

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

Band: 56 (1976)

Heft: 3

Artikel: Alumosilikatführende Knauern im Lepontin

Autor: Klein, Hans-Heiner

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-43695>

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 25.01.2026

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

Alumosilikatführende Knauern im Lepontin

Von *Hans-Heiner Klein*, Basel*)

Mit 10 Figuren und 5 Tabellen

Abstract

Aluminosilicate nodules in metapelites of the Lepontine Alps show a specific regional distribution: kyanite-bearing nodules occur in the rock-forming kyanite zone defined by NIGGLI and NIGGLI (1965), fibrolite-bearing nodules in the fibrolite-sillimanite zone. Andalusite appears only in nodules which are found island-like in the region of the Ticino culmination. The distribution pattern reflects the change of p-, T- and μ -conditions of the mid-tertiary alpine metamorphism in time. The formation of the Al-rich segregation is based on a disequilibrium inducing diffusion (heterogenous stress distribution). The nature of the mobile Al-complex is unknown.

Zusammenfassung

Alumosilikatführende Knauern des Lepontins zeigen eine spezifische Verteilung: diasthenführende Knauern treten in der durch NIGGLI und NIGGLI (1965) definierten gesteinsbildenden Disthenzone auf; fibrolithführende innerhalb der Fibrolith/Sillimanitzone. Andalusit findet sich ausschliesslich in Knauern, welche inselartig und höhenabhängig im Bereich der Tessiner Kulmination auftreten. Dieses Verteilungsmuster widerspiegelt die zeitliche Änderung der p-, T-, (μ)-Bedingungen der tertiären, alpinen Metamorphose.

Die Knauerbildung erfolgt ohne grössere Stofftransporte innerhalb eines aluminiumreichen, alkaliarmen Muttergestein und basiert auf einem thermodynamischen Ungleichgewicht.

Riassunto

Concrezioni con cianite, andalusite e/o fibrolite delle Alpi Lepontine mostrano una specifica distribuzione regionale: concrezioni con cianite si presentano nella zona di formazione rocciosa di cianite definita da NIGGLI e NIGGLI (1965); quelle con fibrolite all'interno della zona di fibrolite/sillimanite. L'andalusite troviamo esclusivamente in concrezioni che si trovano isolate ad una certa quota nella zona di culminazione ticinese. La distribuzione riflette nel tempo la variazione della pressione, della temperatura e del potenziale fisico-chimico della metamorfosi alpina del Medioterziario.

*) Mineralogisch-Petrographisches Institut der Universität, Bernoullistrasse 30, CH-4056 Basel.

La formazione delle concrezioni avviene senza rilevante trasporti di materia all'interno della roccia madre ricca di alluminio e povera di alcali e basato su uno squilibrio provocante diffusione (distribuzione eterogena di tensione). La natura del complesso mobile di alluminio non è conosciuta.

Inhalt

1. Einleitung	436
2. Definition, Geometrie und Mineralbestand	436
Ausbildungsform der Alumosilikate	439
3. Auftreten und regionale Verteilung	439
4. Altersbeziehungen der Alumosilikate	443
5. Kristallisation – Deformation	444
6. Chemismus	445
7. Analyse	449

1. EINLEITUNG

Innerhalb der von E. NIGGLI (1960) sowie E. NIGGLI und C. R. NIGGLI (1965) definierten, alpinen Disthenzone treten alumosilikatführende Knauern auf. Diese Gesteinsinhomogenitäten finden dank ihrer Grösse und Schönheit der sie aufbauenden Mineralien schon seit langem Beachtung bei Sammlern und Wissenschaftlern. Eine Übersicht über die Literatur mit Schwergewicht auf den berühmten Fundstellen von Alpe Sponda–Pizzo Forno findet sich in KELLER (1968). E. WENK (1970) beschäftigt sich ebenfalls kurz mit dem Problem der regionalen Verteilung von alumosilikatführenden Quarzknaeuern.

2. DEFINITION, GEOMETRIE UND MINERALBESTAND

Als Knauern werden lokale, dezimetergrosse Sammelkristallisationen innerhalb von glimmerreichen Gneissen und Schiefern bezeichnet, die sich durch eine Gebundenheit an bestimmte Muttergesteine, durch Makrokristalle und zum Teil ganz spezifische Mineralphasen auszeichnen.

Als typische Knauermineralien treten im Untersuchungsgebiet Andalusit und einschlussfreier Disthen auf. Alle anderen Mineralien, darunter auch der poikilitische Disthen, finden sich gesteinbildend. Lokale, zonierte Disthen-Biotit-Akkumulate werden infolge der poikilitischen (einschlussreichen) Ausbildungsform des Disthens nicht als Knauern betrachtet. Knauern sind linsige Körper, die in der Schichtfläche oder um wenige Grade zu ihr geneigt liegen.

Eine erste Unterteilung der Knauern erfolgt durch ihren Mineralbestand. Der Vollständigkeit halber werden alle im Felde beobachteten Segregationen

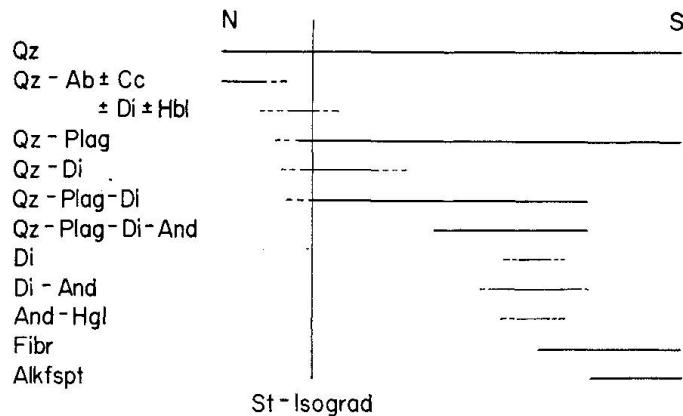


Fig. 1. Schematische Darstellung der Mineralparagenesen aus Knauern als Funktion ihrer regionalen Verbreitung. Lage der St-Isograde gemäss E. NIGGLI (1969) (Tafel 1).

in Fig. 1 zusammengefasst, und in einem hypothetischen N-S-Profil wird ihre regionale Verbreitung schematisch dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die Mineralparagenesen der Knauern vom Metamorphosegrad abhängig sind (VIDALE, 1974). Sowohl sedimentäre als auch metamorphe Vorzeichnungen und Relikte sind nicht nachweisbar.

Die meisten alumosilikatführenden Knauern sind zonal aufgebaut:

- Knauerkern mit Quarz, einschlussfreiem Disthen und/oder Fibrolith.
- Reaktionszone (nach KELLER, 1968, Rand II) mit Plagioklas, einschlussfreiem Disthen, Andalusit und/oder Fibrolith.
- Knauerrand mit Plagioklas, poikilitischem Disthen (Reaktionsbeziehung Disthen-Biotit), Biotit, Zirkon, Monazit, Apatit, Rutil, Ilmenit.

Zirkon und Monazit wurden auf der Röntgenmikrosonde durch Prof. Dr. H. Schwander nachgewiesen. Von den beiden Mineralien bildet lediglich der Monazit deutlich pleochroitische Höfe in Biotit (vgl. SCHWANDER und E. WENK, 1965). Auffallend ist die Häufigkeit von Monazit in der Randzone.

Für kleine (< 5 Vol.-%) und grosse (> 40 Vol.-%) Alumosilikatgehalte wer-

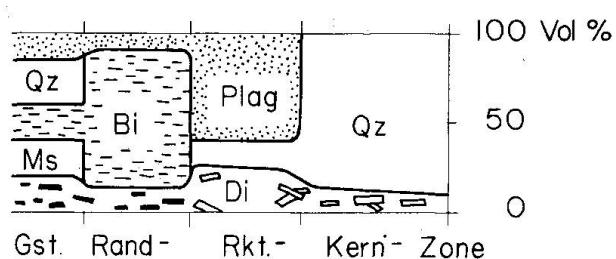
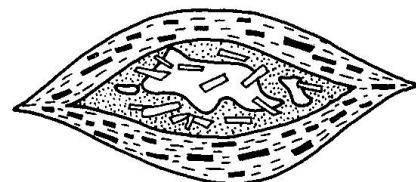


Fig. 2. Darstellung der Idealknauer (K III, S. 449) und dessen Modalbestand als Funktion der einzelnen Knauerzonen.

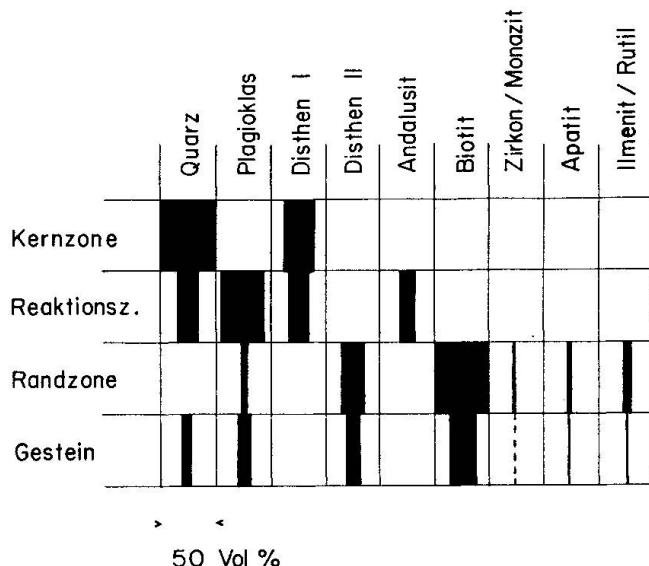


Fig. 3. Verteilung der Mineralphasen in den entsprechenden Knauerzonen.
Disthen I: einschlusffreier Disthen,
Disthen II: poikilitischer Disthen.

den Knauerkern und Reaktionszone infolge undeutlichen Zonenbaus zusammengefasst.

Die Grenzen zwischen Knauerkern und Reaktionszone und zwischen Knauerrand und Gestein sind fliessend, jene aber zwischen Reaktionszone (bzw. Knauerkern) und Randzone ist scharf.

Die Grösse der einzelnen Zonen variiert mit dem Charakter des Muttergestein. So ist insbesonders die Randzone in quarzreichen, glimmerarmen Paragneissen schlecht ausgebildet.

Die Korngrösse der Knauermineralien nimmt über Rand zum Kern der Knauer zu; jene des Muttergestein ist mit der Korngrösse des Randes vergleichbar (vgl. Fig. 4). Die Makrokristalle des Knauerkerns, besonders Disthen, können bis zu hundertmal grösser sein als ihre gesteinsbildenden Äquivalente.

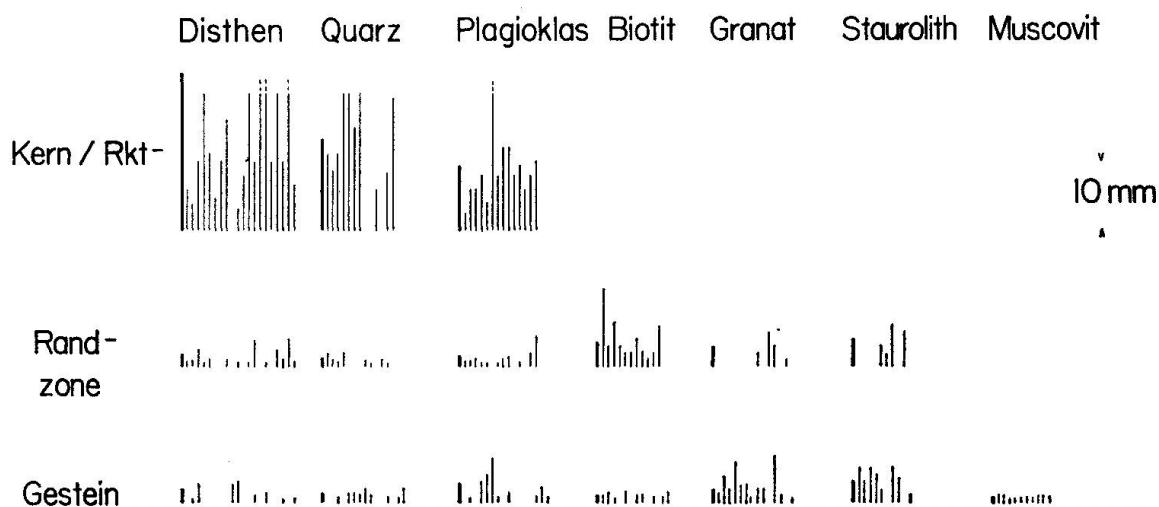


Fig. 4. Korngrößenverteilung von Knauermineralien in verschiedenen Zonen der Knauer. Der erste Wert (dicke Linie) entspricht dem Mittelwert der einzelnen Messungen.

Ausbildungsform der Alumosilikate

Alumosilikate aus Knauern unterscheiden sich von der gesteinsbildenden Form durch:

- einschlussfreie Ausbildungsform,
- Fehlen von Reaktionstexturen (abgesehen von Disthen → Andalusit),
- Fehlen typischer Verwachsungen,
- Makrokristalle,
- spezifische Anordnung der Mineralphasen: Zonierung,
- Auftreten von Andalusit,
- Pseudomorphosen von Andalusit nach Disthen.

Diese typischen Knauertexturen können nicht als reversible Reaktionen zwischen Mineralparagenesen und in einer intergranularen, fluiden Phase gelösten, chemischen Komponenten interpretiert werden. Vielmehr stellen sie das Produkt einer irreversiblen Diffusion als Folge lokaler Potentialgradienten dar. So sind bei Knauern Transportphänomene von grösster Bedeutung; Vorsicht bei jeglicher thermodynamischen Interpretation irreversibler Prozesse.

Hellglimmer, Ilmenit, ± Pyrrhotin, ± Pyrit und Markasit werden infolge ihrer Ausbildung und texturellen Stellung als Spätprodukte der Regionalmetamorphose betrachtet.

Die Alumosilikate werden lokal durch eine erhöhte Wasserfugazität und Kalaktivität randlich und längs Korngrenzen muskovitisiert. In Andalusit-Disthen-Knauern wird vereinzelt Paragonit in der Reaktionszone nachgewiesen.

Ilmenit als postkristallines Produkt bildet dünne, wellig verbogene Plättchen und tritt in Knauern unabhängig von der Zonierung auf.

Pyrrhotin, Pyrit und Markasit (Identifikation durch PD Dr. St. Graeser) nehmen in bezug auf den Zeitpunkt ihrer Kristallisation eine umstrittene Stellung ein; sie treten stets in der Reaktions- oder Kernzone der Knauer auf. Eine regionale Zonierung mit Hilfe der Sulfidminerale in Pyrit (zusammen mit Disthen und Paragonit in den nördlichsten Knauern), Pyrrhotin usw. ist infolge der wenigen Fundpunkte verfrüht. Markasit bildet sich eventuell retrograd auf Kosten von Pyrrhotin.

3. AUFTREten UND REGIONALE VERTEILUNG

Das Auftreten alumosilikatführender Knauern ist neben dem Chemismus von der Position des Muttergestein innerhalb einer Serie abhängig. Bevorzugt bilden sich diese Knauern in der Umgebung zweier sich rheologisch unterschiedlich verhaltender Gesteinsserien, sei es im Kontakt zu quarzreichen Serien (leuko-krete Gneisse) oder zu Amphiboliten. Ähnliche Beobachtungen beschreibt KEL-

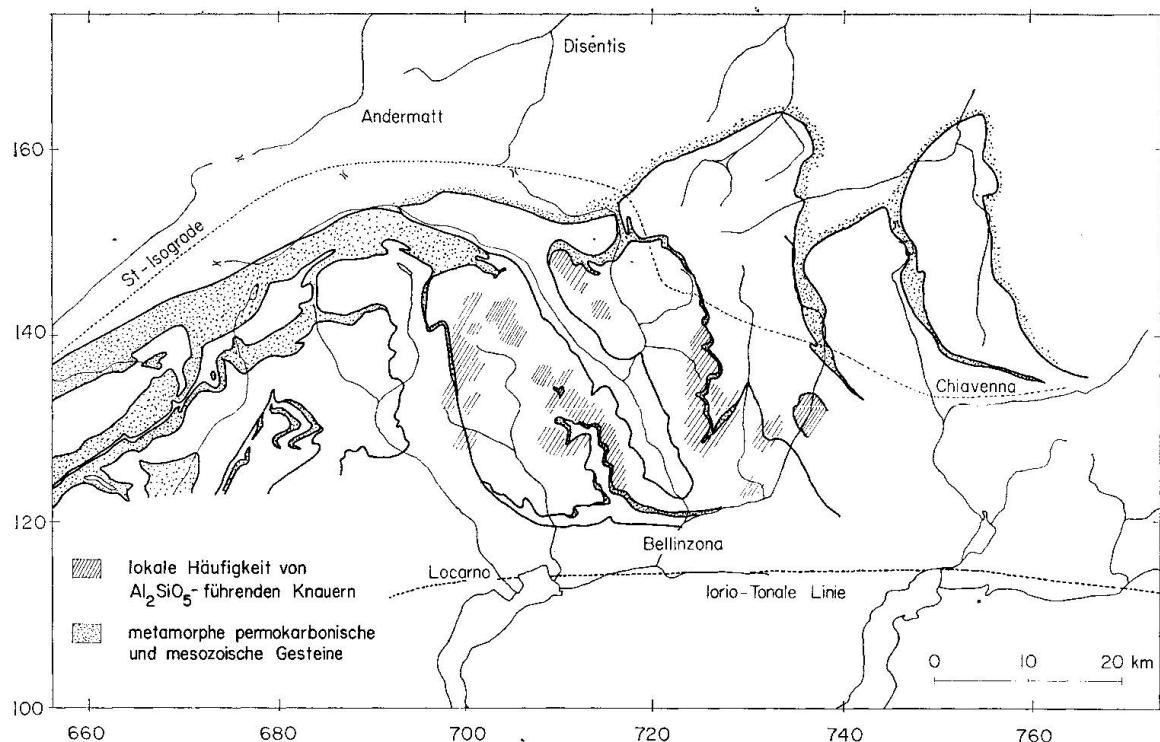


Fig. 5. Hauptverbreitungsgebiet alumosilikatführender Knauern im Lepontin; im Norden durch die von E. Niggli definierte Staurolith-Isograde (Tafel 1, 1969) und im Süden durch die Iorio-Tonale-Linie begrenzt.

LER (1968). Tonerdereiche Muttergesteine sind auffallend arm an alumosilikatführenden Knauern. Hier bilden sich in Spätphasen der alpinen Regionalmetamorphose lokal Quarz \pm Oligoklas-Augen, Quarz-Adern und -Bänder. In Ultramafititen treten vereinzelt Disthen-Quarz-Akkumulate mit granatreicher Randpartie auf. Eine unabgeklärte Reaktionsbeziehung besteht einerseits zwischen zersetzen Plagioklas und Hornblende und anderseits zwischen Granat, Disthen und Quarz.

Eine Übersicht über die Hauptverbreitung alumosilikatführender Knauern gibt Fig. 5. Besonders häufig sind sie in den oberen Serien der Simano, in der Cima-Lunga-Serie und in den tieferen Elementen der Adula (Definition gemäss STAUB, 1958). In den Paragneissen und Glimmerschiefern der oberen Adula, Bosco-Serie usw. – vom Chemismus her gesehen ein ideales Muttergestein – treten sie äusserst spärlich auf. Schwerpunkt des geographischen Auftretens bildet in entsprechenden Muttergesteinen der Gebirgskamm zwischen Val Maggia–Val Verzasca, Verzasca–Leventina, Molarerücken, der Kamm zwischen Riviera–Val Calanca und Val Calanca–Mesolcina.

Auf die Nennung besonders fündig Lokalitäten wird im Interesse des Naturschutzes und als Reaktion auf das Vorgehen skrupelloser Mineraliensammler und -händler verzichtet. Die in Fig. 6 dargestellte Verteilung beruht auf den Sammlungen des mineralogisch-petrographischen Institutes der Universität

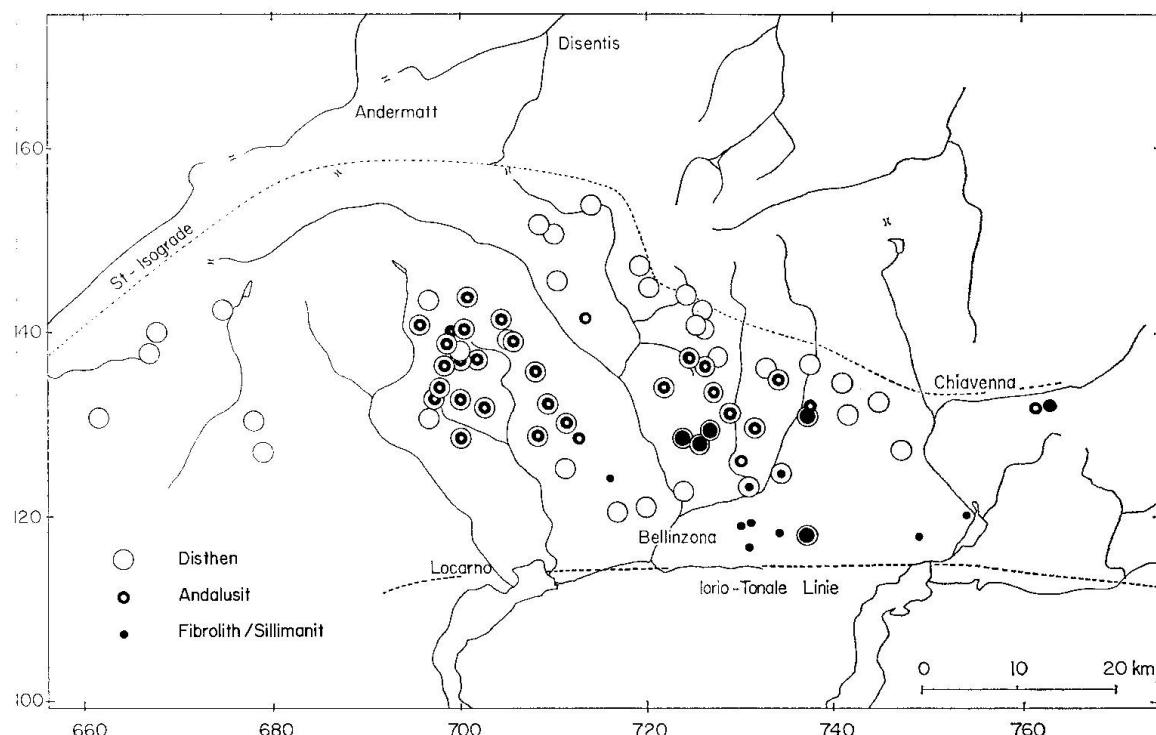


Fig. 6. Fundortkarte der Alumosilikate aus alpinen Knauern des Lepontins.

Basel (regionale Sammlungen, Belegsammlungen Grüttner, Keller, Klein, Preiswerk und Wenk), mündlicher Mitteilung von Prof. Dr. E. Wenk und PD Dr. St. Graeser und auf Daten aus der Literatur (WEBER, 1966; KELLER, 1968; FUMASOLI, 1974; HEITZMANN, 1975).

Die regionale Verteilung der maximalen Anzahl der Alumosilikate ergibt – trotz geringer Probedichte – eine konzentrische Anordnung der Disthen-Paragenese bzw. erstes Auftreten von Andalusit, erstes Auftreten von Fibrolith ± subparallel zu den von Niggli und anderen (E. NIGGLI, 1960; E. NIGGLI und C. R. NIGGLI, 1965; E. WENK, 1970) definierten alpinen Mineralzonen spezifischer, gesteinsbildender Mineralien.

Die langgestreckte, maximal 10 km breite Zone mit *andalusitführenden* Knauern überspannt die Tessiner Kulmination in ihrem zentralen Teil in NNW-ESE-Richtung, stumpfwinklig zur Hauptfaltenachse dieser Aufwölbung. Sie bildet von Westen, vom Rand der steilen Maggia-Querzone her, eine flache Platte, spitzwinklig zur Stofftektonik, die gegen ESE hin abtaucht und ausspitzt. Das Verbreitungsgebiet von Andalusit umfasst also im Westen die hängenden Teile der Simano-Einheit, im Zentrum die Castione-Cima-Lunge-Serie und Begleitgesteine, und im Osten tiefere Teile der Adula; es ist also nicht tektonisch begrenzt. Andalusitführende Knauern meiden nach der bisherigen Kenntnis die südlichen Fortsetzungen der gleichen Gesteinszonen soweit sie in

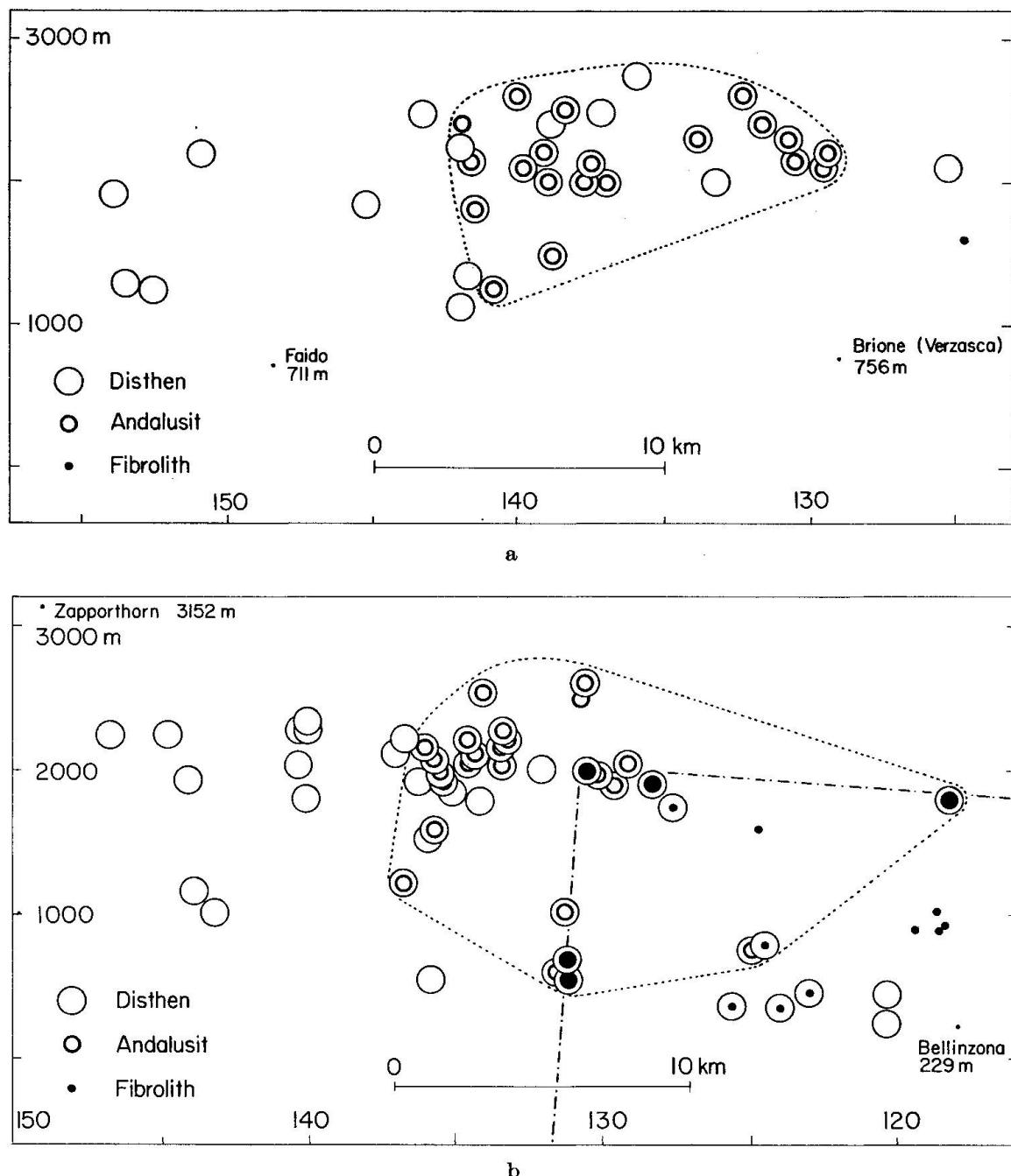


Fig. 7. Horizontalprojektion der Alumosilikatfundpunkte auf die NS-verlaufende Koordinatenachse 705 für Fig. 7a bzw. 730 für Fig. 7b; inselartiges Auftreten von Andalusit. Auf der Abszisse sind die Koordinaten der entsprechenden Achsenabschnitte aufgeführt.

den von spät- bis postalpinen Pegmatiten durchschlagenen Adergneiss-Steilzonen liegen. Ebenso fehlen sie in den niedriger metamorphen, nördlichen Serien der Adula. Eine gewisse Beziehung zum Gebirgsbau – Axialzone der Tessiner Kulmination – ist also vorhanden; aber keine Abhängigkeit von der Stofftektonik.

WENK (1970) postuliert eine höhenabhängige Trennzone zwischen den höheren Andalusit-Disthen- und den tieferen Disthen-Knauerfundstellen (zwischen 1400 m und 1800 m) für das zentrale Tessin. Dies gilt für die Region Maggia–Verzasca–P. Claro, wie Fig. 6 zeigt, jedoch nicht für die östlichen Vorkommen, wo Andalusit auch in der Talregion auftritt.

Zwei NS-Profile längs der Koordinatenachsen 705 und 730 mit einer maximalen Projektionsdistanz von 10 km sind in Fig. 7 dargestellt. Die punktierte Linie umgrenzt das Andalusitfeld, die strichpunktierter das Fibrolithfeld. Eine Diskussion der gefundenen Daten erfolgt auf Seite 454.

4. ALTERSBEZIEHUNGEN DER ALUMOSILIKATE

Alle Vorkommen zeigen die gleiche Altersabfolge:

Disthen – Andalusit – Fibrolith.

Gemäss den Beobachtungen bildet sich Andalusit auf Kosten von Disthen. Neben Pseudomorphosen von Andalusit nach Disthen und reliktischem Disthen in Andalusit stellt der Grad der Muskovitisierung (KWAK, 1971) ein weiteres Kriterium für die beschriebene Altersabfolge dar. Bei der maximalen Vergesellschaftung der Alumosilikate ist stets der Disthen am stärksten muskovitiert.

Die Phasenumwandlung Disthen–Andalusit setzt im Zentrum der Knauern ein, wobei der Disthen den Andalusit vom Biotit der Randzone trennt. Die Reaktion verläuft träge (reliktischer Disthen in Andalusit). Trotz ähnlicher Ausgangssituation – gesteinsbildender Disthen und Disthen als Knauerbestandteil – tritt Andalusit im Tessin ausschliesslich in Knauern auf. Es herrschen demnach für Knauern andere thermodynamische Bedingungen, zum Teil wohl durch ihre Ausbildung und spezifische Mineralvergesellschaftung (geometrische Vorzeichnung) bedingt.

Eine mögliche Erklärung besteht in einer inhomogenen Spannungsverteilung. Der daraus resultierende Stress beeinflusst die Reaktionsgeschwindigkeit, indem lokal Differentialbewegungen ausgelöst werden. Im Gestein bleibt der Disthen infolge seiner Vergesellschaftung mit Biotit oder Hellglimmer (allgemein mit einem inkompotenten Mineral) erhalten. Das Spannungsfeld wird vom Glimmer ausgeglichen. Der Disthen in Knauern aber wandelt sich bei entsprechenden thermodynamischen Randbedingungen und bei kompetenter Vergesellschaftung wie Disthen–Plagioklas, Disthen–Disthen und seltener Disthen–Quarz in Andalusit um. Erwartungsgemäss bleibt der Disthen im Kontakt zum Biotit der Randzone erhalten (inkompotent Vergesellschaftung). Diese Hypothese wird durch die Häufigkeit von Andalusitknauern in mechanisch stark beanspruchten Gesteinsserien bestätigt. Im weiteren ist auffallend, dass abgesehen von einigen seltenen Ausnahmen keine Quarz-Andalusit-Knauern auf-

treten. Durch Domänenrekristallisation oder Mobilisierung von SiO_2 wird die inhomogene Spannungsverteilung ausgeglichen.

Ein anderer Bildungsmechanismus wird durch die Paragenese Andalusit–Hellglimmer gegeben. Der Andalusit bildet sich hier auf jungen Störungsflächen meist deutlich diskordant zum lokalen s. Die durch die Vorzeichnung bedingte erhöhte Wasserfugazität führt in einer späteren Phase zur Entstehung der Hellglimmerrosetten. Diese Beobachtung ist auf den südlichen Teil des Untersuchungsgebietes, unmittelbar beim ersten Auftreten von Fibrolith begrenzt.

In einer letzten Phase bildet sich Fibrolith, zum Teil sogar auf Harnischen innerhalb von Knauern und in der Randzone oft auf Kosten von Biotit; er findet sich auch in posttektonischen Pegmatiten. Generell bleibt die Bildung von Fibrolith nach wie vor problematisch; er bildet sich scheinbar unter «trockeneren» Bedingungen (und eventuell bei erhöhter Kaliumaktivität).

5. KRISTALLISATION – DEFORMATION

Die hier vorliegenden Paragenesen entstanden in einer Spätphase der Regionalmetamorphose bei bereits einsetzender Druckentlastung. Diese bilden den momentanen Zustand bedingt durch die thermodynamischen Randbedingungen ab.

Stellenweise sind aluminosilikatführende Quarzknuern mit offenen Hohlräumen und idiomorph ausgebildetem Quarz im Kern zu beobachten. Ob es sich dabei um Produkte zeitlich ein- oder mehrphasiger Prozesse handelt, ist nicht abgeklärt.

Je nach Art und Lage der Knauer zeigen gewisse Mineralien eine bevorzugte Orientierung. So ist in zonierte Knauern der einschlussfreie Disthen des Kerns unregelmässig orientiert, jener der Reaktions- und Randzone aber ist mit der kristallographischen c-Achse in s und meist parallel zur regionalen Lineation geregelt. Dabei werden besonders im Süden des Untersuchungsgebietes Quarz \pm Plagioklas mobilisiert; es bilden sich Disthen- \pm Andalusit-«Felse».

Der Biotit liegt mit (001) in s.

C von Quarz dürfte entsprechend den Befunden von H. R. Wenk und einigen eigenen Resultaten auf einem ac-Gürtel liegen. Die ursprünglichen Makrokristalle liegen heute in Form einzelner, verzahnter Körner mit zum Teil feinen Fragmenten längs Korngrenzen vor (Domänenrekristallisation). Gemäss KAMB (1959) regeln sich die Glimmer mit c parallel der Hauptspannung σ_1 , prismatische Mineralien wie Disthen aber mit c senkrecht σ_1 . Bei den Knauern führt anscheinend die gleiche Hauptspannungsverteilung zur Bildung der regionalen Lineation und der linearen Orientierung von Disthen. Die Orientierung von Biotit und das Fehlen von Querbiotiten spricht aber für eine Glimmerkristallisation unter anderen Spannungsverhältnissen. Auffallend ist, dass die beiden

Disthenmodifikationen – einschlussfreier Disthen der Reaktionszone und der poikilitische Disthen des Randes – die gleiche Orientierung aufweisen.

Eine Interpretation dieser Beobachtungen ist problematisch, stellen doch diese Befunde das Resultat einerseits sich überschneidender und andererseits zeitlich unabhängiger Prozesse dar.

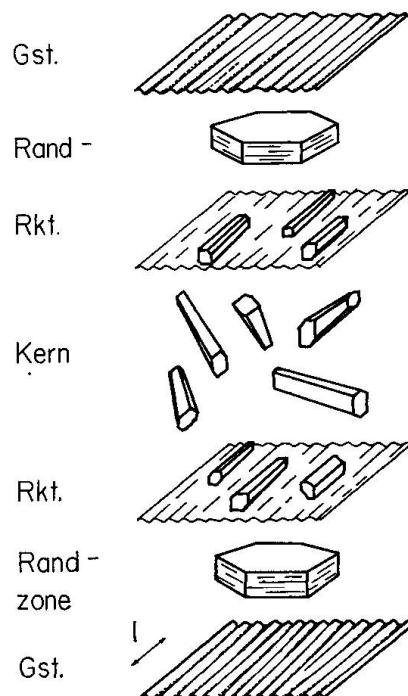


Fig. 8. Zentraler Knauerschnitt mit schematischer Darstellung der Orientierung spezifischer Mineralien. Pseudohexagonale Kristalle: Biotit, trikline Prismen: Disthen.

6. CHEMISMUS

Zonierte alumosilikatführende Knauern treten erfahrungsgemäss meist nur in Paragesteinen auf, die Disthen und/oder Staurolith führen. Diese Beobachtung wird durch einfache Umrechnung bekannter Gesteinschemismen (NIGGLI et al., 1930; DE QUERVAIN et al., 1942, 1956; KELLER, 1968) in ein Mineralaggregat, bestehend aus den typischen Knauermineralien: Quarz, Oligoklas, Disthen, Apatit, Ilmenit, Biotit \pm Muskovit, bestätigt. Die Mineralanalysen wurden aus DEER, HOWIE and ZUSSMAN (1966) übernommen, jene von Biotit und Muskovit, deren Fundort möglichst im Untersuchungsgebiet liegt, stammen aus Institutsarbeiten (E. WENK et al., 1963; SCHWANDER et al., 1968; W. B. STERN, persönliche Mitteilung) (vgl. Tabelle 1). Als Beispiel wird die Gesteinsprobe FK 329 (Staurolith- und Disthen-führender Granat-Glimmerschiefer, KELLER, 1968) aufgeführt, wobei im Fall a der volumenmässige Anteil eines hypothetischen Muskovits berechnet wird, im Fall b nicht (Tabelle 2). Allgemein kann mit dieser Rechenoperation gezeigt werden, dass alumosilikatführende Knauern unter folgenden Randbedingungen entstehen:

Tabelle 1. Spezifische Knauermineralien und deren chemische Zusammensetzung

1. Kolonne in Mol-%, 2. Kolonne in 1000fachen molekularen Äquivalentzahlen

	Qz	Ab	An	Olig	Disthen	Ms
SiO ₂	60,06	100,0	1665	68,7 1140	43,2 719	63,4 1056
Al ₂ O ₃	101,94			19,4 190	36,7 360	37,1 618
Fe ₂ O ₃	159,68				22,8 224	48,0 799
FeO	71,84				62,9 617	31,0 304
MgO	40,32					2,5 16
CaO	56,08					1,5 21
Na ₂ O	61,99			20,2 360	4,0 72	1,5 37
K ₂ O	94,20				9,4 152	0,5 8
TiO ₂	79,90					10,0 106
H ₂ O	18,02					0,5 6
P ₂ O ₅	141,96					4,5 250
	Bi I	Bi II	Ilm	Almandin	Ap	
SiO ₂	60,06	37,0	616	36,3	604	38,0
Al ₂ O ₃	101,94	17,5	172	21,1	207	22,1
Fe ₂ O ₃	159,68	3,0	19	0,4	3	0,9
FeO	71,84	17,5	244	16,2	226	29,2
MgO	40,32	9,5	236	9,9	246	161
CaO	56,08			0,1	2	6,5
Na ₂ O	61,99			0,1	2	1,8
K ₂ O	94,20	9,0	96	8,6	91	32
TiO ₂	79,90	2,0	25	2,1	26	56,0
H ₂ O	18,02	4,5	250	4,5	250	998
P ₂ O ₅	141,96					42,0
						296

- Keine Transportphänomene und metasomatische Prozesse über grössere Bereiche.
- Der «grosse Tonerdeüberschuss» Al > K + Na + $\frac{1}{2}$ Ca (BURRI, 1959) muss einen Wert von 50 Äq.Z. überschreiten.
- Knauern bilden sich in speziellen, chemisch definierten Muttergesteinen mit modalem Disthen und/oder Staurolith.

Abgesehen von einigen spärlichen Ausnahmen (unzonierte Quarz-Disthen-knauern in leukokraten Gneissen) werden obige Daten durch die Feldbeobachtungen bestätigt.

Werden Plagioklas, Quarz und Disthen als Kernminerale und die Glimmer als Randminerale der Knauer betrachtet, so gleicht das berechnete Volumenverhältnis und der berechnete Modus dem beobachteten Durchschnittswert. Diskrepanzen bestehen nur im mineralogischen Aufbau der Randzone. Bedingt durch den hohen K₂O-Gehalt einzelner Muttergesteine, wird ein nicht existierender Muskovit berechnet.

Zur etwaigen Abklärung dieser Unstimmigkeiten wurden Biotitproben aus dem Muttergestein (KI 67), der äusseren Randzone (349a) und der innersten Randzone (353d) mit Hilfe der Röntgenfluoreszenz durch PD Dr. W. B. Stern bestimmt (Tabelle 3).

Auffallend ist, dass keine signifikanten Unterschiede im Chemismus der Bio-

Tabelle 2. Beispiel für die Umrechnung eines Gesteinschemismus (FK 329) in ein Knauer-Mineralaggregat

Fall a: Berechnung des volumenmässigen Anteils von Qz, Olig, Di, Bi, Ms, Ilm und Ap

	Gew.-%	Äq.-Z.	Olig	Bi	Mu	Di	Ilm	Qz	Ap	Bilanz
SiO ₂	70,6	1175	111	99	120	36		809		-
Al ₂ O ₃	13,7	134	24	28	46	36				-
Fe ₂ O ₃	1,0	6		3	2					+1
FeO	4,5	63		39	3		5			+16
MgO	2,0	50		38	6					-
CaO	0,8	14	8						6	-
Na ₂ O	1,0	16	16		1					-1
K ₂ O	3,2	34		15	19					-
TiO ₂	0,8	10		4	1		5			-
H ₂ O	2,0	112		40	38					+34

Fall b: Berechnung des volumenmässigen Anteils von Qz, Olig, Di, Bi, Ilm und Ap, kein Ms

	Gew.-%	Äq.-Z.	Olig	Bi	Di	Qz	Ilm	Ap	Bilanz
SiO ₂	70,6	1175	111	131	76	857			-
Al ₂ O ₃	13,7	134	24	36	76				-
Fe ₂ O ₃	1,0	6		4					+2
FeO	4,5	63		52			5		+6
MgO	2,0	50		50					-
CaO	0,8	14	8					6	-
Na ₂ O	1,0	16	16						-
K ₂ O	3,2	34		20					+14
TiO ₂	0,8	10		5			5		-
H ₂ O	2,0	112		53					+59

	Fall a	Fall b
Berechneter Modus in Vol.-%:	Qz: 50 Olig: 10 Di: 4 Bi: 17 Ms: 16 IIm: 1 Ap: 1	56 10 10 23 - 1 0,4

tite bestehen. Infolge erhöhter Wasserfugazität wird der Biotit (353d) aus dem Kontakt Randzone – Kern (bzw. Reaktionszone) schwach chloritiert.

Umgekehrt lassen sich aus den Modalbeständen der Knauern entsprechende Gesteinschemismen berechnen. Zur Abschätzung der volumenmässigen Anteile wurde der Knauer in der Längsachse geschnitten und die einzelnen Mineralphasen linear ausgemessen. Dabei zeigt sich, dass

- keine signifikanten Unterschiede des Mineralbestandes als Funktion der Orientierung auftreten. Sowohl Schnitte parallel der Lineation als auch senkrecht dazu weisen eine vergleichbare Mineralverteilung auf. Knauer als diskenförmiger, rotationssymmetrischer Körper;
- Tendenzen zur Abnahme des Quarzgehaltes als Funktion des Metamorphosegrades bestehen. Extrem tonerdereiche Knauern treten erst im zentralen Teil der «Disthen-Knauern-Zone» auf;

Tabelle 3. Röntgenfluoreszenzanalysen von Biotiten aus dem Gestein (67), der äusseren Randzone (349a) und der inneren Randzone (353d)

	XV Klein	2897 67	2898 349a	2899 353d	
SiO ₂	36,4	35,8	36,7		
Al ₂ O ₃	20,6	21,2	21,5		
Fe ₂ O ₃	0,2	1,0	0,1		
FeO	17,0	15,8	15,9		
MnO	0,2	0,2	0,1		
MgO	9,5	10,2	10,1		
CaO	0,1	0,1	0,1		
Na ₂ O *)	0,1	0,1	0,1		
K ₂ O	8,7	8,6	8,6		
TiO ₂	2,3	2,2	1,9		
H ₂ O	4,4	4,5	4,6		
Summe	99,5	99,7	99,7		
*) Übernommen, nicht bestimmt.					
Strukturformeln	22	24	22	24	22
Si ^{IV}	5,44	5,40	5,33	5,29	5,44
Al ^{IV}	2,56	2,60	2,67	2,72	2,56
Summe IV	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
Al ^{VI}	1,07	1,00	1,05	0,96	1,19
Fe + 3	0,02	0,02	0,11	0,11	0,01
Fe + 2	2,12	2,11	1,97	1,95	1,97
Mn	0,03	0,03	0,03	0,02	0,01
Mg	2,12	2,10	2,26	2,24	2,23
Ti	0,26	2,26	0,25	0,24	0,21
Summe VI	5,62	5,51	5,66	5,53	5,63
Ca	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Na	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
K	1,66	1,65	1,63	1,62	1,61
Summe Alk	1,70	1,69	1,68	1,66	1,67
OH		4,35		4,42	4,49
Ladungsbilanz	-1,72		-1,69		-1,69
	1,72		1,69		1,69
Dreiecksprojektion (Oktaederplätze)	24,0	23,1	24,8	23,8	25,1
	38,2	38,7	35,1	35,6	35,2
	37,6	38,1	39,9	40,5	39,6
					40,2%

- zwei extreme Ausbildungsformen auftreten: Quarz-Disthen-Knauern und Andalusit-Disthen-Knauern. Bei den letzteren wurde Quarz und Plagioklas in einer postkristallinen Phase mobilisiert;
- im Mittel das Randvolumen 40% und das Kern-(Reaktions-)Volumen 60% betragen. (Einfachheitshalber wurde zur Berechnung des Modalbestandes der Knauer als kugeliger Körper betrachtet.)

Zwei Extremfälle (K I und K II) und ein Mittelwert (Idealknauer: K III) werden berechnet; als Vergleichsbasis dienen drei Gesteinschemismen (vgl. Tabelle 4).

Tabelle 4. Berechnung des Gesteinschemismus anhand des geschätzten Knauermodalbestandes

	K I	K II	K III	G I	G II	G III
SiO ₂	72,5	52,7	61,3	56,4	58,9	59,1
Al ₂ O ₃	11,8	29,1	21,4	23,4	16,7	26,5
Fe ₂ O ₃	1,0	1,0	0,9	1,4	2,8	6,0
FeO	5,6	5,7	5,4	7,6	3,7	
MgO	3,1	3,1	2,8	3,3	2,6	1,4
CaO	0,4	1,1	1,3	0,4	2,2	0,5
Na ₂ O	0,0	1,7	2,1	0,6	1,6	1,3
K ₂ O	2,9	2,9	2,6	4,3	3,6	2,9
TiO ₂	1,0	1,0	1,0	0,6	0,8	1,5
H ₂ O	1,4	1,4	1,3	2,0	1,4	
P ₂ O ₅	0,4	0,4				

K I: Rand: 80 Bi, 17 Di, 2 Ap, 1 Ilm – Kern: 95 Qz, 5 Di

K II: Rand: 80 Bi, 17 Di, 2 Ap, 1 Ilm – Kern: 30 Qz, 40 Di, 30 Olig

K III: Idealknauer: Rand: 10 Olig, 15 Di, 72 Bi, 2 Ap, 1 Ilm – Rkt: 60 Olig, 25 Di, 15 Qz – Kern: 15 Di, 85 Qz

G I: 25 Qz, 5 Olig, 25 Bi, 20 Ms, 10 Gr, 15 Di

G II: mittlerer Pelitchemismus aus W. SCHREYER (1970)

G III: Mittel von 14 Stgir-Schiefer-Analysen aus J. S. FOX (1974)

Tabelle 5. Spurenelementanalyse der Knauerzonen

	P	Be	Sc	V	Cr	Cu	Zn	Rb	Sr	Zr
349 a	Gst.	—	Sp	+	Sp	+	+	+	+	—
	Rand	+	—	+	Sp	+	+	+	Sp	+
	Kern/Rkt.	—	—	+	+	—	+	Sp	Sp	—
381	Gst.	+	+	+	+	+	+	+	++	+
	Kern	—	—	+	Sp	+	Sp	Sp	Sp	Sp
	Y	Nb	Cd	Sn	Ba	Ir	Pt			
349 a	Gst.	+	+	+	+	+	+	Sp		
	Rand	+	Sp	+	+	+	+	Sp		
	Kern/Rkt.	—	—	+	Sp	+	—	+		
381	Gst.	+	+	Sp	+	++	Sp	+		
	Kern	Sp	Sp	+	+	+	—	+		

Sp: <500 ppm; +: 500–1000 ppm; ++: 0,1–1,0 Gew.%

Eine qualitative spektrometrische Analyse gibt Auskunft über eine etwaige, spezifische Verteilung der Spurenelemente (Tabelle 5). Es wurde jeweils ein grösseres Volumen des Knauerkerns, des Randes und des Gesteins untersucht (detaillierte, technische Angaben u. a. in SCHWANDER et al., 1968, p. 361). Dabei bestätigen sich die mineralogischen Daten: relative «Anreicherung» von Phosphor (Träger: Apatit, Monazit), Zirkon (Träger: Zirkon) in der Randzone. Beryllium tritt nur im Gestein auf.

7. ANALYSE

Es gibt lokale, spezifische Mineralkonzentrate. Sie bilden sich nach dem Prinzip der Sekretionen und werden zu dem um 1900 kreierten Begriff der meta-

mophen Differentiation gezählt (CHAPMAN, 1950; ESCOLA, 1932; EUGSTER, 1970; FISHER, 1970, 1973; HOFMANN et al., 1974; KELLER, 1968; MIYASHIRO, 1973; RAMBERG, 1948, 1952; READ, 1932; STILWELL, 1918; VERNON, 1976). Irgendwo wird irgendwie irgend etwas gelöst, transportiert und neu auskristallisiert. Der Weg ist im allgemeinen kurz.

Für den Versuch einer Interpretation seien die wichtigsten beobachteten Eigenschaften kurz zusammengefasst:

- Tertiäre alumosilikatführende Quarz-Feldspatknaue treten in der von NIGGLI und NIGGLI (1965) definierten Disthenzone auf.
- Alumosilikatführende Quarz-Feldspatknaue sind zoniert. Durch diese Zonierung entsteht lokal eine deutliche Anreicherung spezifischer Elemente, vor allem Aluminium.
- Innerhalb der Knauern bilden sich Makrokristalle. Diese sind im Vergleich zu den gesteinsbildenden Äquivalenten bis zu hundertmal grösser und weisen keine Einschlüsse auf.
- Die Häufigkeit der alumosilikatführenden Knauern ist von der geographischen Lage, dem Gebirgsbau und der Position innerhalb der Einheit (Viskositätskontrast) abhängig.
- Typische Reaktionstexturen fehlen.

Diese Punkte beinhalten die ganze Problematik der Knauergenese. Bei den nun folgenden Ausführungen ist äusserste Vorsicht geboten; insbesondere bei der thermodynamischen Behandlung.

Knauern stellen das Produkt irreversibler Prozesse (Transportphänomene) dar. Allgemein sind Masse- und/oder Energietransport Folgen eines

- mechanischen Ungleichgewichtes (z. B. heterogene Spannungsverteilung),
- chemischen Ungleichgewichts (z. B. heterogene Phasenverteilung),
- thermischen Ungleichgewichts (z. B. unterschiedlicher Wärmefluss infolge heterogener Phasenverteilung).

Ein «System» versucht dabei einen Zustand minimaler Entropieproduktion zu erreichen, d. h. entsprechende Gradienten versuchen, das Ungleichgewicht abzubauen.

So werden zum Beispiel innerhalb eines einheitlichen Gesteins infolge heterogener Spannungsverteilung Freie-Energie-Gradienten erzeugt. Diffusionsströme (chemische Potentialgradienten) versuchen das System in einen Zustand minimaler Energie zu bringen. Folgen sind geochemischer Massentransport, spezifische Mineralverteilung und -vergesellschaftung (STEPHANSON, 1974).

Beobachtungen an Knauern und benachbarter Matrix weisen auf eine komplizierte, wohl mehrphasige Entstehungsgeschichte infolge mechanischer Ungleichgewichte hin. Sedimentäre oder metamorphe Vorzeichnungen (ererbte Geometrie) sind dabei von wichtigster Bedeutung. Diese bauen innerhalb des

regionalen Kompressionsfeldes lokale Zerrungsfelder auf. Entweder bilden sich in diesen Niederdruckzonen direkt alumosilikatführende Knauern oder es kommt zur Bildung einer primären Quarz \pm Feldspat-Ader. Der alumosilikatführende Knauer entsteht dann in einer weiteren Phase infolge des nun herrschenden chemischen Ungleichgewichtes.

Für die Theorie eines mechanischen Ungleichgewichtes spricht einerseits die Häufigkeit alumosilikatführender Knauern im Kontakt zwischen sich rheologisch anders verhaltenden Schichten und anderseits das spärliche Auftreten von Knauern in homogenen, aluminiumreichen Glimmerschiefern. Ähnliche Beobachtungen macht KELLER (1969). Gemäss EUGSTER (1970) und FISHER (1970) führen einzelne Aktivitätsgradienten (chemisches Ungleichgewicht) zur Bildung spezifischer Segregationen. Während Eugster Sillimanit-Quarz-Knauern als Folge grossräumiger K-Migration im Bereich Kalium-konsumierender, anatektischer Prozesse interpretiert, postuliert Fisher lokale Aktivitätsgradienten, verursacht durch Freie-Energie-Differenzen metastabiler Phasen. Die aufgeführten Beispiele weisen eine für klassische petrographische Befunde erträgliche Elementverteilung über die einzelnen Zonen auf – anders aber für die hier untersuchten alumosilikatführenden Knauern.

Anhand der Mineralverteilung über die einzelnen Knauerzonen (vgl. Fig. 2, S. 437) lassen sich die Gewichtsprozente der entsprechenden Zonen berechnen (Fig. 9). Als Basis dient der «Idealknauer» mit der Zusammensetzung:

Rand:	10 Vol.-% Olig, 15 Di, 72 Bi, 2 Ap, 1 Ilm.
Reaktionszone:	60 Olig, 25 Di, 15 Qz.
Kern:	15 Di, 85 Qz.
Gestein:	25 Qz, 5 Olig, 25 Bi, 20 Ms, 10 Gr, 15 Di.

Die Verteilung der Elemente in den Knauern besitzt für Aluminium ein Maximum in der Reaktionszone, für Silizium in der Kernzone, für Eisen, Magnesium, Titan, Phosphor in der Randzone.

Die deutliche Anreicherung von Aluminium in der Reaktionszone und Randzone steht im Widerspruch zu den klassischen petrographischen Befunden, welche Aluminium als immobiles Element auffassen (MEHNERT, 1960; CARMICHAEL, 1969).

Untersuchungen über metasomatische Prozesse (KORZHINSKII, 1965) zeigen, dass Aluminium ähnliche Eigenschaften wie das schlecht bewegliche Titan, Eisen (III) besitzen sollte.

Für einen speziellen Bildungsmechanismus spricht der einschlussfreie Disthen, dessen Makrokristalle und lokale Anreicherung. Durch das unterschiedliche, rheologische Verhalten einzelner Mineralien wie Di-Bi, Di-Qz usw. im Kompressionsfeld kommt es zur Bildung lokaler Anreicherungen. Diese Akkumulate stellen wiederum ein chemisch-mechanisches Ungleichgewicht dar. Entsprechende Diffusionsströme versuchen, das System in einen Quasi-Gleichge-

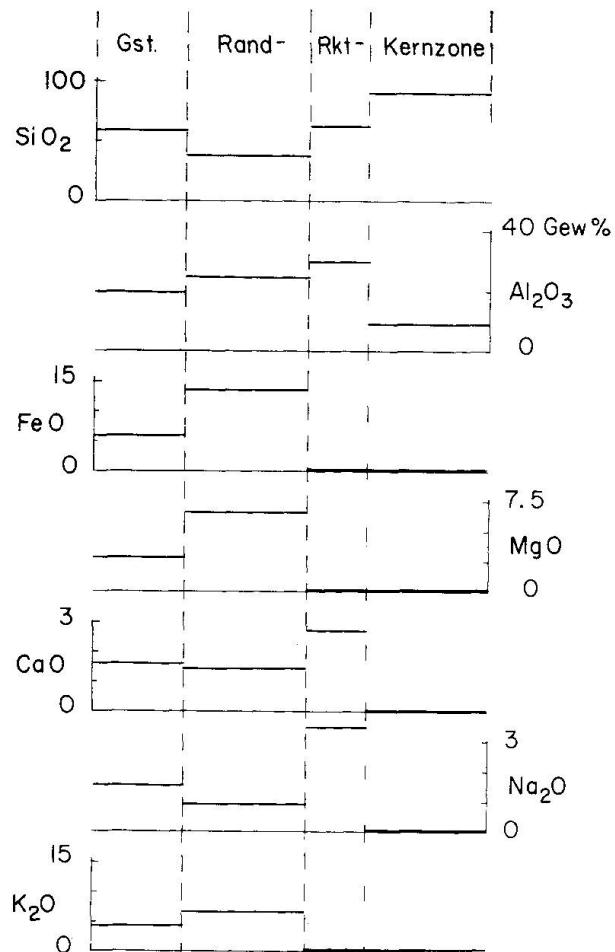


Fig. 9. Vergleich der Gewichtsprozente ausgewählter Elementoxide zwischen den einzelnen Knauerzonen und dem Gestein.

wichtszustand zu bringen – es kommt zur Bildung zonierter, aluminosilikatführender Knauern. Die Kristallisation des Disthens erfolgt mittels mobilen Aluminiumkomplexen im Spannungsfeld (Einregelung der c-Achsen parallel der Lineation) – eine Sammelkristallisation präexistierenden, gesteinsbildenden Disthens (refining crystallization) scheint wenig wahrscheinlich.

In Anlehnung an aktualistische Modelle (Salton Sea geothermal system) und der Zusammensetzung der Flüssigkeitseinschlüsse von Kluftmineralien dürfte es sich bei der Bildung aluminosilikatführender Knauern um eine saure, wässrige Lösung mit eventuell hoher NaCl-Konzentration handeln. Bei der minimalsten Bildungstemperatur von Disthen (500°C) liegen entsprechende Kationen wie Na^+ , K^+ , Mg^{++} usw. in der assoziierten Chloridform vor (vgl. HELGESON, 1969).

Als mögliche Aluminiumkomplexe könnten auftreten:

- Aluminium-Karbonat-Komplex. Die regionale Verteilung bzw. Häufigkeit aluminosilikatführender Knauern in der Nähe von Karbonatzügen (vgl. Fig. 5) als auch das Auftreten von Graphit in Knauern (röntgenographische Identifikation durch H. Hänni und St. Graeser) spricht für die Existenz entsprechender Komplexe.

- Aluminium-Phosphat-Komplex. Die Häufigkeit von Phosphatmineralien (Apatit, Monazit) in der Randzone könnte ein Indiz für erhöhte Al-Mobilität bei entsprechendem Komplex darstellen.
- Aluminium-Fluor-Komplex. Versuche mit Hilfe eines Al-F-Komplexes (Muñoz, 1974) ergeben eine relativ grosse Al-Mobilität bei hohem Fluorgehalt. Als F-haltiges Mineral kommt vor allem der Biotit in Frage.

Figur 10 skizziert schematisch einige genetische Modelle von alumosilikatführenden Knauern. Als Knauer 1 wird eine beliebige, tonerdesilikatführende Segregation bezeichnet. Durch das mechanische Ungleichgewicht 2 kommt es zur Bildung eines zonierten Knauers. Der Quarz ± Feldspat in den glimmerreichen Partien wird korrodiert und wandert in ursprünglich Quarz + Feldspat-reichere Zonen. TUOMINEN (1966) zeigt, dass die Hauptbasifikation im Bereich der stärksten Kompression (entsprechend feinkörnige Ausbildung) und eine zunehmende «Granitisierung» im Bereich der Expansion (grobkörnige Niederdruckzone) stattfindet. Diese Resultate stehen in gutem Zusammenhang mit den Beobachtungen an Knauern. Neben der Übereinstimmung: basische Produkte im Bereich der stärksten Kompression, saure Produkte im Niederdruckbereich nimmt die Korngrösse der sauren im Vergleich zu den basischeren Komponenten des Randes deutlich zu (vgl. Fig. 4, S. 438).

Die Bildung der disthenführenden Knauern setzt während oder unmittelbar nach der letzten Hauptgesteinsmetamorphose ein. Später bildet sich Andalusit, meist auf Kosten von Disthen (Vergesellschaftung Disthen-Andalusit, Pseudomorphosen von Andalusit nach Disthen, vgl. S. 443); der Druck nimmt ab. Die Bildung des Fibroliths schliesst die zeitliche Folge der Alumosilikate ab.

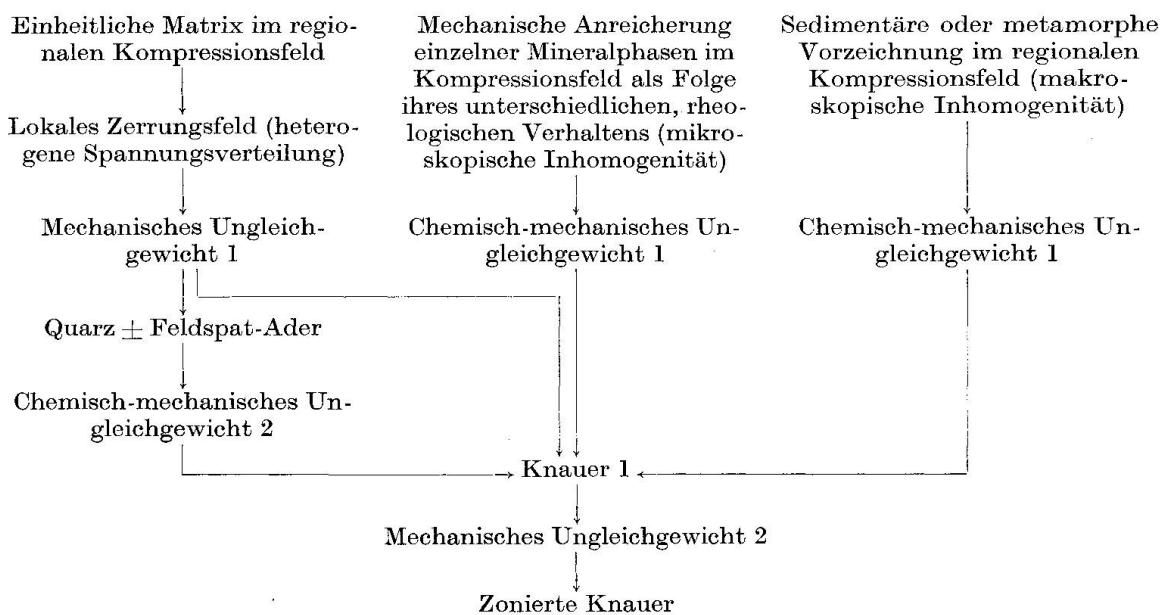


Fig. 10. Schematisches Modell für die Genese zonierter, alumosilikatführender Knauern.

In den NS-Profilen (Fig. 7, S. 442) äussert sich die Abfolge in folgenden Zonen:

- Disthenzone,
- Andalusitzone mit reliktischem Disthen,
- Fibrolithzone mit reliktischem Disthen ± Andalusit.

Hier wölben sich die Isothermen infolge erhöhter Wärmezufuhr und erhöhter Wärmeleitfähigkeit (Steilstellung der Schichten im Bereich der Wurzelzone) zunehmend Richtung Süden bis zur insubrischen Linie auf.

RICHARDSON (1970) interpretiert das inselartige Auftreten von Niederdruckphasen innerhalb einer Mitteldruckfazies als Folge einer thermischen Antiklinale. Einen verstärkten Effekt erhalten wir bei vertikaler Bewegung einzelner Regionen. Dabei nimmt einerseits der Druck ab und anderseits werden die Isothermen mitgeschleppt. In den Leontinischen Alpen offenbart der Verlauf der s-Flächen (E. WENK, unveröffentlicht) verschiedene Grossstrukturen. Für die folgenden Überlegungen sind nur Hebungen von Interesse: Varzokulmination, Maggia-, Tessiner und Crescim-Antiform.

Die regionale Verteilung der entsprechenden Knauerparagenesen ist von der Abkühlungsgeschichte und der lokalen Hebungsgeschichte abhängig. In einer ersten, prä- bis synkinematischen Phase (Kompressionsfeld mit lokalen Dilatationszonen) kommt es zur Bildung von zonierten, disthenführenden Knauern. Bei fortschreitender Vertikalbewegung und Erosion wird lokal die univariante Grenze Disthen – Andalusit überschritten. Hier bildet sich Andalusit auf Kosten von Disthen (vgl. S. 443: Altersbeziehungen der Alumosilikate). Durch das zeitlich verzögerte Mitschleppen der Isothermen wird im Hochtemperaturbereich (Süden) das Stabilitätsfeld von Sillimanit bzw. Fibrolith erreicht.

Verdankungen

Ein spezieller Dank gilt meinem Lehrer, Herrn Professor Dr. E. Wenk, auf dessen Anregung hin diese Arbeit entstanden ist. Herrn Professor Dr. H. Schwander und PD Dr. W. B. Stern sei hier für Ratschläge und das Ausführen der chemischen Analysen besonders gedankt, ebenso Herrn PD Dr. St. Graeser und H. Hänni für röntgenographische Untersuchungen, Herrn Professor Dr. M. Frey für die Durchsicht des Manuskripts, Herrn Dr. Luigi Bier für die Verfassung des Riassunto, Herrn T. Fischer und H. Hänni für das Anfertigen der Dünnschliffe und Frau S. Lüthi für ihre Mühe bei der Reinschrift des Manuskripts. Dank schulde ich auch allen meinen Kollegen und insbesondere dem Patriat von Biasca und seinen Einwohnern; sie alle verhalfen mir zu einer angenehmen Studienzeit.

Literatur

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

- BURRI, C. (1959): Petrochemische Berechnungsmethoden auf äquivalenter Grundlage. Birkhäuser-Verlag, Basel und Stuttgart.
- CARMICHAEL, D. M. (1969): On the mechanism of prograde metamorphic reactions in quartz bearing pelitic rocks. *Contr. Mineral. Petrol.* 20, 244–267.
- CHAPMAN, C. A. (1950): Quartz veins formed by metamorphic differentiation of aluminous schists. *Amer. Mineralogist* 35, 693–710.
- DEER, W. A., R. A. HOWIE and J. ZUSSMAN (1966): An introduction to the rock-forming minerals. Longmans, London.
- DE QUERVAIN, F. und V. JENNY (1942): Chemismus schweizerischer Gesteine. *Beitr. Geol. Schweiz, geotech. Ser.* 20.
- (1956): Chemismus schweizerischer Gesteine. *Beitr. Geol. Schweiz, geotech. Ser.* 34.
- ESCOLA, P. (1932): On the principle of metamorphic differentiation. *C. R. Soc. Géol. Finlande* 5, 68–77.
- EUGSTER, H. P. (1970): Thermal and ionic equilibria among muscovite, K-feldspar and aluminosilicate assemblages. *Fortschr. Mineral.* 47, 106–123.
- FISHER, G. W. (1970): The application of ionic equilibria to metamorphic differentiation: an example. *Contr. Mineral. Petrol.* 29, 91–103.
- (1973): Nonequilibrium thermodynamics as a model for diffusion-controlled metamorphic processes. *Amer. J. Sci.* 273, 897–924.
- Fox, J. S. (1974): Petrology of some low-variance meta-pelites from the Lukmanier Pass area, Switzerland. Diss. Darwin College, Cambridge (unveröffentlicht).
- FUMASOLI, M. W. (1974): Geologie des Gebietes nördlich und südlich der Iorio-Tonale-Linie im Westen von Gravedona. Diss. Zürich, Offsetdruck Steinbauer und Rau, München.
- HEITZMANN, P. (1975): Zur Metamorphose und Tektonik im südöstlichen Teil der Leptoninischen Alpen (Provincia di Como, Italia). *SMPM* 55, 467–522.
- HELGESON, H. C. (1969): Thermodynamics of hydrothermal systems at elevated temperatures and pressures. *Amer. J. Sci.* 267, 729–804.
- HOFMANN, A. W., B. J. GILETTI, H. S. YODER jr. and R. A. YUND (1974): Geochemical transport and kinetics. Carnegie Institution of Washington 634.
- KAMB, W. B. (1959): Theory of preferred crystal orientation developed by crystallisation under stress. *J. Geol.* 67, 153–170.
- KELLER, F. (1968): Mineralparagenesen und Geologie der Campo Tencia Pizzo Forno-Gebirgsgruppe. *Beitr. geol. Karte Schweiz, N.F.* 135.
- KORZHINSKII, D. S. (1965): Abriss der metasomatischen Prozesse. Akademie-Verlag, Berlin.
- KWAK, T. A. P. (1971): The selective replacement of the Al-silicate by white micas. *Contr. Mineral. Petrol.* 32, 193–210.
- MEHNERT, K. R. (1960): Über endogene Erzbildung und ihre Beziehung zur Granitentstehung durch selektive Mobilisation. *N. Jb. Miner. Abh.* 94, 47–76.
- MIYASHIRO, A. (1973): Metamorphism and metamorphic belts. George Allen and Unwin, London.
- MUNOZ, J. L. (1974): Measurement of quenched fluoride in synthetic hydrothermal fluids. *Abstr. with programs Geol. Soc. of America*, 882.
- NIGGLI, E. (1960): Mineralzonen der alpinen Metamorphose in den Schweizer Alpen. *Int. Geol. Congr. XXI Session, Pt XIII*, 132–138.
- (1969): Alpine Metamorphose und alpine Gebirgsbildung. *Fortschr. Mineral.* 47, 16–26.

- NIGGLI, E. und C. R. NIGGLI (1965): Karten der Verbreitung einiger Mineralien der alpidischen Metamorphose in den Schweizer Alpen. *Eclogae geol. Helv.* 58, 335–368.
- NIGGLI, P., F. DE QUERVAIN und R. U. WINTERHALTER (1930): Chemismus schweizerischer Gesteine. *Beitr. Schweiz. geotech. Ser. I.*
- RAMBERG, H. (1948): Radial diffusion and chemical stability in the gravitational field. *J. Geol.* 56, 448–458.
- (1952): The origin of metamorphic and metasomatic rocks. The University of Chicago Press.
- READ, H. H. (1932): On quartz-kyanite rocks in Unst, Shetland Islands, and their bearing on metamorphic differentiation. *Min. Mag.* 23, 317–328.
- RICHARDSON, S. W. (1970): The relation between a petrogenetic grid, facies series' and the geothermal gradient in metamorphism. *Fortschr. Mineral.* 47, 65–76.
- SCHREYER, W. (1970): Metamorphose pelitischer Gesteine im Modellsystem MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O. *Fortschr. Mineral.* 47, 124–165.
- SCHWANDER, H. und E. WENK (1965): Monazit als Kern pleochroitischer Höfe in Biotiten der Tessiner Gneisse. *SMPM* 45, 797–806.
- SCHWANDER, H., J. HUNZIKER und W. B. STERN (1968): Zur Mineralchemie von Hellglimmern in den Tessineralpen. *SMPM* 48, 797–806.
- STAUB, R. (1958): Klippendecke und Zentralalpenbau. *Beitr. geol. Karte Schweiz, N.F.* 103, p. 127.
- STEPHANSON, O. (1974): Stress-induced diffusion during folding. *Tectonophysics* 22, 233–251.
- STILWELL, F. L. (1918): The metamorphic rocks of Adelie Land. *Australian Antarctic Expedition* 3/1.
- TUOMINEN, H. V. (1966): Structural control of composition in the Orijärvi granodiorite. *Bull. Comm. géol. Finl.* 222, 311–329.
- VERNON, R. H. (1976): Metamorphic processes, reactions and microstructure developments. George Allen and Unwin, London.
- VIDALE, R. (1974): Vein assemblages and metamorphic in Dutchess County, N. Y. *Bull. geol. Soc. Amer.* 85, 303–306.
- WEBER, W. (1966): Zur Geologie zwischen Chiavenna und Mesoceo. Diss. Zürich, Offsetdruck: P. Schmidberger.
- WENK, E. (1970): Zur Regionalmetamorphose und Ultrametamorphose im Leponin. *Fortschr. Mineral.* 47, 34–51.
- WENK, E., H. SCHWANDER und W. B. STERN (1963): Zur Mineralchemie von Biotit in den Tessineralpen. *SMPM* 43, 435–463.
- WENK, H. R. (1965): Gefügestudie an Quarzknauern und -lagen der Tessiner-Kulmination. *SMPM* 45, 467–515.

Manuskript eingegangen am 1. September 1976.