Zeitschrift: Bulletin de la Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles = Bulletin der Naturforschenden Gesellschaft Freiburg

Herausgeber: Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles

Band: 72 (1983)

Heft: 1-2

Artikel: Einschlüsse in Quarzkristallen der Schweizer Alpen und ihre mineralogisch-geologische Bedeutung

Autor: Mullis, Josef

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-308618

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: 16.07.2025

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

Einschlüsse in Quarzkristallen der Schweizer Alpen und ihre mineralogisch-geologische Bedeutung

von JOSEF MULLIS,
Institut für Mineralogie und Petrographie, 1700 Freiburg

1. Einleitung

Der vorliegende Beitrag hat zum Ziel, den Inhalt des vor der Freiburger Naturforschenden Gesellschaft am 5.11.81 gehaltenen Vortrags «Bergkristalle – Schönheit, Genese, Einblick in die Entstehung der Alpen» zusammenzufassen und gleichzeitig einige Schwerpunkte der aktuellen Einschlußforschung an Bergkristallen aufzuzeigen.

Wer auf einer Wanderung in den Bergen einen Bergkristall, also das Mineral Quarz, findet oder ihn in einer Mineraliensammlung wiedererkennt, ist oft von seiner Farbe, Formenvielfalt und Transparenz fasziniert.

Was aber den Mineraliensammler erfreut, mag für den Mineralogen oft von geringer Bedeutung sein. Umgekehrt führen unscheinbare oder gar ästhetisch störende Merkmale am Quarz zu neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen.

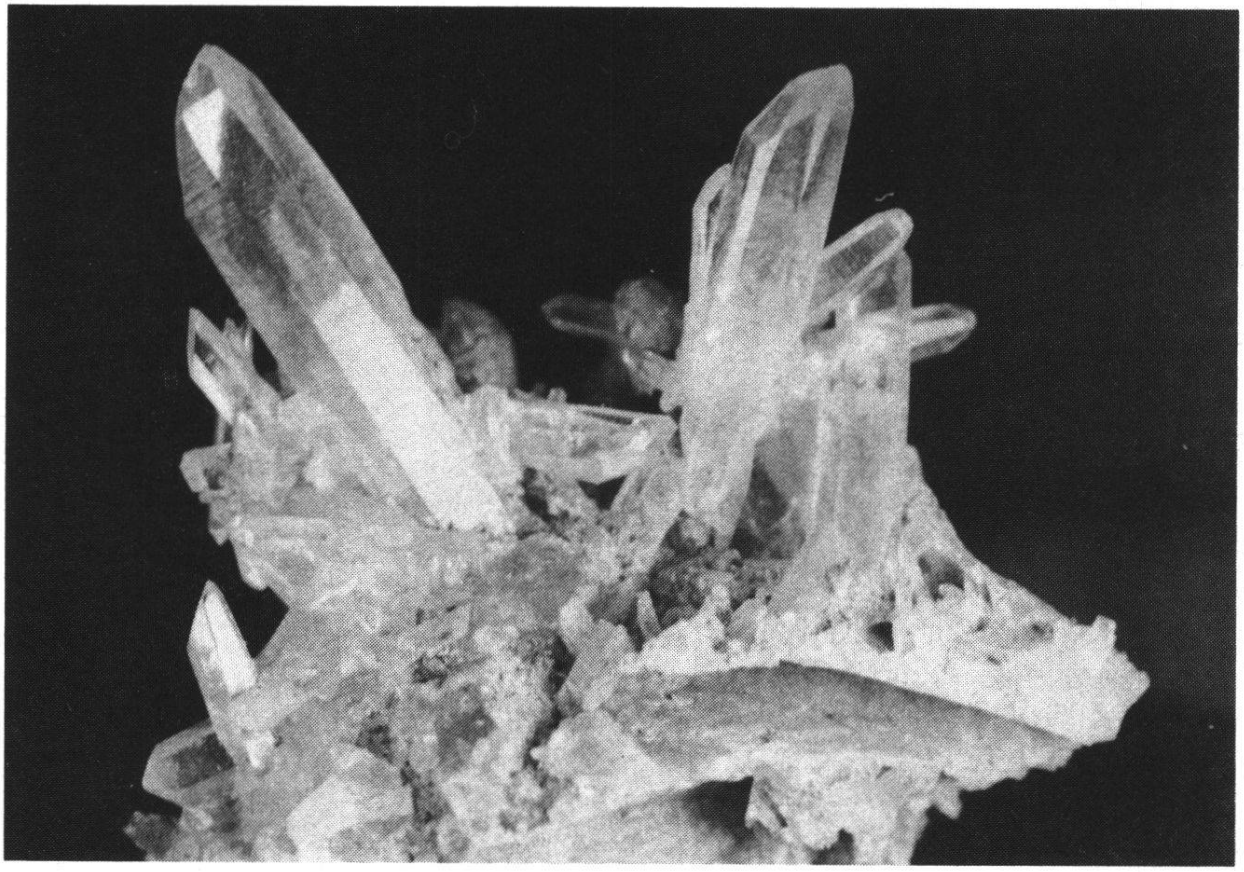


Fig. 1: Bergkristallstufe von Vättis. Bildbreite: 5 cm.

So entpuppen sich zum Beispiel Verunreinigungen oder die milchige Trübung im Innern der Quarze als Festkörper-, Flüssigkeits- und Gaseinschlüsse [1], die während des Wachstums in den Quarzkristall eingebaut wurden. Sie sind somit Zeugen der Entstehungsbedingungen, unter denen die Quarze einst kristallisierten.

2. Quarzwachstum im Autoklav und in alpinen Zerrklüften

Die hydrothermale Züchtung synthetischer Quarzkristalle im Autoklav erfolgt weitgehend nach dem Prinzip des Temperaturdifferenzverfahrens (MOSEBACH, 1955). Dabei bleiben das Volumen (V) und der mittlere Druck (P) im Autoklav konstant. Einzig die Temperatur (T) wird so gewählt, daß von der Basis bis zur Decke des Druckraumes ein T-Gefälle von 20 bis 40 °C entsteht. Der Boden des Autoklavs wird mit körnigem Quarz versehen, und unter der Decke wird ein fehlerfreier Quarzkeim angebracht. Wird nun die Basis des Autoklavs mit etwa 400 °C und die Decke des Druckraumes mit 360 bis 380 °C beheizt, so löst sich in der heißeren Zone mehr Quarz als im kühleren Bereich. Die hier befindliche Lösung ist in bezug auf den Quarzkeim übersättigt. Infolgedessen wächst dieser auf Kosten der am Boden befindlichen Quarznährsubstanz. Nach diesem Verfahren können in kurzer Zeit große Kristalle von über 100 g Gewicht gezüchtet werden.

Anders als bei der Hydrothermalsynthese im Autoklav verhält sich das Quarzwachstum in der Natur. Dort kristallisieren die Quarze in Spalten und Klüften des Gesteins. Das Volumen solcher Klufthohlräume, ihr Innendruck und die Fluidzusammensetzung können während des Wachstums der Quarzkristalle oft stark variieren, während sich die Temperatur nur wenig verändert.

Die untersuchten Quarzkristalle stammen aus alpinen Zerrklüften, wo sie vor 10 bis 20 Mio. Jahren kristallisierten. Ihr Wachstum stellt man sich allgemein wie folgt vor: Gebirgsbildende Kräfte verspannen das Gestein in den Alpen bis in Tiefen von 20 km und reißen Klüfte auf (MULLIS, 1974). In die sich öffnenden Klüfte dringen heiße, leicht alkalische Lösungen ein und füllen sie. Quarzkristalle und weitere Silikatminerale werden hierbei aus dem Gestein herausgelöst und in die Kluft transportiert. Bei abnehmenden Temperaturen und Drucken wird die Lösung in der Kluft an Kieselsäure übersättigt. An vorhandenen Kristallkeimen beginnt der Quarz nun zu kristallisieren und wächst als Bergkristall von der Kluftwand in den Kluftraum hinein (Fig. 2).

3. Alpine Tektonik und Quarzwachstum

Da die tektonischen Spannungen während des Quarzwachstums weiter andauern, beeinflussen sie in bedeutendem Maße die Kristallbildung, was an zwei Beispielen gezeigt werden soll:

a) Fadenquarzwachstum infolge sich rhythmisch auseinanderbewegender Kluftwände.
b) Zepterquarzwachstum infolge brüsker Erweiterung der Klufthohlräume, bedeutender Druckgefälle (und darauf folgender Entmischung und/oder Migration fluider Phasen).

[1] Def.: Flüssigkeits- und Gaseinschlüsse = Fluideinschlüsse.

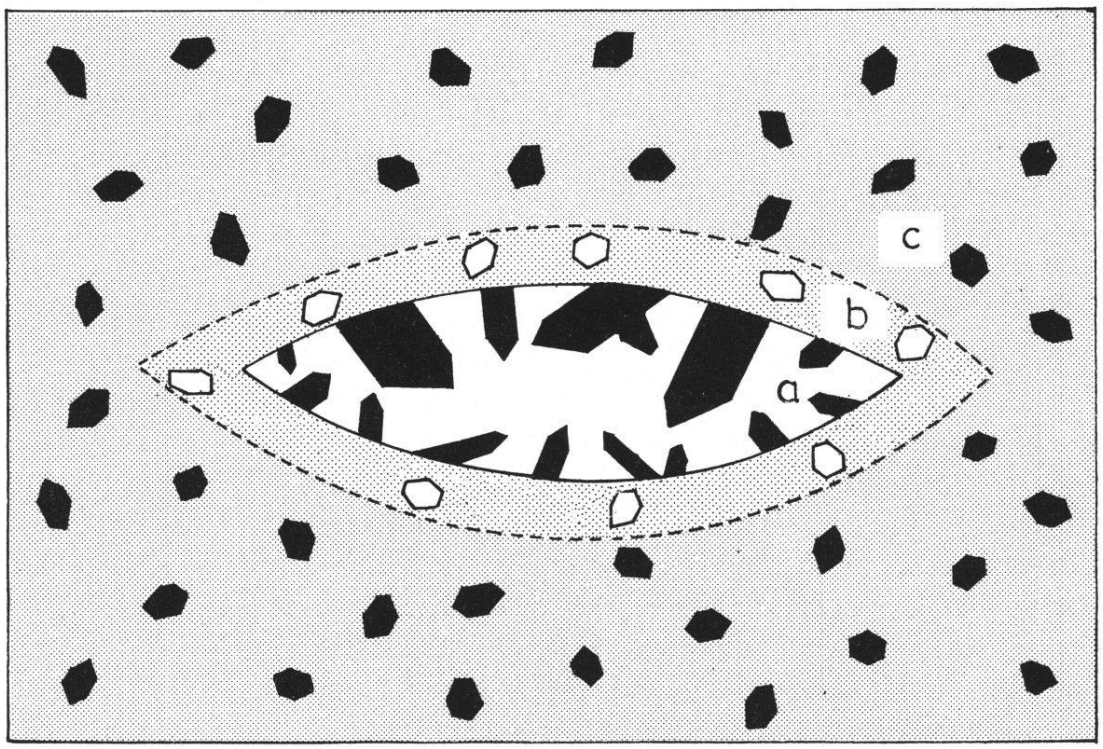


Fig. 2: Schematische Darstellung einer alpinen Zerrkluft.
a) Kluftraum mit Bergkristallen
b) Auslaugungszone
c) Gestein

a) Fadenquarzwachstum

Das Wachstum der Fadenquarze in quarzführendem Muttergestein erfolgt gleichzeitig mit der Öffnung der Klüfte (Fig. 3). Beim Aufreißen der Kluft wird das gesteinsbildende Quarzkorn ein erstes Mal gebrochen und in der Folge wiederum verheilt. Es hat sich im mm-Bereich eine «Quarzbrücke» von einer Kluftwand zur anderen gebildet. Während rhythmisch wiederkehrende Spannungseinwirkungen den Kluftraum um geringste Beträge vergrößern, wird der von Kluftwand zu Kluftwand reichende Quarzkristall immer wieder gebrochen und erneut verheilt. Dieser Verheilungsprozeß geschieht nicht vollständig: Entlang ungezählter Spaltrisse wird jene Mutterlösung in den Quarz eingebaut, die sich zur

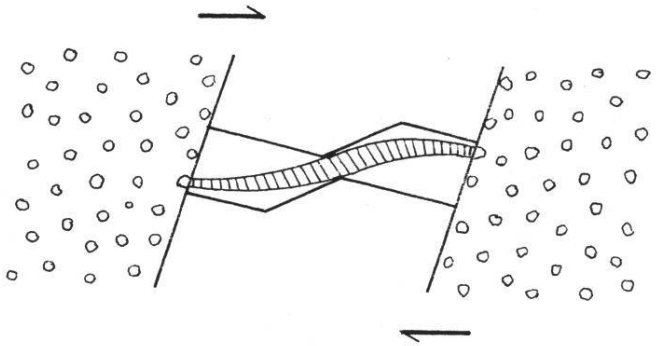


Fig. 3: Fadenquarzwachstum. Durch rhythmisch wiederkehrende Öffnungsbewegungen der Kluft wird der von Kluftwand zu Kluftwand gespannte Fadenquarz fortwährend zerschert und wiederum verheilt: es kristallisiert der Fadenquarz.

Verheilungszeit in der Kluft befindet. Fadenquarz und Fluideinschlüsse werden gleich einem Paläoseismogramm zu Informationsträgern alpintektonischer Ereignisse. – Die Entstehung der Fadenquarze wurde zum ersten Mal von LAEMMLEIN (1946) beschrieben. MULLIS (1976a) brachte sein Wachstum in den Zusammenhang mit spätalpinen tektonischen Bewegungen, während RAMSAY (1980) den «crack-seal»-Mechanismus als Folge der Gesteinsdeformation ausleuchtete.

b) Zepterwachstum

Das Wachstum von Zepter- und Fensterquarzen [2] erfolgt in einem gasreichen, emulsionsähnlichen Milieu. Der Gasanteil kann aus höheren Kohlenwasserstoffen (HKW), Methan, Kohlendioxid, Stickstoff und Wasserdampf bestehen, oder aus einem Gemisch dieser und weiterer Gase zusammengesetzt sein. Die Anreicherung gasreicher Fluids in alpinen Zerrklüften ist das Produkt einer Entmischung infolge Temperatur- und/oder Druck-Erniedrigung. Zahlreiche Beobachtungen lassen den Schluß zu, daß entmischtes Gas offensichtlich in mehreren Schüben durch die Kluftsysteme migrierte. Die häufigste Ursache der Gasentmischung und der Migration fluider Phasen ist ein Druckgefälle im Gestein, das durch tektonische Kompressions- und Hebungsbewegungen der Alpen entlang bevorzugter Zonen entstanden ist (Arbeiten in Vorbereitung). Druckgefälle von 1 bis 2 kbar sind nicht selten anzutreffen.

Am Beispiel der Quarzkristalle vom Steinental kann dieses Phänomen eindrücklich gezeigt werden (Fig. 4): Gewöhnlicher Quarz vom Tessinerhabitus kristallisierte aus einer CO_2-angereicherten wäßrigen Lösung (Fig. 6, e), bei Temperaturen von $\geqslant$ 400 °C und Drucken von $\geqslant$ 4 kbar. (Die Temperaturabschätzung erfolgte in Anlehnung an POTY et al., 1974, die Druckermittlung unter Anwendung der PVT-Daten des Systems H_2O–CO_2–

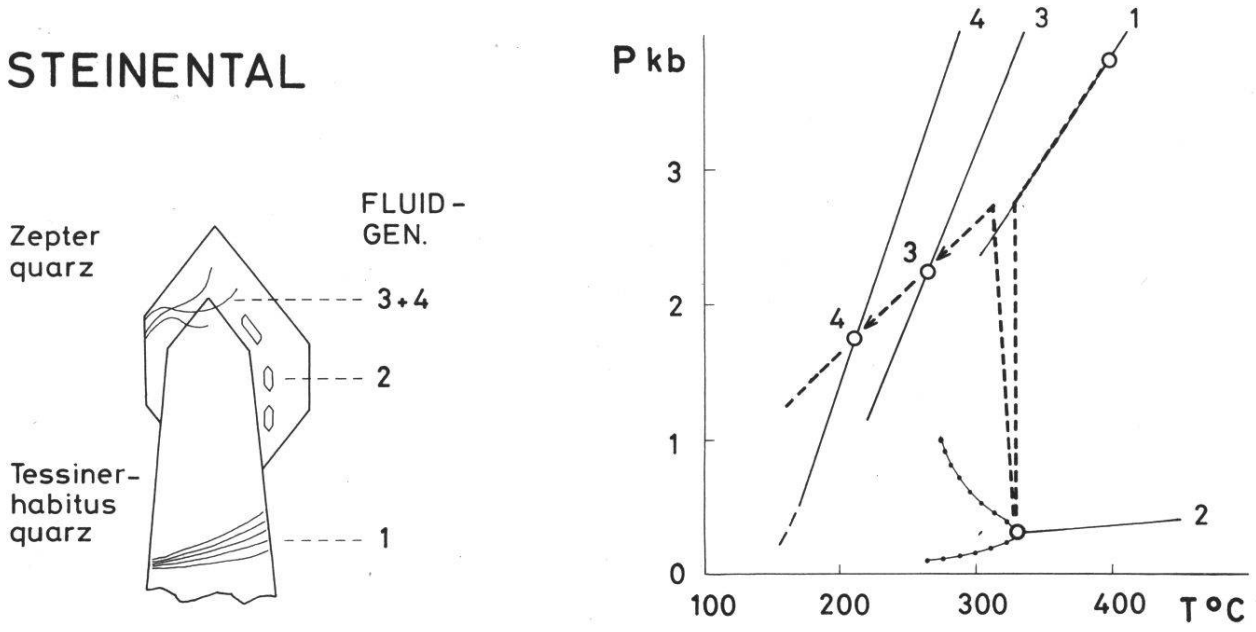


Fig. 4: Zepterquarzwachstum. Infolge brüsker Klufterweiterung, Druckgefälle und Fluidentmischung wird die gasreiche, emulsionsartige Phase an Kieselsäure übersättigt: es kristallisiert der Zepterquarz.

[2] Der Zepterquarz ist die Juvenilform des Fensterquarzes (vgl. MULLIS, 1976 b).

Generation	H_2O	CO_2	NaCl
1	78.7	20.1	1.2
2	68.6	31.4	?
3	98.5	0.0	1.5
4	99.6	0.0	0.4

Tab. 1: Approximative Fluidzusammensetzung der Quarzkristalle vom Steinental (in Mol %; Salzgehalt in NaCl-Äquivalenten).

NaCl, BOWERS & HELGESON, 1983). Tektonische Vorgänge im Gebirgskörper führten dann zur Erweiterung der Kluft. Die Folge davon war ein Druckgefälle von > 2 kbar in der Kluft, was zur Entmischung der mit CO_2 angereicherten wäßrigen Lösung in eine CO_2-reiche (Fig. 6, f) und in eine wasserreiche Phase führte (Tab. 1: Gen. 1 und 2). Die Löslichkeit der Kieselsäure in der gasreichen «sauren» Phase wurde beim vorliegenden Druckgefälle stark erniedrigt. Dies führte zu einer schnellen Quarzausscheidung in der Form des Zepterquarzwachstums. Im Zuge der retrograden Fluidentwicklung schließlich wurde die Zerrkluft wiederum mit wäßriger Lösung gefüllt und der Fluiddruck dem lithostatischen Druck angenähert (Tab. 1: Gen. 3 und 4). Dieser Wachstumsmechanismus wurde bereits von MULLIS (1976 b) beschrieben und bildet den Gegenstand weiterer Forschungsarbeiten. Dabei kommt dem Studium der Zepterquarze eine zunehmende Bedeutung in Hinblick auf die generellen Fragen nach der Entmischung und Migration der Fluids im Gestein zu.

4. Quarzkristalle – Fluideinschlüsse – Metamorphose

Die Ergebnisse einer systematischen Bearbeitung der Fluideinschlüsse in Kluftquarzen der Schweizer Alpen [3] lassen sich mit dem Blick auf die alpine Metamorphose thematisch nach verschiedenen Gesichtspunkten gliedern. Zwei davon sind:

a) Die Darstellung der Fluidzusammensetzung in Kluftquarzen auf einer thematischen Karte der Schweiz.
b) Die Darstellung der Fluidfelder im PT-Diagramm.

a) Verteilung der Fluidzusammensetzung in Kluftquarzen der Schweizer Alpen

Die Zusammensetzung der Fluids im Porenraum der Gesteine wird hauptsächlich vom Gesteinschemismus, der Fluidmigration und von den PT-Verhältnissen kontrolliert,

[3] Die Fluideinschlüsse in Quarzkristallen wurden mit den Methoden der Gaschromatographie, der Massenspektrometrie, der Ramanspektroskopie, überwiegend aber mit der Methode der Mikrothermometrie untersucht. Letztere ist in POTY et al. (1976) eingehend beschrieben. Die verwendete Meßapparatur besteht aus einem Durchlichtmikroskop, das mit einer Heiz- und Kühlanlage (Typ CHAIX MECA) ausgerüstet ist. Damit können die Phasenübergänge der Fluideinschlüsse zwischen – 180 und + 600 °C beobachtet und gemessen werden.

denen das Gestein ausgesetzt ist. Dabei darf angenommen werden, daß die Fluideinschlüsse im Innern der Quarzkristalle einen Teil jener Fluids darstellen, der zur Zeit der Einschlußbildung im Gestein vorlag. In einer der laufenden Forschungsarbeiten wird nun die früheste Zusammensetzung der Fluideinschlüsse in Kluftquarzen von > 300 Lokalitäten der Schweizer Alpen bestimmt. Vorläufige Ergebnisse sind in einer Kartenskizze der Schweiz schematisch zusammengestellt (Fig. 5). In Fig. 6 werden einige typische Beispiele von Fluideinschlüssen gezeigt.

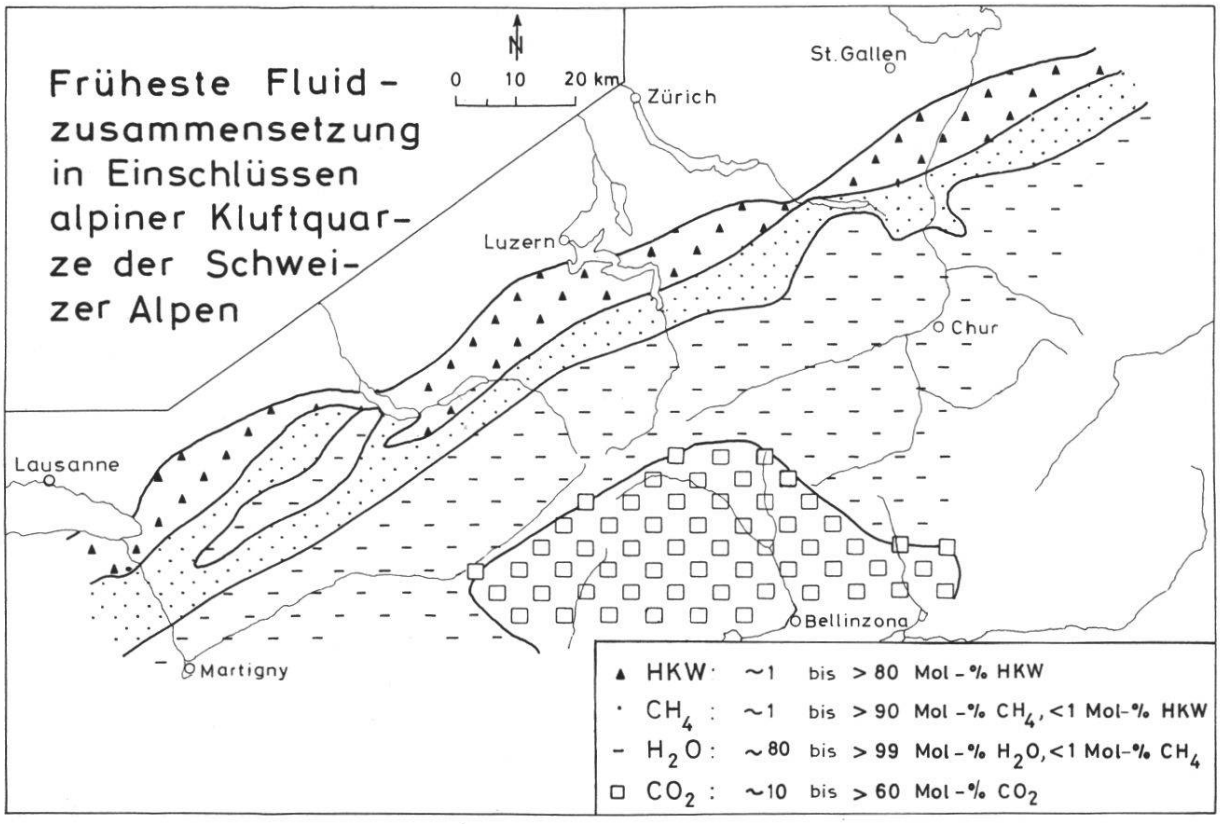
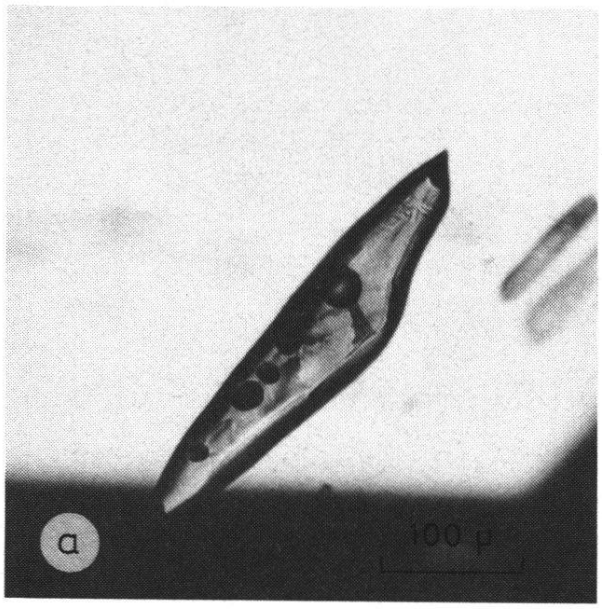
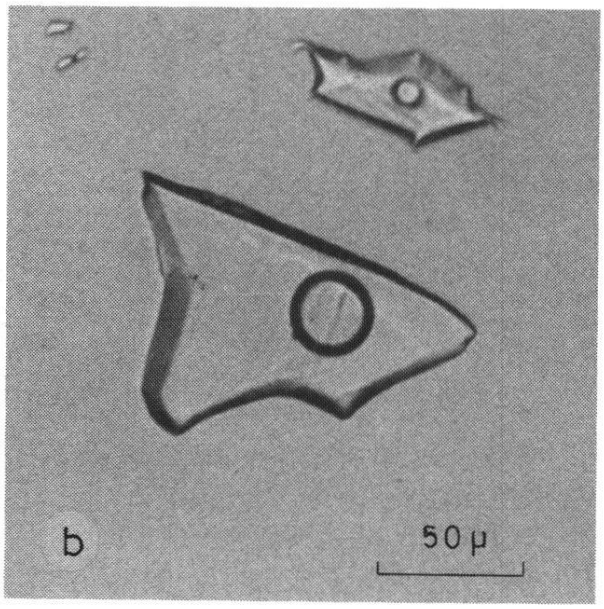


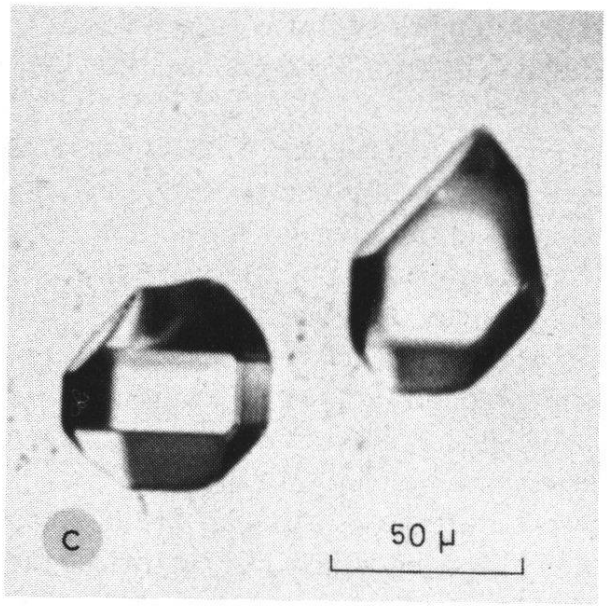
Fig. 5: Fluidkarte der Schweizer Alpen. Darstellung der vorläufigen Ergebnisse.

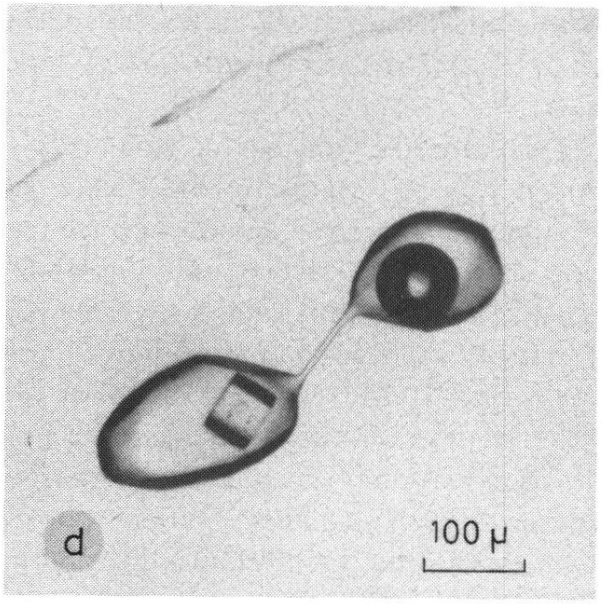
Fig. 6: Fluideinschlüsse in Kluftquarzen der Schweizer Alpen.

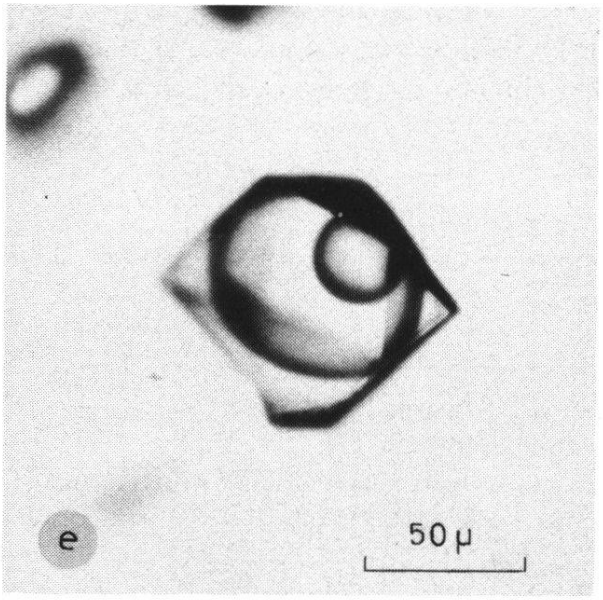
a) Mehrphaseneinschluß mit flüssigen, höheren Kohlenwasserstoffen, einer Gasblase aus niederen Kohlenwasserstoffen und «bitumenähnlichen» Festkörpern eines Zepterquarzes vom Steinbruch Zingel, Seewen. (HKW-Feld: Diagenesezone).
b) Zweiphaseneinschluß mit wäßriger Lösung und einer Methan-Gasblase eines prismatischen Quarzes vom Val d'Illiez. (CH_4-Feld: untere Anchizone).
c) Einphasige, methanreiche Einschlüsse eines Zepterquarzes vom Val d'Illiez.
d) Dreiphasiger Einschluß mit Salzlösung, CO_2-Gasblase und NaCl-Kristall eines prismatischen Quarzkristalls von Bitsch. (H_2O-Feld: Epizone).
e) Dreiphasiger Einschluß mit wäßriger Lösung, flüssigem und gasförmigem CO_2 eines Tessiner Habitusquarzes vom Steinental. (CO_2-Feld: Mesozone).
f) Einphasiger, CO_2-reicher Einschluß eines Zepterquarzes vom Steinental.

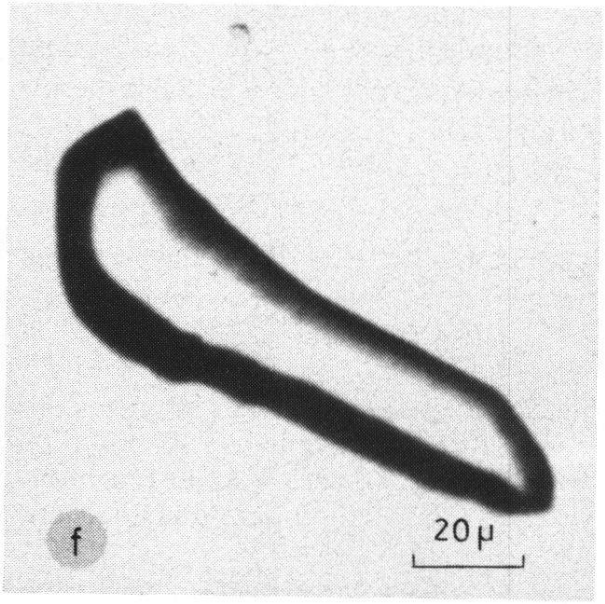

a
100 μ


b
50 μ


c
50 μ


d
100 μ


e
50 μ


f
20 μ

Von NW nach SE können in den Schweizer Alpen 4 Fluidfelder unterschieden werden:

- HKW-Feld: ~1 bis > 80 Mol % höhere Kohlenwasserstoffe (HKW) (H_2O, NaCl, CO_2, CH_4, ...)
- Methanfeld: ~1 bis > 90 Mol % CH_4, < 1 Mol % HKW, (H_2O, NaCl, H_2S, CO_2, ...)
- Wasserfeld: ~80 bis > 99 Mol % H_2O, < 1 Mol % CH_4, (NaCl, H_2S, CO_2, N_2, ...)
- Kohlendioxidfeld: ~10 bis > 60 Mol % CO_2, (H_2O, NaCl, H_2S, CH_4, N_2, ...)

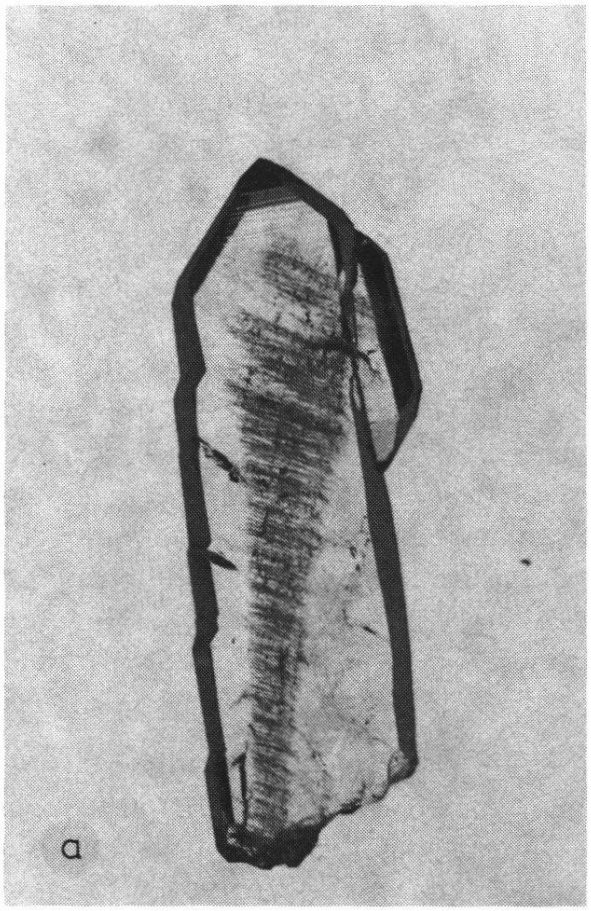
Die Veränderung der Fluidzusammensetzung in den Einschlüssen und damit im Gestein geht mit dem Anstieg der alpinen Regionalmetamorphose von NW nach SE einher (vgl. hierzu die Metamorphosekarte von NIGGLI et al., 1973, FREY et al., 1974, FREY et al., 1980). – Das Wasserfeld im Methanfeld der westlichen Schweizer Alpen läßt auf einen Deckentransport nach der Metamorphose der Gesteine schließen (MULLIS, 1979). – Erste Mitteilungen über das Auftreten regional verbreiteter Fluidvorkommen wurden von STALDER (1964), TOURAY et al. (1970), STALDER & TOURAY (1970) und POTY & STALDER (1970) gemacht.

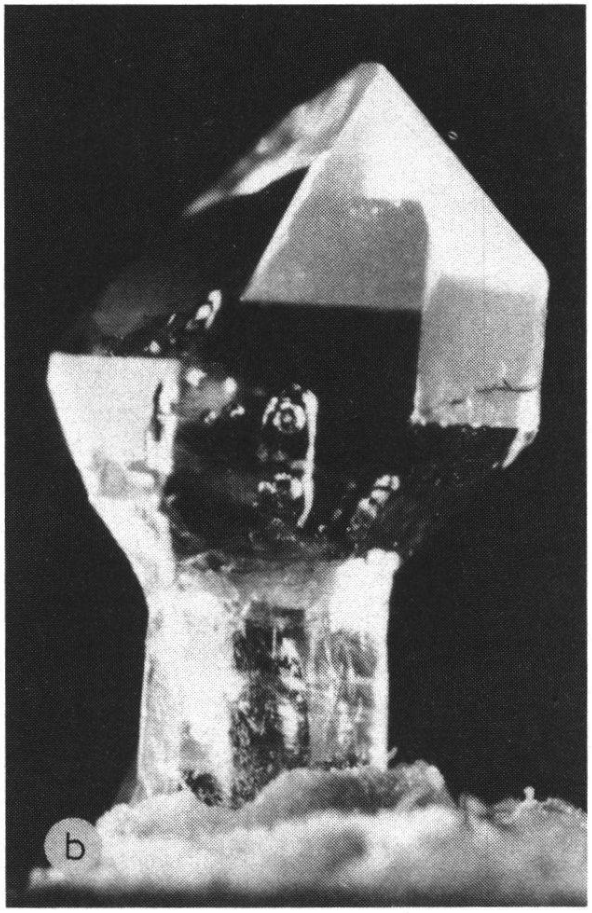
Das Auftreten von höheren Kohlenwasserstoffen im nordwestlichen Teil der Schweizer Alpen kann als Maturationsprodukt organischer Substanzen gedeutet werden, welches während der Versenkung der Sedimentgesteine entstand. Mit zunehmender Temperatur und steigendem Druck wurden die HKW zu Methan gekräckt. Methan wurde auch als Volatilisationsprodukt von terrigenem Kerogen freigesetzt. Der Übergang vom Methanfeld ins Wasserfeld kann zur Zeit noch nicht endgültig interpretiert werden. Das Vorkommen von > 10 Mol % CO_2 südlich des Alpenkammes deutet auf Dekarbonatisationsprozesse hin, es kann aber auch organischer oder juveniler Herkunft sein (HOEFS & STALDER, 1977). $\delta\ ^{13}C$-Untersuchungen an Fluideinschlüssen sind zur Zeit im Gange.

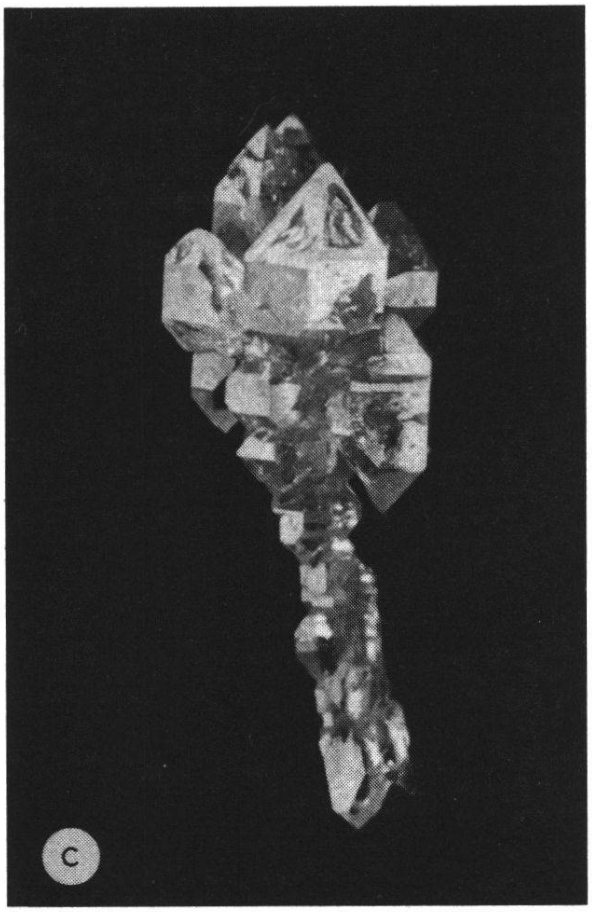
Daß mit zunehmendem Metamorphosegrad die Fluidzusammensetzung und damit das Quarzwachstum beeinflußt wurde, ist nunmehr nicht verwunderlich. Der zusätzliche Einfluß der Tektonik auf das Quarzwachstum und die Fluidentmischung hat die Ausbildung mehrerer Quarztrachten und -habitus zur Folge. Die beobachteten Quarztypen lassen sich in vereinfachter Weise wie folgt den einzelnen Fluidfeldern zuordnen (die weniger typischen Quarzhabitus sind in Klammern gesetzt; einige typische Vertreter sind in Fig. 7 abgebildet):

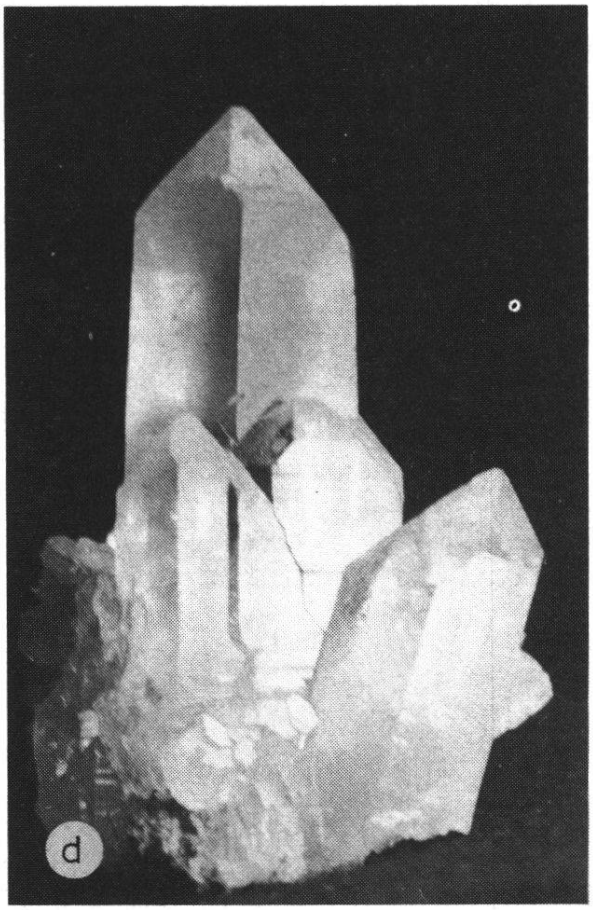
- HKW-Feld: Quarze mit verschieden steilen Rhomboedern (prismatische Quarze, Zepterquarze)
- Methanfeld: Fadenquarze, Zepterquarze (prismatische Quarze)

Fig. 7: Bergkristalle aus alpinen Zerrklüften der Schweizer Alpen.
a) Fadenquarz vom Val d'Illiez. Länge: 7 mm.
b) Zepterquarz auf prismatischem Quarz vom Val d'Illiez. Länge: 4 mm.
c) Zepterquarz und Fensterquarz auf Fadenquarz vom Val d'Illiez. Länge: 3 cm.
d) Prismatischer Quarz vom Val Giuv. Länge: 6 cm.


a


b


c


d

- Wasserfeld: Prismatische Quarze, Fadenquarze (Zepterquarze)
- Kohlendioxidfeld: Tessinerhabitusquarze (Zepterquarze, Nadelquarze)

Quarzkristalle mit verschieden steilen Rhomboedern wurden bereits von MARTIN (1973) im HKW-Feld von Orpierre (Frankreich) beobachtet. Weitere, eher untergeordnete Quarzhabitus wurden von RYKART (1977) in seinem Buche «Bergkristall» unterschieden. – Eine strukturelle Klassifizierung der Bergkristalle gelang BAMBAUER et al. (1962). Aufgrund des variierenden Einbaus von Spurenelementen in die Struktur der Quarzkristalle unterteilten diese Autoren die alpinen Bergkristalle in «gewöhnliche» Quarze und Lamellenquarze. Beide Gruppen sind mehr oder weniger überall vertreten. Die Kenntnis der Fluidzusammensetzung jedoch zeigt, daß Quarzkristalle mit erhöhtem Wasserstoffionengehalt (Tessinerhabitusquarze und Lamellenquarze) aus einem, wenn auch nur temporär an CO_2 angereicherten Wachstumsmilieu kristallisierten. Dieser Sachverhalt rechtfertigt die Annahme, daß durch Dissoziation der Kohlensäure die erforderlichen Wasserstoffionen für den Einbau in die Quarzstruktur bereitgestellt wurden.

b) Darstellung der Fluidfelder im PT-Diagramm

Unter besonderen Bedingungen können die Fluideinschlüsse als Geothermometer und -barometer verwendet werden. Dies ist der Fall, wenn wasser- und methanreiche Einschlüsse gleichen Alters im Kristall vorliegen (Fig. 6, b und c). Dabei müssen die wasserreichen Einschlüsse zur Zeit ihrer Bildung an Methan gesättigt gewesen sein, damit ihre Homogenisationstemperatur als minimale Bildungstemperatur interpretiert werden darf.

Bei hinreichender Reinheit der methanreichen Einschlüsse kann mit der Methode der Mikrothermometrie die Dichte des eingeschlossenen Gases und damit dessen Isochore bestimmt werden.

Durch Projektion der gemessenen minimalen Bildungstemperatur auf die ermittelte Methanisochore läßt sich der minimale Bildungsdruck der Einschlüsse und der Quarzkristalle ermitteln.

Nach diesem Vorgehen wurden die minimalen Bildungstemperaturen und -drucke der frühesten Einschlüsse und deren Quarzgenerationen bestimmt. Durch Übertragung der erhaltenen Werte in ein PT-Diagramm läßt sich das «Stabilitätsfeld» des Methans in den Externbereichen der Schweizer Alpen definieren (Fig. 8). Dieses wird bei $\geqslant$ 200 °C und $\geqslant$ 1200 bar gegen das HKW-Feld und bei $\geqslant$ 270 °C und $\geqslant$ 1700 bar gegen das Wasserfeld hin abgegrenzt (MULLIS, 1979). – Die gewonnenen Erkenntnisse erhalten bei der Prospektion von Erdöl und Erdgas eine zunehmende Bedeutung.

5. Quarzwachstum – Fluideinschlüsse – Mineralparagenesen

Während des Wachstums der Quarzkristalle werden neben den Flüssigkeits- und Gaseinschlüssen auch Festkörper in den Quarzkristall eingebaut. Sie bestehen aus Gesteinsbruchstücken und bereits gebildeten anderen Mineralen. Durch Erschütterung des Gesteins werden diese häufig von den Kluftwänden abgeschert und auf darunterwachsende

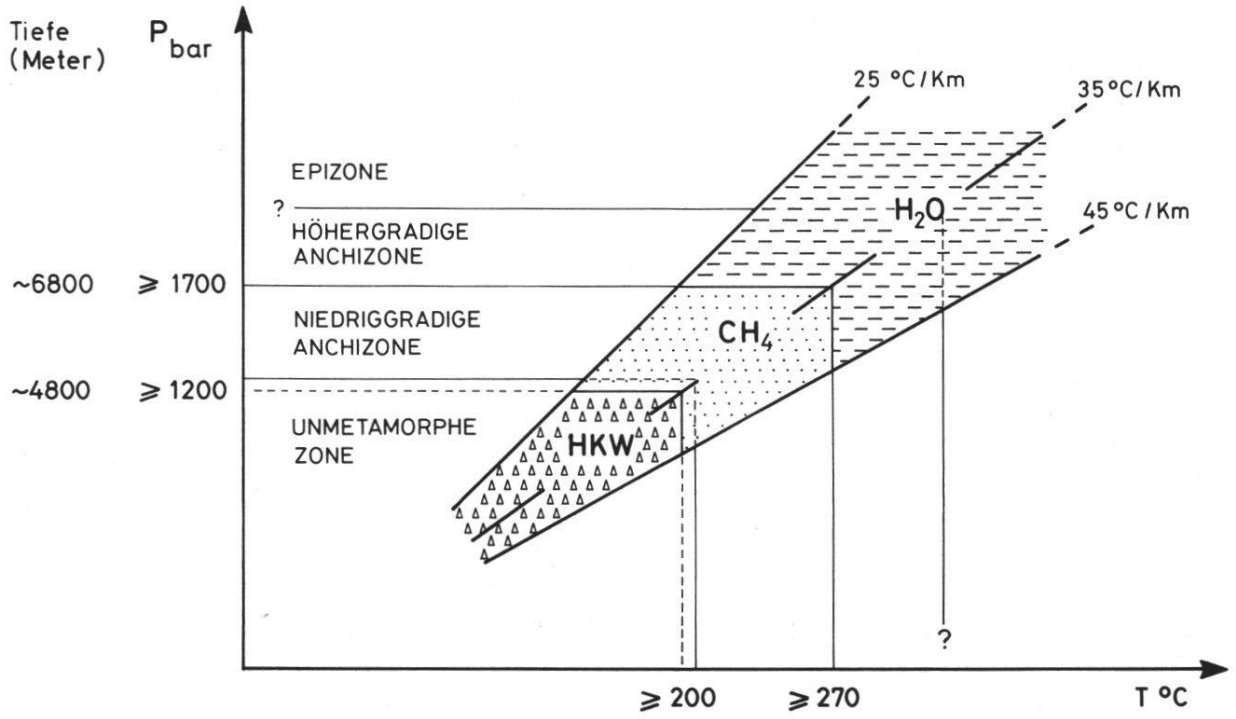


Fig. 8: PT-Diagramm der Fluidfelder in den Externbereichen der Schweizer Alpen.

Quarzkristalle aufgestreut. Dort bilden sie dünne Mineral- und Gesteinsdepots und können gelegentlich vom Quarzkristall umwachsen und phantomartig eingeschlossen werden. Die außerhalb der Quarze im Kluftraum verbleibenden Minerale unterliegen den durch PT und X gegebenen Gleichgewichtsbedingungen. Werden nun diese durch äußere Einflüsse plötzlich verändert, so kann ein Teil der vorhandenen Mineralparagenese aufgelöst und unter den neuen Gleichgewichtsbedingungen in Form anderer Minerale wiederum auskristallisiert werden. Die Festkörpereinschlüsse in Quarzkristallen sind dann die einzig überbleibenden Zeugen der einstigen Frühparagenese. Zusammen mit den Fluideinschlüssen dienen sie zur Rekonstruktion des veränderten Wachstumsmilieus.

Das Zusammenspiel von Quarzwachstum, Fluidentwicklung und Kristallisation anderer Minerale (Mineralparagenese) wurde an über 50 Klüften untersucht (Arbeiten in Vorbereitung). Eine der Klüfte wurde im Naturhistorischen Museum zu Freiburg rekonstruiert und deren Mineralsukzession 1978 in einer Tonbildschau vorgestellt. Es handelt sich um eine außergewöhnliche Rauchquarzkluft, die anfangs der 70er Jahre von H. R. Burgdorfer am Zinggenstock gefunden wurde. Das Ineinandergreifen von Fluidentwicklung und Mineralsukzession vor, während und nach dem Wachstum der Rauchquarze sei in Fig. 9 schematisch zusammengefaßt: Biotit, Epidot, Albit, Apatit, Chlorit, Ilmenit, Brannerit, Titanit, Monazit, Xenotim und Anatas kristallisierten bis zum Ende der 2. Quarzgeneration aus einer wasserreichen Phase. Gegen Ende des Quarzwachstums diffundierte infolge tektonischer Gebirgsbewegungen CO_2 ins Kluftsystem. Die Minerale Epidot, Ilmenit, Titanit und Chlorit waren mit der neuen Mutterlösung nicht mehr im Gleichgewicht und wurden aufgelöst. Im CO_2-angereicherten Milieu gelangte eine neue Mineralparagenese zur Auskristallisation: Rutil, Phengit und Siderit. Folgende Brutto-Mineralreaktionen lassen sich herleiten:

1. Titanit + CO_2 = Calcit + Rutil + Quarz
2. Ilmenit + CO_2 = Siderit + Rutil
3. Epidot + K^+ + 1/4 Fe^{++} + H_2O + 2 CO_2 = Phengit + 2 Calcit + 1/4 Fe^{+++} + H^+
4. Chlorit + K^+ + 3 CO_2 = Phengit + 3 Siderit + Mg^{++} + 3 H_2O

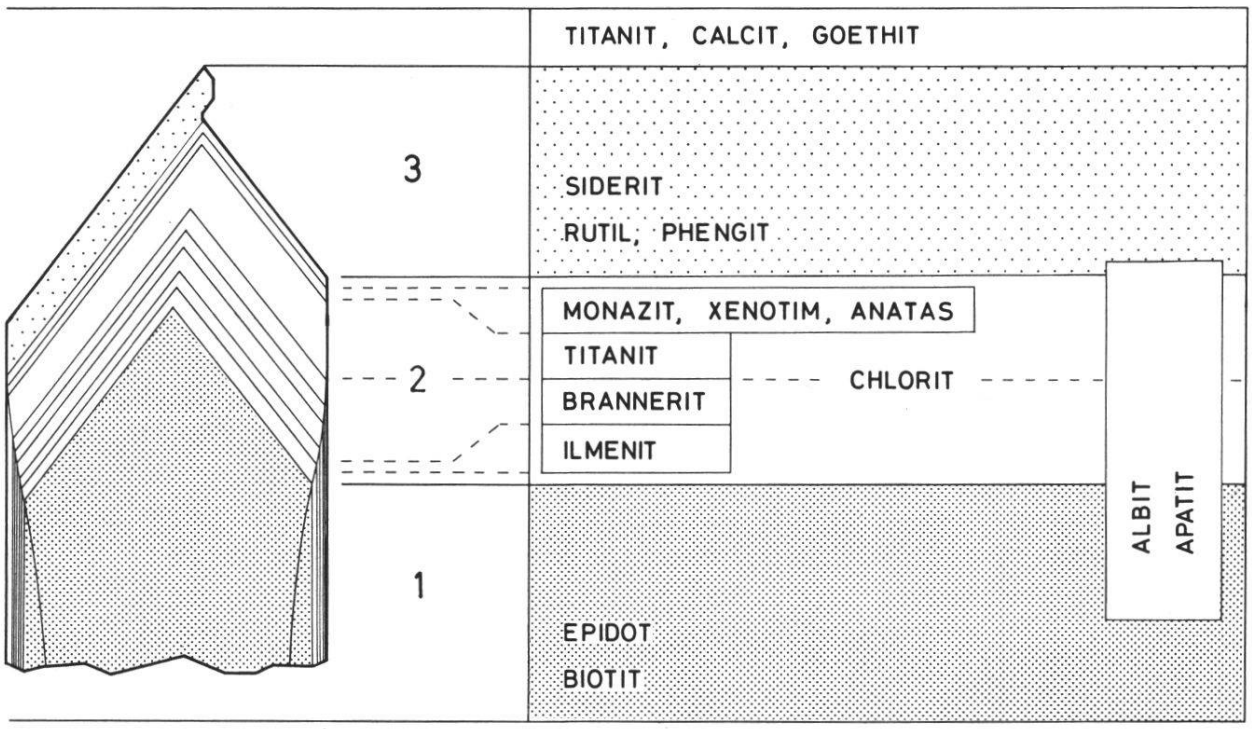


Fig. 9: Zusammenspiel von Quarzwachstum, Kristallwachstum, Kristallisation der Mineralparagenese und Fluidentwicklung, dargestellt an einer Rauchquarzkluft vom Zinggenstock.

Generation	H_2O	CO_2	NaCl
1	97.1	0.7	2.2
2 früh	96.7	0.7	2.6
3 früh	93.8	3.3	2.9

Tab. 2: Approximative Fluidzusammensetzung der Quarzkristalle vom Zinggenstock (in Mol %; Salzgehalt in NaCl-Äquivalenten).

Aufgrund des mengenmäßigen Überwiegens der Ausgangsminerale Chlorit und Ilmenit ist als Teilprodukt nur wenig Calcit zu erwarten. Sein Kationenanteil wurde entweder in den Siderit eingebaut oder kam erst später als Calcit zur Auskristallisation. Ein geringer Teil des Magnesiums wurde ebenfalls dem Siderit «beigemischt», während der überwiegende Teil in Lösung verblieb.

Reaktion 1 wurde experimentell durch HUNT & KERRICK (1977) überprüft: sie war von WAGNER et al. (1972) zum ersten Mal in den Schweizer Alpen beobachtet worden. Die

Reaktionen 2 bis 4 gehen nur aus Beobachtungen hervor und sind experimentell und thermodynamisch noch zu verifizieren. Reaktion 3 wurde zum ersten Mal von POTY (1969) im Mont-Blanc-Massiv beschrieben. In der Schweiz konnte sie erstmals an Hand der beschriebenen Kluft vom Zinggenstock nachgewiesen werden (Tonbildschau, Naturhistorisches Museum Freiburg, 1978). 1980 haben STALDER und STALDER & RYKART ähnliche Beobachtungen aus anderen Teilen der Schweizer Alpen mitgeteilt.

Das eben diskutierte relativ einfache Beispiel verweist auf eine bislang wenig genutzte Chance der Einschlußforschung: man kann mit ihrer Hilfe die Rahmenbedingungen der Mineralbildung, -auflösung und -neubildung in alpinen Zerrklüften während der retrograden alpinen Metamorphose schrittweise in Erfahrung bringen.

6. Zusammenfassung

Alpine Kluftquarze kristallisierten im Zuge der Kompressions- und Hebungsbewegungen der Alpen. Festkörper-, Flüssigkeits- und Gaseinschlüsse im Quarz geben Einblick in seine Entstehungsgeschichte und in diejenige der alpinen Kluftmineralparagenesen. Einschlüsse sind oft Zeugen spätalpiner tektonischer Bewegungen. Es darf angenommen werden, daß die Fluidzusammensetzung im Gestein zur Zeit der Einschlußbildung derjenigen Fluidzusammensetzung entsprach, die heute in den Einschlüssen der Quarzkristalle gefunden wird. So können mit zunehmendem Metamorphosegrad von NW nach SE vier Fluidfelder in den Schweizer Alpen unterschieden werden: das Feld der höheren Kohlenwasserstoffe, das Methanfeld, das Wasserfeld und das Kohlendioxidfeld. Die minimalen PT-Bedingungen des Methanfeldes wurden mit $\geqslant$ 200 °C und $\geqslant$ 1200 bar bzw. mit $\geqslant$ 270 °C und $\geqslant$ 1700 bar bestimmt.

Tektonische Einwirkung und die regionale und temporäre Variation der Fluidzusammensetzung in den Klüften beeinflußten in großem Ausmaß die Wachstumsbedingungen der Quarzkristalle. Verschiedene Quarztrachten und -habitus gelangten zur Ausbildung: Prismatischer Quarz, Fadenquarz, Zepterquarz, Tessinerhabitusquarz usw.

Summary

Quartz crystals from alpine fissures crystallized during compression and uplift movements of the Alps. Solid, liquid and gaseous inclusions in quartz record its growth history and that of the mineral paragenesis crystallized simultaneously in the alpine fissures. Inclusions often give information about late alpine tectonic movements. During trapping, fluid composition in the rocks is considered to be equal to that found in fluid inclusions of quartz crystals. Following the increasing path of regional metamorphism from the NW to the SE of the Swiss Alps four fluid fields have been differenciated: the field of higher hydrocarbons, the methane-field, the water-field and the field of carbonic gas. Minimum PT-conditions delimitating the methane-field are: $\geqslant$ 200 °C at $\geqslant$ 1200 bar resp. $\geqslant$ 270 °C at $\geqslant$ 1700 bar.

Tectonic movements and regional and temporary variations in fluid composition influenced significantly the growth conditions of quartz, crystallizing in consequence under different form combinations and habitus, such as prismatic quartz, fibre quartz, skeletal quartz, Tessin habitus quartz, etc.

Résumé

Des cristaux de quartz provenant de fentes alpines ont cristallisé au cours de mouvements de compression et de soulèvement des Alpes. Des inclusions solides, liquides et gazeuses ont été piégées dans les quartz dont elles reflètent la genèse ainsi que celle des paragenèses minérales cristallisées simultanément dans les fentes alpines. Les inclusions sont souvent les témoins des mouvements tectoniques alpins tardifs. La composition des fluides dans la roche lors de la formation des inclusions a été considérée comme égale à celle trouvée dans les inclusions fluides des quartz. Suivant l'évolution du métamorphisme régional du NW au SE à travers les Alpes Suisses, quatre champs de fluides ont été différenciés: le champ à hydrocarbures plus lourds que le méthane, le champ à méthane, le champ à eau et le champ à gaz carbonique. Les conditions minimales de P et T délimitant le champ à méthane sont respectivement: $\geqslant$ 200 °C pour $\geqslant$ 1200 bars, et $\geqslant$ 270 °C pour $\geqslant$ 1700 bars.

Les mouvements tectoniques et les variations spatio-temporaires de la composition des fluides dans les cavités ont influencé fortement les conditions de croissance des cristaux de quartz formant plusieurs costumes et apparances: quartz prismatique, quarz à âme, quartz sceptre, quartz à habitus tessinois, etc.

7. Verdankungen

In der vorliegenden Arbeit wird ein Teil der Ergebnisse einer mehrjährigen Forschungsarbeit zusammengefaßt, welche vom Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung in verdankenswerter Weise durch mehrere Projekte unterstützt wurde: Projekt Nr. 2.645-0.72. Nr. 2.529-0.76, Nr. 2.240-0.79.

8. Literatur

BAMBAUER, H.U., BRUNNER, G.O., & LAVES, F.: Wasserstoffgehalte in Quarzen aus Zerrklüften der Schweizer Alpen und die Deutung ihrer regionalen Abhängigkeit. Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. *42,* 221–236 (1962).

BOWERS, T.S., & HELGESON, H.C.: Calculation of the thermodynamic and geochemical consequences of nonideal mixing in the system H_2O-CO_2-NaCl on phase relations in geologic systems: Equation of state for H_2O-CO_2-NaCl fluids at high pressures and temperatures. Geochim. cosmochim. Acta *47,* 1247-1275 (1983).

FREY, M., BUCHER, K., FRANK, E., & MULLIS, J.: Alpine metamorphism along the Geotraverse Basel-Chiasso – a review. Eclogae geol. Helv. *73,* 527–546 (1980).

– – , HUNZIKER, J.C., FRANK, W., BOCQUET, J., DAL PIAZ, G.V., JAEGER, E., & NIGGLI, E.: Alpine metamorphism of the Alps. A Review. Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. *54,* 247–290 (1974).

HOEFS, J., & STALDER, H.A.: Die C-Isotopenzusammensetzung von CO_2-haltigen Flüssigkeitseinschlüssen in Kluftquarzen der Zentralalpen. Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. *57,* 329–347 (1977).

HUNT, J.A., & KERRICK, D.M.: The stability of sphene; experimental redetermination and geologic implications. Geochim. cosmochim. Acta *41,* 279–288 (1977).

LAEMMLEIN, G.G.: O proischoschdenii ploskich kwarzew s «beloj polosoj». (Über die Entstehung flacher Quarze mit «weißem Streifen».) Wopr. Mineral. Geochim. Petrogr. (Isdat. Akad. Nauk SSSR, Moskwa) *1946*, 98–110.

MARTIN, R.: Morphologie des quartz de la zone d'Orpierre (Hautes-Alpes, France). Schweizer Strahler *3*, 101–127 (1973).

MOSEBACH, R.: Neue Ergebnisse auf dem Gebiet der hydrothermalen Forschung. Chem. Ztg. *79*, 583–599 (1955).

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

– – : Die Quarzkristalle des Val d'Illiez – Zeugen spätalpiner Bewegungen. Eclogae geol. Helv. *69*, 343–357 (1976 a).

– – : Das Wachstumsmilieu der Quarzkristalle im Val d'Illiez (Wallis, Schweiz). Schweiz. mineral petrogr. Mitt. *56*, 219–268 (1976 b).

– – : The system methane-water as a geologic thermometer and barometer from the external part of the Central Alps. Bull. Minéral. *102*, 526–536 (1979).

NIGGLI, E., et al.: Metamorphic map of the Alps. Sub-Commission for the Cartography of the Metamorphic Belts of the World: Leiden-Paris 1973.

POTY, B.: 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) 1969.

– – , LEROY, J., & JACHIMOWICZ, L.: Un nouvel appareil pour la mesure des températures sous le microscope: l'installation de microthermométrie Chaixmeca. Bull. Minéral. *99*, 182–186 (1976).

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

– – , STALDER, H.A., & WEISBROD, A.M.: Fluid inclusion studies in quartz from fissures of Western and Central Alps. Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. *54*, 717–752 (1974).

RAMSAY, J.G.: The crack-seal mechanism of rock deformation. Nature *284*, 135–139 (1980).

RYKART, R.: Bergkristall. Ott: Thun und München 1977.

STALDER, H.A.: Petrographische und mineralogische Untersuchungen im Grimselgebiet (Mittleres Aarmassiv). Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. *44*, 187–398 (1964).

– – : Die Mineralien des Gotthardstraßentunnels. Mineralienfreund *18*, 105–132 (1980).

– – , & RYKART, R.: Epidot-Hohlformen in Quarzkristallen. Schweizer Strahler *5*, 320–323 (1980).

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

TOURAY, J.C., VOGLER, M., & STALDER, H.A.: Inclusions à hydrocarbures liquéfiés dans les quartz de Zingel/Seewen (Suisse). Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. *50*, 131–139 (1970).

WAGNER, A., FREY, M., QUADRIO, F., SCHWARTZKOPF, J., & STALDER, H.A.: Die Mineralfundstellen von Camperio und Campo Blenio, Kanton Tessin. Jb. Naturhist. Mus. Bern *1969–1971*, 277–360 (1972).