

BEITRÄGE ZUR GEOLOGIE DER SCHWEIZ
KLEINERE MITTEILUNGEN

Nr. 61

**Untersuchungen über radioaktive Mineralien
und Gesteine in der Schweiz**

**Regelmässigkeiten der
Radioaktivitätsverteilung in granitischen
Gesteinskörpern
(Beispiele aus den Schweizer Alpen)**

von

L. RYBACH und T. P. LABHART

**Vorwort der Schweizerischen Geotechnischen Kommission und des
Arbeitsausschusses für die Untersuchung schweizerischer
Mineralien und Gesteine auf Atombrennstoffe und seltene
Elemente**

Die vorliegende Arbeit von L. Rybach und T. P. Labhart «Regelmässigkeiten der Radioaktivitätsverteilung in granitischen Gesteinskörpern (Beispiele aus den Schweizer Alpen)» befasst sich mit der Anreicherung von U- und Th-Gehalten in den Randzonen von Graniten. Die Untersuchungen wurden durch den Arbeitsausschuss und den «Entwicklungsfonds seltene Metalle» finanziert. Für die Messungen standen Instrumente, die aus Mitteln des Schweizerischen Nationalfonds bezahlt worden waren, zur Verfügung. Den Autoren sei für ihre interessante Studie zur wissenschaftlichen Erforschung der Gehalte an radioaktiven Elementen in schweizerischen Gesteinen bestens gedankt.

Für den Inhalt des Textes und der Figuren sind die Verfasser allein verantwortlich.

Zürich, Dezember 1973.

Der Präsident der
Schweiz. Geotechnischen Kommission
und des Arbeitsausschusses

Prof. F. DE QUERVAIN

Erscheint gleichzeitig in
«Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen»
Band 53, Heft 3, 1973

Regelmässigkeiten der Radioaktivitätsverteilung in granitischen Gesteinskörpern (Beispiele aus den Schweizer Alpen)*)

Von *L. Rybach* (Zürich) und *T. P. Labhart* (Bern)**)

Mit 3 Figuren im Text

Abstract. To understand the earth's thermal regime information on the distribution of radioactive heat sources, especially in crustal rocks, is indispensable. Surface studies of the radioactivity distribution in granitic bodies show a zonation pattern with the highest concentrations of U and Th at the rim and a variable, but rapid decrease towards the center. An attempt is made to explain this distribution pattern as the result of a generalized diffusion mechanism in a *temperature gradient*. The solution of FICK's first equation for this case predicts that

- the decrease of radioactivity towards the center of granitic bodies would follow an exponential law;
- the logarithmic decrement of the decrease is inversely proportional to the temperature gradient.

Small granite batholiths which are intruded at shallow depths cause a strong temperature gradient and thus exhibit a more rapid decrease of radioactivity than larger granitic bodies with comparable depths of intrusion. Exponential decrease with a decrement of 4 km have been found for the Rotondo granite (Gotthard massif) and the Mont Blanc granite. For nearly isometric bodies it can be assumed that the vertical distribution of the radioactivity is almost identical with the distribution on the surface. Based on this assumption and using heat flow observations, calculations indicate that the Rotondo granite extends about 9 km below the surface and about 4 km have been already eroded.

*) Erscheint gleichzeitig als «Beiträge zur Geologie der Schweiz, Kleinere Mitteilungen Nr. 61» und Mitteilung Nr. 84 aus dem Institut für Geophysik ETH Zürich.

**) Adresse der Autoren: Dr. L. Rybach, Institut für Geophysik ETH, Aussenstation Höggerberg, CH-8049 Zürich.

Dr. T. P. Labhart, Mineralogisch-Petrographisches Institut, Sahlistrasse 6, CH-3012 Bern.

Die treibende Kraft der geodynamischen Prozesse ist die Wärme des Erdinnern. Zu deren Verständnis sind Kenntnisse über den Verlauf der Temperatur-Tiefen-Funktion $T(z)$ unerlässlich. Die Temperaturverteilung in der Erdkruste ist weitgehend durch die *Wärmeproduktion* der Gesteine bestimmt. Diese Wärme entsteht durch den Zerfall der natürlichen Radioisotope, die in meist kleiner Konzentration (ppm-Bereich) in allen Gesteinen vorhanden sind.

Zur radioaktiven Wärmeproduktion tragen im wesentlichen die Elemente U, Th und K bei. Ihre Konzentration ist von Gesteinstyp zu Gesteinstyp verschieden, wobei bekanntlich saure Gesteine radioaktiver sind als basische. Auch innerhalb von recht homogenen Gesteinskörpern, wie z. B. Granitbatholithen, ist die Verteilung der Radioaktivitätsträger ungleichmässig, wobei jedoch gewisse *Regelmässigkeiten* bestehen.

Bezüglich des U- und Th-Gehaltes zeigen die meisten hierauf untersuchten Granite einen mehr oder weniger ausgeprägtem *Zonarbau*. Die ersten Beispiele stammen aus Kanada (INGHAM and KEEVIL, 1951); allgemein wird eine deutliche Anreicherung von U und Th in den Randpartien festgestellt. Im Innern der Granitkörper nimmt die Konzentration von U und Th rasch ab. Die Abnahme ist bei U meist ausgeprägter als bei Th.

In Fig. 1 sind Resultate gammaspektrometrischer U- und Th-Bestimmungen an einigen granitischen Gesteinen der Schweizer Alpen dargestellt (vgl. auch LABHART und RYBACH, 1973). Auffallend sind die langgestreckten Variationsfelder der einzelnen Gesteinskörper. Die Längsachse der Variationsfelder steht steiler als 45° ; dies deutet auf stärkere Anreicherung des U gegenüber Th in den Randzonen hin. U reichert sich gegenüber Th fast quadratisch an: $c_U \propto c_{Th}^2$.

In dieser Form präsentiert sich das Beobachtungsmaterial. Die folgenden Überlegungen mögen diesen Sachverhalt zu erklären versuchen. Die Anreicherung der Radioaktivitätsträger in den Randzonen von Graniten wird mit einem *Diffusionsmechanismus unter Einwirkung eines Temperaturgradienten* erklärt. Die stärkere Abkühlung am Rande der Intrusion führt zu einem Temperaturgefälle zwischen Kern und Kontakt des Intrusivkörpers. Dadurch wandern U und Th gegen den Rand, wo sie – aus geochemischen und kristallchemischen Gründen – bevorzugt in die früh kristallisierenden akzessorischen Mineralien wie Zirkon, Apatit, Titanit, Orthit, Monazit eingebaut werden.

Mit dem diadochen Einbau des Th in die akzessorischen Mineralien ist die randliche Anreicherung des Thoriums abgeschlossen. Demgegenüber kann U oxydiert werden ($U^{4+} \rightarrow U^{6+}$); das verminderte Ionisationspotential des Uranyl-Ions UO_2^{2+} sichert eine weitere, bis in die späte pegmatitisch-hydrothermale Phase reichende Mobilität (SZÁDECZKY-KARDOSS, 1955). Auf diese Weise ist die ausgeprägtere Anreicherung von U verständlich (Fig. 1). Ein Beispiel für U-Anreicherung in den Spätphasen stellen die Aplite mit extrem niedrigen Th/U-Verhältnissen dar (Fig. 1).

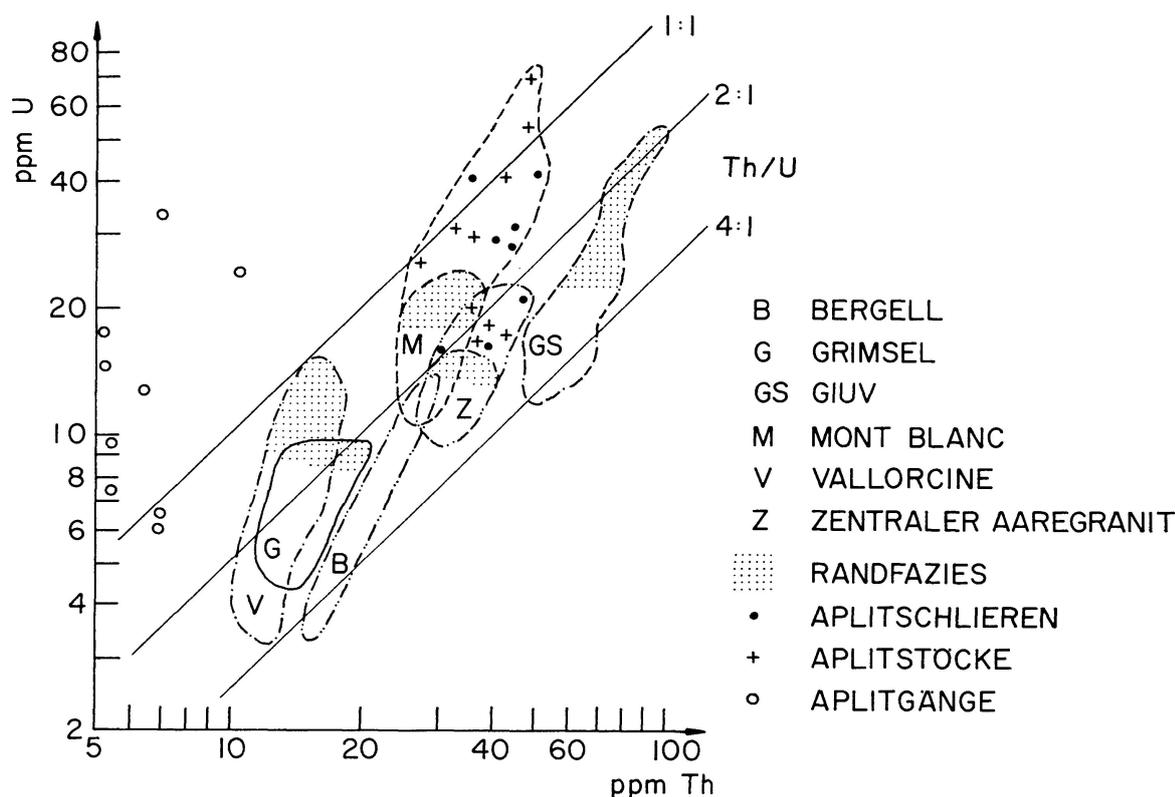


Fig. 1. Das Uran-Thorium-Variationsdiagramm der untersuchten Gesteine zeigt einander ähnliche, langgestreckte Variationsfelder; innerhalb desselben Gesteinskomplexes geht die Anreicherung von U und Th von der meist grobkörnigen Kernzone über die feinkörnige Randzone zu den Aplitstöcken, wobei das Th/U-Verhältnis ständig abnimmt. Aplitgänge haben extrem niedrige Th/U-Verhältnisse und fallen weit ausserhalb der Variationsfelder.

(Nach LABHART u. RYBACH 1974).

Die Diffusion erreicht einen Gleichgewichtszustand, nachdem sich ein bestimmtes Temperaturgefälle eingestellt hat. Dann gilt in einer Richtung ξ

$$j = -D \left(\frac{\partial c}{\partial \xi} + k \frac{\partial T}{\partial \xi} c \right). \quad (1)$$

wo j den Diffusionsstrom, D den Diffusionskoeffizienten und c die Konzentration bedeuten. Dies ist die erweiterte Form des I. FICKSchen Gesetzes (s. z. B. GIRIFALCO, 1964), wobei das zweite Glied in der Klammer den Einfluss des Temperaturgradienten berücksichtigt.

Die Lösung von (1) für kleines j (≈ 0) und konstantes $dT/d\xi$ lautet

$$c(\xi) = c(0) \exp \left[-k \left(\frac{dT}{d\xi} \right) \xi \right] = c(0) \exp \left[-\frac{\xi}{H} \right], \quad (2)$$

d. h. eine *exponentielle Abnahme* der Konzentration (des U bzw. Th) mit einem Dekrement von

$$H \propto \left(\frac{dT}{d\xi} \right)^{-1}. \quad (3)$$

Für mehr oder weniger isometrische Gesteinskörper kann angenommen werden, dass die Konzentrationsverteilung in allen Richtungen etwa gleich ist: $c(\xi) \approx c(z) \approx c(x)$. Somit ist z. B. die *vertikale* Verteilung der Radioaktivität mit der *lateralen* Variation vergleichbar, welche an der Erdoberfläche direkt erfasst werden kann.

Im folgenden soll die Abnahme der Radioaktivität bzw. der Wärmeproduktion mit zunehmender Entfernung vom Kontakt näher untersucht werden. Die radioaktive Wärmeproduktion A eines Gesteins lässt sich aus den U-, Th- und K-Konzentrationen c_U , c_{Th} (in ppm) und c_K (in %) wie folgt berechnen:

$$A [\text{HGU}] = 0,317 \rho (0,73 c_U + 0,20 c_{Th} + 0,27 c_K), \quad (4)$$

wo ρ die Dichte des Gesteins (g/cm^3) bedeutet; $1 \text{ HGU} = 10^{-13} \text{ cal/cm}^3 \text{ sec}$. Untersuchungen an zwei Graniten der Schweizer Alpen zeigen (Fig. 2), dass die Verteilung der Radioaktivität bzw. der Wärmeproduktion $A(x)$ tatsächlich einem Exponentialgesetz folgt: $A(x) = A(0) \exp(-x/H)$.

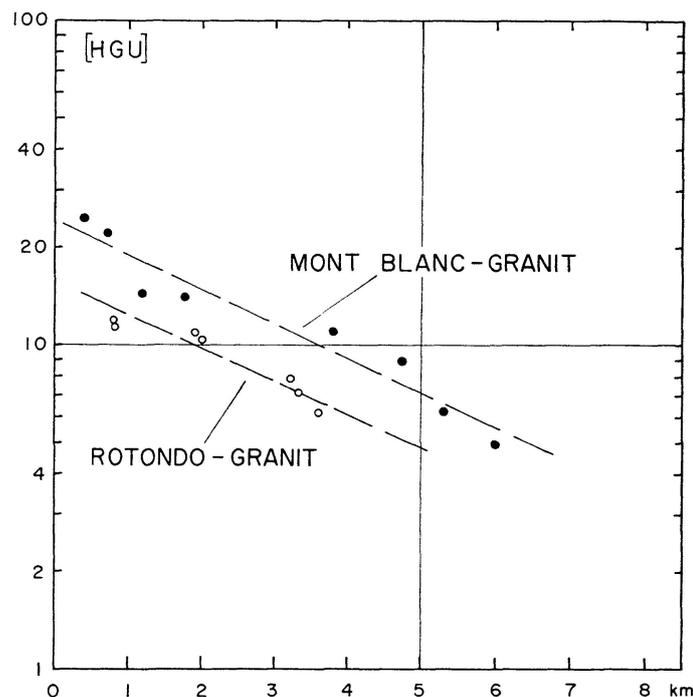


Fig. 2. Exponentielle Abnahme der Wärmeproduktion mit zunehmender Entfernung vom Kontakt Granitkörper/Nebengestein. Logarithmisches Dekrement H in beiden Fällen rund 4 km. Daten aus RYBACH et al. (1962), (1966).

Gleichung (3) besagt, dass Granite, bei deren Abkühlung ein *starker Temperaturgradient* vorhanden war, eine *starke randliche Erhöhung* der Wärmeproduktion aufweisen (Dekrement H klein). Dies ist z. B. der Fall bei kleinen, in relativ geringer Tiefe erstarrten Graniten. Bei grossen Graniten mit ver-

gleichbarer Erstarrungstiefe ist die Anreicherung weniger ausgeprägt (H gross). Dieser Unterschied wird mit zunehmender Erstarrungstiefe (Zunahme der Nebengesteinstemperatur) immer kleiner.

Aus den Gesetzmässigkeiten der Radioaktivitätsverteilung lassen sich – unter bestimmten Voraussetzungen und Annahmen – wertvolle Schlüsse ziehen, was am Beispiel des *Rotondo-Granits* (Gotthard-Massiv) demonstriert werden soll. Bei bekanntem Oberflächen-Wärmefluss $q(0)$ (siehe z. B. CLARK and NIBLETT, 1956; CLARK and JÄGER, 1969) lässt sich die *Tiefenerstreckung* z^* und die *Erosionstiefe* z_{er} (vgl. Fig. 3) berechnen:

$$z^* = H \ln \frac{2 H A(0)}{H A(0) + q^* - q(0)} \doteq \underline{9,6 \text{ km}}$$

und

$$z_{er} = H \ln \frac{A(0)}{A_{zentr}} \doteq \underline{3,8 \text{ km}}.$$

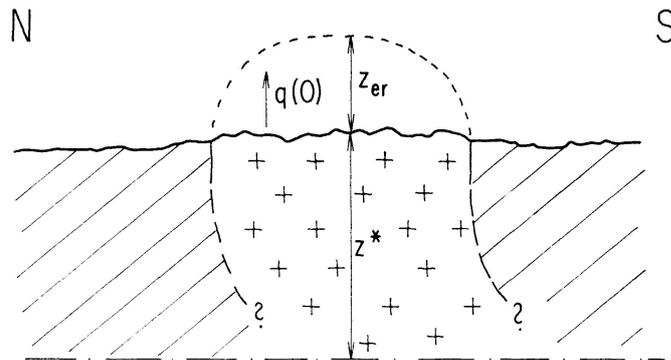


Fig. 3. Schematisches Querprofil durch den Rotondo-Granit. $q(0)$ = Wärmefluss an der Oberfläche. Für z^* wurde 9,6 km, für z_{er} 3,8 km errechnet (siehe Text).

Näheres über die Berechnungsmethode siehe in RYBACH (1973). Eingesetzt wurden

$$H = 4,2 \text{ km (Fig. 2),}$$

$$A(0) = 15 \text{ HGU,}$$

$$q^* = 0,8 \text{ HFU,}$$

$$1 \text{ HFU} = 10^{-6} \text{ cal/cm}^2, \text{ sec.}$$

$$A_{zentr} = 6 \text{ HGU (Fig. 2),}$$

$$q(0) = 1,9 \text{ HFU (RYBACH, 1973),}$$

Für die gammaspektrometrischen Messungen stand der Messplatz des Instituts für Kristallographie und Petrographie der ETH Zürich, ausgerüstet mit einem 1024-Kanal-Analysator aus Mitteln des Schweizerischen Nationalfonds (Kredit Nr. 2.550.71), zur Verfügung. Wir danken Herrn G. Buntebarth (Clausthal) für wertvolle Diskussionen.

LITERATUR

- CLARK, S. P. and NIBLETT, E. R. C. (1956): Terrestrial heat flow in the Swiss Alps. *Monthly Notices Roy. Astron. Soc., Geophys. Suppl.* 7, 176–195.
- CLARK, S. P. and JÄGER, E. (1969): Denudation rate in the Alps from geochronologic and heat flow data. *Amer. J. Sci.* 267, 1143–1160.
- GIRIFALCO, L. A. (1964): *Atomic Migration in Crystals*. Blaisdell Publ. Co., New York.
- INGHAM, W. and KEEVIL, N. (1951): Radioactivity of the Bourlamaque, Elzevir, and Cheddar Batholiths, Canada. *Bull. Geol. Soc. Amer.* 62, 131–148.
- LABHART, T. P. und RYBACH, L. (1974): Granite und Uranvererzungen in den Schweizer Alpen. *Geol. Rdsch.* 63 (im Druck).
- RYBACH, L., HAFNER, ST. und WEIBEL, M. (1962): Die Verteilung von U-Th, Na, K und Ca im Rotondogranit. *Schweiz. Min. Petr. Mitt.* 42, 307–320.
- RYBACH, L., VON RAUMER, J. and ADAMS, J. A. S. (1966): A Gamma Spectrometric Study of Mont Blanc Granite Samples. *Pure and Appl. Geophysics* 63, 153–160.
- RYBACH, L. (1973): Wärmeproduktionsbestimmungen an Gesteinen der Schweizer Alpen. *Beitr. Geol. Schweiz. Geotechn. Ser., Lfg.* 51.
- SZÁDECZKI-KARDOSS, E. (1955): *Geokémia*. Akadémiai Kiadó, Budapest.

Manuskript eingegangen am 20. Oktober 1973.