



## 5 Was ist Metamorphose?

- Abgrenzung der P–, T–Bedingungen
- Metamorphe Fazies, Indexmineral
- Metamorphosetypen

# Sedimentgesteine

- **Sedimentgesteine**

entstehen aus Sedimenten, die an der Oberfläche der kontinentalen oder ozeanischen Erdkruste - an Land, in Meeren, in Seen und in Flüssen - durch Ablagerung von losen oder in Lösung herbeigeführtem Material gebildet werden.

- **Klastische Sedimentgesteine**

- **Chemische Sedimentgesteine**

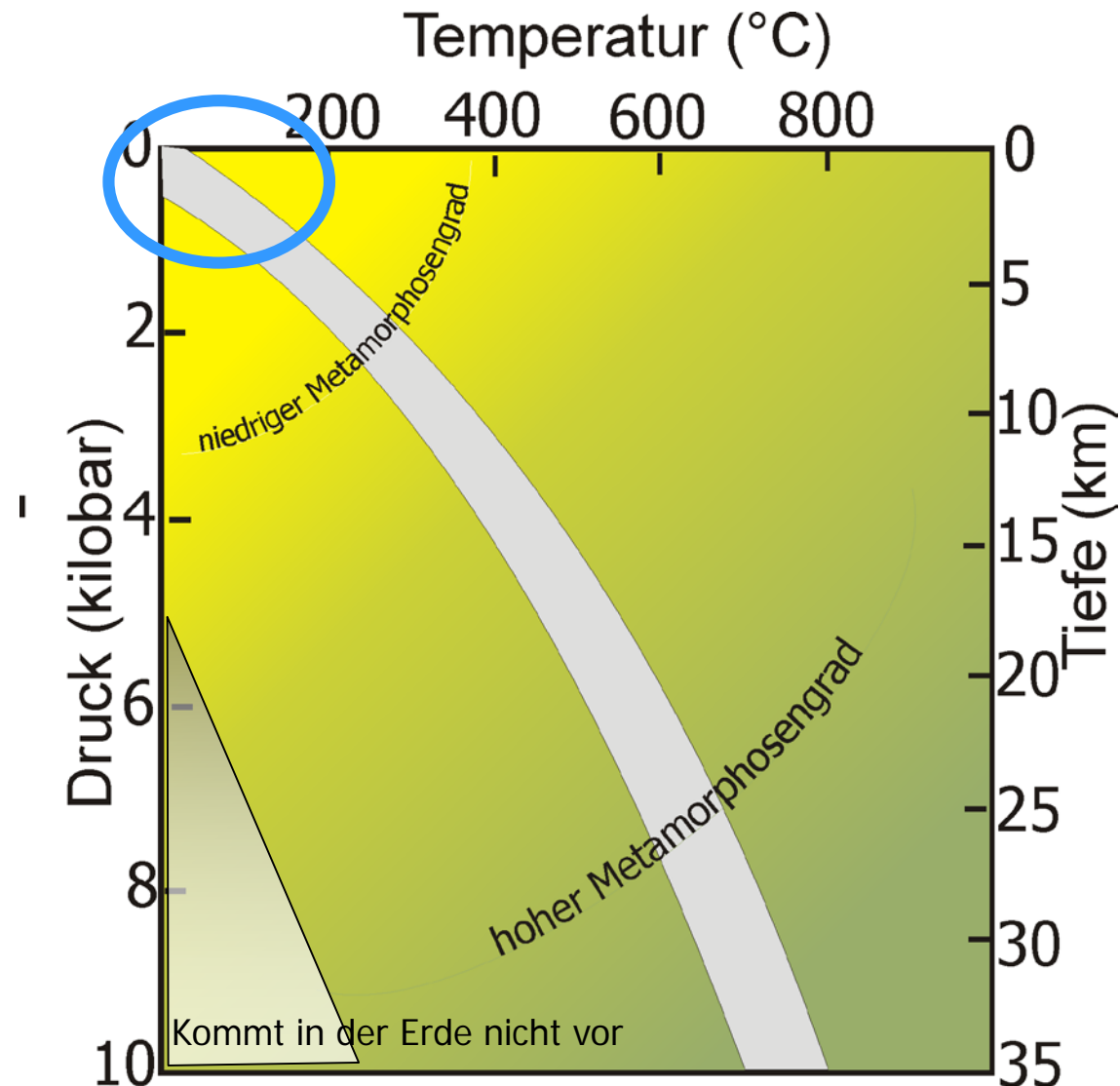
- **Biogene Sedimentgesteine**

# Abgrenzung der Metamorphose zu niedrige Temperaturen

## ✓ Diagenese

- **Porosität**  
nimmt extrem ab
- **Schieferung**  
Parallel-Orientierung  
der Schichtsilikate
- **Kristallinität**  
der Minerale nimmt zu
- **Muscovit** Bildung

Tonsteine  
~ 200° C

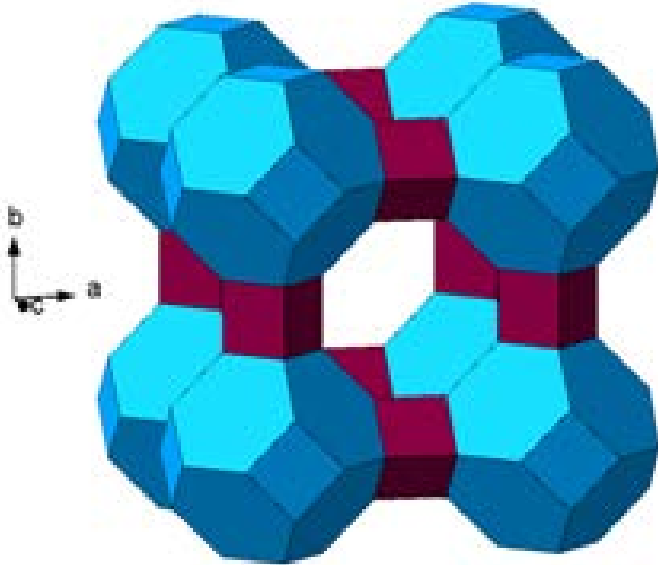


# Zeolith

Gerüstsilikate aus  $\text{AlO}_4$ - und  $\text{SiO}_4$ -Tetraeder

Natrolit  $(\text{Na}_{16}) [\text{Al}_{16}\text{Si}_{24}\text{O}_{80}]\cdot 16\text{H}_2\text{O}$

Chabasit  $(\text{Ca}_2) [\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{24}]\cdot 12\text{H}_2\text{O}$



„Zeolith Typ A“

Technische Anwendung  
als Molekularsieb,  
Enthärtungsmittel



# Abgrenzung der Metamorphose zu hohe Temperaturen

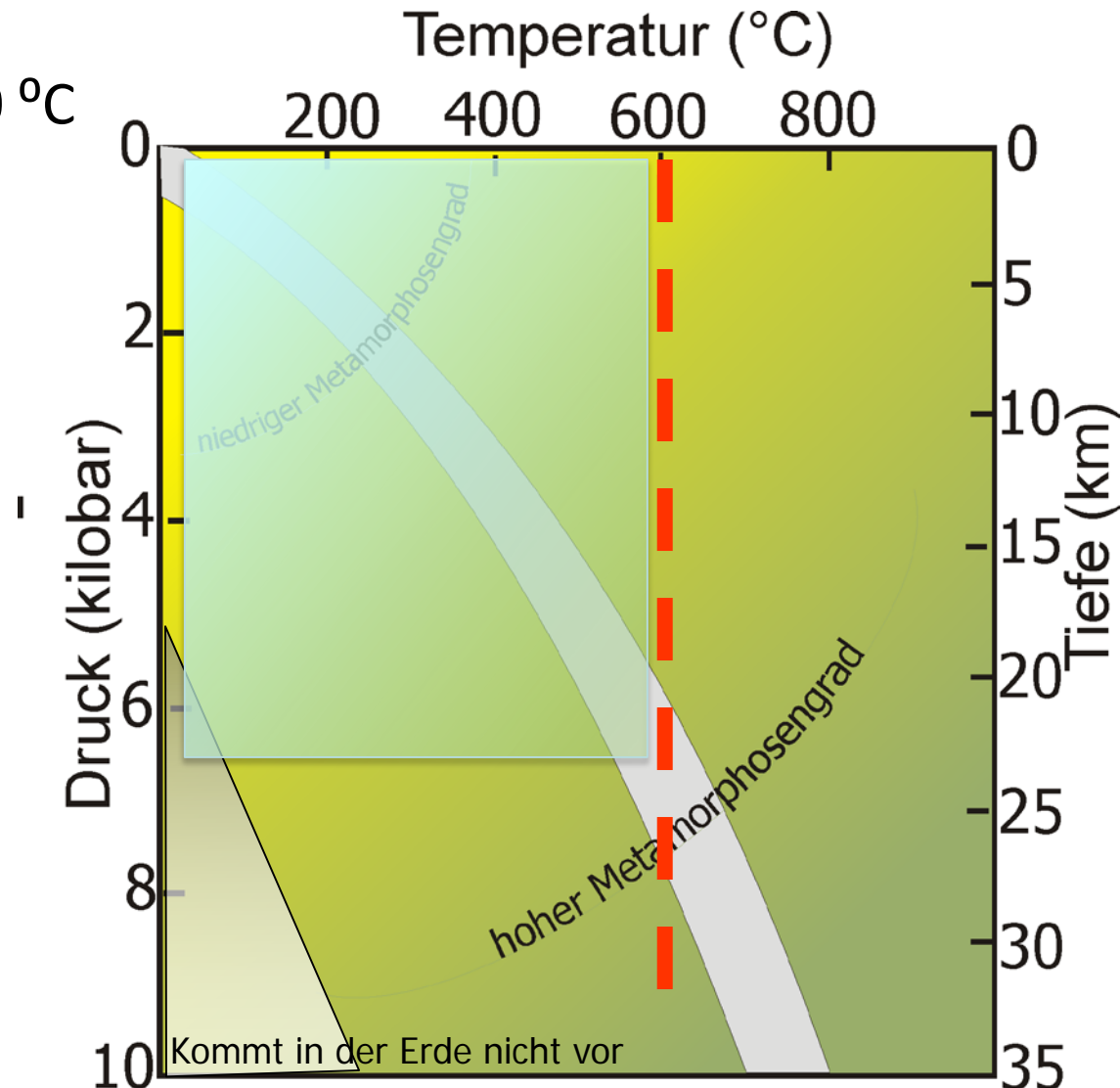
- **Teilschmelze Anatexis / Migmatit**

Temperatur > 600 bis 1100 °C  
meist < 800 °C

abhängig von

- Druck
- Zusammensetzung
- H<sub>2</sub>O-Gehalt

**Granitische Schmelze**  
Ausgangsgestein:  
Tonsteine, Grauwacken,  
Granite



Schmilzt ein Gestein durch Erhöhung der Temperatur partiell auf,  
so spricht man von **Anatexis**



Reru Valley Migmatite

Anatexis findet in der tieferen Erdkruste statt. Es ist meist Folge der Gebirgsbildungsprozessen - Beispiel Himalaya, Alpen

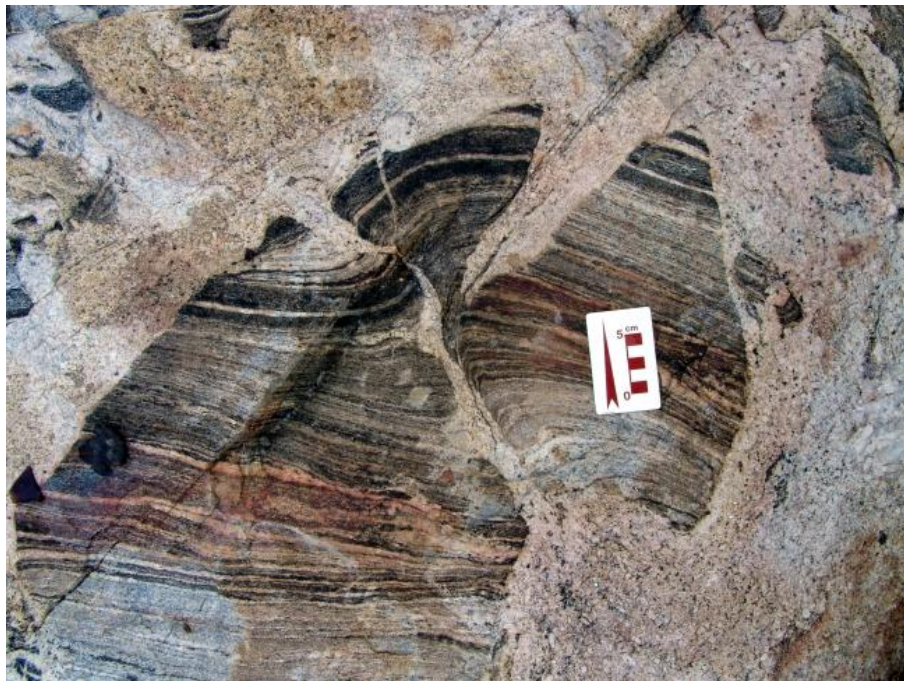
Die resultierenden Gesteine werden als **Migmatite** bezeichnet

# Migmatite

unter wasserreichen Bedingungen können Gesteine teilweise (partiell) aufgeschmolzen werden.



*Kadanie, Czech Republic*



Die hellen, leukokraten Teilschmelzen bestehen i.d.R. aus K-Feldspat, Plagioklas, Biotit, Quarz (Leukosom).

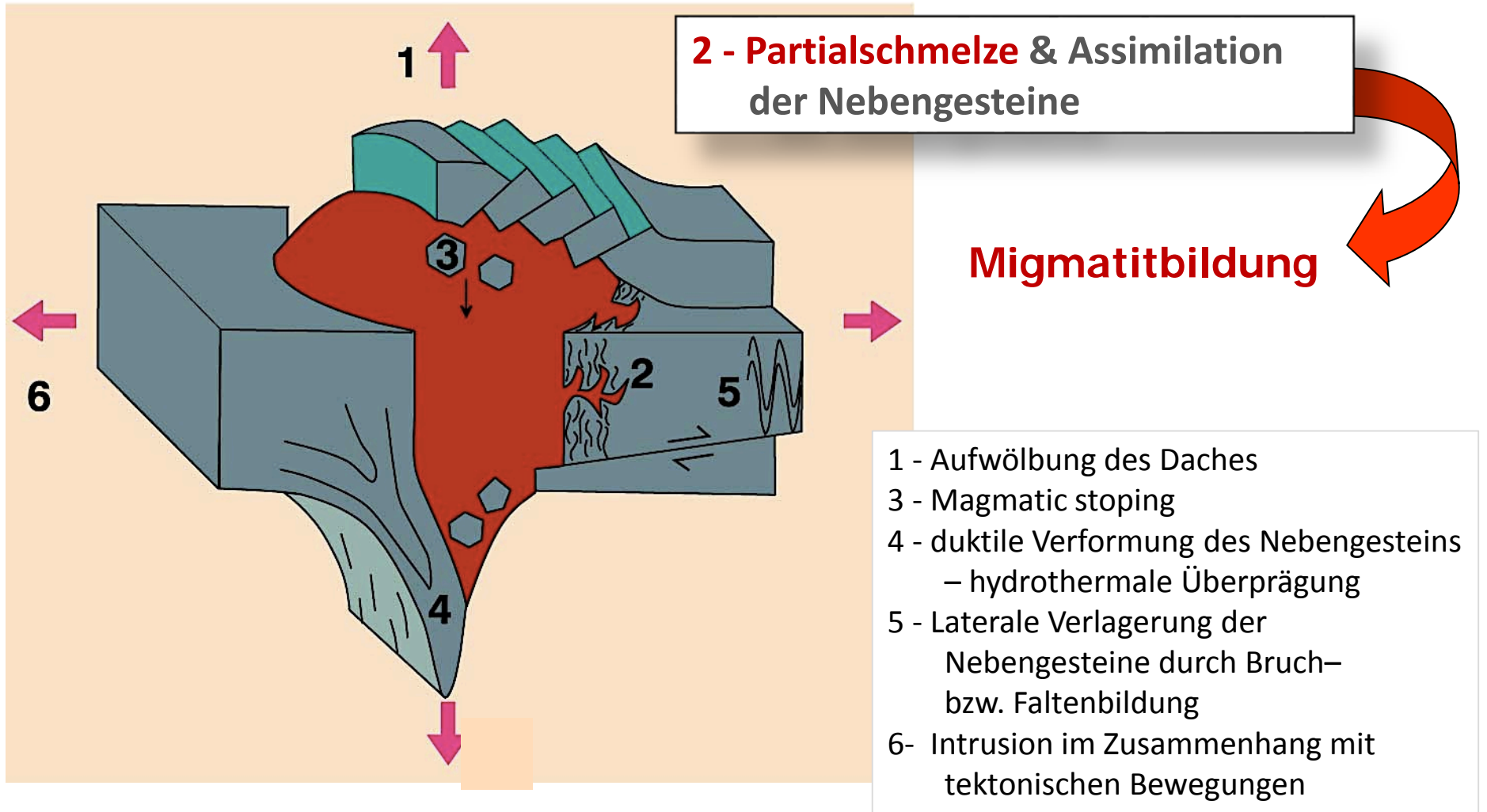
Die dunklen mesokraten Bestandteile des Gesteins bleiben zurück (Melanosom).

*Prata Pluton  
Borborema Province*

*Roberto Weinberg, Monash University, Australia*

# Anatexis

## Übergang Plutonismus / Metamorphose





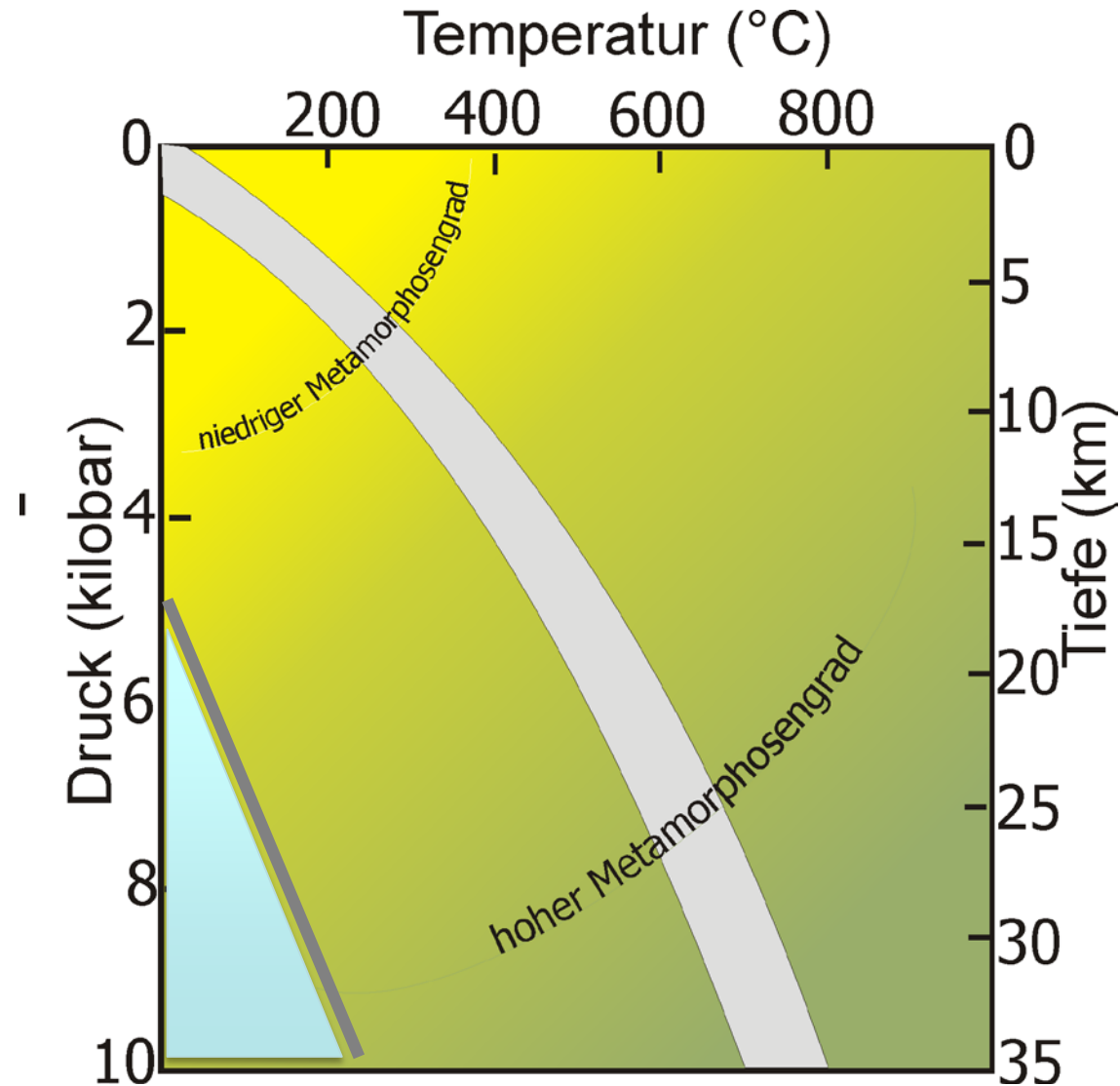
- Mindest - Druck

Geothermischer Gradient mind.  $\sim 6^\circ \text{ C / km}$

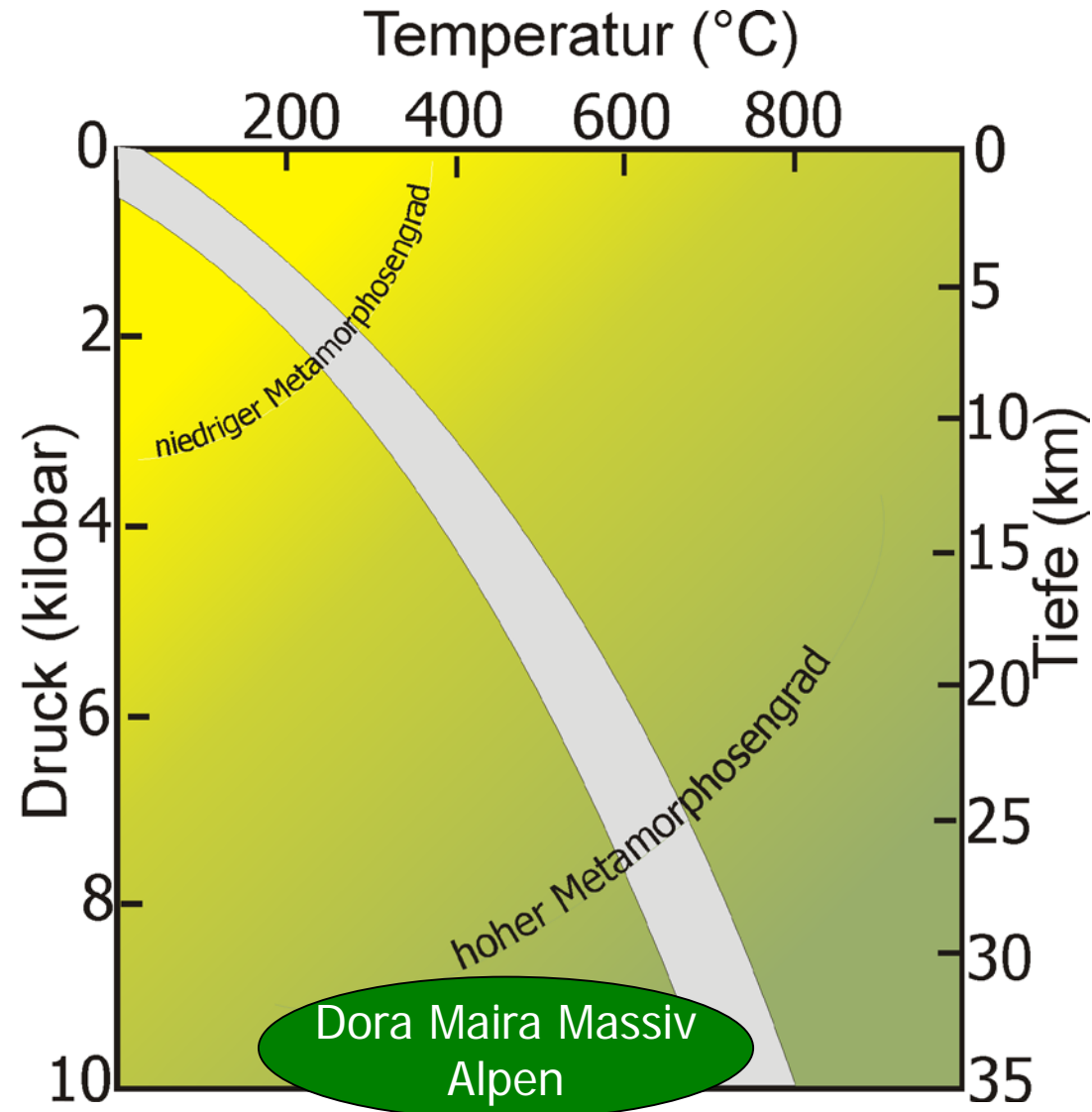
1 GPa = 10 kbars

1 MPa = 10 bars

$10^5 \text{ Pa} = 1 \text{ bar}$



- Hoch - Druck



## Ultra-Hochdruck Metamorphose

$P > 2,5$  bis  $2,8$  GPa  
Minerale wie Coesit, Diamant

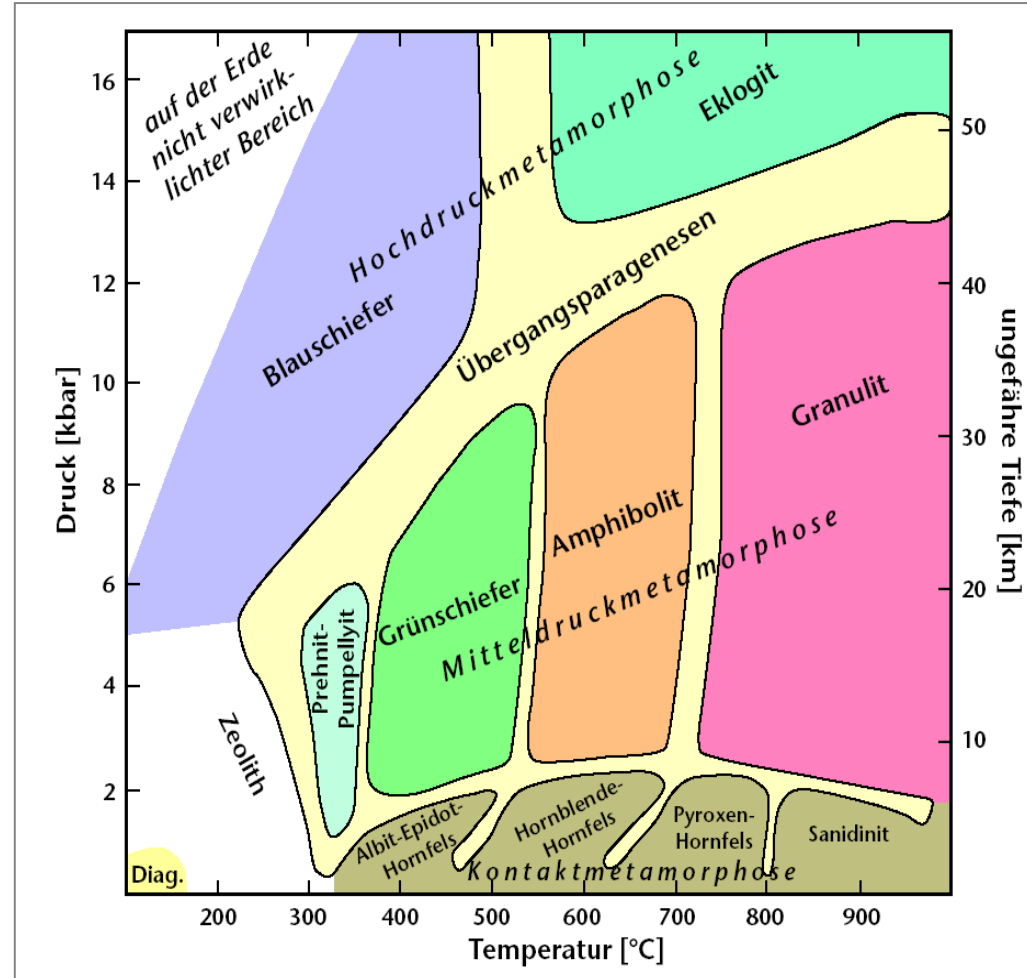
# Metamorphe Fazies

Einteilung von metamorphen Gesteinen nach den Mineralen, die sich bei den bei der Metamorphose herrschenden P-T-Bedingungen bilden können.

Die Bezeichnung der acht metamorphen Fazies entspricht den jeweiligen Gesteinsnamen entsprechender mafischer Gesteine (Metabasite)

Grundlagen des Konzepts entwickelte der finnische Petrologe Pentti Eskola (1883-1964)

P-T Diagramm mit ungefähren Position der metamorphen Faziesbereiche



# Definition

- **Diagenese**

Sedimentverändernde Prozesse (Kompaktion, Verfestigung, Entwässerung) - ohne oder unter nur mäßigen Änderung von T und/oder P

- **Metamorphose**

Gesteinsumwandlung (im festen Zustand) infolge einer Veränderung der äußeren Parameter, meist Druck (P) oder Temperatur (T).

In der Regel wird die Zusammensetzung beibehalten (= isochem)

- **Metasomatose**

Prozesse, bei den Elemente zwischen einem Gestein und seiner Umgebung bzw. fluiden Phase ausgetauscht werden

# Definition

- **Migmatit**

(partielle) Aufschmelzung der Gesteine unter wasserreichen Bedingungen.

Die hellen, leukokraten Teilschmelzen bestehen i.d.R. aus K-Feldspat, Plagioklas und Quarz (Leukosome).

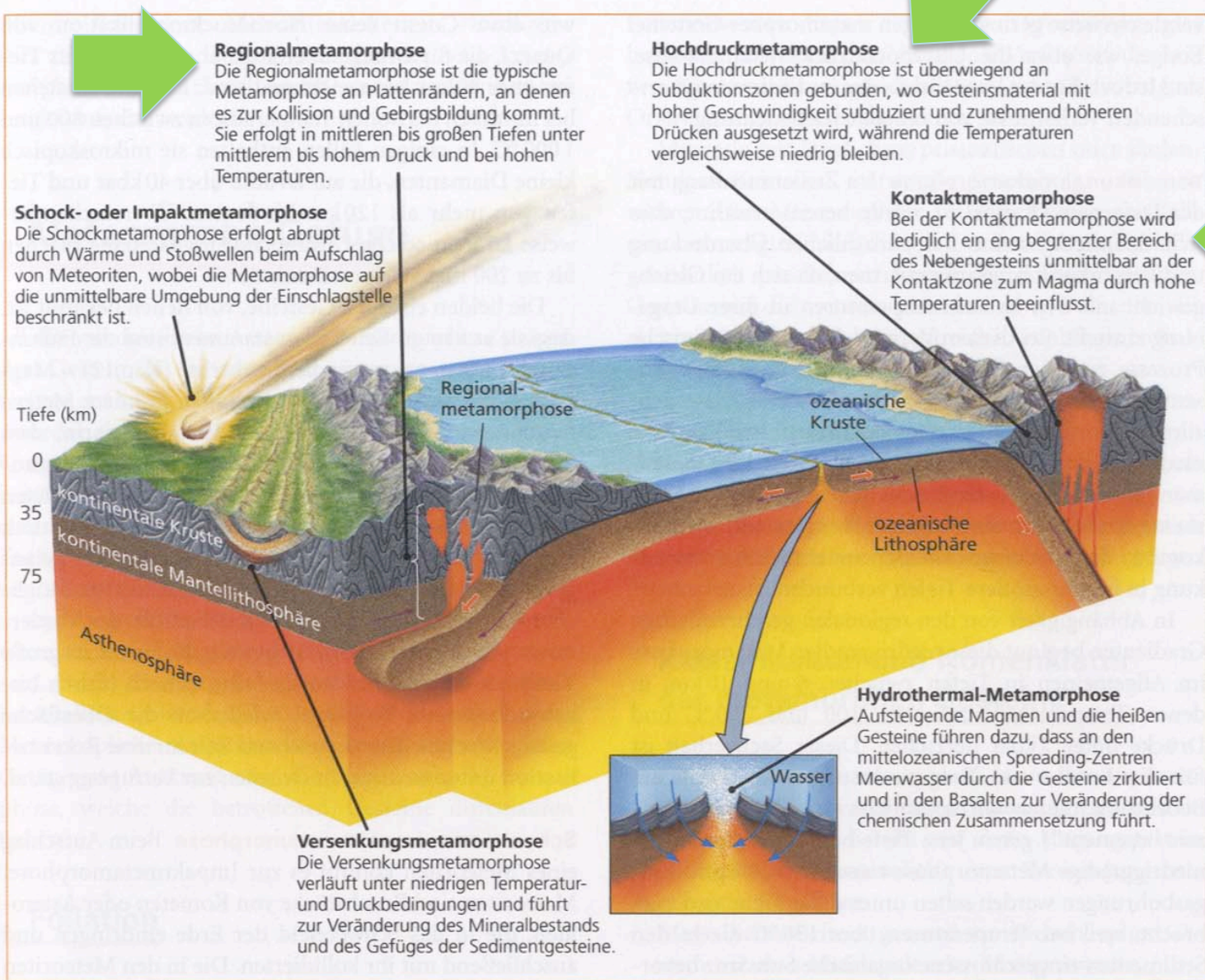
Die dunklen mesokraten Bestandteile des Gesteins bleiben als Restite zurück (Melanosome).

- **Metamorphe Fazies**

Unterscheidung der Gesteine anhand charakteristischer Mineralzusammensetzungen, welche sich unter bestimmten Druck- und Temperaturbedingungen gebildet wurden.

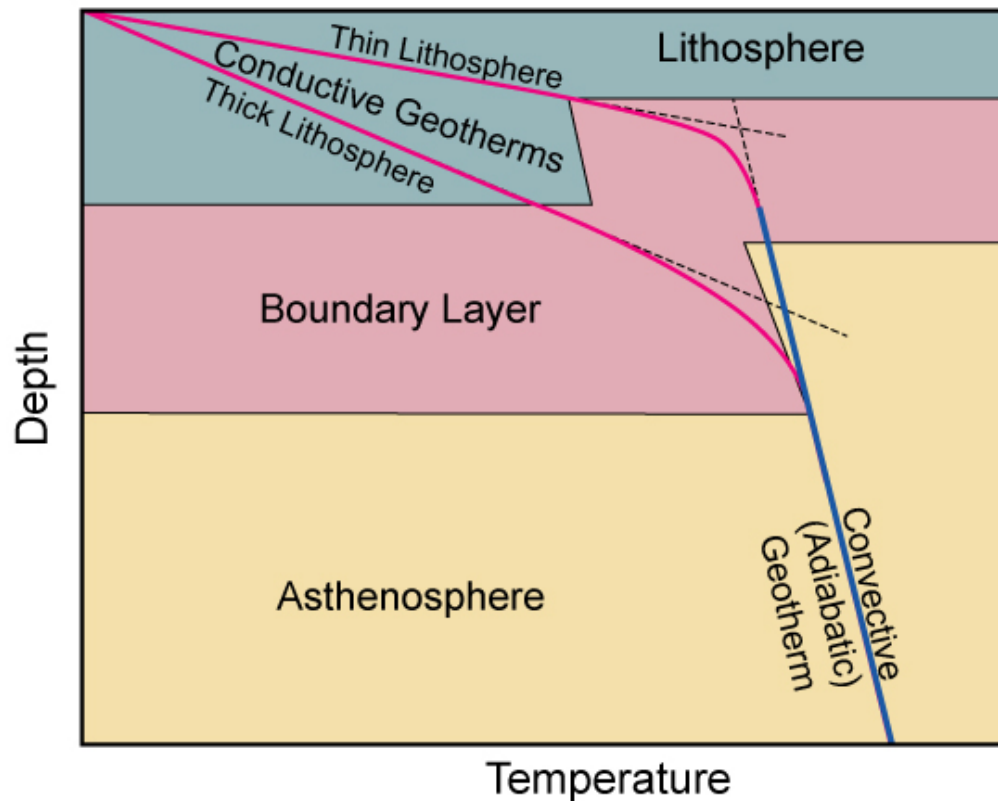
# Metamorphosearten

I	Kontaktmetamorphose	T
II	Hochdruckmetamorphose	P
III	Regionalmetamorphose (Mitteldruckmetamorphose)	P + T



**Abb. 6.3** Die Interaktion von Lithosphäre und Asthenosphäre führt zur Bildung metamorpher Gesteine.

# Der geothermische Gradient



= **geothermische Tiefenstufe**

die Tiefendifferenz, in der sich die Erdkruste um ein Kelvin erwärmt

Faustregel: 1 Kelvin pro 33 Meter

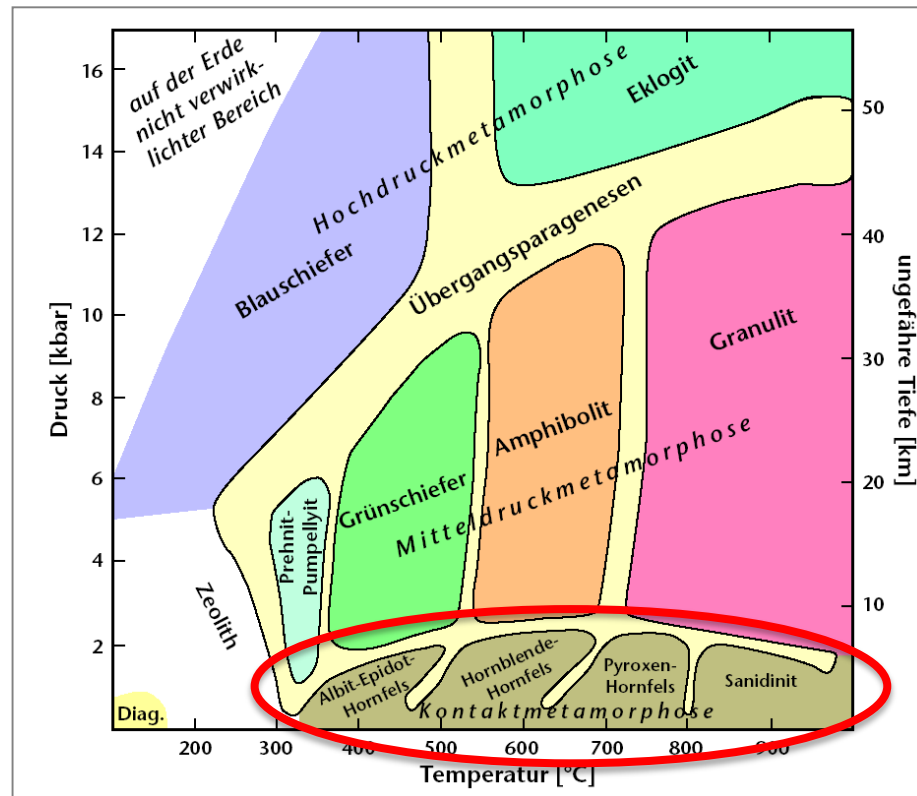
3 Kelvin pro 100 Meter



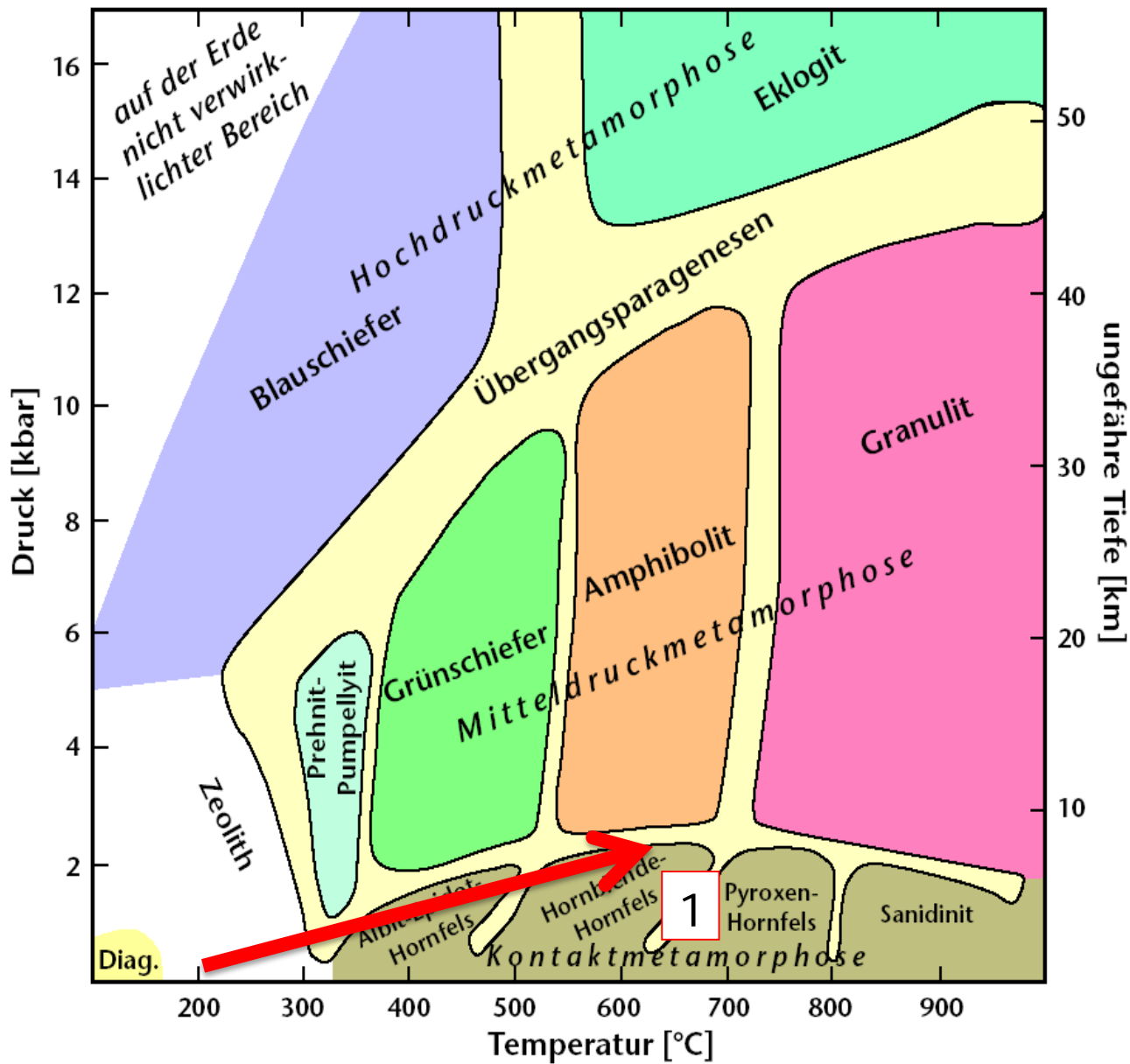
# Metamorphosearten

## I Kontaktmetamorphose

T



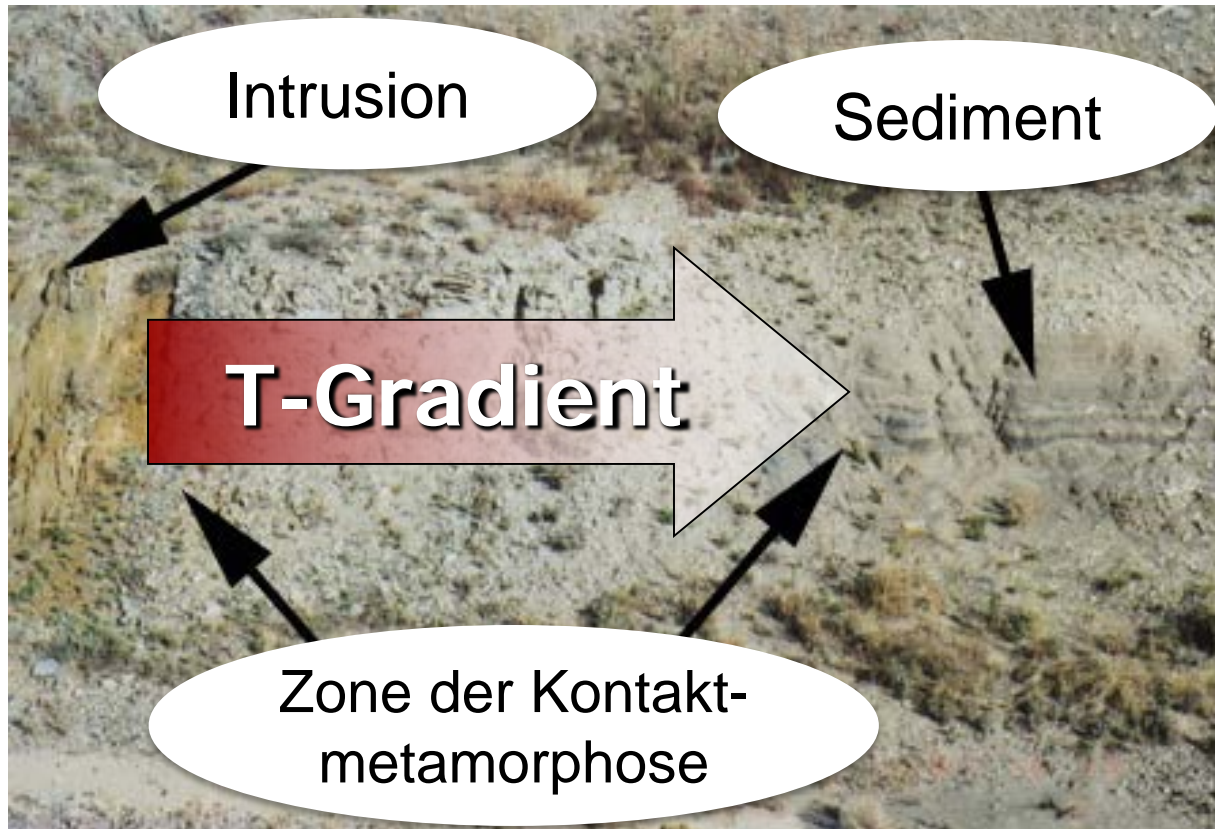
Hornfels - Fazies



1  $400^{\circ}\text{C}/10\text{ km} =$   
**40 Kelvin /km**  
 200 Kelvin / kbar

# Kontaktmetamorphose

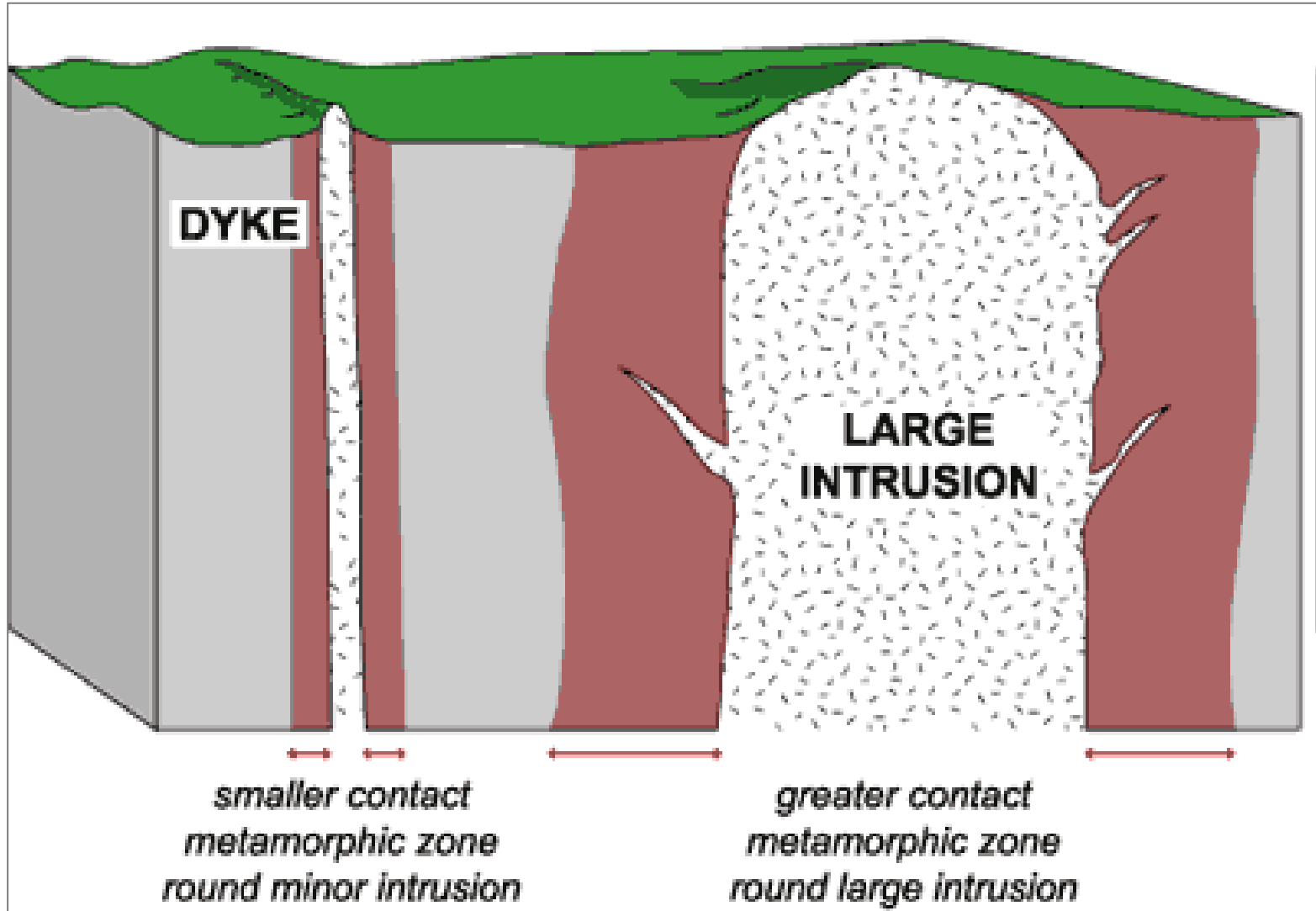
Magma  
als  
Wärme-  
quelle



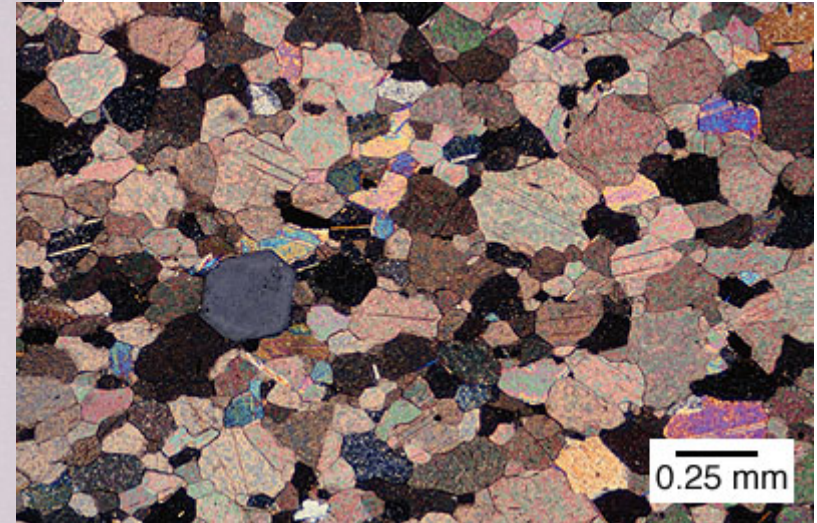
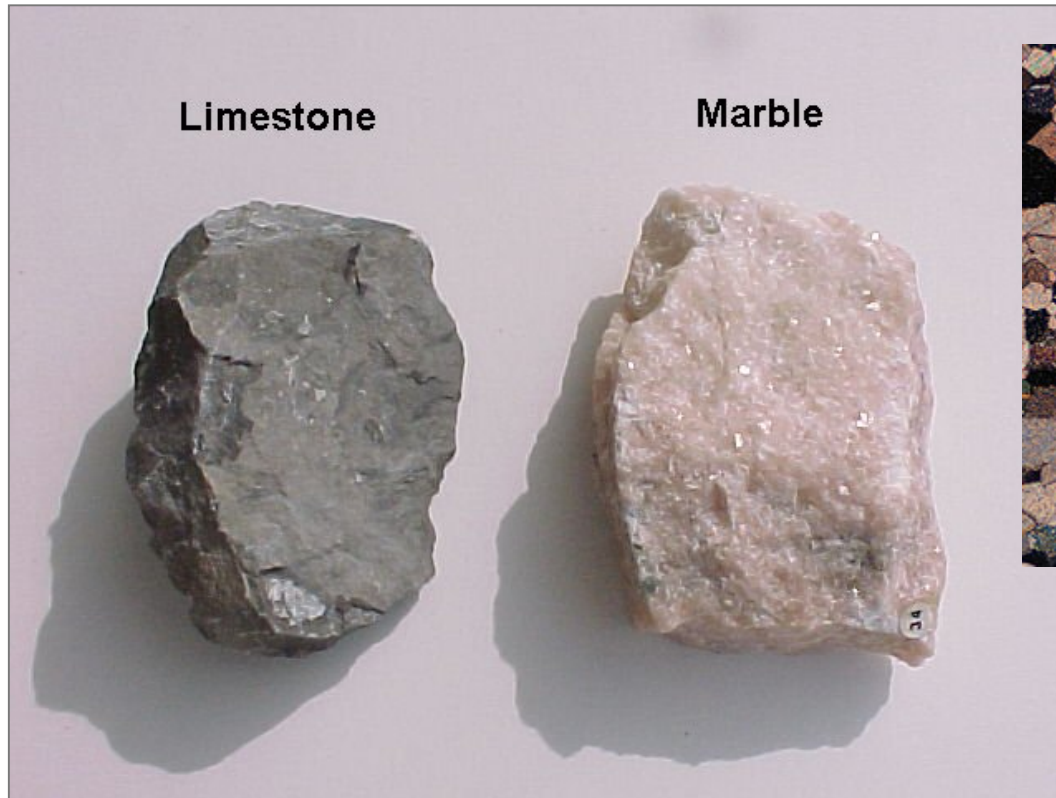
Kontaktaureole

mm - km

# Kontaktmetamorphose



# Kristallwachstum / Rekrystallisation



## Grad der Kristallinität

- Korngrösse
- Kornform
- Korngrenze

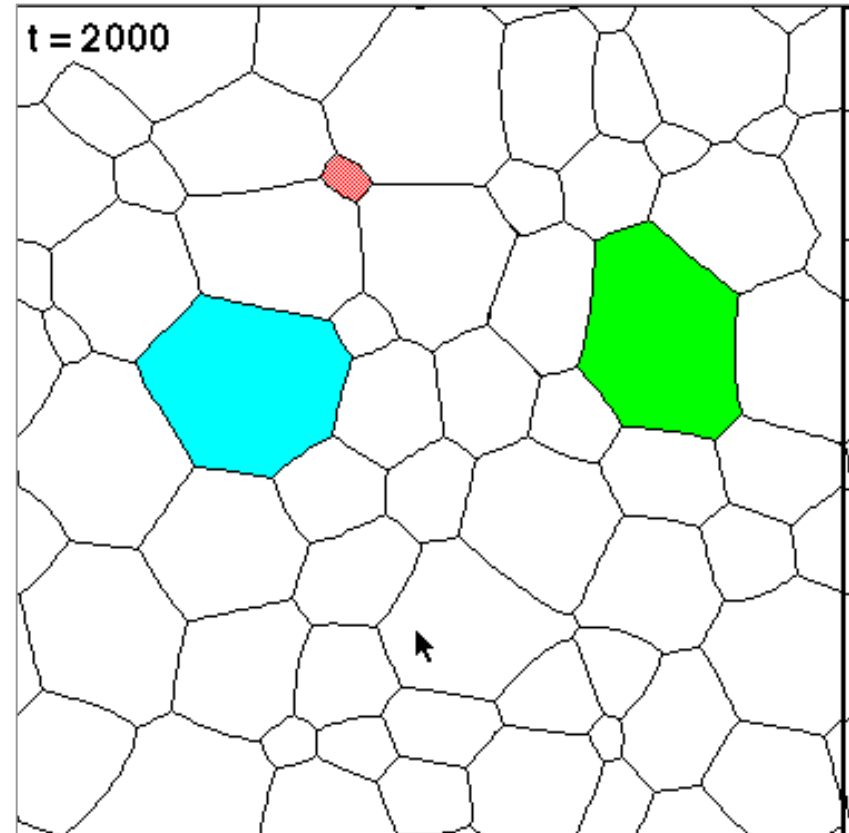
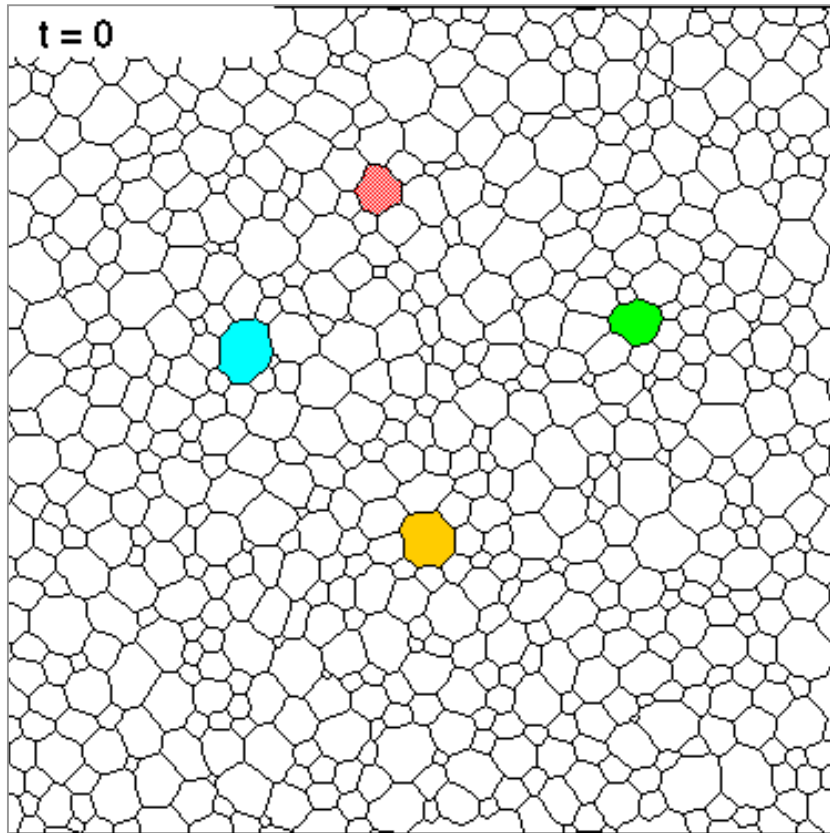
Gestein: Kalkstein

-

Marmor

# Korngrenzenwanderung

## Ostwald Reifungsprozess



# Hornfels

## Nomenklatur: Hornfels

hartes, kompaktes kontaktmetamorphes Gestein

mit einer hornartigen Eigenschaft, muscheligen bis splittrigen Bruch

besteht hauptsächlich aus Silikate und Oxide



**Kontakt- ...**

in der äußeren Zone einer Aureole

**mafischer Hornfels**

basische Gesteine als Protolith

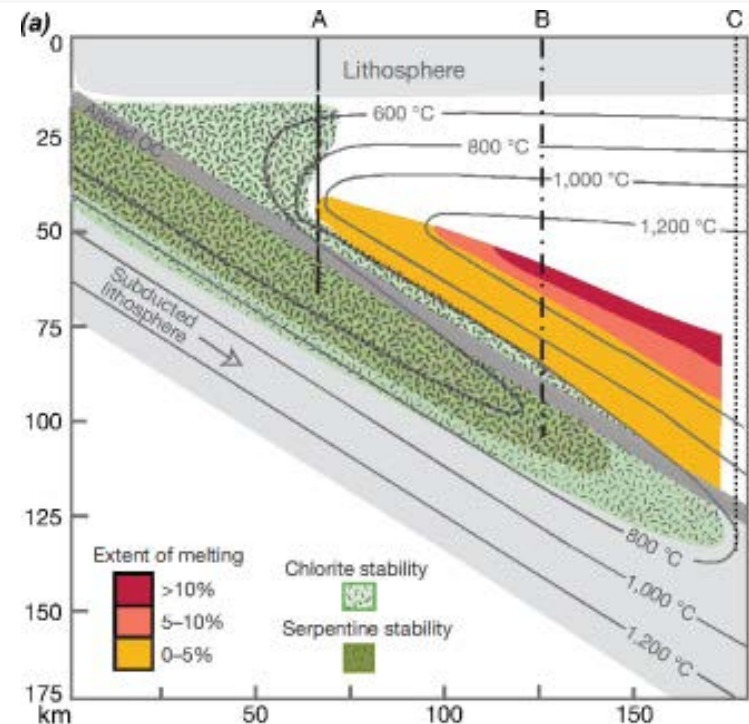
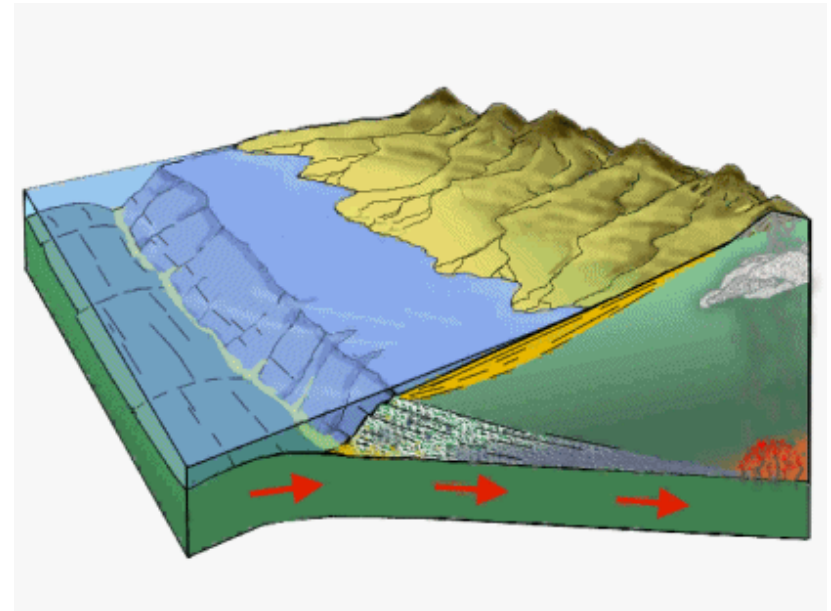
**Granofels (Hornfelsoid)** hier handelt es sich um ein regionalmetamorphes Gestein

In Subduktionszonen:

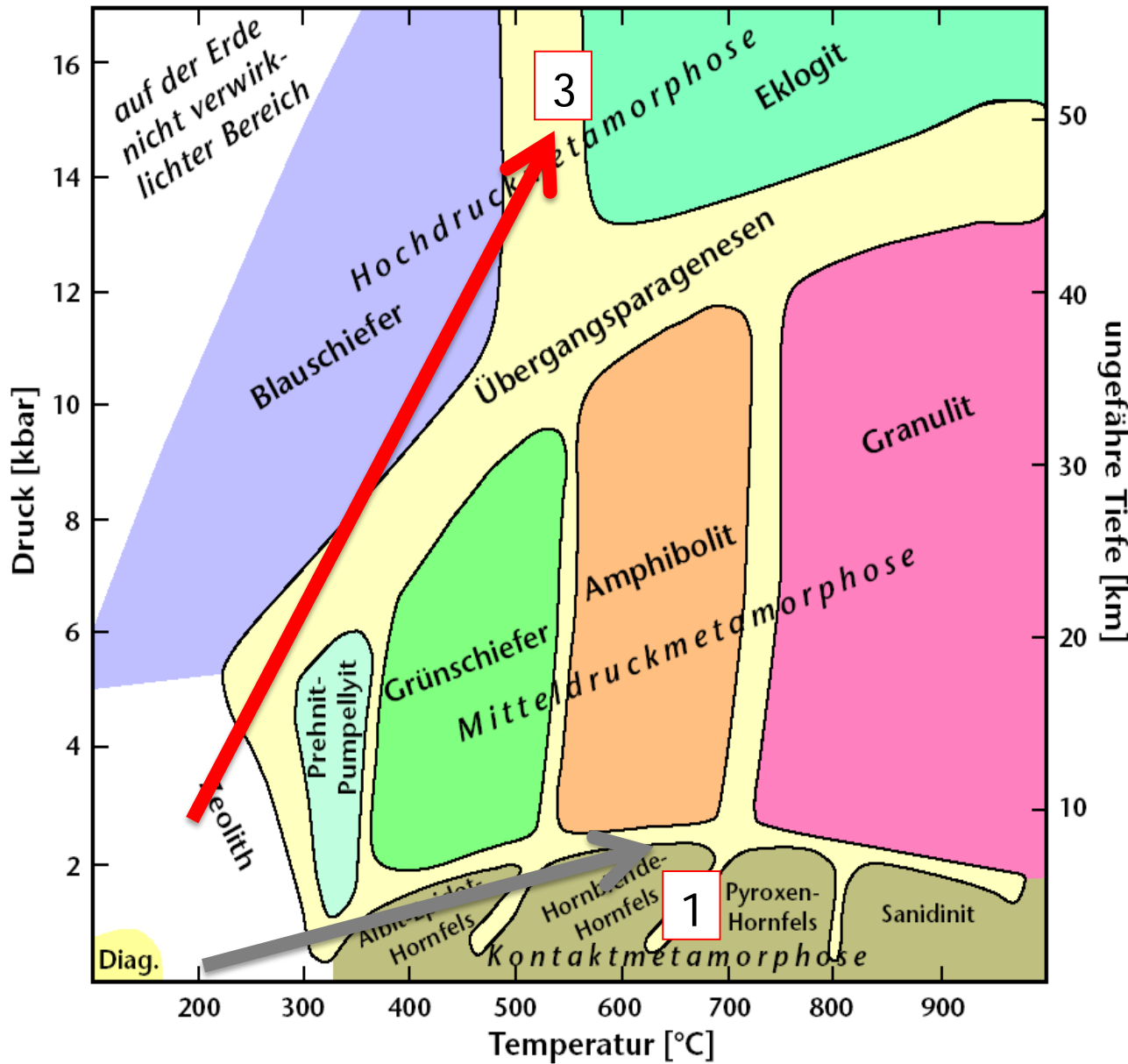
Die verhältnismäßig kalte ozeanische Kruste wird mit den Sedimenten subduziert.

Die ablaufende Metamorphose wird daher von vergleichsweise **niedrigen Temperaturen** und **hohen Drucken** bestimmt.

## Hochdruck- Niedertemperatur- Metamorphose







3  $400^{\circ}\text{C}/50\text{ km} =$   
**8 Kelvin / km**  
 12kbar  $\sim$  40 km  
**36 Kelvin / kbar**

1  $400^{\circ}\text{C}/10\text{ km} =$   
**40 Kelvin / km**  
**200 Kelvin / kbar**

# Metamorphosearten

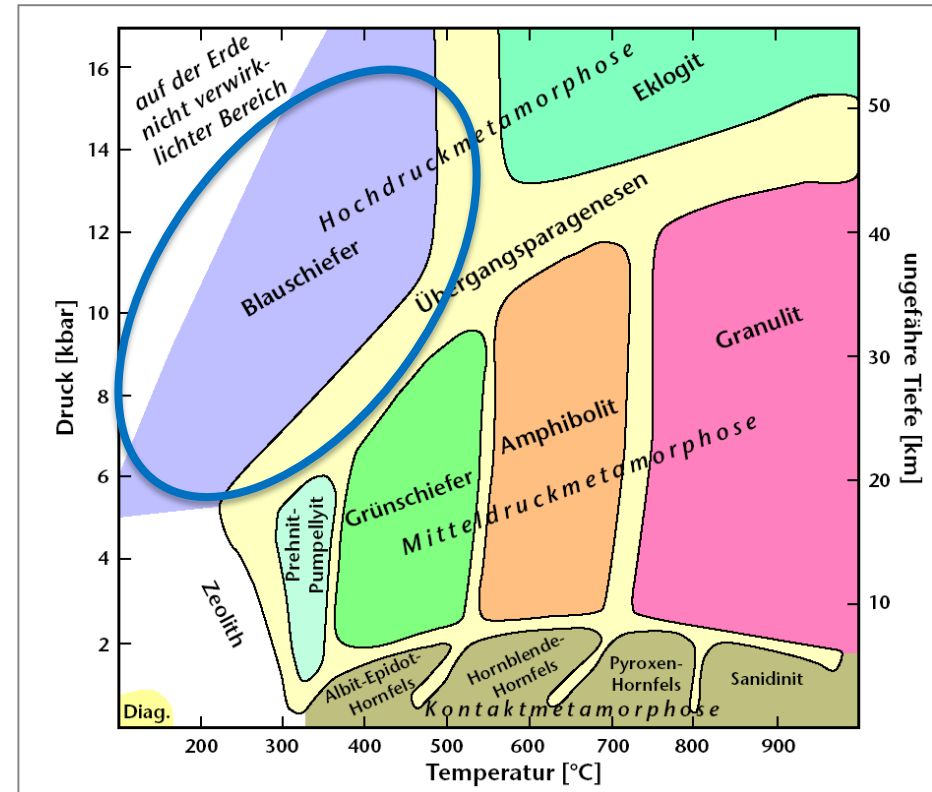
## II) Hochdruck-Niedertemperatur – Metamorphose P

Blauschiefer



Ward Creek  
Franciscan Complex, Kalifornien

Blauschieferfazies



# Metamorphosearten

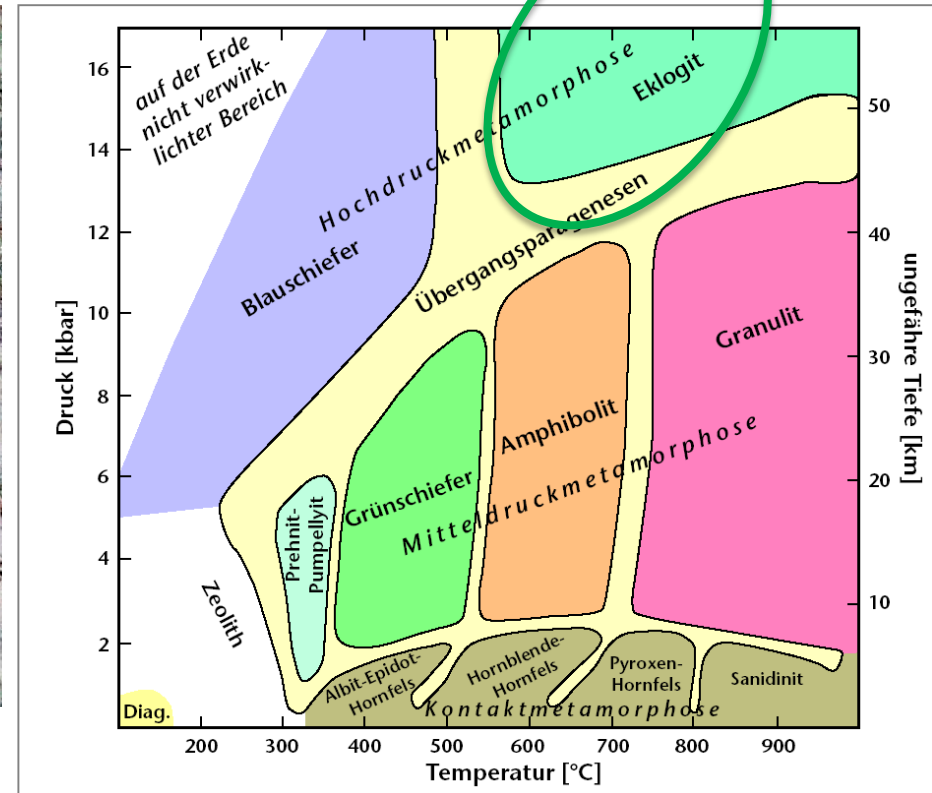
## II) Hochdruck-Niedertemperatur – Metamorphose P

Eklogit

Eklogit-Fazies



Granat (Pyrop) & Klinopyroxen (Omphazit)



# III Regionalmetamorphose

## Die häufigste Arte der Metamorphose

eine großräumige Metamorphose, die Gebiete von mehreren Tausend Quadratkilometern erfasst.

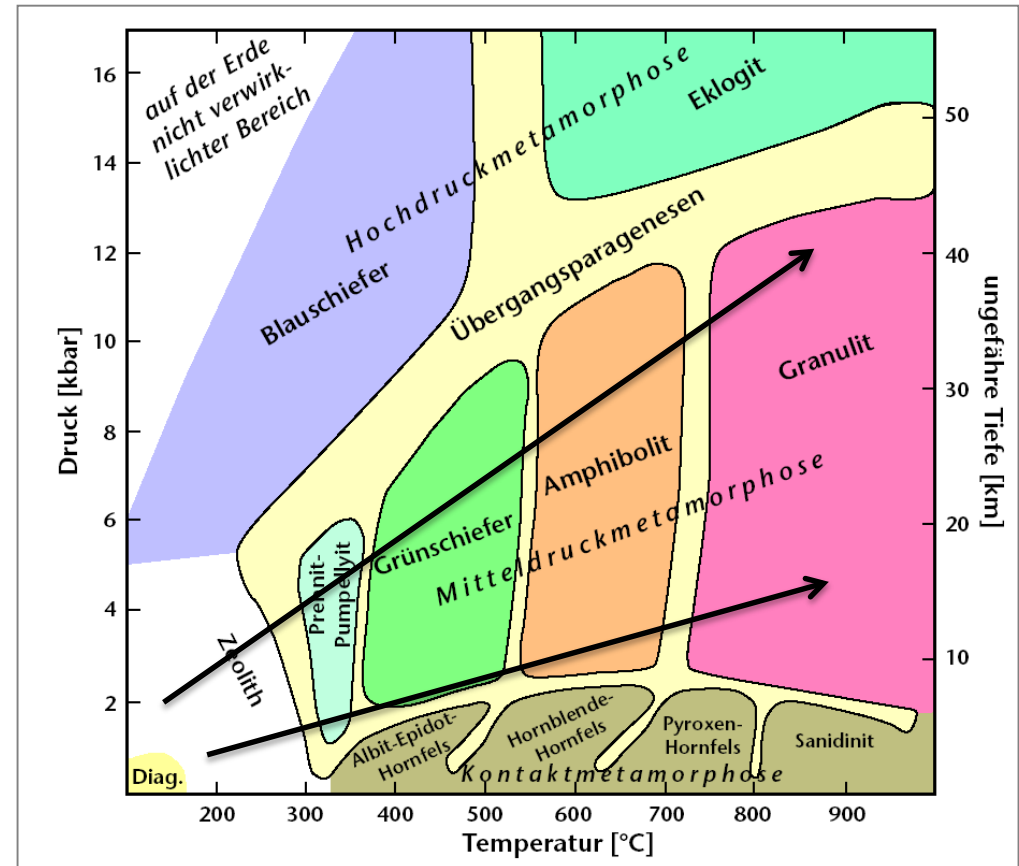
In Subduktions- und Kollisions-Gebieten durch Versenkung und Verformung verschiedener Gesteinseinheiten (Sedimente, Magmatite und Metamorphite).

Unter niedrigen bis hohen Druck- und Temperaturbedingungen werden die primären Minerale umgewandelt und neue Minerale gebildet.

# Regionalmetamorphose (= Mitteldruckmetamorphose)

P T

- Prehnit – Pumpellyit - Fazies
- Grünschiefer - Fazies
- Amphibolit - Fazies
- Granulit - Fazies



Basalt



- Mafischer Granulit

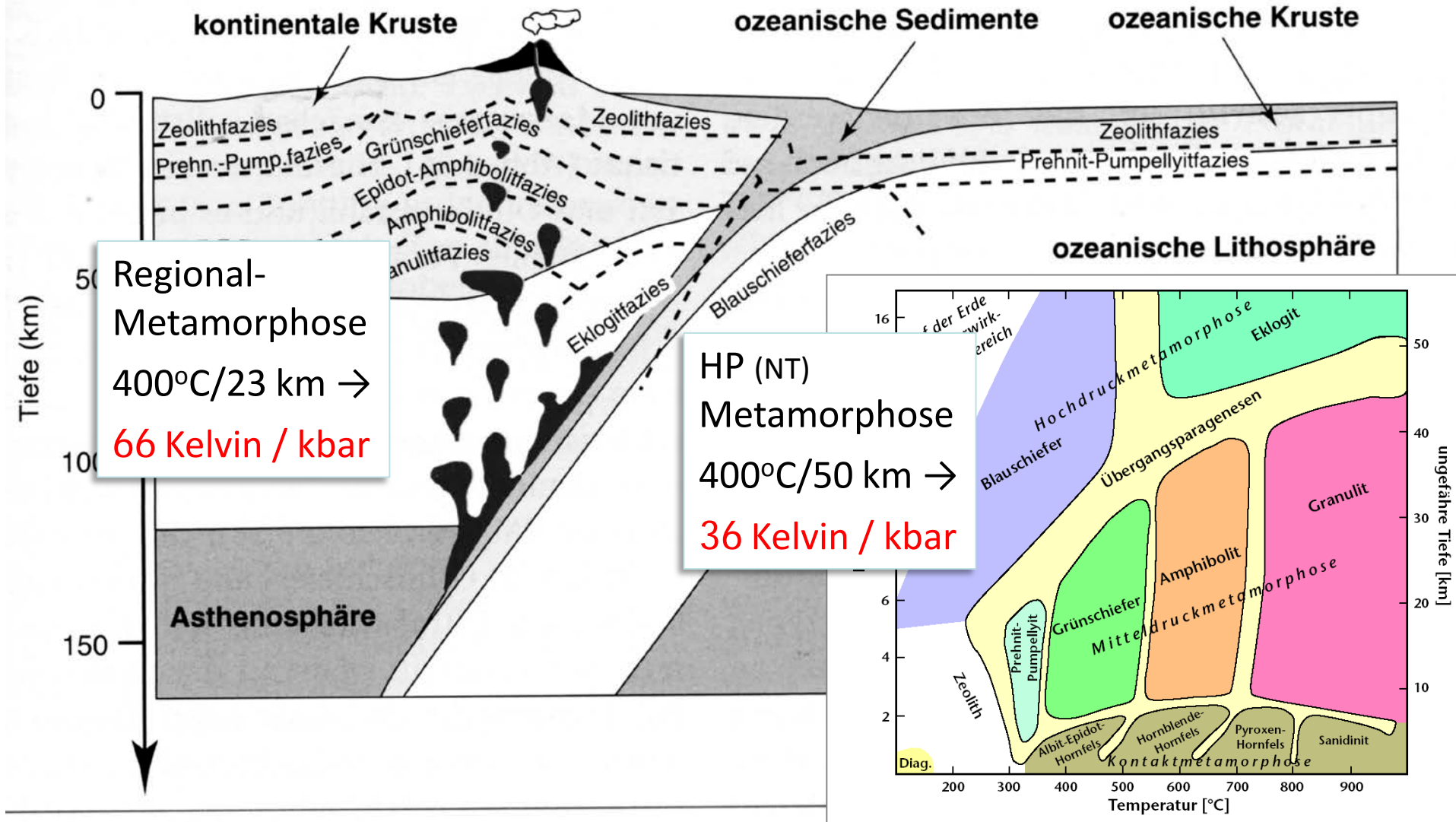


- Grünschiefer



- Amphibolit

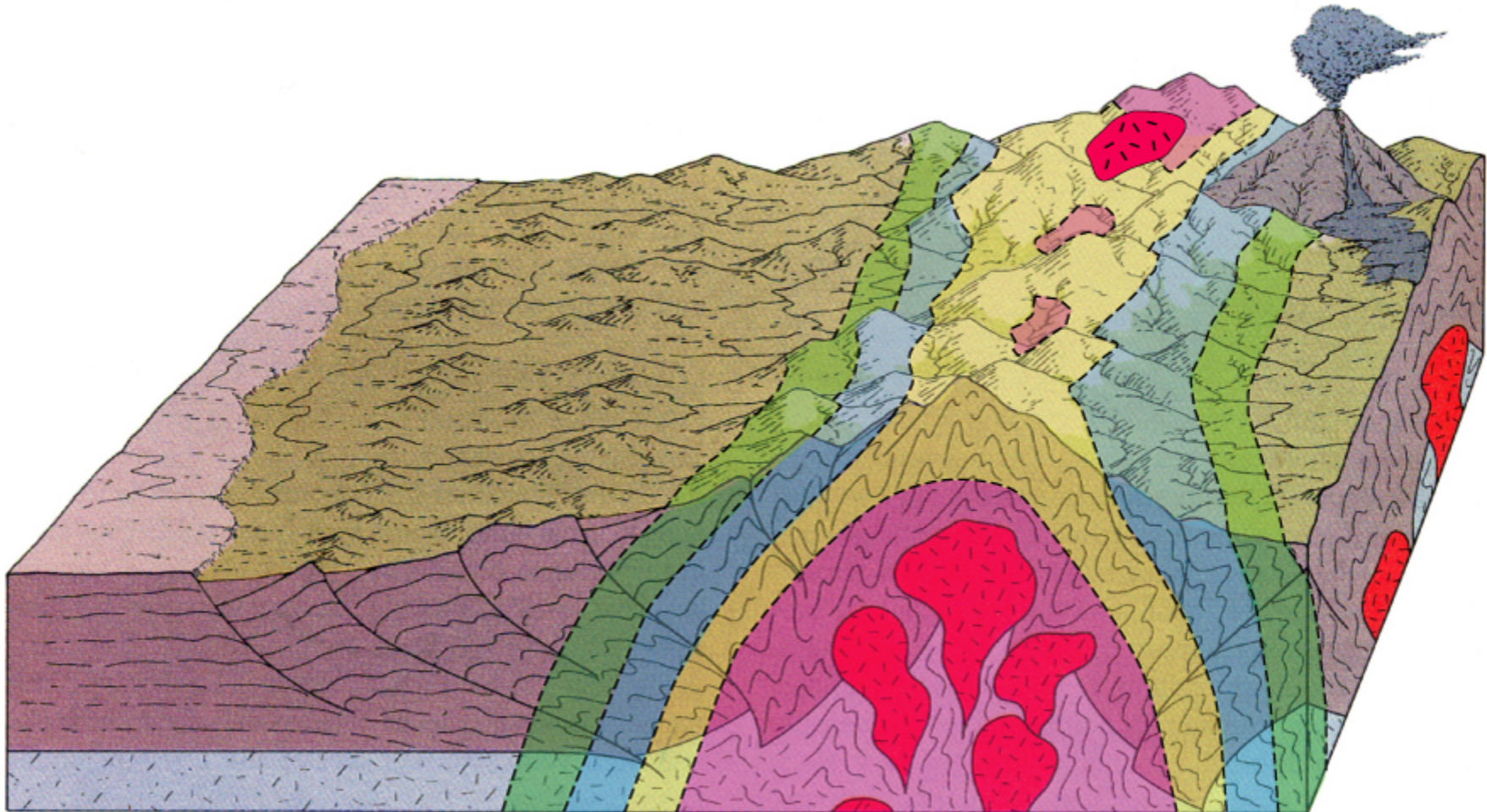
# Metamorphe Gesteine in der Erdkruste



2 Metamorphe Fazien im Bereich konvergenter Plattengrenzen nach Spear (1993).

## Beobachtung im Gelände:

- Systematische Abfolge von **metamorphen Zonen**, gekennzeichnet durch das Auftreten neuer Mineralparagenesen





Ausgangsgestein (= Protholit) → Metamorphit

- Karbonatgestein Marmor
- Basalt ... - Hornfels  
Grünschiefer  
Amphibolit  
basischer Granulit  
Blauschiefer  
Eklogit
- Tonstein Metapelit

# Ausgangsmaterial: Pelite

Gliederung der klastischen Sedimente / Sedimentgesteine nach ihrer Korngröße:

- Psephite  $\emptyset > 2 \text{ mm}$  → Konglomerat, Brekzie
- Psammite  $\emptyset 2 - 0,02 \text{ mm}$  → Arkose, Sandstein
- Pelite  $\emptyset < 0,02 \text{ mm}$  → Tongestein

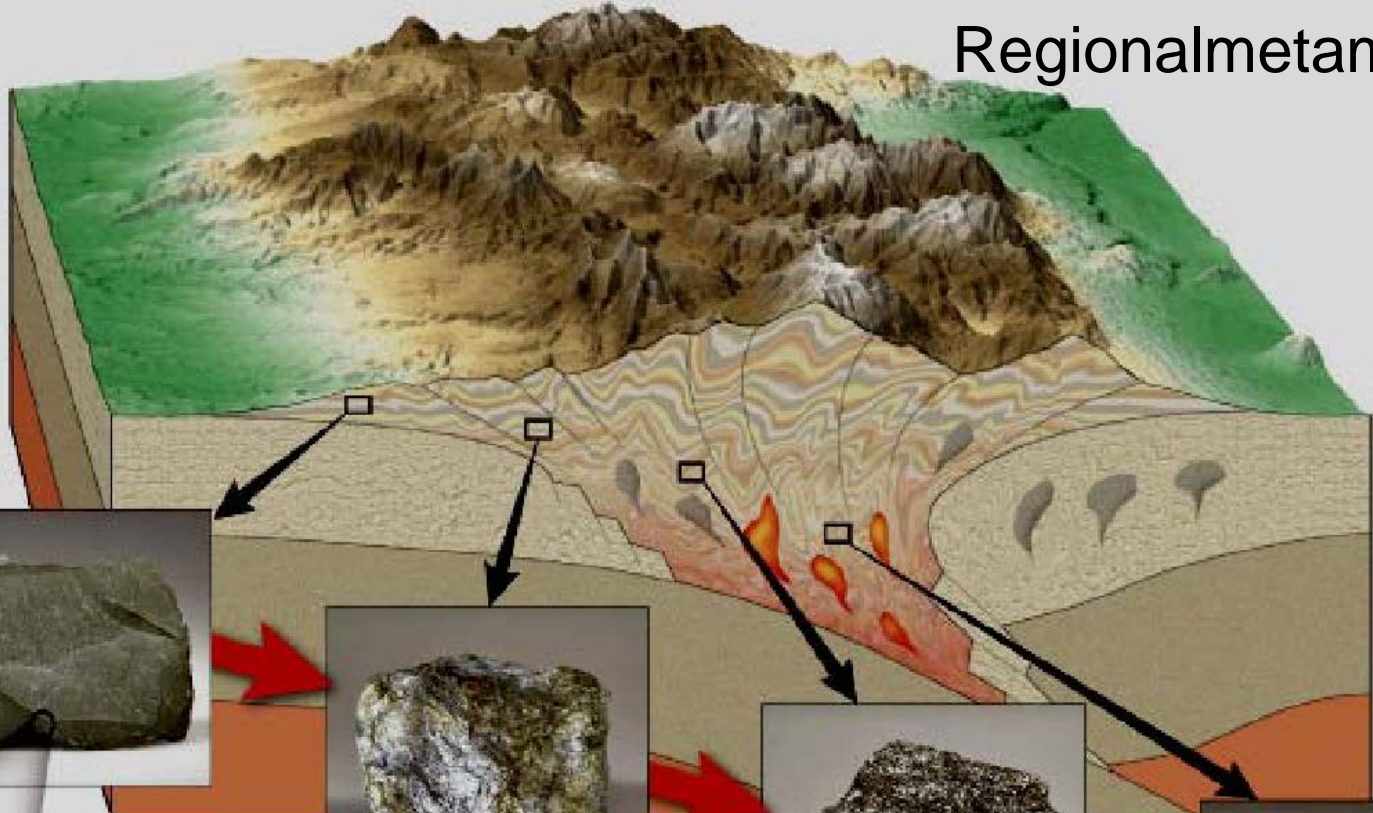
Varietäten der Tonfraktion

- Lehm- und Lehmgesteine
- Mergel und Mergelstein
- Löß, Kaolin
- Schieferton, Tonschiefer

# Zusammensetzung pelitischer Sedimente

- feine Al-K-reiche Schichtsilikate 30 – 50 %
  - Tonminerale (Montmorillonit, Kaolinit, Smektit)
  - feine Hellglimmer (Muskovit, Sericit)
  - Chlorit
- Quarz 10 – 30 %
- Feldspat (Albite / K-Feldspat) 20 – 40 %
- Fe-Oxide, Karbonate, Sulfide, organische Stoffe

Regionalmetamorphose



Slate



Phyllite



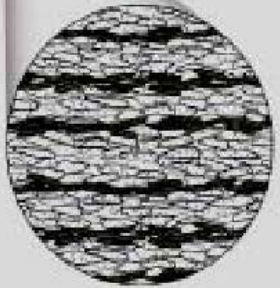
Schist



Gneiss



**Metamorphic rock series**



Wärme

+

Druck

Regionalmetamorphose

Zunehmende Metamorphosegrad



Slate



Tonschiefer



Gneiss

# Metamorphic rock series

Bild: [http://pumice.pdx.edu/201/Chapter\\_7.pdf](http://pumice.pdx.edu/201/Chapter_7.pdf)

Wärme

+

Druck

Regionalmetamorphose

Zunehmende Metamorphosegrad



Slate



Phyllite



Sch

Phyllit



Gneiss



# Metamorphic rock series

Bild: [http://pumice.pdx.edu/201/Chapter\\_7.pdf](http://pumice.pdx.edu/201/Chapter_7.pdf)

Wärme

+

Druck

Regionalmetamorphose

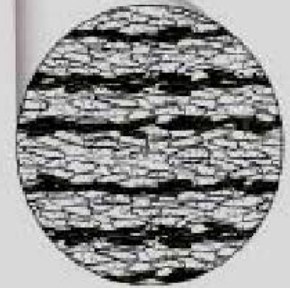
Zunehmende Metamorphosegrad



Glimmerschiefer



Gneiss



ries

Wärme

+

Druck

Regionalmetamorphose

Zunehmende Metamorphosegrad



Slate

Gneis

Gneiss

Metam

Bild: [http://pumice.pax.eau/201/Chapter\\_1.paj](http://pumice.pax.eau/201/Chapter_1.paj)



# Unterscheidung Phyllit / Glimmerschiefer

## Phyllit

- Dünnschiefrig, blättrig
- Überwiegend feinschuppige Hellglimmer
- $\sim 250 - 350^{\circ} \text{ C} / 1-3 \text{ kbar}$



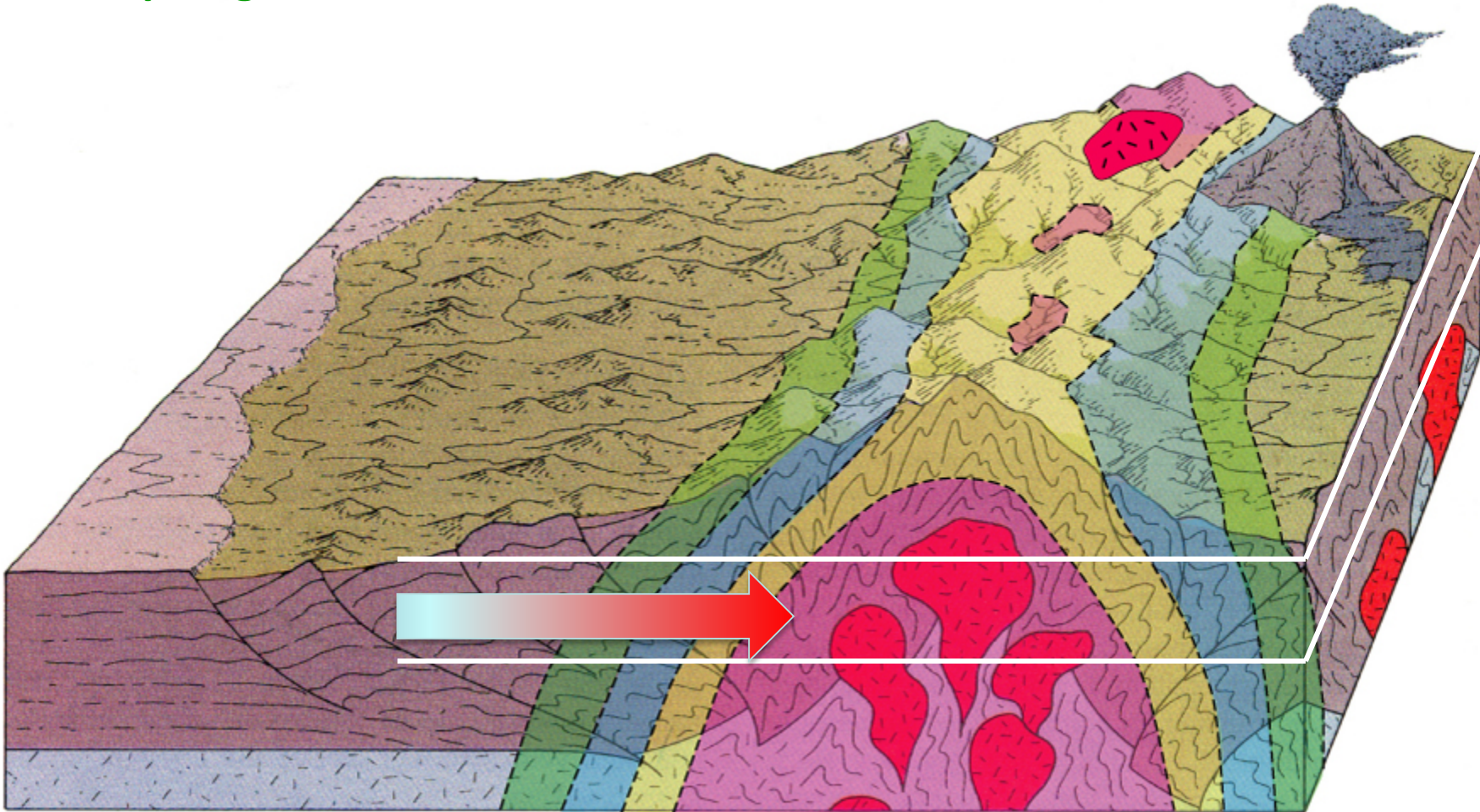
## Glimmerschiefer

- mittel- bis grobkörnig
- Plattiger Bruch
- Stets Hellglimmer, Quarz
- $\sim 300 - 650^{\circ} \text{ C}$



## Beobachtung im Gelände:

- Systematische Abfolge von **metamorphe Zonen**
- **Mineralparagenese**

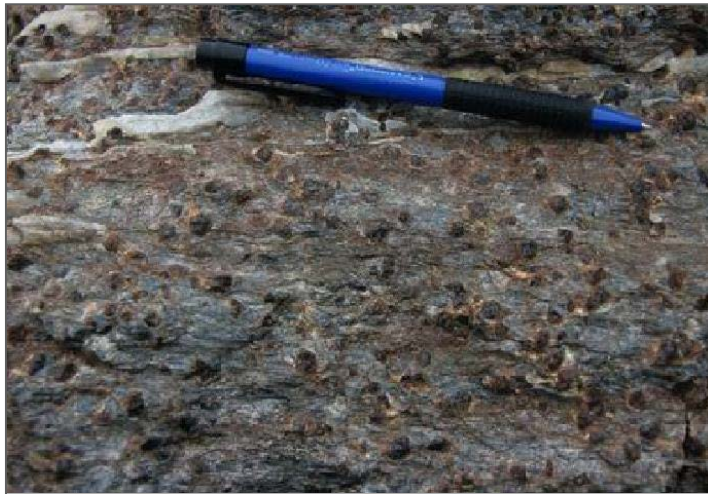


## Definition

## Mineral- Paragenese

griechisch **para:** neben **genesis:** Entstehung

- charakteristische Vergesellschaftung verschiedener Mineralien
- abhängig von den dort herrschenden physikalischen und chemischen Bedingungen



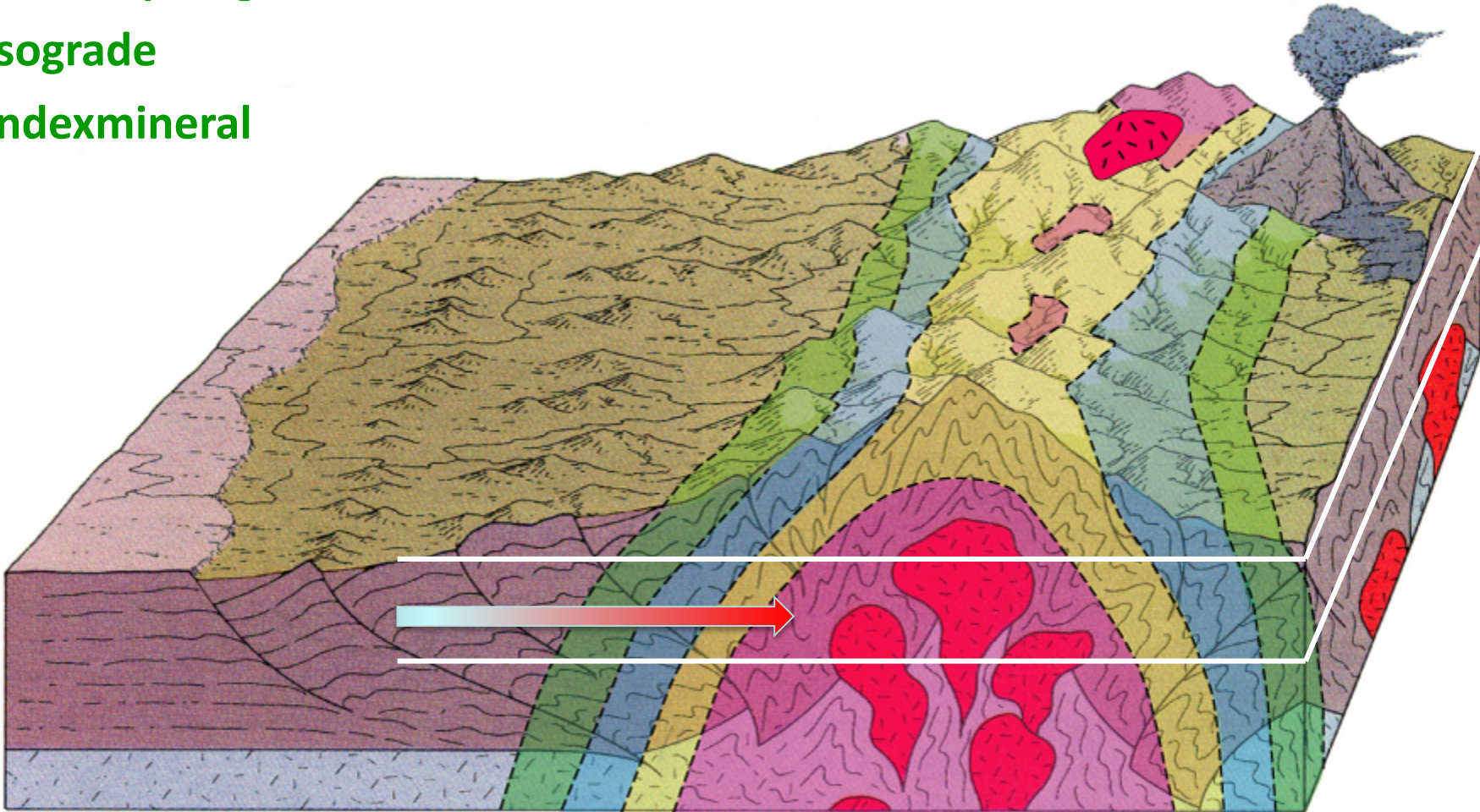
### Granat – Glimmerschiefer

#### Granat

Biotit, Muskovit, Chlorit, Quarz,  
Albit oder Oligoclase

## Beobachtung im Gelände:

- Systematische Abfolge von **metamorphe Zonen**
- **Mineralparagenese**
- **Isograde**
- **Indexmineral**



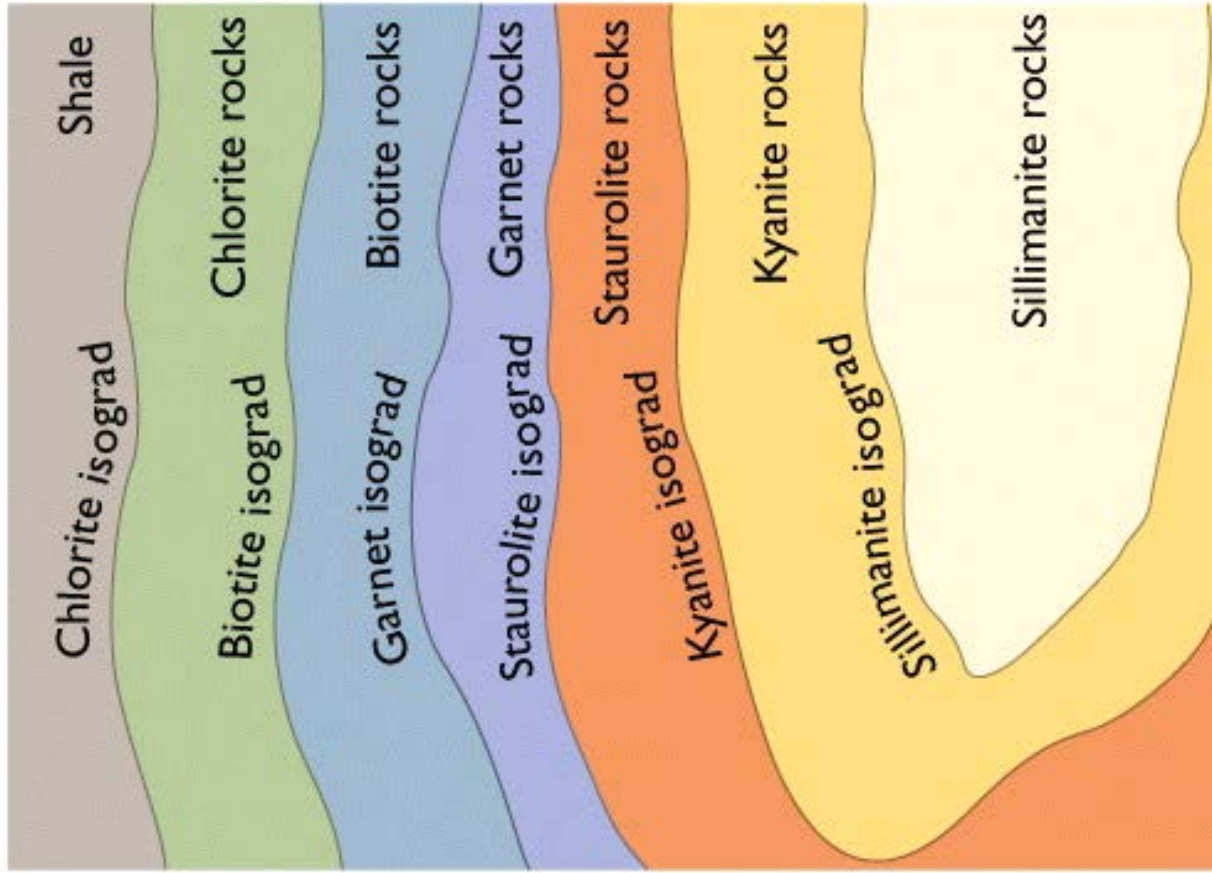
## Definition

## Isograde - Indexmineral

- 1) Beobachtung von Mineralparagenesen im Gelände  
→ Proben mit der gleichen **Paragenese** erhalten das gleiche Symbol
- 2) **Isograde** entspricht einer Linie in einer Karte, die die Punkte miteinander verbindet, an denen in Gesteinen mit vergleichbarer chemischer Zusammensetzung die gleiche Mineralreaktion zu beobachten ist.  
Diese Proben haben die gleichen Metamorphosebedingungen erlebt.
- 3) In vielen Fällen entsteht durch die Reaktion ein neues Mineral → **Indexmineral**.  
Dieses Indexmineral wird zur Benennung der Isograde (Mineralisograde) oder der zwischen den Isograden liegenden Zonen verwendet.

# Definition

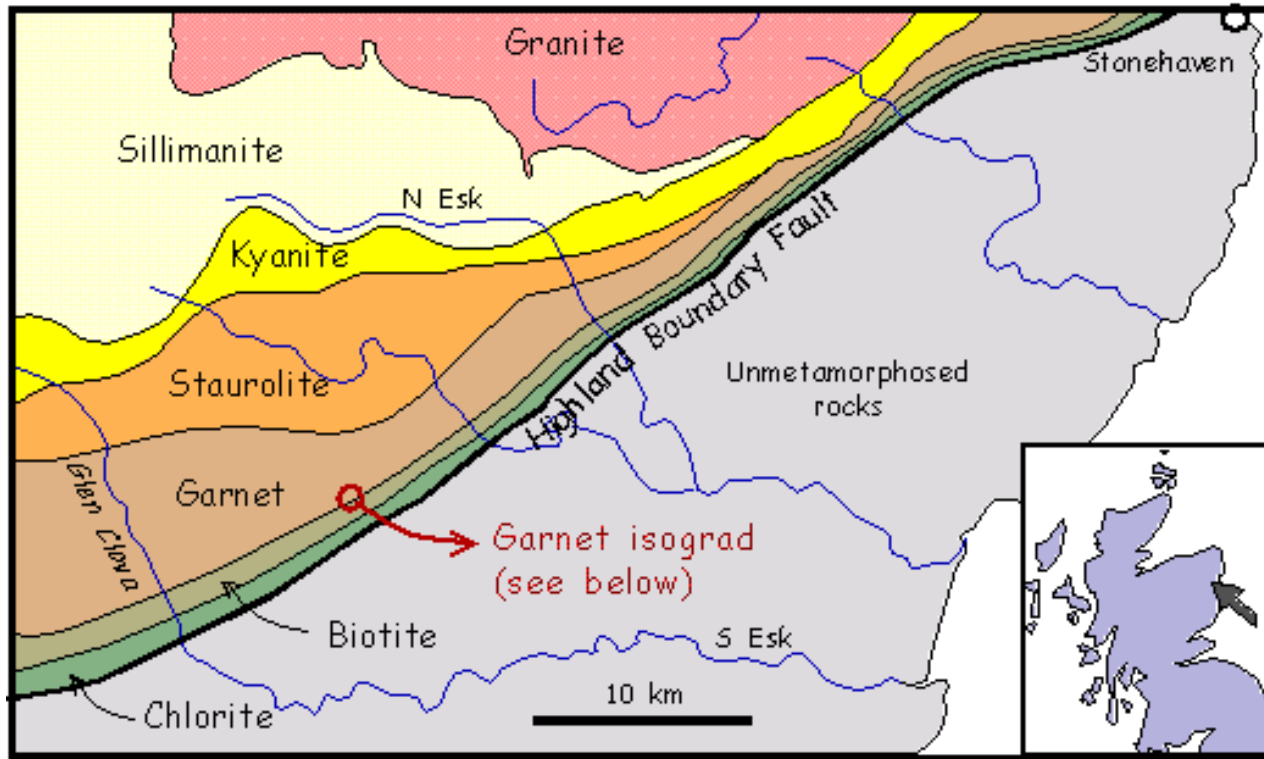
# Isograd



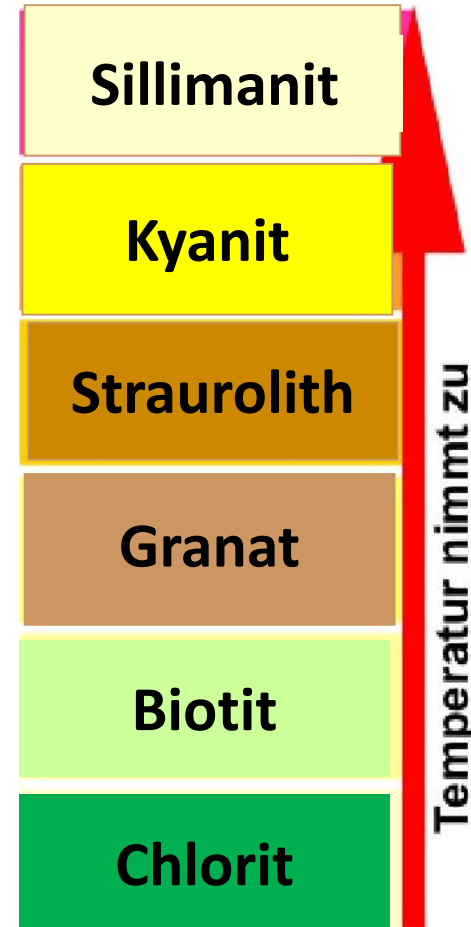
—Increasing metamorphic grade—→



# Regionalmetamorphose Barrow - Typ



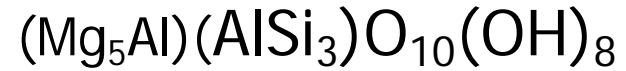
Metamorphic mineral zones in NE Scotland, after Barrow and Tilley



## Beobachtung im Gelände



# Chlorit - Zone



Tonschiefer / Phyllite

*Chlorit,*  
*Muskovit, Quarz & Albit*

# Biotit - Zone

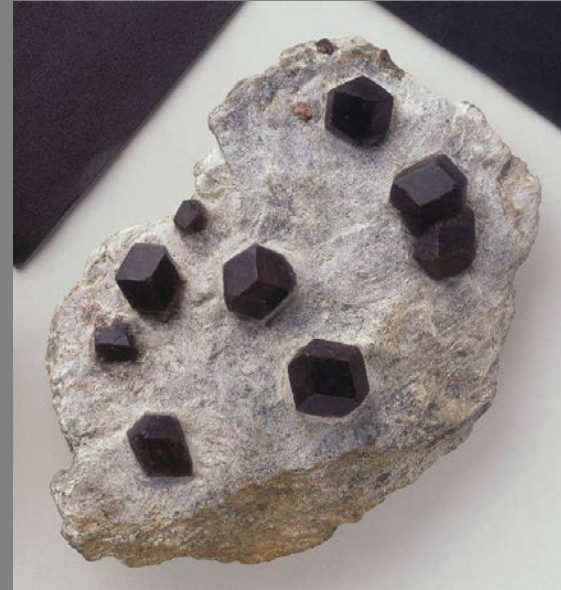
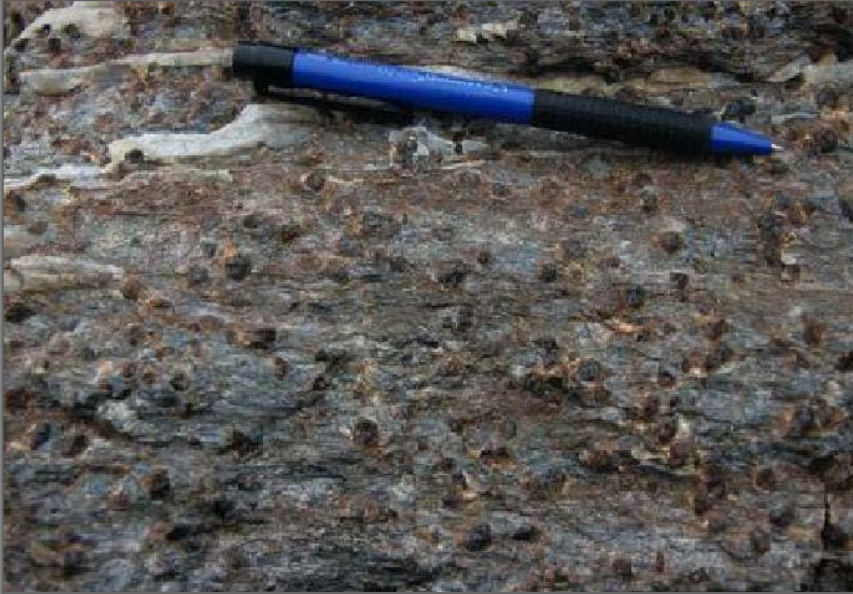


Phyllite /  
Glimmerschiefer

***Biotit***

*Chlorit, Muskovit, Quarz, Albi*

# Granat - Zone



## Glimmerschiefer

mit roten Almandin-  
reichen Granat

## *Granat*

*Biotit, Chlorit, Muskovit, Quarz,  
Albit oder Oligoclase*

# Disthen - Zone



**Glimmerschiefer**  
mit Disthen

***Disthen***

*Biotit, Muskovit, Quarz, Plagioklas,  
Granat*

# Sillimanit - Zone

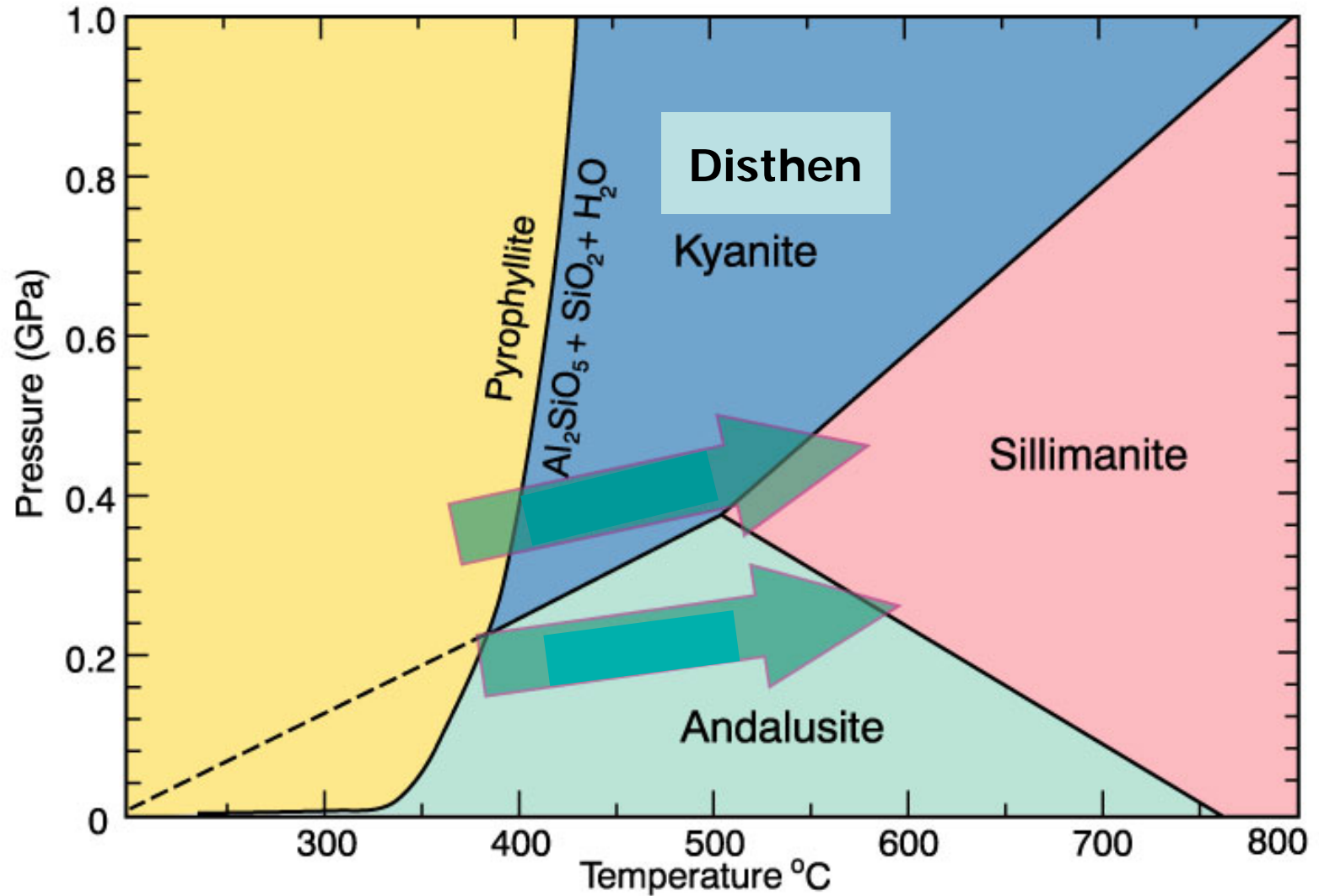


Glimmerschiefer /  
Gneis mit Sillimanit

**Sillimanit**

*Biotit, Muskovit, Quarz, Plagioklas,  
Granat*

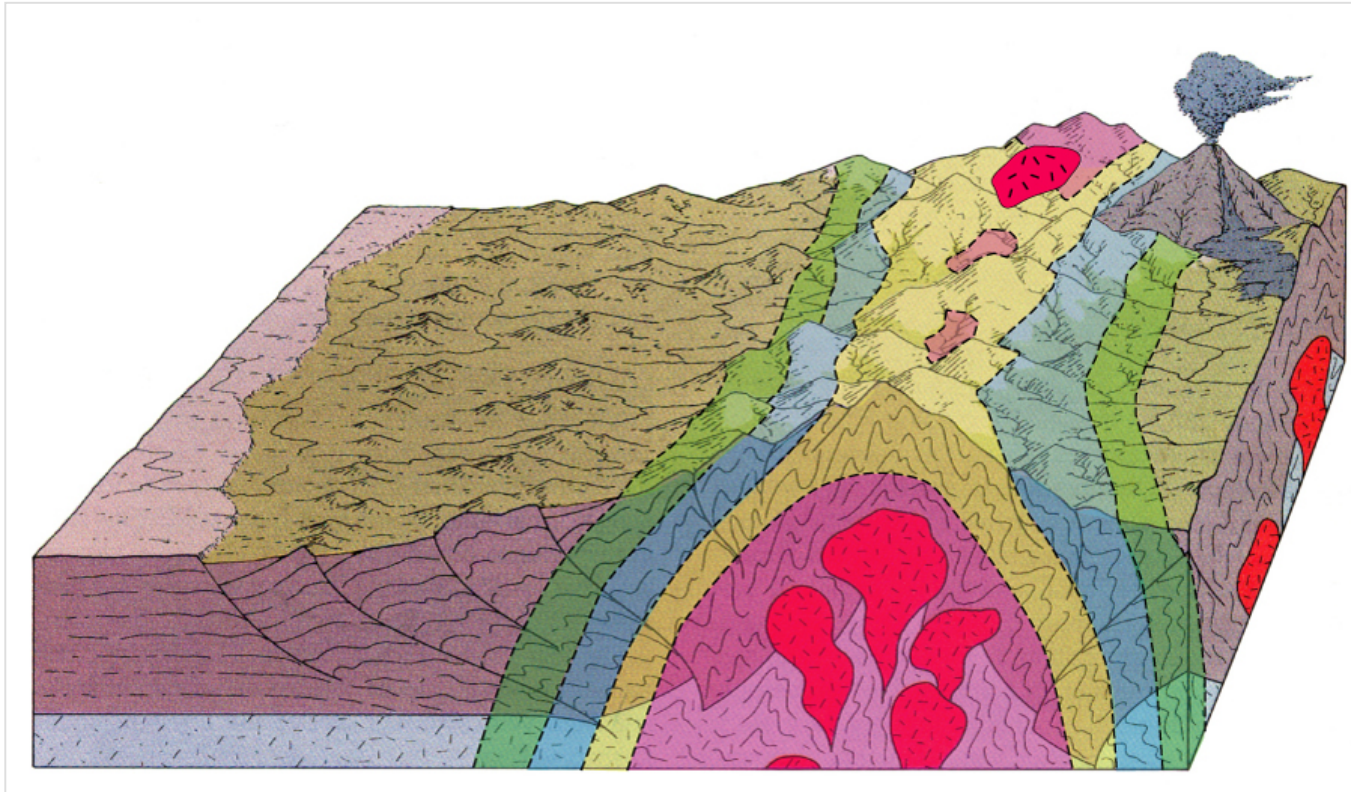
Stabilitätsfeld von Andalusit liegt  
bei einem Druck < 0,37 GPa (~ 10 km)



<b>Zone</b>	<b>Gestein</b>	<b>Paragenese</b>
<b>Chlorit Zone</b>	Tonschiefer / Phyllit	<i>Chlorit, Muskovit, Quarz &amp; Albit</i>
<b>Biotit Zone</b>	Phyllit / Glimmerschiefer	<i>Biotit, Chlorit, Muskovit, Quarz, Albit</i>
<b>Granat Zone</b>	Glimmerschiefer mit roten Almandin-reichen Granaten	<i>Granat, Biotit, Chlorit, Muskovit, Quarz, Albit oder Oligoclase</i>
<b>Kyanite / Disthen Zone</b>	Glimmerschiefer mit Disthen	<i>Disthen, Biotit, Muskovit, Quarz, Plagioklas, sowie Granat</i>
<b>Sillimanit Zone</b>	Glimmerschiefer & Gneis mit Sillimanit	<i>Sillimanit, Biotit, Muskovit, Quarz, Plagioklas, Granat</i>

# Regional - Metamorphose

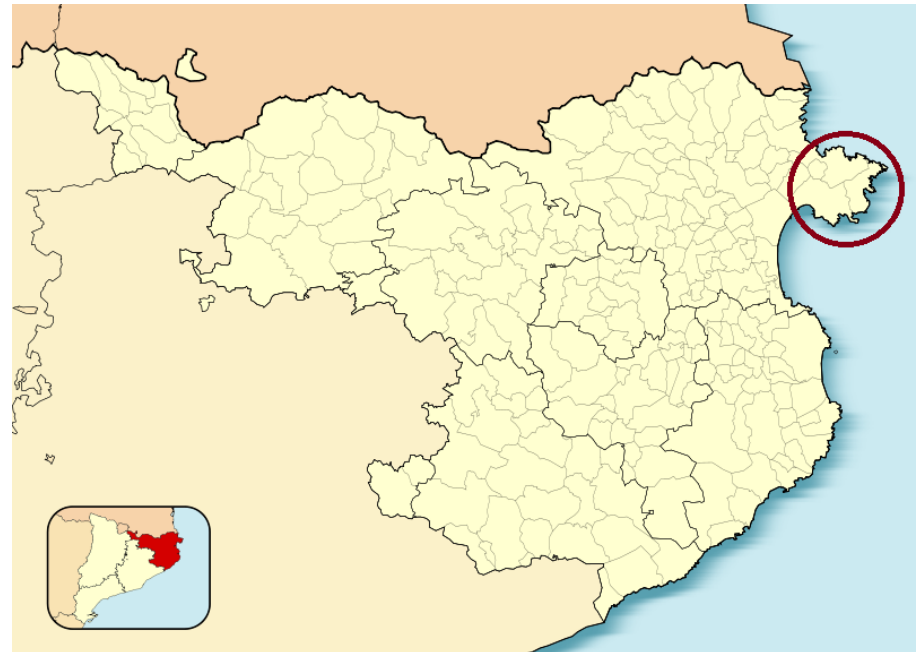
## Migmatit-Bildung

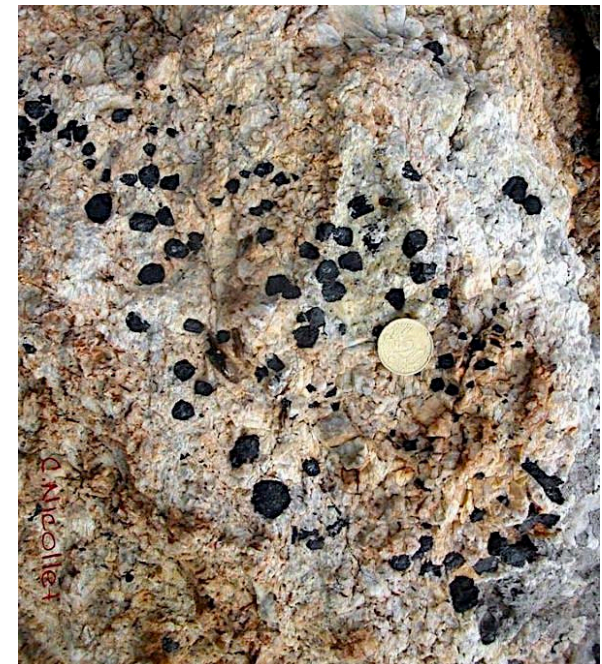
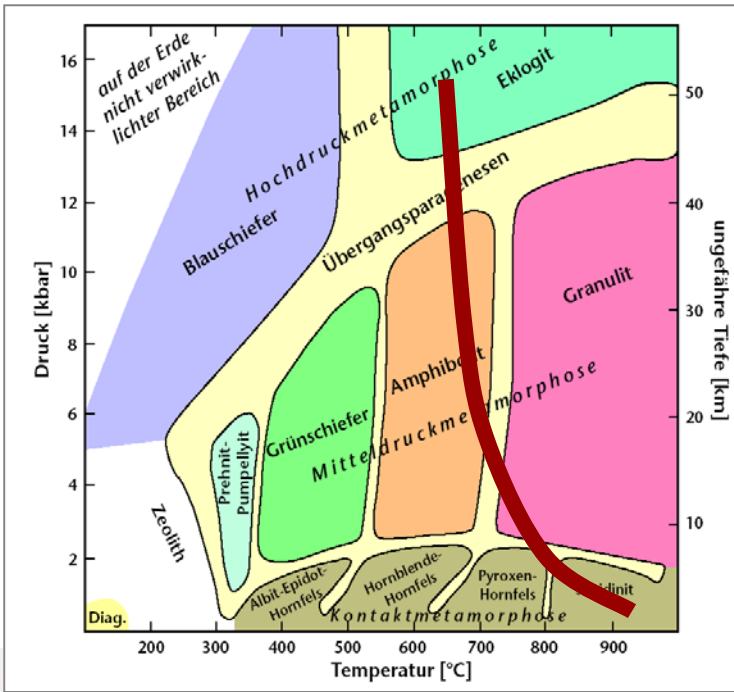


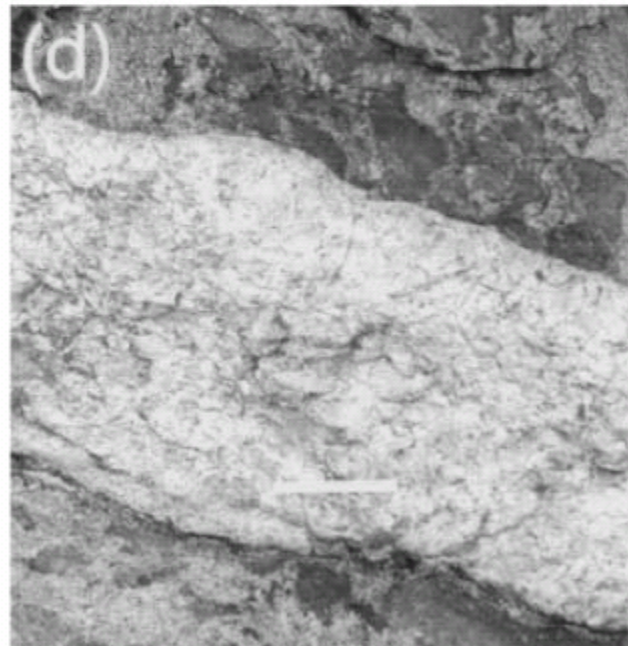
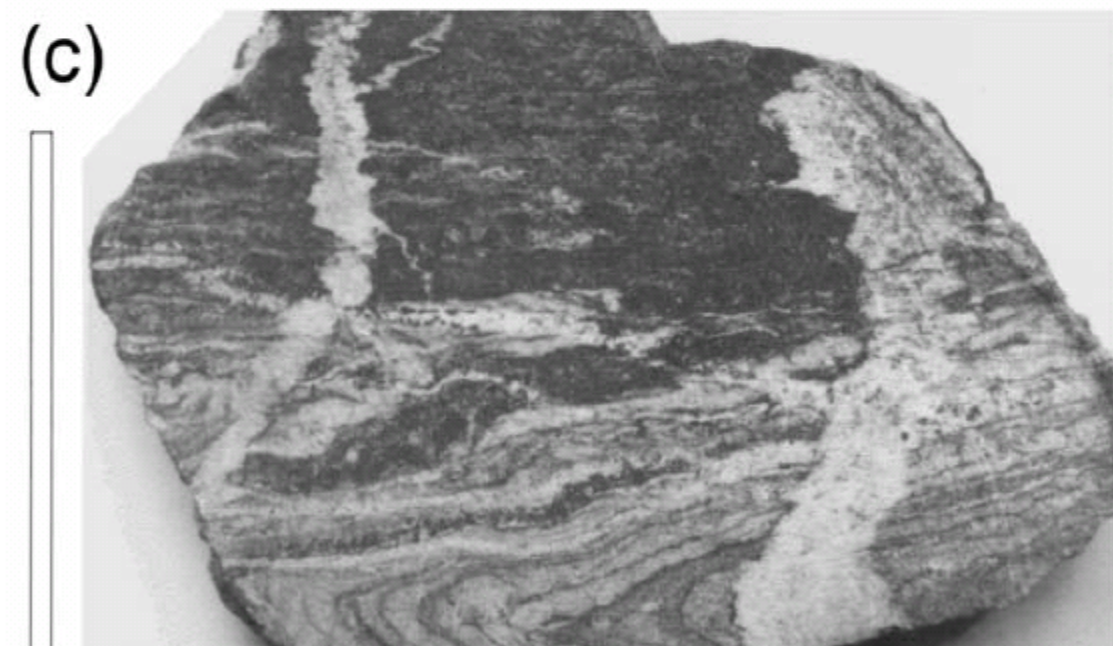
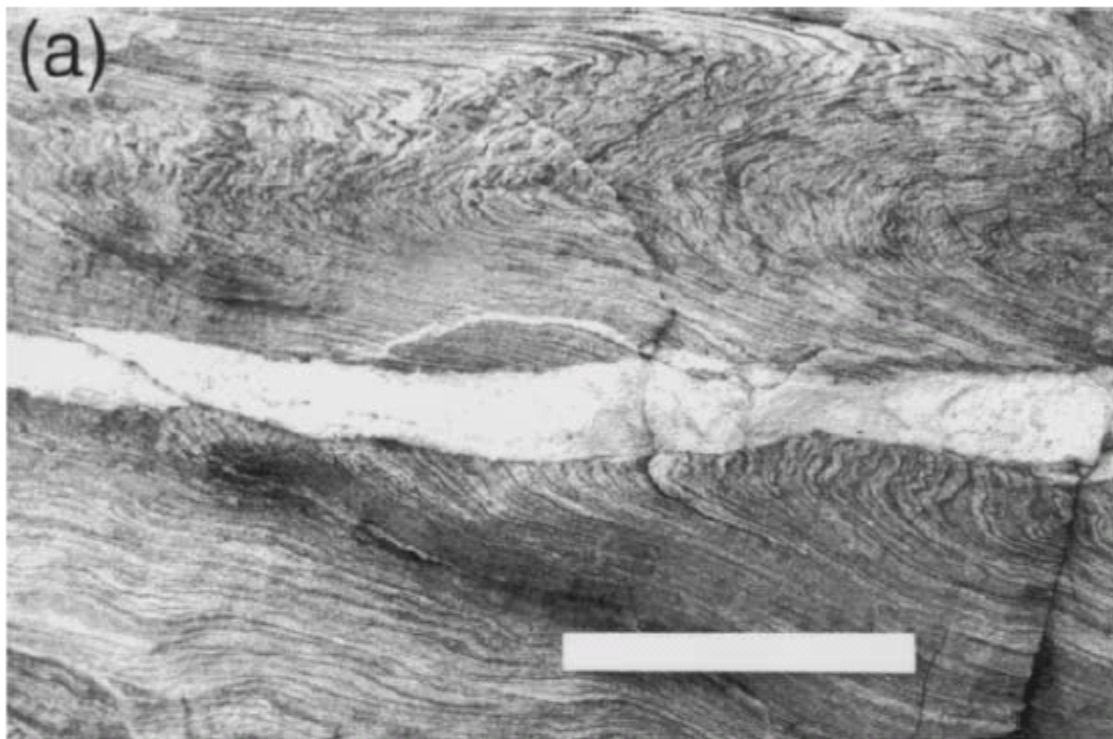


# CAP DE CREUS

Katalanien, Spanien



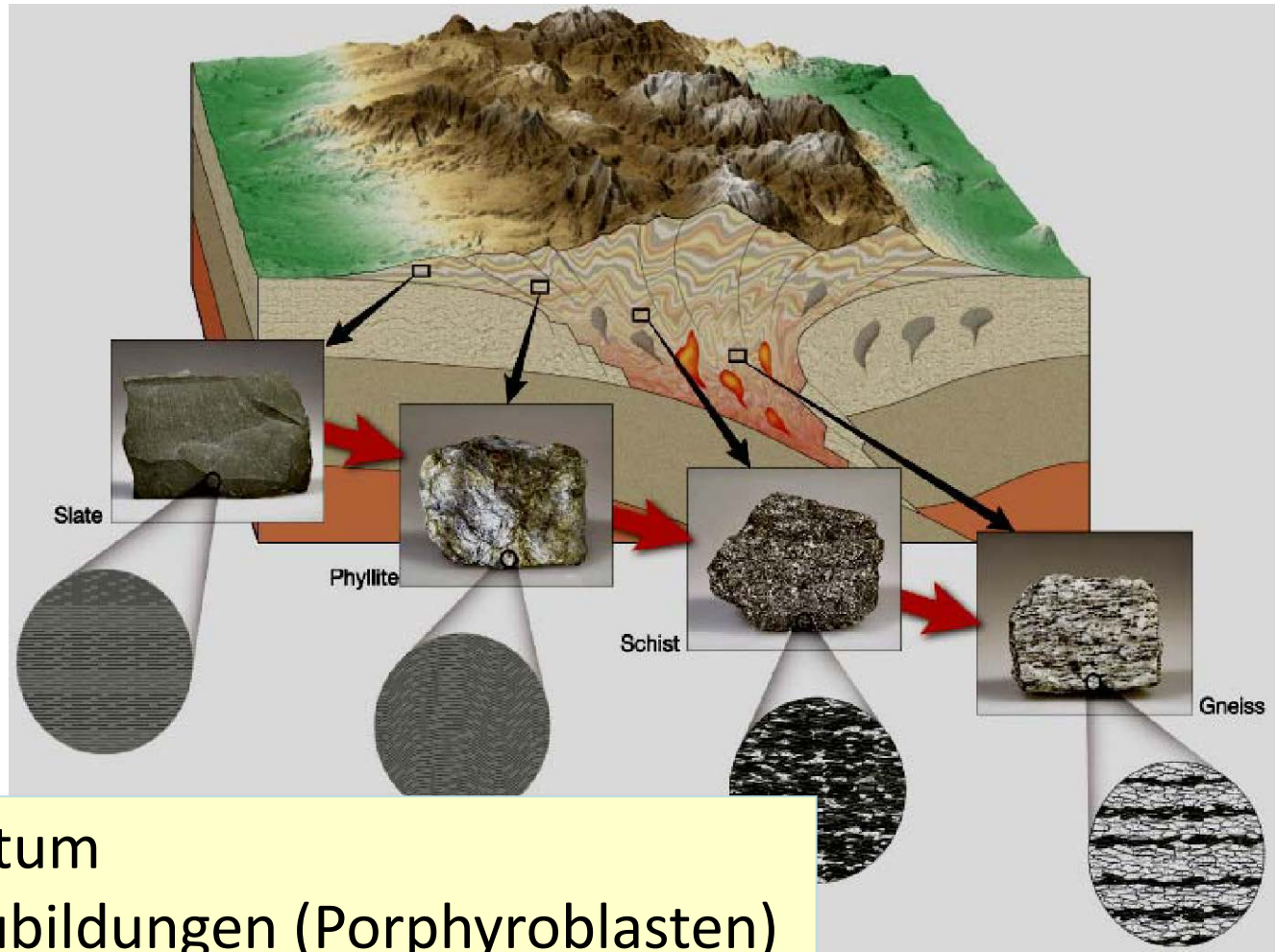




# Regional - Metamorphose

Wärme

Druck



- Kornwachstum
- Mineralneubildungen (Porphyroblasten)
- ausgeprägte Einregelung der Minerale

# Regional - Metamorphose

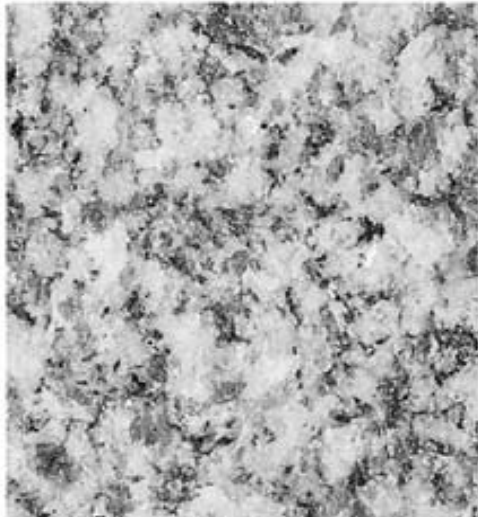
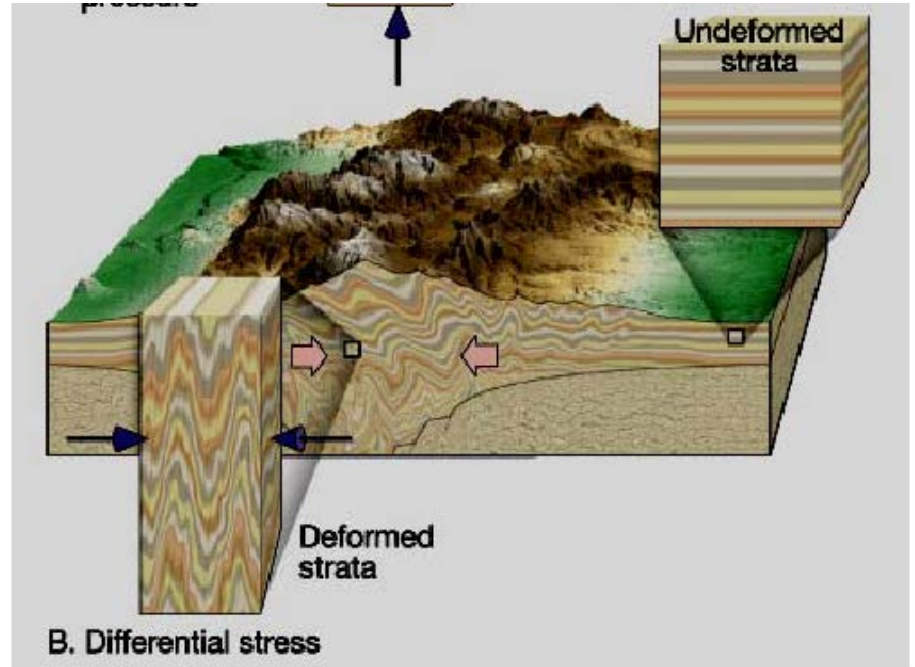
Wärme

Druck

Gerichteter Druck

Ungestört

Gerichteter  
Druck



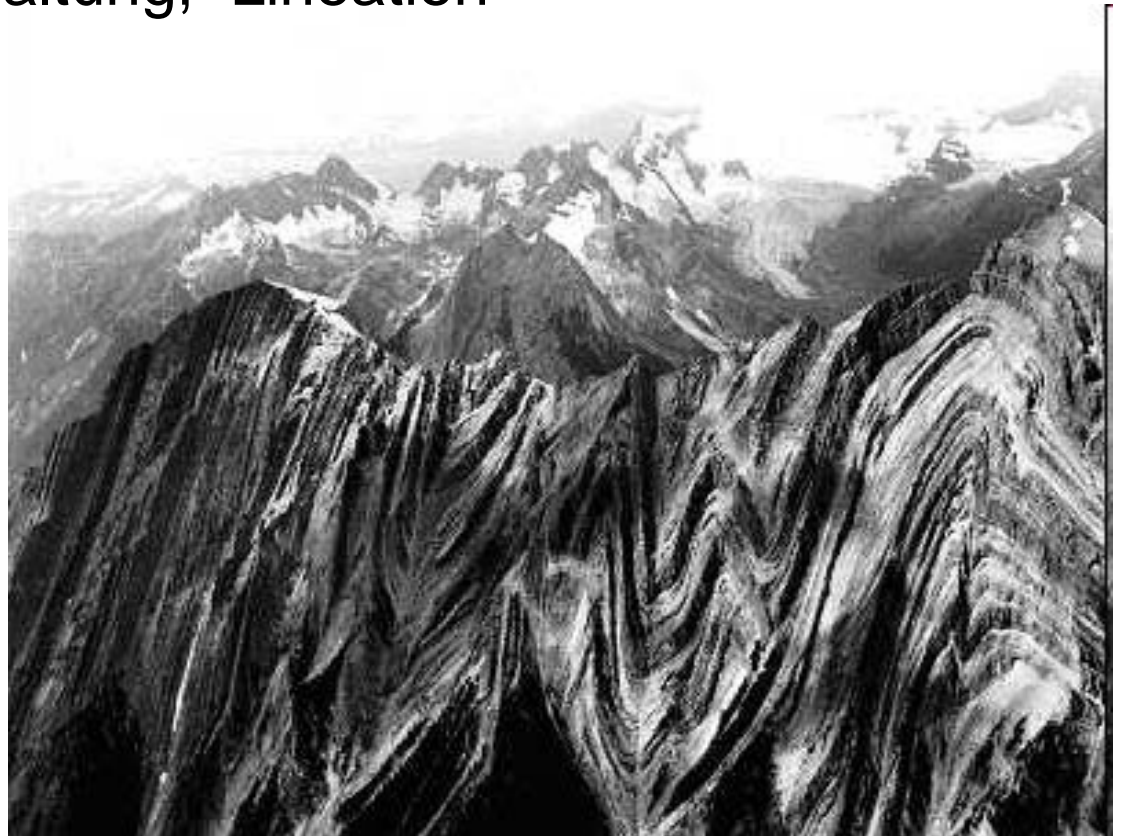
vorher

nachher

# Regionalmetamorphose

- Tektonik → Deformation  
Schieferung, Verfaltung, Lineation

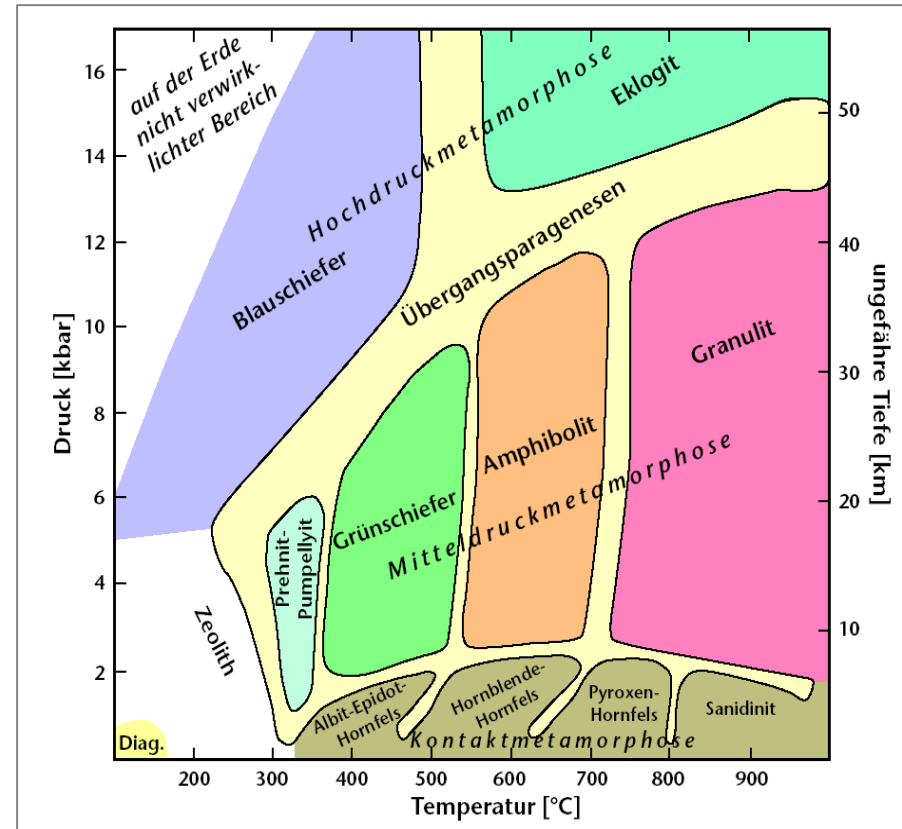
Unter Umständen  
mehrere Phasen der  
Kristallisation &  
Deformation

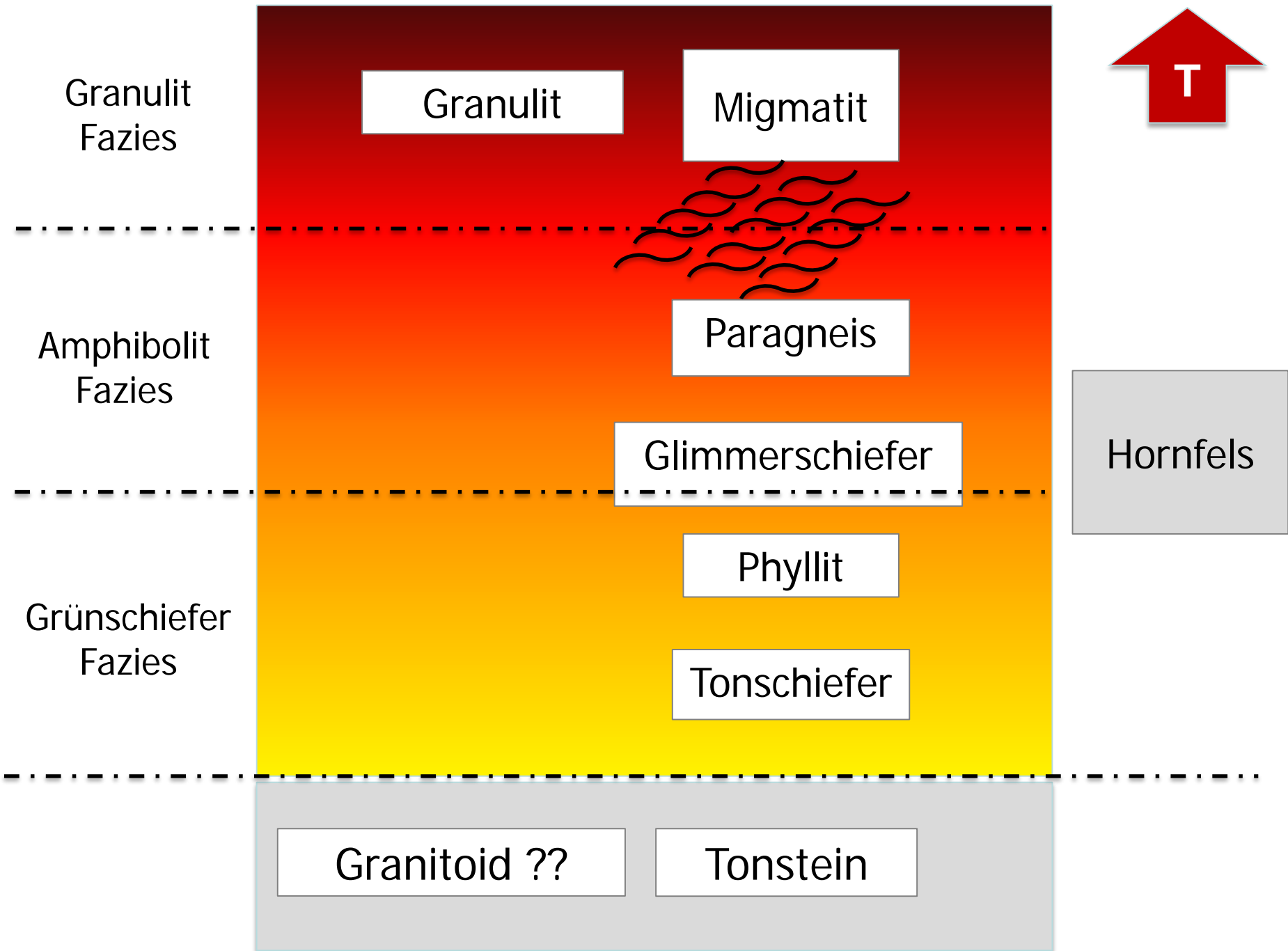


*British Columbia (Kanada)*

<http://www.efodon.de/html/archiv/vorzeit/zillmer/berge1.jpg>

Metamorphosegrad	Zonegliederung nach Mineralfazies der Regionalmetamorphose	Ausgangsmaterial
		Ton
beginnend	Diagenese	Tonschiefer
	Zeolithfazies	
niedrig	Grünnschieferfazies	Phyllit
mittel		Glimmerschiefer (oft mit Granat)
	Amphibolitfazies	
hoch		Paragneis
sehr hoch	Granulitfazies	Granulit





Granulit  
Fazies

Granulit

Migmatit

T

Amphibolit  
Fazies

Paragneis

Hornfels

Grünschiefer  
Fazies

Glimmerschiefer

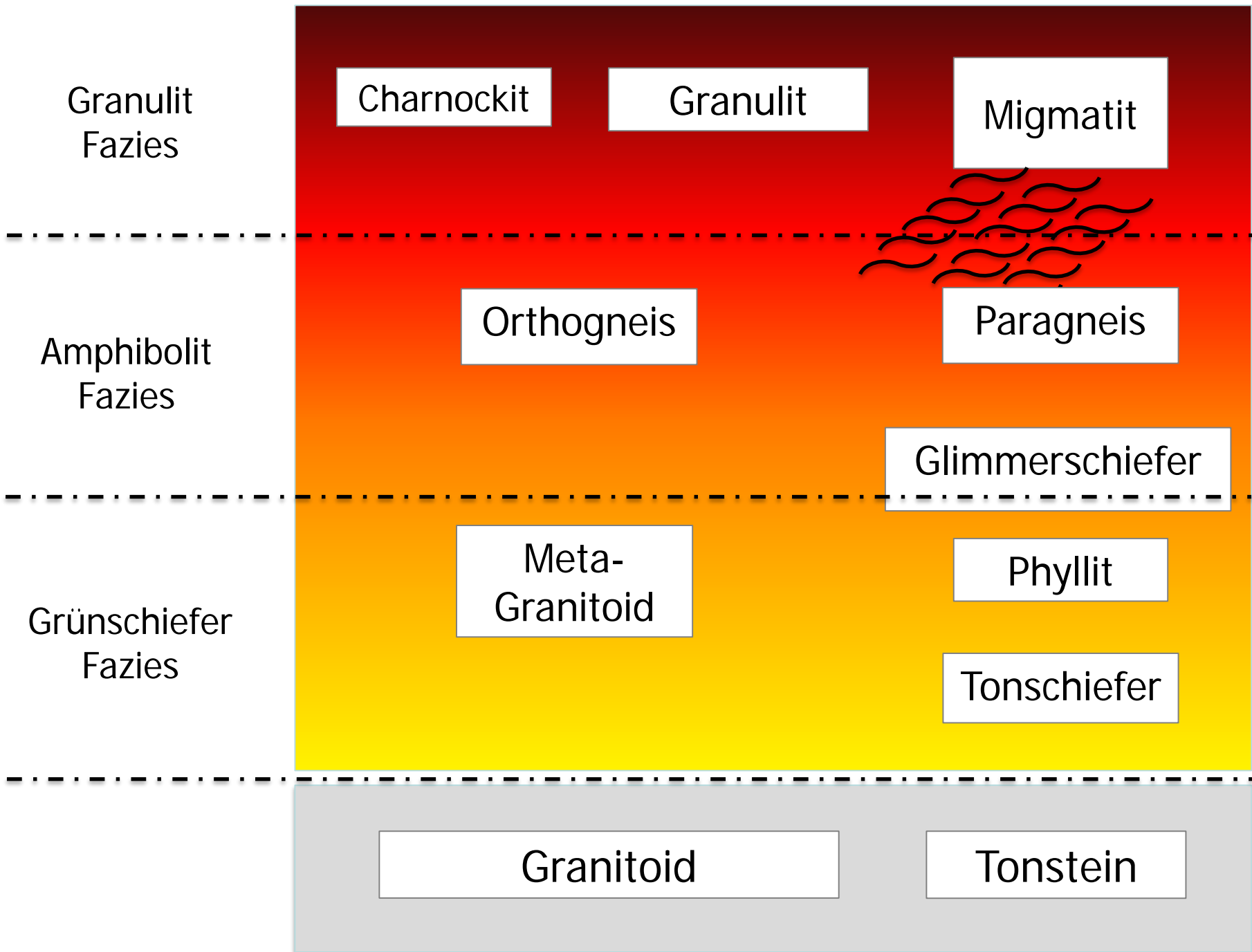
Phyllit

Tonschiefer

Granitoid ??

Tonstein





Granulit  
Fazies

Charnockit

Granulit

Migmatit

Amphibolit  
Fazies

Orthogneis

Paragneis

Grünschiefer  
Fazies

Meta-  
Granitoid

Phyllit

Tonschiefer

Granitoid

Tonstein

# Granit - Orthogneis

Metamorphes Gestein mit Paralleltextur

→ eingeregelter Kristalle senkrecht zur Fläche mit maximalen Kompressionskraft



## Definition

## Ortho-, Para-Gneis

Gneis von "Geneus", einem alten Wort der sächsischen Bergleute für das taube feste Gestein zwischen den Erzgängen

- ✓ mittel- bis grobkörnige Metamorphite mit ausgeprägtem Parallelgefüge (lagige Textur).
- ✓ Hauptminerale sind Feldspat (meist Orthoklas, > 20%), Quarz und Glimmer (Biotit, Muskovit). Als Nebengemengteile können u.a. Disthen, Sillimanit, Granat, Hornblende und Pyroxen auftreten.
- **Orthogneis** entstanden aus **magmatischem** Ausgangsgestein
- **Paragneis** entstanden aus **sedimentärem** Ausgangsgestein

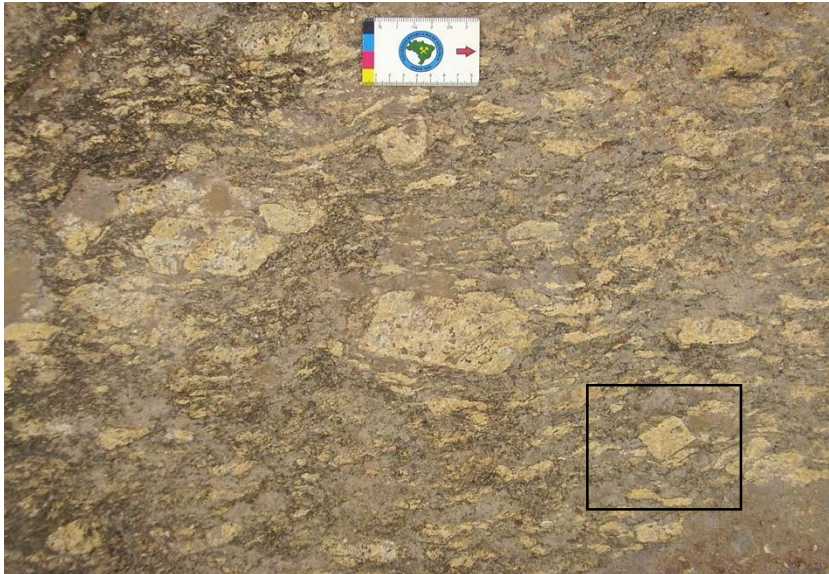
## Definition

## Granulit

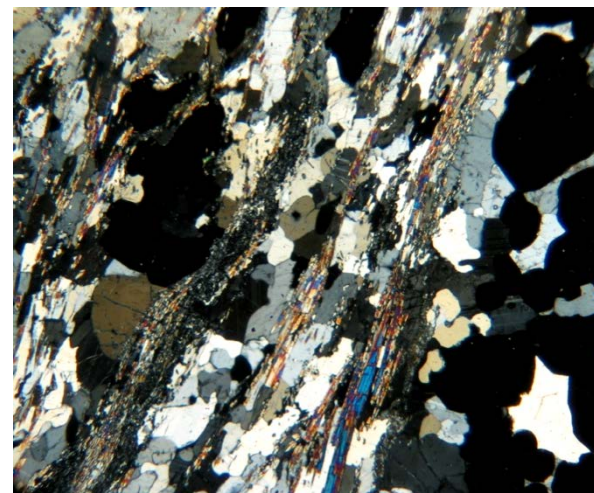
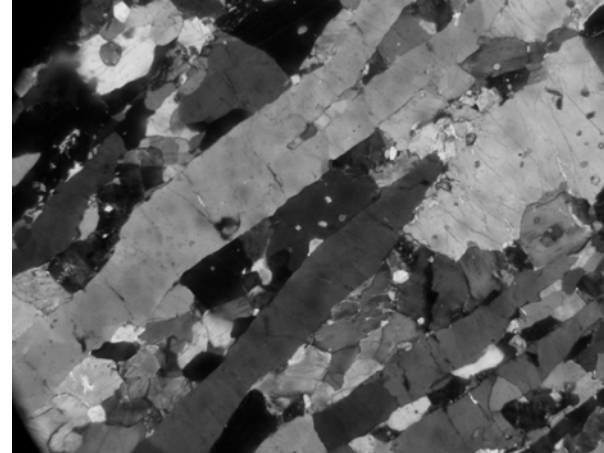
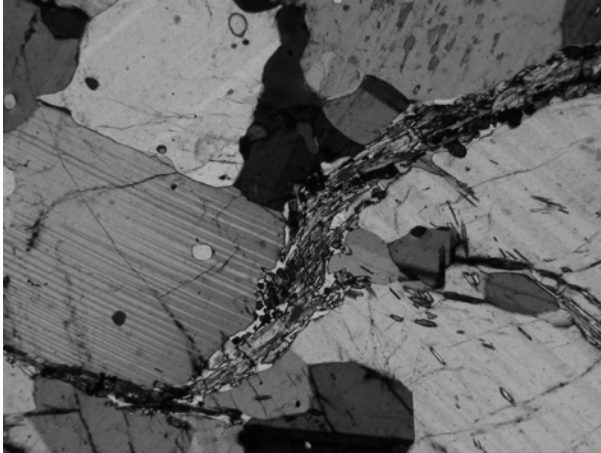
(latein. granulum: Körnchen)

- ✓ Granulitfazies: hohe Drücke, hohe Temperatur
- ✓ Ein fein- bis mittelkörniges, hochgradig metamorphes basisches oder saures Gestein.
  - Hauptminerale: Feldspat, Quarz
  - mafische Minerale: Pyroxen, Granat, Amphibol.
  - Granulite enthalten kein Wasser.  
Muskovit ist nicht mehr stabil.

# Vom Granit zum Orthogneis ...



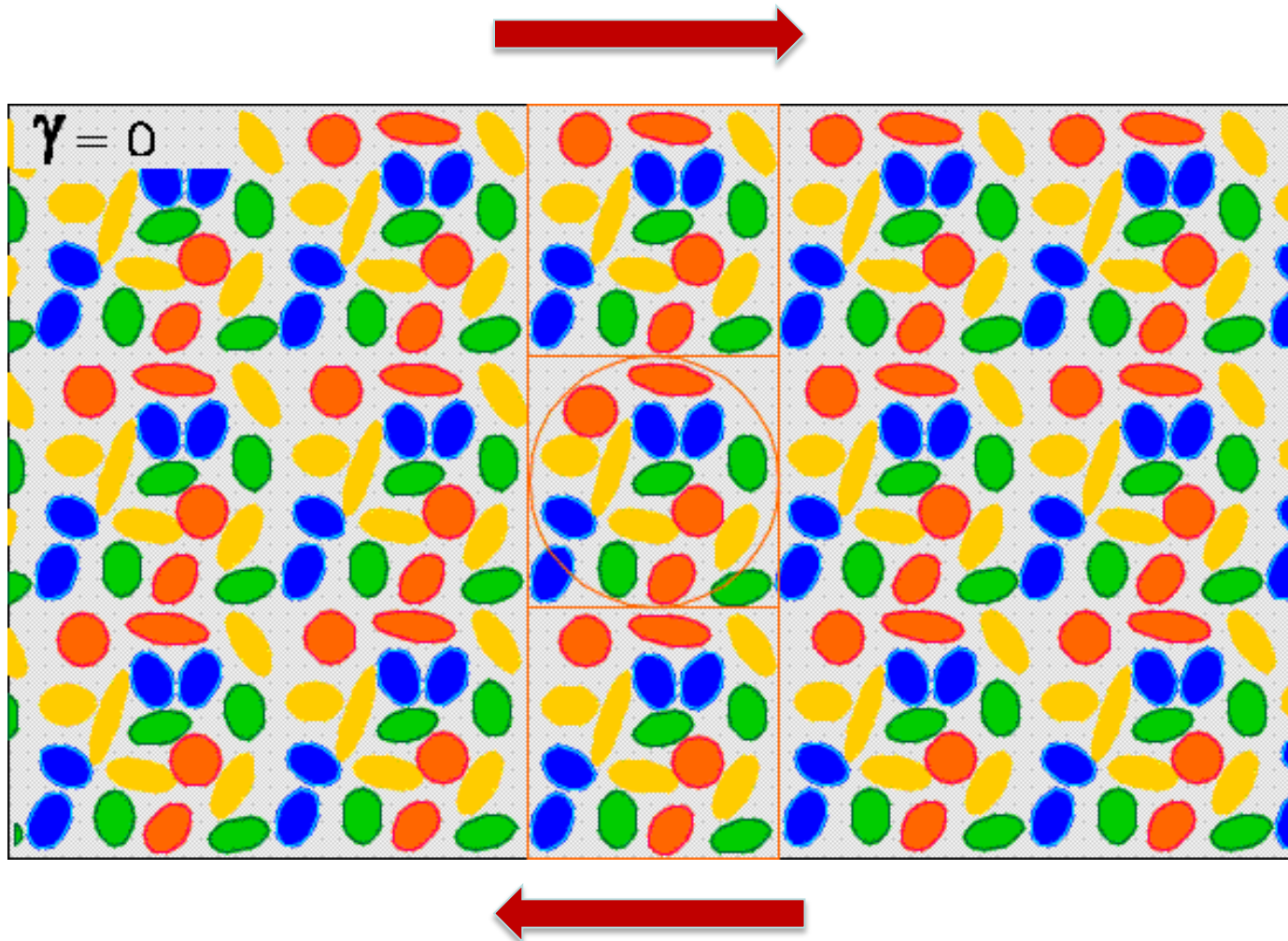
# Entwicklung einer metamorphen Foliation im Gneis und Granulit



~ 1 cm

# Deformation entlang von Scherbahnen

- In Gesteinen können Deformationen in diskrete Zonen konzentriert auftreten (engl. fault rocks).

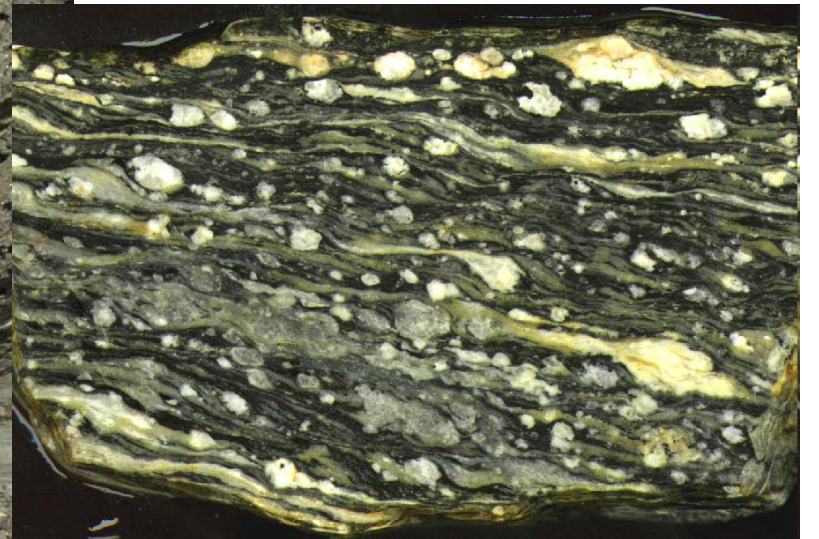


# Kataklastische - Metamorphose / Mylonit

Lokale Deformation,  
auf die Umgebung von tektonischen  
Störungszonen (Verwerfungen,  
Überschiebungen) beschränkt



**Kataklase**



**Mylonite**



# Kataklastit / Mylonit

**Kataklase** = Zerschneiden & Zermahlen von einzelnen Mineralen in einem Gestein

- Spröde Deformation der Minerale
- Brekziöses Aussehen

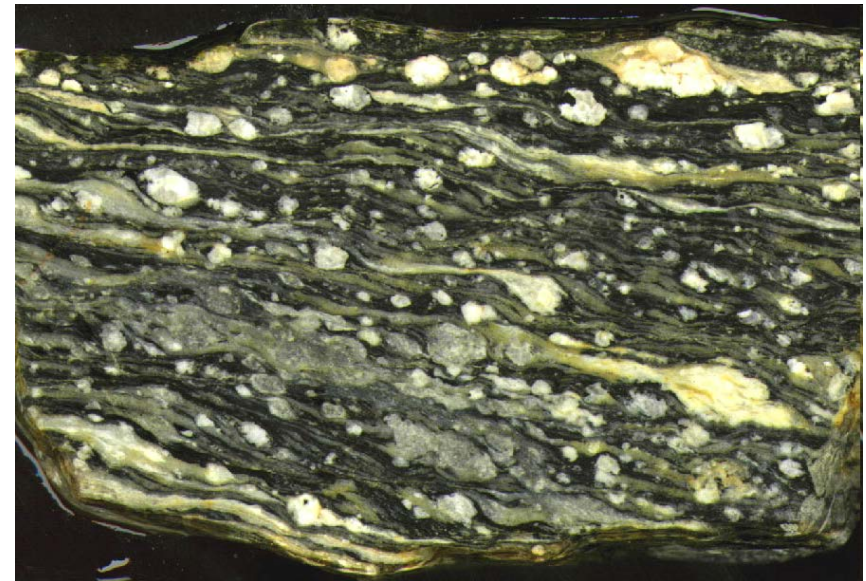
Diese Gesteine entstehen entlang tektonischer Störungszonen durch scherende Bewegung zweier aneinander vorbeigleitender Gesteinskörper

**Mylonite:**                    *Griech. 'Mühle'*

- plastische Verformung der Minerale
- die verformten Minerale sind in der Regel kleiner als im Ausgangsgestein



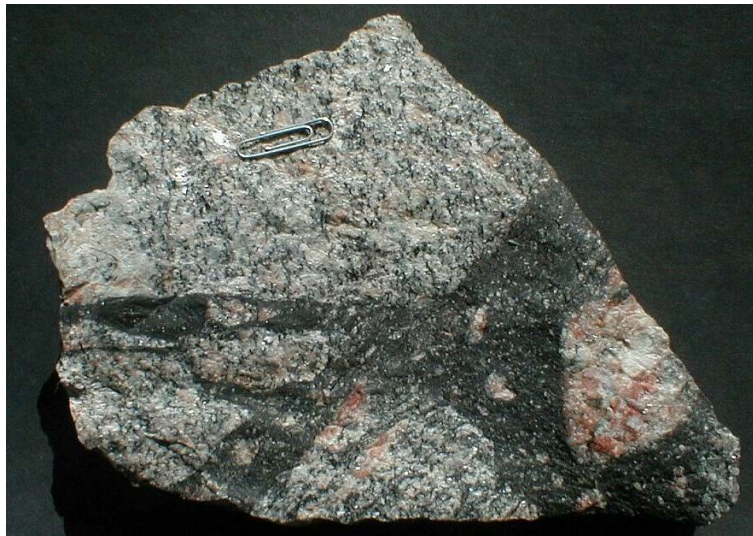
*Bild: <http://www.mineralienatlas.de>*



*Bild: <http://earth.boisestate.edu/home/cjnorth/images/mylonite.JPG>*

# Pseudotachylit

Beim Versatz von Gesteinseinheiten  
an einer tektonischen Störung  
können lokal Temperaturen bis  
1000°C erreicht werden  
→ zu Glas erstarrte Schmelze



Pseudotachylit wird meist als Anzeiger für  
sehr starke Erdbeben gewertet

*gri pseudos* = Täuschung, Betrug  
*tachys* = schnell

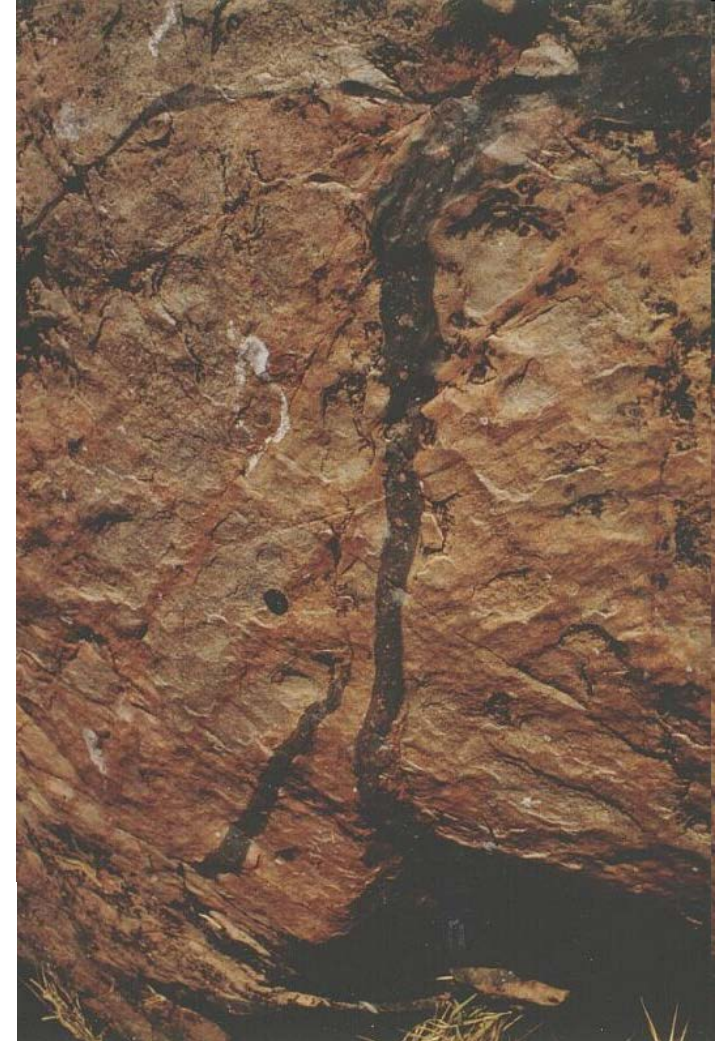
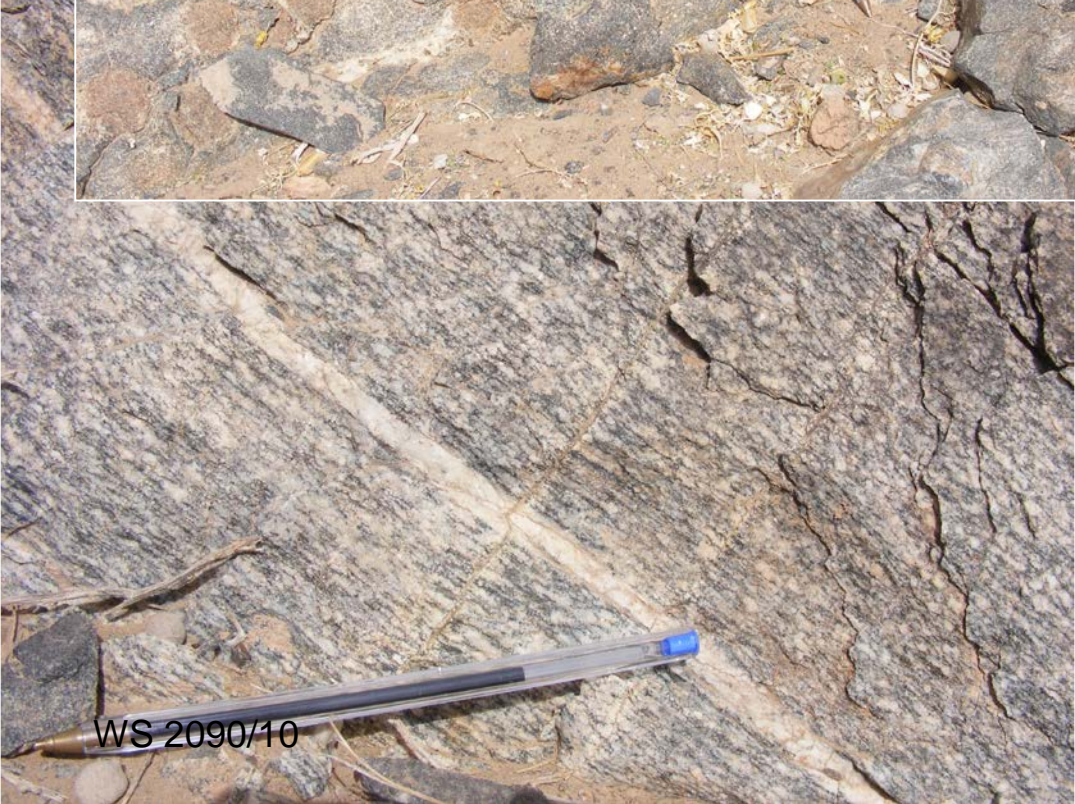


Bild: <http://www.impaktstrukturen.de/origi/pseudovredefort.jpg>  
<http://www.impaktstrukturen.de/origi/070.jpg>

Zaghand / Zentral - Iran



WS 2090/10

# Zusammenfassung

## Metamorphose

- abhängig von den herrschenden physikalischen und chemischen Bedingungen
- alle Gesteine können metamorph überprägt werden  
→ Was war das Ausgangsgestein (Protolith) ?
- Ursache für das Aufheizen eines Gesteins:
  - Versenkung von Gesteinspakete
  - radioaktiver Zerfall in der verdickten Kruste
  - Intrusion eines Magmas
  - Zufuhr heißer Fluide

# Zusammenfassung

## Metamorphose

- **Kontaktmetamorphose**
  - d.h. hohe Aufheizungsraten und geringe Druckänderungen
  - in der Nähe von Intrusionen
  - meist fehlt eine Mineraleinregelung
  - oft geringe Korngröße → Hornfels
- **Versenkungsmetamorphose**
  - d.h. hohe Druckänderungen bei niedrige Aufheizungsraten
  - Subduktionszonen
  - typische Gesteine: Blauschiefer (Eklogit)
- **Regionalmetamorphose:**
  - d.h. regionale Erhöhung von Druck und Temperatur
  - typisch für konvergente Plattengrenzen (Orogenese)
  - i.d.R. zeigen die Gesteine eine bevorzugte Einregelung

# Zusammenfassung

- metamorphe Fazies: (Eskola)  
Gesteine, die unter gleichen P-T-Bedingung gebildet wurden
- Metamorphosegrade  
ist grob mit der Intensität der Metamorphose gekoppelt.  
Das erste Erscheinen eines Minerals als Indikator (Indexmineral, Isograde)

## Prozesse während der Metamorphose

- Kornwachstum
- Phasenumwandlung
- Mineralreaktionen
- Deformation - Rekristallisation