Radioisotope, MK] konstant und unabhängig von Temperatur- und Druckänderungen. Aufgrund dessen, dass eine große Anzahl radioaktiver Körper mit einer konstanten Rate zerfällt, wird angenommen, dass diese Konstanz eine bestimmte Eigenschaft aller radioaktiven Elemente ist. Im Falle des Urans kann diese Annahme für Perioden von gleichem Ausmaße wie die Halbwertszeit nicht überprüft werden. In Analogie mit dem Verhalten der kurzlebigen Elemente ist es wahrscheinlich, hätten wir Messungen in kambrischen Zeiten durchgeführt und mit archaischen uranhaltigen Mineralien experimentiert, so wie es in der letzten Dekade geschehen ist, würde die Halbwertszeit exakt die gleiche sein wie wir sie heute feststellen – 5400 Millionen Jahre. Im Falle der Radium-Emanation kann es keinen Zweifel daran geben, dass Experimente in kambrischer Zeit konkordante Resultate mit den unsrigen ergeben würden. Es würde genauso unphilosophisch sein, dies anzuzweifeln wie zu glauben, dass die Gesetze von Physik und Chemie mit der Zeit variieren.“

¹ Diese Erklärung, so FAURE & MENSING (2005, 34), ist niemals wirklich herausgefordert oder modifiziert worden: „This explanation of radioactive decay has never been seriously challenged or modified (...).“

² Eine vermeintlich absolute Datierung von Ereignissen der Erdgeschichte war bisher nicht möglich.

³ Bezogen auf langlebige radioaktive Isotope.

⁴ John JOLY (1857-1933), ehemals Prof. für Geologie und Mineralogie am Trinity College, Dublin.

II) LOTZE

LOTZE befasst sich 1922 in *Jahreszahlen der Erdgeschichte* mit der „Zeitrechnung in Geschichte und Geologie“, zu einem Zeitpunkt, wo die neue (radiometrische) Methode noch nicht allgemein hin akzeptiert war (→ 2-36). Auch lagen zu diesem Zeitpunkt nur wenige radiometrische Altersbestimmungsergebnisse vor. LOTZE vergleicht die bisherigen (Schätz-)Methoden geologischer Zeitmessung, (a) Bildungsdauer der Sedimentgesteine und (b) Abschätzung geologischer Vorgänge am Ende der Eiszeit (unter Entwicklung von Verhältniszahlen) und Extrapolation in die Vergangenheit, mit (c), der Zeitmessung auf Grund radioaktiver Vorgänge. Hierbei konstatiert er (S. 64): „Die neue Methode [auf Grund radioaktiver Vorgänge, MK] muss zeigen, dass sie auch vor einer strengen Kritik bestehen kann. Ihre unmittelbare Nachprüfung, die sich auf Millionen von Jahren erstrecken müsste, ist nun allerdings nicht möglich, und so muss sie in erster Linie durch die innere Folgerichtigkeit und Widerspruchslosigkeit ihrer Ergebnisse für sich sprechen.“ Für Letzteres nennt er drei Bedingungen (S. 64):

- 1) „Wir müssen zuerst von den zu erhaltenen Alterszahlen verlangen, dass sie sich dem Altersrahmen, den wir aus den früher besprochenen geologischen Methoden gewonnen haben, ohne Zwang einfügen.“
- 2) „Weiter muss von den radioaktiven Methoden der Altersbestimmung verlangt werden, dass ihre Ergebnisse mit dem sicher festgelegten, relativen Alter der Gesteine übereinstimmen.“
- 3) „Schließlich muss sich bei Altersbestimmungen von verschiedenen Mineralien aus ein und demselben Gestein, also etwa aus einem einheitlichen Granitblock, für alle dasselbe Alter ergeben (...)“

III) FAURE

In *Principles of Isotope Geology* führt FAURE (1986)

aus, dass die Anwendung radiometrischer Altersbestimmung die Annahme impliziere, dass die Zerfallskonstante in den vergangenen 4,6 Milliarden [radiometrischen] Jahren unverändert geblieben sei. Diese Annahme sei gerechtfertigt, weil (a) radioaktiver Zerfall eine Eigenschaft des Kernes ist und (b) es keinen Anhaltspunkt gäbe, dass sich Zerfallskonstanten als eine Funktion der Zeit während der Geschichte des Solarsystems geändert hätten. Er schildert in diesem Zusammenhang Ausnahmetatbestände bei äußerst hohen Drücken, 100 kbar und mehr, die bei einem Beispiel eine Erhöhung der Zerfallsrate um 0,59 % bewirkten. Diese Beobachtung habe jedoch in der Praxis bei den angewendeten Altersbestimmungsmethoden keinen Effekt. Sein Fazit: „Folglich gibt es keinen Grund zu bezweifeln, dass die Zerfallskonstanten der natürlich vorkommenden langlebigen radioaktiven Isotope, die für die Datierung genutzt werden, invariant oder unabhängig von physikalischen oder chemischen Konditionen sind, denen sie seit der Nukleosynthese unterlegen haben mögen“ (S. 41).^{5,6}

... und was zu entgegen ist

Nachfolgend werden die wesentlichen Aussagen zusammengefasst, des Weiteren werden die vorgebrachten Argumente typologisiert und deren Bedeutung aufgezeigt:

- 1) Ein Nachweis darüber, dass die Zerfallskonstante während der gesamten Erdgeschichte und in jedem Milieu gleichgeblieben ist, kann nicht erbracht werden.⁷ HOLMES als auch LOTZE bezeugen dies. LOTZE: Eine Nachprüfung der Methode, „die sich auf Millionen von Jahren erstreckt“, ist nicht möglich. HOLMES: „Im Falle des Urans kann diese Annahme für Perioden von gleichem Ausmaße wie die Halbwertszeit nicht überprüft werden.“
- 2) Die neue (radiometrische) Methode hätte wohl keine Akzeptanz gefunden, wenn ihre Ergebnisse nicht mit dem zu diesem

⁵ Die gleiche Formulierung findet sich in der Neuauflage (FAURE & MENSING 2005, 58).

⁶ Es wird eingeworfen, dass die wissenschaftlichen Begründungen von FAURE (1986, 41), warum die Annahmen gerechtfertigt seien, hier nicht vollumfänglich dargelegt werden. So könnte beim uneingeweihten Leser der Eindruck entstehen, dass die Annahmen frei aus der Luft gegriffen seien. – Im Vergleich werden die

Annahmen und Begründungen von HOLMES (1913) und LOTZE (1992) ebenfalls nur kurz und punktuell präsentiert. Der Verfasser empfiehlt in jedem Fall, die zitierte Literatur zu lesen.

⁷ Das gilt auch heute; ein Nachweis konnte bisher nicht erbracht werden. Eine Vergleichszeitkala, an der die Annahme überprüft werden könnte, existiert nicht.

Zeitpunkt mit anderen (Schätz-)Methoden konstruierten und weitgehend anerkannten Altersrahmen übereingestimmt hätte (LOTZE). Erwähnt sei in diesem Zusammenhang beispielsweise auch SCHINDEWOLF (1970), der von einer willkommenen Größenordnung spricht: „(...) sie [die Verfahren radiometrischer Altersbestimmung, MK] sind für die Geologie von größter Bedeutung insofern, als sie willkommene Größenordnungen für die Zeitbestimmung gewisser geologischer Ereignisse und für die Zeitdauer erdgeschichtlicher Vorgänge liefern.“

- 3) Ein Analogieschluss in Verbindung mit einer Extrapolation und einer „ist wahrscheinlich, dass“-Formulierung (HOLMES: kurzlebige Radioisotope, Messung im Kambrium) ist eine Suggestiv-Konstruktion; sie soll hilfsweise den fehlenden Nachweis (Punkt 1) ersetzen, kann es aber nicht.
- 4) „Es gibt keinen Grund zu bezweifeln“ (HOLMES, FAURE) oder ähnliche Formulierungen sind suggestiv und fehlleitend. Wissenschaft muss kritisch sein und bleiben. Grundfragen dürfen nicht ausgeblendet, fundamentale Annahmen nicht ignoriert werden.
- 5) „Es gibt keinen Anhaltspunkt“ (FAURE), der dagegen spricht, ist kein Für-wahr-halten-Müssen. Dieser argumentative Ansatz mündet in eine Beweislastumkehr: „Gib einen Anhaltspunkt, dass ...“. Der Urheber bzw. Anwender aber hat nachzuweisen.
- 6) Das Argument der „Konstanz der Physik“ (HOLMES, FAURE), eingesetzt als finales „Über“-Argument, hat, wie die „Konstanz der Zerfallskonstante“ eine historische Komponente; die „Konstanz der Physik“ kann aber wie die „Konstanz der Zerfallskonstante“ nicht nachgewiesen werden.

Quo vadis?

Wissenschaftlich korrekt ist, diese entscheidende Grundfrage zu stellen und sie als solche stehen

und gelten zu lassen. Für die Geowissenschaft, insbesondere die Historische Geologie, die in hohem Maße das Schließverfahren der Abduktion anwendet, ist dies eine geübte Praxis. Sie unterscheidet sich dadurch von den experimentellen Wissenschaften wie Physik und Chemie, in denen Induktion und Deduktion die vorherrschenden Verfahren sind. So galt es lange in der Physik als unwissenschaftlich und „unerlaubt“, „historische Elemente“ zuzulassen und die „Konstanz der Physik“ in Frage stellen zu „dürfen“.

Das *Geologische Wörterbuch* stellt die Grundfrage explizit heraus. Dort heißt es unter dem Begriff Altersbestimmung im Unterpunkt 2c: „Mit physikalischen Mitteln (**radiometrische** Altersbestimmungen) bei Kenntnis der konstanten Zerfallsdauer radioaktiver Substanzen (Halbwertszeit) und der Voraussetzung, dass diese Konstante während der gesamten Erdgeschichte und in jedem Milieu gleichgeblieben ist (...)“ (MURAWSKI & MEYER 2010, 6).

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Es kann nicht nachgewiesen werden, dass die Zerfallskonstanten während der gesamten Erdgeschichte und in jeder Umgebung gleichgeblieben sind. Demzufolge kann über die Validität der Ergebnisse radiometrischer Datierungen im Sinne einer Angabe über die reale Zeit keine Aussage getroffen werden.⁸ Es ist ein Nicht-Wissen. Es können auch keine Wahrscheinlichkeitsaussagen gemacht werden. Im Grunde genommen ist nicht bekannt, in welcher Beziehung radiometrische Alter zum realen Alter stehen.

Bei der Kommunikation der Alterswerte gegenüber dem Bildungswesen und der breiten Öffentlichkeit ist auf wissenschaftlich korrekte Darstellung zu achten, insbesondere sind Angaben zu den konkreten Datierungsmethoden, Einheiten, Bedingungen, Annahmen, Schlüssen etc. vorzunehmen. Wegen den weitreichenden Auswirkungen auf das gesellschaftliche Leben sind Entscheidungsträger und Öffentlichkeit aktiv und vollumfänglich über die Gültigkeit der Ergebnisse radiometrischer Datierungen aufzuklären.

⁸ Es wird eingeworfen, dass diese Aussage eine unzulässige Pauschalierung sei; insbesondere, weil lediglich geringfügige Veränderungen der Zerfallskonstante beobachtet werden (max. $\pm 1\%$) und somit die Größenordnung der Ergebnisse als sicher zu betrachten sei. Selbst eine wohlwollende Erhöhung des Fehlerbereichs um eine Größenordnung ($\pm 10\%$) könne an der

Größenordnung der Ergebnisse (Beispiel: Perm/Trias-Grenze (Meishan, China); untere vulkanische Aschenlage: gewichtetes mittleres $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ -Alter von $251,941 \pm 25$ [10% „Toleranz“, MK] Millionen [Isotopen-] Jahre; $\rightarrow 4\text{-}01$) nichts ändern. – Genau dies sind aber auch die Beobachtungen und Argumente beispielsweise von FAURE, die in diesem Beitrag diskutiert werden.

Literatur

- BECQUEREL AH (1896) Émission de radiation nouvelles par l'uranium métallique. Comptes Rendus de l'Académie des sciences 122, 1086-1088.
- BOLTWOOD B (1907) The Ultimate Disintegration Products of the Radio-active Elements. Part II. The disintegration products of uranium. American Journal of Science 134, 77-88.
- GRADSTEIN FM, OGG JG, SCHMITZ MD & OGG GM (2012) The Geologic Time Scale 2012. Volume 1/2, Oxford Amsterdam.
- FAURE G (1986) Principles of Isotope Geology. 2nd edition, New York.
- FAURE G & MENSING TM (2005) Isotopes. Principles and Applications. 3rd edition, Hoboken.
- HOLMES A (1913) The Age of the Earth. London.
- LOTZE R (1922) Jahreszahlen der Erdgeschichte. Stuttgart.
- MURAWSKI H & MEYER W (2010) Geologisches Wörterbuch. 12. Auflage, Heidelberg.
- RUTHERFORD E & SODDY F (1902) The Cause and Nature of Radioactivity I, II. Philosophical Magazine IV, 370-96, 569-85.
- SCHINDEWOLF OH (1970) Stratigraphie und Stratotypus. Abhandlungen der mathematisch naturwissenschaftlichen Klasse, Nr. 2, Mainz.

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

Zur Ergänzung → 4-01, 4-03, 4-09, 4-21, 4-22.

4-21 Radiometrische Methode quasi amtlich

Unterkommission des US-amerikanischen Nationalen Forschungsrats löst das Problem des Alters der Erde mit der radiometrischen Altersbestimmungsmethode

Der Vorstoß

Mitte der 1920er-Jahre, hauptsächlich mit der Entwicklung geophysikalischer Methoden in der Prospektion von Erdöl und Mineralien, wurde es in den USA als notwendig erachtet, insbesondere der auffallend interdisziplinär agierenden Instanz¹ „Geophysik“ mehr Aufmerksamkeit zu schenken. Der Bereich „Physikalische Wissenschaften“ des Nationalen Forschungsrats legte deshalb 1926 ein Programm auf, um den Wissenschaftlern des Landes den aktuellen Stand des neuen geophysikalischen Wissens in Form autoritativer Abhandlungen zu vermitteln. Es wurden neun Themenbereiche ausgegliedert und jeweils einer Unterkommission übertragen. Neben Themenkommissionen u. a. für „Seismologie“, „Meteorologie“, „Ozeanographie“, „Vulkanologie“ und „Terrestrischem Magnetismus“ wurde eine Unterkommission für „Das Alter der Erde“ eingerichtet.

Dieser Unterkommission gehörten folgende Personen an:

- E. W. BROWN (Astronomie²);
- A. HOLMES (Radioaktivität und geologische Zeit);
- A. F. KOVARIK (Radioaktivität und Altersbestimmung von Mineralien);
- A. C. LANE³;
- C. SCHUCHERT (Geochronologie, auf der Grundlage von Sedimenten und des Lebens) und
- A. KNOPF (Ozeanalter), Vorsitzender.

Die Ergebnisse wurden im Rahmen der Serie *Die Physik der Erde* im *Bulletin of the National Research Council* (Number 80) 1931 veröffentlicht (Abb. 1). Den Hauptteil des 466 Seiten umfassenden Berichts nimmt die radiometrische Methode (Part III und IV) mit insgesamt 386 Seiten ein.

Das Problem des Alters der Erde

Das Problem des Alters der Erde gilt als gelöst, so das Verständnis, wenn eine sichere Bestimmung des Alters möglich ist. Doch was ist sicher?

KNOPF (1931a, 3) leitet seine Zusammenfassung damit ein, dass man sich zu Beginn des 20. Jahrhunderts für die Bestimmung des Alters der Erde das Erfordernis dreier unabhängiger Schätzungen vorstellte, die in ihrer Größenordnung übereinstimmen (Tab. 1). Die Entdeckung der Radioaktivität allerdings zerstörte die Grundlagen, auf welche sich die bisherigen, hauptsächlich physikalischen Methoden zur Schätzung der geologischen Zeit gestützt hatten.

Autor	Altersschätzung	Hypothese
G. H. Darwin	57 Mio. Jahre	Trennung des Mondes von der Erde
Lord Kelvin	20-40 Mio. Jahre	Langsame Abkühlung der Erde
J. Joly	80-90 Mio. Jahre	Natrium-Akkumulationsrate in den Weltmeeren

Tab. 1 Das Alter der Erde zu Beginn des 20. Jahrhunderts. In der Größenordnung übereinstimmende, hypothetische Schätzungen. Nach KNOPF (1931a).

Altersbestimmung über die Mächtigkeit der Sedimentgesteine nicht möglich

Diese „Altersbestimmungsmethode“ gilt als die älteste Methode: Die Bestimmung der Dauer der geologischen Zeit über die Mächtigkeit (Dicke) von Gesteinsfolgen. Die Umrechnung der akkumulierten Maximaldicken der Sedimente in Zeit (Jahre), so seinerzeit KNOPF (1931a, 4), „ist nach wie vor, auch annäherungsweise, ein ungelöstes Problem“, insbesondere weil die Sedimentdicken durch den fortschreitenden Erkenntnisgewinn ständig nach oben korrigiert werden müssen.

¹ Die „Instanz“ entwickelte sich zu einer eigenständigen Fachrichtung.

² In Klammer das jeweils verantwortete Thema.

³ Prof. A. C. LANE war (gleichzeitig) Vorsitzender der Kommission für „Bestimmung der geologischen Zeit mittels atomaren Zerfalls“ des Bereiches Geologie und Geographie.

Deshalb ist es auch nicht möglich, die durch den radioaktiven Zerfall vorgenommenen Zeitbestimmungen durch die Sedimentüberlieferung zu verifizieren. So akzeptiert SCHUCHERT (1931) die Schätzung von 500 Millionen [radiometrischen] Jahren als beste Schätzung für die Zeitdauer vom Beginn des Kambriums bis heute (Phanerozoikum), die hauptsächlich, aber nicht ausschließlich auf dem radiometrischen Zeugnis beruht. Auch kann SCHUCHERT aufzeigen, dass das Zeugnis der Schichtgesteine mit den Altersergebnissen harmonisiert werden kann.

Hierbei geht SCHUCHERT (S. 16-49) äußerst systematisch vor. Zunächst gibt er einen historischen Abriss. Er zeigt auf, dass bisherige Schätzungen, hauptsächlich über die Maximaldicken, eine hohe Variationsbreite von 3 bis 1584 Millionen Jahre ergaben, die meisten Schätzungen sich jedoch in einem Bereich von bislang „generell akzeptierten“ max. 100 Millionen Jahren bewegten (Tab. 2). Sodann fährt er mit den geologischen Zeugnissen („evidence“) fort. Dabei weist er die jeweils ermittelten Maximalmächtigkeiten der Sedimentfolgen des Phanerozoikums aus, unter Schätzung ihrer Anteile an Sand(steinen), Ton(steinen) und Kalk(steinen). So betrage die aktuellste Maximalmächtigkeit für Nordamerika etwa 80 km (seine Tabelle S. 32, 260.000 Fuß).

Im folgenden Abschnitt stellt er die Eingangsfrage, was getan werden kann, um die ermittelten Maximalmächtigkeiten der Sedimentfolgen in geologische Zeit, ausgewiesen in Jahren, zu übersetzen. Er stellt zunächst fest, dass diese Ergebnisse am Ende nur ungenau und bestenfalls nur relativ zu verstehen sind. Als Zwischenergebnis formuliert er (S. 36): „Die vorangehenden Aussagen zeigen, dass bislang keine Sedimentationsdurchschnittsraten bekannt sind, auch keine für Sandsteine, Tonsteine oder Kalksteine. Weiterhin erscheint es dem Autor, dass ein Durchschnitt, der auf alle Schichtfolgen an alle Orten anwendbar ist, niemals herausgefunden werden kann; das, was allenfalls erwartet werden kann, ist ein Durchschnitt für jedes einzelne Sedimentbecken.“

Mit Aufzeigen dieser Unzulänglichkeiten und ausdrücklich in Anerkennung der radiometrischen Methode und ihrer Ergebnisse führt er seine Überbrückungsrechnungen zum Ziel: „Was wären die offenkundigen Sedimentationsdurchschnittsraten, wenn diese Dicke [80 km, MK] durch die Zeitspanne der Jahre auf Grundlage des radioaktiven Zerfalls dividiert [500 Millionen [radiometrische] Jahre, MK] würden?“ Unter Zugrundelegung der sechs radiometrischen

Ankerpunkte („tie-points“, siehe Tab. 3) erhält er Verhältniszahlen der Zeitdauer von Känozoikum zu Mesozoikum zu Paläozoikum wie 1 : 2 : 5, rechnerisch 59 zu 111 zu 347 Millionen [radiometrische] Jahre (seine Tabelle S. 47). Diese Verhältnisse erfordern, dass durchschnittlich ein Meter Sandstein in etwa 1500 Jahren, ein Meter Tonstein in 3000 Jahren und ein Meter Kalkstein in 7500 Jahren abgelagert werden. Diese Raten sind wesentlich höher als die, die bisher zur Anwendung gelangt sind.

Autor	Jahr	Maximaldicke [m]	Sedimentationsrate [in Jahren für 1 m]	Zeit [Mio. Jahre]
Phillips	1860	22000	4364	96
Huxley	1869	30000	3333	100
Haughton	1871	54000	28259	1526
Winchell	1883			3
Croll	1889	3600	20000*	72
De Lapparent	1890	46000	1957	90
Wallace	1892	54000	519	28
Geikie	1892	30000	2433-22667	73-680
McGee	1893	80000	19800	1584
Upham	1893	80000	1250	100
Walcott	1893			45-70
Reade	1893	10000	9500*	95
Sollas	1895	50000	340	17
Sederholm	1897			35-40
Geikie	1899			100
Sollas	1900	81000	327	26,5
Joly	1908	81000	988	80
Sollas	1909	102000	784	80
Woodward	1926	69000		
Holmes	1927	161000		

Tab. 2 Das Alter der Erde errechnet anhand theoretischer Maximaldicken der Sedimentgesteine. Die meisten Werte harmonisieren mit den damals „generell akzeptierten“ max. 100 Millionen Jahre, KELVINS ursprünglicher Schätzung. Nach SCHUCHERT (1931, seine Tabelle S. 18).

Verifizierung der Bestimmungen der geologischen Zeit auf Grundlage des radioaktiven Zerfalls. Nach KNOPF (1931a, 4f) kann eine Verifizierung über Warven erfolgen, insofern echte Warven vorliegen. Als Beispiel nennt er die Green River Formation. Dort habe BRADLEY (1929) abgeschätzt, dass die Bildungszeit der Sedimentfolge 5-8 Millionen Jahre betragen habe. Da die Formation etwa ein Drittel des Eozäns ausmache, lässt sich so die Gesamtdauer des

Eozäns abschätzen, die gut mit den Alterswerten der radiometrischen Methode harmoniere.⁴ Als weiteres Beispiel führt er die Warven der Bannisdale Slates an. MARR (1928) habe für die rund 1.500 m mächtige Folge eine Bildungszeit von 700.000 Jahren und eine Sedimentationsrate von umgerechnet 1 m in 460 Jahren errechnet. Diesen Wert übertrug MARR auf ordovizische und silurische Sedimentfolgen und ermittelte so eine rechnerische Gesamtdauer von 13 Millionen Jahren für beide Perioden. KNOPF stimmt mit MARR überein, dass diese Methodik zu einer Annäherung an die Größenordnung der Dauer geologischer Perioden führe.⁵

Radiometrische Ankerpunkte	Radiometrische Altersbestimmungen
Unteres Oligozän	31+ Mio. Jahre
Unterstes Känozoikum	60 Mio. Jahre
Unterstes Perm	207(?) Mio. Jahre
Mittleres Devon	290 Mio. Jahre
Oberstes Ordovizium (?)	380 Mio. Jahre
Top von Ozarkium* oder Kambrium	450 Mio. Jahre

Tab. 3 Die radiometrischen Ankerpunkte, die SCHUCHERT (1931, seine Tabelle S. 49) zur Eichung der Sedimentationsraten über Maximalmächtigkeiten verwendet. *: oberstes Kambrium und tiefstes Ordovizium zusammengefasst (nach einer alten nordamerikanischen Gliederung).

Biologie kann nichts zum Alter der Erde beitragen

Nach SCHUCHERT (1931, 59) zeigt die Historische Geologie keine bekannte konstante Geschwindigkeit in der Evolutionsrate. Damit kann die Biologie nichts zum Alter der Erde beitragen. Mit „no way“ bringt es KNOPF (1931a, 5) in seiner Zusammenfassung auf den Punkt.

SCHUCHERT zeigt aber interessante Zusammenhänge auf. Die Paläontologen sind nicht die Macher der Zeit, sondern die Nutzer.⁶ Und:

Zoologen sind hinsichtlich einer Schätzung der Zeit auf die Geologen angewiesen. Allerdings in einer engen Wechselwirkung, denn die Zoologen können aufgrund der organischen Evolution Schlüsse darüber ziehen, ob die Zeit für eine Periode ausreichend ist.⁷

Er diskutiert des Weiteren die Aufstellung von MATTHEW (1914; → 2-35), ein Versuch, die Geschwindigkeit der Evolution der Pferde während des Känozoikums zu bestimmen. Auf Grundlage dieser Aufstellung harmonisiert SCHUCHERT die Gesamtdauer des Phanerozoikums durch Anpassungen und Extrapolationen zu 480 Millionen Jahren (S. 62).

Ozeanalter nicht bestimmbar

1899 schlug JOLY vor, das Alter der Erde aus dem Natriumgehalt der Ozeane zu bestimmen. Die Basisannahmen waren: a) Der Urozean enthielt kein Natrium, b) das in die Meere eingebrachte Natrium reicherte sich an und verbrauchte sich nicht und c) die jährliche heute messbare Rate war während der gesamten geologischen Zeit konstant gewesen. Mit dieser Methode errechnete JOLY ein Ozeanalter von 80-100 Millionen Jahre.

Auf wenigen Seiten handelt KNOPF (1931b, 65-72) alle wesentlichen Annahmen ab, indem er die über zwei Jahrzehnte bekannt gewordenen Einwände gegen diese „klassisch-gradualistische“ Methode zusammenträgt und schlussfolgert: Zwei der Annahmen sind falsch („untrue“) und die Methode hat zu viele unbekannte Faktoren. Deshalb kann sie nicht zur Verifikation anderer Methoden herangezogen werden. Die 100 Millionen Jahre seien möglicherweise ein Minimum.

Durchbruch für die radiometrische Methode

Die Methoden der Altersbestimmung auf der Grundlage des radioaktiven Zerfalls werden von KOVARIK (1931) und HOLMES (1931) ausführlich

⁴ Zu einer Diskussion siehe KOTULLA (2015), insbesondere Abschnitt 5.2.

⁵ Bei den aufgeführten „Warven“-Beispielen ist kein Nachweis darüber erbracht worden, dass es sich tatsächlich um Warven handelt.

⁶ Hierbei zitiert er CLARKE (1922, 275): „(...) [paleontologists] are not the makers, but the users of time.“ CLARKE weiter (in Übersetzung): „Wir danken ihnen [Interpreten der Radiochemie, MK], uns das gegeben zu haben, was wir ohnehin schon hatten. Da ist genügend Zeit. In

der Tat so viel, dass, um [nur] einen notwendigen Anteil davon in die Philosophie der Evolution des Lebens zu absorbieren, es sogar eine Revision unserer Konzeptionen erfordert.“

⁷ SCHUCHERT zitiert in diesem Zusammenhang POULTON (1896, 815): „Zoologists rely on geologists for an estimate of the time occupied by the deposition of the stratified rocks, while they rely on us for a conclusion as to how far this period is sufficient for the whole of organic evolution.“

dargelegt. Nach KNOPF (1931a, 5) erfordern sie die geringste Anzahl von Annahmen. Zur Konstruktion einer geologischen Zeitskala (in Jahren) sollten nachfolgende Bedingungen gelten.

„1. Das Mineral darf keine Veränderung erfahren haben; (...) 2. Die Gehalte von U, Th und Pb müssen bestimmbar sein. (...) 3. Das Atomgewicht von Blei sollte ermittelt werden, (...) 4. Das geologische Alter des Minerals sollte bekannt sein.“

Diese (neuen Standard-) Anforderungen werden bislang, so KNOPF weiter, von sieben Altersbestimmungen eingehalten. Hierzu zählen Bestimmungen an uranreichen Alaunschiefern (Kolm) in Schweden (höchstes Kambrium, 450 Millionen [radiometrische]⁸ Jahre) und an Uranit⁹-Mineralen in Russland (Lokalität Sinyaya, Präkambrium, 1852 Millionen [radiometrische] Jahre). KNOPF erachtet die Altersbestimmung des Kolms mit Abstand als die wichtigste überhaupt. Denn nur diese Lokalität ist aufgrund ihrer Fossilien präzise geologisch datiert. Der Uranit von Sinyaya aus Pegmatit-Gängen gilt als bislang ältestes Mineral. Da es sich um eine Intrusion in älteres Gestein handelt, folgert KNOPF mit HOLMES, dass das Alter der Erde mindestens 2000 Millionen [radiometrische] Jahre betragen muss. Es sind diese zwei Ankerpunkte, die das primäre Gerüst der geologischen Zeitskala (Phanerozoikum, Präkambrium) bilden.

Eine Verifikation der radiometrischen Methode ist allerdings nicht möglich. Denn, so HOLMES, es wurde aufgezeigt, dass Bestimmungen der geologischen Zeit sowohl über eine Thermohistorie der Erde (thermische Zyklentheorie) als auch über Methoden der Abtragung und Sedimentation (mit Ausnahme kurzer Perioden) unzuverlässig sind. Das einzige Zeugnis („evidence“) für lange Perioden sei das auf der Grundlage des radioaktiven Zerfalls (→ 4-22).¹⁰

Astronomie muss passen

BROWN (1931, S. 460-466) diskutiert das Alter der Erde aus Sicht des Astronomen. Allerdings, so seine erste Aussage, gibt es bislang keine bekannten Methoden auf der Grundlage astronomischer Daten alleine, das Alter der Erde abzuschätzen. KNOPF (1931a, 9) ist dennoch optimistisch: „Die Schätzung auf Grundlage des atomaren Zerfalls (2×10^9 Jahre) stimmt aber mit den astronomischen Wahrscheinlichkeiten überein.“ Diese wiederum, erklärt BROWN zu Beginn seines Beitrages, beruhen auf Spekulationen. Denn ist die Erde 2×10^9 Jahre alt, muss das Alter des Sonnensystems zwischen 10^9 und 10^{10} Jahren liegen, und an einigen Hypothesen (u. a. Entstehung der Kometen, Bildung des Sonnensystems) zeigt BROWN, können die Annahmen so gewählt werden, dass diese Größenordnungen erreicht oder überschritten werden. Zum Beispiel (S. 462): „Es ist daher unwahrscheinlich, dass mit der Hypothese, dass zahlreiche solcher Exzentrizitäten oder Inklinationen [Planetenstabilität im Sonnensystem, MK] ursprünglich groß waren, das Alter des Systems geringer als 10^{10} Jahre ist: Es ist möglicherweise um wenigstens ein oder zwei Zehnerpotenzen älter. Das lässt genug Zeit für die hohe Schätzung des geologischen Alters der Erde von 2×10^9 Jahren, und dieses Alter macht nur einen kleinen Bruchteil des Alters des Sonnensystems aus.“

Relevanz und Schlussbemerkungen

Mit Quasi-Feststellungen beendete die Kommission das Problem des Alters der Erde: „In Kürze, das radioaktive Zeugnis zeigt an, dass die postkambrische Zeit, d. h. vom Ordovizium aufwärts, 450 Millionen Jahre umfasst (...) und dass das Alter der Erde mindestens 2.000 Millionen Jahre beträgt (...).“¹¹ Das war jedoch kein überraschendes Ergebnis, wenn die Zusammensetzung und das

⁸ [radiometrische] = Einfügungen des Verfassers zur Klarstellung.

⁹ Auch Uraninit (Pechblende).

¹⁰ „It has been shown in the preceding sections that estimates of geological time can no longer be based on the Earth's thermal history, whatever hypothesis be adopted as best representing the cooling process. Every attempt so far made has been unsound in principle. The methods based on denudation and sedimentation are also unreliable except as applied to relatively short intervals. The only evidence for long periods given by the materials of the Earth itself is that

based on radioactive disintegration. Like Hutton we can still find 'no trace of a beginning', for the oldest rocks have everywhere been made from preexisting and therefore still older materials, of which no other relics now survive“ (HOLMES 1931, 454).

¹¹ „In short, the radioactive evidence indicates that post-Cambrian time, i. e., from Ordovician onward, is 450 million years, a span that is easily reconcilable with the geologic evidence, and that the age of the Earth is at least 2,000 million years, an estimate which, although not incompatible with the geologic evidence, is less readily reconcilable“ (KNOPF 1931a, 3).

Ziel der Unterkommission betrachtet werden, deren vornehmliche Aufgabe ein Zusammentragen und Bewerten war.^{12,13} Aber, es war nunmehr quasi amtlich: Die einzig gültige Methode zur Bestimmung geologischer Zeit war (und ist) die radiometrische Methode.¹⁴

Weitere bemerkenswerte Ergebnisse und Folgerungen sind:

1. Die geologische Zeitskala wurde um das 10- bis 20-Fache ausgedehnt.
2. Die klassisch-gradualistische Methode, die Zeitabschätzung über Sedimentationsraten und Sedimentmächtigkeiten, die Jahrzehnte in Gebrauch war, wurde entwertet. Sie hatte ihre Gültigkeit als „unabhängige Methode“ verloren. Sedimentationsraten waren nunmehr radiometrisch neu geeicht worden. Weiterhin zeigte die Diskussion deutlich, dass das Theoretisieren über durchschnittliche Sedimentationsraten nichts gemein hat mit dem eigentlichen Phänomen der Sedimentation und den Sedimentationsprozessen selbst.
3. Die geologische Zeitskala auf Grundlage radiometrischer Altersbestimmungen kann nicht verifiziert werden (→ 4-22). Es gibt keine andere Methode („Uhr“), die die radiometrisch geeichte stratigraphische Tabelle bestätigen könnte. Eine Abstimmung (vermeintlich gemeint als weichere Form der Verifizierung) der 450 Millionen [radiometrische] Jahre mit dem geologischen Zeugnis („easily reconcilable with geologic evidence“, Fußnote 11) ist ein Trugschluss; allenfalls kann gemeint sein, dass die Größenordnung, mit der bislang schon operiert wurde, passt.
4. KNOPF (1931b, 65) scheint im doppelten Sinne Recht zu haben, wenn er sagt: „Das Problem ist tatsächlich verknüpft mit unseren Ideen über die Entstehung des Planeten.“¹⁵ Damit räumt er ein, dass in einem anderen „Ideen-Klima“ wahrscheinlich andere Wege eingeschlagen und andere Schlussfolgerungen gezogen worden wären.¹⁶

¹² Vgl. BURCHFIELD (1990, 202).

¹³ Damit war auch HOLMES am Ziel, Hauptprotagonist der Methode und Begründer der geologischen Zeitskala.

¹⁴ Siehe auch YOCHELSON & LEWIS (2001): „The bulletin is significant, for the publication had the authority of the NCR [National Research Council] behind it“ (S. 150). Und: „From the geologist’s point of view, in both Britain and America, the issue of the age of the Earth

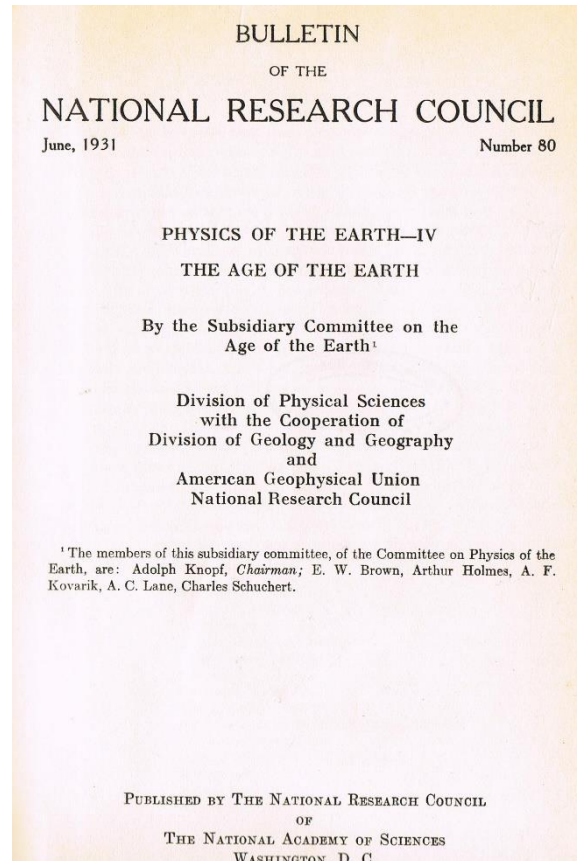


Abb. 1 Der Kommissionsbericht.

Literatur

- BRADLEY WH (1929) The varves and climate of the Green River Epoch. U.S. Geol. Survey Prof. Paper 168-E, 87-104.
- BROWN RW (1931) The Age from the Earth from Astronomical Data. In: Physics of the Earth IV. The Age of the Earth. Bulletin of the National Research Council 80, 460-466.
- BURCHFIELD JD (1990) Lord Kelvin and the Age of the Earth. Chicago London.
- CLARKE JM (1922) The age of the Earth from the paleontological viewpoint. Proc. Am. Phil. Soc. 61, 272-282.
- HOLMES A (1931) Radioactivity and Geological Time. In: Physics of the Earth IV. The Age of the Earth. Bulletin of the National Research Council 80, 124-459.

was essentially resolved by 1931, for once radioactivity was finally accepted as a dating technique, all subsequent efforts were elaborations on the original theme“ (S. 152).

¹⁵ „In fact, the problem is linked with our ideas on the origin of the planet“ (KNOPF 1931b, 3).

¹⁶ Nach Erscheinen des Kommissionsberichts wurde die Unterkommission aufgelöst (YOCHELSON & LEWIS 2001, 150).

- JOLY J (1899) An estimate of the geological age of the Earth. Sci. Tans. Roy. Dublin Soc. 7, 23-66.
- KNOPF A (1931a) The Age of the Earth. Summary of Principal Results. In: Physics of the Earth IV. The Age of the Earth. Bulletin of the National Research Council 80, 3-9.
- KNOPF A (1931b) Age of the Ocean. In: Physics of the Earth IV. The Age of the Earth. Bulletin of the National Research Council 80, 65-72.
- KOTULLA M (2015) Sedimentfolgen und ihre Interpretation: Zyklusstratigraphie und das Milankovitch-Zyklen-Syndrom. W+W Special Paper G-15-1, Baidersbronn.
https://www.wort-und-wissen.org/wp-content/uploads/g-15-1_zyklusstratigraphie_und_milankovitch-zyklen.pdf
- KOVARIK AF (1931) Calculating the Age of Minerals from Radioactivity Data and Principles. In: Physics of the Earth IV. The Age of the Earth. Bulletin of the National Research Council 80, 73-123.
- MARR JE (1928) A possible chronometric scale for the graptolite-bearing strata. Palaeobiologica 1, 161.
- MATTHEW WD (1914) Time ratios in the evolution of mammalian phyla. Science 40, 232-235.
- POULTON EB (1896) A naturalist's contribution to the discussion upon the age of the Earth. Rept. British Assoc. Adv. Sci. 66, 808-828.
- SCHUCHERT C (1931) Geochronology, or the Age of the Earth on the Basis of Sediments and Life. In: Physics of the Earth IV. The Age of the Earth. Bulletin of the National Research Council 80, 10-64.
- YOCHELSON EL & LEWIS CLE (2001) The age of the Earth in the United States (1891-1931): from the geological viewpoint. In: LEWIS CLE & KNELL SJ (eds.) The age of the Earth: from 4004 BC to AD 2002. Geological Society, London, Special Publications, 190, 139-155.

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

Zur Ergänzung → 4-01, 4-03, 4-09.

4-22 Radiometrische Methode nicht verifizierbar

Die geologische Zeitskala ist eine nicht verifizierte Zeitskala

Einleitung

Die Konstruktion der geologischen Zeitskala (aktuelle Version GTS2012)¹ erfolgt durch eine zeitlich-numerische Eichung der hochabstrahierten, zeit-relativen Internationalen Chronostratigraphischen Tabelle (Abb. 1, → 2-02).² Dabei werden radiometrische Altersbestimmungen an geologischen Objekten (z. B. Zirkonen) bekannten stratigraphischen Alters durchgeführt. Mit aktuell über 260 selektiv ausgewählten Isotopenaltern wird unter Anwendung verschiedener Interpolationsverfahren eine durchgängige quasi-lineare Zeitskala erstellt. Für das Phanerozoikum (Kambrium bis rezent) bspw. wird eine Dauer von 541 Millionen [radiometrischen] Jahren angegeben.

Vom Sinn der Bestimmung absoluter Zeiten in der Geologie

SIMON (1960, 462) beantwortet die Frage „vom Sinn der Bestimmung absoluter Zeiten in der Geologie“ wie folgt: Für die Gliederung des Phanerozoikums sei die absolute Zeitbestimmung im Gegensatz zum Präkambrium³ ohne Belang. Denn für diesen Abschnitt ab dem Kambrium werde die historische Ordnung nach Schichtenfolgen, ihren Strukturen und vor allem ihren Leitfossilien vollzogen. Demnach wäre das geologische Weltbild und seine praktisch-geologische Nutzung nicht anders, wenn Methoden der

absoluten Zeitbestimmung unbekannt wären. Zur Ordnung der Objekte und der ihnen bezeugten erdgeschichtlichen Ereignisse gehöre allerdings die Kenntnis der Größenordnung, in der sich die Ereignisse vollzogen haben; und da versage jede andere Methode. So hätten die Isotopen-Daten die Bedeutung, „‘das elastische und vor dem rückschauenden Blick zusammengeschrumpfte Band der erdgeschichtlichen Abläufe (...) auf die wahre Dauer zurückzudehnen und am Gerüst der Weltzeit zurechtgerückt festzuheften‘ (SIMON 1948)“.

Keine Nebensächlichkeit – radiometrische Methode ist nicht verifizierbar

Zur Bestimmung der zeitlichen Größenordnung erdgeschichtlicher Ereignisse, so schreibt SIMON, versage jede andere Methode (s. o.). Das ist keine nebensächliche Aussage. Bereits einleitend, in seiner Diskussion voneinander abweichender radiometrischer Zeitskalen, macht er klar (S. 461): „Es sind keine anderen Methoden bekannt, die Dauer größerer Zeitabschnitte primär zu bestimmen.“⁴

HOLMES, der Chefarchitekt der geologischen Zeitskala, sagt im Kontext eines Vergleichs von Methoden (→ 4-21) bemerkenswert deutlich (1931, 454): „Die einzige Evidenz für lange Perioden, vorgegeben durch die Stoffe der Erde selbst, ist die [Methode, MK], die auf dem radioaktiven Zerfall basiert.“⁵

¹ Geologic Time Scale 2012, siehe GRADSTEIN et al. (2012).

² Zugriff zu den offiziellen Tabellen siehe unten unter Abschnitt „Links“.

³ „Für das Präkambrium ist die absolute Zeitbestimmung der Schlüssel zur Gliederung überhaupt“ (SIMON 1960, 462).

⁴ Das Zitat im Kontext, mit Bezug auf die Arbeiten von MARBLE (1950) und HOLMES (1959): „Die Zeitdauer z. B. des Silurs ist bei MARBLE und bei HOLMES übereinstimmend 40 Mill. Jahre, die Grenz-Daten weichen um 80 Mill. Jahre voneinander ab. Tatsächlich müssen wir unsere Aufmerksamkeit auf diese Grenz-Daten beschränken. Nur sie werden mit Hilfe radioaktiver Datum-Mineralien ermittelt; die Dauer der Formationen ergibt sich erst aus diesem Umweg. Es sind keine anderen Methoden bekannt, die Dauer größerer Zeitabschnitte primär zu bestimmen. Die Gesteinsdicken der

Formationen bieten kein Vergleichsmaß für die Ablagerungsdauer; denn Ablagerung vollzieht sich nicht zeit-proportional“ (SIMON 1960, 461).

⁵ „It has been shown in the preceding sections that estimates of geological time can no longer be based on the Earth's thermal history, whatever hypothesis be adopted as best representing the cooling process. Every attempt so far made has been unsound in principle. The methods based on denudation and sedimentation are also unreliable except as applied to relatively short intervals. The only evidence for long periods given by the materials of the Earth itself is that based on radioactive disintegration. Like Hutton we can still find 'no trace of a beginning', for the oldest rocks have everywhere been made from preexisting and therefore still older materials, of which no other relics now survive“ (HOLMES 1931, 454).

Äonothem /Äon	Ärathem /Ära	System/ Periode	Serie/ Epoche	Numme- risches Alter (Mra)	
PHANEROZOIKUM	KÄNOZOIKUM	QUARTÄR	HOLOZÄN	0,0117	
			PLEISTOZÄN	2,58	
			PLIOZÄN	5,333	
		NEOGEN	MIOZÄN	23,03	
			OLIGOZÄN	33,9	
		PALÄO- GEN	EOZÄN	56,0	
			PALÄOZÄN	66,0	
	MESOZOIKUM		KREIDE	OBERKREIDE	100,5
		UNTERKREIDE		~ 145,0	
		JURA	OBERJURA	163,5	
			MITTELJURA	174,1	
			UNTERJURA	201,3	
		TRIAS	OBERTRIAS	~ 237	
			MITTELTRIAS	247,2	
			UNTERTRIAS	251,902	
		PERM	LOPINGIUM	259,1	
			GUADALUPIUM	272,95	
	CISARALIUM		298,9		
	PALÄOZOIKUM	KARBON	PENNSYLVANIUM	323,2	
			MISSISSIPPIUM	358,9	
		DEVON	OBERDEVON	382,7	
			MITTELDEVON	393,3	
			UNTERDEVON	419,2	
		SILUR	PRIDOLI	423,0	
			LUDLOW	427,4	
			WENLOCK	433,4	
			LLANDOVERY	443,8	
		ORDOVI- ZIUM	OBERORDOVIZIUM	458,4	
			MITTELORDOVIZIUM	470,0	
			UNTERORDOVIZIUM	485,4	
		KAM- BRIUM	FURONGIUM	~ 497	
	SERIE 3		~ 509		
	SERIE 2		~ 521		
	TERRENEUVIUM		541,0		
	NEO- PROTERO- ZOIKUM	EDIACARIUM	~ 635		
		KRYOGENIUM	~ 720		
		TONIUM	1000		
	„PRÄKAMBRIUM“	Auslassung von Proterozoikum (Teile) und Archaikum			4000
		HADAIKUM			~ 4600

Diese Aussagen zeigen unmissverständlich, dass die radiometrische Altersbestimmungsmethode durch keine andere Methode verifiziert (bestätigt) werden kann bzw. bisher verifiziert werden konnte.⁶ Demnach kann auch keine Aussage über die Gültigkeit der Ergebnisse getroffen werden. Die geologische Zeitskala ist eine nicht verifizierte Zeitskala.

Literatur

- GRADSTEIN FM, OGG JG, SCHMITZ MD & OGG GM (Eds.) (2012) The Geologic Time Scale 2012. Volume 1/2, Oxford Amsterdam.
- HARLAND WB, ARMSTRONG RL, COX AV, CRAIG LE, SMITH AG & SMITH DG (1989) A geologic time scale 1989. Cambridge.
- HOLMES A (1931) Radioactivity and Geological Time. In: Physics of the Earth IV. The Age of the Earth. Bulletin of the National Research Council 80, 124-459.
- HOLMES A (1959) A revised geological time-scale. Transactions of the Edinburgh Geological Society 17, 183-216.
- KOTULLA M (2015) Sedimentfolgen und ihre Interpretation: Zyklusstratigraphie und das Milankovitch-Zyklen-Syndrom. W+W Special Paper G-15-1, Baiersbronn.
- https://www.wort-und-wissen.org/wp-content/uploads/g-15-1_zyklusstratigraphie_und_milankovitch-zyklen.pdf
- MARBLE JP (1950) Report of the Committee on the Measurement of Geologic Time, 1949-1950. Washington, National Research Council.
- SIMON W (1960) Geologische Zeitrechnung im Dilemma. Naturwiss. Rundschau 13 (12), 461-465.

Abb. 1 Internationale Chronostratigraphische Tabelle. Mit Zuweisung geschätzter numerischer Alter des GTS2012-Altersmodells in Millionen [radiometrischen] Jahren (Mra) ohne Unsicherheiten; rechte Spalte. Nach Version v2020/01 der Internationalen Stratigraphischen Kommission (ICS) mit teilweise aktualisierten Alterswerten. Deutsche Bezeichnungen nach STDK2012 (Stratigraphische Tabelle von Deutschland Kompakt). Grafik: F. MEYER.

⁶ Dieser Sachverhalt wird in aktuelleren Studien nicht mehr explizit herausgestellt. Dennoch kann festgehalten werden, dass die Autoren bzw. Konstrukteure der Geologischen Zeitskala von 1989 (GTS1989, HARLAND et al. 1989) und 2012 (GRADSTEIN et al. 2012) der radiometrischen Methode ein „Alleinstellungsmerkmal“ zuweisen. Von einer Verifizierung der radiometrischen

Methode durch eine andere unabhängige Methode ist keine Rede. GRADSTEIN et al. (2012, 16) weisen auf das Potential hin, dass über ein Orbitaltuning zyklischer Sedimentfolgen eine noch exaktere Eichung der geologischen Zeitskala möglich wäre: „Tuning cyclic sequences to orbital time scales (...) has the potential to be the most accurate calibration of the geologic time scale.“

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

Zur Ergänzung → 4-01, 4-03, 4-09, 4-10.

Links

Internationale Chronostratigraphische Tabelle
(International Chronostratigraphic Chart)
v2020/03 der Internationalen Stratigraphischen
Kommission (International Commission on
Stratigraphy); sowie ältere Versionen bis 2008:
<https://stratigraphy.org/chart>

Stratigraphische Tabellen von Deutschland:
2016 (STD 2016) und 2002 (STD 2002):
<http://www.stratigraphie.de/std/index.html>

4-23 Geochronologie: absolutes Alter und radiometrisches Alter

Arthur Holmes: „Absolutes Alter“ ist ein bedeutungsloser Begriff

Einleitung

Unter der Rubrik „Verschiedenes“ wurde 1962 in dem Wissenschaftsmagazin *Nature* ein Kurzbeitrag von Arthur HOLMES veröffentlicht. Der Beitrag war mit „*Absolutes*“ Alter: ein bedeutungsloser Begriff überschrieben. – HOLMES ist Begründer und Protagonist der geologischen Zeitskala, die auf radiometrischen Alterswerten gründet (→ 4-01, 4-21, 4-22).

Das Ansinnen von HOLMES

HOLMES (1962) richtet seinen Appell an seine Geologenkollegen sowie Mitarbeiter des schnell wachsenden Fachgebiets der Geochronologie. Es möge die Gewohnheit oder Mode aufgegeben werden, radiometrische Alter als „absolute“ Alter zu bezeichnen. Dies sei sowohl unnötig als auch irreführend.

HOLMES Kritik an dem Begriff „absolutes Alter“

Ein Alter werde nicht absolut, so HOLMES, weil es in Zeiteinheiten wie einem Jahr ausgedrückt werde. Wenn ‚absolut‘ überhaupt etwas bedeute, impliziere es völlige Unabhängigkeit von allen Ereignissen und Beziehungen. Aber ein Jahr sei eine Beziehung und – darüber hinaus –, dass ein Jahr einem anderen Jahr gleiche sei nur eine zweckmäßige pragmatische Hypothese. Wie Augustinus vor langer Zeit erkannt habe, könne es keinen wirklichen Standard der Zeit geben wie es ihn für Länge oder Raum gäbe – da die ‚Zeit‘, die durch ein Ereignis bestimmt ist, vergehe und nicht zurückgebracht werden könne, um sie zu

messen, wie ein Meterstab gemessen werden könne, indem er an den Standardmeter angelegt werde. Wir – HOLMES weiter – würden keine Mühe darauf verwenden zu sagen, dass die „absolute“ Länge des Stabes ein Meter sei. Und wenn ein Mann von 45 Jahren gefragt werde, wie alt er sei, würde er antworten, dass sein absolutes Alter 45 Jahre sei.

Der Begriff „absolutes Alter“ sei nicht nur überflüssig, er sei auch philosophisch und wissenschaftlich ohne Bedeutung. Schließlich sei er irreführend, weil er psychologisch eine höhere Genauigkeit, als sie gerechtfertigt sei, suggeriere. In *Nature* sei kürzlich ein gutes Beispiel erschienen, wo der Titel eines besonders willkommenen Beitrags mit *Bestätigung des absoluten Alters ...*¹ beginne. Wie könne nun, so fragt HOLMES, ein Vorher, wenn es „absolut“ sei, eine Bestätigung benötigen.

Und HOLMES fährt fort: „Wenn überhaupt die Täter [culprits] behaupten, dass sie sich in guter Gesellschaft mit Newton und Kelvin befinden, die beide von ‚absoluter Zeit‘ schrieben, müssen sie sich nur an Einstein und das Kommen der Relativitätstheorie erinnern.“²

Der angemessene Begriff: radiometrisches Alter

HOLMES (1962) führt abschließend aus: „Wenn es wünschenswert ist, wie es manchmal vorkommt, zwischen geologischem Alter und in Jahren ausgedrücktem Alter zu unterscheiden, kann das Letztere (außer wenn durch Zählen von Warven gemessen)³ angemessen als ‚radiometrisches Alter‘ bezeichnet werden.“⁴

¹ HOLMES (1962) bezieht sich auf die Arbeit von EBERHARDT & FERRARA (1962).

² „If any of the culprits claim that they are in good company with Newton and Kelvin, who both wrote of ‘absolute time’, they have only to remember Einstein and the coming of relativity“ (HOLMES 1962, 1238).

³ Zu Warven und zur warvenchronologischen Methode → 3-01, 3-10.

⁴ „When it is desirable, as it sometimes is, to distinguish between geological age and the age expressed in years, the latter (except when measured by counting varves) can appropriately be called the ‘radiometric age’, a term that has already appeared occasionally in the literature of geochronology“ (HOLMES 1962, 1238).

Heutiges Verständnis

Mit einer Auswahl von radiometrischen Altern wird auch heute die zeit-relative, abstrahierte stratigraphische Abfolge, die Internationale Chronostratigraphische Tabelle, geeicht. In dem inzwischen etablierten Standardwerk zur geologischen Zeitskala heißt es in der Ausgabe *The Geologic Time Scale 2012*: „Die Wissenschaft (...) der radiometrischen Datierung (...) ist ein integraler Partner bei dem Bestreben der Konstruktion der geologischen Zeitskala; [sie] trägt zu der Fähigkeit bei, Ereignisse in der Erdgeschichte zu absoluter Zeit zu kalibrieren“ (SCHMITZ 2012).⁵

Fazit und Handlungsbedarf

Der Appell von HOLMES (1962) hat wenig genutzt oder ist in Vergessenheit geraten.

„Radiometrisches Alter“ und „radiometrische Datierung“ sind zwar etablierte Begriffe. „Radiometrisches Alter“ wird aber im Standardwerk *The Geologic Time Scale 2012* (wie damals auch) quasi mit „absolutem Alter“ gleichgesetzt.

Für ein besseres Verständnis – insbesondere das Bildungswesen und die breite Öffentlichkeit betreffend – ist es geboten, nicht nur den Begriff „radiometrisches Alter“, sondern auch den Begriff „radiometrisches Jahr“ zu verwenden.

Literatur

EBERHARDT P & FERRARA G (1962) Confirmation of the absolute age of the granodiorite outcrop in Elba Island with potassium-argon measurements. *Nature* 196, 665-666.

HOLMES A (1962) Absolute Age: a Meaningless Term. *Nature* 196, 1238.

SCHMITZ MD (2012) Radiogenic Isotopic Geochronology. In: GRADSTEIN FM, OGG JG, SCHMITZ MD & OGG GM (Eds.) (2012) *The Geologic Time Scale 2012*. Volume 1/2, Oxford Amsterdam, 115-126.

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

Zur Ergänzung → 4-03, 4-09, 4-10, 8-10.

⁵ „The science (...) of radiometric dating (...) is an integral partner in the effort of constructing the geologic

time scale, contributing the ability to calibrate events in Earth history to absolute time“ (SCHMITZ 2012, 115).

5-01 Dendrochronologische Methode (Dendrochronologie) – Übersichtsblatt

Sinngleiche und verwandte Begriffe

Dendrochronologie, Jahrringkalender, Baumringchronologie, Jahrringchronologie.

Ziel

Versuch, anhand überlappender Abschnitte von Jahrringbreiten-Kurven unterschiedlich alter Hölzer einer Region (von der Gegenwart) rückwärts eine absolute (zusammengesetzte) Chronologie aufzubauen.

Grundlagen

Feststellung, dass bei Bäumen in mittleren Breiten mit ausgeprägtem Jahreszeitenklima durch den periodischen Wechsel von Winterruhe und Vegetationszeit eine Jahrringstruktur verursacht wird. Dabei hängt die Dicke (Breite) jedes Jahrrings hauptsächlich von der Witterung, insbesondere dem Niederschlag und der Temperatur während der Vegetationsperiode, ab.

Vorgehensweise

Erstellung einer regionalen Standardchronologie: Beschaffung des Materials, Beprobung, Messung und ggf. graphische Darstellung. Synchronisierung der Proben untereinander (→ 5-13), u. a. mit statistischen Hilfsmitteln (Kreuzkorrelationskoeffizient r , t -Wert, Gleichläufigkeit GLK; → 5-14), durch abschließenden subjektiven Ja-/Nein-Entscheid des Dendrochronologen. – Eine Altersbestimmung erfolgt durch Abgleich der Dickensignatur der Probe mit der des Standards.

Basisannahme(n)

Korrelierbarkeit der Baumringsequenzen anhand der Dickensignatur kontinuierlich für den gesamten zu erschließenden Zeitraum der Vergangenheit.

Historie

Erstanwendung der Methodik in Nordamerika (DOUGLAS 1921); Aufbau Mitteleuropa (HUBER 1941, BECKER 1993). Konstruierte (ultra-) lange Chronologien:

- Kalifornische Borstenkiefernchronologie, bis 5142 v. Chr. (7104 Dendrojahre): FERGUSON (1969); → 5-21.
- Belfast-Chronologie, bis 5289 v. Chr. (7272 Dendrojahre): BROWN et al. (1986); → 5-22.
- Hohenheim-Eichenchronologie, bis 8480 v. Chr. (10.482 Dendrojahre): SPURK et al. (1998);

Hohenheim-Kiefernchronologie, bis 10461 v. Chr. (2516 Dendrojahre): FRIEDRICH et al. (2004); zusammen „Hohenheimer Jahrringkalender“ (→ 5-23), 12.460 Dendrojahre.

Anwendung

Archäologie, (Paläo)klimatologie, Geologie. Altersbestimmung von Objekten vorwiegend in nachchristlicher Zeit. Kalibrierung der Radiokarbon-Zeitskala (→ 6-01).

Angabe/Größenordnung der Ergebnisse

Angabe in Jahren, da absolut (s. u.).

- Jahrringfolge, z. B.: 1483-1599.
- Fällungsjahr, jahrgenau z. B.: Winter 1780/81 oder terminus post quem, nach 1540.

Bekannte Einschränkungen/Probleme

Keine Ausbildung einer markanten Dickensignatur; wechselnde Standortbedingungen; fehlende oder Scheinjahrringe; Pilzbefall; Insektenfraß.

Eichung

Keine. Das „Testen“ erfolgt System-intern durch „Replikation“; eine externe Replikation liegt vor (der „ultimative Test“), wenn Chronologien unabhängiger Bearbeiter übereinstimmen (nach BAILLIE 1995); → 5-13.

Aber: Eine ^{14}C -Datierung (Vordatierung) der Hölzer (insbesondere für Lang-Chronologien) ist üblich und unentbehrlich.

Altersbestimmungsverfahren

Anspruch: Unabhängig und absolut.

Verifizierung

Die Methode bedarf einer unabhängigen Verifizierung durch Objekte/Ereignisse bekannten (historischen) Alters.

Gültigkeit (der Ergebnisse)

Die Basisannahme konnte bisher nicht nachgewiesen werden.

Für Abschnitte einer Chronologie, die durch bekannte historische Ereignisse bestätigt sind, kann von validen Aussagen ausgegangen werden. Diese Abschnitte können je nach historischen Gegebenheiten und verfügbaren Materials für die regionalen Chronologien sehr unterschiedlich sein, etwa max. 500-1000 v. Chr. Für die älteren Abschnitte der genannten Lang-Chronologien versagt die unabhängige Verifizierung und es erfolgten generell ^{14}C -

Vordatierungen. So kann über die Validität der Lang-Chronologien keine Aussage gemacht werden. Es ist nicht bekannt, in welchem Verhältnis diese Dendroalter zum realen Alter stehen.

Hierzu und zu weiteren Punkten siehe KOTULLA (2019).

Kritik und Handlungsbedarf

Die Dendrochronologie präsentiert sich als eine unabhängige und absolute Datierungsmethode. Dies muss differenziert betrachtet werden (s. o.); für Lang-Chronologien ist dies nicht zutreffend.

Der breiten Öffentlichkeit werden die ungeprüften Lang-Chronologien als reale Alter, nämlich abgezahlter (echter) Kalenderjahre, dargestellt und kommuniziert. Dies ist in Anbetracht der unsicheren Erkenntnisse (fehlender Nachweis, ^{14}C -Eichung/-Vordatierung) und der Nutzung als Kalibrierung der ^{14}C -Zeitskala eine deutliche Grenzüberschreitung. Entscheidungsträger und Öffentlichkeit sind aktiv und vollumfänglich über die Gültigkeit und Grenzen der Ergebnisse dendrochronologischer Datierungen aufzuklären.

Literatur

BAILLIE MGL (1995) A Slice Through Time: Dendrochronology and Precision Dating. London.
BECKER B (1993) An 11,000-year German oak and pine dendrochronology for radiocarbon calibration. Radiocarbon 35, 201-231.
BROWN DM, MUNRO MAR, BAILLIE MGL & PILCHER JR (1986) Dendrochronology – the absolute Irish standard. Radiocarbon 28, 279-283.

DOUGLASS AE (1921) Dating our prehistoric ruins. Natural History 21, 27-30.

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

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.

HUBER B (1941) Aufbau einer mitteleuropäischen Jahrring-Chronologie. Mitt. Akad. Dtsch. Forstwiss. 1, 110-125.

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, Baiersbronn.

https://www.wort-und-wissen.org/wp-content/uploads/g-19-1_radiokarbon.pdf

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.

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

Zur Ergänzung → 3-01.

5-13 Kreuzdatierung, Synchronisation und Replikation

„Die letzte Entscheidung trifft der Dendrochronologe“

Methodik der Dendrochronologie¹

SPEER (2010) zufolge ist der wesentliche Grundsatz der Dendrochronologie das „Prinzip der Kreuzdatierung“. ² Für BAILLIE (1995, 28) ist Kreuzdatierung „die Kunst der Dendrochronologie“.

In der Praxis ist Kreuzdatierung („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 (→ 5-14). Die Datierung wird als „absolut“ betrachtet, wenn die zu datierende Jahrringabfolge zu einer in der Gegenwart beginnenden Standardchronologie („Absolutchronologie“) kreuzdatiert ist; sie wird als relativ betrachtet, wenn die zu datierende Jahrringabfolge zu einer schwimmenden Chronologie kreuzdatiert ist. Kreuzvergleich („cross-matching“) dagegen ist der zugrunde liegende Vorgang. Im deutschsprachigen Raum werden für Kreuzdatierung auch die Begriffe Überlappungsverfahren (SCHWEINGRUBER 1983) oder Überbrückungsverfahren (ECKSTEIN & WROBEL 2005) verwendet.

Replikation beschreibt ein System von Synchronisationen. ³ BAILLIE (1995, 28) zufolge geschieht Replikation auf drei Ebenen:

- 1) Eine primäre Replikation liegt vor, wenn individuelle Jahrringmuster einer Lokalität übereinstimmen; diese

Jahrringabfolgen bilden gegebenenfalls eine lokale Chronologie.

- 2) Eine sekundäre Replikation liegt vor, wenn unabhängige Lokalchronologien übereinstimmen; tendenziell sind diese Chronologien länger und – wegen ihrer primären Replikation – robuster als individuelle Jahrringmuster.⁴
- 3) Eine tertiäre bzw. externe Replikation liegt vor – der „ultimative Test“ –, wenn Chronologien⁵ unabhängiger Bearbeiter übereinstimmen (mit Verweis auf die europäischen Eichenchronologien⁶; → 5-22, 5-23).

Damit hat BAILLIE (1995)⁷ – wissenschaftstheoretisch – sowohl das System-Design als auch das Test-Design für lange Chronologien festgeschrieben. Die externe Replikation ist die „ultimative Probe des gesamten Chronologie-Systems.“⁸ Für die Anzahl der Proben, die auf der Grundlage der Kreuzdatierung das gleiche (Dendro-) Zeitintervall einer Chronologie (primäre Replikation) belegen, sind im deutschsprachigen Raum die Begriffe Beleg- oder Belegungsdichte verbreitet.

Der statistische Vergleich von Jahrringfolgen soll hierarchisch dem visuellen Vergleich untergeordnet sein. Als statistisches Ergebnis können mehrere mögliche Deckungslagen mit gleichen Ähnlichkeitswerten vorkommen (→ 5-14). So stellen ECKSTEIN & WROBEL (2005, 158) heraus: „Die letzte Entscheidung trifft der Dendrochronologe aufgrund seiner Erfahrung im Beurteilen von Ähnlichkeiten von Jahrringmustern. Diese Erfahrung ist schwer oder gar nicht messbar. Hierdurch bekommt die Dendrochronologie ohne Zweifel eine subjektive Komponente, im

¹ Dieser Beitrag ist im Wesentlichen ein Auszug aus KOTULLA (2019).

² „The principle of crossdating is the basic tenet of dendrochronology“ (SPEER 2010, 11); zuvor (Seite 2) mit Verweis auf A. E. DOUGLASS als Begründer des „crossdating“.

³ „The secret is, that the dendrochronologist has relevant experience and a repertoire of multi-match back-up, in the form of replication“ (BAILLIE 1995, 21).

⁴ Primäre und sekundäre Replikation werden auch als interne Replikation zusammengefasst.

⁵ Lokal- oder Regionalchronologien.

⁶ Kapitel 2 in BAILLIE (1995).

⁷ BAILLIE hat bereits in älteren Arbeiten das „Prinzip der Replikation“ beschrieben (z. B. BAILLIE 1983). Nach SPEER (2010, 23) ist das „Prinzip der Replikation“ – nach BAILLIE (1995) aber nur primäre Replikation – z. B. bereits von TWINNING (1833) und BABBAGE (1838) erkannt worden.

⁸ BAILLIE (1995, 27) schreibt weiter: „Replication is the factor which allows dendrochronologists to have confidence in their procedures. A dendrochronologist can not only claim that a chronology is precisely correct on the basis of in-house primary and secondary replication, but can demonstrate independent verification using tertiary replication.“

Ausnahmefall ist auch eine Fehlentscheidung nicht auszuschließen.“ Auch BAILLIE (1982) äußert sich in ähnlicher Weise.⁹

Es wird schließlich dargelegt – z. B. beim Hohenheimer Jahrringkalender (→ 5-23)¹⁰ –, dass die Konstruktion einer Langchronologie ausschließlich mit der Methode der Kreuzdatierung (bzw. dem dendrochronologischen Überbrückungsverfahren) möglich ist¹¹: In der Gegenwart beginnend und sukzessive in die Vergangenheit zurück erweiternd – entweder durch Anknüpfung einzelner Jahrringabfolge oder durch Anknüpfung einer schwimmenden Chronologie. Die Praxis allerdings weicht von einer abschließlichen Anwendung der „Theorie des Muster-Vergleichs“¹² gravierend ab (→ 5-21, 5-22, 5-23).

Handlungsbedarf

Es bedarf einer *wirklich* unabhängigen Validierung der langen Baumringchronologien. Die sog. „tertiäre oder externe Replikation“ (s. o.) ist nicht System-extern, sondern System-intern. Eine unabhängige, System-externe Validierung wäre z. B. durch Objekte bzw. Ereignisse bekannten Alters gegeben.

Literatur

- BAILLIE MGL (1982) Tree-Ring Dating and Archaeology. London.
- BAILLIE MGL (1983) Belfast dendrochronology – the current situation. In: OTTAWAY BS (ed.) Archaeology, Dendrochronology and the Radiocarbon

Calibration Curve. Occasional Paper No. 9, 15-24. Edinburgh.

BAILLIE MGL (1995) A Slice Through Time: Dendrochronology and Precision Dating. London.

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

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, Baiersbronn.

https://www.wort-und-wissen.org/wp-content/uploads/g-19-1_radiokarbon.pdf

SCHWEINGRUBER FH (1983) Der Jahrring. Standort, Methodik, Zeit und Klima in der Dendrochronologie. Bern Stuttgart.

SPEER JH (2010) Fundamentals of Tree-Ring Research. Tuscon.

STOKES MA & SMILEY TL (1968) An introduction to tree-ring dating. Chicago London. [Die Ausgabe von 1996 ist unverändert.]

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

Zur Ergänzung → 5-01, 6-01.

⁹ „Of course just because a match has a value of $t > 3.5$ does not mean that it has to be correct. The final decision must always rest with the dendrochronologist – the computer is only a back-up. To restate this last and important point: because a significant t value is quoted does not mean that the match is definitely correct – that rests in the hands of the dendrochronologist and the ultimate decision on correctness is his decision. However, a dendrochronologist's suggested match, if not backed up by a significant computer correlation, may well be suspect!“ (BAILLIE 1982, 85).

¹⁰ „So entsteht ein Jahrringkalender. Man beginnt mit der Untersuchung heute gefällter, möglichst alter Bäume. Balken aus Fachwerkhäusern z.B. sind noch älter und liefern mit ihren Jahrringkurven Wachstumsmuster, deren äußerer Bereich mit den inneren Jahrringen der heute gefällten Bäume übereinstimmt. Die inneren (älteren) Jahrringe dieser Fachwerkbalken passen zu Hölzern aus historischen Bauten oder

archäologischen Fundstellen. Die auf diese Weise zusammengefügte Standardjahrringkurven (Chronologien) können mit noch älteren Bäumen aus Kiesgruben oder Mooren – immer weiter in die Vergangenheit zurück – verlängert werden. So kann – mit dem dendrochronologischen Überbrückungsverfahren – aus vielen Bäumen schließlich eine mehrtausendjährige Jahrringchronologie aufgebaut werden, deren Verlauf durch den Wechsel von breiten und engen Jahrringen unverwechselbar ist.“

(https://botanik.uni-hohenheim.de/archaeo-palaeo_dendro_hoh-jahrringkalender; Zugriff 2019).

¹¹ SCHWEINGRUBER (1983, 40) zufolge ist es „das erklärte Ziel der dendrochronologischen Forschung, Chronologien über Jahrhunderte und Jahrtausende aufzubauen“. Dies sei technisch mit „Crossdating“ möglich.

¹² Begriff in Anlehnung an STOKES & SMILEY (1968, 49).

5-14 Statistische Methoden

Die Akzeptanz niedriger Ähnlichkeitswerte erhöht das Potenzial für dendrochronologische Kreuzdatierungen

Ähnlichkeitsmaße und ihre Anwendung¹

Zum Vergleich von Jahrringbreiten-Reihen (der „Muster“; → 5-13) werden hauptsächlich nachfolgende Ähnlichkeitsmaße verwendet:

- (Kreuz-) Korrelationskoeffizient r (Werte zwischen -1 und 0 bzw. 0 und 1);
- ein vom (Kreuz-) Korrelationskoeffizienten abgeleiteter Wert t (s. u. Gleichung 1), insbesondere entwickelt für kürzere Reihen (Werte ≥ 0);
- Gleichläufigkeitswert GLK (Werte zwischen 0 und 100 %).

Für die Berechnung von r - und t -Werten werden die Reihen zuvor normalisiert (weitere Begriffe: standardisiert, indiziert), d. h. sie werden trend- und mittelwertbereinigt (bzw. allgemein: gefiltert). Demnach ist zwischen ungefilterten (rohen) und gefilterten (transformierten) Reihen zu unterscheiden. Bei der Filterung wird mitunter – spektralanalytisch gesehen – eine Erhaltung bzw. Verstärkung der kurzfristigen Jahrringbreiten-Variation von 1-2 Jahren bewirkt.²

Zur Analyse des massenhaften Materials, das für die Konstruktion von langen Baumringchronologien gesammelt wurde, insbesondere zum Auffinden möglicher Synchronlagen, ist die Verwendung von Ähnlichkeitswerten und deren automatisierte Berechnung unentbehrlich. So heißt es in BAILLIE (1995, 21): „Korrelationsprogramme

sind also überaus zweckdienlich, und das ist insbesondere der Fall für einige der Referenz-Chronologien mit Längen von Tausenden von Jahren. In solchen Fällen wäre es nicht praktikabel mit dem Auge [also visuell, MK] nach Synchronlagen zu suchen.“³

Bemerkenswert ist, dass die maßgeblichen Jahrringlaboratorien über Jahre hinweg hauptsächlich nur ein einziges Ähnlichkeitsmaß verwendeten, und zwar jeweils ein unterschiedliches: LTTR Arizona (→ 5-21), r -Wert; Belfast (→ 5-22), t -Wert; Hohenheim (→ 5-23), GLK-Wert (z. B. BECKER 1982, 9).

Bei der Anwendung von Ähnlichkeitsmaßen sind der Schwellenwert, die Bewertung der Ähnlichkeit sowie die Länge der korrelierten Reihen von Bedeutung.

Zur Anwendung und Bewertung des t -Wertes liegen zahlreiche Arbeiten und Aussagen vor. BAILLIE (1982) zufolge liegen die t -Werte für den Untergrund („background“) in der Praxis zwischen 0,0 und 3,5, positive Synchronisationen („wahre Matches“) dagegen würden in der Regel t -Werte von $> 3,5$ produzieren.⁴ BAILLIE et al. (1983) wollen nur t -Werte mit einer „beträchtlichen Überschreitung“ eines Schwellenwertes von $t=3,0$ akzeptiert haben.⁵ PILCHER et al. (1984) bewerten den „ t -Test“, den sie in ihrer Publikation angewendet haben, eher als einen ziemlich groben Routine-Test als einen strengen statistischen Test.⁶ Irreleitend ist die Aussage von

¹ Dieser Beitrag ist im Wesentlichen ein Auszug aus KOTULLA (2019).

² Siehe z. B. FERGUSON & GRAYBILL (1981, 11). U. a. zu „D = the tree ring disturbance signal“: „(...) it is necessary to recognize and remove or control the B, D and E signals (...) Failure to do so would obscure (...) short term variation of 1-2 years that is important for crossdating purposes.“

³ Im Original (BAILLIE 1995, 21): „So, correlation programs are extremely useful and this is particularly the case with some of the reference chronologies which are thousands of years in length. In such cases it would not be practical to search for matching positions by eye.“ Und weiter: „High-correlation positions are checked visually and, where appropriate, backed up by replicative matches.“

⁴ „In practice the background t values fall between $t = 0.0$ and $t = 3.5$, and correlations of ring patterns which grew over the same time span of years normally produce t values greater than $t = 3.5$. (...) A genuine match will normally yield at least $t = 3.5$ “ (BAILLIE 1982, 84). So auch in BAILLIE (1991, 16).

⁵ „All cross-dating between ring patterns has been visual and statistical. The Belfast CROS program (Baillie and Pilcher, 1973) was used as standard, and only matches that were visually acceptable and produced 't' values well in excess of 3.0 were accepted. More important from the point of view of overall chronology integrity is insistence on replication“ (BAILLIE et al. 1983, 172).

⁶ „The t -test applied here is a rather crude routine test widely accepted as a valuable aid in cross-dating rather than a rigorous statistical test [mit Endnote 17 Verweis auf BAILLIE 1982]. In this program, the correlation

SCHWEINGRUBER (1983, 94) zur Berechnung des t -Wertes und seiner Aussagekraft („Eindeutigkeit“): „Mit diesem ‚t-Test‘ wird nun geprüft, ob zwei Kurven miteinander in Beziehung stehen. (...) Der Test ist sehr streng und gibt in der Regel die synchrone Lage zweier Kurven eindeutig

an.“ REINIG et al. (2018) z. B. klassifizieren ihre ermittelten t_{BP} -Werte (nach BAILLIE & PILCHER 1973, BP) wie folgt: ≥ 6 , sicherer Dendro-Link; ≥ 4 , guter/deutlicher Dendro-Link; ≥ 2 , schwacher Dendro-Link.⁷

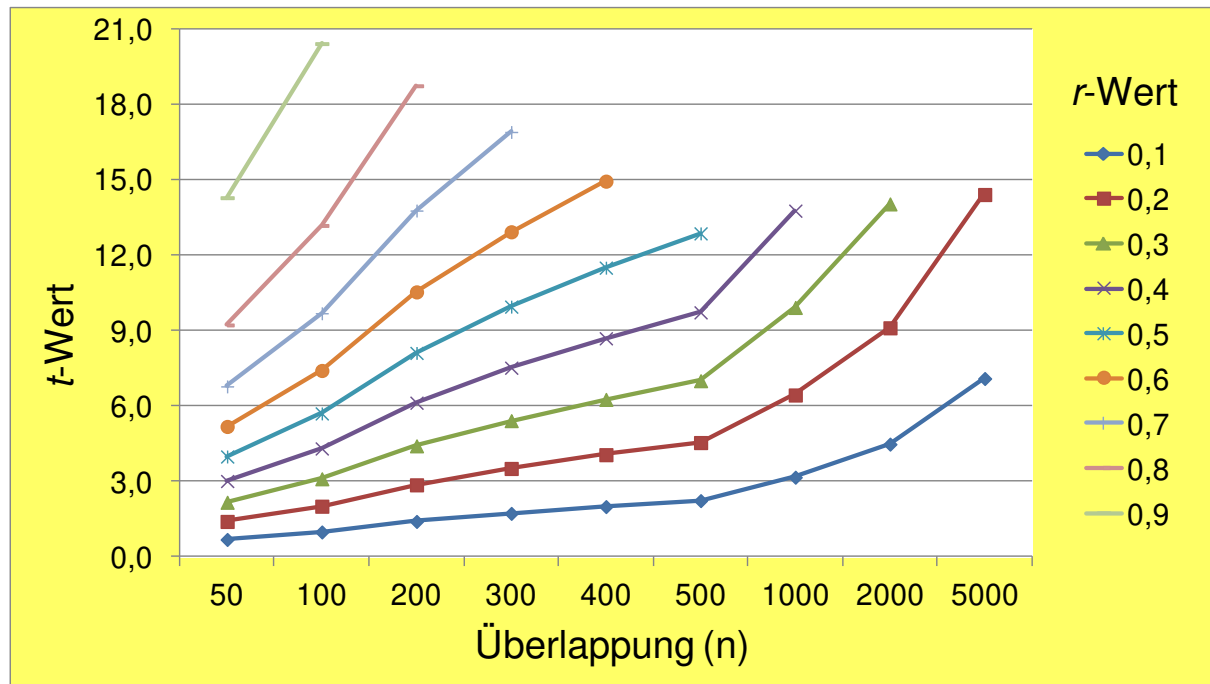


Abb. 1 Ähnlichkeitsmaß t . Entwicklung der t -Werte in Abhängigkeit von der Länge der Überlappung n und dem Wert des (Kreuz)korrelationskoeffizienten r .

Bei der Bewertung des t -Wertes wird allerdings eine Beziehung zur Länge der mutmaßlichen Überlappung nicht beachtet; dies ist für Vergleiche längerer Jahrringbreiten-Reihen oder Jahrringbreiten-Mittelwertreihen relevant.

$$t = |r| \cdot ((n-2)/(1-r^2))^{0,5} \quad (\text{Gleichung 1})$$

So beträgt beispielsweise der t -Wert gemäß Gleichung 1 bei einem Korrelationskoeffizienten

von $r=0,2$ und einer mutmaßlichen Überlappung von $n=1000$ bereits $t=6,4$ (Abb. 1). Das wäre REINIG et al. (2018) zufolge eine statistisch sichere Kreuzdatierung, obwohl der r -Wert sehr niedrig ist.

Zum GLK-Wert liegt ebenfalls eine Bewertung von PILCHER et al. (1984) vor; er soll ein leistungsfähiges Ähnlichkeitsmaß insbesondere für den Vergleich langer Zeitreihen bieten.⁸

coefficient is calculated on the logs of high-pass filtered series and t calculated from this. The values of t cannot be converted to probabilities because allowance is not made for autocorrelation. The significance of the test in the present study is that in all but one of the cases illustrated in Fig. 2 (the exception being Navan-Dorsey and Southwark, the t -value quoted is the highest value for all possible positions of overlap of the two series. The t -test should be seen as complementing the visual cross-dating" (PILCHER et al. 1984, 151f).

⁷ Hieraus könnte abgeleitet werden (implizit): < 2 , kein Dendro-Link.

⁸ „In addition to the t -test, the percentage of parallel variation, GL% (Gleichlaufigkeits value [mit Endnote 22 Verweis auf ECKSTEIN & BAUCH 1969, MK]), provides a

powerful test of synchrony when used on long time series. This simple non-parametric test derives the first differences of the two series and then determines what percentage of the total common years of the two series has the same sign. A test of the south German chronology against the Irish chronology over a total of 4,700 yr gave a GL% of 54.0%, significant at the 99.99% level. If the 1,582 signature years in the south German chronology are tested against the same years in the Irish sequence, the GL% rises to 56.1%, again significant at the 99.99% level. The Irish sequence and the three north German sequences give GL% values of 57.0, 56.8 and 55.6%, all significant at the 99.99% level" (PILCHER et al. 1984, 152).

Hinsichtlich Ähnlichkeit geben ECKSTEIN & WROBEL (2005, 158) zu bedenken: Einerseits stimmen zwei Jahrringfolgen nie völlig genau überein; diese Tatsache bezeichnen sie als Dilemma. Sie stellen „die Frage, wie eine schwache Ähnlichkeit zwischen zwei tatsächlich zeitgleichen Jahrringmustern von einer hohen Zufallsähnlichkeit getrennt werden kann“. Die Frage sei einfach zu beantworten: „Es ist unmöglich.“⁹ Andererseits ergebe sich mit Hilfe der Statistik immer eine „beste“ Ähnlichkeit. Dies mag wiederum in den teilweise niedrigen Schwellenwerten begründet sein, die die Bearbeiter akzeptieren.

In der Praxis bieten moderne Programme, die dendrochronologische Rohdaten verarbeiten, die Berechnung aller drei Ähnlichkeitsmaße nebeneinander, auch unter Berücksichtigung unterschiedlicher Normalisierungsverfahren. Hierdurch ist eine Gesamtübersicht stets gewahrt.

Literatur

- BAILLIE MGL (1982) Tree-Ring Dating and Archaeology. London.
- BAILLIE MGL (1991) Dendrochronology and Thera. The scientific case. Journal of the Ancient Chronology Forum 4, 15-28.
- BAILLIE MGL (1995) A Slice Through Time: Dendrochronology and Precision Dating. London.
- BAILLIE MGL & PILCHER JR (1973) A simple cross-dating program for tree-ring research. Tree-Ring Bulletin 33, 7-14.
- BAILLIE MGL, PILCHER JR & PEARSON GW (1983) Dendrochronology at Belfast as a background to high-precision calibration. Radiocarbon 25, 171-178.
- BECKER B (1982) Dendrochronologie und Paläoökologie subfossiler Baumstämme aus Flussablagerungen. Ein Beitrag zur nacheiszeitlichen Auenentwicklung im südlichen Mitteleuropa. Mitteilungen der Kommission für Quartärforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Band 5. Wien.
- ECKSTEIN D & BAUCH J (1969) Beitrag zu Rationalisierung eines dendrochronologischen Verfahrens und zur Analyse seiner Aussagesicherheit. Forstwissenschaftliches Centralblatt 88, 230-250.
- ECKSTEIN D & WROBEL S (2005) Dendrochronologie. In: PINGEL V & HAUPTMANN A (eds.) Archäometrie – eine Querschnittswissenschaft. Methoden und Anwendungsbeispiele naturwissenschaftlicher Verfahren in der Archäometrie. Stuttgart, 154-170.
- FERGUSON CW & GRAYBILL DA (1981) Dendrochronology of bristlecone pine. A terminal report submitted 31 October, 1981 on the National Science Foundation grant EAR-78-04436 with the assistance of the Department of Energy contract no. EE-78-A-28-3274.
- 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, Baiersbrunn.
- https://www.wort-und-wissen.org/wp-content/uploads/g-19-1_radiokarbon.pdf
- PILCHER JR, BAILLIE MGL, SCHMIDT B & BECKER B (1984) A 7272-year tree-ring chronology from Western Europe. Nature 312, 150-152.
- REINIG F, NIEVERGELT D, ESPER J, FRIEDRICH M, HELLE G, HELLMANN L, KROMER B, MORGANTE S, PAULY M, SOOKDEO A, TEGEL W, TREYDTE K, VERSTEGE A, WAKER L & BÜNTGEN U (2018) New tree-ring evidence for the Late Glacial period from the northern pre-Alps in eastern Switzerland. Quaternary Science Reviews 186, 215-224.
- SCHWEINGRUBER FH (1983) Der Jahrring. Standort, Methodik, Zeit und Klima in der Dendrochronologie. Bern Stuttgart.
- und Blattnummer: Verweis auf andere Beiträge der Online-Loseblattsammlung.
- Zur Ergänzung → 5-01, 6-01.

⁹ ECKSTEIN & WROBEL (2005, 158) fahren unmittelbar fort: „Dennoch ist die Dendrochronologie eine zuverlässige Datierungsmethode. Warum? Das beim Aufbau von

Jahrringchronologien und bei deren Anwendung für Datierungen immer wieder zugrundegelegte Prinzip heißt Replikation (...). Zu Replikation → 5-13.

5-21 Kalifornische Borstenkiefernchronologie (bristlecone pine chronology)

Die Gültigkeit des langen Teils der Borstenkiefernchronologie ist nicht bekannt – eine unabhängige Validierung ist bislang nicht erfolgt

Erste (ultra-) lange Baumjohrningchronologie¹

Die kalifornische Borstenkiefernchronologie (bristlecone pine chronology) wurde hauptsächlich in den 1960er-Jahren am Laboratory of Tree-Ring Research (LTRR) der Universität Arizona konstruiert (FERGUSON 1969)²; mit den Erweiterungen bis 1983 soll sie – FERGUSON & GRAYBILL (1983) zufolge – 8681 [Dendro-] Jahre umfassen (Tab. 1). Darüber hinaus ist keine Erweiterung mitgeteilt worden, obgleich nach FERGUSON & GRAYBILL (1985) noch „ältere“ Bäume (¹⁴C-datiert) gefunden wurden. Die aktuelle Länge soll 8836 [Dendro-] Jahre betragen (LEAVITT & BANISTER 2009, 375).³ Grundlegend allerdings sind die Publikationen zur 7104 [Dendro-] Jahre umfassenden Chronologie (FERGUSON 1969, 1970).



Abb. 1 Borstenkiefer (bristlecone pine) im „Ancient Bristlecone Pine Forest“ der White Mountains, Kalifornien. Foto: Rick GOLDWASER, 2008 (Wikimedia Commons, CC-BY-2.0).

Die Chronologie ist für Borstenkiefern⁴ der kalifornischen White Mountains entwickelt worden; das Material stammt aus etwa 3000 m Höhe von lebenden und toten, noch stehenden Bäumen oder Resten bzw. Fragmenten umgefallener und erodierter Stämme. FERGUSON (1969) hat die Standardchronologie aus den zuvor existierenden Teilchronologien Methusaleh Walk (Skalenabschnitt AD 1600-1962, 9 Bäume) und Schulman-Standard (Skalenabschnitt AD 800-1954, 14 Bäume; Tab. 1) sowie 17 einzelnen Individuen (Skalenabschnitt 5142 BC bis AD 1285) zusammengesetzt.

Die lange Chronologie ist hauptsächlich mit dem Ziel erstellt worden, dendrochronologisch datierte Jahrringproben für die Kalibration der Radiokarbon-Zeitskala (→ 6-01) zur Verfügung zu stellen.⁵ Eine diesbezügliche Kooperation mit dem Radiokarbon-Laboratorium der Universität von Arizona war aber zweiseitig angelegt; denn für Proben unbekannten Alters (nicht-lebender Bäume) lieferte das Radiokarbon-Laboratorium (die notwendigen) ¹⁴C-Alter.

Die Datensätze der kalifornischen Borstenkiefernchronologie bildeten über viele Jahre das Rückgrat der Dendrokalibration der Radiokarbon-Zeitskala, sind aber seit Mitte der 1990er-Jahre nicht mehr in der Kalibrationskurve inkludiert (REIMER et al. 2009, 2013).

Die komplette Standardchronologie mit 7104 gefilterten Werten ist in tabellarischer Form publiziert (FERGUSON 1969, Appendix A; FERGUSON 1970, Table 3) und liegt auch als normalisierte Zeitreihe vor (Datei ca506.crn).⁶ Die dendrochronologischen Rohdaten und Konstruktionsdaten

¹ Dieser Beitrag ist im Wesentlichen ein Auszug aus KOTULLA (2019).

² Das sog. *Bristlecone Pine Project* begann 1956 (FERGUSON & GRAYBILL 1983, 288).

³ Mit Verweis auf eine pers. Mittlg. von T. HARLAN.

⁴ Einige lebende Exemplare sollen sehr hohe individuelle Alter aufweisen. Siehe z. B. SCHULMAN (1956), SCHULMAN & FERGUSON (1956) und SCHULMAN (1958).

⁵ „The primary focus of the project – to provide dendrochronologically-dated decade samples for an interlaboratory calibration of the ¹⁴C time scale (Klein et al, 1982) – continues as bulk material for selected time periods becomes available“ (FERGUSON & GRAYBILL 1983, 287).

⁶ <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/treering/chronologies/northamerica/usa/ca506.crn>

sind allerdings nicht veröffentlicht; auch ist eine hochauflösende Bild-Dokumentation der Proben nicht publiziert bzw. zugänglich hinterlegt (u. a.

wegen der z. T. komplexen Wuchsformen und dem Problem vermeintlich fehlender Jahrringe).

Chronologie/ Referenz	Dendro-Zeitskala		Länge [Dendrojahre]	Anmerkung
	Start	Ende		
<u>Schulman Master</u>				
Schulman (1956)	AD 800	AD 1954	1155	
<u>White Mountains Master</u>				
Ferguson & Wright (1963)	ca. 1900 BC	AD 1954 ?	3850	A
Ferguson et al. (1966)	ca. 4638 BC ?	AD 1962 ?	>6600	B
Ferguson (1968)	5150 BC		7117	
Ferguson (1969)	5142 BC	AD 1962	7104	
Ferguson (1970)	5522 BC	AD 1962	7484	
Ferguson (1972)			nahezu 8000	
Ferguson (1979)	6275 BC	AD 1978	8253	
Ferguson & Graybill (1981)	6700 BC			
Ferguson, Graybill & Burns			8681	C
Ferguson & Graybill (1983)	6700 BC	AD 1981	8681	
Ferguson et al. (1985)	6700 BC			
Linick et al. (1986)	6554 BC			D

Tab. 1 Kalifornische Borstenkiefernchronologie. Ausgewählte Marksteine der Konstruktion. Anmerkungen: A: Zwischenmitteilung zum Konstruktionsfortschritt; „nutzbare“ Standardchronologie; B: Zwischenmitteilung zum Konstruktionsfortschritt; C: angekündigt in FERGUSON & GRAYBILL (1981), aber nicht publiziert; D: die Verlängerung bezieht sich nach LINICK et al. (1986, 944) auf eine Borstenkiefer-Probe (Dendrojahre 6554-5820 BC), die mit der existierenden Chronologie kreuzdatiert werden konnte.

Material und Alter

Die Baumstämme bzw. Baumstammreste am jeweiligen Fundpunkt geben keinen Hinweis auf ihr Alter oder – bei mehreren Individuen – ihr relatives Alter zueinander. Das gilt für alle Fundsituationen. Eine Feststellung von LIBBY (in FERGUSON 1970) zu dem Borstenkiefern-Material der White Mountains dokumentiert dies: „Es ist ein schwieriges Problem, weil wir, wenn wir ein Stück Holz bloß betrachten, nicht fähig sind zu sagen, ob es sehr alt ist oder nicht.“⁷

Elemente der Chronologie-Konstruktion:

¹⁴C-Vordatierung

FERGUSON (1970, 244) berichtet für die 7484 [Dendro-] Jahre umfassende Borstenkiefernchronologie – Stand 15. Mai 1969 – von insgesamt 471 ¹⁴C-datierten Proben, hauptsächlich in Form von 10-Jahrringeinheiten. Grundlage der Radiokarbon-Bestimmungen war eine Kooperation mit dem Radiokarbon-Laboratorium der Universität von Arizona; demnach sollte das Laboratorium ¹⁴C-Alter für Überreste von Bäumen liefern, die in keiner Beziehung zu lebenden Bäumen standen, also von Holz unbekannten Alters.⁸

⁷ LIBBY in einer Diskussion im Anschluss an FERGUSONS Vortrag über die Etablierung seiner 7484 [Dendro-] Jahre umfassenden Borstenkiefernchronologie in den kalifornischen White Mountains (FERGUSON 1970, 245): „We are making a concerted effort, working with the U. S. Forest Service, the Park Service and the Bureau of Land Management, to protect these ancient forests and particularly the pieces of ancient wood lying on the ground, which, as Professor Ferguson has indicated, are in many respects more valuable than the living trees. It is a difficult problem, because we are unable to tell by just looking at a piece of wood whether it is very ancient or not. Our first thought and

plan were to pick up all of this dead wood and put it in a warehouse. (...) Professor Ferguson tells a story about finding the oldest piece ever found right the trail. I guess that that is about the state of the art at the moment – largely a matter of luck – but thousands of tons of ancient wood are lying there and we badly need to go through these areas and somehow segregate and protect them. Such a program may be fairly practical. We are thinking about taking samples from these ancient pieces of dead wood and determining radiocarbon dates for all of them. (...)“.

⁸ Bereits der Folgeantrag zur Forschungsbewilligung NSF-G 19949 vom 10. Mai 1963 (MCGINNIES &

Zu diesem Zeitpunkt bildeten – über die Reichweite der Sequoia und ägyptischen Materials hinaus – nur Proben der Borstenkiefer die einzige Quelle für die Kalibration der Radiokarbon-Zeitskala.⁹ FERGUSON erwähnt in seinen Arbeiten nicht ausdrücklich, dass er die ¹⁴C-Datierungen zur Konstruktion der Chronologie verwendet hat; dies ergibt sich aber aus dem Gesamtzusammenhang.¹⁰

Validierung durch zweite Borstenkiefernchronologie?

LAMARCHE & HARLAN (1973) vergleichen ihre nach eigenen Angaben „unabhängig entwickelte“ Campito-Chronologie mit der Methuselah-Chronologie von FERGUSON (1969) (kalifornische Borstenkiefernchronologie). Beide Borstenkiefern-Probenlokalitäten, Campito Mountain und Methuselah Walk, befinden sich in den White Mountains (Kalifornien) und sind nur etwa 16 km voneinander entfernt. Die konstruierte, zusammengesetzte Campito-Chronologie ist 5403 Dendrojahre lang und umfasst den Skalenbereich 3433 BC bis AD 1970 (Tab. 2).

LAMARCHE & HARLAN (1973) beurteilen die Übereinstimmung der Chronologien als „nahezu perfekt“ und schließen, dass die Anwendung „dendrochronologischer Techniken auf die Borstenkiefer hoch-reproduzierbare Ergebnisse

liefert“.¹¹ Die Werte der 53 ermittelten Korrelationskoeffizienten (100-Jahrringintervalle) lagen in einem Korridor zwischen 0,4 und 0,8 (LAMARCHE & HARLAN 1973, ihre Fig. 7).

Allerdings belegen LAMARCHE & HARLAN (1973) eine unabhängige Konstruktion der Campito-Chronologie nicht (zu einer Analyse siehe KOTULLA 2019). Folglich ist eine Reproduzierbarkeit der Methuselah- bzw. kalifornischen Borstenkiefernchronologie (FERGUSON 1969) durch die Campito-Chronologie im Sinne einer unabhängigen Verifikation nicht gegeben (Skalenbereich 3433 BC bis < AD 600). Demnach liegt auch keine externe (tertiäre) Replikation vor (→ 5-13).

Publikation der dendrochronologischen Rohdaten und Konstruktionsdaten

Die für die Kalibrierung der Radiokarbon-Zeitskala sowie der Konstruktion der Belfast-Chronologie (→ 5-22) und des Hohenheimer Jahrringkalenders (→ 5-23) einstmals relevante kalifornische Borstenkiefernchronologie muss praktisch überprüfbar, also duplizier- und reproduzierbar sein. Hierzu bedarf es einer (freiwilligen) Veröffentlichung nicht nur der dendrochronologischen Rohdaten, sondern auch der Konstruktionsdaten. Dies ist bis heute nicht geschehen.

PATRICK 1963, 13) enthielt eine weitreichende Passage zur Kooperation mit dem Radiokarbon-Laboratorium der Universität von Arizona: „Our part of the cooperative studies with the University of Arizona Radiocarbon Laboratory is to furnish exactly dated tree-ring material that can be used to check radiocarbon determinations over a span of 4500 years. In return, the radiocarbon laboratory will provide dates on ‘floaters’, pieces of wood that are remnants of former trees and have no provenience in relation to any living tree. These pieces were chosen from sites having a sensitive chronology and producing trees in the 4000-year range. The floaters could be the inner portions of trees of the maximum age class that have been dead for a thousand years or more. Three specimens dated so far, at 2692 ± 36, 3000 ± 300, and 3334 ± 58 B.P. (5730 half life), are within the range of the present tree-ring chronology, but time has not yet permitted their study. Carbon-14 dating of wood of unknown age may be useful in either of two ways: (1) if the Carbon-14 date falls within the range of the existing tree-ring chronology it would simplify the process of correctly identifying the exact time span in which the floater falls, or (2) should the date be prior to the existing tree-ring chronology, this material would provide a basis for ultimately extending the tree-ring chronology back in time by cross-dating individual

specimens and, by filling in the gaps, tying it into the chronology based on living trees.“ – MCGINNIES & PATRICK (1963, 13) beziehen sich auch auf die Publikation von LIBBY (1963, 279), der mitteilte, dass keine Jahrringdaten von früher als 3600 Jahre vor heute vorlägen.

⁹ „Beyond the range of the sequoia and Egyptian material, samples of bristlecone pine constitute the sole source of dated wood for the calibration of the radiocarbon timescale“ FERGUSON (1970, 244).

¹⁰ Z. B.: „(...) we are cautiously optimistic that the chronology may eventually reach back at least 10,000 years. This thought is buttressed by the presence of a 500-year ‘floating’ sequence in the range of 9000 years BP (Ferguson, 1968). Current ¹⁴C analysis seems to indicate that another remnant, collected in 1981, again with ca 500 rings, may be over 10,000 years old (H N Michael, pers commun, 1982). Continuing tree-ring and ¹⁴C studies will further define the temporal relationship of these two specimens“ (FERGUSON & GRAYBILL 1983, 287).

¹¹ „The nearly perfect agreement between the independently developed chronologies shows that dendrochronological techniques give highly reproducible results upon their application to bristlecone pine“ (LAMARCHE & HARLAN 1973, 8856).

Baumring- chronologie	Lokalität (White Mountains, Kalifornien)	Länge [Dendrojahre]	Dendro-Zeitskala	
			Start	Ende
Methuselah	Methuselah Walk	7104	5141 BC	AD 1962
Campito	Campito-Mountain, 16 km N Methuselah Walk	5403	3433 BC	AD 1970

Tab. 2 Lange Baumringchronologien der White Mountains, Kalifornien. Zusammengestellt nach LAMARCHE & HARLAN (1973).

Fazit und Handlungsbedarf

Die Konstruktion der kalifornischen Borstenkiefernchronologie erfolgte nicht ausschließlich – unabhängig – mit der dendrochronologischen Methode („Prinzip der Kreuzdatierung“; → 5-13). Die Konstruktion des langen Abschnitts der Chronologie erfolgte ausnahmslos direkt mit ^{14}C -Vordatierungen von Baumringproben.

Die Konstrukteure der kalifornischen Borstenkiefernchronologie haben die Gültigkeit und Unabhängigkeit ihrer Chronologie weder aufgezeigt noch belegt; die Beweislast aber liegt auf ihrer Seite.

Bei dem langen Teil der kalifornischen Borstenkiefernchronologie handelt es sich um einen nicht verifizierten Jahrringkalender. Eine Gleichsetzung von Dendrojahr (Jahrringkalenderjahr) und Realjahr ist nicht zulässig.

Literatur

- FERGUSON CW (1968) Bristlecone Pine: Science and Esthetics. *Science* 159, 839-846.
- FERGUSON CW (1969) A 7104-year annual tree-ring chronology for bristlecone pine, *Pinus aristata*, from the White Mountains, California. *Tree-Ring Bulletin* 29, 3-29.
- FERGUSON CW (1970) Dendrochronology of bristlecone pine, *Pinus aristata*: establishment of a 7484-year chronology in the White Mountains of eastern-central California, U. S. A. In: OLSSON IU (ed.) *Radiocarbon Variations and Absolute Chronology*. Stockholm, 237-259.
- FERGUSON CW (1972) Dendrochronology of bristlecone pine prior to 4000 B.C. *Proceedings of the 8th International Conference on Radiocarbon Dating*, Lower Hutt, New Zealand. *Bulletin Royal Society of New Zealand* 14, A2-A10.
- FERGUSON CW (1979) Dendrochronology of bristlecone pine, *Pinus longaeva*. *Environment International* 2, 209-214.
- FERGUSON CW & GRAYBILL DA (1981) Dendrochronology of bristlecone pine. A terminal report submitted 31 October, 1981 on the National Science Foundation grant EAR-78-04436 with the

assistance of the Department of Energy contract no. EE-78-A-28-3274.

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

FERGUSON CW, LAWN B & MICHAEL HN (1985) Prospects for the extension of the bristlecone pine chronology: Radiocarbon analysis of H-84-1. *Meteoritics* 20, 415-421.

FERGUSON CW & WRIGHT RA (1963) Tree rings in the western Great Basin. *Anthropological Paper Number 9*, Nevada State Museum. Carson City, Nevada.

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*, Baiersbrunn.

https://www.wort-und-wissen.org/wp-content/uploads/g-19-1_radiokarbon.pdf

LAMARCHE JR VC & HARLAN TP (1973) Accuracy of tree ring dating of bristlecone pine for calibration of the radiocarbon time scale. *Journal of Geophysical Research* 78, 8849-8858.

LEAVITT SW & BANNISTER B (2009) Dendrochronology and Radiocarbon dating: The Laboratory of tree-ring research connection. *Radiocarbon* 51, 373-384.

LINICK TW, LONG A, DAMON PE & FERGUSON CW (1986) High-precision radiocarbon dating of bristlecone pine from 6554 to 5350 BC. *Radiocarbon* 28, 943-953.

MCGINNIES WG & PATRICK DL (1963) Continuation of Studies on the Dendrochronology of Bristlecone Pine (*Pinus aristata* Engelm.) (Continuation of Research Grant NSF-G 19949). A Research Proposal Submitted to the National Science Foundation.

REIMER PJ, BARD E, BAYLISS A, BECK JW, BLACKWELL PG, BRONK RAMSEY C, BUCK CE, EDWARDS RL, FRIEDRICH M, GROOTES PM, GUILDERSON TP, HAFLIDASON H, HAJDAS I, HATTÉ C, HEATON TJ, HOGG AG, HUGHEN KA, KAISER KF, KROMER B, MANNING SW, REIMER RW, RICHARDS DA, SCOTT EM, SOUTHON JR, TURNER CSM & VAN DER PLICHT J (2013) 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, BLACKWELL PG, BRONK RAMSEY C, BUCK CE, BURR GS, EDWARDS RL, FRIEDRICH M, GROOTES PM, GUILDERSON TP, HAYDAS I, HEATON TJ, HOGG AG, HUGHEN KA, KAISER KF, KROMER B, MCCORMAC FG, MANNING SW, REIMER RW, RICHARDS DA, SOUTHON JR, TALAMO S, TURNEY CSM, VAN DER PLICHT J & WEYHENMEYER CE (2009) INTCAL09 and MARINE09 Radiocarbon Age Calibration Curves, 0–50,000 years cal BP. Radiocarbon 51, 1111-1150.

SCHULMAN E (1956) Dendroclimatic Changes in Semiarid America. Tucson, Arizona, USA. University of Arizona.

SCHULMAN E (1958) Bristlecone pine, oldest known living thing. National Geographic Magazine 113, 354-372.

SCHULMAN E & FERGUSON CW (1956) Millenia-old pine trees sampled in 1954 and 1955. In: SCHULMAN (ed.) Dendroclimatic Changes in Semiarid America. Appendix C, 136-138.

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

Zur Ergänzung → 5-01, 5-14, 6-01.

5-22 Belfast-Chronologie (irische Eichenchronologie)

Die Gültigkeit des langen Teils der Belfast-Chronologie ist nicht bekannt – eine unabhängige Validierung ist bislang nicht erfolgt

Eine (ultra-) lange Baumjohringschronologie für Westeuropa¹

Die Belfast-Chronologie (auch irische Eichenchronologie) umfasst 7272 [Dendro-] Jahre. Sie wurde zwischen 1968 und 1984 an der Queens-Universität Belfast (Nordirland) konstruiert (Tab. 1). Das Ziel war, eine (lokale) Kalibration für die Radiokarbon-Zeitskala zur Verfügung zu stellen (BAILLIE 2009, 361).²

PILCHER et al. (1984) allerdings berichten von einer gemeinsamen Initiative zur finalen Konstruktion einer 7272 [Dendro-] Jahre umfassenden, „ununterbrochenen“ Baumringchronologie, zu welcher hauptsächlich Eichen aus Nordirland, Norddeutschland und Süddeutschland beitrugen, und bezeichnen sie als „europäische Eichenchronologie“ bzw. „Chronologie für Westeuropa“. In diesem Zuge wurde wohl die „irische Chronologie“ abgeschlossen, mit einem Startpunkt 5289 Dendrojahre BC.^{3,4} Mit BROWN et al. (1986) ist die Belfast-Chronologie als fertiggestellter und abgeschlossener, „absoluter irischer Standard“ etabliert worden.⁵

Für die vorchristliche Zeit (BC) erfolgte die dendrochronologische Bearbeitung an Stammscheiben von (subfossilen) nordirischen Mooreichen; sie waren hauptsächlich von der Landwirtschaft geborgen und in Haufen zusammengetragen worden (BAILLIE 2009, 364).

Für die [Dendro-] Sequenz 5289–116 BC sind 658 Bäume einbezogen worden; es werden zwei Schwachstellen mit niedriger Replikationsrate (Belegdichte < 10 Bäume) aufgeführt, bei den Skalenpunkten 2500 und 950 BC (BROWN et al. 1986, 282). Viele Jahre später bestätigen BROWN &

BAILLIE (2012) erneut die Existenz von „Lücken“ und „Verarmungen“ in der irischen Eichenchronologie (bzw. Belfast-Langchronologie⁶). Eine Weiterführung der Chronologie über den Skalenpunkt von 5289 BC hinaus hat es bis dato nicht gegeben.

Belfast Telegraph News Opinion Business Sport

Queen's ordered to release tree data



The analysing of tree rings can give scientists information on global weather patterns

By Clare Weir

May 01 2010 01:50 AM



Queen's University has until Monday night to hand over unique data that could undermine global warming theories.

The institution has refused to release all its findings on tree rings, which store information on climate patterns.

London academic Douglas J Keenan has been battling Queen's University Belfast (QUB) for three years for the vital material.

Abb. 1 Zur Zwangsveröffentlichung der Rohdaten des (ehemaligen) dendrochronologischen Labors der Queens-Universität Belfast (QUB). Hier der Online-Artikel des *Belfast Telegraph* (Screenshot) vom 1. Mai 2010.

¹ Dieser Beitrag ist im Wesentlichen ein Auszug aus KOTULLA (2019).

² Siehe Fußnote 5.

³ „The Irish chronology is continuous and internally replicated back to 5289 BC“ (PILCHER et al. 1984, 152).

⁴ Die 7272 [Dendro-] Jahre beziehen sich auf das Jahr 1984; Rechnung: 5289 (BC) + 1949 (AD) = 7238 (Bezugsjahr 1950) + 34 = 7272 (Bezugsjahr 1984).

⁵ Zum Hergang: „Once the Belfast chronology was complete, work started on archiving the primary data and rebuilding the chronology as a single continuous sequence“ (BROWN et al. 1986, 282). – In der Konklusion heißt es dann (S. 282): „We are confident in presenting this chronology [die Belfast-Chronologie, MK] to the radiocarbon world as a primary standard of high integrity on which to base the radiocarbon calibration.“

⁶ Belfast Long Chronology, Kurzform BLC7000.

Referenz	Dendro-Zeitskala		Länge [Dendrojahre]	Anmerkung
	Start	Ende		
<u>Chronologie-Elemente</u>				
Pilcher et al. (1977)	ca. 6100 BC		ca. 8100	A
Baillie (1979)	ca. 5500 BC		ca. 7500	A
Baillie et al. (1983)	ca. 5300 BC		ca. 7300	A
<u>Absolut-Chronologie</u>				
Smith et al. (1972)	AD 1381	AD 1971	591	
Baillie (1977a)	AD 1379	AD 1970	592	
Baillie (1977b)	AD 1001	AD 1970	972	
Baillie et al. (1983)	13 BC	Gegenwart	ca. 2000	
Pilcher et al. (1984)	5289 BC	AD 1984	7272	B
Brown et al. (1986)	5289 BC	AD 1984	7272	C
Brown & Baillie (2012)	5289 BC	AD 1984	7272	D

Tab. 1 Belfast-Chronologie. Ausgewählte Marksteine der Konstruktion. Anmerkungen: A: Gesamtlänge in Dendrojahren mit Lücken bis zur Gegenwart; B: als „Europäische Eichenchronologie“ bezeichnet; C: finale Etablierung der „Belfast-Chronologie“; D: „Lücken“-Diskussion, siehe Textteil.

Die dendrochronologischen Rohdaten (über 9000 Datensätze) sind 2010 von der Queens-Universität Belfast auf Anordnung des *Beauftragten für Information* „zwangs“ veröffentlicht worden (Abb. 1). Der Maßnahme war ein entsprechender Antrag – nach dem *UK Freedom of Information Act 2000* – vorausgegangen.

Material und Alter

Die Baumstämme bzw. Baumstammreste am jeweiligen Fundpunkt geben keinen Hinweis auf ihr Alter oder – bei mehreren Individuen – ihr relatives Alter zueinander. Das gilt für alle Fundsituationen. BAILLIE (2009) schreibt: „Das größte Problem, bei dem Versuch Chronologien mit Mooreichen aufzubauen, ist, dass die Eichen selbst keine Anhaltspunkte zu ihrem relativen Alter aufweisen; eine Mooreiche sieht wie jede andere Eiche aus. (...) Es gab Tausende von Mooreichen holozänen Alters, aber sie waren nicht geschichtet und es gab nichts, das entweder

ihr absolutes oder zumindest ihr relatives Alter anzeigte.“⁷

Elemente der Chronologie-Konstruktion:

¹⁴C-Vordatierung und „Wiggle-Matching“⁸

BAILLIE (2009, 364) schreibt von einem „chronologischen Rahmenwerk“, welches durch die ¹⁴C-Datierungen der Hölzer zur Verfügung stand. Die „¹⁴C-Datierungspraxis“ habe gezeigt, dass der Großteil der Hölzer prähistorisch sei; für Irland bedeute dies die Zeit vor Christus (S. 362). Zuvor war BAILLIE (1983, 16) konkreter: „Umfangreiche Radiokarbon-Analysen von Proben dieser 4300 Jahre umfassenden Chronologie [sog. „lange Chronologie“, MK] erlaubten eine zeitliche Platzierung der Chronologie.“⁹

Die europäischen Baumringchronologien Belfast und Hohenheim (→ 5-23) sind während ihrer Konstruktionsphase durch „Wiggle-Matching“ mit der kalifornischen Borstenkiefernchronologie (→ 5-21) synchronisiert worden. In einem Rückblick schreiben LEAVITT & BANNISTER (2009; mit

⁷ „The biggest problem in trying to build chronologies using bog oaks is that the oaks themselves offer no clues as to relative age; one bog oak looks very like any other, and appearance is no guide to age. This problem was made even more difficult by the fact that the timbers were normally not found in situ in the bogs; rather, they were almost always found in heaps after they had been dragged out by heavy machinery (see Figure 2). So the problem initially appeared as follows. There were thousands of bog oaks of Holocene age, but they were

unstratified and there was nothing to indicate either absolute age or indeed relative age“ (BAILLIE 2009, 364).

⁸ 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.

⁹ Siehe Fußnote 12.

Verweis auf LINICK et al. 1985 und DAMON 1987), dass mit der ^{14}C -Datenreihe der Borstenkiefer – also über ^{14}C -Daten- bzw. Wiggle-Matching – zahlreiche schwimmende (undatierte) Segmente der europäischen Chronologien fixiert und datiert worden seien.^{10,11}

So auch BAILLIE (1983, 16): „In der Praxis wurden die Details der Belfast-Kalibrationskurve gegen die bereits existierende amerikanische Borstenkiefer-Kalibrationskurve (Suess 1978) mittels Wiggle-Matching abgeglichen.“¹²

Eine Chronologie-Lücke bei Dendro-Skalenpunkt 948 BC

Die Belfast-Eichenchronologie besteht aus zusammengesetzten und verknüpften Chronologie-Segmenten. In mehreren Publikationen berichten BAILLIE et al. (1983), BAILLIE (1995) und BROWN & BAILLIE (2012), wie sie die „Lücke“ zwischen den irischen Chronologie-Segmenten Belfast Long und Garry Bog 2 mit dem englischen Chronologie-Segment Swan Carr überbrücken (vgl. Abb. 2). Demnach endet die Belfast-Long-Chronologie mit Dendrojahr 949 BC während die Garry-Bog-2-Chronologie mit Dendrojahr 947 BC beginnt; die durch die Swan-Carr-Chronologie

überbrückte „Lücke“ beträgt ein Dendrojahr, datiert auf 948 BC. Die publizierten Ähnlichkeitswerte (als Ergebnisse des Vergleichs der Zeitreihen; → 5-14) betragen: Swan Carr und Belfast Long (bzw. Teilsegment Garry Bog 1), $t=4,7$; Swan Carr und Garry Bog 2, $t=6,3$. In BAILLIE et al. (1983) heißt es, dass diese Verknüpfung noch vorläufig sei. Sie sei aber „konsistent mit der ^{14}C -Information“.¹³

OSSOWSKI LARSSON & LARSSON (2012a,b,c, 2014) haben u. a. den Versuch unternommen, die Situation der „948-BC-Dendrolücke“ nachzustellen. Demnach betragen die Ähnlichkeitswerte zwischen dem nachgebildeten und erweiterten Chronologie-Segment „Belfast Long“ und dem nachgebildeten Chronologie-Segment „Garry Bog 2“ $r=0,13$ und $t=1,4$ (Überlappung 110 Jahrringe) (vgl. Abb. 3). OSSOWSKI LARSSON & LARSSON (2014) schließen aus den niedrigen Werten, dass die originäre Verknüpfung (der Dendro-Link) zwischen der Belfast-Long-Chronologie und Garry-Bog-2-Chronologie falsch ist.¹⁴ Des Weiteren sei der originäre t -Wert von 4,7 (Swan Carr vs. Belfast Long) nicht duplizierbar; OSSOWSKI LARSSON & LARSSON (2014) weisen in ihrer Table 2 nur einen t -Wert von 2,8 aus ($r=0,19$; Überlappung 206 Jahrringe).

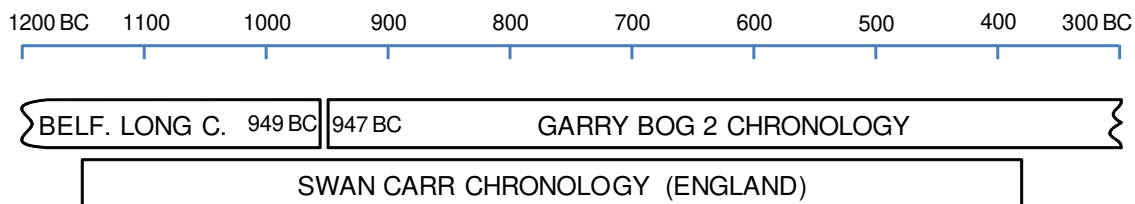


Abb. 2 „948-BC-Dendrolücke“, Überbrückung mit Swan-Carr-Chronologie. Nach BAILLIE et al. (1983, Fig. 2) und BROWN & BAILLIE (2012, Fig. 4). Chronologie-Längen gemäß BAILLIE (1995): Belfast Long, 2990 Dendrojahre (S. 33); Garry Bog 2, 719 Dendrojahre (S. 33); Swan Carr, 775 Dendrojahre (S. 35).

¹⁰ „However, the use of wiggle-matching with the bristlecone ^{14}C record helped link together several floating (undated) segments in the early European chronologies (Linick et al. 1985; Damon 1987)“ (LEAVITT & BANNISTER 2009, 380).

¹¹ BECKER (1992, 41) schreibt in diesem Zusammenhang von einer internationalen Kooperation: „This may also explain why some of the longstanding gaps of the European Holocene chronology finally have been bridged only after international cooperation.“

¹² Im Kontext: „Extensive radiocarbon analyses on samples from this 4300 year chronology allowed the chronology to be placed in time. In practice the detail in the Belfast calibration curve was wiggle matched with fluctuations in the pre-existing American bristlecone

pine calibration curve (Suess, 1978)“ (BAILLIE 1983, 16).

¹³ „Possible matching position between the Belfast Long chronology and the Swan Carr/Garry Bog 2 chronology. This tentative link requires further replication but is consistent with the ^{14}C information“ (BAILLIE et al. 1983, Beschreibung zu ihrer Fig. 2).

¹⁴ „We found a 380 years long oak curve from Ballymacombs More (Q10705M, measured in 2009, dated 1210 to 837 BC) extending the Belfast Long chronology by 112 years with a convincing corr. 0.49, $t=9.2$. But there is no match towards Garry Bog 2 (GB2; corr. 0.13, $t=1.4$ at 110 years overlap, see table 2) though Garry Bog 2 also contains samples from that same Ballymacombs More, especially in the oldest overlapping part“ OSSOWSKI LARSSON & LARSSON (2014, 11f).

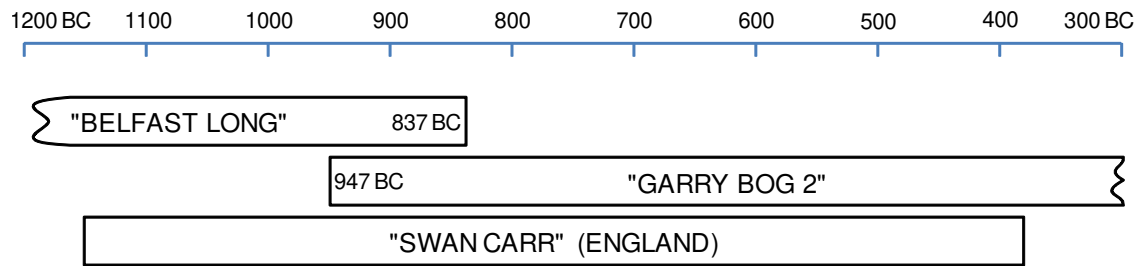


Abb. 3 Erweiterung der „Belfast-Long“-Chronologie. Nach OSSOWSKI LARSSON & LARSSON (2012a, Fig. 1).

Publikation der dendrochronologischen Rohdaten und Konstruktionsdaten

Die für die Kalibrierung der Radiokarbon-Zeitskala relevante Belfast-Chronologie muss praktisch überprüfbar, also duplizier- und reproduzierbar sein. Es sind zwar unfreiwillig (über 20 Jahre später) die dendrochronologischen Rohdaten veröffentlicht worden, aber die ebenso wichtigen Konstruktionsdaten nicht.

Mit den Rohdaten sowie weiterer bislang selektiv publizierter, übergeordneter Konstruktionsinformationen kann der Versuch unternommen werden, einzelne Abschnitte der Belfast-Chronologie zu duplizieren. Dies erfolgte beispielsweise für die Dendrolücke bei Skalenpunkt 948 BC (s. o.).

Fazit und Handlungsbedarf

Die Konstruktion der Belfast-Chronologie erfolgte nicht ausschließlich – unabhängig – mit der dendrochronologischen Methode („Prinzip der Kreuzdatierung“; → 5-13). Die Konstruktion des langen Abschnitts der Chronologie erfolgte ausnahmslos direkt oder indirekt mit ^{14}C -Vordatierungen von Baumringproben, und schwimmende Serien sind mit ^{14}C -Daten- und Wiggle-Matching auf die kalifornische Borstenkiefernchronologie kalibriert worden.

Der Versuch der Nachbildung der Überbrückung der „Lücke“ bei Dendro-Skalenpunkt 948 BC hat gezeigt, dass die originäre Verknüpfung – unter Einbeziehung weiterer Funde – durch entsprechend hohe Ähnlichkeitswerte nicht unterstützt wird. Demnach handelt es sich nicht um eine überbrückte Lücke, sondern um einen Bruch in der Chronologie. Diese Unterbrechung macht die Belfast-Chronologie im Sinne eines absoluten, jahrgenauen Kalenders für den Skalenabschnitt vor 947 BC im Grunde genommen wertlos.

Die Konstrukteure der Belfast-Chronologie haben die Gültigkeit und Unabhängigkeit ihrer Chronologie weder aufgezeigt noch belegt; die Beweislast aber liegt auf ihrer Seite.

Bei dem langen Teil der Belfast-Chronologie handelt es sich um einen nicht verifizierten Jahrringkalender. Eine Gleichsetzung von Dendrojahr (Jahrringkalenderjahr) und Realjahr ist nicht zulässig.

Literatur

- BAILLIE MGL (1977a) Recent dendrochronological results from modern and historic Irish oak timbers. In: FRENZEL B (ed.) Dendrochronologie und postglaziale Klimaschwankungen in Europa. Erdwissenschaftliche Forschung XIII, 9-15.
- BAILLIE MGL (1977b) The Belfast oak chronology to AD 1001. Tree-Ring Bulletin 37, 1-12.
- BAILLIE MGL (1979) An interim statement on dendrochronology at Belfast. Ulster Journal of Archaeology 42, 72-84.
- BAILLIE MGL (1983) Belfast dendrochronology – the current situation. In: OTTAWAY BS (ed.) Archaeology, Dendrochronology and the Radiocarbon Calibration Curve. Occasional Paper No. 9, 15-24. Edinburgh.
- BAILLIE MGL (1995) A Slice Through Time: Dendrochronology and Precision Dating. London.
- BAILLIE MGL (2009) The Radiocarbon calibration from an Irish oak perspective. Radiocarbon 51, 361-371.
- BAILLIE MGL, PILCHER JR & PEARSON GW (1983) Dendrochronology at Belfast as a background to high-precision calibration. Radiocarbon 25, 171-178.
- BECKER B (1992) The history of dendrochronology and radiocarbon calibration. In: TAYLOR RE, LONG A & KRA RS (eds.) Radiocarbon After Four Decades: An Interdisciplinary Perspective. New York, 34-49.

- BROWN DM & BAILLIE MGL (2012) Confirming the existence of gaps and depletions in the Irish oak tree-ring record. *Dendrochronologica* 30, 85-91.
- BROWN DM, MUNRO MAR, BAILLIE MGL & PILCHER JR (1986) Dendrochronology – the absolute Irish standard. *Radiocarbon* 28, 279-283.
- 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, Baiersbronn.
https://www.wort-und-wissen.org/wp-content/uploads/g-19-1_radiokarbon.pdf
- LEAVITT SW & BANNISTER B (2009) Dendrochronology and Radiocarbon dating: The Laboratory of tree-ring research connection. *Radiocarbon* 51, 373-384.
- OSSOWSKI LARSSON P & LARSSON L-A (2012a) Dating and linkage of the long Belfast BC chronology - an error in one of the key links.
<http://www.cybis.se/forfun/dendro/hollstein/belfast/index.php>.
- OSSOWSKI LARSSON P & LARSSON L-A (2012b) How continuous is the European oak chronology? Veröffentl. Manuskript vom 8. Oktober 2012.
<http://www.cybis.se/dendro/wp-content/uploads/2015/02/16117-19224-1-SM.pdf>.
- OSSOWSKI LARSSON P & LARSSON L-A (2012c) Evaluation of the Irish oak chronology and its linkage. Veröffentl. Manuskript vom 8. Dezember 2012.
<http://www.cybis.se/dendro/wp-content/uploads/2015/02/LarssonResearchReport.pdf>.
- OSSOWSKI LARSSON P & LARSSON L-A (2014) Dendrochronological dating of Roman time. Veröffentl. Manuskript vom 18. April 2014.
<http://www.cybis.se/dendro/wp-content/uploads/2015/02/Dendrochronological-dating-of-Roman-time.pdf>.
- PILCHER JR, BAILLIE MGL, SCHMIDT B & BECKER B (1984) A 7272-year tree-ring chronology from Western Europe. *Nature* 312, 150-152.
- SMITH AG, BAILLIE MGL, HILLAM J, PILCHER JR & PEARSON GW (1972) Dendrochronological work in progress in Belfast: the prospects for an Irish post-glacial tree-ring sequence. Proceedings of the 8th International Conference on Radiocarbon Dating, Lower Hutt, New Zealand. *Bulletin Royal Society of New Zealand* 14, A92-A95.

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

Zur Ergänzung → 5-01, 6-01.

5-23 Hohenheimer Jahrringkalender

Die Gültigkeit des langen Teils des Hohenheimer Jahrringkalenders ist nicht bekannt – eine unabhängige Validierung ist bislang nicht erfolgt

Der „längste Jahrringkalender der Welt“¹

Im Jahrringlaboratorium des Instituts für Botanik an der Universität Hohenheim ist es nach eigener Aussage gelungen, „einen ununterbrochenen Jahrringkalender aufzubauen, der von heute rund 12.500 Jahre bis an das Ende der letzten Eiszeit zurück reicht“; an einer Verlängerung bis 14.400 Jahre vor heute werde gearbeitet.²

Die Entwicklung und Konstruktion einer „postglazialen Eichenjahrringchronologie“ begann zu Beginn der 1970er-Jahre³, zeitlich nach der Präsentation der kalifornischen Borstenkiefernchronologie (→ 5-21) (BECKER 1993⁴).

Der sogenannte Hohenheimer Jahrringkalender (Abb. 1) besteht aus einer abgeschlossenen Eichenchronologie (Holocene Oak Chronology,

HOC) in Kombination mit einer der Eichenchronologie angeschlossenen Kiefernchronologie (Preboreal Pine Chronology, PPC). Ausgewählte Marksteine der Konstruktion der Baumringchronologien listet Tab. 1.

Die Hohenheim-Eichenchronologie⁵ ist von BECKER (bis 1993)⁶ konstruiert und etabliert und von SPURK et al. (1998) bzw. FRIEDRICH et al. (2004) abgeschlossen worden. Demnach beginnt die Eichenchronologie 8480 BC und umfasst bis AD 2002 10.482 [Dendro-] Jahre (Tab. 1). Der Hohenheim-Master ist aus regionalen Eichenchronologien von Süd- und Ostdeutschland sowie ausgewählten Daten historischer Gebäude, archäologischen Holzes und lebender Bäume zusammengesetzt (FRIEDRICH et al. 2004) (Abb. 2).



Abb. 1 Hohenheimer Jahrringkalender. Screenshot (Ausschnitt) einer Seite des Webauftritts des Instituts für Botanik der Universität Hohenheim. Link siehe Fußnote 2.

¹ Dieser Beitrag ist im Wesentlichen ein Auszug aus KOTULLA (2019).

² Webpage des Instituts: https://botanik.uni-hohenheim.de/archaeo-palaeo_dendro_hoh-jahrringkalender (Zugriff 07/2018).

³ Ein Meilenstein war die Genehmigung von BECKERS DFG-Forschungsantrag „Absolute südmitteleuropäische Eichenjahrringchronologie des Postglazials“ vom 10. 7. 1972 (RUMP 2017, 368). – Über den Stand der Dendrochronologie von Mitteleuropa berichtete Huber (1970, 233) zum 12. Nobel-Symposium (1969) mit dem Symposium-Titel *Radiocarbon Variations and Absolute Chronology*: Für den Zeitraum nach der Geburt Christi sei die Dendrochronologie durch Balken bekannten historischen Alters gut abgesichert, für den Zeitraum vor der Geburt Christi lägen allerdings nur Fragmente vor.

⁴ „I have described elsewhere the history of dendrochronology with respect to radiocarbon age calibration (Becker 1992). Following the completion of the US bristlecone pine series (Ferguson 1969), research was begun in Ireland and Germany to construct super-long chronologies. After two decades of intensive field collection and laboratory analyses, three European Holocene oak series have been established: (...)“ (BECKER 1993, 201-202).

⁵ Weitere Bezeichnungen: süddeutsche oder südmitteleuropäische Eichenchronologie; German oak (dendro)chronology, deutsche Eichen(dendro)chronologie.

⁶ Bernd BECKER verstarb 1994 (KROMER 1994).

Referenz	Dendro-Zeitskala		Länge [Dendrojahre]		Anmerkung	
	Start	Ende	HOC/ PPC	HOC + PPC		
<u>Hohenheim-Eichenchronologie, Holocene Oak Chronology (HOC)</u>						
Becker (1981)	2319 BP	370 BC	Gegenwart	2319	A	
Becker (?1981)	2495 BP	546 BC	Gegenwart	2595	B	
Becker & Schmidt (1982)	3411 BP	1462 BC	Gegenwart	3411	C	
Becker (1982)	4634 BP	2685 BC	Gegenwart	4634	neues Material	
Becker (1983)	4753 BP	2804 BC	Gegenwart	4753	neues Material	
Pilcher et al. (1984)	6038 BP	4089 BC	Gegenwart	6038	Becker et al. (1985)	
Becker & Kromer (1986)	6038 BP	4089 BC	AD 1985	6074		
Becker & Schmidt (1990)	9186 BP	7237 BC	Gegenwart	9224	D	
Becker et al. (1991)	9887 BP	7938 BC	Gegenwart	9928		
Becker (1993)	9970 BP	8021 BC	Gegenwart	9970		
Spurk et al. (1998)	10429 BP	8480 BC	Gegenwart	10482	Teilrevision	
Friedrich et al. (2004)	10429 BP	8480 BC	AD 2002	10482	Etablierung HOC	
<u>Hohenheim-Kiefernchronologie, Preboreal Pine Chronology (PPC)</u>						
Becker (1993)	>11370 BP	9494 BC	7727 BC	1768	>11000	E
Spurk et al. (1998)	11871 BP	9922 BC	7951 BC	1972	11871	F
Friedrich et al. (1999)	11919 BP	9970 BC	7951 BC	1972	11919	G
Friedrich et al. (2004)	11941 BP	9992 BC	7951 BC	1972	11941	H
Friedrich et al. (2004)	12410 BP	10461 BC	7942 BC	2516	12460	I
Schaub et al. (2008b)	12593 BP	10644 BC	7942 BC		12593	J
Hogg et al. (2016)	12325 BP	10376 BC	7942 BC	2435	12325	K
Reinig et al. (2018)	12325 BP	10376 BC	7942 BC	2435	12325	L

Tab. 1 Hohenheim-Chronologien. Ausgewählte Marksteine der Konstruktion. Die (Gesamt-)Länge bis zur Gegenwart bezieht sich auf das Bezugsjahr 0 BP (= 1950) oder ein aktuelles Jahr nach 1950; bei HOC handelt es sich um den von der Gegenwart zurückreichenden, als lückenlos ausgewiesenen Anteil. Anmerkungen: A: Dendro-Link zur 1000-jährigen Jahrringchronologie (HUBER & GIERTZ-SIEBENLIST 1969); B: nach BECKER & SCHMIDT (1982), Referenz/Quelle unklar; C: Dendro-Link mit „norddeutscher Absolutchronologie“ (Köln); D: Dendro-Link mit Schleswig-Holstein-Serie (Köln); E: ¹⁴C-Oszillationen-Link („Wiggle-Matching“) zu HOC, vorläufig; F: neue PPC, Link der 2 PPC-Teile vorläufig; Link zu HOC revidiert, aber vorläufig; G: Dendro-Link PPC/HOC; H: Dendro-Link PPC-Teile; I: neue PPC; Zürich-Link vorläufig; J: Dendro-Link Zürich/YD_B; K: Dendro-Link Zürich/YD_B „unzuverlässig“; L: „zuverlässiger Teil“, ohne Zürich-Link.

Das Baummaterial stammt hauptsächlich aus nacheiszeitlichen Flussablagerungen, die subfossile Auwaldeichen bergen (BECKER 1982). Das Durchschnittsalter der 6775 beprobten subfossilen Eichen beträgt 176 Jahre.

Die Hohenheim-Kiefernchronologie geht ebenfalls auf BECKER (bis 1993) zurück.⁷ Sie ist von SPURK et al. (1998) und FRIEDRICH et al. (2004) fortgeführt und von FRIEDRICH et al. (1999, 2004) mit dem älteren Ende der Hohenheim-Eichenchronologie dendrochronologisch verknüpft worden. Das Baummaterial stammt

hauptsächlich aus nacheiszeitlichen Flussablagerungen von Donau und Rhein, aus Ostdeutschland und der Schweiz. Stand 2004 umfasst die Chronologie auf Grundlage von 515 synchronisierten Kiefern 2520 [Dendro-] Jahre und endet bei Skalenpunkt 7942 BC. Die vorläufige Verknüpfung mit der „Zürich“-Serie am älteren Ende der PPC ist nach einer erneuten Analyse „nicht zuverlässig“ (HOGG et al. 2016)⁸; demnach beginnt die PPC gegenwärtig bei Skalenpunkt 12.325 BP (Tab. 1).

⁷ „When the first ¹⁴C dates of H. E. Suess (unpublished data) attributed a surprisingly old age to these pine trees, I started collecting both pines and oaks. This project led to the construction of an unbroken 1768-yr floating late Younger Dryas and early Holocene pine chronology, as well as a 405-yr Allerod pine series“ (BECKER 1993, 210).

⁸ „Dendrochronological reanalysis of the ‘Zurich’ to Cottbus connection has since confirmed the unreliability of this linkage (as reported by Friedrich et al. at the 2015 Zurich IntCal-Dendro workshop)“ (HOGG et al. 2016, 3).

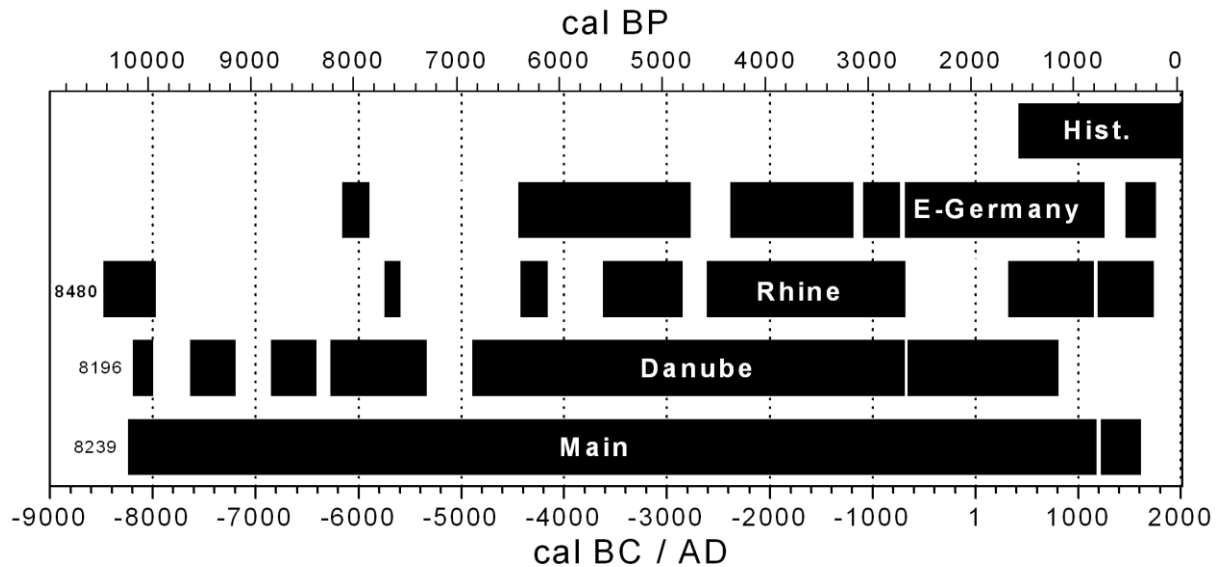


Abb. 2 Holozäne Eichenchronologie des Hohenheim-Laboratoriums. Nach FRIEDRICH et al. (2004) reicht diese zusammengesetzte, mitteleuropäische Chronologie von Skalenpunkt 10.430 BP (8480 BC) bis zur Gegenwart (Stand Publikation bis AD 2002). Die schwarzen Blöcke repräsentieren „replizierte, regionale Chronologien, die zueinander dendrochronologisch verknüpft wurden“. Die Main-Chronologie besteht aus einer „ununterbrochenen Aufzeichnung von 8239 BC bis AD 1100“. Legende: Danube, Donau; Rhine, Rhein; E-Germany, Ostdeutschland; Hist., historisch; cal., dendrokalierte ^{14}C -Jahre (hier implizit: Kalenderjahre). Abbildung aus FRIEDRICH et al. (2004), Wiedergabe ihrer Fig. 4, in *Radiocarbon*. Mit freundlicher Genehmigung von Cambridge University Press („single figure“ policy, Zugriff 05/2018).

Material und Alter

Die Baumstämme bzw. Baumstammreste am jeweiligen Fundpunkt geben keinen Hinweis auf ihr Alter oder – bei mehreren Individuen – ihr relatives Alter zueinander. Das gilt für alle Fundsituationen. BECKER (1982, 25) zufolge liefert der Zustand (Erhaltung, Verfärbung etc.) eines aus dem Grundwasser ausgebagerten subfossilen Baumstammfundes keinen sicheren Anhaltspunkt für die Dauer seiner Lagerung im Sediment.

Elemente der Chronologie-Konstruktion:

^{14}C -Vordatierung und „Wiggle-Matching“⁹

Die von BECKER (1982, 17) im Hohenheim-Laboratorium erstellte „postglaziale Eichen-Jahrringchronologie in Südmitteleuropa“ besteht – Stand 1982 – aus drei Teilen (vgl. Abb. 3):¹⁰

- 1) kalenderjahrgenau: bis 2685 v. Chr.;

- 2) vier Radiokarbon-kalibrierte Teilchronologien: zwischen 2630 bis 7200 v. Chr.;
- 3) konventionell ^{14}C -datierte Sequenzen: 8650 bis 8150 ^{14}C -Jahre v. h.

Diese Aufteilung zeigt die jeweiligen Datierungszustände auf, d. h. mit welcher Methode bzw. mit welchem Methodenmix Datierungen durchgeführt wurden:

- Zu 1) Kombination aus historischer Chronologie, ^{14}C -Vordatierungen und Synchronisationen deutscher Regionalchronologien;
- Zu 2) Korrelation mit der Borstenkiefernchronologie¹¹ (Radiokarbon-Kalibration, Wiggle-Matching), „korrigierte Absolutalter“ bis 7200 v. Chr.;
- Zu 3) ^{14}C -Vordatierungen, aufgrund der (konventionellen) ^{14}C -Skala außerhalb der Borstenkiefernchronologie.

Demnach erfolgt eine Positionierung von Teilchronologien oder einzelnen Reihen jenseits der Standardchronologie (Skalenabschnitt vor

⁹ 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.

¹⁰ Siehe Abbildung 6 in BECKER (1982).

¹¹ Borstenkiefer von BECKER (1982) als Grannenkiefer bezeichnet.

2685 BC) auf der Dendro-Skala – quasi-jahrgenau oder grob – zunächst durch ^{14}C -Vordatierungen in Kombination mit Wiggle-Matching oder durch ^{14}C -Vordatierungen alleine.

Darüber hinaus wird hier der maßgebliche Einfluss der Borstenkiefernchronologie auf die Hohenheim-Eichenchronologie deutlich (BECKER 1982, 14); es zeigt, dass die Hohenheim-Eichenchronologie nicht unabhängig entwickelt wurde.

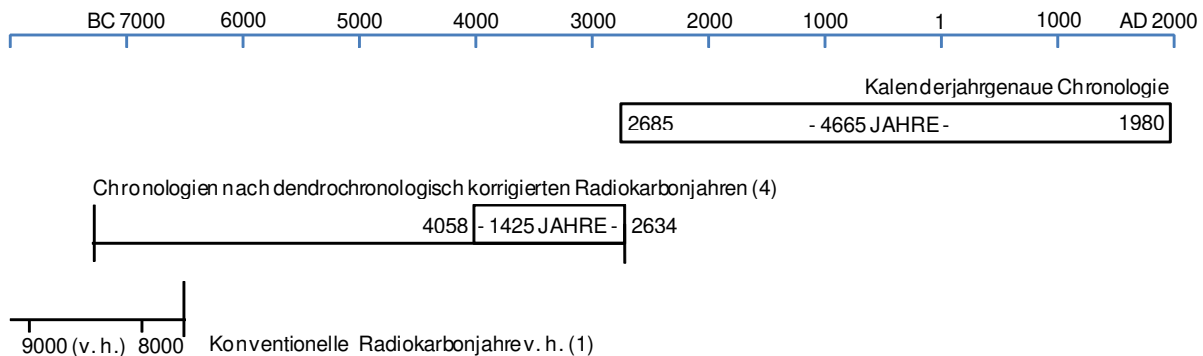


Abb. 3 Datierungsmethoden. Abschnittsweise Konstruktion der Eichen-Langchronologie des Laboratoriums von Hohenheim, Stand 1982. Nach BECKER (1982), seine Abb. 6, unterer Teil (schematisch umgezeichnet). BECKER beschriftet seine Abb. 6 (S. 17) wie folgt: „Derzeitiger Stand der postglazialen Eichen-Jahrringchronologie in Südmittleuropa. Die in Hohenheim erstellte Chronologie besteht aus einem kalendergenauen Teil (bis 2685 v. Chr.), vier radiokarbon-kalibrierten Teilchronologien (zwischen 2630 bis 7200 v. Chr.), sowie einer noch älteren Sequenz, die nach konventionellen ^{14}C -Altern von 8650 bis 8150 v. h. datiert.“ Anmerkung: Einzelelemente (oberer Teil der Originalabbildung) sind in dieser Abbildung des Verfassers nicht eingetragen.

Publikation der dendrochronologischen Rohdaten und Konstruktionsdaten

Der für die Kalibrierung der Radiokarbon-Zeitskala relevante Hohenheimer Jahrringkalender muss praktisch überprüfbar, also duplizier- und reproduzierbar sein. Hierzu bedarf es einer (freiwilligen) Veröffentlichung nicht nur der dendrochronologischen Rohdaten, sondern auch der Konstruktionsdaten. Dies ist bis heute nicht geschehen.

Fazit und Handlungsbedarf

Die Konstruktion des Hohenheimer Jahrringkalenders erfolgte nicht ausschließlich – unabhängig – mit der dendrochronologischen Methode („Prinzip der Kreuzdatierung“; → 5-13). Die Konstruktion des langen Abschnitts der Chronologie erfolgte ausnahmslos direkt oder indirekt mit ^{14}C -Vordatierungen von Baumringproben, und schwimmende Serien sind mit ^{14}C -Daten- und Wiggle-Matching auf die kalifornische Borstenkiefernchronologie (→ 5-21) kalibriert worden.

Die Konstrukteure des Hohenheimer Jahrringkalenders haben die Gültigkeit und

Unabhängigkeit ihrer Chronologie weder aufgezeigt noch belegt; die Beweislast aber liegt auf ihrer Seite.

Bei dem langen Teil des Hohenheimer Jahrringkalenders handelt es sich um einen nicht verifizierten Jahrringkalender. Eine Gleichsetzung von Dendrojahr (Jahrringkalenderjahr) und Realjahr ist nicht zulässig.

Literatur

- BECKER B (1981) Fällungsdaten römischer Bauhölzer anhand einer 2350-jährigen süddeutschen Eichen-Jahrringchronologie. Fundberichte aus Baden Württemberg 6, 369-386.
- BECKER B (1982) Dendrochronologie und Paläoökologie subfossiler Baumstämme aus Flussablagerungen. Ein Beitrag zur nacheiszeitlichen Auenentwicklung im südlichen Mitteleuropa. Mitteilungen der Kommission für Quartärforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Band 5. Wien.
- BECKER B (1983) The long-term radiocarbon trend of the absolute German oak tree-ring chronology, 2800 to 800 BC. Radiocarbon 25, 197-203.
- 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, 961-967.
- BECKER B, KROMER B & TRIMBORN P (1991) A stable-isotope tree-ring timescale of the Late Glacial/Holocene boundary. *Nature* 353, 647-649.
- BECKER B & SCHMIDT B (1982) Verlängerung der mitteleuropäischen Eichen-Jahrringchronologie in das zweite vorchristliche Jahrtausend (bis 1462 v. Chr.). *Archäologisches Korrespondenzblatt* 12, 101-106.
- BECKER B & SCHMIDT B (1990) Extension of the European oak chronology to the past 9924 years. In: WATERBOLK HT & MOOK WG (eds.) *Proceedings of the Second International Symposium, Archaeology and ¹⁴C*. PACT 29, 7-50.
- FERGUSON CW (1969) A 7104-year annual tree-ring chronology for bristlecone pine, *Pinus aristata*, from the White Mountains, California. *Tree-Ring Bulletin* 29, 3-29.
- FRIEDRICH M, KROMER B, SPURK M, HOFMANN J & KAISER KF (1999) Paleo-environment and radiocarbon calibration as derived from Late Glacial/Early Holocene tree-ring chronologies. *Quaternary International* 61, 27-39.
- 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.
- HOGG A, SOUTON, J, TURNEY C, PALMER J, RAMSEY CB, FENWICK P, BOSWIJK G, BÜNTGEN U, FRIEDRICH M & HELLE G (2016) Decadally resolved lateglacial radiocarbon evidence from New Zealand kauri. *Radiocarbon* 58, 709-733.
- HUBER B (1970) Dendrochronology of central Europe. In: OLSSON IU (ed.) *Radiocarbon Variations and Absolute Chronology*. Stockholm, 233-235.
- HUBER B & GIERTZ-SIEBENLIST V (1969) Unsere tausendjährige Eichen-Jahrringchronologie durchschnittlich 57 (10-150)-fach belegt. *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Klasse Abteilung 1*, 178, 37-42.
- 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, Baiersbronn.
https://www.wort-und-wissen.org/wp-content/uploads/g-19-1_radiokarbon.pdf
- KROMER B (1994) Bernd Becker, 1940-1994. *Radiocarbon* 36 (1), v-viii.
- REINIG F, NIEVERGELT D, ESPER J, FRIEDRICH M, HELLE G, HELLMANN L, KROMER B, MORGANTE S, PAULY M, SOOKDEO A, TEGEL W, TREYDTE K, VERSTEGE A, WAKER L & BÜNTGEN U (2018) New tree-ring evidence for the Late Glacial period from the northern pre-Alps in eastern Switzerland. *Quaternary Science Reviews* 186, 215-224.
- RUMP HH (2017) Die historische Entwicklung von Jahrringforschung und Dendrochronologie in Europa. Diss., Frankfurt/M.
- SCHAUB M, KAISER KF, FRANK DC, BÜNTGEN U, KROMER B & TALAMO S (2008b) Environmental change during the Allerød and younger Dryas reconstructed from Swiss tree-ring data. *Boreas* 37, 74-86.
- 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, 1107-16.
- und Blattnummer: Verweis auf andere Beiträge der Online-Loseblattsammlung.
- Zur Ergänzung → 5-01, 5-14, 5-22, 6-01.

6-01 Radiokarbonmethode – Übersichtsblatt

Sinngeleiche und verwandte Begriffe

Radiokohlenstoff, ^{14}C , Kohlenstoffmethode, ^{14}C -Methode, Radiokarbonuhr.

Ziel

Versuch, den radioaktiven Zerfall von ^{14}C zur Altersbestimmung archäologischer und geologischer Objekte zu nutzen; z. B. Bestimmung der verflossenen Zeit seit Ausschluss vom Kohlenstoffkreislauf (Tod).

Grundlagen

^{14}C ist ein Radioisotop, welches sich (gegenwärtig) in der Stratosphäre bildet und als CO_2 in den Kohlenstoffkreislauf der Natur eingebunden wird. Halbwertszeit: 5730 ± 40 Jahre (nach GODWIN 1982).

Vorgehensweise

Ermittlung der Kohlenstoff-Isotopenmengen und -Isotopenverhältnisse; mit Kenntnis der Zerfallsrate Berechnung des ^{14}C -Alters (nach STUIVER & POLLACH 1977, → 6-11). I. d. R. Ausweis kalibrierter ^{14}C -Alter (s. Eichung).

Basisannahmen

1. Unveränderlichkeit der ^{14}C -Zerfallsrate für den gesamten Bildungszeitraum in der Vergangenheit und in jeder Umgebung.
2. Konstante ^{14}C Produktionsrate für den gesamten Bildungszeitraum in der Vergangenheit.
3. Im Verhältnis zur Zerfallsrate schneller Kohlenstoffaustausch zwischen den Reservoiren (Atmosphäre, Biosphäre, Hydrosphäre, Geosphäre).
4. Keine Fraktionierung der Kohlenstoffisotope im Kohlenstoffkreislauf.
5. Einstellung des Kohlenstoffaustauschs mit der Umgebung nach dem Tod des Organismus oder der Sedimentation von Karbonaten.

Historie

Idee (LIBBY 1946); Methode (LIBBY 1952, 1969); Nachweis Altersdiskrepanzen (DE VRIES 1958); erste Eichkurve (SUESS 1965); systematische Kalibrationskurven (u. a. STUIVER et al. 1986, 1998; REIMER et al. 2004, 2009, 2013, 2020), aktuell u. a. IntCal20 (→ 6-41).

Anwendung

Archäologie, Quartärgeologie, Paläobotanik;

sehr verbreitet.

Angabe/Größenordnung der Ergebnisse

Die ermittelten Isotopenalter liegen im Bereich von bis zu 50.000 ^{14}C -Jahren; technisch sind auch etwas höhere Werte möglich.

- Konventionelle ^{14}C -Alter: z. B. 11.099 ± 68 ^{14}C -Jahre BP¹.
- Kalibrierte ^{14}C -Alter: z. B. 13.091-12.794 cal ^{14}C -Jahre BP, zusätzlich Angabe der Kalibrierungskurve und des -Programms.

Bekannte Einschränkungen/Probleme

Die ^{14}C -Produktion unterliegt beträchtlichen zeitlichen und breitenabhängigen Schwankungen; darüber hinaus sind Einflüsse der Industrialisierung sowie des Kernwaffengebrauchs und sogenannte Reservoir- und Hartwassereffekte bekannt, Einflüsse durch vulkanisches CO_2 werden vermutet.

Eichung

Atmosphärische Kalibrationskurve der nördlichen Hemisphäre (IntCal20):

- Skalenbereich von ca. 13.900 bis 0 kalibrierte ^{14}C -Jahre BP: Baumringe (Baumringchronologien), → 5.01.
- Skalenbereich ca. 55.000 bis ca. 13.900 kalibrierte ^{14}C -Jahre BP: Laminierte Sedimente (Warvenchronologien), U-Th-datierte Speläotheme (Höhlenminerale) und Korallen.

Mit der Kalibrierung sollen alle möglichen Einflüsse (s. o.) Berücksichtigung finden.

Altersbestimmungsverfahren

Anspruch: unabhängig und (nach Kalibration) quasi absolut (für den dendrokalibrierten Teil).

Verifizierung

Die Methode bedarf einer unabhängigen Verifizierung durch Objekte/Ereignisse bekannten (historischen) Alters.

Gültigkeit (der Ergebnisse)

Die Erfüllung der Voraussetzungen (insbesondere die Basisannahmen 1 und 2) sind bisher nicht nachgewiesen. Die langen Baumringchronologien verifizieren die ^{14}C -Zeitskala vor dem ersten christlichen Jahrtausend nicht; es sind Baumringchronologien konstruiert worden, die sich aus ^{14}C -datierten

¹ BP = before present, Basis 1950

Jahrringsequenzen zusammensetzen (KOTULLA 2019).

a) Absolute Altersbestimmung

- Bis etwa 3.000 Jahre vor heute: Im Wesentlichen durch Objekte bekannten historischen Alters verifiziert; „präzise“ Datierungen im Rahmen von $\pm 15-200$ Jahren. Unter Ausschluss der bereits bekannten Einschränkungen gibt es nach wie vor einen Anteil nicht „passender“ Ergebnisse.
- Etwa 3.000 bis 5000 Jahre vor heute: Unsicher. Teilweise ist das Alter der zur Verifizierung herangezogenen Objekte/Ereignisse nicht sicher.
- Größer etwa 5.000 Jahre vor heute: Nicht bekannt. Eine unabhängige Verifizierung durch Objekte/Ereignisse bekannten (historischen) Alters war bisher nicht möglich. Es ist nicht bekannt, in welchem Verhältnis diese ^{14}C -Alter zum realen Alter stehen.

b) Relative Altersbestimmung

- Eingeschränkt gegeben. Unter strenger Beachtung der Probenentnahme und ihrer stratigraphischen Stellung ist eine Relation Zunahme des relativen Alters zu Zunahme des Isotopenalters für eine Mehrzahl der Bestimmungen (Datierungen) gegeben.

Kritik und Handlungsbedarf

^{14}C -Datierungsergebnisse etwa > 3.000 kalibrierte ^{14}C -Jahre BP werden von den Bearbeitern gegenüber der Öffentlichkeit fast ausnahmslos als quasi reale Alter dargestellt und kommuniziert; dies ist in Anbetracht der unsicheren Erkenntnisse (keine unabhängige Bestätigung, s. o.) eine deutliche Grenzüberschreitung. Entscheidungsträger und Öffentlichkeit sind aktiv und vollumfänglich über die Gültigkeit und Grenzen von ^{14}C -Datierungsergebnissen aufzuklären.

Literatur

DE VRIES H (1958) Variation in concentration of radiocarbon with time and location on earth. Koninkl. Ned. Akad. Wetenschappen B61, 94-102.

GODWIN H (1962) Half-life of Radiocarbon. Nature 195, 984.

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, Baiersbrunn.
https://www.wort-und-wissen.org/wp-content/uploads/g-19-1_radiokarbon.pdf

LIBBY WF (1946) Atmospheric Helium Three and Radiocarbon from Cosmic Radiation. Physical Review 69, 671-672.

LIBBY WF (1952) Radiocarbon dating. Chicago.

LIBBY WF (1969) Altersbestimmung mit der C^{14} -Methode. Mannheim.

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

SUESS HE (1965) Secular variations of the cosmic-ray produced carbon 14 in the atmosphere and their interpretations. *Journal of Geophysical Research* 70, 5937-5952.

STUIVER M, KROMER B, BECKER B & FERGUSON CW (1986) Radiocarbon age calibration back to 13,300 years BP and the ^{14}C age matching of the German oak and US bristlecone pine chronologies. In: STUIVER M & KRA RS (eds.) *Proceedings of the 12th International ^{14}C Conference*. *Radiocarbon* 28, 969-979.

STUIVER M & POLLACH HA (1977) Discussion: Reporting of ^{14}C data. *Radiocarbon* 19, 355-363.

STUIVER M, REIMER PJ, BARD E, BECK JW, BURR GS, HUGHEN KA, KROMER B, MCCORMAC G, VAN DER PLICHT J & SPURK M (1998) *IntCal98 Radiocarbon Age Calibration, 24,000-0 cal BP*. *Radiocarbon* 40, 1041-1083.

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

Zur Ergänzung → 5-21, 5-22, 5-23.

6-11 Theorie und Praxis der Radiokarbon-Altersbestimmung

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

Ermittlung konventioneller Radiokarbon-Alter

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

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

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

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

- „Die Verwendung der Halbwertszeit [von ^{14}C , MK] von 5568 a (mittlere Lebensdauer von 8033 a)¹; Libby-Zerfallskonstante²: $\lambda_L = 1/8033 \text{ a}^{-1}$.
- „Die Annahme der Konstanz des atmosphärischen ^{14}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 PDB³ [Pee-Dee-Belemnite, MK])“.
- „Das Jahr 1950 ist automatisch das Basisjahr, mit Altersangaben in Jahre BP (d. h. heute [oder Gegenwart, MK] ist AD 1950).“

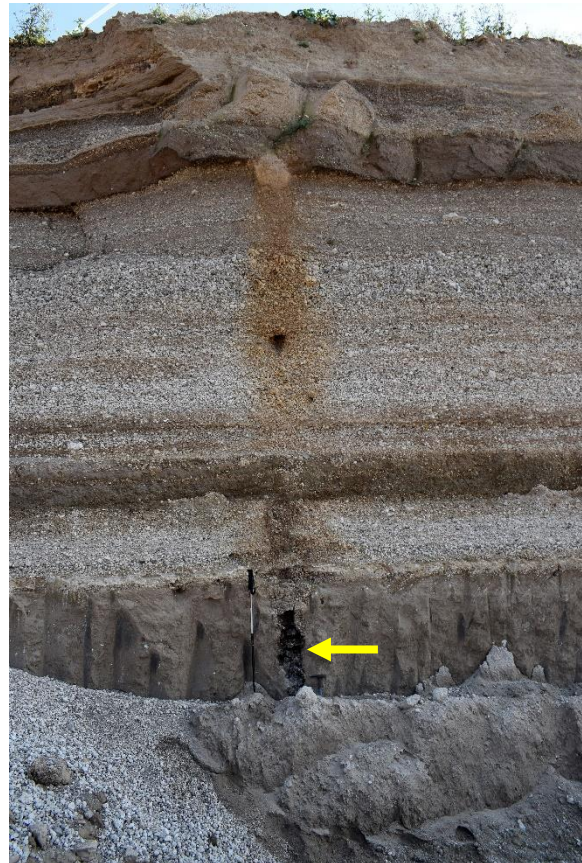


Abb. 1 Verkohlter Baumstamm, Bimsabbaugrube Nicke-nich (s. KOTULLA 2019). Die Abbauwand hat eine Höhe von über 6 m. Der untere Teil der Laacher-See-Tephra ist nicht aufgeschlossen, der obere Teil ist erodiert oder zuvor abgetragen worden. Der verkohlte, aufrecht stehende Baumstamm (gelber Pfeil) ist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

¹ Nach Bestimmungen von LIBBY (1955). Die neuere Cambridge-Halbwertszeit von 5730 ± 40 Jahren (GODWIN 1962) wird aus Gründen der Vergleichbarkeit mit älteren Messungen nicht verwendet. HOLDEN (1990, 925) empfiehlt die Verwendung einer Halbwertszeit von 5715 ± 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.

² Deshalb auch als Libby-Alter bezeichnet.

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

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

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

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

Die relative Aktivität beschreibt folgende Gleichung 2:

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

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

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

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

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

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

Von Probenmaterial eines verkohlten Baumstamms in Tephra-Ablagerungen⁴ des Laacher-See-Vulkans bei Nickenich (Abb. 1) sind von zwei Laboratorien Radiokarbon-Bestimmungen durchgeführt worden.

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

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

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

Kalibrierte Radiokarbon-Alter

Ein Laboratorium hat unter Verwendung des Programms OxCal (BRONK RAMSEY 2017) zusätzlich ein kalibriertes ^{14}C -Alter BP ausgewiesen. Nach diesem Programm, mit dem Kalibrationsdatensatz von IntCal13 (REIMER et al. 2013; IntCal, international calibration), liegt das Alter bei Probe NCK-1a zwischen 13.017 und 12.727 und bei Probe NCK-1b zwischen 13.091 und 12.794 kalibrierten ^{14}C -Jahren BP (Tab. 2). Das kalibrierte Alter wird bezogen auf den Ausgangswert (inklusive der 1σ -Unsicherheit) für eine Wahrscheinlichkeit von 95,4 % in Form einer Alterspanne ausgewiesen.

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

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

Tephra hat vereinzelte Bäume an Ort und Stelle begraben.

kalibrierten ^{14}C -Jahren BP transformiert werden (ohne Berücksichtigung der 1σ -Unsicherheit).

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

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

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

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

Internationale Kalibration der Radiokarbon-Zeitskala

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

Literatur

- BAALES M (2008) Eiszeitliches Pompeji am Mittelrhein. *Archäologie in Deutschland* 5, 6-11.
- BAALES M, JÖRIS O, STREET M, BITTMANN F, WENINGER B & WIETHOLD J (2002) Impact of the late glacial eruption of the laacher see volcano, central Rhineland, Germany. *Quat. Res.* 58, 273-288.
- BRONK RAMSEY C (2009) Bayesian Analysis of Radiocarbon dates. *Radiocarbon* 51, 337-360.
- BRONK RAMSEY C (2017) Methods for summarizing Radiocarbon datasets. *Radiocarbon* 59, 1809-1833.
- GODWIN H (1962) Half-life of Radiocarbon. *Nature* 195, 984.
- HOLDEN NE (1990) Total half-lives for selected nuclides. *Pure & Appl. Chem.* 62, 941-958.
- KOTULLA M (2019) Verkohlte Baumstämme in Tephra-Ablagerungen des Laacher-See-Vulkans: neue Radiokarbon-Bestimmungen und ihre

Altersinterpretation. W+W Special Paper G-19-1, Baiersbronn.

https://www.wort-und-wissen.org/wp-content/uploads/g-19-1_radiokarbon.pdf

LIBBY WF (1955) Radiocarbon Dating. Chicago, 2nd ed.

REIMER PJ, AUSTIN WEN, BARD E, BAYLISS A, BLACKWELL PG, BRONK RAMSEY C, BUTZIN M, CHENG H, EDWARDS RL, FRIEDRICH M, GROOTES PM, GILDERSON 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, SOUTHERN JR, TURNEY CSM, WACKER L, ADOLPHI F, BÜNTGEN U, CAPANO M, FAHRNI SM, FOGTMANN-SCHULZ A, FRIEDRICH R, KÖHLER P, KUDSKS, MIYAKE F, OLSEN J, REINIG F, SAKAMOTO M, SOOKDEO A & TALAMO S (2020) The IntCal20 northern hemisphere radiocarbon age calibration curve.(0-55 cal kBP). *Radiocarbon*, DOI: <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41>

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

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

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

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

Zur Ergänzung → 5-01, 6-01.

6-41 IntCal20: Neue Kurve zur Kalibrierung der Radiokarbon-Zeitskala veröffentlicht

Veröffentlichung von dendrochronologischen Rohdaten und Konstruktionsdaten für Baumringchronologien als Ziel formuliert – auch die neue Kalibrationskurve operiert mit einer nicht unabhängig validierten dendrochronologischen Datenbasis (ca. > 3000 kalibrierte ¹⁴C-Jahre BP)

Atmosphärische Radiokarbon-Kalibrationskurve

Die Kalibrations-Arbeitsgruppe (IntCal Working Group; IntCal, international calibration) gibt seit 2004 in recht regelmäßigen Intervallen Radiokarbon-Alterskalibrationskurven heraus. Kürzlich ist nun eine neue Kurve für die nördliche Hemisphäre veröffentlicht worden: IntCal20 (REIMER et al. 2020).^{1,2}

Die Kalibrationskurve IntCal20 ist eine Zusammenstellung aus Datensätzen unterschiedlicher Herkunft. Die Datenbasis bilden:

- Skalenbereich von ca. 13.900 bis 0 kalibrierte ¹⁴C-Jahre BP³: Baumringe.
- Skalenbereich von ca. 55.000 bis ca. 13.900 kalibrierte ¹⁴C-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 CO₂ (REIMER et al. 2013a).

Im Folgenden wird nur der durch Baumringchronologien (Dendrochronologien) kalibrierte Teil behandelt.

Dendrokalibrierte Datensätze der atmosphärischen Kalibrationskurve

Das Proben- und Datenmaterial für den dendrokalibrierten Skalenbereich > 1900 kalibrierte ¹⁴C-

Jahre BP ist wie folgt zusammengestellt:

- Skalenbereich von ca. 7150 bis ca. 1900 kalibrierte ¹⁴C-Jahre BP: hauptsächlich Belfast-Eichenchronologie (→ 5-22) und Hohenheim-Eichenchronologie (→ 5-23).
- Skalenbereich von ca. 12.300 bis ca. 7150 kalibrierte ¹⁴C-Jahre BP: Hohenheim-Eichenchronologie und Hohenheim-Kiefernchronologie (zusammen Hohenheimer Jahrringkalender, → 5-23).
- Skalenbereich von ca. 13.900 bis 12.300 kalibrierte ¹⁴C-Jahre BP: „Radiokarbon-kalibrierte“ schwimmende, spätglaziale Kiefernchronologie⁴ (Schweiz und Deutschland).

Die jeweiligen Proben stammen von einzelnen Jahrringen oder mehreren Jahrringen (gepoolt, ≥ 2 bis 20 aufeinanderfolgende Jahrringe einer Sequenz). Sie sind einerseits dendrochronologisch absolut-datiert oder „Radiokarbon-kalibriert“-datiert sowie andererseits konventionell ¹⁴C-datiert. Von diesen gelieferten und ausgewählten Rohdatensätzen (Wertepaare: kalibriertes ¹⁴C-Alter BP, konventionelles ¹⁴C-Alter BP ± 1 σ)⁵ wird eine statistisch geglättete Kalibrationskurve erzeugt, von dieser dann ein Kalibrationsdatensatz (Wertepaare wie oben) in Schritten von 1, 5 oder 10 kalibrierten ¹⁴C-Jahren generiert.

Anforderungen an dendrokalibrierte Rohdatensätze

REIMER et al. (2013b, 1933f) führen erstmals konkrete methodische Anforderungen für Proben-

¹ Ursprünglich sollte 2019 eine IntCal19 (REIMER et al. 2018) herausgegeben werden.

² <http://www.intcal.org/curves/intcal20.14c>

³ Before present, vor heute; Bezugsjahr 1950.

⁴ Siehe REIMER et al. (2020, 12; weitere Referenzen dort) sowie KOTULLA (2019).

⁵ Siehe <http://intcal.org/>

bzw. Datensatz-Reihen der Radiokarbon-Kalibrationskurve auf. Diese beziehen sich auf verschiedene Aspekte der Konstruktion und Validierung von Baumringchronologien.

Neben anderen Punkten sei zwingend erforderlich, dass die jeweilige Dendrochronologie gut erstellt und vollständig publiziert ist; eine Veröffentlichung sollte u. a. enthalten:

- Details zur angewendeten Methodologie für die Baumring-Analyse;
- vollständige Details des Kreuzvergleichs und der Kreuzdatierung für jede Baumring-Serie;
- verbleibende Unsicherheit in absoluten Jahren;
- Angabe der Version der Chronologie, die für Datierungszwecke verwendet wurde;
- Veröffentlichung der Roh-Baumringbreiten der Bäume, die für Kalibrationsdaten beprobt wurden (ggf. Ablage in einem digitalen Archiv);
- klare Zuordenbarkeit der publizierten Kalibrationsdatensätze (welche Ringe von welcher individuellen Baumring-Serie sind in der ^{14}C -Probe inkludiert).

Stand heute und Stand REIMER et al. (2020) werden diese Anforderungen weder von der Belfast-Chronologie noch von den Hohenheim-Chronologien erfüllt (→ 5-22, 5-23). Die Jahrringlabore haben beispielsweise „vollständige Details des Kreuzvergleichs und der Kreuzdatierung für jede Jahrringserie“ oder „Roh-Jahrringbreiten der Bäume, die für Kalibrationsdaten beprobt wurden“ bislang nicht veröffentlicht. Eine Ausnahme ist die Veröffentlichung der Roh-Datenbasis des dendrochronologischen Labors der Queens-Universität Belfast (QUB) 2010; sie erfolgte aber zwanghaft und nicht im Rahmen der Präsentation der Belfast-Chronologie (z. B. mit BROWN et al. 1986).

Die „Wichtigkeit einer vollen Transparenz“

REIMER et al. (2020, 24) berichten nicht darüber, ob und inwieweit die methodischen Anforderungen (s. o.) erfüllt sind. Aber sie benennen für alle IntCal-Daten als zukünftiges Ziel ein

„Zubewegen auf eine verbesserte Datenverwaltung und öffentlichen Archivierung oder Open Access“.

Dabei soll für jährliche ^{14}C -Daten eine volle Transparenz geschaffen werden: „(...) aufgrund der Bedeutung der vollständigen Transparenz mit jährlichen ^{14}C -Daten für alle IntCal-eingereichten Daten benötigen wir jetzt auch Berichte des Baumringlabors, in dem die dendrochronologische Datierung durchgeführt wurde, die Metadaten, Rohringbreiten- oder $\delta^{18}\text{O}$ -Messungen und Kreuz-Korrelationsstatistiken einschließen.“⁶

Fazit und Relevanz

Durch REIMER et al. (2020) wird deutlich, dass die *internen* Anforderungen an Proben- bzw. Datensatz-Reihen der Radiokarbon-Kalibrationskurve (REIMER 2013b) nicht erfüllt werden. Die dendrochronologischen Rohdaten und Konstruktionsdaten sind nach wie vor weitestgehend nicht veröffentlicht. Das zeigt insbesondere die Zielformulierung, die mit der „Wichtigkeit einer vollen Transparenz“ begründet wird. Dieses sollte aber nicht nur für jährliche ^{14}C -Daten gelten, sondern generell für alle Daten.

Die relevanten Jahrringkalender bzw. Dendrochronologien (Belfast, Hohenheim) sind allerdings vor dem ersten vorchristlichen Jahrtausend nicht nachweislich valide (KOTULLA 2019); denn es liegt keine *unabhängige* und *System-externe* Validierung vor. Insofern operiert auch die aktuelle Kalibrationskurve mit Bezug auf den älteren dendrokalibrierten Teil mit einer nicht validierten Datenbasis.

Literatur

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

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, Baiersbronn.

https://www.wort-und-wissen.org/wp-content/uploads/g-19-1_radiokarbon.pdf

out which include meta data, raw ring width or $\delta^{18}\text{O}$ measurements and cross-correlation statistics” (REIMER et al. 2020, 24).

⁶ „(...) because of the importance of full transparency with annual ^{14}C data for any IntCal submitted data, we now also require reports from the tree-ring laboratory in which the dendrochronological dating was carried

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, AUSTIN WEN, BARD E, BAYLISS A, BRONK RAMSEY C, CHENG H, EDWARDS L, FRIEDRICH M, GROOTES PM, GUILDERSON TP, HAJDAS I, HEATON TJ, HOGG AG, HUGHEN KA, KROMER B, MANNING SW, MUSCHELER R, PALMER JG, PEARSON CL, REIMER RW, RICHARDS DA, SCOTT M, SOUTHON JR, TURNEY CSM, VAN DER PLICHT J & WACKER L (2018) A preview of the IntCal19 radiocarbon calibration curves. 23rd International Radiocarbon Conference, June 17-22 2018, Trondheim. Book of Abstracts, 42.

REIMER PJ, BARD E, BAYLISS A, BECK JW, BLACKWELL PG, BRONK RAMSEY C, BUCK CE, CHENG H, EDWARDS RL, FRIEDRICH M, GROOTES PM, GUILDERSON HP, HAFLIDASON H, HAJDAS I, HATTÉ C, HEATON TJ, HOFFMANN DL, HOGG AG, HUGHEN KA, KAISER KF, KROMER B, MANNING SW, NIU M, REIMER RW, RICHARDS DA, SCOTT EM, SOUTHON JR, STAFF RA, TURNEY CSM & VAN DER PLICHT J (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, HAFLIDASON 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.

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

Zur Ergänzung → 5-01, 5-13, 5-14, 5-21, 6-01, 6-11.

7-01 Magnetostratigraphie – Übersichtsblatt

Sinngeleiche und verwandte Begriffe

Magnetische Datierung, Paläomagnetismus, Geomagnetische Polaritätszeitskala.

Ziel

Versuch, in Gesteinen „aufgezeichnete“ magnetische Richtungsschwankungen (Anomalien) zu Altersbestimmungszwecken zu nutzen.

Grundlagen

1. Fähigkeit von Mineralien (Gesteinen), das erdmagnetische Feld zur Zeit der Gesteinsbildung (oder einer nachträglichen Erhitzung) in Form einer bleibenden (remanenten) Magnetisierung aufzuzeichnen und zu konservieren.
2. Feststellung signifikanter Schwankungen der Magnetisierung in unregelmäßigem Wechsel und mit unterschiedlicher Andauer, die als Umpolungen des geomagnetischen Feldes interpretiert werden (Polaritätswechsel).

Vorgehensweise

Die Schwankungen in ihrer Nacheinanderfolge werden abstrahiert und in Abschnitte normaler (heute) und inverser (entgegengesetzt zu heute) Magnetisierung unterteilt (Magnetostratigraphie). Durch radiometrische Alterseichung der abstrahierten Abfolge entsteht die Geomagnetische Polaritätszeitskala (hierarchisch von der Gegenwart in die Vergangenheit) und ein ihr eigenes Polaritätsmuster (Abb. 1).

Grundeinheit der Skala ist das Chron, ein Zeitabschnitt einheitlicher Polarität. Die jeweiligen Chron-Grenzen sind definitionsgemäß Isochronen. Ein Polaritätswechsel ist weltweit korrelierbar. Untergeordnet ist das Subchron bzw. Ereignis, ein „kurzweiliger“ Ausschlag (Exkursion) mit nur lokaler Bedeutung.

Eine Datierung erfolgt durch Identifizierung des Polaritätsmusters und Abgleich mit der abstrahierten Polaritätszeitskala; darüber Rückschluss auf das Isotopenalter und final auf die stratigraphische Stellung (oder umgekehrt).

Basisannahme(n)

In der Erdvergangenheit existierte 1. ein dipolares geomagnetisches Feld und 2. fielen

geomagnetischer und geographischer Pol (im Mittel) zusammen.

Historie

Phänomen: BRUHNES (1906), MATUYAMA (1929); Anwendung: HEIRTZLER et al. (1968).

Anwendung

Geologie (rezent bis Mitteljura).

Angabe/Größenordnung der Ergebnisse

Ausweis des jeweiligen Chrons oder Subchrons/Ereignisses der Polaritätszeitskala, z. B. (aktuell nach GRADSTEIN et al. 2012):

- C1n (Brunhes-Chron); Basis Umpolung: 0,781 Millionen [radiometrische] Jahre*
- C1r.1n (Jaramillo-Ereignis); Basis Umpolung: 1,073 Millionen [radiometrische] Jahre*

* jeweils über Modelle interpoliert

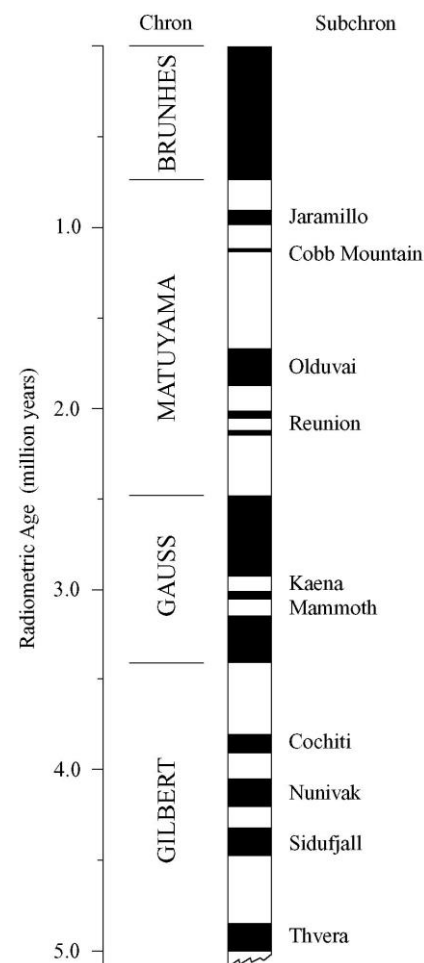


Abb. 1 Geomagnetische Polaritätszeitskala (Top); schwarz: normal (n); weiß: invers bzw. revers (r). Grafik: <http://geomaps.wr.usgs.gov/gump/common/MPTS.html> (Zugriff 2013).

Eichung

Zeitskala direkt oder indirekt (bio- bzw. zyklolithostratigraphisch, → 9.01) radiometrisch geeicht.

Altersbestimmungsverfahren

Relativ. Sekundärmethode in Bezug auf radiometrische Altersbestimmung (→ 4-01).

Gültigkeit (der Ergebnisse)

a) Relative Altersbestimmung

Gegeben, wenn das Polaritätsmuster eindeutig identifizier- und korrelierbar ist.

Die Magnetostratigraphie trägt zur klassischen Stratigraphie bei; Relevanz in Bezug auf weltweite Korrelationen.

b) Absolute Altersbestimmung

Keine realen Altersaussagen möglich (→ 4-01).

Literatur

BRUHNES B (1906) Recherches par la direction d'aimantation des roches volcaniques. J. Phys. 5, 705-724.

GRADSTEIN FM, OGG JG, SCHMITZ MD & OGG GM (2012) The Geologic Time Scale 2012. Volume 1/2, Oxford Amsterdam.

HEIRTZLER JR, DICKSON GO, HERRON EM, PITMAN III WC & LE PICHON X (1968) Marine magnetic anomalies, geomagnetic field reversals, and motions of the ocean floor and continents. Journal of Geophysical Research 73, 2119-2136.

MATUYAMA M (1929) On the direction of magnetization of basalt in Japan. Tyosen and Manchuria. Jap. Acad. Proceed. 5, 203-205.

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

Zur Ergänzung → 2-01, 2-02, 2-03.

8-01 Eiskernchronologische Methode – Übersichtsblatt

Sinngleiche und verwandte Begriffe

Zählung von Jahresschichten in Eiskernen bzw. Eisbohrkernen (Eisschichtenzählung); Eiskerndatierung.

Ziel

Versuch, an einem Eisbohrkern (Abb. 1) jährliche Schneezuwächse zu identifizieren und auszugliedern und dadurch eine absolute Chronologie von der Oberfläche einer Eisdecke (Gegenwart) in die Tiefe (Vergangenheit) rückwärts aufzubauen.

Grundlagen

Beobachtung saisonaler Schwankungen (Eisoberfläche) sowie laminarer Gefüge und Stoffperiodizitäten (Eiskern).

Vorgehensweise

Ausführung von Kernbohrungen (ggf. bis zur Basis); stratigraphische Aufnahme der Eiskerne, visuell, sowie Durchführung physikalischer und chemischer Reihenmessungen (u. a. Säuregrad (Acidität), Staubgehalt, $\delta^{18}\text{O}$, Ca^{2+} , NH_4^+ , Mikropartikel, Nitrat). Einsatz aller Mittel zu einer (Multi-Parameter-) Identifizierung von jährlich gebildeten Eisschichten.

Basisannahme(n)

1. Die Identifizierung bzw. Abgrenzung eines jährlichen Schneezuwachses ist kontinuierlich über das gesamte Profil möglich.
2. Die ermittelten Stoffperiodizitäten repräsentieren Jahreslagen und demzufolge Kalenderjahre.
3. Der heute zu beobachtende Prozess der Sauerstoffisotopenfraktionierung ist uneingeschränkt auf die Vergangenheit übertragbar.
4. Eisfluss- und Diagenesemodelle bilden die Vergangenheit korrekt ab.

Historie (grönländischer Eisschild)

DANSGAARD et al. (1969), HAMMER et al. (1986), RASMUSSEN et al. (2006), WALKER et al. (2009).

Anwendung

Quartärgeologie, (Paläo)klimatologie.

Angabe/Größenordnung der Ergebnisse

Längste Chronologien:

- Grönland: > 120.000 [Eiskern-] Jahre.
- Antarktis: ~ 800.000 [Eiskern-] Jahre.



Abb. 1 Bohrkopf mit Eiskern. Foto: Sepp KIPFSTUHL; NEEM ice core drilling project, <http://www.neem.ku.dk>.

Bekannte Einschränkungen/Probleme

U. a. problematische Zone spröden Eises, Diffusion, Nachlassen/Ersterben der $\delta^{18}\text{O}$ -Feinszillationen.

Eichung

Radiometrisch (→ 4.01, 6.01), indirekt (s. u.).

Altersbestimmungsverfahren

Anspruch: Unabhängig und absolut (HAMMER et al. 1986).

Verifizierung

Die Methode bedarf einer unabhängigen Verifizierung durch Objekte/Ereignisse bekannten (historischen) Alters.

Gültigkeit (der Ergebnisse)

a) Relative Altersbestimmung

Gegeben. Eisbohrkerne können untereinander und in Teilbereichen mit marinen und terrestrischen Abfolgen korreliert werden.

b) Absolute Altersbestimmung

- Skalenbereich ~ 1000 bis 0 Eiskernjahre b2k¹: Sehr wahrscheinlich gegeben. Punktuell kann der jüngste Teil der Grönland-Eiskernchronologie-2005 (RASMUSSEN et al. 2006) durch unabhängige, zeitlich bekannte Ereignisse (vulkanische Aschenlagen bzw. -partikel) verifiziert werden (KOTULLA 2019).

- Skalenbereich > 1000 Eiskernjahre b2k: Nicht gegeben. Eine Verifizierung mit unabhängigen, zeitlich bekannten Ereignissen ist nicht gegeben.

Die Basisannahmen sind bisher nicht oder in einem sehr eingeschränkten Maße nachgewiesen worden. Vielmehr erfolgt die Datierung von Eiskernen hierarchisch (Beispiel grönländischer Eisschild, KOTULLA 2019): 1.

¹ Before 2k (2000); Bezugsjahr ist das Jahr 2000.

Stratigraphische Korrelation; 2. Übernahme von zwei radiometrisch geeichten Altersfixpunkten der quartär-geologischen Zeitskala und Übertragung auf konkrete Ereignispunkte der Eissäule, Konstruktion (Approximation) einer meter- bzw. „jahr“genauen Alters-zu-Tiefen-Beziehung durch Kalkulation unter Anwendung physikalischer Eisflussmodelle; 3. „Jahresschichtenzählung“: Die Anzahl auszuweisender Einzel-„Jahre“ ist durch die radiometrische Eichung im Wesentlichen vorbestimmt. Durch Fixierung der notwendigen Skalen- bzw. „Jahres“einheiten über entsprechende Auflösungen stratigraphischer und/oder physikochemischer Signale wird eine „jahrgenaue“ Zeitskala konstruiert (Eiskernchronologie). Die Signale werden mit „Jahren“ und „Jahresschichten“ assoziiert bzw. als solche interpretiert (kein Nachweis).

Kritik und Handlungsbedarf

Die eiskernchronologische Methode (Eiskern-datierung) in ihrer Gesamtheit ist weder ein unabhängiges noch ein absolutes Altersbestimmungsverfahren (s. o.).

Der breiten Öffentlichkeit werden die Eiskernalter fast ausnahmslos als reale Alter, nämlich abgezahlter (echter) Jahre („Jahresschichtenzählung“), dargestellt und kommuniziert. Dies ist irreführend; sie sind hauptsächlich radiometrisch begründet. Darüber sollte die breite Öffentlichkeit vollumfänglich aufgeklärt werden; die Eiskernalter sollten entsprechend gekennzeichnet werden, u. a. durch Ausweis der zugrundeliegenden Datierungsmethoden und ihrer substanziellen Annahmen.

Literatur

- DANSGAARD W, JOHNSON SJ, MOLLER J & LANGWAY CC JR (1969) One thousand centuries of climate record from Camp Century on the Greenland ice sheet. *Science* 166, 377-381.
- HAMMER CU, CLAUSEN HB & TAUBER H (1986) Ice-core dating of the Pleistocene/Holocene boundary applied to a calibration of the ¹⁴C timescale. *Radiocarbon* 28, 284-291.
- KOTULLA M (2019) Grönländische Eisbohrkerne und ihre Interpretation: Absolute Datierung durch Zählung von Jahresschichten? W+W Special Paper G-19-2, Baiersbronn; https://www.wort-und-wissen.org/wp-content/uploads/g-19-2_eisbohrkern.pdf
- RASMUSSEN SO, ANDERSEN KK, SVENSSON AM, STEFFENSEN JP, VINTHER BM, CLAUSEN HB, SIGGAARD-ANDERSEN M-L, JOHNSEN SJ,

LARSEN LB, DAHL-JENSEN D, BIGLER M, RÖTHLISBERGER R, FISCHER H, GOTO-AZUMA K, HANSSON M-E & RUTH U (2006) A new Greenland ice core chronology for the last glacial termination. *J. Geophys. Res.* 111, D06102, doi:10.1029/2005JD006079.

WALKER M, JOHNSEN S, RASMUSSEN SO, STEFFENSEN JP, POPP T, GIBBARD P, HOEK W, LOWE J, ANDREWS J, BJØRCK S, Cwynar L, HUGHEN K, KERSHAW P, KROMER B, LITT T, LOWE DJ, NAKAGAWA T, NEWNHAM R & SCHWANDE J (2008) The Global Stratotype Section and Point (GSSP) for the base of the Holocene Series/Epoch (Quaternary System/Period) in the NGRIP ice core. *Episodes* 31, 264-267.

8-10 Das bislang älteste Eis

800.000 Jahre oder 800.000 radiometrische Jahre? – Auf den Unterschied kommt es an

Die Vermessung des Eises – Rekordverdächtige Alter¹

„Forscher holen 750.000 Jahre altes Eis ans Tageslicht.“² – So oder ähnlich waren die Meldungen in 2003, die die breite Öffentlichkeit erreichten, nachdem ein Bohrkern aus 3140 Metern Tiefe aus dem antarktischen Eis gewonnen und datiert worden war (EPICA Community Members 2004). Damit war es das bislang älteste Eis. Die Bohrung an der Station Dome C im Südosten der Antarktis (Abb. 3), etwa 1000 km von der Küste entfernt, wurde im Rahmen des Forschungsprojektes EPICA³ niedergebracht, zu welchem auch eine Bohrung an der deutschen Kohnen-Station gehört (EPICA Community Members 2006).

Mit Abschluss der Bohrung im Dezember 2004 in einer Bohrtiefe von 3270,2 Metern, etwa 5 Meter oberhalb des Felsuntergrundes, wurde sogar angenommen, dass der gesamte Eiskern⁴ Klimateaufzeichnungen von mehr als 900.000 Jahren enthält (Tab. 1).⁵ Weitere Auswertungen schrieben das Alter jedoch auf „nur“ 800.000 Jahre fort (PARRENIN et al. 2007). Inzwischen wird nach noch älterem Eis gesucht. Es sind Regionen in der Antarktis identifiziert worden, die nach FISCHER et al. (2013) einen 1,5 Millionen Jahre alten Eiskern liefern könnten.⁶

Es stellt sich die Frage, wie antarktische

Eiskerne datiert werden und um was für Alter es sich handelt.



Abb. 1 EPICA-Eiskern. Tiefe ca. 2650 m, Kohnen-Station, Antarktis. Foto: Hans OERTER, AWI, <http://www.awi.de>.

EPICA-DOME-C-Eiskern (EDC99) – Stratigraphie und Alterskalkulation

An dem EDC-Eiskern wurden, wie bei anderen Eiskernen auch, zahlreiche physiko-chemische Reihenmessungen vorgenommen. Das markanteste, den kompletten Eiskern beschreibende Phänomen ist das Profil der Wasserstoffisotopenverhältnisse (Abb. 2), kurz δD ⁷ (analog Sauerstoffisotopenverhältnisse, $\delta^{18}O$).

¹ Dieses „bislang älteste Eis“ bezieht sich auf eine kontinuierliche Eisüberlieferung von der Eisdecke bis in eine Tiefe von 3040 m. Inzwischen sollen ältere, aber isolierte Eiskörper gefunden worden sein: Siehe YAN et al. (2019).

² Bild der Wissenschaft vom 4. 11. 2003 (http://www.wissenschaft.de/home/-/journal_content/56/12054/1148225/); Zugriff 11/2013.

³ European Project for Ice Coring in Antarctica, Projektlaufzeit 1996-2005.

⁴ Eiskerne sind erbohrte Eis-Zylinder mit einem Durchmesser von i. d. R. 10 cm. Sie werden stückweise, in Längen von bis zu drei Metern, gefördert. Aus den einzelnen Eis-Zylindern wird ein Gesamtprofil („virtuelle“ Eissäule) erstellt. Das Eis entsteht durch Ansammlung (Akkumulation) der Schneeflocken, zunehmender Verdichtung (Überlagerungsdruck) und Rekristallisation.

⁵ Pressemitteilung des AWI (Alfred-Wegener-Institut) vom 13. 1. 2005: Der älteste antarktische Eiskern; [http://www.awi.de/de/aktuelles_und_presse/pressemitteilungen/detail/item/in_the_cornucopia_of_the_european_project_of_ice_coring_in_antarctica_the_oldest_antarctic_ice_core/?tx_list_pi1%5Bmode%5D=6&cHash=387b6e696183817ba4f50f04c5e78f0a](http://www.awi.de/de/aktuelles_und_presse/pressemitteilungen/detail/item/in_the_cornucopia_of_the_european_project_of_ice_coring_in_antarctica_the_oldest_antarctic_ice_core/?tx_list_pi1%5Bmode%5D=6&cHash=387b6e696183817ba4f50f04c5e78f0a;); Zugriff 11/2013.

⁶ Bild der Wissenschaft vom 5. 11. 2013 (http://www.wissenschaft.de/web/wissenschaft.de/erde-weltall/geowissenschaften/-/journal_content/56/12054/2421667/); Zugriff 11/2013.

⁷ Verhältnis 2H (D) zu 1H in Bezug zu einem Standard; durch Isotopenfraktionierung ist das Inlandeis an 1H angereichert, d.h. die δD -Werte sind negativ.

Kennzahlen	Dome C	Vostok
Bohrkampagne, abgeschlossen	2006	1998
Höhe über NN	3233 m	3488 m
Mittlere Oberflächentemperatur	-54,5° C	-55° C
Oberflächenakkumulation p.a. Wasser	25 mm	23 mm
Tiefe der Bohrung	3270,2 m	3623 m
Abstand zum Untergrund, etwa	5 m	120 m
Eisalter an der Basis, [radiometrische] Jahre	> 800.000	> 423.000

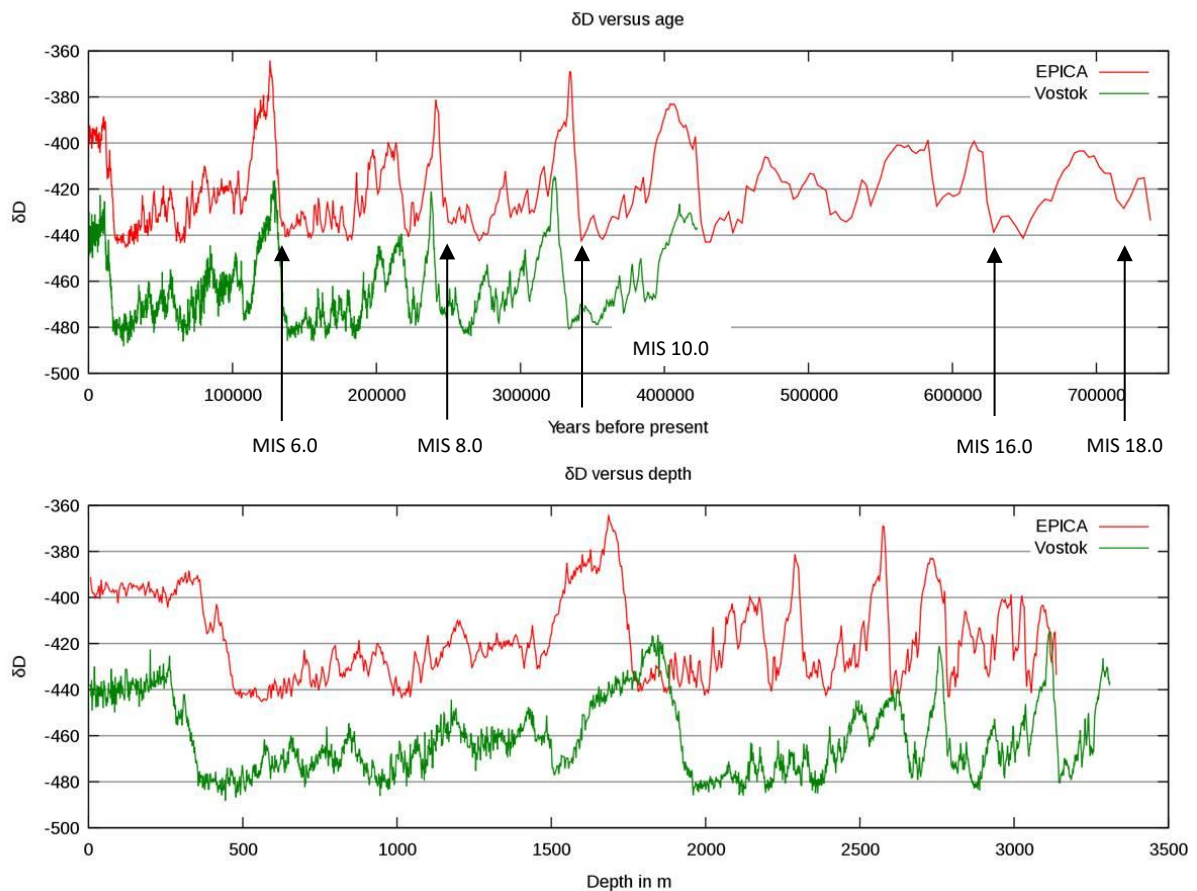
Tab. 1 Kennzahlen zu den Eiskernbohrungen Dome C und Vostok.

Abb. 2 δD -Profil des EPICA-Dome-C-Eiskerns im Vergleich zum Vostok-Eiskern. Die Signatur mit der Tiefe (untere Grafik) ist bis etwa 1700 m Tiefe identisch. Durch (klimato-)stratigraphische Korrelation werden die Profile zeitlich in Beziehung gesetzt, sodass die obere Grafik eine weitgehende Übereinstimmung über vier Intervalle (interpretiert als Glazialzyklen) erkennen lässt. Ein Glazialzyklus (Kalt-/Warmzeit) ist definiert als zwei MIS-Einheiten. Die fünf Ankerpunkte („Kontrollpunkte“, siehe Textteil) sind mit Pfeilen markiert. Die Lage der „Kontrollpunkte“ MIS 8.0 und MIS 10.0 (vgl. EPICA Community Members 2004, Fig. 2b, dort markiert durch Diamantensymbole) ist durch den Verfasser korrigiert worden. Grafik: NOAA, http://en.wikipedia.org/wiki/File:EPICA_delta_D_plot.svg; nach *Epica_18_plot.png*; Pfeile und MIS-Angaben durch Verfasser ergänzt. Quelle: ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/icecore/antarctica/epica_domec/edc_dd.txt.

Die auffällige Signatur von Intervallen extremer δD -Oszillationen wird mit dem Sauerstoffisotopenprofil mariner Sedimente (MIS⁸) ausgehend von der Gegenwart über insgesamt „acht Glazialzyklen“ (klimatostratigraphisch) korreliert (EPICA Community Members 2004). Hierbei wird eine strenge Beziehung zwischen den δD - bzw. $\delta^{18}O$ -Werten und der Temperatur angenommen. Abb. 2 zeigt das δD -Profil (Isotopenstratigraphie) mit zunehmender Tiefe (unten) und zunehmenden Alter (oben) jeweils im Vergleich zum Vostok-Eiskern sowie die ausgewiesenen Terminationen⁹ (Pfeile, vgl. unten).

Der Datierung des EDC99-Eiskerns gingen zahlreiche Datierungen zuvor gewonnener Eiskerne aus dem antarktischen Inlandeis voraus (z. B. Byrd, Vostok). Die Eiskernbearbeiter haben zahlreiche, sich ergänzende physikalische Modelle/Eisflussmodelle entwickelt, um Eiskern-Zeitskalen (Chronologien) zu konstruieren. Über diese Verfahren wird für jeden Eiskern ein Alters-zu-Tiefen-Modell aufgestellt, d. h. jedem Meter und Zentimeter der Eissäule wird ein rechnerisches Modellalter zugewiesen (siehe Anhang II).

A) EDC2-Chronologie

Die Vorgehensweise – insbesondere die Modelle, die für die Datierung des EDC99-Eiskerns herangezogen wurden und zu einem Alter von 740.000 Jahren führten – wird im Methodenteil nach dem eigentlichen Artikel (EPICA Community Members 2004, 627) sowie dem Zusatzmaterial dargelegt; in dieser Reihenfolge (gekürzt):

- Die Berechnung einer (angenommenen) Ausdünnung mit der Tiefe mittels eines Eisflussmodells (nach RITZ 1992), mit vorgegebenen Eisschildhöhen über NN. Hierbei fließen zwei unzureichend bekannte („poorly known“) Parameter ein:

Die Schmelzrate F [mm/a] im Untergrund an der Basis des Eisschildes sowie ein Parameter m für die Vertikalkomponente.

- Die Berechnung der Akkumulationsrate A [cm/a Eis] mittels eines Kondensationsmodells.
- Anwendung eines Firnmodells zur Anpassung Gasalter/Eisalter.
- Die unzureichend bekannten („poorly known“) Parameter (F , m , A_0 sowie einer Konstanten β) der Modelle bzw. deren Werte werden abgeschätzt durch Übernahme bereits datierter Kontrollpunkte- bzw. Kontrollfenster (siehe Tab. 2, Anhang III).

Tatsächlich erfolgt aber die Konstruktion hierarchisch. Denn ohne eine vorherige Alters-eichung ist eine Konstruktion nicht möglich.

1. Korrelation (klimatostratigraphisch). Abgleich der δD -Kurve des EDC-Eiskerns mit der marinen Isotopenkurve (MIS) und Feststellung eines weitestgehend ähnlichen Verlaufs (vgl. EPICA Community Members 2004, Fig. 2; JOUZEL et al. 2007, Fig. 1). Mit der Korrelation markanter Abschnitte/Ausschläge (Peaks) wird von zeitgleichen Bildungen ausgegangen. Beide Kurven werden klimatisch interpretiert.
2. Übernahme radiometrisch geeichter Altersfixpunkte (Anker, siehe oben „Kontrollpunkte“ bzw. „Kontrollfenster“). Es werden drei Fixpunkte der EDC1¹⁰-Skala sowie fünf Fixpunkte der marinen Isotopenkurve MIS (aus BASSINOT et al. 1994) auf konkrete Ereignispunkte der EDC99-Eissäule übertragen. Mit diesen radiometrisch geeichten Fixpunkten erfolgt die Konstruktion einer zentimeter- bzw. „jahrgenauen“ Tiefen-zu-Alters-Beziehung unter Anwendung mehrerer

⁸ Auch Sauerstoffisotopenstufen (OIS, oxygen isotope stages); Gliederung der abstrahierten Sauerstoffisotopen-Chronologie in Stufen (Oszillationen interpretiert als relativ wärmere bzw. relativ kältere Perioden) von der Gegenwart bis über die Pliozän/Pleistozän-Grenze hinaus (Grenze: Stufe 103), aktueller Standard LR04 (LISIECKI & RAYMO 2005). Es handelt sich um eine Weiterentwicklung der SPEC-MAP-Kurve (Spectral Mapping Projekt), eine in den 1980er-Jahren entwickelte Standardchronologie/-zeitskala für den Sauerstoffisotopenbericht mariner Sedimente. Die jeweiligen (Komposit-) Kurven sind

radiometrisch geeicht, geglättet, gefiltert und auf astronomische Zyklen getunt (eingephasst).

⁹ Termination: abrupter Wechsel („abrupt shift“) von niedrigen zu hohen Isotopenwerten; werden als Wechsel von glazialen (kalten) zu interglazialen (warmen) Episoden interpretiert; nomenklatorisch durchnummeriert mit geraden x.0-Werten.

¹⁰ EDC1 ist eine frühere Chronologie und bezieht sich auf eine erste Bohrung (EDC96) an der Dome C Station, die 1999 in 788 m Tiefe abgebrochen werden musste (SCHWANDER et al. 2001). Die EDC2-Chronologie ist die an dieser Stelle behandelte Tiefbohrung (EDC99) der EPICA-Veröffentlichung in 2004.

- physikalischer Modelle.
3. Feinadjustierung.

B) EDC3-Chronologie

PARRENIN et al. veröffentlichten 2007 eine neue Chronologie des EPICA-Dome-C-Eiskerns (EDC99) mit der Bezeichnung EDC3. Die Vorgehensweise wird schlicht umrissen; EDC3 „basiert auf eine Anwendung eines 1) Schneeakkumulations- und mechanischen Flussmodells und 2) einem Set unabhängiger Altersmarker entlang des Eiskerns“ (S. 485). Alle Marker (Tab. 3, Anhang III) > 1000 Jahre sind allerdings radiometrisch begründet, d. h. von einer radiometrischen Zeitskala abgeleitet. Sie sind deshalb auch nicht „unabhängig“. Die Autoren weiten die Skala auf 800.000 [radiometrische] Jahre aus.

C) Vostok-Chronologie

PETIT et al. (1999, 432) nennen drei Basisannahmen zur Konstruktion der glaziologischen Zeitskala GT4¹¹ des Vostok-Eiskerns. Die dritte besagt, dass der Vostok-Eiskern in einer Tiefe von 1.534 m mit der marinen Isotopenstufe (MIS) 5.4 (110 ka) und in einer Tiefe von 3.254 m mit der Stufe 11.2.4 (390 ka) korrespondiert. Das heißt, dass die GT4-Zeitskala – wie auch in

wesentlichen Teilen die EDC2-Zeitskala – an der radiometrisch begründeten MIS-Skala ge-
eicht wurde.

Fazit – Es gibt einen Unterschied

Das älteste Eis, erbohrt an der Station Dome C und gefördert aus einer Tiefe von knapp 3300 m, ist nicht 800.000 Jahre (Basis: PARRENIN et al. 2007), sondern 800.000 **radiometrische** „Jahre“ alt. Die Vorgehensweise der Eiskernbearbeiter zeigt, dass keine eigenständige, unabhängige und absolute Datierungsmethode entwickelt wurde, sondern eine Sekundäranwendung vorliegt, die das radiometrische Altersgerüst als essentielle Grundlage nutzt. Dies trifft auf alle Lang-Chronologien von Eiskernen der Antarktis und des grönländischen Eisschildes (vgl. KOTULLA 2019) zu.

Da nicht bekannt ist, in welcher Beziehung radiometrische Alter dieser Größenordnungen zum realen Alter stehen (vgl. weitere Beiträge dieser Loseblattsammlung), können radiometrische Alter nicht mit realem Alter gleichgesetzt werden. Die Altersangaben zu den Eiskernen ohne Ausweis der Annahmen und der (mittel- oder unmittelbar) zugrundeliegenden Datierungsmethoden, also ohne entsprechende Kennzeichnung, sind irreführend.

¹¹ GT4: Glaciological Timescale four cycles; glaziologische Zeitskala, die vier Glazialzyklen umfasst.

Anhang I: Karte der Antarktis

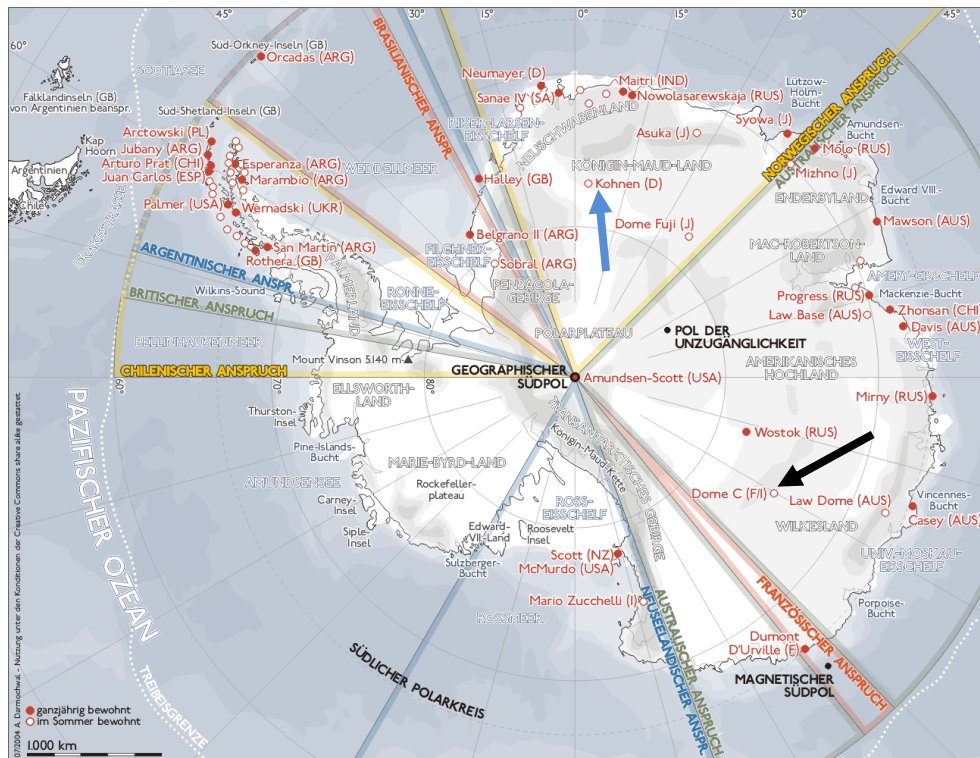


Abb. 3 Antarktis mit Forschungsstationen, u. a. Dome C (F/I) (schwarzer Pfeil) und Kohnen (D) (blauer Pfeil), Stand 2004. Grafik: Sansculotte, 2004 (Wikimedia Commons; CC BY-SA 3.0).

Anhang II: Eisflussmodelle

Es werden hauptsächlich 1-dimensionale Modelle angewendet, die die (angenommene) zunehmende Ausdünnung mit der Tiefe als auch die Eisschmelze im Untergrund beschreiben. Nach FISCHER et al. (2013, 2491) ist das Altersprofil (Alters-zu-Tiefen-Beziehung) durch das Integral

$$t(z) = \int_H^z \frac{-1}{\left(A - \frac{\partial H}{\partial t} - M\right) \left(\frac{z}{H}\right)^{m+1} + M} dz \quad (1)$$

gegeben, wobei A die Akkumulationsrate ist, M die Schmelzrate (beide Größen in Meter Eis-äquivalente p. a.), H die Eisdicke, z die Höhe über dem Untergrund und m ein adjustierbarer Faktor (nahe 0,5). Die Kurve hat einen exponentiell fallenden Verlauf.

Entscheidend ist, dass die Größen A , M und H der Gleichung (1) alle Funktionen der Zeit sind und angenommen wird, dass diese über die verflossene Zeit konstant waren.¹² Hierüber

wird also kein Nachweis erbracht. Eine signifikant höhere und wechselnde Niederschlagsrate in der Vergangenheit könnte das Modell in dieser Form nicht abbilden. Höhere Niederschlagsraten würden auf jeden Fall (ohne Abänderung der anderen Parameter) zu jüngeren Alterswerten führen.

Für den EDC-Eiskern wurden folgende Durchschnittswerte zu Grunde gelegt: $A = 0,0181$ m Eisäquivalent p. a., $H = 3151$, $m = 0,5$, $T_s = 213$ K [-60°C] Oberflächentemperatur als wichtiger Parameter für eine Berechnung von M). Mit diesen Werten wurde eine gute Übereinstimmung mit der EDC3-Zeitskala (PARRENTIN et al. 2007) erzielt.

Die auf Basis der Modelle hergeleitete Ausdünnung ist extrem hoch. An Abb. 2 können Circa-Werte mittelbar abgelesen werden. Für den Tiefenbereich 3100-3000 m repräsentieren durchschnittlich etwa 1,0 mm ein „Jahr“; im Vergleich zur Oberfläche (Äquivalent von ca. 25 mm) beträgt der Faktor > 20 (95%-

¹² „Note that A , M and H are all functions of time. In the following, however, we will assume that A , M

and H are constant in time but use their long-term temporal averages“ (FISCHER et al. 2013, 2491).

Volumenverlust durch seitliches „Abfließen“).
Dieser Tiefenabschnitt alleine repräsentiert

100.000 Eiskernjahre.¹³

Anhang III: Korrelations- bzw. Eich Tabellen

Bohrtiefe [m]	Übernahme stratigraphischer Fixpunkte - Korrelation mit ...	Übernahme Alter [radiometrische Jahre]	Referenzen
233	Von EDC 1: Vulkanisches Ereignis, Korrelation mit Vostok-Eiskern (GT4-Zeitskala)	7135 ± 100	Petit et al. 1999
374	Von EDC1: Korrelation mit Ereignis des Byrd-Eiskerns	12390 ± 400	Blunier et al. 1998
740	Von EDC1: Isotopenspitze von ¹⁰ Be (koreliert mit geomagnetischem Ausschlag des Laschamp-Ereignisses, U/Th-datiert)	41 ± 2 k	Schwander et al. 2001
1738	Termination II (MIS 6.0)	131 ± 6 k	Bassinot et al. 1994
2311	Termination III (MIS 8.0)	245 ± 6 k	"
2593	Termination IV (MIS 10.0)	338 ± 6 k	"
3038	Termination VII (MIS 16.0)	626 ± 6 k	"
3119	Termination VIII (MIS 18.0)	717 ± 6 k	"

Tab. 2 Übernahme stratigraphischer Fixpunkte und deren radiometrische Alter (nach EPICA Community Members 2004 und Ergänzung durch den Verfasser; Referenzen siehe dort; k = kilo).

Bohrtiefe [m]	Übernahme stratigraphischer Fixpunkte - Korrelation mit ...	Übernahme Alter [radiometrische Jahre]	Referenzen
8,35-41,52	Zuweisung vulkanischer Eruptionen bekannten historischen Alters zu Sulfatausschlägen: 7 Ereignisse (Krakatau und älter, teilweise auch 'unbekannt')	AD 1884±1 - AD 1171±6	Castellano et al. 2005
107,8 181,1	Synchronisation mit GICC05 und INTCAL; Perioden großer ¹⁰ Be/ ¹⁴ C-Variationen	2716 yr BP 5279 yr BP	Reimer et al. 2004 Vinther et al. 2006 Udisti et al. 2004
361,5	Übernahme EDC96 (355,3 m): GICC05, CH ₄ -Profil	11,65 ± 0,32 kyr BP	Severi et al. 2007
427,2	Übernahme EDC96 (421,2 m): GICC05, CH ₄ -Profil	14,64 ± 0,34 kyr BP	Severi et al. 2007
740,1	Isotopenausschlag ¹⁰ Be, GICC05 und EDC96	41,2 kyr BP	Raisbeck et al. 2007
1265	Mount Berlin (Antarktis), Aschenlage Ar/Ar-datiert	92,5 kyr BP	Narcisi et al. 2006
1699	Termination II (MIS 6.0), rapides CH ₄ -Ereignis; U/Th-datierte Höhlenspeleotheme	130,1 kyr BP	Yuan et al. 2004 Bar-Matthews et al. 2003
- 2790	Luftblasen-Profil, 10 Fixpunkte, orbital-getuned	- 440 kyr BP	Raynaud et al. 2007
2714-3199	δ ¹⁸ O _{atm} -Profil, 37 Fixpunkte, orbital-getuned	300-800 kyr BP	Dreyfus et al. 2007
3165	Brunhes/Matuyama-Polaritätswechsel, Marker in ¹⁰ Be-Bericht; radiometrisch datiert/orbital-getuned	785 kyr BP	Coe et al. 2004 Raisbeck et al. 2006

Tab. 3 Übernahme stratigraphischer Fixpunkte und deren radiometrische Alter (nach PARRENTIN et al. 2007 und Ergänzung durch den Verfasser; Referenzen siehe dort, BP = before present, vor 1950; yr = years, Jahre). Auch die auf astronomische Zyklen getuneten Reihen („orbital-tuned“), die GICC05-Zeitskala (grönländischer Eisschild; Greenland Ice Core Chronology) und die CH₄-Reihen sind radiometrisch begründet. Eine Ausnahme bilden die obersten Dekameter der Eissäule. Den Sulfatniederschlägen (erhöhte Sulfatkonzentrationen im Eiskern) werden Vulkaneruptionen zugewiesen, im oberen Teil von Ausbrüchen bekannten historischen Alters. Sulfatniederschläge hinterlassen aber keinen eindeutigen Fingerabdruck (im Gegensatz zu Aschenlagen, bei denen das Potential geochemischer Vergleiche besteht). Insofern ist kein Nachweis darüber erbracht worden, dass es sich tatsächlich um diese Ausbruchereignisse handelt (z. B. CASTELLANO et al. 2005).

¹³ Die Diskussion eines alternativen Modells ist nicht Gegenstand dieses Beitrages.

Literatur

- BASSINOT FC, LABEYRIE LD, VINCENT E, QUIDELLEUR X, SHACKLETON NJ & LANCELOT Y (1994) The astronomical theory of climate and the age of the Brunhes-Matuyama magnetic reversal. *Earth Planet. Sci. Lett.* 126, 91-108.
- CASTELLANO E, BECAGLI S, HANSSON M, HUTTERLI M, PETIT JR, RAMPINO MR, SEVERI M, STEFFENSEN JP, TRAVERSI R & UDISTI R (2005) Holocene volcanic history as recorded in the sulfate stratigraphy of the European Project for Ice Coring in Antarctica Dome C (EDC96) ice core. *J. Geophys. Res.* 116, D06114, doi:10.1029/2004JD005259.
- EPICA Community Members (2004) Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature* 429, 623-628.
- EPICA Community Members (2006) One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica. *Nature* 444, 195-198.
- FISCHER H, SEVERINGHAUS J, BROOK E, WOLFF E, ALBERT M, ALEMANY O, ARTHURN R, BENTLEY C, BLANKENSHIP D, CHAPPELLAZ J, CREYTS T, DAHL-JENSEN D, DINN M, FREZZOTTI M, FUJITA S, GALLEE H, HINDMARSH R, HUDSPETH D, JUGIE G, KAWAMURA K, LIPENKOV VF, MILLER H, MULVANEY R, PARRENIN F, PATTYN F, RITZ C, SCHWANDER J, STEINHAGE D, VAN OMMEN T & WILHELMS F (2013) Where to find 1.5 million yr old ice for the IPICS "Oldest-Ice" ice core. *Clim. Past* 9, 2489-2505.
- JOUZEL J, MASSON-DELMOTTE V, CATTANI O, DREYFUS G, FALOURD S, HOFFMANN G, MINSTER B, NOUET J, BARNOLA JM, CHAPPELLAZ J, FISCHER H, GALLET JC, JOHNSEN S, LEUENBERGER M, LOULERGUE L, LUETHI D, OERTER H, PARRENIN F, RAISBECK G, RAYNAUD D, SCHILT A, SCHWANDER J, SELMO E, SOUCHEZ R, SPAHNI R, STAUFFER B, STEFFENSEN JP, STENNI B, STOCKER TF, TISON JL, WERNER M & WOLFF EW (2007) Orbital and millennial Antarctic climate variability over the past 800,000 years. *Science* 317, 793-796.
- KOTULLA M (2019) Grönländische Eisbohrkerne und ihre Interpretation: Absolute Datierung durch Zählung von Jahresschichten? W+W Special Paper G-19-2, Baiersbronn; https://www.wort-und-wissen.org/wp-content/uploads/g-19-2_eisbohrkern.pdf
- PARRENIN F, DREYFUS G, DURAND G, FUJITA S, GAGLIARDINO O, GILLET F, JOUZEL J, KAWAMURA K, LHOMME N, MASSON-DELMOTTE V, RITZ C, SCHWANDER J, SHOJI H, UEMURA R, WATANABE O & YOSHIDA N (2007) 1-D-ice flow modelling at EPICA Dome C and Dome Fuji, East Antarctica. *Clim. Past* 3, 243-259.
- LISIECKI LE & RAYMO ME (2005) A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}O$ records. *Paleoceanography* 20, PA1003, doi:10.1029/2004PA001071.
- PETIT JR, JOUZEL J, RAYNAUD D, BARKOV NI, BARNOLA J-M, BASILE I, BENDER M, CHAPPELLAZ J, DEVIS M, DELAYGUE G, DELMOTTE M, KOTLYAKOV VM, LEGRAND M, LIPENKOV VY, LORIUS C, PEPIN L, RITZ C, SALTZMAN E & STIEVENARD M (1999) Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature* 399, 429-436.
- RITZ C (1992) Un modèle thermo-mécanique d'évolution pour le bassin glaciaire Antarctique Vostok-Glacier Byrd: Sensibilité aux valeurs des paramètres mal connus. Thesis, University J. Fourier.
- SCHWANDER J, JOUZEL J, HAMMER CU, PETIT J-R, UDISTI R & WOLFF E (2001) A tentative chronology for the EPICA Dome Concordia ice core. *Geophysical Research Letters* 28, 4243-4246.
- YAN Y, BENDER ML, BROOK EJ, CLIFFORD HM, KEMENY PC, KURBATOV AV, MACKAY S, MAYEWSKI PA, NG J, SEVERINGHAUS JP & HIGGINS JA (2019) Two-million-year-old snapshots of atmospheric gases from Antarctic ice. *Nature* 574, 663-666.

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

Zur Ergänzung → 8-01.

9-01 Astrochronologische Methode (Astrochronologie) – Übersichtblatt

Sinngleiche und verwandte Begriffe

Astronomische bzw. Milankovitch-Theorie, astronomische Zeitskala, Milankovitch-Zyklen, Zyklusstratigraphie.

Ziel

Versuch, die theoretischen Orbital- bzw. Milankovitch-Zyklen zu Datierungs- und/oder Feinabstimmungszwecken (bestehender Zeitskalen) zu nutzen.

Grundlagen

Ermittlung der theoretischen Langzeit-Variationen der Erdbahnparameter für eine [theoretische] Vergangenheit unter Zugrundelegung der (aktuellen) Himmelskörper-Interaktion. Die rechnerische Dauer der Haupt-Zyklen (Milankovitch-Zyklen) beträgt nach HINNOV & HILGEN (2012): 19 bzw. 24 (Präzession), 41 (Schiefe der Ekliptik, Obliquität) und 99 bzw. 405 Tausend [astronomische] Jahre (Exzentrizität). Aktuelle astronomische Modelle (bis 250 Millionen [astronomische] Jahre: La2004, La2010 (LASKAR et al. 2004, 2011)).

Vorgehensweise

Eichung (vermeintlich) zyklischer Sedimentfolgen (Zyklusstratigraphie, Abb. 1) auf eine astronomische Skala (das Ziel). Durch abschnittsweise (physische) Befüllung durch Gesteinskörper (→ 2-02) wird die Astronomische Zeitskala (astronomical time scale, ATS) „aufgeladen“; die stratigraphische Abdeckung (Käno- und Mesozoikum) beträgt aktuell mehr als 80 % (HINNOV & HILGEN 2012). Mögliche einzelne Schritte:

- Datensammlung und Generierung von Wertereihen (stratigraphische, geophysikalische, geochemische, biologische Reihenmessungen; z. T. als Proxydaten bezeichnet); Variablen: z. B. Schichtdicken, $\delta^{18}\text{O}$ (Sauerstoffisotopenverhältnis), MS (Magnetische Suszeptibilität).
- Prüfung der Wertereihen auf Zyklizität (mittels Zeitreihenanalysen).
- Vergleich der Perioden und/oder Verhältniszahlen (Sedimentfolge bzw. sedimentäre Parameter mit theoretischen Orbital-Perioden).
- Zuweisung sedimentärer Zyklen zu Orbitalzyklen.
- Tuning sedimentärer Zyklen auf Orbitalzyklen.



Abb. 1 Karbonatische Wechselfolge, Steilküste Eraclea Minoa (Sizilien). Trubi-Formation (Pliozän); die Sedimentfolge wird zyklusstratigraphisch interpretiert (LOURENS et al. 1996). Foto: Hein56didden (Wikimedia Commons; CC BY-SA 4.0).

Basisannahme(n)

1. Das Vorliegen eines einfachen linearen Systems für die geologische Vergangenheit: „orbitaler Input → klimatischer Output“ bzw. „Insolation → Klima → sedimentäre Überlieferung“.
 - Quasi-periodische Oszillationen der Sonne/Erde-Position haben in der Erdgeschichte signifikante Variationen des Klimas verursacht.
 - Diese astronomisch erzwungenen klimatischen Variationen wiederum bewirkten eine klimatisch-sensitive Sedimentation, die sich in der (versteinerten) zyklisch-stratigraphischen Überlieferung zeigt (Zyklusstratigraphie).
2. Validität der radiometrisch geeichten Geologischen Zeitskala (Gleichsetzung radiometrischer Alter mit Realalter).

Historie

ADHÉMAR (1842), CROLL (1867), KÖPPEN & WEGENER (1924), MILANKOVITCH (1941), HAYS et al. (1976); Einführung von „Zyklusstratigraphie und

Astrochronologie“ mit *A Geological Timescale 2004* (GRADSTEIN et al. 2004).

Anwendung

Geologie, Paläoklimatologie.

Bekannte Einschränkungen/Probleme

Unsicherheit des astronomischen Modells; fragmentarische Sedimentation.

Eichung

Für jeden Einzelfall radiometrische Verankerung (durch Zuweisung).

Altersbestimmungsverfahren

Anspruch: absolut (mit Einschränkungen) und unabhängig; oder nur zur Feinabstimmung.

Gültigkeit (der Ergebnisse)

Die Milankovitch-Theorie ist nicht bewiesen. Ein Nachweis darüber, dass die stratigraphische Überlieferung durch eine lang-periodische Orbitalsteuerung (Milankovitch-Zyklen) beeinflusst wurde, ist bisher nicht erbracht worden. Die methodischen Zuweisungen basieren auf eine zufällige bzw. zwangsläufige Übereinstimmung von Milankovitch-Band-Periodizität (im Rahmen der radiometrischen Zeitskalierung) und bisher nicht verifizierten A-priori-Annahmen (s. Basisannahmen; zu 2. → 4-01).

Die astrochronologische Methode ist eine scheinbare Altersbestimmungsmethode. Die durch die Methode zielgerichtete, erwirkte Befüllung und Belebung dieser theoretischen astronomischen Zeitskala ist virtueller Natur. Im Grunde genommen erfolgt lediglich eine Segmentierung der radiometrisch begründeten Skala in Einheiten von bspw. 21, 41 oder 405 Tausend radiometrischen Jahren.

Die Astronomische Zeitskala (ATS) – auf Basis der astrochronologischen Methode – ist eine fiktive Zeitskala. Sie kann allenfalls als uneigenständiges Derivat der Geologischen Zeitskala (GTS) betrachtet werden. Demzufolge ist die Astronomische Zeitskala keine unabhängige und absolute Zeitskala neben der Geologischen Zeitskala; sie kann die radiometrisch begründete Geologische Zeitskala nicht verifizieren (bestätigen).

Zu allen genannten Punkten siehe KOTULLA (2015).

Literatur

ADHÉMAR J (1842) *Révolution des Mers: Déluges Périodiques*. Publication privée, Paris.

CROLL J (1867) On the eccentricity of the Earth's orbit and its physical relations to the glacial epoch. *Philosophical Magazine* 33, 119-131.

GRADSTEIN FM, OGG JG & SMITH AG (Eds.) (2004) *A Geologic Time Scale 2004*. Cambridge.

HAYS JD, IMBRIE J & SHACKLETON NJ (1976). Variations in the Earth's Orbit: Pacemaker of the Ice Ages. *Science* 194, 1121-1132.

HINNOV LA & HILGEN FJ (2012) Cyclostratigraphy and Astrochronology. In: GRADSTEIN FM, OGG JG, SCHMITZ MD & OGG GM (Eds.) *The Geologic Time Scale 2012*. Volume 1, Oxford Amsterdam, 63-83.

KÖPPEN W & WEGENER A (1924) *Die Klimate der geologischen Vorzeit*. Berlin.

KOTULLA M (2015) Sedimentfolgen und ihre Interpretation: Zyklusstratigraphie und das Milankovitch-Zyklen-Syndrom. W+W Special Paper G-15-1, Baidersbronn.

https://www.wort-und-wissen.org/wp-content/uploads/g-15-1_zyklusstratigraphie_und_milankovitch-zyklen.pdf

LASKAR J, ROBUTEL P, JOUTEL J, GASTINEAU M, CORREIA ACM & LEVRAND B (2004) A numerical solution for the insolation quantities of the Earth. *Astronomy and Astrophysics* 428, 261-285.

LASKAR J, FIENGA A, GASTINEAU M & MANCHE H (2011) La2010: A new orbital solution for the long term motion of the Earth. *Astronomy and Astrophysics* 532, doi: 10.1051/0004-6361/201116836.

LOURENS LJ, ANTONARAKOU A, HILGEN FJ, VAN HOOFF AAM, VERGNAUD-GRAZZINI C & ZACHARIASSE W (1996) Evaluation of the Plio-Pleistocene astronomical timescale. *Paleoceanography* 11, 391-413.

MILANKOVITCH M (1941) *Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem*. Ed. Spec. Acad. Royale Serbe, Belgrad.

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

Zur Ergänzung → 2-01, 2-03, 4-03, 4-09, 4-10, 4-21, 4-22.

A-01 Chronologie der Loseblatt-Lieferungen

Lieferung	Datum	Ergänzungen; Änderungen	
2. Ergänzungs-lieferung	10/2020	▪ Neues Layout. ▪ Neue Internetadresse: www.wort-und-wissen.org ▪ Neue Blätter; Einbeziehung von Studien der Reihe „W+W Special Paper“. ▪ Bestehende Blätter aktualisiert bzw. ergänzt (u. a. Berücksichtigung von Kritiken).	
1. Ergänzungs-lieferung	02/2014	▪ Neue Blätter. ▪ Berücksichtigung von Kritiken. ▪ Änderung der Bezeichnung Faktenblatt in Übersichtsblatt.	
1. Lieferung	10/2013		