

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 $\tau_0 = t_1 = t_2$ 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.

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

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

$$\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}} = e^{\lambda_{238}\tau_0} - 1 \quad (3)$$

$$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{235}\text{U}} = e^{\lambda_{235}\tau_0} - 1 \quad (4)$$

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 inkorrektzer 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

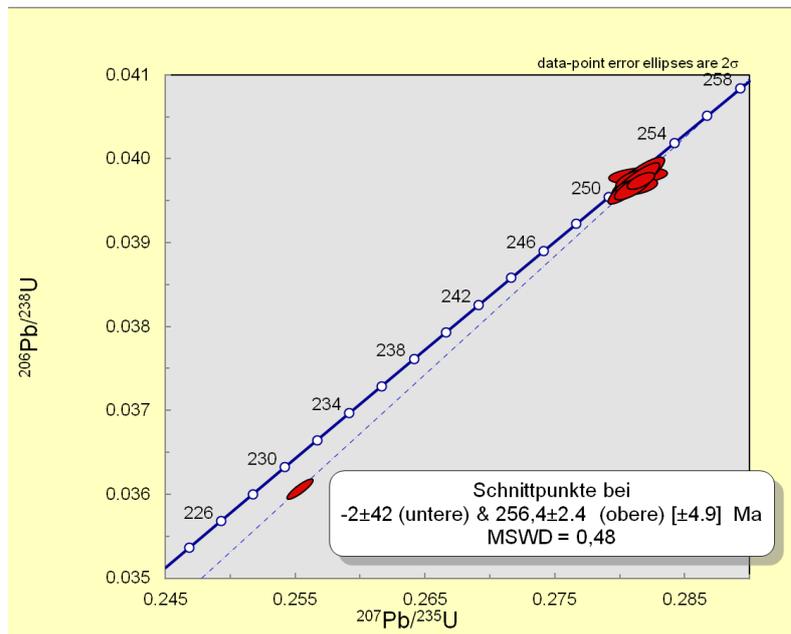


Abb. 1 Beispiel für ein Wetherill-Konkordia-Diagramm. Links: Wertetabelle; rechts: Grafik. Legende: MSWD (mean standard weighted deviation), mittlere gewichtete Standardabweichung; Ma = Millionen Jahre; 2σ = Standardabweichung etwa 95,4 %, Werte innerhalb der Streuintervalle.

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 $^{206}Pb/^{238}U$ -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 $256,5 +2,6/-2,0$ 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.

$^{238}U/^{206}Pb$	2σ %err	$^{207}Pb/^{206}Pb$	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

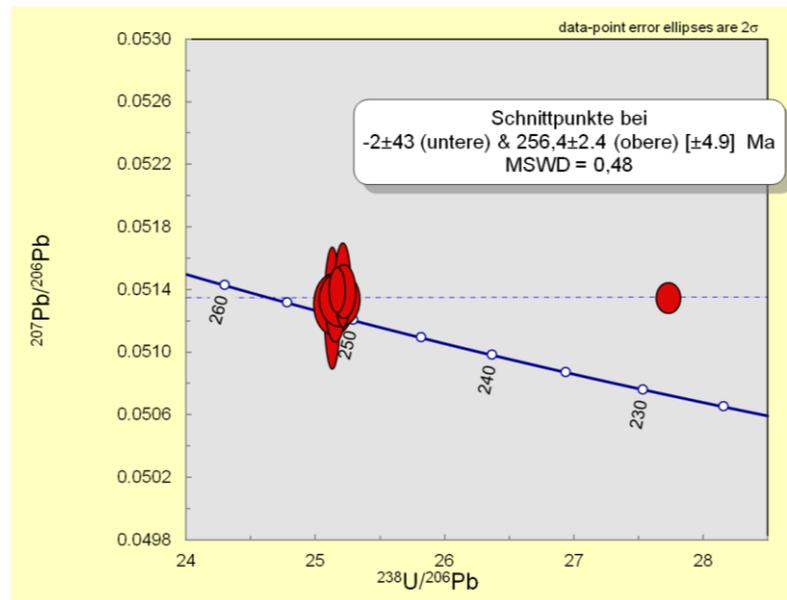


Abb. 2 Beispiel für ein Tera-Wasserburg-Konkordia-Diagramm. Links: Wertetabelle; rechts: Grafik. Legende: MSWD (mean standard weighted deviation), mittlere gewichtete Standardabweichung; Ma = Millionen Jahre; 2σ = Standardabweichung etwa 95,4 %, Werte innerhalb der Streuintervalle.

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 $^{207}Pb/^{235}U$ 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).