

Die wichtigsten Gesteine und ihre Entstehung: (3) Metamorphe Gesteine

Magmatische Gesteine
(Magmatite)



Vulkanite

Schnelle
Abkühlung

Plutonite

Langsame
Abkühlung

Metamorphe Gesteine
(Metamorphite)

Entstehen aus
anderen Gesteinen

Sedimentgesteine
(Sedimente)

z.B. Kalkstein, Tonstein, Sandstein

Die wichtigsten Gesteine und ihre Entstehung: (3) Metamorphe Gesteine

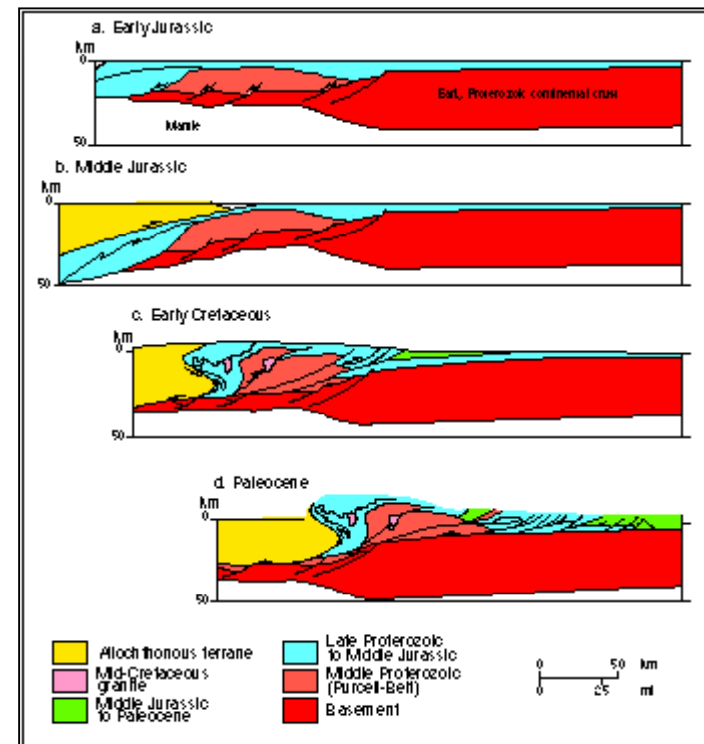
Metamorphose

Metamorphose = Gesteinsumwandlung. Man unterscheidet **Regional-** und **Kontaktmetamorphose**.

► **Ausgangsmaterial:** Magmatische & sedimentäre Gesteine, oder andere Metamorphite (Poly-metamorphose!).

► **Ursache:** Druck und/oder Temperaturänderungen innerhalb der Erdkruste infolge geodynamischer Prozesse (Subduktion, Orogenese, Erosion & Exhumierung).

→ p-T-t Pfade!!!



Metamorphose

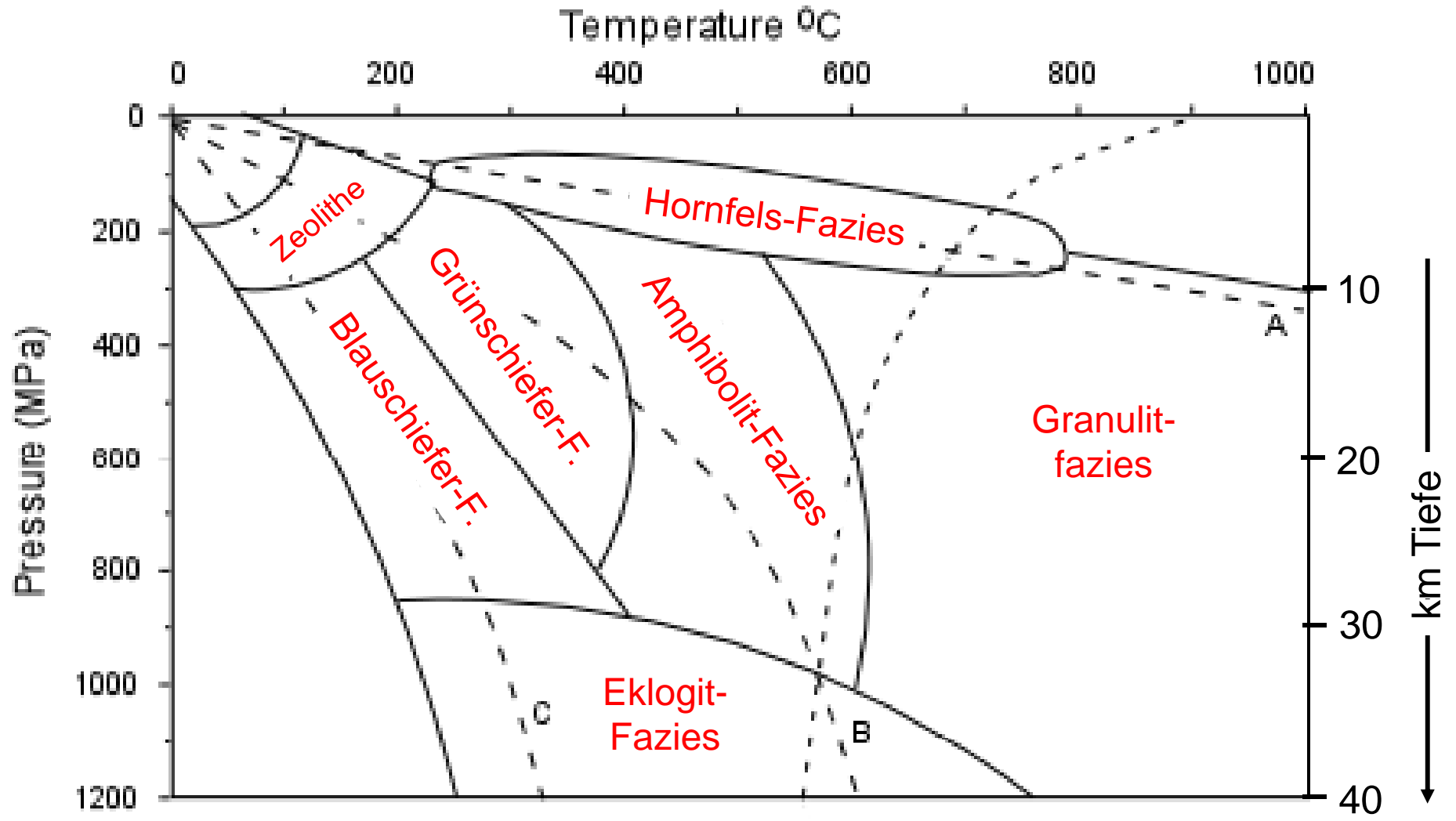
▶ **Grund:** Minerale sind nur unter **bestimmten p-T-Bedingungen** stabil. Ändern sich diese, verändern die Minerale ihre **Gitterstruktur**, jedoch nicht zwingend ihre chemische Zusammensetzung („isochemische Umwandlung“).

▶ **Wirkungen:**

(1) **Gefügeänderung** der Gesteine (*Gefügeänderung* = strukturelle und texturale Änderungen: z.B. Bildung einer *Schieferung* = **Foliation**, Mineralwachstum, Rekristallisation (mit zunehmender Temperatur).

(2) **Mineralreaktionen** führen zur Neubildung von Mineralen, entscheidend: **Fluide Phasen**

Metamorphe Faziestypen



Metamorphe Faziestypen („in Worten“)

Zeolithfazies:	Diagenesebereich (bis max. 250°C)
Grünschieferfazies (Epizone):	Schwachgradige M. (200-400°C)
Amphibolitfazies (Mesozone):	Mittelgradige M. (400-600°C)
Granulitfazies (Katazone):	Hochgradige, temperaturbetonte M.
Eklogitfazies:	Hochgradige, druckbetonte M.
Blauschieferfazies:	Druckbetonte Metamorphose
Hornfelsfazies:	Temperaturbetonte Metamorphose

Welcher metamorphe Faziesbereich vorliegt, hängt vom jeweiligen „geodynamischen Setting“ ab!

Metamorphe Faziestypen: Nach „Setting“ (I)

Regionalmetamorphose

In **Orogenen**, also in tektonisch aktiven (kompressiven) Regionen. Voraussetzung für die RM ist eine **Krustenverdickung** und damit eine „Versenkung und Aufheizung“ der Gesteine.

Kontaktmetamorphose

Am **Kontaktbereich** von **Intrusionen** werden die Nebengesteine infolge der Aufheizung in **Kontaktmetamorphite** umgewandelt.

Hochdruckmetamorphose

Typisch in **Subduktionszonen** mit anormal niedrigem **geothermischem Gradienten** (6-10°C/km). Hoher Druck, relativ niedrige Temperatur.

Metamorphe Faziestypen: Nach „Setting“ (II)

Ozeanbodenmetamorphose

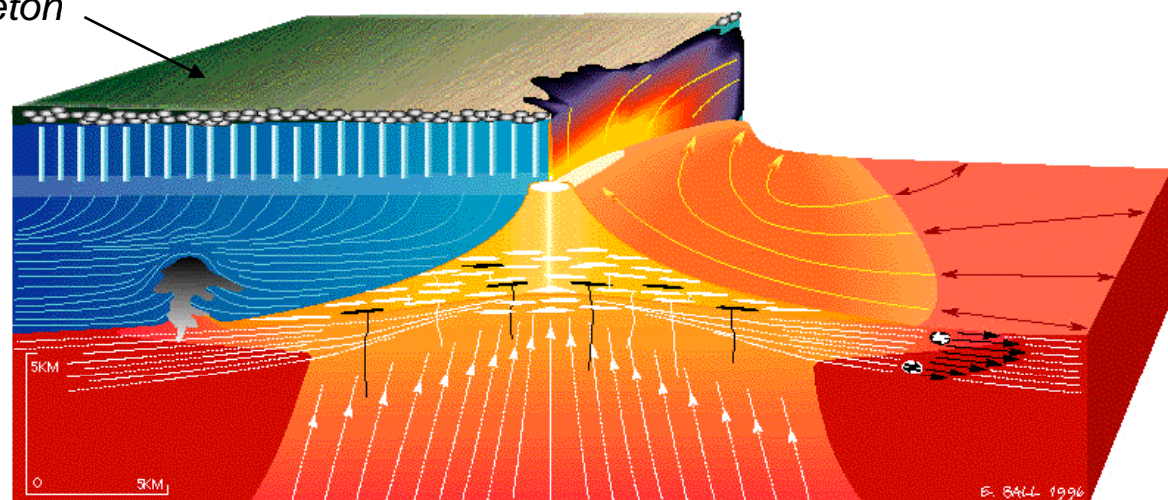
Starkes Relief an **mittelozeanischen Rücken**, verbunden mit Abkühlung und „Rifting“, erzeugt tiefe **Spaltensysteme**, an denen Meerwasser bis in den **oberen Erdmantel** gelangt. Dadurch werden im heißen (und bis dahin trockenen!) Gestein (*Peridotit!!*) chemische Reaktionen induziert: **Ozeanbodenmetamorphose**.

Tiefsee-Sedimente: Cherts, Tiefseeton

Kruste: Basalt

Kruste: Gabbros

Mantel: Peridotite



From: A. Nicolas

Metamorphe Minerale

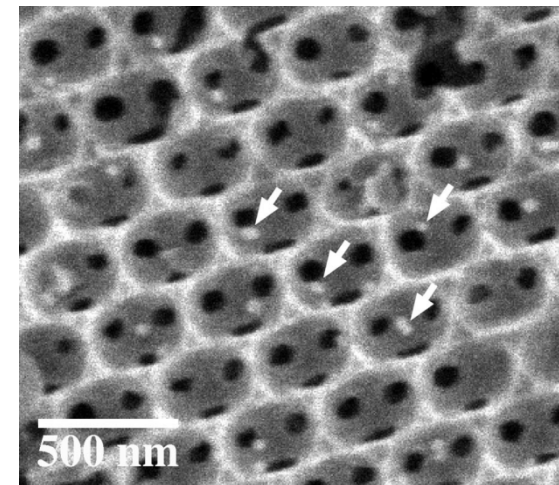
Neben **Glimmern** und **Amphibolen** spielen in metamorphen Gesteinen die folgenden Minerale eine wichtige Rolle:

► Zeolithe (Gerüstsilikate)

Sehr poröse Struktur, eingelagerte Wassermoleküle („Zeolithwasser“) und Kationen (Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Ba^{2+}). Sind **Kationenaustauscher**. Zeolithwasser wird reversibel abgegeben.

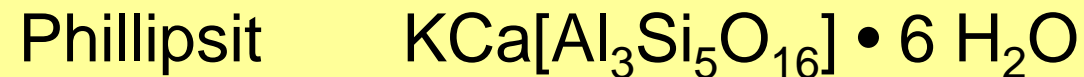
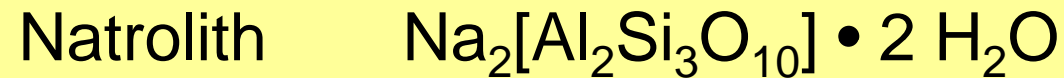
Entstehen aus Alumosilikaten bei der **Diagenese** bzw. bei **niedriggradiger Metamorphose**.

Man unterscheidet makroskopisch:
Faserzeolithe, Blätterzeolithe, Würfelzeolithe.



Metamorphe Minerale

Einige Zeolithe:



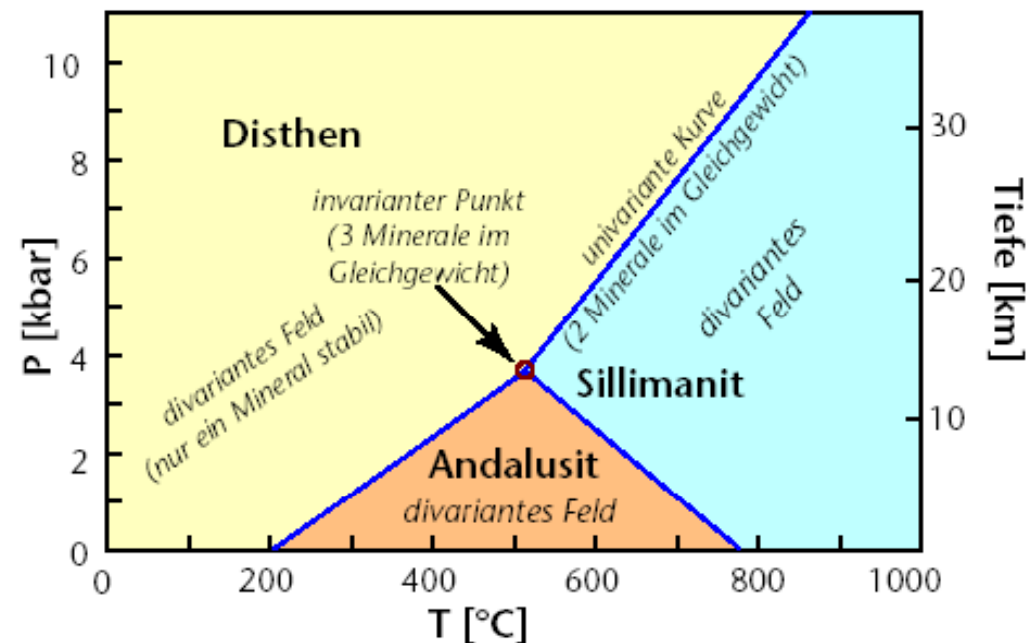
Metamorphe Minerale

► Al₂SiO₅ – Gruppe (Inselsilikate)

Disthen (triklin) - **Andalusit** (rhombisch) - **Sillimanit** (rhombisch)

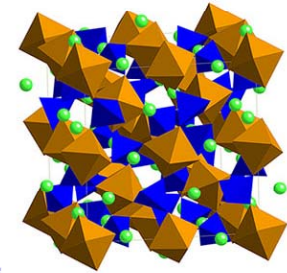
Idiomorphe (trimorphe) Gruppe, welche Modifikation stabil ist, hängt von den pT-Bedingungen ab:

Minerale der Al₂SiO₅-Gruppe sind typische **Indexminerale**, die den Grad der Metamorphose bzw. den **Metamorphosetyp** anzeigen (*Disthen* ist typisch für die druckbetonte Metamorphose, *Andalusit* ist typisch für die temperaturbetonte Metamorphose).



Metamorphe Minerale

► Granat – Gruppe (Inselsilikate)



Wichtige Vertreter dieser kubischen Mineralgruppe sind:

Pyrop: $\text{Mg}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$ tiefrot

Almandin: $\text{Fe}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$ rotbraun - braun

Pyrop und Almandin bilden eine **vollständige Mischkristallreihe**,
(Mg und Fe können teilweise durch Mn ersetzt werden).

Grossular: $\text{Ca}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$

Andradit: $\text{Ca}_3\text{Fe}_2[\text{SiO}_4]_3$



Auch hier vollständige Mischkristallbildung.

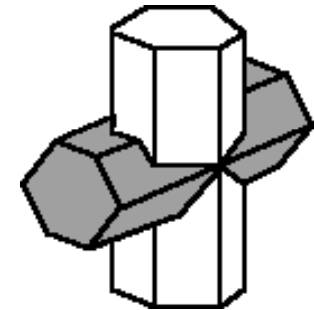
Granate besitzen eine **sehr dichte** Gitterstruktur (Dichte zwischen 3,5 - 4,5 g/cm³), weshalb sie nur bei hohen Drücken gebildet werden. Sind typisch für metamorphe Gesteine und kommen nur in solchen vor.

Metamorphe Minerale

► Staurolith (Inselsilikat)

$\text{Fe}_2\text{Al}_9[\text{O}_6(\text{O},\text{OH})_2(\text{SiO}_4)_4]$ *Wasserhaltiges Al-reiches Inselsilikat*

Bildet häufig sog. **Durchkreuzungszwillinge**, mit einem Kreuzungswinkel von $\sim 60^\circ$ oder $\sim 90^\circ$. Kommt häufig zusammen mit *almandinreichem Granat* und *Biotit* vor.

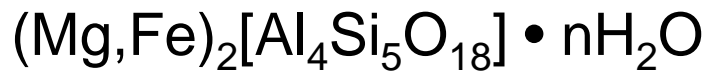


► Epidot (Gruppensilikat: $[\text{Si}_2\text{O}_7]$)

Ca-Al-Fe-Gruppensilikat. Zur Epidotgruppe gehört auch **Klinozoisit**, der weitgehend Fe-frei ist (Al:Fe^{III} = 2:1 im Epidot, 3:0 im Klinozoisit). Es liegt vollkommene Mischbarkeit vor.

Metamorphe Minerale

► Cordierit (Ringsilikat)



Typischerweise in **Kontaktmetamorphiten** zu finden.

► Talk (Schichtsilikat)

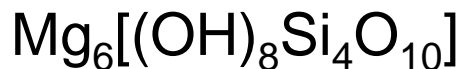


Entsteht metamorph-metasomatisch typischerweise als **sekundäres Umwandlungsprodukt** aus mafischen Mineralen (z.B. Olivin, Pyroxen).

Gemahlen als **Talkum** industrielle Verwendung, massiver Talk ist bekannt als **Speckstein** (sehr weiches Material)

Metamorphe Minerale

► Serpentin-Gruppe (Schichtsilikat)



Chrysotilasbest

Polymorphe Gruppe mit rhombischer, monokliner oder trikliner Symmetrie. Wichtige Vertreter sind **Chrysotil** (=Faserserpentin, Chrysotilasbest) und **Antigorit** (=Blätterserpentin).

Entsteht wie Talk aus Mg-reichen, d.h. aus **mafischen Mineralen** der ozeanischen Kruste und des Mantels: **Ozeanbodenmetamorphose**

► Chlorit-Gruppe (Schichtsilikate)

Ähnlich dem Talk, jedoch **höherer Fe-Gehalt**, häufig grün gefärbt. Geringe Härte und gute Spaltbarkeit. Typisch in **niedriggradigen Metamorphiten** (**Grünschiefern**) und *sekundär* aus mafischen Mineralen (Biotit, Amphibol, Pyroxen) oder **retrograd** aus Granat.

Metamorphe Minerale

► Glaukophan (Natronamphibol)



Glaukophan

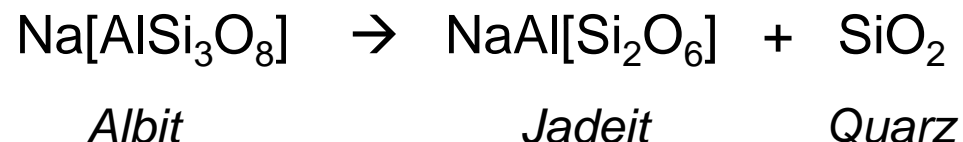


Typische in **Hochdruckmetamorphiten**, hier namensgebend:
Glaukophanschiefer (= **Blauschiefer** wg. der schwach bläulichen Farbe des Glaukophans).

► Jadeit (Na-Pyroxen)



Ebenfalls typisch in **Hochdruckmetamorphiten**, fast immer gemeinsam mit Glaukophan (typische **Paragenese!**). Entsteht bei Druckzunahme durch den Zerfall von Albit:



Metamorphe Minerale

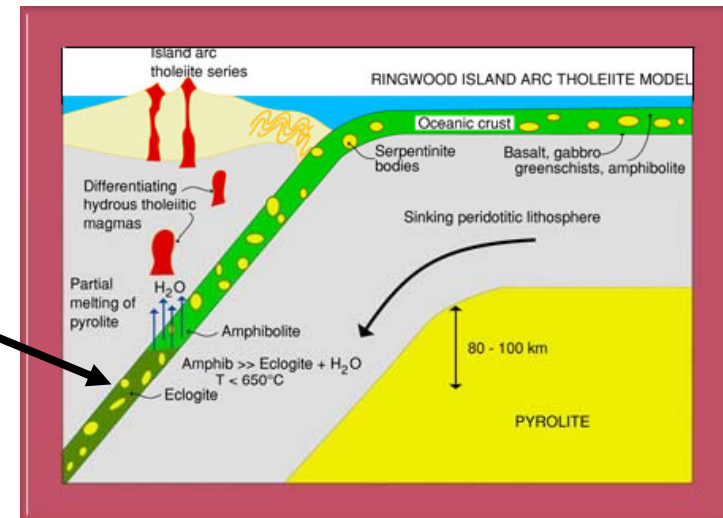
► Omphacit (komplexer Pyroxen)

Mischkristall aus Jadeit und Augit: $(\text{Na,Al,Ca,Mg,Fe})_n [\text{Si}_2\text{O}_6]$

Typisch in **Ultrahochdruck-Gesteinen** der **Eklogit-Fazies**, dann häufig zusammen mit Granat



Eklogit mit Granat (rot) und Omphacit (grün)

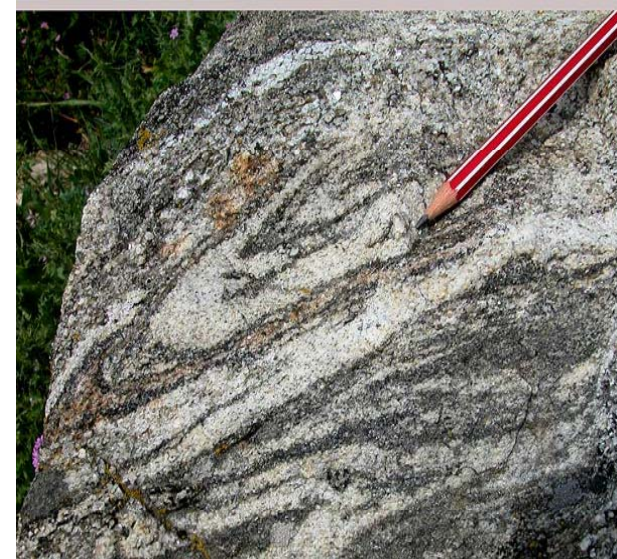


Metamorphose: Gesteine der Regionalmetamorphose

Gesteine der Regionalmetamorphose

Welche Gesteine bei der Regionalmetamorphose entstehen, hängt vom **Ausgangsmaterial** (Protolith, Edukt) und von den **p-T-Bedingungen** ab.

So entsteht z.B. aus *Granit und Grauwacken*, die chemisch & mineralogisch oft sehr ähnliche Zusammensetzung haben (aber völlig unterschiedlich entstanden sind), bei der Regionalmetamorphose dasselbe metamorphe Gestein: **Gneis**



Metamorphose: Gesteine der Regionalmetamorphose

Weisschiefer

Aus Metapeliten entstehen **prograd** unter sehr hohen Drucken unter Mg-Zufuhr aus Chlorit – Serizit – Quarz Schiefen sog. **Weisschiefer** mit Talk, Disthen & Qz. Retrograd können dabei Cordierit, Enstatit & Chlorit auftreten.

Granulite

entsteht trocken unter **granulitfaziellen Bedingungen** mit *granoblastischem Gefüge* aus mafischen – felsischen Edukten:

Charnockit = felsischer Granulit

Enderbit = mafischer Granulit

Typische Minerale: Qz, Fsp, Gt, Disth, Sill, Opx, Cpx. Dunkle Gemengteile sind i.Allg. wasserfrei: Pyroxen & Granat.

Die wichtigsten Gesteine und ihre Entstehung: (3) Metamorphe Gesteine

Metamorphose: Gesteine der Regionalmetamorphose

Ausgangsmaterial (Protolith)	Sub-Grünschiefer- Fazies	Grünschiefer- Fazies	Amphibolit- Fazies	Granulit/Eklogit- Fazies
Tonstein	Tonschiefer (Metapelit)	Phyllit (Serizit, Qz)	Glimmerschiefer (Musk, Qz, Gt)	Paragneis (Qz, Fsp, Bt)
Mergel	Schiefer	Kalkphyllit (Calcit, Serizit)	Kalkglimmer- schiefer (Cc, Mk)	Kalksilikat- schiefer, -fels
Sandstein	Quarzit	Quarzit	Quarzit	Quarzit
Arkosen	Metaarkose (Qz, Fsp, Serizit)	Paragneis (Qz, Fsp, Musk)	Paragneis (Qz, Fsp, Musk)	Paragneis
Grauwacken	Metagrauwacke (Qz, Fsp, Serizit)	Paragneis (Qz, Fsp, Musk)	Paragneis	Paragneis
Kalk, Dolomit	keine Veränderung	Marmor	Marmor	Marmor
Granit, Rhyolith	keine Veränderung	Metagranit bzw. Porphyroid (Qz, Fsp, Ser.)	Orthogneis (Qz, Fsp, Bt, Mk)	Orthogneis (Qz, Fsp, Bt, Mk)
Basalt, Gabbro	keine Veränderung	Grünschiefer (Chl, Plag, Ep, Akt)	Amphibolit (Amph, Plag, Gt)	Eklogit (Gt, Omph)

Metamorphose: Gesteine der Hochdruckmetamorphose

Gesteine der Hochdruckmetamorphose

Glaukophanschiefer (Blauschiefer)

Entstehen aus subduzierten vulkanogenen & sedimentären Gesteinen mit u.a. Glaukophan, Muskovit, Chlorit, Jadeit, Albit, Epidot, Qz, Aragonit, etc:



Eklogite

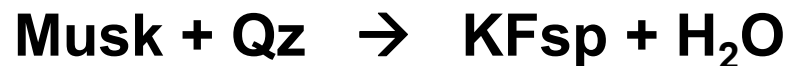
Entstehen aus mafisch-ultramafischen Gesteinen (Diorit, Basalt, Gabbro, Peridotit) unter trockenen Bedingungen. Typische Mineralparagenese: **Granat + Omphacit**, \pm Qz, \pm Disthen, \pm Hellglimmer, \pm Amphibol, \pm Rutil.

Bei Anwesenheit von H_2O ist die Eklogit-Paragenese nicht stabil und wandelt sich in **Plag + Hbl** um.

Metamorphose: Partielles Aufschmelzen: Anatexis

Migmatite I

Bei mehr als 650-700°C findet in *felsisch-intermediären* Gesteinen folgende Reaktion statt:



Freiwerdende Fluide führen zur **Anatexis**

Sind keine Fluide vorhanden, entstehen Gesteine der **Granulitfazies**, d.h. keine Schmelzbildung. Schmelzbildung dann erst bei 700 - 800°C.

Migmatite sind also **partiell aufgeschmolzene** Gesteine, die bei der **Anatexis** (=partielle Aufschmelzung) krustaler (also intermediär bis felsischer) Gesteine (z.B. Gneis) entstehen.

Metamorphose: Partielles Aufschmelzen: Anatexis

Migmatite II

Bei Migmatiten (Anatexiten) unterscheidet man die **neugebildete Schmelze** (=Leukosom, vorwiegend helle Minerale wie Plag, Qz) vom **Restit** (= **Melanosom**, meist reich an Biotit, Hornblende, z.T. Hellglimmer).

Da bei der Anatexis aus Gneis **granitische Schmelzen** entstehen, unterscheidet man bei den Graniten solche, die aus Metasedimenten entstanden sind (**S-Typ Granite**) von solchen, die primär magmatisch entstanden sind (**I-Typ Granite**).

Leukosom = ehemalige Schmelze



Melanosom = Rest

Die wichtigsten Gesteine und ihre Entstehung: (3) Metamorphe Gesteine

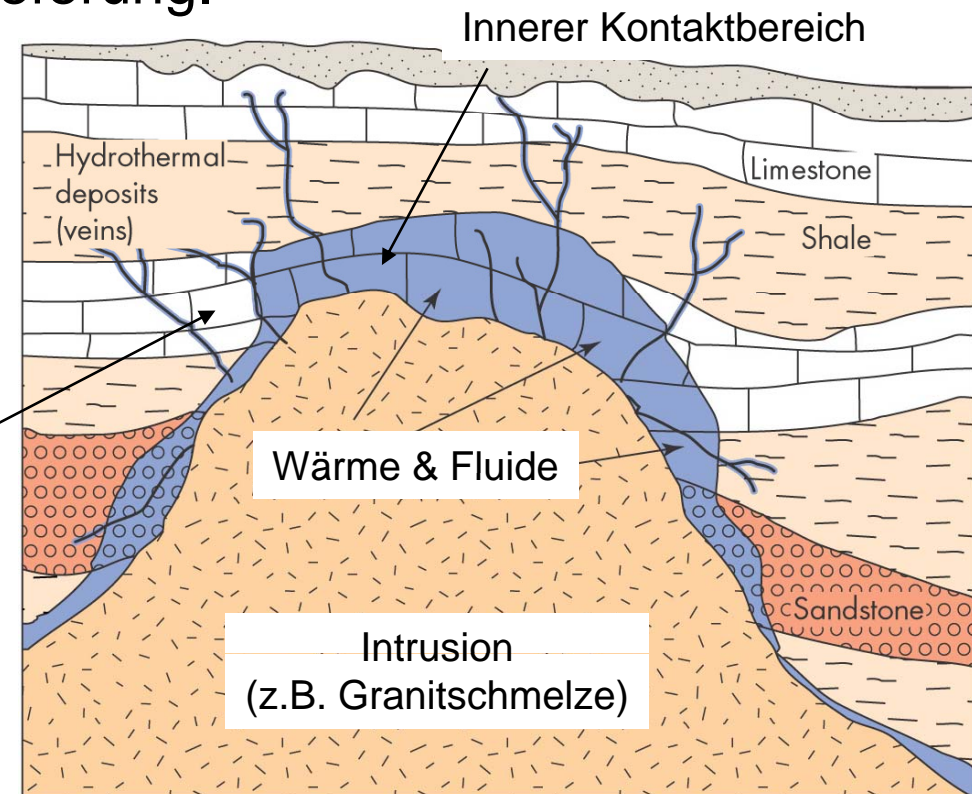
Metamorphose: Gesteine der Kontaktmetamorphose

Gesteine der Kontaktmetamorphose

Kontaktmetamorphose = **Hochtemperaturmetamorphose** bei niedrigen Drucken im **Kontaktbereich** von Intrusionen (Plutonen).
Kein Stress, damit oft keine Schieferung.

Findet v.a. bei **Granit-intrusionen** statt, da viel fluide Phase als Reaktionsmedium zur Verfügung steht:
Metasomatose.

Äusserer Kontaktbereich



Die wichtigsten Gesteine und ihre Entstehung: (3) Metamorphe Gesteine

Metamorphose: Gesteine der Kontaktmetamorphose

Ausgangsmaterial (Protolith)	Innerer Kontakthof rd. 500 – 550°C	Äusserer Kontakthof <500°C
Tonstein	Hornfels (Ser, And, Cord, Bt, Musk, Qz)	Knotenschiefer
Kalk	Marmor, Kalksilikatmarmor	
Mergel	Kalksilikatfels, Skarn (Diopsid, Gros, Epid, Hbl, Cc, Wo, Plag)	
Sandstein	Quarzit	
Kohle	Anthrazit	

Metamorphose: Gesteine der Kontaktmetamorphose

Hornfels

Dichtes, relativ *feinkörniges Gefüge*, vollständig *rekristallisiert*.

Mineralbestand variabel mit Andalusit, Cordierit, Biotit, Muskovit, Qz, \pm Plag (Edukt: Pelite), bzw. mit Diopsid, Grossular, Vesuvian, Epidot, \pm Cc, \pm Wo, \pm Plag (Edukt: Mergel/Kalkmergel).

Knoten-, Garben- und Fruchtschiefer

Unvollständige Umwandlungsprodukte der Kontaktmetamorphose.

Oft **Porphyroblasten** (Knoten, Garben) aus Cordierit, Andalusit, Biotit, Amphibol in wenig veränderter Grundmasse (Edukt: Tonschiefer, Phyllit).

Die wichtigsten Gesteine und ihre Entstehung: (3) Metamorphe Gesteine

Metamorphose: Gesteine der Kontaktmetamorphose

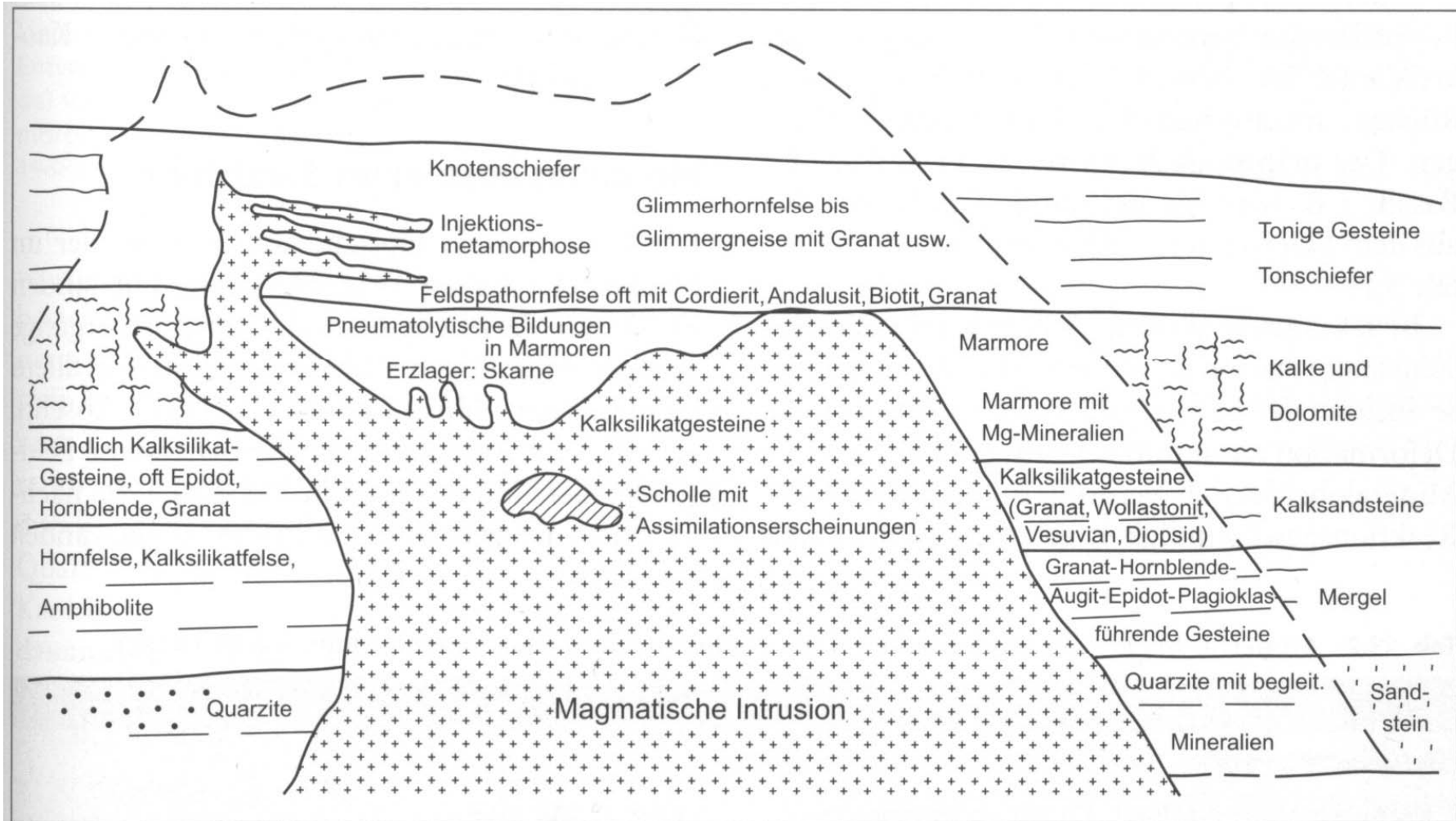
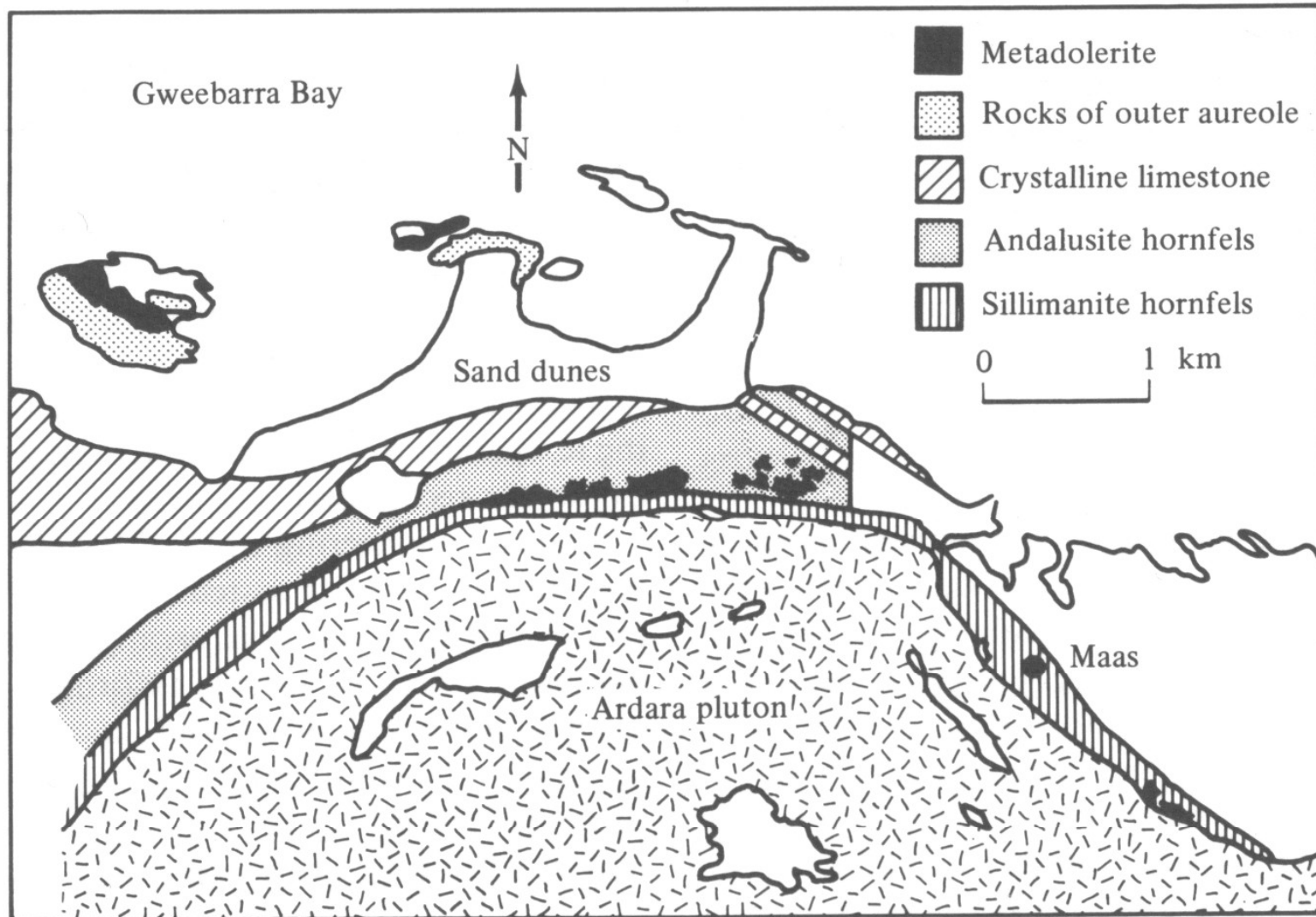


Abb. 13.4 Schema der Kontaktmetamorphose und ihrer Produkte im Kontakthof (gestrichelt) einer Intrusion (vgl. auch Tab. 13.3) (aus ZEIL, 1990).

Die wichtigsten Gesteine und ihre Entstehung: (3) Metamorphe Gesteine

Metamorphose: Gesteine der Kontaktmetamorphose



Metamorphose: Gesteine der Ozeanbodenmetamorphose

Gesteine der Ozeanbodenmetamorphose

Bei der **Ozeanbodenmetamorphose** entstehen aus den mafischen Gesteinen der ozeanischen Lithosphäre „**Grünsteine**“ mit i.W. **Chlorit, Epidot & Hornblende**.

Aus den ultramafischen Gesteinen entstehen **Serpentinite** mit den Mineralen **Serpentin & Talk**.

Serpentinit

