

# Radiometrische Stollenprofile durch zentralmassivische Granite im Bereich der Schweizer Geotraverse

Autor(en): **Labhart, Toni P. / Rybach, Ladislaus**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Eclogae Geologicae Helvetiae**

Band (Jahr): **73 (1980)**

Heft 2: **Symposium alpine geotraverses with special emphasis on the Basel-Chiasso profile : Lausanne, 4-5 October 1979**

PDF erstellt am: **21.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-164976>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Eclogae geol. Helv.	Vol. 73/2	Seiten 571–581	6 Textfiguren und 1 Tabelle	Basel, Juli 1980
---------------------	-----------	----------------	--------------------------------	------------------

## Radiometrische Stollenprofile durch zentralmassivische Granite im Bereich der Schweizer Geotraverse<sup>1)</sup>

Von TONI P. LABHART<sup>2)</sup> und LADISLAUS RYBACH<sup>3)</sup>

### ABSTRACT

*Radiometric tunnel profiles through granitic units of the Swiss Central Massifs.* Several tunnels constructed for hydropower, pipelines and highways enabled, for a limited period of time, the characterization of continuous, unweathered rock profiles by radioactivity measurements under favourable conditions ( $\pm$  constant geometry for scintillation counter measurements). In the area of the Swiss Geotraverse the following granitic units of the Aar and Gotthard Massifs have been investigated: Grimsel Granodiorite, Mittagfluh Granite, Rotondo Granite, Southern Aare Granite and Central Aare Granite, including aplitegranitic stocks and veins. Radioelement contents as determined by gamma-ray spectrometric analyses of rock samples show distinct variation patterns:

- Uranium and thorium contents generally increase towards the rim of the individual granitic bodies; the adjacent rocks (gneiss cover) exhibit significantly lower radioactivity.
- Uranium is relatively stronger enriched – with respect to thorium – from the older to the younger units as indicated by successively decreasing Th/U ratios.

The distribution patterns of U and Th result from several processes: a) fixation of U and Th during granite emplacement and crystallization, b) migration of U and Th in the fluid phase, c) mobilization of U (and to a lesser extent also of Th) due to later phases of deformation and/or metamorphism.

### ZUSAMMENFASSUNG

Der Gotthardstrassentunnel, der Furka-Eisenbahntunnel, die Kraftwerkstollen der Göschenalp und die Erdgaspipeline-Stollen der Grimsel haben, für relativ kurze Zeit, kontinuierliche Profile durch unverwitterte granitische Gesteine des Gotthard- und des Aarmassivs erschlossen. Radiometrische Stollenprofile wurden in den folgenden Einheiten aufgenommen: Grimsel-Granodiorit, Mittagfluhgranit, Rotondogranit, Südlicher Aaregranit und Zentraler Aaregranit, samt Aplitgranitgängen und -stöcken. Gammaspectrometrisch bestimmte Radioelementgehalte von Gesteinsproben zeigen Regelmässigkeiten der Uran- und Thoriumverteilung innerhalb der untersuchten Gesteinskörper:

- Die U- und Th-Gehalte nehmen vom Inneren der Granitkörper gegen den Kontakt mit dem (wesentlich weniger radioaktiven) Nebengestein zu.
- Uran wird – gegenüber Th – in den jüngeren Graniten wesentlich stärker angereichert; entsprechend nimmt das Th-U-Verhältnis von den älteren zu den jüngeren Graniten hin ab.

Das heutige U-Th-Verteilungsbild entstand durch das Zusammenwirken mehrerer Vorgänge: a) Primäre Verteilung der Elemente bei der Bildung der Schmelzen und zu Beginn der Kristallisation, b) Umverteilung des U und des Th während der Abkühlung durch Überlagerung von Migrations- und Diffusionsvorgängen, die zu einer ausgeprägten Anreicherung in den Randzonen der Granitkörper geführt hat, und c) eine weitere Umverteilung infolge alpiner Metamorphose/Deformation.

<sup>1)</sup> Mitteilung Nr. 285 aus dem Institut für Geophysik der ETH Zürich.

<sup>2)</sup> Mineralogisch-petrographisches Institut, Universität, CH-3012 Bern.

<sup>3)</sup> Institut für Geophysik, ETH-Hönggerberg, CH-8093 Zürich.

## 1. Einleitung, Messmethodik

Im Rahmen der Prospektion der Schweiz auf Atombrennstoffe konnten wir in den vergangenen Jahren eine Reihe von Stollenbauten untersuchen, die im Bereich der Schweizer Geotraverse liegen. Es handelt sich um den *Gotthardstrassentunnel*, die *Kraftwerkstollen der Göscheneralp*, die *Stollen der Transitgas-Pipeline im Grimselgebiet* und um den *Furka-Eisenbahntunnel* (s. Übersichtsskizze Fig. 1). Da wir uns seit einiger Zeit mit der Radioaktivität der Granite befassen (LABHART & RYBACH 1971, 1972, 1974, 1976, RYBACH & LABHART 1973), war es von besonderem Interesse, dass diese Stollenbauten vorübergehend den Zugang zu einmaligen Querprofilen von insgesamt rund 30 km Länge durch grössere Granitkörper erschlossen haben, nämlich durch den Komplex des Zentralen Aaregranits im Aarmassiv und durch den Rotondogranit im Gotthardmassiv. Unsere Untersuchungen umfassten radiometrische Stollenmessungen, petrographische Feld- und Laborarbeiten und gamma-spektrometrische Messungen an gezielt entnommenen Gesteinsproben. Wir berichten im folgenden über die Radiometrie der oben genannten Granitkörper.

Die radiometrischen Feldmessungen der  $\gamma$ -Aktivität erfolgten mit tragbaren

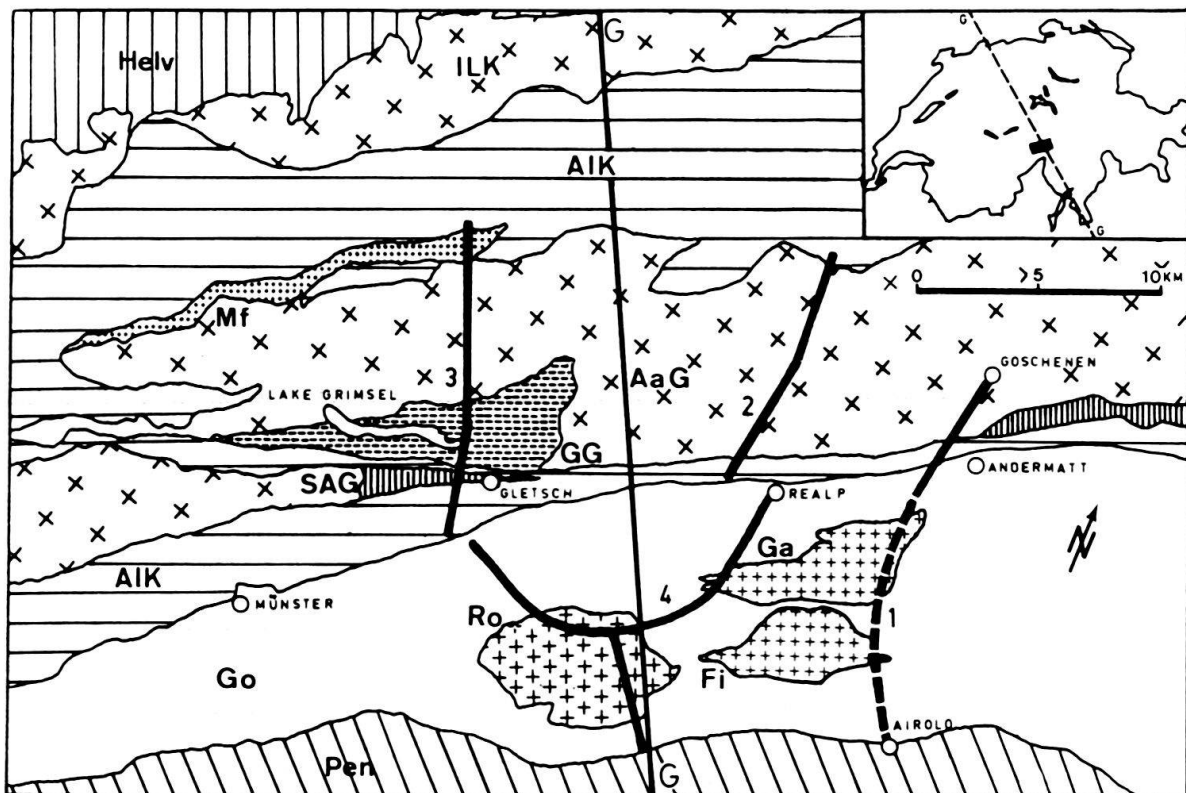


Fig. 1. Petrographische Übersicht mit Lage der untersuchten Stollen (1 = Gotthardstrassentunnel, 2 = Kraftwerkstollen Göscheneralp, 3 = Transitgas-Pipelinestollen, 4 = Furka-Bahntunnel) und der Achse der Geotraverse Basel-Chiasso (G-G). *Helv* = Helvetikum, *ILK* = Innertkirchner und Lauterbrunner Kristallin, *AIK* = Altkristalline Gneishülle, *Mf* = Mittagfluhgranit, *GG* = Grimsel-Granodiorit, *SAG* = Südlicher Aaregranit, *Go* = Gotthardmassiv, *Ro* = Rotondogranit, *Ga* = Gamsboden-Granitgneis, *Fi* = Fibbia-Granitgneis, *Pen* = Penninikum. Nach LABHART (1977).

*Location map of the tunnel profiles investigated.*

Szintillometern des Typs SRAT SPP 2 (Ableseung in cps,  $100 \text{ cps} \approx 25 \mu\text{R/h}$ ). Diese Messungen liessen schon im Feld eine charakteristische Höhe und Verteilung der Radioaktivität in den einzelnen Granitkörpern erkennen, die besonders gut zur Geltung kommt, wenn die sehr zahlreichen Einzelmessungen zu kontinuierlichen Gammalogs zusammengestellt werden (vgl. Fig. 2 und 3). Auffallend waren die deutlich erhöhten Werte am Rand vieler Granitkörper sowie an eingelagerten Aplitgranitstöcken und -gängen.

Die gammaspektrometrische Simultanbestimmung von U, Th und K erfolgte im Labor an Gesteinspulvern; über die Analytik siehe RYBACH (1971). Die Genauigkeit der U- und Th-Bestimmung beträgt rund  $\pm 10\%$ . Vor allem bei der Bestimmung des Urans muss es (angesichts der leichten Mobilisierbarkeit dieses Elements bei der Verwitterung) als grosser Vorteil angesehen werden, dass völlig unverwittertes Probematerial zur Verfügung stand. Analysiert wurden aus den erwähnten Stollen insgesamt 255 Proben granitischer Gesteine. Zum Vergleich dienten ferner die von E. Kissling analysierten 92 Proben von der Oberfläche des Rotondogranits (KISS-

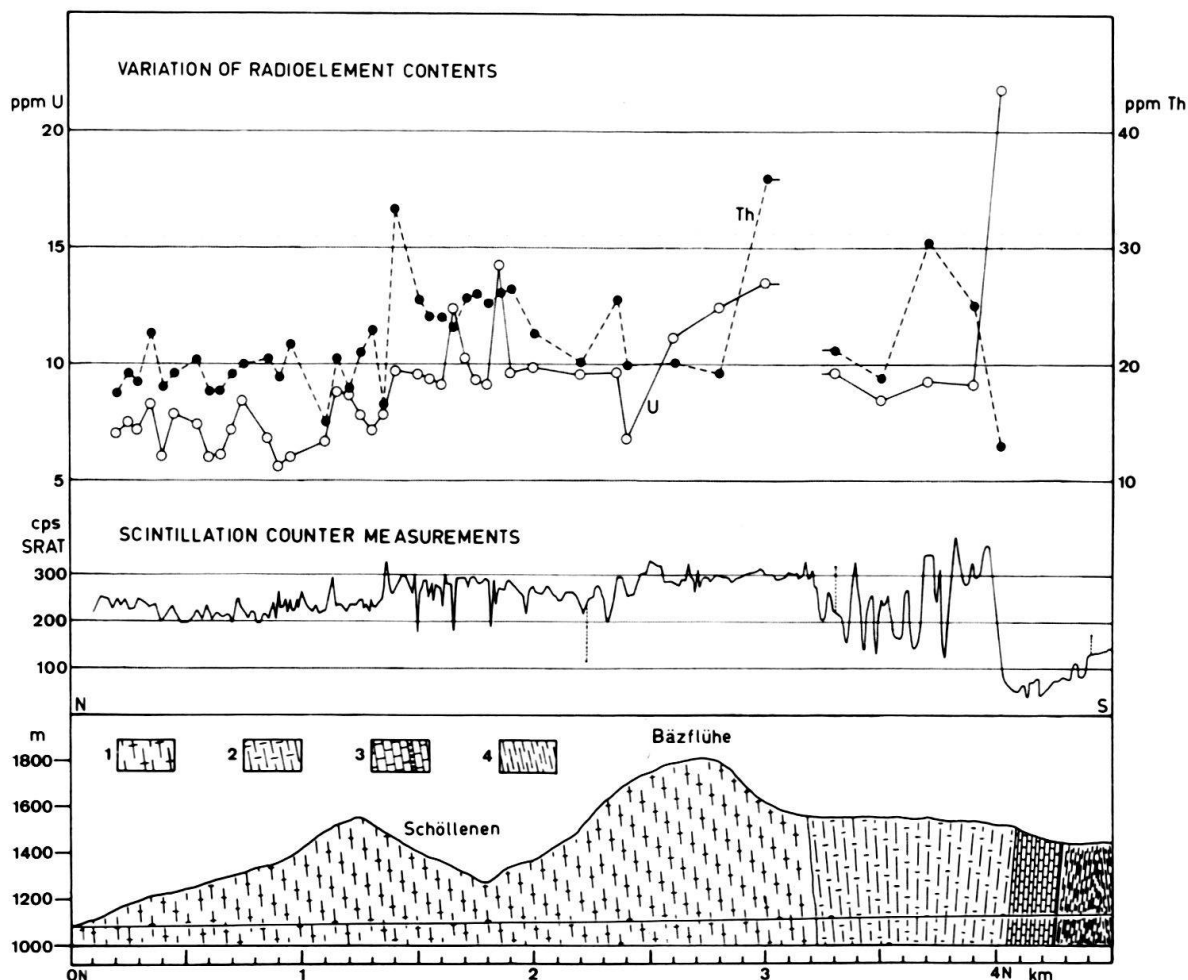


Fig. 2. Radiometrisches Profil durch den nördlichsten Teil des Gotthardstrassentunnels. Nordportal: Göschenen. 1 = Zentraler Aaregranit, 2 = südliche Gneishülle (Altkristallin) des Aarmassivs, 3 = Mesozoikum, 4 = Permokarbon.

*Radiometric profile through the northernmost part of the Gotthard highway tunnel.*

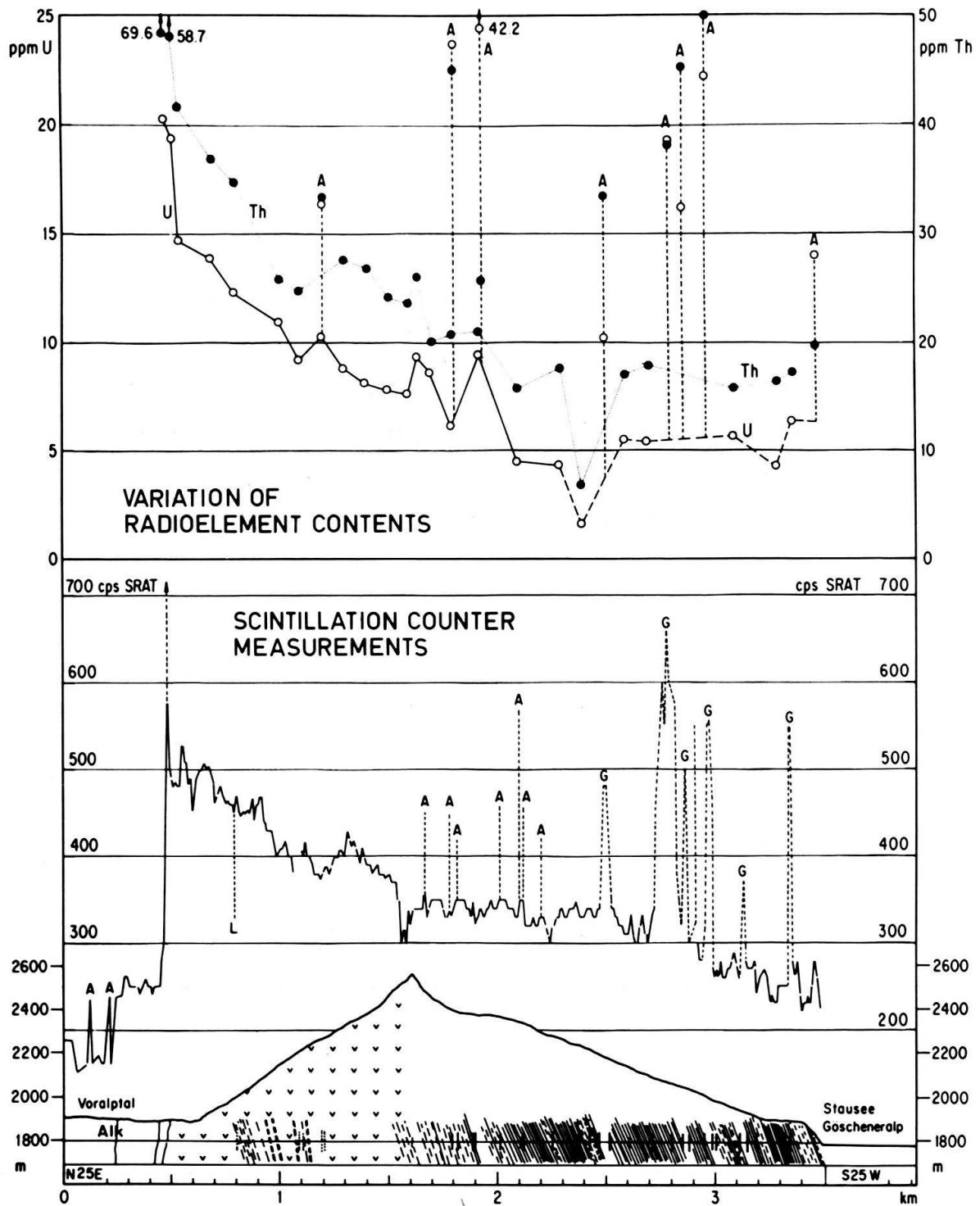


Fig.3. Radiometrisches Profil durch den Nordteil des Kraftwerkstollens Göschenentalp (Zuleitung Voralp-Reuss). Im lithologischen Profil sind eingetragen: die nördliche Randfazies des Zentralen Aaregranits (v-Signatur), das nördlich anschliessende Altkristallin (Alk), die Aplitgänge (vertikale, starke Striche) und - halbschematisch - die Intensität der alpidischen Verschieferung des Granits (dünne Striche, wo unterbrochen = Lettenmylonite). Abkürzungen im Gammalog: A = Aplitegang, G = Granitstock, L = Lamprophyrgang.

*Radiometric profile through the northern part of the hydroelectric tunnel Göschenentalp. In the lithologic profile (below) the northern rim facies of the Central Aare Granite is marked by v's, the northern gneiss cover by Alk and aplitic veins by vertical lines. In the radioactivity profile aplite veins are marked by A, aplitegranite stocks by G. L = lamprophyre.*

LING et al. 1978). Im folgenden sollen vorerst die radiometrischen Verhältnisse der vier Stollen kurz beschrieben werden.

## 2. Die untersuchten Stollenabschnitte und Gesteinstypen

### a) Gotthardstrassentunnel

In diesem Tunnel sind nur die südlichsten 3,2 km des im Reussquerschnitt rund 9 km mächtigen *Zentralen Aaregranits* angeschnitten. Das Gammalog (Fig. 2) zeigt ein stufenartiges Ansteigen der Radioaktivität gegen den Südrand des Granits hin. Sein ruhiger Verlauf spiegelt die gleichmässige, lithologisch monotone Ausbildung des Granits wider, dem auch auffallend wenig Aplitgänge eingelagert sind. Die Erhöhung der Radioaktivität ist bedingt durch die Zunahme von Uran von 6–8 auf 11–14 ppm und von Thorium von 17–20 auf 20–26 ppm. Gegenüber der altkristallinen Hülle (südlich anschliessend ab Stollenmeter 3200 N; mit stark variierender Gesteinsradioaktivität) ist ein deutlicher Kontrast festzustellen: im Mittel niedrigere Radioaktivitätswerte im Altkristallin.

### b) Zuleitungsstollen Stausee Göscheneralp

Hier ist ein komplettes Querprofil durch den rund 8 km mächtigen *Zentralen Aaregranit* aufgeschlossen. Das Gammalog lässt eine ausgesprochen zonare Verteilung der Radioaktivität im Granitkörper erkennen, mit einem sukzessiven Anstieg von einer Zentralzone gegen Süden und (ausgeprägter) gegen Norden. Der Nordteil des Profils mit dem Gammalog und den Uran- und Thoriumgehalten ist in Figur 3 dargestellt. Die Urangehalte steigen von einer Zentralzone mit 4–6 ppm gegen Norden bis auf 15–20 ppm und gegen Süden – ganz analog zum Gotthardtunnel – auf 8–11 ppm. Für Thorium lauten die Werte 15–18 ppm (Zentralzone), 30–70 ppm (Nordrand) und 21–25 ppm (Südrand). Der Granit ist lithologisch differenzierter als im Gotthardstrassentunnel. Es tritt eine gleichkörnige, kompakte und helle nördliche Randfazies auf, und der zentrale Teil ist durchsetzt von kleinen, jüngeren Granitstöcken und Aplitgängen, deren höhere Radioaktivität im Gammalog als charakteristische Peaks erscheint.

### c) Stollen der Transitgas-Pipeline

Diese erschlossen im Grimselgebiet ein umfangreiches und aufschlussreiches Querprofil durch den hier recht komplex gebauten Aaregranit. Von der Hauptmasse (dem *Zentralen Aaregranit s. str.*) mit seinen zahllosen *hellen und dunkeln Schlieren*, *jüngeren Granitstöcken und Aplitgängen* sondert sich am Nordrand der *Mittagfluhgranit* als selbständige, randliche Teilintrusion mit einer eigenen Randfazies ab. Der *Zentrale Aaregranit s. str.* geht ohne scharfe Grenze aus dem ihm südlich angelagerten, wohl etwas älteren *Grimsel-Granodiorit* hervor. Am Südrand des Komplexes schliesslich, von der Hauptmasse durch eine Gneis-Schiefer-Zone getrennt, tritt der *Südliche Aaregranit* auf, ein schmaler, langgestreckter Granitzug, dessen Stellung nicht geklärt ist, der aber wohl am ehesten als südliche, junge Teilintrusion betrach-

tet werden muss. Entsprechend der petrographischen Vielfalt ist das Gammalog sehr kompliziert und kann in diesem Rahmen nicht im Detail dargestellt und diskutiert werden. Sein Verlauf wird zusätzlich kompliziert durch das Auftreten von Zonen sekundärer An- oder Abreicherung: Am Rand von Granitkörpern (besonders auffallend am südlichen Aaregranit) gibt es in alpidischen und jüngeren Bewegungszonen mit Letten und tektonischen Breccien kleine Uranvererzungen mit 200–2000 ppm Uran, andererseits sind an wasserführenden Zonen mit starker tektonischer Zerrüttung und in der Umgebung alpidischer Zerrklüfte Uran-Abreicherungen festzustellen.

Eine zonare Verteilung der Radioaktivität ist in diesem komplizierten Querschnitt in zweifacher Hinsicht realisiert: Einerseits zeigen die nördlichsten und südlichsten Granite (Mittagfluhgranit und Südlicher Aaregranit) gegenüber der Hauptmasse (dem Aaregranit s.str.) deutlich erhöhte Werte, andererseits zeigen alle grösseren Teilkörper (Zentraler Aaregranit s.str., Mittagfluhgranit, Grimsel-Granodiorit und Südlicher Aaregranit) randlich beidseits ein mehr oder weniger ausgeprägtes Ansteigen der Radioaktivität. Für die Uran- und Thoriumgehalte der Gesteine sei auf die Tabelle verwiesen.

*d) Furka-Eisenbahntunnel (inkl. Baufenster Bedretto)*

Dieses System erschloss zwei etwas exzentrisch gelegene Profile von insgesamt 6,7 km Länge durch den *Rotondogranit* (vgl. KISSLING et al. 1978). Die Radioaktivi-

Tabelle: *Mittlere Uran- und Thoriumgehalte der untersuchten granitischen Gesteine.*

Stollen / Gesteinstyp	Proben- Anzahl	Uran (ppm)	Thorium (ppm)	Thorium/Uran
<u>Furka-Tunnel</u>				
Rotondogranit	59	7.9	23.2	2.95
" /Apiltgaenge	5	23.5	20.1	0.92
<u>Gotthard-Strassentunnel</u>				
Zentraler Aaregranit	34	8.4	23.0	2.75
<u>Stollen Goescheneralp</u>				
Zentraler Aaregranit	49	7.5	21.3	2.83
<u>Transitgas-Stollen</u>				
Zentraler Aaregranit s.str.	24	10.8	27.0	2.51
" /Schilleren	9	13.2	33.9	2.57
" /Granitstoecke	5	14.4	34.8	2.41
" /Apiltgaenge	3	18.7	32.8	1.75
Mittagfluhgranit	12	14.8	33.5	2.27
" /Randfazies	5	21.9	32.6	1.56
Suedlicher Aaregranit	11	15.8	26.2	1.66
Grimsel-Granodiorit	14	7.0	18.9	2.69
" /Apiltgaenge	9	20.0	37.1	1.85

tätsmessungen ergaben markante Anstiege der Werte gegen alle drei angefahrenen Kontakte (und sehr brüske Abfälle gegenüber den angrenzenden Schiefen und Gneisen des gotthardmassivischen Altkristallins). Erschwert wurden Aufnahme und Interpretation der Gammalogs durch das zeitweise Auftreten von Radon und seinen Folgeprodukten in der Stollenluft. Uran und Thorium zeigen eine ausgeprägte zonare Verteilung im Granitkörper: Der Urangehalt beträgt in der hellen und gleichkörnigen südlichen und nördlichen Randfazies 10–15 ppm und sinkt in der Zentralzone auf unter 6 ppm. Für das Thorium lauten die Werte 20–30 ppm in Randzonen und 20 ppm in der Zentralzone. Beide Radioelemente sind in den Randzonen angereichert, Uran allerdings ausgeprägter als Thorium. Helle, aplitisch oder pegmatitisch ausgebildete Schlieren im Granit und jüngere Aplitgänge enthalten bis zu 20 und mehr ppm Uran (vgl. Tabelle). Der Vergleich mit den von KISSLING et al. (1978) an der Oberfläche über den Stollen ermittelten Gehalten ergibt eine Abnahme der Uran- und Thoriumgehalte von der Oberfläche bis auf das

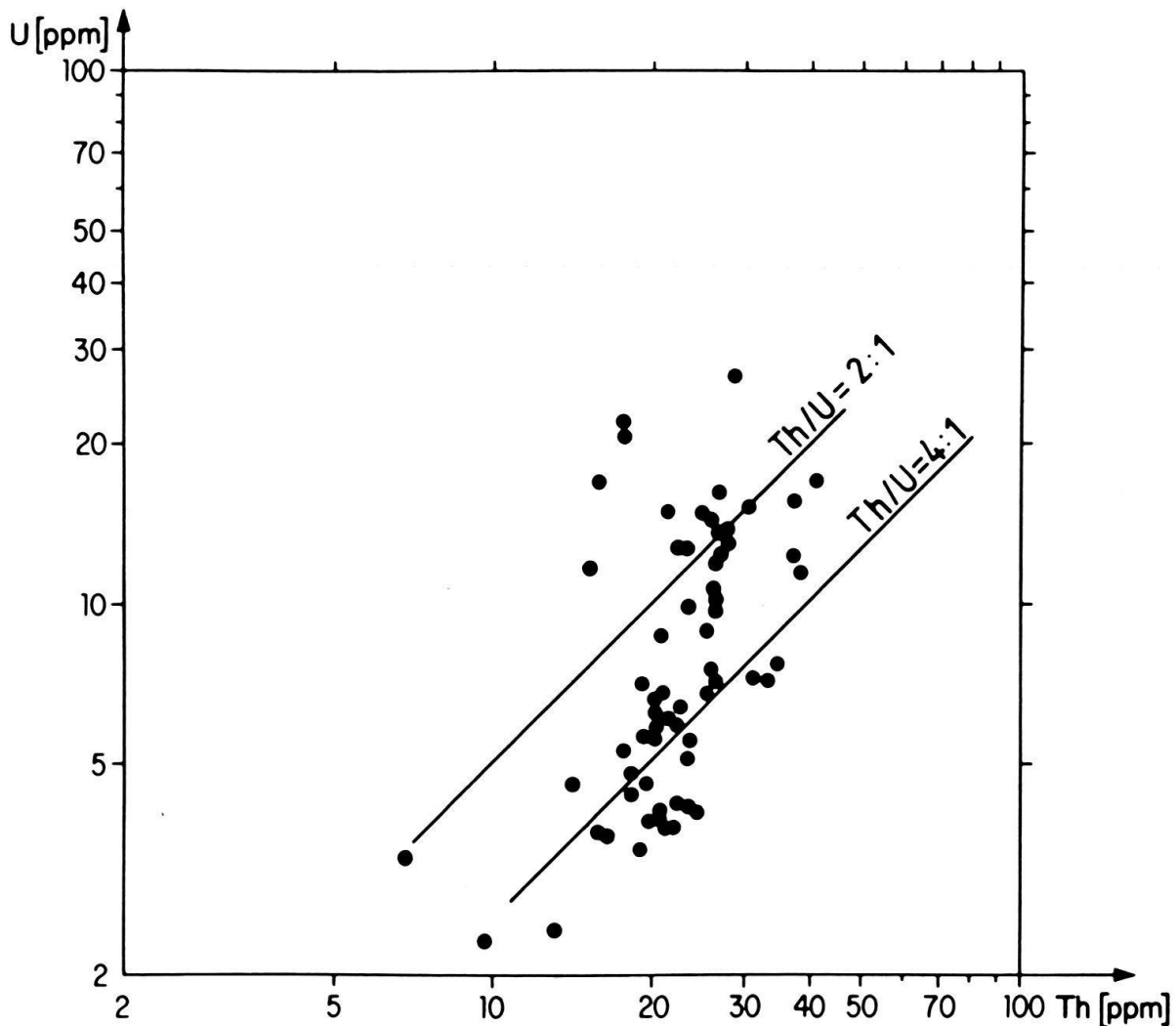


Fig. 4. Rotondogranit (Stollenproben Furkatunnel), Uran-Thorium-Diagramm. Daten aus KISSLING et al. (1978). Diskussion im Text.

*U-Th diagram of the Rotondo Granite. Data from KISSLING et al. (1978). Discussion in text.*



Niveau der Stollen um 10 bzw. 20%. Gedeutet wurde diese Tatsache als Zunahme der Radioelemente gegen das Dach des Granitstocks.

### 3. Diskussion, Interpretation

Gesamthaft kann festgestellt werden, dass zwischen den Feld-Radioaktivitätsmessungen und den im Labor ermittelten Uran- und Thoriumgehalten der betreffenden Gesteine eine sehr gute Korrelation besteht (vgl. Fig. 2 und 3). Es ist in unseren Stollenaufschlüssen mit ihrer einfachen und mehr oder weniger gleichbleibenden Geometrie ( $\pm$  konstanter Raumwinkel der Szintillometer-Messung) offenbar möglich, die Verteilung der Radioelemente in den betreffenden Gesteinskörpern in allen Details und kontinuierlich zu erfassen.

Die Uran- und Thoriumgehalte der untersuchten Gesteinskomplexe sind in der Tabelle zusammengestellt. Aus den Daten geht eine wichtige Gesetzmässigkeit hervor: Überall dort, wo eine Altersabfolge beobachtet oder vermutet wurde, reichert sich gegen die jüngeren Glieder das Uran stark an, im Gegensatz zum Thorium, das geringe Zu- oder Abnahme aufweist. Das gilt zum Beispiel für die Abfolge Grimsel-Granodiorit  $\rightarrow$  Aaregranit s.str.  $\rightarrow$  Mittagfluhgranit bzw.  $\rightarrow$  Südlicher Aaregranit, es gilt aber auch für alle Granitkörper und die darin eingeschlossenen jüngeren Granitstöcke und Aplitgänge. Der Uran- und Thorium-Gesamtgehalt unserer Gesteine unterliegt offensichtlich einer genetisch-petrologischen Abhängigkeit.

Die zum Teil beträchtliche Streuung der Uran- und Thoriumgehalte lässt sich

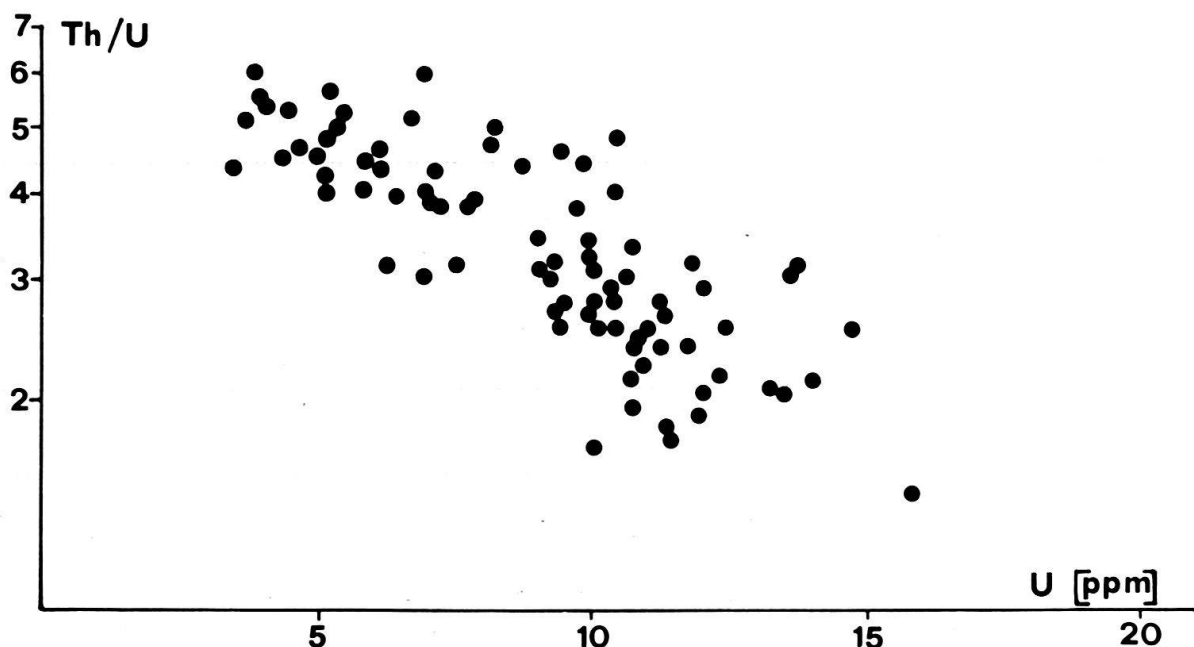


Fig. 5. Rotondogranit (Stollenproben Furkatunnel), Th/U gegen U. Daten aus KISSLING et al. (1978). Diskussion im Text.

*Rotondo granite (samples from the Furka tunnel), Th/U versus U. Data from KISSLING et al. (1978). Discussion in text.*

am besten in Uran-Thorium-Diagrammen darstellen: Als Beispiel diene das Diagramm (Fig. 4) der Werte des Rotondogranits. Die beiden Elemente zeigen eine gute Korrelation, sie belegen im Diagramm ein für den betreffenden Granit charakteristisches Feld. Trägt man Th/U gegen Th bzw. gegen U (Fig. 5) auf, so zeigt sich, dass die Variation des Th-U-Verhältnisses stark vom Uran-, nicht aber vom Thoriumgehalt abhängig ist (KISSLING et al. 1978; Fig. 12 und 13). Beim Radioelementenpaar Thorium/Uran ist das Uran der variable, mobile Partner!

Auf diese Mobilität des Urans ist unserer Auffassung nach die auffallende, zonare Verteilung dieses Elementes in vielen Granitkörpern zurückzuführen. Die untersuchten Stollenprofile haben zum Teil in modellhafter Weise gezeigt, dass die Höhe der Radioelementgehalte, insbesondere diejenige des Urans, auch in homogenen Graniten von der Lage im Granitkörper abhängig ist. Beobachtet wurde in allen Fällen eine Anreicherung vom Zentrum eines Körpers gegen seinen Rand hin, und zwar oft eine sukzessive und kontinuierliche, die nicht auf petrographische Faziesänderungen zurückgeführt werden kann. Der Anreicherungsfaktor beträgt für Uran 2-4, für Thorium 1,2-2. Die im Rotondogranit gefundene Anreicherung gegen die Dachpartien ist für beide Elemente deutlich geringer. Hier muss ein Verteilungsmechanismus vorliegen, der während der Erstarrung und der Abkühlung der

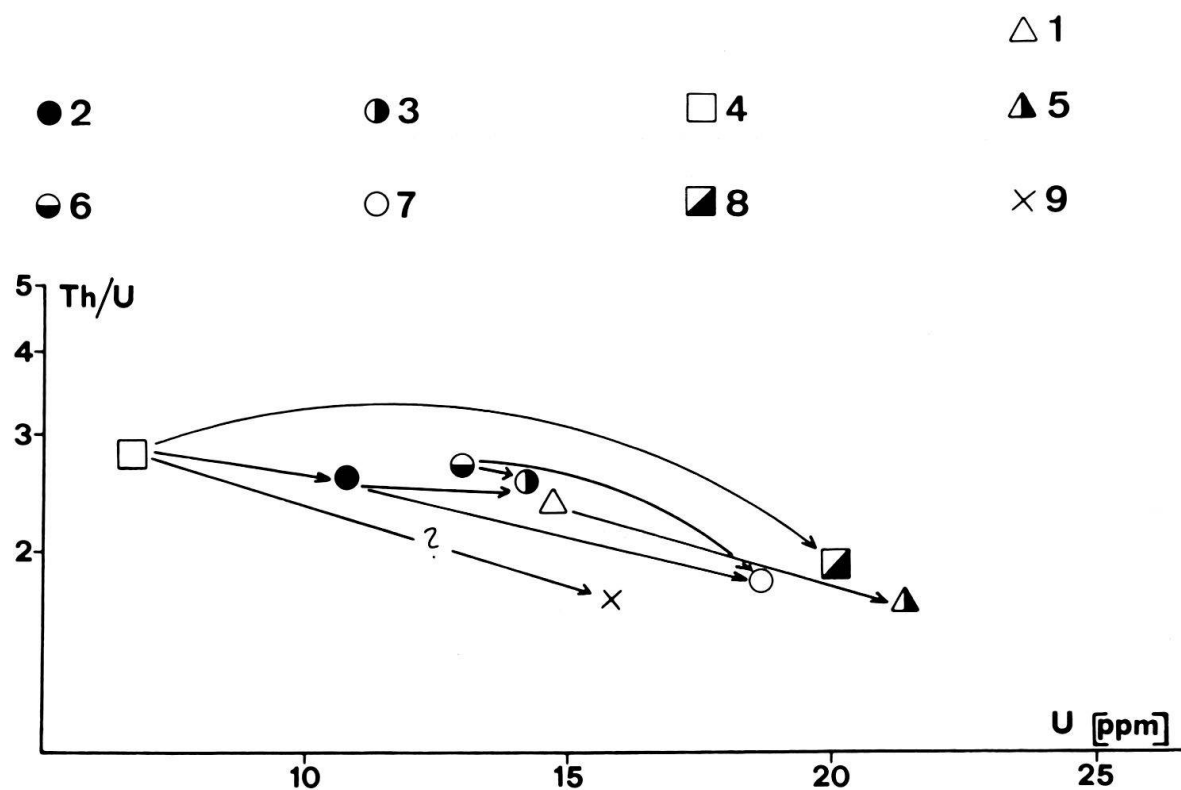


Fig. 6. Entwicklungsdiagramm (Th/U gegen U) für die Teilkörper des Zentraler-Aaregranit-Komplexes im Grimselprofil. Mit Pfeilen sind die Altersbeziehungen der Gesteine angegeben (Pfeilspitze gegen Jüngerer). Weitere Details siehe Text. 1 = Mittagfluhgranit, 2 = Zentraler Aaregranit (ZAgr), 3 = Aplitstöcke im ZAgr, 4 = Grimsel-Granodiorit (Ggd), 5 = Ggd, Randfazies, 6 = Schlieren im ZAgr, 7 = Aplitgänge im ZAgr, 8 = Aplitstöcke und -gänge im Ggd, 9 = Südlicher Aaregranit.

Diagram depicting the development of U and Th within the different genetic units of the Central Aare Granite Complex (Grimsel profile). Arrows indicate development trends and point towards younger units.

Granitkörper wirksam war. BUNTEBARTH (1975, 1976) postulierte eine Wanderung des geochemisch mobilen Urans in den Erstarrungs- und Abkühlungsphasen gegen den Rand der Granitkörper, und zwar als Resultat zweier entgegengesetzt gerichteter Vorgänge: einer Migration von innen gegen den Kontakt (der als geochemische Barriere wirkt) und einer Diffusion vom Kontakt gegen innen, der migrationsbedingten Konzentrationszunahme entgegenwirkend. Als Antriebskräfte kommen für die Migration in erster Linie Temperatur- und Druckgradient, aber auch chemische Potentiale, z. B. Ionenschichten an Korn-Oberflächen, und für die Diffusion der Konzentrationsgradient in Frage. Modellrechnungen haben ergeben (RYBACH & BUNTEBARTH 1979), dass die für die Entstehung eines Zonarbaus aus einer homogenen Verteilung heraus benötigte Wanderungszeit tatsächlich in der Größenordnung der Abkühlzeit der betrachteten Granitkörper liegt. Ein solcher Mechanismus würde bedingen, dass die Randzonen eines Granitkörpers einen höheren Prozentsatz schwach gebundenen Urans enthalten müssten als die Kernzonen. Im Falle des Giuv-Syenits konnte dieser Nachweis erbracht werden (LABHART & RYBACH 1971).

Trägt man in gleicher Weise wie für den Rotondogranit in Figur 5 Th/U gegen U für die Mittelwerte der Teilkörper des Aaregranits auf (Fig. 6), so ergibt sich das ähnliche Bild einer starken Abhängigkeit des Th/U von U. Da es sich aber um Granitkörper handelt, die zeitlich und räumlich getrennt entstanden sind, ist die Ursache dieser Entwicklung eine andere, nämlich eine Anreicherung des Urans im Verlauf der Differentiation dieser Teilkörper.

#### 4. Schlussfolgerungen

Die heutige Verteilung des Urans in den untersuchten Granitkörpern muss das Resultat mehrphasiger, überlagerter Vorgänge sein. Vom gesamten, in einer Schmelze enthaltenen Uran und Thorium (die Absolutmengen und die Mengenverhältnisse hängen wie gezeigt von genetischen Faktoren ab) wird ein Teil des Urans und ein Grossteil des Thoriums relativ früh bei der Kristallisation fest in Gitter von Mineralien wie Zirkon, Monazit, Titanit u. a. eingebaut und dort in der Regel für die spätere Geschichte des Granits fixiert. Es ist durchaus möglich, ja wahrscheinlich, dass bereits zu diesem Zeitpunkt innerhalb eines Granitstocks inhomogene, zonare Verteilungen angelegt werden, z. B. erhöhte Uran- und Thoriumgehalte in einer zirkon- und monazitreichen, hellen Randfazies oder in aplitisch-pegmatitischen Schlieren und Nestern (wie z. B. im Rotondogranit). Im weiteren Verlauf der Kristallisation und Abkühlung wanderten dann aber ein beträchtlicher Teil des Urans (der noch nicht gebundene, «mobile» Anteil) und eventuell ein geringer Teil des Thoriums in der oben beschriebenen Weise gegen die Randzonen, einen Zonarbau bewirkend oder einen früher angelegten akzentuierend.

Spätere, postintrusive Vorgänge, in unserem Falle die alpidische Tektonik und Metamorphose, scheinen diese Verteilungsmuster der Radioelemente nur noch lokal überprägt und gestört zu haben. Bereits erwähnt wurden die Uran-Anreicherungen in alpidischen (oder auch jüngeren) Scherzonen im Bereich primär uranreicher Randzonen von Graniten sowie die Abreicherung von Uran an alpidisch stark tektonisierten, wasserführenden Zonen. Andere Autoren erwähnen das Auftreten

von Uranmineralisationen in der Nähe von Aplitgranitstöcken (WALENTA 1972 im Grimselgebiet) und Anreicherungen von Uran in Glimmern alpidischer Zerrklüfte (mündliche Mitteilung J. Mullis). Die Annahme liegt nahe, dass es sich bei diesem mobilisierten Uran-Anteil um den schwachgebundenen handelt. Die Tatsache, dass viele Stollenwässer aus dem Rotondogranit im Furkatunnel zum Teil erhebliche Urangehalte aufweisen, beweist eindrücklich, dass sich die Umlagerungen des Urans bis in die Gegenwart hinein fortsetzen.

### Verdankungen

Die radiometrischen Stollenmessungen erfolgten mit Unterstützung des «Arbeitsausschusses für die Untersuchung schweizerischer Mineralien und Gesteine auf Atombrennstoffe und seltene Elemente» (im Rahmen des Arbeitsprogrammes der Schweizerischen Geotechnischen Kommission). Die Laboruntersuchungen und die Auswertung der Resultate wurden durch den Schweizerischen Nationalfonds (Projekte Nr. 2.616-0.76, 2.904-0.77 und 2.108-0.78) finanziell unterstützt. Besonderen Dank schulden wir den verschiedenen Bauleitungen, welche uns den Zugang zu den Stollen ermöglicht haben. Herrn E. Kissling danken wir für wertvolle Diskussionen.

### LITERATURVERZEICHNIS

- BUNTEBARTH, B. (1975): *Geophysikalische Untersuchungen über die Verteilung von Uran, Thorium und Kalium in der Erdkruste sowie deren Anwendung auf Temperaturberechnungen für verschiedene Krustentypen*. – Diss. TU Clausthal.
- (1976): *Distribution of uranium in intrusive bodies due to combined migration and diffusion*. – Earth and planet. Sci. Lett. 32, 84–90.
- KISSLING, E., LABHART, T. P., & RYBACH, L. (1978): *Radiometrische Untersuchungen am Rotondogranit*. – Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 58, 357–388.
- LABHART, T. P. (1977): *Aarmassiv und Gotthardmassiv*. Samml. geol. Führer 63. – Bornträger, Berlin.
- LABHART, T. P., & RYBACH, L. (1971): *Abundance and distribution of uranium and thorium in the syenite of Piz Giuv (Aar Massif, Switzerland)*. – Chem. Geol. 7, 237–251.
- (1972): *Der Vallorcine-Granit und seine radiometrischen Anomalien*. – Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 52, 571–574.
- (1974): *Granite und Uranvererzungen in den Schweizer Alpen*. – Geol. Rdsch. 63, 135–147.
- (1976): *Radioaktivitätsprofile durch den Zentralen Aaregranit im Bereich der Schweizer Geotraverse*. – Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 56, 669–673.
- RYBACH, L. (1971): *Radiometric Techniques*. In: WAINERDI, R. E., & UKEN, E. A. (Ed.): *Modern Methods of Geochemical Analysis* (p. 271–318). – Plenum Press, New York.
- RYBACH, L., & BUNTEBARTH, G. (1979): *Radiogenic heat sources in crustal rocks*. – EOS Trans. Amer. Geophys. Union 60, 594–595.
- RYBACH, L., & LABHART, T. P. (1973): *Regelmässigkeiten der Radioaktivitätsverteilung in granitischen Gesteinskörpern (Beispiele aus den Schweizer Alpen)*. – Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 53, 379–394.
- WALENTA, K. (1972): *Grimselit, ein neues Kalium-Natrium-Uranylkarbonat aus dem Grimselgebiet (Oberhasli, Kt. Bern, Schweiz)*. – Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 52, 93–108.

