

Kataklasite und Mikrorisse in Gesteinen des Schwarzwälder Grundgebirges

Wolfhard Wimmenauer

Kurzfassung

Verheilte Mikrorisse in Quarz sind in Kristallingesteinen des gesamten Schwarzwaldes weit verbreitet. Sie bestehen aus vielen, mehr oder weniger regelmäßig angeordneten Fluideinschlüssen und werden als Erzeugnisse weit zurückliegender, wiederholter tektonischer Erschütterungen und anschließender Rekristallisation des Quarzes gedeutet. In besonders betroffenen Gebieten zeugen zwei oder mehr Phasen der Kataklase und gangförmige Mikrobrecien für die wiederholte Wirkung solcher schnell verlaufender Prozesse.

Stichwörter

Kataklasite, Mylonite, Quarz, Mikrorisse, Erdbeben, Schwarzwald, Deutschland.

Cataclasites and microcracks in rocks of the Black Forest basement, Germany

Abstract

Healed microcracks in quartz are very widespread in rocks of the whole Schwarzwald (Black Forest) basement. They consist of many, more or less regularly arranged fluid inclusions; they are interpreted as results of early tectonic shocks and subsequent recrystallization of the quartzes. In some areas so affected, two or more phases of cataclasis and microbreccia dikelets indicate, for a certain time, a repeated action of such processes.

Key words

Cataclasites, mylonites, quartz, microcracks, earthquakes, Black Forest, Germany.

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr. Wolfhard Wimmenauer
Rehhagweg 21
79100 Freiburg i. Br.

1. Einführung

1.1 Kataklasite und Mylonite. Lage der Vorkommen und allgemeine Befunde

Kataklasite und Mylonite sind in den Gesteinen des Schwarzwälder Grundgebirges weit verbreitet; sie wurden im Laufe der Erforschung mehrfach in speziellen Untersuchungen dargestellt, besonders durch GROSCHOPF 1973, FLÖTTMANN et al. 1985 und in einer schon weiter zurück liegenden Notiz von WIMMENAUER 1948, auf deren Inhalt hier im Folgenden wieder Bezug genommen werden soll. Besonderes Interesse gilt dabei dem spröden oder duktilen Verhalten des Quarzes und den dazu gehörigen Erscheinungen. Die vorzugsweise behandelten Vorkommen sind:

- Granite im Nord- und Mittelschwarzwald, TK 7216 Gernsbach, 7316 Forbach, 7415 Allerheiligen-Seebach, 7616 Alpirsbach.
- Hydrothermale Quarzgänge im Kinzigtal, Halden der Gruben Baberast, Segen Gottes und Ludwig im Adlersbach TK 7614 Zell am Harmersbach und 7714 Haslach i. K.
- Ausgedehnte Zonen und Flächen in der Umgebung von Simonswald, TK 7814 Elzach und 7914 St. Peter (siehe Karte Abb. 1).
- Bohrungen und Tagesaufschlüsse im Dreisamtal östlich von Freiburg i. Br., TK 8013 Freiburg SO.
- Aufschlüsse über und unter Tage im Schauinslandgebiet südlich von Freiburg i. Br., TK 8013 Freiburg SO.
- Metabasitkörper in verschiedenen Teilen des Gneisgebietes im Mittelschwarzwald.
- Ausgedehnte Kataklasit- und Mylonit-Flächen in der tektonischen Zone Badenweiler-Lenzkirch, TK 8112 Staufen, 8113 Todtnau und 8213 Zell im Wiesetal.

Darüber hinaus wurden bei einer allgemeinen Revue von mehreren Tausend Dünnschliffen aus dem Schwarzwald weitere einschlägige Befunde zum Thema mit einbezogen.

1.2 Petrographie der Kataklasite und Mylonite

Zu Beginn der vorliegenden Untersuchung war es eine Hauptfrage, wie weit sich in den Gefügen der dort vorkommenden Kataklasite und Mylonite langsame und schnelle Prozesse im Aufschluss, am Gesteinsstück und mikroskopisch erkennen und unterscheiden lassen. Besonderes Augenmerk galt dabei den Erscheinungen in den Quarzen, speziell den im Schwarzwald noch kaum je beachteten Mikrorissen darin, waren doch solche in den letzten Jahrzehnten als mögliche Indikatoren besonders energiereicher, kurzzeitiger Kräftwirkungen, speziell bei Impakten großer Meteorite angesehen worden. Die zunächst betrachteten Gesteine aus den oben genannten Gebieten sind, unabhängig von solchen Deutungen, als Mylonite und Kataklasite zu bezeichnen. Im allgemeinen Sprachgebrauch sind Mylonite tektonisch erzeugte, im festen, aber duktilen Zustand verformte Gesteine mit gerichteten Texturen; bei ihnen findet gegenüber dem Ausgangsgestein eine Zerkleinerung der Minerale statt, die indessen dank einer Rekristallisation ihren Zusammenhang bewahren. Kataklasite im Sinne

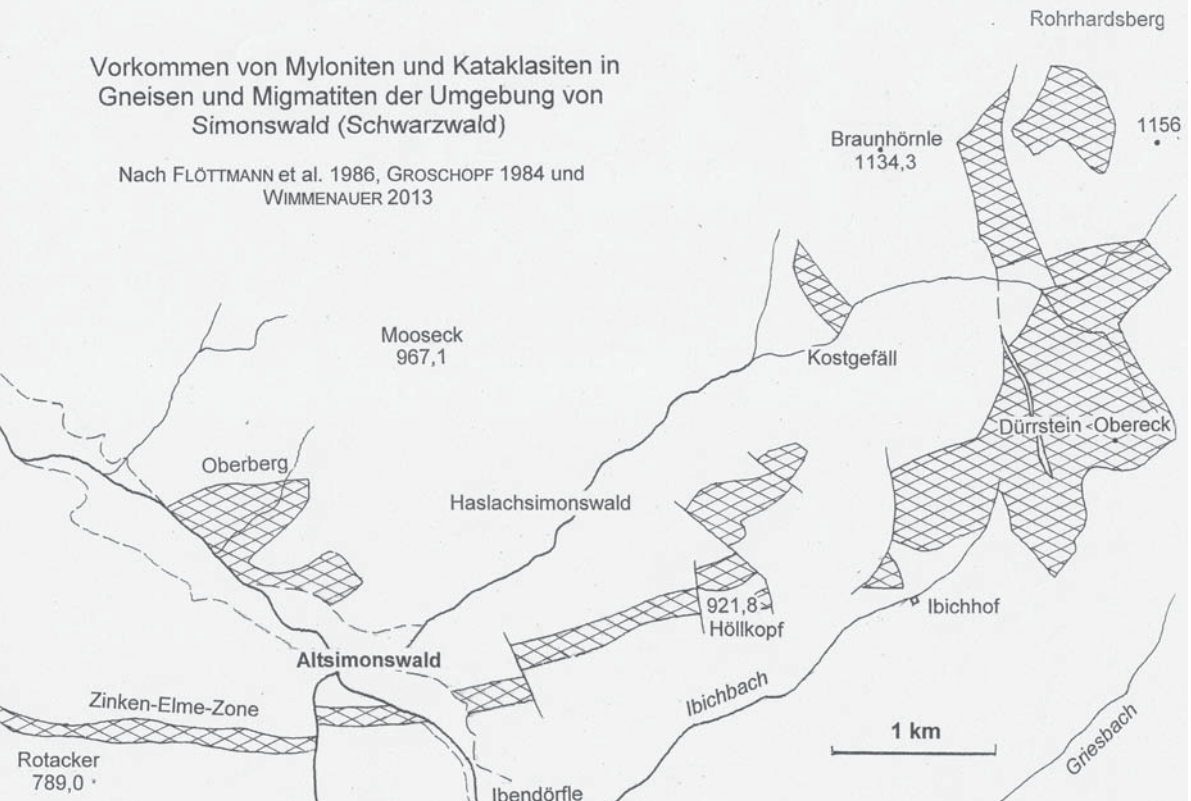


Abb. 1: Kartenskizze Simonswald. **Fig. 1:** Sketch map of the Simonswald area. Cross hatched = mylonite and cataclasite areas.

dieses Aufsatzes sind Gesteine, deren Mineralsubstanz im spröden Zustand zerbrochen, zerkleinert und zu festen, zuletzt feinkörnigen bis dichten Massen ohne gerichtete Texturen umgewandelt wurden. Noch erhaltene Bruchstücke des Ausgangsmaterials sind Klasten; ihre Größen reichen von Dezimetern herab bis an die Grenze der Erkennbarkeit im Dünnschliff. Oft liegen aber die kleinsten Klasten auch in einer neu gebildeten Matrix, die im Dünnschliff fein kristallin oder strukturlos und dann optisch isotrop sein kann. Bereits FLÖTTMANN et al. 1986 haben deren äußere Ähnlichkeit mit Pseudotachylyten, d. h. durch Reibungserhitzung gebildeten, zunächst glasigen Gängen und Adern hervorgehoben.

Manche der vorgefundenen Kataklasite haben im Dezimeter- bis Zentimeterbereich eine fast konglomeratartige Struktur mit gerundeten Gesteinsklasten in einer feiner zerkleinerten Grundmasse, so z. B. in dem Vorkommen Pflugshalde am Schauinsland (Abb. 1 bei WIMMENAUER 1948). Von ihnen aus bestehen alle Übergänge in kataklastische Breccien mit Gesteins- und Mineralfragmenten von Zentimeter- und Millimeter Größe und endlich zu gleichmäßig klein- bis feinkörnigen Kataklasiten, deren Aussehen an Grauwacken erinnern kann (Fundgebiete Pflugshalde, Stäpfelefen, Rappeneck und Umgebung von Simonswald). Andere, durch Überlagerung mylonitischer durch kataklastische Verformung entstandene Gefüge enthalten die Merkmale beider Prozesse sowohl mesoskopisch als auch bis in den Dünnschliffbereich.

1.3 Gangförmige Kataklasite und Mikrobrecien

Mehrfach, besonders in den Fundbereichen Grube Schauinsland, Rappeneck, Thomashof, Holzhof und Bohrung Kirchzarten, treten Kataklasite ausgesprochen gang- oder aderförmig in mehr oder weniger intaktem Nebengestein auf und lassen selbständige Verlagerungen ihres Materials gegenüber der unmittelbaren Nachbarschaft, also ein quasi intrusives Verhalten deutlich erkennen (intrusive Mikrobrecien, Abb. 2). Die gleichen Fundgebiete sind es auch, in denen wenigstens zwei Generationen von Kataklasit auftreten, deren ältere meist in Gestalt abgerundeter oder sogar fladenförmiger Klasten erhalten ist (z. B. Grube Schauinsland und Vorkommen Thomashof, siehe Abschnitt 1.4).

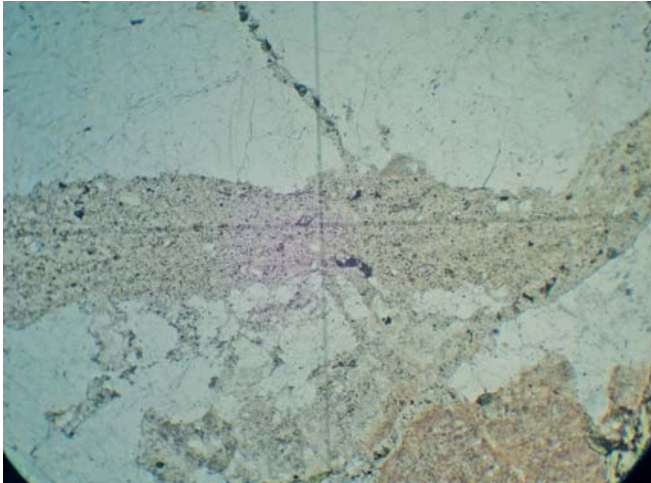


Abb. 2: Mikrobrecien-Gängchen (mit Verzweigung) in Kataklasit vom Rappeneck (TK 1:25 000 Freiburg SO). Bildbreite 3 mm.

Fig. 2: Branched microbreccia dikelet in cataclasite from Rappeneck (Topographic Map 1:25 000 Freiburg SO). Width of the image 3 mm.



Abb. 3: Xenolithartiges Bruchstück eines älteren Kataklasits in jüngerem, gangförmigem Kataklasit. Grube Schauinsland, Kappler Stollen-Sohle nahe Diagonaltrum 0, Bildbreite 1,5 mm.

Fig 3: Xenolithic fragment of older cataclasite in younger cataclasite dike. Mine Schauinsland, Kappler Stollen level near diagonal vein 0, width of the image 1,5 mm.

Zu den für die Ausbildung solcher Kataklasite entscheidenden Modalitäten gehört die ausgesprochen dilatative Tendenz der erzeugenden Bewegungen. Sie ermöglichte die Öffnung schmaler Gangspalten und ihre Füllung mit Mikrobreccie und ließ, anders als ein mylonitisierender Vorgang, den Klasten eine gewisse Bewegungsfreiheit. Dadurch wurden oft kantig-eckige Klasten gebildet, erhalten und sogar der Wegtransport von einzelnen Gesteinsstücken von ihrem vorherigen Ort bewirkt. Ein erster, dahin gehender Befund ist von GROSCHOPF (1973) beschrieben worden; es handelt sich dort um Porphyritklasten in der Zinken-Elme-Zone (zwischen Siensbach und Simonswald, TK 7913 und 7914).

1.4 Alterskriterien in Kataklasiten

Oft ist an den intrusiven, aderförmigen Mikrobreccien eine Verfestigung mit Adular, Chlorit oder Klinozoisit eingetreten. Im Fundbereich Grube Schauinsland werden konsolidierte Mikrobreccien dieser Art von Äderchen mit Adular und Calcit durchquert, Minerale, die auch in den nahe benachbarten Erzgängen zu den ältesten Bildungen gehören. Für die kataklastischen Brecciengängchen gilt demnach, dass sie älter als die, wahrscheinlich im Tertiär gebildeten, Erzgänge sind (hierzu siehe auch die Ausführungen von WERNER et al. 2002). Für die flächig ausgedehnten Kataklasite des Dürsteingebiets östlich von Altsimonswald liefern die unversehrt darin aufsetzenden Granitporphy- bzw. Lamprophyrgänge ein Alterskriterium, das die Kataklastose in einen Zeitraum früher als 290 Millionen Jahre versetzt – eine Erkenntnis, die auch für die Tiefenlage und die P-T-Bedingungen zur Zeit dieses Prozesses maßgeblich ist. Nur schnell wirkende Kräfte können an den dort noch warmen Gesteinen und ihren Mineralen die beobachteten Brucherscheinungen und Zerspaltungen erzeugt haben.

In mehreren Vorkommen lässt sich anhand von einzelnen Klasten, die mit ihren Gefügen von einer älteren Kataklasitgeneration herzuleiten sind, deutlich eine Zweiphasigkeit des Geschehens erkennen. Einzelne Bruchstücke einer ersten Generation kataklastischen oder mylonitischen Gesteins liegen dort als - oft abgerundete - Einschlüsse zwischen den Klasten der jüngeren Generation. Immer sind die Bildungen der älteren Generation deutlich feiner körnig als die jüngeren; nicht selten zeigen sie Relikte einer feinlagigen Struktur und weitere Abweichungen ihres Gefüges von dem ihrer jetzigen Umgebung. Die Verhältnisse lassen erkennen, dass die ältere kataklastische Phase eine weiter gehende Zerkleinerung des Gesteins bewirkte als die jüngere; bei dieser fand unter Auflockerung auch die Durchmischung statt, die dazu führte, dass einzelne Fragmente der ersten Generation jetzt, anscheinend unregelmäßig verteilt, wie Xenolithe in der Hauptmasse des Gesteins anzutreffen sind. Beispiele für solche Verhältnisse bieten die Fundorte in der Zinken-Elme-Zone (TK 7914 St. Peter), die Forschungsbohrungen bei Kirchzarten (TK 8013 Freiburg SO), Untertage-Aufschlüsse in der Grube Schauinsland (TK 8013, Abb. 3), Tagesaufschlüsse beim Thomashof und beim Holzhof (TK 8013, Abb. 4 und 5), Tagesaufschlüsse am Rappeneck (TK 8013) sowie vier Fundorte nahe der Ortschaft Aitern (TK 8113 Todtnau). Besonders an einigen solcher älterer Kataklasitrelikte im Vorkommen Thomashof sind ganz unterschiedliche Grade der Zerkleinerung, seltener auch ausgeprägte Lagenstrukturen eines mylonitischen Gefüges erkennbar (Abb. 6).



Abb. 4: Kataklasit, Anschliff Thomashof im Rechtenbachtal (TK Freiburg SO). Stark zerkleinertes Gestein mit vielen, frisch erhaltenen Feldspat- und Quarzklasten (weiß) und umgewandelten, bis über ein Zentimeter großen Kataklasitklasten älterer Generationen (grau und bräunlich in verschiedenen Farbtönen). Bildbreite 4,5 cm.

Fig. 4: Polished section of cataclasite, Thomashof, Rechtenbach valley (Topographic Map 1:25 000, sheet Freiburg SO). Strongly triturated rock with many, fresh feldspar- and quartz clasts (white) and altered, up to 2 cm large cataclasite clasts of earlier generations (grey and brownish). Width of the image 4,5 cm.

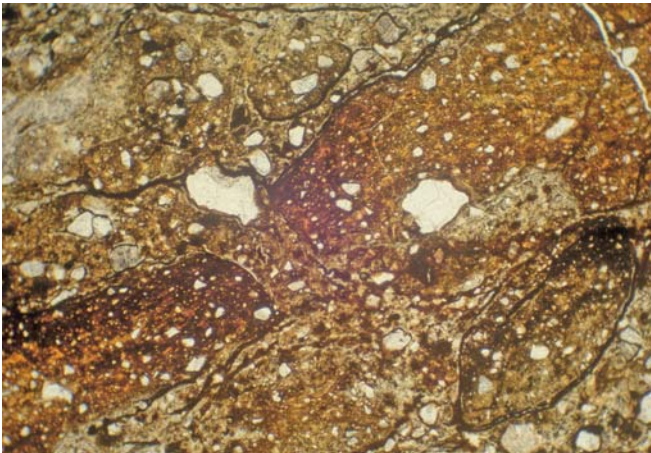


Abb. 5: Kataklasit vom Thomashof im Rechtenbachtal (TK Freiburg SO). Dünnschliffbild eines brecciösen Gefüges mit hell durchsichtigen Quarz- und Feldspatbruchstücken und sehr stark zerkleinerter und zersetzter Kataklasitmatrix älterer Generation. Bildbreite 3 mm.

Fig. 5: Cataclasite, same locality as fig. 4, thin section. In a fine grained breccious matrix, there are transparent clasts of quartz and feldspar and larger fragments of cataclastic rock of an earlier generation. Width of the image 3 mm.

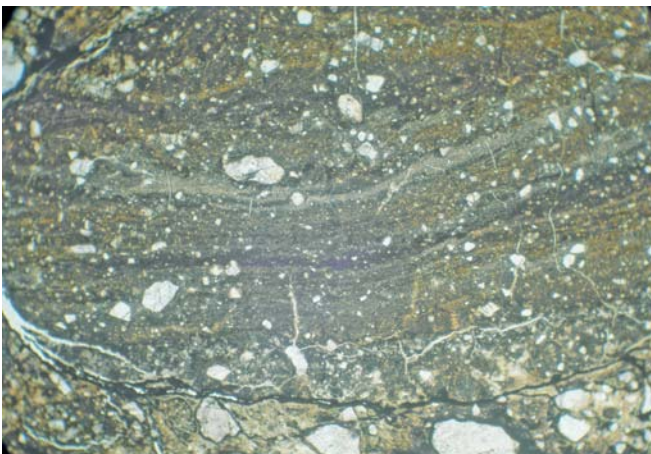


Abb. 6: Lagenstruktur eines größeren, fladenförmigen Mylonitklasten im Kataklasit vom Thomashof im Rechtenbachtal (TK Freiburg Südost). Hell durchsichtige Quarz- und Feldspäte wie in Abb. 3 und 4; dünne, sehr feinkörnige Lagen optisch nicht definierbarer Kataklasitmatrix, zum Teil bei gekreuzten Polarisatoren isotrop („Pseudotachylyt“). Bildbreite 3 mm.

Fig. 6: Banded structure of a larger, mylonitic inclusion in cataclasite; locality as in fig. 4 and 5. The most fine-grained layers appear optically isotropic and thus resemble the matrices of some "pseudotachylytes". Width of the image 3 mm.

Ganz ähnliche Beobachtungen wurden von mehreren Autoren vom Kristallin des Nördlinger Ries, einem Impaktkrater, mitgeteilt (GUDDEN 1974, CHAO 1977, HÜTTNER 1977, STÄHLE & OTTEMANN 1977) und mit der ausgesprochenen Zweiphasigkeit des dortigen Geschehens in Verbindung gebracht. Auf die erste Stoßwelle des Impaktes mit starker Kompression folgte nach wenigen Sekunden die Rückfederungswelle mit Dilatation, die zum Auswurf großer Gesteinsmassen und zur Bildung des Kraters führten. Auch die Beobachtungen an den intrusiven Mikrobrecien im Ries-Kristallin entsprechen weitgehend denen an unseren Vorkommen.

Für unsere Befunde stellt sich die Frage, wie weit aber nicht auch tektonische Prozesse, namentlich Erdbeben, die beobachtete Abfolge hier zustande bringen konnten.

2. Mikrorisse in Quarz

2.1 Systematik der Mikrorisse

Ein anderes Hauptthema der vorliegenden Arbeit sind die ungemein verbreiteten Mikrorisse in Quarz, die zunächst in einigen Kataklasiten, dann aber auch in verschiedensten, nicht kataklastischen Gesteinen des Schwarzwälder Grundgebirges angetroffen wurden. Sie basieren physikalisch auf dem Bruchverhalten des Minerals, wenn es infolge der P-T-Verhältnisse oder der Schnelligkeit der Einwirkung nicht duktil reagieren kann. Es treten dann Rissbildungen ein, die nach Richtung und Größe der Kraftwirkung und der Orientierung des betroffenen Kristallgitters sehr unterschiedlich sein müssen. Gefunden werden:

- Risse, die mehr als ein Quarzkorn durchsetzen (transkristalline Risse), wobei die überquerten Korngrenzen entweder keine erkennbare Störung bewirken oder auch eine Ablenkung verursachen können. Sie führen oft einen bräunlichen, isotropen oder auch anisotropen Belag, der sich zu einer eigentlichen mineralischen Füllung verstärken kann (gefüllte Mikrorisse).
- Risse, die nur innerhalb eines (optisch einheitlichen) Kornes auftreten, darunter oft solche,
- die eine sichtbare Distanz zu den Korngrenzen einhalten (intrakristalline Risse).
- Verheilte Mikrorisse, das heißt solche, die durch Nachwachsen der Substanz des betroffenen Minerals wieder geschlossen wurden. Sie können unter Umständen in dichten Schwärmen auftreten, in denen die Abstände zwischen den einzelnen Rissen nur einige μm betragen. Sie sind überaus häufig und wegen ihrer genetischen Aussage besonders bedeutsam (Abb. 7 und 8).
- Offene Mikrorisse ohne mineralische Füllung. Viele von ihnen können bei der Herstellung des Dünnschliffes entstanden sein, andere sind Abkühlungsrisse (siehe Abschnitt 2.6).

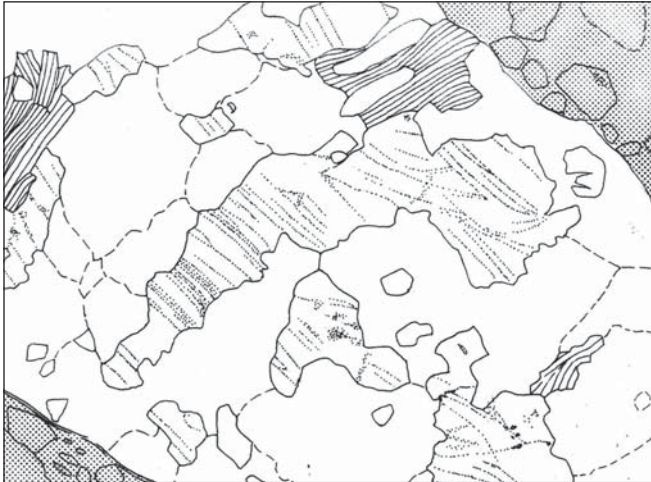


Abb. 7: Verheilte Mikrorisse in Quarz eines Migmatit-Bruchstückes; Kataklasit vom Stäpfeleisen (TK Freiburg SO). Weiße Flächen: Feldspäte, feines Punktraster: Kataklasit, schraffiert: Biotit. Bildbreite 3 mm.

Fig. 7: Healed microcracks in quartz (shown as arrays of small dots); white areas = feldspars; fine punctation = kataklasite; hatched = biotite. Width of the image 3 mm. Stäpfeleisen near Schauinsland; Topographic Map 1:25 000 as in fig. 2.

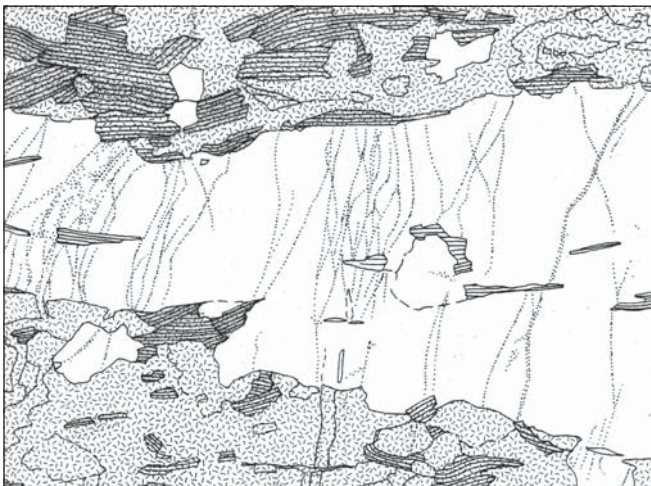


Abb. 8: Quarzlage in Paragneis, Bohrung Bad Griesbach 349,5 m (TK 7515 Oppenau). Zahlreiche verheilte Mikrorisse durchsetzen die Quarzlage unter steilem Winkel zur Paralleltextur des Gesteins. Nur wenige Risse lassen eine Fortsetzung außerhalb der Quarzlage erkennen. Quarz weiß, Feldspäte gerastert, Biotit schraffiert. Bildbreite 3 mm.

Fig. 8: Quartz layer in paragneiss, drilling Bad Griesbach 349,5 m (Topographic Map 1:25 000 Oppenau). Numerous healed microcracks traverse the quartz layer; only a few of them seem to continue into the neighbouring feldspar (gridded) and biotite areas. Width of the image 3 mm

2.2 Verheilte Mikrorisse

Ein großer Teil der in unseren Gesteinen angetroffenen Mikrorisse ist gar nicht mehr in seinem Originalzustand, sondern verheilt. Dann liegen, je nach der Orientierung und der dadurch bedingten Ansicht im Mikroskop, Reihen oder Flächen von winzigen Fluideinschlüssen vor. Diese heben sich infolge der niedrigen Lichtbrechung ihres Inhaltes optisch sehr stark von der umgebenden Mineralsubstanz ab und kennzeichnen gut den Verlauf des betreffenden Risses. Es kann angenommen werden, dass die Verheilung der Risse oft bald, vielleicht sogar sofort anschließend an deren Bildung eintreten konnte. Dazu waren ein an SiO_2 gesättigtes Fluid und entsprechend auch die für hydrothermale Mineralbildung günstigen P-T-Bedingungen

erforderlich - Verhältnisse, die in den anzunehmenden Bildungstiefen von mehreren Kilometern wohl als normal anzusehen sind.

Die weite Verbreitung gerade dieses Risstyps scheint zu bedeuten, dass solche Bedingungen weithin geherrscht haben und dass die verheilten Risse, einmal entstanden, auch unter später veränderten Umständen noch erhalten bleiben oder doch noch erkennbare Relikte hinterlassen.

Verheilte Mikrorisse treten in Graniten und Metamorphiten des Schwarzwälder Grundgebirges überaus häufig auf; sie sind, einzeln oder zu mehreren, bevorzugt in Körnern, die größer als ungefähr 0,1 mm sind, anzutreffen. Am häufigsten sind nahezu ebene oder nur wenig gekrümmte Risse; oft sind sie aber in verschiedenem Maße gebogen, in sich tordiert und nicht genau untereinander parallel. Oft kommen auch spitzwinklige Berührungen, Gabelungen oder Durchsetzungen vor. Vielfach gehören solche Risse verschiedenen Systemen an, die sich unter stumpfen Winkeln berühren oder durchkreuzen. In Gneisen mit gut entwickelter Paralleltextur und geplätteten Quarzen verlaufen solche Risse bevorzugt quer dazu; ein Beispiel hierfür ist in Abb. 8 gezeigt. Sehr häufig ist der Befund, dass die unmittelbar angrenzenden Minerale, besonders Feldspäte, keine gleichartigen, sondern andere oder gar keine Brucherscheinungen aufweisen, als ob ihre Gefüge sich noch nach den Rissbildungen im Quarz weiter entwickelt hätten. Auch in Vorkommen, wo solche verheilten Risse ungewöhnlich massiert auftreten (z. B. im Forbachgranit des Fundgebietes Ruckgraben, TK 7218 Gernsbach), enden sie an den Grenzen zu den benachbarten Feldspäten und Glimmern. Ein Konvergieren dicht gescharter Risse auf die Kanten benachbarter Muskovite ist im Granit des Ruckgrabens (Abb. 10 und 11) und im Eisenbacher Granit von Unterkirnach (TK 7916 Villingen) zu beobachten. Es scheint, als ob elastisches Nachgeben des Glimmers die Risse zu seinen, an Quarz grenzenden, Kanten hingelenkt hätte. Auch von Kanten und Ecken angrenzender Feldspäte werden Bündel der Risse im Quarz gleichsam „in die Zange genommen“, wobei an diesen Nachbarmineralen keine Deformationserscheinungen oder Risse sichtbar sind.

Hinsichtlich der Orientierung der Risse im Gitter der betroffenen Quarze ist festzustellen, dass angesichts des krummen Verlaufs und der mangelnden Parallelität der Risse innerhalb eines Kornes und andererseits der Fortsetzung vieler Risse durch mehrere, optisch ganz verschieden orientierte Nachbarkörner, die oft vermutete Zuordnung zu bestimmten Gitterebenen nicht gegeben sein kann. Die gleiche Unabhängigkeit scheint auch gegenüber Gitterstörungen, die sich durch undulöse Auslöschung kenntlich machen, und den verschiedenen Formen der jeweils vorhandenen Quarz-Quarz-Korngrenzen (glatt, suturartig, fein verzahnt und andere) zu bestehen. Stattdessen ist oft festzustellen, dass die Lage solcher Risse im Gestein und entsprechend ihre Ausrichtung im Dünnschliff über größere Bereiche des Kornverbandes gleich bleibt und somit den Vorrang der von außen wirkenden Krafrichtungen bestätigt. Ganz allgemein gilt auch, dass verheilte Risse in Gesteinen mit gut entwickelten, sozusagen unversehrten, Metamorphitgefügen auftreten und nicht auf Kataklasite beschränkt sind. Ein auffallendes Phänomen ist hier die Häufung solcher Risse in langgestreckten „Plattenquarzen“ in Paragneisen und Leptiniten verschiedener Herkunft, z. B. in der Bohrung Griesbach (TK

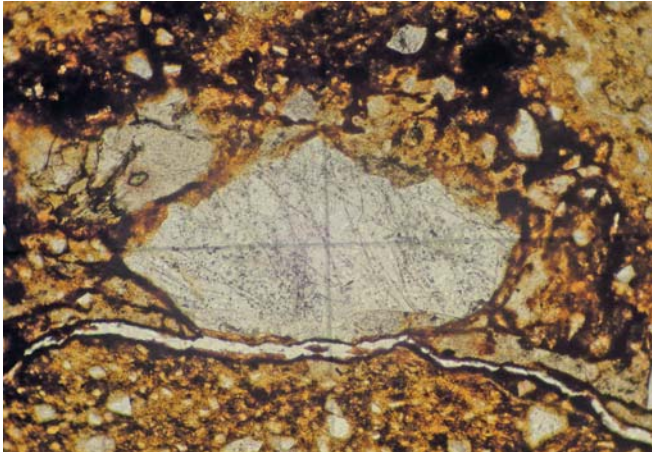


Abb. 9: Verheilte Mikrorisse in Quarzklast. Kataklastit vom Thomashof im Rechtenbachtal (TK Freiburg SO). Bildbreite 1,5 mm.
Fig. 9: Healed microcracks in a quartz clast. Thin section of cataclite; locality as in fig. 3. Width of the image 1,5 mm.

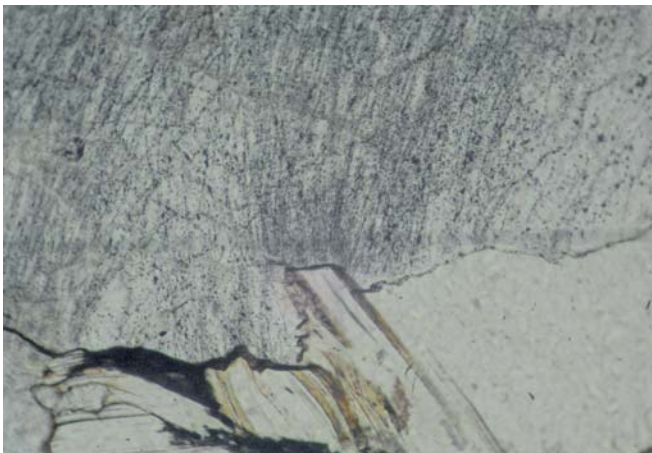


Abb. 10: Dichtes, auf Muskovitkante konvergierendes Bündel verheilter Mikrorisse in Quarz des Forbach-Granits, Ruckgraben bei Reichental (TK Gernsbach). Bildbreite 0,75 mm.
Fig. 10: Dense bunch of healed microcracks in quartz, converging towards the edge of a muscovite grain in granite. Ruckgraben near Reichental (Topographic Map 1:25 000 Gernsbach). Width of the image 0,75 mm.

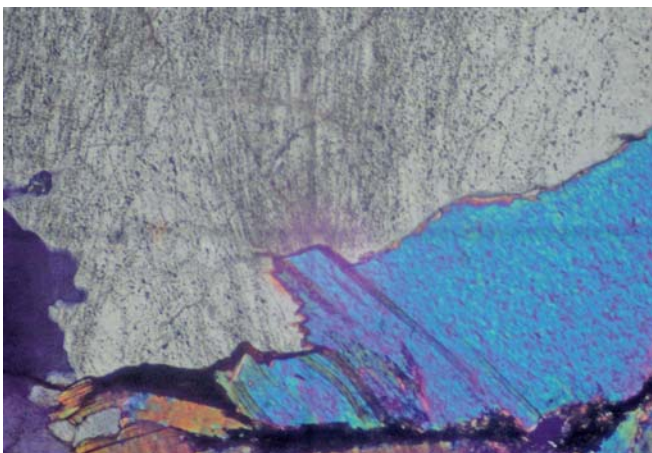


Abb. 11: Dasselbe Motiv wie Abb. 10, bei gekreuzten Polarisatoren.
Fig. 11: Same object as that of fig. 10, crossed polarizers.

7515 Oppenau, Abb. 8) und in Leptinit von Zindelstein (TK 8016 Donaueschingen). Mikrorisse kommen aber auch, und stellenweise sogar reichlich, in ganz undeformierten Gesteinen, so in praktisch allen variskischen Graniten des Schwarzwaldes vor. Nirgends ist erkennbar, dass entlang solcher Risse Seitenverschiebungen stattfinden, obschon ihre oft beobachtete gleichmäßige Orientierung im Gestein auf eine gerichtete Kraftwirkung bei ihrer Entstehung hinweist. Das Vorkommen solcher Rissssysteme in den jüngeren Graniten und selbst in einigen Granitporphyren des Schwarzwaldes bedeutet, dass die verursachenden Ereignisse jünger als der variskische Plutonismus des Schwarzwaldes sein müssen. Erst recht sind sie jünger als die metamorphen Mineralbestände und Gefüge der Gneise des Gebietes. Problematisch ist angesichts dieses Befundes das Fehlen solcher Risse in manchen Gneisen und Migmatiten des Mittelschwarzwaldes. Es kann bedeuten, dass diese Gesteine von den erzeugenden Kräften nicht betroffen wurden oder dass früher einmal gebildete Risse durch Rekristallisation der Quarze wieder verschwunden sind.

Die in den Metabasiten des Grundgebirges verbreitet auftretenden Quarze sind von internen Rissbildungen nicht überall in derselben Weise betroffen, wie die der gewöhnlichen Gneise und Migmatite. So erscheinen sie in vielen Fällen nicht oder nur ansatzweise verheilt. Nicht selten treten auch mineralisierte Risse auf, die entweder aus Komponenten eines metamorphen Mineralbestandes, besonders Klinozoisit, oder aber solche, die schon dem Verwitterungszyklus angehören, also vor allem aus Limonit, bestehen. Mineralbildungen dieser Art setzen das Aufbrechen offener Risse voraus, die ihrerseits auf Schrumpfungsprozesse an den betreffenden Quarzkörnern hinweisen. Solche können letztlich nur Folge der Abkühlung sein, die die Minerale beim Aufstieg aus den P-T-Bedingungen auf dem Höhepunkt des Metamorphosegeschehens, also der Anatexis, erfahren haben (vgl. die experimentelle Untersuchungen von RAZ et al. 2002). Die Sonderstellung solcher Quarze und Quarzaggregate hebt sie auch im Dünschliffbild in prägnanter Weise hervor (Abb. 12).

In einem ganz anderen Milieu, dem unterkarbonischen Ignimbrit vom Bergerwald bei Lenzkirch, kommen millimetergroße Quarzkörner vor, deren Gestalt auf eine teilweise Resorption in der Schmelze schließen lässt (BURGATH 1972, Abb. 63 und 65). Sie enthalten bei 50-facher Vergrößerung deutlich erkennbare verheilte Mikrorisse, die leicht gekrümmte und spitzwinklig sich schneidende Bruchflächen nachzeichnen. Ihre Erhaltung trotz der erlebten, starken Erhitzung ist überraschend, zumal ähnlich geformte Quarze in anderen Gluttuff-Vorkommen keine solchen Risse aufweisen.

2.3 Alterung und Verschwinden verheilter Mikrorisse

In vielen Gesteinen erscheinen die verheilten Risse nur undeutlich ausgebildet; stattdessen treten dort erheblich größere Fluideinschlüsse auf, die aber nicht mehr so korrekt aufgereiht sind. Die Anordnung der Fluideinschlüsse ist gelockert, wie verwischt; sie verliert sich schließlich in „Wolken“ aus größeren und kleineren Fluideinschlüssen ohne bestimmte Orientierung. Der Inhalt größerer Einschlüsse lässt dann eine zweiphasige Füllung mit Flüssigkeit und Gaslibelle

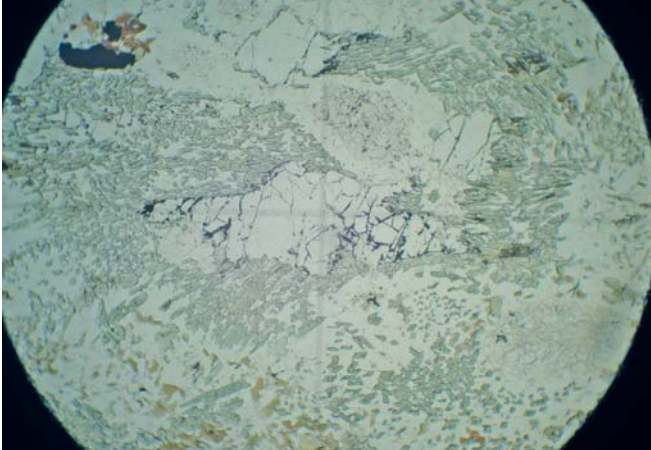


Abb. 12: Quarzaggregate mit dunkel gefüllten Mikrorissen. Eklogitamphibolit vom Wanglerhof (TK 8014 Hinterzarten). Die Rissysteme im Quarz setzen sich nicht in die Minerale der amphibolitisch kristallisierten Gesteinsumgebung fort. Bildbreite 3 mm.

Fig. 12: Metabasite from Wanglerhof, Topographic Map 1:25 000 Hinterzarten. Microcracks with dark fillings in quartz; they do not continue into the amphibolitic environment (plagioclase, amphibole, biotite). Width of the image 3 mm.

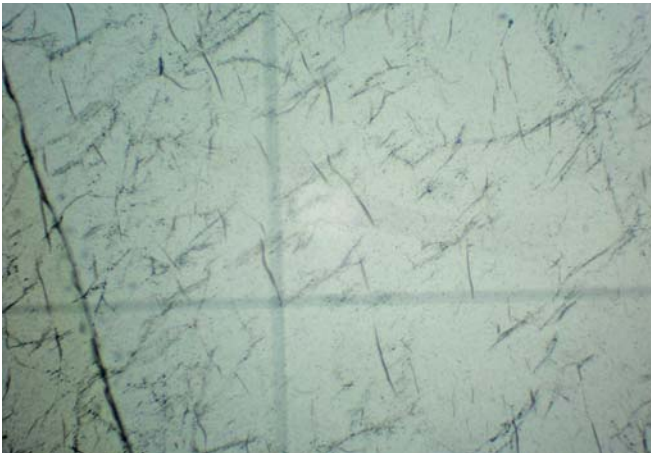


Abb. 13: Abkühlungsrisse (etwa NNW gerichtet) und verheilte, z. T. gealterte Mikrorisse (NNE gerichtet) in Quarz, Grube Baberast (TK 7614 Zell am Harmersbach). Bildbreite 3,0 mm.

Fig. 13: Cooling cracks (oriented about NNW) and healed, partly "aged" microcracks (NNE-directed), in quartz from the mine Baberast, Topographic Map 1:25 000 Zell am Harmersbach. Width of the image 3 mm.

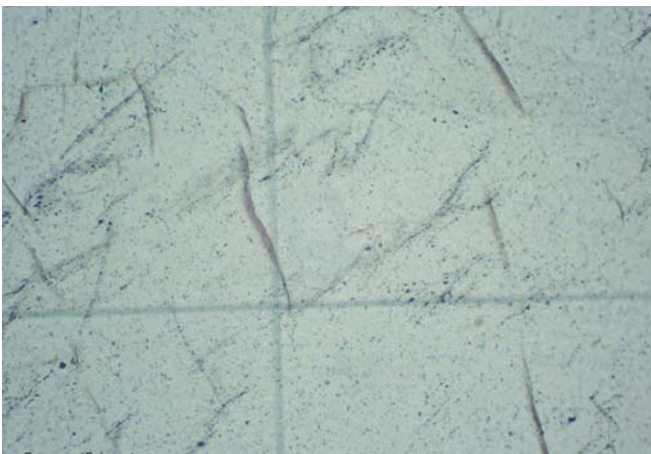


Abb. 14: Dasselbe Motiv wie Abb. 13, Bildbreite 0,3 mm.

Fig. 14: The same object as in fig. 13; width of the image 0,3 mm.

erkennen. Offensichtlich hat ein besonderer Modus der Weiterkristallisation der Quarzsubstanz die Ansammlung der Fluide in wenigeren, aber größeren Einschlüssen bewirkt.

Der Nachweis, dass dort Fluideinschlüsse unter Druck vorhanden sind, ist mit Hilfe der Platine d'Ecrasement nach G. Deicha leicht möglich. Kleine Proben von Mineralen mit solchen Einschlüssen werden unter dem Mikroskop, in Immersionsöl eingebettet, zwischen zwei Fensterglasplättchen langsam zerdrückt und zerbrechen vor den Augen des Beobachters unter Freisetzung deutlich sichtbarer Bläschen, deren Volumen um ein Vielfaches größer ist als das der zuvor vorhandenen Fluideinschlüsse der Probe. Erscheinungen dieser Art wurden an Kataklasiten verschiedener Fundgebiete, aber auch an nicht kataklastisch veränderten Graniten beobachtet.

Eine eigentlich auch zu erwartende Erscheinung, nämlich eine unfertige Verheilung von Mikrorissen in der Weise, dass die direkte Fortsetzung von noch im ursprünglichen, offenen Zustand erhaltenen Rissen in verheilte sichtbar ist, wurde, wenn auch relativ selten, beobachtet.

Die mit diesen Befunden angesprochene Thematik hat in den letzten Jahrzehnten zunehmend an Aktualität gewonnen. Unser Literaturverzeichnis führt eine ganze Anzahl von einschlägigen Untersuchungen auf, in denen in verschiedener Weise Mikrorisse dieser Art behandelt werden. Ausdrücklich deutet schon TRÖGER (1967, S. 159) „lineare Bläschenzüge“ in Quarz als Überreste von ausgeheilten Sprüngen im Gestein und betont, dass sie oft durch mehrere benachbarte Körner weiter laufen. Im gleichen Sinne haben SCHILD et al. (1998) Mikrorisse in Kernen der Forschungsbohrung Soultz-sous-Forêts, VOLBRECHT et al. (1999) solche in der KTB-Forschungsbohrung in der Oberpfalz behandelt. Die Abhängigkeit der Rissbildung vom tektonisch bedingten Stressfeld und dem kristallographisch und temperaturbedingten Bruchverhalten der Quarze werden dort analysiert und ausführlich dargestellt. Offenbar entsprechen die untersuchten Mikrorisse ganz den im Schwarzwald-Kristallin gefundenen. Hingewiesen sei hier weiterhin auf einschlägige Studien von FEVES et al. (1977), RICHTER & SIMMONS (1977), SIMMONS & RICHTER (1983), SHELTON & ORVILLE 1980, SMITH & EVANS 1984, KRONENBERG 1984, BRANTLEY et al. 1990, DI TORO et al. 2004 und STÖCKHERT et al. 2007.

2.4 Verhältnis der verheilten Mikrorisse zu Kataklasten und Mylonitisierung

Für die zeitliche und ursächliche Zuordnung der verheilten Mikrorisse ist ihr Verhältnis zu den Vorgängen und Produkten der Kataklasten, die oben geschildert wurden, von großer Bedeutung. Wo immer diese Beziehung eindeutig erkennbar ist, zeigen sich die verheilten Mikrorisse als älter gegenüber der gröberen, kataklastischen Überprägung; die dabei verarbeiteten Quarze haben solche Risse schon mitgebracht. Dies ist vor allem dort zu sehen, wo größere Quarzklasten noch gut erhalten sind (Abb. 9). Gute Beobachtungsmöglichkeiten zu diesem Problem bieten besonders die ausgedehnten Kataklasitbereiche im Mittelschwarzwald, die in Tagesaufschlüssen, dem Bergwerk Schauinsland und den Bohrungen im Dreisamtal instruktives Probenmaterial geliefert haben. Die gleichen Beziehungen sind auch in ähnlichen

Kataklastitvorkommen, so z. B. der Zone Zinken-Elme, bei Altsimonswald, im Gebiet Wiesetal-Belchen und anderen erkennbar.

Die Vorkommen verheilte Mikrorisse erstrecken sich indessen auch über große Gesteinsbereiche, die keine Anzeichen größerer kataklastischer Wirkungen erkennen lassen. Ganz außerhalb besonderer kataklastischer oder mylonitischer Zonen waren auch dort in situ wirkende, durchdringende und gleichsam rüttelnde Kräfte am Werke; sie hinterließen die betroffenen Quarze in ihren Gefügezusammenhängen an Ort und Stelle und äußerlich nahezu undeformiert; die Merkmale duktiler Verformung fehlen dort gänzlich. Vielmehr sind die Quarzkörner innerlich zerrissen, ja zersplittert worden und bald danach auch wieder vollkommen verheilt. Die weite räumliche Verbreitung der so gebildeten, verheilten Mikrorisse im ganzen Schwarzwald stützt die Vorstellung von einem oder auch mehreren energiereichen Ereignissen, die das Gebiet betroffen haben. Wann solche stattfanden, muss aus dem Vorkommen oder Fehlen der Mikrorisse in den verschiedenen Gesteinseinheiten hervorgehen. In vielen Graniten sind indessen die Mikrorisse sehr gut erhalten. Rissbildung und Verheilen haben, wenn auch in geringerem Maße, selbst an Quarzeinsprenglingen vieler Granitporphyre, die jünger sind als die Granite, stattgefunden; auch sie wurden offenbar noch in der Tiefe von solchen Wirkungen erreicht. Damit wird deutlich, dass wesentliche Bildungsbedingungen (Tiefenlage, Temperatur- und Druckverhältnisse) der verheilten Mikrorisse in weiten Bereichen des Grundgebirges in ähnlicher Weise geherrscht haben müssen. Die beschriebene Alterung verheilte Mikrorisse, die bis zur Unkenntlichkeit führen kann, ist wahrscheinlich die Folge einer weiter andauernden Wärmewirkung in solchen Gebieten.

2.5 Nicht verheilte Mikrorisse und mineralisierte Mikrorisse

Vielfach sind in Dünnschliffen neben verheilten Rissen auch nicht verheilte Risse vorhanden, von denen viele auch erst bei der Herstellung des Präparates entstanden sein können. Die Unterscheidung solcher Risse von ähnlichen, aber „von Natur“ schon vorhandenen Rissen kann ein echtes Problem werden, wofür hydrothermale Gangquarze des mittleren Kinzigtals ein prägnantes Beispiel bieten (siehe Abschnitt 2.6). Sichere Kriterien für die natürliche Bildung solcher Risse sind Mineralfüllungen, die sich trotz ihrer geringen Größe durch eigene Licht- und Doppelbrechung kenntlich machen. Als so gefüllte Risse sind sie nach Erscheinung und Genese hinreichend von den ganz anders beschaffenen verheilten Rissen abgegrenzt, die keine fremde Mineralbildung enthalten. Für die nicht verheilten Risse gilt, dass sie sowohl intrakristallin als auch transkristallin auftreten. Nach der Gestalt sind glatte Risse von gekrümmten, tordierten und in anderer Weise unregelmäßig verlaufenden Rissen unterscheidbar. Während glatte Risse ihr Wirtsmaterial in kantige bis splitterige Bruchstücke zerlegen, folgen die gekrümmten Risse teils den Korngrenzen, teils sind sie unabhängig von diesen innerhalb eines oder mehrerer Körner angelegt.

Andere, ausgedehntere Risse und Spalten im Gestein enthalten selbständige mineralische Neubildungen, die stofflich und strukturell von ihrer unmittelbaren Umgebung deutlich

unterschieden werden können. Es sind transkristalline Risse oder Spalten mit Quarz, Adular, Hellglimmer, Epidot, Calcit oder, besonders im Bereich der vordringenden Oberflächenverwitterung, auch mit Eisenhydroxidmineralen; sie sind dadurch essentiell verschieden von den im Vorausgehenden bereits behandelten verheilten Mikrorissen. Rissssysteme dieser Art sind unter Anderem auch in Graniten mit sphäroidischer Absonderung in charakteristischer Form anzutreffen.

2.6 Abkühlungsrisse

Bei der Durchmusterung vieler Dünnschliffe von Gesteinen und Gangmineralen aus dem Schwarzwald wurden in einer Anzahl von Fällen offene Risse in Quarz gefunden, die am ehesten auf die Abkühlung des Gesteins im Verlauf seiner Heraushebung und Freilegung hinweisen. Die Risse kommen nur in nicht zu kleinen, also mindestens ein oder mehrere Zehntel Millimeter großen Anschnitten von Quarzkörnern vor. Ihre Aufgabe, den durch Abkühlung eintretenden Volumenschwund auszugleichen, scheinen sie dort durch eine mehr oder weniger gleichmäßige Verteilung über das Kornvolumen zu erfüllen. Bei kleineren Körnern kann derselbe Schwund eher von den Korngrenzen, dort aber optisch kaum wahrnehmbar, übernommen werden. Ähnliche Risse wurden auch in größeren Quarzkörnern retrograd veränderter Eklogite, z. B. von der Äußeren Allmend (TK 8014 Hinterzarten) und anderenorts gefunden.

Erste Fundorte typischer Abkühlungsrisse waren die Halden der historischen Gruben Baberast (etwa R33550/H53200), Segen Gottes (R33250/H51000) und Ludwig im Adlersbach (R35560/H49100) auf den TK 7614 Zell am Harmersbach und 7714 Haslach im Kinzigtal (vgl. auch BLIEDTNER & MARTIN 1986). In Dünnschliffen aus den neunziger Jahren des 20. Jahrhunderts sind nicht verheilte, offene Risse in größeren Quarzkörnern reichlich vorhanden (Abb. 13 und 14). Die Risse sind meist kurz (d. h. nur einige hundertstel bis wenige Zehntel Millimeter lang), selten ganz gerade, öfter gekrümmt und in sich tordiert. Sie sind locker in den Quarzindividuen verteilt, untereinander etwa parallel und so platziert, dass sie zu ihren Nachbarn gewisse Distanzen einhalten; jedes kristallographisch einheitliche Quarzkorn enthält eine seinem Volumen ungefähr entsprechende Menge solcher Risse. Sie scheinen die Grenzen der Quarzindividuen zu meiden; selten quert ein Riss dieser Art eine Quarz-Quarz-Korngrenze. Teils stellen sie sich als offene Risse, teils als Risse mit einem bräunlichen „Belag“ dar. Dieser erscheint in einzelnen Fällen pleochroitisch und zeigt bei gekreuzten Polarisatoren auch eine schwache Doppelbrechung; in anderen Fällen fehlen diese Erscheinungen.

Zur Sicherstellung dieser Befunde, die sich in den älteren Präparaten zeigten, wurden mit besonderer Vorsicht Duplikate von den noch vorhandenen Schleifklötzchen hergestellt. Dabei zeigte sich, dass in diesen die oben geschilderten nicht verheilten Risse fehlen; stattdessen enthalten die betreffenden Quarzkörner zwar verheilte Risse der gewöhnlichen Art, dazu aber Erscheinungen der Spannungsdoppelbrechung in einem Muster, das die Anlage der offenen Risse gewissermaßen vorwegzunehmen scheint. Diese wären dann in den alten Präparaten

durch Kräftewirkungen des Schleifvorganges aus einem gleichsam latenten Zustand erweckt worden, während sie in den neueren Schlifften in diesem verblieben sind. Diese Möglichkeit würde auch eine Erklärung dafür geben, dass offene Risse der beschriebenen Art bei Weitem nicht so häufig zu beobachten sind, als eigentlich die Abkühlung der in der Tiefe kristallisierten Minerale es erwarten liesse.

Zur Frage der Natur der scheinbar substanzlosen braunen Beläge sei an dieser Stelle berichtet, dass Risse mit dieser Erscheinung durch Erhitzen von kleinen Bergkristallen auf etwa 700°C und langsame Abkühlung erhalten wurden. Risse desselben Typs wurden auch in Dünnschlifften anderer Provenienz gefunden, so z. B. in Pegmatitquarzen aus Brasilien und dort in einem besonders dicken (etwa 0,05 mm) Präparat, das die oben beschriebenen Erscheinungen, auch die tordierte Gestalt und den bräunlichen Belag ebenfalls zeigt.

Für diese Befunde relevante experimentelle Untersuchungen an Quarz finden sich unter Anderen bei RAZ et al. (2002). Ihnen ist zu entnehmen, dass das Volumen des Quarzes je nach den sich ändernden Druck- und Temperaturbedingungen um bis zu knapp 2 Prozent veränderlich ist. Davon müssen auch die Quarze in unseren Gesteinen, die unter den Verhältnissen einer mittelgradigen Metamorphose bis herunter zu denen hydrothermalen Gangbildung entstanden sind, notwendig mit betroffen sein.

2.7 Mikrorisse in Feldspäten

Gute Beispiele von Mikrorissen in Feldspäten, die nicht Artefakte des Schleifprozesses sein können, sind in sehr vielen Proben, z. B. der Vorkommen Rappeneck, Oberberg bei Altsimonswald und Reinerzau angetroffen worden. Unvollkommen geradlinige bis leicht gekrümmte Risse durchkreuzen größere Körner von Kalifeldspat in mehreren Richtungen und in einer Weise, die einer Interpretation als Spaltrisse entgegensteht; es fehlt ihnen vielmehr an der dafür erforderlichen Parallelität und Ebenflächigkeit. Wo Plagioklas in kataklastischen Zusammenhängen vorkommt, ist die Zwillingslamellierung oft gut erhalten, aber beim Durchgang transgranularer Risse verbogen; Systeme von verheilten Mikrorissen wie beim Kalifeldspat wurden nicht beobachtet.

2.8 Mikrorisse in Granat und Apatit

Als granatreiche Gesteine sind im Schwarzwald vor allem retrograd umgewandelte Eklogite verbreitet. Dort enthalten nicht allzu kleine Granatkörner fast regelmäßig Risse, die an keine besonderen Richtungen in den Kristallen gebunden zu sein scheinen. Verbreitet sind es deutlich intrakristalline Risse; sie setzen sich nicht in die unmittelbar angrenzenden Kelyphit- und andere Gefüge fort. Doch kommt es vor, dass die Hauptrisse in den Granaten über einen ganzen Dünnschliff hin einer bestimmten Richtung folgen (z. B. in den Vorkommen Dobelhof und Hauseckfelsen, beide TK 8014 Hinterzarten). Als mineralische Füllungen

solcher Risse kommt mehrfach blassbrauner Glimmer vor, was auf eine relativ frühzeitige Öffnung hindeutet (s. KLEIN & WIMMENAUER 1984). Auch der im Quarz sehr häufige, noch rätselhafte braune „Belag“ kommt in Mikrorissen der Eklogitgranate vor. In der Literatur sind Mikrorisse in Granat vor allem von HAZEN et al. (1978) und SHAOCHEN et al. (1997) behandelt worden. Die Autoren heben besonders die Entlastung der Gesteine bei ihrem Aufstieg aus besonders großen Tiefen als Ursache der Rissbildungen hervor. Daneben dürfte aber auch die Schrumpfung der Minerale bei fallender Temperatur ihren Beitrag dazu geleistet haben.- In zwei der Retroeklogitvorkommen wurden auch in relativ großen Apatiten (Zeigerhalde und Mathisenmühle TK Hinterzarten) Risse in mehreren Richtungen gefunden, die sich nicht in die benachbarten Gefüge fortsetzen. Zur Mikrorissbildung in Apatit siehe auch MATSUGAKE et al. (2004).

2.9 “Planare Elemente” in Quarz und Feldspäten

Von den oben beschriebenen Mikrorissen (Abschnitte 2.1 bis 2.3) sind die planaren Elemente in Quarz und Feldspat deutlich verschieden. Als Vorkommen sind zu nennen: Quarz in Gneis der Bohrung Oberbirken bei Kirchzarten, Kalifeldspat in einer Breccie am Hang des Höllentals bei der Posthalde (Geologische Karte Blatt 8014 Hinterzarten) Kalifeldspat in Gneis-Kataklasit am Oberberg bei Altsimonswald und in einem Quarzitklast aus dem unterkarbonischen Konglomerat zwischen Wacht und Blößling (Geologische Karte Bl. 8114 Feldberg). Erst bei starker Vergrößerung sind in den Dünnschliffen Strukturen erkennbar, die ebenflächig und mit gleichmäßigen Abständen (bis 10 μm) in nur wenigen Einzelkörnern der Minerale eine Besonderheit bilden. Im einfach polarisierten Licht betrachtet, stellen sie sich als niedriger lichtbrechende Lamellen dar. Diese erscheinen wie feine Fugen, die nicht bis zu einer eindeutig sichtbaren Öffnung gelangt sind; bei gekreuzten Polarisatoren und Drehen des Schliffes folgen sie mit Aufhellung und Auslöschung ganz ihrer unmittelbaren Umgebung. Demnach scheinen sie dort, wo sie in Feldspäten vorkommen, keine Entmischungslamellen zu sein.

3. Ergebnisse

Hauptergebnis der Untersuchung war die Feststellung, dass verheilte Mikrorisse in den Quarzen der Kristallingesteine des Schwarzwaldes sehr häufig sind, ja sogar in nur wenigen Gebieten ganz fehlen. Sie weisen als Flächen, die in verschiedener Dichte mit Fluideinschlüssen belegt sind, auf schnell verlaufende Prozesse hin, bei denen die Minerale zerbrochen wurden; dabei öffneten sich Mikrorisse, die danach, durch Weiterwachsen der betroffenen Quarze, auch wieder geschlossen wurden. Diese Prozesse haben offenbar in größerer Tiefe und bei P-T-Bedingungen, wo Quarz bei langsamer Beanspruchung duktil reagieren würde, stattgefunden. Deutlich ist zu erkennen, dass verheilte Mikrorisse unter Vergrößerung und Verlagerung der Fluideinschlüsse altern können. Vielfach sind in einem

Quarzkorn jüngere, akkurat angelegte verheilte Mikrorisse neben gealterten vorhanden; es muss daraus auf wiederholte Bildung solcher Risse geschlossen werden. Die Zeitabstände zwischen den verschiedenen Generationen solcher Risse waren beträchtlich, sodass eher eine Folge von Erdbeben als etwa die nur Sekunden auseinander liegenden Kompressions- und Rückfederungswellen eines Impaktes als Ursache angenommen werden können. Wenigstens zwei Generationen des Geschehens sind in manchen Kataklastitgebieten des Schwarzwaldes auch anhand von xenolithartigen, älteren Kataklastitfragmenten in einer jüngeren Hauptmasse deutlich zu erschließen. Mikrobrecciengänge in den gleichen Vorkommen weisen ebenfalls auf schnelle Prozesse hin. Soweit in solchen Gesteinen überhaupt verheilte Mikrorisse in Quarz vorkommen, scheinen sie älter als die allgemeine Kataklastose und Mylonitisierung zu sein. Abkühlungsriss in Quarz, die angesichts der ursprünglichen Kristallisation des Minerals unter mittelgradigen P-T-Bedingungen zu erwarten sind, wurden nur verhältnismäßig selten eindeutig festgestellt; sie werden nur in nicht zu kleinen, das heißt wenigstens über 0,1 mm großen Quarzkörnern sichtbar. Sehr verbreitet sind auch jüngste, weiter reichende Risse und Spalten, die mehr oder weniger mit späten Mineralbildungen gefüllt sein können oder offen geblieben sind.

Angeführte Schriften

- Brantley, S., Evans, B., Hickman, S. H. & Crerar, D. D. (1990): Healing of microcracks in quartz: implications for fluid flow.- *Geology*, 18, 136-139.
- Burgath, K. (1972): Der unterkarbonische Vulkanismus des Südschwarzwaldes.- Diss. Freiburg i. Br., 350 S.
- Chao, E. C. T. (1977): Preliminary interpretation of the 1973 Ries research deep drill core and a new Ries Cratering model.- *Geologica Bavarica*, 75, 421-442.
- Bliedtner, M. & Martin, M. (1986): Erz- und Minerallagerstätten des Mittleren Schwarzwaldes – eine bergbaugeschichtliche und lagerstättenkundliche Darstellung.- *Geologisches Landesamt Baden-Württemberg (Hrsg.)*, 781 S.
- Di Toro, G., Goldsby, D. L. & Tullis, T. E. (2004): Friction falls towards zero in quartz rock as slip velocity approaches seismic rates.- *Nature*, 427, 436-439.
- Feves, M., Simmons, G. & Siegfried, R. W. (1977): Microcracks in crustal igneous rocks. Physical properties.- *The Earths Crust. AGU Geophysical Monograph Series*, 205-117.
- Flöttmann, T., Gallus, B. & Kleinschmidt, G. (1985): Variskische Kataklasite im Mittleren Schwarzwald.- *N. Jb. Geol. Paläontol., Mh.* 1986, 459-466.
- Groschopf, R. (1973): Eine weitere Zone präpermischer Sedimente im Schwarzwald.- *Jh. Geol. Landesamt Baden-Württemberg*, 15, 247-249.
- Gudden, H. (1974): Die Forschungsbohrung Nördlingen 1973. Durchführung und erste Befunde.- *Geologica Bavarica*, 72, 11-31.
- Hazen, R. M. & Finger, L. W. (1978): Crystal structures and compressibilities of pyrope and grossular to 60 kilobar.- *Amer. Miner.* 63, 297-303.
- Hüttner, R. (1977): Makroskopische Beobachtungen zur Deformation des Kristallins in der Forschungsbohrung Nördlingen 1973.- *Geologica Bavarica*, 75, 273-238.
- Klein, H. & Wimmenauer, W. (1984): Eclogites and their retrograde transformation in the Schwarzwald.- *N. Jb. Mineral., Monatsh.*, 1984, 25-38.
- Kronenberg, A. K. (1994): Hydrogen speciation and chemical weakening of quartz.- In: *Silica. Physical behaviour, geochemistry and materials applications, Reviews in Mineralogy*, 29, 123-176.
- Matsugake, K. N., Ono, S., Kawamoto, T. & Kikegawa, T. (2004): The compressibility of a natural apatite.- *Phys. Chem. Minerals*, 31, 580-584.
- Raz, U., Girsperger, S. & Thompson (2002): Thermal expansion, compressibility and volumetric changes of quartz obtained by single crystal dilatometry to 700°C and 3,5 kilobars (0,35 Gpa).- Internet-Eintrag unter: ethz-a-004392716.
- Regelmann, K. (1934): *Geologische Spezialkarte von Württemberg 1:25 000, Blatt Obertal-Kniebis*, 3. Auflage, mit Erläuterungen, 162 S.
- Richter, D. & Simmons, G. (1977): Microcracks in igneous rocks. *Microscopy.-The Earths Crust. AGU Geophysical Monograph Series*, 20, 149-176.
- Ruedrich, J. & Vollbrecht, A. (2006): *Geowissenschaftliche Bedeutung von Mikrorissen in Kristallingesteinen. TSK Universitätsdrucke Göttingen*, 185-186.
- Sawallisch, A. (1987): *Zur Hydrogeologie und Geochemie der Grube Schauinsland bei Freiburg (Südschwarzwald). Diplomarbeit*, 52 S.

- Schild, M., Vollbrecht, A., Siegesmund, S. & Reutel, C. (1998): Microcracks in granite cores from EPS-1 drillhole Soultz-sous-Forêts.- *Geol. Rundschau*, 86, 775-785.
- Shaochen Ji, Pinglao Zhao & Saruwatari, K. (1997): Fracturing of garnet crystals in anisotropic metamorphic rocks during uplift.- *J. Structural Geology*, 19, 603-620.
- Shelton, K. L. & Orville, P. M. (1980): Formation of synthetic fluid inclusions in natural quartz.- *Amer. Miner.* 65, 1233-1236.
- Sibson, R. H. (1977): Fault rocks and fault mechanisms.- *J. Geol. Soc. London*, 133, 191-213.
- Simmons, G. & Richter, D. (1976): Microcracks in rocks.- In STRENS, R. G. J. (ed.): *Physics and chemistry of minerals and rocks*, 105-138, London (Wiley & Sons).
- Smith, D. L. & Evans, B. (1984): Diffusional crack healing in quartz. - *J. geophys. Res.*, 89, 4125-4135.
- Stähle, V. & Ottemann, J. (1977): Ries-Forschungsbohrung 1973: Zeolithisierung der Gläser im Suevit und Petrographie der Beckensuevite und Gangbreccien.- *Geologica Bavarica*, 75, 191-218.
- Stenger, R. & Groschopf, R. (1985): Bohrung Kirchzarten 3. Petrographisch-geochemische Untersuchungen.- In: *Die magnetische Anomalie Kirchzarten*. *Geol. Jb. E* 28,127-163.
- Stöckhert, B., Trepmann, C. & Nüchter, J. (2007): Erbebensschäden in über zehn Kilometern Tiefe. Gesteine mit Erinnerungsvermögen.- *Geowissenschaften Rubin*, 2007, 36-44.
- Tröger, W. E. (1967): *Optische Bestimmung der gesteinsbildenden Minerale*, Teil 2., 822 S.
- Vollbrecht, A., Stipp, H. & Olesen, N. O. (1999): Crystallographic orientation of microcracks in quartz and inferred deformation processes: a study on gneisses from the German Continental Deep Drilling Project (KTB).- *Tectonophysics*, 303, 279-297.
- Werner, W., Franzke, H. J., Wirsing, G., Jochum, J., Lüders, V. & Wittenbrink, J. mit einem Beitrag von Steiber, B. (2002): *Die Erzlagerstätte Schauinsland bei Freiburg im Breisgau. Bergbau, Geologie, Hydrologie, Mineralogie, Geochemie, Tektonik und Lagerstättenentstehung*.- *Ber. Naturforsch. Ges. Freiburg i. Br.*, 92, 1-110.
- Wimmenauer, W. (1948): Brecciengänge im Grundgebirge bei Freiburg i. B.- *Mitteilungsblatt der Badischen Geologischen Landesanstalt*, 2, 8-12.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Berichte der naturforschenden Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau](#)

Jahr/Year: 2014

Band/Volume: [104](#)

Autor(en)/Author(s): Wimmenauer Wolfhard

Artikel/Article: [Kataklasite und Mikrorisse in Gesteinen des Schwarzwälder Grundgebirges 111-130](#)