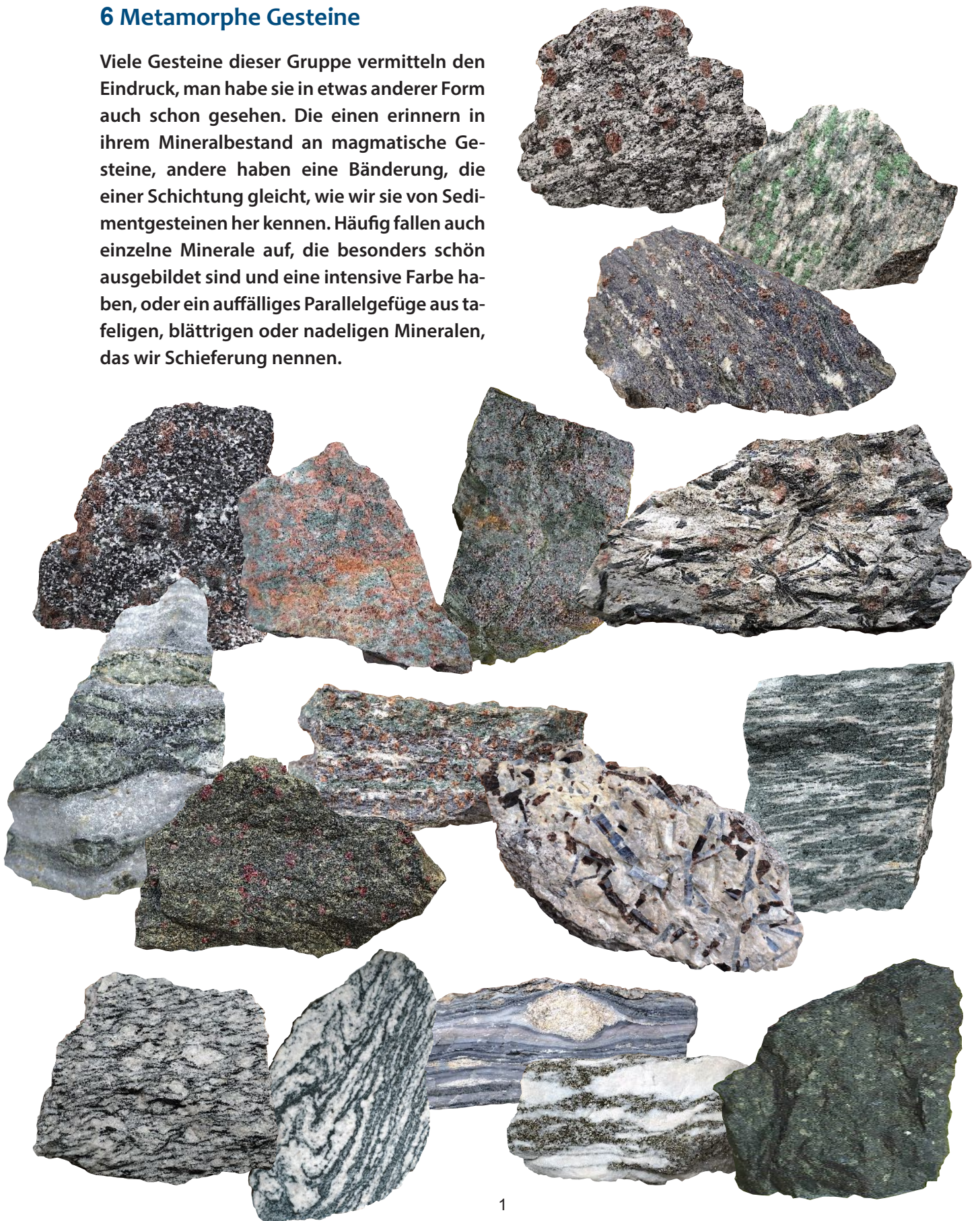


Grundlagen der Sprache der Gesteine

6 Metamorphe Gesteine

Viele Gesteine dieser Gruppe vermitteln den Eindruck, man habe sie in etwas anderer Form auch schon gesehen. Die einen erinnern in ihrem Mineralbestand an magmatische Gesteine, andere haben eine Bänderung, die einer Schichtung gleicht, wie wir sie von Sedimentgesteinen her kennen. Häufig fallen auch einzelne Minerale auf, die besonders schön ausgebildet sind und eine intensive Farbe haben, oder ein auffälliges Parallelgefüge aus tafeligen, blättrigen oder nadeligen Mineralen, das wir Schieferung nennen.



6.1 Der Begriff ‘Metamorphose’

Bereits der Naturforscher und Geologe James Hutton, einer der Begründer der modernen Geologie, vermutete im 18. Jh., dass diese Gesteine nichts eigenes darstellen, sondern **Umwandlungen von magmatischen und sedimentären Gesteinen unter Einwirkung von erhöhten Drücken und Temperaturen sind, sowie meist gleichzeitig auch unter Einwirkung deformierender Kräfte**. Dabei wachsen im Gestein durch chemische Reaktionen neue Minerale. Der Geologe Charles Lyell prägte im 19. Jh. den Begriff der ‘Gesteinsmetamorphose’ für solche Umwandlungsprozesse und nannte deren Ergebnisse entsprechend ‘metamorphe Gesteine’ (altgriech. metamórhosis = Umwandlung).

Da hohe Drücke und Temperaturen sowie Kräfte, die Gesteine deformieren können, auf der Erdoberfläche nicht auftreten, mussten diese Gesteine also in der Tiefe der Erdkruste entstanden sein. Wie genau sie dorthin kamen und danach auch wieder zurück an die Erdoberfläche, war jedoch schwierig zu verstehen und blieb lange Zeit Gegenstand wissenschaftlicher Debatten. Heute wissen wir, dass metamorphe Gesteine dort entstehen, wo die Erdkruste gestaucht, gedehnt oder zerschert wird. Dabei werden die Gesteine erhitzt und sind hohen Drücken sowie deformierenden Kräften ausgesetzt.

6.2 Sprachelemente der metamorphen Gesteine

Die Sprache der metamorphen Gesteine kann teils von bloßem Auge gelesen werden, häufig basiert sie jedoch auf den Ergebnissen aufwändiger Laborarbeit.

6.2.1 Welches Ausgangsgestein?

Es ist bereits von bloßem Auge möglich, den Ursprung eines metamorphen Gesteins, also sein **Ausgangsgestein**, grob einzugrenzen. Ist das metamorphe Gestein weitgehend homogen, handelt es sich mit grosser Wahrscheinlichkeit um ein ehemaliges magmatisches Gestein. Da magmatische Gesteine aus heissen Schmelzen auskristallisierten, löst die Metamorphose, deren Temperaturen meist unterhalb jener von geschmolzenem Gestein bleiben, bei ihnen kaum Veränderungen im Mineralbestand aus. Waren sie heftiger Deformation ausgesetzt, weisen sie jedoch ein gut sichtbares Parallelgefüge auf, eine sogenannte **Schieferung** (Abb. 1).

Sedimentgesteine wurden bei Bedingungen abgelagert, wie sie auf der Landoberfläche oder im Meer herrschen. Die Erhöhung von Druck und Temperatur während der Metamorphose löst deshalb bei vielen Sedimentgesteinen eine komplette Veränderung des Mineralbestandes aus. Trotzdem ist ihr Ursprung als Sedimentgesteine meist noch deutlich erkennbar. Insbesondere wenn es sich bei den Ausgangsgesteinen um Schichtstapel aus sehr unterschiedlichen Sedimentgesteinen handelte, bleibt die Schichtung als **Bänderung** im Gestein gut sichtbar, denn jedes Ausgangsgestein wandelt sich in ein anderes metamorphes Gestein mit einem anderen Mineralbestand um (Abb. 2).

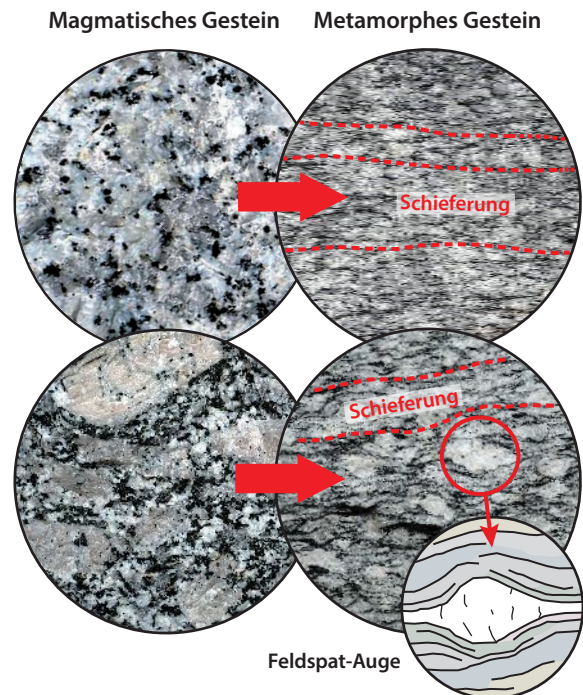


Abb. 1: Gleichkörniger, homogener Granit ändert seinen Mineralbestand durch die Metamorphose nicht. Wird er jedoch deformiert, entsteht eine Schieferung. Grosse Feldspatkristalle in porphyrischem Granit werden durch die Deformation zu Feldspat-‘Augen’ verformt.

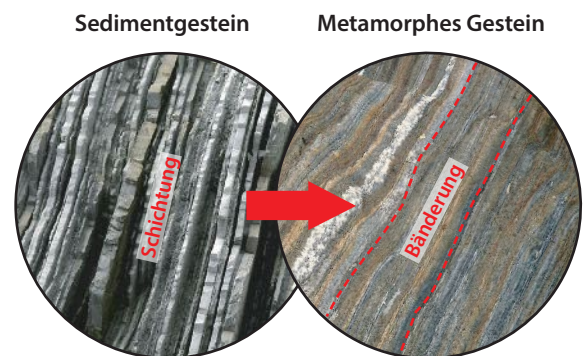


Abb. 2: Die Schichtung der Sedimentgesteine bleibt nach der Metamorphose als Bänderung erhalten.

6.2.2 Die Rolle der Minerale

In vielen metamorphen Gesteinen erkennt man von Auge auffällige Minerale, die es ermöglichen, die Entstehungsgeschichte metamorpher Gesteine bis hin zu ihren Ausgangsgesteinen zurück zu verfolgen. Diese Sprachelemente sind jedoch nicht selbsterklärend, sie sind vielmehr das Resultat jahrzehntelanger Forschungsarbeit im Labor.

Mineralbestand als Indikator für das Ausgangsgestein

Der Mineralbestand sagt uns, aus welcher Art von Ausgangsgestein ein metamorphes Gestein entstanden ist. Wachsen während der Metamorphose z. B. Minerale wie Chlorit, Biotit, Granat oder Disthen, welche Aluminium enthalten, musste das Ausgangsgestein ebenfalls Aluminium enthalten haben. Dies trifft besonders auf Tongesteine zu. Diese Minerale gelten deshalb als Indikatoren für ehemalige Tongesteine.

Kennen wir das Ausgangsgestein, ist ein Blick weit zurück in die Erdgeschichte möglich, denn wir wissen nun, woraus die Gesteine bereits vor ihrer Metamorphose bestanden haben (Abb. 3). So können wir uns ein Bild von der damaligen Beschaffenheit der Erde machen. Da Tongesteine und tonreiche Gesteine im allgemeinen ca. 80% aller Sedimentgesteine weltweit ausmachen, gehören metamorphe Tongesteine zu den häufigsten metamorphen Gesteinen. Wir werden sie deshalb in der Folge als Beispiele verwenden.

Mineralbestand als Indikator für Druck- und Temperaturbedingungen

Die Geologie interessiert sich dafür, aus welcher Tiefe in der Erdkruste metamorphe Gesteine stammen, denn dadurch kann sie sehr viel über den Bau von Gebirgen erfahren (siehe Modul 5). Wenn es gelingt, die Druck- und Temperaturbedingungen (kurz: P-T Bedingungen) für die Entstehung häufiger Minerale zu bestimmen, können metamorphe Gesteine als Thermometer und Barometer dienen und uns verraten, aus welcher Tiefe sie stammen.

Jedes Mineral hat einen mehr oder weniger eng begrenzten Stabilitätsbereich, es kann also nur bei bestimmten P-T Bedingungen kristallisieren und auch stabil bleiben.

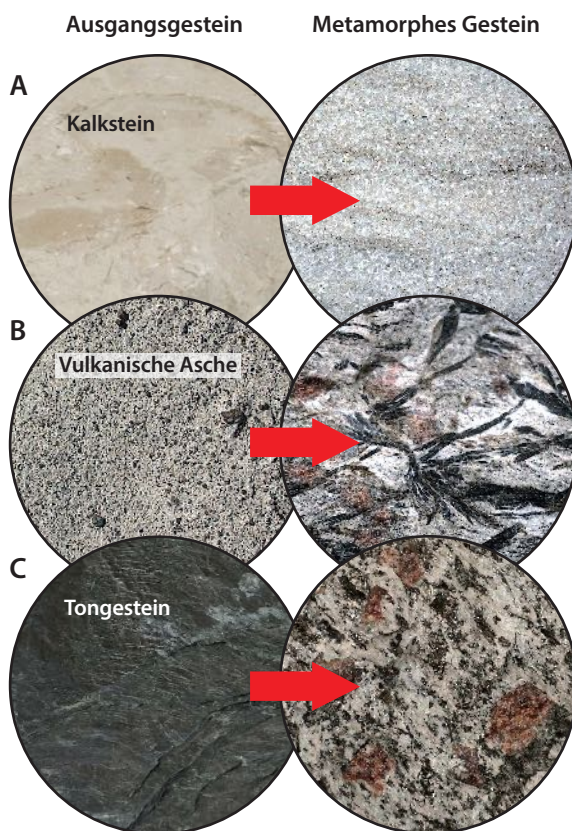


Abb. 3: Waren die Ausgangsgesteine Sedimentgesteine, lässt sich deren Art über den Mineralbestand der metamorphen Gesteine eingrenzen. Gesteine mit einem hohen Anteil an Kalzit waren beispielsweise einst Kalksteine oder Mergel (A). Gesteine mit viel Hornblende und Granat werden als ehemalige vulkanische Aschelagen verstanden (B). Gesteine, die Biotit und Granat enthalten, verraten uns über ihren hohen Aluminiumgehalt, dass sie einst Tongesteine waren (C).

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, andere Minerale wie Disthen 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.

Mit etwas Glück können in einem Gestein Mineralreaktionen beobachtet werden, die wie in einer Momentaufnahme „eingefroren“ sind. Die P-T Bedingungen solcher Mineralreaktionen können durch Laborversuche und mittels Berechnungen ermittelt werden. Sie werden in Form einer Reaktionskurve in einem Druck-Temperatur Diagramm (P-T Diagramm) dargestellt (Abb. 4).

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. 5). Dadurch lassen sich die Druck- und Temperaturbedingungen während der Metamorphose bereits gut eingrenzen. Kommen in einem Gestein z. B. Biotit und Granat vor, musste das Gestein eine Temperatur zwischen etwa 500° und 600° C erreicht haben.

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 schwieriger, genaue Angaben zu den Druckbedingungen zu machen. In der Erdkruste nimmt die Temperatur im Durchschnitt um etwa 27° C pro Kilometer Tiefe zu. 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.

Sollen die P-T Bedingungen genauer bestimmt werden, ist dies nur durch Laborarbeit möglich. Dabei wird die chemische Zusammensetzung bestimmter Minerale gemessen. Diese Messwerte können anschliessend in Druck- und Temperaturwerte umgerechnet werden (vgl. Modul 3). Das könnten im Fall unseres Gesteins mit Biotit und Granat z. B. 580° C und 0.6 GPa sein. Sobald eine Druckangabe vorliegt, kann auch die Tiefe genauer bestimmt werden: Der Druck nimmt in der oberen Erdkruste mit jedem Kilometer Tiefe um 300 bar (0.03 GPa) zu. 0.6 GPa entsprechen somit 20 km Tiefe (Skala rechts in den P-T Diagrammen).

6.2.3 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. Damit wir sie schliesslich finden können, müssen sie zusätzlich aus der Tiefe der Erdkruste auch wieder an die Erdoberfläche verfrachtet werden. Die Prozesse, die dabei eine Rolle spielen, werden wir in Modul 4 und 5 (Plattentektonik, Alpengeologie) kennen lernen.

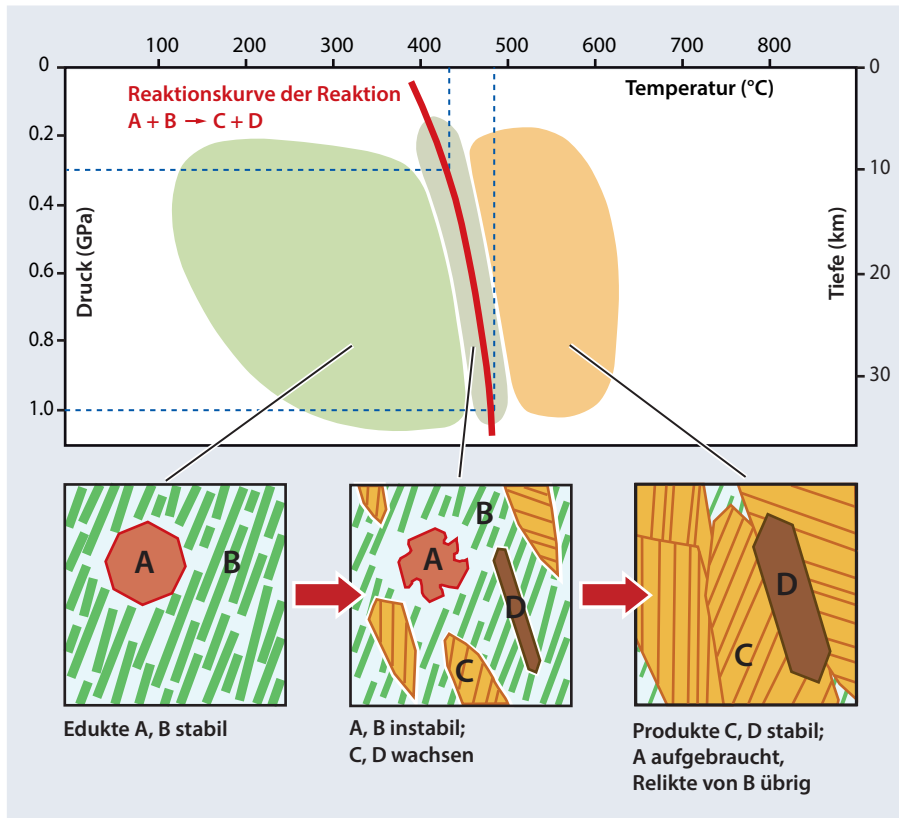


Abb. 4: Schematische Darstellung der Mineralreaktion $A + B \rightarrow C + D$. Die Reaktionskurve (rot) ist im Druck-Temperatur Diagramm (P-T Diagramm) dargestellt, wobei die Temperatur von links nach rechts und der Druck von oben nach unten zunehmen. Links der Reaktionskurve sind die Edukte A+B stabil, 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. Da die Reaktion bei zunehmenden P-T Bedingungen stattfindet, wird sie 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 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.

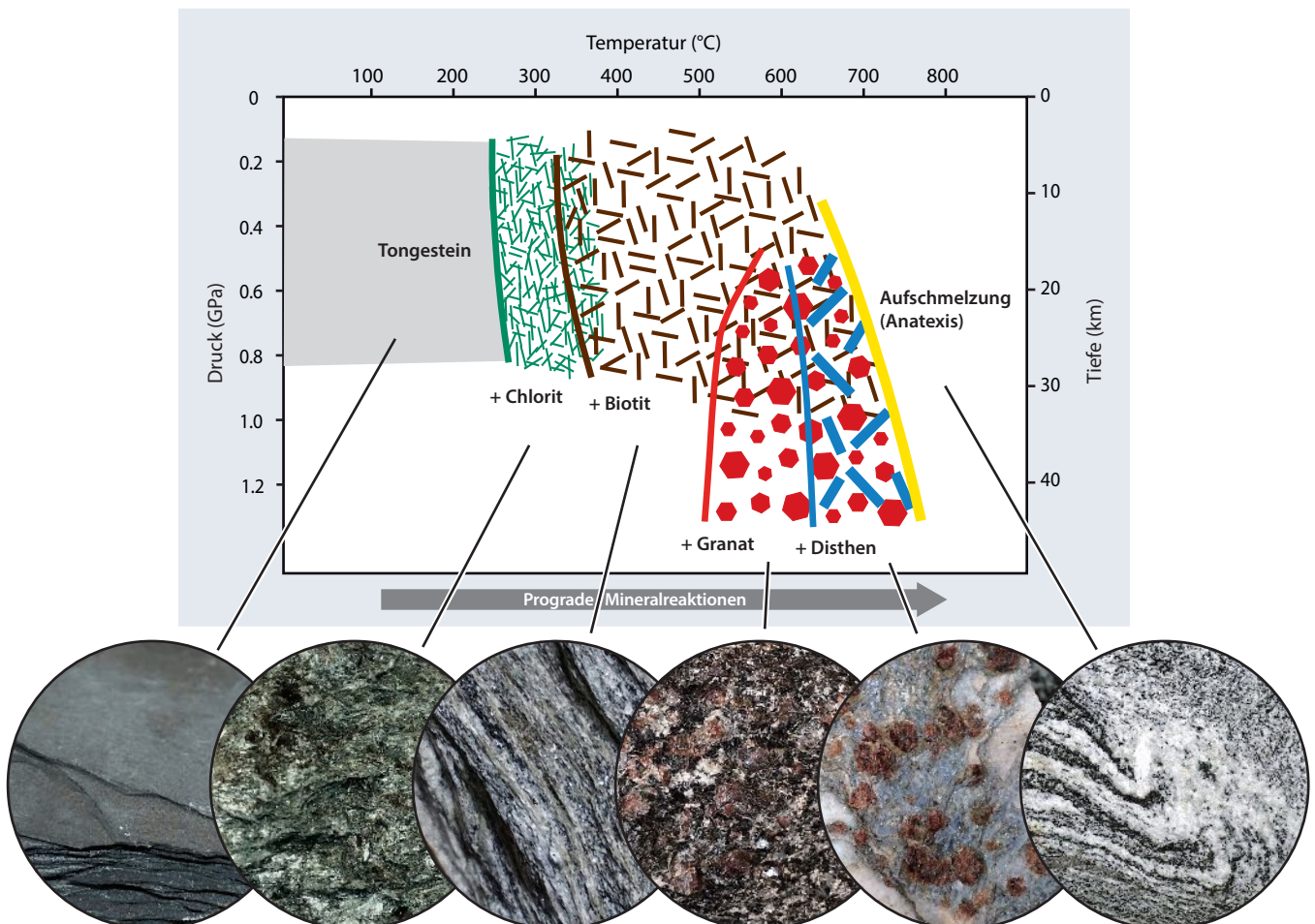


Abb. 5: Auftreten auffälliger Minerale in metamorphen Tongesteinen im P-T Diagramm. Die Kurven zeigen das erste Auftreten der Minerale Chlorit, Biotit, Granat und Disthen sowie den Beginn der Aufschmelzung des Gesteins. Die Mineralreaktionen werden in diesem speziellen Fall vor allem durch eine Zunahme der Temperatur ausgelöst.

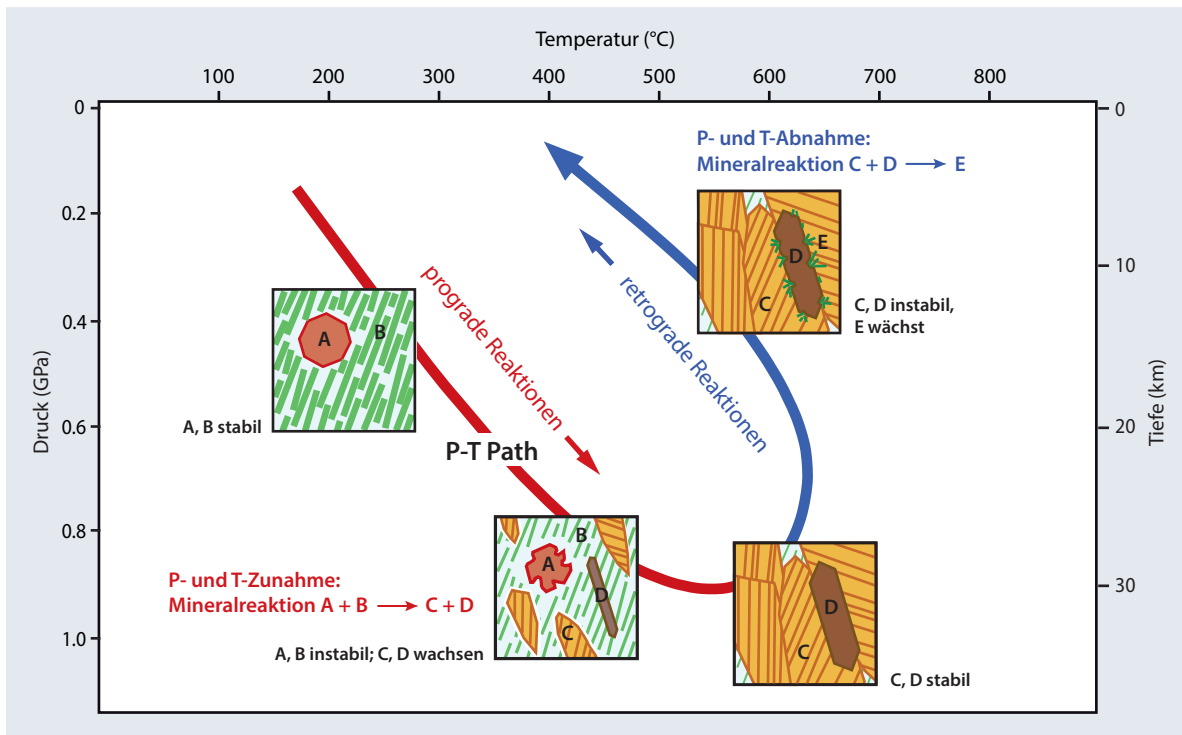


Abb. 6: Zu- und Abnahme von Druck und Temperatur auf dem Weg eines Gesteins durch die Erdkruste, dargestellt im P-T Diagramm. Dafür wird der englische Ausdruck 'P-T Path' (übersetzt 'P-T Weg') verwendet. Rot: P-T Path auf dem Weg in die Tiefe der Erdkruste mit prograden Mineralreaktionen, blau: P-T Path auf dem Weg zurück zur Oberfläche mit retrograden Mineralreaktionen.

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 sogenannten **prograden Mineralreaktionen**, wie sie in Abb. 4 bis 6 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. 6). 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 zu schnell, finden keine retrograden Reaktionen statt.

6.2.4 Das Gefüge als Indikator für Deformation

Ein weiteres, auffälliges Merkmal der metamorphen Gesteine ist ihr Parallelgefüge, das **Schieferung** genannt wird. Die Schieferung wird als Resultat von Kompression und/oder Scherung in der Erdkruste verstanden (Abb. 7A). Mit wenigen Ausnahmen ist die Metamorphose also auch von einer Deformation des Gesteins begleitet. Minerale können durch Rotation eingeregelt oder durch Kompression

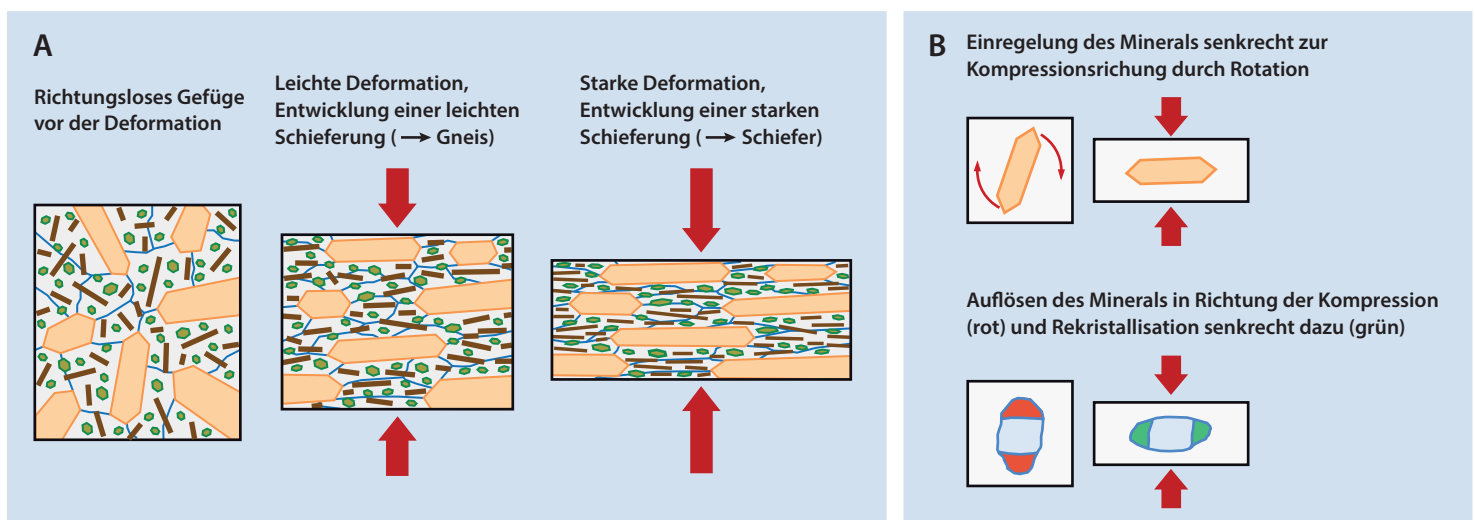


Abb. 7A: Entstehung einer Schieferung durch Kompression des Gesteins. **B:** Einregelung von Mineralen senkrecht zur Kompressionsrichtung durch Rotation oder durch Auflösen und Rekristallisation des Minerals.

sion umkristallisiert werden (Abb. 7B). Aus dem richtungslosen Gefüge eines Tiefengesteins beispielsweise kann dadurch ein Gneis oder sogar ein Schiefer werden.

6.3 Namensgebung

6.3.1 Gesteine mit systematischer Nomenklatur

Bei den meisten metamorphen Gesteinen folgt die Namensgebung einem klaren System und ist einfach zu erlernen.

Schritt 1: Gefügeame als Hauptname

Metamorphe Gesteine mit richtungslosem Gefüge werden als Fels bezeichnet. Dieser Begriff ist zweideutig, ist er doch in der Umgangssprache ein Synonym für alle Arten grosser Gesteinsbrocken oder sogar ganzer Felswände. Gesteine mit einer gut sichtbaren Schieferung werden als Gneis bezeichnet, Gesteine mit sehr dominanter, enger Schieferung schliesslich sind Schiefer (Abb. 8). Die Grenzen zwischen Gneis und Schiefer sind fließend und werden oft unterschiedlich beurteilt.

Das richtungslose Gefüge der Felse weist darauf hin, dass solche Gesteine während der Metamorphose keine Deformation erlitten haben. Dies ist eher selten. Allermeistens werden die Gesteine zu Gneisen oder sogar Schiefen zusammen gepresst, wobei die tafeligen, blättrigen oder nadeligen Minerale senkrecht zur Kompressionsrichtung eingeregelt werden (Abb. 7, 8). Gneise, die aus magmatischen Gesteinen entstanden sind, heissen **Orthogneise**, sind sie aus Sedimentgesteinen entstanden, werden sie als **Paragneise** bezeichnet.

Schritt 2: Präzisierung mit Mineralnamen

Die Hauptnamen 'Fels', 'Gneis' oder 'Schiefer' werden weiter präzisiert durch die Voranstellung der Namen jener Minerale, die das entsprechende Gestein in grösseren Anteilen enthält. Dabei sind gewisse Freiheiten möglich. Die

Mineralnamen werden nach aufsteigender Häufigkeit angefügt. So enthält beispielsweise ein Disthen-Granat-Muskovitgneis mehr Muskovit als Granat und mehr Granat als Disthen. Minerale, die in beinahe allen Felsen, Gneisen und Schiefen durchgehend vorkommen, wie Quarz und Feldspat, werden nicht speziell erwähnt.

Der Begriff 'Gneis' entstammt der Bergmannssprache des 16. Jahrhunderts. Er kann auch ohne angefügte Mineralnamen für sich allein stehen, denn man versteht unter diesem Begriff seit jeher ein Gestein mit Quarz, Feldspat, Muskovit und/oder Biotit. Schiefer hingegen muss immer mit Mineralnamen präzisiert werden.

6.3.2 Gesteine mit speziellen Namen

Das oben eingeführte System zur Bildung von Gesteinsnamen ist relativ jung. Es gibt auch einige Gesteine, deren Namen so stark in der Umgangs- oder Wissenschaftssprache verwurzelt sind, dass sie sich nicht in diese systematische Nomenklatur einfügen lassen (Abb. 9).

Marmor: Marmore entstehen bei der Metamorphose von Kalksteinen, wobei die mikroskopisch kleinen Kalzitkristalle im Kalkstein zu grösseren Kalzitkristallen heranwachsen, die von Auge sichtbar sind. Im Gegensatz zu Kalksteinen glänzen Marmore deshalb im Licht. Marmore wären nach obiger Systematik eigentlich 'Kalzitfelse'. Reine Marmore sind weiss bis beige. Wenn das Ausgangsgestein jedoch kein reiner Kalkstein war, bilden sich während der Metamorphose zusätzlich auch andere Minerale, die den Marmor grau, rötlich, gelblich oder auch grünlich färben können.

Serpentin: Diese auffällig grünen Gesteine, deren Name vom lateinischen Wort 'Serpens' für Schlange abgeleitet ist, bestehen hauptsächlich aus dem Mineral Serpentin, das in unterschiedlichen Formen vorkommt. Serpentine können deshalb massig, geschiefert oder sogar fasrig sein.

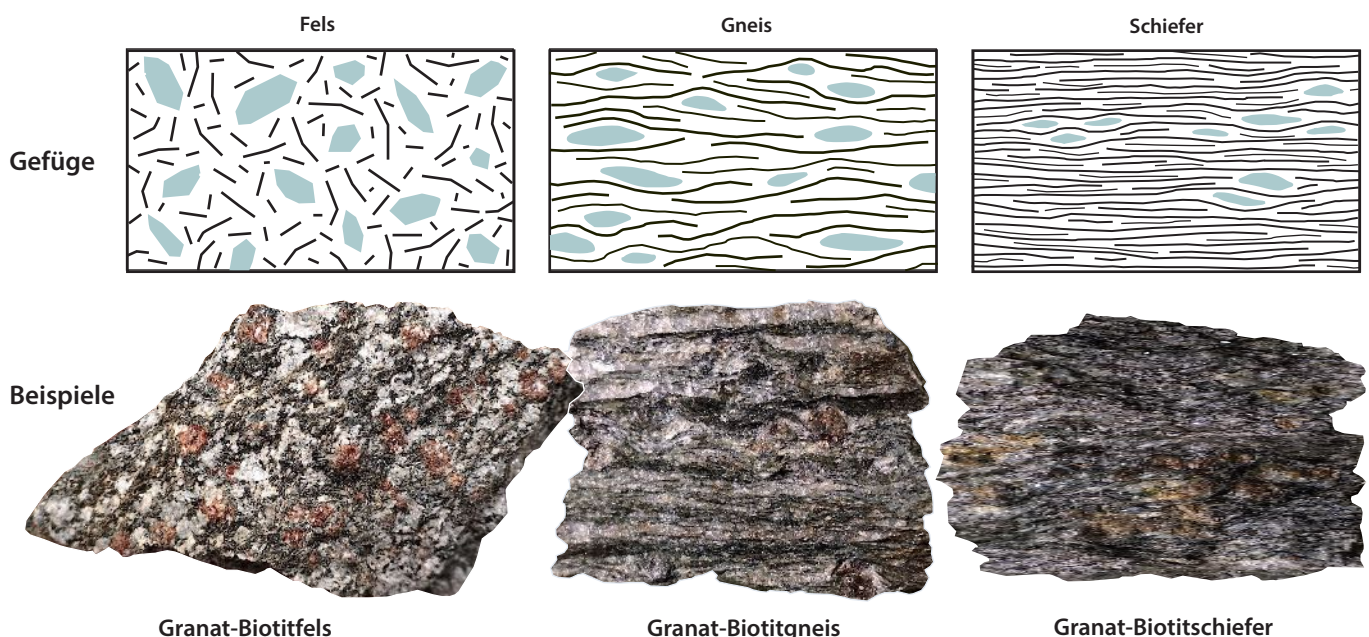


Abb. 8: Die drei namensgebenden Gefüge mit Beispielen.

Sie entstehen bei der Metamorphose von Peridotiten (Erdmantelgestein) durch Zugabe von Wasser. Diese Metamorphose ist ein Spezialfall, denn sie läuft unter den Mittelozeanischen Rücken in neu gebildeten Ozeanböden ab (Ozeanische Metamorphose). Serpentinite spielen eine wichtige Rolle für das Verständnis des Gebirgsbaus, denn sie zeigen an, wo sich früher Mittelozeanische Rücken und damit Ozeane befunden haben (Module 4, 5).

Quarzit: Wie der Name sagt, bestehen diese Gesteine hauptsächlich aus Quarz und sind meist metamorphe Sandsteine. Sie haben ein richtungsloses Gefüge, reine Quarzite sind weiss. Wie die Marmore können sie jedoch durch zusätzliche Minerale verschiedene Farben annehmen.

Amphibolit: Diese Gesteine enthalten viel Hornblende, die auch für die vorwiegend dunkle Farbe verantwortlich ist, sowie Feldspat. Meist entstehen Amphibolite aus dunklen magmatischen Gesteinen wie Gabbros oder Basalten.

Eklogit: Dieses Gestein besteht aus grünem Pyroxen und rotem Granat und hat ein richtungsloses Gefüge. Es wäre also eigentlich ein 'Granat-Pyroxenfels'. Eklogite sind selten, für die Geologie jedoch äusserst wichtig, da diese spezielle Kombination aus Pyroxen und Granat nur bei sehr hohen Drucken entstehen kann. Man nimmt an, dass Eklogite während Gebirgsbildungsprozessen in Tiefen bis zu 70 km aus Gabbros oder Basalten entstehen. Mit einer

Dichte von bis zu 3.6 g/cm^3 sind sie denn auch ausserordentlich schwer. Die Eklogite müssen danach aus dieser enormen Tiefe auch wieder bis an die Erdoberfläche befördert worden sein, sonst könnten wir sie heute dort nicht finden. Dies vermittelt eine Vorstellung der Dimensionen und Kräfte von Gebirgsbildungsprozessen, die in den Modulen 4 und 5 genauer besprochen werden.

Migmatit: Dies sind Gneise, Schiefer oder Felse, die mit wolkigen Gebilden aus hellen Mineralen (Quarz, Feldspat) durchsetzt sind, welche als erstarrte Schmelzen verstanden werden. Migmatite markieren also den Übergang zur Aufschmelzung (Anatexis) der metamorphen Gesteine und sind deshalb Indikatoren besonders hoher Temperaturen über ca. 650°C (Abb. 5).

Tonschiefer: Dies ist ein Tongestein mit einer extrem feinen Schieferung, das sich in dünne Platten spalten lässt. Genau genommen handelt es sich dabei nicht um ein metamorphes Gestein, sondern um ein Sedimentgestein (siehe Kap. 5.4.2). Der Begriff ist trotzdem sehr gebräuchlich. Die plättchenförmigen Tonminerale lagern sich beim Absinken in Gewässern wie fallendes Herbstlaub horizontal ab und werden während der Diagenese weiter eingeregelt, sodass sie schliesslich perfekt parallel zueinander liegen und den Eindruck einer Schieferung vermitteln. Korrekterweise sollten solche Gesteine, da sie nicht metamorph sind, als Ton(ge)stein bezeichnet werden.



Abb. 9: Einige metamorphe Gesteine mit speziellen Namen.