Zeitschrift: Schweizerische mineralogische und petrographische Mitteilungen = Bulletin suisse de minéralogie et pétrographie

Band: 52 (1972)

Heft: 3

Artikel: Rb-Sr-Untersuchungen an einigen alpinen Zerrklüften des Cristallina-Granodiorites im östlichen Gotthardmassiv

Autor: Arnold, Andreas

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-40615

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Rb-Sr-Untersuchungen an einigen alpinen Zerrklüften des Cristallina-Granodiorites im östlichen Gotthardmassiv

Von *Andreas Arnold* (Bern)*)

Mit 3 Figuren und 2 Tabellen im Text

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit Rb-Sr-Isotopenbestimmungen an Mineralien aus alpinen Zerrklüften und deren Nebengestein. Die Proben stammen alle aus dem Cristallina-Granodiorit, der zu den variszischen Intrusivkörpern des östlichen Gotthardmassivs gehört.

Von drei verschiedenen Klüften ergaben Adular und Glimmer aus Klüften, sowie Gesamtgestein und Glimmer des Nebengesteins drei parallele Rb-Sr-Isochronen. Ihr Alterswert ist innerhalb der Fehlergrenze gleich und beträgt 15–16 Mill. J. Die entsprechenden initialen Sr^{87}/Sr^{86}-Verhältnisse sind verschieden und variieren zwischen 0,720 und 0,731. Aus einer weiteren Kluft liefern Biotit und Adular einen Alterswert von $16{,}0 \pm 0{,}5$ Mill. J.; dies bei einem ungefähren initialen Sr^{87}/Sr^{86}-Verhältnis von 0,736. Schliesslich geben zwei Muskovit-Adular-Paare anderer Klüfte Alter von $17{,}4 \pm 15$ und $12{,}2 \pm 14$ Mill. J. Der geringe Gehalt an radiogenem Sr bedingt den grossen Fehler der letzteren. Diese Alter weichen nicht über den Fehlerbereich der Einzelbestimmungen von jenem der anderen Klüfte ab.

Der Alterswert von 15–16 Mill. J. wird interpretiert als der Zeitpunkt, an welchem die untersuchten Kluftmineralien für Rb und Sr zum geschlossenen System wurden. Dies ist zugleich ein Minimalalter für die Bildung der wichtigsten Kluftmineralien, da Quarz und Adular in der zeitlichen Mineralabfolge älter sind als Muskovit und Biotit. Zum gleichen Zeitpunkt haben die Kluftlösungen wahrscheinlich aufgehört, in den Bereichen zu zirkulieren, wo unsere Kluftbiotite gebildet wurden.

Der fehlende Altersunterschied zwischen Biotiten aus Kluft und Nebengestein, lässt darauf schliessen, dass die Minimaltemperatur für die Bildung der wichtigsten Kluftmineralien 300°C betrug. Sie dürften sich zwischen 300°C und 550°C gebildet haben.

Da die Isochronen verschiedener Lokalitäten verschiedene initiale Sr^{87}/Sr^{86}-Verhältnisse liefern, dürfte das Sr der Kluftmineralien direkt aus dem unmittelbar benachbarten Nebengestein stammen. Schliesslich liefern die drei Gesamtgesteine, von denen das radiogenste aus einer Scherzone stammt, einen Alterswert von rund 70 Mill. J. Das zeigt, dass der Granodiorit, während der alpinen Metamorphose mindestens in den Scherzonen für Rb und Sr zum offenen System wurde.

---

*) Mineralogisch-Petrographisches Institut der Universität, Sahlistrasse 6, CH-3012 Bern.

Abstract

Results of Rb-Sr determinations on some Alpine fissure minerals together with the whole-rock and micas from the country rock are given. The samples are all located in the "Cristallina" granodiorite, a Hercynian intrusive from the eastern Gotthard massif in the Swiss Alps.

For three different localities, micas and adularia from fissures together with the whole-rock and micas from the country rock, define parallel Rb-Sr isochrons. Their apparent age of 15–16 m. y. is the same to within experimental error, whereas the initial Sr^{87}/Sr^{86} ratios vary for different localities and range from 0.720 to 0.731. From another fissure, biotite and adularia show an apparent age of 16.0 ± 0.5 m. y. In other localities, pairs of fissure muscovite and adularia give ages of 17.4 ± 15 and 12.2 ± 14 m. y. The large error is due to the low content of radiogenic Sr in the muscovites. These ages are not experimentally different to those of the other fissures.

The age of 15–16 m. y. gives the time at which the chemical system for the micas was closed to Rb an Sr. It is a minimum age for the principal fissure minerals, since the micas are younger than quartz and adularia in the mineral paragenesis. At the same time, the fluid solutions in contact with biotite probably ceased to circulate.

The ages on biotites in the rocks are considered cooling ages with a closure temperature of about 300° C. Since there is no difference in age between biotite from the fissures and that from the country rock, we conclude that the main minerals formed at a minimum temperature of about 300° C with a probable range of from 300° to 550° C.

Since the isochrons from different localities show different initial Sr^{87}/Sr^{86} ratios, we conclude that the Sr of the fissure minerals was derived from the adjacent country rock.

The three analytical points of the whole rock samples show an apparent age of about 70 m. y. The most radiogenic sample is from a shear zone, indicating that these zones in the "Cristallina" granodiorite became "open" to Rb and Sr during Alpine Metamorphism.

Résumé

Les résultats d'analyses isotopiques Rb-Sr présentés ici ont été obtenus sur des minéraux de cavités à cristaux et de leur roche encaissante: celle-ci est la granodiorite de Cristallina qui appartient aux masses intrusives hercyniennes du massif du Gotthard.

Trois isochrones Rb-Sr parallèles ont été obtenues en trois localités différentes. Elles comprennent les données des micas et de l'adulaire des cavités d'une part, et de la roche totale et des micas de la granodiorite encaissante d'autre part. Leur âge apparent, 15–16 m. a., est identique dans la limite d'erreur, mais leurs rapports initiaux Sr^{87}/Sr^{86} sont différents et varient entre 0,720 et 0,730. La biotite et l'adulaire provenant d'une autre cavité donnent un âge de $16{,}0 \pm 0{,}5$ m. a. et un rapport initial Sr^{87}/Sr^{86} d'environ 0,736. En outre la muscovite et l'adulaire, de localités differentes, livrent des âges de $17{,}4 \pm 15$ et de $12{,}2 \pm 14$ m. a. L'erreur importante de ces derniers est due à leur faible teneur en Sr radiogénique. Dans la limite de l'erreur, ces âges ne diffèrent pas de celui des isochrones.

L'âge des isochrones est interprété comme étant celui de la fermeture du système chimique pour le Sr. Cela veut dire, que la biotite et la muscovite n'ont plus echangé le Sr depuis 15–16 m. a. Les micas étant postérieurs au quartz et à l'adulaire, cet âge est un âge minimal pour la formation des principaux minéraux des cavités. Cet âge correspond probablement aussi à la fin du contact des solutions avec les biotites.

Les ages Rb-Sr sur biotites des roches doivent être considérés, comme des âges de refroidissement à environ 300° C. Comme il n'y a pas de différence d'âge entre la biotite

des cavités et celle de la roche encaissante, il peut être conclu que la témperature minimale de cristallisation de ces minéraux était de 300° environ et était comprise probablement entre 300° et 500° C.

Le fait que les rapports initiaux Sr^{87}/Sr^{86} soient différents pour différentes localités, démontre que le Sr des minéraux de cavités analysés provient directement de la roche voisine de chaque cavité.

Enfin trois analyses de roches totales, dont la plus radiogénique provient d'une zone d'écrasement, donnent un âge approximatif de 70 m. a. Cela démontre que, dans les zones d'écrasement, la granodiorite en tant que roche totale est devenue système ouvert pour le Sr durant le métamorphisme alpin.

I. EINLEITUNG

Rb-Sr-Isotopenbestimmungen geben in erster Linie Altersdaten. Sie können aber auch Informationen über geochemische Austauschvorgänge des Sr oder indirekt über Temperaturen liefern. Deshalb wurde die Gelegenheit genutzt, frische Proben alpiner Zerrkluftmineralien aus den Stollen der Kraftwerke Vorderrhein im Lukmaniergebiet zu beschaffen.

Obwohl die alpinen Zerrklüfte beliebte Studienobjekte sind, wurden bisher, im Vergleich zu den Gesteinen der Alpen, noch wenig Rb-Sr-Untersuchungen an Kluftmineralien durchgeführt. ARNOLD und JÄGER (1965) bestimmten ein Rb-Sr-Alter von rund 15,5 Mill. J. an einem Kluftbiotit des Tavetscher Zwischenmassivs. Im Simplontunnel und im südlichen Aarmassiv lieferten Kluftbiotite und Biotite aus deren Nebengesteinen nach JÄGER, NIGGLI und WENK (1967) übereinstimmende Rb-Sr-Alter von rund 10 bis 12 Mill. J. Dabei stimmt das Alter der Kluftbiotite überein mit dem regionalen Abkühlungsalter der Gesteinsbiotite. Im Mt.-Blanc-Massiv bestimmten LEUTWEIN, POTY, SONET und ZIMMERMANN (1970) K-Ar- und Rb-Sr-Alter von rund 15 Mill. J. an zwei Kluftmuskoviten. Eine Altersübereinstimmung mit den Biotiten aus dem Mt.-Blanc-Granit, die nach BAGGIO, FERRARA und MALARODA (1967) Alterswerte von 18 bis 36 Mill. J. ergeben, scheint dort nicht zu bestehen.

Diese Arbeit soll nun nicht regionale Zusammenhänge zeigen, wie dies in PURDY und STALDER (1972) geschieht, sondern Informationen liefern, die zu Alter, Temperatur und geochemischem Verhalten in bezug auf Sr und Rb von Kluftmineralien desselben Gesteins Aussagen ermöglichen.

II. GEOLOGISCHE LAGE UND KURZBESCHREIBUNG DER UNTERSUCHTEN PROBEN

a) Allgemeine geologische Situation

Die vorliegenden Resultate stammen aus alpinen Zerrklüften des Cristallina-Granodiorites im östlichen Gotthardmassiv. Die geologische Situation ist in Fig. 1 dargestellt.

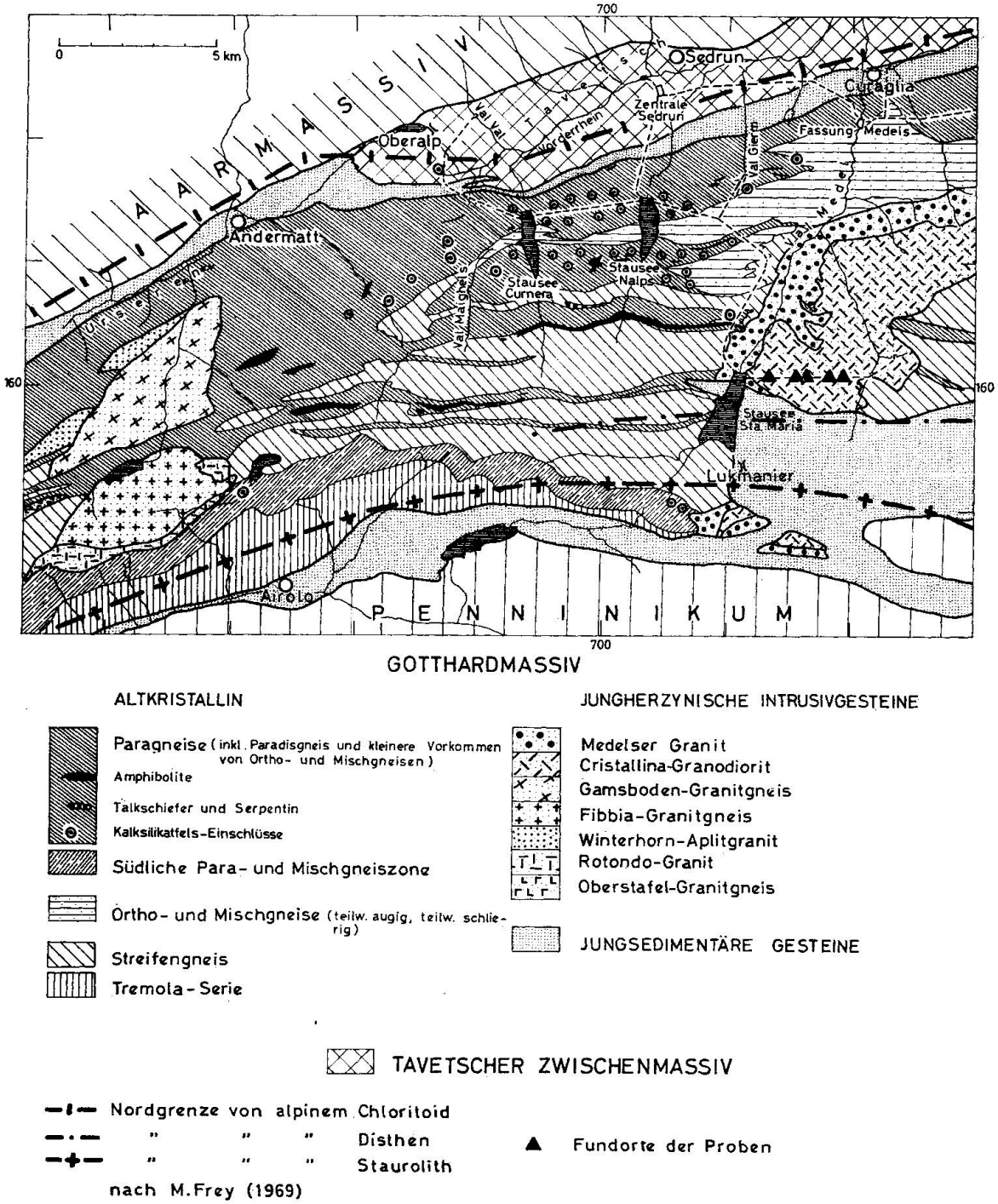

Fig. 1. Überblick über das zentrale und östliche Gotthardmassiv.

Zusammen mit dem Medelsergranit, gehört der Cristallina-Granodiorit zu den jungherzynischen Intrusivgesteinen des Gotthardmassivs. Das Alter derselben kann nach Huber (1943) und Arnold (1970) insofern eingeengt werden, als einerseits Gneistextur und Streifenlinear der Streifengneise sowohl an den Intrusivkontakten abgeschnitten werden, als auch in Xenolithen des

Medelsergranits in gedrehter Stellung eingefroren sind; andererseits aber liegen die permisch-mesozoischen Gesteine diskordant auf den Kristallingesteinen des Gotthardmassivs. Ferner sind die Streifengneise und Paragneise polymetamorph geprägt, während die jungherzynischen Gesteine nur alpin, monometamorph überprägt wurden. Sie sind also jünger als die Streifengneise, für welche ARNOLD (1970) eine Rb-Sr-Isochrone von 420 ± 17 Mill. J. angibt. Die Zirkone des Medelsergranits lieferten ferner nach GRÜNENFELDER (1962) U-Pb-Alter an Zirkonen von 270–300 Mill. J., was gut übereinstimmt mit der Rb-Sr-Isochrone von rund 260 Mill. J. am Rotondogranit nach JÄGER und NIGGLI (1964).

Die alpine Metamorphose hat den Cristallina-Granodiorit zwar selektiv, aber dennoch über grössere Bereiche penetrativ erfasst. Der dabei erreichte Metamorphosegrad liegt an der Grenze zwischen Grünschieferfazies und Amphibolitfazies. Nach FREY (1969) (siehe auch Fig. 1) liegt der Bereich des Granodiorits, aus welchem unsere Proben stammen, wenig nördlich der Disthen-Isograde, ca. 4 km nördlich der Staurolith-Isograde und ca. 10 km südlich vom ersten Auftreten alpinen Chloritoids. Aus mineralparagenetischen Überlegungen schliesst FREY auf eine Temperatur von 500°–550° C und auf Drucke von 5–8 kb (die letzteren noch unsicher) für die alpine Metamorphose im direkt südlich liegenden Mesozoikum des Lukmaniergebietes.

Für die Abkühlung nach der alpinen Metamorphose, gibt JÄGER (1961) Biotitalter von 21,7 ± 5,6 (Medelsergranit) und 31 ± 14 (Streifengneis); beide ca. 5 km nördlich unserer Klüfte.

b) Spezielle geologische Situation der untersuchten Proben

Alle untersuchten Proben wurden aus alpinen Klüften und dem entsprechenden Nebengestein im Cristallina-Granodiorit entnommen und zwar aus dem Stollen, welcher den Stausee Sta. Maria mit den Wassern der Val Cristallina und der Val Uffiern im Osten beliefert (siehe Fig. 1).

Die Proben, die genauen Fundorte und die Kluftparagenesen sind in Tab. 1 zusammengestellt. Dabei wurden die verschiedenen Klüfte mit den Buchstaben A–G gekennzeichnet. Die Fundpunkte der Proben liegen im Stollen innerhalb einer Strecke von 2,3 km.

Aus den Klüften wurden, soweit vorhanden, die Glimmer und Adulare entnommen, aus dem Nebengestein Proben für Bestimmungen an Gesamtgestein und den Glimmern. Es wurde darauf geachtet, die Proben einige Meter von der Auslaugungszone entfernt ausserhalb des direkten Einflussbereiches der Klüfte zu entnehmen.

Zwei Klüfte, B und C, liegen in einer alpin intensiv zerscherten Zone des Cristallina-Granodiorites. Der Granodiorit ist dort praktisch vollständig zu einem Sericit-Biotit-Schiefer rekristallisiert. Die übrigen Klüfte A, D, E, F

Tabelle 1. *Herkunft der Proben und Kluftparagenesen*

Kluft Laufmeter*) Landeskoordinate	Untersuchte Gesteine und Mineralien	Kluftparagenese	Bemerkungen
A. 820 705 39/160 11	Gesamtgestein Biotit/Gestein Biotit/Kluft	Quarz, Adular, Chlorit, Biotit, Pyrit, Calcit	Die Gesteinsprobe ist 1 m von der Kluft entfernt. Der Kluftbiotit stammt aus gefülltem Teil mit Quarz und Adular in Knollen
B. 1660 706 25/160 16	Gesamtgestein Biotit/Gestein Muskovit/Gestein Biotit/Kluft Adular/Kluft	Quarz, Adular, Chlorit, Biotit, Calcit, Albit, Titanit	Gesteinsprobe 8 m von der Kluft entfernt. Cristallina-Granodiorit blastomylonitisch zerschert. Biotit aus gefüllten Klüftchen
C. 1697 706 27/160 16	Biotit/Kluft Adular/Kluft	Quarz, Adular, Biotit, Calcit	Gehört zum gleichen Komplex wie Kluft B
D. 2790 707 37/160 22	Gesamtgestein Biotit/Gestein Adular/Kluft Muskovit/Kluft Biotit/Kluft	Quarz, Adular, Chlorit, Biotit, Muskovit	Gesteinsprobe 9 m von der Kluft entfernt. Muskovit sitzt auf Adular und Quarz im offenen Teil der Kluft. Biotit aus kleinem, gefülltem Hohlraum ist noch deutlich tektonisch beansprucht
E. 1923 706 50/160 17	Muskovit/Kluft Adular/Kluft	Quarz, Adular, Chlorit, Calcit, Muskovit, Magnetkies	Muskovit aus offenem Teil der Kluft
F. 3138 707 71/160 24	Muskovit/Kluft	Quarz, Adular, Chlorit, Calcit, Titanit, Erz	Muskovit aus offenem Teil der Kluft
G. 3152 707 73/160 24	Muskovit/Kluft Adular/Kluft	Quarz, Adular, Chlorit, Muskovit	Quarz und Adular bilden Knollen mit kleinen Hohlräumen. Muskovit aus offenen Hohlräumen

*) Die Metrierung beginnt beim Stausee Sta. Maria und schreitet fort nach Osten.

und G liegen in kompaktem aber stets gneisigem Granodiorit. Die Paralleltextur äussert sich in der Parallelanordnung der Biotite und in der Längung von Quarz-Feldspat-Mörteln. Der alte Mineralbestand ist dabei aber noch gut erkennbar, obwohl die Feldspäte oft sericitisiert, die Kalifeldspäte randlich albitisiert sowie Epidot und Titanit neu gebildet worden sind. Eine ausführlichere Beschreibung geben Huber (1943) und Schönbächler-Seiler (1972).

Bei den Klüften selbst handelt es sich nicht um einfache Zerrungshohlräume, sondern vorwiegend um Systeme von Adern und Knauern aus Quarz und teilweise Adular. Diese Adern und Knauer enthalten Hohlräume oder sie sind von solchen randlich begleitet. Diese Hohlräume können immerhin auch Metergrösse erreichen. Ausbleichungshöfe sind sehr unterschiedlich ausgebildet und stehen nicht im Verhältnis zur Grösse der Klüfte.

Wie schon HUBER (1943) feststellte liegt in unserem Gebiet, vereinfacht, folgende Ausscheidungsfolge in den Klüften vor: zuerst kristallisieren Quarz und Adular, die gefolgt und teilweise begleitet werden von Calcit, Epidot und Apatit. Schliesslich setzen sich Muskovit und Chlorit ab. Obwohl der Biotit ähnlich dem Chlorit in den Klüften selbst auftritt, erwähnt HUBER ihn nur in den Auslaugungszonen der Klüfte als Neubildung. Wo ein direkter Zusammenhang erkennbar ist, kann festgestellt werden, dass hier der Biotit nach Quarz und Adular gebildet wurde. Oft liegt er aber in kleinen Klüftchen, welche die Fortsetzung grösserer Klüfte bilden, und füllt dort den Hohlraum ganz aus.

Es sei noch vermerkt, dass besonders in Scherzonen die Klüfte mit ihrem Inhalt noch tektonisch deformiert sein können.

III. RESULTATE DER Rb-Sr-BESTIMMUNGEN

Es fanden folgende Konstanten Verwendung:

$$\lambda = 1{,}47 \cdot 10^{-11}\ \text{J.}^{-1}$$

$$\text{Gewöhnliches Sr:}\quad 88/86 = 8{,}432$$

$$87/86 = 0{,}7091$$

$$\text{Rb:}\quad 85/87 = 2{,}591$$

Die Isochronen wurden als einfache Regressionsgeraden mit 95% Wahrscheinlichkeit gerechnet.

Die Einzelresultate können aus Tab. 2 entnommen werden. Von drei verschiedenen Klüften ergeben Biotit und Adular aus der jeweiligen Kluft sowie Gesamtgestein und Glimmer des entsprechenden Nebengesteins je eine Rb-Sr-Isochrone. Diese sind in Fig. 2 dargestellt.

Die Rb-Sr-Isochrone der Kluft A umfasst Analysenpunkte je einer Biotitprobe aus Kluft und Nebengestein sowie einer Probe des Nebengesteins als Gesamtgestein. Der Alterswert beträgt $15{,}8 \pm 1{,}1$ Mill. J.

Die Isochrone der Kluft B ergibt sich aus Analysenpunkten von Biotit und Adular aus der Kluft sowie von Biotit, Gesamtgestein und Muskovit des Nebengesteins. Sie hat einen Alterswert von $15{,}7 \pm 0{,}7$ Mill. J. und ein initiales Sr^{87}/Sr^{86}-Verhältnis von $0{,}7310 \pm 0{,}0066$.

Die Rb-Sr-Isochrone der Kluft D besteht aus Analysenpunkten von Adular, Muskovit und Biotit der Kluft sowie Gesamtgestein und Biotit aus dem Nebengestein. Sie ergibt einen Alterswert von $15{,}4 \pm 0{,}4$ Mill. J. und ein initiales Sr^{87}/Sr^{86}-Verhältnis von $0{,}7202 \pm 0{,}0039$. Das letztere unterscheidet sich eindeutig von jenem der Kluft B.

Von drei weiteren Klüften wurden die Rb-Sr-Alter von Muskovit-Adular- und Biotit-Adularpaaren bestimmt. Das Rb-Sr-Alter von Biotit und Adular

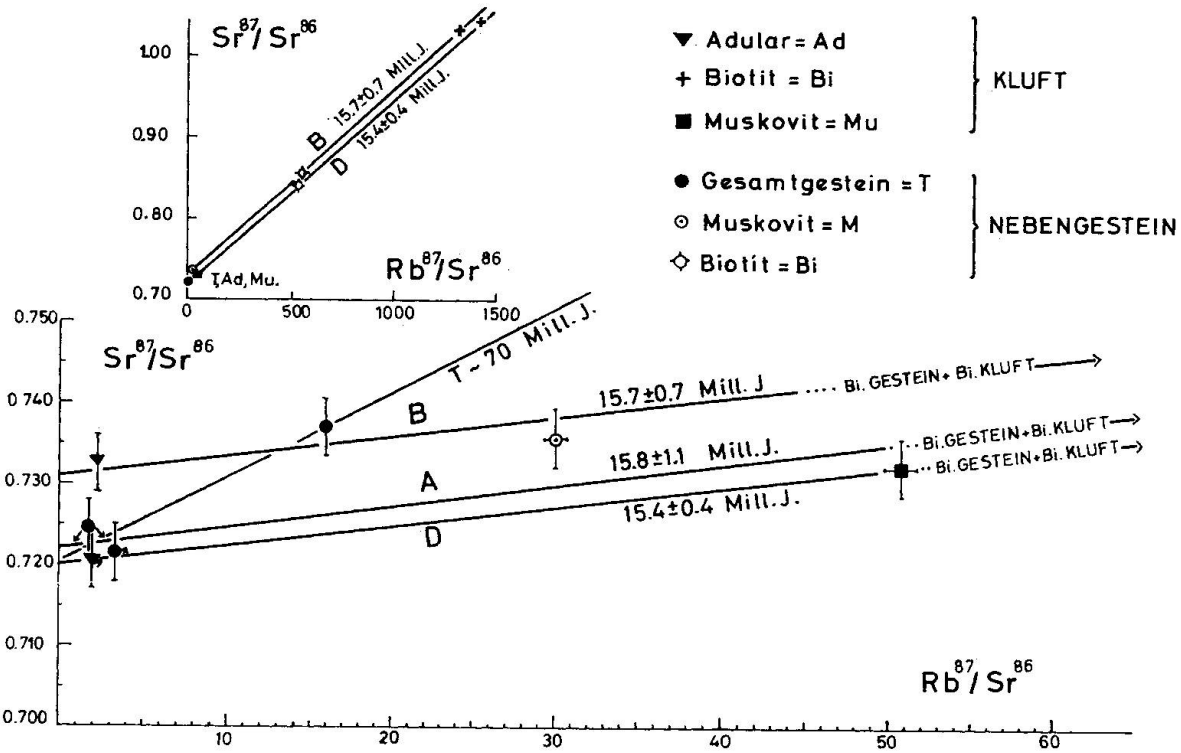

Fig. 2. Rb-Sr-Isochronen von drei verschiedenen alpinen Zerrklüften des Cristallina-Granodiorites.

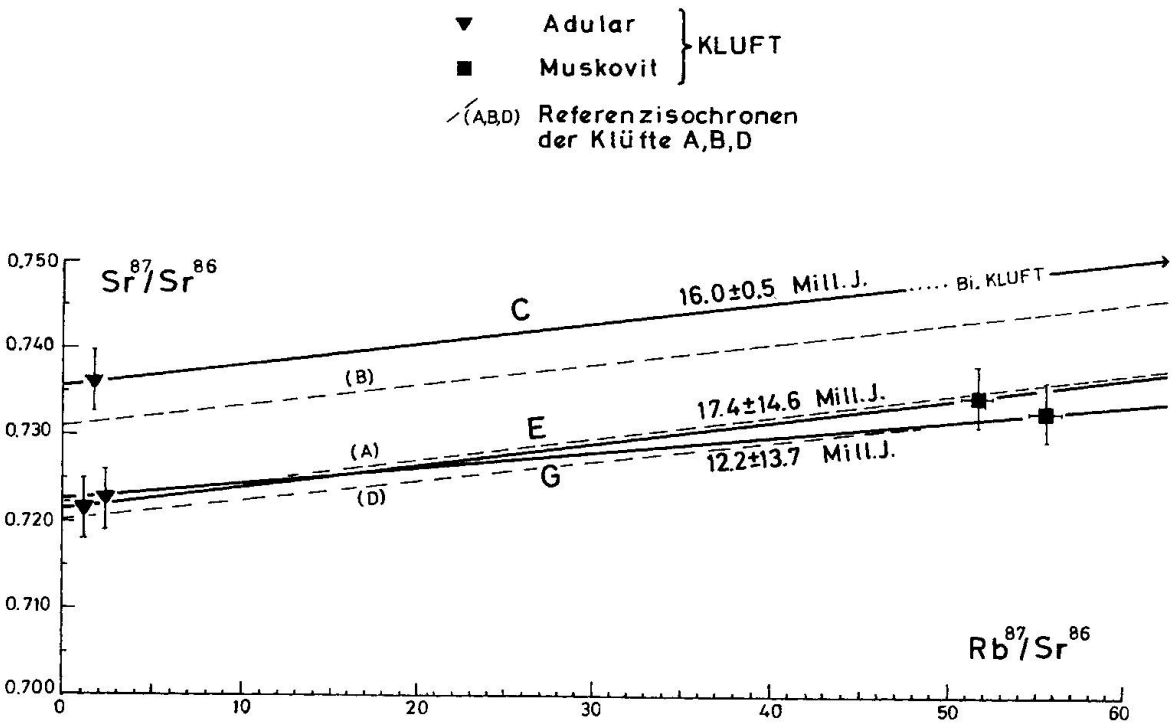

Fig. 3. Rb-Sr-Daten von Biotit-Adular- und Muskovit-Adular-Paaren mit ihren Verbindungsgeraden C, E und G. Gestrichelt sind die Referenzisochronen A, B und D aus Fig. 2.

Tabelle 2. *Resultate der Rb-Sr-Altersbestimmungen an Klüften des Cristallina-Granodiorites*

KAW Nr.	Kluft	Gestein/Mineral	Rb^{87} ppm	Sr^{87} rad. ppm	% rad.	Sr comm. ppm	Alter Mill. J.	Sr^{87}/Sr^{86}	Rb^{87}/Sr^{86}	Alter korr. Alter Isochrone
587	A	Gesamtgestein	39,5	0,323	2,2	212	—	0,7247	1,74	
578/2	A	Biotit/Gestein	197	0,0486	19,2	2,97	16,8 ± 1,7	0,8772	682,9	15,8 ± 1,1
526	A	Biotit/Kluft	218	0,0525	36,9	1,35	16,3 ± 0,8	1,123	1724	
579	B	Gesamtgestein	63,7	0,0964	2,3	41,2	102 ± 64	0,7370	15,9	
579/2	B	Biotit/Gestein	231	0,0608	17,1	4,28	17,9 ± 2,0	0,8549	554	
579/3	B	Muskovit/Gestein	115	0,0994	3,5	39,4	58,7 ± 32,1	0,7355	30,1	15,7 ± 0,7
528	B	Biotit/Kluft	235	0,0577	31,4	1,83	16,7 ± 0,9	1,033	1318	y_0[1]) = 0,7310 ± 0,0066
529	B	Adular/Kluft	120	1,270	3,2	555	—	0,7327	2,22	
530	C	Biotit/Kluft	229	0,0560	49,8	0,818	16,7 ± 0,7	1,412	2883	16,0 ± 0,5
531	C	Adular/Kluft	90,8	1,474	3,7	560	—	0,7363	1,67	
581	D	Gesamtgestein	47,5	0,205	1,8	167	—	0,7217	2,93	
581/2	D	Biotit/Gestein	183	0,0448	15,4	3,56	16,6 ± 2,0	0,8385	529	
535	D	Adular/Kluft	73,0	0,446	1,6	411	—	0,7206	1,82	15,4 ± 0,4
536	D	Muskovit/Kluft	102	0,0460	3,1	20,7	30,6 ± 20	0,7319	50,8	y_0 = 0,7202 ± 0,0039
537	D	Biotit/Kluft	198	0,0465	32,0	1,43	16,0 ± 0,9	1,042	1416	
532	E	Adular/Kluft	72,0	0,764	1,8	624	—	0,7216	1,24	17,4 ± 14,6
533	E	Muskovit/Kluft	94,4	0,0465	3,5	18,8	33,3 ± 23	0,7345	51,7	
538	F	Muskovit/Kluft	79,5	0,0391	2,9	18,9	33,3 ± 23	0,7304	43,4	
539	G	Muskovit/Kluft	92,3	0,0393	3,2	17,0	29,0 ± 18	0,7329	55,7	12,2 ± 13,7
540	G	Adular/Kluft	66,0	0,446	1,9	336	—	0,7226	2,02	

[1]) y_0 = initiales Sr^{87}/Sr^{86}-Verhältnis,
$\lambda = 1{,}47 \cdot 10^{-11}$ Jahre^{-1}. Gewöhnliches Sr: 88/86 = 8,432, 87/86 = 0,7091, Rb: 85/87 = 2,591.

der Kluft C beträgt 16,0 ± 0,5 Mill. J. bei einem ungefähren initialen Sr^{87}/Sr^{86}-Verhältnis von 0,736. Man beachte, dass die Kluft B, die nur 20 m entfernt ist, zur gleichen Scherzone gehört und ebenfalls ein hohes initiales Sr^{87}/Sr^{86}-Verhältnis zeigt (siehe Fig. 3).

Adular und Muskovit aus der Kluft E liefern einen Alterswert von 17,4 ± 15 Mill. J. und aus der Kluft G einen solchen von 12,2 ± 14 Mill. J. Der hohe Fehler resultiert aus dem niedrigen Gehalt an radiogenem Sr^{87} in den Muskoviten, der nur 3%–3,5% beträgt. Die Verbindungsgeraden zwischen Muskovit und Adular der einzelnen Paare sind in Fig. 3 eingezeichnet, wobei die Referenzisochronen der Klüfte A, B und D gestrichelt eingetragen sind. Es ist dort klar ersichtlich, dass die Steigung der Geraden zwischen Muskovit und Adular E und G nicht über den Fehlerbereich der Einzelmessungen hinaus von jener der Isochronen A, B und D abweichen.

Zusammenfassend kann folgendes ausgesagt werden:

a) Bei drei Klüften verschiedener Lokalität resultieren drei parallele Isochronen mit übereinstimmendem Alterswert von 15–16 Mill. J., aber verschiedenen, initialen Sr^{87}/Sr^{86}-Verhältnissen. Die Unterschiede der initialen Sr^{87}/Sr^{86}-Verhältnisse werden bestätigt durch den hohen Wert von rund 0,736 von Biotit und Adular der Kluft C.
b) Trotz des hohen Relativfehlers unterscheidet sich das Alter der Mukovit-Adularpaare nicht wesentlich von jenem der Isochronen.
c) Es besteht kein Altersunterschied zwischen Muskovit und Biotit in den Klüften. Ob ein solcher auch im Nebengestein fehlt, kann aus dem einzelnen analysierten Muskovit nicht eindeutig gesagt werden, zumal der Muskovit aus einer Scherzone stammt.
d) Es besteht ferner kein Altersunterschied zwischen Kluftbiotit und dem Biotit des unbeeinflussten Nebengesteins.

Zusätzlich zu diesen Informationen kann aus Tab. 2 entnommen werden, dass die Biotite der Klüfte einen eindeutig niedrigeren Gehalt an gewöhnlichem Sr aufweisen als jene des Nebengesteins, was aber erklärt werden kann durch einige Titaniteinschlüsse in den Gesteinsbiotiten.

IV. INTERPRETATION DER RESULTATE

a) Zum Alter der Kluftmineralien

Die Isochronen geben den Zeitpunkt, da vor 15–16 Mill. J. alle untersuchten Kluftmineralien, Gesteinsglimmer und Gesamtgesteine geochemisch für Rb und Sr zum geschlossenen System wurden. Zum genannten Zeitpunkt hatten die Biotite und Adulare der einzelnen Klüfte, sowie Gesamtgestein und Glimmer des entsprechenden Nebengesteins, innerhalb der Fehlergrenze das gleiche Sr^{87}/Sr^{86}-Verhältnis. Das bedeutet aber, dass mindestens die Glimmer bis vor

15–16 Mill. J. offene Systeme waren. Ob dies auch für Adular der Fall war kann nicht gesagt werden. Wäre nämlich der Adular 20–30 Mill. J. früher chemisch geschlossen worden, würde sein Altersunterschied zu den Glimmern, wegen seiner niedrigen Rb^{87}/Sr^{86}-Verhältnisse, immer noch im Fehlerbereich untergehen. Wir können zum Alter der Adulare nichts weiteres aussagen, als dass sie, als frühere Ausscheidungen, mindestens so alt sein müssen, wie die Glimmer.

Für den Biotit haben KULP und ENGELS (1963) experimentell gezeigt, dass er durch Grundwasser schon bei Zimmertemperatur in relativ kurzer Zeit für Rb und Sr zum offenen System werden kann. Um so mehr müsste man annehmen, dass heisse Kluftlösungen beim Biotit Sr-Austausch bewirken müssten. Die Schlussfolgerung, dass in biotitführenden Klüften, die Lösungen vor 15–16 Mill. J. und, wie wir später begründen werden, bei Temperaturen um 300°C aufgehört haben zu zirkulieren, liegt nahe.

Allerdings gibt es in anderen Klüften des Cristallina-Granodiorites noch Zeolithe, welche bei niedrigeren Temperaturen, und somit später kristallisiert sein dürften. Bis jetzt ist es jedoch nicht klar, ob Biotit und Zeolithe in den gleichen Klüften gebildet wurden, und damit die Kluftlösungen noch in direkten Kontakt zu den Biotiten kamen.

Von den Experimenten her muss berücksichtigt werden, dass KULP und ENGELS (1963) mit verdünnten Lösungen gearbeitet haben, während in den Klüften an verschiedenen Jonen gesättigte Lösungen vorhanden waren, über deren Zusammensetzung wir zuwenig wissen. Experimente an Biotiten, mit NaCl-Lösung und Calcit ergaben ferner nach VERDURMEN und SCHUILLING (1972), dass die Biotite, bei 1000 Bar Druck und 300–800°C in 30 Tagen, keinen messbaren Verlust an radiogenem Sr oder an Rb zeigten. Dies widerspricht aber noch den zahlreichen Rb-Sr-Bestimmungen an Gesteinsbiotiten in den Alpen.

Aus den bisherigen Informationen scheint es noch wahrscheinlicher, dass in jenen Teilen der Klüfte, in welchen unsere Biotite gebildet wurden, nach dem Zeitpunkt von 15–16 Mill. J. die Kluftlösungen nicht mehr zirkulierten.

Wie dem auch sei, da Biotit und vor allem der Muskovit in unseren Klüften nach Quarz und Adular gebildet wurden, geben die Isochronen ein Minimalalter von 15–16 Mill. J. für die Bildung der Hauptparagenese in unseren Klüften.

b) Zur Bildungstemperatur der Kluftmineralien

Biotite aus Klüften und Gesteinen geben das gleiche Alter. Ferner stammen die Biotite des Nebengesteins von Proben, die bis zu 9 m von den Klüften entfernt abgenommen wurden und nicht sichtbar von Kluftlösungen beeinflusst wurden. Nun entspricht nach JÄGER, NIGGLI und WENK (1967) das Rb-Sr-Alter der Biotite der Abkühlung derselben auf ungefähr 300°C. Das würde

für uns bedeuten, dass die Kluftbiotite bei mindestens 300° C gebildet wurden, dass aber zugleich die Kluftlösungen bei derselben Temperatur aufgehört haben, auf die Biotite einzuwirken.

Nach derselben Arbeit entsprechen Rb-Sr-Alter an Muskoviten in Gesteinen einer Abkühlung auf ca. 500° C, was sich in den Alpen in einem regional konstanten Altersunterschied zwischen Muskovit- und Biotitaltern äussert. In unseren Klüften aber besteht kein Altersunterschied zwischen Muskovit und Biotit. Aus dem Nebengestein steht zu dieser Frage nur eine einzelne Muskovitbestimmung zur Verfügung, so dass nicht bewiesen werden kann, dass dieser Altersunterschied auch in den Gesteinen unseres Gebietes fehlt. Es lässt sich deshalb nicht entscheiden, ob die Muskovitalter einer Abkühlung auf Temperaturen unter rund 500° C entsprechen, was eine minimale Bildungstemperatur von rund 500° C für dieselben implizieren würde, oder ob sie das wirkliche Bildungsalter der Muskovite, oder schliesslich einfach das Ende einer späteren Einwirkung der Kluftlösungen auf die Kluftmuskovite anzeigen. Die beiden letzten Möglichkeiten scheinen wahrscheinlicher, zumal der Muskovit in den Klüften eine relativ späte Ausscheidung ist und stets aus offenen Teilen der Klüfte stammt.

Aus der Übereinstimmung von Biotitaltern aus Kluft und Nebengestein können wir auf eine Minimaltemperatur von rund 300° C für die Hauptmineralbildung in unseren Klüften schliessen; die Übereinstimmung vom Muskovitalter mit dem Biotitalter kann aber bedeuten, dass der Muskovit entweder vor rund 15 Mill. J. gebildet worden ist, oder dass er bis herunter zu 300° C mit den Kluftlösungen sein Sr ausgetauscht hat.

Wie schon erwähnt nimmt Frey (1969) eine Temperatur von 500° C bis 550°C für die alpine Metamorphose im Lukmaniergebiet weiter südlich an. Es ist deshalb wahrscheinlich, dass die Hauptmineralbildung in unseren Klüften bei Temperaturen zwischen 300° C und 500° C stattgefunden hat. Im Vergleich dazu kommt Poty (1969) auf 400°–450° C für die Bildung von Kluftquarzen im Mt.-Blanc-Massiv auf Grund von Einschlüssen im Quarz und von Mineralparagenesen in den Klüften. Nissen (1967) gibt Temperaturen von rund 420° C für die Bildung der Kluftadulare im zentralen Bereich der Alpen, zu welchem auch das Gotthardmassiv gehört.

c) Zur Herkunft des Sr der Kluftmineralien

Es wird von den meisten Autoren berichtet, dass ein enger Zusammenhang besteht zwischen dem Mineralinhalt der Klüfte und der chemischen Zusammensetzung des Nebengesteins. Dies bestätigen auch unsere Rb-Sr-Bestimmungen.

Wie aus Fig. 3 und Tab. 2 schön ersichtlich ist, geben die Analysen der Kluftmineralien und des Nebengesteins verschiedener Lokalitäten des Cri-

stallina-Granodiorits parallele Isochronen. Die initialen Sr^{87}/Sr^{86}-Verhältnisse sind aber von Ort zu Ort verschieden. Das heisst, dass das Sr^{87}/Sr^{86}-Verhältnis der Kluftmineralien zur Zeit ihrer Bildung, jenem des unmittelbar benachbarten Nebengesteins angepasst wurden. Dort wo das Nebengestein höhere Sr^{87}/Sr^{86}-Verhältnisse hatte, wie etwa bei den Klüften B und C, dort haben auch die untersuchten Kluftmineralien Sr mit entsprechend höherem Sr^{87}/Sr^{86}-Verhältnis eingebaut und umgekehrt. Das heisst nichts anderes, als dass die Kluftmineralien ihr Sr direkt aus dem unmittelbar benachbarten Nebengestein bezogen haben.

Ein weiterer Hinweis dazu ergibt sich aus der Tatsache, dass zum Teil nur einige hundert Meter südlich unserer Klüfte, karbonatische mesozoische Gesteine auftreten. Wäre Sr von diesen in unsere Klüfte gelangt, dann wären nicht so hohe initiale Sr^{87}/Sr^{86}-Verhältnisse zu erwarten.

Im Gegensatz dazu stellt Baertschi (1957) anhand von O^{18}/O^{16}- und C^{13}/C^{12}-Bestimmungen fest, dass die Materialzufuhr zur Bildung von Kluftkarbonaten inhomogen war, sogar innerhalb eines einzelnen Kristalls. Er zeigt dazu aber auch, dass der H_2O^{18}-Gehalt der Kluftlösungen in karbonatarmen Gneisen, wesentlich verschieden ist von jenem in karbonatreichen Gesteinen, und weitgehend vom Austausch mit dem umgebenden Gneis diktiert wird. Dazu muss auch bemerkt werden, dass Baertschi die leichtflüchtigen Bestandteile CO_2 und H_2O untersuchte, die auch nach Stalder (1964) nicht nur aus der unmittelbaren Umgebung der Klüfte bezogen werden können.

Ob nun das Sr dank seiner Isotopenzusammensetzung als «tracer» für die schwerflüchtigen Bestandteile der Kluftmineralien betrachtet werden kann, ist zwar ungewiss. Immerhin dürfte es für die Begleitelemente in unseren Kluftglimmern und Kluftadularen wohl zutreffen.

d) Zum Verhalten des Cristallina-Granodiorits bei der alpinen Metamorphose

Wie schon Niggli (1944) und Huber (1943) klar zeigten, hat die alpine Metamorphose auf die Gesteine des östlichen Gotthardmassivs recht selektiv eingewirkt. Das kann auch am Cristallina-Granodiorit festgestellt werden. Er wurde in unserem Bereich praktisch penetrativ durchbewegt, wobei ihm eine gneisige Schieferung aufgeprägt wurde. Zusätzlich dazu wurde er in Zonen so stark zerschert, dass er heute dort den Aspekt eines Glimmerschiefers zeigt. Aus einer solchen Scherzone stammen nun auch die Proben der Klüfte B und C. Das Nebengestein weist dort ein recht hohes Rb/Sr-Verhältnis auf. Versucht man nun aus den Gesamtgesteinen in Fig. 2 ein Alter zu berechnen, kommt man nicht etwa auf 300 Mill. J., sondern auf ca. 70 Mill. J. Das bedeutet, obwohl nur drei Messungen vorliegen, dass der Cristallina-Granodiorit in Scherzonen für Rb und Sr alpin zum offenen System wurde. Das ergänzt die von Hunziker (1970) und von Hanson et al. (1969) gemachten

Beobachtungen, wonach Gesamtgesteine in tektonisch aktiven Zonen, bei intensiver retrograder Umwandlung, für Rb und Sr zu offenen Systemen werden können.

V. ZUSAMMENFASSUNG DER SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Rb-Sr-Isochronen der verschiedenen Klüfte aus dem Cristallina-Granodiorit zeigen, dass die Glimmer vor rund 15–16 Mill. J. für Rb und Sr zum geschlossenen System wurden. Das bedeutet, dass die Hauptmineralbildung in den untersuchten Klüften zu diesem Zeitpunkt abgeschlossen war, und dass die Zirkulation von Kluftlösungen im Kontakt mit Biotiten im wesentlichen aufgehört haben dürfte. Wir erhalten ein Minimalalter von 15–16 Mill. J. für die Hauptmineralbildung.

Da die Biotite der Klüfte und des Nebengesteins das gleiche Alter ergeben und die Biotitalter des Nebengesteins als Abkühlungsalter aufgefasst werden müssen, betrug die Bildungstemperatur der hauptsächlichsten Kluftmineralien mindestens rund 300° C. Sie dürfte zwischen 300° und 550° C gelegen haben.

Da die Isochronen verschiedener Lokalitäten, bei gleichem Alter, verschiedene initiale Sr^{87}/Sr^{86}-Verhältnisse zeigen, können wir annehmen, dass die Kluftmineralien ihr Sr und wahrscheinlich auch die übrigen Elemente vom unmittelbar benachbarten Nebengestein bezogen haben.

Schliesslich kann aus den Rb-Sr-Daten an Gesamtgesteinen entnommen werden, dass der Cristallina-Granodiorit in Scherzonen während der alpinen Metamorphose für Rb und Sr zum offenen System wurde.

* * *

Diese Arbeit wurde vom Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung finanziert, wofür ich zu grossem Dank verpflichtet bin. Frau Prof. Dr. E. Jäger danke ich herzlich für die grosszügige Förderung dieser Arbeit und die kritische Durchsicht des Manuskripts. Mit anregenden Diskussionen standen mir die Herren Prof. Dr. E. Niggli, Dr. H. A. Stalder, Dr. J. C. Hunziker und Dr. B. Gulson zur Seite, wofür ihnen mein Dank zugesichert sei. Für die Mithilfe im Labor danke ich Herrn R. Brunner, Herrn R. Siegenthaler und Frau Ch. Zgraggen herzlich.

Die Kraftwerke Vorderrhein AG, für welche ich den Stollen aufnahm, unterstützten in verdankenswerter Weise meine Feldarbeit.

LITERATUR

SMPM = Schweiz. Mineral. u. Petrogr. Mitt.

Arnold, A. (1970): On the History of the Gotthard Massif (Central Alps, Switzerland). Eclogae geol. Helv. 63, 29–30.

— (1970): Die Gesteine der Region Nalps-Curnera im nordöstlichen Gotthardmassiv, ihre Metamorphose und ihre Kalksilikatfelseinschlüsse. Beitr. geol. Karte Schweiz, N. F. 138.

ARNOLD, A. und JÄGER, E. (1965): Rb-Sr-Altersbestimmungen an Glimmern im Grenzbereich zwischen voralpinen Alterswerten und alpiner Verjüngung der Biotite. Eclogae geol. Helv. 58, 359–390.

BAERTSCHI, P. (1957): Messung und Deutung relativer Häufigkeitsvariationen von O^{18} und C^{13} in Karbonatgesteinen und Mineralien. SMPM 37, 73–152.

BAGGIO, P., FERRARA, G. and MALARODA, R. (1967): Results of some Rb/Sr Age Determinations of the Rocks of the Mont-Blanc Tunnel. Boll. Soc. Geol. ital. 86, 193–212.

FREY, M. (1970): Die Metamorphose des Keupers vom Tafeljura bis zum Lukmanier-Gebiet. Beitr. geol. Karte, Schweiz, N. F. 137.

GRÜNENFELDER, M. (1962): Mineralalter von Gesteinen aus dem Gotthardmassiv. SMPM 42, 6–7.

HANSON, G. N., GRÜNENFELDER, M. and SOPTRAYANOVA, G. (1969): The Geochronology of a Recristallized Tectonite in Switzerland – the Roffna Gneiss. Earth Pla. Sci. Lett. 5, 413.

HUBER, H. M. (1943): Die Kluftminerallagerstätten im südöstlichen Gotthardmassiv. SMPM 23, 475–537.

— (1943): Physiographie und Genesis der Gesteine im südöstlichen Gotthardmassiv. SMPM 23, 72–260.

HUNZIKER, J. C. (1970): Polymetamorphism in the Monte Rosa, Western Alps. Eclogae geol. Helv. 63, 151–161.

JÄGER, E. (1961): Rb-Sr Age determinations on Micas and Total Rocks from the Alps. J. geophys. Res. 67, 5293–5306.

JÄGER, E. und NIGGLI, E. (1964): Rubidium-Strontium-Isotopenanalysen an Mineralien und Gesteinen des Rotondogranites und ihre geologische Interpretation. SMPM 44, 61–81.

JÄGER, E., NIGGLI, E. und WENK, E. (1967): Rb-Sr Altersbestimmungen an Glimmern der Zentralalpen. Beitr. geol. Karte Schweiz, N. F. 134.

KULP, J. L. and ENGELS, J. (1963): Discordances in K-Ar and Rb-Sr ages. Radioactive Dating, Intern. Atim. Energy, Vienna, 219.

LEUTWEIN, F., POTY, B., SONET, J. and ZIMMERMANN, J. L. (1970): Age des cavités à cristaux du Mont-Blanc. C. R. Acad. Sci. Paris. 271, 156–158.

NIGGLI, E. (1944): Das westliche Tavetscher Zwischenmassiv und der angrenzende Nordrand des Gotthardmassivs. SMPM 24, 58–301.

NISSEN, H. U. (1967): Domänengefüge, Natriumgehalt, Natriumentmischung und Gitterkonstanten von Alkalifeldspaten (Mikroklin, Orthoklas, Adular) der Schweizeralpen. SMPM 47, 1140–1145.

POTY, B. (1969): La croissance des cristaux de quartz dans les filons sur l'exemple du filon de La Gardette (Bourg d'Oisans) et des filons du massif du Mont-Blanc. Sciences de la Terre, Mem. 17.

PURDY, J. und STALDER, H. A.: Erscheint in SMPM 53/1, 1973.

SCHÖNBÄCHLER-SEILER, S. M. (1972): Schwerermineralien im Cristallina-Granodiorit (östliches Gotthardmassiv). Diss. ETH Zürich, Juris-Verlag, Zürich.

STALDER, H. A. (1964): Petrographische und mineralogische Untersuchungen im Grimselgebiet (Mittleres Aarmassiv). SMPM 44, 187–398.

VERDURMEN, E. A. TH. and SCHUILLING, R. D. (1972): A Laboratory experiment on the mobility of radiogenic Sr in biotite under hydrothermal conditions. Abstract, II European Coll. of Geochronology, Heidelberg.

Manuskript eingegangen am 15. September 1972.