

Postenübergreifende Ergänzung 2: Geothermobarometrie

Das geologische Thermo- und Barometer

An Posten 11 werden Sie sich gefragt haben, wie die Geologie herausfinden kann, in welcher Tiefe in der Erdkruste Gesteine entstanden sind.

Das sieht schwieriger aus, als es ist ... zumindest in der Theorie.

Der Aufbau eines Gebirges wie die Alpen ist sehr komplex. Das haben Sie sicher bereits bei der Betrachtung des Profils durch die zentralen Alpen an Posten 11 festgestellt. Die Westalpen sind sogar noch um einiges komplizierter aufgebaut (Abb. 1). Um im Detail nachvollziehen zu können, wie Gebirge entstanden sind, müssen möglichst genau die Druck- und Temperaturbedingungen bestimmt werden können, unter welchen die Gesteine im Gebirgsinneren durch Metamorphose umgewandelt wurden. Dadurch kann abgeschätzt werden, unter welcher Überlast sich Teile der Erdkruste während der Gebirgsbildung befanden und wie tief sie unterschoben (subduziert) bzw. aus welcher Tiefe sie wieder an die Oberfläche gehoben wurden. Für die Rekonstruktion der Abläufe während der Gebirgsbildung macht es einen grossen Unterschied, ob dies beispielsweise „nur“ 30 oder über 100 km waren.

Da sich keines der Gesteine, das Sie bisher an den Posten kennengelernt haben, besonders gut für die Druck- und Temperaturbestimmung eignet, wird die Vorgehensweise anhand von Tongestein aufgezeigt. Tongestein ist ein weiches Sedimentgestein, das in stehenden Gewässern abgelagert wird. Ton als unverfestigtes Sediment haben Sie sicher im Werkunterricht kennen gelernt. Obwohl Tongestein ein häufiges Sedimentgestein ist, kann man es auf der Erdoberfläche selten sehen, da es wegen seiner Weichheit kaum Felswände bildet und meist von Vegetation bedeckt ist. Wird Tongestein jedoch metamorph, wandelt es sich in vielfältige, oftmals ausserordentlich farbenreiche Gesteine um, die vielerorts anzutreffen sind.

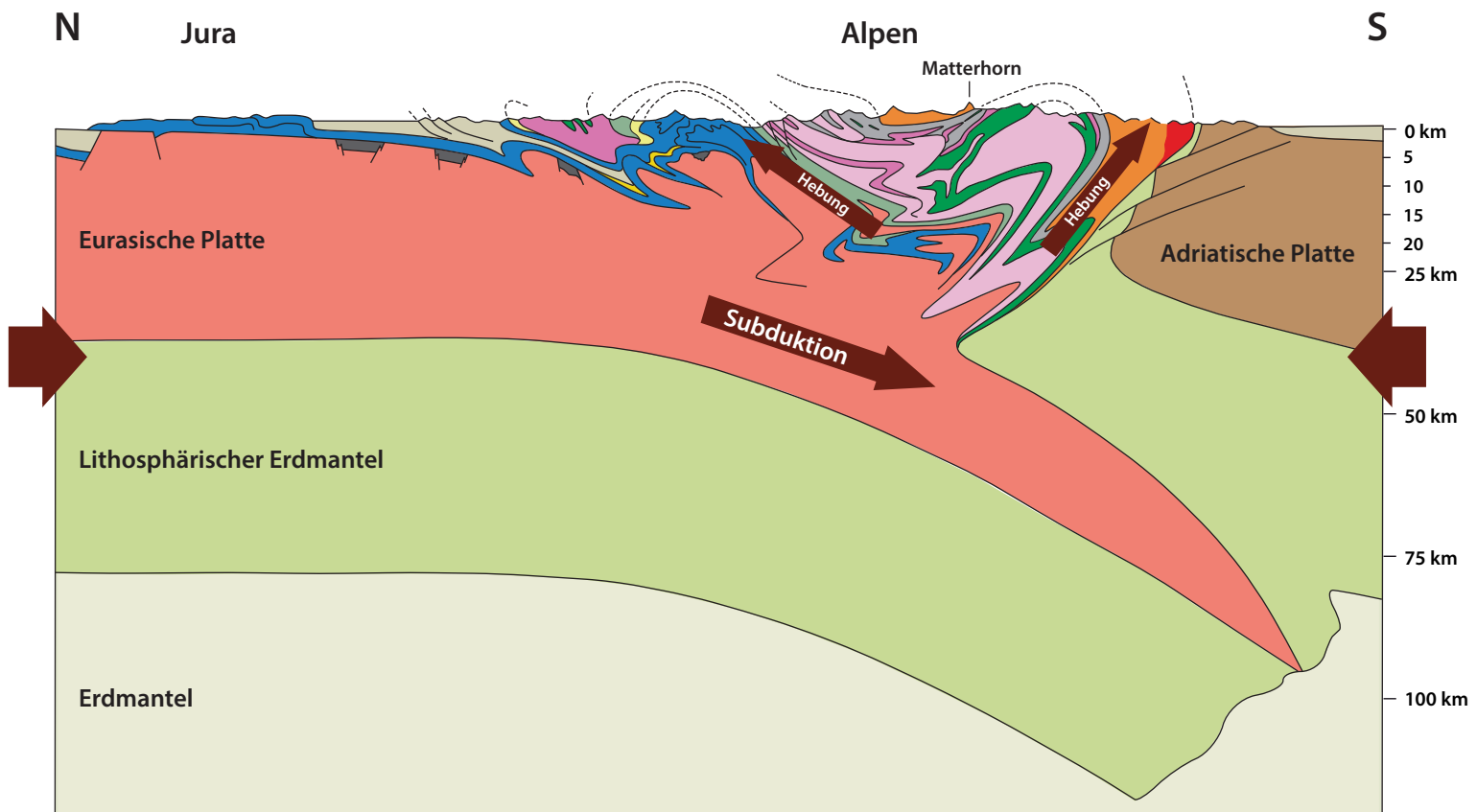


Abb. 1: Schnitt (Profil) durch Jura, Mittelland und Alpen von Norden (links) nach Süden (rechts). Die Pfeile zeigen die Bewegungsrichtung der tektonischen Platten an. Die nördliche, Eurasische Platte wird unter die südliche, Adriatische Platte geschoben (Subduktion). Dabei werden Teile der Platten in die Tiefe gequetscht, aber auch wieder in die Höhe gehoben.

Mineralbestand als Indikator für Druck- und Temperaturbedingungen

Jedes Mineral hat einen mehr oder weniger eng begrenzten Stabilitätsbereich, es kann also nur bei bestimmten Druck- und Temperaturbedingungen (P-T Bedingungen) kristallisieren und auch stabil bleiben. Ändern sich die P-T Bedingungen, wird das Mineral instabil und beginnt, mit einem oder mehreren anderen Mineralen zu reagieren, wobei eines oder mehrere neue Minerale entstehen. Für einige Minerale, wie z. B. Quarz, ist der Stabilitätsbereich gross, viele andere Minerale indes haben einen eng begrenzten Stabilitätsbereich. Alle Mineralreaktionen laufen in festem Zustand ab, indem Atome entlang der Kristallgrenzen wandern. Dabei schmilzt nichts auf, allenfalls kann das Vorhandensein von Wasser im Gestein den Transport der Atome erleichtern.

Manchmal können in einem Gestein Mineralreaktionen beobachtet werden, die wie in einer Momentaufnahme „eingefroren“ sind. Die P-T Bedingungen solcher Mineralreaktionen können durch Laborversuche, Messungen und Berechnungen ermittelt werden. Sie werden in Form einer Reaktionskurve in einem Druck-Temperatur Diagramm (P-T Diagramm) dargestellt (Abb. 2).

In den metamorphen Tongesteinen, die wir als Beispiele verwenden, sind die Reaktionskurven der vier sehr auffälligen Minerale Chlorit, Biotit, Granat und Disthen im P-T Diagramm bekannt (Abb. 3). Dadurch lassen sich die Druck- und Temperaturbedingungen während der Metamorphose bereits gut eingrenzen. Kom-

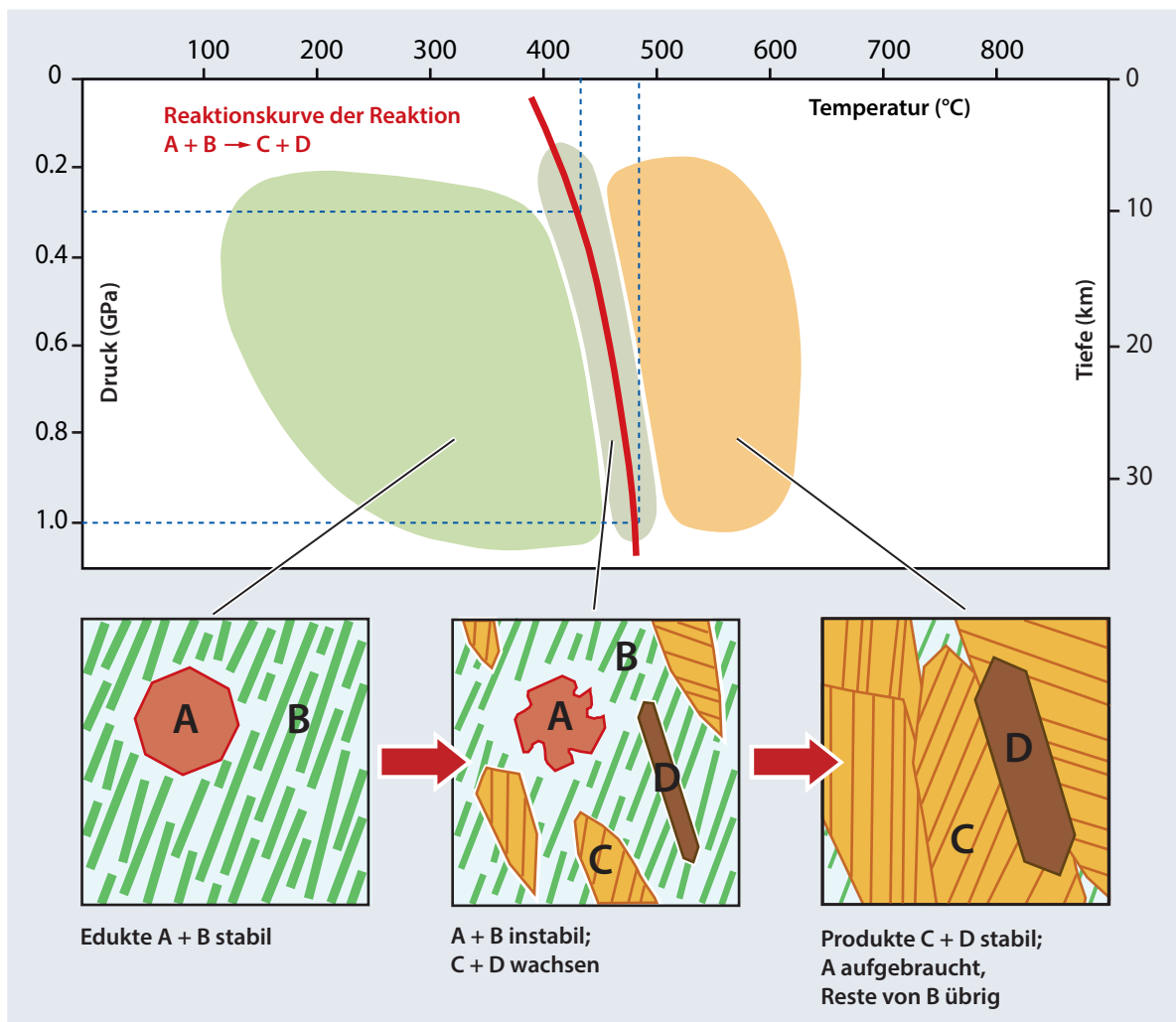


Abb. 2: Schematische Darstellung der Mineralreaktion $A + B \rightarrow C + D$. Die Reaktionskurve (rot) ist im Druck-Temperatur Diagramm (P-T Diagramm) dargestellt, wobei die Temperatur von links nach rechts und der Druck von oben nach unten zunehmen. Links der Reaktionskurve sind die Edukte A+B stabil, rechts davon die Produkte C+D. Da der Druck in der Erdkruste direkt von der Tiefe unter der Erdoberfläche abhängt, sind auf der Skala auf der rechten Seite die zum Druck gehörenden Tiefen angegeben. Die Reaktion findet bei zunehmenden P-T Bedingungen statt, sie wird deshalb als sog. „prograd“ bezeichnet. Die Reaktionskurve ist so zu lesen, dass die Mineralreaktion $A + B \rightarrow C + D$ beispielsweise bei einem Druck von 0.3 GPa (1 GPa = 10'000 bar) und einer Temperatur von 430°C ausgelöst werden kann, ebenso wie beispielsweise auch bei 1.0 GPa und 480°C (gestrichelte Linien) oder bei allen anderen P-T Bedingungen, die durch die Form der Kurve vorgegeben sind.

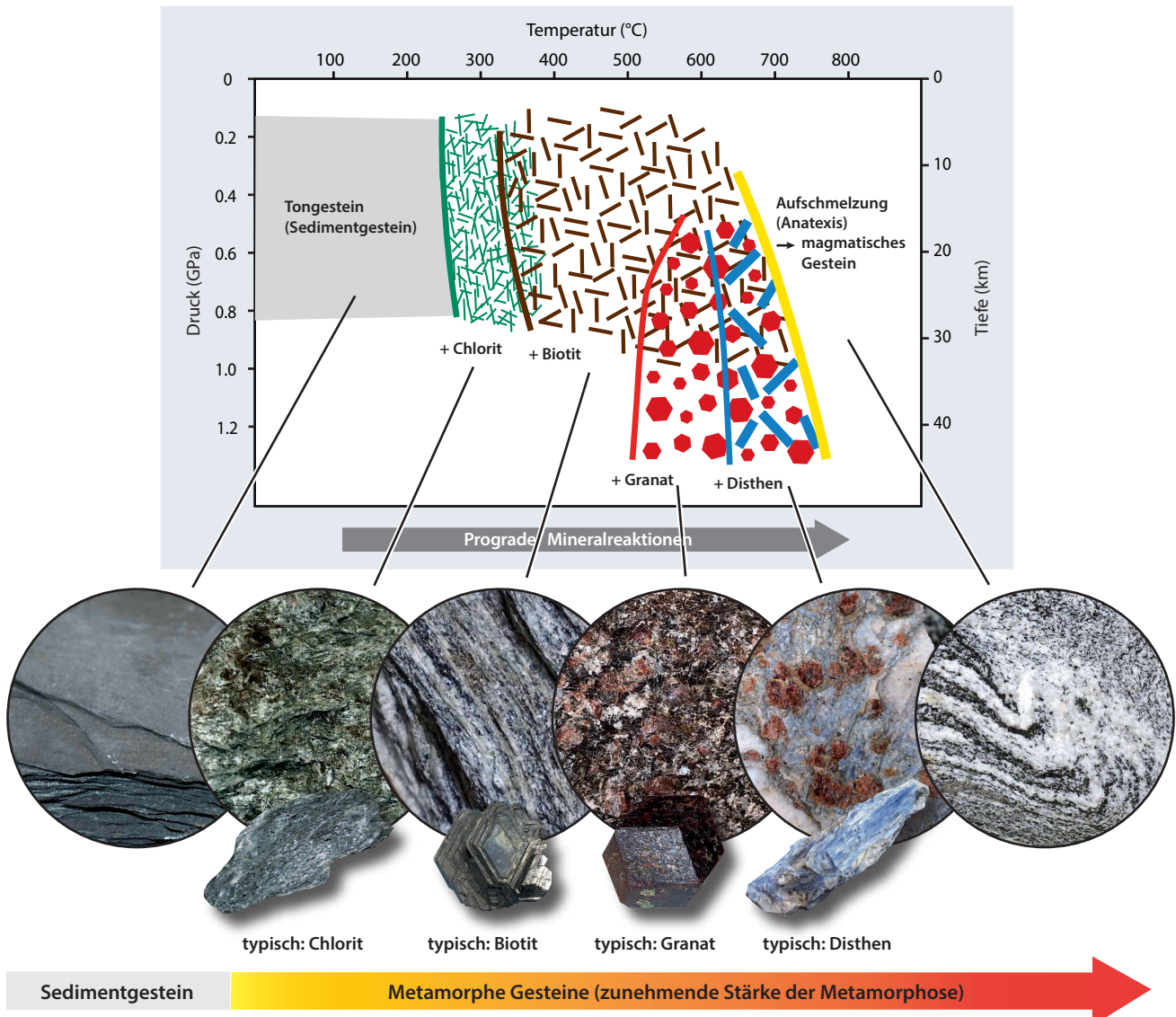


Abb. 3: Auftreten auffälliger Minerale in metamorphen Tongesteinen im P-T Diagramm. Die Kurven zeigen das erste Auftreten der Minerale Chlorit, Biotit, Granat und Disthen sowie den Beginn der Aufschmelzung des Gesteins (bei totaler Aufschmelzung entsteht ein magmatisches Gestein). Die Mineralreaktionen werden in diesem speziellen Fall vor allem durch eine Zunahme der Temperatur ausgelöst.

men in einem Gestein z. B. Biotit und Granat vor, musste das Gestein eine Temperatur zwischen etwa 500° und 600° C erreicht haben (Abb. 3).

Da das Wachstum von Chlorit, Biotit, Granat und Disthen hauptsächlich durch zunehmende Temperatur ausgelöst wird, stehen die Reaktionskurven annähernd senkrecht im P-T Diagramm. Deshalb ist es schwierig, nur aufgrund dieser Reaktionen genaue Angaben zu den Druckbedingungen zu machen. In den obersten 10 km der Erdkruste nimmt die Temperatur im Durchschnitt um etwa 27° C pro Kilometer Tiefe zu, in grösserer Tiefe ist die Temperaturzunahme geringer. Dies ist aber keine zuverlässige Angabe und hängt unter anderem von der Dicke der Erdkruste ab. Eine Temperatur zwischen 500 und 600°C entspräche demnach einer Tiefe zwischen 18 und 22 km.

Der Weg durch die Erdkruste

Metamorphe Tongesteine müssen, wie alle anderen Sedimentgesteine auch, von der Erdoberfläche, wo sie abgelagert wurden, in die Tiefe der Erdkruste gelangt sein, um metamorph zu werden. Damit wir sie schliesslich finden können, müssen sie zusätzlich aus der Tiefe der Erdkruste auch wieder an die Erdoberfläche verfrachtet werden.

Gelangt ein Gestein aus der Tiefe der Erdkruste wieder an die Oberfläche zurück, kann auch dies sichtbare Spuren im Mineralbestand hinterlassen. Es ist allerdings nicht so, dass die sogenannt prograden Mineralre-

aktionen, wie sie in Abb. 2 und 3 dargestellt sind, bei abnehmender Temperatur und abnehmendem Druck einfach in umgekehrter Richtung ablaufen und rückgängig gemacht werden. Vielmehr lösen Temperatur- und Druckabnahme neue, sogenannte retrograde Mineralreaktionen aus (Abb. 4). Dies setzt allerdings voraus, dass die Gesteine so langsam an die Erdoberfläche gelangen, dass die Minerale genügend Zeit haben, miteinander zu reagieren. Erfolgt der Aufstieg schnell, finden keine retrograden Reaktionen statt.

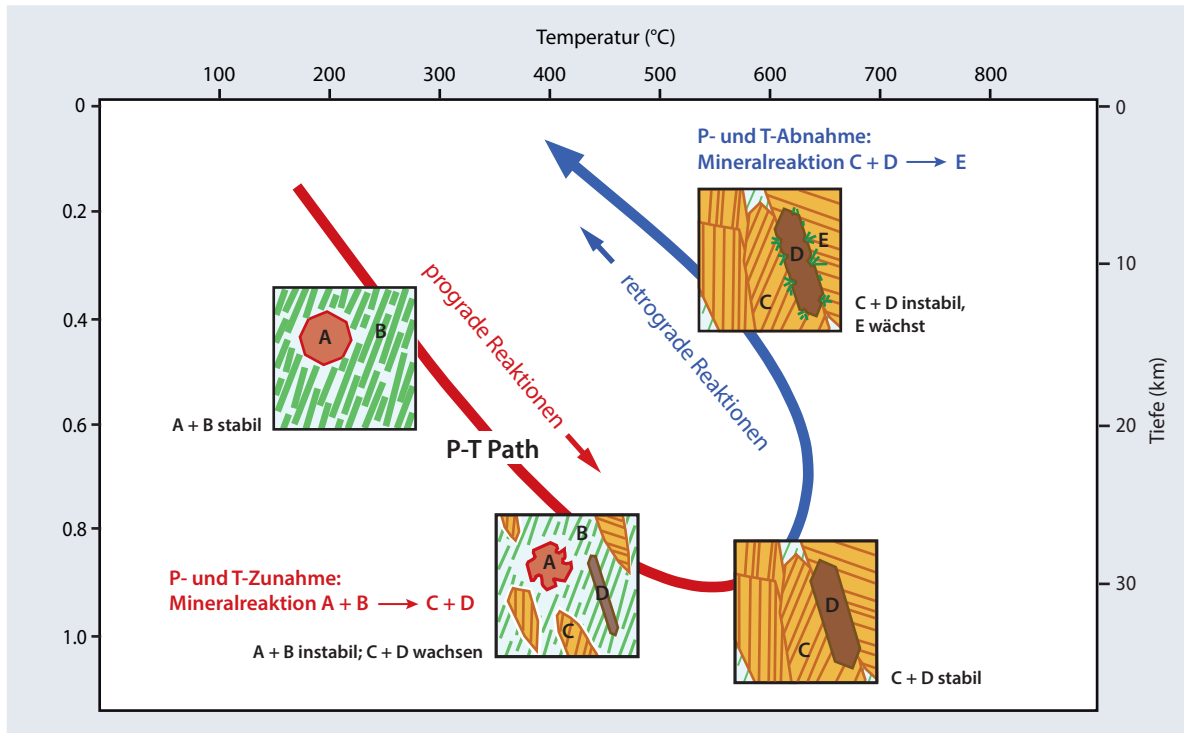


Abb. 4: Zu- und Abnahme von Druck und Temperatur auf dem Weg eines Gesteins durch die Erdkruste, dargestellt im P-T Diagramm. Dafür wird der englische Ausdruck 'P-T Path' (übersetzt 'P-T Weg') verwendet. Rot: P-T Path auf dem Weg in die Tiefe der Erdkruste mit prograden Mineralreaktionen, blau: P-T Path auf dem Weg zurück zur Oberfläche mit retrograden Mineralreaktionen.

Geothermobarometrie

Die Druck und Temperaturbedingungen können nicht nur abgeschätzt werden, sie können auch durch Messungen genauer ermittelt werden. Auch dafür eignen sich metamorphe Tongesteine besonders gut. Etliche Minerale tauschen im Lauf der Metamorphose untereinander Ionen¹ aus, die etwa gleich gross sind und dieselbe Ladung haben. In metamorphen Tongesteinen (Abb. 5) werden zwischen Granat, Biotit und Plagioklas (eine von vielen Arten Feldspat) unter anderem die Ionen von Magnesium (Mg^{2+}), Eisen (Fe^{2+}) und Kalzium (Ca^{2+}) ausgetauscht. Dieser Austausch ist jedoch nicht zufällig. Der Mg^{2+} -Anteil in Granat ist vor allem von der Temperatur abhängig, er ist also ein gutes Thermometer. Der Ca^{2+} -Anteil hingegen ist von

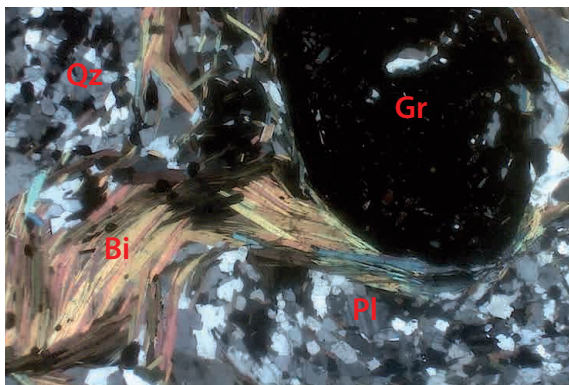


Abb. 5: Dünnschliff eines metamorphen Tongesteins aus dem Himalaya mit Granat (Gr), Biotit (Bi), Plagioklas (Pl) und Quarz (Qz), Vergrößerung ca. 10 x.

Temperatur und Druck gleichermaßen abhängig. Zusammen ergeben diese Werte deshalb ein gut funktionierendes Thermo-Barometer.

Durch Experimente und Berechnungen lässt sich der Gewichtsanteil von Mg^{2+} und Ca^{2+} in Granatkristallen² für jede Temperatur und für jeden Druck bestimmen und in Form von Linien konstanter Zusammensetzung (Isoplethen) in einem Druck-Temperatur Diagramm darstellen. Solche Isoplethendiagramme stehen routinemässig zur Verfügung (Abb. 6). Mit einer Elektronenmikrosonde, einer komplexen Apparatur, welche Minerale mit einem Elektronenstrahl analysiert (Abb. 7), werden nun die Gehalte an Mg^{2+} und Ca^{2+} in einem Granatkristall aus

einer Gesteinsprobe gemessen². Das könnten beispielsweise 2.4 Gewichtsprozent (Gew-%) Mg^{2+} und 7.3 Gew-% Ca^{2+} sein. Der Schnittpunkt der entsprechenden Isoplethen (grün und gelb in Abb. 8) repräsentiert die Druck- und Temperaturbedingungen bei der Entstehung der Minerale in unserer Gesteinsprobe.

Wie bei der Geochronologie treten auch bei der Geothermobarometrie Ungenauigkeiten bei Messungen und Berechnungen auf. Man rechnet deshalb generell mit einer Genauigkeit der ermittelten Werte von ca. $\pm 50^\circ\text{C}$ und ± 0.1 GPa.

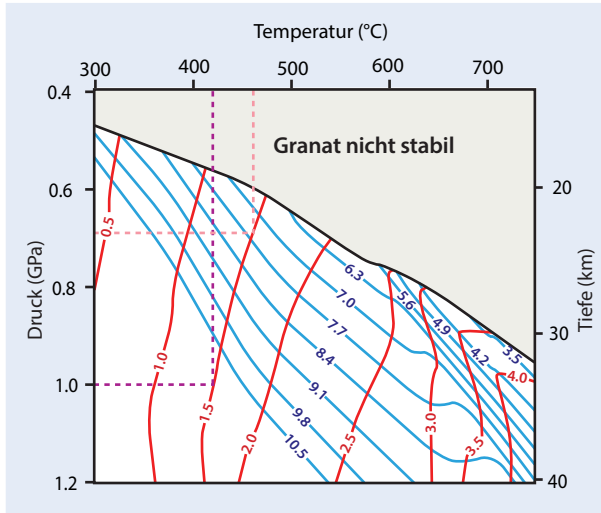


Abb. 6: Isoplethen (Linien konstanter Zusammensetzung) in Gewichtsprozent (Gew-%) für den Gehalt an Mg^{2+} (rot) und Ca^{2+} (blau) in Granat², dargestellt in einem Druck-Temperatur Diagramm. Das Diagramm ist folgendermassen zu lesen:

Beispielsweise beträgt der Gehalt an Mg^{2+} sowohl bei 1.0 GPa und 420°C (violett gestrichelte Linien) wie auch bei 0.7 GPa und 460°C (rosa gestrichelte Linien) 1.5 Gew.-%.

Der Übersichtlichkeit halber sind die Isoplethen in Schritten von 0.5 Gew-% für Mg^{2+} und 0.7 Gew-% für Ca^{2+} dargestellt, kleinere Schritte ergäben mehr Isoplethen. Im grauen Bereich kommt Granat nicht vor.



Abb. 7: Elektronenmikroskopie

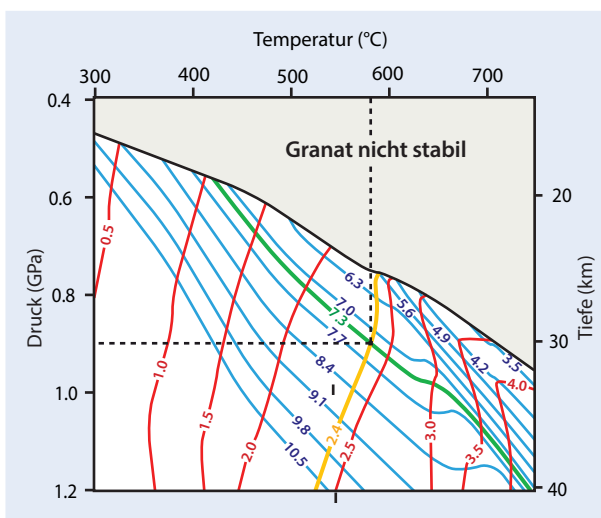


Abb. 8: Isoplethen für gemessene 2.4 Gewichtsprozent (Gew-%) Mg^{2+} (gelb) und 7.3 Gew-% Ca^{2+} (grün) im Granat einer Gesteinsprobe², dargestellt in einem Druck-Temperatur Diagramm.

Der Schnittpunkt der Isoplethen ergibt die Temperatur- und Druckbedingungen bei der Entstehung des Granatkristalls: ca. 580°C bei 0.9 GPa, dies entspricht einer Entstehungstiefe von ca. 30 km.

¹ Atome mit positiver oder negativer Ladung.

² Genau genommen wird der Gehalt in Gewichtsprozent der Oxide (Magnesiumoxid, MgO ; Kalziumoxid, CaO) berechnet.