

Erdgeschichte: Die Erfindung der Zeit

Foto: Adobe Stock

Im 19. Jahrhundert vollzog sich „eine der größten Transformationen in der Geschichte menschlichen Denkens“ (TOULMIN). Die Zeitskala von Kosmos, Erde und Leben erfuhr eine enorme Ausdehnung, von einigen Tausend Jahren zu Hunderten von Millionen Jahren. Die Protagonisten dieser „intellektuellen Revolution“ – von der Idee bis zur Etablierung der geologischen Zeit – waren James HUTTON, Charles LYELL und Charles DARWIN. Im 20. Jahrhundert ist das Zeitproblem in der Geologie, die konkrete Bestimmung von Altern, schließlich gelöst worden: Die mit radiometrischen Alterswerten geeichte stratigraphische Tabelle, meistens dargestellt als geologische Zeitskala, ist seitdem als eine Grundlage der Naturwissenschaft akzeptiert. Zur Erfindung der Zeit wird hier eine Zwischenbilanz gewagt.

Michael Kotulla

Einleitung

Die „Erfindung der geologischen Zeit“¹ vollzog sich nach dem Historiker Joe D. BURCHFIELD (1998) in mehreren Schritten:²

- Das Erkennen einer Abfolge vergangener Ereignisse in der Gesteinsüberlieferung.
- Die Akzeptanz eines Erdalters, das signifikant höher ist als die historische Überlieferung der Menschheit.
- Die Entwicklung eines historischen Sinns von der Vergangenheit der Erde durch die Konstruktion einer heuristischen* „geologischen Zeitskala“.³

– Die Schaffung quantitativer Methoden, die Dauer der „geologischen Zeitskala“ zu bemessen.

– Die Akzeptanz einer quantitativ bestimmten Grenze für das Alter der Erde.

Während Schritt eins bereits im 17. Jahrhundert mit den Arbeiten von STENO und HOOKE einsetzte⁴, seien die Schritte drei und vier – mit einer besonders hohen Aktivität in den letzten Dekaden – noch im Gange.

Im Rückblick stellt sich so die „Erfindung der geologischen Zeit“ wie eine zwangsläufige historische Entwicklung dar. Einer Kernfrage allerdings wird nur selten nachgegangen: Wie

Hinweis zu den Anmerkungen: Die Anmerkungen enthalten umfangreiche Zitate und weitere Informationen; sie sind deshalb – wie die Z-Verweise – als Zusatzmaterial zum Artikel ausgelagert und unter www.si-journal.de/jg28/heft2/erfindung-der-zeit.pdf abruf- bzw. herunterladbar.

Mit einem Stern* versehene Begriffe werden im Glossar erklärt.

Kompakt

Geologische Zeit ist ein weithin anerkanntes Konzept, demzufolge das heutige Erscheinungsbild der Erde als Ergebnis einer *langen* Entwicklung betrachtet wird. Es wird durch radiometrische Alterswerte unterstützt, die Ergebnisse von Millionen und Hunderten von Millionen [radiometrischen] Jahren liefern.

Aber dieses enorme Zeitkonto, über welches die historische Geologie verfügt, ist scheinbar nicht gedeckt. Die radiometrische Methode ist ohne belastbare Verifizierung etabliert worden. Und konkrete Beispiele zeigen, dass eine geschätzte Zeitdauer, die auf eine geologisch-sedimentologische Indikation gründet, in einem krassen Missverhältnis zu der unmittelbar aus den radiometrischen Altersbestimmungen abgeleiteten Dauer bzw. Bildungszeit einer Sedimentfolge steht.

können wir wissen, dass „geologische Zeit“ wirkliche, reale Zeit ist? Und wie können wir wissen, dass eine Altersbestimmungsmethode – hier die radiometrische Methode – gültige (valide) Ergebnisse liefert? Der Artikel stellt zunächst die Protagonisten der Idee der geologischen Zeit und ihre Zeitentwürfe kurz vor und behandelt im Diskussionsteil in der Hauptsache den Fragenkomplex der Verifizierung.

Abb. 1 Winkeldiskordanz am Siccar Point östlich Edinburgh (Schottland), auch als Hutton-Diskordanz bekannt. Steilstehende marine* silurische Grauwacken (Sandsteine) und Tonschiefer werden von flach geneigten terrestrischen* devonischen Brekzien und Sandsteinen überlagert (s. KOTULLA 2020b, Blatt 2-20). Aufgrund radiometrischer Alterswerte soll die Grenzfläche eine zeitliche Lücke von etwa 65 Millionen [radiometrischen] Jahren repräsentieren. Foto: Anne BURGESS, <https://www.geograph.org.uk/profile/139> (Wikimedia Commons, CC BY-SA 2.0).



Die Erfindung der Zeit stellt sich wie eine zwangsläufige historische Entwicklung dar.

den Sedimentgesteine (oberer Komplex). 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 Diese seine „Abfolge von Welten“ ist wie ein fortwährender Zyklus und immerwährender Gesteinskreislauf. Schließlich endet HUTTONS Werk mit den Worten: „(...) wir finden keine Spur eines Anfangs, keine Aussicht auf ein Ende“ (1788).⁷

Nur wenige Jahre nach BUFFON (1778), der das Alter der Erde aufgrund von Experimenten mit Eisenkugeln auf 75.000 Jahre geschätzt hatte⁸, entwarf HUTTON vergangene Zeiträume unermesslicher Dauer.

Erdgeschichte: Entwurf der Zeit

James HUTTON – unermessliche Zeiträume

1785 präsentierte der Arzt und Geologe James HUTTON (1726–1797) eine Zusammenfassung seiner Dissertation über *Die Theorie der Erde* (1788, 1795). HUTTON betrachtete die Schichtgesteine im Lichte seiner eigenen Naturbeobachtungen einer extrem langsamen Abtragung im schottischen Hügelland.⁵ Sein Augenmerk galt insbesondere diskordanten* Gesteinskomplexen (Abb. 1 und Abb. Z-1): Seiner Interpretation zufolge lieferten die älteren (herausgehobenen und steilgestellten) Sedimentgesteine (unterer Komplex), ehemals Meeresablagerungen, das Material für die jüngeren, überlagern-

Charles LYELL – 12 x 20 Millionen Jahre

Das Programm des Juristen und Geologen Charles LYELL (1797–1875) liest sich bereits im Untertitel seines erstmals 1830–1833 erschienenen Hauptwerkes *Principles of Geology: Ein Versuch, die früheren Veränderungen der Oberfläche der Erde durch heute wirkende Ursachen zu erklären*.

LYELL ließ für die Deutung der Vergangenheit als einzige Erfahrungsquelle nur beobachtbare gegenwärtige geologische Vorgänge zu.⁹ Methodisch handelt es sich um verschiedene Ausprägungen von Uniformität (Gleichförmigkeit). WHEWELL (1832, 126) bezeichnete das Programm und seine zugrunde liegende Methodologie als Uniformitarismus und stellte diesen als Gegenentwurf zum Katastrophismus heraus.¹⁰ Der sintflutartige Katastrophismus konnte nur dadurch zurückgewiesen werden, indem die gewaltigen Kräfte, denen die umwälzenden Veränderungen der Erdoberfläche zugeschrieben wurden, durch Zeit ersetzt wurden (BURCHFIELD 1990, 9). Mit dem regulativen Prinzip des Uniformitarismus wurde genau das erreicht: Eine immerwährende Gegenwart (minimale Kräfte), projiziert in die Vergangenheit, bedingt maximale Zeit.

LYELL propagierte, HUTTON folgend, die „Unermesslichkeit der Zeit“; „von Geologen wurden Myriaden von Zeitaltern kalkuliert“ (LYELL 1830, 73). Erst in der vorletzten, zehnten Auflage seiner populären *Principles of Geology* (1867–1868) unternahm LYELL schließlich den Versuch, die aufgespannte Unermesslichkeit vergangener Zeit zu quantifizieren. Die Kon-

struktion umfasst 12 Perioden (Zyklen) zu je 20 Millionen Jahren, also für den Abschnitt Kambrium bis heute (Phanerozoikum) 240 Millionen Jahre. Auf ersten Anschein ist es ein simplizistischer Entwurf mit einer leicht zu merken- den Formel (12×20), der mit physikalischen und biologischen Parametern operiert. Die Konzeption allerdings ist eine geschickte Integration einer damals inzwischen weitgehend anerkannten, gerichteten Evolution (vgl. DARWIN 1859, s. u.) in LYELLS uniformitaristische Prinzipienwelt: Eine stete, langsame Veränderungsrate der Organismen bis eine organische Revolution vollendet ist (= ein Zyklus) und eine neue beginnen kann; so sich fortlaufend ereignende Zyklen (eine Sonderform des Uniformitarismus).¹¹

Charles DARWIN – sein enorm großer Zeitbedarf

Der Naturforscher und Geologe Charles DARWIN (1809–1882) gründete seine Theorie der „Entstehung der Arten durch natürliche Zuchtwahl“ (1859) u. a. auf die Unermesslichkeit vergangener Zeitperioden, die LYELL in den *Principles of Geology* dargelegt hatte. DARWIN extrapolierte seine Beobachtungen der „Veränderlichkeit“ durch Domestizierung einfach in die Vergangenheit, bis er zu seinem Startpunkt gelangte: „(...) dass alle Tiere und Pflanzen von einem einzigen Prototyp abstammen“ (DARWIN 1859, 484). Die Vergangenheit war lange genug – so seine Annahme –, dass alle langsamen Veränderungen hatten stattfinden können.

Wie groß sein Zeitbedarf war, erschließt sich aus seiner Berechnung über die Erosion des Weald in Südengland (Abb. Z-2). Demnach soll die Abtragung (Denudation) der etwa 335 m mächtigen kretazischen Schichtenfolge 306.662.400 Jahre gedauert haben (DARWIN 1859, 287).¹² Diese enorm lange Zeit war nur ein kleiner Bruchteil der geologischen Zeit¹³, und zwar – wie er sich ausdrückte – eine „blo- ße Kleinigkeit“ (S. 285).

DARWIN hatte die quasi-dimensionslose geologische Zeit mit neuem 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.¹⁴

Das Zeitproblem in der Geologie und seine Lösung

THOMSON, späterer Lord Kelvin, lieferte 1862 zwei kosmologische Bestimmungen zum Alter der Erde, die bei einem Ergebnis von etwa 100



Abb. 2 Fragment eines Eisenmeteoriten, Henbury-Krater, Australien. Solch ein Fragment gehörte zu den Proben, die PATTERSON (1956, seine Tabelle 1) auswählte, um die isotopische Zusammensetzung von Blei in Troilit-Mineralen (Meteor- kies, FeS) zu bestimmen. Unter Verwendung bestimmter Annahmen ermittelte er ein Pb^{207}/Pb^{206} -Alter von $4,55 \pm 0,07$ Milliarden [radiometrischen] Jahren. Gewicht: 1,7 kg, Maßstab: Kubus mit Kantenlänge von 1 cm. Foto: Meteorite Recon (Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0).

Millionen Jahren übereinstimmen.¹⁵ Der Alterswert erreichte aufgrund von THOMSONS wissenschaftlicher Autorität eine hohe Akzeptanz. Insbesondere setzte er DARWIN (1859) und den Uniformitaristen eine Grenze. Die geologische Altersbestimmung – die Bestimmung der geologischen Zeit über die Mächtigkeit (Dicke) der Schichtenfolgen –, die zwischen 1860 und 1910 sehr an Bedeutung gewann, orientierte sich häufig an diesen weitgehend akzeptierten maximalen 100 Millionen Jahren (Tab. Z-1).

Nur wenige Jahre nach der Entdeckung der Radioaktivität sah HOLMES (1913) in der „radioaktiven Uhr“ eine Lösung für das Zeitproblem in der Geologie; er publizierte eine erste radiometrisch geeichte geologische Zeitskala. Die 1926 vom US-amerikanischen Nationalen Forschungsrat eingesetzte Unterkommission „Das Alter der Erde“ verhalf der Methode schließlich zum Durchbruch. Nachdem zahlreiche Methoden zur Bestimmung der geologischen Zeit evaluiert worden waren, galt das „Problem des Alters der Erde“ mit der radiometrischen Methode als gelöst. KNOPF (1931, 3) fasst zusammen: „In Kürze, das radioaktive Zeugnis zeigt an, dass die post-kambrische Zeit, d. h. vom Ordovizium aufwärts, 450 Millionen Jahre umfasst (...) und dass das Alter der Erde mindestens 2.000 Millionen Jahre beträgt (...).“

Diese Entscheidung hatte quasi amtlichen Charakter. Gegenüber den bislang „generell akzeptierten“ max. 100 Millionen Jahren (SCHUCHERT 1931, Tab. Z-1) war dies eine Ausdehnung der geologischen Zeit um das 20-Fache.¹⁶

Im Laufe der Zeit wurde die geologische Zeitskala als eine Grundlage der Naturwissenschaft akzeptiert. PATTERSON (1956) veröffentlichte schließlich ein „Alter der Erde“ von $4,55 \pm 0,07$ Milliarden radiometrischen Jahren. Dieses Alter war an Meteoriten-Bruchstücken ermittelt und auf die Erde übertragen worden (Abb. 2). Die Geologische Zeitskala 2020 (GTS2020) weist aktuell ein T_0 -Datum von 4,567 Milliarden radiometrischen Jahren aus (GRADSTEIN et al. 2020), dem mutmaßlichen Beginn einer Staub- und Gasakkumulation als Teil des Sonnensystems.



Abb. 3 Winkeldiskordanz im Grand Canyon (Lokalität Venus-Tempel), Arizona, USA. An der Grenzfläche der „Great Unconformity“ („Großen Unkonformität“) wird hier der schräg einfallende Schichtenkomplex der proterozoischen Grand-Canyon-Supergruppe von flach liegenden kambrischen Schichten der Tonto-Gruppe überlagert. Aufgrund radiometrischer Alterswerte soll die Grenzfläche eine zeitliche Lücke von etwa 220 Millionen [radiometrischen] Jahren repräsentieren. Mehrere Winkeldiskordanzen übereinander – im Sinne von HUTTON – kommen nicht vor: Die horizontale Schichtenfolge des Grand Canyon (Kambrium bis Perm) setzt sich in der Grand Staircase fort (Trias bis Paläogen). In der Schichtenfolge des Grand Canyon liegen aber zahlreiche Diskordanzen vor; in Summe sollen etwa 75 % der Gesteinsüberlieferung fehlen.³² Foto: James St. JOHN (Wikimedia Commons, CC BY 2.0).

Status Quo

Die „geologische Zeit“ ist – häufig verdichtet in erdgeschichtlichen Tabellen (geologische Zeitskala u. v. m.; Abb. Z-3) – seit Jahrzehnten weltweit über die Ebenen des staatlichen Verwaltungs- (z. B. geologischen Dienste) und Bildungswesens präsent und hat das gesellschaftliche Leben durchdrungen.

In der Einführung zur *Geologischen Zeitskala 2020* heißt es zu Beginn (GRADSTEIN 2020, 3): „Die geologische Zeitskala (GTS) ist das Rahmenwerk für die Entschlüsselung der langen und komplexen Geschichte unseres Planeten (...).“ Demnach ist die geologische Zeitskala *einzig* das Rahmenwerk.

Diskussion

Zu HUTTON, LYELL und DARWIN

Im Phänomen der Winkeldiskordanz – mit Bezug auf HUTTONS Beobachtung und Interpretation – schlug sich der (damals) mutmaßlich längste, denkbare geologische Prozess konzentriert an einem Punkt nieder: Abtragung, Ablagerung, (Verfestigung), Heraushebung (und Verstellung); Abtragung, Ablagerung, (Verfestigung), Heraushebung; Abtragung (aktuell) (Beispiel Siccar Point, Abb. 1). Aber „eine Diskordanz oder ein anderes Merkmal der Gesteine gibt uns an sich“, so AUBRY (2009, 93), „*a priori* keinen intuitiven Sinn für die Zeitdauer“. Auch gibt es keinen Ort, an welchem mehrere

Winkeldiskordanzen in einer Schichtenfolge – im Sinne von HUTTON – zu beobachten wären (Abb. 3).

Der LYELL'sche Uniformitarismus ist theoriegeladen und mit zahlreichen Feldbeobachtungen überhaupt nicht verträglich (z. B. AGER 1993). DARWIN führt zwar Argumente für eine „schier unermesslich vergangene Zeit“ an, beruft sich aber hauptsächlich auf LYELL. Zu einer Diskussion der Langzeit-Konstruktionen von LYELL und DARWIN, die auf hypothetischen, nicht verifizierbaren Annahmen basieren, siehe KOTULLA (2020b).¹⁷

Fazit: Es hat den Anschein, dass für die Protagonisten der „geologischen Zeit“ insgesamt gilt, was AGER (1993, 70) über die Uniformitaristen schreibt: 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.“

Die Natur der sedimentären Überlieferung

Eine sedimentologische* Erforschung der Schichtgesteine war im 19. Jahrhundert noch nicht gegeben; über die Prozesse und Bedingungen des Sedimenttransports und der Sedimentakkumulation war wenig bekannt. Wie sehr die Erforschung hinter ungeprüften Vorstellungen zurücklag bzw. -liegt, zeigt das Beispiel feinkörniger Sediment(gestein)e. Erst zu Beginn des 21. Jahrhunderts sind mit Wasserkanal-Experimenten weitestgehend natürliche Bedingungen nachgestellt worden, die zeigen, dass feinkörnige siliciklastische Sedimente (Ton, Silt) und feinkörnige Karbonatsedimente unter höher-energetischen Bedingungen entstehen können. Dabei werden Aggregate (Flocken) durch schnell bewegende Strömungen – wie Sand – als Bodenfracht transportiert und abgelagert. Bisher war der Idee gefolgt worden, dass feinkörnige Sedimentgesteine im Wesentlichen lange Zeit in Anspruch nehmende (Stillwasser-) Ablagerungen repräsentieren. Konsequenterweise spricht SCHIEBER (2011) von einem Paradigmenwechsel.¹⁸

AGER (1993) vertritt die Doktrin, dass die stratigraphische Überlieferung an jedem Ort „eine lange Lücke mit gelegentlicher Sedimentation“ repräsentiert, wobei die Sedimentation häufig sehr rasch erfolgt sei (Abb. 4).¹⁹ Bereits BARRELL (1917) hatte eine Konzeption vorgestellt, die besagte, dass in einer Schichtenfolge zahlreiche kleinere Sedimentationsunterbrechungen vorliegen (sog. Diasteme), die in Summe genauso viel Zeit repräsentieren würden wie das Sediment selbst. Zur Dauer dieser „Zeitlücken“ nannte er eine Spanne, die von



Abb. 4 Sedimentgesteine des Lias (Unterjura) liegen diskordant unterkarbonischen Kalksteinen auf, östlich Ogmore-by-Sea (Wales). AGER (1986) interpretiert den konglomeratischen untersten Teil der Lias-Abfolge (sog. „Sutton-Stone“) als Massenstromablagerung, als eine rasche Sediment-Schüttung an einem „Dienstagnachmittag“. ³³ Foto: M. KOTULLA, 2016.

saisonalen Sedimentationsstillständen bis zu solchen reichten, die sich geologischen Epochen annäherten. ²⁰ Auch SADLER (1981) macht eine Unvollständigkeit (Lückenhaftigkeit) der sedimentären Überlieferung geltend. MIALL (2015) versucht in seinem Hierarchie-Konzept diese „Lückenhaftigkeit“ abstrakt zu verarbeiten. Seine Klassifikation unterscheidet beobachtete und kalkulierte Sedimentationsraten über 12 Zeitskalen-Größenordnungen von 10^{-6} bis 10^6 – 10^7 [tw. radiometrischen] Jahren. Sedimentationsraten werden von Hierarchie-Stufe zu Hierarchie-Stufe, von Zeit-Perspektive zu Zeit-Perspektive, nivelliert – und letztlich auf die Zeitperspektive der geologischen Zeit eingephasst. In allen Publikationen ist festzustellen, dass bei diesen Überlegungen und Vorstellungen im Rahmen „absolut gesetzter“ radiometrischer Alterswerte und Zeitskalen operiert wird. ²¹

Fazit: Mit Blick auf die konkrete, physische Sedimentgesteinsfolge ist also in jedem Fall eine Diskussion möglicher Sedimentationsunterbrechungen notwendig (s. u. und Kasten 2).

Etablierung der radiometrischen Methode – ohne belastbare Verifizierung?

Im Ergebnisbericht der Unterkommission für „Das Alter der Erde“ (s. o.) hatte KNOPF (1931) zwei Beispiele angeführt, wo radiometrische Alter und ermittelte Bildungszeiten von Sedimentfolgen über eine Abzählung von Warven (Jahresschichten) in der Größenordnung übereinstimmten. Allerdings ist in beiden Fällen nicht der Nachweis erbracht worden, dass es sich tatsächlich um Warven handelt. ²²

Die radiometrische Methode ist ohne belastbare Verifizierung etabliert worden.

In den nachfolgenden Jahrzehnten sind solche „Übereinstimmungen“ immer wieder präsentiert worden. ²³ Auch wird z. B. angeführt, dass die Datierung des Ausbruchs des Vesuv (79 n. Chr., Abb. 5) ein übereinstimmendes Ergebnis lieferte: Ein $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -Alter von 1925 ± 94 Jahren vor heute im Vergleich zu kalendarisch 1918 Jahren vor heute (jeweils bezogen auf 1997). Dieses $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -Alter aber war zuvor korrigiert worden, nämlich um einen überschüssigen Argon-Anteil, der sich aus dem bekannten (wirklichen) Alter der Probe ermitteln ließ. ²⁴

HOLMES (1931), der Begründer der geologischen Zeitskala, stellte schon damals heraus, dass die radiometrische Methode „die *einzige* Evi-

Abb. 5 Gartenansicht der ausgegrabenen Villa von Oplontis, heutiges Torre Annunziata, westlich des antiken Pompeji. Hier ist eine Bims-Probe entnommen worden zur radiometrischen Datierung der Vesuv-Eruption von 79 n. Chr. mit der Argon-Argon-Methode (RENNE et al. 1997). Mitte und vorne rechts sind die meterhohen Tephra-Ablagerungen der Eruption noch erhalten. Foto: Miguel HERMOSO CUESTA, 2013 (Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0).



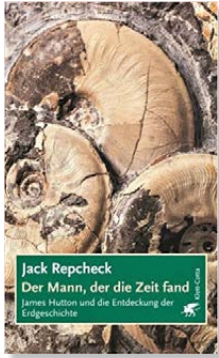


Abb. 6 *Der Mann, der die Zeit fand. James Hutton und die Entdeckung der Erdgeschichte* (Buchcover). REP-CHECK (2007) zufolge ist die (geologische) Zeit von HUTTON entdeckt worden.

denz für lange Perioden“ sei (kursiv durch Verfasser). Das heißt, dass die radiometrische Altersbestimmungsmethode durch keine andere Methode verifiziert (bestätigt) werden kann bzw. bisher verifiziert werden konnte.²⁵ Das bedeutet, dass die geologische Zeitskala eine nicht verifizierte Zeitskala ist.²⁶ Es bedeutet des Weiteren, dass nicht bekannt ist, in welchem Verhältnis die radiometrischen Alter zum realen Alter stehen.

Fazit: Die radiometrische Methode ist ohne belastbare Verifizierung etabliert worden. Die Größenordnung der radiometrischen Alterswerte (implizit: Isotopenjahre = Realjahre) hat zu den generell akzeptierten Vorstellungen einer geologischen Zeit (s. o. und Tab. Z-1) gepasst.

1 | Radiometrische Methode und geologische Zeitskala

Bei der radiometrischen Methode wird der Versuch unternommen, den radioaktiven Zerfall ausgewählter Radioisotope zur Altersbestimmung geologischer Objekte zu nutzen; z. B. die Bestimmung der verflossenen Zeit seit der Bildung eines Minerals. Der Anwendung liegen zahlreiche Annahmen zugrunde (vgl. FAURE & MENSING 2005, KOTULLA 2020b). Zur Erstellung des Altersmodells für die Geologische Zeitskala 2020 sind 81 % U-Pb- und 18 % Ar-Ar-Alterswerte (im Vergleich 2004: 54 % und 45 %) verwendet worden (siehe SCHMITZ 2020, Appendix 2). Während die Uran-Blei-(U-Pb-) Methode ein unabhängiges Altersbestimmungsverfahren ist, ist die Argon-Argon-(⁴⁰Ar/³⁹Ar-)Methode eine relative Datierungsmethode (JOURDAN et al. 2014).

Die Alter werden auf einen Mineral-Standard „bekannten“ Alters zurück referenziert (z. B. Fish Canyon Tuff, ca. 28 Millionen radiometrische Jahre). Für die U-Pb-Altersbestimmung ist das bevorzugte (uranhaltige) Analyse-Mineral Zirkon (ZrSiO₄). Die Zirkonkörner (Abb. 7) werden primär aus umgewandelten vulkanischen Aschenlagen (Bentoniten) gewonnen, die Sedimentgesteinsfolgen zwischengeschaltet sind (KOTULLA 2020a). Analytisch werden die maßgeblichen Isotopenmengen und Isotopenverhältnisse ermittelt und ausgewertet. Mit Kenntnis der mittleren (aktuellen) Zerfallsrate bezogen auf die jeweilige Ausgangsmenge (Zerfallskonstante, Halbwertszeit) erfolgt die Berechnung des Isotopenalters.

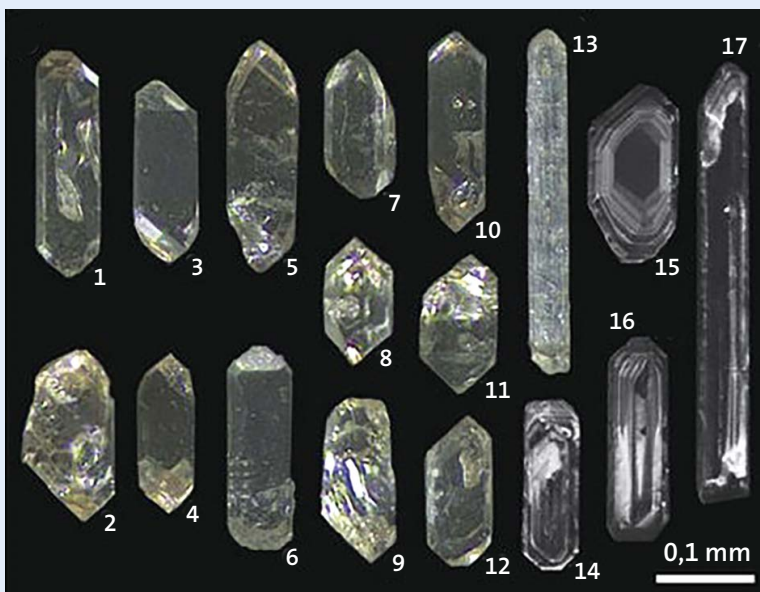


Abb. 7 Zirkonkörner der „Likhall“-Bank (Mittelordovizium), Steinbruch Thorsberg, Kinnekulle (Schweden). Typische Körner, die für U-Pb-Altersbestimmungen verwendet werden. Körner 1–13, Auflichtaufnahmen; Körner 14–17, Kathodoluminiszenzaufnahmen. Abbildung: Wiedergabe von Fig. 2b aus LINDSKOG et al. (2017) in *Nature Communications* (CC BY-NC 4.0).

Verifizierung durch geologisch-sedimentologische Interpretation?

Der Verfasser zeigt anhand einiger Fallbeispiele auf, dass die Möglichkeit besteht, dass radiometrische Alter durch eine geologisch-sedimentologische Interpretation überprüft und ggf. verifiziert werden können (KOTULLA 2020a).

Das Beispiel „Perm/Trias-Grenzschichten“ ist in Kasten 2 dargelegt. Demnach steht die Zeitdauer, die auf eine geologisch-sedimentologische Indikation gründet, in einem krassen Missverhältnis zu der unmittelbar aus den radiometrischen Altersbestimmungen abgeleiteten und ausgewiesenen Dauer bzw. Bildungszeit der Sedimentfolge: Circa 7 Tage versus den „≤ 100–300 Tausend Jahren“, die ja von SHEN et al. (2011) als Real-Jahre verstanden werden wollen.

Zu diesem und weiteren konkreten Vergleichen ausgewählter paläozoischer Sediment(gesteins)folgen ist festzuhalten, dass die radiometrisch begründete Bildungsdauer häufig um 6–7 Größenordnungen höher ist als die geologisch-sedimentologisch begründete. Voraussetzung für diese Diskrepanz ist u. a., dass die U-Pb-Zirkonalter „absolute Zeit“ (SCHMITZ 2012a), d. h. Real-Zeit in Kalenderjahren, repräsentieren und die geologisch-sedimentologische Interpretation das damalige reelle Sedimentationsgeschehen annähernd zutreffend erfasst. Für diese Fälle wird die radiometrisch begründete Bildungsdauer und auch das absolute Alter der Ereignisse in einer ausgewiesenen Spanne von etwa 541 bis 252 Millionen Jahre vor heute in Frage gestellt (KOTULLA 2020a).

Vorläufige Bilanz

Ist die Zeit von James HUTTON „gefunden“ worden, wie es in einem Buchtitel (Abb. 6) ausgedrückt wird? Ist es eine Entdeckung von bereits Vorhandenem, das aber bislang nicht bekannt war? Oder handelt es sich bei der „geologischen Zeit“ um eine Erfindung, wie es BURCHFIELD (1998) auffasst²⁷, eine schöpferische Leistung einer Forschergemeinschaft, eine Problemlösung, die sich über 150 Jahre erstreckte?

„Geologische Zeit“ ist eine Idee, ein Konzept, und so wird es auch bleiben, solange die mutmaßlichen langen Zeiträume nicht validiert werden können.^{28,29}

Die Idee der „geologischen Zeit“ drückt sich auf andere Weise in einer Aussage von LOTZE (1968, 7) aus, die er zeitlich lange nach der Etablierung der radiometrisch geeichten geologischen Zeitskala machte: „Sie [Die Geologie, MK] geht davon aus, dass das heutige Erschei-

2 | U-Pb-Altersbestimmungen an der Perm/Trias-Grenze: Verifizierung durch geologisch-sedimentologische Interpretation?

Überblick und radiometrische Altersbestimmung

Die Grenze der geologischen Systeme Perm und Trias ist formal in einer marinen Sedimentgesteinsfolge bei Meishan (Südchina) definiert (Abb. 8). Die Grenzschiechten (Tab. 1) sollen das sogenannte „end-permische Massenaussterben“ überliefern. SHEN et al. (2011) haben den Versuch unternommen, diesem mutmaßlichen Ereignis sowohl ein präzises numerisches Alter als auch eine präzise Zeitdauer zuzuweisen. Sie nutzen dabei den Umstand, dass im definierten Grenzbereich über eine kurze Profildistanz mehrere umgewandelte vulkanische Aschenlagen (Bentonite) eingeschaltet sind; ihre magmatogenen Zirkone verwenden sie zum Zwecke einer Altersbestimmung. Demzufolge wird das „Maximum des Massen-Extinktionsintervalls“ (maximum mass extinction interval) durch die Schichten 25-28 repräsentiert (Abb. 8). Es wird zeitlich eingegrenzt durch ein „Start-Datum“ von $252,28 \pm 0,08$ Millionen [radiometrischen] Jahren vor heute (Schicht 25) und ein „End-Datum“ von $252,10 \pm 0,06$ Millionen [radiometrischen] Jahren vor heute (Schicht 28). SHEN et al. (2011) zufolge soll das „Extinktionsintervall“

weniger als 200 Tausend [radiometrische] Jahre gedauert haben; die Differenz der Alterswerte, Δt , beträgt 180 ± 80 Tausend [radiometrische] Jahre.³¹

Zur Bildungszeit der Sedimente: geologisch-sedimentologische Interpretation

Zum Verständnis der Bildungszeit der Sedimente sind lithologische, sedimentologische sowie stratigraphische Untersuchungen bis in den Mikrobereich von besonderem Interesse. Der Verfasser hat eine Schicht-für-Schicht-Betrachtung dargelegt, diskutiert und in Teilen eine alternative Interpretation vorgestellt (KOTULLA 2020a, 199ff); hier erfolgt lediglich eine Zusammenfassung der Interpretation. Sie orientiert sich an geologisch-sedimentologischen Indizien einer wahrscheinlichen Real-Sedimentation.

Die Sedimentfolge von Schicht 25 bis Schicht 28 wird als eine Aufeinanderfolge von Ereignislagen interpretiert (Tab. 1, Abb. 8): A) Die Tone bzw. Tonsteine (Bentonite) – Schichten 25 und 26 – als (umgewandelte) vulkanische Aschen-

möglicherweise mit zwei Schüttungspulsen. C) Der Ton bzw. Tonstein (Bentonit) – Schicht 28 – als (umgewandelter) vulkanischer Aschenniederschlag. D) Alle Schichtglieder (hier Schichten 25/26 zusammen betrachtet) weisen scharfe Liegend- und Hangendgrenzen auf. Bioturbation ist in Schicht 27 teilweise verbreitet, sie durchdringt aber nicht die Liegendschicht 26 oder die Hangendschicht 28. Dieser Umstand lässt auf eine rasche Überdeckung von Schicht 26 und eine rasche Überdeckung von Schicht 27 durch Schicht 28 und 29 schließen. E) Die Bildung der Ereignislagen kann Stunden (vulkanische Eruptionspulse) bzw. Minuten bis Stunden (karbonatische Schüttungspulse) gedauert haben. Die Sedimentfolge von Schicht 25 bis Schicht 28 könnte – auf Grundlage dieser alternativen Interpretation einer raschen Aufeinanderfolge der Sedimentationsereignisse – eine Zeitdauer von wenigen Tagen repräsentieren.

Vergleich und Fazit

Die Zeitdauer, die auf eine geologisch-sedimentologische Indikation gründet, steht in einem krassen Missverhältnis zu der unmittelbar aus den radiometrischen Altersbestimmungen abgeleiteten und ausgewiesenen Dauer bzw. Bildungszeit der Sedimentfolge: Wenige Tage (z. B. 7) versus den „ $\leq 100-300$ Tausend Jahren“, die ja von SHEN et al. (2011) als Real-Jahre verstanden werden wollen. Der Dimensionsunterschied der Zeitskalen beträgt etwa 7 Größenordnungen (etwa 1 zu 10.000.000; 7 Tage zu 200.000 Jahre oder ca. 73.000.000 Tage).

Es könnte argumentiert werden, dass „nur“ 0,00001 % der Zeit durch Sediment repräsentiert ist, die Zeit also in den Schichtfugen liegen muss. Diese „leere“, nicht durch Sediment repräsentierte Zeit wäre kompensatorischer Natur; sie ist nicht nachweislich real. Es sei hier nochmals erwähnt, dass für eine rasche Aufeinanderfolge der Sedimentationsereignisse – ohne größere Sedimentationsunterbrechungen – die Erhaltung der vulkanischen Aschenlagen sowie die Nichtvermischung der Schichteinheiten durch Bioturbation sprechen.

Im Ergebnis werden die radiometrischen Alterswerte durch die geologisch-sedimentologische Interpretation nicht verifiziert; vielmehr stellt die geologisch-sedimentologische Interpretation die radiometrischen Alterswerte in Frage. Demzufolge wäre hier die Gleichsetzung von radiometrischem Jahr und Kalenderjahr inkorrekt.

In KOTULLA (2020a) führt der Verfasser weitere paläozoische Sedimentfolgen an mit Missverhältnissen der Bildungszeiten um 6-7 Größenordnungen.

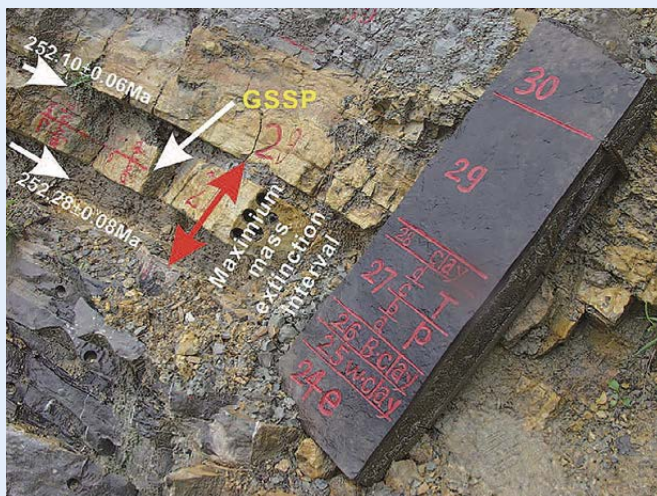


Abb. 8 Perm/Trias-Grenze, Meishan (China). Gekennzeichnet sind die Schichten 24e bis 30. Die definierte Perm/Trias-Grenze befindet sich mittig in Schicht 27 (Referenzpunkt, „GSSP“).
Legende: Siehe Textteil und Tab. 1. Abbildung: Wiedergabe von Fig. 4A aus SHEN (2012), mit freundlicher Genehmigung des *Journal of Geography* (Chigaku Zasshi).

Schicht Nr.	Lithologie	Dicke [cm]	Beschreibung (kurz) und vorherrschende Interpretation
29	Kalkstein	26	Mittelbankig, grau, tonig-siltig, fossilführend.
28	Ton(stein); „clay“	4	Gräulich-gelber Illit-Montmorillonit-Ton, fossilführend. Umgewandelte vulkanische Aschenlage (Bentonit) mit magmatogenen Zirkonen.
27	Kalkstein	16	Feinkörnig bis dicht, fossilführend, teilweise Bioturbation; zur Mikrofossil-Beprobung Aufteilung in vier gleichdicke Partitionen a bis d (je 4 cm).
26	Ton(stein); „B(lack) clay“	6	„Schwarzer Ton“; dunkelgrauer Montmorillonit-Illit-Tonstein, teilweise kalkig und siltig; fossilführend. Mit magmatischen Primärkomponenten. Als „sedimentär“ betrachtet (Antransport und Ablagerung).
25	Ton(stein); „W(hite) clay“	4	„Weißer Ton“; lichter, blaugrauer Illit-Montmorillonit-Tonstein; fossilführend. Umgewandelte vulkanische Aschenlage (Bentonit) mit magmatogenen Zirkonen.
24a-e	Kalkstein	81	Mittelbankig, grau, feinkörnig bis dicht, mit sehr dünnen Tonstein-Zwischenlagen; fossilführend. Gegliedert in fünf Untereinheiten 24a bis 24e (oberste).

Tab. 1 Beschreibung der Perm/Trias-Grenzschiechten, Lokalität Meishan (China). Zusammengestellt für Profil Meishan-D (Ausschnitt) nach YIN et al. (1994) sowie weiteren Autoren.

Glossar

Diskordanz: Bei Sedimentgesteinen eine „nicht übereinstimmende“ Abfolge; z. B. das winklige Abstoßen der Schichten eines (unteren) Gesteinskörpers gegenüber den aufliegenden Schichten eines (oberen) Gesteinskörpers (= Winkeldiskordanz).

heuristisch: Die Heuristik betreffend; von „heureskin“ (gr.) für „entdecken“. Hier ein Vorgehen, bei dem das bestimmte Wissen oder das erwünschte Ergebnis durch vorläufige Annahmen gewonnen werden.

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

sedimentologisch: Die Sedimentologie betreffend; geowissenschaftliche Disziplin. Lehre von der Zusammensetzung, den Eigenschaften und der Entstehung von Sedimenten und Sedimentgesteinen.

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

nungsbild der Erde das Ergebnis einer *langen* und wechselvollen Entwicklung ist (...)“ (kursiv durch den Verfasser). LOTZE benennt die fundamentale *Annahme* der historischen Geologie. Eine *lange* Entwicklung bedeutet eine *lange* (Erd-) Geschichte und folglich eine *lange* Zeitskala.

Der Verfasser argumentiert anhand ausgewählter Beispiele, dass in diesen Fällen ausschnittsweise (punktuell) eine kurze Geschichte vorliegen könnte (KOTULLA 2020a). Für Abschnitte des Paläozoikums kann initial die Vorstellung vertreten werden – in Anlehnung an LOTZE (1968) –, dass „das heutige Erscheinungsbild der Erde“ in Teilen „das Ergebnis“ einer *kurzen* „und wechselvollen Entwicklung ist“. *Kurz* wäre ein Antagonismus zu *lang*, zur „Idee der geologischen Zeit“. *Kurz* würde der historischen Geologie eine fundamentale Grundlage entziehen.

Nicht auszuschließen ist, dass im 19. Jahrhundert überhastet ein irreführender Weg eingeschlagen wurde.

Für TOULMIN (1962–1963) ist „die Entdeckung der Zeit“ (sein Titel) „eine der größten Transformationen in der Geschichte des menschlichen Denkens“, eine „intellektuelle Revolution“.³⁰ Diese Transformation basiert möglicherweise auf unsicheren oder fragwürdigen Annahmen. Nicht auszuschließen ist, dass im 19. Jahrhundert überhastet – ohne sedimentologische und weitere Detailkenntnisse – ein irreführender Weg eingeschlagen wurde. Insofern gilt es abzuwarten, wie sich die Situation in Bezug auf eine *lange* oder möglicherweise *kürzere* Geschichte der Erde und des Lebens in 50 oder 100 Jahren darstellen wird.

Dank

Mein Dank gilt Dr. Reinhard JUNKER und Dr. Martin ERNST für die Durchsicht des Manuskripts und wertvolle Hinweise.

Literatur (Auswahl)

- AGER DV (1993) The Nature of the Stratigraphical Record. Third Edition. Chichester.
- BARRELL J (1917) Rhythms and the measurements of geologic time. Bulletin of the Geological Society of America 28, 745–904.
- AUBRY M-P (2009) Thinking of deep time. Stratigraphy 6, 93–99.
- BURCHFIELD JD (1998) The age of the Earth and the invention of geological time. In: BLUNDELL DJ & SCOTT AC (eds.) Lyell: the Past is the Key to the Present. Geological Society, London, Special Publications 143, 137–143.
- 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.
- FAURE G & MENSING TM (2005) Isotope Principle and Applications. 3rd Edition, Hoboken, N. J.
- GRADSTEIN FM, OGG JG, SCHMITZ MD & OGG GM (Eds., 2020) Geologic Time Scale 2020. Volume 1/2, Oxford Amsterdam.
- HUTTON J (1788) Theory of the Earth. Transactions of the Royal Society of Edinburgh 1, 209–304.
- 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.
- KOTULLA M (2020a) Bentonit-Horizonte in paläozoischen Sedimentfolgen: Tephrostratigraphie und U-Pb-Altersbestimmungen mit magmatogenen Zirkonen. W+W Special Paper G-20-1, Baiersbronn. https://www.wort-und-wissen.org/wp-content/uploads/Bentonit-Horizonte_G-20-1.pdf
- KOTULLA M (2020b) Gültigkeit und Grenzen geologischer Zeitbestimmung. Online-Loseblattsammlung, Stand: 2. Ergänzungslieferung 10/2020. <https://www.wort-und-wissen.org/publikationen/geologie-loseblattsammlung/>
- LOTZE F (1968) Geologie. Sammlung Götschen, Band 13/13a, Berlin.
- 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.
- PATTERSON C (1956) Age of meteorites and the earth. Geochimica et Cosmochimica Acta 10, 230–237.
- REPCHECK J (2007) Der Mann, der die Zeit fand. James Hutton und die Entdeckung der Erdgeschichte. Stuttgart.
- SADLER PM (1981) Sediment accumulation rates and the completeness of stratigraphic sections. Journal of Geology 89, 569–584.
- SCHIEBER J (2011) Shifting Paradigms in Shale Sedimentology – The Implications of Recent Flume Studies for Interpreting Shale Fabrics and Depositional Environments. Abstract 2011 CSPG SSEG CWLS Convention, 1–4.
- SHEN S-Z (2012) Meishan Sections in South China: The Witness of the largest Biological Mass Extinction during the Phanerozoic. Journal of Geography (Chigaku Zasshi) 121, 570–578.
- SHEN S-Z, CROWLEY JL, WANG Y, BOWRING SA et al. (2011) Calibrating the end-Permian mass extinction. Science 334, 1367–1372.
- THOMSON W (Lord KELVIN) (1862) On the age of the sun's heat. Macmillan's Magazine 5, 388–393.
- TOULMIN S (1962–1963) The discovery of time. Manchester Literary and Philosophical Society Memoirs and Proceedings 105, 100–112.

Weitere Literaturangaben siehe o. a. Zusatzmaterial.

Anschrift des Verfassers:

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