

Zirkon – ein magisches Mineral für die Gebirgsforschung

Das Schwermineral Zirkon ist nicht nur stabil gegenüber mechanischer und chemischer Verwitterung, sondern eignet sich aufgrund seiner Isotopenzusammensetzung auch ideal, um das Alter von Gesteinen zu bestimmen. Anhand der Zirkone in Sandsteinen lässt sich die komplexe Geschichte der Ursprungsgebiete rekonstruieren.

Sandsteine sind Zeugen der vergangenen Erdgeschichte. Zu jeder geologischen Zeit geben sie Informationen über die Gesteine, die um die Sedimentbecken an der Erdoberfläche liegen. In der sogenannten Provenienzanalyse von sandigen Sedimenten werden die Mineralien und Gesteinsbruchstücke, die von den umgebenden Bergen eingeschwemmt wurden, mit verschiedenen Methoden bearbeitet und quantitativ erfasst. Damit erhalten wir ein Bild der Gesteine, die in den Liefergebieten erodiert und anschließend in den Sedimentbecken abgelagert wurden.

Traditionell werden dazu im Gesteinsdünn-schliff die Anteile von Quarz, Feldspäten und Gesteinsbruchstücken gezählt oder mit Anreicherungs-methoden die viel selteneren Schwerminerale wie Zirkon, Turmalin, Apatit, Hornblende oder Granat bestimmt.

Bestandteile verraten Herkunft

Die jahrzehntelange Erfahrung zeigt, dass die Plattentektonik die Zusammensetzung der Gesteine in den Liefergebieten bestimmt, bzw. dass diese Zusammensetzung aus den gleichaltrigen Sandsteinen abgelesen werden kann. Gebirge, die bei Subduktionszonen entstehen, sind durch Vulkane geprägt. Werden sie erodiert, entsteht ein heterogener Schutt aus vulkanischen Mineralien, Gesteinsbruchstücken und dem kristallinen Wirtsgestein.

Bei Kollisionszonen von Kontinentalplatten, wo sich Gebirge wie zum Beispiel die Alpen oder der Himalaya bilden, sehen wir in den vorgelagerten Sedimentbecken einen Trend in den Schwermineralien. Dieser Trend zeigt, wie mit der Zeit aus der Tiefe immer höher metamorphe Gesteine an die

Oberfläche gelangen. Sandsteinformationen, die von alten Gebirgen beliefert wurden, zeigen hingegen eine einfache Zusammensetzung mit den dominierenden Mineralien Quarz und Feldspat.

Ein Beispiel: Geht man dem Lauf des Amazonas nach, zeigt sich, dass in den Sandsteinen die Spuren der vulkanisch-magmatischen Gesteine der Anden durch Beimischung von Sandkörnern vom alten Amazonas-Schild nach und nach verdünnt und fast ausgelöscht werden. Der lange Transportweg mit wiederholter Zwischenlagerung der Körner, die geringere Stabilität der vulkanischen Produkte sowie das herrschende tropische Klima spielt dabei auch eine gewichtige Rolle.

Weitverbreitet und stabil

Solche Gesteinsanalysen sind hilfreich, aber sie tragen den Makel, dass sie uns nicht das Alter der zur Erosion gebrachten Gesteine anzeigen. Eine radiometrische Datierung der verfrachteten Mineral-körner ist die Lösung. Dazu eignet sich ein weitverbreitetes Mineral, das sehr stabil ist gegenüber mechanischer und chemischer Verwitterung und mit radiogenen Isotopen datiert werden kann. Nach unserer heutigen Erkenntnis erfüllt das Mineral Zirkon ($ZrSiO_4$) diese Bedingungen am besten.

Zirkon kann mit Hilfe der Uran-Thorium-Blei-Methode ($^{206}Pb/^{238}U$, $^{207}Pb/^{235}U$ oder $^{208}Pb/^{232}Th$) sehr genau datiert werden. Zudem verliert Zirkon auch unter hohen Temperaturen während einer späteren Gesteinsmetamorphose seine ursprüngliche Altersinformation nicht. Man findet in Graniten sogar alte Zirkonkerne, die bei der Wiederaufschmelzung des Gesteins im Magma umwachsen wurden. Beide Komponenten, der alte Kern und der jüngere Rand, können mittels In-situ-LA-ICP-MS (Laser-Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) datiert werden. Bei dieser Methode werden die einzelnen Mineralkörner mit einem Laserstrahl mit einem Durchmesser von 30 bis 40 Mikrometern bis auf eine Tiefe von 10 Mikrometern angebohrt. Aus dem Dampf werden die Isotopenanteile im Massenspektrometer gemessen und daraus das Alter berechnet.

Weitere Voraussetzungen sind die technische Machbarkeit und ein vernünftiger Arbeitsaufwand



Links: Zirkone unter dem petrographischen Mikroskop. Mitte: Kathodenlumineszenzaufnahmen von datierten Zirkonen mit Alterswerten und Fehlern in Millionen Jahren vor heute. Die Zonierung der Zirkone wird sichtbar auf Grund wechselnder Gehalte von Thorium und Blei in der Schmelze während der Kristallisation. Beachte, dass die Datierung von einem (variszischen) Kern und Umwachsung ein älteres Mischalter ergibt (Mitte unten); das echte Alter wird in den Spitzen evaluiert. Rechts: Zirkone, die bei der Analyse vom Laser gelöchert wurden.

bei der Vorbereitung der Zirkone. Eine gute statistische Aussage über die Altersverteilung der Zirkone in einer Sandsteinbank erfordert die Messung von mindestens 100 bis 120 Zirkonen. Andere hochpräzise Verfahren wie TIMS (Thermal Ion Mass Spectrometer) und SIMS (Secondary Ion Mass Spectrometer) sind sehr viel arbeitsaufwändiger. Bei diesen Verfahren werden jeweils «nur» 6 bis 10 ausgewählte Zirkone analysiert. Dies ist zum Beispiel interessant, wenn eine reine vulkanische Aschenschicht datiert werden soll.

Erdmantel oder Erdkruste?

Eine weitere interessante Information liefern die Zirkone durch ihre Zusammensetzung in den Hafnium-Isotopen. Das Verhältnis $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ gibt Auskunft über die Art des Magmas, in denen die Zirkone kristallisierten. Die Häufigkeit von ^{177}Hf blieb in der Erdgeschichte stabil. Aus dem Zerfall von ^{176}Lu hingegen entsteht im Laufe der Erdgeschichte das Isotop ^{176}Hf . Somit muss das Verhältnis $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ auf das Alter der Zirkone korrigiert werden.

Ein positive Abweichung des $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ -Verhältnisses gegenüber dem Standard deutet darauf hin, dass die Quelle des Magmas im Erdmantel liegt. Tendiert die Abweichung gegen Null, erklärt sich dies durch einen zunehmenden Anteil von geschmol-

zener Erdkruste im Magma. Negative Werte entstehen, wenn das Magma mehrheitlich durch Aufschmelzen von kontinentaler Kruste entstand. Für beide Messreihen, diejenige zur Bestimmung des Alters und diejenige zur Bestimmung der Hf-Isotopenverhältnisse, werden von den zu untersuchenden Zirkonen zuerst Kathodenlumineszenz-Aufnahmen gemacht, um den Laserstrahl an den geeigneten Stellen am Zirkon anzusetzen.

Rekonstruktion der Geschichte

Am Departement Erdwissenschaften der ETH Zürich werden diese Untersuchungen an Zirkonen seit einiger Zeit in verschiedenen Gebirgen angewendet, so etwa in den Anden (Ecuador), im Zentralasiatischen Orogen (Mongolei) und in Gebirgszügen in Iran und Myanmar, aber auch in den Alpen. Die dabei erlangten Informationen helfen, die Geschichte dieser Gebirge zu rekonstruieren.

Dies zeigt sich exemplarisch an den Zirkonen, die man in den Sandsteinen des sogenannten Gurnigel-Flysches in den Schweizer Voralpen und in den Sandsteinen der Südalpen findet. Die Gurnigel-Zirkone zeigen, dass das alpine Grundgebirge aus einer Mischung von Gesteinen aufgebaut ist, die über eine lange geologische Zeit entstanden: Zu den Gesteinen, die während der Pan-Afrikanischen

Gebirgsbildung vor 650 bis 450 Millionen Jahren am nördlichen Rand des Westafrikanischen Kratons (heute etwa Marokko) entstanden, gesellten sich während der sogenannten variszischen Orogenese vor 360 bis 300 Millionen Jahren Granite und vulkanische Gesteine. Die nachfolgende permische Dehnung, die ihren Höhepunkt vor 280 Millionen Jahren hatte, führte zur Grabenbildung und erneutem Vulkanismus.

In der anschliessenden Trias-Zeit brach der Superkontinent Pangea entlang einem Ost-West verlaufenden Bruchsystem auf. Damit begann die alpine Geschichte: Der Atlantik stand kurz vor seiner Öffnung, und in der Dehnungszone, die sich von Europa bis Mittelamerika erstreckte, wurden Evaporite, Dolomite und Sandsteine abgelagert. Durch die Dehnung konnten erneut vulkanische Schmelzen aufsteigen. Sie erstarrten an der Oberfläche und wurden in die benachbarten Sedimentbecken erodiert.

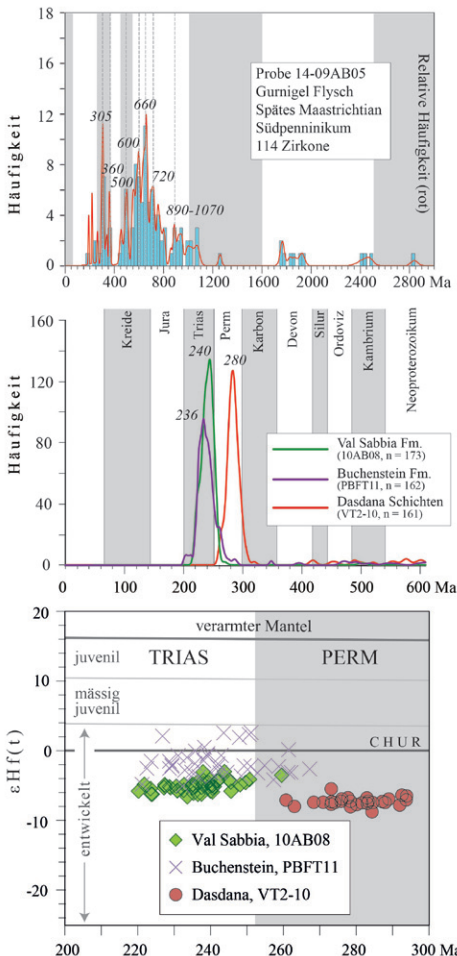
Die Zirkone der Val-Sabbia- und Buchenstein-Formationen der Südalpen zeigen mit ihren niedrigen bis leicht negativen Abweichungen in den Hafnium-Isotopenverhältnissen an, dass die aufsteigenden Magmen durch Aufschmelzung von gut entwickelter kontinentaler Kruste entstanden. Eine frühere Theorie, dass der Vulkanismus in den Südalpen durch eine Subduktion verursacht wurde, konnte durch diese Resultate widerlegt werden, müssten die Hafniumisotope dazu doch eine andere Zusammensetzung aufweisen.

Wilfried Winkler und Albrecht von Quadt

Wilfried Winkler ist emeritierter Professor für Geologie am Geologischen Institut der ETH Zürich; Dr. Albrecht von Quadt ist Senior Scientist am Institut für Geochemie und Petrologie der ETH Zürich.

LITERATUR

- Bütler E. et al. 2011. Laser ablation U/Pb age patterns of detrital zircons in the Schlieren Flysch (Central Switzerland): new evidence on the detrital sources. *Swiss Journal of Geoscience* 104: 225-236. DOI 10.1007/s00015-011-0065-1
- Beltrán A. et al. 2013. Tracing Alpine sediment sources through laser ablation U–Pb dating and Hf-isotopes of detrital zircons. *Sedimentology* 60: 197–224. DOI 10.1111/sed.12006



← Oben: Typisches Altersspektrum (Histogramm und relative Häufigkeit) der Zirkone eines spätkretazischen Flyschsandsteins, das mehrheitlich die Altersstruktur des alpinen Grundgebirges illustriert (Ma=Millionen Jahre vor heute). Mitte: Relative Häufigkeit der syn-sedimentären vulkanischen Eruptionen in post-variszischen (Perm) und früh-alpinen Sandsteinen und Aschenlagen. Unten: Hafnium-Isotopenverhältnisse [ε Hf] der selben Zirkone bestätigen die Herkunft der Magmen von entwickelter kontinentaler Kruste und ihre nahe Verwandtschaft.