© Jürg Meyer 2010
www.juerg-meyer.ch

Gesteinsmetamorphose und metamorphe Gesteine

Mit speziellem Bezug zu den Alpen und zur Alpenbildung

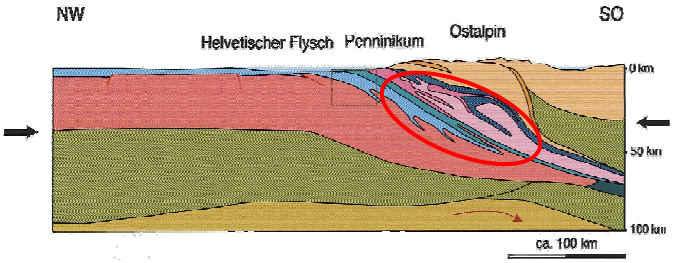
Um was es geht

Metamorphe Gesteine entstehen durch Umkristallisation in **festem Zustand** (also ohne Aufschmelzung!) von bestehenden Gesteinen, wenn diese in der Erdkruste erhöhten Temperaturen und Drücken als bei ihrer Entstehung ausgesetzt sind. Dies geschieht meist durch Versenkung infolge tektonischer Prozesse.

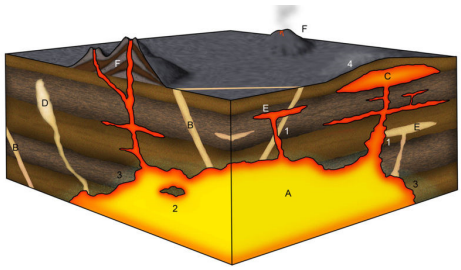
Temperatur- und Druckbereiche der Gesteinsmetamorphose: ab rund 150 °C / 1'000 bar bis rund 800 °C / 35'000 bar. Druck und Temperatur nehmen in der Erdkruste mit der Tiefe zu, wobei die Temperaturzunahme (der „geothermische Gradient“) je nach geologischer Situation von rund 15 °C pro km (z.B. Subduktionszonen) bis rund 100 °C pro km (z.B. in Vulkangebieten) variieren kann.

Man unterscheidet zwei Hauptarten von Gesteinsmetamorphose:

Regionalmetamorphose	**Kontaktmetamorphose**
Gesteine gelangen durch tektonische Prozesse, etwa in Subduktionszonen oder bei einer Gebirgsbildung, in tiefere Krustenbereiche mit erhöhten Temperaturen und Drücken.	Gesteine werden durch eindringendes Magma erhitzt, was nicht an eine Versenkung in grössere Tiefen gebunden ist.



Querschnitt durch die sich bildenden Alpen vor rund 35 Mio. Jahren. In den sich überschiebenden Decken werden die Gesteine regionalmetamorph umgewandelt, verbunden mit der Ausbildung einer Schieferung in Gesteinen mit Glimmermineralien.
Aus: Marthaler, Das Matterhorn aus Afrika, 2002



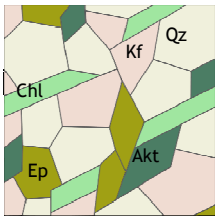
Blockdiagramm einer magmatischen Magmakammer mit aufsteigenden Intrusionen und Vulkanschloten. Um die roten Zonen herum erleiden die Umgebungsgsteine eine Kontaktmetamorphose.
Aus: Wikipedia

Daneben gibt es noch die Spezialfälle von **Dislokations**-, **Schock**- und **Hydrothermal**metamorphose.

Was passiert bei der Gesteinsmetamorphose?

Die Gesteine verändern bei einer metamorphen Umwandlung zwar ihre **mineralogische Zusammensetzung** und/oder ihre **Struktur**, **nicht** jedoch ihre **chemische Gesamtzusammensetzung** – mit einer wichtigen Ausnahme: bei zunehmender Temperatur verlieren die Gesteine **H_2O**, welches bei tieferen Temperaturen in den Mineralien eingebaut ist, sie werden in der Regel „trockener“. Das H_2O in metamorphen Gesteinen trägt entscheidend zur Geschwindigkeit der Umkristallisationen bei: je “trockener“ ein Gestein, desto reaktionsträger ist es. Dies ist der Hauptgrund, warum metamorphe Gesteine nach dem „Peak“ der Metamorphose bei der nachfolgenden Abnahme von Temperatur und Druck (durch Heraushebung) nicht wieder „zurück“ in den Ursprungszustand reagieren. Manchmal zeigen metamorphe Gesteine unterschiedliche Grade solcher „Rückreaktionen“, die man retrograde Metamorphose nennt.

Beispiel einer metamorphen Mineralreaktion in einem Metabasalt (Grüngestein)



Grünschiefer
oder Prasinit

Chlorit
+ Aktinolith
+ Epidot

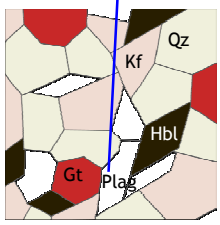
Prograde metamorphe Reaktion
Übergang von Grünschiefer zu Amphibolithfazies

Kalifeldspat Kf und Quarz Qz sind an der Reaktion nicht beteiligt und bleiben unverändert

Retrograde metamorphe Reaktion
spielt sich aus kinetischen Gründen meist kaum ab

Granat
+ Hornblende
+ Plagioklas
+ H_2O

H_2O
Das Reaktionswasser entweicht aus dem Gestein



Amphibolit

Es gibt Mineralien, die in verschiedenen Gesteinsgruppen vorkommen können – etwa Quarz und Feldspat, die in Sedimentgesteinen, Magmatiten und Metamorphiten auftreten. Daneben gibt es eine ganze Anzahl von Mineralien, die ausschliesslich in metamorphen Gesteine vorkommen, wie etwa Disthen, Aktinolith, Staurolith. Diese nennt man **metamorphe Mineralien**.

Spezialfälle Marmor und Quarzit

Gesteine mit einer sehr einfachen mineralogischen (und damit auch chemischen) Zusammensetzung verändern bei der Metamorphose lediglich ihre kristalline Struktur, aber nicht ihre mineralogische Zusammensetzung. Bekannteste Beispiele sind:

Kalkstein
besteht aus feinstkristallinem Calcit, $CaCO_3$





Marmor
besteht aus grobkristallinem Calcit, $CaCO_3$

Metamorphose
Um- und Rekristallisation bei gleich bleibender Mineralogie

Reiner Sandstein
besteht aus Quarzsandkörnern, SiO_2





Quarzit
besteht aus rekristallisiertem Quarz, SiO_2

Und wenn die Temperaturen noch höher werden?

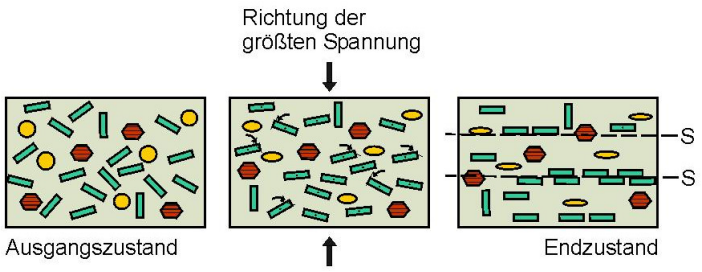
Bei sehr hohen Temperaturen (über ca. 650 °C) können metamorphe Gesteine aufzuschmelzen beginnen. Gesteine, welche in diesem Übergangsbereich zu den magmatischen Gesteinen erhalten bleiben, werden **Migmatite** genannt.



Verschiedene Migmatite aus den Schweizer Alpen. In allen erkennt man einen dunkleren Anteil mit noch metamorphem Gefüge und Schieferung, sowie einen hellen Quarz-Feldspat-Anteil, welcher aufgeschmolzen wurde und das Gefüge von einem magmatischen Gestein zeigt.

Schieferung, Schiefer und Gneis

Regionalmetamorphose ist mit erhöhten Drucken und meist auch Verformungsprozessen verbunden. Die erhöhten Drucke können zu einer **Schieferung** führen, falls die Gesteine plättchenförmige Mineralien aus der Grossfamilie der Schichtsilikaten enthalten (Glimmer, Chlorit, Serpentin, Tonmineralien etc.) Die Kristallplättchen richten sich senkrecht zum grössten Druck aus. Schieferung muss von sedimentärer Schichtung streng unterschieden werden, da beide von ganz unterschiedlichen geologischen Prozessen zeugen – im Felde nicht immer sofort evident.





Schieferung in schwach metamorphem Mergelschiefer



Schieferung in mittelstark metamorphem Gneis

Schiefer sind schwach bis mittelstark metamorphe, meist feinkörnige Gesteine, die eine engständige Schieferung aufweisen und in Platten von mm bis cm Dicke spalten. Die Glimmermineralien auf den Schieferungsflächen sind meistens von blossem Auge nicht erkennbar, sondern bilden schimmrig glänzende Flächen.

Gneise sind mittelstark bis hoch metamorphe Gesteine mit einer flaserig-unregelmässigeren Schieferung. Gneise spalten in cm bis dm dicke Platten. Die Glimmermineralien sind in Bahnen konzentriert und von blossem Auge auf den Schieferungsflächen deutlich erkennbar, die Gesteine weisen ein körniges Grundgefüge auf.

Protolith – das Ursprungsgestein

Jedes Gestein kann eine Metamorphose erleiden. Das Ausgangsgestein eines metamorphen Gesteins nennt man den **„Protolith“**, und es ist eine Aufgabe der Geologen, bei einem metamorphen Gestein den Protolith zu bestimmen. Es kann nämlich sein, dass ein bestimmtes metamorphes Gestein aus ganz unterschiedlichen Protolithen hat entstehen können. So gibt es z.B. Gneisarten wie etwa Biotit-Plagioklas-Gneise, die entweder aus einem magmatischen Gestein oder aus einem Sedimentgestein entstanden sein können.

Metamorphe Sedimentgesteine werden in ihrem metamorphen Zustand auch als **Para-Gesteine**, metamorphe magmatische als **Ortho-Gesteine** bezeichnet.

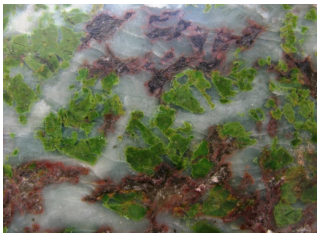
Mehrfache Metamorphose

Je nach geologischer Geschichte können Gesteine auch eine mehrfache metamorphe Überprägung zeigen. So gibt es etwa Gneise in Grundgebirgsdecke der Alpen, die bei der kaledonischen Gebirgsbildung (vor ca. 450 Mio.J.) unter hohem Druck, bei der varsizischen Gebirgsbildung (vor ca. 330 Mio.J.) unter hohen Temperaturen, und bei der alpinen Gebirgsbildung (vor ca. 35 Mio.J.) nochmals bei mittleren Temperaturen und Drucken umgewandelt wurden, und die Spuren aller Ereignisse noch in sich tragen. Man nennt solche Gesteine **polymetamorph**.

Ein anderes Beispiel dafür ist etwa der Allalin-Metagabbro in der südpenninischen Zermatt-Saas-Decke. Der Gabbro entstand in der ozeanischen Kruste, welche bei der Oeffnung des Tethysozeans vor rund 150 Mio. Jahren gebildet wurde. Er entging der endgültigen Subduktion in den Erdmantel und wurde bei der Alpenbildung in mehreren Phasen metamorphosiert.



Unmetamorpher Gabbro, mit erhaltenem magmatischem Gefüge und Mineralien.



1. Metamorhpose, T & P sehr hoch (Eklogitfazies). Andere Mineralien, erhaltenes magmatisches Gefüge.



2. Metamorphose, T mittel, P hoch (Blauschieferfazies), beginnendes Flasergefüge (grobe Schieferung)



3. Metamorphose, T & P mittel (Grünschieferfazies), verbunden mit intensiver Verschieferung und Faltung.

Falten – wie biegt man harte Gesteine?

Verformungen der Gesteine wie etwa Deckenüberschiebungen führen oft zu Verfaltungen. Verfaltungen bei höheren Temperaturen resultieren in Faltenstrukuren, die den Anschein erwecken als seien die Gesteine geflossen. Doch alle diese Prozesse fanden durch langsame Um- und Rekristallisation im festen Zustand statt – so wie auch das Eis in einem Talgletscher sich langsam so verformt, dass der Gletscher als Ganzes fliessen kann.



Grosse Falten in leicht metamorphem Kalkstein, Brienz BE



Grossfalte in stark metamorphem Marmor, Campolungo, TI



Kleinfalten in mittelstark metamorphem Gneis, Randa, VS



Enge Kleinfalten in mittelstark metamorphem Marmor, Saas Fee, VS

Die ewige Verwirrung: Granit oder Gneis?

Wird ein Granitkörper – etwa während der Alpenbildung – metamorphosiert und deformiert, so erfassen Verformung und Umkristallisation den Granit meist nicht homogen, sondern entlang von diskreten Scherzonen, die ihn dann wie ein Netzwerk durchziehen. In der Mitte einer solchen Scherzone kann ein Granit vollständig zu einem feinkörnigen Schiefer umgeformt sein, und dann folgt ein allmählicher Übergang über einen gneisartigen Granit hinein in einen verschonten Bereich von völlig undeformiertem Granit. In den Gebieten stärkerer alpiner Metamorphose (etwa Tessin und Walliser Alpen) wurde ein Grossteil der Granite zu Gneis oder Augengneis umgewandelt, und geschonte Bereiche mit undeformiertem Granit sind die Ausnahme, und umgekehrt ist in Gebieten mit fehlender oder schwacher alpiner Metamorphose (etwa Urner Alpen und Engadin) der Grossteil der Granite undeformiert, vergneiste und verschieferte Partien sind die Ausnahme. In diesen Granitgebieten bilden die verschieferten Partien meistens die Scharten und Couloirs, weil dort die Verwitterung am besten angreifen konnte.

Ein bedeutender Teil der Gneise der Alpen waren ursprünglich Granite, man bezeichnet sie auch als Granitgneise. Aber als Gneise liegen auch metamorphosierte andere Gesteine vor, etwa ehemals sandig-tonige Sedimentgesteine oder Grauwacken, die zu Biotit-Plagioklas-Gneisen umgewandelt wurden.



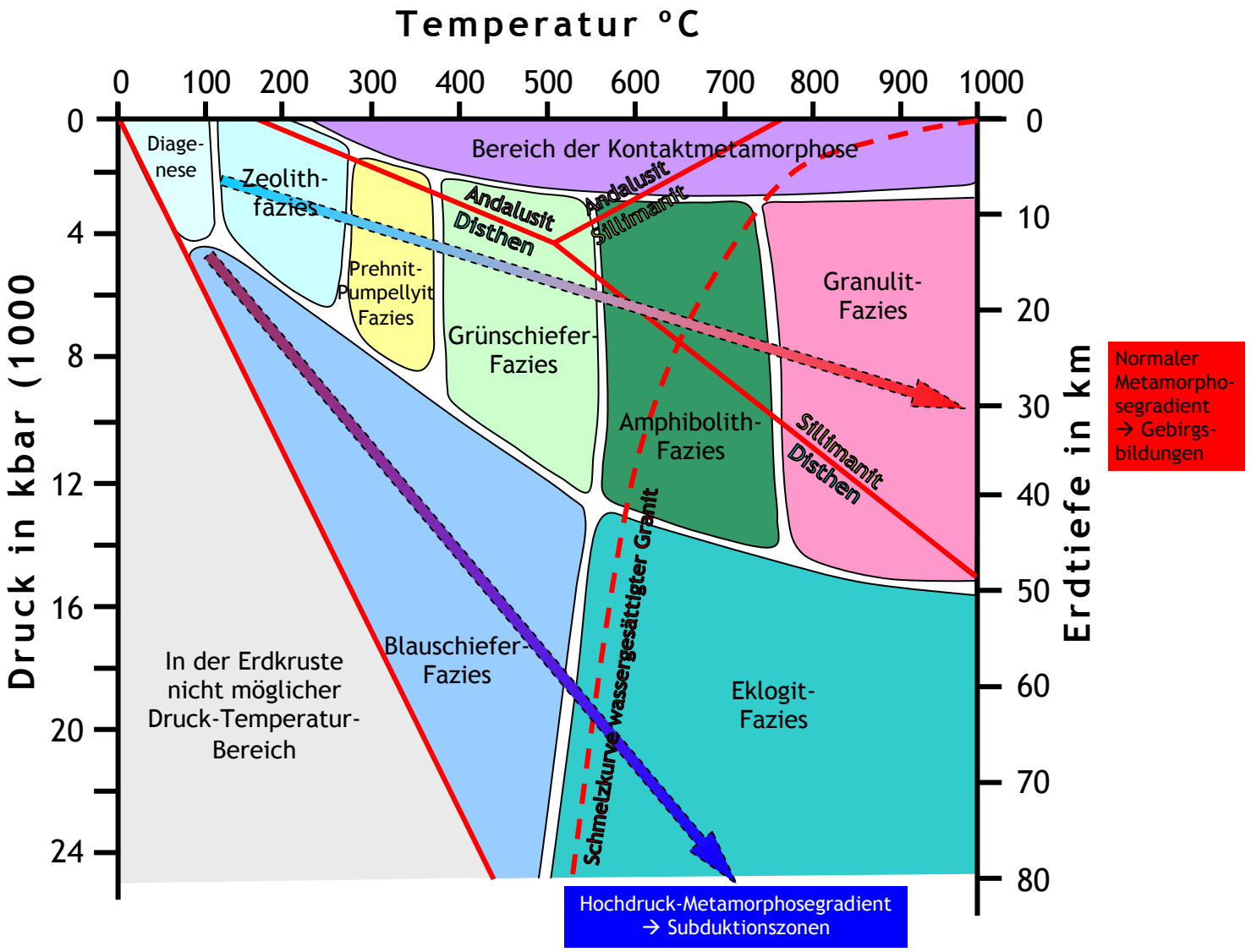
Arolla – Granit aus der der Walliser Dent-Blanche – Decke (Ostalpin, afrikanisches Grundgebirge) mit von links nach rechts zunehmender Vergneisung, vom undeformierten Granit bis zum stark deformierten Granitgneis – eine Folge der Metamorphose bei der Alpenbildung



Porphyrischer Granit (links, Bergeller Granit) und zwei Stadien zunehmender Verngeisung zu Augengneis (Randa-Augengneis, Wallis, Mischabel-Siviez-Decke, mittelpenninisches Grundgebirge).

Druck-Temperaturbereiche der Gesteinsmetamorphose

Man gliedert die Metamorphosetypen und deren Druck-Temperaturbereiche in einem Druck P (=Tiefe) – Temperatur T – Diagramm. Die wichtigsten Druck-Temperaturzonen werden als Felder von „metamorpher Fazies“ unterteilt, denen man Namen nach typischen Gesteinen dieser PT-Bereich zugeordnet hat:



Weit verbreitete metamorphe Gesteine – vom Protolith zum hochgradigen Metamorphit

Unmetamorph	Schwach metamorph →	mittelstark metamorph →	stark metamorph
Kalkstein	Kalkmarmor, zunehmend grobkörnig		
Dolomit	Dolomitmarmor, zunehmend grobkörnig		
Tonstein	Tonschiefer	Phyllit	Glimmerschiefer	Metapelit-Granulit
Mergel	Mergelschiefer	Kalkphyllit	Kalkglimmerschiefer / Hornblendeschiefer	Granulit
Quarz-Sandstein	Quarzit		
Konglomerat	Metakonglomerat	Quarz - Augengneis	
Granit	Metagranit	Granitgneis / Augengneis	
Basalt	Metabasalt	Grüngestein / Prasinit	Amphibolith	basischer Granulit

Diese Abfolgen gelten für einen normalen Metamorphosegradienten. Bei Kontakt- oder Hochdruckmetamorphose können aus den verschiedenen Protolithen weitere metamorphe Gesteinstypen entstehen.

Zwei wichtige metamorphe Gesteinsserien: Metapelite und Metabasalte

Es gibt zwei wichtige Gesteinsgruppen, die bei unterschiedlichen Metamorphosegraden besonders deutlich verschiedene metamorphe Gesteine ergeben, und die für die Beschreibung und Nomenklatur verschiedener Metamorphosegrade und -typen bedeutsam sind. Es sind dies einerseits die Tonsteine, im metamorphen Zustand als „Metapelite“ zusammengefasst, sowie die Basalte, im metamorphen Zustand als „Metabasalte“ bezeichnet. Sie helfen auch dem Feldgeologen häufig für eine grobe Einschätzung des Metamorphosegrades einer Gesteinsserie im Gelände. Im jeweiligen Druck-Temperaturdiagramm können die unten dargestellten metamorphen Gesteinsgruppen unterschieden werden.

Metapelite
= metamorphe sedimentäre Tonsteine

Metabasalte
= metamorphe Basalte oder Gabbros

