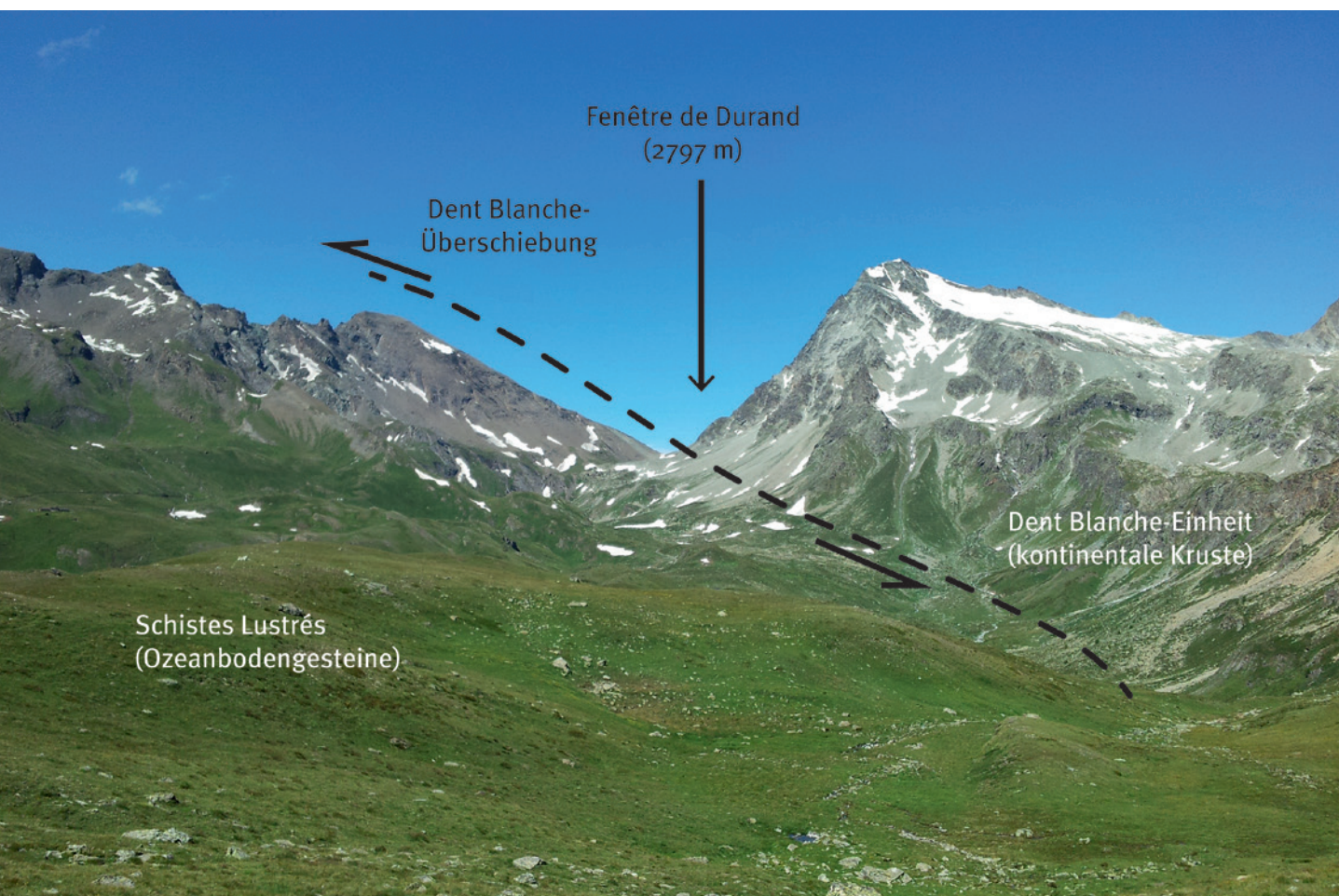


Altersbestimmung geologischer Prozesse mit dem Rb-Sr-Zerfallssystem

Johannes Glodny

Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

The Rb-Sr decay system forms the basis for one of the oldest and most established isotopic dating techniques in geology. Its versatility arises from the fact that Rb and Sr are present in most rock-forming minerals, which provides the means to date geologic processes in a wide variety of rocks and geologic environments. In recent years, one of the main innovations of the Rb-Sr method was the direct age dating of deformation processes in the Earth's crust. Since deformation is a key factor in shaping the Earth's surface and the internal architecture of the crust, age data for deformation processes are essential to constrain the time scales of crustal evolution. Time constraints on deformation facilitate the calculation of rates of movements of crustal units, the understanding of orogenic processes and ultimately of the dynamics of the Earth's crust. Deformation processes occur over the entire range of depths and temperatures in the crust, from migration of melts at depth, through ductile deformation in the middle crust, to brittle fragmentation of rocks in earthquake-related near-surface shear zones. This contribution provides an overview of the potential of Rb-Sr geochronology of rock deformation.



Geologische Altersbestimmungen – Wie und wozu

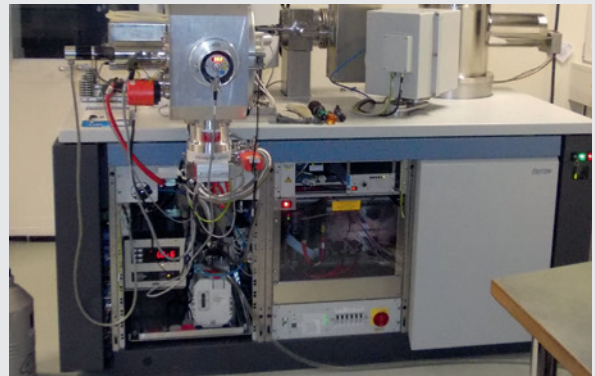
Geochronologie ist die Wissenschaft, die sich mit der Suche nach geologischen Zeitmarken und der Bestimmung absoluter Alter geologisch-erdgeschichtlicher Archive befasst. Wissenschaftsgeschichtlich steht die Frage nach dem Alter der Erde und den Geschwindigkeiten geologischer Prozesse schon lange im Fokus. Folgend auf frühe, biblisch inspirierte Vorstellungen gab es vor allem im 19. Jahrhundert eine Reihe von Versuchen, das Alter der Erde und geologischer Einheiten auf physikalisch-naturwissenschaftlicher Basis abzuschätzen. Ein wissenschaftlicher Durchbruch auf diesem Feld gelang mit der Entdeckung der Radioaktivität. Ernest Rutherford wies im Jahre 1904 als erster auf die Möglichkeit hin, aus dem Zerfall radioaktiver Nuklide ein absolutes Zeitmaß abzuleiten. Die moderne Geochronologie hat seitdem eine Reihe von Methoden zur Altersbestimmung entwickelt. Alle nutzen den natürlichen Zerfall radioaktiver Nuklide, wie z. B. von ^{238}U zu ^{206}Pb und ^4He , von ^{87}Rb zu ^{87}Sr , von ^{40}K zu ^{40}Ar , oder von ^{176}Lu zu ^{176}Hf . Zur Altersbestimmung muss die Zerfallskonstante des jeweiligen Zerfalls bekannt sein und es müssen die jeweiligen Konzentrationen der Mutternuklide und der im Gestein angesammelten Zerfallsprodukte (Tochternuklide) bestimmt werden. Exemplarisch werden im Folgenden das Rb-Sr-Zerfallssystem und seine geochronologische Anwendung dargestellt.

Das $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$ -Zerfallssystem

Bereits im Jahr 1937 haben O. Hahn, F. Strassmann und E. Waling nachgewiesen, dass die schon länger bekannte natürliche Radioaktivität von Rb auf den Zerfall des Isotops ^{87}Rb zu ^{87}Sr zurückgeht. Daraufhin schlug der Geochemiker V. M. Goldschmidt im gleichen Jahr vor, dieses Zerfallssystem zur Datierung geologisch alter, Rb-haltiger Minerale zu nutzen. Mit der Entwicklung

der Thermionen-Massenspektrometrie (TIMS, siehe Toolbox unten) konnte etwa ab den 1960er-Jahren das Rb-Sr-System zu verschiedensten geochronologischen Fragestellungen erprobt und genutzt werden. Ein besonderer Vorteil des Rb-Sr-Systems ist, dass Rb und/oder Sr in den meisten gesteinsbildenden Mineralen

Thermionen-Massenspektrometer Thermal Ionization Mass Spectrometer (TIMS)



Anwendung: Hochpräzise Messung von Isotopenverhältnissen thermisch ionisierbarer Elemente (hauptsächlich Metallelemente) sowie Isotopenverdünnungsanalyse (zur präzisen Spurenelement-Konzentrationsbestimmung)

Analysiertes Material: Minerale, Gesteine, Material der Bio- und Hydrosphäre, jeweils nach entsprechender Probenvorbereitung

Ionisierung: Thermisch; Probe wird als Lösung auf ein dünnes Metallband aufgebracht; Stromfluss durch das Band trocknet, erhitzt und ionisiert die Probe

Massenseparation: Separation in einem magnetischen Sektorfeld

Ionendetektion: Je nach Geräteausstattung bis zu 9 bewegliche Faraday-Detektoren und bis zu 8 Sekundärelektronenvervielfacher

Probenpräparation: Trennung des zu analysierenden Elements von seiner Matrix und chemische Anreicherung mittels Ionenaustauschchromatographie unter Reinraumbedingungen

Probenmenge pro Messung: Meist zwischen 20 und 200 ng des gemessenen Elements, extrahiert aus 0,1 bis 100 mg Mineral oder Gestein

Erreichbare Präzision im Isotopenverhältnis: Besser als 10 ppm

Links: Fenêtre de Durand, Walliser Alpen (Schweiz/Italien). Beispiel einer durch Gebirgsbildung herausgehobenen Paläosubduktionszone. Deutlicher Farb- und Verwitterungskontrast zwischen Gneisen eines Kontinentrands (rechts), die auf Ozeanbodengesteine (links) überschoben sind. Mylonite entlang der Überschiebungsbahn zeigen Rb-Sr-Alterswerte zwischen ~48 und ~38 Mio. Jahre. (Foto: S. Angiboust, Paris)

Left: Fenêtre de Durand, Valais Alps (Switzerland/Italy). Example of an exhumed paleosubduction thrust system. Note colour contrast between rocks with oceanic affinity (to the left) and gneisses of former continental margin (right). Mylonites along the thrust have been dated to between ~48 and ~38 Ma (Rb-Sr multimineral data, Angiboust et al., 2014)



Kontakt: J. Glodny
(glodnyj@gfz-potsdam.de)

vorkommen. Der über die Zeit gesammelte Erfahrungsschatz zur geochemischen Verteilung von Rb und Sr, zu geeignetem und ungeeignetem Probenmaterial, zur analytischen Handhabung auch kleiner Mengen an Rb und Sr und zur geologischen Interpretation der Daten ist heute für die Geochronologie und für die laufende Weiterentwicklung der Methodik enorm wertvoll.

Grundlagen der Datierung mit Rb/Sr

Sr besteht aus vier Isotopen, nämlich ^{84}Sr , ^{86}Sr , ^{87}Sr und ^{88}Sr . Während die relativen Mengenanteile von ^{84}Sr , ^{86}Sr und ^{88}Sr in der Natur annähernd konstant sind, steigt der Mengenanteil des ^{87}Sr in Rb-haltiger Matrix (also z. B. in einem Rb-haltigen Mineral) im Laufe der Zeit durch den β -Zerfall von ^{87}Rb an. In einem Gestein mit Sr-haltigen Mineralen wird also ein Mineral mit einem hohen Rb/Sr-Verhältnis im Laufe der Zeit ein besonders hohes $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnis entwickeln. Im Gegensatz dazu werden sich die Sr-Isotopenverhältnisse in einem Rb-freien Mineral im Laufe der Zeit gar nicht verändern. Diese Proportionalität zwischen $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ und mit der Zeit entwickeltem $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnis lässt sich in einem sogenannten Isochronendiagramm darstellen (Abb. 1). In diesem Diagramm zeigt sich die Proportionalität in einer Geraden (Isochrone), die die Minerale mit verschiedenen $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ - und $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnissen verbindet. Aus der Steigung dieser Geraden kann, mit der bekannten Zerfallskonstante des ^{87}Rb , direkt das Alter der Mineralvergesellschaftung berechnet werden.

Eine wichtige Voraussetzung dafür ist, dass die Minerale genetisch, d. h. von ihrer Kristallisationsgeschichte her zusammengehören. Nur wirklich gleichzeitig und im gleichen Milieu kristallisierte oder umkristallisierte Minerale haben Sr mit gleichen Ausgangsisotopenverhältnissen eingebaut, entsprechend einer horizontalen Lage

der Isochrone (Steigung von o) zum Zeitpunkt der Mineralbildung. Es lassen sich also geologische Prozesse mit Rb-Sr datieren, die zur Neubildung von Mineralpaaren (oder Mineralgruppen) geführt haben. Solche Prozesse sind z. B. magmatische Kristallisation, Kristallisation einer Mineralvergesellschaftung aus einem Fluid (z. B. in einer Erzmineralisation) oder auch duktile Deformation in Scherzonen. Falls die bei einem solchen Prozess gebildete Mineralvergesellschaftung physikalisch in ihre einzelnen Mineralkomponenten separiert werden kann (Abb. 2) und wenigstens ein deutlich Rb-haltiges Mineral enthält, wird eine Altersbestimmung realisierbar.

Datierung von Deformationsprozessen in der Erdkruste

Deformation des Gesteins, mit der damit verbundenen Bildung von Gebirgen, von Dehnungsstrukturen mit Vulkanismus, sowie Landhebung und -senkung, ist entscheidend für die Gestalt der Erdoberfläche und für die Architektur der Erdkruste. Abgesehen von Erdbeben verläuft Deformation sehr langsam, mit Versatzbeträgen von unter einem mm bis zu wenigen cm pro Jahr. Solche Bewegungen sind, außer mit hochpräzisen geodätischen Methoden an der Oberfläche, kaum erfassbar. Deformation in tieferen Bereichen der Erdkruste bleibt der direkten Beobachtung jedoch verborgen. Rb-Sr-Datierungen von ehemals in der Tiefe deformierten Gesteinen sind eine der wenigen Möglichkeiten, die Zeitlichkeit von Deformation zu erfassen und damit die Dynamik der Erdkruste zu erschließen. Dabei liegt der Schlüssel darin, solche Gesteine und Strukturen zu datieren, die diskrete „Zeitmarken“ der Deformationsgeschichte in verschiedenen Krustenstockwerken markieren. Die im Folgenden dargestellten Anwendungsbeispiele illustrieren diesen Ansatz.

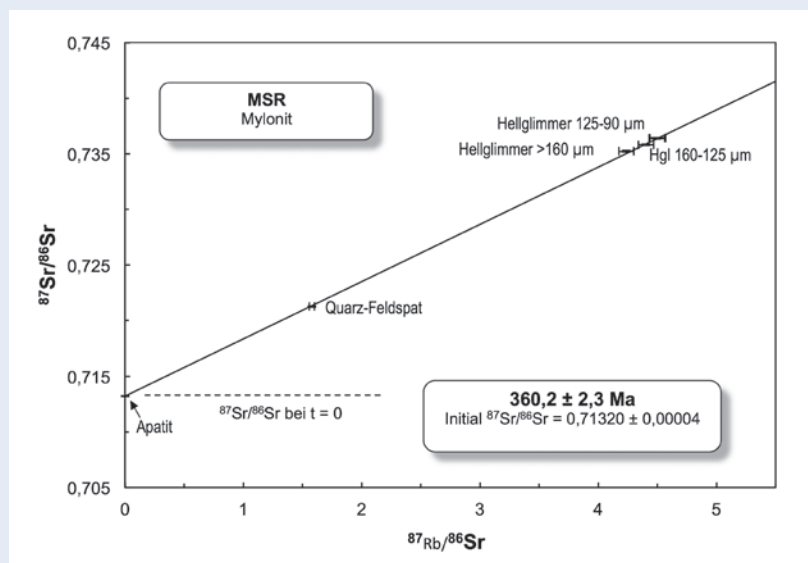


Abb. 1: Datierung eines Mylonits (vgl. Abb. 5) mit dem Rb-Sr-Isochronendiagramm. Das Alter der Mineralbildung wird aus der Steigung der Regressionsgeraden (Isochrone) berechnet. Gestrichelt: initiales $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnis aller Minerale zum Zeitpunkt der Mineralbildung (Ma = Mio. Jahre)

Fig. 1: Rb-Sr isochron diagram for a mica-bearing mylonitic rock (see Fig. 5). The age is derived from the slope of the regression line. Dashed line: common $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotope ratio of all minerals at the time of assemblage (re)crystallization



Abb. 2: Mineralseparate aus einem Eklogit (einem in einer Subduktionszone bei hohem Druck umkristallisiertem Gestein) für die Rb-Sr-Analyse. Oben li.: Apatit; oben re.: Amphibol; unten li.: Omphazit; unten re.: Hellglimmer. Nur jeweils wenige mg werden für eine Analyse benötigt. (Fotos: Bernd Kröger/Agentur Kröger, Potsdam)

Fig. 2: Mineral separates from an eclogite (a rock formed in a subduction zone under high pressure), for Rb-Sr analysis. Upper left: apatite; upper right: amphibole; lower left: omphacite; lower right: white mica. Only a few mg of each mineral is required for analysis.

Pegmatite

Pegmatite sind sehr grobkörnige magmatische Gesteine, die oft als Gangfüllungen vorkommen (Abb. 3). Hinweise auf das Alter von Deformationsprozessen können sich aus Pegmatiten ergeben, wenn ein Pegmatitgang Deformationsgefüge durchschneidet. In Abb. 3 ist zu erkennen, wie ein Pegmatitgang Brüche in einem Gneis ausfüllt. Der Gneis selbst zeigt ein Deformationsgefüge, erkennbar an in etwa von oben nach unten durch das Bild verlaufenden hellen und dunkleren „Schlieren“ im Gestein. Dieses Deformationsgefüge muss also älter sein als die Bruchbildung und der Pegmatitgang, der wiederum mit Rb-Sr datiert werden kann.

Pegmatite können auch wichtige Rohstoffquellen sein, z. B. für Tantal und Beryllium. In einem aktuellen Projekt am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ werden Rb-Sr-Altersdaten für Pegmatite zur Definition von Pegmatitprovinzen genutzt, um das Rohstoffpotenzial einzelner Pegmatitvorkommen besser einschätzen zu können.



Abb. 3: Pegmatitgang in Korsika, der das Deformationsgefüge des Nebengesteins (Gneis) durchsetzt. (Foto: S. Büttner, Grahamstown, Südafrika)

Fig. 3: Pegmatite vein system cutting through a weakly foliated gneiss, Corsica

Metamorph deformierte Pegmatite

Viele metamorphe Gesteine verlieren bei starker Durchbewegung unter hohen Temperaturen komplett ihr „metamorphes Gedächtnis“, so dass geochronologisch aus ihnen nur noch das Alter der letzten Durchbewegung bestimmt werden kann. Metamorph überprägte Pegmatite haben bei Deformation aber oft eine sehr viel höhere Scherfestigkeit als die umgebenden feinerkörnigen Gesteine, so dass der Pegmatit zwar mit zerschert wird, aber einzelne große Kristalle erhalten bleiben. Die großen Kristalle des Ausgangsgesteins liegen dann eingebettet in einer feinerkörnigen, bei der Durchbewegung mobilisierten und neu kristallisierten Matrix (Abb. 4). Glodny et al. (1998) konnten zeigen, dass in solchen Gesteinen die grobkörnigen Kristallrelikte von Plagioklas und Muskovit ihre Rb-Sr-Signaturen behalten, während die bei der Deformation umkristallisierten feinerkörnigen Anteile eine auf den Zeitpunkt der Deformation zurückgesetzte „Rb-Sr-Uhr“ zeigen. Geschickte Präparation ermöglicht es dann, aus ein und derselben Probe sowohl das Alter der Deformation als auch das Alter der primären Kristallisation zu bestimmen, wobei letzteres oft der einzige Hinweis auf die prädeformative Geschichte eines Gesteinskomplexes ist.

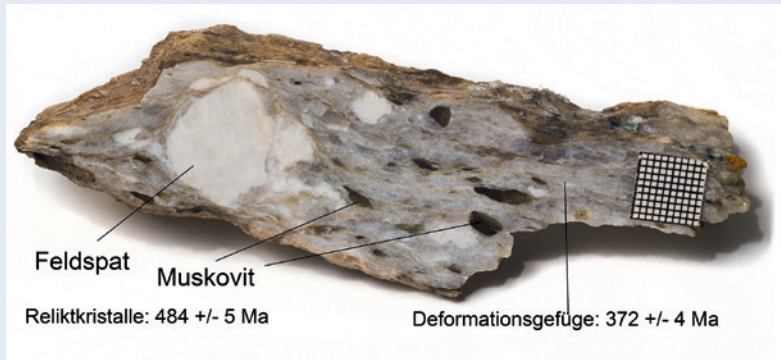


Abb. 4: Metamorph überprägter Pegmatit (Domažlice, Tschechien), mit prädeformativen Relikten von Plagioklas und Muskovit in feinkörniger Matrix. Rekristallisierte Minerale der Matrix erlauben die Datierung der Deformation. Altersinformation: Glodny et al. (1998). Skala: 1x1 cm (Foto: Bernd Kröger/Agentur Kröger, Potsdam)

Fig. 4: Metapegmatite sample. Predeformative relics of plagioclase and muscovite in a fine grained recrystallized matrix. Rb-Sr age is reset only in the strongly deformed matrix. 1 cm² for scale

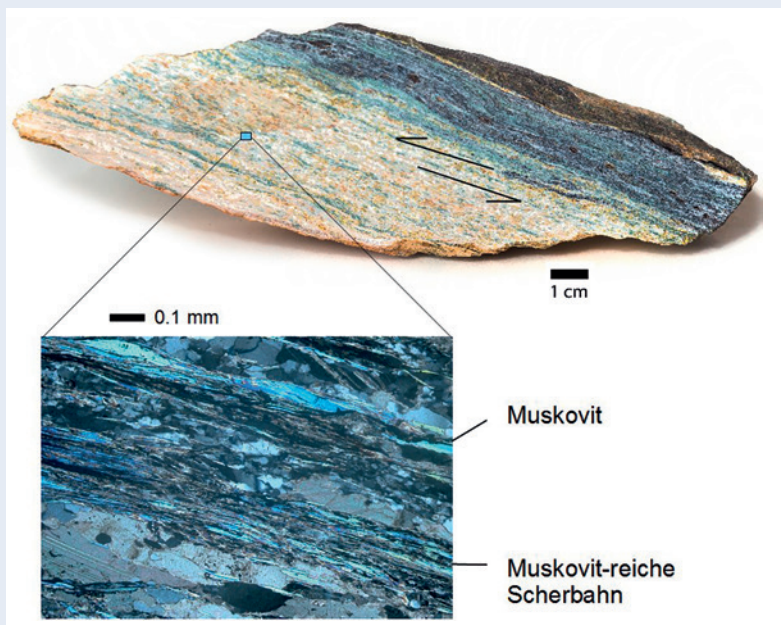


Abb. 5: Mylonit aus einer Deformationszone, Nord-Bayern (vgl. Abb. 1). Sowohl im Anschnitt (oben) als auch im Dünnschliff im Polarisationsmikroskop (unten) wird das Deformationsgefüge deutlich. Feinkörnig rekristallisierte Minerale in Scherbahnen ermöglichen eine direkte Rb-Sr-Datierung der Deformation auf $360,2 \pm 2,3$ Ma. (Altersinformation: GFZ; Foto des Anschnitts: Bernd Kröger/Agentur Kröger, Potsdam)

Fig. 5: Mylonite, NE Bavaria (see Fig. 1). Metasediment with greenschist facies metamorphic overprint. Dynamic recrystallization facilitates Rb-Sr dating of deformation.

Mylonitische Deformation

Mylonite sind Gesteine, die in der Tiefe an tektonischen Grenzflächen durch schernde Bewegung zwischen zwei Gesteinskörpern entstehen. Der Begriff „Mylonit“ ist vom griechischen Wort für Mühle abgeleitet. Diese Begriffsbildung beruht darauf, dass bei mylonitischer Deformation das betroffene Gestein durch plastische Verformung weitgehend aufgearbeitet wird, was meist mit einer Kornverkleinerung und immer mit einer Um- oder Neubildung der Minerale verbunden ist (Abb. 5). Bei den meisten Gesteinen ist plastische Verformung nur bei Temperaturen oberhalb von etwa 300 °C möglich, so dass Mylonite über Deformationsprozesse in tiefen und mittleren Krustenstockwerken Auskunft geben können. Unter anderem enthalten Mylonite Information über die

Druck- und Temperaturbedingungen bei der Deformation, über die Richtung der Verformung, zum Teil auch über den Gesamtversatz an der Störung.

Ein Hauptarbeitsfeld der Geodynamik ist derzeit die Untersuchung von Plattenrändern mit Subduktionszonen. Das Interesse begründet sich wesentlich durch das Auftreten großer Erdbeben an solchen Plattenrändern (z. B. in Chile, Japan, Sumatra) und die Einsicht, dass die Prozesse in der Tiefe, in denen die Erdbeben ausgelöst werden, unzureichend verstanden sind. Die Untersuchung fossiler, bei Gebirgsbildung herausgehobener Subduktionszonen (vgl. Titelfoto dieses Beitrags) leistet hier wichtige Beiträge. Beispielsweise konnten *Angiboust et al. (2014)* mit Hilfe von Rb-Sr-Datierungen am GFZ und Geländeuntersuchungen an Myloniten

der westlichen Alpen zeigen, wie dort in einer Subduktionszone Ozeanbodengesteine, Sedimente des Ozeanbodens und Fragmente kontinentaler Kruste über etwa 20 Mio. Jahre (Ma) hinweg (etwa zwischen 60 und 40 Ma vor heute) in die Tiefe verfrachtet worden sind. Dort sind diese Gesteine sukzessiv immer wieder an die überschiebende kontinentale Platte angelagert worden. Diese Anlagerung ist mit Hebung und weiterer Deformation der überschiebenden Platte verbunden, wie sie heute auch an aktiven Subduktionssystemen beobachtet werden kann.

Oberkrustale tektonische Bruchbildung und Mineralisationen

Im Bereich der oberen Erdkruste, bei Temperaturen unterhalb von etwa 300 °C, kommt es bei starken tektonischen Spannungen nicht mehr zu duktiler Deformation, sondern zur Bruchbildung. Mit einer Kombination von Rb-Sr-Altersdaten aus den GFZ-Laboratorien mit K-Ar-basierten Altersdaten konnten zum Beispiel *Blisniuk et al. (2001)* mehrere Phasen von Fluidfluss und Mineralisation in einem Grabenbruch, also in einer dehnungsbezogenen Störung, im zentralen tibetischen Hochland datieren. Dehnung in Ost-West-Richtung in diesem Bereich des tibetischen Hochlands wird als Konsequenz der Heraushebung des Hochlands verstanden. Die geochronologischen Daten deuten auf eine mehrphasige Dehnungsgeschichte, die mindestens bei 13,5 Ma begonnen hat und auch bei nur 4 Ma noch nachweisbar ist. Die Heraushebung des tibetischen Plateaus muss also bei etwa 13,5 Ma schon weit fortgeschritten gewesen sein, mit allen ihren Konsequenzen für die Kinematik (Bewegungsgeometrie) der Kollision zwischen den indischen und eurasischen Kontinentalplatten, für die regionale Paläoklimaentwicklung (Monsun) und für globale atmosphärische Strömungsmuster, für die ein weit herausgehobenes tibetisches Plateau ein bedeutendes Hindernis ist.

Ausblick – Neue Entwicklungen

In jüngster Zeit hat es erhebliche Fortschritte in der Interpretation von Rb-Sr-Daten für Mineralvergesellschaftungen in Gesteinen gegeben. Hier hat sich gezeigt, dass entgegen früherer Annahmen der Einfluss von Deformation und Fluidüberprägung auf das Rb-Sr-System sehr viel gewichtiger ist als der Einfluss von Temperatur. Diese Erkenntnis hat zu einer deutlichen Erweiterung des Anwendungsfeldes der Rb-Sr-Methode hin zu Hochtemperaturprozessen beigetragen.

Die Rb-Sr-Methode ermöglicht jetzt auch die Datierung von Paläoerdbeben. Erdbeben führen oft oberflächennah zur Bildung von feinkörnigen Störungsbrekzien. Durch Zutritt von Wasser kann es in diesen zur Neubildung von Illit kommen, einem grundsätzlich mit Rb-Sr datierbaren Tonmineral. In der Frage der Entwicklung von Störungen in Teilen Anatoliens werden derzeit, vor dem Hintergrund der dortigen Erdbebengefährdung, am GFZ Arbeiten zur Rb-Sr-Systematik von illitführenden Störungsgesteinen durchgeführt

Ein aktuelles Forschungsfeld ist die Entwicklung von Rb-Sr hin zu einer In-situ-Methode. Bislang gab es die auch am GFZ eingesetzte Technik, kleine Volumina unter dem Mikroskop auszu-bohren (microdrilling), aus diesen kleinen Volumina Rb und Sr zu separieren und die beiden Elemente per TIMS zu analysieren. Für die Zukunft erscheint ein neuer Ansatz vielversprechend, der auf Laserablation und Online-Separation von Rb und Sr in einer Reaktionszelle innerhalb eines ICP-Massenspektrometers basiert. Hierdurch würde eine schnelle und effiziente Methode entstehen, die der Rb-Sr-Geochronologie neue Anwendungsfelder erschließen könnte.

Literatur

- Angiboust, S., Glodny, J., Oncken, O., Chopin, C. (2014): In Search of Transient Subduction Interfaces in the Dent Blanche–Sesia Tectonic System (W. Alps). - *Lithos*, 205, pp. 298-321, 10.1016/j.lithos.2014.07.001.
- Blisniuk, P. M., Hacker, B. R., Glodny, J., Ratschbacher, L., Bi, S. W., Wu, Z. H., McWilliams, M. O., Calvert, A. (2001): Normal faulting in central Tibet since at least 13.5 Myr ago. - *Nature*, 412, 6847, pp. 628-632, 10.1038/35088045.
- Glodny J, Grauert B., Fiala J., Vejnar Z., Krohe A. (1998): Metapegmatites in the Western Bohemian Massif: Ages of crystallisation and metamorphic overprint, as constrained by U-Pb zircon, monazite, garnet, columbite and Rb-Sr muscovite data. - *Geologische Rundschau*, 87, 1, pp. 124-134, 10.1007/s005310050194.
- Goldschmidt, V. M. (1938): Geochemische Verteilungsgesetze der Elemente : 9, Die Mengenverhältnisse der Elemente und der Atom-Arten, (Skripter / Norske Videnskaps-Akadademi i Oslo, Matematisk-Naturvidenskapelig Klasse ; 1937,4), Oslo : Dybwad, 148 p.
- Hahn O., Strassmann F., Walling E. (1937): Herstellung wägbarer Mengen des Strontiumisotops 87 als Umwandlungsprodukt des Rubidiums aus einem kanadischen Glimmer. - *Naturwissenschaften*, 25, 12, p. 189, 10.1007/BF01492269.
- Rutherford, E. (1904): op. cit. - In: Badash, L. (1968), Rutherford, Boltwood, and the age of the earth: the origin of radioactive dating techniques. - *Proceedings of the American Philosophical Society*, 112, 3, S. 157-169.