

Zeitschrift:	Eclogae Geologicae Helvetiae
Herausgeber:	Schweizerische Geologische Gesellschaft
Band:	59 (1966)
Heft:	2
Artikel:	Die Geologische Abbildung, erläutert am Beispiel der Zentralalpen
Autor:	Wenk, Hans-Rudolf
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-163393

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 17.01.2026

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

Die Geologische Abbildung, erläutert am Beispiel der Zentralalpen

Von **Hans-Rudolf Wenk** (Zürich und Basel)¹⁾

mit 6 Textfiguren, 1 Tabelle im Text und 1 Tafel (I)

ABSTRACT

The Geological Image is defined as a geological phenomenon determined by its previous state which is conserved in an altered shape. If the projection is known, a reconstruction of geological processes and situations is possible. The geological image is represented as a system of research; it also may serve to systematize the foundations of the Earth Sciences.

Geological thermometers and images of stress symmetry are reviewed. A map of the most important joints and fissures in the Swiss central Alps is demonstrated and some problems of their genesis are discussed. A stress-model of the central alpine orogenesis is displayed as a possible interpretation of geological images.

Die Geologie befasst sich damit, den Zustand der Erde in früheren Zeiten zu rekonstruieren. Dies geschieht durch Beobachtung erhaltener Tatbestände der Vergangenheit, durch Vergleich mit rezenten Vorgängen (Aktualitätsprinzip) und durch theoretische und hypothetische Rückschlüsse auf Grund physikalischer, chemischer und biologischer Gesetze. Die Geologie als beschreibende Wissenschaft zu sehen, ist sicher deshalb verfehlt, weil das eigentliche Erforschungsobjekt in seiner ursprünglichen Form gar nicht mehr vorhanden ist, also nicht beschrieben werden kann. Die Beschreibung steht zwar am Anfang jeglicher Untersuchung, doch ist dies Methode und nicht Inhalt der Geologie. Dieser ist nur erfassbar durch die Kombination zweier Erkenntnisformen: der Beobachtung und der Ableitung.

Da der Geologe in erster Linie Empiriker ist und sich hauptsächlich für spezielle (regionale und lokale) Probleme interessiert, wurde vielfach darauf verzichtet, klare Grundbegriffe zu schaffen, wie sie die meisten andern Wissenschaften besitzen. Gerade die Phänomene und Methoden, welche uns die geologische Vergangenheit erkennen lassen, entbehren der Systematik. Wir versuchen daher hier einen Zusammenhang zwischen den verschiedenen Zweigen der Geologie aufzuzeigen und zu diskutieren.

¹⁾ Institut für Kristallographie und Petrographie der Eidg. Techn. Hochschule, Sonneggstr. 5, Zürich.

Eine Eigenschaft, welche den Temperaturzustand einer vergangenen Situation widerspiegelt, heisst geologisches Thermometer. Es sind hauptsächlich physikalisch-chemische Eigenschaften der Mineralien und Mineralparagenesen, die uns ein Bild der Temperaturverhältnisse in der geologischen Vergangenheit erhalten. Allgemeiner möchten wir für irgendeine Erscheinung, die durch einen vergangenen Zustand bestimmt ist und diesen in umgewandelter, projizierter Form widerspiegelt, den Begriff geologische Abbildung einführen. Wir verwenden Abbildung in Analogie zur darstellenden Geometrie: Eine geometrische Figur wird dort durch eine Projektion in eine zweite, das Bild der ersten, übergeführt (Fig. 1).

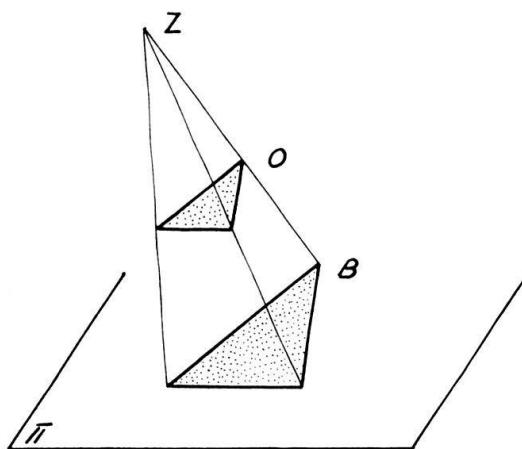


Fig. 1. Abbildung in der Geometrie (O Objekt, Z Projektionszentrum, Π Bildebene, B Bild)

Zwischen Ausgangsobjekt und Bild besteht ein strenger kausaler Zusammenhang. In der Geometrie sind Objekt und Bild bloss räumlich getrennt, in der Geologie jedoch in komplexer Weise räumlich, zeitlich und eigenschaftsmässig zugleich. Dies bringt grundlegende Schwierigkeiten mit sich: In der Geometrie gilt, dass bei hinreichender Beobachtung des Bildes und genauer Kenntnis der Projektion, Erscheinungsform und Eigenschaften des Objektes berechnet werden können. Diese Aussage ist für die Geologie nicht bewiesen, bei Betrachtung kleinster Dimensionen sogar unwahrscheinlich: Zahlreiche Prozesse streben statistische Verteilung an (die Entropie nimmt immer zu) und danach kann nicht mehr auf den ursprünglichen Ordnungszustand geschlossen werden; andere sind reversibel und vermögen somit nicht, einen früheren Zustand festzuhalten. Als geologische Abbildungen kommen vor allem irreversible Vorgänge in Frage, welche vorausgegangene Zustände – etwa als metastabiles Gleichgewicht – konservieren. Trotz der prinzipiellen Unmöglichkeit, ein exaktes und vollständiges Bild der Vergangenheit zu entwerfen, darf die Forderung der Erforschbarkeit des Objektes in guter Näherung als erstes Prinzip und als Grundlage der Geologie beibehalten werden; die Erfahrungen der letzten Jahrzehnte haben es genügend bestätigt.

Einige Charakteristika geologischer Abbildungen erkennen wir am besten anhand konkreter Beispiele (siehe Tabelle I).

Tabelle I. Beispiele von Geologischen Abbildungen

Direkte Abbildungen

Lebensraum:	Fauna und Flora Sedimentart Stratigraphie
Klima:	Fauna und Flora Verwitterungszustand
Indirekte Abbildungen	
Biologische Abbildungen	
Zeitmarken:	Orthogenese
Physikalisch-chemische Abbildungen	
Geologische Thermometer:	Mineralparagenesen Mineralchemismus (Mischkristalle, Spurengleichgewicht) Kristallstruktur (z. B. Triklinität von Feldspäten) Umwandlungspunkte (z. B. Markasit-Pyrit)
Geologische Manometer:	Mineralparagenesen (z. B. SiO_2 : Quarz-Coesit-Stishovit, Al_2SiO_5 : Andalusit-Disthen-Sillimanit)
Geologische Uhren:	Isotopenzerfall
Geometrische Abbildungen	
Abbildungen von Skalaren und Vektorbeträgen	
Kristallisationsfolge	
Sedimentpetrographie:	Korngrösse Mineralbestand
Abbildungen von Vektorrichtungen	
Stress- und Strainsymmetrien:	Korngefüge Gesteinsstrukturen (z. B. Lineation und Schieferung) Gebirgsstrukturen Klüfte und Störungen
Lage des magnetischen Pols:	Paläomagnetismus

Wir gliedern die Gesamtheit der Abbildungsarten nach ihren Eigenheiten: Bei direkten Abbildungen ist ein vergangener Zustand unverändert konserviert, die Projektionsart ist unmittelbar ersichtlich. Direkte Abbildungen werden von aussen nicht beeinflusst und können deshalb als gesonderte Phänomene erforscht werden. Das wichtigste Beispiel dieser Gruppe ist die Paläontologie, die aus den Fossilien – meist durch Analogieschlüsse zur Gegenwart – direkte Rückschlüsse auf damalige Lebensbedingungen zieht. Viel komplizierter verhält es sich mit den indirekten Abbildungen: Sie erhalten einen Zustand lediglich als Ergebnis eines physikalisch-chemischen Prozesses (z.B. die Temperatur als chemisches Gleichgewicht). Die theoretische oder empirisch-abstrakte Gesetzmässigkeit muss zur Rekonstruk-

tion des Ausgangszustandes bekannt sein. Physikalische Zustände wirken immer integral auf sämtliche Effekte, nicht speziell. Die Abbildungen beeinflussen sich oft gegenseitig (z.B. Druck und Temperatur in Mineralparagenesen; vgl. System SiO_2 in Fig. 2) und können letztlich nur als Ganzes erfasst werden. Immerhin gelingt es mit guter Näherung, Abbildungen zu finden, die nur auf eine bestimmte Art der Zustandsänderung empfindlich sind.

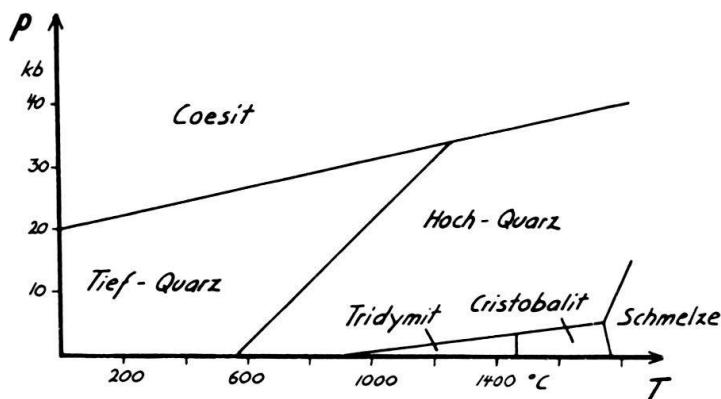


Fig. 2. System SiO_2 , Zustandsdiagramm (nach BOYD und ENGLAND, 1960).

Die Art der Projektion zu erfahren, ist ein zentrales Problem der Geologie, mit dessen Lösung die verschiedensten Wissenschaften beschäftigt sind, vor allem Biologie, Physik, Physikalische Chemie, sodann besonders Kristallographie und Geophysik. Sie tun dies mehr oder weniger als Selbstzweck, die geologische Fragestellung ist ihnen meist gleichgültig. Dadurch erwächst dem Geologen die Schwierigkeit, die ihm zunächst fremden Tatsachen zu verstehen und sie richtig anzuwenden.

Wir haben den allgemein bekannten und gebrauchten Begriff der Abbildung neu definiert und ihn als Grundlage einer allgemeinen Systematik in den Erdwissenschaften verwendet. Da die Verwendung des Abbildungsvorgangs Forschungsmethode ist, wird die Klassifikation weitgehend durch die historischen Gegebenheiten bedingt und ist nicht immer natürlich. Eine Objekt-Systematik kommt im Bereich der Geologie kaum je in Frage bei der Mannigfaltigkeit von Einzelerscheinungen und auch bei der leider oft tiefgreifenden Spaltung in Einzelwissenschaften, die sich gegeneinander abschliessen.

Die Diskussion abstrakter Begriffe mag vom praktischen Standpunkt aus unwichtig erscheinen. Unseres Erachtens ist sie sogar notwendig: Die Geologie hat sozusagen als einzige Wissenschaft auf philosophische Grundsätze als Ausgangspunkt verzichtet. Sie ist nicht getragen von umgreifenden Prinzipien (wie die Kausalität in der modernen Physik), einem Mythos (wie dem des Lebens in der klassischen Biologie) oder wirtschaftlichen Notwendigkeiten (wie etwa die Chemie); sie entspringt dem Forscherwillen des Einzelnen, der, ohne an eine mögliche Anwendung in materiellem oder geistigem Gebiet zu denken, die Natur erforschen will. Diese Bescheidenheit ist einmalig und faszinierend, doch sie könnte der Geologie zum Verhängnis werden, da die verschiedenen Zweige langsam von den Grossen aufgefressen werden. Wollen wir verhindern, dass die Paläontologie zu einem Spezialgebiet der Biologie, die Kristallographie zu einem solchen der Physikalischen Chemie wird, so müssen wir für diese reinste Naturwissenschaft nachträglich eine gemeinsame

Grundlage schaffen, zu der wir uns bekennen können, eine Grundlage, welche die Spannweite von Strukturbestimmung bis zur Paläogeographie in sich aufzunehmen vermag. Würde man die naturwissenschaftliche Erkenntnis bloss nach dem rationalen Fortschritt beurteilen, so hätte die Geologie schon längst aufgehört, zu existieren.

Doch wenden wir uns nun der praktischen Anwendung der geologischen Abbildung zu, um zu zeigen, dass es sich dabei keineswegs bloss um eine philosophische Spekulation handelt. Was wir geologische Abbildung nennen, ist für die meisten Erdwissenschaften schon lange ein selbstverständliches Forschungsprinzip, ein Zweig, die Tektonik, geht allerdings nach der Methode der subjektiven Extrapolation von Einzelbeobachtungen vor. Als Beispiel wählen wir die gut untersuchten Zentralalpen. Wir möchten betonen, dass es dabei nicht um die Demonstration neuer Ergebnisse geht: Wir verwenden Angaben aus der Literatur, um die geologische Abbildung anschaulich zu illustrieren. Dass es dabei in erster Linie um petrographische und kristallographische Phänomene geht, liegt in der Natur des Kristallinkörpers: Klassische feldgeologische Untersuchungen tragen nur mehr wenig zum Verständnis der geologischen Vorgänge bei.

Von den physikalisch-chemischen Abbildungen sind vor allem Thermometer bedeutungsvoll, über Druckverhältnisse ist noch wenig bekannt. Fig 3 zeigt Isograde im lepontinischen Raum, welche in erster Näherung als Isothermen aufgefasst werden können. Drei verschiedene Erscheinungen, für die Metamorphose charakteristische Mineralien (NIGGLI, 1960, 1965), der An-Gehalt von Plagioklas in der Paragenese Calcit-Plagioklas (E. WENK, 1962) und der H-Gehalt von Kluftquarz (BAMBÄUER et al., 1962).

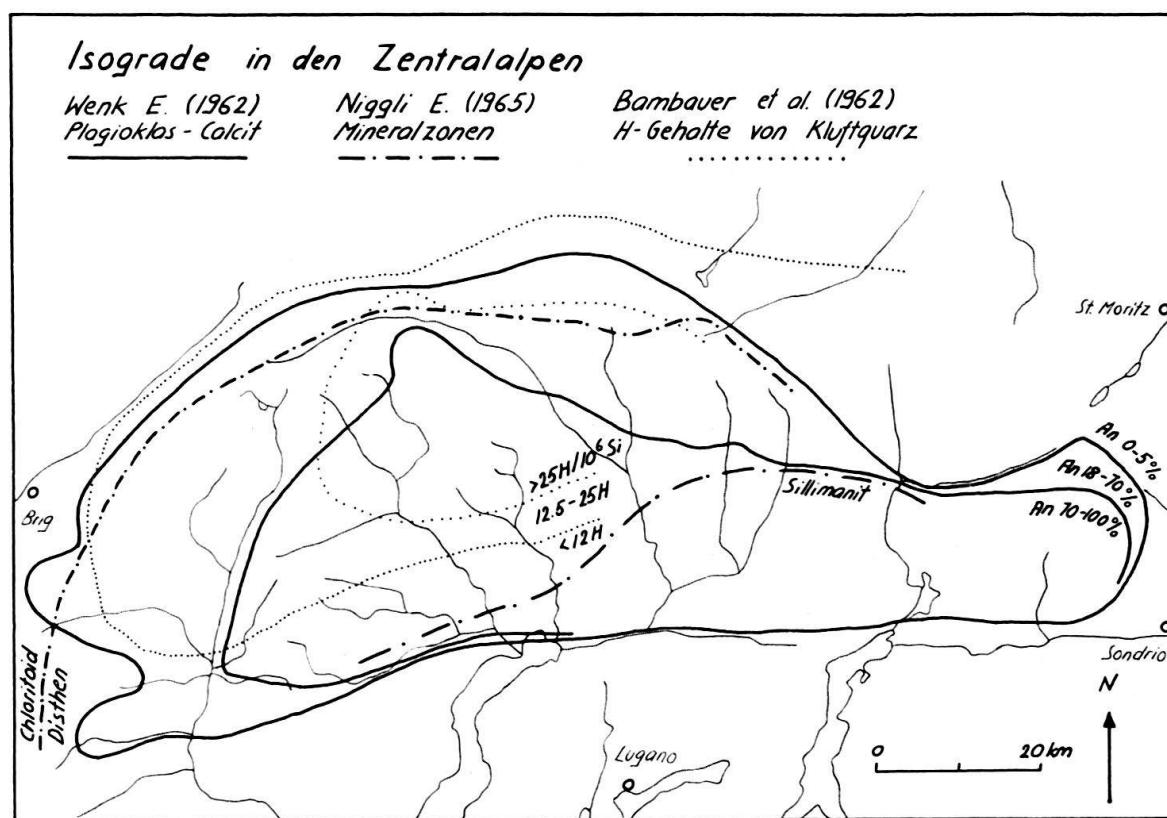


Fig. 3. Isograde in den Zentralalpen.

quarz (BAMBAUER, BRUNNER und LAVES, 1962) ergeben ringförmig geschlossene Isograde mit Epizentrum im zentralen Tessin. Die grobe Übereinstimmung ist evident und wurde von E. WENK (1962) als Wärmedom gedeutet, schwieriger zu interpretieren sind die charakteristischen Unterschiede, doch gerade sie erlauben es, exaktere Aussagen über die physikalischen Parameter bei der Gebirgsbildung zu machen. Um die Problematik der Abbildung zu zeigen, gehe ich kurz auf die einzelnen Thermometer ein.

Das Prinzip der Mineralfazies, wie es von ESKOLA (1921) definiert wurde, erlaubt es, die metamorphen Gesteine einzuteilen und ihren Metamorphosegrad zu bestimmen: zahlreiche Mineralien und Mineralparagenesen sind charakteristisch für bestimmte Druck- und Temperaturverhältnisse (vgl. dazu Fig. 2). NIGGLI (1960, 1965) wählt faziesempfindliche Mineralien («index minerals») und untersucht ihr Vorkommen: Es ergeben sich deutlich voneinander abgrenzbare Mineralzonen.

Der Anorthitgehalt von Plagioklas in Karbonatgestein ist von der Kristallisationstemperatur bestimmt. Voraussetzung für das einwandfreie Funktionieren des Thermometers ist das Bestehen eines Gleichgewichts zwischen Calcit und Plagioklas. Die Isograde geben ein Bild des Temperaturzustandes in einem Zeitpunkt, der wohl mit der Phase der stärksten Erwärmung zusammenfallen dürfte.

Die H-Gehalte der Kluftquarze, ein Spurengleichgewicht (die «Löslichkeit» von H im Gitter von Quarz ist eine Funktion der Temperatur), erhält einen späten Temperaturzustand. Die Daten von BAMBAUER et al. sind wohl deshalb geologisch schwer zu deuten und streuen stark (nur mit Mühe lassen sich einigermassen signifikante Kurven ziehen), weil neben der relativ geringen Anzahl von Proben die Altersfrage nicht berücksichtigt wurde. Die Kristallisation von Kluftquarz hat früh begonnen und hielt lange an. Verschiedene Generationen von Quarz in derselben Kluft sind häufig, man denke etwa an abgebrochene und wieder verheilte Kristalle. Wie verhält sich wohl der H-Gehalt – indirekt also die Temperatur – bei zeitlich verschiedenen gebildeten Quarzen?

Zwischen der Kristallisation von Feldspat und derjenigen von Kluftquarz hat sich der Wärmedom verschoben. Wir verzichten auf Spekulationen über mögliche Gründe, am ehesten werden hier Altersdaten und thermische Berechnungen Hinweise geben.

Die Temperatur ist ein Skalar und wird durch eine einzige Zahl beschrieben. Anders verhält es sich mit Vektoren und Tensoren, wo neben dem Betrag noch eine Richtung, in welcher die Grösse wirkt, angegeben werden muss. Wir haben bislang Abbildungen von Beträgen kennengelernt; es ist das einmalige Verdienst SANDERS, zum ersten Mal Abbildungen von Richtungen erkannt zu haben: Er postulierte, dass die Stress- und Strainsymmetrie im Gestein abgeprägt wird (1911; spätere wichtige Arbeiten: SANDER 1950, PATERSON und WEISS, 1961). Diese Hypothese hat sich glänzend bewährt und ist durch experimentelle Untersuchungen bestätigt worden.

Als Illustration der Symmetriearrangemente eignet sich wiederum das Lepontin. Das Stressfeld während der Hauptkristallisation wird im Korngefüge durch die Orientierung der Glimmer- und Karbonatkristalle (Fig. 4; aus E. WENK und TROMMSDORFF (1965) und TROMMSDORFF und H. R. WENK (1965)), im mesoskopischen Bereich durch Lineation, Fältelung und Schieferung abgebildet. In der Strukturkarte der Tessiner Alpen hat E. WENK (1955) den Verlauf der Lineation regional dargestellt.

Ein grundlegend verändertes Bild zeigt die Korngefügesymmetrie der Spätkristallitate. In [0001]-Diagrammen von Quarzgefügen aus Linsen ist eine starke Unterbesetzung in b (der Richtung der regionalen Lineation) erkenntlich (Fig. 5,

vgl. H. R. WENK, 1965). Die Symmetrie ist in erster Näherung C_∞ mit b als Symmetrieebene, ganz anders also als zur Zeit der Glimmer- und Calcit-Kristallisation, wo wir s-Tektonite mit einem [0001]-Maximum in Gefüge-c feststellten (Fig. 4). Im Quarzgefüge ist der Spannungszustand der Schlussphase der Orogenese abgebildet, nachher ist das Korngefüge vollständig eingefroren und wurde nicht mehr wesentlich verändert.

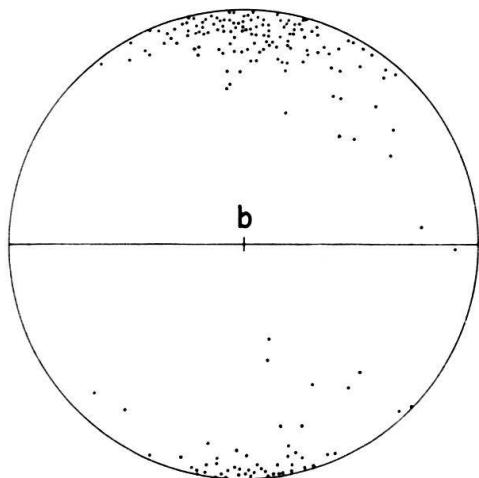


Fig. 4a. Biotit-Oligoklas-Alkalifeldspat-gneiss, Strasse nach Trasquera NW Berto-nio. 200 Glimmer-Blättchen-normalen, ac-Schnitt (aus E. WENK und V. TROMMS-DORFF, 1965).

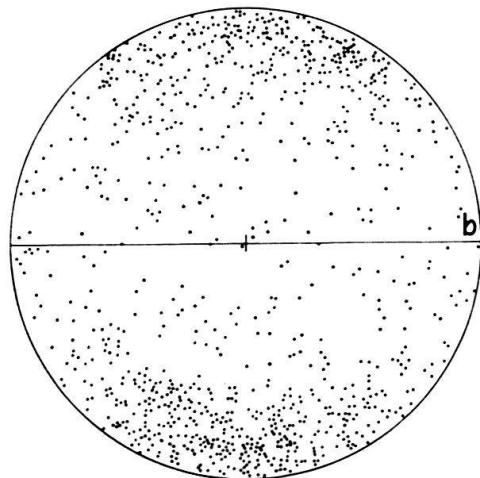


Fig. 4b. Dolomitischer Marmor, Stein-bruch Enso bei Crevola d'Ossola. 955 [0001] von Dolomit, bc-Schnitt (aus V. TROMMSDORFF und H. R. WENK, 1965).

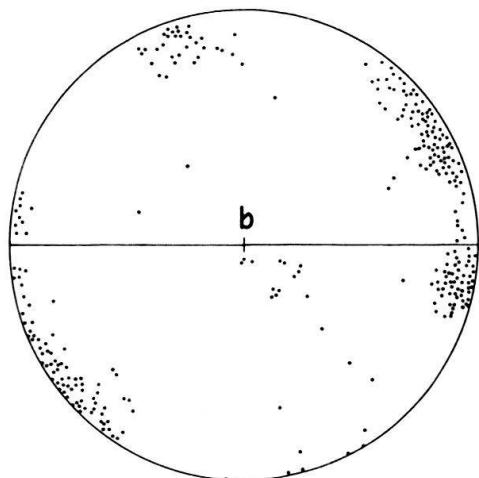


Fig. 5a. Quarzlinse aus Leventina-Gneiss, Steinbruch Lodrino. 556 [0001] von Quarz, ac-Schnitt (aus H. R. WENK, 1965).

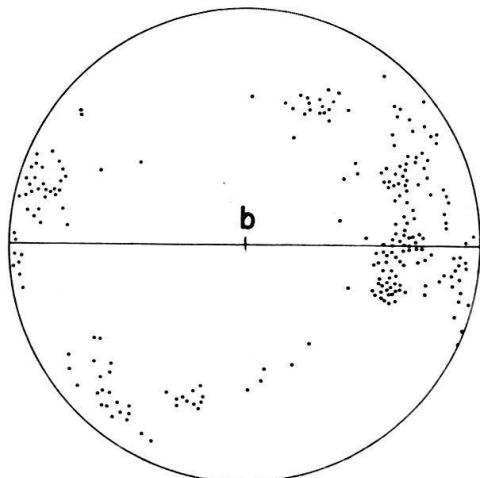


Fig. 5b. Quarzlinse aus Injektionsgneiss, N Pte. Brolla am Kanal. 306 [0001] von Quarz, ac-Schnitt (aus H. R. WENK, 1965).

Allerdings gibt es einen Indikator, der die jüngsten Spannungsverhältnisse anzeigt. Wir sprachen vorhin von Spaltung; neben den Klüften, die überbrückt werden müssen, gibt es nun auch solche, die zu messen sind. Sicher zu Unrecht sind sie von Petrographen und Geologen vernachlässigt worden. Tafel I zeigt den Verlauf der wichtigsten Kluftsysteme in den Zentralalpen. Erstaunlich ist die Konstanz im westlichen Teil, wo die Klüfte Helvetikum (an der Lötschbergrampe), Permocarbon (im Oberwallis), Bündnerschiefer und Lepontin gleichmäßig in NW-SE-Richtung

durchziehen und erst gegen die Tessiner Kulmination hin unregelmässig werden. Ob dasselbe System auch im östlichen Rahmen des Lepontins vorherrscht (was wir auf Grund der bisherigen Daten vermuten) oder ob das Hauptkluftsystem radial zum Alpenbogen verläuft und grosstektonische Spannungsverhältnisse abbildet, muss auf Grund weiterer Messungen entschieden werden. Im Osten ist das Kluftbild jedenfalls bei weitem nicht so gleichmässig wie im Westen; lokale Störungen sind häufig. Um die grosse Regelmässigkeit zu verstehen, sehen wir die Ursachen in konstanten Krustenspannungen, die schon lange bestanden und die oberen Bereiche stets in dieser bevorzugten NW-SE-Richtung aufreissen lassen.

STALDER (1964) fand im Grimselgebiet parallel dazu verlaufende Kluftscharen herzynischen Alters, REINHARD (1966) beschreibt parallele Pegmatite im Gebiet östlich von Domodossola, WIELAND (1966) beobachtete im V. Isorno parallele Störungen mit verstellter Schieferung aber durchgehender Lineation, anderseits fand STRECKEISEN (1965) im Simplongebiet junge Störungen (T), die in ihrer Richtung mit den Klüften übereinstimmen.

Gegen Osten zu tritt im Bereich der Kerngneisse von Val Antigorio bis zur Leventina sehr deutlich ein W-E-streichendes System auf. Es klingt sowohl im Norden gegen die Massive als auch im Süden gegen die insubrische Linie ab. Ein enger Zusammenhang mit der lepontinischen Metamorphose ist kaum zu bestreiten. Charakteristisch sind einige Gebiete, in denen die Klüfte unregelmässig streuen (z. B. Campolungo-P. Campo Tencia, Passo S. Giacomo-Kastelhorn). Zum Teil sind dafür wohl alte Störungen verantwortlich. Die Klüfte des Seengebirges und der südlichen Kalkalpen sind deutlich ausserhalb des Homogenitätsbereichs der alpinen Kluftgenese.

Wir halten die grundsätzlichen Unterschiede im Kluftbild von Lepontin und Rahmengebieten fest, verzichten aber vorläufig auf eine genetische Deutung der Erscheinungen: Dazu sind Detailuntersuchungen nötig. Bloss einige Probleme seien beleuchtet.

Im Gegensatz etwa zu Lineation und Schieferung sind Klüfte nur statistisch homogen und nicht stetig. Klüfte bilden wie Korngefüge statistisch homogene Diskontinua (vgl. H. R. WENK, 1966), was eine raumgruppen-theoretische Betrachtung nahelegt: Neben der Richtung sollte auch die Translationsperiode, welche von mm bis Dm schwanken kann, beachtet werden. Bei Diskontinua ist es nur bedingt sinnvoll, zwischen zwei Kluftrichtungen eine dritte zu interpolieren. Aus einer Reihe von Messungen muss jeweils der Mittelwert genommen werden.²⁾

Auffallend ist die ausserordentliche Konstanz im Streichen, welcher eine starke Variabilität im Fallen (gewöhnlich um die Vertikale) gegenübersteht. Flache Kluftsysteme sind selten, was sicher nicht nur durch den Schnitteffekt bedingt sein kann. Man findet sie im Süden (Seengebirge), im Maggialappen und teilweise in den Kerngneisskörpern.

²⁾ Bei der Einmessung von Systemen am Aufschluss dürfen nur Klüfte berücksichtigt werden, die in Parallelscharen vorliegen. Eine Verwertung sämtlicher Klüfte ist statistisch falsch und führt meist zu scheinbar isotroper Verteilung. Bei schlechter Kluftung (z. B. in Granitkomplexen) wählt man mit Vorteil Klüfte mit besonderen Kennzeichen aus (Chloritbelag, Rutschharnisch). Die Konstanz dieser genetisch verwandten Klüfte ist oft erstaunlich und passt zum Teil ausgezeichnet ins grosse Bild (z. B. Göschenen Alp).

Die petrographischen Verhältnisse, kaum von Einfluss auf die Lineation, sind für Klüfte von entscheidender Bedeutung: Klüfte in alpinen Amphiboliten, auch in feinkörnigen Marmoren, Kalksteinen und Quarziten sind ausnehmend parallel, regelmässig und weisen kleine Translationsperioden auf; in Kerngneissen, besonders in Migmatitkomplexen, fehlen oft gemeinsame Richtungen. Die Klüfte sind verbogen, ihre Richtung ändert sich über kurze Distanzen. Stellenweise trifft man dafür die sehr charakteristischen, vollständig parallelen «Zerrklüfte», oft mit Chloritfüllung und ausgebleichtem Saum. Ihre Verbreitung ist lokal; bei Bagni di Craveggia (Onsernone) wurde z.B. beobachtet, wie zwei derartige Systeme von Zerrklüften mit benachbarten Scherkluftsystemen (Distanz etwa 100 m) der insubrischen Störung völlig übereinstimmen.

Fragen, die sich im Zusammenhang mit den Klüften stellen, sind zahlreich: Wir gehen stichwortartig auf einige Punkte ein:

- 1) Sind idiomorphe Kluftmineralien vorhanden und was für welche? Eine statistische Studie würde wohl endlich Licht auf die Frage der Verbreitung alpiner Kluftmineralien werfen.
- 2) Sind die Klüfte ausgefüllt (z.B. mit Quarz, Calcit, Chlorit, Epidot)?
- 3) Sind die Kluftsäume ausgebleicht?
- 4) Existieren Rutschharnische? Haben Translationsbewegungen stattgefunden und wenn ja in welchen Beträgen? Es stellt sich dabei speziell das Problem, alpine Zerrklüfte (wohl vorwiegend durch Abkühlungsspannungen entstanden) von Scherklüften, die zahlenmässig überwiegen, unterscheiden zu können.
- 5) Lassen sich relative Altersbeziehungen feststellen, etwa beim Schnitt mit einem zweiten System oder mit Gängen? Interessant wäre auch die Frage des absoluten Alters der Kluftmineralien; zahlreiche Indizien weisen darauf hin, dass diese bis in jüngste Zeiten entstanden.
- 6) Die Beziehung der Kluftrichtung zu den Gefügerichtungen. Aus den elastischen Konstanten der Gesteine und der relativen Kluftlage kann der Stress beim Aufreissen berechnet werden³⁾. Klüfte, die senkrecht zur Lineation verlaufen, sind häufig, doch sollte daraus nicht ohne weiteres ein Zusammenhang zu dieser hergeleitet werden. Das Beispiel des westlichen Rahmens zeigt, dass hier Klüfte unabhängig von Lineation und Schieferung mit grosser Konstanz verlaufen.

Die verschiedenen Aspekte sollten regional untersucht werden, Detailstudien sind unbedingt notwendig und werden auch interessante Ergebnisse für Mineralogen, Geologen, Tektoniker, Geophysiker und last not least für morphologisch arbeitende Geographen zeitigen. Es ist erstaunlich, dass man diese im Landschaftsbild so bedeutungsvollen geologischen Elemente vielfach übersehen hat.

Der Geologe hat das Bild erkannt, er hat Anorthitgehalte und Isotopenalter bestimmt, er hat Lineationen und Kristallachsen gemessen: Wie ist sein weiteres Vorgehen?

Wie schon eingangs erwähnt, muss er die Projektion kennen, um sich eine adäquate Vorstellung der Vergangenheit machen zu können. Dazu gibt es prinzipiell drei Wege:

³⁾ Darauf hingewiesen, wurde schon von GRUBENMANN (1910) p. 109 (Querklüfte-Zerrklüfte, Längsklüfte-Scheerklüfte).

- 1) Der empirische Weg benutzt Analogien zu anderen Lokalitäten, wo die Verhältnisse besser bekannt sind und einfachere Bedingungen herrschten und zu rezenten Vorgängen (Aktualitätsprinzip). Die Methode braucht bereits bekannte Modelle, ist also stets mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Dennoch ist es die am meisten verbreitete und sicher auch zuverlässigste Methode, wenn man sich auf qualitative und relative Aussagen beschränkt, andernfalls wird sie gefährliche Spekulation.
- 2) Der experimentelle Weg gewinnt derzeitig an Bedeutung. Geologische Druck- und Temperaturbedingungen können schon gut reproduziert werden; lediglich die Zeit – leider ein äußerst wichtiger Faktor – kann kaum größenordnungsmässig angenähert oder extrapoliert werden. Sie wird der experimentellen Forschung immer Grenzen setzen.
- 3) Die theoretische Methode ist an und für sich ein sicherer Weg: Auf Grund physikalischer Gesetze wird ein Vorgang berechnet. Da aber die geologischen Vorgänge äußerst komplexer Art, und die Randbedingungen meist nicht genügend bekannt sind, ist der mathematische Aufwand oft viel zu gross und kann selbst von den schnellsten Computern nicht bewältigt werden. Die theoretische Lösung bleibt ein hohes Ziel, sie ist aber in ihrer Durchführbarkeit eingeschränkt; man wird sich immer auf stark vereinfachte Modelle beschränken müssen. Gerade den Geologen, die ungleich schwerere Probleme bewältigen müssen als die Physiker, gebietet es an guten Mathematikern.

Betrachten wir zum Schluss die Interpretation geologischer Abbildungen, das Endziel jeglicher Forschung, wiederum am speziellen Beispiel der Spannungsverhältnisse während der lepontinischen Orogenese.

Projektionen ergeben sich hier aus theoretischen Berechnungen: Für Rekristallisation von Mineralien unter Stress hat KAMB (1959) nach den Gesetzen der Thermodynamik ermittelt, dass sich Glimmer mit der Blättchen normale, Calcit und Dolomit mit [0001] in die Hauptstressrichtung einstellen, [0001] von Quarz jedoch einen Gürtel normal zur Hauptkompression bildet. Die Unterschiede in der Orientierung sind durch die elastischen Konstanten der verschiedenen Mineralien bedingt. Stimmen die Berechnungen und gelten sie für die Bedingungen während der Quarzkristallisation, so gibt uns das Quarzgefüge nicht nur eine Abbildung der Symmetrie, sondern ebenfalls der vektoriellen Richtungen der Spannung. Für die Zentralalpen ergibt sich somit aus den Stressabbildungen eine grosso modo EW-Kompression während der Hauptkristallisation (Lineation und Fältelung werden am einfachsten durch tangentiale Pressung erklärt). Nachher ändern sich die Verhältnisse, indem während der Quarzkristallisation die Hauptkompressionsrichtung parallel zur Lineation liegt, was wir aus den ac-Gürteln folgern.

Eine geologische Interpretation dieser Tatsachen führt etwa zu folgendem Modell (Fig. 6, vgl. H. R. WENK, 1965), das kritisch diskutiert werden muss, denn es geht um Tektonik und hier ist die Dialektik, das Wechselspiel von These und Antithese, die Methode des Historikers massgebendes Element.

EW-Kompression, möglicherweise bedingt durch den Druck der sich an der Tessiner Kulmination teilenden Decken und durch die Symmetrie des Alpenbogens, führt zu einer Längung der Gesteine in b, die sich besonders deutlich an Konglomeratgneisen beobachten lässt: ursprünglich runde Gerölle sind heute meterlange Schwänze. Durch die Längung entstehen am Widerstand der relativ starren Massive

im Norden und des Seengebirges im Süden Reaktionskräfte, die sich als relative NS-Kompression auswirken, sobald die EW-Spannungen abklingen. Die Zusammenstauchung der Gesteine mag für die Entstehung der Schlingenstrukturen im Norden (Maggia-Lappen) und Süden (Zone von Bellinzona) verantwortlich sein. Zu dieser Zeit, als die Hauptkompressionsrichtung parallel zur Lineation, der Richtung der grössten Längung lag, muss das Quarzgefüge kristallisiert sein.

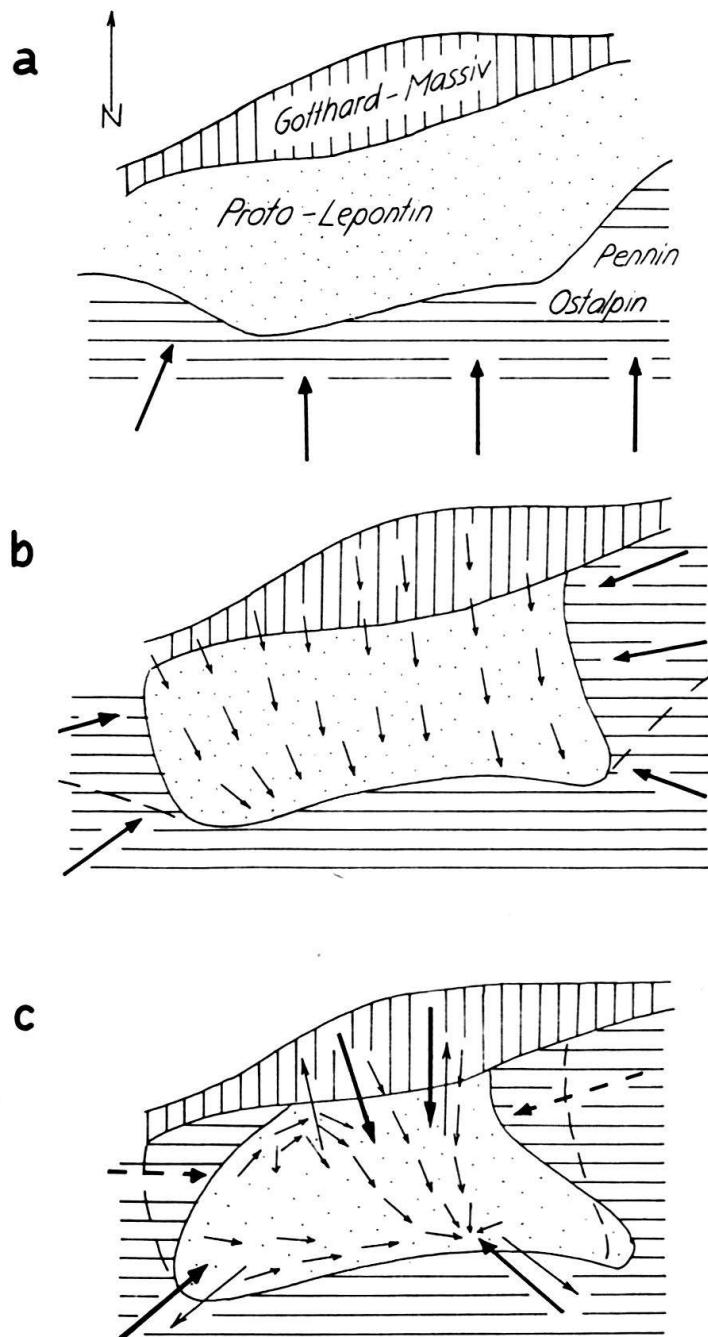


Fig. 6. Hypothetisches Stressmodell zur leontinischen Orogenese.

- a) Überschiebung der Decken von Süden.
- b) EW-Kompression führt zur Bildung einer NS-Lineation und einer Längung der Gesteine.
- c) Durch die Längung entstehen Widerstandskräfte im Norden und Süden. Die Zusammenstauchung verursacht eine NS-Kompression (Quarzkristallisation). Es entstehen Schlingenstrukturen (Matorello, Bellinzona).

Doch wir verlassen den sicheren Boden der Abbildung, wir verallgemeinern und spekulieren auf Grund von Spannungsbeobachtungen. Wir wollten lediglich an Beispielen die geologische Abbildung als System der Forschung zeigen.

Wir danken Prof. E. WENK (Basel) für kritische Diskussionen und die Überlassung eigener Daten und Herrn E. LAUTENSCHLAGER für die Ausführung von Reproduktionen. Die Kluftkarte enthält neben eigenen Messungen Beiträge von Prof. E. WENK, Dr. V. TROMMSDORFF, J. HUNZIKER, F. KELLER, B. REINHARD, M. JOOS und H. WIELAND (Basel) und Dr. H. U. NISSEN (Zürich). Allen sei an dieser Stelle für ihre Hilfe bestens gedankt, nicht zuletzt auch dem Militärdepartement, wurde mir doch nach langem Zögern erlaubt, eine Kluft im Gebiet der Festung Naters zu messen und gelang es mir auch während eines WKs einige nützliche Daten im Gotthardgebiet zu sichern.

Die Arbeit widme ich meinem Lehrer, Prof. F. LAVES (Zürich) zum 60. Geburtstag.

LITERATURVERZEICHNIS

- BAMBAUER, H. U., BRUNNER, G. O., und LAVES, F. (1962): *Wasserstoffgehalte in Quarzen aus Zerrklüften der Schweizer Alpen und die Deutung ihrer regionalen Abhängigkeit*. Schweiz. min. petr. Mitt. 42, 221–236.
- BOYD, F. R., and ENGLAND, J. L. (1960): *The Quartz-Coesite transition*. J. Geoph. Res. 65, 749–756.
- ESKOLA, P. (1921): *The mineral facies of rocks*. Norsk geol. tidskr. 6, 143–194.
- GRUBENMANN, V. (1910): *Die kristallinen Schiefer*. Berlin, Bornträger.
- KAMB, W. B. (1959): *Theory of preferred orientation developed by recrystallization under stress*. J. Geol. 67, 153–170.
- NIGGLI, E. (1960): *Mineralzonen der alpinen Metamorphose in den Schweizer Alpen*. Rep. Int. Geol. Congr. XXI. Session Pt. XIII, 132–138.
- NIGGLI, E., und NIGGLI, C. R. (1965): *Karten der Verbreitung einiger Mineralien der alpidischen Metamorphose in den Schweizer Alpen (Stilpnomelan, Alkali-Amphibol, Chloritoid, Staurolith, Disthen, Sillimanit)*. Eclogae geol. Helv. 58, 335–368.
- PATERSON, M. S., und WEISS, L. E. (1961): *Symmetry concepts in structural analysis of deformed rocks*. Geol. Soc. Am. Bull. 72, 841–882.
- REINHARD, B. (1966): *Geologie und Petrographie der Monte Rosa-Zone, der Sesia-Zone und des Canavese im Gebiet zwischen V. d'Ossola und Valle Loana (Prov. di Novara, Italia)*, Diss. Basel (im Druck).
- SANDER, B. (1911): *Über Zusammenhänge zwischen Teilbewegungen und Gefügen in Gesteinen*. Tschermaks. mineral. petr. Mitt. 30, 281–314.
- SANDER, B. (1948 und 1950): *Einführung in die Gefügekunde der geologischen Körper*, 1. und 2. Teil. Wien, Springer.
- STALDER, H. A. (1964): *Petrographische und mineralogische Untersuchungen im Grimselgebiet (Mittleres Aarmassiv)*. Schweiz. min. petr. Mitt. 44, 187–398.
- STRECKEISEN, A. (1965): *Junge Bruchsysteme im nördlichen Simplon-Gebiet (Wallis, Schweiz)*. Eclogae geol. Helv. 58, 407–416.
- TROMMSDORFF, V., und WENK, H. R. (1965): *Die Regelung des Dolomites von Crevola (Simplongruppe), Ergebnisse und Probleme*. Schweiz. min. petr. Mitt. 45.
- WENK, E. (1955): *Eine Strukturkarte der Tessiner Alpen*. Schweiz. min. petr. Mitt. 35, 311–319.
- (1962a): *Plagioklas als Indexmineral in den Zentralalpen*. Schweiz. min. petr. Mitt. 42, 139–152.
 - (1962b): *Das reaktivierte Grundgebirge der Zentralalpen*. Geol. Rundschau 52, 754–766.
- WENK, E., und TROMMSDORFF, V. (1965): *Parallelgefüge und Glimmerregelung im südöstlichen Teil der Simplongruppe*. Eclogae geol. Helv. 58, 417–422.
- WENK, H. R. (1965): *Gefügestudie an Quarzlinsen und -knauern der Tessiner Kulmination*. Schweiz. min. petr. Mitt. 45, 468–515.
- (1966): *Fehlbau in Quarzkristallen aus Tektoniten*. Contr. Mineral. and Petrol. 12, 63–72.
- WIELAND, H. (1966): *Geologie und Petrographie des Val Isorno (Novara Italia)*. Schweiz. min. petr. Mitt. 46, 189–303.

Manuskript eingegangen am 29. Oktober 1965

