

Dynamische Erde I

Übungen – Repetition

Mineralogie, Magmatismus & Metamorphose

Übersicht aller Übungen:

Allgemein/Mineralien

- ⇒ Die Studierenden kennen den Aufbau der Erde und die Grundtypen der Grenzen der Erdplatten
- ⇒ Die Studierenden kennen die Grundtypen der Gesteine
- ⇒ Die Studierenden kennen die äusseren Merkmale und Erkennungskriterien von Mineralien
- ⇒ Die Studierenden können die wichtigsten Mineralien selbstständig identifizieren
- ⇒ Die Studierenden kennen die Hauptelemente (chemische Zusammensetzung, nicht die genaue Formel) der wichtigsten Silikate und nicht-silikatischen Mineralien.
- ⇒ Die Studierenden erkennen die wichtigsten gesteinsbildenden Silikate
- ⇒ Die Studierenden kennen Zusammenhänge zwischen Eigenschaften und Struktur der Silikate
- ⇒ Die Studierenden können die Hauptelemente der verschiedenen Silikate nennen
(Die genaue Formel ist nicht zwingend gefragt)

Sedimentgesteine

- ⇒ Die Studierenden kennen die Eigenschaften und den Aufbau der verschiedenen Sedimenttypen
- ⇒ Die Studierenden können Sedimentgesteine unterscheiden und bestimmen

Magmatische Gesteine

- ⇒ Die Studierenden können Gefüge und Mineralogie von magmatischen Gesteinen beschreiben
- ⇒ Die Studierenden können Mineralien im Gestein auf makroskopischer Ebene bestimmen
- ⇒ Die Studierenden können Vulkanite, Plutonite und Ganggesteine unterscheiden
- ⇒ Die Studierenden können Vulkanite, Plutonite und Ganggesteine unterscheiden
- ⇒ Die Studierenden können magmatische Gesteine nach der Streckeisen-Systematik benennen
- ⇒ Die Studierenden können die Fraktionierungsreihe nach Mineralogie/SiO₂-Gehalt erklären
- ⇒ Die Studierenden verstehen die Bowen'sche Differentiationsreihe

Metamorphe Gesteine

- ⇒ Die Studierenden erkennen das Gefüge und den Mineralbestand metamorpher Gesteine
- ⇒ Die Studierenden können anhand des Gefüges und des Mineralbestandes den Chemismus und die Bildungsbedingungen metamorpher Gesteine bestimmen.

Geophysik

- ⇒ Die Studierenden wiederholen den Aufbau der Erde.
 - ⇒ Die Studierenden lernen zwei wichtige Materialeigenschaften kennen und wie diese Parameter mit seismischen Ausbreitungsgeschwindigkeiten und dem Inneren der Erde zusammenhängen.
 - ⇒ Die Studierenden kennen die verschiedenen Arten von seismischen Wellen.
 - ⇒ Die Studierenden können diverse seismische Phasen benennen und unterscheiden.
 - ⇒ Die Studierenden verstehen das Brechungsgesetz und die Umwandlung von seismischen Phasen.
Die Studierenden kennen den wichtigen Unterschied zwischen Gefahr und Risiko.
 - ⇒ Die Studierenden kennen das Verhalten von Tsunamiwellen bei unterschiedlich tiefem Wasser.
 - ⇒ Die Studierenden können die Gravitationskraft von verschiedenen Himmelskörpern ausrechnen.
-

1. Mineralogie

1.1 Definition und Begriffe

Mineral	Ein Mineral ist ein natürlicher anorganischer Festkörper, welcher makroskopisch homogen erscheint. Es ist durch eine chemische Zusammensetzung, eine atomare Struktur und einen bestimmten p-T Stabilitätsbereich gekennzeichnet. Kristalle oder amorphe Substanzen können Mineralien darstellen.
Kristall	Ein Kristall ist ein dreidimensional periodisch geordneter Festkörper, welcher sich durch Anisotropie (Richtungsabhängigkeit physikalischer Eigenschaften) auszeichnet. Die Geometrie des Kristallgitters bestimmt die Form und Spaltbarkeit eines Kristalls.
Amorphe Substanz	Amorphe Substanzen (z.B. Glas) zeigen Isotropie, d.h. gleiche Eigenschaften in alle Raumrichtungen.
Gestein	Ein Gestein ist ein Aggregat aus Mineralien. monomikt: besteht nur aus einem einzigen Mineral polymikt: besteht aus mehreren verschiedenen Mineralien
Elementarzelle	Die Elementarzelle ist die kleinste Baueinheit eines Kristalls und weist alle Symmetrieelemente und Eigenschaften des makroskopischen Kristalls auf.
Tracht	Gesamtheit aller ausgebildeten Flächen eines Kristalls und deren Kombinationen (Würfel, Oktaeder, Bipyramide, ...)
Habitus	Gesamtgestalt eines Kristalls, bestimmt durch die Größenverhältnisse der Flächen zueinander. Sie wird beschrieben mit Begriffen wie stengelig, tafelig, würfelig, etc.
Mischkristalle	Mischkristalle bestehen aus mehreren chemischen Endgliedern, die durch Substitution von einzelnen chemischen Komponenten untereinander gebildet werden (z.B. Olivin, Feldspäte).

1.2 Klassifikation von Mineralien

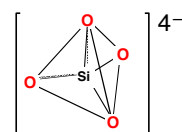
Zusammensetzung	⇒ Elemente (kein Anion)
(Art des Anions)	⇒ Oxide und Hydroxide (O^{2-} oder OH^-) ⇒ Halogenide (F^- , Cl^-) ⇒ Sulfate (SO_4^{2-}) ⇒ Sulfide (S^{2-}) ⇒ Karbonate (CO_3^{2-}) ⇒ Phosphate (PO_4^{3-}) ⇒ Silikate (SiO_4^{4-}) → wichtigste gesteinsbildende Mineralien
Kristallstruktur	⇒ Silikate

1.3 Kristalle

- ⇒ Grundbaueinheit = Silikat – Tetraeder $[SiO_4]^{4-}$
- ⇒ Sehr stabile kovalente Bindung zwischen O und Si
- ⇒ Tetraeder durch O-Brücken oder über Kationen verbunden
- ⇒ Ladungsausgleich erfolgt mittels Einbaus von Kationen (K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Al^{3+} , Ti^{4+} , ...) zwischen Tetraedern

Silikatstrukturen — drei Bauprinzipien

(1) SiO_4 -Tetraeder ($r_O : r_{Si} \sim 0.3$)
mit stark kovalenter Si — O - Bindung



(2) Verknüpfung von Tetraedern über gemeinsame Sauerstoff - Ecken



(3) $1 \ominus$ - Ladung pro Einzel - Sauerstoff O:
→ Ausgleich durch \oplus Kationen

Silikat-Typ	Anzahl Verknüpfungen	Formel Grundeinheit	Beispielmineral
Inselsilikate	0	$[\text{SiO}_4]^{4-}$	Olivin
Gruppensilikate	1	$[\text{Si}_2\text{O}_7]^{6-}$	Epidot
Ringsilikate	2	$[\text{Si}_n\text{O}_{3n}]^{2n-}$ n...3, 4, 6	Beryll, Turmalin
Ketten- und Bändersilikate: Einfachketten	2	$[\text{Si}_n\text{O}_{3n}]^{2n-}$	Pyroxene
Ketten- und Bändersilikate: Doppelketten	2 - 3	$[\text{Si}_4\text{O}_{11}]^{6-}$	Amphibole
Schichtsilikate	3	$[\text{Si}_2\text{O}_5]^{2-} / [\text{Si}_4\text{O}_{10}]^{4-}$	Glimmer, Tonminerale
Gerüstsilikate	4	$[\text{Si}_n\text{O}_{2n}]^0$	Quarz Feldspat

1.4 Mineralogische Konzepte

Kationenaustausch

- ⇒ einfache Substitution (Forsterit – Fayalit: $\text{Mg}^{2+} \leftrightarrow \text{Fe}^{2+}$)
- ⇒ gekoppelte Substitution (Tschermarkaustausch: $\text{Mg}^{2+} + \text{Si}^{4+} \leftrightarrow \text{Al}^{3+} + \text{Al}^{3+}$)

Isomorphie

Gleiche Gestalt bei unterschiedlichem Chemismus

- ⇒ Granat: $\text{A}^{2+}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$
- Almandin ($\text{A} = \text{Fe}$)
- Pyrop ($\text{A} = \text{Mg}$)
- Grossular ($\text{A} = \text{Ca}$)
- => Hochdruck-Metamorphose: Bestimmung des Chemismus des Ursprungsgesteins

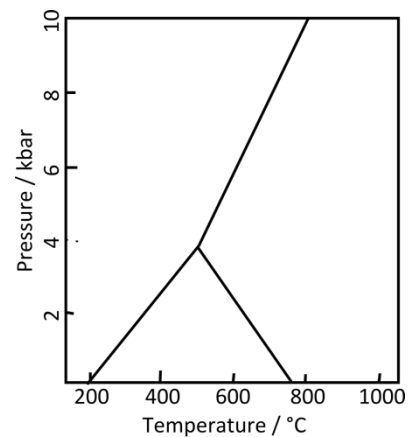
Polymorphie

Unterschiedliche Gestalt (Kristallstruktur) bei gleichem Chemismus

- ⇒ Alumosilikate: Al_2SiO_5
- Andalusit
- Disthen
- Sillimanit
- => Indikator für Metamorphosegrad eines Gesteins

Aufgaben:

- ⇒ Trage die Alumosilikate im Diagramm rechts ein.
- ⇒ Zeichne das Feldspatdreieck und beschreibe die zwei Kationen-Austauschreaktionen zwischen den jeweiligen Engliedern (Tipp: einfache und gekoppelte Substitution)

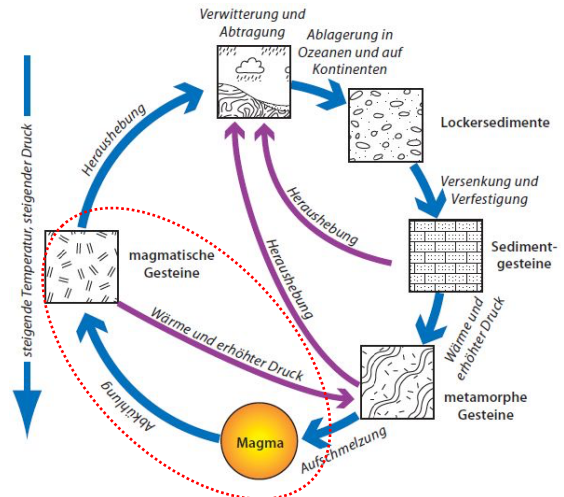


2. Magmatismus

2.1 Gesteinsbeschreibung – Begriffe

Das Gefüge beschreibt den inneren Aufbau des Gesteins. Unter Struktur versteht man Korn- oder Kristallgrösse, Kornverteilung, Rundungsgrad, Korngrenzen und Kornbindung. Die Textur ist die Art und Weise, wie die Bestandteile im Raum angeordnet sind (z.B. Fliesstextur, richtungslose Textur, blasige Textur).

Die englische Übersetzung bietet Raum für Verwirrung:
Struktur => engl. texture, Textur => engl. fabric



Struktur (engl. texture)

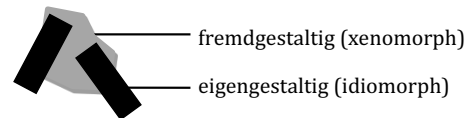
Grad der Kristallinität

(Abkühlungsgeschwindigkeit, Unterscheidung Vulkanit und Plutonit)

- ⇒ holokristallin => bei Plutoniten (griech. holo = komplett); vollkommen auskristallisiert
- ⇒ hemikristallin => bei Vulkaniten (altgr. hemi = halb); kristalline als auch glasige Komponenten
- ⇒ holohyalin => bei Vulkaniten (griech. hyalin = Glas); vollkommen aus Glas

Absolute Korngrösse

- ⇒ sehr grobkörnig (> 3 cm)
- ⇒ grobkörnig (5 mm - 3 cm)
- ⇒ mittelkörnig (1 mm - 5 mm)
- ⇒ feinkörnig bis dicht (< 1 mm)

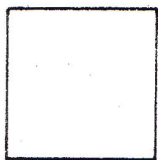


Relative Korngrösse

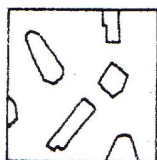
- ⇒ gleichkörnig
- ⇒ porphyrisch (2 Kristallgenerationen: Einsprenglinge (idiomorph) in feinkörniger Grundmasse (meist xenomorphe Mineralien), sowohl in holokristallinen sowie hemikristallinen Gesteinen möglich)
- ⇒ porphyrtartig (2 Generationen unscharf getrennt)

Kornform

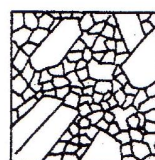
- ⇒ idiomorph (Kristallformen ausgeprägt) (griech. idio = eigen, selbst); (Eselsbrücke: idio => ideal)
- ⇒ xenomorph (keine geometrische Kristallform, schnell abgekühlt und kristallisiert); (griech. xeno = fremd)



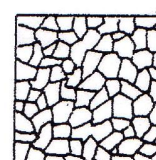
glasig, (holo)hyalin



hemikristallin, porphyrisch



holokristallin, porphyrisch



holokristallin, gleichkörnig

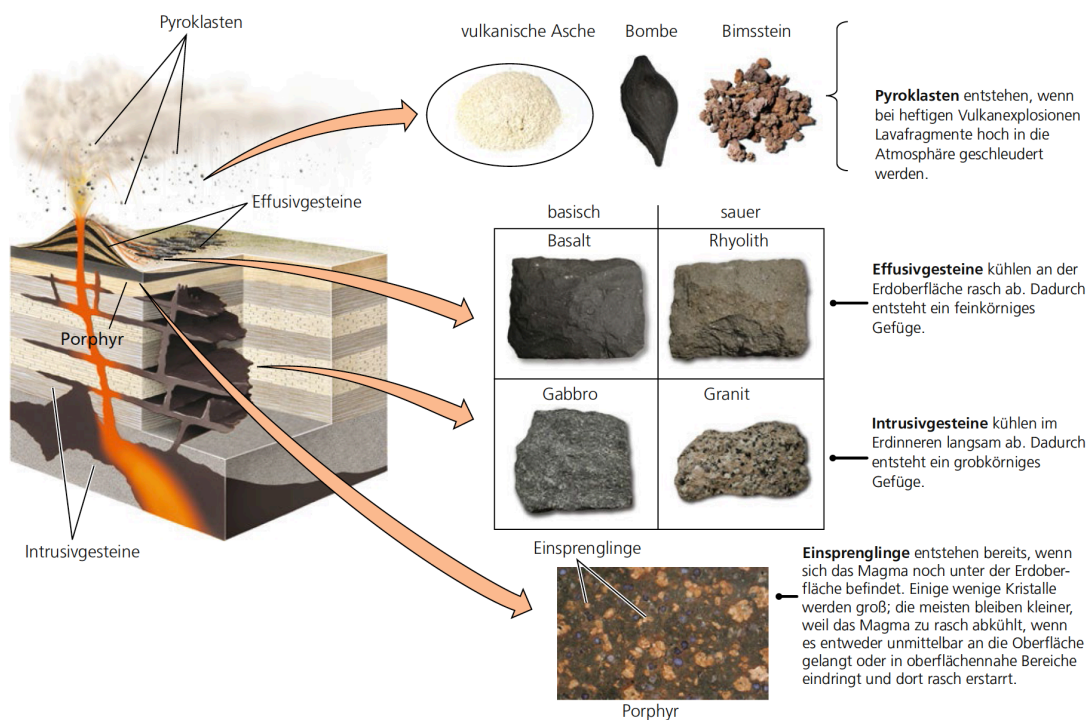
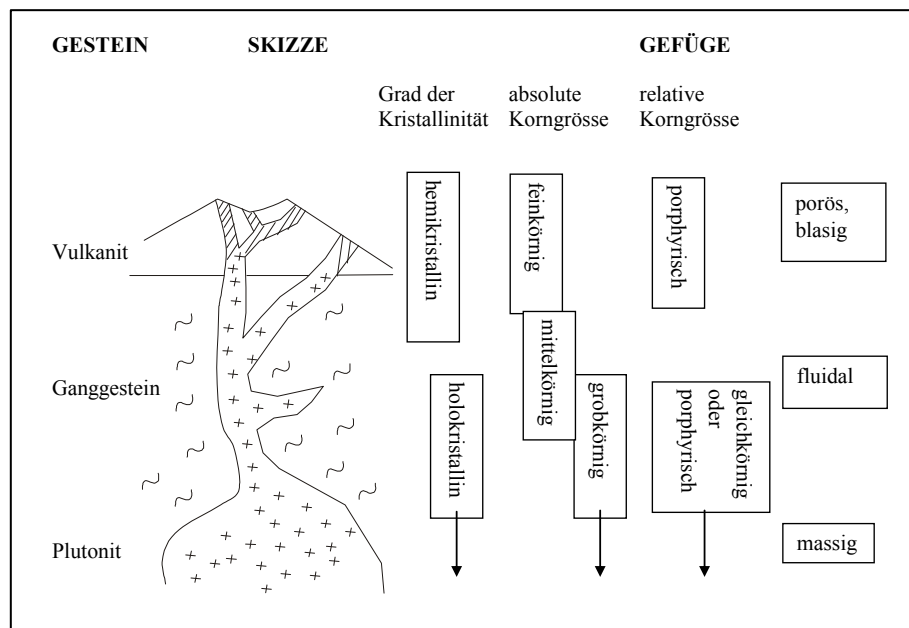
Textur (engl. fabric)

- ⇒ Kompakt
- ⇒ Porös
- ⇒ Blasig
- ⇒ fluidal
- ⇒ schlackig
- ⇒ ...

Mineralien

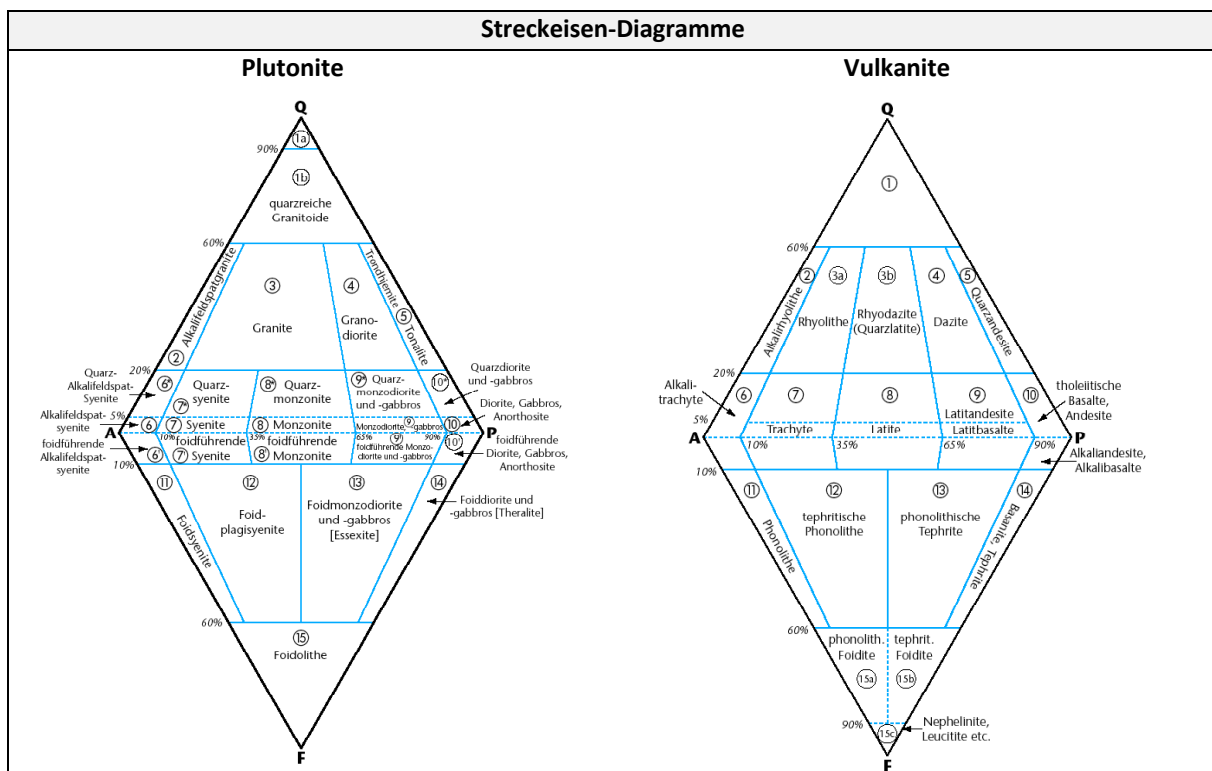
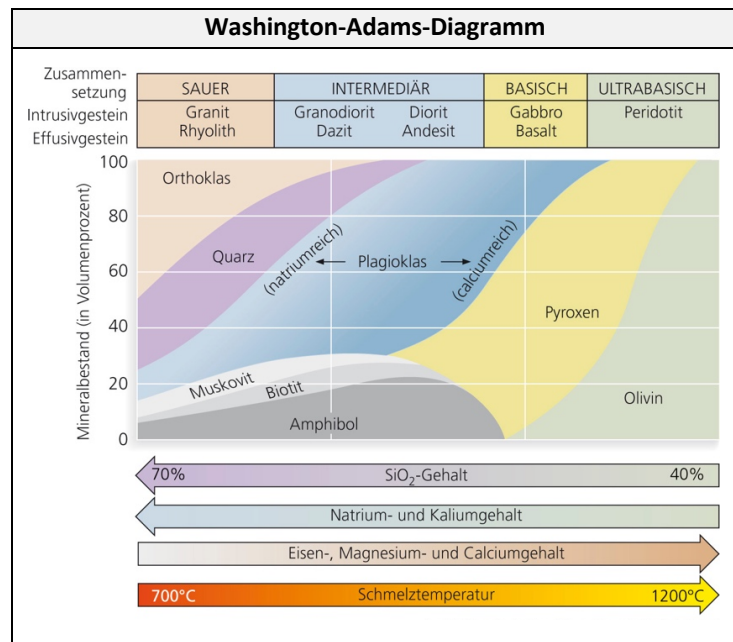
- Mafisch**
- ⇒ Reich an Eisen (Fe) und Magnesium (Mg), relativ arm an Silicium (Si)
 - ⇒ Olivin, Pyroxen, Amphibol, Biotit
 - ⇒ Generell dunkle Mineralien (schwarz/grün)
 - ⇒ Eselsbrücke: Ma für Magnesium, f für Fe/Eisen
- Felsisch**
- ⇒ Reich an Silicium (Si) und Alkalien (z.B. mit Na, Ca, Ka)
 - ⇒ Quarz, Plagioklas, Feldspat, Muskovit
 - ⇒ Generell helle Mineralien (weisslich, rötlich)
 - ⇒ Eselsbrücke: Fel für Feldspat, si für Silicium

Übersicht Gefüge und Beispiele von magmatischen Gesteinen

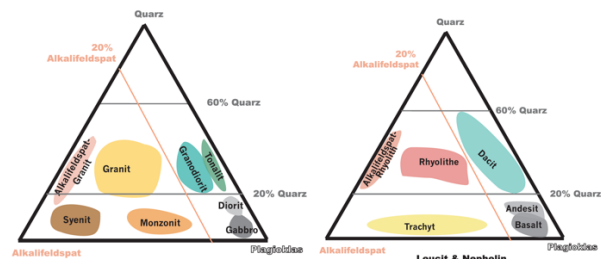


2.2 Klassifikation magmatischer Gesteine (hauptsächlich Plutonite)

In beiden Diagrammtypen werden die Gesteine anhand ihres Volumenanteils bestimmter Minerale eingeordnet. Das **Washington-Adams-Diagramm** erlaubt einen vereinfachten Überblick, sowohl über Plutonite als auch Vulkanite. Zudem ist die Veränderung zentraler Komponenten wie SiO_2 -Gehalt angegeben. In den **Streckeisen-Diagrammen** (QAPF) werden Plutonite und Vulkanite separat und ausführlicher betrachtet. Die Klassifikation beruht auf den Bestandteilen Quarz (Q), Alkalifeldspäte (A), Plagioklas (P), Foide (F). (F kommen nie mit Q vor)

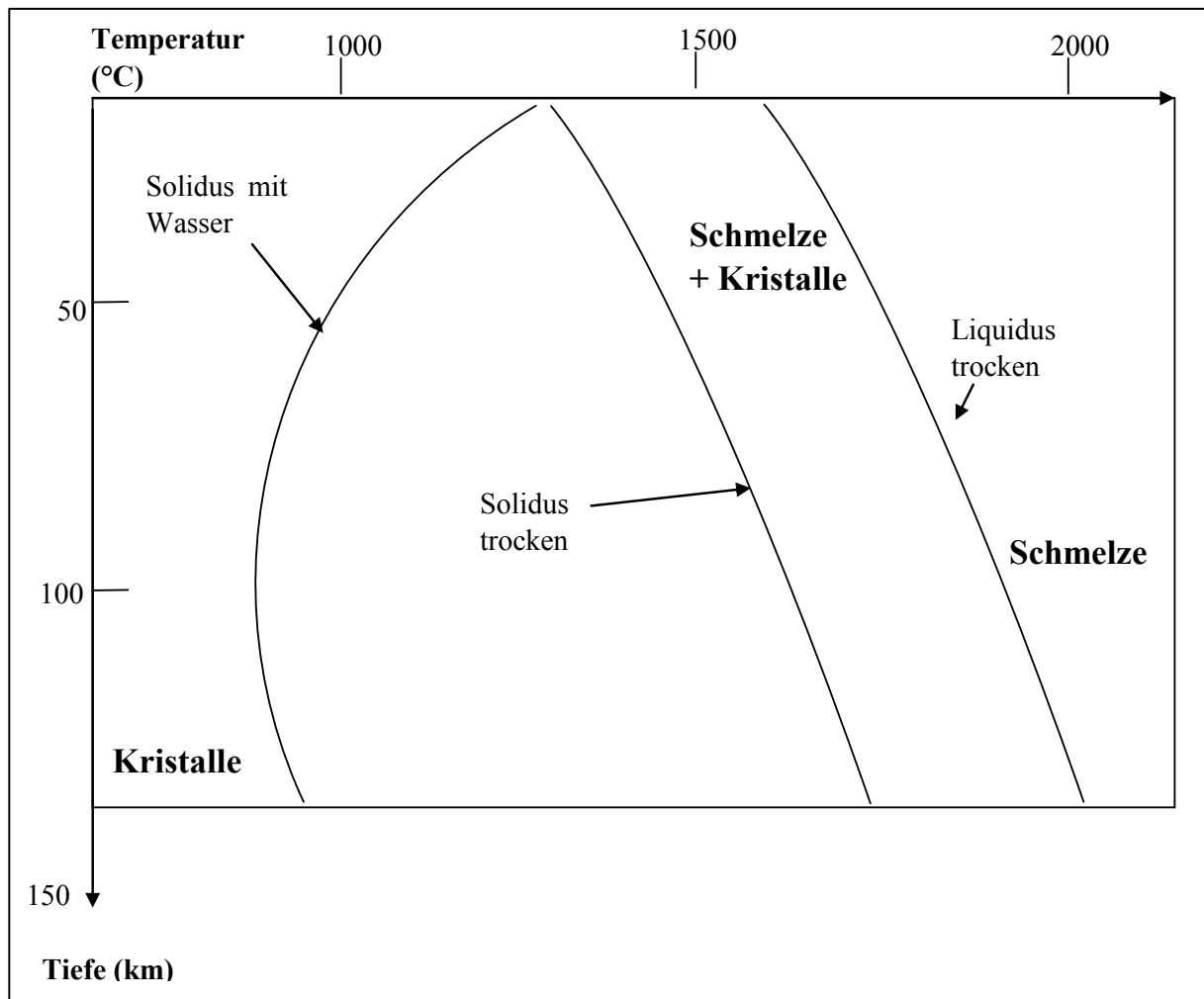


Obacht beim Eintragen/Herauslesen. Die jeweilige Ecke steht für 100% Anteile. Ein reines Quarzgestein würde man z.B. in der oberen Ecke einordnen. Enthält ein Gestein 60% Quarz, zeichnet man eine parallele Linie zu der der Quarz-Ecke gegenüberliegenden. Führt man dies für alle drei Komponenten aus (QAP), gibt der Schnittpunkt den Namen des Gesteins.



2.3 Magmaentstehung – Schmelzprozesse

Aufgabe: Zeichne die drei Möglichkeiten zur Schmelzentstehung in untenstehendes Phasendiagramm ein.



Wärmezufuhr:

- ⇒ Kontakt von heißen Magmen mit kälteren Umgebungsgesteinen kann zu Teilaufschmelzungen führen (heiße Intrusion in kalter Kruste)
- ⇒ Konvektive Wärmezufuhr aus Erdinnern
- ⇒ geologisch generell von geringer Bedeutung

Druckentlastung:

- ⇒ Druckabnahme führt zum Aufschmelzen von Gesteinen
- ⇒ Durch adiabatischen Aufstieg (= kein Wärmeaustausch mit Umgebung) eines Mantelpaketes kommt es zu Dekompressionsschmelzen (Solidus wird gekreuzt)

Wasserzufuhr:

- ⇒ Wasserzufuhr erniedrigt die Schmelztemperatur von Gesteinen indem Wasser als Flussmittel wirkt

Subduktionszone – Vulkanbögen / Arcs:

- ⇒ Vulkan- und Gebirgsketten oberhalb von Subduktionszonen
- ⇒ Zugabe von Wasser - Entwässerung der subduzierten ozeanischen Lithosphäre
- ⇒ Partielles Aufschmelzen des Mantelkeils durch Schmelzpunkterniedrigung
- ⇒ Meist starke Differentiation durch fraktionierte Kristallisation
- ⇒ Wasserhaltigen Magmas resultieren in explosivem Vulkanismus an der Oberfläche

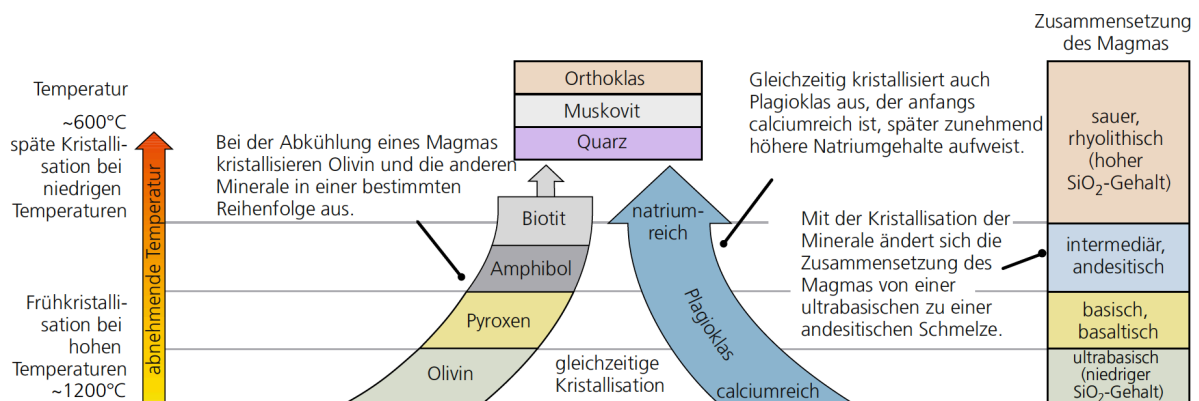
Riftsysteme - MOR: ⇒ Lineare Zonen mit langsamem Aufwölben des Mantels und Dehnung der Kruste angetrieben durch Konvektion
 ⇒ Dekompressionsschmelzen des oberen Mantels (Druckentlastung)
 ⇒ Differenzierung im Sinne von SiO_2 Anreicherung gering

Hotspot: ⇒ Adiabatischer Aufstieg von Material (Plumes) aus Erdinnern (tiefer Mantel), kreuzt Solidus -> partielles Aufschmelzen

Adiabatischer Aufstieg Bei einem adiabatischen Aufstieg eines Mantelpaketes aus dem Erdinnern findet kein Wärmeaustausch mit der Umgebung statt, da die Wärmeleitfähigkeit von Silikaten generell gesehen sehr gering ist. Eine Temperaturänderung resultiert somit nur aus der Expansion des Materials aufgrund der Druckabnahme (Entropie des Systems muss konstant bleiben). Der Adiabat entspricht nicht dem Geotherm (effektiver Temperaturverlauf im Erdinnern). Wenn nun aber der adiabatische Pfad den Solidus kreuzt kommt es zur Aufschmelzung des aufsteigenden Mantelmaterials. Die potentielle Manteltemperatur entspricht der Temperatur des Mantels an der Erdoberfläche, falls dieser adiabatisch aufsteigen würde und beträgt ca. 1350 °C)

Partielles Schmelzen, Lherzolith/Harzбургit Partielles Aufschmelzen des oberen Erdmantels (Lherzolith) produziert Primärschmelzen mit basaltischer Zusammensetzung sobald der Solidus des Mantelgesteins überschritten wird. Als Residuum bleibt ein Harzburgit (abgereicherter an K, Na, Ca, Al und Si und angereichert an Mg und Fe) zurück.

2.4 Magmadifferenzierung



Die Bowen'sche Reaktionsreihe liefert eine Modellvorstellung für die fraktionierte Kristallisation.

Fraktionierte Kristallisation führt zur Differenzierung einer Primärschmelze, d. h. zur Veränderung deren chemischen Zusammensetzung. Durch Kristallisation und anschließendes gravitatives Absinken der neu gebildeten Mineralien in der Magmakammer wird die Schmelze chemisch an den in die Mineralien eingebauten Elementen abgereichert. Generell gesehen geht es beim Prinzip der fraktionierten Kristallisation darum momentan kristallisierende Mineralien direkt nach deren Bildung von der residualen Schmelze zu trennen. Neben dem Prozess des gravitativen Absinkens kann dies auch durch Kristallisation an den Seitenwänden einer Magmenkammer oder mechanisches Auspressen von Restschmelze aus einem Kristallbrei erreicht werden. Während die evolvierte Schmelze weiter wandert (Aufstieg Richtung Oberfläche oder in eine neue Magmakammer, etc.) verbleiben die kristallisierten Mineralien als Kumulat in der Magmakammer. Da aus einer Primärschmelze mit basaltischer Zusammensetzung als erste Mineralien normalerweise mafische Mineralien (Olivin, Pyroxen, Amphibol) ausfallen reichert sich diese mit zunehmendem Fraktionierungsgrad an mit SiO_2 sowie Na und K. Die oben abgebildete Bowenreihe widerspiegelt in vereinfachter Weise fortschreitende Differenzierung ein Magma durch fraktionierte Kristallisation.

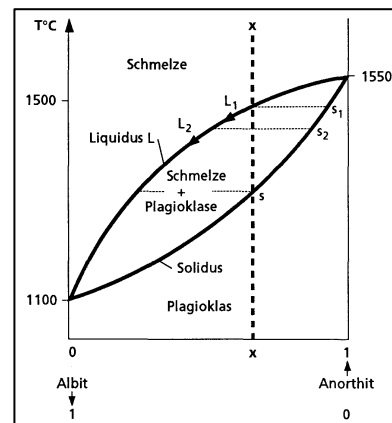
2.5 Zusatz für Interessierte: Schmelzdiagramme

- Kongruent** \Rightarrow An einem definierten Schmelzpunkt geht eine Phase in eine Schmelze ihrer eigenen Zusammensetzung über
- Inkongruent** \Rightarrow Phase geht in einem Punkt nicht in Schmelze derselben Zusammensetzung über, sondern es bildet sich eine neue intermediäre Phase
- Eutektikum** \Rightarrow Punkt mit direktem Übergang einer reinen Schmelze in ein Gemenge von Mineral-A und Mineral-B
 \Rightarrow Entspricht der minimalen Temperatur in welcher Schmelze existieren kann
 \Rightarrow Xenomorphe Verwachsung = Eutektstruktur
 \Rightarrow Reaktion im Punkt vom Typ: Mineral-A + Mineral-B = Schmelze
- Peritektikum** \Rightarrow Punkt, in welchem inkongruentes Verhalten auftritt
 \Rightarrow Reaktion im Punkt vom Typ: Mineral-A + Schmelze = Mineral-B

Fall 1:

Schmelze und Mineralserien komplett mischbar

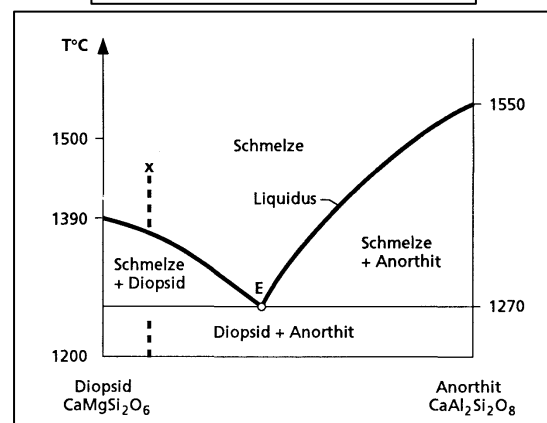
- \Rightarrow Albit – Anorthit System (Plagioklasreihe)
- \Rightarrow Forsterit – Fayalit System (Olivinreihe)



Fall 2:

Reine Mineralien sind nicht mischbar (binäres eutektisches System)

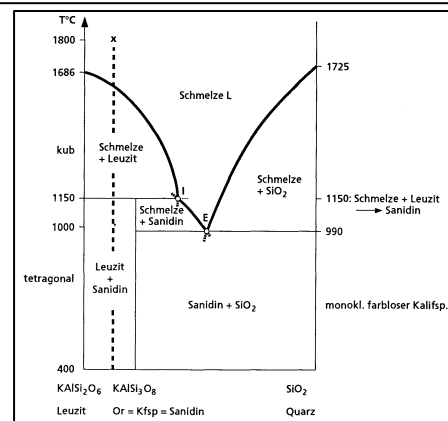
- \Rightarrow Diopsid – Anorthit System



Fall 3:

Aus zwei Mineralien werden eine oder mehrere Verbindungen gebildet (binäres peritektisches System)

- \Rightarrow Leuzit – Quarz System



3. Metamorphose

3.1 Definitionen und Begriffe für Gesteinsbestimmung

Gesteinsmetamorphose	Eine Gesteinsumwandlung durch p und T Änderungen in einem chemisch geschlossenen System bezeichnet man als Gesteinsmetamorphose. Das System ist dabei für Fluide (H ₂ O, CO ₂) offen, aber nicht für sonstige Komponenten.
Fluid	mobile hydrothermale Lösung, besteht hauptsächlich aus H ₂ O aber auch CO ₂
Metasomatose	Metasomatose bezeichnet eine Umwandlung eines Gesteins verbunden mit einer Veränderung des Gesteinschemismus und einer Stoffwanderung.
Mineralparagenese	Vergesellschaftung von Mineralien in einem Gestein.
Isograde	Das erstmalige Auftreten eines für bestimmte p-T Bedingungen charakteristischen Minerals im Feld definiert eine Isograde, welche in einer geologischen Karte eingetragen werden kann.
Indexmineral	Mineral, welches charakteristisch ist für bestimmte P-T Bedingungen und einen Gesteinschemismus. Ein Indexmineral dient oft der Einteilung eines Probengesteins in eine metamorphe Fazies.
Migmatit	Gestein, welches durch hochgradige Metamorphose in der Granulitfazies teilweise aufgeschmolzen wurde (Anatexis) und im Aussehen einer Mischung aus Granit und Gneis ähnelt.
Typische Metamorphose-Bedingungen	Druck: 0.5 - 30 kbar = 2 - 100 km Tiefe Temperatur: 200 - 1000 °C

Struktur: relativer Vergleich der Mineralien untereinander

Körnigkeit	⇒ <u>gleichkörnig</u> (granoblastisch – lepidoblastisch – nematoblastisch)
	⇒ <u>ungleichkörnig</u> (porphyroblastisch)
Kornform	⇒ <u>Idioblasten</u> (Minerale mit grosser Kristallisationskraft, eigene Form)
	⇒ <u>Xenoblasten</u> (Minerale mit nur geringer eigener Formbegrenzung)

Textur: räumliche Anordnung der Gemengeteile

⇒ massig/richtungslos	⇒ paralleltexturiert	⇒ faserig	⇒ gefältelt
⇒ linear, gestreckt, stängelig	⇒ geschiefert	⇒ Augentextur	⇒ lagig, gebändert

Unterscheidung Gefüge nach Schieferungsabstand (=Foliation)

- Phyllit:** Abstand der einzelnen Schieferungsflächen ist sehr gering (mm-Bereich)
Schiefer: brechen in mm-dünne Blätter und bestehen vorwiegend aus blättrigen Mineralien (Glimmer, Serpentin, Tonmineralien)
Gneis: brechen in cm-dicke Blätter/Bänder und bestehen hauptsächlich aus Quarz und Feldspat
Fels: brechen in keiner bevorzugten Ebene (massige Textur)

Namensgebung

Der Name eines metamorphen Gesteins setzt sich aus den häufigsten Mineralien und dem Gefüge zusammen. Je kleiner der Anteil eines Minerals am Gesteinsaufbau, desto weiter vorne steht das Mineral im Gesteinsnamen. Quarz und Feldspat werden normalerweise nicht genannt (z.B. Zweiglimmergneis, Granat-Stauroolith-Glimmer-Schiefer). Daneben existiert aber noch eine Vielzahl von Spezialnamen für bestimmte metamorphe Gesteine (z.B. Eklogit, Blauschiefer, Serpentin). Hierbei sind vor allem die Metabasika zu nennen, deren Namen mit den Fazies-Bereichen übereinstimmen.

Minerale-Gefüge, Art des metamorphen Gesteins nach Herkunft/Protolith + Fazies

Bsp:

Granat-Stauroolith-2-Glimmer-Schiefer, Metapelit in Amphibolit Fazies



Auflisten der Mineralien nach
zunehmendem Volumenanteil

3.2 Metamorphe Reaktionen

Antriebskräfte metamorpher Reaktionen sind einerseits Druckanstieg durch Kompression des Systems (Volumen-Abnahme) und andererseits Temperaturanstieg (Entropie Zunahme = Unordnung des Systems steigt).

- Polymorphe Mineralien** ⇒ Quarz = Coesit
 ⇒ Disthen = Andalusit = Sillimanit
 ⇒ Atome werden nur verschoben (deplaziv), Gerüst nicht komplett umgebaut
- Kompletter Umbau der Kristallgitter** ⇒ Serpentin = Olivin + Enstatit + H₂O
 ⇒ Atomspezies müssen über lange Distanzen transportiert werden
- Austausch von Ionen zwischen Mineralien** ⇒ Fe-Granat + Mg-Biotit = Mg-Granat + Fe-Biotit
 ⇒ Austausch einzelner Kationen durch Diffusion (stark T-abhängig)
 ⇒ Prinzip der Geothermobarometrie

Wenn bei der Hebung von Gesteinspaketen an die Oberfläche die Mineralien, welche bei hohen Metamorphose Bedingungen stabil sind, wieder zurückreagieren zu tiefen metamorphen Paragenesen spricht man von retrograden Reaktionen. Ein Beispiel ist die Entstehung von Amphibol und Plagioklas aus Granat (Symplektit) oder auch das Auftreten von retrogradem Chlorit. Retrograde Metamorphose wird unterbunden durch: schnelle Exhumierung, Panzerung von Mineralkörnern durch anderes Mineral oder fehlende Zufuhr von Fluiden.

3.3 Gesteinschemismus und Mineralogie

Einen Überblick über charakteristische metamorphe Mineralien für die verschiedenen Fazies und Gesteinschemismen findet ihr im nächsten Kapitel.

Gesteine	Ursprungsgestein (Protolith)	wichtigste Elemente	typische Mineralien
Metaultrasika	Peridotit	Si-arm, Mg	Serpentin, Olivin, Pyrop (Mg-Grt), Talk, Enstatit, Chlorit
Metagranitoide	Granit, Sandstein	Si-reich	Quarz, Feldspäte
Metakarbonate	Kalk, Dolomit	Ca, Mg, CO ₃	Tremolit, Calcit, Dolomit, Grossular (Ca-Grt)
Metapelite	Ton, Schieferton	Al, Si-reich, Alkalien (K, Na)	Alumosilikate, Staurolith, Glimmer, Almandin (Fe-Grt)
Metabasika	Basalt, Mergel	Fe, Mg, Al, Ca	Aktinolith, Glaukophan, Epidot, Hornblende, Pyrop (Mg-Grt)

3.4 Metamorphe Fazies

Die verschiedenen metamorphen Fazies entsprechen bestimmten Druck- und Temperaturbereichen und dienen der groben Einteilung von metamorphen Gesteinen. Namensgebend für die Fazies sind die metabasischen Gesteine (Blauschiefer -> Blauschieferfazies). Für alle anderen metamorphen Gesteine wird die metamorphe Fazies anhand des Gefüges und beobachteter Mineralparagenesen (siehe Faziestabelle auf der nächsten Seite) bestimmt.

	Metagranitoide (Quarz=Durchläufer)	Meta-Ultrasika	Metabasika	Metakarbonate (Calcit=Durchläufer)	Metapelite (Quarz=Durchläufer)
Grünschiefer-Fazies	Albit Chlorit Epidot ± Biotit	<u>Serpentin</u> Chlorit Brucit ± Olivin	Albit Chlorit <u>Aktinolith</u> <u>Epidot</u>	Dolomit ± Quarz Talk Hellglimmer <u>Phlogopit</u> ± Tremolit Albit	<u>Chloritoid</u> Biotit + Muskovit Chlorit Granat
Amphibolit-Fazies	Plagioklas <u>Kalifeldspat</u> Muskovit Biotit	Serpentin Olivin + Talk <u>Tremolit</u> , Chlorit	<u>Plagioklas</u> <u>Hornblende</u> Granat	Dolomit Tremolit <u>Diopsid</u> Olivin Plagioklas	Biotit + Muskovit Granat <u>Staurolith</u> <u>Disthen</u> ± Sillimanit
Granulit-Fazies	Plagioklas Kalifeldspat <u>Sillimanit</u> Pyroxene ± Granat	Olivin <u>Enstatit</u> <u>Mg-Al-Spinell</u> Diopsid	Plagioklas <u>Pyroxene</u> <u>Granat</u>	<u>Kalifeldspat</u> Diopsid Olivin Plagioklas	<u>Sillimanit</u> <u>Kalifeldspat</u> keine Glimmer
Blauschiefer-Fazies (Glaukophan-Lawsonit Schiefer Fazies)	Jadeit, Pyroxen	<u>Serpentin</u>	<u>Glaukophan</u> <u>Lawsonit/Epidot</u> Aragonit Jadeit	Dolomit Quarz ev. Aragonit Tremolit	Hellglimmer Chlorit
Eklogit-Fazies	Jadeit ± Granat	Olivin Enstatit Spinell <u>Granat (Pyrop)</u>	Na-Ca Pyroxen (<u>Omphazit</u>) <u>Granat (Pyrop)</u>		Granat Disthen Plagioklas

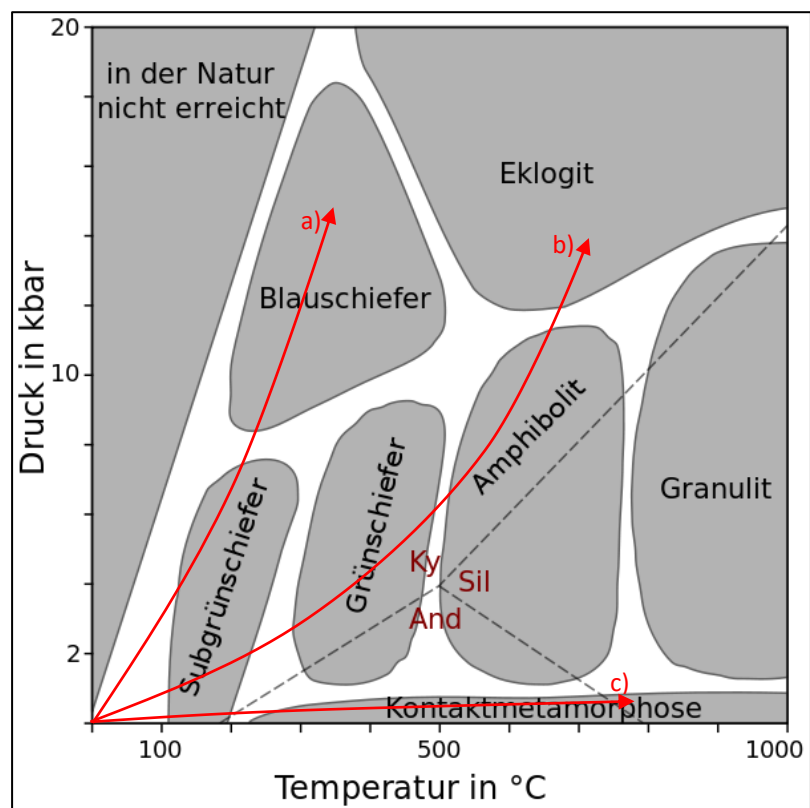
3.5 Metamorphose Pfade (Druck und Temperatur)

Bei der Gesteinsmetamorphose werden prinzipiell zwei Arten unterschieden:

- Regionalmetamorphose** ⇒ P + T Änderungen durch vertikale Bewegungen eines Gesteinspaketes
 ⇒ Tektonische Prozesse: Subduktion, Orogenese, Extension
- Kontaktmetamorphose** ⇒ Gesteinspaket bleibt statisch und wird nur lokal umgewandelt (keine Bewegung involviert)
 ⇒ Wärmezufuhr durch Intrusion und Assimilation von Nebengestein

Zusätzlich können grundlegend drei verschiedene prograde Metamorphose Pfade in einem P-T Diagramm unterschieden werden (siehe P-T Diagramm).

- a) Subduktion
- b) Orogenese
- c) Kontaktmetamorphose



4. Zusatzfragen

1. Welche (neun) Kriterien benutzt man zum makroskopischen Bestimmen von Mineralien? Nennen Sie für jedes Kriterium ein Beispiel, d.h. ein Mineral und dessen beobachtete Eigenschaft.
2. Erklären Sie die Voraussetzungen für und den Ablauf von explosiven Eruptionen. Was passiert in der aufsteigenden Schmelze? Welche Rolle spielt der Druck?
3. Magmen, die aus dem Mantel in die Kruste aufsteigen, entwickeln sich chemisch. Erklären Sie wie das funktioniert, was die prinzipielle chemische Evolution ist, und warum dies in welchem geotektonischen Setting die grösste Rolle spielt.
4. Was ist ein Manteladiabat, was eine potentielle Manteltemperatur? Wie sieht die Temperaturverteilung von der Oberfläche in den Mantel hinein aus und wie kommt diese zustande? Was passiert mit einem Mantel, der entlang eines Adiabaten aufsteigt, was mit einem Mantel, der entlang von einem Geotherm liegt? Illustrieren Sie diese Fragen mit **einer** Zeichnung.
5. Treibende Kräfte bei Reaktionen sind Entropie und Volumen. Erklären Sie das Prinzip und geben Sie je ein Beispiel. Welche praktische Bedeutung hat das für die Erde, was passiert mit zunehmender Temperatur, was mit zunehmendem Druck?
6. Erklären Sie den prinzipiellen Unterschied zwischen ozeanischer und kontinentaler Kruste und erläutern Sie welche praktischen Konsequenzen dieser Unterschied nach sich zieht. Wo bildet sich kontinentale Kruste, wo bildet sich ozeanische Kruste; warum ist die kontinentale Kruste so anders?
7. In der Vorlesung wurden drei prinzipielle (metamorphe) Reaktionstypen besprochen. Welche? Geben sie je ein qualitatives Beispiel. Wozu können solche Reaktionen benutzt werden?