Zeitschrift: Eclogae Geologicae Helvetiae
Herausgeber: Schweizerische Geologische Gesellschaft
Band: 69 (1976)
Heft: 2

Artikel: Die Quarzkristalle des Val d'Illiez : Zeugen spätalpiner Bewegungen
Autor: Mullis, Josef
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-164514

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: 15.12.2025

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

Eclogae geol. Helv.	Vol. 69/2	Seiten 343-357	6 Textfiguren und 2 Tabellen	Basel, Juli 1976

Die Quarzkristalle des Val d'Illiez – Zeugen spätalpiner Bewegungen

Von JOSEF MULLIS[1])

RÉSUMÉ

Les cristaux de quartz du Val d'Illiez comprennent des quartz prismatiques, des quartz à âme, des quartz-sceptres et des quartz à fenêtre (type Porretta). Ces variétés de quartz ont été prélevées dans des fissures du Flysch parautochtone du torrent de la Tille. Le développement de ces cristaux (4 générations) et de leurs inclusions fluides est étroitement lié à la genèse et à l'évolution des fissures. Alors que la morphologie des quartz reflète les moindres mouvements tectoniques des fissures, les inclusions fluides renseignent de façon assez précise sur la composition originelle de la solution-mère dans les fissures. Les inclusions fluides sont analysées par les méthodes de la chromatographie en phase gazeuse et de la microthermométrie. Grâce aux diagrammes PTX des systèmes H_2O, H_2O-NaCl et CH_4, on peut calculer les pressions et les températures minimales des différentes générations de quartz.

Les conditions T et P du début de la croissance des quartz à âme (température: 249 ± 3°C; pression: 1530 ± 165 bars) coïncident avec le domaine de stabilité de la laumontite, qui a été mise en évidence dans cette zone. Entre le début de la cristallisation et la fin de la deuxième génération de quartz, on constate au total une montée de la pression d'environ 300 bars, ce qui peut être interprété comme résultant de l'accroissement de contraintes tangentielles. Chaque fois que le seuil de rupture est dépassé, d'importantes chutes de pression (70–1200 bars) se produisent dans les fissures, soulignant ouvertures et élargissements consécutifs à ces mouvements tectoniques.

ABSTRACT

Quartz crystals from Val d'Illiez comprise prismatic individuals, prismatic quartzes with a white stripe, sceptres and skeletal forms (Porretta Type). These different habits have been collected from Alpine clefts in Parautochthonous Val d'Illiez Flysch. Crystal growth (4 generations) and contemporaneous fluid inclusions are closely related to the tectonic evolution of the Alpine clefts. Crystal morphology reflects even small tectonic movements of Alpine clefts, and fluid inclusions record quite precisely the original composition of solutions in the clefts. Fluid inclusions have been analyzed by gas-chromatography and microthermometry. Minimum pressures and temperatures of formation for the different growth generations of quartz have been calculated using PTX-diagrams for H_2O, H_2O-NaCl and CH_4.

Starting conditions (P, T) for growth of prismatic quartz with a white stripe (T: 249 ± 3°C; P: 1530 ± 165 bars) coincide with the stability field of laumontite which has been found in this region. Between the beginning of quartz growth and the end of the second generation of growth, pressure rose about 300 bars; this could be the result of build-up of tangential stress. Each time that the limit of rupture was exceeded, an important pressure decrease in the cleft resulted (70–1200 bars); thus opening and enlarging processes were a consequence of tectonic events.

[1]) Institut für Mineralogie und Petrographie der Universität, CH-1700 Freiburg.

1. Einleitung

Die Morphologie der Quarzkristalle vom Val d'Illiez und deren Flüssigkeits- und Gaseinschlüsse verdienen eine besondere Aufmerksamkeit. Sie wurden durch POTY & STALDER (1970), STALDER & TOURAY (1970) und FREY (1973) im regionalen Rahmen bearbeitet. Eine erste Detailuntersuchung der Einschlüsse erfolgte durch MULLIS et al. (1973). Weitere Forschungsarbeiten führten zur Aufdeckung der Beziehungen zwischen den Einschlüssen, der Wachstumsgeschichte der Quarzkristalle und der Entstehung der Zerrklüfte (MULLIS 1975, 1976*a*/*b*).

Die vorliegende Arbeit widmet sich vor allem der *geologisch-tektonischen* Stellung quarzführender Zerrklüfte, wobei aufgrund der Verknüpfung von quarzmorphologischen Beobachtungen mit den Ergebnissen der Einschlussuntersuchungen die Ursachen und Folgen der Kluftentstehung näher gedeutet werden.

2. Geologie und Petrographie der Fundstelle

Die Quarzfundstelle liegt im westlichen Teil der Schweizer Alpen, an der Basis des parautochthonen Flysches vom Val d'Illiez, der von helvetischen und ultrahelvetischen Deckeneinheiten der Dents du Midi überlagert wird (Torrent de la Tille, Val d'Illiez, Koord.: 559.700/118.160, Landeskarte der Schweiz, Blatt 1304, Val d'Illiez).

Die anstehenden Gesteine bestehen aus grösseren Tonschiefer-Einheiten und mächtigen Wechselabfolgen von harten Sandsteinbänken mit weichen Tonschiefern; sie wurden von SCHROEDER & DUCLOZ (1955) als parautochthoner Flysch gedeutet und ins Rupélien gestellt. Sandstein und Tonschiefer enthalten die gleichen Minerale; unterschiedlich ist der Anteil an Quarz und Hellglimmer, was sich in den chemischen Analysen (Tab. 1) widerspiegelt.

Der Dünnschliff zeigt, dass Quarz, Calcit und Hellglimmer die Hauptgemengteile darstellen. *Quarz,* von unregelmässiger, eckiger Form, ist häufig korrodiert und rekristallisiert, ein Phänomen, das vor allem in den schiefrigen Partien zu beobachten ist. Seine Korngrösse reicht von 20–80 μ (in den Tonschiefern) bis zu 50–500 μ (in den Sandsteinen). Die c-Achsen der Quarzkörner sind statistisch im Gefüge verteilt. *Calcit* ist fein- bis grobkörnig ausgebildet und liefert den Hauptteil des Zements. Die *Hellglimmer* liegen parallel dem sedimentären Primärgefüge und sind durch Scherung s-förmig verbogen. Bei den Nebengemengteilen ist der *Plagioklas* häufig serizitisiert und Biotit teilweise durch *Chlorit* ersetzt. Zu ihnen gesellen sich *Mikroklinperthit,* amorphe, meist chloritisierte Körner, sowie opake Substanz, die mehrheitlich als kohlig-bituminöser Bestandteil gedeutet werden kann. Zusammen mit den Mineralkörnern finden sich zusätzlich kleine Fragmente von vorwiegend quarzitischer Zusammensetzung. Als Kriterien der Polarität des Sedimentgesteins sind gradierte Schichtung, Kreuzschichtung und Slumping erkennbar.

3. Tektonische Stellung der Flyschgesteine

Die Fundstelle der Quarzkristalle liegt unmittelbar über dem tektonischen Kontakt der autochthonen Molasse zum parautochthonen Flysch. Die Gesteine

Tabelle 1: *Chemische Analysen von 3 Gesteinsproben aus dem Nebengestein von 3 Klüften im Torrent de la Tille*

Gestein	Tonschiefer	Feinkörniger Sandstein	Mittelkörniger Sandstein
Nr.	TT 31.1.3.1.A	TT 35.1.3.1.	TT 46.1.1.1.
in Gew.-%			
SiO_2	57.63	63.31	69.63
Al_2O_3	16.67	10.63	8.14
Fe_2O_3 total	5.69	4.25	2.94
MnO	0.02	0.06	0.06
MgO	3.70	3.24	3.58
CaO	2.46	5.53	5.04
Na_2O	1.51	1.60	1.59
K_2O	3.43	1.75	1.45
TiO_2	0.99	0.54	0.30
Glühverlust	6.60	7.67	7.37
Total	98.70	98.58	100.10
Spuren-Elemente in ppm			
Ba	537	291	326
Co	15	14	31
Cr	196	127	424
Cu	33	17	12
Ni	63	45	178
Sr	157	209	112
V	145	70	63

Die Analysen wurden im Laboratorium für Spektrographie am Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques, Nancy, unter der Leitung von K. Govindaraju ausgeführt.

fallen 20–50° SE ein, und die gemessenen Faltenachsen folgen dem axialen SW-Abtauchen der darüberliegenden Morcles-Decke (DE LOYS & GAGNEBIN 1928) (Fig. 1). In diesem störungssensiblen Kontaktbereich zweier tektonischer Einheiten können die früh- und spättektonischen Deformationen leicht auseinandergehalten werden (Fig. 2). Erstere dürften genetisch mit der SE-NW-Überschiebung der darüberliegenden Decken zusammenhängen, während letztere auf spätalpine Bewegungen zurückzuführen sind. Infolge dieser Bewegungen kam es zur Bildung der untersuchten alpinen Klüfte.

a) Frühtektonische Strukturen

In den Abfolgen von harten Sandsteinen mit zwischengelagerten Tonschiefern erkennt man einen vorwiegend harmonischen Faltenstil von konzentrischen und ähnlichen Biegefalten. Grössere Tonschiefer-Einheiten reagierten zusätzlich mit der Ausbildung lokaler Isoklinalfalten. Der ganze Beobachtungsraum ist von *Scherungszonen* verschiedenen Alters überprägt. Die frühesten von ihnen hängen offensichtlich mit der Verfaltung und Überschiebung des Gesteins zusammen. Auf ihnen wurden die Flysch-«Pakete» relativ zueinander bewegt und schuppenartig aufeinandergeschoben. Dabei wurden die harten Sandsteinbänke sehr häufig zu Scherungslinsen zerlegt und nordwärts bewegt; die Tonschiefer verhielten sich plastisch und dienten den Scherungslinsen als Gleithorizonte. Gleichzeitig hatten diese Ereignisse eine Verschieferung der Gesteine ± parallel dem Primärgefüge zur

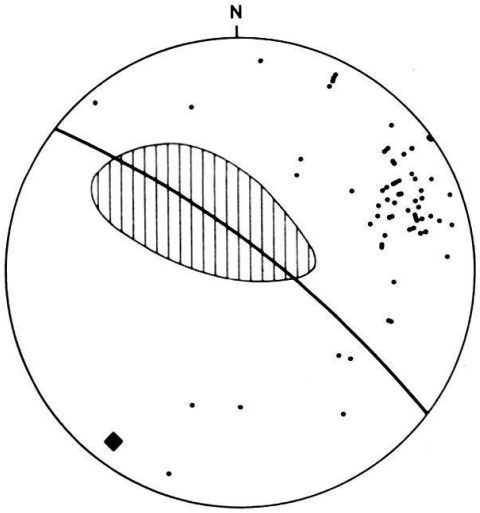

Fig. 1. Geländedaten im Schmidt'schen Netz (untere Halbkugel).

Grosskreis = π-Kreis. Quadrat = Faltenachse der Hauptfalten. Schraffierter Sektor = Lage der s_0 (in unmittelbarer Kluftnähe gemessen). Punkte = Pole von 67 eingemessenen Kluftflächen.

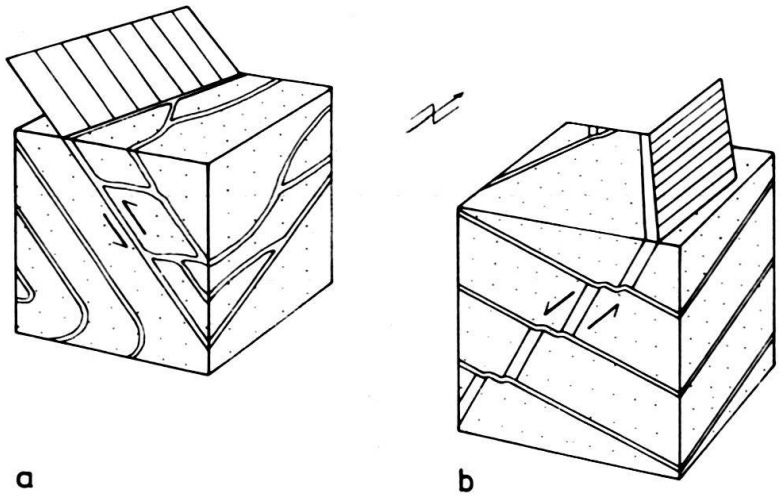

Fig. 2. Darstellung der früh- und spättektonischen Bewegungsphasen im Blockdiagramm.

a) Frühtektonische Strukturen: Falten, Schuppen, Schieferung (Bewegungsrichtung SE-NW).
b) Spättektonische Strukturen: Zerrklüfte (Bewegungsrichtung NE-SW).

Folge. Dies kann vorzüglich bei tonigen Gesteinen beobachtet werden. Dort sind die Hellglimmer durch Scherung sigmoidal ausgelängt und zeigen somit den Verlauf der Schieferung an. Eine metamorphe Neueinregelung der Glimmer scheint aber nicht erfolgt zu sein, da sie immer noch den feinen, sedimentären Slumping-Fältelungen folgen. Hingegen kann der dunkle Glanz der schiefrigen Oberflächen eine Neukristallisation der Glimmerminerale infolge niederer Metamorphose vermuten lassen.

b) Spättektonische Strukturen

Die meisten Zerrklüfte der Fundstelle wurden im Laufe der letzten alpinen Bewegungen geöffnet. Diese zeitliche Stellung kann aus folgenden Beobachtungen abgeleitet werden:

1. Das Wachstum der Fadenquarze erfolgte gleichzeitig mit der Öffnung der Klüfte. Dabei bildet der Fadenquarz das Aufreissen der Klüfte und den weiteren Verlauf der relativen Bewegungen der Kluftwände zueinander wie folgt ab: Die Quarzkörner an der Grenze vom Gestein zur beginnenden Kluft werden durch scherende Spannungseinwirkung ein erstes Mal gebrochen und in der Folge verheilt. Der Gesteinsquarz wächst nun als Kluftquarz weiter. Während rhythmisch wiederkehrende Spannungseinwirkung den Kluftraum um geringste Beträge vergrössert, wird der von Kluftwand zu Kluftwand gespannte Quarzkristall bei jedem Klufterweiterungsimpuls erneut gebrochen und wiederum - meist unvollständig - verheilt (LAEMMLEIN 1946).
   Aus der aktuellen Lage der aufgewachsenen Fadenquarze in den Zerrklüften lassen sich die ursprünglichen Spannungsvektoren der Kluftöffnung ableiten: Diese sind gleichsam in der Quarzorientierung fossil erhalten geblieben (vgl. DURNEY 1972). Hierbei ist zu beobachten, dass sich - ungeachtet ihrer bevorzugten Lage in frühtektonischen Strukturen - $^2/_3$ aller Klüfte in S-, SW- und W-Richtung öffneten. Wären diese Klüfte jedoch im Verlaufe frühtektonischer Bewegungen gebildet worden, so hätten sie sich analog der Bewegungsrichtung der Scherungslinsen in SE–NW-Richtung geöffnet, was nur bei wenigen Boudin-Klüften (Fig. 3, Typ 2) der Fall ist.
   Einige Klüfte öffneten zwar in NE- und SE-Richtung; die nähere Untersuchung zeigt aber, dass *diese* Klüfte in überkippten Faltenschenkeln liegen. Anlässlich der gleichen spättektonischen Bewegungen wurden diese Faltenschenkel «mitgeschleppt» oder «sackten ab» und verursachten so das Aufreissen solcher Klüfte (Fig. 3, Typ 8).

2. Die Quarzkristalle sind in den Klüften relativ gut erhalten geblieben. Hätten aber nach Abschluss der Quarzbildung noch spätere tektonische Ereignisse wie Deckenvorstösse, Hebung der Alpen etc. stattgefunden, wären einige Klüfte neu geöffnet und andere wiederum geschlossen worden. Ihr Inhalt wäre dabei zerbrochen und grösstenteils zerstört worden. Die gute Qualität der Quarzkristalle in den Klüften widerspricht daher der Annahme einer später erfolgten tektonischen Überprägung der Klüfte.
   Daraus folgt, dass die zeitliche Stellung der Zerrkluftbildung *nach* den frühtek-

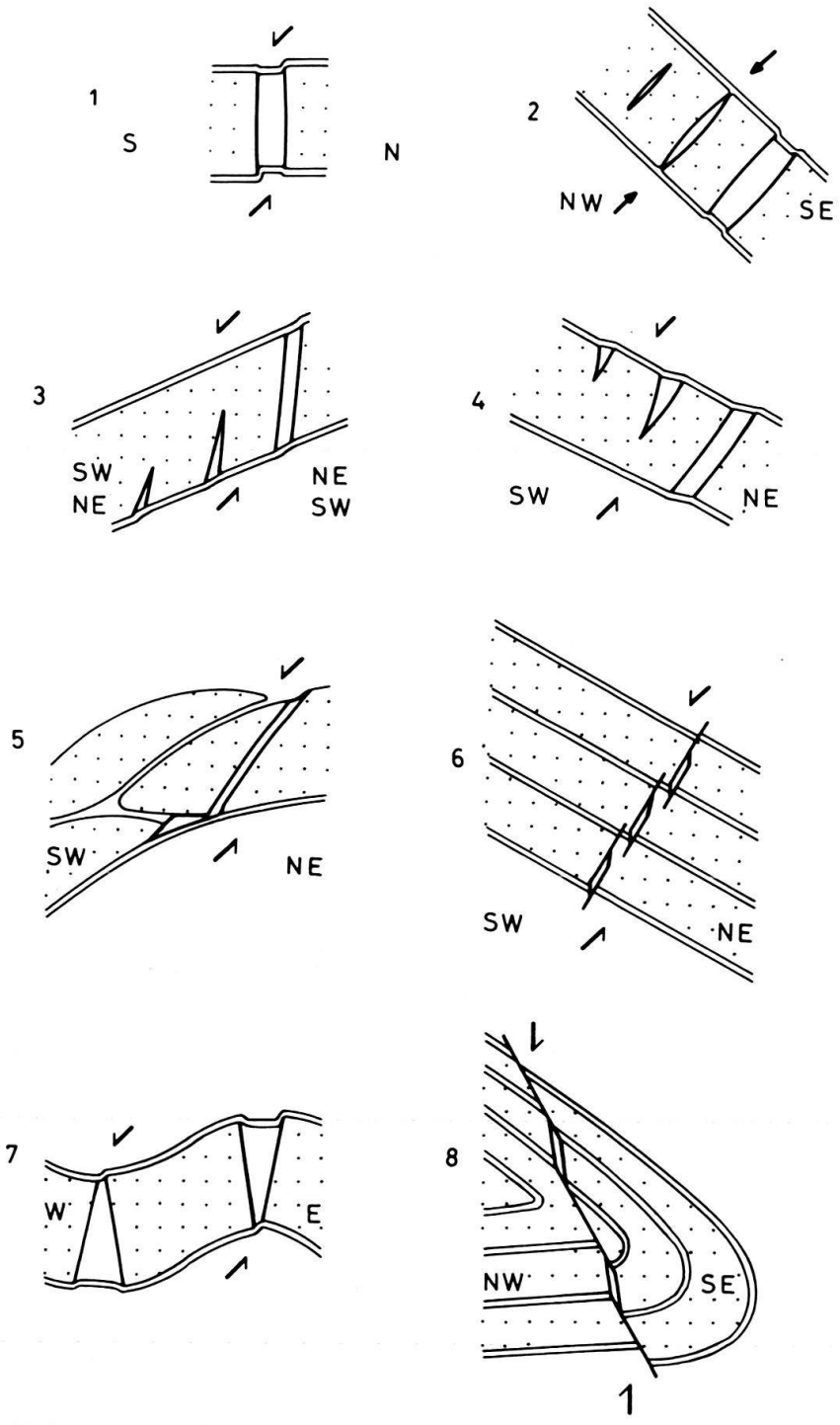

Fig. 3. Beobachtete Klufttypen im Untersuchungsgebiet.

1. Boudin-Klüfte	in horizontaler Struktur
2. Boudin-Klüfte	in geneigter Struktur
3. Kluftrisse rechtfallend	in geneigter Struktur
4. Kluftrisse gegenfallend	in geneigter Struktur
5. Kluftrisse in Scherungslinse	in geneigter Struktur
6. Fiederklüfte	in geneigter Struktur
7. A- und V-Klüfte	in gefalteter Struktur
8. Klüfte auf Bruchflächen	in gefalteter Struktur

tonischen Bewegungen und *vor* Ende der spättektonischen Bewegungen anzusetzen ist.

4. Zerrklüfte und Quarzwachstum

Die Klüfte des Val d'Illiez stellen eine besondere Art der alpinen Zerrklüfte dar. Sie sind ausschliesslich in den härteren Partien der Flyschgesteine anzutreffen. Boden und Dach der Klüfte bestehen gewöhnlich aus Sandstein, die Wände aus Schiefer. Es fehlen hier die üblichen Erkennungsmerkmale einer alpinen Zerrkluft wie Quarzband oder Chloritsand, und eine Auslaugungszone ist selbst im Dünnschliff nur schwer erkennbar. Nur in seltenen Fällen lässt der Austritt von Wasser oder Lehm eine Kluft vermuten. Oft kann in der Nähe einer Kluft die feine Einschnürung der schiefrigen Partien wahrgenommen werden. Allgemein aber ist das Vorkommen von Zerrklüften direkt an mechanisch günstige Strukturen frühtektonischer Anlagen, wie Flexuren, Falten, Scherflächen und spättektonische Brüche, gebunden. Der *Kluftraum* ist oft bis zur Hälfte mit feuchtem Lehm gefüllt, der häufig den Hauptteil des Fundgutes (derber Quarz, Fadenquarz, Zepter- und Fensterquarz) einschliesst. Die Quarze liegen daher oft nicht mehr an ihrem ursprünglichen Wachstumsort und können teilweise nur noch als Bruchstücke geborgen werden. Als Ursache hierfür sind tektonische Bewegungen während des Quarzwachstums, Dekrepitation von Methaneinschlüssen in den Quarzkristallen, nacheiszeitliche Bewegungen des Gesteins und Frostsprengung in den Klüften anzunehmen.

Unversehrte Klüfte bieten dem Auge des Strahlers einen herrlichen Anblick: Ein dichter Rasen von Fadenquarzen ragt von den Kluftwänden in den Kluftraum hinein. Oft tragen sie an ihren Enden zierliche Zepterformen, deren Flächen zum Kluftraum hin verzerrt sind (Fig. 5). Der obere Teil der Kluft enthält dann häufig extrem gefensterte Quarzkristalle. Die *Kluftgrösse* kann stark variieren, je nach der Mächtigkeit der Sandsteinbänke und deren tektonischen Lage. In Tabelle 2 sind die Vergleichsmasse einer kleinen, einer mittleren und einer grossen Zerrkluft aufgeführt. Die Länge ist dabei durch die längste Ausdehnung der Klüfte (= Kluftachse) und die Höhe durch die Öffnungsrichtung der Klüfte definiert.

Tabelle 2: *Grössenvergleich dreier repräsentativer Klüfte*

Kluft	kleine	mittlere	grosse
Länge	30 cm	110 cm	470 cm
Breite	3 cm	24 cm	65 cm
Höhe	6 cm	6 cm	14 cm
Kluft Nr.	59	23	54

Es sollen nun die *Klufttypen* näher besprochen werden. Sie gehören allgemein dem alpinen Zerrkluft-Typus an und können lokal in 8 Typen unterteilt werden. Diese Variation ist genetisch auf die unterschiedliche Lage der Gesteinsbänke im Spannungsfeld sowie die unterschiedliche Mächtigkeit und Härte der Sandsteinbänke zurückzuführen (vgl. MULLIS 1974). Die verschiedenartige Lage der Ge-

steinsbänke zu den kluftbildenden Kräften erklärt auch, weshalb praktisch keine ac-Klüfte auftreten und nur wenige als bc-Klüfte bezeichnet werden können. In Figur 3 seien die 8 häufigsten Klufttypen dargestellt.

Durch die *Öffnungsrichtung* der Klüfte und insbesondere die Lage der Fadenquarze in den Klüften kann - wie schon gezeigt - die Richtung der lokalen Spannungseinwirkung ermittelt werden. Sie streicht NE-SW und taucht ± parallel zur Faltenachse leicht gegen SW ein.

Die *Öffnung* der Klüfte erfolgte - wie vorausgehend beschrieben - beim Wachstum der Fadenquarze rhythmisch langsam. Geringste Klufterschütterungen sind auch während des Wachstums der prismatischen Kristalle anzunehmen. Diese Feinrhythmen wurden mehrere Male durch stärkere tektonische Bewegungen (Grossrhythmen) unterbrochen: Quarzkristalle zerbrachen dabei, und es lagerten sich Mineral- und Gesteinsbruchstücke auf den Flächen der Quarzkristalle ab (vgl. GRIGORIEV 1963). Ruckhafte tektonische Bewegungen dieser Art vergrösserten zunächst die Kluft-Hohlräume und hatten damit eine brüske Veränderung der Mutterlösung in den Klüften zur Folge. Das Gleichgewicht des wachsenden Kristalls mit seiner Mutterlösung wurde dabei gestört - der Quarzkristall begann sehr schnell zu wachsen und entwickelte Zepter- und Fensterformen. Detaillierte Ausführungen dazu entnehme man MULLIS (1976*a*/*b*).

Der beschriebene Vorgang hat sich dreimal wiederholt, so dass im ganzen 4 Quarzgenerationen entstanden. Figur 4 veranschaulicht das Wachstum der

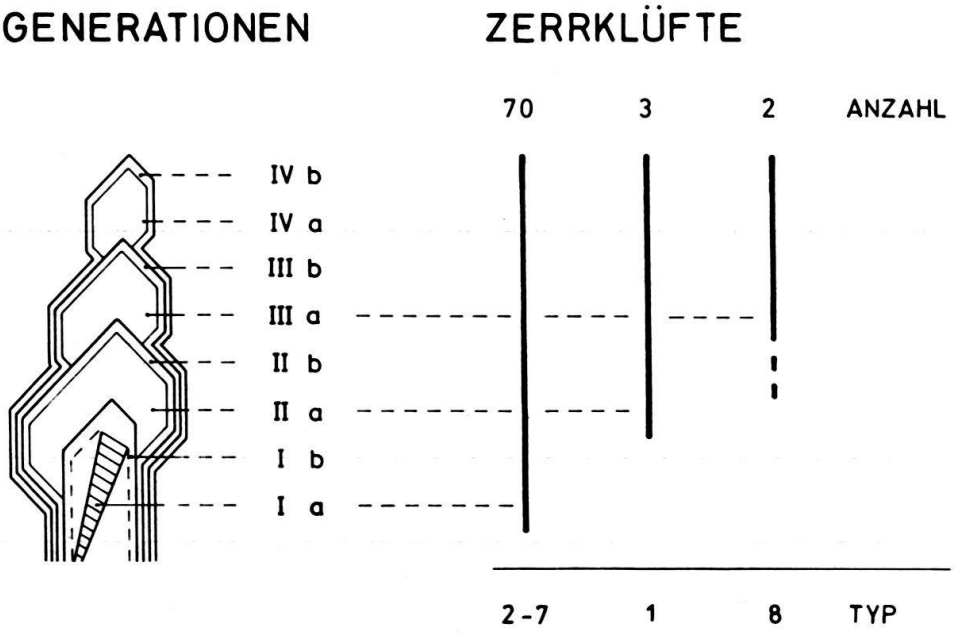

Fig. 4. Generationenwachstum der Quarzkristalle und ihre Beziehung zum Klufttyp.

Jede Quarzgeneration weist 2 Wachstumsstadien auf, ein Frühstadium mit der Ausbildung von Fadenquarz (Gen. Ia), Zepter- und Fensterquarz (Gen. IIa-IVa), und ein Spätstadium mit dem Wachstum von prismatischem Quarz (Gen. Ib-IVb).

In fast allen Zerrklüften sind 4 Quarzgenerationen zur Ausbildung gelangt. Wenige, tektonisch offensichtlich minder begünstigte Klüfte wurden später geöffnet und erlaubten die Kristallisation von nur zwei oder drei Quarzgenerationen (Klufttypen vgl. Fig. 3).

4 Quarzgenerationen, die in fast allen Klüften vorgefunden wurden. Wenige, tektonisch offensichtlich minder begünstigte Klüfte wurden erst zu Beginn der zweiten oder dritten Quarzgeneration geöffnet; es fehlen dann die Fadenquarze (Gen. I), und es wurden nurmehr die Quarzkristalle der späteren Generationen ausgebildet.

5. Quarzmorphologie, Flüssigkeits- und Gaseinschlüsse

Nachdem die Lage der Zerrklüfte im Raum aufgezeigt worden ist, sollen hier in kurzer Zusammenfassung diejenigen Ergebnisse morphologischer Untersuchungen und mikrothermometrischer Messungen mitgeteilt werden, die für die Themenstellung von Bedeutung sind (weiterführende Details sowie Fragen der Messmethodik sind den entsprechenden Arbeiten zu entnehmen: MULLIS 1975, 1976*a/b*).

Bei den Quarzkristallen des Val d'Illiez können *4 verschiedene Habitus* festgestellt werden:

— Normalprismatischer Habitus
— Prismatischer Quarz mit weissem Faden von Flüssigkeits- und Gaseinschlüssen (= Fadenquarz, Fig. 5)[2])
— Zepter-Habitus (Fig. 5)
— Skelett-Habitus (= Fensterquarz und Quarz mit extremem Kantenwachstum)

Diese Quarzhabitus kommen mit Ausnahme des Fadenquarzes (Gen. Ia) in allen 4 Quarzgenerationen vor (Fig. 4). Jede dieser Generationen weist 2 Wachstumsstadien auf:

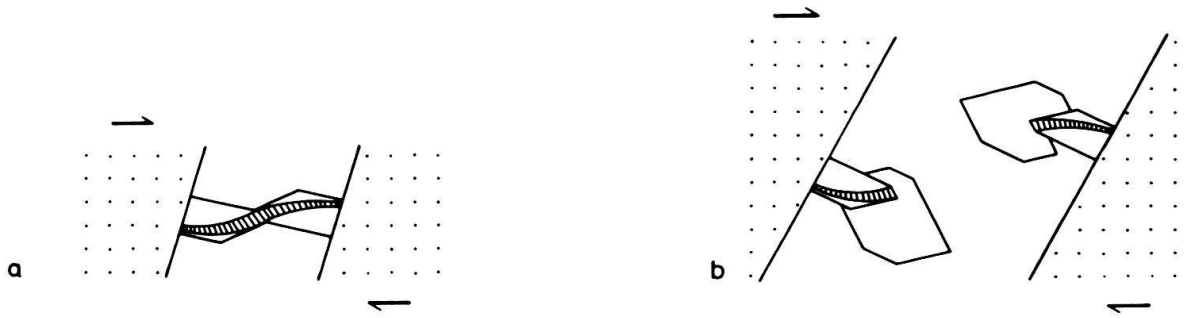

Fig. 5. Quarzkristallwachstum in einer Scherkluft.

	a	b
Kluftöffnungsrhythmus	langsam	schnell
Zusammensetzung der Mutterlösung	wässrige Kochsalzlösung mit 7,5 ± 1 Vol.-% gelöstem Methan. Mit fortschreitendem Fadenquarz-Wachstum kann der Methan-Anteil in der Kluft zunehmen	*Viel* Methan neben wässriger Kochsalzlösung
Kristallwachstum	Fadenquarz (und prismatischer Quarz)	Zepter- und Fensterquarz

[2]) Der Fadenquarz wurde zum ersten Mal durch LAEMMLEIN 1946 näher beschrieben; er entspricht den «Syntaxial» oder «Stretched» crystal growth fibers von DURNEY & RAMSAY (1973).

a) ein Frühstadium, bei tektonisch bewegtem Wachstumsmilieu, unterschieden in
   — ein rhythmisch langsames Wachstum der Fadenquarze (Gen. Ia)
   — und ein schnelleres Wachstum der Zepter- und Fensterquarze (Gen. IIa, IIIa, IVa)

b) ein Spätstadium, bei tektonisch ruhigem Milieu und langsamem Quarzwachstum. Dabei wurden die vorgebildeten Frühstadien mit einem prismatischen Quarzmantel umwachsen (Gen. Ib, IIb, IIIb, IVb).

Die *chemische Zusammensetzung der Flüssigkeits- und Gaseinschlüsse* wurde mit der Gas-Chromatographie und der Mikrothermometrie untersucht. Als Hauptkomponenten fanden sich CH_4, H_2O und NaCl. Die Ergebnisse von 2718 Einschlussmessungen in 101 Quarzkristallen von 8 ausgesuchten Klüften unterscheiden sich stark nach den vorhandenen Generationen und nur untergeordnet nach den verschiedenen Klüften.

Aus der mikrothermometrischen Einschlussanalyse ergaben sich folgende Informationen:

1. Dichte der Methaneinschlüsse anhand ihrer Homogenisierungstemperaturen (ZAGORUCHENKO & ZHURAVLEV 1970).

2. Kochsalzgehalt der wässerigen Einschlüsse aufgrund ihrer systematischen Gefrierpunktserniedrigung bei zunehmendem Salzgehalt (LANDOLT-BÖRNSTEIN 1960, ROEDDER 1962).

3. Minimale Bildungstemperaturen der Einschlüsse infolge konstanter Homogenisierungstemperaturen von Wasser und Methan in allen Quarzgenerationen.

4. Minimale Bildungsdrucke: Für wasserreiche Einschlüsse (Wachstumsstadien Ia_1, Ib, IIb, IIIb, IVb) kann die untere Druckgrenze durch Addition der Partialdrucke von Wasser und Methan ermittelt werden. Unter Berücksichtigung der Volumenanteile von Methan und Wasser, ihrer Dichten, ihrer Homogenisierungstemperaturen und der Kochsalzkonzentration in der wässrigen Lösung lassen sich die Partialdrucke nach den experimentellen Daten der vorhandenen Systeme mit grosser Annäherung errechnen (BURNHAM et al. 1969; LAEMMLEIN & KLEVTSOV 1961, ZAGORUCHENKO & ZHURAVLEV 1970). Für methanreiche Einschlüsse (Wachstumsstadien Ia_2, IIa, IIIa, IVa) kann die untere Druckgrenze durch Interpolation der Homogenisierungstemperaturen von Wasser und Methan unter Anwendung der experimentellen Daten von ZAGORUCHENKO & ZHURAVLEV (1970) ermittelt werden.

6. Diskussion der Messergebnisse

Wir wollen uns nachfolgend darauf beschränken, die Konstruktion einer Druck- und Temperaturkurve für die 4 Quarzgenerationen zu besprechen, um hernach eine Beziehung des Quarzwachstums zur Metamorphose herzustellen.

a) Temperatur

Aus Figur 6 ist ersichtlich, dass die Temperaturen, hier als minimale Bildungstemperaturen angesetzt, einen gleichmässigen Abfall bis zur letzten Wachstumsgeneration aufweisen. Die Homogenisierungstemperaturen von Wasser und Methan bleiben konstant innerhalb der Quarzgenerationen Ia_1, Ib, IIb, IIIb und IVb. Dies veranschaulicht deutlich, dass die eingeschlossene Mutterlösung zur Zeit ihres Einschlusses homogen war, so dass die Homogenisierungstemperaturen als minimale Bildungstemperaturen des Einschlusses und der betreffenden Quarzgeneration anzunehmen sind. Das bedeutet, dass die erste Quarzgeneration bei gleicher oder höherer Temperatur als 249°C und dass die letzte Quarzgeneration bei gleicher oder höherer Temperatur als 182°C kristallisierte (Fig. 6).

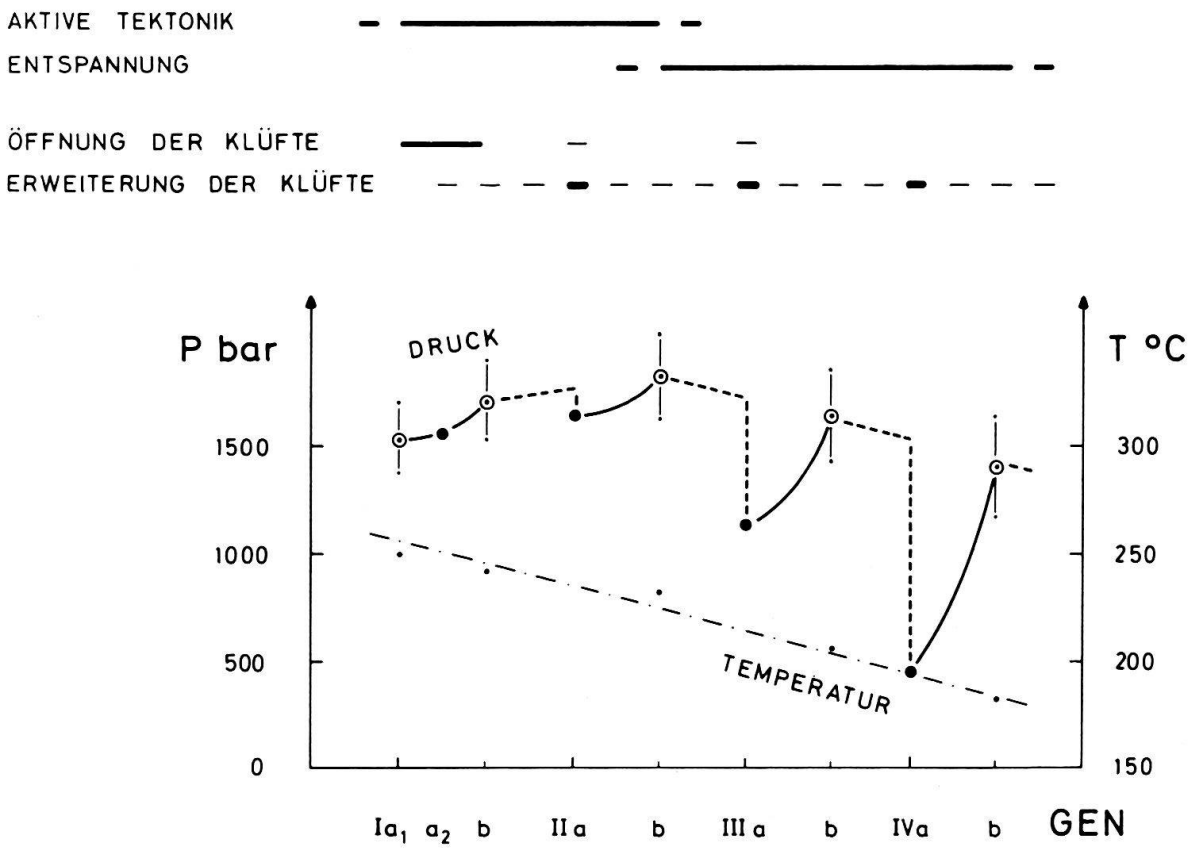

Fig. 6. Druck-Temperatur-«Generationen»-Diagramm vom Quarzwachstum in den Zerrklüften des Val d'Illiez und dessen Wechselbeziehungen zur Klufttektonik.

⊙ Druck im Faden- und prismatischen Quarz; >90 Vol.-% H_2O

● Druck im Faden-, Zepter- und Fensterquarz; >95 Vol.-% CH_4

Druckentwicklung, ermittelt auf der Basis der mikrothermometrischen Messdaten

Interpolierter Druckverlauf

Streubereich der Drucke

b) Druck

Beim Druckverhalten sind 2 verschiedene Tendenzen zu beobachten: ein allgemeines und ein sprunghaftes Druckverhalten. Das *allgemeine Druckverhalten* (von der ersten bis zur letzten Quarzgeneration) ist wie folgt gekennzeichnet: Der Druck der homogenen (wässerigen) Mutterlösung in den Klüften nimmt von der 1. Generation (1530 ± 165 bar) bis zur Generation IIb (1820 ± 195 bar) fortlaufend zu, um nun bis zum Ende des Quarzwachstums abzunehmen (1400 ± 235 bar). Nimmt man an, dass die homogene Mutterlösung in den Klüften dem Druck der Flüssigkeits- und Gasanteile im Gestein und diese ihrerseits dem Gesamtdruck des Gesteins entsprachen, können folgende Überlegungen über Ursachen und Folgen dieses Druckanstiegs angestellt werden: Ein Druckanstieg der fluiden Phasen[3]) infolge thermochemischer Prozesse bei der Bildung von Methan würde die naheliegendste Erklärung geben (HEDBERG 1974). Da aber seit Beginn des Kristallwachstums nur abnehmende Bildungstemperaturen festzustellen sind, muss die Ursache des Druckanstiegs im Gesteinsdruck gesucht werden.

Beim Übergang von der ersten zur zweiten Quarzgeneration beobachten wir eine zunehmende Methandichte in den Einschlüssen. Da nun überkritisches Methan mit zunehmendem Druck dichter wird, ist die Dichtezunahme im Einschluss auf eine Druckzunahme im umgebenden Gestein zurückzuführen. Läge ein lithostatischer Druckanstieg vor, so könnte man ihn mit Subduktionsbewegungen oder Deckenüberschiebung erklären. Subduktion und Deckenüberschiebung sind jedoch von der zeitlichen Stellung der spättektonischen Anlage der Klüfte nicht anzunehmen. Mit zunehmender Masseüberlagerung sollte man auch eine positive Veränderung der minimalen Bildungstemperaturen erwarten, was ebensowenig zutrifft. Hingegen weist die Öffnungsrichtung der Zerrklüfte auf seitlich einwirkenden NE–SW verlaufenden Scherungsstress hin. Tangentiale Spannungen parallel der darüberliegenden Deckenachse (Morcles-Decke) haben demnach beim Überschreiten der Reissfestigkeit des Gesteins zum Aufreissen von Zerrklüften geführt. Ähnliche Beobachtungen zur Bildung alpiner Zerrklüfte wurden von GÜNTHERT (1971) im nordwestlichen Tessin und westlichen Gotthardmassiv und STECK (1966) im westlichen Aarmassiv mitgeteilt. Diese NE–SW verlaufenden kluftbildenden Tangentialspannungen können durch SE–NW gerichtete seitliche Druckeinwirkung oder durch die *Hebung des Alpenkörpers* verursacht worden sein.

Der beobachtete Druckanstieg in den Einschlüssen kann somit nach dem aktuellen Stand des Wissens mit dem Druckanstieg dieser Tangentialspannungen in Zusammenhang gebracht werden, die ihrerseits durch *aktive Tektonik* verursacht worden sind. Nach der Öffnung dieser Zerrklüfte nahmen die Bildungsdrucke in den homogenen Einschlüssen kontinuierlich ab. Gleichzeitig wurden die Kluft-Hohlräume in wechselschnellem Rhythmus *erweitert.* Es ist anzunehmen, dass dieser späte Mechanismus mit der letzten Hebung der Alpen und der fortschreitenden Erosion zusammenfällt. Belastungsdruck und Gesteinstemperaturen nahmen dabei im Sinne einer *«Entspannung»* allmählich ab.

---

[3]) Fluide Phasen: Zustandsformen der Flüssigkeits- und Gasanteile.

Das *sprunghafte Verhalten* des Druckes weist beträchtliche Beträge auf. Es können folgende Druckgefälle zu Beginn jeder neuen Quarzgeneration beobachtet werden: 70 bar zu Beginn der 2. Generation, 700 bar zu Beginn der 3. und 1200 bar zu Beginn der 4. Generation (Fig. 6). Die wahrscheinliche Erklärung für diese Tatsache ist das Eintreten eines Druckgefälles beim *Öffnen und Erweitern der Klüfte.* Solche Unterdrucke in den Klüften wurden ausgeglichen, bis sie dem Druck der Gas- und Flüssigkeitsanteile im umgebenden Gestein von neuem entsprachen. Beim *langsamen* Kluftöffnen während des Fadenquarz-Wachstums kann dieser Druckausgleich durch nachdiffundierendes Wasser und Methan sogleich erfolgen. Im Gegensatz dazu scheint der Druckausgleich bei *schneller* Vergrösserung der Kluft-Hohlräume (in der Phase des gleichzeitigen oder unmittelbar nachfolgenden Zepter- und Fensterquarz-Wachstums) erst nach längerer Zeit erfolgt zu sein. Diese Annahme wird gestützt durch das gleichzeitige Auftreten einer heterogenen Mutterlösung in den Klüften (Wasser und Methan) beim Wachstum der Frühstadien von Quarz (Gen. Ia_2, IIa, IIIa, IVa) (P der fluiden Phasen in der Kluft $\leq$ P der fluiden Phasen im Gestein), während der Beginn des Fadenquarz-Wachstums (Gen. Ia_1) sowie alle Endstadien der Quarzgenerationen (Gen. Ib, IIb, IIIb, IVb) eine homogene Mutterlösung in den Klüften voraussetzen (P der fluiden Phasen in der Kluft = P der fluiden Phasen im Gestein). Das Quarzwachstum mit seinen Flüssigkeits- und Gaseinschlüssen hinterlässt damit eine lückenlose Darstellung der Druckentwicklung der Flüssigkeits- und Gasanteile in den Klüften und im Gestein während des Ablaufs tektonischer Vorgänge.

c) Beziehung zwischen Kristallwachstum und Metamorphose

Wir stellen fest, dass die mikrothermometrisch ermittelten minimalen Bildungsdrucke und -temperaturen der Quarzkristalle im Val d'Illiez zeitlich in direkter Beziehung mit der Entstehung der Zerrklüfte stehen. Da die Bildung der Klüfte fast ausschliesslich als Ursache spättektonischer Bewegungen anzusehen ist, dürfen die erhaltenen Druck- und Temperaturwerte des Kristallwachstums nur als minimale PT-Verhältnisse der mit der frühen Tektonik verbundenen Metamorphose gelten.

Aus den Messdaten lassen sich nun Rückschlüsse über die *Mächtigkeit der Sedimentüberlagerung* ziehen. Nimmt man an, dass der Druck der fluiden Phasen in den Klüften und im Gestein dem lithostatischen Druck entspricht und letzterer allein von der Gesteinsauflast abhängt, so erhält man für die erste Quarzgeneration eine minimale Mächtigkeit von 6100 ± 600 m überlagerndem Sediment (mittlere Dichte von 2,5). Unter der Voraussetzung, dass Druck und Temperatur in der Kluft denjenigen im umgebenden Gestein entsprechen, lässt sich für den Beginn des Quarzwachstums (Gen. Ia_1) ein mittlerer geothermischer Gradient von 36,5°C/km und für dessen Abschluss (Gen. IVb) ein mittlerer geothermischer Gradient von 28°C/km errechnen. Diese Zahlen stimmen mit früheren Daten gut überein (Clark & Jäger 1969, Lepontin: 20–40°C/km; Kübler et al. 1974, Westalpen: $<$30°C/km; Niggli 1970, Lepontin: 20–40°C/km; Poty 1969, Mont-Blanc: 35–40°C/km, Gardette: $<$50°C/km; Poty et al. 1974, Mont Blanc: 37°C/km, Aar - Kammegg: 37°C/km, Aar - Zentrale Zone: 42°C/km, Gotthard - Piz Garviel: $<$48°C/km, Pennin - Gischihorn: 55°C/km; Wenk 1970, Lepontin: 50°C/km).

Es ist fernerhin zu beachten, dass die Bildungsdrucke und -temperaturen der Quarzkristalle den *Bedingungen der Anchimetamorphose* entsprechen. MARTINI (1972) und MARTINI & VUAGNAT (1965) stellen in den Taveyannaz-Sandsteinen der Diablerets- und Gellihorn-Decke zwischen der Rhone und dem Thunersee Laumontit sowie Pumpellyit und Prehnit fest. Die minimalen Bildungsdrucke und -temperaturen der Fadenquarze (P: 1530 ± 165 bar, T: 249 ± 3°C) fallen dabei mit dem Stabilitätsfeld von Laumontit zusammen (LIOU 1971). Von Bedeutung ist weiterhin die *Beziehung* zwischen *Methan-Entstehung* und Versenkungsmetamorphose. Dank der guten Konservierung der Flüssigkeits- und Gaseinschlüsse in den Quarzkristallen kann der Anteil an Kohlenwasserstoffen in den Einschlüssen gaschromatographisch ermittelt werden[4]). Man weiss, dass bei der Bildung von Methan mit steigender Temperatur und zunehmender Sedimentüberlagerung der biochemische vom thermochemischen Bildungsprozess abgelöst wird (vgl. Skizze von SOKOLOV in HEDBERG 1974). Das Verhältnis Methan zu höheren Kohlenwasserstoffen nimmt dabei von 3500 m Sedimentüberdeckung an fortlaufend zu. Die hohe Reinheit von Methan in den Einschlüssen des Val d'Illiez (>99% CH_4, Rest: gesättigte und ungesättigte Homologe bis C_6) deutet somit auf eine Methan-Bildung in den Sedimenten in einer Tiefe von mindestens 6 km hin!

Verdankungen

Der Schweizerische Nationalfonds (Projekt Nr. 2.645.72) ermöglichte die Durchführung der Untersuchungen dank eines Dreijahresstipendiums, wofür ich meinen Dank ausspreche. Weiter danke ich Herrn B. Poty und Herrn K. Govindaraju, Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques, Nancy, für die quantometrische Analyse der Gesteinsproben sowie Herrn Prof. J. Touret, Univ. Paris VII, Herrn Prof. R. Martin und Frl. N. Masson, Univ. Nancy I, welche mir die gas-chromatographische Untersuchung der Einschlüsse ermöglichten. Besonderer Dank gilt den Herren Prof. J. von Raumer, Prof. E. Nickel und Herrn B. Poty für ihre Anteilnahme am Fortgang der Arbeit.

LITERATURVERZEICHNIS

BURNHAM, C.W., HOLLOWAY, J.R., & DAVIS, N.F. (1969): *Thermodynamic Properties of Water to 1,000°C and 10,000 Bars.* - Spec. Pap. geol. Soc. Amer. *132.*

CLARK, S.P. jr., & JÄGER, E. (1969): *Denudation rate in the Alps from geochronologic and heat flow data.* - Amer. J. Sci. *267,* 1143-1160.

DURNEY, D.W. (1972): *Deformation history of the western Helvetic Nappes, Valais, Switzerland.* - Ph.D. thesis, London Univ.

DURNEY, D.W., & RAMSAY, J.G. (1973): *Incremental Strains Measured by Syntectonic Crystal Growths.* In: DE JONG, K.A., & SCHOLTEN, R. (Ed.): *Gravity & Tectonics* (p. 67-96). - Wiley & Sons, New York/London/Sydney/Toronto.

FREY, A. (1973): *Einige Quarzfundstellen im Val d'Illiez und in der Umgebung von Bex.* - Schweizer Strahler *3/2,* 54-58.

GRIGORIEV, D.P. (1963): *«Ombres» sur les cristaux de quartz.* - Bull. Soc. franç. Minéral. (Cristallogr.) *86,* 376-379.

GÜNTHERT, A. (1971): *Klufttypen im nordwestlichen Tessin und westlichen Gotthardmassiv, eine Übersicht.* - Eclogae geol. Helv. *64,* 105-131.

---

[4]) Die gas-chromatographischen Untersuchungen wurden im Laboratorium von Prof. J. Touret, Univ. Paris VII, und Prof. R. Martin, Univ. Nancy I, zusammen mit Frl. N. Masson durchgeführt.

HEDBERG, H.D. (1974): *Relation of Methane Generation to Undercompacted Shales, Shale Diapirs, and Mud Volcanoes.* - Bull. amer. Assoc. Petroleum Geol. *58/4*, 661-673.

KÜBLER, B., MARTINI, J., & VUAGNAT, M. (1974): *Very Low Grade Metamorphism in the Western Alps.* - Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. *54/2-3*, 461-469.

LAEMMLEIN, G.G. (1946): *O proiskhozhdenii kvartsev s «beloi polosoi» [Über die Entstehung flacher Kristalle mit «weissen Streifen»].* - Vopr. Mineral. Geokhim. Petrogr. (Izdat. Akad. Nauk SSSR, Moskva), 98-110.

LAEMMLEIN, G.G., & KLEVTSOV, P.V. (1961): *Relations among the principal thermodynamic parameters in a part of the system H_2O-NaCl.* - Geochem. *2*, 148-158.

LANDOLT-BÖRNSTEIN (1960): *Gleichgewichte Dampf-Kondensat und osmotische Phänomene* (6.Aufl.; Bd. 2/2, Teil a). - Springer, Berlin/Göttingen/Heidelberg.

LIOU, J.G. (1971): *Stilbite-Laumontite Equilibrium.* - Contr. Mineral. Petrol. *31*, 171-177.

LOYS, F. DE (& GAGNEBIN, E.) (1928): *Monographie géologique de la Dent du Midi.* - Beitr. geol. Karte Schweiz [N.F.] *58.*

MARTINI, J. (1972): *Le métamorphisme dans les chaînes alpines externes et ses implications dans l'orogenèse.* - Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. *52/2*, 257-275.

MARTINI, J., & VUAGNAT, M. (1965): *Présence du faciès à zéolites dans la formation des «grès» de Taveyanne (Alpes franco-suisses).* - Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. *45*, 281-293.

MULLIS, J. (1974): *Zur Entstehungsgeschichte der alpinen Zerrklüfte.* - Mineralienfreund *6*, 77-88.

— (1975): *Growth conditions of Quartz Crystals from Val d'Illiez (Valais, Switzerland).* - Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. *55*, 419-430.

— (1976a): *Das Wachstumsmilieu der Quarzkristalle im Val d'Illiez (Wallis, Schweiz).* - Diss. Nr.751, Univ. Freiburg (Schweiz).

— (1976b): *Morphologie der Quarzkristalle im Val d'Illiez.* - (in Vorb.).

MULLIS, J., POTY, B., & LEROY, J. (1973): *Nouvelles observations sur les inclusions à méthane des quartz du Val d'Illiez, Valais (Suisse).* - C.R. Acad. Sci. (Paris) *277*, 813-816.

NIGGLI, E. (1970): *Alpine Metamorphose und alpine Gebirgsbildung.* - Fortschr. Mineral. *47*, 16-26.

POTY, B. (1969): *La croissance des cristaux de quartz dans les filons sur l'exemple du filon de La Gardette (Bourg d'Oisans) et des filons du massif du Mont Blanc.* - Thèse Univ. Nancy (Sci. de la Terre, Mém. *17*).

POTY, B., & STALDER, H.A. (1970): *Kryometrische Bestimmungen der Salz- und Gasgehalte eingeschlossener Lösungen in Quarzkristallen aus Zerrklüften der Schweizer Alpen.* - Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. *50/1*, 141-154.

POTY, B.P., STALDER, H.A., & WEISBROD, A.M. (1974): *Fluid Inclusions Studies in Quartz from Fissures of Western and Central Alps.* - Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. *54/2-3*, 717-752.

ROEDDER, E. (1962): *Studies of fluid inclusions I: Low temperature application of dual-purpose freezing and heating stage.* - Econ. Geol. *57*, 1045-1061.

SCHROEDER, J.W., & DUCLOZ, CH. (1955): *Géologie de la Molasse du Val d'Illiez (Bas-Valais).* - Beitr. geol. Karte Schweiz [N.F.] *100.*

STALDER, H.A., & TOURAY, J.C. (1970): *Fensterquarze mit Methan-Einschlüssen aus dem westlichen Teil der schweizerischen Kalkalpen.* - Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. *50/1*, 109-130.

STECK, H.A. (1966): *Petrographische und tektonische Untersuchungen am Zentralen Aaregranit und seinen altkristallinen Hüllgesteinen im westlichen Aarmassiv.* - Beitr. geol. Karte Schweiz [N.F.] *130.*

WENK, E. (1970): *Zur Regionalmetamorphose und Ultrametamorphose im Lepontin.* - Fortschr. Mineral. *47*, 34-51.

ZAGORUCHENKO, V.A., & ZHURAVLEV, A.M. (1970): *Thermophysical properties of gaseous and liquid methane.* - Israel Progr. sci. Transl. (Jerusalem).