

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

Band: 45 (1965)

Heft: 2

Artikel: Gefügestudie an Quarzknuern und -lagen der Tessiner Kulmination

Autor: Wenk, Hans-Rudolf

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-35201>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 18.10.2024

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

Gefügestudie an Quarzknuern und -lagen der Tessiner Kulmination

Von *Hans-Rudolf Wenk* (Zürich)*)

Mit 80 Textfiguren und 2 Tabellen

INHALT

Abstract	468
Zusammenfassung	469
Vorwort	470
1. Einleitung	471
2. Geologische Situation	472
3. Probenverzeichnis	473
4. Optisch ermittelte Gefügediagramme	474
5. Achsenverteilungsanalysen (AVA)	483
6. Nachbarbeziehungen der Kristalle	491
7. Röntgen-Texturanalyse	496
8. Kinematischer Deutungsversuch	503
9. Folgerungen über den Spannungszustand während der alpinen Orogenese	507
a) Anwendung der Theorie von KAMB (1959)	507
b) Tektonisches Modell zur Deutung des Spannungsbildes	509
Literaturverzeichnis	513

*) Institut für Kristallographie und Petrographie der Eidg. Technischen Hochschule, Zürich.

ABSTRACT

Fabrics of quartz-lenses and -layers of the Tessin and Toce culmination (Le-pontine Alps) are examined in classical (optical U-stage measurements and grain-statistics) and modern ways (X-ray, electronic computer). Great weight is attached to methodology. The results permit a hypothetical kinematic and dynamic conception of quartz orientation.

The optic [0001]-diagrams (c-axis) show strong minima in the fabric direction *b* (regional alpine lineation) and girdle pole distribution in *ac*. In fabrics with clear, sharp-edged crystals the directions of the c-axis are piled up in discrete maxima (maxima-type) distributed asymmetrically in the zone *ac*. In strongly recrystallized fabrics, the *ac*-girdle is belayed uniformly or with a broad maximum in *a*. Between *ac*-girdle and cross-girdle there are all states of transition.

Axial distribution analyses (AVA, SANDER) show almost everywhere a strong tendency to form superindividuals. In the fabric the distribution of the c-axes is spatially homogeneous. There is no correlation between grain-size and pole direction nor are there any direction-groups after SANDER. Neighbour-grain statistics — taking account by means of computers of all angles between the neighbouring c-axes — show a flat distribution around some preferred angles. Obviously there is no immediate correlation between the grains (e. g. twins). The medium neighbour angle, introduced for a closer description of the fabric, gives information on the homogeneity of the sample. Compared with theoretic model-distributions, X-ray diagrams show partly good orientation of $(10\bar{1}1)$ in fine-grained quartzites; in coarse-grained lenses there is almost always liberty of rotation, but the *a*-axes in superindividuals are often fixed. Single-crystal investigation showed strong structural defects in the quartz-grains, which are generally split up into many domains (see WENK H.-R., 1966a).

The results are discussed: Gliding is only detectable in the mylonite-quartzite Ghendola. In all other samples the c-axis direction seems to be the most important element of orientation (minimum in *b*). Preferred orientation of rhombohedral planes (e. g. $(10\bar{1}1)$) is interpreted as potential readiness for gliding, which it comes to only in a very few cases. The domain-structure helps to understand the mechanism of orientation: variation in the stress field causes the domains to change their direction uniformly in the grain like a parallel-aggregate. That brings about a new position of equilibrium („internal rotation“). Domain recrystallization is clearly to be distinguished from nucleus-recrystallization.

The observations are critically compared with the thermodynamic theory of KAMB (1959) predicting a girdle orientation of the c-axes normal to the main compression-axis for the crystallization of quartz in a uni-axial stress field. Because the physical conditions required by KAMB are likely to be realized in the analysed material, we try to derive a dynamic explanation: during the quartz-crystallization *b* (direction of the regional lineation) was the main compression axis. This result is made plausible for the situation in the Tessin region: (1) EW-compression causes folding and lineation. The rocks are simultaneously elongated in the fabric-direction *b* (main crystallization). (2) The elongation produces reaction-forces because of the resistance of the massifs. The main compression is NS (quartz-crystallization). (3) Cooling of the Lepontine gneiss complex causes tensions in *b* producing *ac*-fissures, which are very common in the region.

The applied FORTRAN 2-Programs (plotting of diagrams, transformation of coordinates, indirect orientation, neighbour-grain statistics), which make it possible to save much time, are published elsewhere (see WENK and TROMMSDORFF, 1965). They can be ordered from the Mineralogical Institute of Basle University.

ZUSAMMENFASSUNG

An Quarzknauern und -lagen der Tessiner Kulmination wird eine möglichst vollständige Gefügeanalyse durchgeführt. Das Hauptgewicht der Arbeit liegt auf der Methodik. Die Ergebnisse führten zu einer Hypothese über den Regelungsmechanismus bei Rekristallisationsgefügen und zu einer synthetischen Vorstellung über das Spannungsbild während der alpinen Orogenese.

Die optisch gemessenen [0001]-Diagramme (c-Achse) zeigen durchwegs eine starke Unterbesetzung in der Gefügerichtung b, der Richtung der regionalen Lineation, und gürtelförmige Pollagenverteilung in ac. In Gefügen mit klaren, scharfbegrenzten Kristallen sind die c-Achsenrichtungen in diskreten, in der Zone ac asymmetrisch verteilten Maxima gehäuft (*Maxima-Typ*), bei stark rekristallisierten Gefügen ist der ac-Gürtel gleichmässig besetzt oder er weist ein breites Maximum in a auf. Zwischen *ac-Gürtel* und *Kreuzgürtel* finden sich alle Übergänge. Achsenverteilungsanalysen zeigen in den meisten Gefügen eine starke Tendenz zu Überindividuenbildung. Die c-Achsenrichtungsverteilung ist an verschiedenen Raumpunkten des Gefüges gleich. Es besteht kein enger Zusammenhang zwischen Korngrösse und Polrichtung. Eine Nachbarwinkelstatistik, bei der mit elektronischen Rechenmaschinen sämtliche c-Achsen-Nachbarwinkel im Gefüge berechnet werden, zeigt flache Häufigkeitsverteilungen um einige bevorzugte Lagen. Zwischen den Körnern besteht offensichtlich kein unmittelbarer Zusammenhang (z. B. Verzwilligung). Zur weiteren Beschreibung des Gefüges wurde der mittlere Nachbarwinkel eingeführt. Er gibt unter anderem Aufschluss über die Homogenität der Probe. Röntgendiagramme, welche mit theoretisch berechneten Modellverteilungen verglichen werden, zeigen eine gute Orientierung von $(10\bar{1}1)$ in feinkörnigen Quarziten. In grobkörnigen Knauern herrscht im gesamten Drehfreiheit der a-Achsen, nur in den Überindividuen sind diese meist fixiert. Bei Einkristalluntersuchungen wurde starker Fehlbau, eine Aufspaltung des Quarzkorns in zahlreiche Domänen, beobachtet (vgl. WENK H.-R., 1966 a).

Die Ergebnisse werden diskutiert: Sichere Hinweise auf Gleitung sind nur im Mylonitquarzit Ghendola vorhanden; in den andern Proben scheint die c-Achsenrichtung das wesentliche Regelungselement zu sein (b-Minimum), in der Regelung von $(10\bar{1}1)$ wird möglicherweise eine Bereitschaft zur Gleitung angedeutet. Aus der Domänenstruktur wird auf den Regelungsmechanismus geschlossen: Bei Änderung des Stressfeldes drehen sich die Domänen einzeln, aber im Korn einheitlich (als „Parallelen-Aggregat“) in die Gleichgewichtslage, die dem neuen Spannungszustand entspricht (Internrotation). Quarzgefüge können als Makro-einheiten mit dreifachem, statistisch homogenem, anisotropem Fehlbau aufgefasst werden (die diskontinuierlich sich wiederholenden Bauelemente sind Überindividuum, Korn, Einkristall-Domäne). Domänenrekristallisation ist ein Vorstadium der Keimrekristallisation.

Die Beobachtungen werden kritisch mit der thermodynamischen Theorie von

KAMB (1958) verglichen, welche für Kristallisation in einem einachsigen Stressfeld bei Quarz eine Einregelung der c-Achsen in einen Gürtel senkrecht zur Kompressionsrichtung voraussagt. Da die physikalischen Bedingungen, welche von KAMB vorausgesetzt werden, in den hier beschriebenen Proben vermutlich erfüllt sind, wird aus der Theorie eine dynamische Deutung abgeleitet: Während der Quarzkristallisation muss die Hauptkompression in b, der Richtung der Lineation gewirkt haben. Dieses Ergebnis wird für die Tessiner Region geologisch plausibel gemacht: 1. EW-Kompression führt zur Bildung von Faltung und Lineation. Gleichzeitig werden die Gesteine in b gelängt (Hauptkristallisation). 2. Durch die Längung entstehen am Widerstand der Massive Reaktionskräfte, die zur Ausbildung einer Kompression in Richtung der Lineation führen. 3. Abkühlung des Komplexes, durch Zugspannungen in b entstehen ac-Klüfte.

Die verwendeten gefügeanalytischen FORTRAN-2-Programme (Zeichnen von Diagrammen, Koordinatentransformation, indirekte Orientierung und Nachbarwinkelstatistik) sind samt einer ausführlichen Programmbeschreibung publiziert (siehe WENK H.-R. und TROMMSDORFF, 1965). Sie können durch das Mineralogische Institut der Universität Basel, Bernoullianum, bezogen werden.

Vorwort

Seit den klassischen Arbeiten von SANDER beschränkte man sich in der Gefügekunde während der letzten Jahrzehnte — abgesehen von den Deformationsexperimenten — hauptsächlich auf die Anwendung von SANDERS Vorschlägen bei konkreten geologischen Problemen. Bei den grossen Fortschritten in Kristallographie und Festkörperphysik sollte die Methodik dem neuen Stand der Forschung angepasst werden, um lebendig zu bleiben. Diese Arbeit will dazu beitragen: Die Korngefügeanalyse wird durch Verwendung der Röntgenbeugung zur Untersuchung von Gefügen und Einkristallen und durch die Auswertung von Messdaten mit elektronischen Rechenanlagen erweitert.

Die Arbeit wurde im Institut für Kristallographie und Petrographie der ETH, Zürich, im Sommer 1963 begonnen und Ende 1964 abgeschlossen. Prof. F. Laves in Zürich danke ich sehr dafür, mir die Durchführung der Arbeit an seinem Institut ermöglicht zu haben. Mein Dank gilt ferner den Herren Dr. H. U. Nissen (Zürich) und Dr. V. Trommsdorff (Basel) für manch lange und fruchtbare Diskussion über gefügekundliche Probleme. Ein Grossteil der elektronischen Berechnungen konnte im Basler Rechenzentrum durchgeführt werden; teilweise wurden die Daten auch auf dem CDC-1604-A-Computer der ETH verarbeitet; die mir dort gewährte Hilfe (Frl. H. Haffner, Frl. R. Frech und Dr. M. Fehlmann) sei auch hier dankend erwähnt. Mein Bruder Caspar Wenk hat mich beim Ablochen der Datenkarten tatkräftig unterstützt.

Dr. A. Spicher, Redaktor der SMPM, hat mich in drucktechnischen Belangen beraten und sich für eine saubere Gestaltung der Arbeit eingesetzt, die Schweiz. Min. und Petr. Gesellschaft leistete einen Beitrag an die Druckkosten. Ihnen sei mein Dank ausgesprochen.

Eine grosse Hilfe war mir weiterhin Herr E. Glauser (technischer Assistent am Mineralogischen Institut Basel): er führte während meiner Aufenthalte in Zürich zahlreiche Aufnahmen in Basel durch und stand mir in technischen Belangen mit

Rat und Tat zur Seite. Seiner Geschicklichkeit ist es auch zu verdanken, dass die Gefügekamera zu einer mechanisch einwandfreien Apparatur entwickelt werden konnte.

Sehr verpflichtet bin ich meinem Vater für die geologische Vorbildung, die er mir vermittelte. Ob man wollte oder nicht, musste man von klein auf mit auf seine Exkursionen und zu seinen Kartierungsarbeiten und wurde so nach und nach mit den Problemen des Gebirgsbaus vertraut. Der Wert dieser unvermeidbaren Erziehung kam einem erst viel später zum Bewusstsein.

Hier gedenke ich auch gerne der zahlreichen schönen Stunden in den Bergen. Es ist wohl hauptsächlich der Gastfreundschaft der einfachen Tessiner Bauernbevölkerung mit ihrem fröhlichen, aber vornehmen Adel zu verdanken, dass ich jene Gegend wie keine zweite zu lieben begann.

Die vorliegende Arbeit behandelt vorwiegend methodische Fragen. Oft kam es zu Auseinandersetzungen mit Grundlagenproblemen der Wissenschaft, die mir in den letzten Jahren so wertvollen Einblick in das Wesen von Wahrheit und Vernunft verschafften, wodurch mir manche Kluft überbrückt wurde. Der Wissenschaft habe ich diese Erfahrung zu verdanken, für sie wurde diese Arbeit ausgeführt, ihr sei sie gewidmet.

1. Einleitung

Das Gefüge von rekristallisierten Quarzlinsen aus Gneissen der leontinischen Kulminationen bildet ein geeignetes, in sich abgeschlossenes Testobjekt zur Einführung neuer Methoden in die Korngefügeanalyse. Das Material sollte möglichst einfache Gefügetypen repräsentieren, da es sich bei den Proben um Kristallisationen der Schlussphase der alpinen Metamorphose handelt, in denen das Gefügebild nicht durch alte Strukturen gestört ist. Diese Vermutung bestätigte sich nur teilweise: Die Symmetrie der Poldiagramme ist niedrig, die Verteilung der c-Achsen variiert oft in kleinen Bereichen, und es finden sich kaum zwei gleiche Verteilungen in den untersuchten Proben trotz der genetischen Verwandtschaft. Wenn wir in Anbetracht dieser Schwierigkeiten dennoch bei den grobkörnigen Linsen blieben und uns nicht zum Beispiel den feinkörnigen, statistisch homogenen Triasquarziten zuwandten, so aus dem Grund, weil hier Hoffnung bestand, unmittelbaren Einblick in den Mechanismus der Kristallorientierung zu gewinnen.

In dieser Arbeit wird in erster Linie auf die Methodik Wert gelegt, wir können dabei nicht ganz auf einige genetische Betrachtungen verzichten. Das Vorgehen ist induktiv und analytisch: wir benützen den geologischen Rahmen, um auf die Quarzregelung schliessen zu können. Durch Verbindung der Beobachtungen mit der thermodynamischen Theorie wird im letzten Abschnitt der Versuch unternommen, eine kinematische und dynamische Synthese abzuleiten.

2. Geologische Situation

Das petrographische Hauptmerkmal des Lepontins (WENK E., 1956), der tiefsten in den Alpen aufgeschlossenen Zone, bildet die durchgreifende alpine Kristallisation unter mesothermalen, zum Teil schwach katazonalen Bedingungen, welche die Orogenese begleitete und überdauerte. Die geologisch-tektonische Gliederung ist kompliziert und noch nicht restlos geklärt. Insbesondere erwies sich die „Decken-Wurzel-Theorie“ (z. B. STAUB, 1924, 1958) in diesem Bereich als unzutreffend (WENK E., 1962b). Wichtig für das Verständnis der regionalen geologischen Verhältnisse sind mineralogische, physikalische und physikochemische Untersuchungen. Aus Isotopen-Altersbestimmungen (JÄGER et al., 1959, 1960, 1961, 1964; GRÜNENFELDER, 1964) geht hervor, dass ein Grossteil der gesteinsbildenden Mineralien, unter anderem Biotit und Muskowit, zum Teil aber auch Zirkon, alpin rekristallisiert sind. An manchen Stellen lässt sich beginnende Anatexis mit Schollenbildung beobachten (z. B. Tencio und Rozzera in V. Verzasca), im allgemeinen wurde aber der Zustand vollständiger Auflösung nicht erreicht. Die hellen Phasen der Gneisskörper waren jedoch weitgehend mobil; aus ihnen entstanden lokal Linsen während der Hauptkristallisation sowie Pegmatit-, Aplit- und Quarzgänge in einem späteren, nicht scharf abgrenzbaren Zeitpunkt. Durchwegs herrschten starke Temperaturgradienten, zu denen einesteils die endogene Erwärmung der Region (WENK E., 1962a, b), andernteils die Wärmeleitungsanisotropie der meisten alpinen Gesteine (WENK H. R., 1964) beigetragen haben. Mechanische Deformationen (z. B. Überschiebungen) haben im tieferen Lepontin eine mehr lokale Rolle gespielt; sie liessen zum Beispiel Scherungs- und Mylonit-Gefüge entstehen. Die makroskopischen Strukturelemente (planare und lineare Parallelgefüge) sind erdgeschichtlich jung (WENK E., 1955; HAFNER, 1958; STEIGER, 1962) und laufen ohne Hiatus von Süden her ins Gotthardmassiv hinein. Alte Strukturelikte sind bisher in der tieferen Tessiner Region keine bekannt; das Gefüge ist vollständig *umgeprägt* und rekristallisiert. Auch in den Quarzitgefügen des Gebietes sind alte Strukturen nirgends nachweisbar.

Wegen der stofflichen und strukturellen Inhomogenität der geologischen Körper stossen wir auf eine grosse Mannigfaltigkeit von verschiedenen Gefügetypen. Lokale Störungen haben die Quarzregelung stark beeinflusst. Gleichwohl sind gewisse Merkmale in allen Proben erstaunlich ähnlich, und diesen gemeinsamen Merkmalen gilt hauptsächlich unsere Aufmerksamkeit.

3. Probenverzeichnis

Als Untersuchungsmaterial dienten in erster Linie grobkörnige Aussonderungen von Quarz in Knauern und Lagen, zum Vergleich wurden auch einige Gefüge aus feinkörnigeren Quarzitzbänken untersucht. Das Material wurde grösstenteils selbst gesammelt, ausgenommen die beiden Proben Vz 209 und Vz 504 (V. Redorta), welche uns von Dr. Trommsdorff und Prof. Wenk, und Gef 73 (Frodalera), welche uns von Dr. Glauser samt Messprotokollen freundlich zur Verfügung gestellt wurden. Die Lage der Handstücke wurde an Ort und Stelle eingemessen, die hergestellten Dünnschliffe sind ebenfalls orientiert, so dass die Untersuchungen nach-

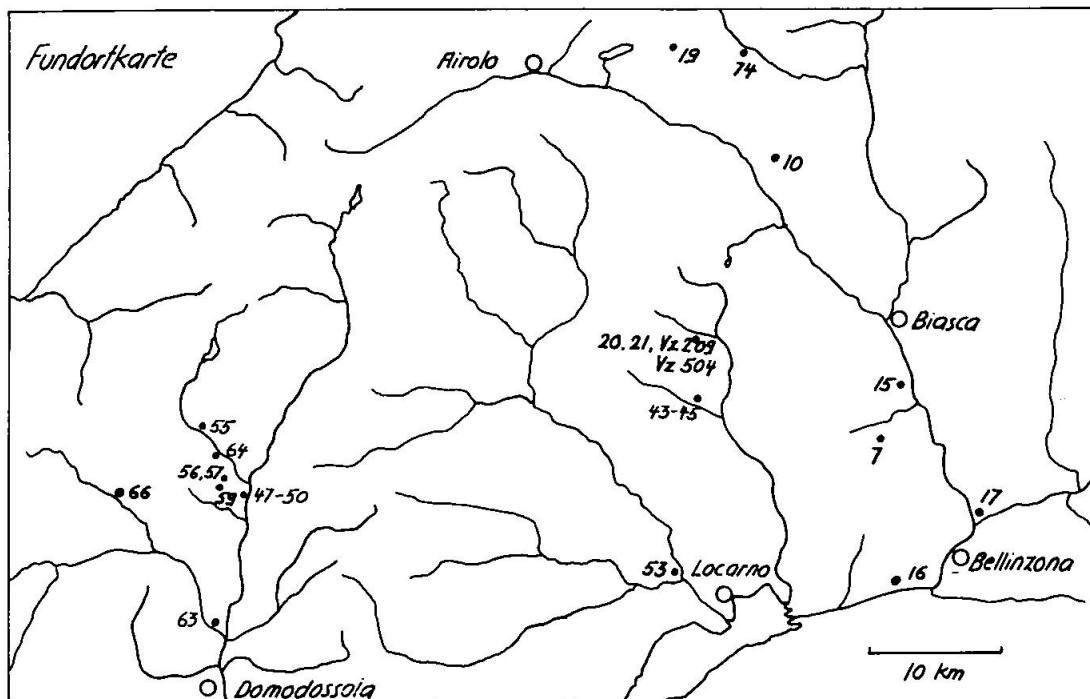


Fig. 1. Fundortkarte der untersuchten Proben.

träglich wieder mit dem Gebirgsbau in Beziehung gebracht werden konnten. In Tabelle 1 sind die Proben mit Fundortangaben und geologischem Vorkommen zusammengestellt, Fig. 1 zeigt eine Fundortkarte. Die im weiteren Verlauf der Arbeit verwendeten Abkürzungen beziehen sich auf die hier erwähnten Angaben; meist wird später auf eine Lokalisierung oder genauere Beschreibung der Proben verzichtet.

Tabelle 2 gibt ein Verzeichnis der an den verschiedenen Proben durchgeführten Untersuchungen, welche diskutiert werden. Es soll dem Leser

Tabelle 1. *Probenverzeichnis*

Probennummer	Fundort	Koordinaten	Muttergestein
Gef 7	Alpe Drosina	71640/12450	Lage in Bündnerschiefer
Gef 10	Strasse Anzonico-Casgioni, 1160 m	70890/14420	Quarzitbank
Gef 15	Steinbruch Rongei bei Lodrino,	71820/12980	Differenziat in Leventina-Gneiss
Gef 16	Kantonsstrasse St. Antonio-Gudo bei Pt. 245.2	71780/11510	Lage in Paragneiss
Gef 17	Steinbruch Castione	72365/12130	Knauer in Kalksilikattfels, glimmerreiche Lage
Gef 19	Loitelle W Passo Corombe, V. Piora	70180/15540	Knauer in Paragneiss, Pratoserie
Gef 20	Wasserfall V. Redorta	70250/13380	Lage in hellem Gneiss
Gef 21	Wasserfall V. Redorta	70250/13380	Lage in feinkörnigem Gneiss
Gef 25	Steinbruch Mergozzoni, Candoglia	67690/09330	Knauer im Paragneiss
Gef 43	Steinbruch Sorio, V. Osola	70320/12840	Lage in Verzasca-Gneiss
Gef 45	Steinbruch Sorio, V. Osola	70320/12840	Lage in Verzasca-Gneiss
Gef 47	Aufschluss an der Strasse Crodo-Baceno	66815/12160	Knauer vom Kontakt Verampio-Gneiss/Baceno-Schiefer
Gef 48	idem		
Gef 49	idem		
Gef 50	idem		
Gef 53	An der Maggia ob Pte. Brolla	70165/10835	Quarzknauer aus Injektionsgneiss
Gef 55	Vor Strassenbrücke unterhalb Goglio, V. Devero	66460/12660	Quarzlage in Gneiss
Gef 56	R. Ghendola, 920 m, V. Devero	66625/12405	Linse in Gneiss
Gef 57	idem		
Gef 59	R. Ghendola, 1090 m, V. Devero	66690/12365	Quarzlage in Bacenoschiefer direkt unterhalb der Überschiebungsfäche des Antigorio-Gneisses
Gef 63	Aufschluss an d. Strasse bei Campiglia zwischen Crevola u. Varzo	66580/11210	Quarzlage in Gneiss
Gef 64	Strassenbrücke b. Osso, V. Devero	66610/12590	Quarzlinse in Baceno-Schiefer
Gef 66	„Alte Kaserne“ an der Simplonstrasse ob Gondo	65050/11520	Quarzknauer aus Antigorio-Gneiss, stark zerschert
Gef 74	Frodalera	≈70700/15400	Quarzitbank
Vz 209	Wasserfall V. Redorta	70280/13380	Quarzlage aus feinkörnigem Zweiglimmergneiss
Vz 504	idem		

als Übersicht dienen. Die Arbeit ist nach Untersuchungsmethoden, nicht nach Proben gegliedert.

4. Optisch ermittelte Gefügediagramme

Die optische Einmessung von Quarzkristallen mit dem U-Tisch ist einfach. Besonders zweckmässig erwies sich dabei die „Rotations-Zeilenanalyse“: Man betrachtet sämtliche im Gesichtsfeld des Mikroskops liegenden Kristalle (5—20), dreht dann den Tisch langsam um 180° und

Tabelle 2. Durchgeführte Untersuchungen¹⁾

nummer Proben-	Optische Untersuchungen			Röntgen-Untersuchung		Elektronische Berechnungen			
	Zeilen- analyse	AVA	Mikro- photo ⁴⁾	Textur	Einkristall ⁴⁾	Zeichnen von Stereo- grammen	Koord.- trans- formation	(10 $\bar{1}$ 1)- Verteilung	Nachbar- winkel- statistik
Gef 7			×	×	×				
Gef 10	×			×	×			×	
Gef 15		×		×	×	×	×		×
Gef 16	×			×		×			
Gef 17	×	×	×	×	×	×	×	×	
Gef 19		×	×	×	×	×			×
Gef 20				×					
Gef 21	×			×	×				
Gef 25	×		×	×	×			×	
Gef 43	×				×	×	×		
Gef 45	×				×	×	×		
Gef 47	×						×		
Gef 48	×			×	×	×			
Gef 49	×				×				
Gef 50	×				×				
Gef 53	×	×	×	×	×	×	×	×	
Gef 55	×								
Gef 56	×				×				
Gef 57	×								
Gef 59		×		×	×	×		×	
Gef 63	×				×				
Gef 64	×		×		×	×	×		
Gef 66	×			×	×	×	×		
Gef 74	(×) ²⁾			×					
Vz 209	(×) ²⁾	(×)		×		×	×	×	×
Vz 504	×						×		

¹⁾ Aufgeführt sind nur diejenigen Untersuchungen an den einzelnen Proben, welche in vorliegender Arbeit näher beschrieben werden.

²⁾ Messung A. GLAUSER, unpubliziert. ³⁾ Aus TROMMSDORFF und WENK, E. (1963). ⁴⁾ Vgl. WENK, H.-R. (1966 a).

misst fortwährend jedes in Auslöschung gelangende Korn ein. Auf diese Weise wird kein Korn übersehen, keines doppelt eingemessen und kein bestimmter Winkelbereich unbewusst bevorzugt. Die Messgeschwindigkeit ist gegenüber der gewöhnlichen Zeilenanalyse beträchtlich erhöht. Die stetige Zunahme des Azimuts in Korngruppen erleichtert das Auftragen des Messpunkte im Stereogramm. Ist ein Gesichtsbereich eingemessen, so verschiebt man wie bei einer gewöhnlichen Zeilenanalyse den Schliff parallel um einen Gesichtsfeldbetrag⁵⁾.

Als Dünnschliffschnitt können grundsätzlich beliebige Ebenen gewählt werden, man hält sich jedoch der Einfachheit halber meist an die mesoskopischen⁶⁾ Gefügekoordinaten. Bei WENK H.-R. und TROMMSDORFF (1965) ist ein FORTRAN-2-Programm beschrieben, das beliebige Koordinatentransformationen durchführt und Messpunkte in stereographischer oder Lambert-Projektion auf einem IBM-836-Autoplotter zeichnet. So wurde zum Beispiel ein schiefer Schnitt der Probe Gef 10 in die Hauptrichtungen transformiert (Fig. 23 und 24).

Es wurden in jeder Probe 100—1500 Körner eingemessen. In grobkörnigen Aggregaten sind oft nicht mehr Körner vorhanden. Ausserdem sind die Randpartien von Quarzlinsen, wie sich zeigte, meist nicht homogen. Die Homogenität innerhalb der Linse ist jedoch im allgemeinen recht gut wie Gef 17 (Fig. 13, 14, 37) und Gef 53 (Fig. 11, 52) zeigen, in denen mehrere senkrecht aufeinander stehende Schlitze untersucht wurden, und Gef 56 (Fig. 16), dessen c-Achsenverteilung fast vollständig mit der 30 cm entfernten, parallel geschnittenen Probe Gef 57/3 (Fig. 17) übereinstimmt. Mit 100—200 Körnern befindet man sich an der unteren Grenze der von der Statistik geforderten Zahl; für eine *qualitative* Betrachtung ist sie jedoch ausreichend. Für jede *quantitative* Statistik in mittelmässig geregelter Gestein ist eine Anzahl von 1000 Messungen ein Minimum. Bei kleineren Mengen ist die Aussage einer genauen Auszählung und Angabe von Dichteprozenten zweifelhaft. Sie täuscht eine grössere Genauigkeit vor, als tatsächlich existiert. Die Diagramme haben wir mit dem optischen Verfahren von TROMMSDORFF (1963) ausgewertet. Eine Einteilung in 2 bis 4 Korndichtezone lässt

⁵⁾ Da die U-Tisch-Konstruktion nur genaue Messungen für Körner im Fadenkreuz erlaubt, wird durch die beschriebene Methode eine Streuung durch systematische Fehlmessungen erzeugt. Die Abweichungen liegen jedoch weit unter der statistischen Genauigkeit der Kornregelung, so dass die einzelnen Fehlmessungen im gesamten Gefügediagramm wieder ausgemittelt werden.

⁶⁾ Mesoskopischer Massstab: Handstück- bis Aufschlussgrösse (TURNER und WEISS, 1963, S. 15—16).

sich dabei gut von Auge abschätzen mit einem Fehler, der weit unterhalb der statistischen Unsicherheit liegt. Eine photographische Aufnahme kann man sich füglich ersparen.

Obgleich die meisten Proben äusserlich und auch der Entstehung nach ähnlich sind, zeigen die Poldiagramme eine ausserordentliche Vielfalt der Achsenverteilungen. Die Quarzachsen sind sichtlich geregelt, eine allen Diagrammen gemeinsame Regel scheint indessen zu fehlen. Bei näherem Hinsehen erkennt man dann überall eine *starke Unterbesetzung nahe b*, ein deutliches Maximum nahe *a* und verschiedenartige Häufungen in der Zone *ac*. In erster Näherung ist die Symmetrie der Quarzdiagramme $C_{\infty h}$. Wir halten uns in der Bezeichnung der Gefügekoordinaten an SANDER (1948, S. 102): *c* = Normale auf die Schieferung *s*, *b* = Lineation, *a* = Normale auf *bc*. Da trotz der guten Übereinstimmung der Diagramme mit der Symmetrie der morphometrischen Richtungen (Lineation, Fältelung) vorläufig kein Anhaltspunkt für einen Zusammenhang genetischer Art zwischen mesoskopischer und mikroskopischer Symmetrie bekannt ist, definieren wir im folgenden allgemeiner *b* als Normale auf den *ac*-Gürtel (Hauptminimum des Diagramms).

Die Proben lassen sich in verschiedenen Gruppen zusammenfassen:

1. *Ungeregelte Gefüge*. Gef 47, 48, 49, 55 (Fig. 2—5). Grosse Kristalle mit Tendenz zu Überindividuenbildung, gruppenweise gehäuft, aber ohne deutbares Ordnungsprinzip.

2. *Maxima-Gefüge*. Gef 15, 16, 21, 43, 45, 53, Vz 504 (Fig. 6—12, 52). Einzelne, verschieden starke Maxima liegen mehr oder weniger scharf auf einem *ac*-Gürtel. Das Hauptmaximum ist oft in der Nähe von *a*. Typisch ist vor allem die Unterbesetzung in *b*. Das Dünnschliffbild zeigt bei allen Proben scharfe Korngrenzen, grosse, im allgemeinen nur schwach undulöse Körner. Deutliche Rekristallisationserscheinungen fehlen.

Die Lage der Maxima ist abgesehen von den erwähnten Prinzipien ziemlich willkürlich. Die Gefügesymmetrie ist triklin.

3. *ac-Gürtel, grobkörnige Gefüge*. Gef 17, 50, 56, 57/3, 63, 64 (Fig. 13—19, 37). Deutlich ausgebildeter *ac*-Gürtel mit Maximum in *a*. Das Bild ist den vorigen Typen verwandt: Die Maxima sind entlang dem *ac*-Gürtel ausgezogen. Gef 56 und 57/3 sind Übergangstypen, die noch schwach einzelne Maxima erkennen lassen. Oft ist der *ac*-Gürtel leicht in einen Kreuzgürtel aufgespalten, dessen Schenkel ungleich besetzt sind. Die Symmetrie ist angenähert monoklin. Die Körner sind undulös und ineinander verzahnt; Überindividuen sind häufig.

4. *Schwacher ac-Gürtel*. Gef 19 (Fig. 20). Das Gefüge ist grobkörnig mit scharfen Korngrenzen. Im Gegensatz zu 3 ist hier der Gürtel viel weniger deutlich ausgebildet.

5. *ac-Gürtel, feinkörnige Gefüge*. Gef 25, 66 (Fig. 21, 22). Das c-Achsendiagramm ist ähnlich wie bei den Proben von 3. Die Korngrenzen sind weitgehend aufgelöst, und die Rekristallisation ist weit fortgeschritten. Die Körner löschen undulös aus.

6. *Kreuzgürtel*. Gef 10, 74 (Fig. 23—25). Dem vorigen Bild sehr verwandt, doch ist hier der ac-Gürtel deutlicher aufgespalten. Es handelt sich bei den Proben nicht um Linsen, sondern um Quarzitbänke.

7. *Mylonit-Gefüge*. Gef 59 (Fig. 26, 27). Die Kornzerkleinerung ist stark und die Regelung ausserordentlich scharf. Das Diagramm zeigt zum mindesten im Innern der Linse (Fig. 26) zwei zu a symmetrische Maxima mit angenähert orthorhombischer Symmetrie. In den Randpartien (Fig. 27) ist die Regelung weniger deutlich. An die Stelle der beiden Maxima tritt ein verwischtes a-Maximum. Im Handstück erscheint die Quarzlage milchigweiss, während bei allen andern Proben die klaren Körner überwiegen. Trotzdem sind die Kristalle im Dünnschliffbild besonders einheitlich, mit geraden Korngrenzen. Rekristallisationserscheinungen fehlen.

Diese Gruppen sind genetisch deutlich miteinander verwandt. Gürtel mit a-Maximum und b-Minimum hat auch WENK E. (1943) in Tessiner Gesteinen gefunden. Wegen des auffallend konstanten Winkels zwischen

Fig. 2—27. Optisch gemessene Quarz-c-Achsenverteilungen, dargestellt in Lambert-Projektion; eingetragen ist die Schieferung und die Lineation b. Achsenausstichpunkte auf der oberen Halbkugel.

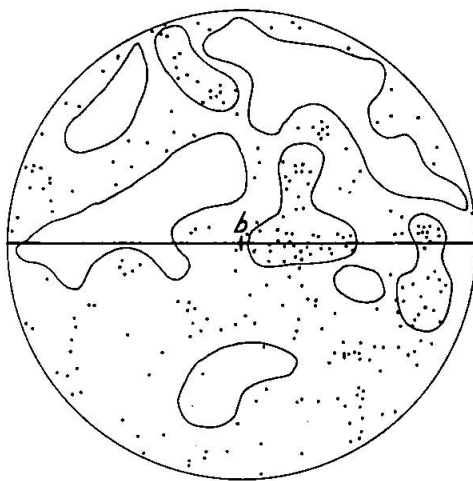


Fig. 2. Gef 47, Quarzlinse, Verampio, 250 Quarz-c-Achsen. ac-Schnitt.

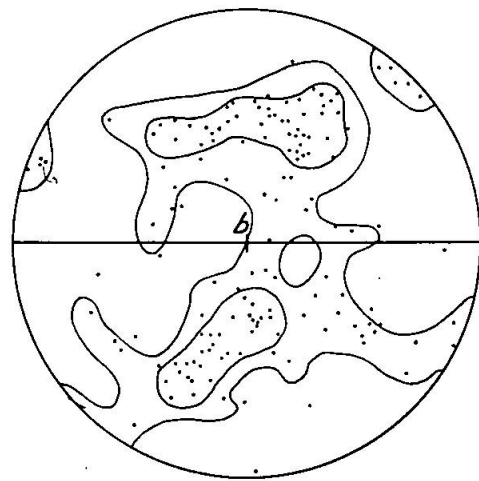


Fig. 3. Gef 48, Quarzlinse, Verampio, 300 Quarz-c-Achsen. ac-Schnitt.

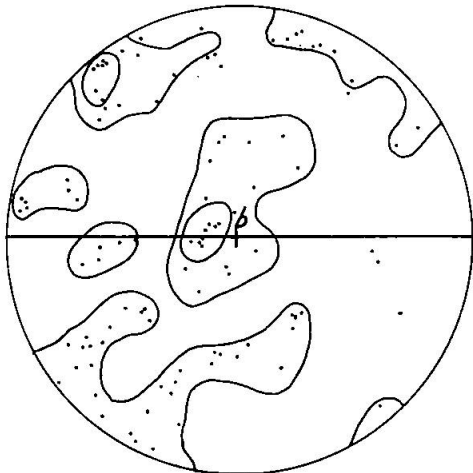


Fig. 4. Gef 49, Quarzlinse, Verampio. 100 Quarz-c-Achsen. ac-Schnitt.

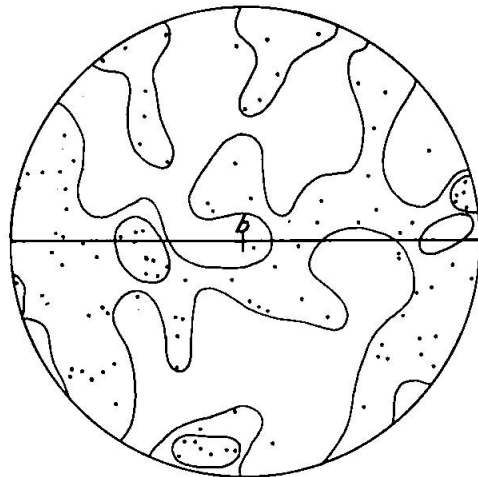


Fig. 5. Gef 55, Quarzlage, Goglio, V. Devero. 100 Quarz-c-Achsen. ac-Schnitt.

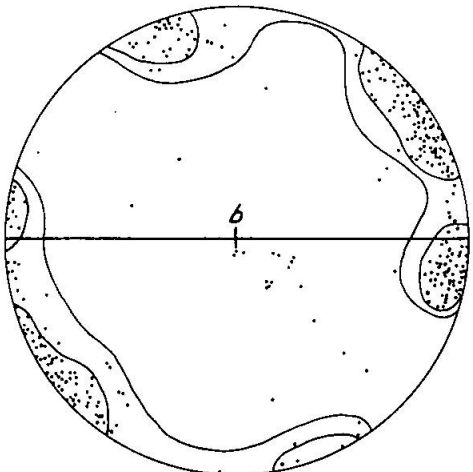


Fig. 6. Gef 15, Quarzlage, Lodrino. 556 Quarz-c-Achsen. Schiefer Schnitt, transformiert in ac-Schnitt.

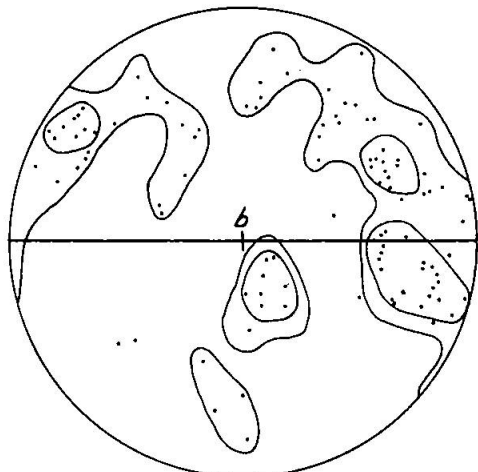


Fig. 7. Gef. 16, Quarzlage, zwischen St. Antonio und Gudo. 100 Quarz-c-Achsen. ac-Schnitt.

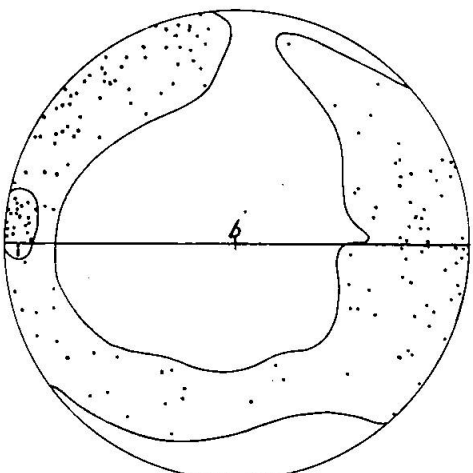


Fig. 8. Gef 21. Quarzlage, V. Redorta, Verzasca. 135 Quarz-c-Achsen. bc-Schnitt, transformiert in ac-Schnitt.

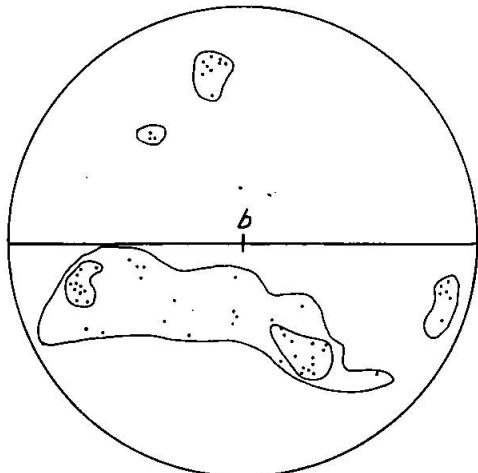


Fig. 9. Gef 43, Quarzlage, V. d'Osola, Verzasca. 100 Quarz-c-Achsen. ab-Schnitt, transformiert in ac-Schnitt.

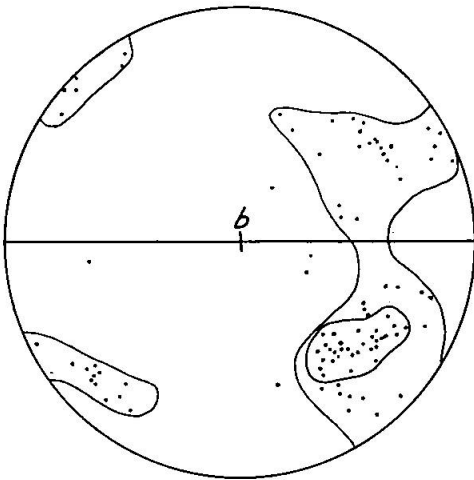


Fig. 10. Gef 45, Quarzlage, V. d'Osola, Verzasca. 110 Quarz-c-Achsen. ab-Schnitt, transformiert in ac-Schnitt.

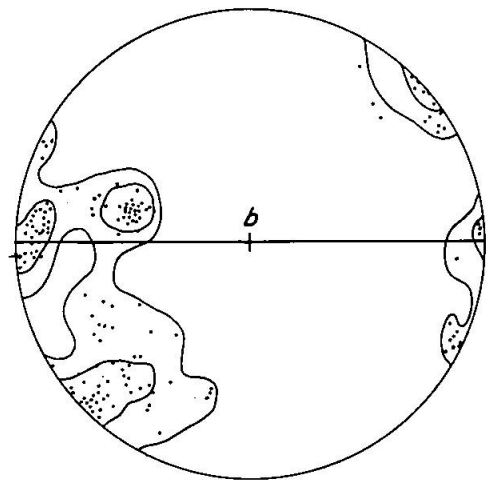


Fig. 11. Gef 53 a, Quarzlinse, Pte. Brolla, V. Maggia. 152 Quarz-c-Achsen. ac-Schnitt. Vgl. Fig. 52.

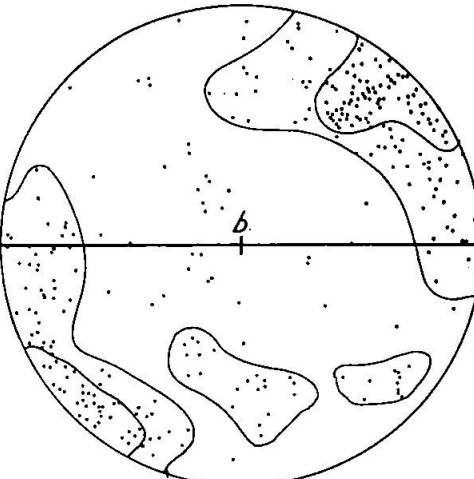


Fig. 12. Vz 504, Quarzlage, V. Redorta, Verzasca. 357 Quarz-c-Achsen. bc-Schnitt, transformiert in ac-Schnitt.

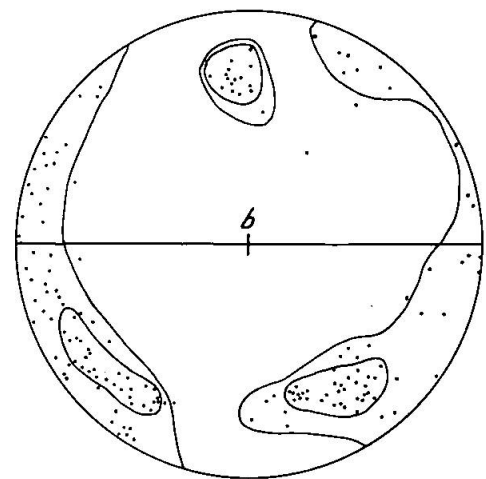


Fig. 13. Gef 17 a, Quarzknauer, Castione, 180 Quarz-c-Achsen. ab-Schnitt, transformiert in ac-Schnitt.

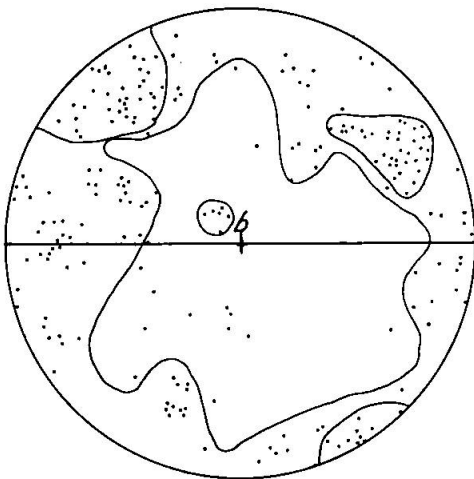


Fig. 14. Gef 17 b, Quarzknauer, Castione. 250 Quarz-c-Achsen. bc-Schnitt, transformiert in ac-Schnitt.

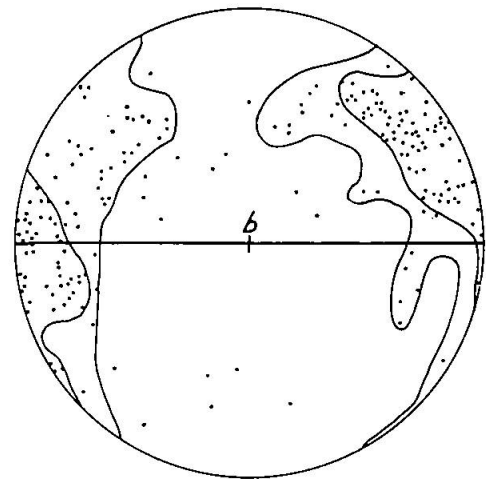


Fig. 15. Gef 50, Quarzlinse, Verampio. 200 Quarz-c-Achsen. ac-Schnitt.

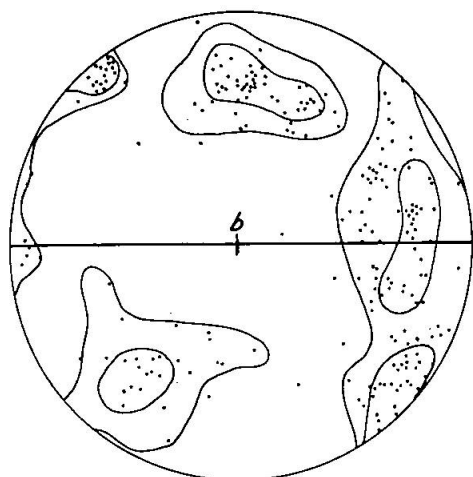


Fig. 16. Gef 56, Quarzlinse, R. Ghendola, V. Devero. 225 Quarz-c-Achsen. ac-Schnitt.

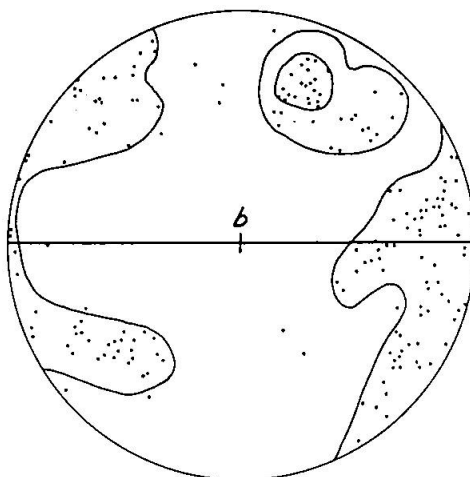


Fig. 17. Gef 57/3, Quarzlinse, R. Ghendola, V. Devero. 200 Quarz-c-Achsen. ac-Schnitt.

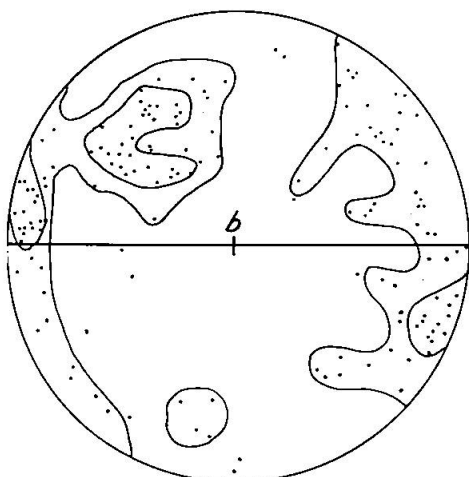


Fig. 18. Gef. 63, Campeggia, Crevola. 150 Quarz-c-Achsen. ac-Schnitt.

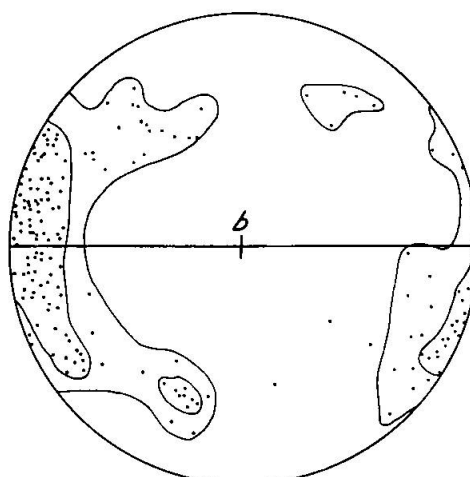


Fig. 19. Gef 64, Quarzknauer, Osso, Baceno. 200 Quarz-c-Achsen. ac-Schnitt.

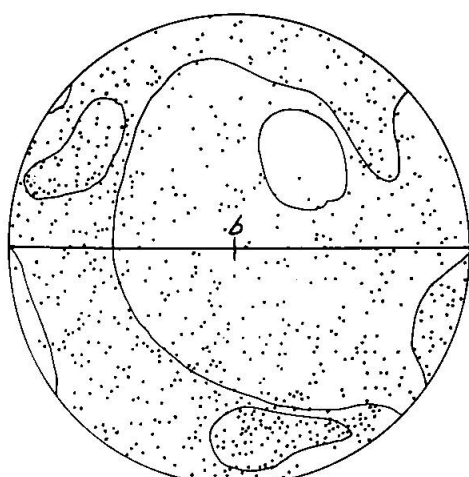


Fig. 20. Gef 19, Passo Corombe, Val Piora. 908 Quarz-c-Achsen. Schiefer Schnitt, transformiert in ac-Schnitt.

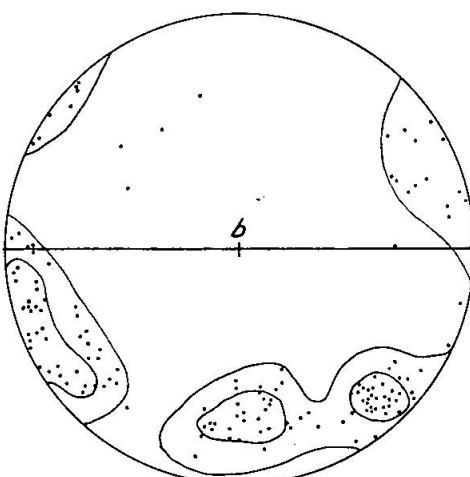


Fig. 21. Gef 25, Quarzknauer, Mergozzoni, Candoglia. 150 Quarz-c-Achsen. ac-Schnitt.

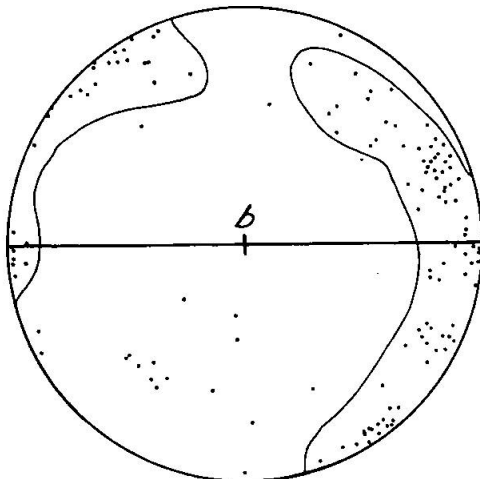


Fig. 22. Gef 66, Quarzlinse, alte Kaserne, Simplon. 200 Quarz-c-Achsen. bc-Schnitt, transformiert in ac-Schnitt.

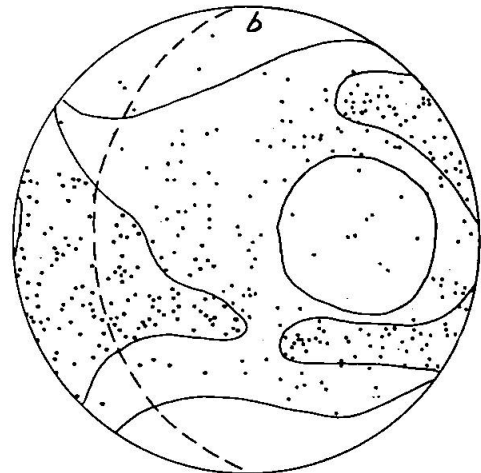


Fig. 23. Gef 10, Quarzbank, Anzonico. 400 Quarz-c-Achsen. Schiefer Schnitt.

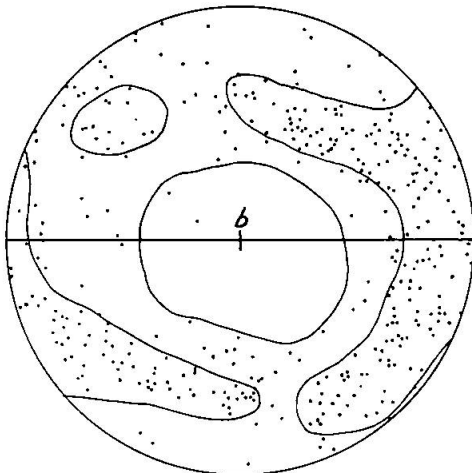


Fig. 24. Gef 10, Quarzbank, Anzonico. 400 Quarz-c-Achsen. Schiefer Schnitt, transformiert in ac-Schnitt.

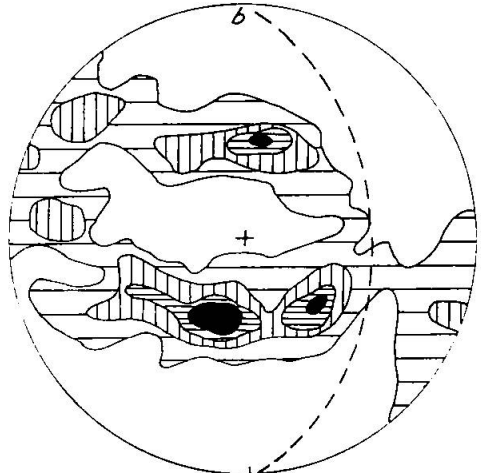


Fig. 25. Gef 74, Quarzitbank, Frodalera. 1000 Quarz-c-Achsen (Probe 76 von Dr. A. Glauser). Schiefer Schnitt.

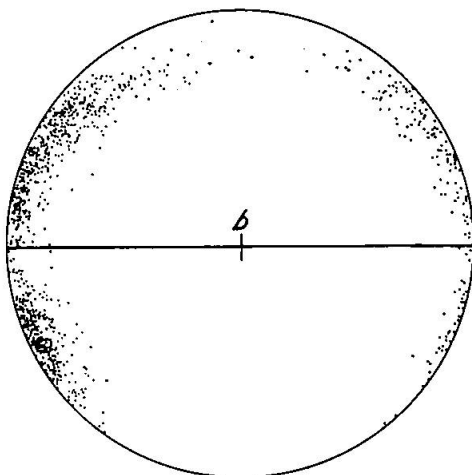


Fig. 26. Gef 59, homogene Mittelpartie der Probe, mylonitisierte Quarzlinse, R. Ghendola, V. Devero. 800 Quarz-c-Achsen. ac-Schnitt.

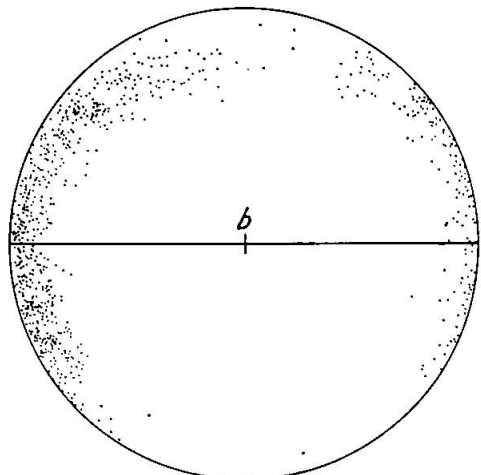


Fig. 27. Gef 59, inhomogene Randpartie der Probe, mylonitisierte Quarzlinse, R. Ghendola, V. Devero. 700 Quarz-c-Achsen. ac-Schnitt.

den Schenkeln des Kreuzgürtels wurde das Phänomen damals mit SANDERS Vorstellung (1930) als zweisecharige Scherung gedeutet. Auf die Deutung des Kreuzgürtels sei in einem späteren Abschnitt eingegangen. Im Simplongebiet fand CHATTERJEE (1962) ähnliche c-Achsenverteilungen.

Die Gruppen lassen sich auch regional charakterisieren: 2 und 3 wurden in der tiefsten Zone als Aussonderungen der Kerngneisse gesammelt. 1 und 4 stammen aus den oberen Deckenregionen, in denen die Temperatur kaum mehr erhöht war, 5 aus tektonisch beanspruchten Zonen mit lokal starker Rekristallisation. Gruppe 7 schliesslich ist einer grossen Überschiebungsfläche mit einer Ruschelzone entnommen.

5. Achsenverteilungsanalysen (AVA)

An einer Reihe von Proben wurden Achsenverteilungsanalysen vorgenommen, um Aufschluss über die räumliche Verteilung der Körner bezüglich der Orientierung zu erhalten. Die Untersuchungsmethode wurde von SANDER (1934) vorgeschlagen, von RAMSAUER (1941) eingeführt und von SANDER (1950) erweitert. In der Achsenverteilungsanalyse werden verwandte Pollagen (z. B. Maxima, Gürtel, Minima) zu Richtungsgruppen (RG) zusammengefasst und die Verteilung der zugehörigen Körner im zweidimensionalen Dünnschliff untersucht. Unter Richtungsgruppen verstehen wir in vorliegender Arbeit zusammengefasste Gruppen ähnlicher Pollagen, sie sind also rein beschreibend definiert, das heisst ohne eine genetische Bedeutung.

Die AVA ist das genaueste und vollständigste Mittel, das Korngefüge zu untersuchen. Ihr Aussagewert ist ungleich höher als derjenige einer gewöhnlichen Zeilenanalyse — leider auch der Arbeitsaufwand. Eine unbewusste Kornauslese ist hier ausgeschlossen, weil jeder Kristall eingemessen werden muss. Die Richtungslage der Kristalle kann mit ihrer Ortslage verglichen werden, man gelangt zur Klärung der Beziehung zwischen Kornform, Korngrösse und Orientierung, die Homogenität der Probe wird überprüft, Überindividuen (d. h. zusammenhängende Komplexe aus Körnern derselben Richtungsgruppe) können erkannt werden und Nachbarbeziehungen zwischen einzelnen Kristallen werden der Untersuchung zugänglich.

Diese wichtigen Erscheinungen seien an fünf verschiedenen Proben untersucht:

Gef 19a (Fig. 28—30). Knauer in Glimmerschiefer. Hüllgestein des Gotthardmassivs, Pratoserie (STEIGER, 1962). Passo Corombe, Lukmanier.

Die Quarzlinse, einer tektonisch hochgelegenen Einheit entnommen, ist gekennzeichnet durch klare, eckige, scharf begrenzte isometrische Körner. Rekristallisation als Kornneubildung ist nur in einigen Bruchbezirken zu vermuten. Die Tendenz zu Überindividuenbildung ist stark ausgeprägt. Das Poldiagramm zeigt die schwache Ausbildung eines ac-Gürtels mit verwischem Maximum in a. Es besteht keine Korngrößenabhängigkeit der c-Achsenrichtung. Die Körner der verschiedenen Gruppen sind im Schliff homogen verteilt.

Gef 15a (Fig. 31—33). Differenziat aus einem Tessiner Kerngneiss der tiefsten Zone. Steinbruch bei Lodrino, Riviera.

Im Poldiagramm fallen die drei ausserordentlich scharfen Maxima auf. Sie sind auf einem ac-Gürtel angeordnet und verschieden stark besetzt. Körner des Hauptmaximums bilden das Grundgewebe mit isometrischen, klaren Kristallen (RG A). Dieses grosse, geschlossene Überindividuum setzt sich aus zahlreichen, voneinander getrennten, kleinen bis mittelgrossen Kristallen zusammen. Körner der Richtungsgruppen B und C sind in der Schliffebene mehrheitlich isoliert. Besonders bei RG B erkennt man starke Verzahnung und Undulosität. Es scheint sich hier um eine besonders spät kristallisierte Spaltenfüllung zu handeln. RG A und C sind im Schliff homogen verteilt, RG B fehlt in verschiedenen Bereichen. Wegen der statistischen Homogenität von RG A und C innerhalb der ganzen Linse kommt eine Deutung als Korngestaltregelung auf Kluftwänden nicht in Frage.

Gef 53b (Fig. 34—36). Knauer aus Gneissen der „Wurzelzone“, Orselina-Serie (Injektionsgneiss-Zone von Pte. Brolla) (KNUP, 1958). N Pte. Brolla, V. Maggia.

Im Gegensatz zur vorigen Probe sind hier die Korngrenzen nicht mehr gerade, sondern leicht verzahnt. Grosse Überindividuen sind vorhanden. RG A hat mächtige, zum Teil wurmartig gekrümmte Körner und belegt weitaus den grössten Teil der Schlifffläche. RG B setzt sich aus vielen kleineren, homogen verteilten Kristallen zusammen. Die Glimmer sind scharf in s eingeregelt. In der Nähe der Glimmerplättchen ist der Rhythmus der Quarzregelung gestört, an ihren Rändern lassen sich Rekristallisationszentren beobachten.

Fig. 28—30. Achsenverteilungsanalyse von Quarzit, Gef 19a. Quarzlinse, Passo Corombe, V. Piora, schiefer Schnitt.



Fig. 28. 908 Quarz-c-Achsen.

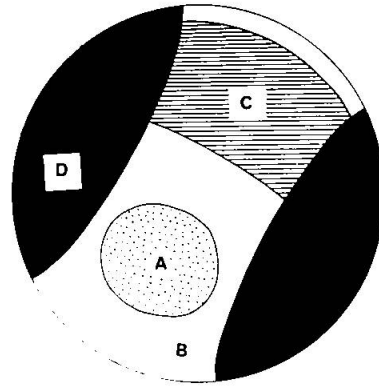


Fig. 29. Einteilung in vier Richtungsgruppen.

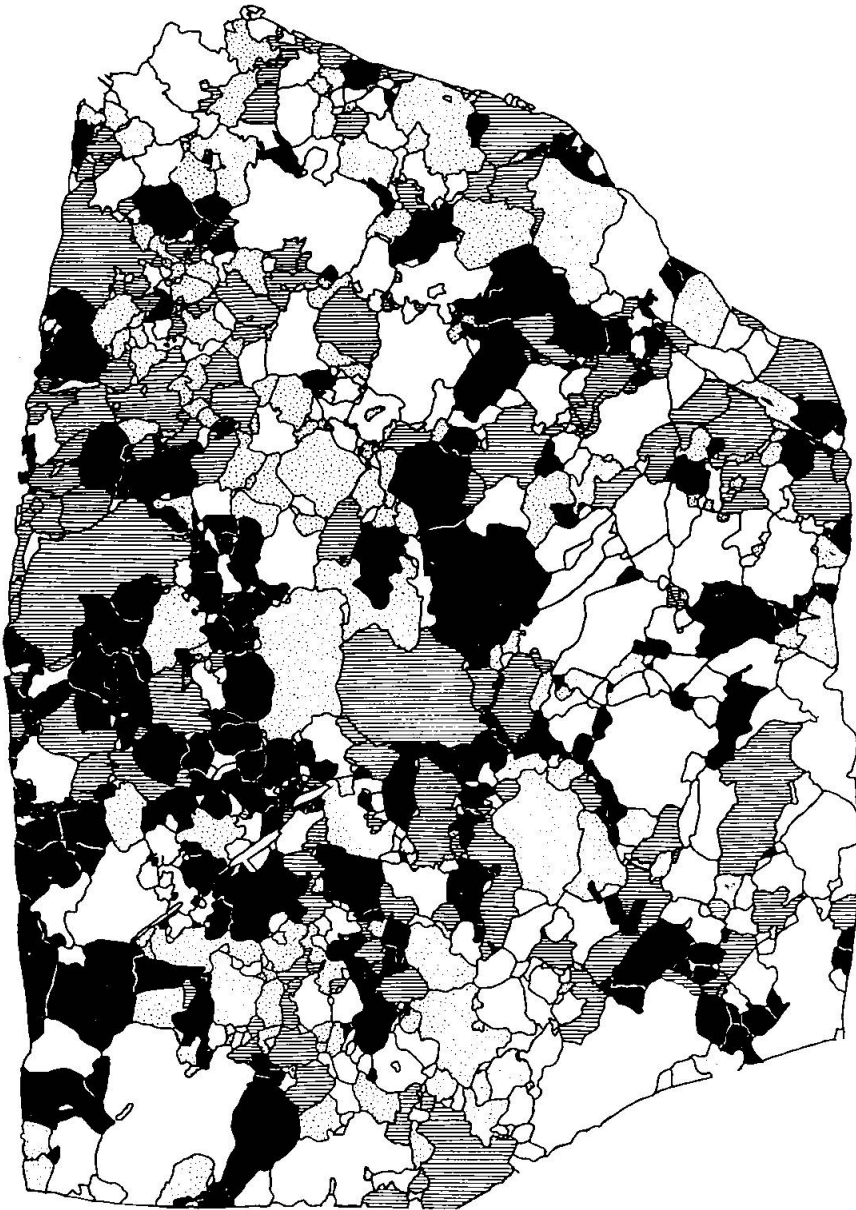


Fig. 30. AVA. (Vergr. 5× linear.)

Fig. 31—33. Achsenverteilungsanalyse von Quarzit, Gef 15a. Quarzlinse, Lodrino, Riviera. Schiefer Schnitt.

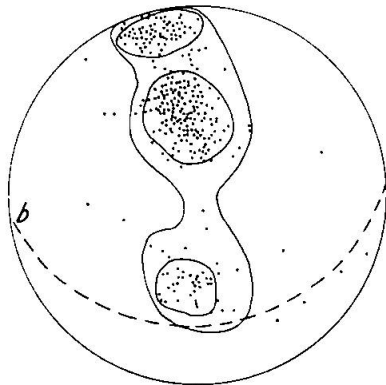


Fig. 31. 556 Quarz-c-Achsen.

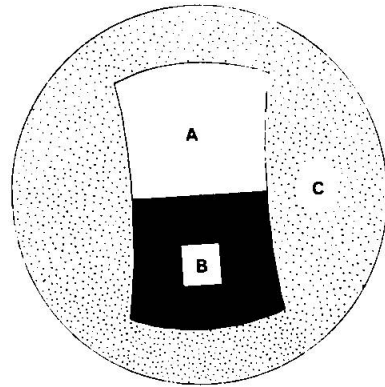


Fig. 32. Einteilung in drei Richtungsgruppen.

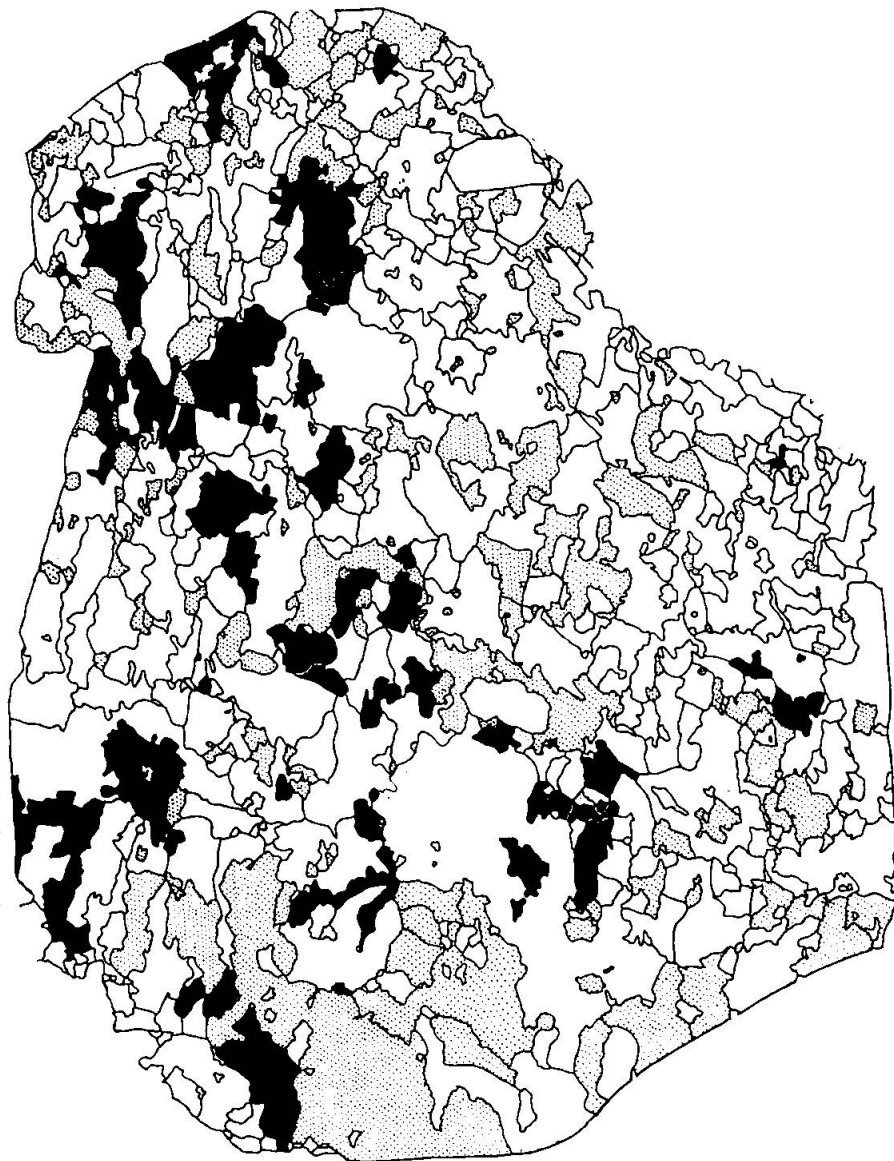


Fig. 33. AVA. (Vergr. 5× linear.)

Fig. 34—36. Achsenverteilungsanalyse von Quarzit, Gef 53b. Quarzlinse, Pte.
Brolla, V. Maggia. bc-Schnitt.

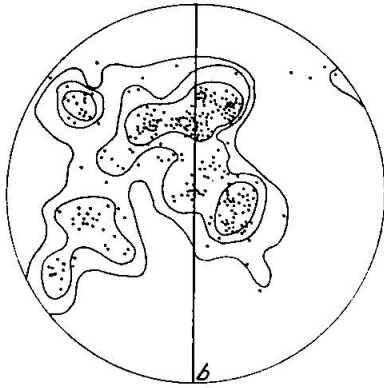


Fig. 34. 306 Quarz-c-Achsen.

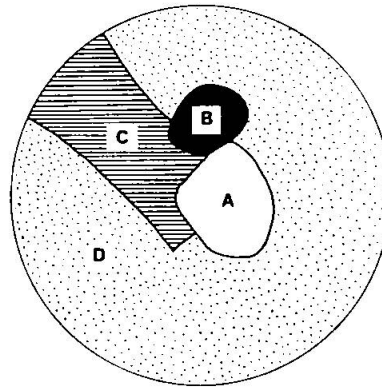


Fig. 35. Einteilung in vier Richtungsgruppen.

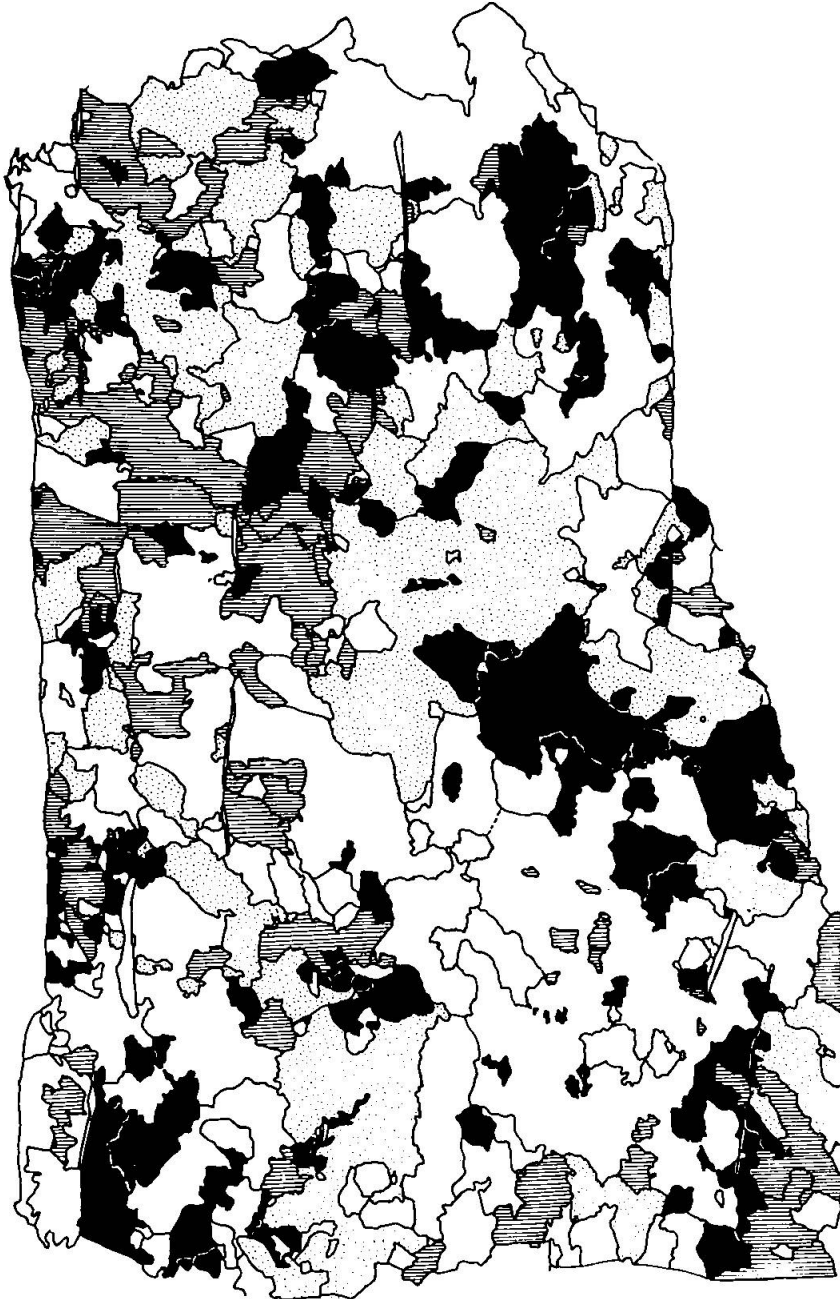


Fig. 36. AVA. (Vergr. 5× linear.)

Gef 17c (Fig. 37—39). Knauer aus glimmerreicher Partie im Triaszug von Castione.

Die Körner sind unabhängig von ihrer Orientierung in *a* gelängt, stark undulös und ineinander verzahnt. Aus den Richtungsgruppen lässt sich einzig Überindividuenbildung ablesen. Das *c*-Achsendiagramm zeigt einen *ac*-Gürtel mit Maximum in *a*; der *ac*-Gürtel ist leicht in einen Kreuzgürtel mit kleinem Öffnungswinkel und ungleicher Gürtelbesetzung aufgespalten. Die Körner im *a*-Maximum sind kleiner als die übrigen und neigen zu Zersetzung durch Rekristallisation. Eine Anhäufung von Körnern gleicher Richtungsgruppen in bestimmten Geraden ist nur durch die Kornlängung bedingt. Möglicherweise spielt lagen-gleiche Orientierung eine Rolle, was jedoch an der kleinen Probe nicht entschieden werden kann. Flächenmässig überwiegt RG B wegen einigen sehr grossen Körnern.

Gef 59a (Fig. 40—42). 2 cm dicke Quarzlage bis -linse vom Überschiebungskontakt der Antigoriodecke auf die Baceno-Schiefer-Serie. Der Baceno-Schiefer ist mylonitisiert und chloritisiert. Riale Ghendola, gegen Cistella.

Die Kornzerkleinerung ist besonders stark, doch fehlen Rekristallisationserscheinungen. Sehr schwach lassen sich in RG B Überindividuen eines alten Gefüges erkennen. Die Körner sind deutlich in der Richtung der *c*-Achse gelängt, jedoch nicht gruppenweise auf Geraden angehäuft. Das Poldiagramm zeigt einen scharfen *ac*-Gürtel mit zwei deutlichen, symmetrisch zu *a* liegenden, gleich stark besetzten Maxima. Die Körner der beiden Gruppen sind morphologisch deutlich verschieden trotz der Übereinstimmung in der *c*-Achsen-Verteilung. Die Maxima sind in den Randpartien der Linse verwaschen (vgl. Fig. 26, 27). Glimmerpakete haben offenbar auch hier eine Änderung des Bewegungsbildes gegenüber einer homogenen Umgebung zur Folge. An zahlreichen Stellen (in Fig. 42 mit Pfeilen markiert) kann die Zergleitung eines Korns in verdrehte Bruchstücke verschiedener Gruppenzugehörigkeit beobachtet werden.

Diskussion der Methodik

SANDER (1951) misst in seiner Interpretation der AVA den Ebenen richtungsgruppengleicher Kornbesetzung besondere Bedeutung zu (op. cit., S. 165 ff.) und deutet sie als Scherflächen. TURNER und WEISS (1963, S. 253) sind dieser Deutung gegenüber skeptisch. Es fehlt bislang an Beispielen, welche die Existenz derartiger Ebenen in Quarzgefügen stati-

Fig. 37—39. Achsenverteilungsanalyse von Quarzit, Gef 17c. Quarzlinse, Steinbruch Castione. ac-Schnitt.

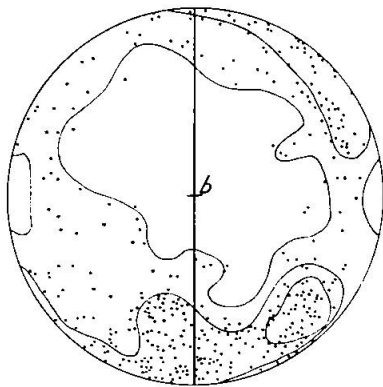


Fig. 37. 384 Quarz-c-Achsen.

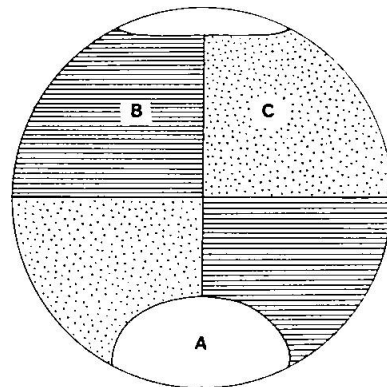


Fig. 38. Einteilung in drei Richtungsgruppen.

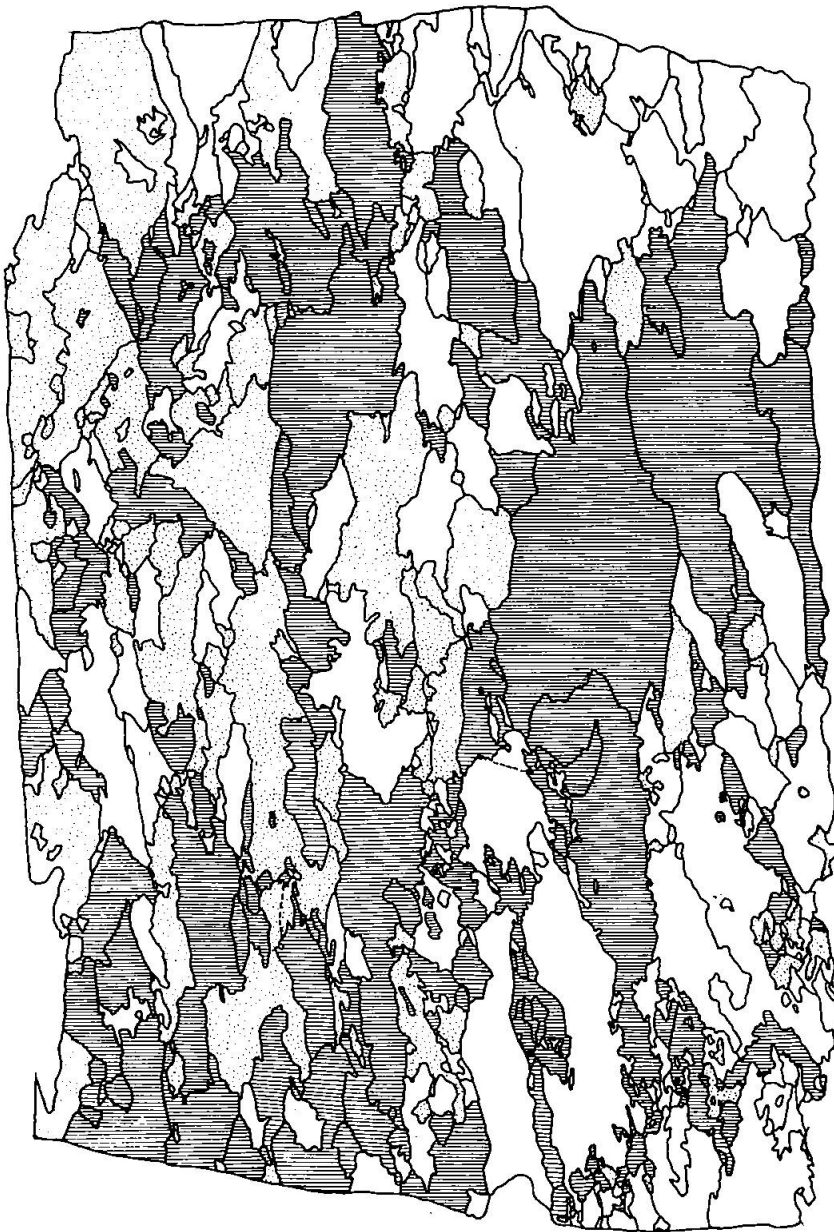


Fig. 39. AVA. (Vergr. 5× linear.)

Fig. 40—42. Achsenverteilungsanalyse von Quarzit, Gef 59. Quarzlinse in Baceno-
schiefer, R. Ghendola. ac-Schnitt.

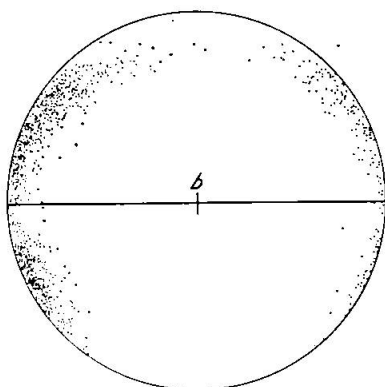


Fig. 40. 800 Quarz-c-Achsen der homogenen
Mittelpartie der Probe (vgl. Fig. 26 und 27).

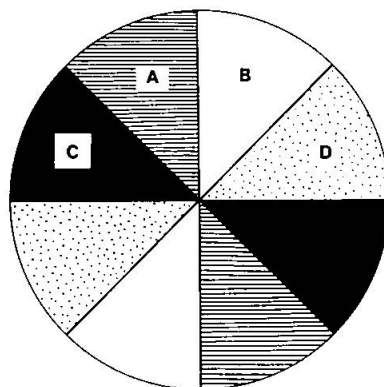


Fig. 41. Einteilung in vier Richtungsgruppen.

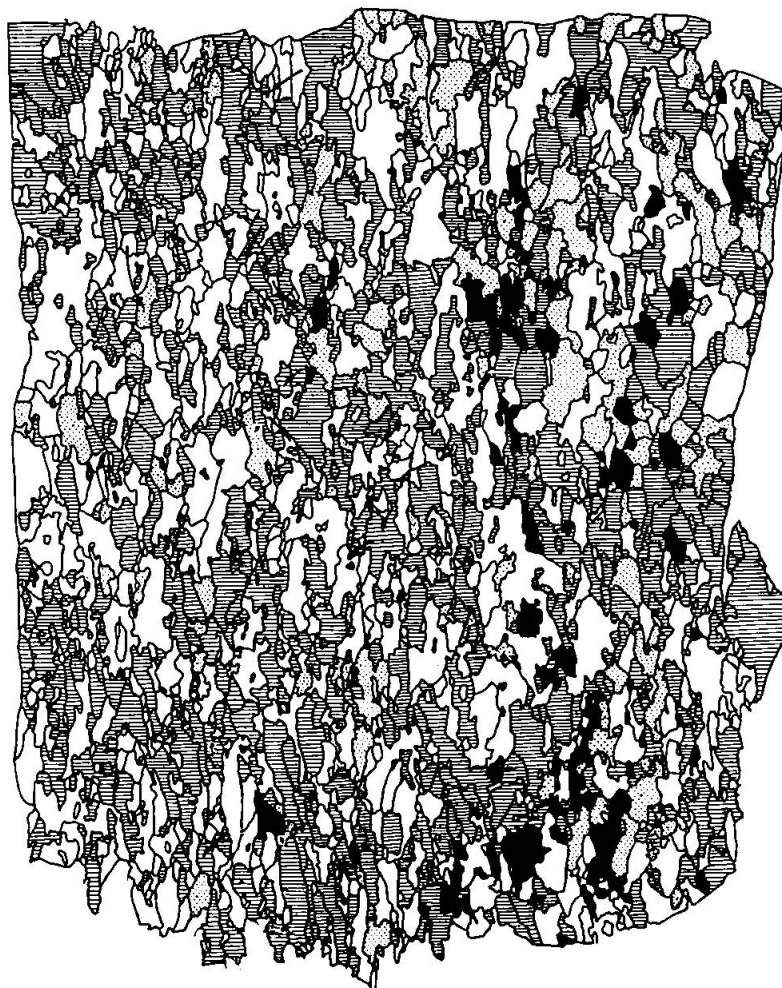


Fig. 42. AVA. (Vergr. 5 × linear.)

stisch eindeutig rechtfertigen würden. Richtungsgruppen im Sinne von SANDER, als Richtungen dichtester Gruppenbesetzung, fanden sich in keiner der hier untersuchten Proben. Es wurden zwar in einer kürzlich veröffentlichten Publikation über einen Tessiner Quarzit (TROMMSDORFF und WENK E., 1963) das Vorhandensein derartiger Flächensysteme postuliert. Besonders in grobkörnigem Gestein mit Tendenz zu Überindividuenbildung (vgl. auch KOARK, 1956) ist eine derartige Folgerung unsicher und schwer zu beweisen, statistisch begründet wäre sie erst in Bereichen, wo die *Korn- oder Überindividuenlänge gegenüber der Untersuchungsfläche klein* ist. Ausgezeichnete Geraden lassen sich sonst in allen Richtungen erkennen, wenn der Wille zum Finden vorhanden ist. Den Forderungen der Statistik genügt bei dieser Betrachtung von unseren Proben einzig Gef 59, und hier sind keine überbesetzten Richtungen zu beobachten.

Die Achsenverteilungsanalyse ist sicher ein wertvolles Instrument in der Gefügekunst. Verglichen mit einem c-Achsendiagramm ist aber der Aufwand so extrem, dass ihre Anwendung nur zur Abklärung prinzipieller Fragen der Gefügeregelung sinnvoll ist, sie ist ungeeignet für dynamische Aussagen, die die Geologie von der Gefügekunde erwartet. Eine Dünnschliffuntersuchung mit Gipsplättchen lässt Überindividuen und Richtungsgruppen meist ebenso erkennen.

6. Nachbarbeziehungen der Kristalle

Es sei nun das in der Gefügekunde wichtige Problem der Nachbarbeziehungen zwischen einzelnen Kristallen betrachtet, insbesondere die Frage, ob in Quarzgefügen die Zwillingsbildung bei der Deformation oder der Kristallisation eine Rolle spielt. Kleinkreisdiagramme legen diese Vermutung nahe: Daraus haben zuerst HO (1946), später TROMMSDORFF und WENK E. (1963) auf die Existenz von Zwillingsgefügen geschlossen. (Unter Zwillingsgefüge verstehen wir ein Gefüge, in dem Zwillingsbildung bei der Kristallisation oder Deformation eine wichtige Funktion ausübte⁷⁾.)

Dank dem freundlichen Entgegenkommen letztgenannter Autoren,

⁷⁾ „Zwillingsgefüge“ wurde von TROMMSDORFF und WENK (1963) vorsichtig als geometrische Möglichkeit, nicht als tatsächliches Vorhandensein von Zwillingen aufgefasst (vgl. SANDER, 1950, S. 142). Ob die Bezeichnung „Zwillingsgefüge“ bei dieser Definition gerechtfertigt ist, scheint fraglich.

die bereitwillig ihr Originalmaterial zur Verfügung stellten, konnte unter anderem die gleiche Probe untersucht werden, die TROMMSDORFF und WENK vorgelegen hat, ebenfalls eine grobkörnige Quarzlage aus Tessiner Gneissen (Vz 209 ac₁, V. Redorta, V. Verzasca). c-Achsen-Nachbarwinkel wurden bereits von TROMMSDORFF und WENK gemessen: Es fanden sich bei einer Auslese von scharfkantigen Nachbarkörnern auffallend oft Winkel von ca. 76°, woraus auf Verzwillingung mit (10 $\bar{1}$ 1) als Verwachsungsebene geschlossen wurde. In vorliegender Arbeit wird die Statistik dadurch erweitert, dass durch Verwendung elektronischer Rechenanlagen sämtliche 5000—10 000 Nachbarwinkel in einer mittel- bis grobkörnigen Probe erfasst werden. Gibt man dem Computer die Positionen aller Kristalle ein und zu jedem die Nummern seiner Nachbarkörner, welche man der AVA entnimmt, so werden daraus die Nachbarwinkel berechnet. Der Winkel zwischen den c-Achsen zweier benachbarter Kristalle wird von 0—180° gemessen, so dass die Schieferungsebene *s* (die hypothetische Gleitebene) zwischen den Körnern liegt. Die Nachbarwinkel werden statistisch ausgewertet und am Ende der Rechnung wird ein Diagramm ausgegeben, in dem die Häufigkeit eines jeden Nachbarwinkels (das heisst die Anzahl der Fälle in der Nachbarwinkel innerhalb eines Intervalls von 2° oder 10° im Gefüge auftreten) als Funktion des Winkels dargestellt ist. Eine ausführliche Beschreibung des verwendeten FORTRAN-2-Programms findet sich in WENK H.-R. und TROMMSDORFF (1965). Drei Proben, Vz 209 ac₁ (Redorta), Gef 15a (Lodrino) und Gef 19a (Corombe) wurden auf diese Weise untersucht. Fig. 43—45 zeigen das Ergebnis. Da Messfehler bis zu 2°, in undulösem Gestein bis 5°, nicht zu vermeiden sind, haben Schwankungen in dieser Grössenordnung keine Signifikanz, sie wurden in den Figuren ausgemittelt. Ein scharfes Maximum bei 76½°, dem c-Achsenwinkel bei einer Verzwillingung in (10 $\bar{1}$ 1), fehlt in allen drei Proben; man beobachtet vielmehr ein langsames Ansteigen und Abfallen in Form einer flachen Glockenkurve um einige bevorzugte Winkel, das heisst ein statistisches Gleichgewicht. Gemeinsam in allen Proben ist das Minimum zwischen 0° und 50°, dann ein stetiges Ansteigen mit einem Maximum zwischen 110° und 150°. Bei Detailbetrachtungen zeigen die drei Kurven starke Unterschiede. Da eine signifikante Häufung bei 76° also nicht vorhanden ist, kann Verzwillingung nicht der Grund für die Regelung sein. Bei Zwillingen müsste das Maximum bei 76 ± 2° liegen, wobei ± 2° der Fehler durch die Messungenauigkeit ist.

Die Nachbarstatistik zeigt, dass zwischen den einzelnen Kristallen in den vorliegenden Quarzgefügen wenigstens *statistisch keine unmittelbare*

Beziehung besteht: Die Existenz eines Zwillingsgefüges, die TROMMSDORFF und WENK E. (1963) aus der kleinen Anzahl von subjektiv ausgewählten Nachbarwinkel-Messwerten abgeleitet haben, wird von der vollständigen Statistik widerlegt. *Verzwilligung ist wohl vereinzelt möglich;* sie kann mit dieser Methode weder festgestellt noch ausgeschlossen werden. Ihr kommt jedoch keine kinematische Bedeutung zu, da sie zahlenmässig eine untergeordnete Erscheinung wäre.

Fig. 43. Nachbarwinkelstatistik Gef 15, Lodrino. 500 Körner.

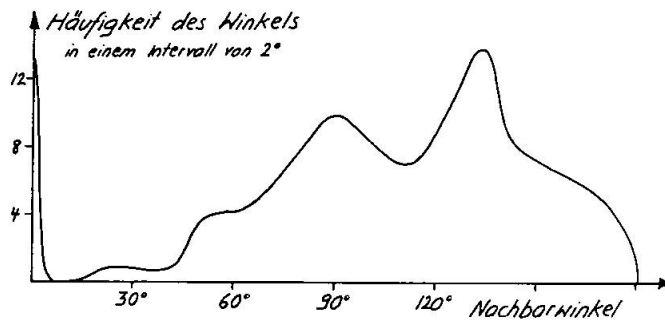


Fig. 44. Nachbarwinkelstatistik Vz. 209ac₁, Redorta. 600 Körner.

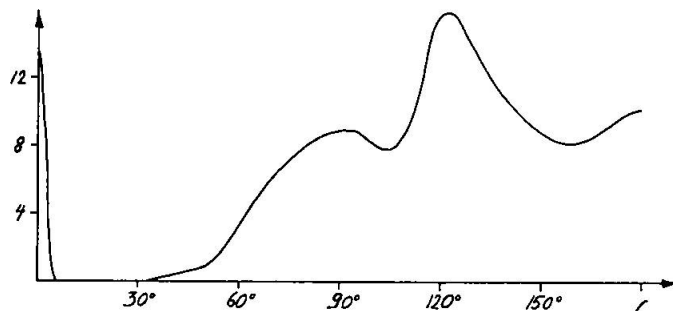
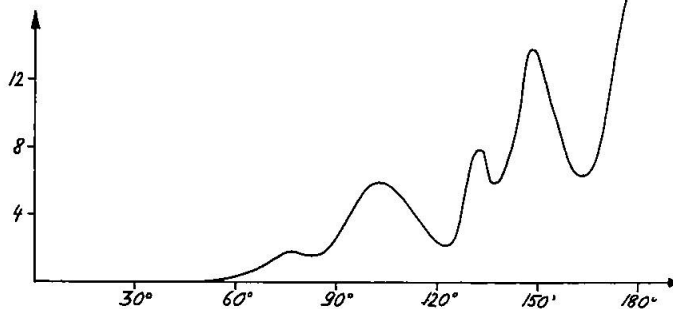


Fig. 45. Nachbarwinkelstatistik Gef 19, Corombe. 500 Körner.



Zur Nachbarstatistik von TROMMSDORFF und WENK muss noch bemerkt werden, dass die Häufung bei 76° keineswegs erstaunlich ist, da bei der Auslese Körner zweier Richtungsgruppen gewählt wurden, deren Hauptmaxima ca. 75° auseinanderliegen (op. cit., S. 694).

Gleichzeitig mit der Zwillingsstatistik wurde für jedes Korn der mittlere Nachbarwinkel berechnet. Darunter sei der Quotient: (Summe der Nachbarwinkel eines Korns) / (Anzahl Nachbarkörner) verstanden.

Die Grösse wird eingeführt als Mass für das Gleichgewicht bei Kornzusammenhang. Die Grenzflächenspannung, welche die thermodynamischen Potentiale zwischen anisotropen Kristallen im spannungsfreien System verursacht, ist zwar ausser vom Nachbarwinkel von der Grösse der gemeinsamen Fläche abhängig. Dies wurde der Einfachheit halber vernachlässigt.

Fig. 46—48. Verteilung des mittleren c-Achsen-Nachbarwinkels in Quarziten.

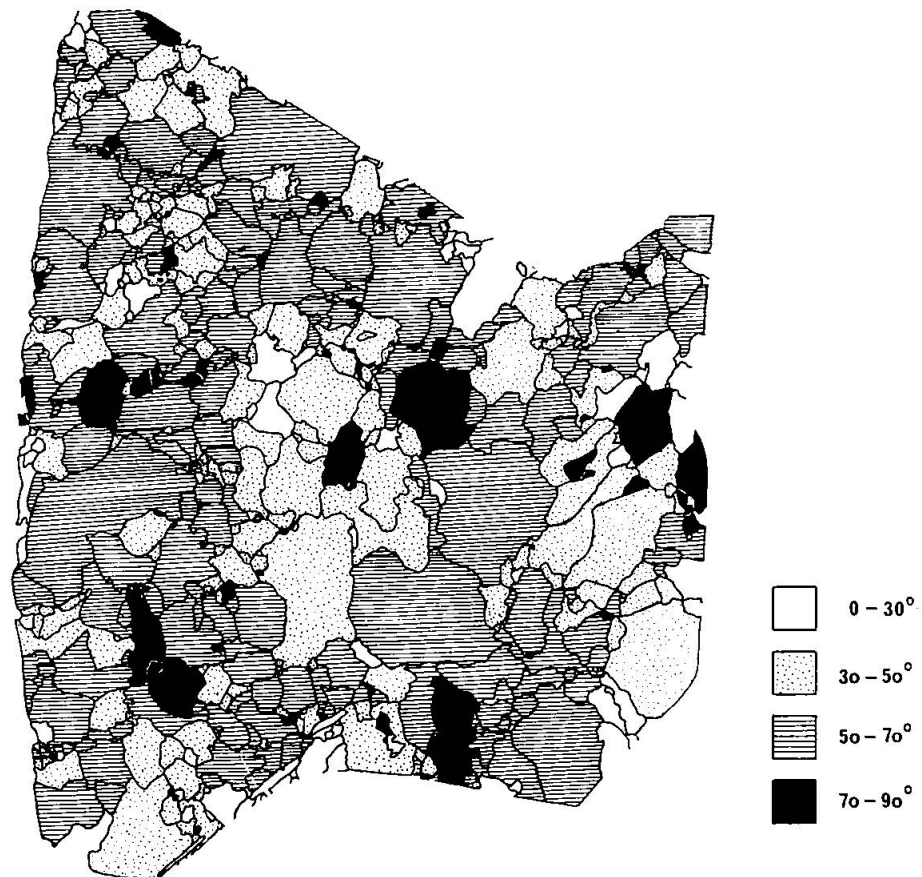


Fig. 46. Gef 19a, Passo Corombe.



Fig. 47. Vz 209ac₁, V. Redorta.

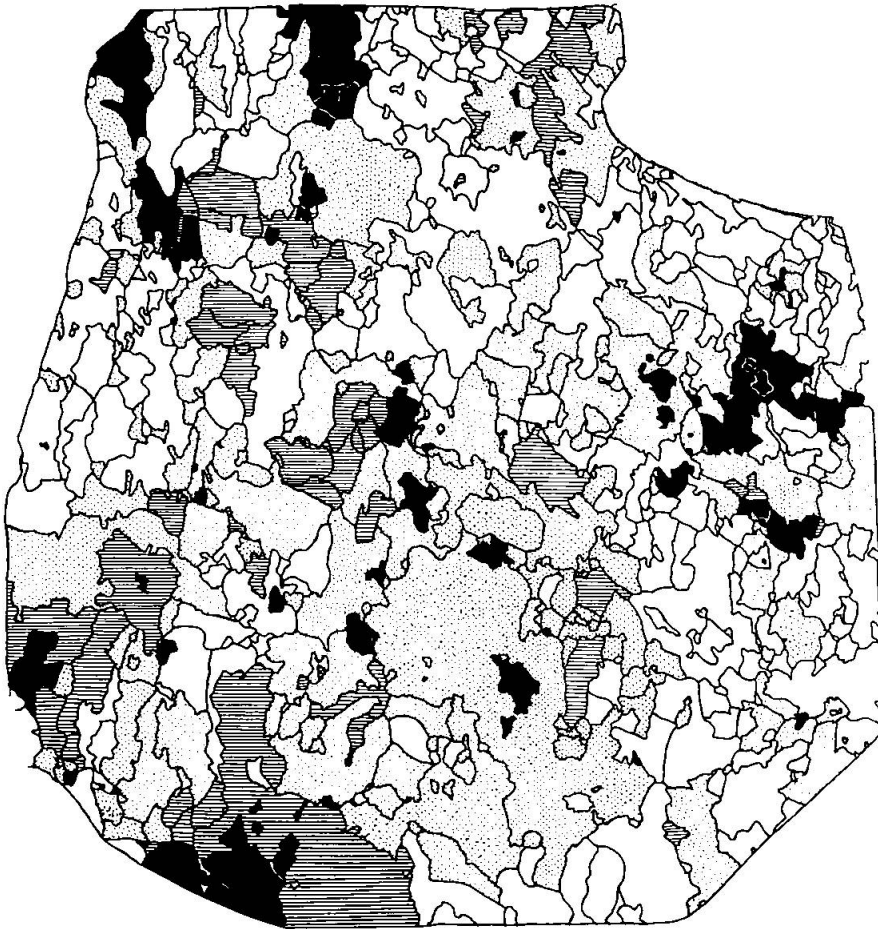


Fig. 48. Gef 15a, Lodrino.

Fig. 46—48 zeigen die Nachbarwinkelverteilungen im Schliff. Ein Gleichgewicht (überall gleicher Nachbarwinkel) liegt keinesfalls vor. Gef 15 (Fig. 48) zeigt von allen drei Proben weitaus das homogenste Bild. Der grösste Teil der Körner hat einen mittleren Nachbarwinkel zwischen 20° und $40\text{--}50^\circ$. Nur wenige Kristalle (hauptsächlich der RG III) haben grössere Winkel. RG I und RG II gehören wegen der gleichen Nachbarwinkel wohl zur gleichen Kristallisationsphase. In Gef 19 (Fig. 46) und Vz 209 (Fig. 47) sind die Nachbarwinkel deutlich grösser, fast durchwegs über 50° ; die Nachbarwinkel der kleinen Kristalle streuen stark. Wie bei der Pollagen-Verteilung (AVA) ist auch in der Nachbarwinkelverteilung eine deutliche Tendenz zu Überindividuenbildung sichtbar: Einzelne abgeschlossene Bezirke zeigen trotz hohem mittlerem Nachbarwinkel homogene Verhältnisse. In Vz 209 ist die Verteilung inhomogen: in der einen Hälfte überwiegen Winkel von $60\text{--}80^\circ$, in der andern solche von $30\text{--}60^\circ$. Die Inhomogenität der Nachbarwinkelverteilung braucht sich nicht in der c-Achsenverteilung bei der AVA be-

merkbar zu machen, sie zeigt aber, dass Nachbarwinkel für den Regelungsmechanismus in Vz 209 bedeutungslos sind. *Das bei der Orientierung wirksame geometrische Element weist allgemein von allen Elementen die grösste Homogenität innerhalb der Probe auf*, denn seine Regelung ist primär, während diejenige der andern Elemente nur indirekt und mittelbar ist.

7. Röntgen-Texturanalyse

An einem Teil der Proben wurde eine Röntgentexturuntersuchung durchgeführt, um das Kristallgitter im Gefüge eindeutig zu fixieren. Optisch ist bei Quarz nur die c -Achse zugänglich.

Nach der vom Autor entwickelten Methode (WENK H.-R., 1965) wurden jeweils drei senkrecht aufeinander stehende Schriffe aufgenommen und zusammengestellt. Man untersuchte die Prismenflächen $(11\bar{2}0)$, $(20\bar{2}0)$ und das Grundrhomboeder $(10\bar{1}1)$. Der Basisreflex ist bei Quarz zu schwach und kam daher für Gefügeaufnahmen nicht in Frage.

Um die Regelungsbilder mehrzähliger Flächen besser beurteilen zu können, wurde ein FORTRAN-2-Programm ausgearbeitet (siehe WENK und TROMMSDORFF, 1965), das die Verteilung einer mehrzähligen Fläche für verschiedene Kristallsysteme berechnet, wenn die c -Achsenrichtungen eingegeben werden, wobei entweder hypothetisch Einregelung der mehrzähligen Fläche senkrecht zu einer Richtung s (z. B. die Schieferung) gefordert oder aber Lagefreiheit um die c -Achse angenommen werden kann.

Zwei Haupttypen konnten unterschieden werden: Beim einen sind die $(10\bar{1}1)$ -Diagramme gekennzeichnet durch zahlreiche diskrete, asymmetrische Maxima (Fig. 49, 50), bei den anderen durch mehr oder weniger symmetrisch verteilte Minima (Fig. 51).

In Fig. 52—72 sind für fünf Proben vier verschiedene Diagramme dargestellt: das erste Diagramm einer jeden Gruppe zeigt die c -Achsenverteilung, die am U-Tisch gemessen wurde, das zweite die Verteilung der Rhomboederfläche $(10\bar{1}1)$ unter der Annahme, dass diese oder eine andere Fläche der Zone $[\bar{1}2\bar{1}0]$ in die Schieferungsebene s eingeregelt ist. Das nächste gibt die Verteilung bei Lagefreiheit. Bei Gef 53 wurde das Diagramm mit zwei verschiedenen Variationsfaktoren gerechnet. Die statistische Verteilung ist sehr ähnlich (Fig. 54 und 55). Die Übereinstimmung zeigt, dass die Lagefreiheitsdiagramme, wenn sie auch nur eine Möglichkeit wiedergeben, doch statistisch richtig sind. Im letzten

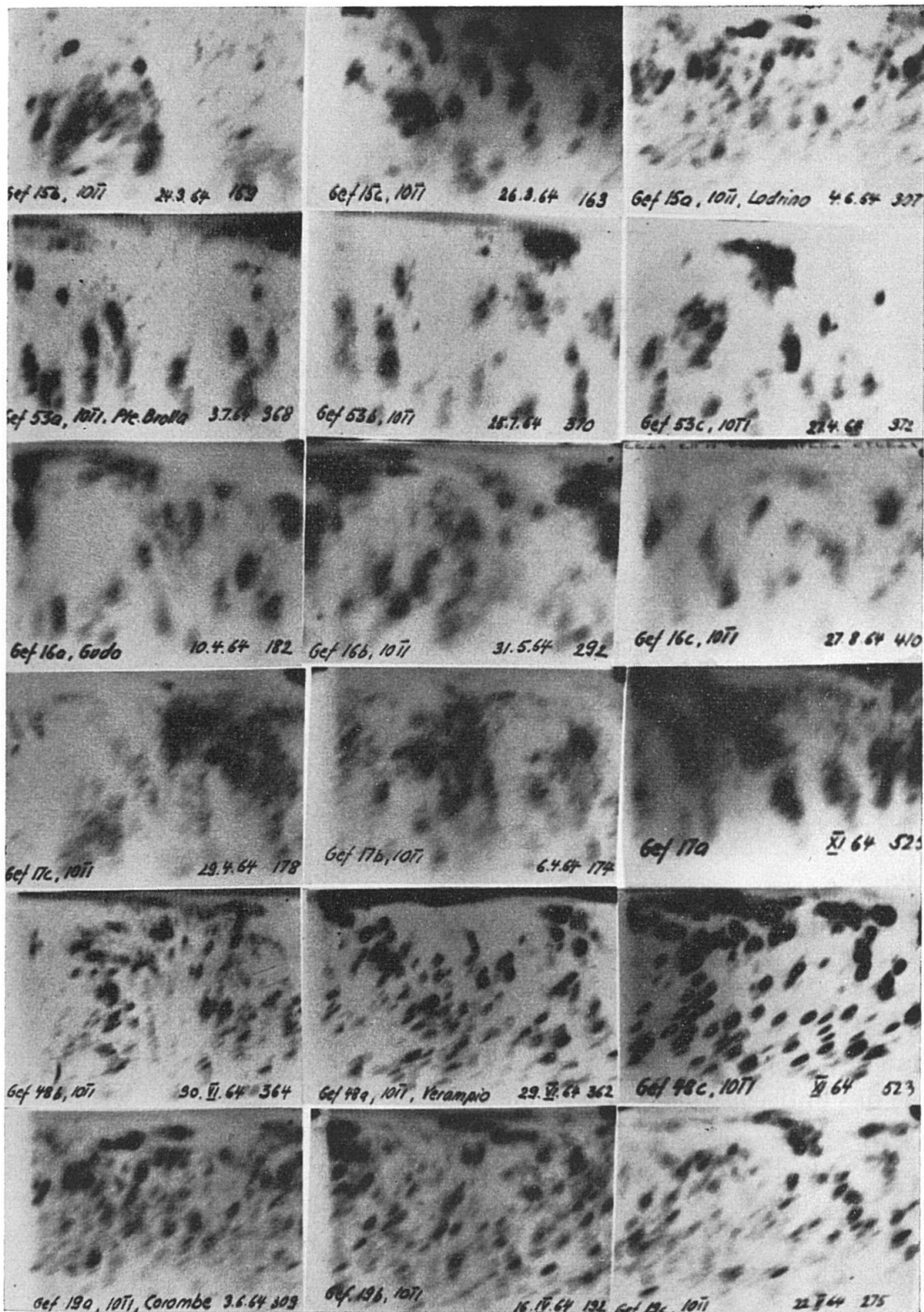


Fig. 49. Röntgendiagramme von Überindividuengefügen. Verteilung der Netzebene (10 $\bar{1}$). Charakteristisch sind die zahlreichen starken Einzelmaxima und die niedrige Symmetrie. Von jeder Probe wurden drei senkrecht zueinander stehende Schnitte aufgenommen. Die erste Kolonne enthält Diagramme von ac-, die zweite von bc- und die dritte von ab-Schnitten (nähere Erläuterungen siehe Text).

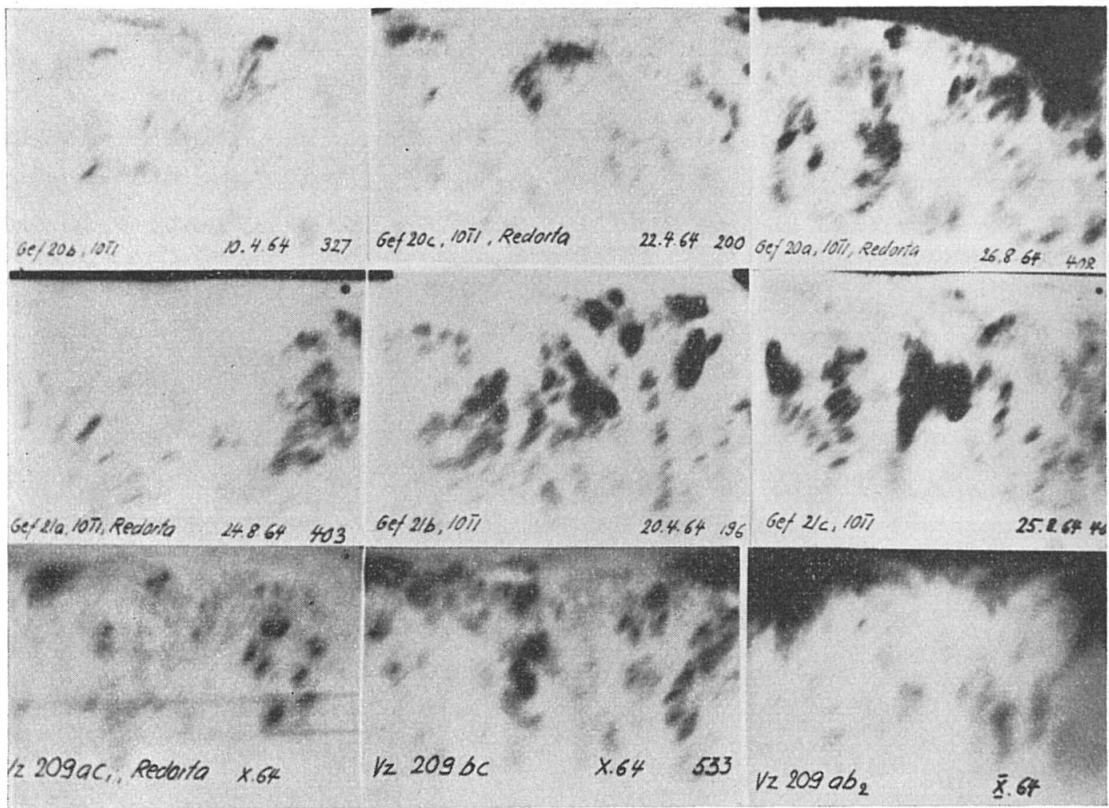


Fig. 50. Röntgendiagramme von Überindividuengefügen. Verteilung der Netzebene ($10\bar{1}1$). Die Proben stammen von der Lokalität Cascata Froda, V. Redorta. Typisch sind die starken Maxima in den ab -Schnitten; sie deuten auf Einregelung von ($10\bar{1}1$) in s (s -Tektonit?). Anordnung der Aufnahmen wie in Fig. 49.

Diagramm schliesslich ist die dem Röntgendiagramm entnommene ($10\bar{1}1$)-Verteilung angegeben.

Besonders bei Gef 17 (Fig. 57—60) und bei Gef 53 (Fig. 52—56), ebenso bei sämtlichen Proben von Fig. 49 ist die Verteilung kompliziert und oft nicht mit den Gefügekoordinaten in Einklang zu bringen, in die das optische Diagramm so gut passt. Diese Gefüge sind offensichtlich stark geregelt, es sind deutliche Schwärzungsmaxima vorhanden, deren Lage jedoch sehr schlecht mit der Symmetrie der c -Achsenverteilung übereinstimmt. Selbst das Koordinieren der Diagramme der verschiedenen Schnitte bereitete Schwierigkeiten. *Die Symmetrie weist auf Drehfreiheit um die c -Achse.* Die zahlreichen Einzelmaxima, die keiner Symmetrie zugeordnet werden können, liegen willkürlich und lassen sich als Ausdruck der Überindividuen deuten, die, gesondert zusammengestellt, keine Drehfreiheit, sondern mehr oder weniger gute Fixierung sämtlicher kristallographischer Achsen zeigen. In der Überindividuenverteilung

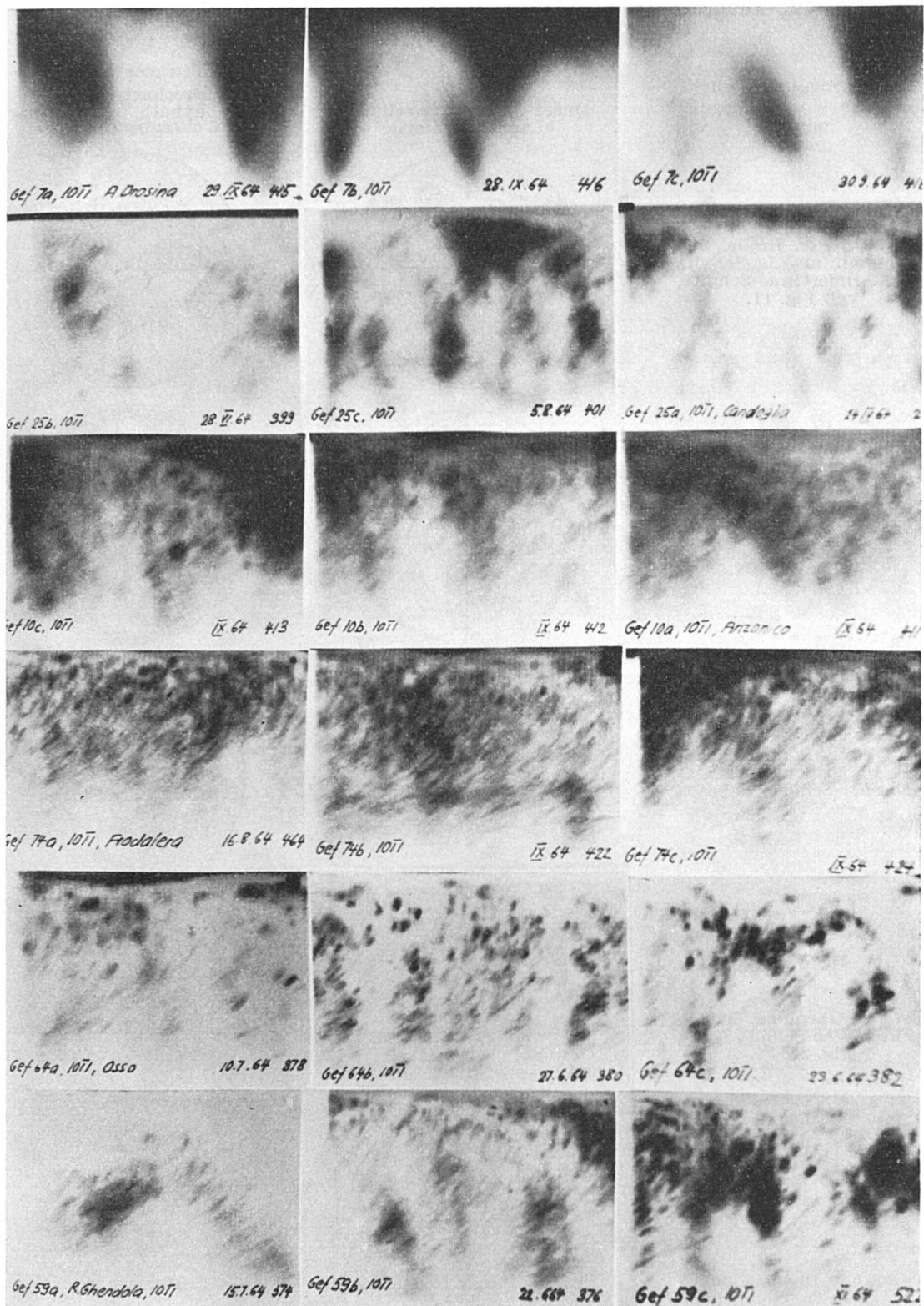
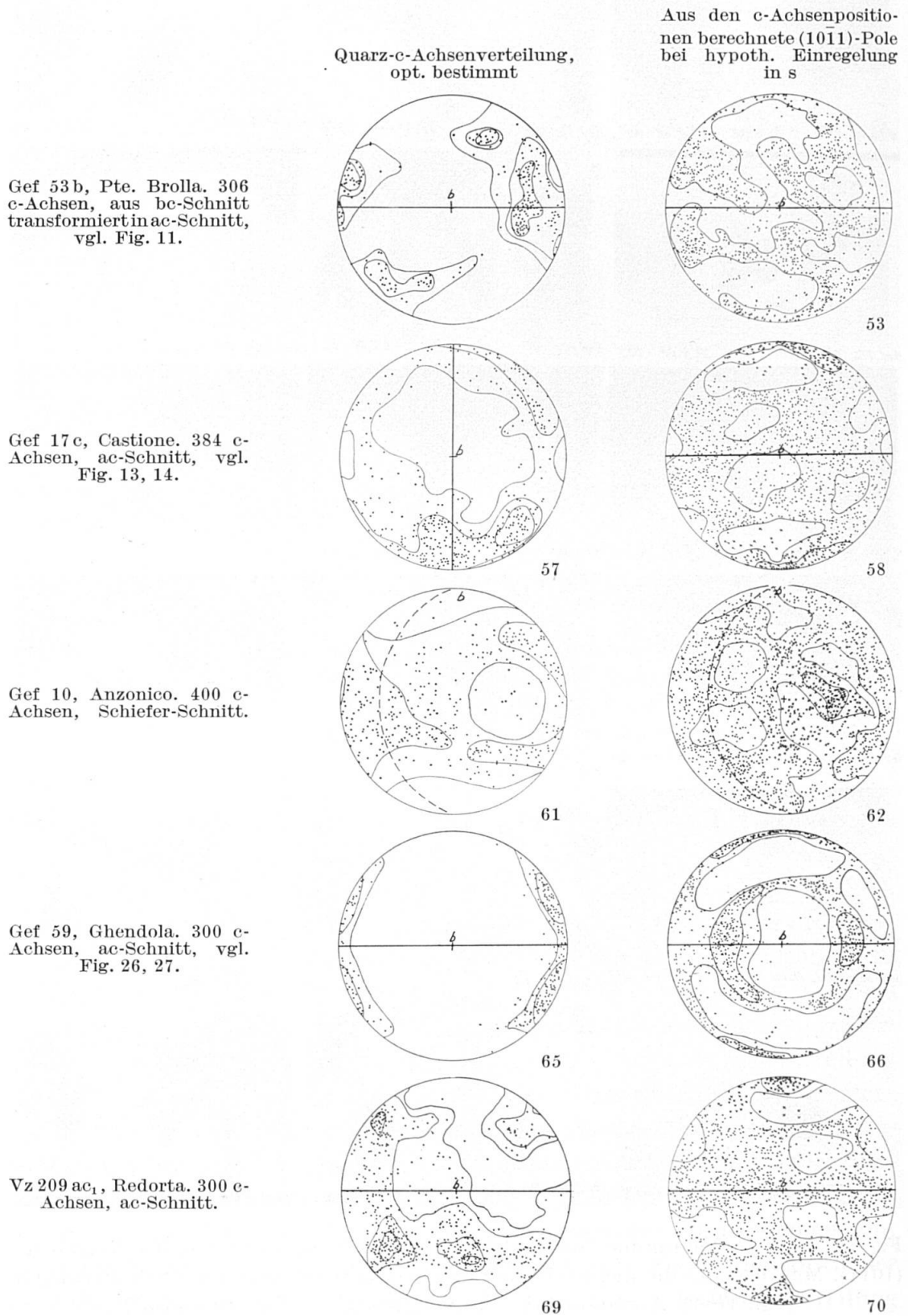
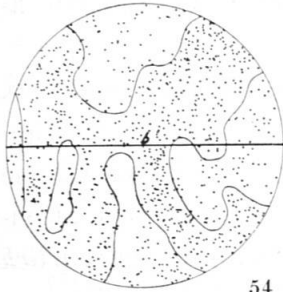


Fig. 51. Röntgendiagramme von feinkörnigen Quarziten. Verteilung der Netzebene (10 $\bar{1}$ 1). Man beachte die mehr oder weniger symmetrisch verteilten Schwärzungen (vgl. Text). Anordnung der Aufnahmen wie in Fig. 49 und 50.

Fig. 52—72. Diagramme zur Deutung der röntgenographischen Gefügeuntersuchungen (vgl. S. 497 ff.).

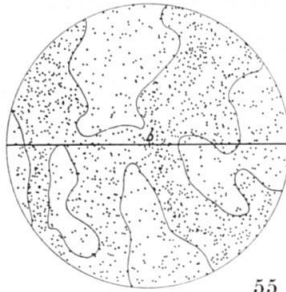


Berechnete $(10\bar{1}1)$ -Pole bei Drehfreiheit um die c-Achse
 Variationsfaktor 5



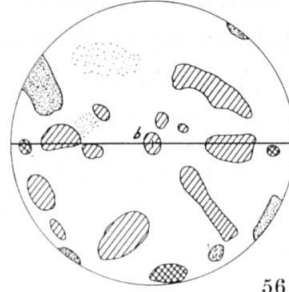
54

Variationsfaktor 10

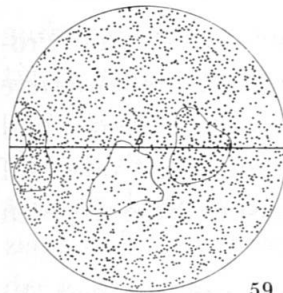


55

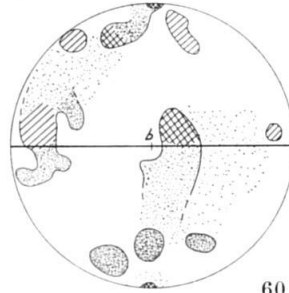
Dem Röntgendiagramm
 entnommene $(10\bar{1}1)$ -Ver-
 teilung.



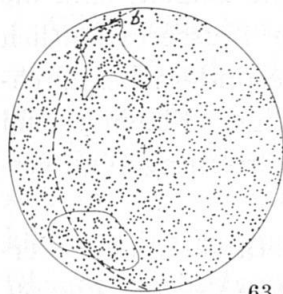
56



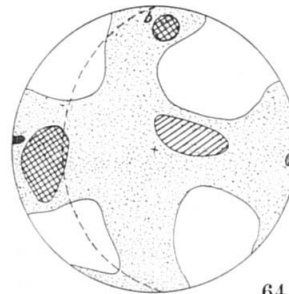
59



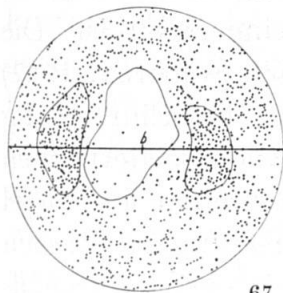
60



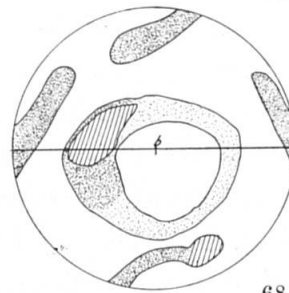
63



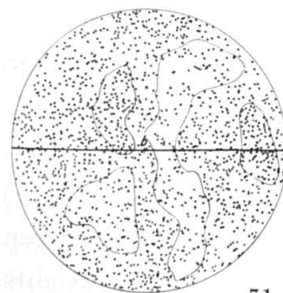
64



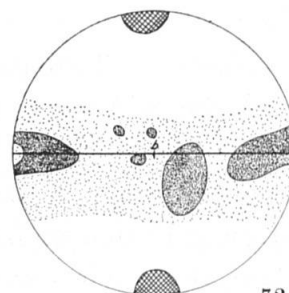
67



68



71



72

wird aber im Schliff keine statistische Anordnung erreicht, so dass bezüglich der a-Achsen keine statistische Lagefreiheitsverteilung zu erwarten ist. Dies wird dadurch erhärtet, dass sich Parallelschliffe, deren c-Achsenverteilung übereinstimmt, bezüglich der a-Achsen nur schwer vergleichen lassen. Die Proben sind deshalb, was die Drehlage der a-Achsen betrifft, inhomogen.

Aus Röntgendiagrammen der beschriebenen Art lässt sich entnehmen, dass eine Pollageverteilung mit charakteristischen *Maxima* auf Einregelung dieser Fläche deutet, wobei nicht entschieden ist, ob der Fläche mechanische Bedeutung zukommt. Die Frage, ob die Lage des Maximums *notwendig* (z. B. bei Gleitung einer Netzebene in s) oder *willkürlich* (z. B. bei Überindividuen) ist, bleibt offen.

Im Gegensatz zu diesen grobkörnigen, schwach rekristallisierten Proben zeigen feinkörnige und stark rekristallisierte Quarzite, insbesondere die Kreuzgürteltypen charakteristische *Polminima* mit verwaschener und undeutlicher Verteilung (Fig. 51), die entweder auf Lagefreiheit oder auf statistisch homogene Orientierung der a-Achsen hinweisen. Es existieren hier keine abgeschlossenen Kornbezirke.

Wie die elektronisch berechneten $(10\bar{1}1)$ -Diagramme zeigen, sind die Häufungen einer geregelten 6-zähligen Netzebene ausserordentlich schwach, verglichen mit der c-Achsenorientierung, besonders bei Drehfreiheit der a-Achsen. Röntgendiagramme mehrzähliger Flächen sind schwer zu deuten; am sichersten ist es, sie mit Modellverteilungen zu vergleichen.

Eine gute Übereinstimmung zwischen Modell und tatsächlicher Verteilung beobachtet man beim Kleinkreisgefüge Redorta (Vz 209, Fig. 50, 69—72) unter der Voraussetzung, dass $(10\bar{1}1)$ in s eingeregelt ist. Die Fixierung einer Geraden (z. B. $[11\bar{2}0]$, Gleitgerade nach SCHMIDT, 1927) ist auf Grund der c-Achsenverteilung unwahrscheinlich. Bei Einregelung von $(10\bar{1}1)$ in s haben die andern gleichwertigen Rhomboederflächen weitgehend Drehfreiheit; ihre Pole liegen auf einem breiten ab-Gürtel (Fig. 70). Die im idealisierten Modell auftretenden Häufungen werden bei den natürlichen statistischen Schwankungen weitgehend ausgeglichen.

Auch im Fall des Mylonitquarzites Ghendola (Gef 59, Fig. 65—68) sind die a-Achsen deutlich fixiert. Komplizierter sind die Regelungsbilder der übrigen Proben von Fig. 51. Sie können nicht mit der Einregelung einer Netzebene in s erklärt werden. Die Regelung von $(10\bar{1}1)$ ist zwar in den meisten Fällen stärker als es bei Drehfreiheit zu erwarten wäre, doch wir verzichten auf eine geometrische Aussage, da angesichts

der Vieldeutigkeit von Pollagenverteilungen 6zähliger Flächen eine sichere Interpretation nicht mehr möglich ist.

Von SCHMIDT (1927) wurde Gleitung auf der stark mit Atomen besetzten Netzebene ($10\bar{1}1$) diskutiert. Den Röntgenaufnahmen kann nicht entnommen werden, ob eine Netzebene als Gleitebene gewirkt hat. *Die Aussagen der Röntgenanalyse sind rein geometrisch*; sie sagen nichts Direktes über die genetischen Vorgänge aus.

8. Kinematischer Deutungsversuch

Über den Regelungsmechanismus⁸⁾ in Rekristallisationsquarziten wurde anderweitig berichtet (vgl. WENK H.-R., 1966 a). Hier sei nur das Wichtigste kurz rekapituliert.

Einkristalluntersuchungen mit der Gefügekamera ergaben, dass das Quarzkorn aus zahlreichen, um kleine Winkelbeträge gegeneinander verstellten Domänen besteht. Die c-Achse ist relativ gut fixiert: auch hier zeigt sich — wie bei den Überindividuen — eine Tendenz zu Drehfreiheit der a-Achsen.

Wirkt eine Spannung auf das Gefüge, so gleichen sich die Domänen — ob starr oder durch intergranulare Umlagerungen sei nicht entschieden — an den neuen Spannungszustand an. Das Korn kann dabei erhalten bleiben. Diese Internrotation (vgl. SANDER, 1950, S. 230) drückt sich in der zunehmenden Verzahnung der Körner aus. Die Domänen klappen bei geringen Spannungen vermutlich gemeinsam in die neue Gleichgewichtslage um, wozu nur geringe Kräfte nötig sind (Parallelkristallisation ist wachstumsenergetisch besonders günstig); der Vorgang kann mit dem Umklappen von Calcitkristallen in die Druckzwillingstellung verglichen werden. *Kornteile* (Domänen) haben unmittelbaren Kontakt. Sie „wissen“ um ihre Nachbardomäne, im Gegensatz zum *Korn*, das sich — wie Zwillingstatistiken zeigten (vgl. S. 491 ff.) — wie ein Einsprengling in fremdem Medium verhält. Als trennende Substanz muss die Intergranulare — ein Substanzfilm von bisher unbekannter Zusammensetzung — wirken. Bei stärkeren Spannungen wird das Korn aufgeteilt, indem die Domänen selbständige Subkörner bilden. Diese

⁸⁾ Unter Regelungsmechanismus sei die Art und Weise verstanden, in der sich bestimmte geometrische Elemente (z. B. Achsen, Ebenen) von Kristallen im Gefüge einem veränderten Spannungsbild anpassen. (Der Ausdruck ist dem Begriff „Bewegungsbild“ bei PATERSON und WEISS, 1961, verwandt; vgl. auch SANDER, 1948, S. 39.)

Domänenrekristallisation ist von der *Keimrekristallisation*, die an Korngrenzen und in Bruchbezirken zu beobachten ist, streng zu unterscheiden. Letztere wurde unter hohen Drucken und Temperaturen in den neusten Deformationsexperimenten von CARTER, CHRISTIE und GRIGGS (1964) eindrucklich reproduziert.

Deformationslamellen und Undulosität entstehen meist postkinematisch (CHRISTIE und RALEIGH, 1959). Sie sind zwar in einzelnen Proben vorhanden (z. B. Gef 17, vgl. dazu WENK H.-R., 1966a), haben jedoch, zeitlich später entstanden, keinen Einfluss auf die kristallographische Orientierung der Körner (welche in dieser Arbeit behandelt wird). In den hier beschriebenen Quarzgefügen ist die c-Achse hauptsächlich von der Regelung betroffen: *Das charakteristische Minimum in der c-Achsenverteilung ist das einzige Merkmal, das in allen Proben auftritt*; ihm muss bei der kinematischen und dynamischen Deutung das Hauptgewicht zugemessen werden. Die Drehlage der a-Achsen wird vermutlich dadurch bestimmt, dass kristallphysikalisch bevorzugte Gleitebenen in potentielle Translationsflächen des Gesteins (zum Beispiel Scherflächen) eingeregelt werden, *wobei Gleitung nur in wenigen Fällen tatsächlich auftritt*. Eine neue Gleichgewichtslage der Körner wird bei diesen Proben durch Rekristallisation und nur untergeordnet durch Gleitung erreicht. Offenbar entstanden Quarz-Translationsgefüge (z. B. Gef 59) im Tessin nur unter speziellen physikalischen Bedingungen.

Der petrographische Befund an alpinen Gesteinen zeigt, dass Quarz ein Spätkristallinat ist. Er kristallisierte zu einem Zeitpunkt, in dem zum Beispiel die Glimmer mehrzeitlich schon nicht mehr mobil waren. Im Quarzgefüge ist demnach ein Spannungszustand der Schlussphase der Orogenese abgebildet, der nicht mit der Hauptstressbeanspruchung zusammenfallen muss. Die Orientierung von Quarz wird vermutlich nur von langanhaltenden konstanten Spannungen beeinflusst, deshalb konnten wohl geregelte Quarzgefüge experimentell nur unvollständig reproduziert werden (vgl. TURNER und WEISS, 1963, S. 355—357). Kurzzeitige Änderungen der Stresskonfiguration werden fortwährend ausgeglichen und haben daher keinen Einfluss auf die Gefügeregelung. Dies macht die Untersuchung der Proben Gef 46—50 wahrscheinlich, die alle der Überschiebungsfläche des Baceno-Schiefers über den Verampio-Gneiss (CASTIGLIONI, 1958) entnommen sind. Die Knauern — sehr häufig in unmittelbarer Nähe des Kontaktes, sowohl im Schiefer als auch im liegenden Gneiss — zeigen keine deutbare Regelung. Es sind Maxima vorhanden, die in den Diagrammen der Proben vollständig verschiedene Lagen haben (Fig. 2—4). Wir deuten diese Linsen deshalb als deformierte Ge-

röle, wie sie im Tessin aus dem Lebendun-Gneiss, den Trias-Marmoren und den Bündnerschiefern bekannt sind.

Einen deutlichen ac-Gürtel weist nur Gef 50 auf (Fig. 15). Die von derselben Lokalität stammende Knauer zeigt etwas verschiedene Ausbildung; sie ist wesentlich kleiner und stark ausgezogen. Es handelt sich dabei wohl um eine Aussonderung im Gegensatz zu den übrigen, meist rundlichen Bildungen.

Die Inhomogenität in einem grobkörnigen Gefüge ist sehr gross und die Wirkung des Spannungszustandes auf die Kornregelung wird durch Korngrösse, Kornlage, Glimmerpakete, Grenzflächen der Knauern zum Nebengestein und durch dieses selbst erheblich beeinflusst, gestört oder geschwächt (vgl. Gef 59, Fig. 26, 27). Eine gute Regelung von Quarz in polymineralischem Gestein findet sich in den Zentralalpen nur selten. Das Spannungsfeld wird offensichtlich von Glimmer ausgeglichen. Solchen lokalen Störungen schreiben wir die undeutbaren, ungleich besetzten Maxima auf ac-Gürteln in den Proben Gef 15, 16, 21, 43, 45, 53, Vz 504 (Fig. 6—12) zu. Wird dieses orientierte Gefüge einem einfachen Stress unterworfen, so verschwinden die Maxima, die Körner verzahnen sich, und es entsteht, wie die Proben Gef 17, 50, 56, 57, 63, 64 (Fig. 13—19) zeigen, ein ac-Gürtel mit breitem Maximum in a. Oft ist der Gürtel schwach aufgespalten. In den beschriebenen Proben kann dies meist mit der Unbestimmtheit der Lage der Schieferung bei Knauern erklärt werden (Fig. 73).

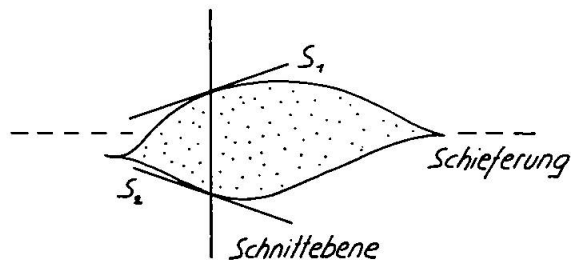


Fig. 73. Unbestimmtheit der Lage der Schieferung in Linsen.

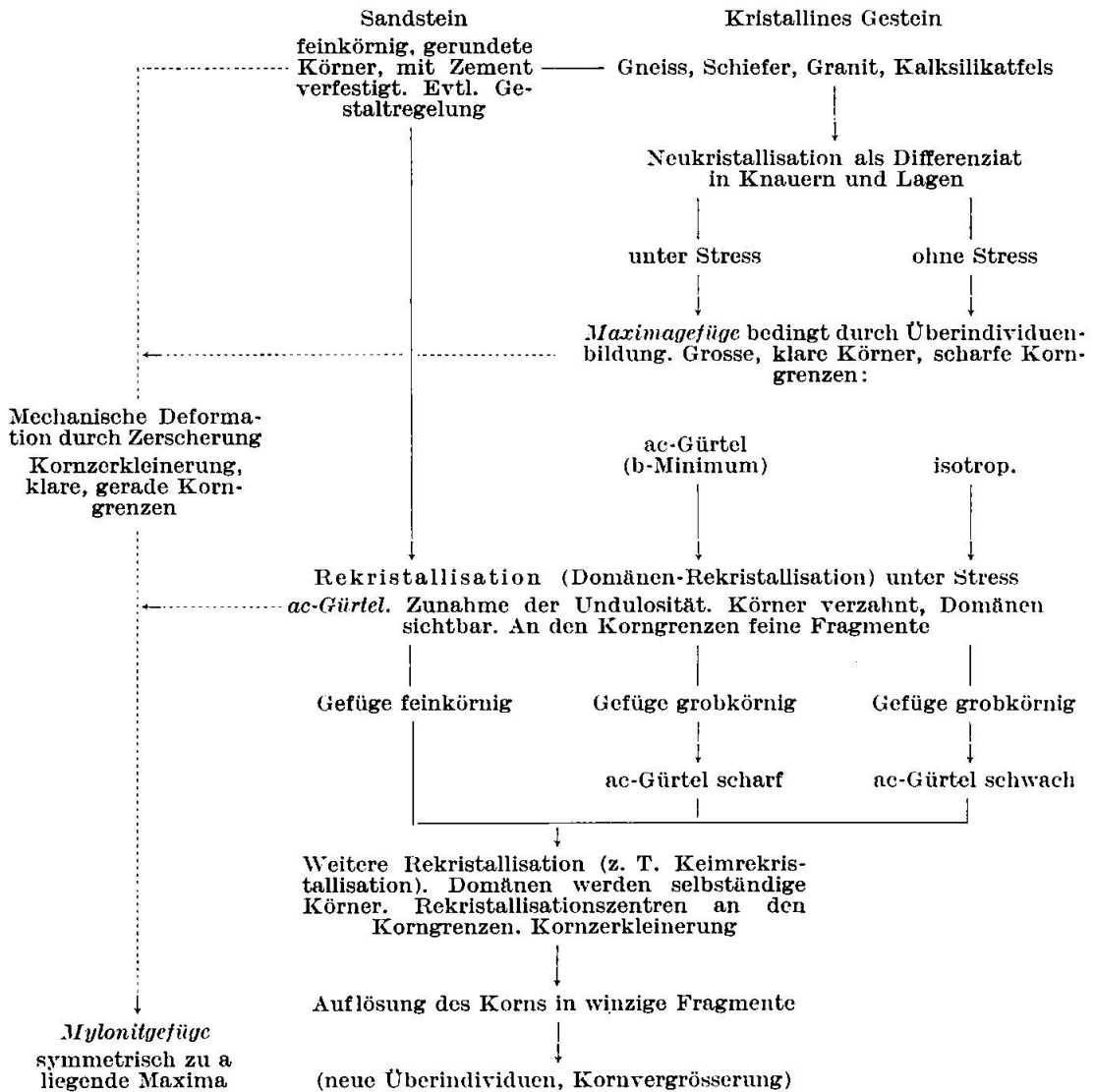
In anderen Fällen (z. B. Gef 10) sehen wir den Grund in einer komplizierteren Stressverteilung (vgl. S. 508), nicht in mehrschariger Scherung (SANDER, 1950; BEHR, 1964). ac-Gürtel und Kreuzgürtel lassen sich im Tessin nicht regional gegeneinander abgrenzen, wie dies von BEHR (1961) im sächsischen Granulitgebirge getan wurde. Die einzelnen Typen bestehen nebeneinander.

Die ac-Gürtelbildung ist nicht notwendig ein späteres Stadium einer Maximaregelung, sie kann ebenso aus feinkörnigem, isotropem Gefüge

(Gef 10, Gef 74) oder aus grobkörnigem unregelmäßigem Überindividuengefüge (Gef 19) entstehen; die Regelung ist dann schwächer. Mylonitische Scherung führt ebenfalls zu einer Anhäufung der c-Achsen in der Zone ac in zwei scharfen, symmetrisch zu a liegenden Maxima (Gef 59). Zwei verschiedene Mechanismen, Kornzerkleinerung und Rekristallisation erzeugen ähnliche Gefüge, wie KAMB (1959) auch aus theoretischen Gründen geschlossen hat.

Die wichtigsten in diesem Abschnitt gefundenen Ergebnisse sind in untenstehendem Schema noch einmal kurz zusammengestellt:

Schema zur Entstehung des ac-Gürtels



9. Folgerungen über den Spannungszustand während der alpinen Orogenese

a) ANWENDUNG DER THEORIE VON KAMB (1959)

Die Entstehung der Unterbesetzung in b, des auffallendsten Merkmals aller Quarz-c-Achsendiagramme wird im folgenden diskutiert. Die röntgenographischen Untersuchungen von HIGGS, FRIEDMAN und GEBHART (1960) und GEHLEN und VOLL (1961) lassen eine Prismenleitung auf $(11\bar{2}0)$ vermuten. Bei den hier beschriebenen Rekristallisationsgefügen haben sowohl Rhomboeder- als auch Prismenflächen weitgehend Drehfreiheit, jedenfalls eine schwächere Orientierung als die c-Achsen (vgl. S. 498 ff.). Ist die c-Achsenrichtung ausschlaggebend, so liegt es nahe, zu versuchen, die Regelung mit Hilfe der Thermodynamik zu erklären, da sämtliche physikalischen Vektorkonstanten bei Quarz durch starke Anisotropie von c zu a gekennzeichnet sind. Eine thermodynamische Erklärung für Kristallwachstumsvorgänge in einem Spannungsfeld wurde schon von RIECKE (1895) und GIBBS (1906) angestrebt. Neuerdings haben MACDONALD (1957, 1960), BRACE (1960) und KAMB (1959) die Frage wieder aufgegriffen und die Theorie weiterentwickelt. Die Resultate der verschiedenen Autoren widersprechen sich; am erfolgversprechendsten erscheinen uns die Ergebnisse von KAMB. Er berechnet die Kristallorientierung in einem einachsigen Spannungsfeld.

Bei Kristallisation von Kristallen, die sich wie Einschlüsse in einem fremden Medium verhalten, postuliert KAMB folgende Vorgänge:

- Glimmer regeln sich so ein, dass die Blättchennormale mit der Richtung der grössten Kompression zusammenfällt.
- Stengelige Mineralien (Turmalin, Beryll) legen sich mit ihrer c-Achse in die Richtung der grössten Kompression.
- Die c-Achsen von Hochquarz bilden einen Gürtel senkrecht zur axialen Spannungsrichtung, gleichgültig, ob Zug oder Druck herrscht.
- Tiefquarz richtet seine c-Achse parallel zur kleinsten Spannung, bei einachsiger Kompression in einen Gürtel senkrecht zur Kompressionsachse. Unter bestimmten Bedingungen können die c-Achsen auf einem Kreiskegel um die Kompressionsachse liegen (vgl. dazu auch LAVES, 1939).

Diese Ergebnisse stimmen mit den Feldbeobachtungen überein. Betrachtet man die drei spätkristallisierten Mineralien Glimmer (als Querglimmer), Turmalin und Quarz, so stellt man fest:

- Querglimmer liegen oft mit der Blättchenebene in ac.
- Turmalin-c-Achsen bilden ein scharfes Maximum in b (z. B. ANDREATTA, 1932; LADURNER, 1954; CHATTERJEE, 1961).

— Quarzgefüge zeigen eine starke Unterbesetzung der c-Achsenverteilung in b (= Lination). Die c-Achsen liegen auf einem ac-Gürtel, der oft in einen Kreuzgürtel aufgespalten ist⁹⁾. An einer Stelle wurde in der untersuchten Region ein Kleinkreisgefüge gefunden (Vz 209, siehe TROMMSDORFF und WENK, E., 1963). Das c-Achsen-Diagramm wurde als Kleinkreis um c gedeutet; typisch ist auch hier ein Minimum in b¹⁰⁾.

Auch experimentell konnte neuerdings ein Quarz-c-Achsen-ac-Gürtel senkrecht zur Hauptkompression erzeugt werden (J. CHRISTIE, mündl. Mitteilung).

In Fig. 74 sind die Normalen auf die ac-Gürtel der gemessenen Quarzdiagramme aufgetragen. Sie fallen meist mit der Lination zusammen. Da die Gefüge der Quarzlinsen im ganzen Gebiet ausserordentlich ähnlich sind und sich so gut mit dem Nebengestein in Beziehung bringen lassen,

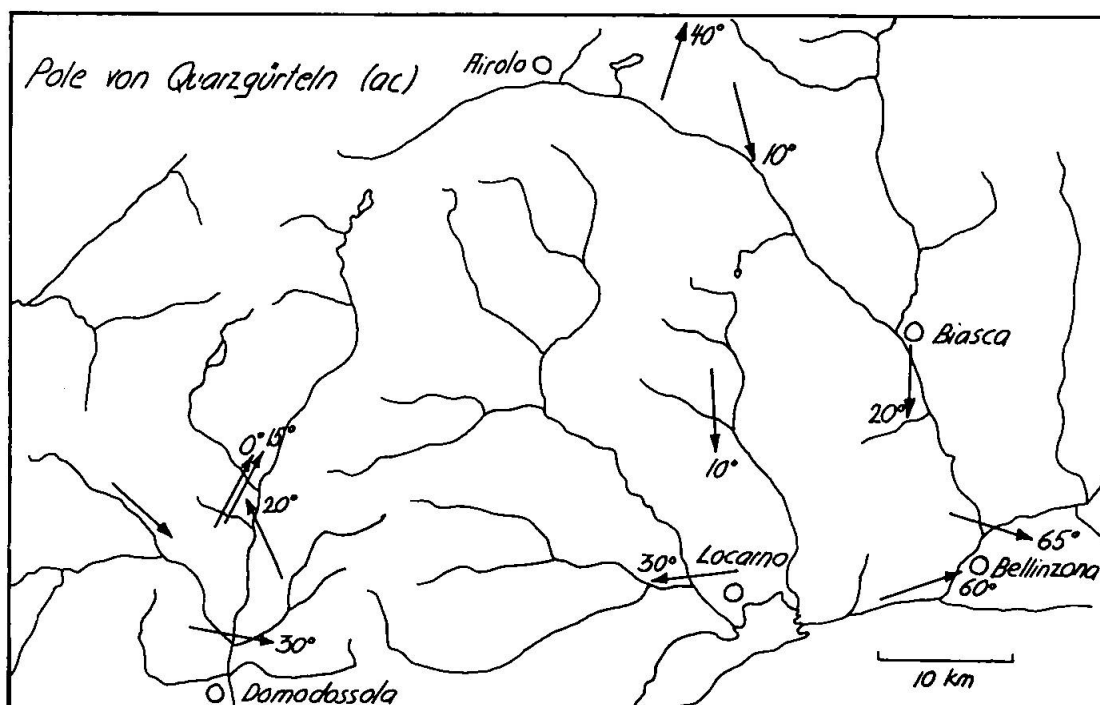


Fig. 74. Pole von Quarzgürteln (ac) in der Tessiner Region.

⁹⁾ Es wäre lohnend, zu prüfen, ob der Kreuzgürtel nicht durch kompliziertere Stressverhältnisse, etwa durch ein zweiachsiges Spannungsfeld thermodynamisch erklärt werden könnte. Feldbeobachtungen legen die Vermutung nahe: zwischen ac-Gürtel und Kreuzgürtel existieren alle Übergänge. An den untersuchten Proben ist kein Indiz vorhanden, das auf Scherung (SANDER, 1950) oder Verzwilligung weisen würde.

¹⁰⁾ Die Autoren vermuten eine Kristallisation als Hochquarz, was nach der Theorie von KAMB gerade nicht zu erwarten wäre. Wahrscheinlich ist der Quarz der ganzen lepontinischen Region — auch wenn er je als Hochquarz bestand — als Tiefquarz kristallisiert und geregelt.

da ausserdem die Voraussetzungen für eine Anwendung der KAMBSchen Theorie offenbar erfüllt sind und die vorausgesagten Kristallorientierungen mit den Beobachtungen übereinstimmen, ist man versucht, für den Zeitpunkt der Quarzkristallisation ein Spannungsbild zu entwerfen. Allerdings müssen wir dabei skeptisch bleiben, es sind Schwierigkeiten vorhanden, die vorläufig nicht befriedigend erklärt werden können: Der ac-Gürtel ist allgemein verbreitet. Darf wohl überall eine späte Rekristallisation des Quarzgefüges mit einer Stresskomponente senkrecht zur ursprünglichen Hauptkompression angenommen werden? Wie kann der Kleinkreistyp Redorta (Fig. 69) dessen Hauptkompressionsrichtung nach KAMB in c liegen müsste, mit dem ac-Typ Redorta (Fig. 8, 12) in Einklang gebracht werden?

Wagt man, aus der geometrischen Analyse eine dynamische Aussage zu treffen, so muss das Ergebnis mindestens geologisch plausibel gemacht werden können.

b) TEKTONISCHES MODELL ZUR DEUTUNG DES SPANNUNGSBILDES

Die folgenden Überlegungen beziehen sich auf ein hypothetisches Modell und beanspruchen keineswegs unbedingte Gültigkeit. Das Modell soll dem Geologen zeigen, dass die theoretischen Ergebnisse durchaus mit den faktischen Verhältnissen übereinstimmen können. Es erklärt die verschiedenen Spannungsphasen und steht mit den Erfahrungen soweit nicht in Widerspruch, was jedoch noch nicht seine Richtigkeit beweist. Um zu bestehen, muss es einer Konfrontation mit dem feldgeologischen Befund standhalten.

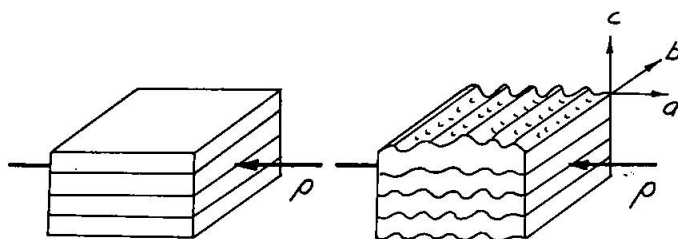


Fig. 75. Zur Entstehung der Lineation.

Vergleicht man die Theorie von KAMB mit den Daten der Quarzgefüge, so kommt man zunächst zu der überraschenden Deutung, dass die Hauptrichtung einer axialen Kompression parallel zu einer regionalen b-Lineation war. Die Lineation ist in der Tessiner Region oft als

Fältelung ausgebildet, welche regional nur durch Kompression senkrecht *b* erklärt werden kann, wenn ein konstantes, stationäres Stressfeld angenommen werden darf (Fig. 75).

In der Strukturkarte der Tessiner Alpen (WENK E., 1955) erkennen wir, dass die Lineation *grosso modo* NS streicht und im Süden gegen *E* abbiegt, also durch EW-Druckbeanspruchung entstanden sein mag. Als Kräfte könnte die seitliche Belastung der von Süden her überschobenen, sich an der Tessiner Kulmination teilenden, penninischen und ostalpinen Decken gewirkt haben (Fig. 76)¹¹). Durch EW-Kompression entsteht

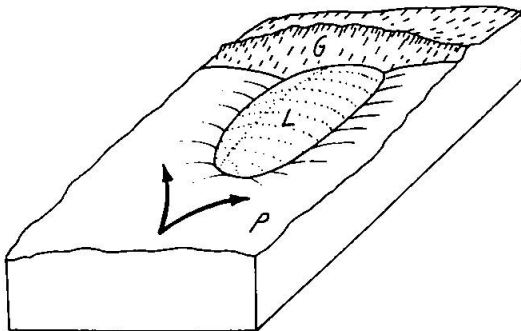


Fig. 76. Schematische Skizze zur Überschiebung der penninischen und ostalpinen Decken. (G = Gotthardmassiv, P = Pennin und Ostalpin, L = späteres Lepontin).

eine Längung der Gesteine in *b*. Sehr schön lässt sich das an den Konglomeratgneissen ablesen, deren Gerölle in der *b*-Richtung oft zwanzigmal länger sind als senkrecht dazu. Es bildet sich eine zunehmende Reaktionskraft der Massive im Norden auf den Tessiner Komplex. Flaut der Druck aus *E* ab, so ist die Hauptstresskomponente nun in der *b*-Richtung. Im Norden und Süden entstehen bei der Zusammenstauchung der Massen komplizierte Schlingenstrukturen (Maggialappen: Einengungstektonik, GÜNTHERT, 1954; Zone von Bellinzona-Arbedo). Auch diese vorwiegend NS gerichtete Beanspruchung wird danach durch eine andere abgelöst. Die Abkühlung der stark erwärmten Tessiner Region wirkt sich vor allem als Zugspannung in der *b*-Richtung aus, da hier der Wärmeausdehnungskoeffizient am grössten ist. Wird die Bruchgrenze überschritten, so spaltet das Gestein senkrecht zur Lineation. Es ent-

¹¹) Eine Überlagerung des Lepontins durch diese, wie sie von STAUB (1924, 1958) angenommen wurde, ist auf Grund von Schlüssen über die Temperatur höchst unwahrscheinlich (WENK E., 1962b). Bei einer Überlagerung von 30 km müsste man Palingenese in den Gesteinen der Basis erwarten, die jedoch fehlt. Überdies weist die starke Verfaltung in der Tessiner „Wurzelzone“ auf ein Fehlen von Deckenfortsätzen. Das Vorhandensein einer Kulmination aus damals recht starrem Material in der Gegend des heutigen Tessins ist also schon zu jener Zeit durchaus möglich.

stehen ac-Klüfte, die in der ganzen Region verfolgt werden können. Die Klüftbildung ist in den Tessiner Alpen postgenetisch; zur Zeit der Hauptphase der alpinen Orogenese war das Material zu plastisch, als dass es zur Bruchbildung hätte kommen können. Die verschiedenen Systeme zeigen eine grosse Konstanz (vgl. WENK H.-R., 1966 b), besonders im Streichen. Abkühlungsklüfte und Störungen kinematischen Ursprungs lassen sich oft nicht unterscheiden, da die Systeme ineinander übergehen und parallel verlaufen. In der Simplonregion streichen die Klüftscharen vom Lepontin ins Seengebirge, was auf sehr junges Alter schliessen lässt. Es zeichnet sich überall eine mehr oder weniger ausgeprägte Abhängigkeit des Klüftverlaufes von der Lineationsrichtung ab. Im einzelnen sind die Verhältnisse kompliziert und lassen sich nur durch Detailstudien deuten, in welchen Muttergestein, Klüftmineralparagenese und die Beziehung zum Gefüge berücksichtigt sind.

Schematisch ist die Entwicklung des Stresszustandes in den Zentralalpen in Fig. 77—80 zusammengestellt. Jeder neue Stresszustand ist eine Antwort auf die unmittelbar vorhergehenden Verhältnisse. Drei tektonische Phasen wurden aufgezeigt, auf Grund derer die ac-Gürtel-Richtungen (Fig. 74) verstanden werden können. Die Phasen stimmen mit den von den Petrographen beobachteten Kristallisationen überein: Die erste, eingeleitet durch die Deckenüberschiebung, führte zur Ausbildung von Falten und Lineationen. Eine gleichzeitige Erwärmung — ob durch Kompression oder Intrusion aus der Tiefe ist nicht entschieden — verursachte erhöhte Mobilität und Diffusion. Es ist dies der Zeitpunkt der Glimmerkristallisation. Wahrscheinlich entstanden damals die Aussonderungen in Linsen und Lagen von hellem Material; lokal wurde Anatexis erreicht. Als Folge der Kompression und des Widerstandes im Norden ändern sich die Spannungsverhältnisse, b wird Hauptkompressionsachse. Glimmer können nur lokal als Querbiotite umkristallisieren; Quarz in monomineralischen Lagen bildet b-Minima der c-Achsenrichtungen. Die letzte Stressumkehr, die zur Zerrklüftbildung führt, vermag das Gesteinsgefüge nicht mehr zu beeinflussen; die Kräfte waren zu schwach, die Temperaturen zu niedrig und die Zeiten zu kurz dazu.

Quarzdiagramme erlauben nur Aussagen über eine Spätphase der Kristallisation, die geologisch-tektonisch schon uninteressant ist. Sie dürfen nicht zur Deutung der Überschiebungsdecken verwendet werden. Der ac-Gürtel hat unmittelbar nichts mit der Lineation zu tun; nur sekundär (da b Hauptstreckungsrichtung ist) ist er von dieser abhängig.

Wir haben hier einige allgemeine Tatbestände abgeleitet. Da diese Untersuchung mehr methodisch als regional ist, werden lokale Inhomo-

Fig. 77—80. Schematisches Modell zur Entwicklung des Spannungszustandes während der alpinen Orogenese¹²⁾ (eine mögliche Plausibilitätserklärung für die Quarz-ac-Gürtelbildung).

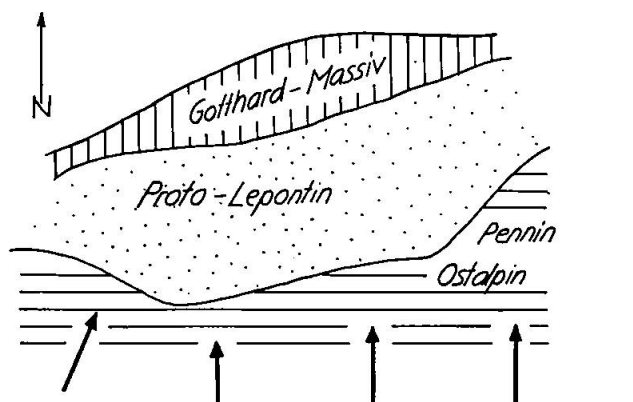


Fig. 77. Überschiebung der penninischen und ostalpinen Decken. Keine Überlagerung des Raumes des späteren Lepontins.

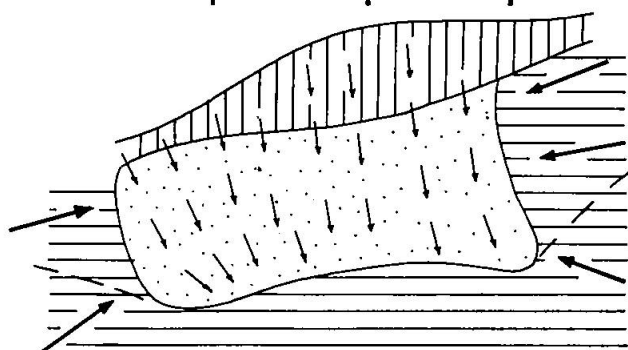


Fig. 78. EW-Kompression führt zur Bildung einer NS-Lineation.

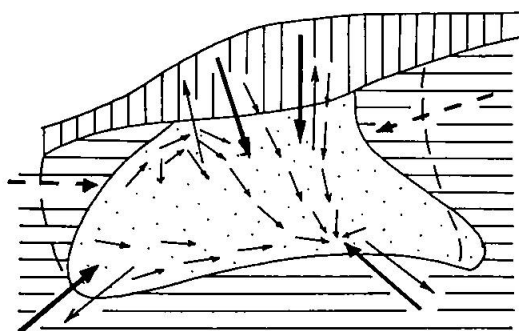


Fig. 79. Durch die EW-Kompression werden die Gesteine in der Lineationsrichtung gelängt (dünne, lange Pfeile). Dadurch entstehen Reaktionsspannungen in der Lineationsrichtung, Zusammenstauchung in Schlingenstrukturen, Hauptkompression NS.

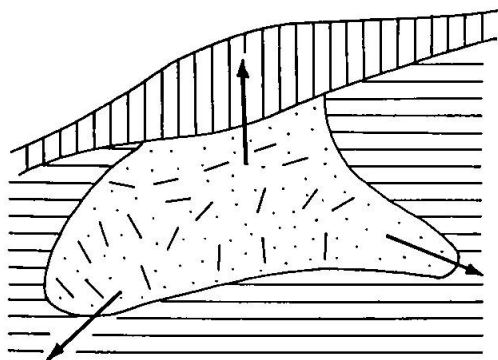


Fig. 80. Zugspannungen in der Lineationsrichtung — durch die Abkühlung des Komplexes verursacht — führen zum Aufreissen von ac-Klüften.

¹²⁾ Die Bezeichnungen der tektonischen Einheiten ist schematisch und bezieht sich lediglich auf die Stressverhältnisse. Sie stimmt nicht streng mit den realen Verhältnissen überein.

genitäten des Spannungsbildes nicht näher behandelt. Auf geologische Aspekte wurde hingewiesen, weil die Gefügekunde letztlich der Klärung geologischer Fragen dienen soll.

LITERATURVERZEICHNIS

SMPM = Schweiz. Mineralogische und Petrographische Mitteilungen

- ANDREATTA, C. (1932): Analisi strutturale di rocce metamorfiche I. Period. Mineral., III, 181—196.
- BEHR, H. J. (1961): Beiträge zur petrographischen und tektonischen Analyse des sächsischen Granulitgebirges. Freiburger Forschungshefte, C 119, 8—118.
- (1964): Die Korngefügefazies der Zweigürteltektonite im kristallinen Grundgebirge Sachsens. Abh. Dtsch. Akad. Wiss., Berlin, math. naturw. Kl.
- BRACE, W. F. (1960): Orientation of anisotropic minerals in a stress field: discussion. Geol. Soc. Amer. Mem., 79, 9—20.
- BURRI, C., PARKER, R. L. und WENK, E. (1966): Die optische Orientierung der Plagioklase. Basel (im Druck).
- CARTER, N. L., CHRISTIE, J. M. and GRIGGS, D. T. (1964): Experimental deformation and recrystallization of quartz. J. Geol., 72, 687—733.
- CASTIGLIONE, G. (1958): Studio geologico e morfologico del territorio di Baceno e Premia (Val d'Ossola-Alpi Lepontine). Mem. Ist. Geol. Mineral. Univ. Padova, XX.
- CHATTERJEE, N. D. (1962): The alpine metamorphism in the Simplon-Area, Switzerland and Italy. Geol. Rdsch., 51, 1—72.
- CHRISTIE, J. M. and RALEIGH, C. B. (1959): The origin of deformation lamellae in Quartz. Amer. J. Sc., 257, 385—407.
- V. GEHLEN, K. und VOLL, G. (1961): Röntgenographische Gefügeanalyse mit dem Texturgoniometer am Beispiel von Quarziten aus kaledonischen Überschiebungszonen. Geol. Rdsch., 51, 440—450.
- GIBBS, J. W. (1906): On the equilibrium of heterogeneous substances. Coll. works of J. W. Gibbs. New Haven, Conn.
- GRÜNENFELDER, M. und GRÖGLER, M. (1964): U/Pb-Zerfallsalter von Zirkonen aus Gesteinen der Alpen. Vortrag, gehalten an der 39. Hauptvers. der Schweiz. mineral. petrogr. Ges. in Zürich (unpubl.).
- GÜNTHERT, A. (1954): Beiträge zur Petrographie und Geologie des Maggia-Lappens (NW-Tessin). SMPM, 34, 1—159.
- HAFNER, S. (1958): Petrographie des südwestlichen Gotthardmassivs (zwischen St.-Gotthardpass und Nufenenpass). SMPM, 38, 255—362.
- HIGGS, D. V., FRIEDMAN, M. and Gebhart, D. (1960): Petrofabric analysis by means of the X-ray diffractometer. Geol. Soc. Amer. Mem., 79, 275—292.
- HO, T. L. (1946): Petrofabric analysis of some Wutai schists and its bearing on the tectonite. Bull. geol. Soc. China, XXVI, 109—119.
- JÄGER, E. and FAUL, H. (1959): Age measurements on some granites and gneisses from the Alps. Geol. Soc. Amer. Bull., 70, 1553—1558.
- JÄGER, E. und FAUL, H. (1960): Altersbestimmungen an einigen Schweizer Gesteinen und dem Granit von Baveno. SMPM, 40, 10—12.

- JÄGER, E., GEISS, J., NIGGLI, E., STRECKEISEN, A., WENK, E. und WÜTHRICH, H. (1961): Rb-Sr-Alter an Gesteinsglimmern der Schweizer Alpen. *SMPM*, 41, 255—272.
- JÄGER, E. und NIGGLI, E. (1964): Rubidium-Strontium-Isotopenanalysen an Mineralien und Gesteinen des Rotondogranites und ihre geologische Interpretation. *SMPM*, 44, 61—81.
- KAMB, W. B. (1959): Theory of preferred orientation developed by recrystallization under stress. *J. Geol.*, 67, 153—170.
- KNUP, P. (1958): Geologie und Petrographie des Gebietes zwischen Centovalli-Valle Vigezzo und Onsernone. *SMPM*, 38, 84—236.
- KOARK, H. J. (1956): Gefügeregel und Gefügegenität in einem Quarz in Quarz-B-Tektonit. *Bull. geol. Inst. Uppsala*, XXXVII.
- LADURNER, J. (1954): Beiträge zur Typisierung von Falten III. Heteroachs geregelte Turmalinfalte. *Jb. geol. Bundesanst., Wien*, 97, 65—70.
- LAVES, F. (1939): Über den Einfluss von Spannungen auf die Regelung von Quarz- und Cristobalit-Kriställchen im Chalcedon, Quarzin und Lussatit. *Naturwiss.*, 27. Jg., 42, 705—707.
- MACDONALD, G. I. F. (1957): Thermodynamics of solids under non-hydrostatic stress with geological applications. *Amer. J. Sc.*, 255, 266—281.
- (1960): Orientation of anisotropic minerals in a stress field. *Geol. Soc. Amer. Mem.*, 79, 1—8.
- PATERSON, M. S. and WEISS, L. E. (1961): Symmetry concepts in structural analysis of deformed rocks. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 72, 841—882.
- RAMSAUER, H. (1941): Achsenverteilungsanalysen an Quarztektoniten. *Diss. Univ. Innsbruck.*, No. 304.
- REINHARD, M. (1931): *Universal Drehtischmethoden*. Basel.
- RIECKE, E. (1895): Über das Gleichgewicht zwischen einem festen homogenen deformierten Körper und einer flüssigen Phase. *Ann. Physik*, 54, 731—738.
- SANDER, B. (1930): *Gefügekunde der Gesteine*. Wien.
- (1934): *Fortschritte in der Gefügekunde der Gesteine. Anwendungen, Ergebnisse. Kritik. Fortschr. Mineral.*, 18, 111—170.
- (1948): *Einführung in die Gefügekunde der geologischen Körper, 1. Teil*. Wien.
- (1950): *Einführung in die Gefügekunde der geologischen Körper, 2. Teil: Das Korngefüge*. Wien.
- SCHMIDT, W. (1927): Zur Quarzgefügeregel. *Fortschr. Mineral.*, 11, 334—336.
- STAUB, R. (1924): *Der Bau der Alpen. Beitr. geol. Karte Schweiz, N. F.*, 52.
- (1958): *Klippendecke und Zentralalpenbau. Beitr. geol. Karte Schweiz, N. F.*, 103.
- STEIGER, R. H. (1962): Petrographie und Geologie des südlichen Gotthardmassivs zwischen St.-Gotthard- und Lukmanierpass. *SMPM*, 42, 381—577.
- TROMMSDORFF, V. (1963): Die photographische Auswertung von Gefügediagrammen. *N. Jb. Mineral. Mh.* 7, 166—173.
- (1963): Photographische Gefügediagramme und Schnitteffektkorrektur. *SMPM*, 43, 699—705.
- TROMMSDORFF, V. und WENK, E. (1963): Diskussion eines Zwillingsgefüges durch Achsenverteilungsanalyse an Quarz eines Tessiner Gneisses. *SMPM*, 43, 687—698.

- TURNER, F. J. and WEISS, L. E. (1963): Structural analysis of metamorphic tectonites. New York.
- WENK, E. (1943): Ergebnisse und Probleme von Gefügeuntersuchungen im Verzascatal (Tessin). SMPM, 23, 265—295.
- (1953): Prinzipielles zur geologisch-tektonischen Gliederung des Penninikums im zentralen Tessin. Eclogae geol. Helv., 46, 9—21.
- (1955): Eine Strukturkarte der Tessineralpen. SMPM, 35, 311—319.
- (1956): Die lepontinische Gneissregion und die jungen Granite der Valle della Mera. Eclogae geol. Helv. 49, 251—265.
- (1962a): Plagioklas als Indexmineral in den Zentralalpen. SMPM, 42, 139—152.
- (1962b): Das reaktivierte Grundgebirge der Zentralalpen. Geol. Rdsch., 52, 754—766.
- WENK, H.-R. (1964): Wärmeleitungsmessungen an Schweizer Gesteinen. SMPM, 44, 89—104.
- (1965): Eine photographische Röntgen-Gefügeanalyse. SMPM, 45, 517—550.
- (1966a): Zum Fehlbau von Quarzkristallen in Gesteinen. Beitr. Mineral. Petrogr. (im Druck).
- (1966b): Die geologische Abbildung. Erläutert am Beispiel der Zentralalpen. Eclogae geol. Helv. (im Druck).
- WENK, H.-R. und TROMMSDORFF, V. (1965): Koordinatentransformation, Mittelbare Orientierung, Nachbarwinkelstatistik. Gefügekundliche Rechen-Programme mit Beispielen. Beitr. Mineral. Petrogr. 11, 559—585.

Manuskript eingegangen am 5. Mai 1965.