

# Heterogenität akzessorischer Zirkone und die petrogenetische Deutung ihrer Uran/Blei-Zerfallsalter. I, Der Zirkon des Granodioritgneises von Acquacalda (Lukmanierpass)

Autor(en): **Grünenfelder, Marc**

Objektyp: **Article**

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

Band (Jahr): **43 (1963)**

Heft 1: **Festschrift Robert L. Parker : zu seinem 70. Geburtstag : 1. Mai  
1963**

PDF erstellt am: **11.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-33450>

## **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.

# Heterogenität akzessorischer Zirkone und die petrogenetische Deutung ihrer Uran/Blei-Zerfallsalter

## I. Der Zirkon des Granodioritgneises von Acquacalda (Lukmanierpass)

Von *Marc Grünenfelder* (Zürich)

Mit 3 Tabellen und 12 Textfiguren

### Zusammenfassung

In einer Probe von Granodioritgneis von Acquacalda (südöstliches Gotthardmassiv) wurde eine heterogene Zirkonvergesellschaftung festgestellt. Die Zirkone lassen sich nach ihrem Kristallbau und nach Gehalt und Verteilung der Spurenelemente in zwei Sorten unterteilen: 1. optisch durchsichtige Zirkone mit ungestörtem Gitterbau und geringem Gehalt und homogener Verteilung der Spurenelemente und 2. milchig-trübe Zirkone mit Domänenstruktur und mit höherem Gehalt und inhomogener Verteilung der Fremdionen. Ferner folgt aus den OH-Spektren im 3- $\mu$ -Gebiet, dass in den milchig-trüben Kristallen wesentlich höhere Mengen an H<sub>2</sub>O eingeschlossen sind. Die beiden Zirkonsorten wurden unter dem Binokular getrennt und auf U und Pb analysiert.

Die trübe, uranreiche Zirkonsorte (1670 ppmU) besitzt ein höheres U/Pb-Verhältnis, welches einem jüngeren Zerfallsalter von 210 Millionen Jahren entspricht. Bei der durchsichtigen Zirkonsorte (579 ppmU) ergab sich hingegen ein Alter von 305 Millionen Jahren, welches mit den heute bekannten Zirkonalter herzynischer Granite (275—315 Millionen Jahre) im Gotthardmassiv übereinstimmt. Das Auftreten von zwei verschiedenen U/Pb-Verhältnissen wird in Zusammenhang mit den festgestellten Unterschieden im Kristallbau und in der chemischen Zusammensetzung der beiden Zirkonsorten diskutiert. Die inhärenten Eigenschaften der trüben Kristalle (zum Beispiel Wassereinschlüsse, starke Gitterstörungen) sind Hinweise für ein teilweise offenes System und erklären das jüngere Zerfallsalter dieser Zirkonsorte.

Verschiedene petrogenetische Interpretationen werden behandelt. Eine mögliche Interpretation ist die folgende: Der Zirkon ist zur herzynischen Zeit unter variablen Bedingungen (unterschiedliches Stoffangebot) gewachsen. Eine spätere Temperaturerhöhung hat die starke granoblastische Rekristallisation des Gesteins verursacht und gleichzeitig selektive Umsetzungen in der Zirkonsubstanz hervorgerufen. Ein solcher Prozess könnte zur Zeit der alpinen Gebirgsbildung abgelaufen sein.

### Abstract

Different zircon populations have been observed in a specimen of granodioritegneiss from Acquacalda (southeastern part of the Gotthard massif). The zircon concentrate can be separated into two species: 1. optically translucent zircons with undistorted crystal structure containing a small amount and a homogenous distribution of trace elements and 2. milky-opaque zircons showing mosaic structure and containing larger amounts and inhomogenous distribution of trace elements. Furthermore, measurements of the OH-bands in the  $3\ \mu$  region reveal differences in the water content of the two species, the milky-opaque crystals containing on the average five times more  $H_2O$  as submicroscopic inclusions than the optically translucent ones. The two zircon species were separated under the binocular and analyzed for their U and Pb content. The milky-opaque species contains a higher amount of U (1670 ppm U), shows a higher U/Pb ratio and accordingly a younger U/Pb age of 210 million years. The translucent zircon species gives, however, a U/Pb age of 305 million years, which agrees with zircon ages of 275–315 million years found for the hercynian granites of the same tectonic unit. The existence of individual U/Pb-systems within the same rock is being discussed on the basis of the observed differences in the crystal structure and chemical composition. The inherent properties of the milky-opaque crystals are indications for a partly opened system and give an explanation for the younger decay age of this zircon species.

From the petrological point of view, these observed relationships are extremely important. One possible petrogenetic interpretation, among others, is the following: The crystals grew originally at hercynian time under changing chemical environments (e. g. variable uranium content of the zircon determined in the original crystallization). A later raise in temperature caused the intensive granoblastic recrystallization of the host rock and altered selectively the zircon-concentrate. These processes may have happened during the alpine metamorphism.

### I. Einführung

In einer kürzlich erschienenen Arbeit haben GRÜNENFELDER und HAFNER (1962) über morphologische und röntgenographische Beobachtungen an akzessorischen Zirkonen des Rotondogranites berichtet, die darauf schliessen lassen, dass ein beträchtlicher Teil des primären Zirkonkristallisats durch Rekristallisation und Resorption verändert worden ist. Dabei konnte festgestellt werden, dass eine *mikrokristalline Umsetzung* sowohl *ganze*, morphologisch als Einkristall erscheinende Zirkonindividuen, wie auch nur *Kristallbezirke* eines Einzelkornes erfasst habe. Die U/Pb-Verhältnisse des Zirkonkonzentrates entsprechen einem Zerfallsalter von 140 Millionen Jahren, das die Autoren infolge der inhärenten Eigenschaften der analysierten Zirkonsubstanz als das Resultat einer Störung des radioaktiven Gleichgewichtes deuten.

Die nachgewiesene, *selektive* Veränderung der Zirkone wurde mit

einem nachträglich, postherzynisch, im Gestein abgelaufenen Prozess in Verbindung gebracht. Insbesondere war auffallend, dass die Zirkonfraktion des Rotondogranites sich durch das *heterogene* Erscheinungsbild *eindeutig* von jener *homogenen* der *Fibbia- und Gamsbodengneise* der gleichen tektonischen Einheit unterscheidet, deren U/Pb-Zerfallsalter (vgl. GRÜNENFELDER, 1962, und diese Arbeit, S. 354) von 275—315 Millionen Jahren mit den herrschenden Ansichten über ein herzynisches Alter dieser Granitintrusionen vereinbar sind (vgl. E. NIGGLI, 1948 und 1953).

Es war deshalb naheliegend, zu fragen, ob nicht durch geeignetes *Fraktionieren* einer repräsentativen Zirkonprobe eines Gesteins, *unterschiedliche U/Pb-Zerfallssysteme* nachgewiesen werden könnten, deren Verschiedenartigkeit mit der Art und dem Ausmass der *Heterogenität* der Zirkonsubstanz eng verknüpft wäre.

Um solche Zusammenhänge abzuklären, ist eine Trennung in einzelne Zirkonfraktionen erforderlich, die sich möglichst genau nach chemischen und physikalischen Gesichtspunkten zu richten hat. Ist erst jede Willkür im Trennverfahren vermieden, so wird der Nachweis von U/Pb-Zerfallssystemen in akzessorischen Zirkonen nicht nur eine „Altersbestimmung“ liefern, sondern auch wichtige Aussagen über Kristallisationsbedingung und Metamorphose des Minerals gestatten, die für die Petrogenese von entscheidender Bedeutung sind.

Bei der weiteren, geochronologischen Bearbeitung des Gotthardmassivs stellten wir in Zirkonkonzentraten verschiedener Gesteine (siehe auch S. 355), darunter in einer Probe des Granodioritgneises von Acquacalda, *heterogene* Zirkonpopulationen fest. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit ersten Analysen, die wir bei der Untersuchung von zwei Zirkonfraktionen derselben Granodioritgneisprobe erhielten.

Die Resultate wurden petrogenetisch ausgewertet, wenngleich es von vorneherein klar war, dass jede einfache, modellartige Vorstellung nur ein oberflächlicher Versuch sein kann, im äusserst komplizierten Gebirgsbau der Alpen die erkennbaren Vorgänge zu deuten.

## II. Geologische Situation und kurze Beschreibung des Gesteinsgefüges

Die Granodioritgneise, welche an den Hängen der sogenannten Selva secca, südwestlich Acquacalda auftreten, bilden zusammen mit einer südlich angrenzenden, granitischen Randfazies ein Kristallin, welches gänzlich von mesozoischen Sedimenten umhüllt ist. Die unmittelbar angrenzenden Gesteine der Trias zeigen keine Kontaktmetamorphose.



In bezug auf die tektonische Stellung dieses Kristallins wurde in einer älteren Arbeit (vgl. W. VAN HOLST-PELLEKAAN, 1913) die Auffassung vertreten, dass es sich um eine „wurzellose, schwimmende Scholle von Tessinergneis“ (l. c., S. 11) handle, die *auf* den mesozoischen Sedimenten der Scopimulde liege. Andererseits wurde in neuerer Zeit auf eine Ähnlichkeit in den Verbandsverhältnissen und der mineralogischen und chemischen Zusammensetzung dieser Gesteine sowie jener zwischen Pizzo dell'Uomo und Alpe di Gana, mit den nördlich des Lukmanierpasses auftretenden, stockartig geformten Medelser-Granitgneisen und Crystallinagranodioritgneisen hingewiesen (vgl. dazu P. NIGGLI u. a., 1936; H. M. HUBER, 1943), die eine tektonische Zugehörigkeit zum Gotthardmassiv eher wahrscheinlich macht. Das Kristallin von Acquacalda bildet dementsprechend den südöstlichsten, isolierten Ausläufer des Gotthardmassivs. Fig. 1 orientiert über die geologische Lage. Darin

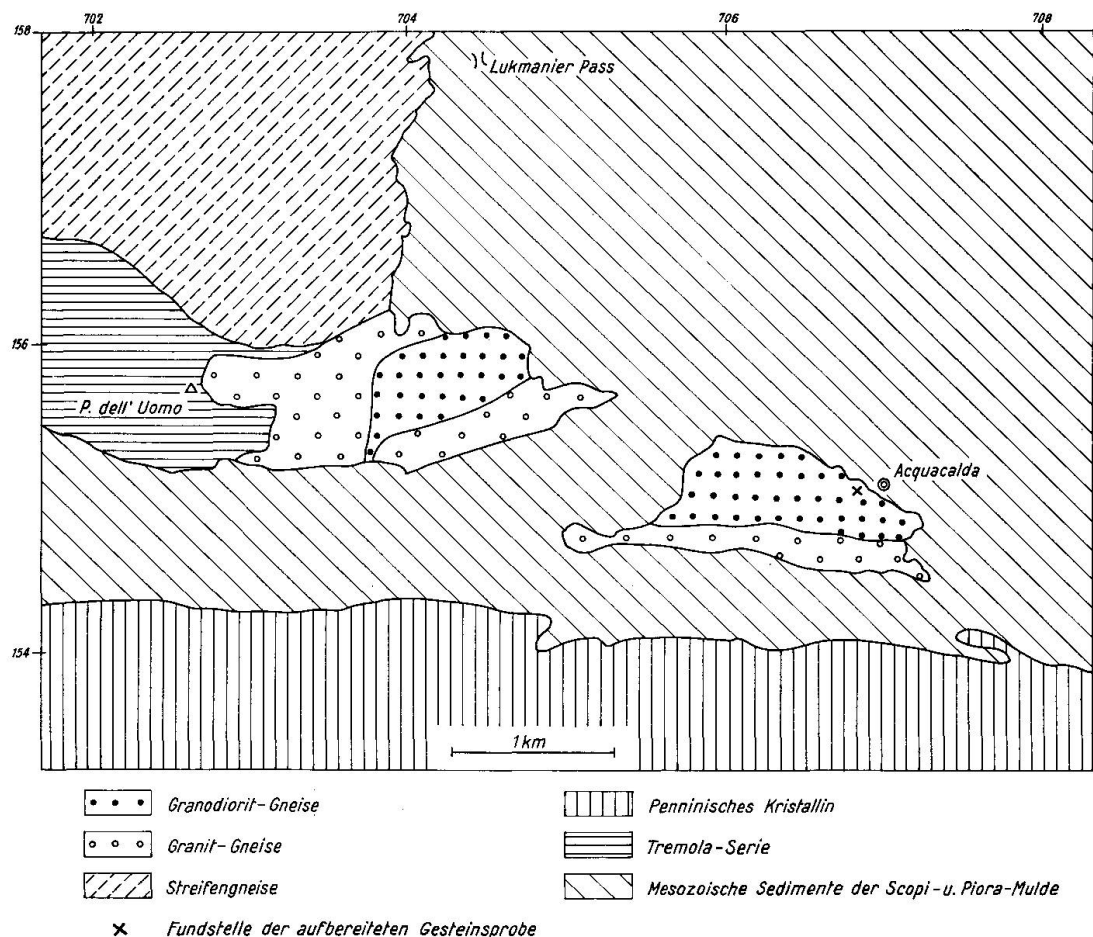


Fig. 1. Das südöstliche Gotthardmassiv.

ist auch die Fundstelle der aufbereiteten Gesteinsprobe eingetragen (Koord. 706.88/155.10).

Die folgende, kurze Charakterisierung des Mineralbestandes und des Gefüges beschränkt sich auf das für die vorliegende Untersuchung aufbereitete Probenmaterial.

#### a) Mineralbeschreibung

##### *Quarz*

Das Mineral kommt im allgemeinen in den folgenden beiden Formen vor:

- α) Weitaus am häufigsten treten xenomorphe, 0,1—0,4 mm grosse Kristalle auf, die keine oder nur eine geringe undulöse Auslöschung zeigen. Sie befinden sich in parallel zueinander verlaufenden Lagen und Schichten, in welchen sie schwach eingeregelt sind. Verbreitet sind auch 0,3—1 mm grosse, gelängte Quarznester, mit gleichkörnigen, verzahnten Kristallen, die eine etwas stärkere undulöse Auslöschung aufweisen.
- β) Als „Tropfenquarz“ in isometrischer, häufig kugeliger, mitunter nahezu idiomorpher Form als deutlich geregelter Einschluss in sauren Plagioklasen, Kalifeldspäten und seltener Biotiten.

##### *Feldspäte*

##### Plagioklas

Die sauren Plagioklase zeigen allgemein drei verschiedene Ausbildungen:

- α) 0,1—0,3 mm grosse, meist hypidiomorphe, z. T. polysynthetisch verzwilligte Kristalle, die zusammen mit Quarz den Hauptbestand des Granitgefüges bilden. Die Körner sind frei von Fremdmineralien und weisen nur eine *sehr geringe* Zersetzung auf.
- β) 0,5—3 mm grosse Plagioklase mit gelappten, xenomorphen Rändern, an welchen vereinzelt myrmekitische Verwachsungen mit Quarz festgestellt werden. Das wesentliche Merkmal dieser Plagioklase sind hingegen die *poikiloblastischen* Interpositionen, mit tropfenartigem Quarz, Kalifeldspat und Plagioklaskristallen abweichender Zusammensetzung. An den Rändern ist meist eine deutliche Albitisierung erkennbar. In den Kernpartien erscheint eine etwas diffuse polysynthetische Verzwilligung zwischen einheitlichen Domänen mit unterschiedlicher Lichtbrechung (vgl. Fig. 2).
- γ) Relativ selten trifft man zirka 0,5—1 mm grosse, hypidiomorphe Plagioklase, mit feinkörnigen Füllungsaggregaten von Serizit und Epidot an, deren Gefüge jenen von H. M. HUBER (1943) im Cristallinagranodiorit aus dem Val Cristallina beschriebenen entspricht. Im Schnitt sind sie durchwegs von Quarz umschlossen.

##### Kalifeldspat

Es handelt sich um Mikrokline (intermediär), deren Begrenzung stets xenomorph mit dem Gefüge verzahnt ist. Eine scharf gegitterte Albit-Periklinverzwilligung

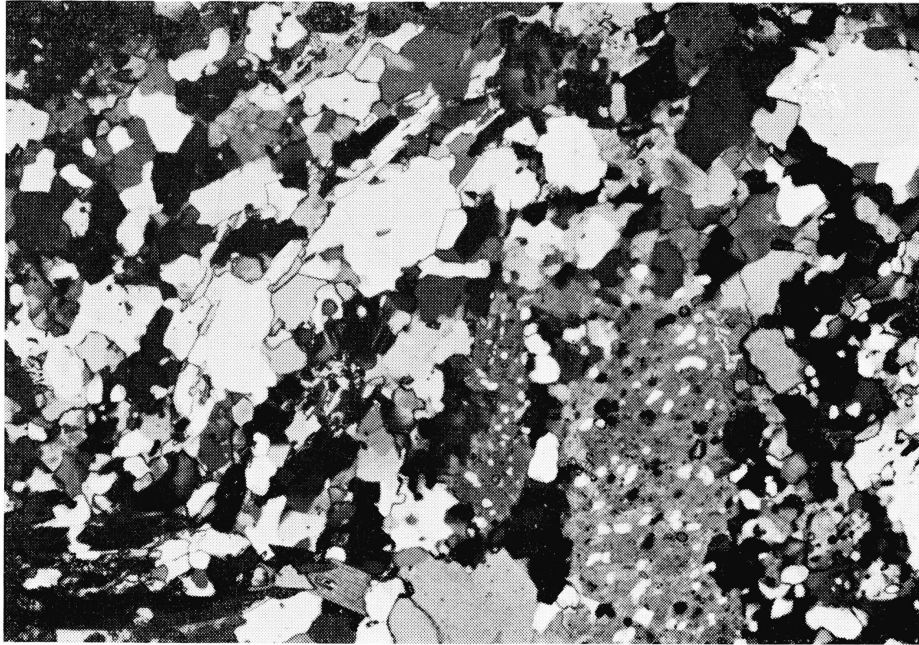


Fig. 2. Xenomorphe Plagioklasblasten (z. T. albitisiert) in einem granoblastischen Biotit-Quarzgefüge. Granodioritgneis, Acquacalda, Vergr.  $30 \times$ .

lingung ist relativ selten erkennbar. Mikroskopisch sichtbare Albitausscheidungen konnten an dem überprüften Probenmaterial nicht nachgewiesen werden. Ein verbreitetes Auftreten bilden Kristalle, die als mehr oder weniger xenomorphe Einschlüsse in Plagioklasen vorhanden sind. Die Zersetzung der Kristalle ist gering. Manche Körner enthalten hingegen idiomorphen Apatit und Epidot.

#### *Biotit*

Die häufigste Ausbildungsart bilden 0,1—2 mm, z. T. auch grössere, unzeretzte Kristalle, die sich in dünnen Lagen und Schmitzen ansammeln und schwach ausgerichtet sind. Andere Individuen liegen deutlich quer dazu. In einzelnen Biotitnestern findet man verbogene, etwas ausgebleichte und xenomorph begrenzte Kristalle, die ausgezeichnete Sagenitgewebe zeigen. In solchen Körpern ist eine fortgeschrittene Zersetzung unter Bildung von Epidot, Chlorit und Erz festzustellen.

#### *Muskowit*

Abgesehen von der bereits erwähnten, serizitischen Überprägung der Plagioklasart  $\gamma$ , gibt es sehr häufig selbständige Muskowitpakete (Korngrösse bis zu 1 mm), die meist mit Biotit zusammen vorkommen. Einzelne, schlecht geregelte Muskowitblätter sind an Korngrenzen grösserer Feldspatkristalle gebunden.

#### *Epidot*

Das Mineral bildet einen wesentlichen, sekundären Gemengteil. Es geht in mehr oder weniger idiomorpher Ausbildung (Korngrösse 0,1—0,6 mm) zusammen mit

Biotit oder gliedert sich in langgezogenen Schnüren parallel zur Texturfläche ein. Auch ummanteln Epidote die spärlich vorhandenen Orthite.

Weitere sekundäre Gemengteile sind: *Titanit*, *Zirkon*, *Orthit*, *Apatit*, *Rutil*, *Chlorit* und *Erz*.

#### b) Das Gesteinsgefüge

In der gleichkörnigen, stellenweise porphyrtartigen Gefügestruktur des Granodioritgneises von Acquacalda ist wohl die Hauptmenge der Mineralkomponenten *blastisch* umkristallisiert. Blastische Neubildungen stellen auch die Epidote dar, die nicht als Zersetzungprodukte anderer Komponenten gedeutet werden können, sondern gleichzeitige, mit dem Gesamtgefüge kristallisierte Aggregate bilden. Abgesehen von einer sehr geringen Serizitisierung der Plagioklase und einer schwachen Katakklase der Quarze, ist der Mineralbestand nach der Rekristallisation kaum mehr verändert worden.

Das Gesteinsgefüge lässt sich unserer Meinung nach am ehesten als das Resultat einer bedeutenden blastischen Überprägung einer prä- bis parakristallinen Deformation eines Altbestandes (vgl. hierzu K. R. MEHNERT, 1957) betrachten. Hinweise auf reliktsche Strukturen sind durch das sporadische Auftreten stark zersetzter und etwas verbogener Biotitblätter gegeben und vielleicht auch in den rekristallisierten Quarznestern zu finden, die möglicherweise ältere, grosse Quarze abbilden.

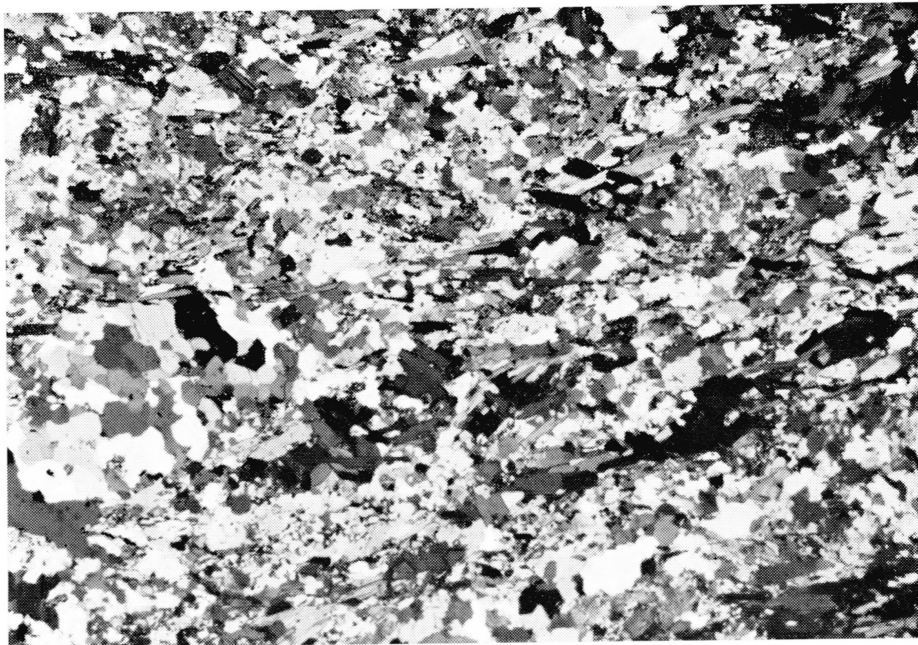


Fig. 3. Gefügebild des Granodioritgneises, Acquacalda, Vergr. 10 × .

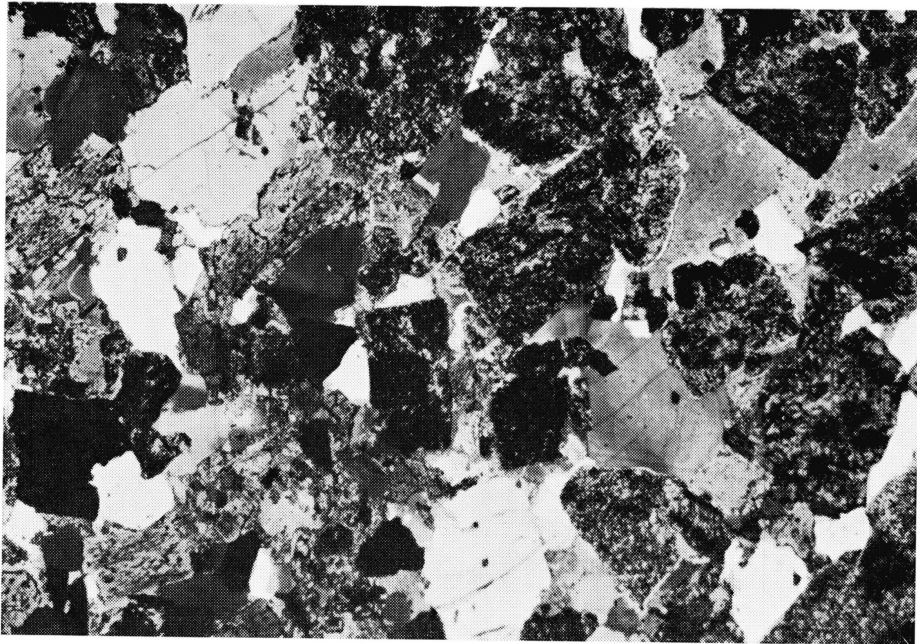


Fig. 4. Gefügebild des Crystallinagranodiorites, Pardatsch, Vergr.  $10 \times$ .

Ein Vergleich der Fig. 3 und 4 lässt ferner den grossen Unterschied im Gefüge zwischen dem Granodioritgneis von Acquacalda und jenem der Granodiorite aus dem Val Crystallina erkennen. Im Gefüge des Gneises weisen nur die relativ seltenen, mit Serizit und Epidot gefüllten Plagioklase (Plagioklasart  $\gamma$ ) auf eine mögliche primäre Verwandtschaft beider Gesteine hin.

### III. Der Zirkon

Für die vorliegenden Untersuchungen lag ein Zirkonkonzentrat von insgesamt 1,6 g vor, das wir aus einem 45 kg schweren Gesteinsblock gewonnen haben.

Schon bei einer ersten, oberflächlichen Betrachtung der Zirkone im Binokular war auffallend, dass *mehrere Zirkonsorten in bezug auf ihre optische Transparenz zu unterscheiden sind*. Die genauere Beobachtung erlaubte eine Unterteilung in eine *milchig-trübe*, eine *durchsichtige* und eine mengenmässig untergeordnete, gemischte, *trüb-durchsichtige* Zirkonfraktion — Bezeichnungen, die wir im folgenden jeweils für die Charakterisierung der Zirkonsorten verwendet haben. Die Auszählung repräsentativer Proben verschiedener Korngrössenfraktionen ergab, wie Tabelle 1 zeigt, eine unterschiedliche Verteilung der oben bezeichneten Zirkonsorten.



Nachdem, wie unten ausgeführt, die Unterscheidung in einen durchsichtigen und einen milchig-trüben Anteil mit weiteren und tiefergehenden Merkmalen zusammenhängt, erschien uns die Aufteilung des Zirkonkonzentrates nach Korngrösse mineralogisch unbegründet zu sein. Ver-

Tabelle 1. Anteil der Zirkonsorten in verschiedenen Korngrössenfraktionen

Korngrössenbereich	durchsichtige Kristalle	trüb-durchsichtige Kristalle	milchig-trübe Kristalle
	Anteil in %		
< 20 DIN	65	12	23
< 40 DIN	56	17	27
< 80 DIN	41	14	45



a) Zirkonkonzentrat



b) durchsichtige Zirkonsorte



c) milchig-trübe Zirkonsorte

Fig. 5. Aufteilung des Zirkonkonzentrates, Granodioritgneis von Acquacalda, Vergr.  $15\times$ .

suche, das Zirkonkonzentrat mit dem Magnetscheider zu trennen, gaben keine befriedigende Ergebnisse, wenngleich nach wiederholten Arbeitsgängen gewisse Anreicherungen einer Zirkonsorte zu beobachten waren. Es war daher notwendig, eine Trennung der Zirkonsorten unter dem Binokular vorzunehmen, was sehr mühsam und zeitraubend war<sup>1)</sup>. Fig. 5 zeigt Aufnahmen des aufbereiteten Konzentrates und der daraus gewonnenen, durchsichtigen und milchig-trüben Zirkonsorten, die getrennt analysiert wurden.

#### a) Äussere Merkmale der Heterogenität

Im wesentlichen handelt es sich um Erscheinungen, die bereits bei der morphologischen Untersuchung der Zirkone des Rotondogranits (vgl. GRÜNENFELDER und HAFNER, 1962, S. 186) aufgeführt wurden. Es seien hier nur kurz einige hervorstechende Merkmale beschrieben. Das Konzentrat zeigt in allen untersuchten Kornfraktionen *gleichen* Habitus, mit meist einfacher Flächenkombination von Prisma und Dipyramide. Auch die Messungen der Längenbreitenverhältnisse ( $c/a$ ) an trüben und durchsichtigen Zirkonen ergeben im Mittel übereinstimmende Werte von ungefähr 3,3 beziehungsweise 3,4. Die grösseren Kristalle sind oft flächenreicher entwickelt. Die milchig-trübe Zirkonsorte besitzt mattschimmernde, rauhe Oberflächen, deren Kanten und Ecken gerundeter sind als jene der durchsichtigen, rotbräunlich gefärbten Kristalle. Wie im Zirkon des Rotondogranits kann auch hier bei starker Vergrösserung unter dem Mikroskop ein mikrokristalliner Aufbau der trüben Zirkonindividuen beobachtet werden. Die dort häufig angetroffenen resorbierten Korngrenzen sind hier bedeutend seltener. Im Durchlicht erscheinen die trüben Zirkone deutlich opak. Ausserdem gibt es praktisch durchsichtige, schlauchartige Gebilde, die regellos im Zirkon verteilt sind. Sowohl durchsichtige als auch trübe Kristalle sind *reich* an nicht näher diagnostizierten, zum Teil gut eingeregeltten Kristallen. In manchen Fällen wird es sich wohl um orientierte Verwachsungen von kleinen, idiomorphen Zirkonindividuen handeln. Daneben findet man häufig stark gerundete, optisch gegenüber dem Wirtkristall verschieden orientierte *Zirkonkerne*.

Fig. 6 bis 9 zeigen Beispiele von Interpositionen durchsichtiger und trüber Zirkonsubstanz, die für einen untergeordneten Teil des Kristallbestandes typisch sind. Man erkennt, dass der trübe Anteil sowohl innere

---

<sup>1)</sup> Frl. S. Seiler und Herrn H. Wiesmann sei an dieser Stelle für ihre mühevollen Arbeit herzlich gedankt.

als auch äussere Zonen des morphologischen Einkristalles bildet, dass der durchsichtige Kristall aber auch nur zum Teil von trübem Material umgeben und dass, wie Fig. 7 zeigt, der trübe und der durchsichtige Teil in einem Kristall voneinander durch eine scharfe Grenze getrennt sein kann. In Fig. 8 ist die Trübung an einer Spitze lokalisiert und durchzieht netzartig den Zirkon in Bereichen, die vermutlich ausgeheilten Rissen entsprechen.

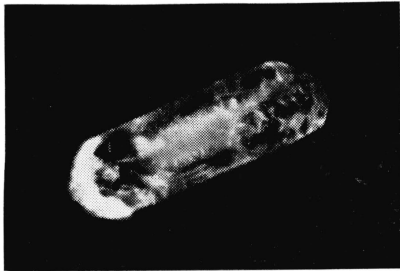


Fig. 6. Milchig-trüber Zirkon im Zentrum eines durchsichtigen Kristalles. Vergr.  $120 \times$ .

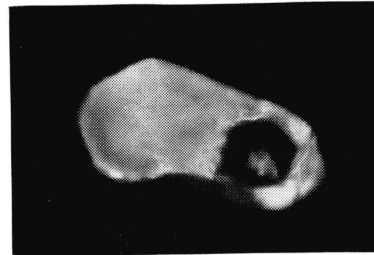


Fig. 7. Scharfe Begrenzung milchig-trüber und durchsichtiger Zirkonsubstanz. Verg.  $120 \times$ .

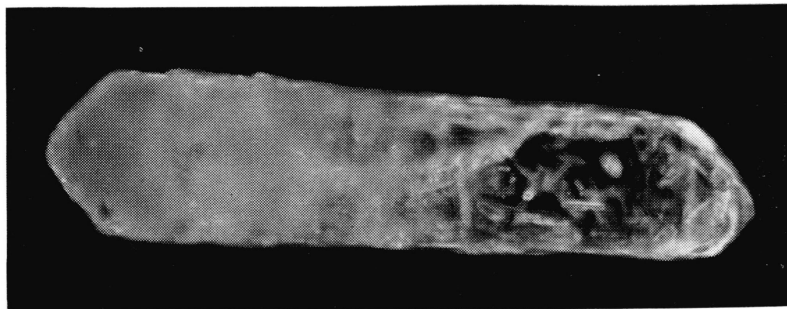
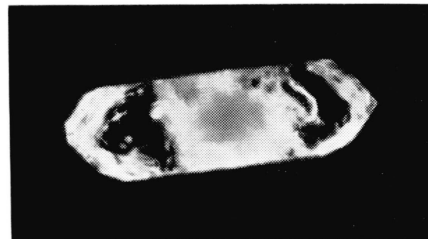


Fig. 8. Trübung eines Zirkons, zum Teil durchzieht sie netzartig den Kristall. Vergr.  $100 \times$ .

Fig. 9. Undeutlich begrenzte bis an Rand reichende trübe Bereiche in der Mitte des Zirkons. Vergr.  $120 \times$ .



Abgesehen von einem wesentlichen Unterschied in der Opazität können keine bedeutenden äusseren Unterscheidungsmerkmale gefunden werden, welche eine Trennung, im Hinblick auf die Altersanalyse, in eine durchsichtige und eine milchig-trübe Zirkonsorte gerechtfertigt hätten. Es stellt sich deshalb die Frage, ob die von Auge erfolgte Unterteilung mit messbaren Kriterien begründet werden kann und auf welche Ursache die Trübung eines Teiles der Kristalle zurückzuführen ist. Die Abschnitte b, c und d geben darüber Aufschluss.



### b) Unterschiede im Kristallbau

Die Präzessionsaufnahmen optisch durchsichtiger Kristalle zeigen *scharfe Einkristallreflexe*. Die analogen Präzessionsaufnahmen von milchig-trüben Kristallen ergeben ungewöhnlich stark verbreitete Reflexe, die in einzelne Satellitenreflexe ausgespalten oder bei anderen Kristallen nur von diffusen Schwänzen umgeben sind. Es handelt sich offensichtlich um *orientierte Domänen*, die bestimmten kristallographischen Lagen zuzuordnen sind. Die Domänengröße variiert von Kristall zu Kristall und auch im gleichen Individuum. Eine grobe Abschätzung ergibt als obere Grenze eine Domänengröße von 0,01 mm, während die untere Grenze in Bereichen von 100 Å liegen wird. Fig. 10a und b veranschaulichen diesen Befund. Die genaue kristallographische Bestimmung wird weiter untersucht.

Hingegen können keine Unterschiede in den Gitterkonstanten festgestellt werden. Aus Pulverdiagrammen, die im Rückstrahlverfahren mit einer Guinierkammer nach Jagodzinsky aufgenommen wurden, ergeben sich für beide Zirkonsorten übereinstimmende Werte für

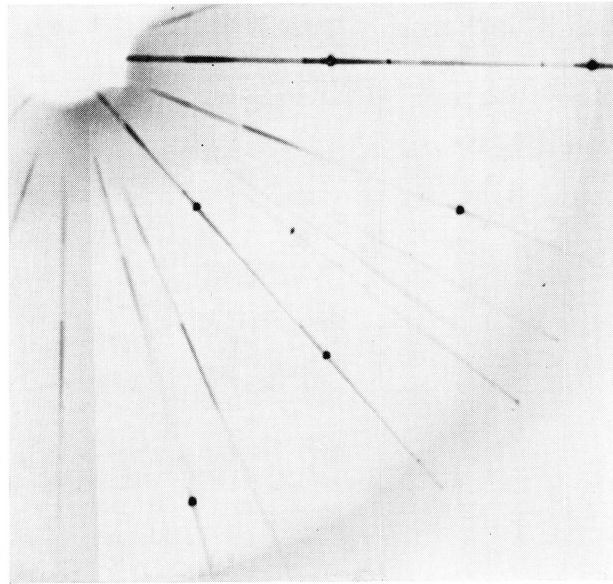
$$c_0 = 5,9870 \pm 0,0006 \text{ \AA} \text{ und } a_0 = 6,6120 \pm 0,0006 \text{ \AA} \text{ (vgl. auch S. 254).}$$

### c) Unterschiede im Gehalt an H<sub>2</sub>O

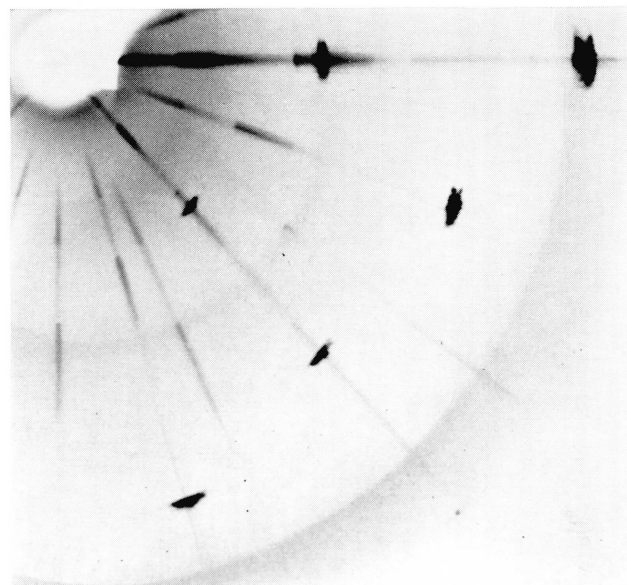
BRUNNER, WONDRATSCHEK und LAVES (1961) haben bei Quarzen beobachtet, dass trübe Kristalle immer eine starke und sehr breite OH-Bande im 3- $\mu$ -Gebiet zeigen, welche mit der bei flüssigem H<sub>2</sub>O auftretenden Bande vergleichbar ist. Ferner tritt die für H<sub>2</sub>O charakteristische Kombinationsbande bei 1,9  $\mu$  auf. Offenbar hängt die Trübung mit submikroskopischen Flüssigkeitseinschlüssen zusammen.

Wir haben daher von je 30 durchsichtigen und 30 milchigtrüben Zirkonen, die eine repräsentative Fraktion des grössten Kornbereiches, nämlich < 20 DIN > 40 DIN, darstellen, ein Ultrarot-Spektrum aufgenommen und auch hier eine breite OH-Bande, entsprechend derjenigen von flüssigem H<sub>2</sub>O, gefunden. Als Überlagerung treten bei einigen Kristallen auch noch schärfere OH-Banden auf, wie sie von strukturell gut definierten OH-Defekten verursacht werden, doch ist deren Anteil am gesamten H-Gehalt gering. Die aus den Spektren ermittelten H<sub>2</sub>O-Gehalte sind im Histogramm der Fig. 11 dargestellt.

Man erkennt zwei separate Häufigkeitsmaxima der H<sub>2</sub>O-Gehalte. Bemerkenswert ist, dass sämtliche durchsichtigen Zirkone in einer ersten Spitze mit einem Gehalt von ca. 400 ppm und sämtliche milchig-trüben



a) durchsichtiger Zirkon



b) milchig-trüber Zirkon

Fig. 10. Ausschnitt von 2 Präzessionsaufnahmen ( $h0l$ ) von zwei ca. 0,3 mm langen und 0,1 mm breiten Zirkonkristallen aus dem Granodioritgneis von Acquacalda. Cu-Strahlung mit Ni-Filter, Blende 0,3 mm, Belichtungszeit je 18 h.

Zirkone in einer zweiten Spitze mit einem Gehalt von etwa 2000 ppm enthalten sind. Unabhängig davon, wie man dieses Resultat interpretieren will, liegt in der Messung der OH-Absorption einerseits eine weitere Begründung für die Unterteilung in eine durchsichtige und eine milchig-trübe Zirkonsorte vor, andererseits wird damit aber auch nahegelegt, dass die Trübung durch submikroskopische Flüssigkeitseinschlüsse, zum

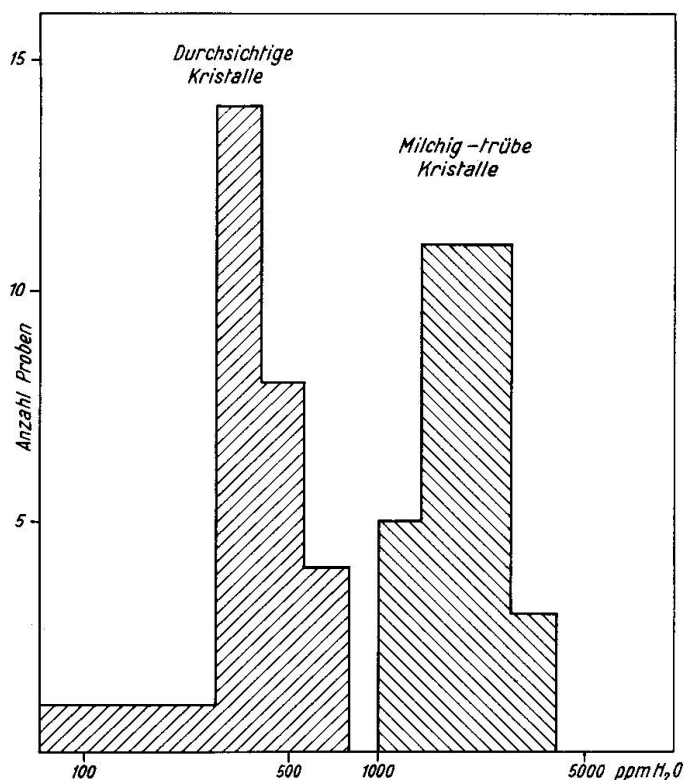


Fig. 11. Häufigkeitsverteilung der H<sub>2</sub>O-Gehalte in durchsichtigen und milchig-trüben Zirkonen des grössten Kornbereiches (< 20 DIN > 40 DIN).

Teil wohl auch durch gelartige Bereiche mit X-OH-Gruppen (X = Si, Zr) verursacht wird. Da es sich offenbar um eine heterogene Verteilung von H<sub>2</sub>O handelt, sind bei der Aufnahme der Spektren vermutlich auch einschussfreie Teile der Kristalle ausgeleuchtet worden, weshalb die angegebenen Gehalte möglicherweise zu tief sind. Auf die Instrumentierung und auf Einzelheiten der Methode soll in einer späteren Arbeit eingegangen werden.

#### d) Unterschiede in der Verteilung von Zr, Hf und U

Die bisherigen Resultate liessen erwarten, dass die Heterogenität sich auch in unterschiedlichen Spurenelementgehalten bemerkbar ma-

chen würde. Eine qualitative Röntgenfluoreszenzanalyse beider Zirkonsorten bestätigte diese Vermutung, indem trübe Zirkone gegenüber durchsichtigen mindestens den doppelten Betrag an Hf, U sowie Y aufweisen.

Dieser Befund und insbesondere die unter b und c gemachten Beobachtungen veranlassten uns weiter, die *Verteilung einzelner Elemente innerhalb eines Kristalles* zu untersuchen.

Die vorliegenden ersten Ergebnisse beschränken sich auf den Nachweis von Zr, Hf und U. Die Absicht war, dadurch mögliche Unterschiede in der *intragranularen* Verteilung eines Hauptelementes sowie auch von zwei Spurenelementen feststellen zu können.

Mit Hilfe einer Mikro-Elektronensonde (Electron Microprobe X-Ray Analyzer) wurde an drei Kristallen ein senkrecht zur c-Achse, durch die Mitte des Kristalles verlaufendes *Profil* abgetastet und die relative Intensität der Zr-L<sub>α</sub>-, Hf-L<sub>β</sub>- und U-L<sub>γ</sub>-Strahlung bestimmt<sup>2)</sup>. Zu diesem Zweck stellten wir polierte Anschliffflächen her, auf welche infolge der schlechten elektrischen Leitfähigkeit des Zirkons eine etwa 400 Å dicke Kohlenstoffschicht aufgedampft wurde.

Fig. 12 zeigt eine schematisierte Wiedergabe der Verteilung der Strahlungsintensität von Zr, Hf und U in einem trüben Zirkon des Rotondogranits (A) sowie in einem trüben (B) und einem durchsichtigen (C) Kristall des Granodioritgneises von Acquacalda. Uran war im durchsichtigen Zirkon nicht mehr nachweisbar. Auf der rechten Seite der Abbildung sind die durch den statistischen Einfall der Impulse auftretenden Intensitätsschwankungen aufgetragen. In der Darstellung ist jeweils der Untergrund abgezogen.

Wie die Abbildung zeigt, bestehen enge Beziehungen zwischen der Verteilung der drei Elemente und dem Erscheinungsbild der Zirkonkristalle. Im durchsichtigen Kristall sind Zr und Hf *gleichmässig* verteilt. Hingegen beobachtet man in trüben Kristallen eine über den Kristall stark *variierende* Verteilung von Zr, Hf und U. Auffallend ist dabei, dass in beiden trüben Zirkonen Hafnium zonal an den Korngrenzen angereichert erscheint. Die Frage, ob diese Verteilung auf eine von aussen erfolgte Diffusion zurückzuführen ist oder von einem mit dem Zonenschmelzverfahren vergleichbaren Reinigungsprozess herrührt oder auch nur ursächlich mit wechselnder Lösungszusammensetzung beim Wachstum des Kristalles zusammenhängt, bleibt noch offen. Der lokal starke

---

<sup>2)</sup> Wir danken der Firma Applied Research Laboratories Inc., Lausanne, die uns ihr Gerät bereitwilligst zur Verfügung gestellt hat.

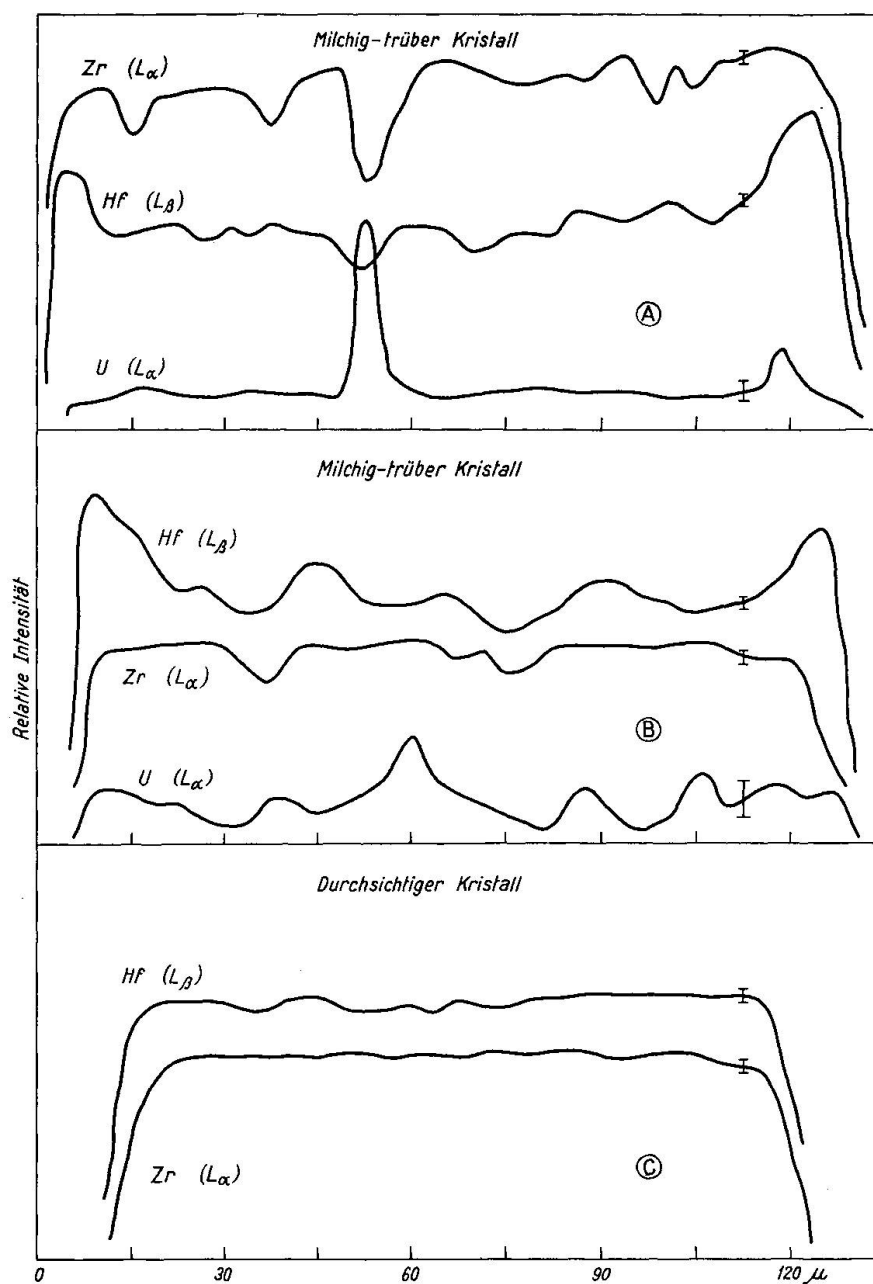


Fig. 12. Schematisierte, relative Verteilung der Strahlungsintensität von Zr, Hf und U in drei an Zirkon mit der Mikro-Elektronen-Sonde aufgenommenen Profilen senkrecht zur c-Achse.

A: trüber Zirkonkristall, Rotondogranit. B: trüber Zirkonkristall. C: durchsichtiger Zirkonkristall. B und C: Granodioritgneis von Acquacalda.

Anstieg im Urangehalt im *Zirkon des Rotondogranits* und die damit verbundene Erniedrigung der Zr- und Hf-Konzentrationen stammen von einem *Einschluss eines U-reichen Minerals* her, welcher auch mikroskopisch nachweisbar ist.

e) Unterschiede im U/Pb-Verhältnis

Uran und Blei wurden in der milchig-trüben und in der durchsichtigen Zirkonsorte mit Hilfe der Isotopenverdünnungsanalyse bestimmt. Für die Verdünnung benützten wir kalibrierte Lösungen der Eichisotope U 235 und Pb 208. Die Proben wurden mit Borax im Platintiegel auf-

Tabelle 2. U-, Pb-Gehalt und die U/Pb-Zerfallsalter der analysierten Zirkone, Granodioritgneis von Acquacalda

a) Durchsichtige Zirkonfraktion

Gehalt in ppm			Atom % Pb, 206 = 100			
U	Pb	Pb <sup>206</sup>	Pb <sup>204</sup>	Pb <sup>206</sup>	Pb <sup>207</sup>	Pb <sup>208</sup>
579	44,3	28,0	0,776	100	17,05	40,00

Zerfallsalter in  
Millionen Jahren

U <sup>238</sup> - Pb <sup>206</sup>	U <sup>235</sup> - Pb <sup>207</sup>
305 ± 25	328 ± 30

b) Milchig-trübe Zirkonfraktion

Gehalt in ppm			Atom % Pb, 206 = 100			
U	Pb	Pb <sup>206</sup>	Pb <sup>204</sup>	Pb <sup>206</sup>	Pb <sup>207</sup>	Pb <sup>208</sup>
1670	86,9	55,0	0,817	100	17,20	39,36

Zerfallsalter in  
Millionen Jahren

U <sup>238</sup> - Pb <sup>206</sup>	U <sup>235</sup> - Pb <sup>207</sup>
208 ± 20	212 ± 25

Verwendete Zerfallskonstanten:

$$\begin{aligned} \text{U}^{238}: \lambda &= 1,54 \cdot 10^{-10} / \text{Jahr} & \frac{\text{U}^{235}}{\text{U}^{238}} &= \frac{1}{137,8} \\ \text{U}^{235}: \lambda &= 9,72 \cdot 10^{-10} / \text{Jahr} \end{aligned}$$

geschlossen, wobei es sich zeigte, dass die trüben Zirkone ungewöhnlich rasch, nach etwa 10 Minuten, in Lösung gingen, während der Aufschluss der durchsichtigen Zirkone über eine Stunde dauerte. Für die Abtrennung von Pb und U verwendeten wir das Verfahren der Flüssigkeitsextraktion (vgl. dazu TILTON et al., 1955, 1957). Die Messung der relativen Isotopenverhältnisse wurde am Massenspektrometer Atlas CH 4 im Physikalischen Institut der Universität Bern durchgeführt. Die analytischen Ergebnisse sind in Tabelle 2 angegeben.

Die Ergebnisse zeigen, dass die beiden Zirkonsorten nicht nur unterschiedliche Uran/Blei-Verhältnisse aufweisen, welche verschiedenen Zerfallsaltern entsprechen, sondern, dass auch ein wesentlicher *Unterschied im Uran-Gehalt besteht*. Die *milchig-trübe* Zirkonfraktion enthält etwa *dreimal mehr Uran* als die durchsichtige. Ferner ist für die im nächsten Abschnitt folgende Diskussion die Feststellung wichtig, dass die *uranreichere* Zirkonfraktion das *grössere* U/Pb-Verhältnis aufzeigt und folglich das *kleinere* Zerfallsalter besitzt. In beiden Proben war der Anteil des gewöhnlichen Pb relativ gross, so dass keine Angaben über die  $Pb^{207}/Pb^{206}$ -Alter gemacht werden können.

#### IV. Diskussion der Resultate

Ein Vergleich der Beobachtungen lässt Beziehungen zwischen dem optischen Erscheinungsbild, der Grösse und Verteilung der Spurenelementkonzentration und dem Kristallbau der beiden Zirkonsorten erkennen. Diese Zusammenhänge sind für die Deutung der U/Pb-Verhältnisse und für die petrogenetische Interpretation der Zerfallsalter von wesentlicher Bedeutung.

Dass es sich bei den untersuchten Zirkonproben um eine *kogenetische* Vergesellschaftung handelt und nicht etwa um zwei Zirkontypen primär verschiedenen Ursprungs, wie dies zum Beispiel in Zirkonkonzentraten metamorpher Sedimentgesteine zu erwarten ist, beweisen die Interpositionen von trüber und durchsichtiger Zirkonsubstanz *innerhalb* eines Kristalles (vgl. Fig. 6—9, S. 245).

Die beiden Zirkonsorten *desselben* Gesteins enthalten verschiedene U/Pb-Systeme, die anscheinend mit den festgestellten Unterschieden im *Kristallbau* und in der *chemischen Zusammensetzung* eng verknüpft sind. Dabei ist es kennzeichnend, dass die mikrokristalline, wasserhaltige und uranreichere Probe ein U/Pb-Verhältnis besitzt, das dem *jüngeren* Zerfallsalter von 210 Millionen Jahren entspricht. Zweifelsohne fanden im



Gefüge der *trüben* Zirkone *intragranulare* Umsetzungen und Umwandlungsvorgänge statt, so dass es naheliegend ist, das U/Pb-Verhältnis als das Resultat einer Störung des radioaktiven Gleichgewichtes anzusehen. Ob es sich dabei um eine *kontinuierliche Diffusion* des radiogenen Bleis aus dem Zirkongitter (vgl. TILTON, 1960), um einen zu *bestimmten Zeitpunkten stattgefundenen Bleiverlust* (oder Urangewinn) im Sinne des Concordia-Diagrammes von WETHERHILL (1956a, b) oder um eine *Kombination* dieser Vorgänge handelt, kann zur Zeit nicht entschieden werden. Wir besitzen noch keine experimentellen Daten, die uns Auskunft über den Einfluss der Domänenstruktur oder des Wassergehaltes oder der Verteilung und Konzentration der Spurenelemente auf den *Grad* der Lösungszirkulation im Zirkon und auf das Ausmass einer Bleiausscheidung und Uranausscheidung geben könnten.

Das U/Pb-Verhältnis der *durchsichtigen* Zirkonsorte entspricht hingegen einem Zerfallsalter, welches innerhalb der Fehlergrenzen mit dem Alter der ebenfalls *durchsichtigen* und *homogenen* Zirkone der granitischen Fibbia- und Gamsbodengneise der gleichen tektonischen Einheit übereinstimmt. In Tabelle 3 sind die analytischen Daten wiedergegeben.

Beide Gesteinskörper besitzen ebenso wie der Granodioritgneis von Acquacalda ein alpin-metamorph stark überprägtes Gefüge. Dafür sprechen auch die von E. JÄGER (1962) an Biotit ermittelten Rb/Sr-Alter von  $16,0 \pm 1,9$  (Gamsbodengneis) und  $15,3 \pm 3,4$  (Fibbiagneis) Millionen Jahre. Trotz der teilweisen Gefügeumkristallisation dieser Gesteine scheint die Zirkonsubstanz ihren radiogenen Bleigehalt seit der herzynischen Kristallisation, gleich wie die durchsichtige Zirkonsorte des Granodioritgneises von Acquacalda unverändert beibehalten zu haben, wenngleich der *Urangehalt* der Zirkone der beiden Gesteine *höher* ist als jener der *trüben* und umgewandelten Zirkone im Granodioritgneis.

Unserer Ansicht nach ist dies ein weiterer Hinweis dafür, dass hoher Urangehalt *allein* nicht unbedingt das verschiedene U/Pb-Zerfallsalter der *trüben* Zirkonsorte erklären kann, es sei denn, dass Anzeichen für einen Urangewinn sprechen würden. Wir vermuten eher, dass das Vorhandensein einer Domänenstruktur, der hohe Gehalt an Wasser und insbesondere die inhomogene Verteilung von U und Hf, das heisst die Bildung struktureller Baufehler eine Störung des radioaktiven Gleichgewichtes verursacht und ein zum Teil offenes U/Pb-System hervorgerufen haben. Es ist nicht ausgeschlossen, dass das nachgewiesene Wasser in den *trüben* Zirkonen Uran und Blei gelöst enthält. Die Flüssigkeitseinschlüsse stehen eventuell durch Risse mit der Oberfläche in Berührung, wodurch ein offenes System resultieren könnte.



Tabelle 3. U-, Pb-Gehalt und die U/Pb-Zerfallsalter von Zirkon aus dem Fibbia- und Gamsbodengneis

## a) Fibbiagneis, Stausee Lucendro, St. Gotthardpass

Gehalt in ppm			Atom % Pb, 206 = 100			
U	Pb	Pb <sup>206</sup>	Pb <sup>204</sup>	Pb <sup>206</sup>	Pb <sup>207</sup>	Pb <sup>208</sup>
3413	183,0	141,3	0,291	100	9,72	19,30

Zerfallsalter in  
Millionen Jahren

U <sup>238</sup> – Pb <sup>206</sup>	U <sup>235</sup> – Pb <sup>207</sup>	Pb <sup>207</sup> – Pb <sup>206</sup>
290 ± 15	305 ± 20	390 ± 60

## b) Gamsbodengneis, Mätteli, Gotthardstrasse südlich Hospental

Gehalt in ppm			Atom % Pb, 206 = 100			
U	Pb	Pb <sup>206</sup>	Pb <sup>204</sup>	Pb <sup>206</sup>	Pb <sup>207</sup>	Pb <sup>208</sup>
2589	121,1	100,5	0,148	100	7,40	12,62

Zerfallsalter in  
Millionen Jahren

U <sup>238</sup> – Pb <sup>206</sup>	U <sup>235</sup> – Pb <sup>207</sup>	Pb <sup>207</sup> – Pb <sup>206</sup>
275 ± 15	280 ± 20	300 ± 50

Beide Zirkonsorten, die uranarme, durchsichtige wie auch die uranreiche, trübe, haben gleiche Gitterkonstanten ( $\Delta < 6 \cdot 10^{-4} \text{ \AA}$ ), so dass man bereits darin in Anlehnung an die Arbeiten von HOLLAND und GOTTFRIED (1955) auf ein unterschiedliches „Strahlungsalter“ schliessen könnte. Es bleibt allerdings ungewiss, ob das Fehlen von Unterschieden nicht etwa darauf zurückzuführen ist, dass U (und Th), wie Fig. 12b zeigt, in trüben Zirkonen nicht feindispers im Wirtkristall verteilt sind und daher keine einheitlichen Strahlungsschäden der Struktur bewirken konnten.

Wann die Bildung dieser strukturellen Baufehler stattfand, ist eine ganz andere Frage. Dabei darf man nicht vergessen, dass die vorliegenden Resultate nur über eine Vielzahl von Kristallindividuen gemittelte Werte darstellen, wobei jeder Kristall oder sogar jede Kristalldomäne für sich ein

*eigenes, individuelles U/Pb-Zerfallssystem enthält, das sich je nach den inhärenten Eigenschaften des kristallinen Materials in der Zeit als ein geschlossenes, als ein offenes oder nur zeitweise offenes System verhalten kann.*

Zunächst ist zu vermuten, dass die Domänenstruktur der trüben Kristalle durch eine Art Kataklyse zustandekam. Dafür sprechen die Trübung, der rasche Aufschluss der Kristalle und der Wassergehalt in Form von Einschlüssen. Der folgende, zeitliche Ablauf der Vorgänge, das heisst kataklastischer Eingriff in die Struktur und anschliessende Rekristallisation — blosse Ausheilung im Falle der trüben, praktische Neubildung im Falle der durchsichtigen Zirkone — wäre denkbar: herzynisches oder vorherzynisches Wachstum von ursprünglich einer Zirkonsorte, anschliessende Kataklyse (Protoklyse) und Rekristallisation und eine spätere, vielleicht während der alpinen Gebirgsbildung stattgefundene „Verjüngung“, besonders der als „offenes System“ anzusehenden trüben Zirkone.

An Stelle einer Kataklyse ist es auch denkbar, dass ein Teil der Zirkonsubstanz während einer späteren Episode eine Umwandlung durchmachte, wie sie BRUNNER, WONDRAUSCHEK und LAVES (1961) an Quarzen beobachtet haben. Die Autoren berichten, dass durch *Erhitzen* von Quarz mit „gelartigen Bereichen“ Vernetzungen der Struktur unter Ausscheidung von H<sub>2</sub>O-Tröpfchen (Trübung) erfolgen können.

Es ist möglich, dass das Wachstum der Zirkonsubstanz ursprünglich, herzynisch oder vorherzynisch, unter *variablen* Bedingungen stattgefunden hat. Ein unterschiedliches Stoffangebot während des Wachstums hätte den heute nachweisbaren, verschieden starken, zum Teil zonaren Einbau von Spurenelementen zur Folge gehabt. Eine spätere Temperaturerhöhung würde gerade in den trüben Zirkonen mit höherem Fremdionengehalt und weiteren Baufehlern eine mikrokristalline Neubildung mit intergranularer Ausscheidung der Fremdstoffe verursachen. Ein solcher, in bezug auf das Zirkonkonzentrat *selektiver* Prozess könnte zum Beispiel während der alpinen Metamorphose abgelaufen sein. Vermutlich ist auch der Mineralbestand des Gesteins zu einem grossen Teil *alpin* granoblastisch rekristallisiert.

In diesem Zusammenhang ist es bemerkenswert, dass sehr ähnliche heterogene Zirkonvergesellschaftungen auch in anderen Gesteinen des *südlichen* Gotthardmassivs gefunden wurden. Ähnliche Zirkonkonzentrate, allerdings mit unterschiedlichen Anteilen von trüben und durchsichtigen Kristallen, enthalten der Rotondogranit sowie die sogenannten Tremola- und Monte-Prosa-Granite. Es wäre zu prüfen, ob dieses Auftreten mit den Vorgängen der spätalpinen Metamorphose, wie diese von

WENK<sup>3)</sup> im Raume der nördlichen Tessiner Alpen festgestellt wurden, in Beziehung gebracht werden können.

Trübe und durchsichtige Zirkone unterscheiden sich nicht nur in ihrem Kristallbau und der Grössenordnung ihrer Spurenelementkonzentration, sondern sind in bestimmten Korngrössenbereichen verschieden stark angereichert (vgl. Tabelle 1, S. 243). Die trübe, uranreichere Zirkonsorte ist dabei in den kleinen Korngrössen häufiger.

Inzwischen haben in ausgezeichneten Arbeiten SILVER und DEUTSCH (1961) und SILVER (1962) ebenfalls wesentliche Unterschiede im Zerfallsalter kogenetischer Zirkonvergesellschaftungen festgestellt. Sie erhielten in *präkambrischen* Gesteinen aus Arizona, USA, schon *allein* auf Grund einer Trennung nach Korngrösse und magnetischen Eigenschaften, U/Pb-Verhältnisse, die verschiedenen, diskordanten Alterswerten (in einem Gestein zwischen 300 und 1600 Millionen Jahren!) entsprechen. Wie in unserem Falle nimmt auch hier in der Regel der Urangehalt mit sinkender Korngrösse zu, und ebenso ist es auch hier die *uranreichere* Zirkonfraktion, welche die grössten Diskordanzen gegenüber dem wahren Alter aufweist.

Beide Beispiele zeigen, dass eine sinnvolle petrogenetische Interpretation der Zerfallsalter natürlicher Zirkone nur mit Hilfe umfassender Untersuchungen über eine Reihe von physikalischen und chemischen Voraussetzungen und Auswirkungen möglich ist.

Die Untersuchungen wurden durch die Mittel der Kommission für Atomwissenschaft des Schweiz. Nationalfonds ermöglicht. Wir danken den Herren Dr. H. U. Bambauer, Dr. O. W. Flörke, Dr. N. Grögler, R. Gubser und H. J. Scheel für ihre freundliche Mithilfe und Unterstützung. Ferner danken wir den Herren Prof. Dr. C. Burri, Prof. Dr. J. Geiss, Prof. Dr. J. Laves, Prof. Dr. L. Silver, Prof. Dr. F. Houtermans, Dr. P. Eberhardt, Frl. Dr. E. Jäger und G. O. Brunner, der freundlicherweise die IR-Messungen ausführte, für ihr wohlwollendes Interesse und wertvolle Diskussionen.

### Literatur

SMPM = Schweiz. Mineralog. und Petrogr. Mitteilungen.

- BRUNNER, G. O., WONDRAČEK, H. und LAVES, F. (1961): Ultrarotuntersuchungen über den Einbau von H in natürlichem Quarz. Z. für Elektrochemie, 65, 735—750.
- GRÜNENFELDER, M. (1962): Mineralalter von Gesteinen aus dem Gotthardmassiv, SMPM 42, 6—7.

<sup>3)</sup> Siehe WENK (1962) und die darin zitierte Literatur.

- GRÜNENFELDER, M. und HAFNER, S. (1962): Über das Alter und die Entstehung des Rotondogranits, SMPM, 42, 169—207.
- HOLLAND, H. D. und GOTTFRIED, D. (1955): The Effect of Nuclear Radiation on the Structure of Zircon. *Acta Cryst*, 8., 291—300.
- HOLST-PELLEKAAN, W. VAN (1913): Geologie der Gebirgsgruppe des Piz Scopi. Diss. Univ. Zürich.
- HUBER, H. M. (1943): Physiographie und Genesis der Gesteine im südöstlichen Gotthardmassiv. SMPM 23, 72—260.
- JÄGER, E. (1962): Rb-Sr age determinations on micas and total rocks from the Alps. *J. Geophys. Research*, 67, 5293—5306.
- MEHNERT, K. R. (1957): Petrographie und Abfolge der Granitisation im Schwarzwald. II. Neues Jb. Mineral. Abh. 90, 39—90.
- NIGGLI, E. (1948): Zur zeitlichen Abfolge der magmatischen und metamorphosierenden Vorgänge im Gotthardmassiv. SMPM 28, 165—176 (Festschrift P. Niggli).
- (1953): In J. CADISCH: Geologie der Schweizer Alpen, Basel.
- NIGGLI, P., PREISWERK, H., GRÜTTER, O., BOSSARD, L. und KÜNDIG, E. (1936): Geologische Beschreibung der Tessiner Alpen zwischen Maggia- und Bleniothal, Beiträge Geol. Karte Schweiz, 71. Liefg.
- SILVER, L. T. (1962): The Use of cogenetic Uranium-Lead Isotope Systems in Zircons in Geochronology, Proc. Symposium of Radioactive Dating, Athen.
- SILVER, L. T. und DEUTSCH, S. (1961): Uranium-Lead Method on Zircons. *Annals New York Acad. of Sciences*, 91, 279—283.
- TILTON, G. R. (1960): Volume Diffusion as a mechanism for discordant lead ages. *J. of Geophys. Research*, 65, 2933—2945.
- TILTON, G. R., PATTERSON, C., BROWN, H., INGRAM, M., HAYDEN, R., HESS, D. und LARSEN Jr., E. (1955): Isotopic Composition and Distribution of Lead, Uranium and Thorium in a precambrian granite. *Geol. Soc. Amer. Bull.* 66, 1131—1148.
- TILTON, G. R., DAVIS, G. L., WETHERILL, G. W. and ALDRICH, L. T. (1957): Isotopic ages of zircon from granites and pegmatites. *Trans. Amer. Geophys. Union* 38, 360—371.
- WENK, E. (1962): Plagioklas als Indexmineral in den Zentralalpen. Die Paragenese Calcit-Plagioklas. SMPM 42, 139—152.
- WETHERILL, G. W. (1956a): An interpretation of Rhodesia and Witwatersrand age patterns. *Geochim. et Cosmochim. Acta* 9, 290—292.
- (1956b): Discordant uranium lead ages. I. *Trans. Amer. Geophys. Union* 37, 320—326.
- Institut für Kristallographie und Petrographie der ETH, Zürich.

Manuskript eingegangen am 31. Dezember 1962.