

**Ein Beitrag zur Petrologie der Rieserferner Intrusion  
in Ost- und Südtirol**

von

**R. GRATZER**

mit

8 Abb., 2 Tab. und 1 Taf.

Anschrift des Verfassers:

Dr. phil. R. Gratzner

c/o Institut für Geowissenschaften

Montanuniversität

A-8700 Leoben

## Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung, Summary . . . . .	320
2. Einleitung . . . . .	321
3. Gesteinsbeschreibung . . . . .	322
4. Gesteinschemismus . . . . .	323
5. Mineralogie – Mineralchemismus . . . . .	324
6. Kristallisationsbedingungen – Vergleich mit experimentellen Arbeiten . . . . .	331
7. Diskussion . . . . .	334
8. Literatur . . . . .	338

## 1. Zusammenfassung

Die südlich des Tauernfensters und nördlich der Defregger–Antholzer–Valser Linie liegende Rieserferner Intrusion wird von Tonaliten, Granodioriten und Graniten aufgebaut. Die auftretenden Gesteinstypen weisen einen variablen Mineralbestand von zonargebautem Plagioklas ( $An_{80-30}$ ), Alkalifeldspat, Quarz, Biotit und Amphibol, sowie an einer Lokalität, im Kontaktbereich des Intrusivkörpers, etwas Granat auf. Geochemisch weisen diese sauren bis intermediären Gesteine korund- und diopsidnormative Zusammensetzungen auf und zeigen einen für kalkalkalische Gesteine typischen Differentiationstrend. Bezüglich der Verteilung der Seltenen Erden bilden die Tonalite gegenüber den Granodioriten und Graniten mit einer ausgeprägten negativen Europiumanomalie ein primitives, mit andesitischen Schmelzen vergleichbares, Selten Erd Muster. Basierend auf Spurenelementanalysen und Selten Erd Daten werden drei petrogenetische Modelle diskutiert: 1) Aufschmelzung von ozeanischem Krustenmaterial, 2) Aufschmelzung von kontinentaler Kruste, 3) Fraktionierte Kristallisation aus einer Schmelze. Das Modell einer fraktionierten Kristallisation wird bevorzugt. Mikrosondenuntersuchungen an Amphibolen der Tonalite, Granodiorite, basischen Einschlüssen und Amphiboleinschlüssen im Granat ergaben eine leichte Kern–Rand-Zonierung mit verschiedenen Entwicklungstrends. Das lokale Auftreten von Granat wird durch ein einfaches "magma mixing"-Modell von tonalitischer Schmelze mit assimiliertem Nebengesteinsmaterial erklärt. Das Kristallisationsintervall dieser Gesteine kann in bezug auf die Mineralzusammensetzung in zwei unterschiedliche Teilakte aufgelöst werden. Eine erste Ausscheidung von Plagioklas (Plagioklaskerne) beginnt bei  $730^{\circ}$  und  $\geq 5$  Kbar  $P_{H_2O}$  gefolgt von Amphibol – Biotit, Quarz und Alkalifeldspat. Im Endstadium der Kristallisation wird der Plagioklasrand sowie Quarz und Alkalifeldspat bei  $P_{tot} \cong 2$  Kbar  $\cong P_{H_2O}$  gebildet.

## Summary

Contribution to the petrology of the Rieserferner Intrusion in eastern and southern Tyrol.

The Rieserferner Pluton outcrop south of the Tauern Window and north of the Defregger–Antholzer–Valser Line is built up by tonalites, granodiorites and granites. The rocks contain strongly zoned plagioclase ( $An_{80-30}$ ), alkalifeldspar, quartz, biotite, amphibole and in contact to the host rock locally almandine-rich garnet. Chemically these rocks follow a typical calcalkaline trend and show a corundum and diopside normative composition. According to their REE concentration the tonalites give a primitive pattern like andesitic rocks while the granodiorites and granites show a well developed negative europium anomaly. Based on trace element analyses and

REE data three petrogenetic models have been discussed. These are: 1) Partial melting from oceanic crust, 2) Partial melting of continental crust, 3) Fractional crystallization from a liquid. The third model is favoured. Microanalysis from mafic mineral phases was carried out too. In the amphiboles from tonalites, granodiorites, mafic inclusions and the amphibole inclusions in garnets small core-rim zonation with different trends have been detected. The origin of garnets could be explained by a simple magma mixing model from a tonalitic liquid with assimilated host rock material. With regard to the composition of minerals two different stages of crystallization have been assumed. The crystallization of the plagioklascores is postulated by  $730^{\circ}\text{C}$ ,  $\geq 5$  Kbar  $\text{P}_{\text{H}_2\text{O}}$  which is followed by the formation of amphibole – biotite, quartz and alkali-feldspar. The final solidification takes place at  $\text{P}_{\text{tot}} \cong 2$  Kbar  $\cong \text{P}_{\text{H}_2\text{O}}$  corresponding to the level of intrusion.

## 2. Einleitung

Entlang der Periadriatischen Linie, die sich aus mehreren Störungszonen zusammensetzt, sind zahlreiche magmatische Körper aufgeschlossen. Dieses im geologischen Bau der Alpen äußerst bedeutungsvolle Lineament trennt die in der Regel alpidisch metamorphen Gebiete der Ost- und Westalpen von den Südalpen, in denen keine vergleichbare Metamorphose bekannt ist.

Ursprünglich wurde als gemeinsames Merkmal für die periadriatischen Tiefengesteine gleiches Alter angenommen (SALOMON, 1897), radiometrische Altersbestimmungen haben dies jedoch nicht bestätigt (BORSI, DEL MORO, SASSI & ZIRPOLI, 1978). Die Intrusionen reichen vom Paläozoikum bis ins Jungtertiär und belegen damit die wiederholte magmatische Aktivität dieser bedeutenden Trennfuge im alpinen Bau (EXNER, 1976).

Die Rieserferner Intrusion liegt südlich des Tauernfensters und nördlich der DAV (Defregger–Antholzer–Valser) Linie. In diese Zone der alten Gneise erfolgte im mittleren Oligozän (BORSI et al., 1978) die Intrusion des Rieserferner Plutons. Die Intrusion bildet einen bis zu 4,5 km breiten und über 40 km langen E–W verlaufenden Körper. Am N-Kontakt zur Zone der alten Gneise herrscht flaches Einfallen nach N ( $30^{\circ}$ – $60^{\circ}$ ), am Südrand entlang der DAV Linie steiles Einfallen nach S ( $60^{\circ}$ – $90^{\circ}$ ). Im mittleren Bereich des Körpers ist das „alte Dach“ noch erhalten und teilt morphologisch den Pluton in zwei Kerne, den Rieserkern im Osten und den Rainwaldkern im Westen (BECKE, 1892). Die Rahmengesteine der Intrusion bilden Glimmerschiefer und Amphibolite, die eine deutliche kontaktmetamorphe Überprägung aufweisen (BELLIENI, 1977, und PROCHASKA, 1980). Die Kontaktzone im Westteil des Körpers zeigt lokal eine leichte Migmatisierung. Im östlichen Bereich wird der Kontakt zum Nebengestein durch eine scharfe tektonische Grenze gebildet.

Erstmals wurde dieser Körper von BECKE (1892) petrographisch untersucht. In neuerer Zeit haben vor allem BELLIENI et al. (1976, 1977, 1978, 1981) in diesem Gebiet gearbeitet.

Diese Arbeit ist ein Teil einer am Institut für Petrologie der Universität Wien durchgeführten Dissertation. Herrn Prof. Dr. W. RICHTER und Herrn Dr. F. KOLLER möchte ich an dieser Stelle für ihre wertvollen Ratschläge und Diskussionen herzlich danken.

### 3. Gesteinsbeschreibung

Die am Aufbau der Rieserferner Intrusion beteiligten Gesteine, nach den Vorschlägen der IUGS-Subkommission (STRECKEISEN, 1974), Granodiorite, Tonalite und Granite, weisen untereinander keine scharfen Grenzen auf, sondern gehen kontinuierlich ineinander über. Im Handstück erscheinen die einzelnen Gesteinstypen homogen, zeigen feines bis mittleres Korn und sind je nach auftretendem Mineralbestand hellgrau bis dunkelgrau gefärbt. Die Tonalite und Granodiorite im Randbereich des Intrusivkörpers zeigen eine leichte Einregelung der Biotite parallel zur Kontaktfläche.

#### Granodiorit:

Der Granodiorit, ein hellgraues, massiges Gestein mit vorherrschend unregelmäßigem Gefüge, ist mit etwa 50 % am Aufbau des plutonischen Körpers beteiligt und tritt vor allem im Ostteil, dem Rieserkern (BECKE, 1892) auf. Porzellanweißer Feldspat, vorwiegend Plagioklas, mit einer Korngröße bis zu 4 mm und fettig glänzender Quarz mit einem Korndurchmesser von 3 mm bilden 80 % v/v vom Mineralbestand. Biotit tritt in zum Teil idiomorphen Tafeln bis zu 4 mm auf und ist neben der nur untergeordnet vorkommenden Hornblende der häufigste mafische Gemengteil.

#### Tonalit:

Der Tonalit, ein helles, mittelkörniges Gestein mit unregelmäßigem Gefüge ist hauptsächlich im westlichen Teil der Rieserferner Intrusion, dem Rainwaldkern (BECKE, 1892), vertreten und ist am Aufbau des Körpers mit ungefähr 40 % beteiligt. Reinweiße Plagioklase mit einer Korngröße bis zu 3 mm und milchig graue Quarze bilden den hellen Mineralbestand. Die zum Teil idiomorphen Biotitpakete mit einem Durchmesser bis zu 5 mm sowie die gut ausgebildeten Hornblendens, die eine Größe von 15 mm erreichen, verleihen diesem Gesteinstyp mitunter ein „porphyrisches“ Aussehen. Abgesehen von einigen Randvarietäten zeigen die mafischen Gemengteile ein relativ einheitliches Mengenverhältnis. An der Lokalität Gelttal führt der Tonalit neben einer beträchtlichen Menge von Hornblende noch Granat. Die Granate, die einen Durchmesser bis zu 30 mm erreichen, zeigen gut ausgebildete Reaktionsräume, bestehend aus Biotit, Plagioklas und Hornblende.

#### Granit:

Dieser Gesteinstyp ist am Aufbau der Intrusion nur untergeordnet beteiligt und tritt unregelmäßig verteilt in den Tonaliten und Granodioriten auf. Der Granit bildet ein hellgraues, mittelkörniges Gestein mit unregelmäßigem Gefüge und weist eine durchschnittliche Modalzusammensetzung von 26 % Quarz, 27 % Alkalifeldspat, 35 % Plagioklas und 12 % Biotit auf.

#### Diorit:

In den Gesteinen der Rieserferner Intrusion ist dieser Gesteinstyp, nach der Definition von DIDIER (1973), nur als endogener Einschluß zu beobachten. Die im Anschnitt linsenförmigen, makroskopisch als Diorite einzustufenden Einschlüsse sind über den ganzen Intrusivkörper verbreitet und erreichen Durchmesser bis zu 1 m. Im wesentlichen bestehen diese basischen Einschlüsse aus Hornblende, Biotit, etwas Quarz und Plagioklas.

#### Nebengesteinseinschlüsse:

Diese nach DIDIER (1973) als exogene Einschlüsse einzustufenden Gesteine können nur sehr untergeordnet beobachtet werden. Zumeist stellen diese Einschlüsse verschiedene Paragesteinsabkömmlinge dar, die durch eine Neubildung von Cordierit und Sillimanit eine kontaktmetamorphe Überprägung aufweisen.

## 4. Gesteinschemismus

Wie bereits bei der Gesteinsbeschreibung festgestellt wurde, besteht die Rieserferner Intrusion aus Tonaliten, Granodioriten und Graniten sowie untergeordnet basischen Einschlüssen. Geochemisch weisen diese sauren bis intermediären Gesteine korund- und diopsidnormative Zusammensetzung auf und zeigen einen für kalkalkalische Gesteine typischen Differentiationstrend (Abb. 1, 2). Diese Differentiationsentwicklung kommt sowohl in den einzelnen Elementkorrelationen als auch in den Verteilungsbildern der Seltenen Erden (REE) gut zum Ausdruck (Abb. 3). Die REE Verteilungsmuster zeigen, bis auf die stärker ausgeprägte Europiumanomalie, mit den Daten von BELLIENI (1981) eine gute Übereinstimmung. Die REE Muster der Granodiorite und Tonalite weisen relativ einheitliche LREE (LREE – Leichte Seltene Erden) auf, zeigen jedoch eine deutliche Verarmung in den HREE (HREE – Schwere Seltene Erden). Im Gegensatz dazu besitzen die Granite geringere Gehalte an LREE und weisen eine gewisse Variationsbreite in den HREE auf, die auf unterschiedliche Fraktionierungs- bzw. Veränderungsmechanismen zurückgeführt wird. Ausgehend von den Tonaliten, die in diesen Gesteinen durch das Fehlen einer Europiumanomalie das primitivste REE Muster aufweisen, läßt sich in den höher differenzierten Granodioriten und Graniten eine deutliche negative Europiumanomalie beobachten. Die untersuchten basischen Einschlüsse zeigen einen variablen Gehalt an LREE und in den HREE eine stärkere Streuung sowie eine ausgeprägte negative Europiumanomalie, die auf eine Feldspatfraktionierung zurückzuführen ist.

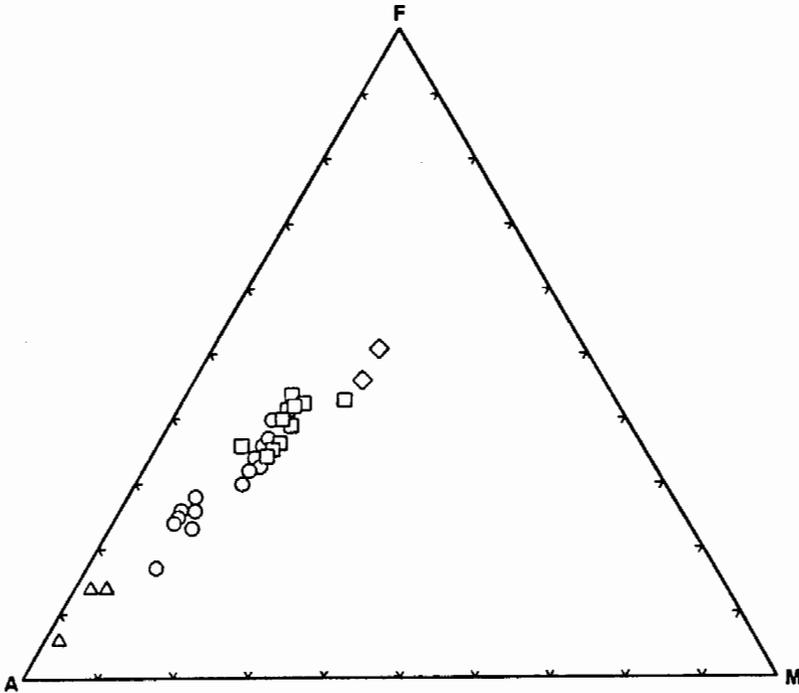


Abb. 1: Variation des Gesteinschemismus der Rieserferner Intrusion dargestellt in der A-F-M Projektion im Vergleich zum Südkalifornischen- und Idahobatholith (MÜLLER & SAXENA, 1977). Symbole: Granite ( $\Delta$ ), Granodiorite ( $\circ$ ), Tonalite ( $\square$ ) und basische Einschlüsse ( $\diamond$ ).

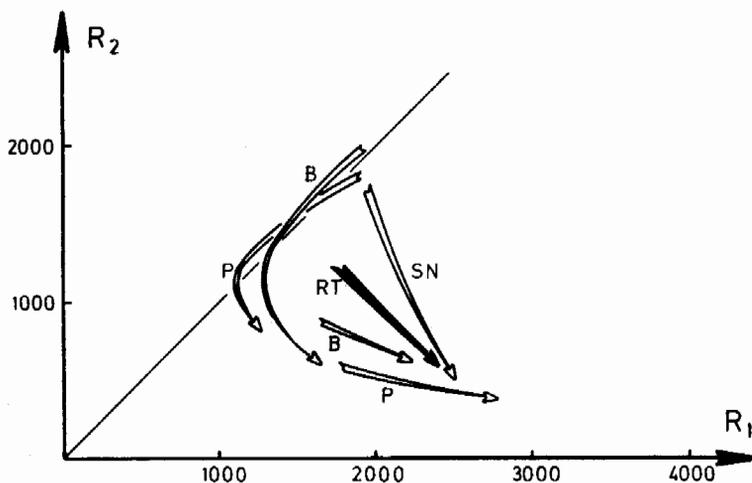


Abb. 2: Vergleich der Rieserferner Intrusion mit anderen kalkalkalischen Plutoniten an Hand der  $R_1$ - und  $R_2$ -Werte ( $R_1$ :  $4 \text{ Si} - 11 (\text{Na} + \text{K}) - 2 (\text{Fe} + \text{Ti})$ ,  $R_2$ :  $6 \text{ Ca} + 2 \text{ Mg} + \text{Al}$ ) nach DE LA ROCHE et al. (1980). Die Pfeilrichtung entspricht dem jeweiligen Differenzierungstrend. RT – Rieserferner Intrusion, SN – Sierra Nevada Batholith, B – Balons Massiv, P – Ploumanach Massiv.

### 5. Mineralogie – Mineralchemismus

Neben den Dünnschliff- und röntgenographischen Untersuchungen wurde die Zusammensetzung der auftretenden Mineralphasen an ausgewählten Gesteinsproben mit der Elektronenstrahl-Mikrosonde untersucht. Die Analysen wurden auf einem Gerät des Typs ARL-SEM-Q bei einer Anregungsspannung von 15 kV und einem Probenstrom von 15–25 nA bestimmt. Gemessen wurde gegen Mineralstandards, die notwendige Korrektur für Absorption und Fluoreszenz wurde nach BENCE & ALBEE (1968) durchgeführt. Für die Mikrosondenanalysen der mafischen Mineralphasen erfolgte eine Berechnung der maximal möglichen  $\text{Fe}^{3+}$  Konzentration aus einer Kationenbilanz.

#### Plagioklas:

Die idiomorph bis hypidiomorph ausgebildeten Plagioklase stellen in allen drei Gesteinstypen die Hauptmasse der hellen Gemengteile dar und erreichen unterschiedlich je nach Gesteinsart eine Größe bis zu 4 mm. Verzwilligungen treten hauptsächlich nach dem Albit und Karlsbader Gesetz auf. Typisch für die Plagioklase ist ein ausgeprägter Zonarbau mit Rekurrenzen (Taf. 1, Fig. 1). Die Plagioklaskerne weisen in den Tonaliten einen mittleren Anorthitgehalt von 70 %, in den Granodioriten von 57 % und in den Graniten von 63 % auf. Die anorthitreichen Kerne sind zumeist stark zerbrochen und zu Kernringen und Kerngerüsten korrodiert. Sie zeigen äußerst unregelmäßige Umrisse und bei den noch erhalten gebliebenen Individuen sind mitunter Korrosionsschläuche zu erkennen. Einschlüsse von saurem Plagioklas, Chlorit, Klinozoisit sowie Quarz und Alkalifeldspat sind zu beobachten. Eine beginnende Mikrolithenbildung ist festzustellen. Feinschuppiger Serizit, Klinozoisit, Epidot und andere Sekundärminerale zeichnen dann das Kerngerüst nach. Für die Plagioklashülle ist in allen drei Gesteinstypen ein annähernd gleicher Anorthitgehalt um 50 % festzustellen. Sie

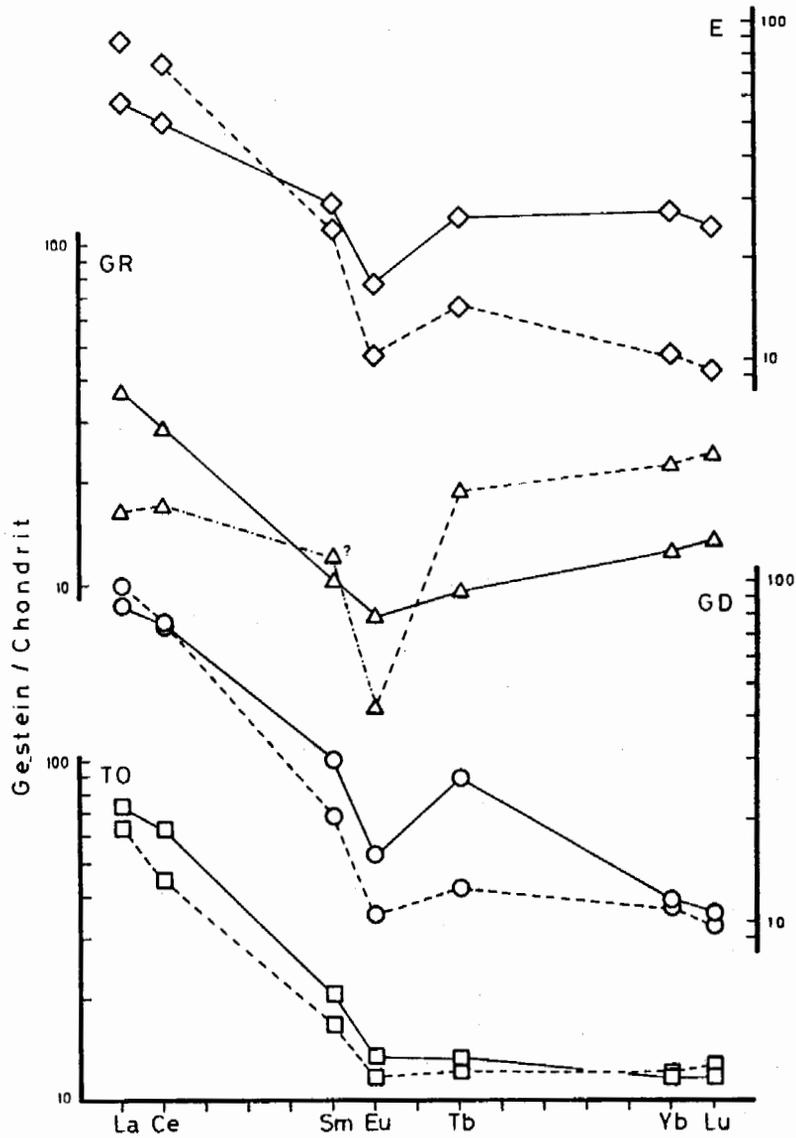


Abb. 3: Chondritnormierte Verteilung der Seltenen Erden in den Tonaliten (TO), Granodioriten (GD), Graniten (GR) und basischen Einschlüssen (E) der Rieserferner Intrusion.

ist gegen den magmatisch korrodierten Plagioklaskern scharf abgegrenzt und zeigt normalen Zonarbau mit Rekurrenzen. In dieser Zone sind die Zwillingslamellen gut entwickelt. Sie können in Richtung Plagioklaskern unstetig werden und mitunter auch auskeilen. Die Randzone der Plagioklase weist in diesen Gesteinen einen mittleren Anorthitgehalt von 30 % auf. Durch die angrenzenden Mineralphasen wird diese Zone stark beeinträchtigt und ist daher zumeist nur schwach ausgebildet (s. Taf. 1, Fig. 1).

#### Alkalifeldspat:

Der Alkalifeldspat ist für die nomenklatorische Zuordnung dieser Gesteine verantwortlich und erreicht in den granitischen Gesteinen Modalgehalte bis 20 % v/v. Die einzelnen Individuen zeigen ein schattenhaftes Auslöschen mit Flecken feinsten Gitterung. Myrmekitbildung sowie eine spindelförmige perthitische Entmischung ist häufig zu beobachten. Sekundäre Zersetzungs- und Füllungserscheinungen sind nur selten vorhanden. Im Mittel weisen die Alkalifeldspäte eine Zusammensetzung von 98 Mol% Orthoklas und etwa 2 Mol% Albit auf. Die Anorthitkomponente (<0,1 Gew.% CaO) erreicht in den Alkalifeldspäten kaum eine nennenswerte Bedeutung.

#### Quarz:

In den Gesteinen der Rieserferner Intrusion ist Quarz, je nach Gesteinstyp, in unterschiedlichem Mengenverhältnis vertreten und weist in den Tonaliten Modalgehalte bis 23 % v/v auf. Die saureren Gesteinsvarietäten erreichen Quarzgehalte um 30% v/v. Die einzelnen Quarzindividuen sind xenomorph ausgebildet und zeigen durchwegs undulöse Auslöschung.

#### Biotit:

In allen drei Gesteinstypen bildet der Biotit den wichtigsten Vertreter der mafischen Gemengteile und nimmt mengenmäßig von Granit über Granodiorit und Tonalit mit 10 über 16 zu 20 Volumsprozent zu. In den Graniten stellt Biotit die einzige mafische Mineralphase dar. Die hypidiomorph bis xenomorph ausgebildeten Biotitindividuen zeigen einen Pleochroismus von hellbraun nach dunkelbraun und erreichen im Tonalit eine maximale Größe von 4 mm. Häufig sind entlang von Spaltrissen und an den Biotiträndern Anreicherungen von Titanit und Eisenhydroxid zu beobachten. In Verbindung mit diesen sind mitunter feinste Schuppen von Muskowit (<0,5 mm) zu erkennen. Als Einschlüsse im Biotit sind vor allem Apatit, Zirkon und untergeordnet Ilmenit sowie sehr selten Plagioklas zu erwähnen.

Die Mineralchemismen der Biotite wurden großteils mit der Mikrosonde bestimmt und nur von einigen ausgewählten Proben wurden die Biotite separiert und naßchemisch untersucht. Ihrem Chemismus nach liegen die Biotite im mittleren Bereich des Feldes, welches von den Endgliedern Annit–Siderophyllit–Phlogopit–Eastonit gebildet wird. Die Biotite zeigen ein relativ einheitliches Fe/(Fe+Mg)-Verhältnis um 0,55. Sie besitzen jedoch in bezug auf die Ti-Gehalte eine größere Streuung von 0,08 – 0,25/11 Ox. Die Al-Gehalte und die Besetzungsdichte in der oktaedrischen Position weisen ebenfalls größere Schwankungen von 2,6 – 3,4 bzw. 2,75 – 2,9/11 Ox auf. Die Fe<sup>3+</sup>-Konzentration, im Mittel um 0,117, kann als relativ gering bezeichnet werden. Mit fortschreitender Differentiation ist ein Anstieg des Fe/(Fe+Mg)-Quotienten von 0,551 auf 0,601 zu beobachten. Ein gleicher Trend ist auch bei den F-Gehalten von 0,11% auf 0,32% zu erkennen.

#### Amphibol:

In den Gesteinen der Rieserferner Intrusion stellen Amphibole neben Biotit den häufigsten mafischen Gemengteil dar und erreichen in den Tonaliten Modalgehalte

um 9% v/v. Am Aufbau der Granodiorite sind die Amphibole mit etwa 4% v/v nur untergeordnet beteiligt. In den Gesteinen mit granitischer Zusammensetzung konnte nur ein Korn beobachtet werden. In den basischen Einschlüssen dominiert Amphibol mit Modalgehalten um 40% v/v. Die einzelnen Amphibolindividuen, die in den Tonaliten eine maximale Größe von 15 mm erreichen sind hypidiomorph bis xenomorph ausgebildet und besitzen einen Pleochroismus von  $n_x$ : gelbgrün,  $n_y$ : grün und  $n_z$ : hellgrün. Mitunter zeigen die Amphibole in den Tonaliten im Kernbereich einzelne Cluster mit bräunlicher Färbung. Die Amphibole der Granodiorite zeigen ähnliche Strukturen wie in den Tonaliten, sind jedoch deutlich kleiner ausgebildet und besitzen einen Pleochroismus von  $n_x$ : hellgelbgrün und  $n_y = n_z$ : dunkelgrün. Bräunliche Cluster im Kernbereich konnten an diesen Amphibolen nicht beobachtet werden. In den basischen Einschlüssen besitzen die Amphibole einen ähnlichen Pleochroismus wie in den Tonaliten, jedoch mit ausgeprägten bräunlichen Kernen. In den Amphibolen der Tonalite und Granodiorite sind häufig Umwandlungen von Amphibol zu unregelmäßig begrenzten Biotitindividuen zu beobachten. Einzelne Amphibolindividuen zeigen mitunter Korrosionserscheinungen, die von albitreichem Plagioklas und Quarz ausgefüllt sind. Häufig vergesellschaftet mit den Amphibolen konnten unregelmäßig ausgebildete Klinozoisitaggregate festgestellt werden. Als Einschlüsse in den Amphibolen findet man vor allem Zirkon, Apatit, Ilmenit und je nach Gesteinstyp Plagioklas.

In der Nomenklatur nach LEAKE (1978) fallen die Amphibole zum Großteil in das Feld der Magnesio-Hornblende mit leichten Tendenzen zu Ferro-Hornblende, tschermakitischer und ferro-tschermakitischer Hornblende (Abb. 4). Die Amphibole weisen einen durchschnittlichen  $Mg/(Mg+Fe)$ -Quotienten um 0,55 auf und besitzen in der tetraedrischen Position eine Si-Besetzung von 7,2–6,25. Eine leichte, nur undeutlich ausgebildete Zonierung ist zu beobachten.

a) Amphibole der Tonalite: Diese Amphibole weisen eine große Streuung in der Si-Besetzung und einen  $Mg/(Mg+Fe)$ -Quotienten  $> 0,525$  auf (Abb. 5, Feld I).

Nach ihrer Zusammensetzung erstrecken sie sich über die Felder der Magnesio-Hornblende und tschermakitischen Hornblende. In bezug auf die Zonierung fällt sowohl der  $Mg/(Mg+Fe)$ -Quotient als auch der Si-Gehalt vom Kern in Richtung Rand. Eine, diesem Trend gegenläufige Tendenz zeigt die Pargasitkomponente und das über den Ladungsausgleich berechnete  $Fe^{3+}/Fe^{2+}$ -Verhältnis (Tab. 1).

b) Amphibole der Granodiorite: Die Chemismen dieser Amphibole weisen einen ähnlichen  $Mg/(Mg+Fe)$ -Quotienten wie in den Tonaliten auf, besitzen jedoch eine höhere Si-Besetzungsdichte in der tetraedrischen Position (Abb. 5, Feld II).

In der Zonierung zeigen sie gleiches Verhalten wie die Amphibole der Tonalite, nur das berechnete  $Fe^{3+}/Fe^{2+}$ -Verhältnis zeigt einen entgegengesetzten Verlauf (Tab. 1).

c) Amphibole der basischen Einschlüsse: Die Amphibole dieser Gesteine weisen einen relativ variablen Chemismus auf und fallen in der Nomenklatur nach LEAKE (1978) in die Felder der Magnesio-Hornblende, tschermakitischen Hornblende und Ferro-Hornblende sowie zwei Analysen in das Feld der eisenreichen Pargasite (Abb. 5, Feld III).

Im Mittel weisen die Amphibole einen  $Mg/(Mg+Fe)$ -Quotienten von 0,528–0,5712 und eine Si-Besetzungsdichte von 6,4–6,8 auf. Die zumeist gut ausgebildete Zonierung zeigt, daß die Amphibolkernbereiche einen geringeren  $Mg/(Mg+Fe)$ -Quotienten und geringere Si-Gehalte aufweisen als die Amphibolränder. In bezug auf das  $Fe^{3+}/Fe^{2+}$ -Verhältnis nimmt dieses, wie bei den Granodioriten, vom Kern in Richtung Rand zu (Tab. 1).

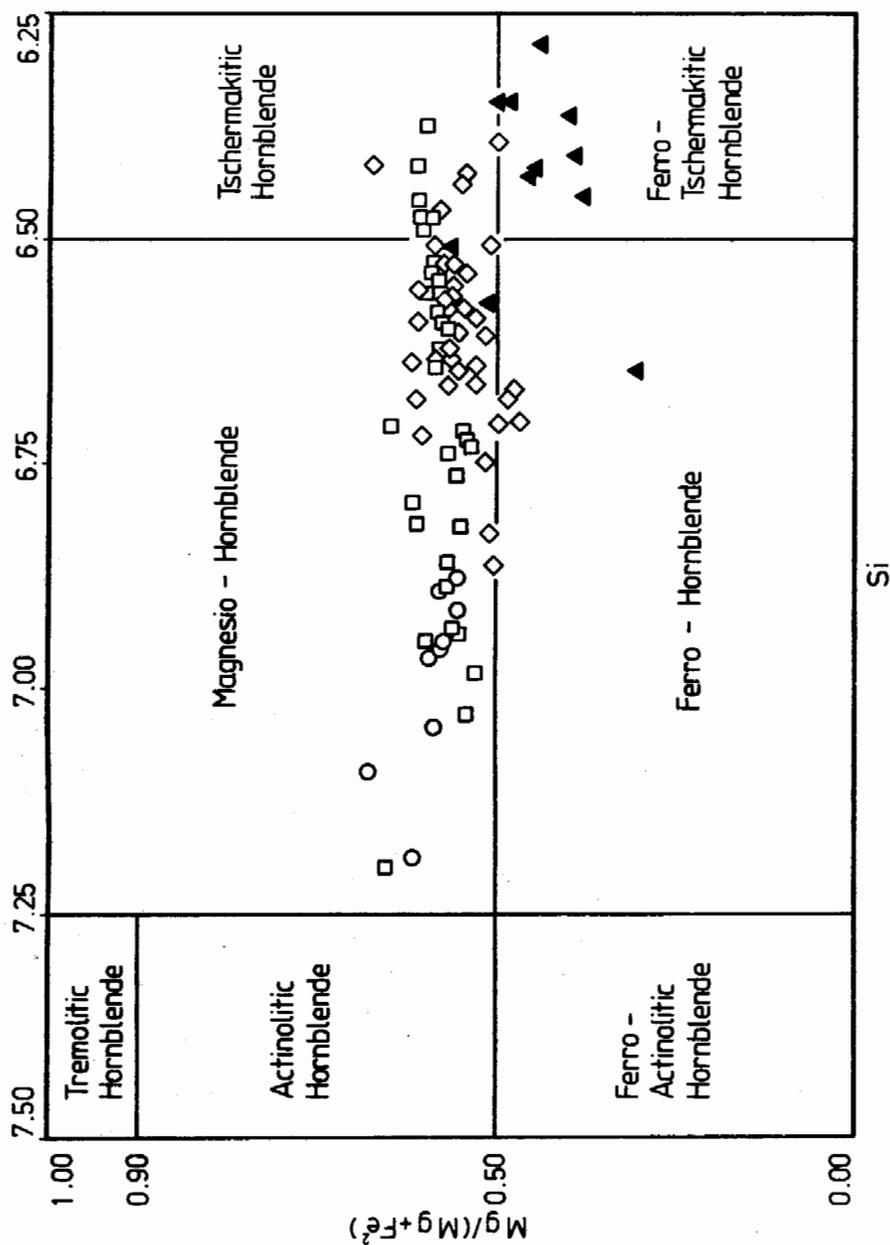


Abb. 4: Nomenklatorische Einstufung der Amphibole nach LEAKE (1978); (□) Tonalite, (○) Granodiorite, (◇) basische Einschlüsse und (▲) im Granat eingeschlossene Amphibole.

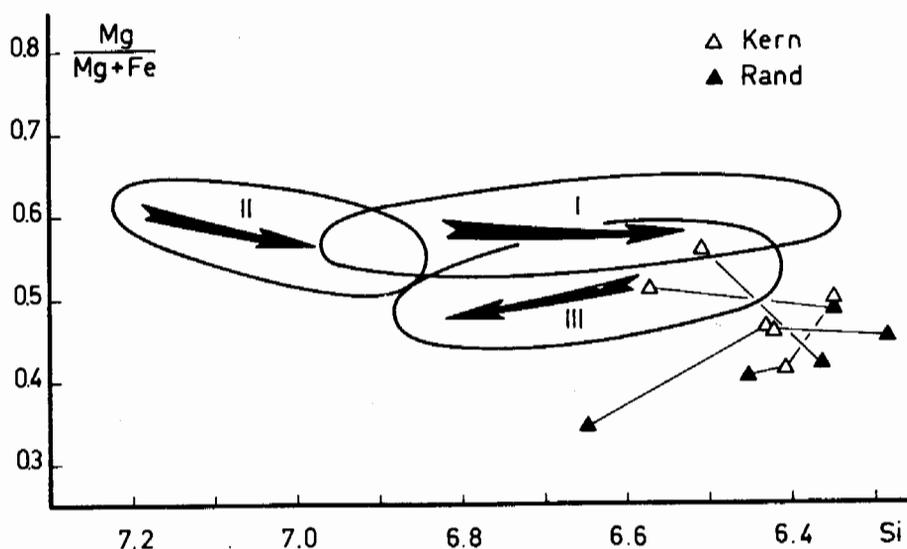


Abb. 5: Amphibolzonierung ausgedrückt durch den Quotienten  $Mg/(Mg+Fe)$  gegen  $Si^4$ ; (I) Tonalite, (II) Granodiorite, (III) basische Einschlüsse und ( $\Delta$ ) Amphibole eingeschlossen im Granat.

Tabelle 1: Gegenüberstellung der  $Mg/(Mg+Fe^{2+})$  und der berechneten  $Fe^{3+}/Fe^{2+}$ -Quotienten in den untersuchten Amphibolen.

	$Mg/(Mg+Fe^{2+})$		$Fe^{3+}/Fe^{2+}$	
	Kern	Rand	Kern	Rand
Im Granat RT-TO 149/2	$0,5072 \pm 0,0634$	$0,3740 \pm 0,0040$	$0,5861 \pm 0,1718$	$0,4566 \pm 0,0535$
Im Granat RT-TO 149/4	$0,4850 \pm 0,0240$	$0,3573 \pm 0,0030$	$0,5223 \pm 0,1358$	$0,3764 \pm 0,0424$
Tonalit	$0,5925 \pm 0,0368$	$0,5702 \pm 0,0246$	$0,3324 \pm 0,0905$	$0,3755 \pm 0,1319$
Granodiorit	$0,4358 \pm 0,0527$	$0,5128 \pm 0,0496$	$0,1612 \pm 0,1570$	$0,1269 \pm 0,1092$
Einschlüsse	$0,5208 \pm 0,0351$	$0,5712 \pm 0,0103$	$0,3456 \pm 0,0901$	$0,2996 \pm 0,0140$

d) Amphibole als Einschlüsse im Granat: Die im Granat eingeschlossenen Amphibole sind nach ihrem  $Mg/(Mg+Fe)$ -Verhältnis und Si-Gehalten zum Großteil als ferrotschermakitische Hornblenden einzustufen (Dreieckssignaturen Abb. 5). Alle Amphibole weisen einen Zonarbau auf, der jedoch zwei unterschiedliche Trends widerspiegelt.

Die Amphibole in der Probe RT-TO 149/2 besitzen einen Zonarbau, bei dem die Kerne einen  $Mg/(Mg+Fe)$ -Quotienten von 0,5072 und eine Si-Besetzung in der tetraedrischen Position von 6,47 aufweisen. In Richtung Amphibolränder verschieben sich diese Werte zu 0,3740 bzw. 6,33 und zeigen somit den gleichen Verlauf im Zonarbau wie die Amphibole der Tonalite. Neben diesen im Granat eingeschlossenen Amphibolen treten in der Probe RT-TO 149/4 ebenfalls im Granat eingeschlossene Amphibolindividuen auf, die ein wesentlich geringeres  $Mg/(Mg+Fe)$ -Verhältnis aufweisen. Im Kern dieser Amphibole beträgt das durchschnittliche  $Mg/(Mg+Fe)$ -Verhältnis

bei einer Si-Besetzung von 6,39. Diese Zusammensetzung verschiebt sich an den Amphibolrändern zu Werten von 0,3573 bzw. 6,56 und zeigt somit gegenüber der zuvor besprochenen Zonierung eine gegenläufige Tendenz. Dieser Verlauf läßt sich gut mit der Amphibolentwicklung in den Einschlüssen korrelieren. In bezug auf das  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ -Verhältnis weisen sowohl die im Granat eingeschlossenen Amphibole als auch die Amphibole in den Einschlüssen ein vom Kern in Richtung Rand abnehmendes, berechnetes  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ -Verhältnis auf (Tab. 1).

#### Granat:

In den Gesteinen der Rieserferner Intrusion ist Granat nur im nordwestlichen Teil des plutonischen Körpers an der Lokalität Gelttal neben zahlreichen basischen Einschlüssen zu beobachten. Die Matrix zwischen diesen Einschlüssen bildet ein Tonalit, der neben großen Hornblendeindividuen noch Granat führt. Die einzelnen hypidiomorph ausgebildeten Granate sind stark zerbrochen und von Einschlüssen durchsiebt. Als Einschlüsse sind vor allem Plagioklas, Amphibol und Biotit zu erwähnen. Eine Besonderheit dieser Granate ist ein bereits makroskopisch erkennbarer Reaktionsraum aus Plagioklas, Amphibol und Biotit sowie Pyrrhotin oder Pyrit (Tafel 1, Fig. 2).

Chemisch gesehen bilden diese Granate einen Mischkristall aus 60 % Almandin, 18 % Pyrop, 13 % Grossular, 5 % Spessartin und 2 % Andradit mit einer leicht ausgebildeten Zonierung.

#### Akzessorien:

**Klinozoisit:** In den Gesteinen der Rieserferner Intrusion stellt Klinozoisit einen häufigen akzessorischen Gemengteil dar. Die einzelnen Individuen zeigen auffällig anomale Interferenzfarben und xenomorphe Kornform. Wie aus dem Schliffbild hervorgeht ist Klinozoisit zum Großteil an die mafischen Mineralphasen wie Biotit, hauptsächlich jedoch an Amphibol gebunden und daher in den basischen Gesteinen häufiger vertreten. Besonders entlang von Spaltrissen und Amphibolrupturen lassen sich die Verwachsungen von Amphibol und Klinozoisit gut beobachten.

**Orthit:** Diese akzessorische Komponente ist, abhängig vom jeweiligen Gesteinstyp, in unterschiedlicher Menge vertreten. Die zumeist idiomorph ausgebildeten Orthitindividuen erreichen eine Größe bis zu 10 mm und lassen mitunter eine Verzwilligung sowie häufig einen Zonarbau erkennen. Die einzelnen Orthitkörner werden häufig von Epidot bzw. Klinozoisit ummantelt und liegen meist ohne Kontakt zu den mafischen Mineralphasen im Feldspat-Quarz-Grundgewebe.

**Ilmenit:** Ilmenit bildet die einzige primärmagmatische Erzphase und scheint in der basischeren Fazies (Tonalit) leicht angereichert zu sein. Die im Schliffbild rundlich erscheinenden Ilmenitkörner sind generell in die mafischen Mineralphasen eingeschlossen und weisen in bezug auf die Elemente Ti und Fe relativ einheitliche Chemismen auf. Auffallend an diesen Ilmeniten ist ihr hoher Mn-Gehalt (bis zu 7,8 Gew.% MnO), der auch von anderen vergleichbaren Intrusivkörpern beschrieben wird.

**Apatit:** In den Gesteinen der Rieserferner Intrusion bildet Apatit einen häufigen akzessorischen Gemengteil. Die einzelnen Apatitindividuen zeigen rundliche Kornformen und sind hauptsächlich in Biotit und nur untergeordnet in Amphibol eingeschlossen.

**Zirkon:** Zirkon ist in diesen Gesteinen ein gängiger akzessorischer Gemengteil und kommt sowohl frei als auch in den mafischen Mineralphasen eingeschlossen vor, in denen er mitunter radiogene Höfe bildet.

## 6. Kristallisationsbedingungen - Vergleich mit experimentellen Arbeiten

Die Kristallisationsabfolge eines Magmas wird hauptsächlich durch die Temperatur, den Gesamtdruck, den Gehalt an Wasser sowie anderer flüchtiger Bestandteile und die Sauerstoff fugazität kontrolliert. Schmelzen mit granitischer bis tonalitischer Zusammensetzung wurden unter verschiedenen Bedingungen von TUTTLE & BOWEN (1958), PLATEN (1965), ROBERTSON & WYLLIE (1971), PIWINSKI (1973), MAALØE & WYLLIE (1975), WINKLER (1976) und WINKLER et al. (1975, 1977, 1978) experimentell bearbeitet.

Um nun eine Vorstellung über den Kristallisationsverlauf in den Tonaliten, Granodioriten und Graniten der Rieserferner Intrusion zu erhalten, werden diese Gesteine an Hand der experimentellen Daten von WINKLER (1976) und WINKLER et al. (1975, 1977, 1978) im System Ab-An-Or-Qz-H<sub>2</sub>O bezogen auf 5 kbar untersucht. Um die Lage der einzelnen Projektionspunkte in den Darstellungen nicht zu verfälschen, wird für die Verrechnung der chemischen Analyse die von MIELKE & WINKLER (1979) vorgeschlagene Mesonorm verwendet. Die ermittelten normativen Gehalte an Albit, Anorthit, Orthoklas und Quarz sind in die Dreiecksdarstellungen Ab-Or-Qz und Ab-An-Or, bezogen auf 5 Kbar PH<sub>2</sub>O, eingetragen (Abb. 6). Die einzelnen Punkte, die die Gesteinszusammensetzung darstellen (offene Signaturen), weisen für die Lage in der Projektion Ab-Or-Qz einen zu großen Gehalt an Anorthit auf, und somit liegen diese Punkte nach ihrer Zusammensetzung noch im Plagioklasraum. Dies bedeutet, daß diese Schmelzen, je nach Zusammensetzung, eine unterschiedliche Menge an anorthitreichem Plagioklas ausscheiden müssen, bis sie die kotektische Fläche (geschlossene Signaturen) erreichen. Die Menge an Plagioklas, die bis zum Erreichen der kotektischen Fläche ausgeschieden wird, beträgt für die Tonalite 35–25 % und liegt in einem Temperaturintervall von 730–700°C, für die Granodiorite 23–14 % bei 700–685°C und für die Granite 3–0 % bei 680–675°C bezogen auf 5 Kbar PH<sub>2</sub>O (Tab. 2).

Da die Experimente bei  $P_{\text{tot}} = P_{\text{H}_2\text{O}}$  durchgeführt wurden, muß bei Anwesenheit anderer fluider Phasen mit einer Beeinflussung auf die Ergebnisse gerechnet werden. Die beiden Projektionen Ab-Or-Qz und Ab-An-Or zeigen, daß diese Gesteine, die im Gelände fließend ineinander übergehen, sich durch ihre mengenmäßige Ausscheidung von anorthitreichem Plagioklas bis zum Erreichen ihrer kotektonischen Zusammensetzung unterscheiden lassen. Die Bereiche von Tonalit und Granodiorit liegen relativ eng beisammen, können jedoch voneinander getrennt werden. Die Granite hingegen sind deutlich von diesen beiden Gruppen abgesetzt.

Bei der mikroskopischen Untersuchung ist in allen drei Gesteinstypen eine gleichverlaufende Kristallisationsabfolge festzustellen. Es kristallisieren zuerst Plagioklas, mehr oder weniger gleichzeitig Amphibol und Biotit und im Endstadium der Solidifikation Quarz und Alkalifeldspat. Diese Beobachtung steht in gutem Einklang mit den experimentellen Ergebnissen von WINKLER (1976) und WINKLER et al. (1975, 1977, 1978) aus denen sich eine Kristallisationsabfolge von Plagioklas, Quarz und Alkalifeldspat ergibt (Tab. 2, Abb. 6).

Vergleicht man die zeitliche Abfolge der einzelnen Mineralphasen mit den von PIWINSKII (1973) experimentell bei 1,2 und 10 Kbar PH<sub>2</sub>O festgestellten Phasengrenzen, so lassen sich diese am besten mit der Kristallisationsabfolge bei etwa 2 Kbar PH<sub>2</sub>O korrelieren. Dieser Druck läßt sich, wie PROCHASKA (1980) in seinen Untersuchungen gezeigt hat, auch vom geologischen Standpunkt am besten vertreten. Unter

Tabelle 2: Gegenüberstellung von Gesteinszusammensetzung und korrekischer Zusammensetzung in den Gesteinen der Rieserferner Intrusion.

GESTEIN		Qz	Ab	An	Or	Ab/An	B E M E R K U N G E N
TONALIT	Gest. Zstg.	31,74	30,61	32,55	5,10	0,94	im Plagioklasraum auf der kot. Fläche bei der Isotherme von 730°C und einem An-Gehalt von 14,5%. Die Schmelze besteht nun aus 32,5% Plagioklas (An 70) solid, etwa 7% Hornblende und Biotit im Plagioklasraum
	Kot. Zstg.	47,03	30,91	14,51	7,55	2,13	
GRANO-DIORIT	Gest. Zstg.	33,71	30,77	21,68	14,25	1,24	auf der kot. Fläche bei der Isotherme von 700°C und einem An-Gehalt von 13,5% (interpol.). Die Schmelze besteht nun aus 18% Plagioklas (An 58) solid, 5% Biotit und Hornblende und 77% Schmelze. im Plagioklasraum
	Kot. Zstg.	41,10	27,81	13,71	17,37	2,03	
GRANIT	Gest. Zstg.	36,29	28,38	12,07	23,26	2,35	auf der kot. Fläche bei der Isotherme von 675°C und einem An-Gehalt von 10,7% (interpol.). Die Schmelze besteht nun aus 2,5% Plagioklas (An 63) solid, etwas Biotit und 95% Schmelze. im Plagioklasraum
	Kot. Zstg.	37,22	28,16	10,76	23,86	2,62	

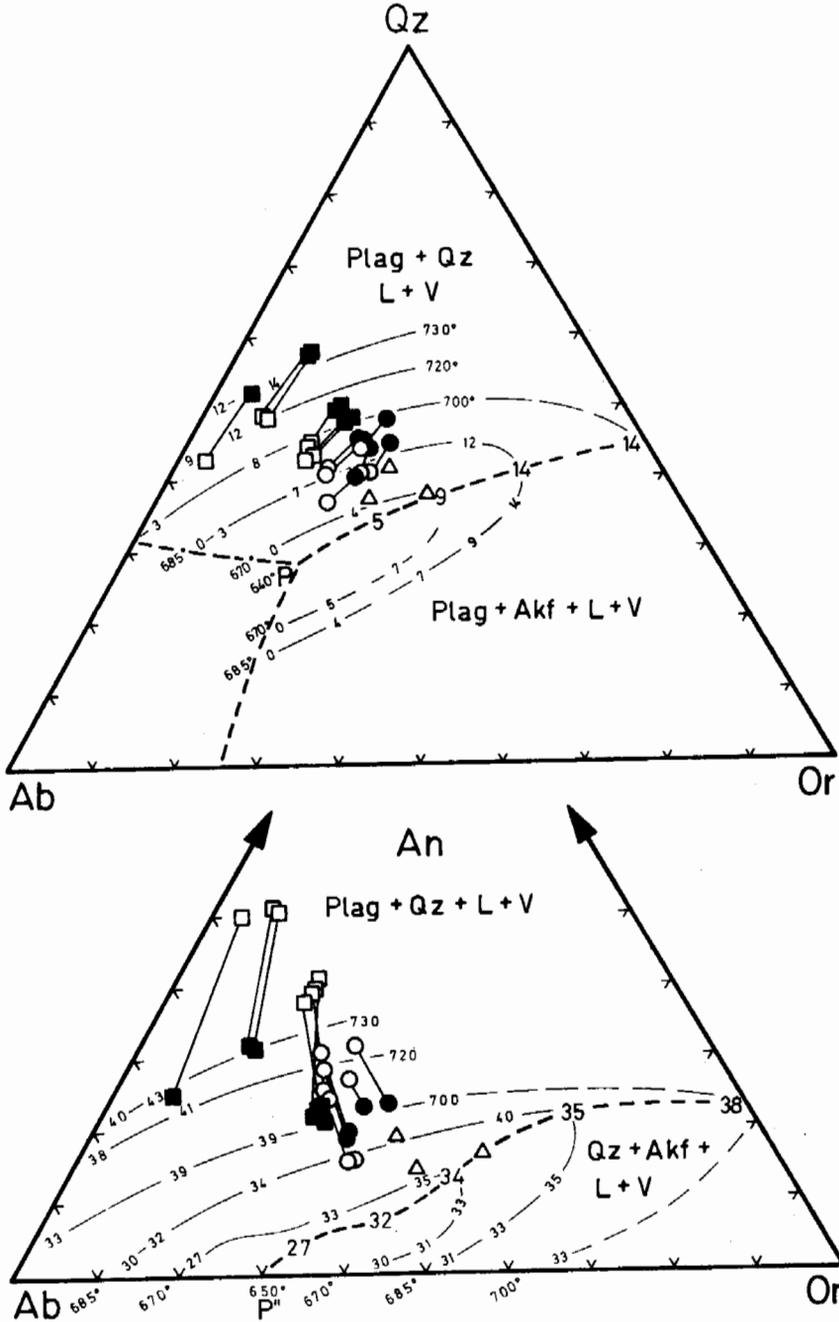


Abb. 6: Darstellung der Schmelzchemismen im System Qz-Ab-An-Or-H<sub>2</sub>O bei 5 Kbar P<sub>H<sub>2</sub>O</sub> (WINKLER, 1977, 1978); Signaturen wie in Abb. 1; offene Punkte - Gesteinszusammensetzung, geschlossene Punkte - Kotektische Zusammensetzung. Die Nummern geben den Anorthit- bzw. Quarzgehalt in Prozent an.

diesen Druckbedingungen beginnt in den Tonaliten eine erste Ausscheidung von Plagioklas bei  $930^{\circ}\text{C}$ . In den Granodioriten erfolgt dies bei einer Temperatur um  $870^{\circ}\text{C}$  und für die Granite bei etwa  $830^{\circ}\text{C}$  bezogen auf 2 Kbar  $\text{P}_{\text{H}_2\text{O}}$ . Da jedoch eine erste Ausscheidung von Plagioklas sicherlich unter höheren Druckbedingungen erfolgt ist, dürften die tatsächlichen Temperaturen wesentlich geringer gewesen sein. Berücksichtigt man die Druckunterschiede dieser Experimente und vergleicht man die Ergebnisse von PIWINSKII (1973) mit denen aus der Darstellung nach WINKLER et al. (1975, 1977, 1978) ergeben sich durchaus vergleichbare Resultate.

Die experimentellen Arbeiten von WINKLER et al. (1975, 1977, 1978) und PIWINSKII (1973) wurden bei  $\text{P}_{\text{tot}} = \text{P}_{\text{H}_2\text{O}}$  durchgeführt. Aus den Arbeiten von LUTH (1969), BROWN & FYFE (1970), PIWINSKII & WYLLIE (1970) und ROBERTSON & WYLLIE (1971) geht jedoch relativ einfach hervor, daß die natürlichen Granitsysteme in ihrer Entwicklungsgeschichte großteils an  $\text{H}_2\text{O}$  untersättigt sind, beziehungsweise nur in Ausnahmefällen der  $\text{H}_2\text{O}$ -Gehalt die Werte von 2–3 Gew.% übersteigt. Erst bei einer fortschreitenden Kristallisation und einem Magmenaufstieg kann es in der Schmelze zu einer derartigen Anreicherung von  $\text{H}_2\text{O}$  kommen, sodaß in gewissen Teilbereichen der Schmelze annähernd die Bedingungen  $\text{P}_{\text{tot}} \sim \text{P}_{\text{H}_2\text{O}}$  auftreten können. Die daraus resultierenden Auswirkungen auf die Stabilitätsgrenzen der einzelnen Mineralphasen ist aus den Arbeiten von ROBERTSON & WYLLIE (1971) deutlich ersichtlich (Abb. 7). Die Soliduskurve einer  $\text{H}_2\text{O}$ -hältigen granodioritischen Schmelze besitzt eine negative Steigung, und mit steigendem Druck sinkt die Solidustemperatur bis auf  $650^{\circ}\text{C}$  ab. Die Liquiduskurve, die im unteren Bereich von Klinopyroxen und im oberen Teil von Hornblende gebildet wird, erreicht hingegen Temperaturen um  $1000^{\circ}\text{C}$  (Abb. 7 A). Die Gesteine der Rieserferner Intrusion führen jedoch OH-hältige Mineralphasen wie Amphibol und Biotit, aus deren Erscheinungsbild und Mineralchemismus auf eine primär magmatische Ausscheidung geschlossen werden kann und somit sind für diese Gesteine die trockenen Bedingungen als nicht zutreffend zu betrachten.

Eine genauere Abschätzung des  $\text{H}_2\text{O}$ -Gehaltes in der Schmelze ist anhand der Stabilitätsgrenze von Biotit möglich (MALLØE & WYLLIE, 1975). Diese ändert sich gegenüber den Phasengrenzen der OH-freien Mineralphasen bei konstanter Sauerstoff-fugazität, konstantem Gesamtdruck und wechselndem Wassergehalt in der Schmelze nur geringfügig von  $840^{\circ}\text{C}$  bei  $\text{P}_{\text{tot}} = \text{P}_{\text{H}_2\text{O}}$  zu  $875^{\circ}\text{C}$  bei geringeren  $\text{H}_2\text{O}$ -Gehalten (Abb. 8). Demzufolge bildet die Stabilitätsgrenze von Biotit eine scharfe Schnittstelle mit den Phasengrenzen der OH-freien Minerale und die zeitliche Lage des Biotits, in bezug auf die Kristallisationsabfolge, wird im wesentlichen durch den  $\text{H}_2\text{O}$  Gehalt in der Schmelze beeinflusst. Rückschließend aus den Stabilitätsbedingungen von Biotit und der petrographisch beobachteten Kristallisationsabfolge von Plagioklas - Hornblende  $\rightarrow$  Biotit  $\rightarrow$  Quarz  $\rightarrow$  Alkalifeldspat ergibt dies für die Gesteinsschmelzen der Rieserferner Intrusion Wassergehalte von 2,5 – 6 Gew. % bezogen auf 2 Kbar bei Ni-NiO Pufferbedingungen.

## 7. Diskussion

Die südlich des Tauernfensters und nördlich der Defregger–Antholzer–Valser Linie liegende Rieserferner Intrusion wird von Tonaliten (ca. 40 Vol. %) Granodioriten (ca. 50 Vol. %) und Graniten (ca. 10 Vol. %) aufgebaut. Vereinzelt sind noch diverse Einschlüsse zu beobachten. Das Intrusionsalter (K/Ar und Rb/Sr Altersdatierung-

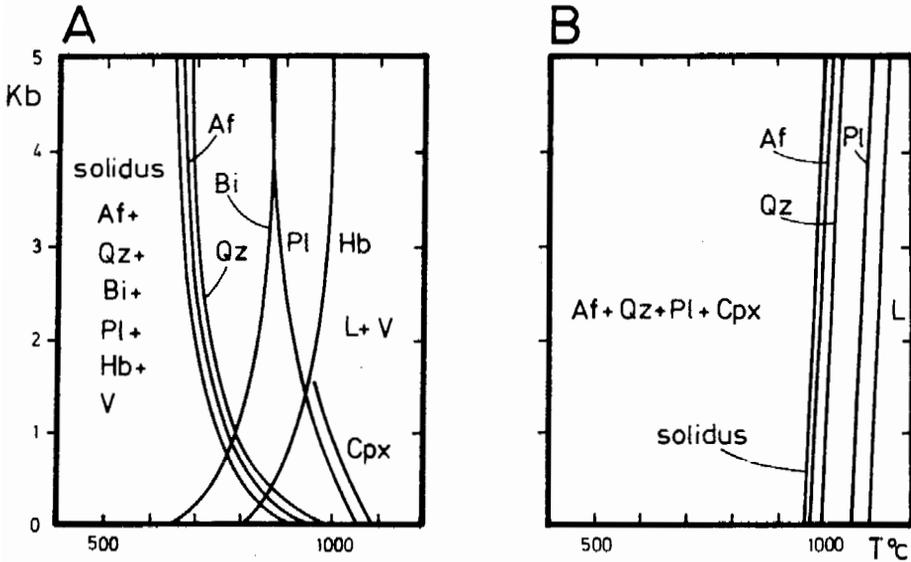


Abb. 7: Phasenbeziehungen einer granodioritischen Schmelze bei Wasserüberschuß (A) und trockenen Bedingungen (B) nach ROBERTSON & WYLLIE (1971).

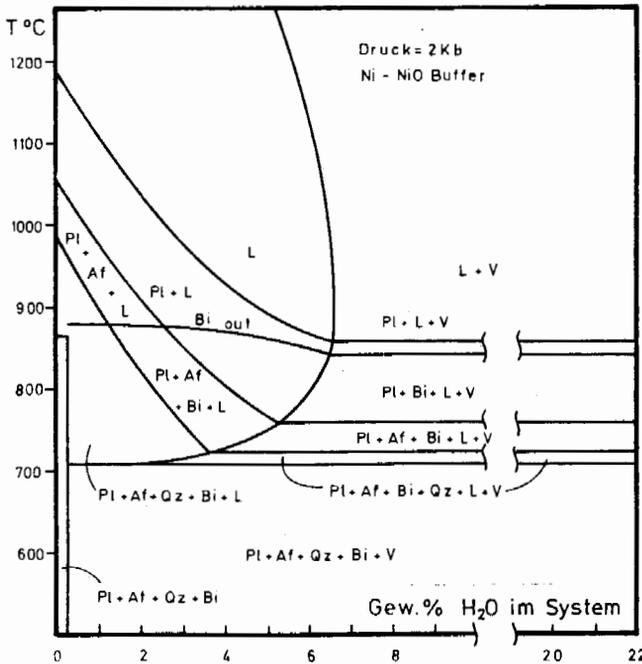


Abb. 8: Kristallisationsintervall eines Biotit-Granits als Funktion einer H<sub>2</sub>O-hältigen Schmelze unter den Bedingungen des Ni-NiO Puffers bei 2 Kbar nach MAALØE & WYLLIE (1975).

gen) kann nach BORSI, DEL MORO, SASSI, ZIRPOLI (1979) mit 32–33 my angegeben werden.

Alle drei Gesteinstypen zeigen einen variablen Mineralbestand von stark zonargebautem Plagioklas ( $An_{80-30}$ ), Alkalifeldspat, Quarz, Biotit und Amphibol sowie an einer Lokalität, im Kontaktbereich des Intrusivkörpers, etwas Granat.

Geochemisch weisen diese sauren bis intermediären Plutonite korund- und diopsidnormative Zusammensetzungen auf und zeigen einen für kalkalkalische Gesteine typischen Differentiationstrend. Diese Entwicklung kommt sowohl in den einzelnen Elementkorrelationen als auch in den Verteilungsmustern der REE gut zum Ausdruck. Wie aus dem Pauschalchemismus, der REE Verteilung und den unterschiedlichen  $^{87}Sr/^{86}Sr$  Verhältnissen hervorgeht, können für die Entwicklung dieser Gesteine die Modelle einer partiellen Aufschmelzung einer kontinentalen Kruste sowie die fraktionierte Kristallisation aus einer Schmelze diskutiert werden.

a) **Aufschmelzung von ozeanischem Krustenmaterial:** Ausgehend von den Sr/Ca Korrelationen (BELLIENI, 1978) wurde diese Entstehungsmöglichkeit in Betracht gezogen.

Diese Vorstellung steht jedoch im Widerspruch mit dem Pauschalchemismus und den Verteilungsbildern der REE, die das Modell einer ozeanischen Krustenaufschmelzung nur bedingt erfüllen. In diesem Fall muß ein Ausgangsmaterial angenommen werden, welches bei einer partiellen Anatexis eine Schmelzzusammensetzung mit einer positiven Sr- und  $Tb_N/Yb_N$  ( $Tb$  chondr. normiert/ $Yb$  chondr. normiert) Korrelation gegen den Differentiationsindex ergibt. Diese Voraussetzungen werden in der Kruste von eklogitischen Gesteinen erfüllt, die bei einer partiellen Aufschmelzung, verbunden mit einer bei geringem Druck erfolgten Kristall-Liquid Fraktionierung von Amphibol und Plagioklas, Schmelzchemismen ergeben, die mit dem beobachteten  $Tb_N/Yb_N$  Verhältnis und Sr-Gehalten vergleichbar sind. Dieses Modell kann jedoch nicht die geringe Variation der Spurenelemente (Co, Sc und Rb) erklären und somit scheint für die magmatische Entwicklung der Rieserferner Intrusion dieses Modell nicht relevant zu sein.

b) **Aufschmelzung von kontinentaler Kruste:** Für diese Modellvorstellung können am ehesten Grauwacken bzw. deren metamorphe Äquivalente als Ausgangsmaterial angenommen werden, da diese Gesteine bei einer partiellen Anatexis für Tonalite und Granodiorite geeignete Schmelzchemismen ergeben. Dieses Modell erfüllt wohl die Konzentration bezüglich der Hauptelemente, läßt sich aber nicht mit den REE und Spurenelementgehalten, sowie den mikroskopischen Beobachtungen in Einklang bringen. Bei einer partiellen Aufschmelzung einer Grauwacke müßten Granat bzw. Pyroxen im Residuum enthalten sein. Dies bedingt bei residualem Granat eine Verarmung in den HREE in der Schmelze bzw. bei Pyroxen in den LREE und in der Folge die Ausbildung einer Europiumanomalie. In den Tonaliten der Rieserferner Intrusion, die die primitivsten Schmelzen darstellen, ist in den REE-Verteilungsbildern keine Verarmung an HREE sowie eine Europiumanomalie festzustellen. Ein weiteres Argument gegen diese Modellvorstellung liefern die für gleiche Gesteine unterschiedlichen Sr-Gehalte. Ebenso könnten die hohen Anorthitgehalte in den Plagioklaskernen durch dieses Modell nicht geklärt werden, da für die Bildung dieser Plagioklaskerne Temperaturen von  $850^{\circ}C$  bezogen auf 5 Kbar  $PH_2O$  notwendig sind, und unter diesen P-T Bedingungen bereits eine quantitative Aufschmelzung erfolgt. Ein derartig steiler geothermischer Gradient ist jedoch in dieser geologischen Position nicht zu erwarten und aus diesen Gründen scheidet für die Bildung

der Rieserferner Intrusion eine partiell aufgeschmolzene kontinentale Kruste des Ostalpins als eher unwahrscheinliche Möglichkeit aus.

c) **Fraktionierte Kristallisation aus einer Schmelze:** Auf das Modell einer Kristall-Liquid Fraktionierung kann aus der geringen Variation der Haupt- sowie einiger Spurenelemente (Co, Sc und Rb) gegen den Differentiationsindex geschlossen werden. In diesem Modell können unabhängig von der Zusammensetzung des Stammagmas (vermutlich eine Schmelze mit andesitischer Zusammensetzung), die einzelnen Korrelationen durch eine stufenweise Kristall-Liquid Fraktionierung erklärt werden. Wobei eine erste, unter höherem Druck stattfindende Fraktionierung von Amphibol und eventuell Granat, jene Schmelzchemismen (Tonalite, Granodiorite) bildet, die eine positive Korrelation von  $Tb_N/Yb_N$  sowie Sr gegen den Differentiationsindex und ein  $Tb_N/Yb_N > 1$  aufweisen. In einer zweiten Stufe, bei geringerem Druck, erfolgt neben einer Reaktion von Granat zu Plagioklas eine Fraktionierung von Amphibol. Bei diesem zweiten Fraktionierungsschritt werden jene Gesteine gebildet (Tonalite, Granodiorite und Granite), die höhere  $SiO_2$ - und geringere Sr-Gehalte sowie ein Verhältnis von  $Tb_N/Yb_N < 1$  aufweisen.

Abschließend kann gesagt werden, daß die Verteilung der Seltenen Erden in den Gesteinen der Rieserferner Intrusion einem Kalkalkali-Trend folgt, der große Ähnlichkeit mit den, an Kontinentalrändern auftretenden, intermediären kalkalkalischen Gesteinen zeigt. Das Ausgangsmaterial für diesen plutonischen Körper könnten andesitische Schmelzen darstellen, deren Chemismus durch verschiedene Fraktionierungs- bzw. Assimilationsprozesse verändert wurden, sodaß sie heute als Tonalite, Granodiorite und Granite die Rieserferner Intrusion aufbauen. Diese Vorstellung würde einer partiellen Aufschmelzung von ozeanischem Krustenmaterial in einer Subduktionszone entsprechen, verbunden mit einer fraktionierten Kristallisation in einer Magmenkammer. Im vorliegenden Fall, der Rieserferner Intrusion, fehlen jedoch ausreichende Kenntnisse über die paläogeologische Situation, daher ist eine Modellvorstellung, Subduktion eines Ozeanbodens, nicht eindeutig belegt. Für die Bildung der Rieserferner Intrusion scheint zwar die Möglichkeit einer partiell aufgeschmolzenen, kontinentalen Kruste des Ostalpins unwahrscheinlich zu sein; hingegen wäre aber die Vorstellung einer teilweisen Aufschmelzung des südlichen (heutigen) Tauernkristallins in Kombination mit Differentiation bzw. fraktionierter Kristallisation für die Bildung der Rieserferner Intrusion denkbar. Die Mischung aus Ophiolithen und kontinentalem Krustenmaterial würde in diesem Fall auch die stark schwankenden  $^{87}Sr/^{86}Sr$  Verhältnisse erklären.

Grundsätzlich stellt die periadriatische Linie ein ausgezeichnetes Lineament dar und das wiederholte Auftreten von intermediären bis sauren Magmatiten kann als Hinweis auf eine alpidische Subduktionszone gedeutet werden.

Einzelne Entwicklungsstadien der Schmelze lassen sich noch vereinzelt in den verschiedenen Mineralphasen nachweisen. Wie aus den Untersuchungen der Schmelzzusammensetzung nach WINKLER (1976), WINKLER et al. (1975, 1977) im System Ab-An-Or-Qz-H<sub>2</sub>O bezogen auf 5 Kbar hervorgeht, führen die tonalitischen Schmelzen bei 5 Kbar PH<sub>2</sub>O bereits einen großen Anteil (etwa 33 %) an Plagioklas (An 70) als Solidusphase, der deutliche Korrosionsspuren aufweist, die als Anzeichen für P-T Schwankungen in der Magmenkammer gewertet werden können. Aus diesem tonalitischen Stammagma bilden sich dann durch eine Kristall-Liquid Fraktionierung die granodioritischen bis granitischen Schmelzen. Als Hinweis für die Richtigkeit dieser Annahme können die in diesen Gesteinen (Granodiorite und Gra-

nite) auftretenden anorthitreichen Plagioklaskerne, die durchaus den Plagioklaskernen der Tonalite entsprechen, betrachtet werden. Ebenso liefert die Verteilung der REE mit einer zunehmenden negativen Europiumanomalie von Granodiorit zu Granit das zu erwartende Bild.

Anhand der Amphiboluntersuchungen konnte gezeigt werden, daß sich die Amphibole der basischen Einschlüsse in bezug auf die Kern-Rand Zonierung deutlich von den liquidmagmatisch gebildeten Amphibolen in den Tonaliten und Granodioriten durch ein entgegengesetztes Verhalten des  $Mg/(Mg+Fe)$ -Quotienten unterscheiden (Tab. 1). Durch diese Unterscheidung konnte auch das lokale Auftreten von Granat geklärt werden. Diese Granate führen Amphibole mit unterschiedlicher Kern-Rand Zonierung als Einschlüsse, bei denen die eine Zonierung die Amphibolentwicklung in den basischen Einschlüssen und die andere den Entwicklungstrend der liquidmagmatisch gebildeten Amphibole widerspiegelt. Auf Grund dieser Tatsache und der an dieser Lokalität gehäuften Amphibolführung im Tonalit konnte diese lokale Granatbildung anhand eines einfachen „magma mixing“-Modells erklärt werden. So ergibt eine normal-tonalitische Schmelze, kontaminiert mit 5 % Einschlußmaterial, der durchschnittlichen Zusammensetzung der basischen Einschlüsse entsprechend, eine Schmelzzusammensetzung, die dem Chemismus nach einem granatführenden Tonalit entspricht. Ein weiteres Argument für eine Granatbildung während des Intrusionsvorganges bei Drucken  $P_{H_2O} < 5$  Kbar kann auch in den Plagioklaseinschlüssen ( $An_{60-40}$ ) gesehen werden, da derartige Anorthitgehalte bei einer primärmagmatischen Ausscheidung von Granat aus petrogenetischen Gründen nicht realisierbar sind. Für die Gesteine der Rieserferner Intrusion ergibt sich nun folgendes, in verschiedene Teilakte auflösbares, Kristallisationsintervall. Wie bereits erwähnt, bilden die anorthitreichen Plagioklaskerne neben Ilmenit eine erste Solidusphase bei Drucken  $P_{H_2O} \geq 5$  Kbar. Im weiteren Kristallisationsverlauf unter geänderten P-T Bedingungen, die auf den fortschreitenden Intrusionsvorgang zurückgeführt werden können, werden die Kernplagioklase vom Hüllplagioklas ummantelt ( $P_{H_2O} > 2$  Kbar). In diesem Kristallisationsintervall solidifiziert ein Großteil der Schmelze unter Ausscheidung von Plagioklas (mit der Zusammensetzung der Hüllplagioklase) neben einer mehr oder weniger gleichzeitigen Kristallisation von Amphibol und Biotit. Im Endstadium der Kristallisation bei  $P_{tot} \cong 2$  Kbar  $\cong P_{H_2O}$  wird der Plagioklasrand sowie Quarz und Alkalifeldspat gebildet. Aus der Ausscheidungsfolge (Plagioklas-Hornblende, Biotit-Quarz-Alkalifeldspat) ergeben sich für das finale Kristallisationsstadium nach MAALØE & WYLLIE (1975) unter den Bedingungen des Ni-NiO Puffers bei  $P_{tot} = 2$  Kbar Wassergehalte von 2,5–6 Gew. % in der Schmelze. Das Temperaturintervall für die Kristallisation dieser Gesteine kann mit Hilfe des Plagioklasthermometers nach KUDO & WEIL (1970) mit  $850^\circ - 600^\circ C$  bezogen auf 5 Kbar  $P_{H_2O}$  angegeben werden. Vergleiche mit den experimentellen Daten von PIWINSKII (1973) bei 2 Kbar  $P_{H_2O}$ , dieser Druck ist auch mit den Kontakterscheinungen und der geologischen Situation durchaus vertretbar (PROCHASKA, 1980), ergeben für eine Erstausscheidung von Plagioklas Temperaturen um  $930^\circ C$  für die Tonalite,  $870^\circ C$  für die Granodiorite und  $830^\circ C$  für die Granite. Da jedoch eine erste Ausscheidung von Plagioklas sicherlich unter höheren Druckbedingungen erfolgt ist, dürften die tatsächlichen Temperaturen wesentlich geringer gewesen sein.

## 8. Literatur

BECKE, CH., 1892: Petrographische Studien am Tonalit der Rieserferner. — Tschers-

- mak mineral.-petrogr. Mitt., 13, 379–432, Wien
- BELLIENI, G., COMIN CHIAROMONTI, P., VISONA, D., 1976: Contributo alla conoscenza del plutone delle Vedrette di Ries (Alpi Orientali). – *Boll. Soc. Geol. Ital.*, 95, 351–370, Roma.
- BELLIENI, G., 1977: Caratteri geobarometrici delle intrusioni granitiche del plutone delle Vedrette di Ries (Rieserferner) (Alto Adige Orientale) alla luce dei sistemi sperimentali Q–Or–Ab–An–H<sub>2</sub>O. – *Rend. Soc. Ital. Mineral. Petrol.*, 33, 631–645, Padua.
- , 1978: Caratteri geochimici del massiccio granodioritico tonalitico delle Vedrette di Ries (Rieserferner) Alto Adige Orientale. – *Rend. Soc. Ital. Mineral. Petrol.*, 34, 527–548, Padua.
- , MOLIN, G. M., VISONA, D., 1978: The petrogenetic significance of the garnets in the intrusive massifs of Bressanone and Vedrette di Ries (Eastern Alps – Italy). – *N. Jb. Mineral. Abh.*, 136, 138–153, Stuttgart.
- , PECCERILLO, A., POLI, G., 1981: The Vedrette di Ries (Rieserferner) Plutonic Complex: Petrological and Geochemical Data Bearing on Its Genesis. – *Contr. Min. Petr.*, 78, 145–156, Berlin–Heidelberg.
- BENCE, A. E., ALBEE, A. L., 1968: Empirical correction factors for the electron microanalysis of silicates and oxides. – *J. Geol.*, 76, 382–402, Chicago.
- BORSI, S., DEL MORO, A., SASSI, F. P., ZIRPOLI, G., 1979: On the age for the Vedrette di Ries (Rieserferner) massif and its geodynamics significance. – *Geol. Rundschau*, 68, 41–60, Stuttgart.
- DE LA ROCHE, H., LETERRIER, J., GRANDCLAUDE, P., MARCHAL, M., 1980: A classification of volcanic and plutonic rocks using R<sub>1</sub> R<sub>2</sub>-diagram and major-element analysis – its relationship with current nomenclature. – *Chem. Geol.*, 29, 183–210, Amsterdam.
- DIDIER, J., 1973: *Granites and their enclaves.* – 393 S., Elsevier scientific publishing Company, Amsterdam–London–New York.
- EXNER, Ch., 1976: Die geologische Position der Magmatite des periadriatischen Lineaments. – *Verh. Geol. B.-A.*, 3–64, Wien.
- GRATZER, R., 1982: Ein Beitrag zur Petrologie der Rieserferner Intrusion in Ost- und Südtirol. – Unveröff. Diss. Formal- u. Naturwiss. Fak. Univ. Wien, 96 S. Wien.
- KUDO, A. M., WEIL, D. F., 1970: An igneous plagioklas thermometer. – *Contr. Min. Petr.*, 25, 52–65, Berlin–Heidelberg.
- LEAKE, B. E., 1978: Nomenclature of amphiboles. – *Can. Mineral.*, 16, 501–520, Toronto.
- LUTH, W. C., 1969: The system NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>–Si<sub>2</sub> and KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>–SiO<sub>2</sub> at 20 Kb and the relationship between H<sub>2</sub>O content, P<sub>H<sub>2</sub>O</sub> and P<sub>total</sub> in granitic magmas. – *Am. J. Sci.*, 267, 325–341, New Haven.
- MAALØE, S., WYLLIE, P. J., 1975: Water content of a granite magma deduced from the sequence of crystallization determined experimentally with water undersaturated conditions. – *Contr. Min. Petr.*, 52, 175–191, Berlin–Heidelberg.
- MIELKE, P., WINKLER, H. G. F., 1975: Eine bessere Berechnung der Mesonorm für granitische Gesteine. – *N. Jb. Mineral. Mh.*, 10, 471–480, Stuttgart.
- MÜLLER, R. F., SAXENA, S. K., 1977: *Chemical Petrology.* – 394 S., New York–Heidelberg–Berlin (Springer).
- PIWINSKII, A. J., 1973: Experimental studies of igneous rocks series, central Sierra

- Nevada batholith, California. Part II. – N. Jb. Mineral. Mh. 5, 193–215, Stuttgart.
- , WYLLIE, P. J., 1970: Experimental studies of igneous series: "Felsic Body Suite" from Needle Point pluton, Wallowa batholith, Oregon. – J. Geol. 78, 52–76, Chicago.
- PLATEN, H., 1965: Kristallisation granitischer Schmelzen. – Contr. Min. Petr., 11, 334–381, Berlin–Heidelberg.
- PROCHASKA, W., 1980: Der Kontakthof der Rieserferner Intrusion in Ost- und Südtirol. – Unveröff. Diss. Formal- u. Naturwiss. Fak. Univ. Wien, 88 S., Wien.
- ROBERTSON, J. K., WYLLIE, P. J., 1971: Rock – water systems, with special reference to the water – deficient region. – Am. J. Sci., 271, 252–277, New Haven.
- SALOMON, W., 1897: Über das Alter der periadriatischen granitischkörnigen Massen. – Eclogae Geol. Helv., 5, 33–38, Basel.
- STRECKEISEN, A., 1974: Classification and nomenclature of plutonic rocks. – Geol. Rundschau, 63, 773–786, Stuttgart.
- TUTTLE, O. F., BOWEN, N. L., 1958: Origin of granite in the light of experimental studies in the system  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ – $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ – $\text{SiO}_2$ – $\text{H}_2\text{O}$ . – Mem. Geol. Soc. Am., 74, 78 p., Baltimore.
- WINKLER, H. G. F., 1976: Petrogenesis of metamorphic rocks. – 4. Aufl., 334 S., New York–Heidelberg–Berlin (Springer).
- , BOESE, M., MARCOPOULOS, TH., 1975: Low temperature granitic melts. – N. Jb. Mineral. Mh., 1975, 245–268, Stuttgart.
- , BREITBART, R., 1978: New aspects of granitic magmas. – N. Jb. Mineral. Mh., 1978, 463–480, Stuttgart.
- , DAS, B. H., BREITBART, R., 1977: further data of low temperature melts existing on the quartz + plagioklase + liquid + vapour isobaric cotectic surface within the system  $\text{Qz}$ – $\text{Ab}$ – $\text{An}$ – $\text{H}_2\text{O}$ . – N. Jb. Mineral. Mh., 1977, 241–247, Stuttgart.

### TAFEL 1

Fig. 1: Zonar gebauter Plagioklas mit Korrosionserscheinungen; X Nicols, Bildbreite ca. 5 mm.

Fig. 2: Stark zerbrochener Granat mit ausgeprägtem Reaktionssaum, mit Einschließen von Plagioklas (hell), Amphibol und Biotit (dunkel). // Nicols, Bildbreite ca. 7,5 mm.



Fig. 1

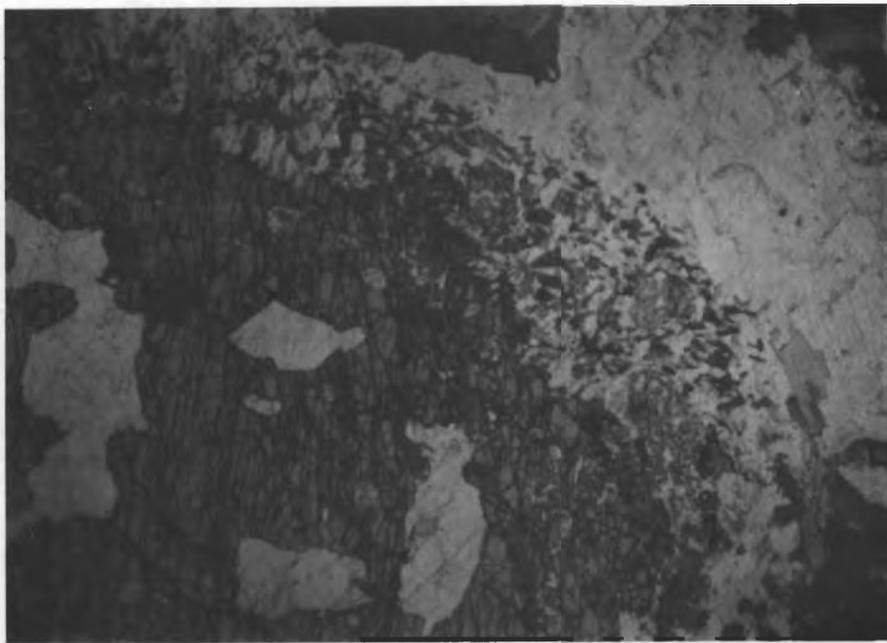


Fig. 2