HAL open science

# Moderne Petrologie – was ist das?

Alexander Proyer, Emilie Bruand

## To cite this version:

Alexander Proyer, Emilie Bruand. Moderne Petrologie – was ist das?. Mitteilungen des naturwissenschaftlichen Vereines für Steiermark, 2010, 140, pp.69-84. hal-01705067

**HAL Id: hal-01705067**

**https://uca.hal.science/hal-01705067v1**

Submitted on 29 Oct 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

# Moderne Petrologie – was ist das?

Von Alexander Proyer[1] & Emilie Bruand[1]
Mit 7 Abbildungen und einer Tabelle

**Summary: Modern Petrology – what is that?** – A petrologist uses physico-chemical methods to read the rock record and constrain its geological history, thus providing important data for the field geologist, the economic geologist and the engineering geologist, which those can use for their work on a broader scale or with a different aim. He operates modern analytical equipment on the one hand and more and more sophisticated tools for thermodynamic and kinetic modelling on the other hand, like pseudosections, which are explained here in some detail. Fields of application for a graduate in petrology are not only found in the academic realm but in all areas of the extractive and processing industry, up to modern high-tech industry where the same physico-chemical principles are applied in the production of advanced materials (ceramics, semiconductors, glassware etc.).

**Zusammenfassung:** Der Petrologe entschlüsselt mit physikalisch-chemischen Methoden die in einem Gestein enthaltenen Hinweise auf dessen Entstehungsgeschichte und liefert so dem Geologen, aber auch dem Lagerstättenkundler und dem Ingenieurgeologen wichtige Hinweise für deren Arbeit in einem weiteren Zusammenhang bzw. mit anderer Zielrichtung. Dazu verwendet er heute einerseits modernste analytische Geräte und andererseits immer ausgefeiltere thermodynamische und kinetische Berechnungs- und Darstellungsmethoden, wie etwa Pseudoschnitte, auf deren Aussagekraft näher eingegangen wird. Als Berufsfelder findet ein Absolvent des Petrologiestudiums nicht nur die Grundlagenwissenschaft selbst vor, sondern sämtliche Bereiche der Grundstoffindustrie (Bergbau und Verarbeitung) bis hin zu den auf denselben physikalisch-chemischen Grundlagen operierenden High-Tech-Unternehmen im Bereich moderner Werkstoffe (Keramiken, Halbleiter, Glas, etc.).

## 1. Einleitung

„Was macht eigentlich ein Petrologe?“ mag sich so mancher interessierte Laie oder Vertreter einer anderen Naturwissenschaft fragen, spätestens dann, wenn er einem der seltenen Vertreter dieser Spezies am Berg begegnet, einen etwas überdimensionierten Hammer in der Hand und den Blick auf irgendeinen Fels gerichtet, anstatt auf den Weg – falls sich der derartig primitiv Bewaffnete als Petrologe zu erkennen gibt, denn meist bevorzug er der Verständlichkeit halber Geologe oder Mineraloge als spontane Berufsbezeichnung. Auch mit „Gesteinskundler“ habe ich es schon versucht (klingt nicht so gut), und bei meinem damals fünfjährigen Neffen hat der Ausdruck „Steine-Doktor“ am besten gezogen, auch wenn das möglicherweise nicht ganz den richtigen Eindruck vermittelt hat. Zuerst vielleicht also: „Was ist ein Petrologe?“ – Ein Petrologe ist, so will ich einmal spontan behaupten, ein Grenzgänger und Vermittler zwischen dem Mineralogen, der sich mit dem Wesen einzelner Minerale bzw. Mineralarten an sich beschäftigt, und dem Geologen, der sich auf sehr viele Teildisziplinen stützt, um die eher regionalen und großräumigen Entwicklungen der Erdkruste zu verstehen und zu beschreiben. Und zu diesen Teildisziplinen gehören unter anderem so unterschiedliche Bereiche wie Geochronologie (Altersdatierung von Mineralen und Gesteinen), Paläontologie (Lebewesen der Vorzeit) oder auch die Petrologie. Zwischen dem Mineral und dem Gebirge vermittelnd steht also das Gestein an sich, der Sandstein, der Granit, der Glimmerschiefer, oder auch ein etwas exotischerer

[1] Alexander Proyer und Emilie Bruand, Institut für Erdwissenschaften, Karl-Franzens-Universität Graz, Universitätsplatz 2/II, A-8010 Graz, Austria, E-Mail: alexander.proyer@uni-graz.at; emilie.bruand@uni-graz.at

Typus, und der Petrologe geht jedem dieser Gesteine auf den Grund, untersucht sie mit verschiedensten physikalisch-chemischen Methoden, auf die wir noch teilweise eingehen werden, und versucht sie dann einzeln und im Verband mit den anderen Gesteinen seines Geländegebietes zu interpretieren, das heißt, ein möglichst gutes Verstehen über ihre Bildungs- und Entwicklungsgeschichte zu erlangen. Dies verwendet dann der Geologe zusammen mit anderen Daten, um die Bildung und Entwicklung größerer Einheiten und Regionen zu verstehen, mit all seinen theoretischen, aber auch praktischen Konsequenzen, etwa was die effiziente Aufsuche von Rohstoffen, die technische Eignung des Untergrundes für Baumaßnahmen oder auch – sehr aktuell – Klimaentwicklung in der Erdgeschichte oder den Einfluss geologischer Prozesse auf den $CO_2$-Haushalt betrifft.

Die Tücken dieser Spurensuche über die Vergangenheit eines Gesteines sind mannigfaltig und nicht unähnlich der detektivischen Arbeit eines Forensikers oder Pathologen, der mit zum Teil enormem technischen Aufwand die Hinweise an seinen stummen Zeugen liest und dann einem Staatsanwalt oder Verteidiger zur Verfügung stellt, damit diese sie im Zusammenhang mit anderen Daten interpretieren. Nur dass die Arbeit eines Petrologen weitaus mehr Ästhetik besitzt und die kalte Faust des Todes eigentlich nur spürbar wird, wenn man sich bei der Probennahme in zu extreme Situationen begibt. Doch da keine Leidenschaft ohne Risiko ist, wollen wir diesen Aspekt beiseitelassen und uns stattdessen ansehen, wie die Arbeit eines modernen Petrologen aussieht.

## 2. Petrographie und Mineralchemie

Was geschieht, wenn der Petrologe sein Handstück im Gelände genommen hat, es beschriftet und im Geländebuch vermerkt hat; wenn er die Geländeskizze bzw. das Aufschlussfoto gemacht und die GPS-Koordinaten genommen hat, wenn er die ursprüngliche Lage der Gesteinsprobe im Raum mit dem Geologenkompass eingemessen hat (falls es kein Fallstück war, sondern vom anstehenden Fels abgeschlagen wurde), und der erste prüfende Blick durch die Lupe getan ist, um den Mineralbestand zu identifizieren? Nun, dann kommt die Probe ins Labor, denn für den ersten detaillierteren Blick benötigt man einen Dünnschliff.

So wie der Pathologe mit viel Sorgfalt eine Gewebeschnitt nimmt und unter sein Mikroskop legt, um dessen Feinstruktur und Merkmale zu untersuchen, so erwartet der Petrologe von seinem Präparator im Gesteinslabor einen etwa 20 x 40 Millimeter großen Gesteinsschnitt mit einer Standarddicke von 0,03 Millimetern (30 µm) – manchmal durchaus eine Herausforderung in der Herstellung, und legt ihn unter sein Mikroskop, um die Art und Menge der vorhandenen Minerale zu bestimmen, ihre Korngrößen, Kornformen, die Verwachsungsformen (Mikrostruktur) sowie Hinweise auf eventuell erhaltene Mineralreaktionen oder den Chemismus von Mineralen, der sich manchmal z. B. anhand ihrer Farbe grob bestimmen lässt. Die unglaubliche Vielfalt der möglichen Erscheinungsformen im Dünnschliff sei hier einfach nur anhand einiger Beispiele illustriert (Abb. 1a–d)

Nun, Dünnschliffe wurden auch vor 100 Jahren schon untersucht, damit haben wir das Feld der modernen Petrologie noch nicht betreten, auch wenn die Mikroskopie von Gesteinsdünnschliffen (oder auch polierter Anschliffe im Fall von opaken Erzmineralen) immer noch das Fundament für jede weitere Arbeit bildet! Ein wesentlicher Schritt der Erneuerung war die Einführung der Elektronenmikroskopie und der damit verbundenen Möglichkeiten einer hochauflösenden Abbildung und der quantitativen chemischen Analytik im Mikrometerbereich durch die Auswertung der durch das Elektronenbombardement angeregten, für jedes chemische Element charakteristischen Röntgenstrahlung (Elektronenstrahl-Mikrosonde). Abb. 2a etwa zeigt eine komplexe Verwachsung verschiedener Ti-haltiger Minerale, die Hinweise auf mindestens vier unterschiedliche Entwicklungsstadien des Gesteines geben. In Abb. 2b erkennt man ein von Diopsid (weiß)

ummanteltes Olivinkorn, beide eingeschlossen in Dolomit, der seinerseits in einer Calcit-Matrix schwimmt – ein Hinweis auf den Ablauf der Reaktion:

$$\underset{\text{Olivin}}{2\ Mg_2SiO_4} + \underset{\text{Calcit}}{4\ CaCO_3} + 2\ CO_2 = \underset{\text{Diopsid}}{CaMgSi_2O_6} + \underset{\text{Dolomit}}{3\ CaMg(CO_3)_2}$$

Die feinen Dolomit-Entmischungen in der Calcit-Matrix sind Zeichen eines späten Abkühlungsstadiums. Abb. 2c schließlich ist ein Falschfarbenbild eines Klinopyroxenkristalls (gelb bis rot) in einer Matrix von Amphibol (grün) und Na-reichem Plagioklas (Blautöne), bei dem nur die Intensität einer charakteristischen Wellenlänge von Ca ausgewertet wurde (die wärmeren Farbtöne im Spektrum bedeuten höherer Ca-Gehalte). Auf diese Weise kann der chemische Zonarbau des Pyroxens gut wiedergegeben werden.

Tabelle 1 enthält eine Reihe von Mikrosondenanalysen von Mineralen, die in einem Marmor gefunden wurden. Solche Analysen und die daraus gerechneten Mineralformeln (unterer Block in Tab. 1) sind natürlich für den Eingeweihten nicht nur eine Reihe von Zahlen, denn die Zuordnung der Elemente zu einer Mineralstruktur (auf die jeweiligen Gitterplätze) und das Ausmaß der Substitution (gegenseitigen Ersetzung) kristallchemisch ähnlicher Elemente (ähnliche Größe, gleiche oder nur gering abweichende Ladung) erzählen dem Petrologen bereits Bände über die Bildungsbedingungen, die sich im weiteren Verlauf durch die Anwendung von Berechnungsmethoden quantifizieren lassen. Um dies zu verstehen, müssen wir uns ein wenig mit Grundlagen befassen:

Tab. 1: Mikrosondenanalysen von Silikaten und Oxiden aus einem Calcit-Dolomit-Marmor.
Microprobe analyses of silicate and oxide minerals from a calcite-dolomite marble.

| | **ol** | **cpx1** | **cpx2** | **phl** | **amph** | **chu** | **Ti-chu** | **chl** | **srp** | **spl** | **gkl** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $SiO_2$ | 42,53 | 54,64 | 55,54 | 41,83 | 45,02 | 38,23 | 38,15 | 30,98 | 42,88 | b.d. | b.d. |
| $TiO_2$ | b.d. | 0,27 | 0,15 | 0,20 | 0,62 | 0,58 | 3,99 | b.d. | b.d. | b.d. | 64,13 |
| $Al_2O_3$ | b.d. | 1,31 | 0,55 | 15,05 | 14,33 | b.d. | b.d. | 20,30 | b.d. | 69,27 | b.d. |
| $FeO^t$ | 3,49 | 0,39 | 0,41 | 0,79 | 1,01 | 2,51 | 1,71 | 1,10 | 3,04 | 3,14 | 8,94 |
| MnO | 0,05 | 0,03 | b.d. | 0,04 | 0,10 | 0,02 | b.d. | 0,09 | b.d. | b.d. | 0,06 |
| MgO | 55,28 | 18,19 | 18,87 | 27,13 | 20,43 | 56,21 | 54,94 | 32,81 | 41,57 | 27,33 | 27,27 |
| CaO | 0,08 | 24,70 | 24,69 | 0,13 | 12,98 | 0,18 | 0,09 | 0,05 | b.d. | b.d. | 0,01 |
| $Na_2O$ | b.d. | 0,09 | 0,08 | 0,43 | 2,88 | b.d. | b.d. | b.d. | b.d. | b.d. | b.d. |
| $K_2O$ | b.d. | b.d. | 0,02 | 10,24 | 1,14 | 0,03 | b.d. | 0,04 | b.d. | b.d. | b.d. |
| F | b.d. | b.d. | b.d. | 1,75 | 0,98 | 3,23 | b.d. | 0,31 | b.d. | b.d. | b.d. |
| F=O | 0,00 | 0,00 | 0,00 | –0,73 | –0,41 | –1,36 | 0,00 | –0,13 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| **Total** | **101,43** | **99,62** | **100,30** | **96,84** | **99,07** | **99,63** | **98,88** | **85,54** | **87,50** | **99,74** | **100,49** |
| Si | 1,00 | 1,98 | 1,99 | 2,90 | 6,26 | 3,98 | 3,98 | 2,93 | 7,99 | 0,00 | 0,00 |
| Ti | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,07 | 0,05 | 0,31 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 |
| Al | 0,00 | 0,06 | 0,02 | 1,23 | 2,35 | 0,00 | 0,00 | 2,27 | 0,00 | 1,97 | 0,00 |
| Fe | 0,07 | 0,01 | 0,01 | 0,05 | 0,12 | 0,22 | 0,15 | 0,09 | 0,47 | 0,06 | 0,16 |
| Mn | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Mg | 1,93 | 0,98 | 1,01 | 2,80 | 4,24 | 8,73 | 8,55 | 4,63 | 11,55 | 0,98 | 0,84 |
| Ca | 0,00 | 0,96 | 0,95 | 0,01 | 1,93 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Na | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,06 | 0,78 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| K | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,91 | 0,20 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| F | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,38 | 0,43 | 1,06 | 0,00 | 0,09 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| **Σ Kat** | **3,00** | **3,99** | **4,00** | **7,96** | **15,95** | **13,00** | **13,00** | **9,94** | **20,01** | **3,01** | **2,00** |

b.d. = unter der Nachweisgrenze, $FeO^t$ = alles Eisen als zweiwertig angenommen, Kat = Kationen, Abkürzungen der Mineralnamen: ol = Olivin, cpx = Klinopyroxen, phl = Phlogopit, amph = Amphibol, chu = Klinohumit, Ti-chu = Titano-Klinohumit, chl = Chlorit, srp = Serpentin, spl = Spinell, gkl = Geikielith

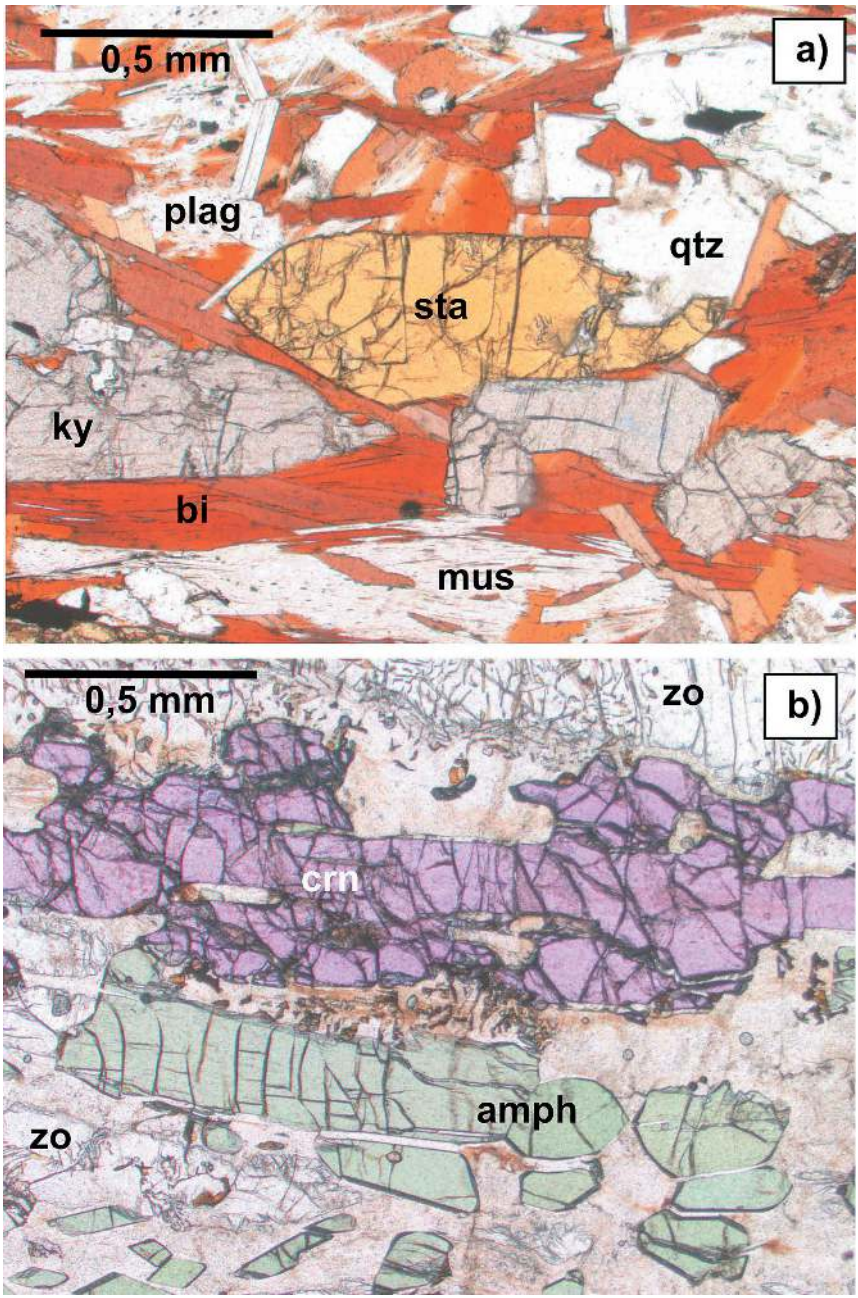


Abb. 1: Mit dem Polarisationsmikroskop gemachte Dünnschliff-Aufnahmen: a) Staurolith (sta), Kyanit (ky) und Biotit (bi) in einer farblosen Matrix von Hellglimmer (mus), Quarz (qtz) und Plagioklas (plag); b) rötlicher Rubin (crn), grüner Amphibole (amph), weißer Zoisit (zo) und feinkörniger brauner Cr-Spinell in einer sehr feinkörnigen mattweißen Matrix (zumeist Margarit); Longido, Tansania; Polarised light microphotographs of a) staurolite (sta), kyanite (ky) and biotite (bi) in a colorless matrix of muscovite (mus), quartz (qtz) and plagioclase (plag); b) pink ruby (crn), green amphibole (amph), white zoisite (zo) and fine-grained brown Cr-spinel in a very fine-grained whitish matrix of mainly margarite; Longido, Tanzania;

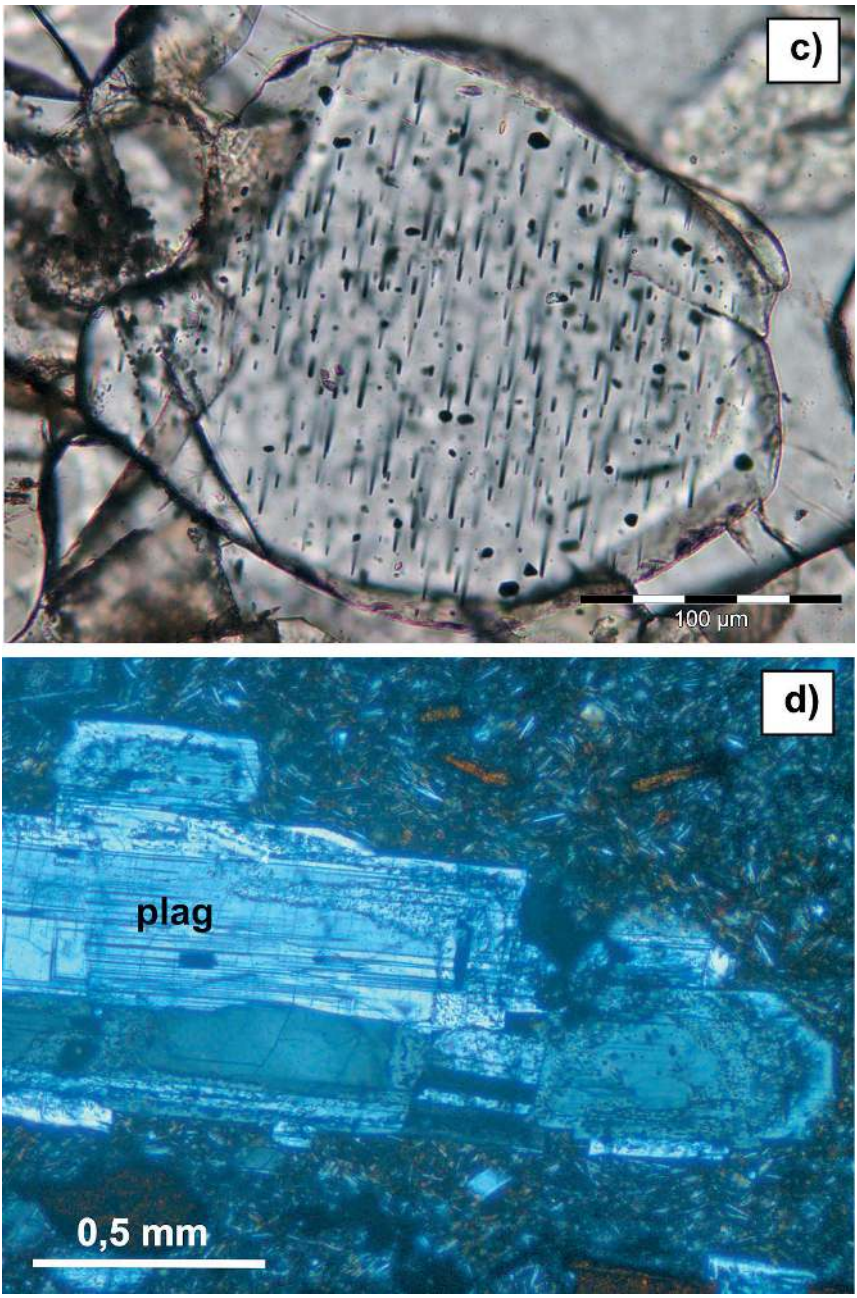


Abb. 1: c) Apatitkristall mit orientierten nadeligen Einschlüssen von Magnetkies (Granulit, Rhodopengebirge); d) zonar gebauter Plagioklaskristall in der feinkörnig entglasten Matrix eines Basaltes (Oststeiermark); Aufnahme mit gekreuzen Polarisatoren.
c) apatite crystal with oriented acicular inclusions of pyrrhotite (from a granulite, Rhodope); d) zoned plagioclase crystal in a fine-grained devitrified matrix of a basalt (Eastern Styria), crossed polarisers.

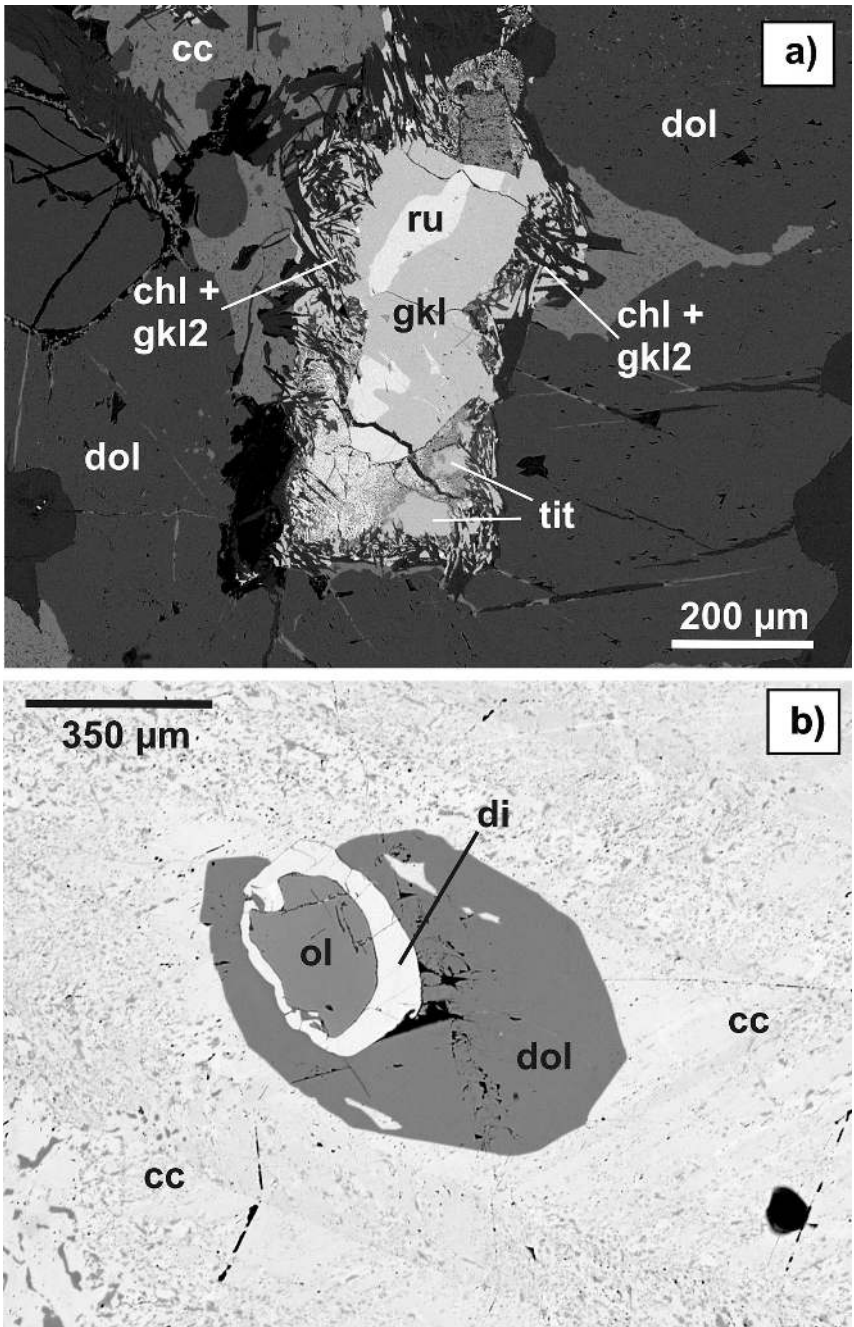


Abb. 2: Rückstreuelektronen-Bilder von: a) komplexer Verwachsung von Rutil (ru), Geikielith (2 Generationen: gkl1, gkl2) und Titanit (tit) mit Chlorit (chl) in einer Matrix aus Dolomit (dol) und Calcit (cc) (Rhodopengebirge); b) Silikatminerale in Marmor;
Backscattered electron images of a) complex intergrowth of rutil (ru), geikielite (2 generations: gkl1, gkl2) and titanite (tit) with chlorite (chl) in a matrix of dolomite (dol) and calcite (cc) (Rhodope); b) silicate minerals in marble;

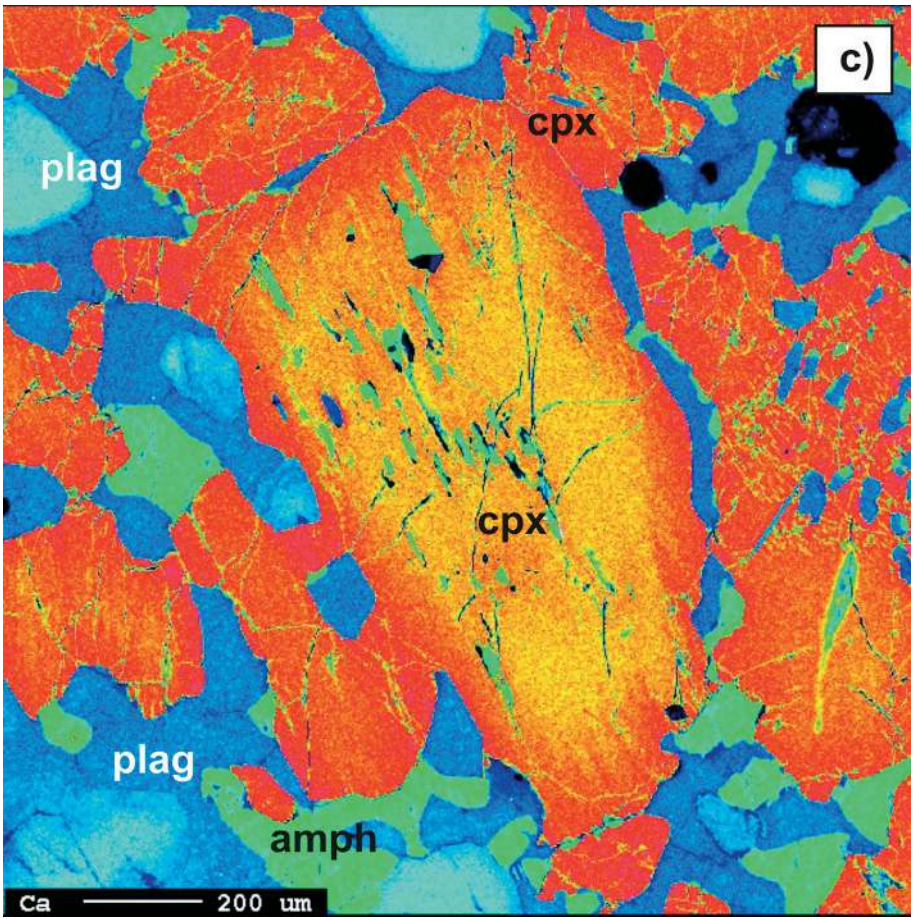


Abb. 2: c) Verteilung von Ca zwischen Klinopyroxen (cpx), Plagioklas (plag) und Amphibol (amph) in einem Granulit aus den Rhodopen.
c) distribution map for Ca: clinopyroxene (cpx), plagioclase (plag) and amphibole (amph) in a granulite from Rhodope.

## 3. Thermodynamik und Kinetik

…sind wundervoll esoterisch und kompliziert klingende Fachausdrücke, die im Wesentlichen auch nur genau diesen Zweck erfüllen: Die nicht Eingeweihten vor Ehrfurcht und Respekt erschauern zu lassen. Demjenigen, der die anfängliche Scheu überwindet und sich auf die Thematik einlässt, wird rasch klar, dass es hier eigentlich um zwei sehr einfache und elementare Dinge geht, und die eigentliche Kunst nur darin besteht, einzuschätzen, in wie weit man beide Gebiete auf die konkreten geologischen Situationen anwenden darf: Hier besteht Ermessensspielraum und hier sind gesunder Menschenverstand und Erfahrung essenziell – ein wunderbarer Grund für heiße Diskussionen unter Kollegen – die einander entweder das Eine oder das Andere absprechen… aber zuerst: worum geht's überhaupt?

Nüchtern betrachtet, wird Materie von Energie durchflossen und kann diese in größerem oder geringerem Ausmaß speichern. Wenn ein Sediment durch zunehmende Auflast oder durch tektonische Kräfte in die Tiefe versenkt wird, oder wenn ein magmatisches

Gestein durch die Erdkruste aufsteigt, dann ändern sich der Druck und die Temperatur: Das Sediment wird langsam aufgeheizt und komprimiert, das Magma kühlt ab und expandiert, Energie fließt in Form von Wärme oder Arbeit, und der Energieinhalt, die *Innere Energie*, des Gesteins selbst ändert sich. Wenn die derart gespeicherte Energie relativ spontan frei wird, wie bei Erdbeben oder Vulkanausbrüchen, ist dies sehr augenfällig, aber die meisten Vorgänge im Erdinneren laufen weitaus langsamer und unauffälliger ab, die energetische Angleichung erfolgt harmonischer. Wenn man aus Labormessungen weiß, wie sich das Volumen und die spezifische Wärmeaufnahmefähigkeit (Wärmekapazität) von Mineralen in Abhängigkeit von Druck und Temperatur ändern, kann man vorhersagen, wie sie sich unter bestimmten Bedingungen entwickeln werden, bzw. wann sie nicht mehr „stabil" sind und entweder die Struktur ändern (Beispiel: Graphit zu Diamant) oder mit anderen Mineralen reagiert, um neue Verbindungen zu bilden. Die dazugehörige Energiebilanz-Rechnung ist *Thermodynamik*. Sie sagt uns, was im Idealfall passiert, wenn Gleichgewicht erreicht wird, das heißt, wenn das betrachtete Gestein genügend Zeit hatte, um den Zustand der niedrigsten Freien Energie, also den stabilsten Zustand zu erreichen. Zeit wird in dieser Rechnung nicht berücksichtigt. In Fällen, wo die Zeit durchaus eine wichtige Rolle spielt, liefert das Gebiet der *Kinetik* einige Gleichungen, mit denen man (zusätzliche!) Informationen über zeitliche Abläufe aus einem Gestein gewinnen kann. Dies ist aber nur möglich, wenn in einem bestimmten Bereich des Gesteins kein Gleichgewicht erreicht wurde, d. h. Ungleichgewicht „eingefroren" vorliegt. Dazu noch mehr weiter unten. An dieser Stelle sein nur noch etwas sehr Elementares angemerkt: Die meisten Gesteine, die man an der Erdoberfläche antrifft, sind *nicht* im Gleichgewicht in Bezug auf Oberflächendruck und -temperatur: die magmatischen und metamorphen Gesteine sowieso nicht, und auch sehr viele Sedimente nicht. Der Hauptgrund dafür ist die (für Gesteine) niedrige Temperatur an der Erdoberfläche. Die Reaktionsgeschwindigkeit in einem Gestein ist unter diesen Bedingungen zumeist fast unendlich langsam. Ein weiterer Grund ist das Fehlen bzw, die geringe Effizienz eines Reaktions- bzw. Transportmediums: Gesteine, die intensiv von Wasser durchflossen werden, wandeln sich rascher um als andere – Verwitterung und Bodenbildung etwa sind in den Tropen viel ausgeprägter als in Trockengebieten. Seine eigentliche enorme Bedeutung für die Reaktionsgeschwindigkeit und die Einstellung von Gleichgewicht in Gesteinen hat „Wasser" aber innerhalb der Erdkruste selbst, wo es unter erhöhten Temperaturen als Fluid vorliegt.

## 4. Fluid

Bis zum so genannten kritischen Punkt können eine Flüssigkeit und ihre entsprechende Dampfphase, z. B. Wasser und Wasserdampf, nebeneinander koexistieren. Oberhalb des kritischen Punktes ist der Übergang zwischen Flüssigkeit und Gas kontinuierlich, die beiden sind nicht mehr unterscheidbar und die Substanz wir daher als Fluid bezeichnet. Für reines Wasser liegt der kritische Punkt bei 374 °C und 220 bar. Bei einem normalen geothermischen Gradienten (Temperaturzunahme mit der Tiefe) wird dieser Zustand spätestens in 10 km Tiefe erreicht. Da die Erdkruste im Durchschnitt 30 km mächtig ist und unter Gebirgen bis zu 100 km erreichen kann, ist $H_2O$ mit den darin gelösten Stoffen meistens höheren Temperaturen und Drücken ausgesetzt und liegt daher als Fluid vor. In den oberflächennaheren Regionen ist es zumeist flüssig (Mineralwasser!), und auch hier erkennen wir seine Kraft, Gesteinsbestandteile zu lösen, noch am hohen Ionengehalt.

Sämtliches an der Erdoberfläche existierende $H_2O$ stammt ursprünglich aus dem Erdinneren, d. h. ist durch Entgasung der Erde entstanden, und kommt auch bis heute von dort. Das meiste Wasser bzw. Fluid, in der Erdkruste ist jedoch bereits (mehrfach) rezykliert. Es gelangt nicht nur als Grundwasser, sondern vor allem durch geologische

Prozesse wieder in die Tiefe: einerseits als Porenwasser in den relativ locker gepackten Sedimenten, andererseits im Kristallgitter von Mineralen selbst gebunden (z. B. Tonminerale). In Mineralen gebundenes Wasser (als $H_2O$ oder als $OH^-$) hat die Tendenz, mit steigender Temperatur erneut zu entweichen und Teil des Fluids im Porenraum zu werden. Fluid wird also in einem Sediment, das zunehmend stärker metamorph wird, laufend durch *Entwässerungsreaktionen* in den Porenraum nachgeliefert, wo es das Transportvehikel und Katalysemittel für sämtliche Mineralreaktionen bildet, mit denen sich der Charakter des Gesteins ändert: Die Korngröße, die Mineralart und der Mineralchemismus haben die Chance, sich fortwährend an die wechselnden Umgebungsbedingungen (Druck, Temperatur) anzugleichen. Da Fluid an sich sehr beweglich und flüchtig ist, verschwindet es (im Gegensatz zu den ortsfesten Mineralen!) aber auch langsam durch Diffusion über den Porenraum nach oben. Sobald ein Gestein also seine Fähigkeit verliert, $H_2O$ (oder in anderen Fällen das ebenfalls volatile $CO_2$) zu produzieren – entweder weil die Minerale bereits alle ihr $H_2O$ freigesetzt haben, oder weil die Temperatur wieder sinkt, wenn das Gesteinspaket tektonisch nach oben verfrachtet wird oder langsam in der Tiefe abkühlt (z. B. kristallisierter Magmakörper) – verliert es auch sehr stark seine Fähigkeit, umzukristallisieren, d. h. seinen Mineralbestand weiterhin den sich verändernden (sinkenden) Bedingungen von Druck und Temperatur anzugleichen. Die Minerale und das Gefüge des letzten aktiven Stadiums der Umkristallisation werden „eingefroren", und wenn es nicht irgendwann später zu einer erneuten Zufuhr von Fluid von außen kommt, dann bleibt das Gestein genau in diesem Zustand erhalten – zum großen Glück aller Petrologen, Kletterer und Dekorsteinliebhaber, wenn es dann eines Tages durch Erosion und tektonische Prozesse an die Erdoberfläche gelangt, wo wir es als solches finden und untersuchen können.

Sobald ein Gestein einmal „eingefroren" ist, kann es ausgesprochen lange in der Tiefe verbleiben, ohne sich zu verändern. Man kann einem Gestein daher nicht ansehen, wie alt es ist. Man kann ihm höchstens ansehen, wie lange es schon (nahe) an der Oberfläche liegt und der Verwitterung, d. h. einem gewissen Grad an erneuter Kinetik und Veränderung ausgesetzt ist.

Worauf wollen wir hier hinaus? Auf zweierlei. Erstens: Theoretisch sollte ein Gestein, solange ein gewisses Maß an Kinetik, d. h. Rekristallisation unter Anwesenheit eines Fluids (oder einer Schmelze) möglich ist, aus genau diesem Grund seine Vorgeschichte eigentlich vollständig auslöschen und überschreiben, und die einzige Aufzeichnung, das es bewahrt, sollte die des letzten Momentes des Einfrierens sein. Das ist ausgesprochen wenig Information über seine Geschichte, die wir da rekonstruieren könnten, und oft ist es auch so, aber nicht immer. Denn zweitens, in der Praxis, gibt es oft Bereiche in einem Gestein, in dem der Löschvorgang unvollständig ist, Bereiche, die dem Wirken des Porenfluids schon früher entzogen wurden: Das Innere von Kristallen. Das Wachstum von Kristallen und – wichtiger noch – deren Auflösung erfolgen hauptsächlich dort, wo das Porenfluid wirken kann, also vor allem an den Rändern, den Korngrenzen. In geringerem Ausmaß pflanzt sich Korrosion entlang von Rissen und Gitterfehlstellen ins Kristallinnere fort. Nur die stark temperaturabhängige (und erst über 600 °C annähernd relevante) Diffusion im Festkörper selbst ist noch ein weiteres Transportvehikel, um Gitterbausteine von und zu den Korngrenzen zu transportieren. Die Geschwindigkeit dieser Diffusion hängt außerdem von der Art des Ions und der Gitterstruktur ab. $Fe^{2+}$ und $Mg^{2+}$ etwa diffundieren wesentlich rascher durch das Gitter von Biotit als durch das von Granat. Das hat zur Folge, dass Biotit nur selten einen chemischen Zonarbau aufweist, weil er sich über seinen ganzen Korndurchmesser hinweg auf die aktuellen Druck- und Temperaturbedingungen einstellen kann. Granat hingegen kann im Kern noch lange das „chemische Gedächtnis" seines ersten Wachstums tragen. Nur an seinem äußersten Rand spiegelt er jeweils die aktuellen Bedingungen wider (solange ein Porenfluid vorhanden ist). Dieser chemische

Abdruck gelangt beim weiteren Wachstum ins Innere des Mineralkornes und zeichnet so in Form eines chemischen Zonarbaues die stetig wechselnden Bedingungen auf. Solche Zonarbaue sind also eine Art von chemischem Ungleichgewicht, die eine „Erinnerung" an einen größeren Teil der Entwicklungsgeschichte eines Gesteins darstellt. Eine andere Erinnerung sind Einschlüsse von Mineralen oder sogar von kleinen Fluidtröpfchen selbst in einem überwachsenden Wirtsmineral. Einschlusse, die vielleicht unter den gegebenen Druck- und Temperaturbedingungen in der *Matrix*, d. h. im Kontakt mit dem fluidbenetzten Porenraum, gar nicht mehr stabil sind oder bereits einen anderen Chemismus hätten, und nur vom Fluid geschützt, vollständig eingewachsen und umschlossen von einem Wirtsmineral überdauern, und somit auch ein Stück aufgezeichnete Vergangenheit darstellen, weil Gleichgewicht sich nicht völlig durchdringend einstellen konnte. Und so besteht die Arbeit des Petrologen in einem Erkennen von Ungleichgewicht aufgrund einer Kenntnis von Gleichgewicht, und dem Lesen und Entschlüsseln von beidem, d. h. dem Ablesen von fossil erhaltenen Druck- und Temperaturbedingungen auf dem Entwicklungspfad eines Gesteins. Und diese Werte von Druck und Temperatur erlauben dann weitere Schlüsse auf den Bewegungspfad des Gesteins, z. B. während einer Gebirgsbildungsepoche. Aus vielen solchen Bewegungspfaden ergibt sich die geodynamische Entwicklung größerer Räume oder Gebirge.

## 5. Auswertung

Wie in anderen Naturwissenschaften auch, war die Theorie der konkreten Umsetzung immer weit voraus. Thermodynamik ist eine schon relativ alte Disziplin, aber es hat lange gedauert, bis eine genügende Anzahl von Materialparametern experimentell bestimmt waren, um zumindest die wichtigsten Gesteinstypen in zweiter Näherung genau behandeln zu können. Es hat hier wenig Sinn, näher auf Dinge einzugehen, für die man viele, viele Stunden investieren muss, um sie Fachstudenten näher zu bringen. Machen wir einfach einen großen Sprung und sehen wir uns eine Art von Diagrammen an, mit deren Hilfe sich sehr viel über Gesteine und ihre Entwicklungsgeschichte aussagen lässt, und die aufgrund einer ausreichenden Fülle von Messdaten und einer ausreichenden Kenntnis des mineralchemischen Verhaltens heute möglich sind: sogenannte *fixed composition diagrams* oder *pseudosections*. Die Gibbs-Duhem-Regel aus der Thermodynamik sagt aus, dass, wenn man die chemische Zusammensetzung eines Systems (Gesteins) kennt, man für beliebige Umgebungsbedingungen (Druck und Temperatur) sämtliche Eigenschaften des Systems ausrechnen kann. Praktisch heißt das: Für jeden von mir gewählten (gemessenen) Gesteinschemismus kann ich ausrechnen, welche Minerale in welcher Menge und mit welcher chemischen Zusammensetzung bei von mir vorgegebenen Drücken und Temperaturen stabil sind, d. h. ich kann sagen, welches „Gesicht" eine bestimmte Probe irgendwo im Erdinneren annimmt beziehungsweise eventuell einmal gehabt hat – Gleichgewichtseinstellung immer vorausgesetzt.

Sehen wir uns anhand von konkreten Beispielen an, wie uns das hilft, Messdaten zu interpretieren und mehr über die Entwicklungsgeschichte eines Gesteins zu erfahren:

Abbildung 3 ist ein Druck-Temperatur-Diagramm für eine Glimmerschieferprobe. Man erkennt verschiedene Felder in unterschiedlicher Grautönung. In jedem Feld ist eine andere Mineralvergesellschaftung (*Paragenese*) stabil, je weniger Minerale das sind, umso dunkler die Grautönung. Die Mineralnamen selbst sind aus Platzgründen abgekürzt (and = Andalusit, chl = Chlorit, cz = Klinozoisit, g = Granat, gln = Glaukophan, ky = Kyanit, pa = Paragonit, pl = Plagioklas, st = Staurolith); in allen Feldern sind zusätzlich Muskovit, Quarz und (wässriges) Fluid stabil. In jedem dieser Felder variieren Menge und Chemismus der vorhandenen Phasen (Minerale und Fluid) systematisch und kontinuierlich. Jede Feldergrenze bedeutet das Erscheinen bzw. Verschwinden einer Phase. In der

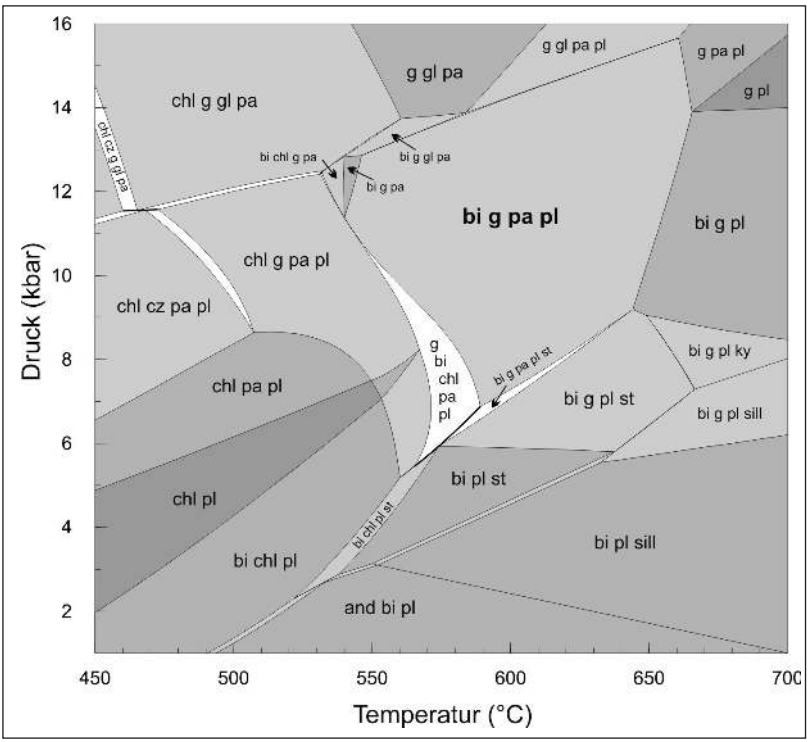


Abb. 3: Pseudoschnitt für einen Glimmerschiefer (Schneebergerzug, Südtirol). Abkürzungen: and = Andalusit, chl = Chlorit, cz = Klinozoisit, g = Granat, gl = Glaukophan, ky = Kyanit, pa = Paragonit, pl = Plagioklas, st = Staurolith.
Pseudoscetion for a micaschist (Schneebergerzug, Südtirol). Abbreviations: and = andalusite, chl = chlorite, cz = clinozoisite, g = garnet, gl = glaukophane, ky = kyanite, pa = paragonite, pl = plagioclase, st = staurolite.

Arbeit, aus der diese Abbildung stammt (Proyer 2003a) ging es darum, den Bildungsbereich eines Glimmerschiefers mit der Paragenese Granat + Biotit + Muskovit + Quartz + Paragonit + Plagioklas genauer zu bestimmen. Das entsprechende Paragenesefeld ist in Abb. 3 fett beschriftet und in Abb. 4 separat herausgehoben. Abb. 4a zeigt, wie sich die Größe dieses Feldes verändern würde, wenn das Gestein etwas mehr Calcium enthielte. Leichte Änderungen in der Gesamtgesteinschemie sind zumeist die Erklärung dafür, warum in ganz ähnlich aussehenden, im Gelände nebeneinander liegenden Gesteinen einzelne Minerale vorkommen oder auch fehlen können. Abb. 4b zeigt, wie man mit weiteren Informationen die Bildungsbedingungen noch besser bestimmen kann. Da sich nach den Gesetzen der Thermodynamik für einen bekannten Gesamtchemismus alle Eigenschaften ausrechen lassen, kann man zum Beispiel sogenannte *Isoplethen* rechnen, das sind Linien gleicher Menge oder gleicher Zusammensetzung einer Phase. Dies wurde in Abb. 4b gemacht, und zwar sind Isoplethen für die Menge von Granat (z. B.: g 20 = Linie für 20 Mol% Granat im Gestein) sowie für den Kalziumgehalt im Granat (Menge des Endglieds Grossular, etwa gro 0,10 = 10 Mol% Grossular im Granat) und für den Aluminiumgehalt im K-Hellglimmer (mus 0,85 = 85 % Muskovit-Endglied) dargestellt. Hat man Messdaten aus der Mikrosonde. Lässt sich damit der Bildungsbereich ziemlich genau einschränken.

Eine weitere sehr wichtige Isoplethe ist die für $H_2O$ (Proyer 2003b), in Abb. 5 ausgedrückt als die Menge an $H_2O$, die noch in den Mineralen strukturell gebunden vorliegt

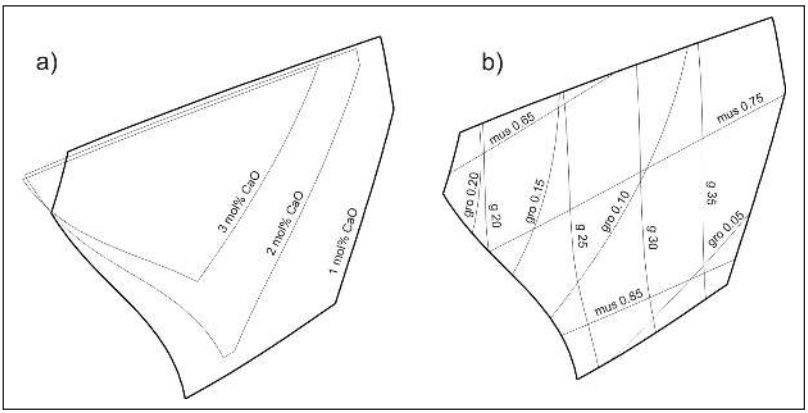


Abb. 4: Darstellung eines Feldes aus Abb. 3 für: a) variablen Ca-Gehalt und b) mit Isoplethen für Granatmenge und sowie Grossulargehalt in Granat und Muskovit-Endgliedanteil in K-Hellglimmer. Detail of one field in Fig. 3 for: a) variable Ca-content and b) with isopleths fort he amount of garnet, grossular content in garnet and muscovite endmember in potassium white mica.

(willkürlich skaliert von 100 abwärts; 100 entspricht 16,04 Mol% $H_2O$ im Gesamtgestein, welche links oben im Diagramm fast vollständig in Mineralstrukturen gebunden sind). Dies gibt ein direktes Bild des „Entwässerungsgrades" eines Gesteins und lässt Rückschlüsse zu, an welchem Punkt entlang eines *Metamorphosepfades*, d. h. entlang jener Entwicklungslinie von Druck- und Temperaturveränderungen, die ein Gestein im Zuge eines großen geologischen Geschehnisses, wie etwa einer Gebirgsbildung durchmacht, der „trockenste" Zustand erreicht wurde, d. h. jener Zustand, der das „Einfrieren" der Paragenese bedeutet. Dies ist in Abb. 5 exemplarisch für drei verschiedene Metamorphoseverläufe dargestellt. Man erkennt, dass ein typischer kühler Hochdruckpfad (A) sehr gut vom Gestein dokumentiert wird, weil sein trockenster Punkt nahe dem Druck- und Temperaturhöhepunkt liegt. Ein druckbetonter Metamorphosepfad (B), der zu höheren Temperaturen führt, wird von Glimmerschiefern schlechter aufgezeichnet, weil der trockenste Punkt zwar nahe dem Temperaturmaximum, aber bei deutlich niedrigeren als den Maximaldrücken liegt. Er kann damit sehr ähnliche oder gleiche Gesteine erzeugen, wie ein normaler Mitteldruck-Pfad der Regionalmetamorphose (C), der ebenfalls selten die Spitzendrücke aufzeichnet.

Solche Darstellungen der Fähigkeit eines Gesteines, wichtige Teile seines Metamorphosepfades aufzuzeichnen bzw. eben nicht aufzeichnen zu können, lassen sich für die verschiedensten Gesteinstypen anfertigen und erlauben es dem Petrologen dann, im Gelände gezielt Gesteine auszuwählen, welche am aussichtsreichsten dafür sind, die gewünschten Informationen zu enthalten. Diagramme dieser Art haben auch einen langen Streit unter Geowissenschaftern darüber beendet, ob Eklogite (typische Hochdruckgesteine, wie man sie z. B. auf der Kor- und Saualpe findet), die gleiche Metamorphosegeschichte hinter sich haben, wie die sie umgebenden Glimmerschiefer und Gneise, die keinerlei Hinweise auf eine solche Entwicklung enthalten, oder ob sie exotische Fremdlinge sind, die ihren heutigen Platz erst geologisch sehr spät eingenommen haben. Heute weiß man, dass Eklogite typischerweise so aufzeichnen, wie Pfad (A) in Abb. 5, und Metapelite (Glimmerschiefer, Paragneise) eher wie Pfad (B). Die beiden können also durchaus das Gleiche hinter sich haben, „erinnern" sich aber (nur) an unterschiedliche Abschnitte dieser Strecke. Diese Verschiedenheit ist durchaus nicht unwillkommen, versetzt es den Petrologen doch in die Lage, aus eng benachbarten unterschiedlichen Gesteinen, die die gleiche Entwicklung durchgemacht haben sollten, unterschiedliche Punkte auf dem sogenannten *P-T*-Pfad zu

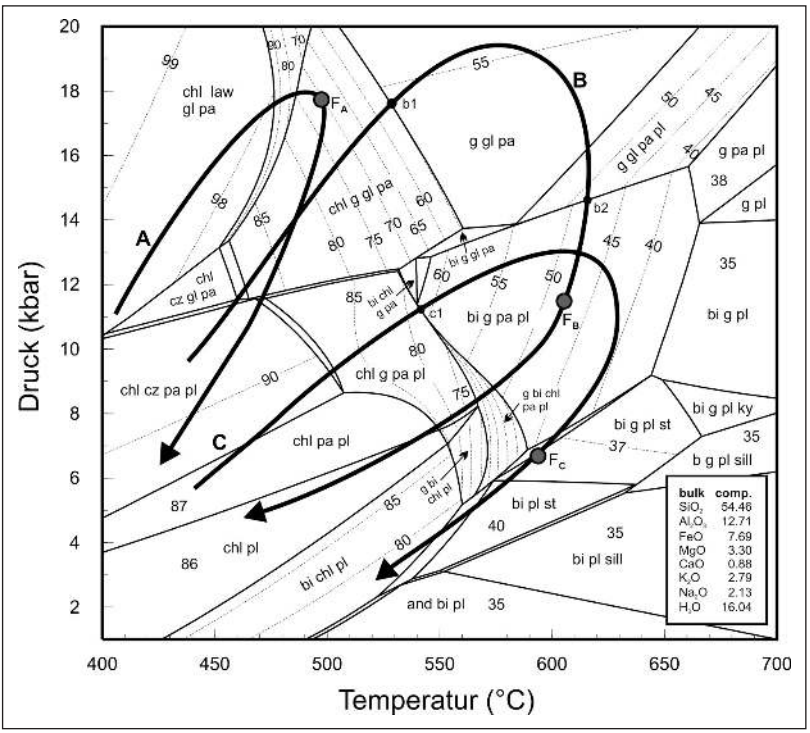


Abb. 5: Ähnlich Abb. 3, aber konturiert mit Isoplethen für strukturell gebundenes $H_2O$; weiters dargestellt: drei Arten von Metamorphosepfaden mit dem jeweiligen Punkt, an dem das Gestein „eingefroren" wird (Erhaltungsparagenese): $F_A$, $F_B$, $F_C$.
Similar to Fig. 3, but contoured with isopleths for $H_2O$ content in solid phases; three types of P-T paths are shown, each one with the point of „freeze in" of the preserved assemblage: $F_A$, $F_B$, $F_C$.

ermitteln, und somit dem Pfad als solchem erst Gestalt zu verleihen. So zeigt die Abb. 6 aus Baziotis & al. (2009) den Pseudoschnitt für einen Blauschiefer, für den anhand diverser Beobachtungen unterschiedliche Punkte für den *P-T*-Pfad festgemacht werden konnten. Die Punkte C und F im Besonderen stehen jedoch für die Hauptmetamorphose im Blauschiefer (C) und im gleich benachbarten Grünschiefer (F).

Damit ist aber das Potenzial von Pseudoschnitten nicht einmal annähernd ausgereizt. Wenn man in der Lage ist, aus anderen Informationen heraus den Druck oder die Temperatur bereits zu bestimmen bzw. wenn man ein bestimmtes Verhältnis von Druck zu Temperatur voraussetzen darf (geothermischer Gradient), bekommt man eine Achse des Diagramms zur Verfügung, um eine (interessante) Abhängigkeit von einer anderen Größe darzustellen. Man kann auf dieser Achse einen bestimmten Faktor in der Gesteinschemie variieren lassen, z. B. Na/(Na + Ca), oder sich die Variation zwischen zwei verschiedenen Chemismen ansehen, z. B. zwischen dem Gestein in seinem festen Zustand und einer sich darin bildenden Schmelze, um zu sehen, wie sich ein Gestein entwickelt, wenn man die sich bildende Schmelze abzieht, um sie anderswo intrudieren zu lassen (Schmelzextraktionsdiagramme). Die gesamte Unterkruste der Erde besteht aus Granuliten – Gesteinen, von denen man aus verschiedensten Gründen annimmt, dass sie Restite sind, also ehemalige Glimmerschiefer, Gneise, Amphibolite usw., die so tief versenkt wurden, dass die Hitze des Erdmantels zu einer Teilschmelzbildung und Schmelzextraktion geführt hat. Mit thermodynamischer Modellierung anhand von Pseudoschnitten kann man solchen geologischen

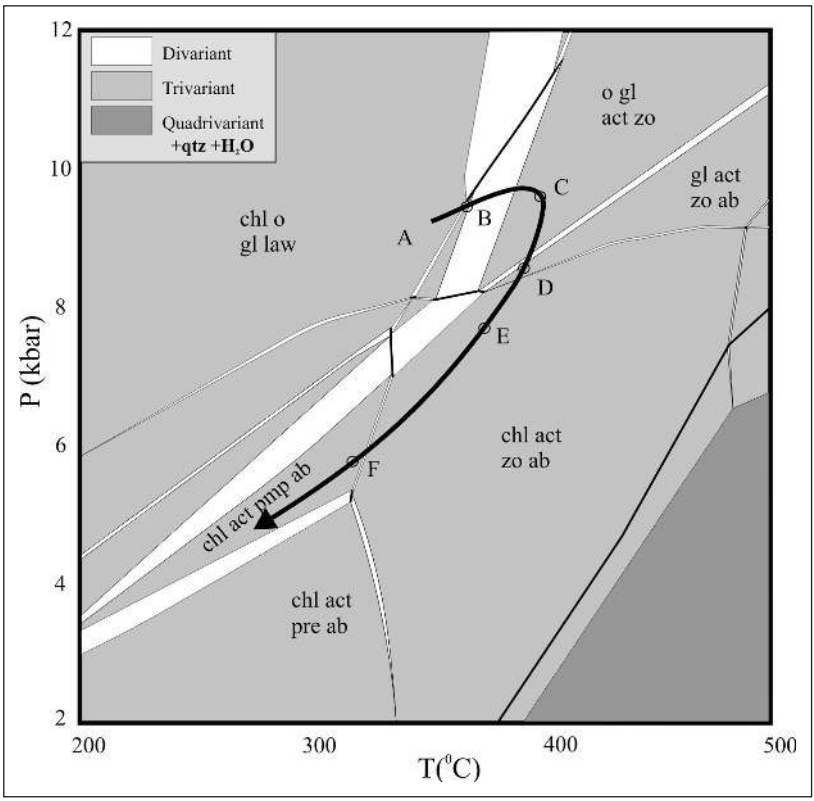


Abb. 6: Pseudoschnitt für einen Blauschiefer (Lavrion, Griechenland) mit bestimmtem Metamorphosepfad. Neue Abkürzungen: ab = Albit, act = Aktinolith, law = Lawsonit, o = Omphazit, pmp = Pumpellyit, pre = Prehnit.
Pseudoscetion for a blueschist from Lavrion (Greece) with determined *P-T* path. New abbreviations: ab = albite, act = actinolite, law = lawsonite, o = omphacite, pmp = pumpellyite, pre = prehnite.

Konzepten quantitativ auf den Grund gehen. Wir wollen hier einen ganz anderen Aspekt von Gesteinen darstellen, der analytisch oft schwierig zu fassen ist, nämlich der Oxidationsgrad, der sich fast immer in unterschiedlichen Verhältnissen von $Fe^{2+}/Fe^{3+}$ ausdrückt. Die Menge an dreiwertigen Eisen ist mikroanalytisch (Mikrosonde) nicht bestimmbar und wird daher meist nur auf der Basis von mineralchemischen Grundkenntnissen bei der Mineralformelberechnung theoretisch ermittelt. $Fe^{3+}$ kann aber einen sehr starken Einfluss auf die Stabilität von Mineralen haben. Abbildung 7 ist aus einer noch unveröffentlichten Arbeit der Zweitautorin (E. B.), in der bei einer bekannten Temperatur der Sauerstoffgehalt der Probe (und damit das Verhältnis $Fe^{2+}/Fe^{3+}$) variiert wird, um zu sehen, bei welchen Gehalten und welchem Druck die in der Probe beobachtete Paragenese stabil ist. Man kann in diesem Diagramm sehr leicht erkennen, welche Vielfalt an Paragenesen bei ansonsten gleichen Umgebungsbedingungen eigentlich möglich ist!

## 6. Ausblick

Das Gebiet der Pseudoschnitte und der thermodynamischen Diagramme im Allgemeinen ist noch stark in Entwicklung: neue Materialeigenschaften von Mineralien werden gemessen und in den Datensatz aufgenommen, neue kristallchemische Modelle

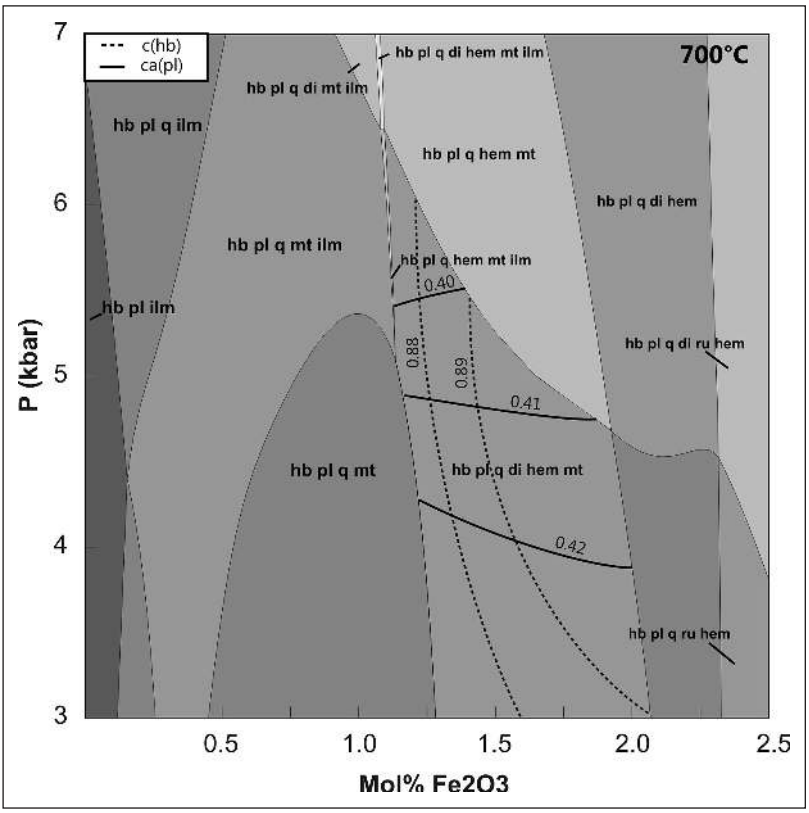


Abb. 7: Pseudoschnitt für einen Amphibolit (Alaska) für 700 °C, auf der X-Achse wird die Menge an dreiwertigem Eisen variiert. Das Feld der in der Probe vorgefundenen Paragenese ist für Zusammensetzungsparameter von Hornblende und Plagioklas konturiert. Neue Abkürzungen: hem = Hämatit, ilm = Ilmenit, mt = Magnetit.
Pseudosection for an amphibolite from Alaska for 700 °C, with variation of the amount of $Fe^{3+}$ along the x-axis. The field of the observed mineral assemblage is contoured for composition parameters of hornblende and plagioclase. New abbreviations: hem = hematite, ilm = ilmenite, mt = magnetite.

entwickelt, neue Algorithmen geschrieben. Aber selbst das ist natürlich nur ein kleiner Teilbereich der Petrologie. Aspekte von Kinetik in Gesteinen werden in einem eigenen Beitrag über die Umwandlung von Gabbro in Eklogit angesprochen (Proyer & Postl, dieser Band). Die Geochemie der Spurenelemente im Mikrobereich, die Isotopenanalytik und damit auch die Bestimmung von radioaktiven Isotopen und Tochternukliden sind aufgrund neuer analytischer Möglichkeiten und sinkender Nachweisgrenzen ein Boom-Bereich. Beide Zweige der Geowissenschaften werden dem Petrologen und dem Geologen in Zukunft ganz essenzielle neue Informationen liefern können – über die in den Gesteinen ablaufenden Prozesse selbst und über die detaillierte zeitliche Abfolge dieser Geschehnisse. Und damit sind wir noch nicht einmal bei gesellschaftsnahen Anwendungen, die es natürlich auch gibt, auch wenn das nicht immer auf den ersten Blick offensichtlich ist.

Petrologen, die mit fossilen Magmen- und Fluidsystemen vertraut sind, können natürlich auch gehaltvolle Aussagen zu heute aktiven Vulkanen, Hydrothermalfeldern und Tiefwasserquellen machen. Sie suchen und verfolgen die Spuren von Fluidströmen (z. B. alpine Klüfte) und von Konzentrationsprozessen (Adern und Segregationen) bis hin

zur Anreicherung von Wertmineralen in Vorkommen und Lagerstätten, und beschäftigt sich mit den chemischen und physikalischen Prozessen, die dazu geführt haben. Man untersucht so unterschiedliche Vorgänge wie die Oberflächenchemie und -physik der Verwitterung einerseits, konkret etwa die Umweltrelevanz von Bergbaudeponien und deren Sicherung, und andererseits fossile Spuren oberflächennaher und damit katastrophenrelevanter Erdbeben, etwa das entlang von Erdbebenflächen durch Reibungswäre gebildetes Gesteinsglas (Pseudotachylite). Man betreibt experimentelle Petrologie, nicht nur um die Materialparameter zu bestimmen, mit denen die Thermodynamik rechnet, oder einfach um Prozesse im Erdinneren zu simulieren, sondern man synthetisiert und experimentiert auch mit Kristallen, die in der Natur gar nicht vorkommen, entweder um Analogieschlüsse auf die Natur ziehen zu können oder überhaupt, um sein Basiswissen im Bereich der angewandten technischen Wissenschaften und Materialwissenschaften einzusetzen. Was hier mit einem Halbsatz nur angerissen wird, ist nichtsdestotrotz das Betätigungsfeld vieler Absolventen des Petrologie-Studiums. Petrologen arbeiten heute nicht nur in den Forschungs- und Qualitätssicherungsabteilungen von Bergbauen und Verarbeitungsbetrieben (etwa Glas und Beton) sondern auch in der Feuerfestindustrie, der Halbleiterfertigung und anderen Bereichen wo moderne Werkstoffe, Sensoren oder Industrieverfahren erdacht und umgesetzt werden, denn das Verhalten anorganischer Materialien unter erhöhten Drücken und Temperaturen, unter Spannung und wechselnden chemischen „Environments“ unterschiedet sich nicht prinzipiell zwischen Mutter Erde und den Fabriken des Menschen, nur dass erstere es oft nicht so eilig hat.

Doch auch für den Grundlagenforscher, der nach wie vor oft mit dem Hammer in der Hand im Gelände beginnt, hat die Vielzahl der mögliche Betätigungsfelder einen gemeinsamen Nenner: Die Anwendung von Physik und Chemie auf die Erde, im Wesentlichen auf Minerale und Gesteine. Thermodynamik und Kinetik, und sehr, sehr viel Beobachtung, im Gelände, am Lichtmikroskop, an der Elektronenstrahl-Mikrosonde und an diversem anderem Gerät – verbunden mit viel Gespür und Affinität für diese Materie – das ist Petrologie.

## Danksagung

Das Studium von Gesteinen ist eine weitaus interessantere Angelegenheit als man auf den ersten Blick vermuten würde – wir danken unseren akademischen Lehrern dafür, dass sie uns die Begeisterung für dieses Fach vermitteln konnten, allen voran Georg Hoinkes (Graz) und Christian Nicollet (Clermont-Ferrand). K. Stüwe gilt unser Dank für die prompte und effektive Prüfung des Manuskriptes.

## Literatur

Baziotis I., Proyer A. & Mposkos E. 2009: High-temperature/low-pressure metamorphism of basalts in Lavrion (Greece): implications fort he preservation of peak metamorphic assemblages in blueschists and greenschists. – European Journal of Mineralogy 21: 133–148.

Proyer A. 2003a: The preservation of high-pressure rocks during exhumation: metagranites and metapelites. – Lithos 70: 183–194.

Proyer A. 2003b: Metamorphism of pelites in NKFMASH – a new petrogenetic grid with implications for the preservation of high-pressure mineral assemblages during exhumation. – Journal of metamorphic Geology 21: 493–509.

Proyer A. & Postl W. 2010: Eclogitized Gabbros from Gressenberg, Koralpe, Austria: Transformation phenomena and their interpretation. – Mitteilungen des naturwissenschaftlichen Vereines für Steiermark, Band 140: 45–67.