



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**

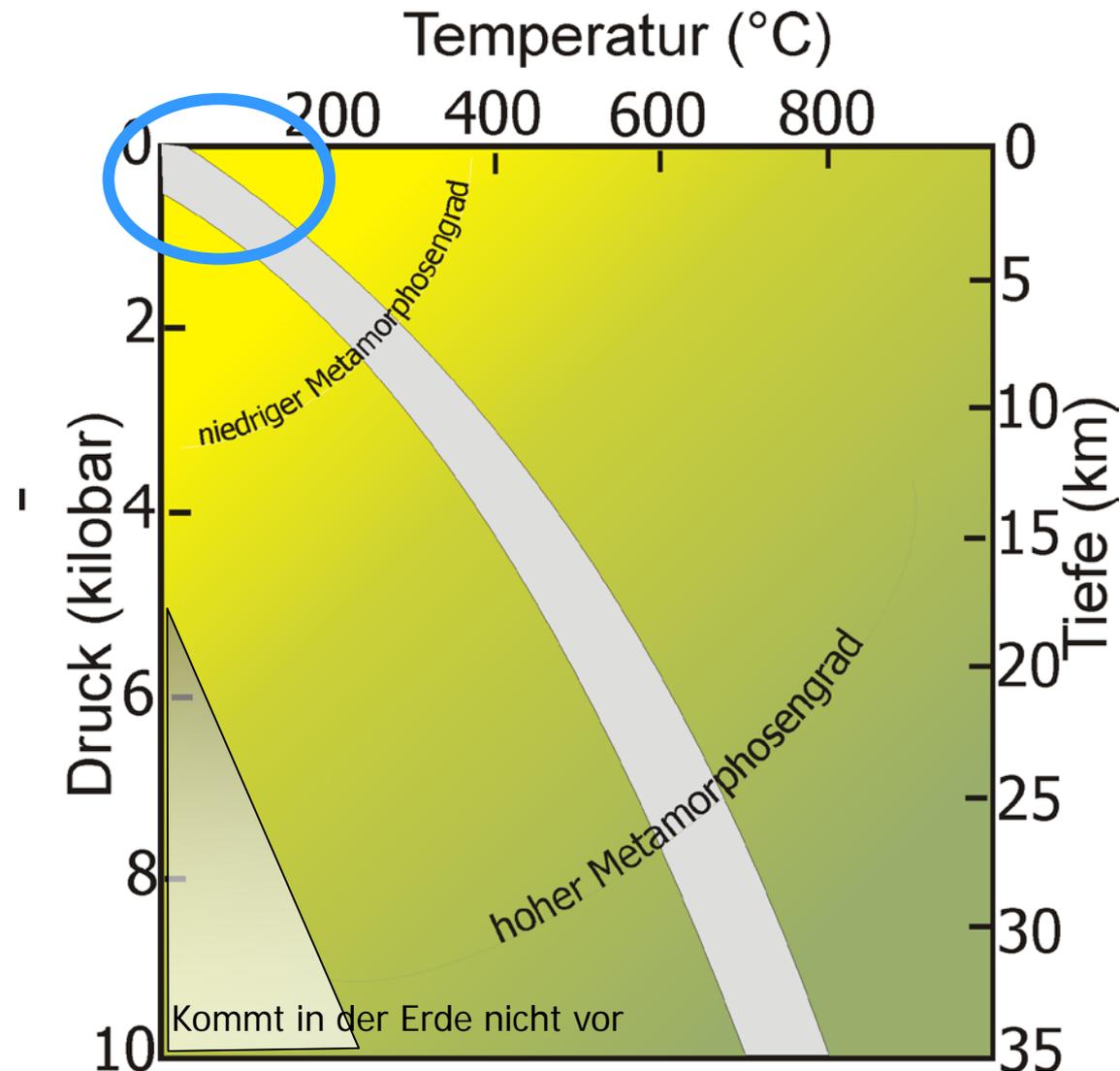
- **Biogene Sedimentgesteine**

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

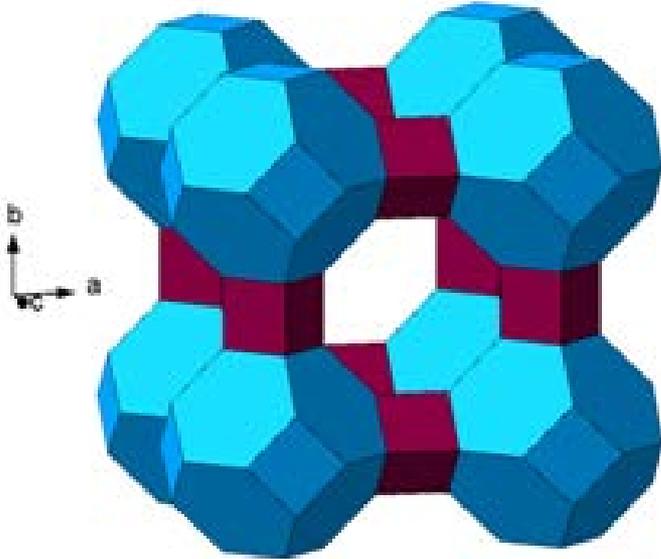


Zeolith

Gerüstsilikate aus AlO_4 - und 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

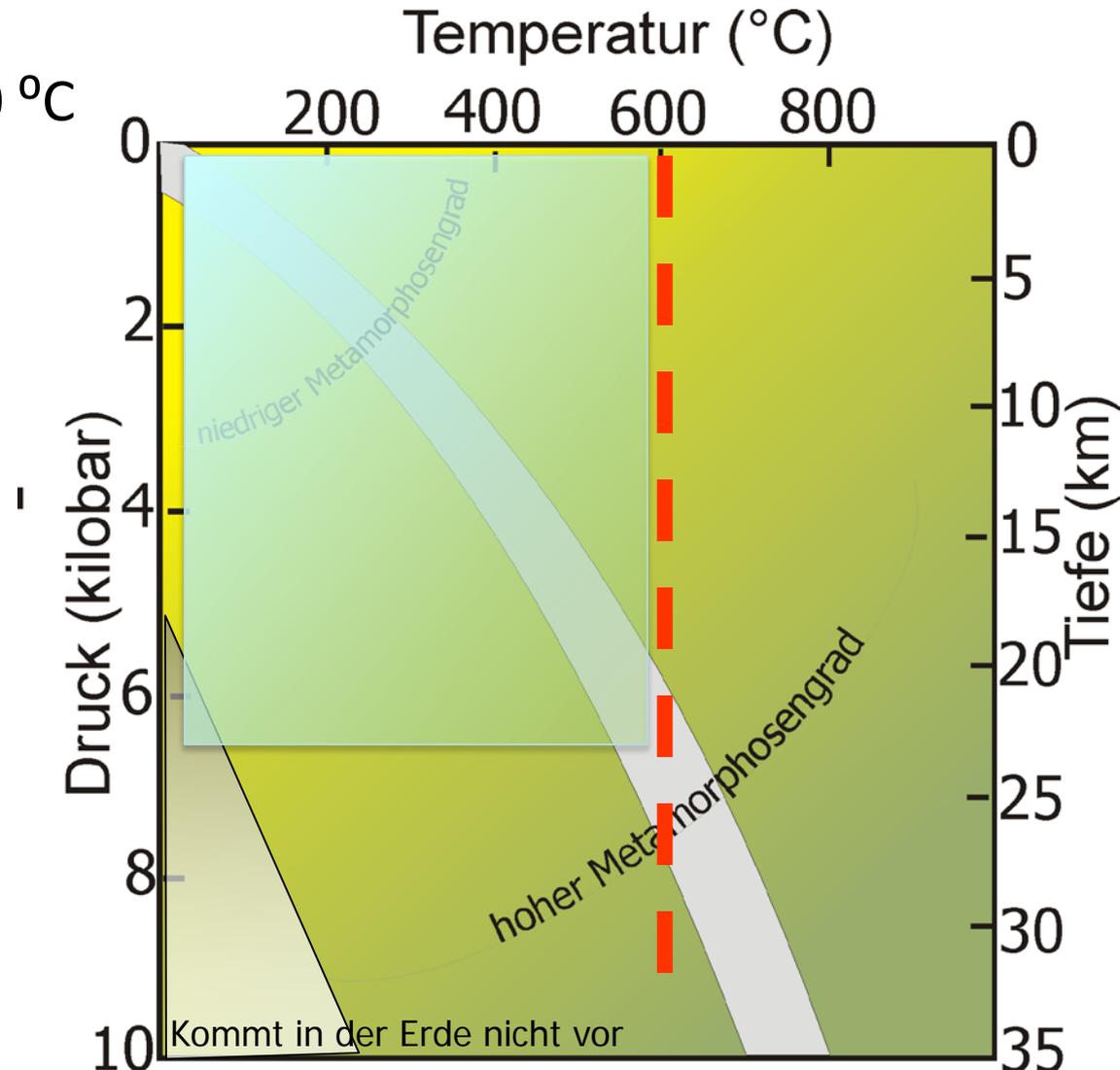
- **Teilschmelze Anatexis / Migmatit**

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

abhängig von

- Druck
- Zusammensetzung
- H₂O-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

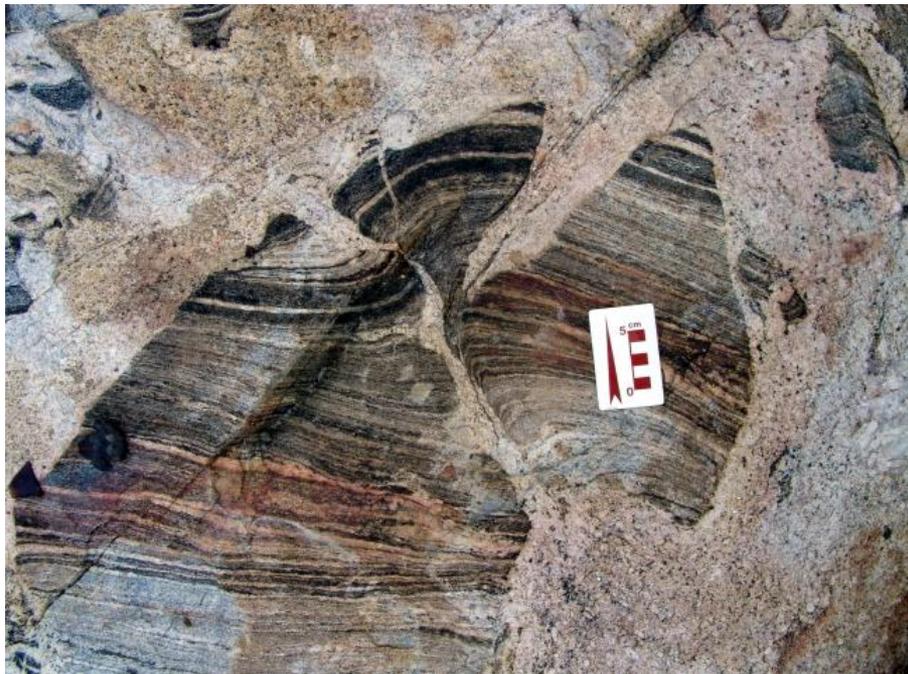
Die resultierenden Gesteine werden als **Migmatite** bezeichnet

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).

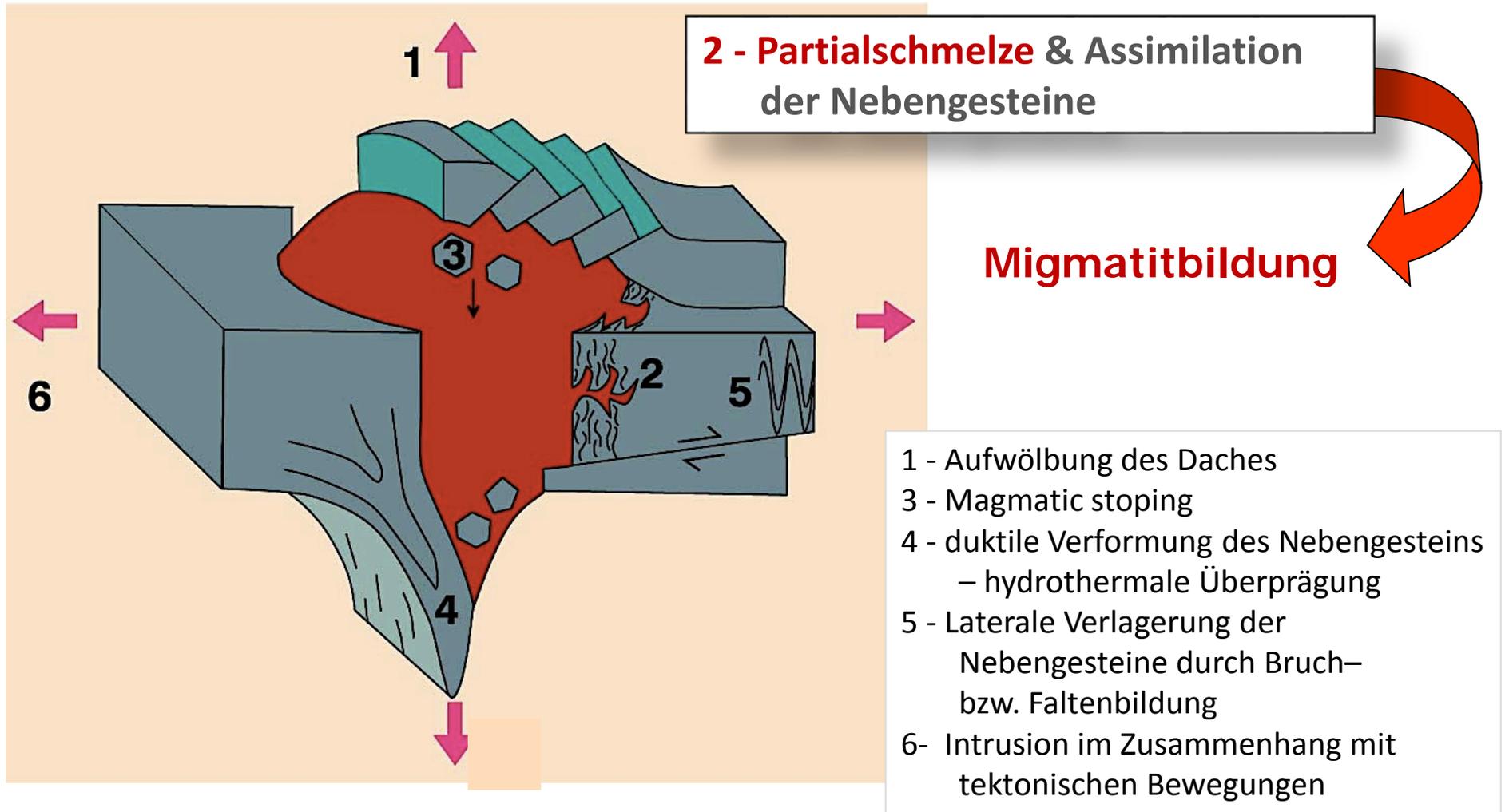
Die dunklen mesokraten Bestandteile des Gesteins bleiben zurück (Melanosom).

*Prata Pluton
Borborema Province*

Roberto Weinberg, Monash University, Australia

Anatexis

Übergang Plutonismus / Metamorphose



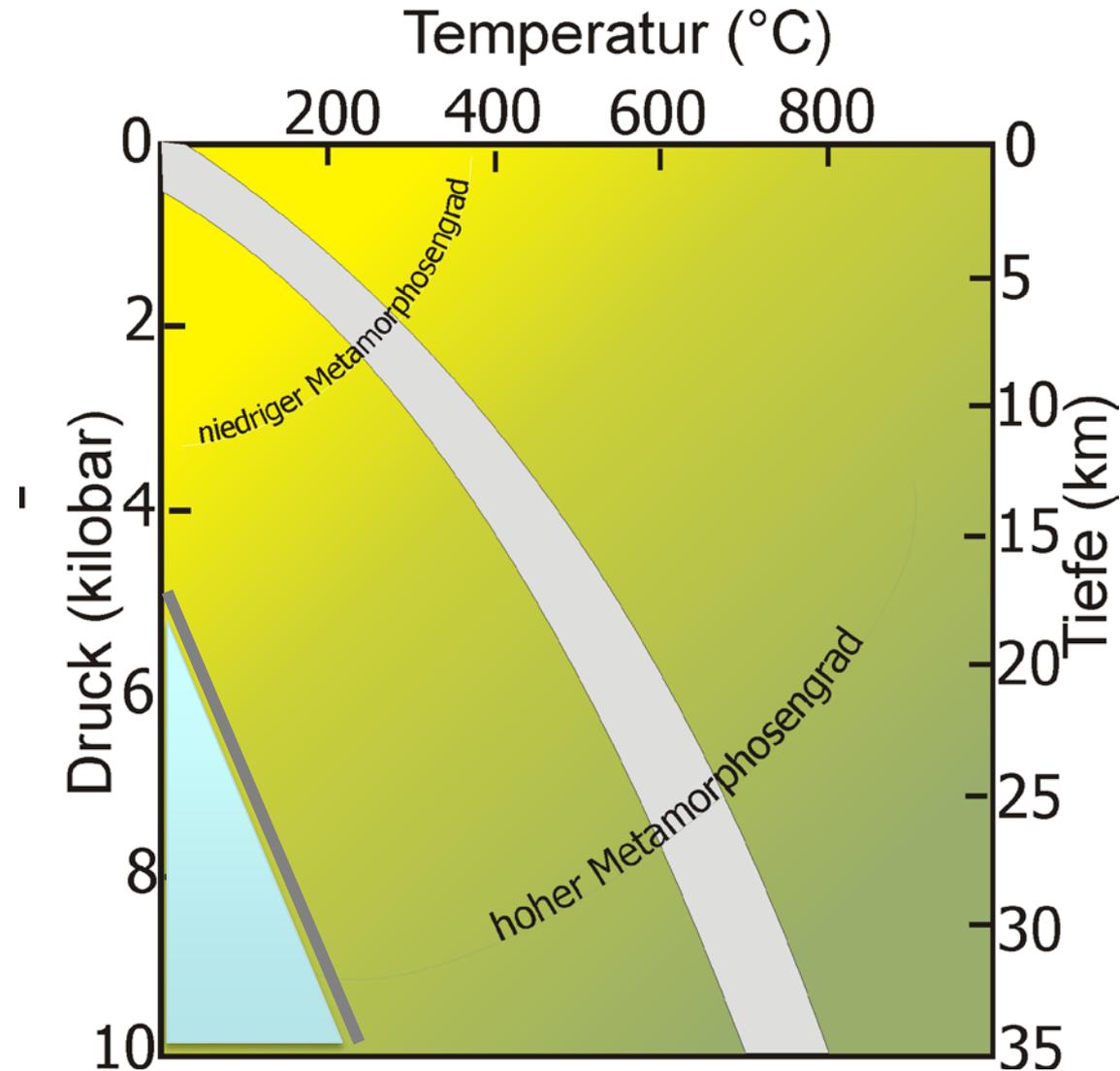
- Mindest - Druck

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

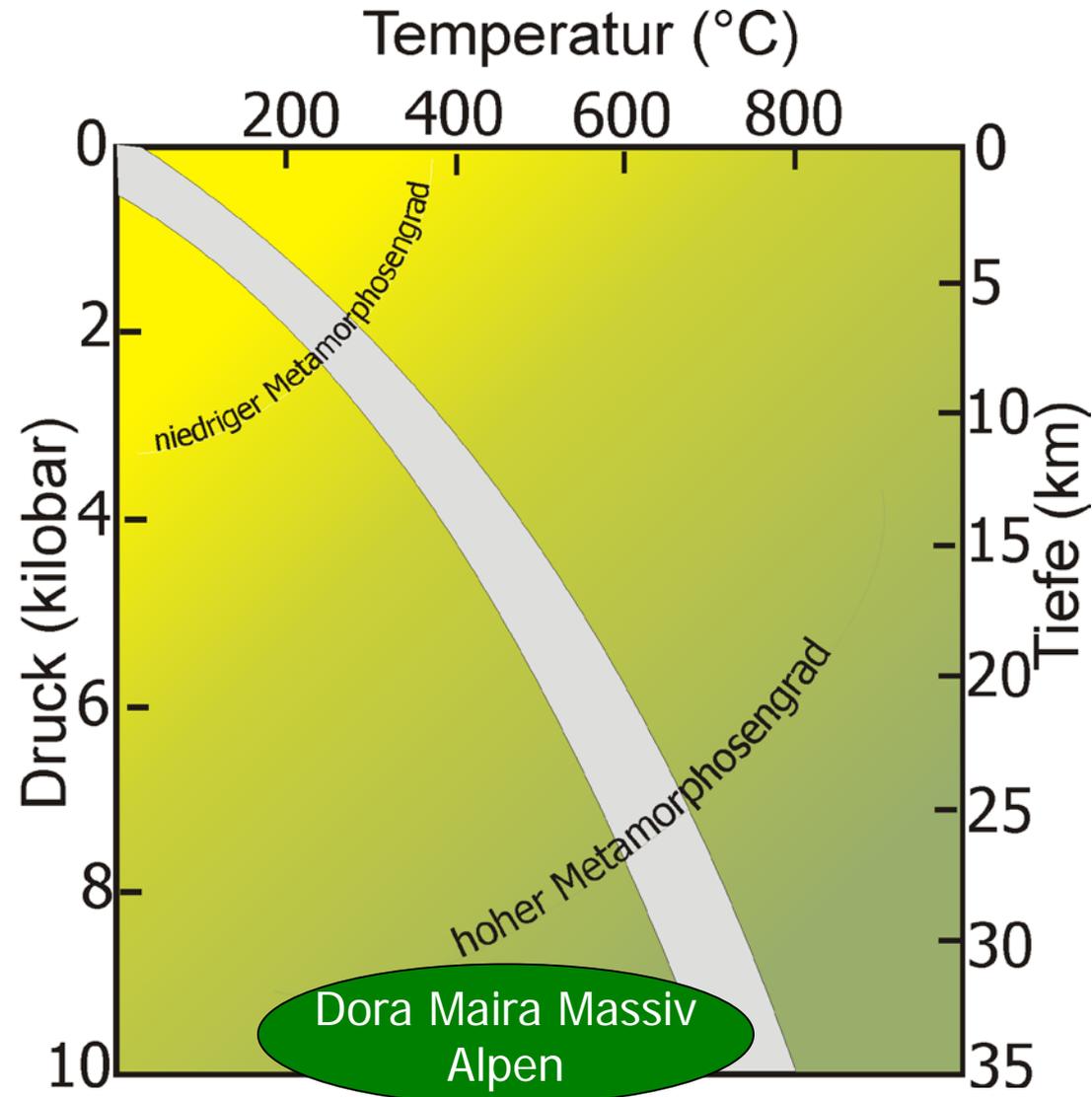
1 GPa = 10 kbars

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

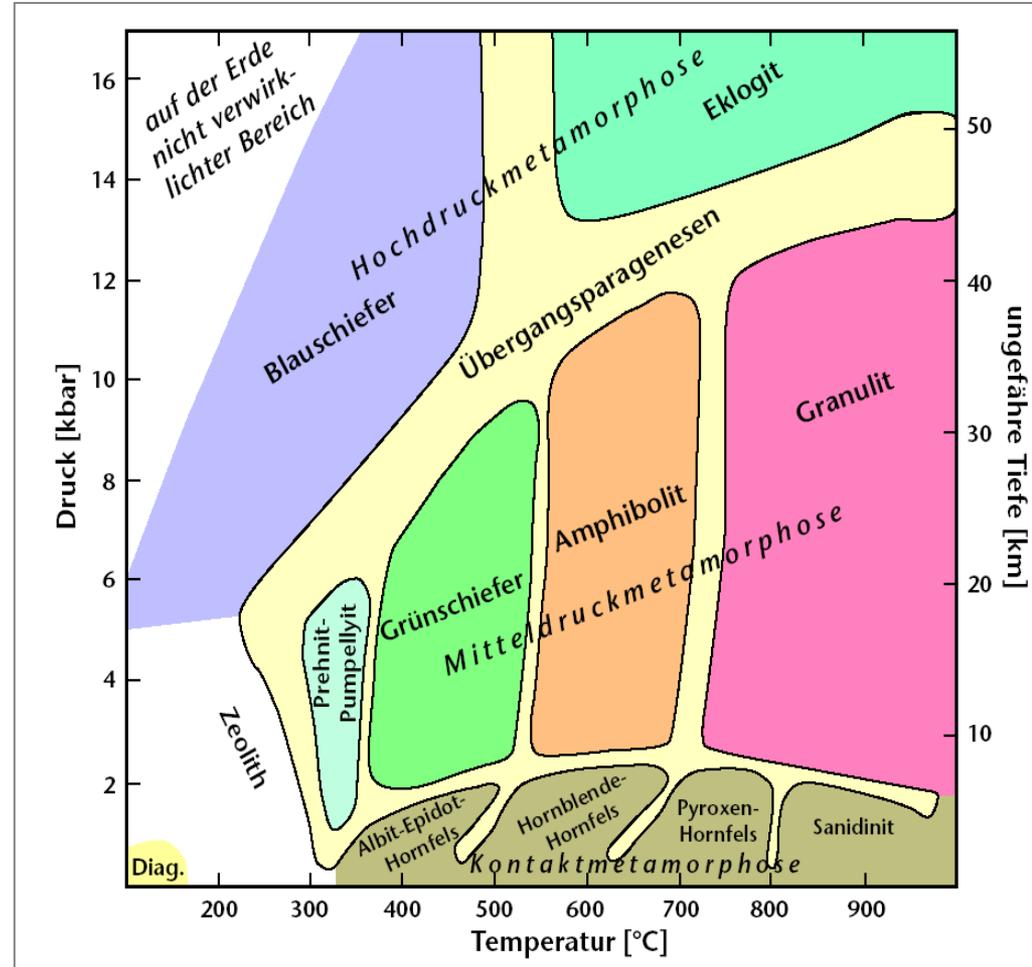
Metamorphe Fazies

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

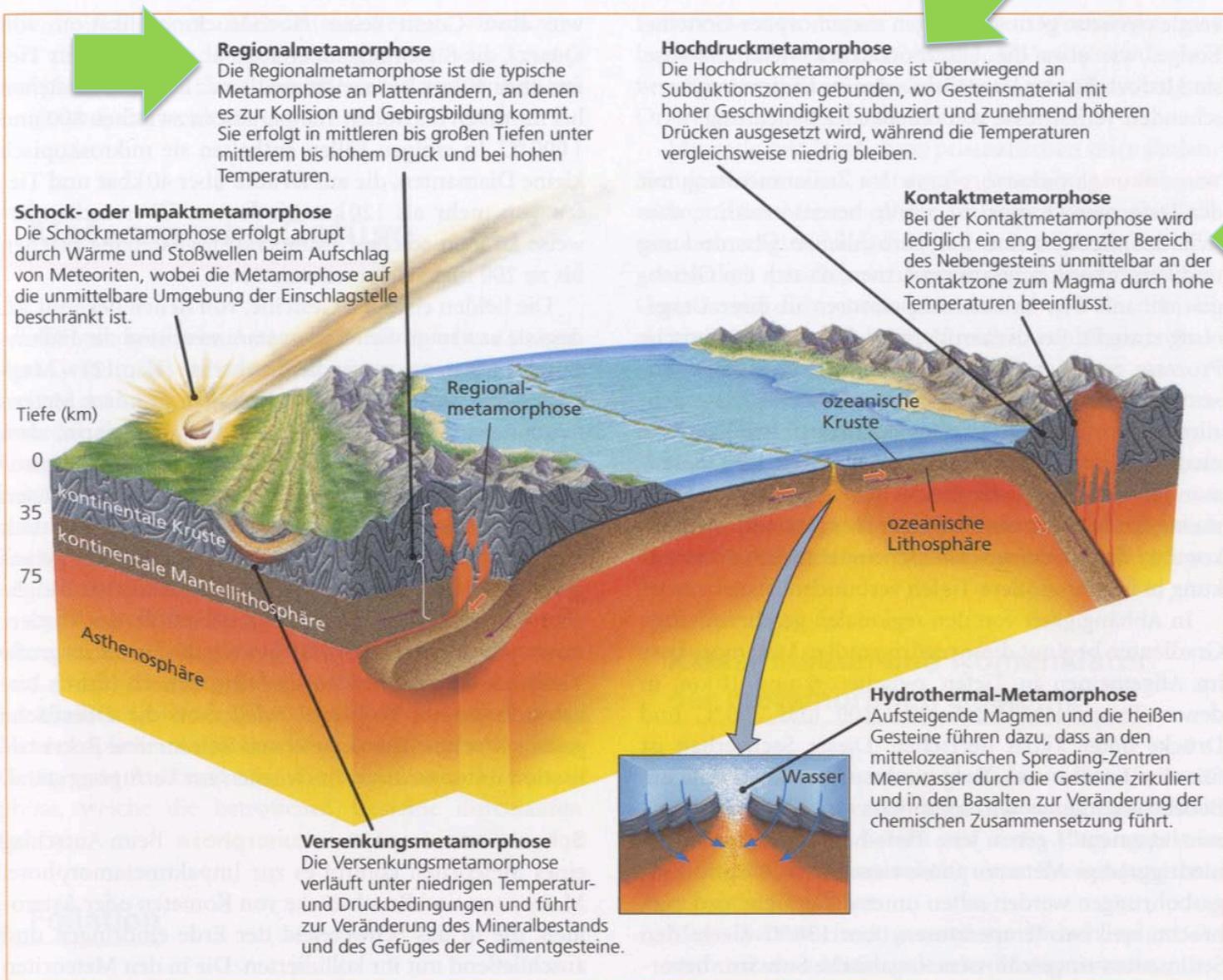
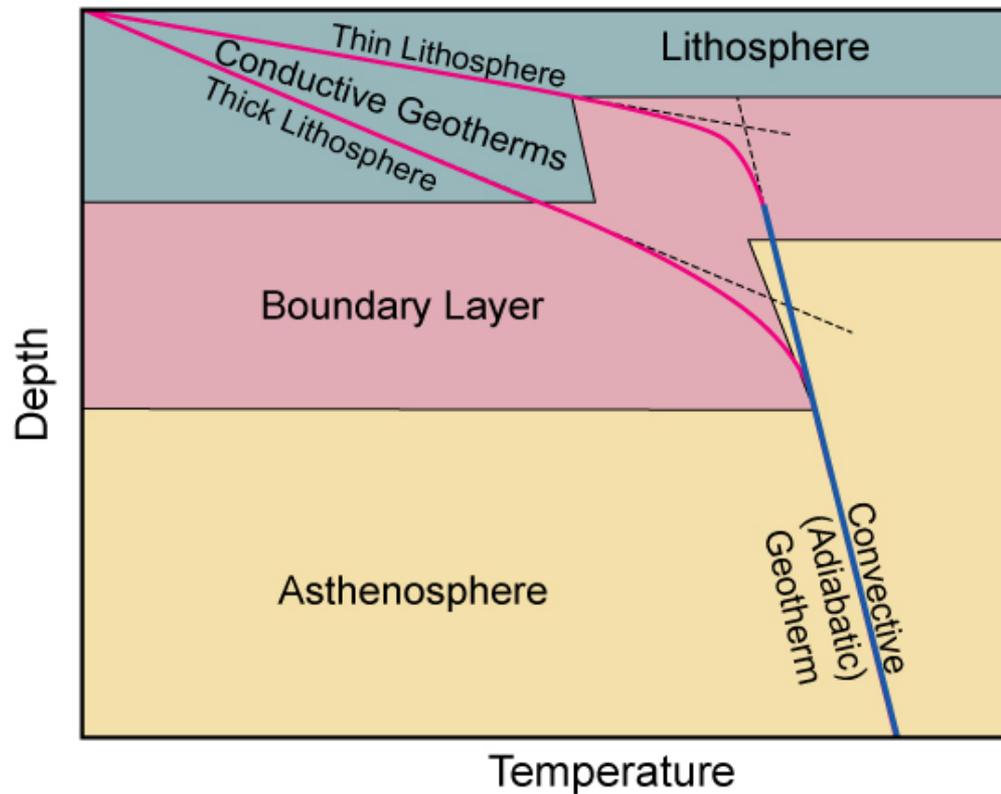


Abb. 6.3 Die Interaktion von Lithosphäre und Asthenosphäre führt zur Bildung metamorpher Gesteine.

Der geothermische Gradient



= **geothermische Tiefenstufe**

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

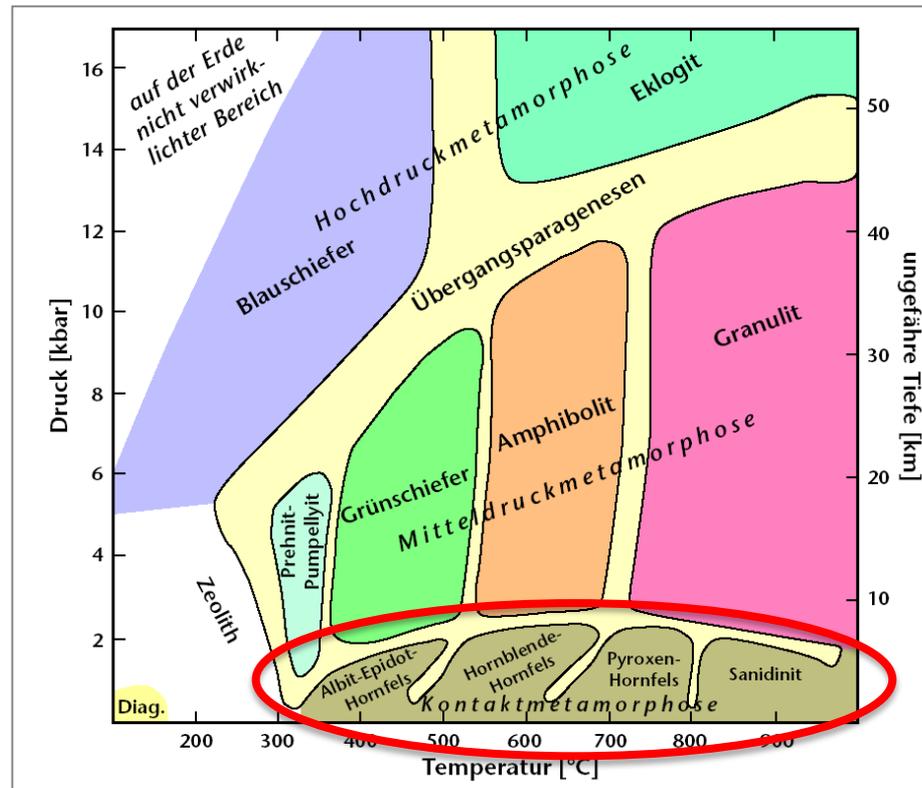
Faustregel: 1 Kelvin pro 33 Meter

3 Kelvin pro 100 Meter

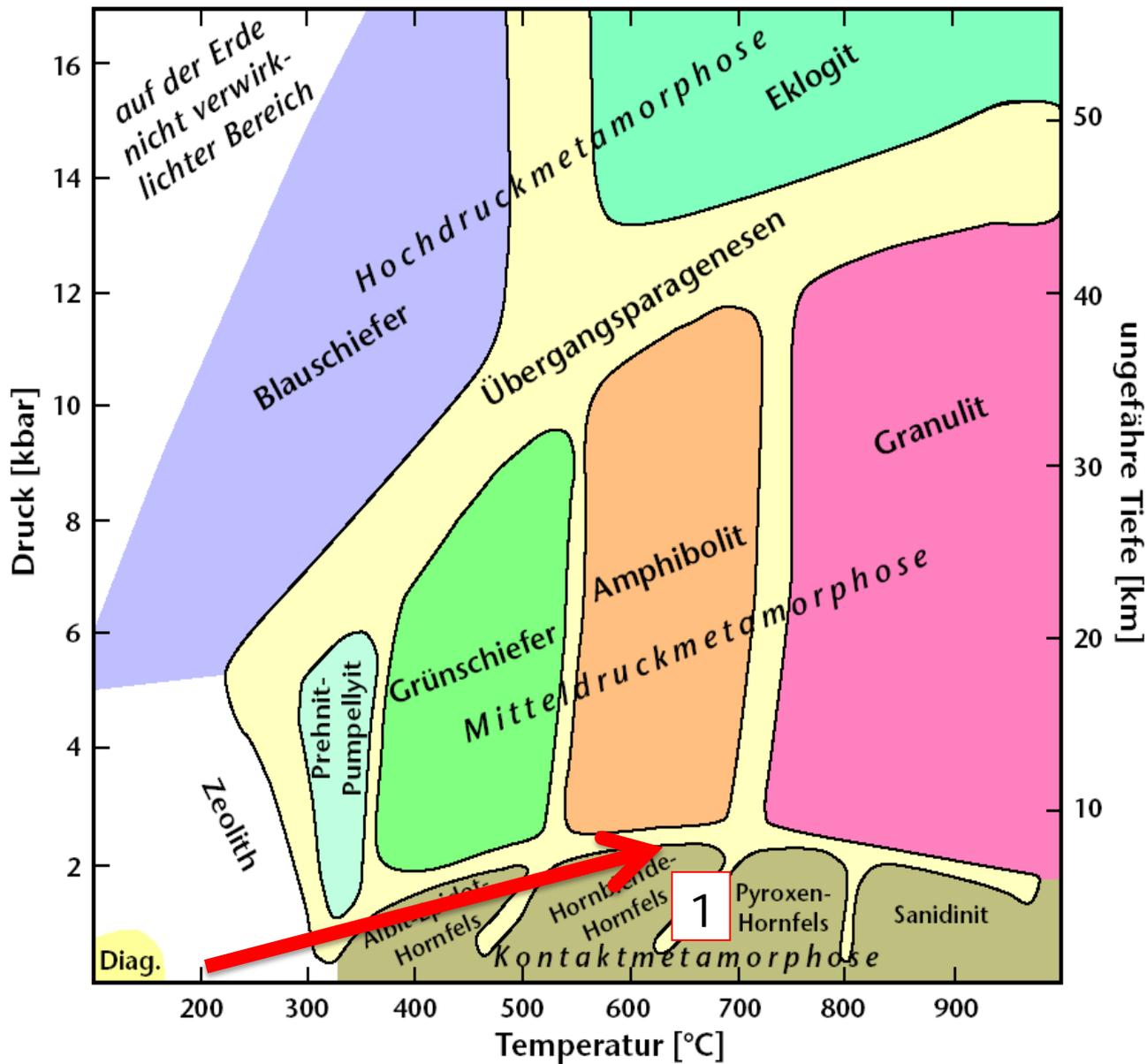
Metamorphosearten

I Kontaktmetamorphose

T

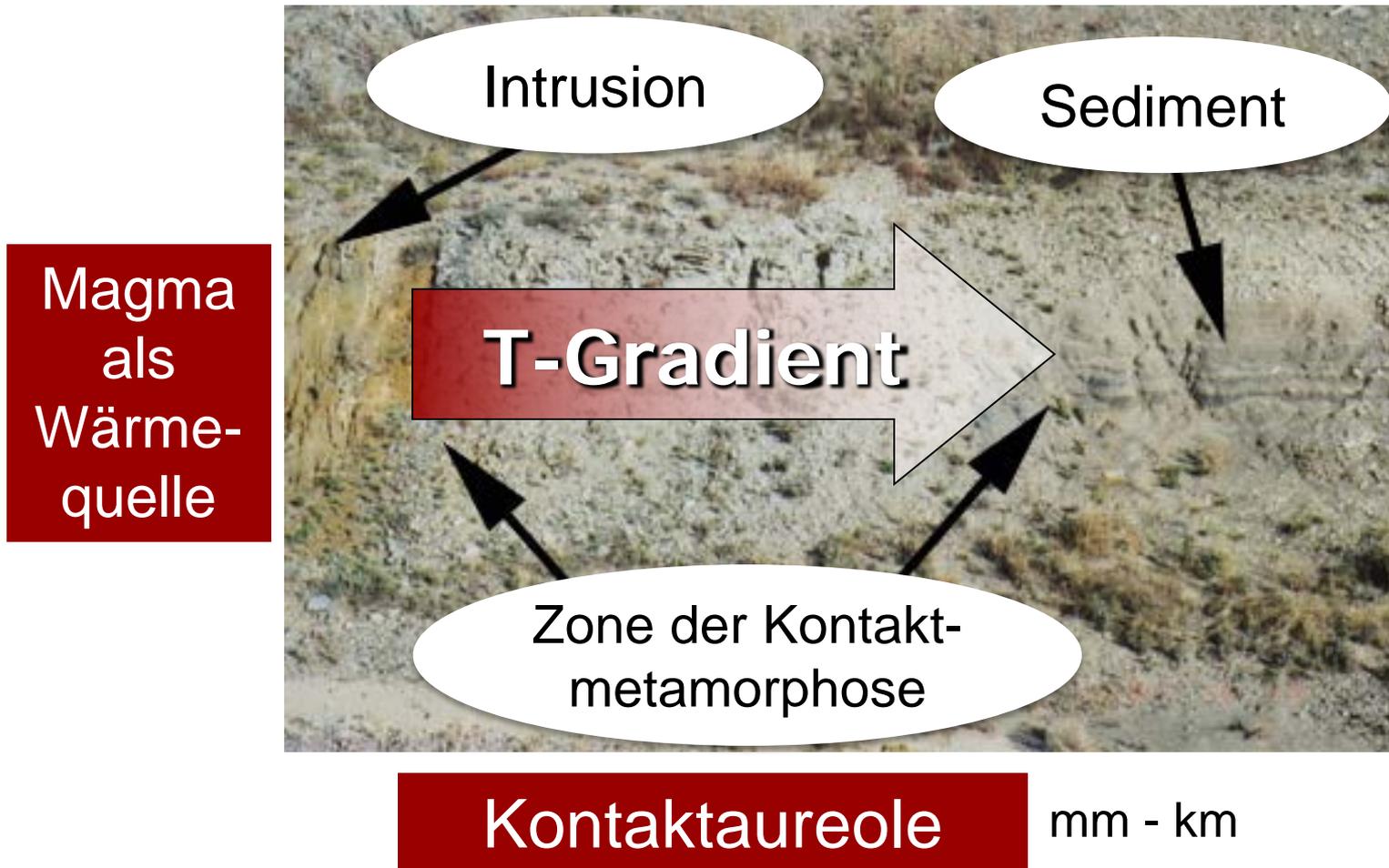


Hornfels - Fazies

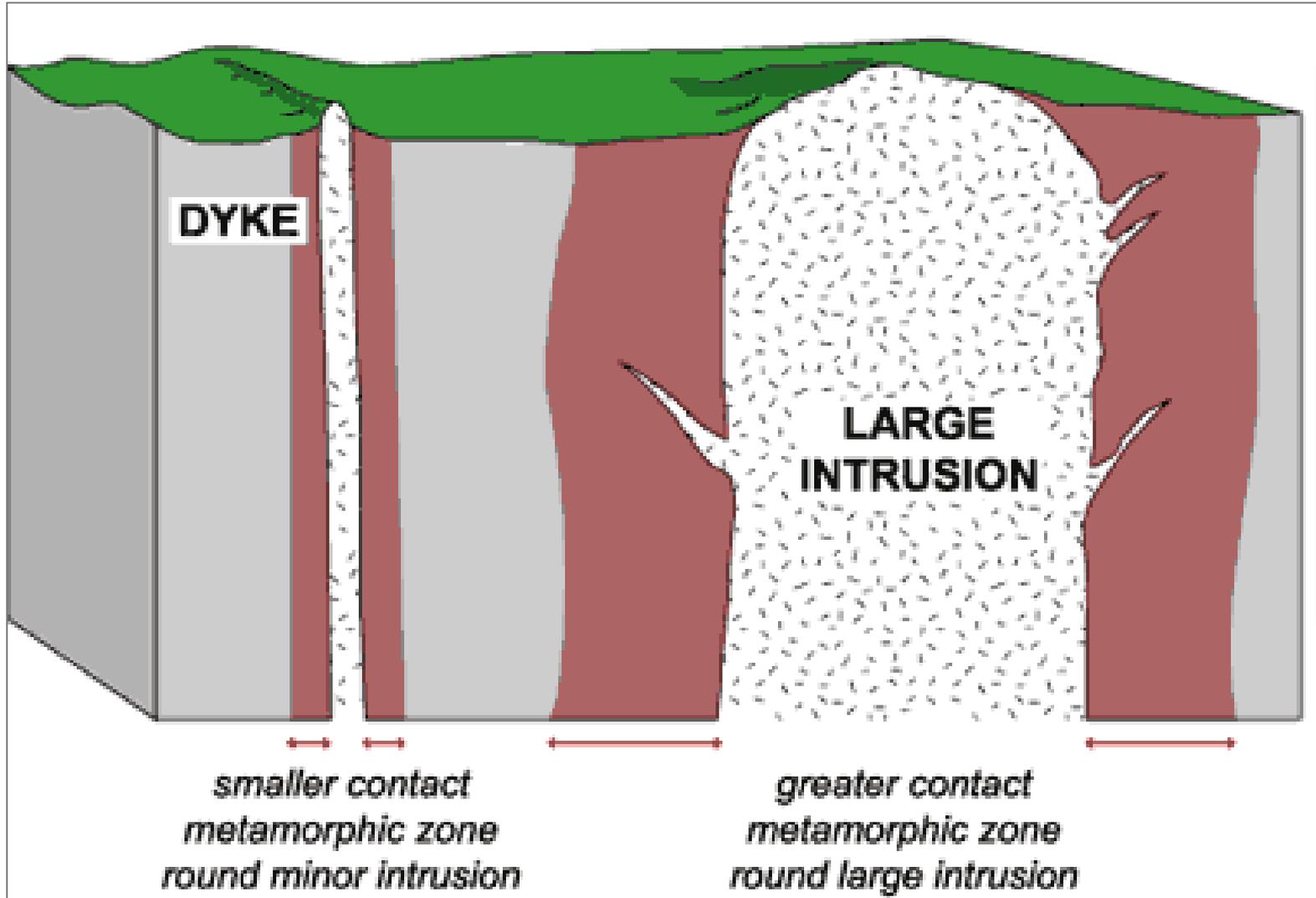


1 400°C/10 km =
40 Kelvin /km
 200 Kelvin / kbar

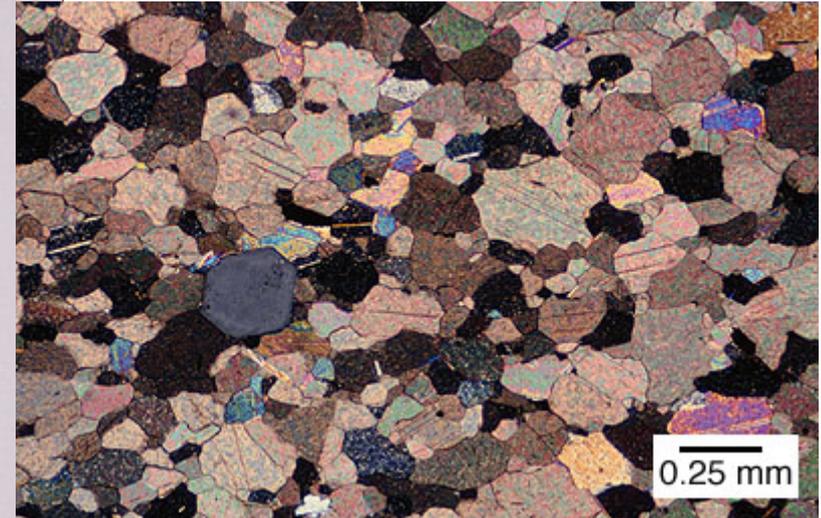
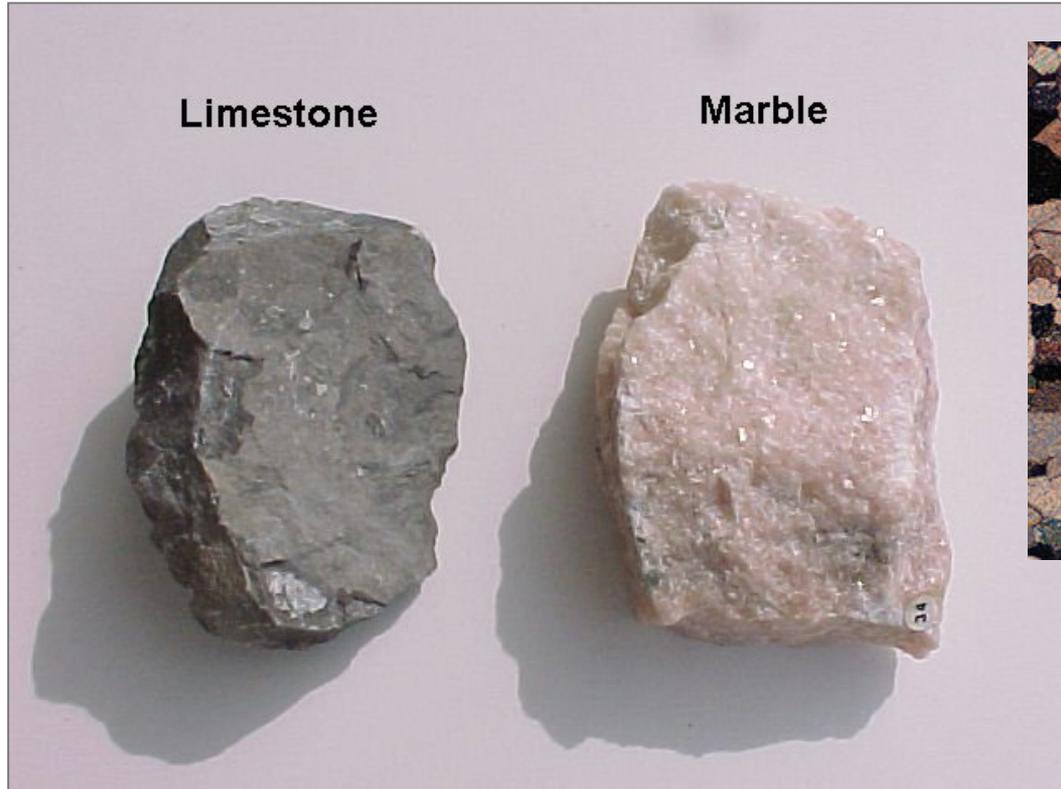
Kontaktmetamorphose



Kontaktmetamorphose



Kristallwachstum / Rekrystallisation



Grad der Kristallinität

- Korngrösse
- Kornform
- Korngrenze

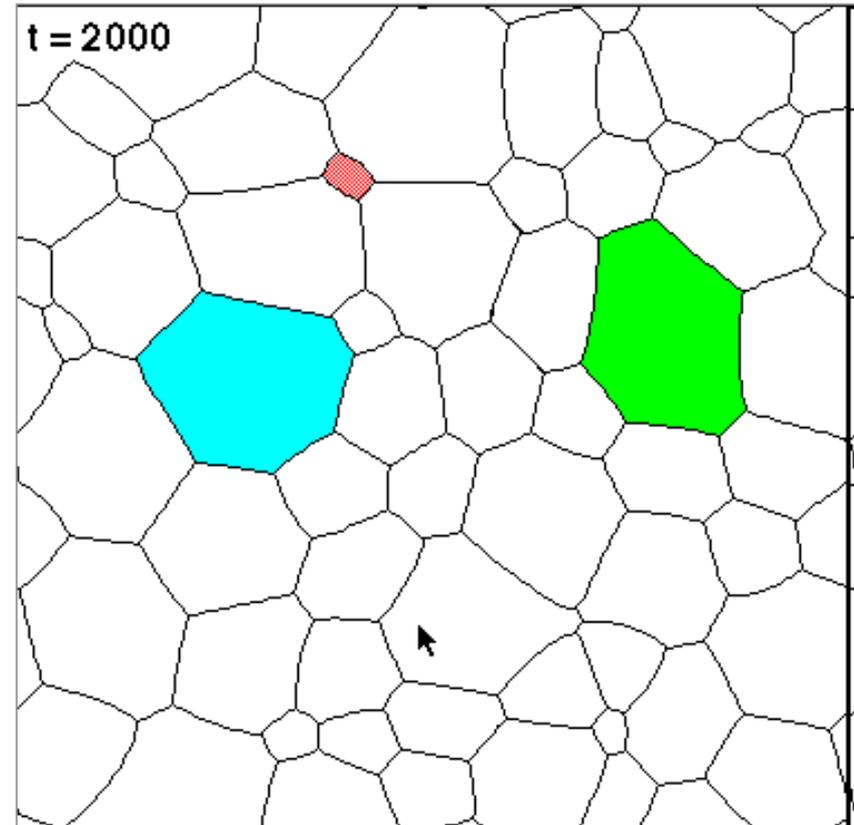
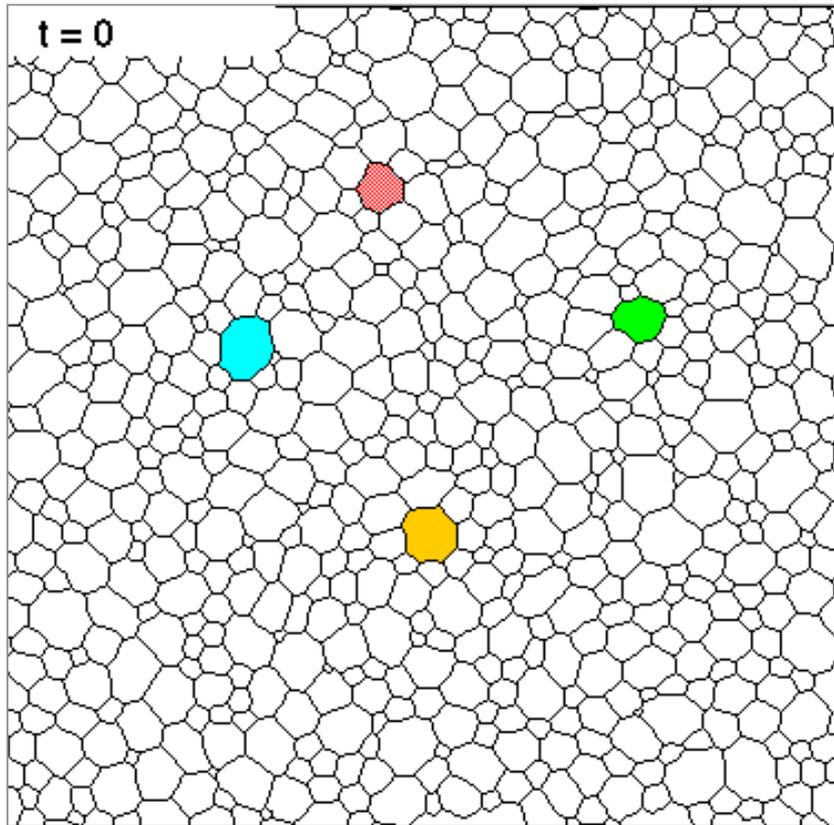
Gestein: Kalkstein

-

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

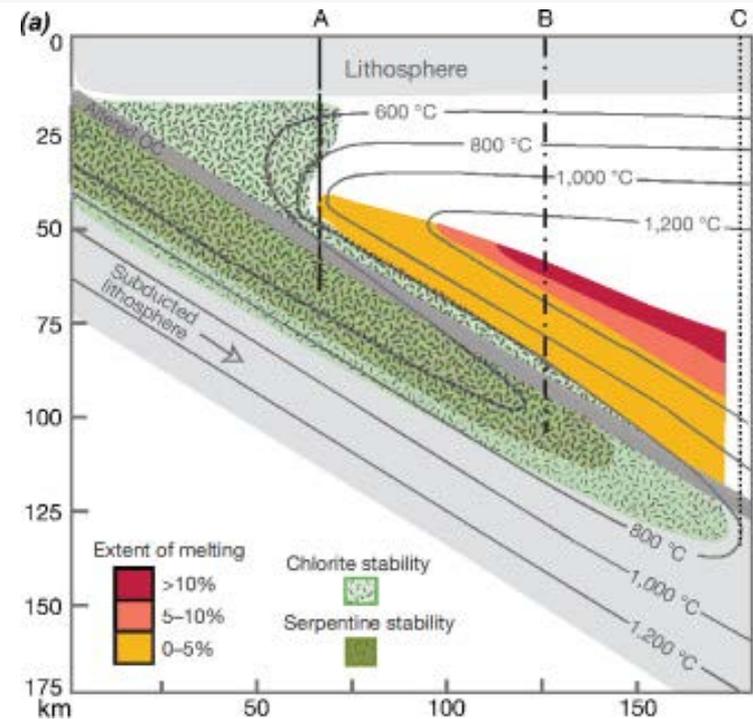
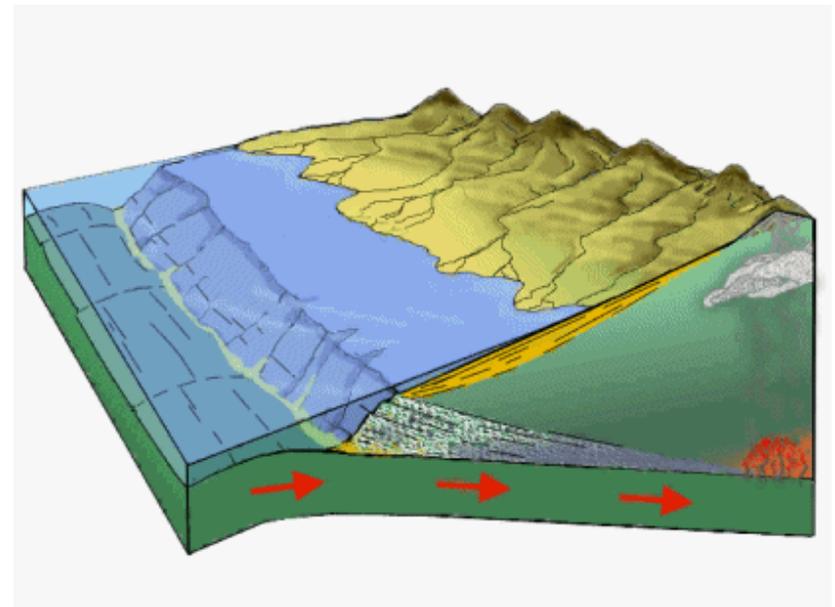
Granofels (Hornfelsoid) hier handelt es sich um ein regionalmetamorphes Gestein

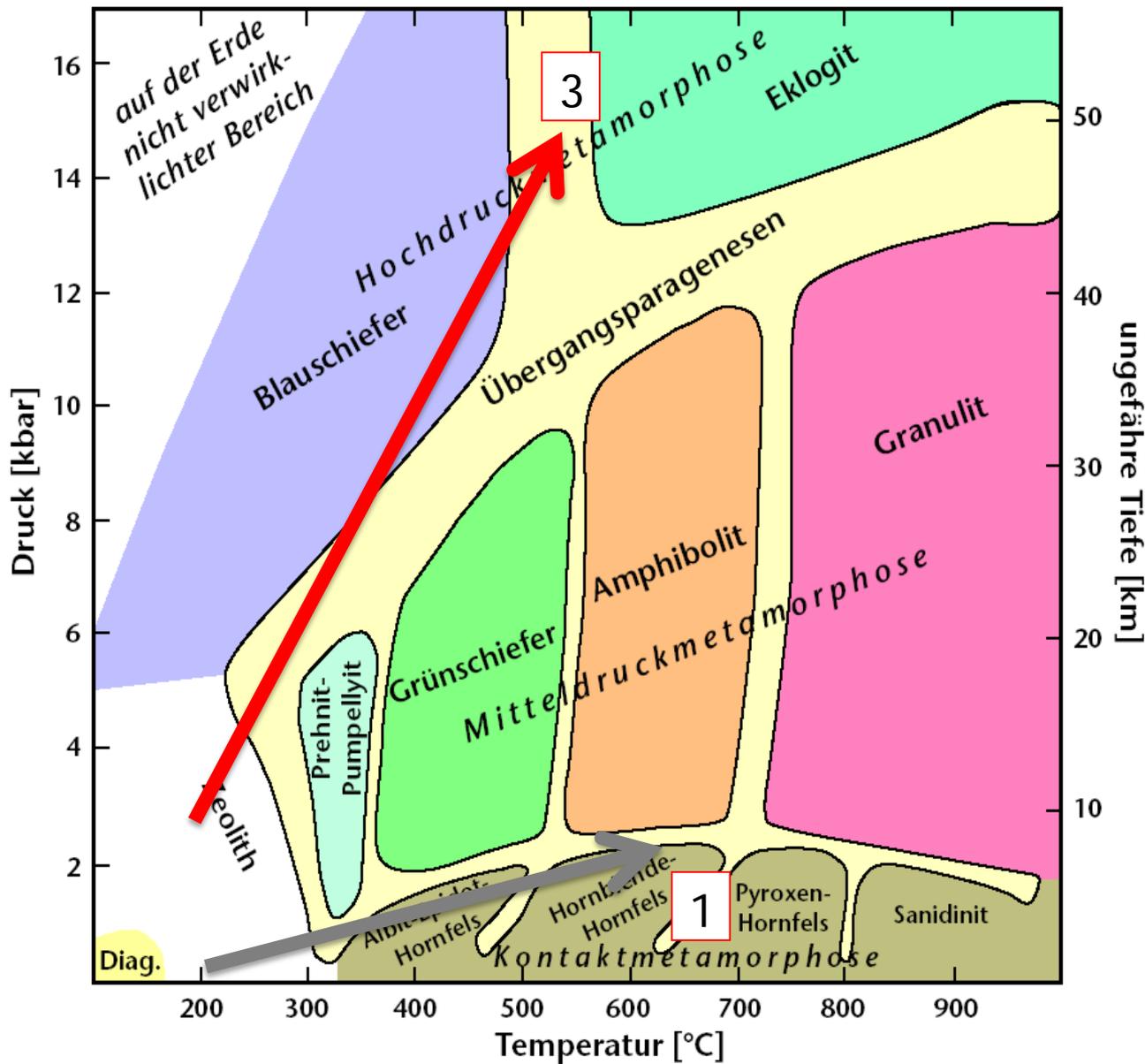
In Subduktionszonen:

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

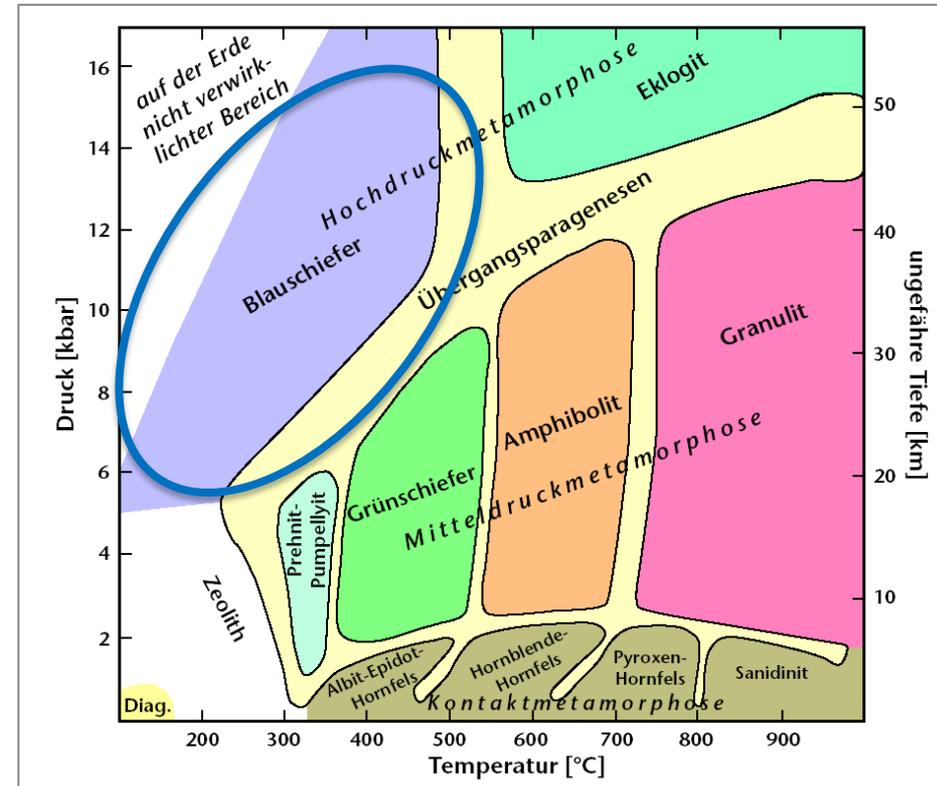
II) Hochdruck-Niedertemperatur – Metamorphose P

Blauschiefer



Ward Creek
Franciscan Complex, Kalifornia

Blauschieferfazies



Metamorphosearten

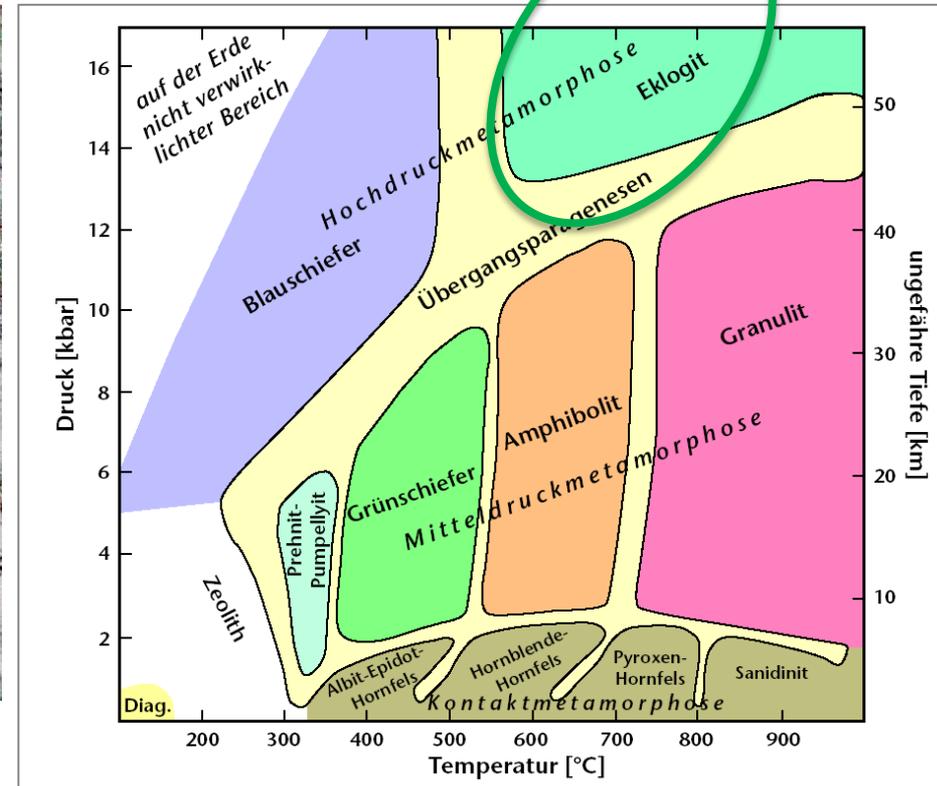
II) Hochdruck-Niedertemperatur – Metamorphose P

Eklogit

Eklogit-Fazies



Granat (Pyrop) & Klinopyroxen (Omphazit)



III Regionalmetamorphose

Die häufigste Arte der Metamorphose

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

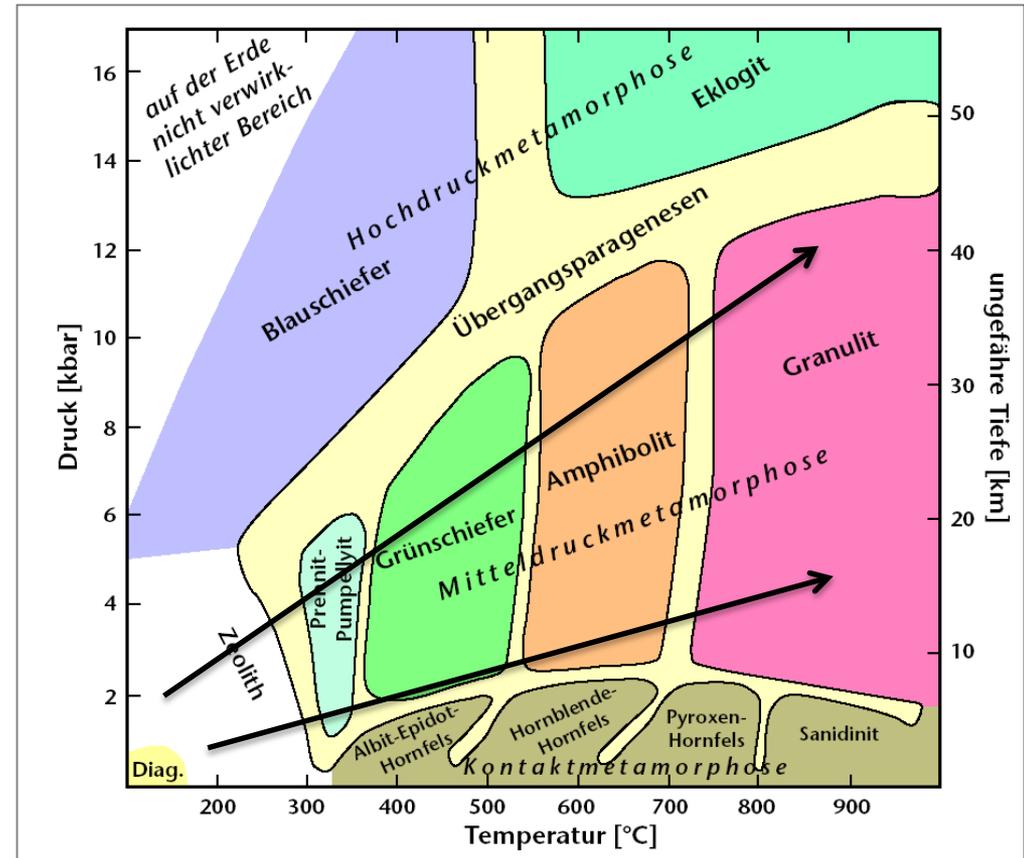
In Subduktions- und Kollisions-Gebieten durch Versenkung und Verformung verschiedener Gesteinseinheiten (Sedimente, Magmatite und Metamorphite).

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

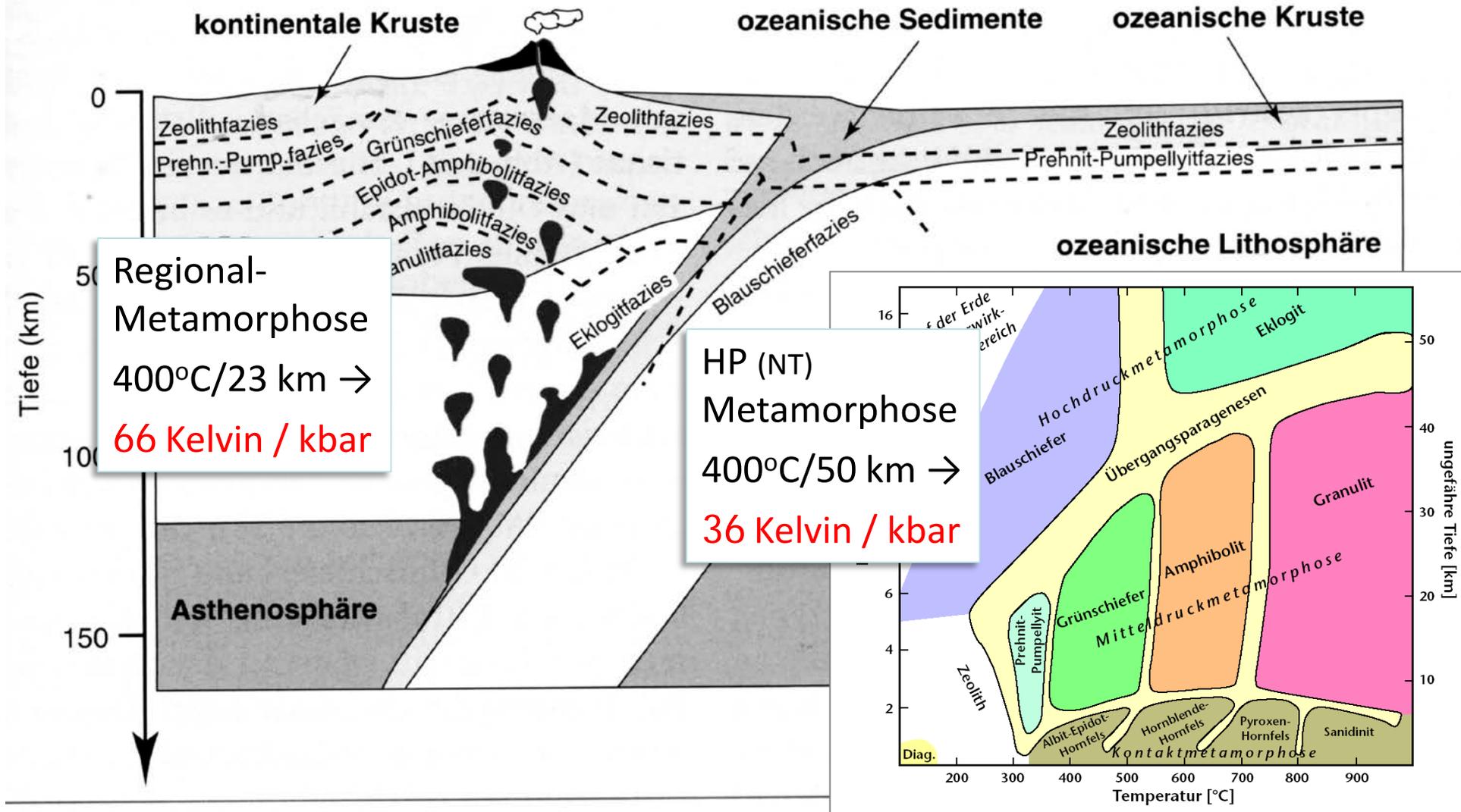


- Grünschiefer



- Amphibolit

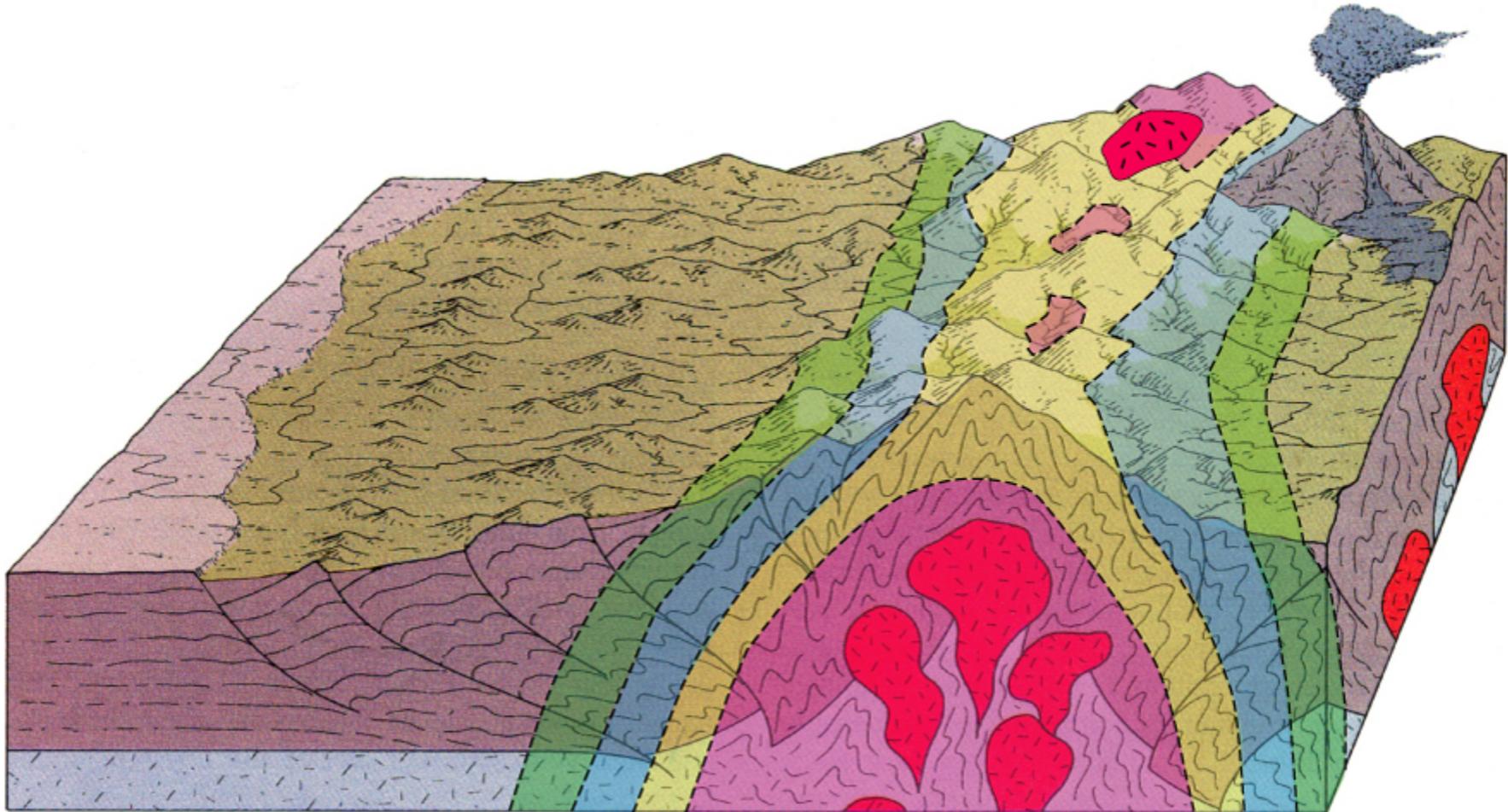
Metamorphe Gesteine in der Erdkruste



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

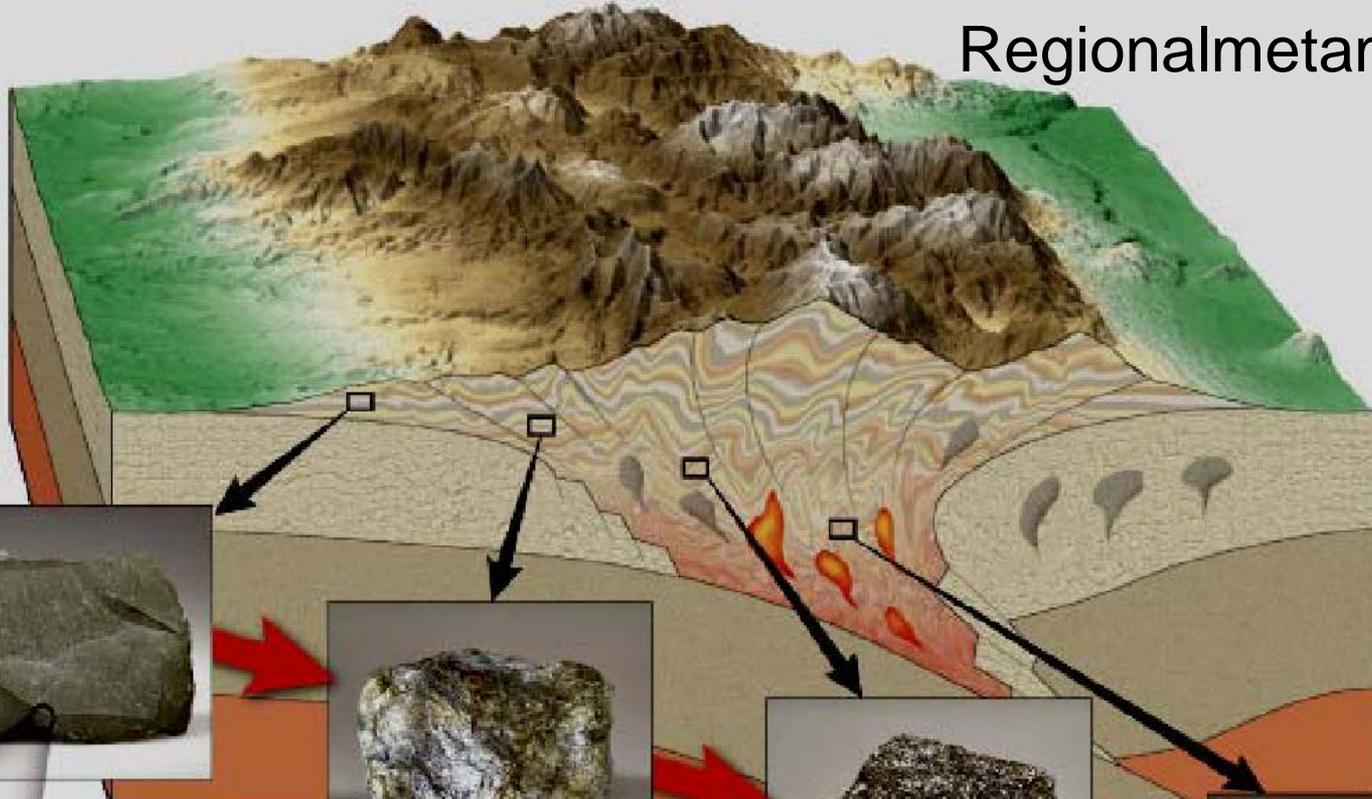
Varietäten der Tonfraktion

- 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



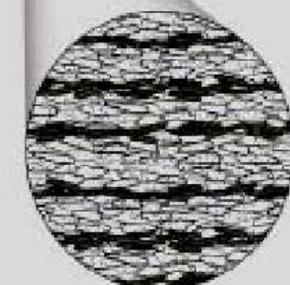
Schist



Gneiss



Metamorphic rock series



Wärme

+

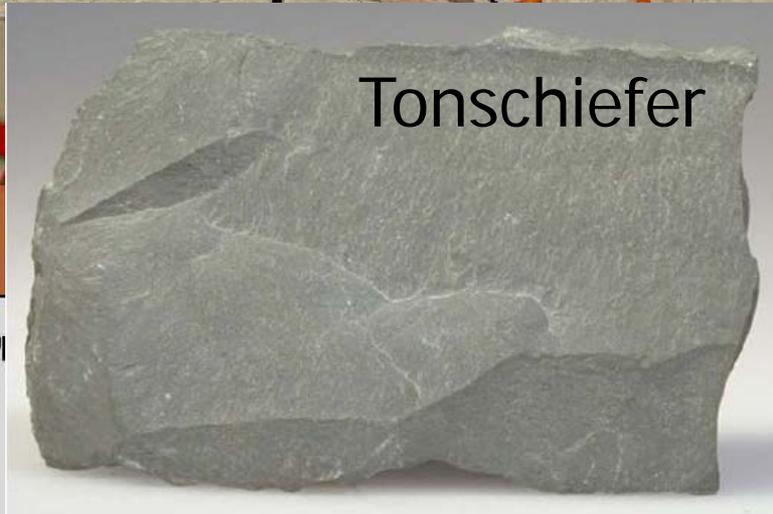
Druck

Regionalmetamorphose

Zunehmende Metamorphosegrad



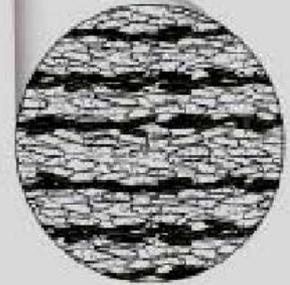
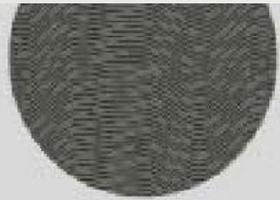
Slate



Tonschiefer



Gneiss



Metamorphic rock series

Bild: http://pumice.pdx.edu/201/Chapter_7.pdf

Wärme

+

Druck

Regionalmetamorphose

Zunehmende Metamorphosegrad



Slate



Phyllite



Sch

Phyllit



Gneiss



Metamorphic rock series

Bild: http://pumice.pdx.edu/201/Chapter_7.pdf

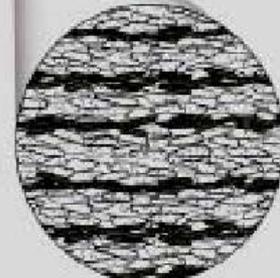
Wärme

+

Druck

Regionalmetamorphose

Zunehmende Metamorphosegrad



Wärme

+

Druck

Regionalmetamorphose

Zunehmende Metamorphosegrad



Slate



Gneis



Gneiss



Metan

Bild: http://pumice.pax.eau/201/Chapter_1.paj

Unterscheidung Phyllit / Glimmerschiefer

Phyllit

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



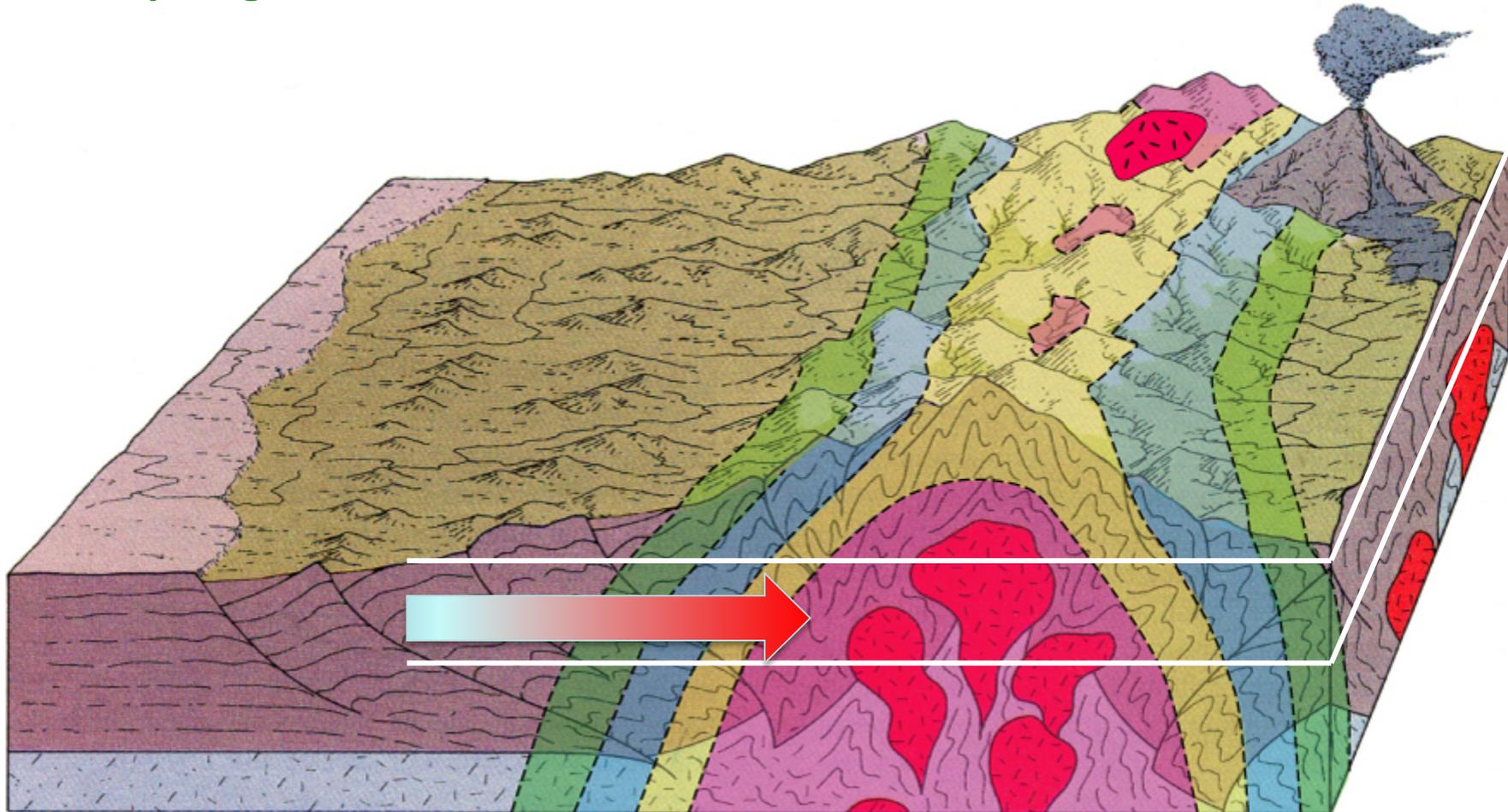
Glimmerschiefer

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



Beobachtung im Gelände:

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

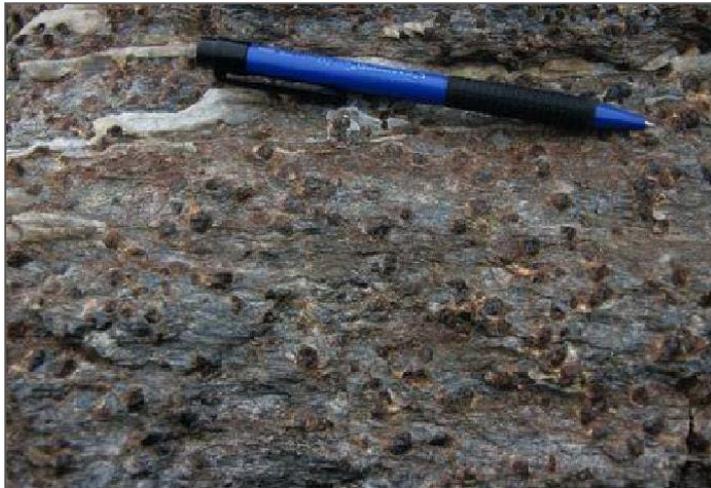


Definition

Mineral- Paragenese

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

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



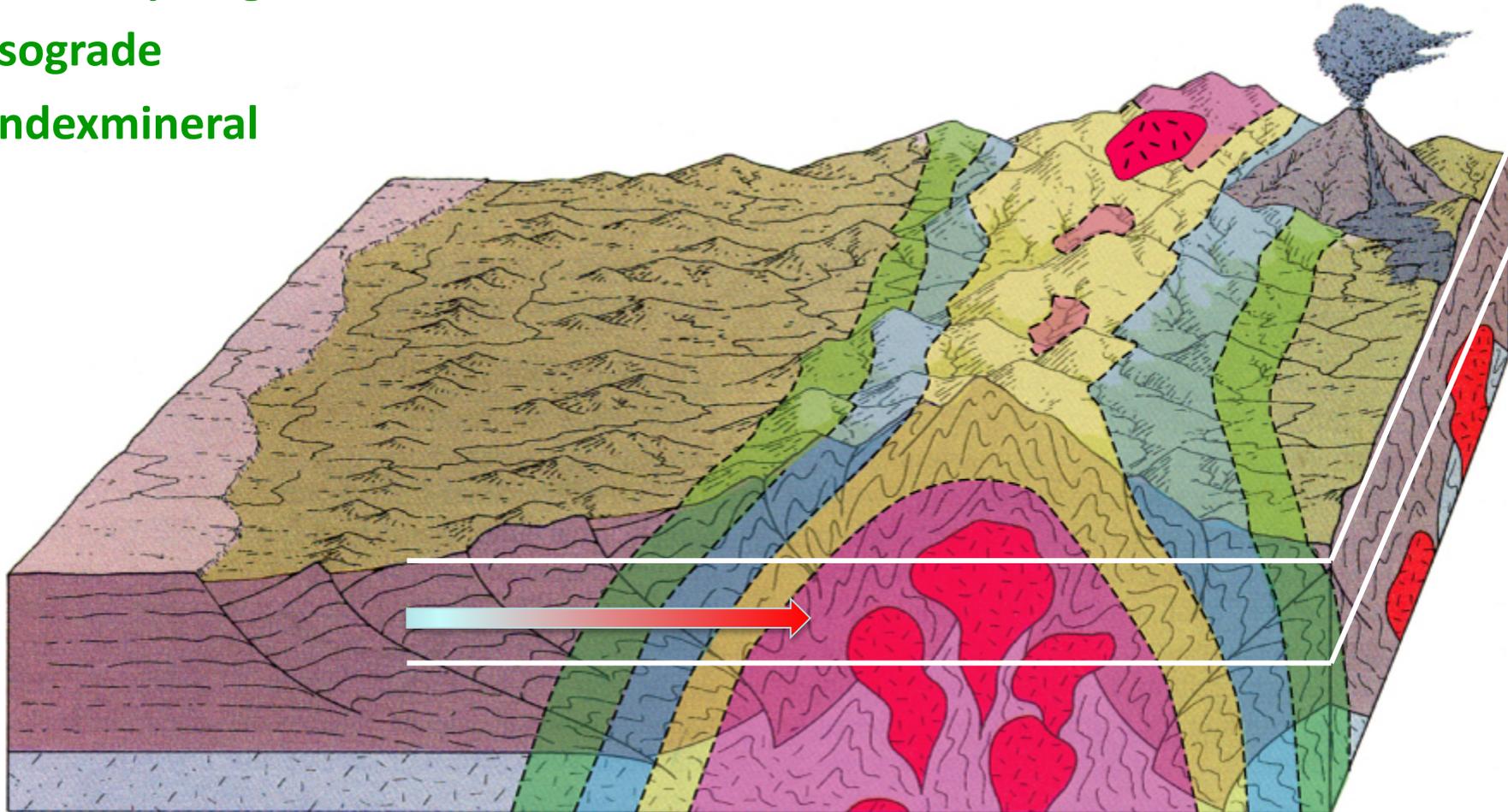
Granat – Glimmerschiefer

Granat

Biotit, Muskovit, Chlorit, Quarz,
Albit oder Oligoclase

Beobachtung im Gelände:

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



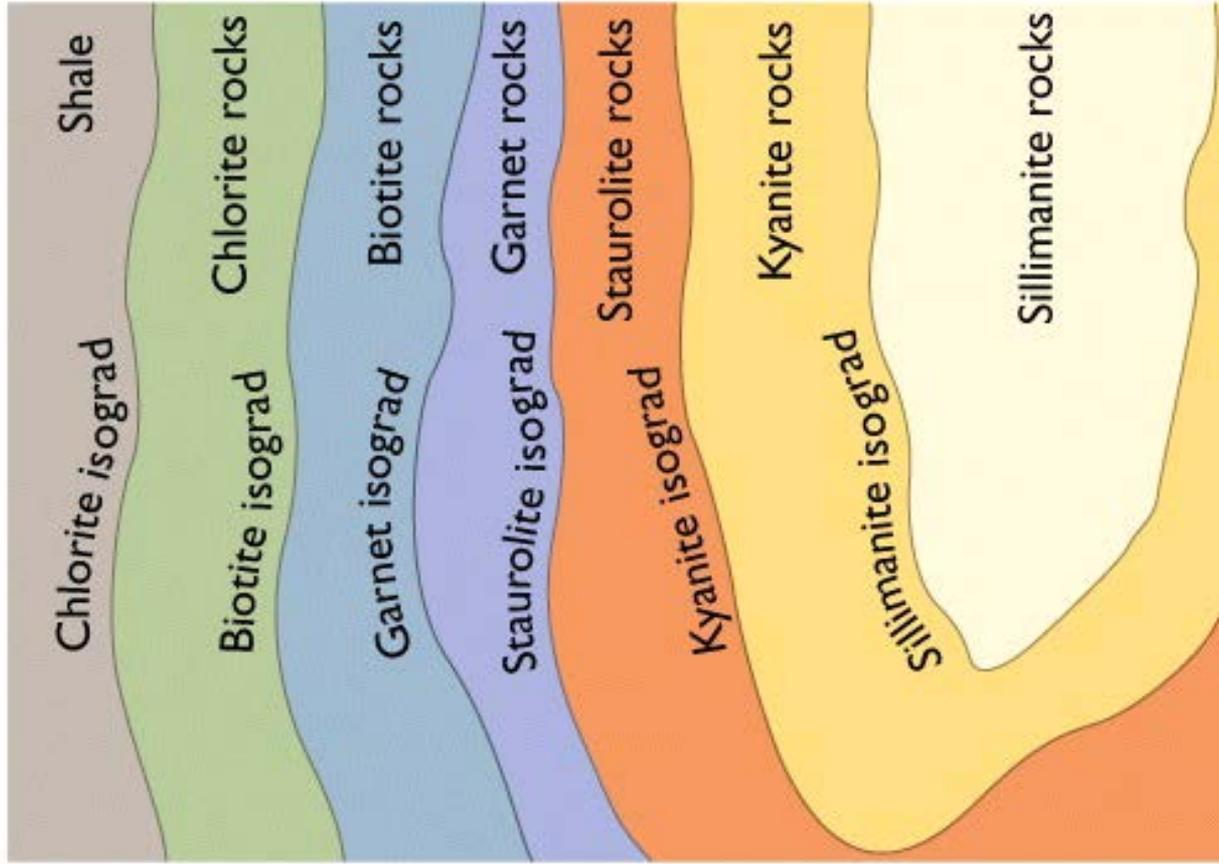
Definition

Isograde - Indexmineral

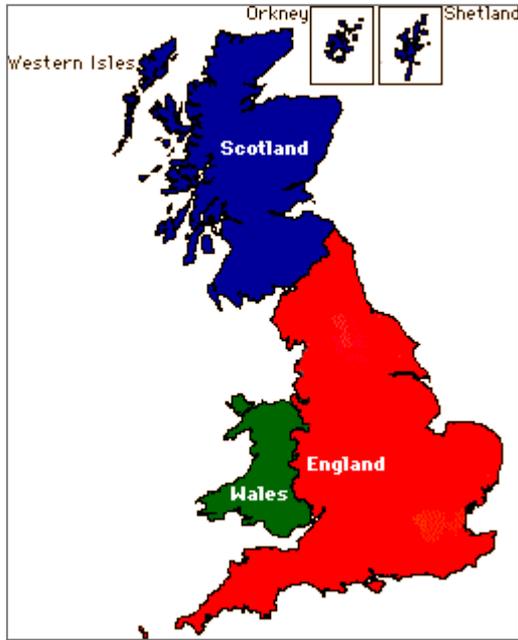
- 1) Beobachtung von Mineralparagenesen im Gelände
→ Proben mit der gleichen **Paragenese** erhalten das gleiche Symbol
- 2) **Isograde** entspricht einer Linie in einer Karte, die die Punkte miteinander verbindet, an denen in Gesteinen mit vergleichbarer chemischer Zusammensetzung die gleiche Mineralreaktion 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

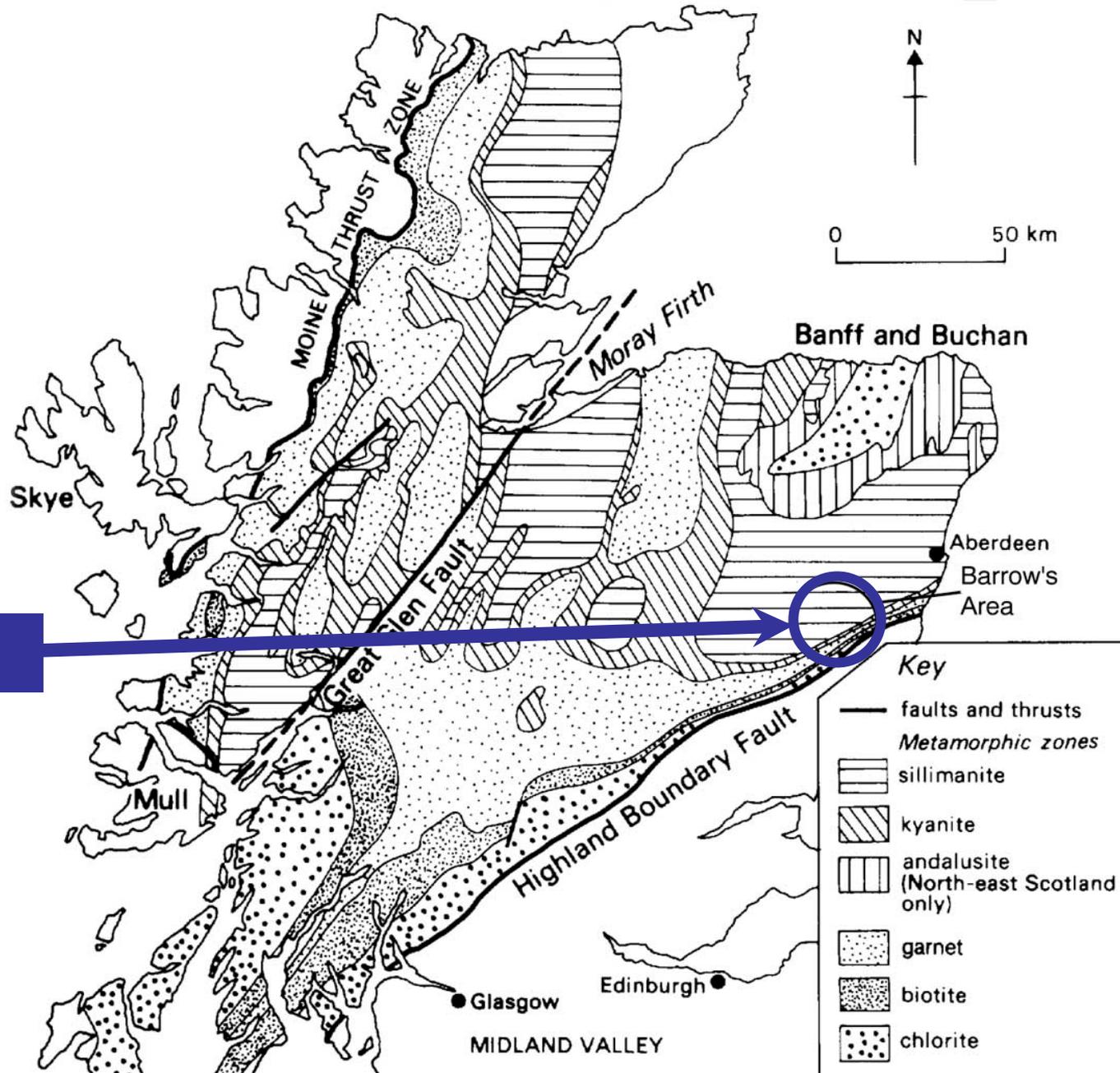
Isograd



—Increasing metamorphic grade—→

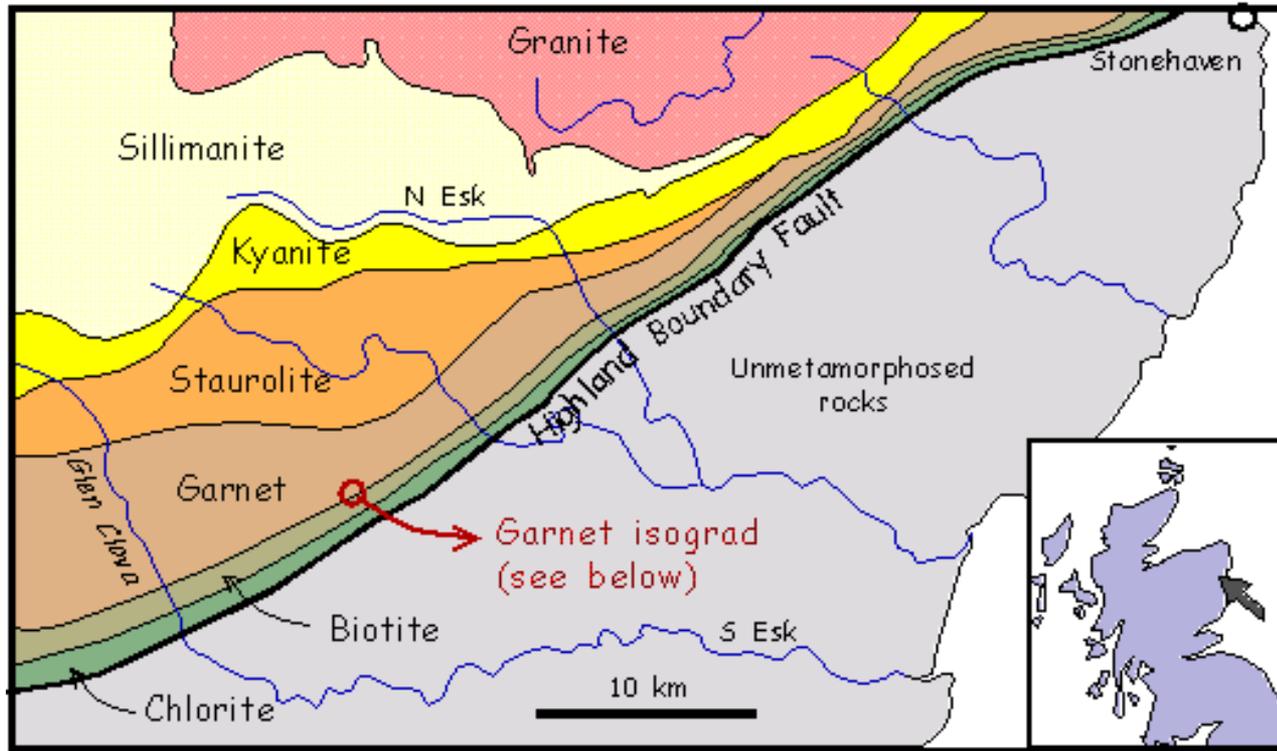


Barrow's Gebiet

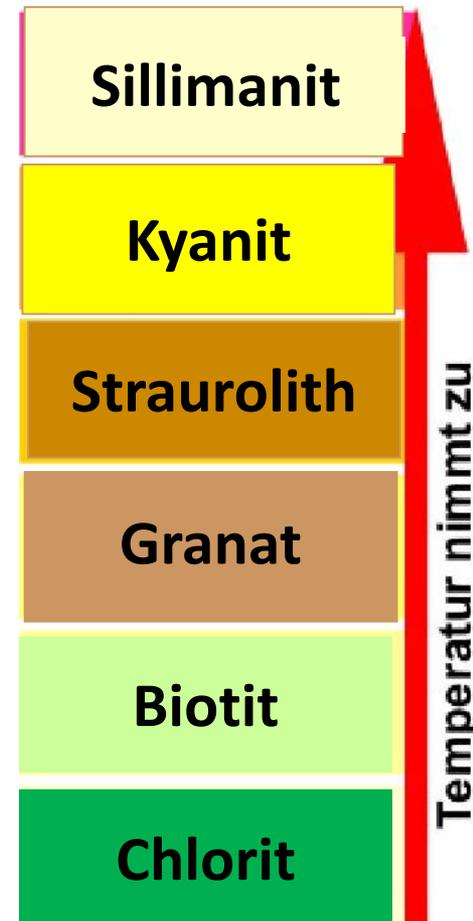


*Bild von Gillen (1982)
Metamorphic Geology. An
Introduction to Tectonic and
Metamorphic Processes.
George Allen & Unwin.
London.*

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

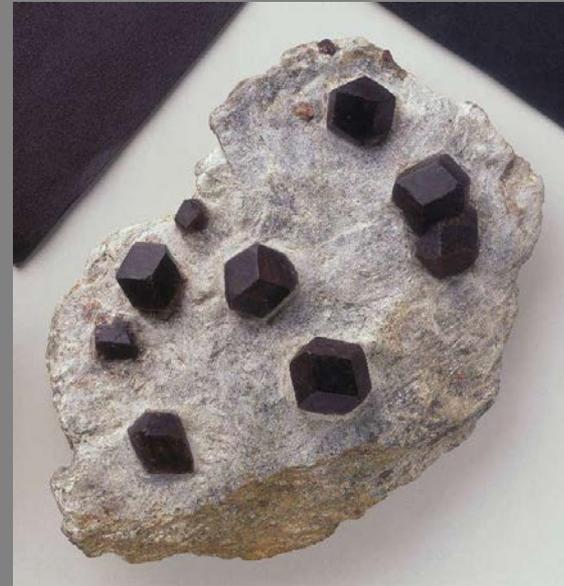


Phyllite /
Glimmerschiefer

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

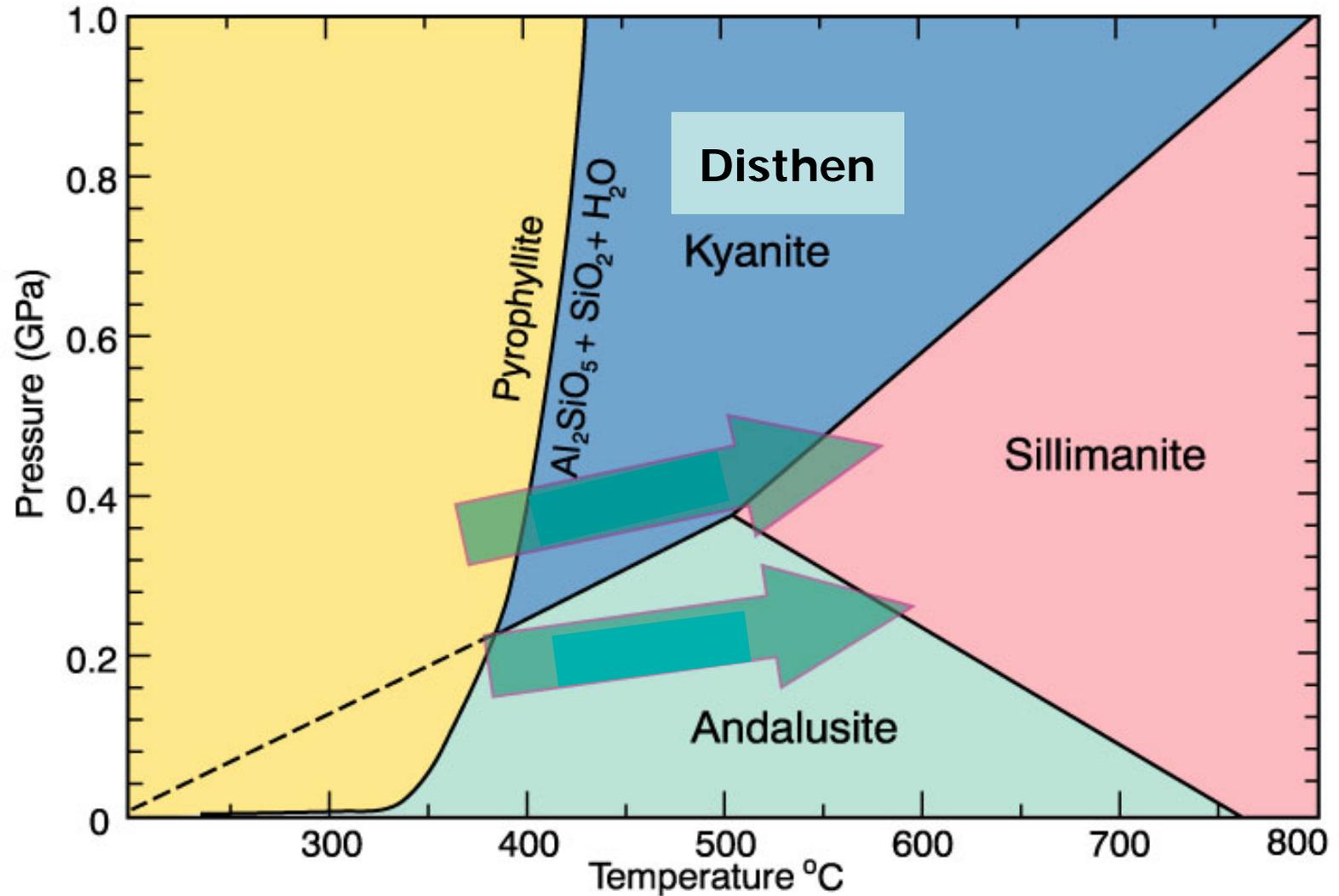


Glimmerschiefer /
Gneis mit Sillimanit

Sillimanit

*Biotit, Muskovit, Quarz, Plagioklas,
Granat*

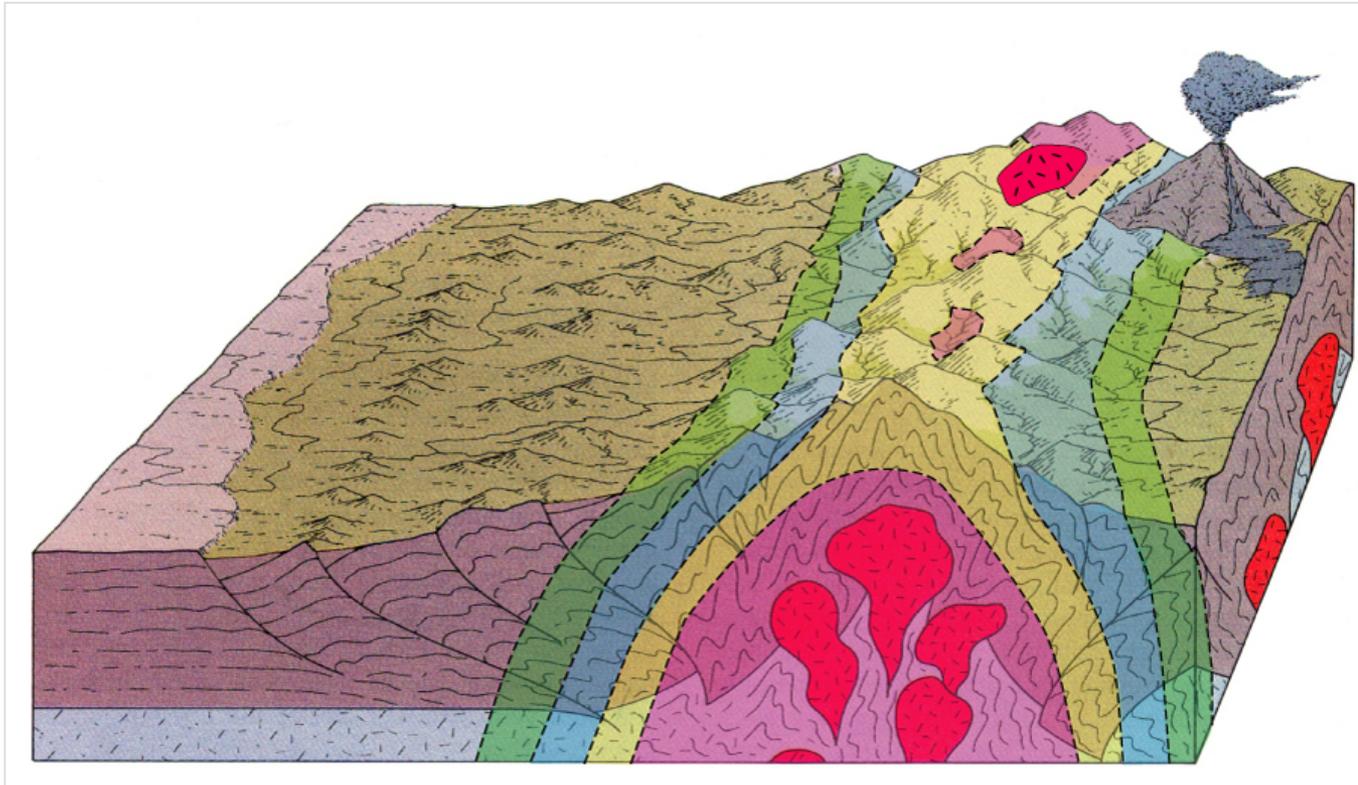
Stabilitätsfeld von Andalusit liegt
bei einem Druck < 0,37 GPa (~ 10 km)



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

Regional - Metamorphose

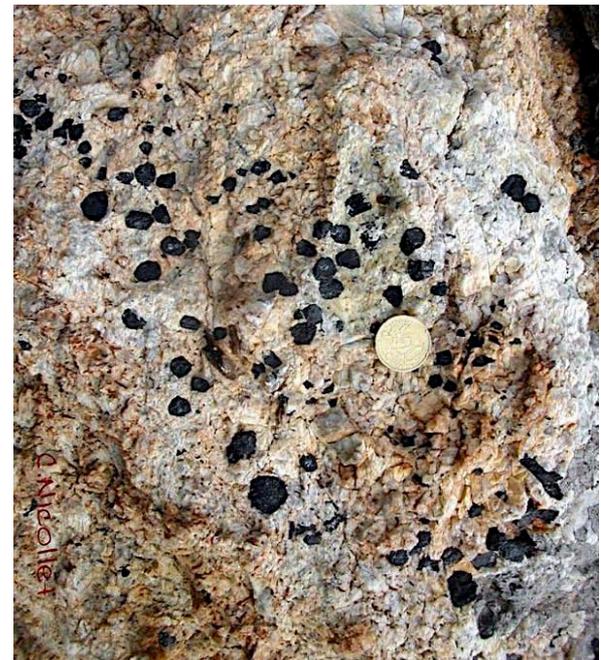
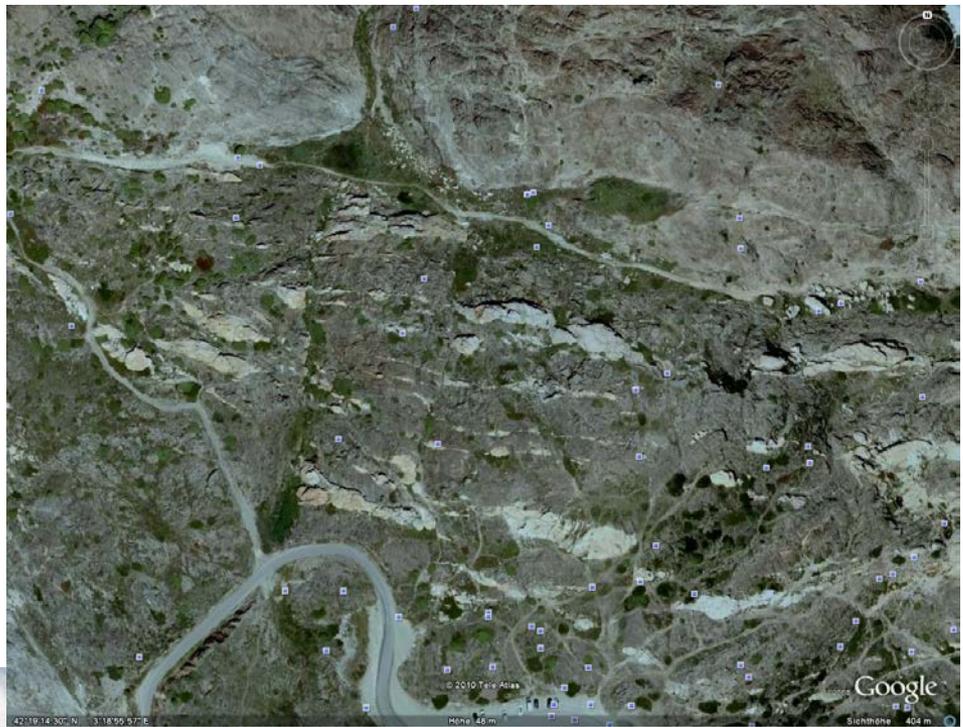
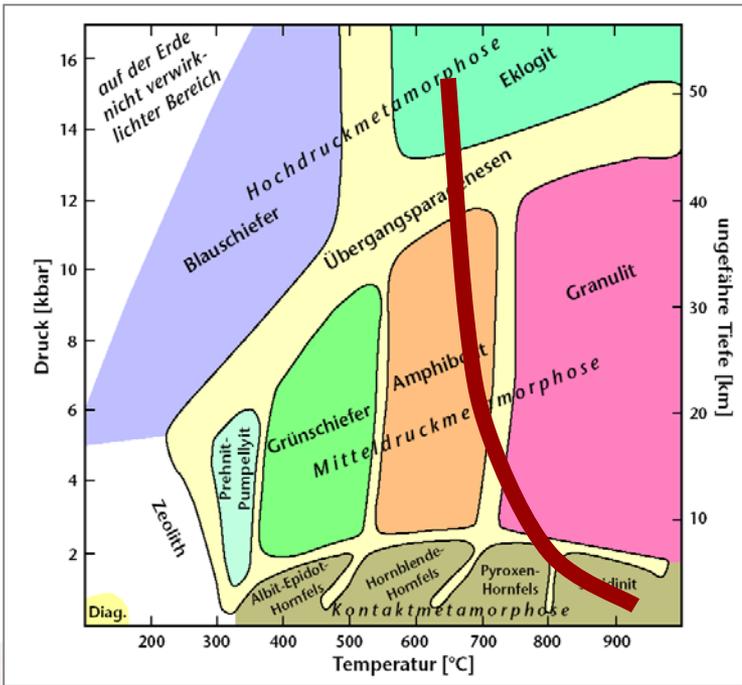
Migmatit-Bildung

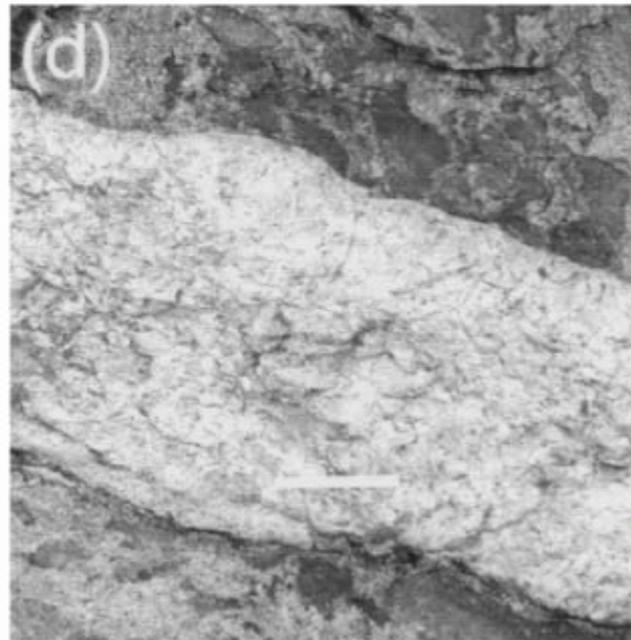
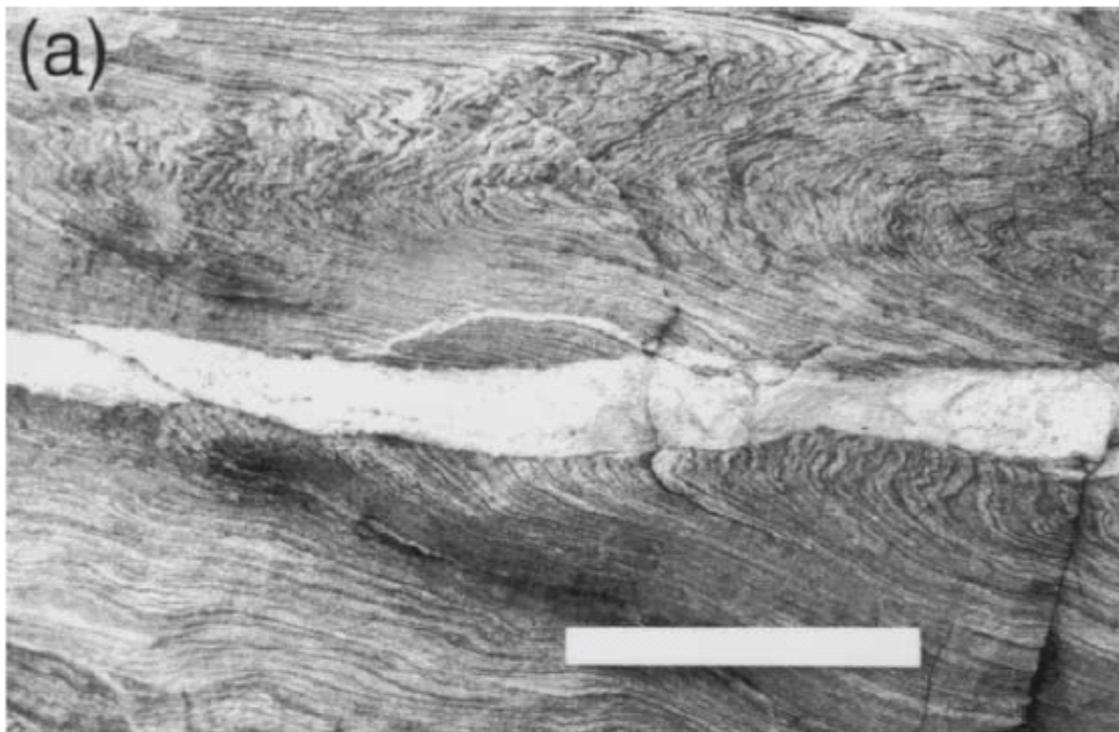


CAP DE CREUS

Katalanien, Spanien



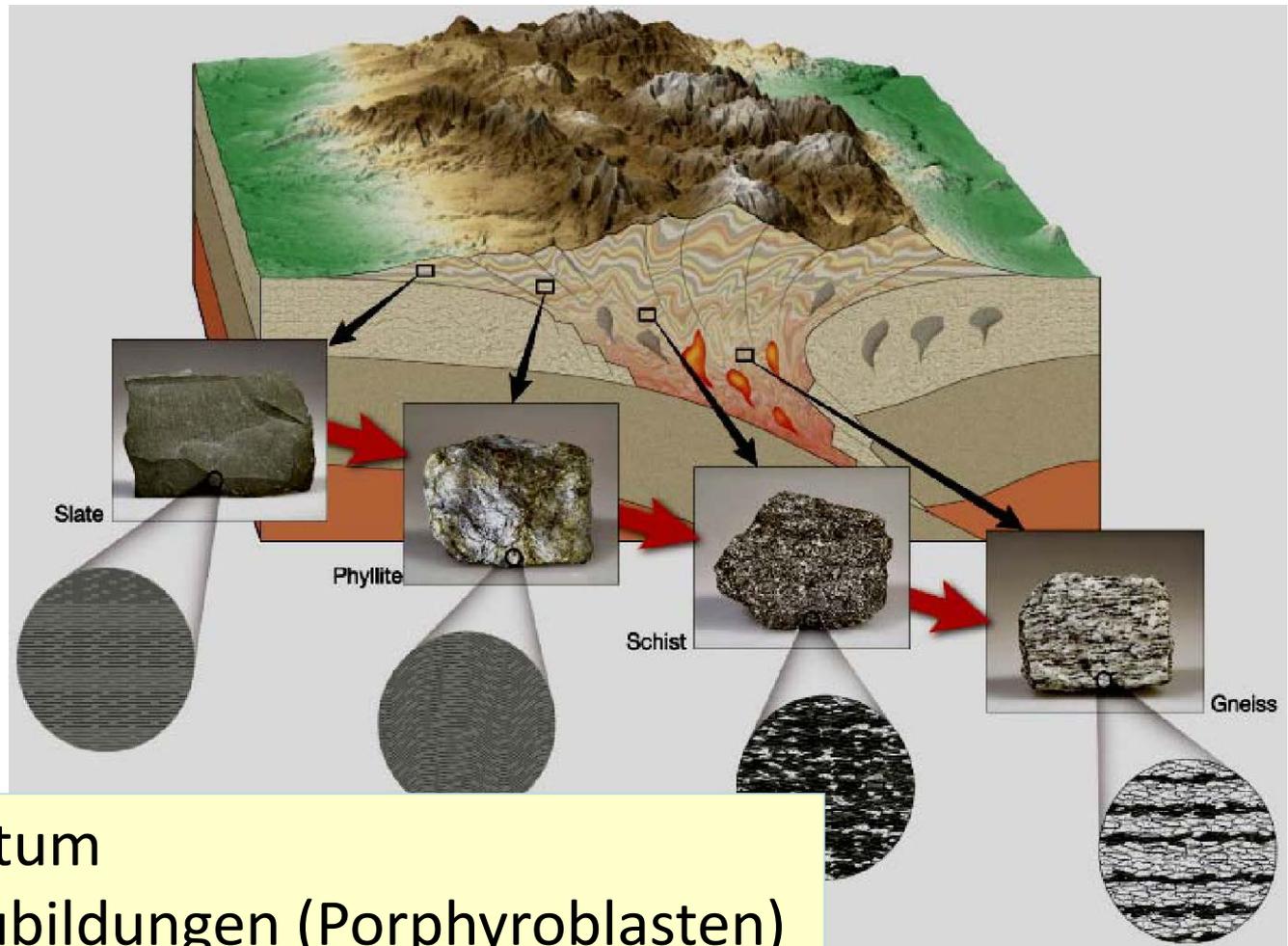




Regional - Metamorphose

Wärme

Druck



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

Regional - Metamorphose

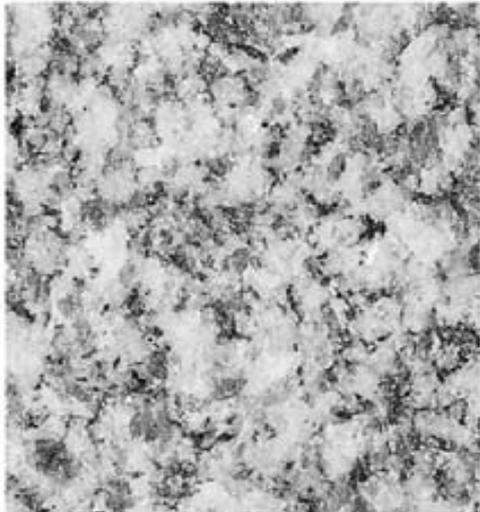
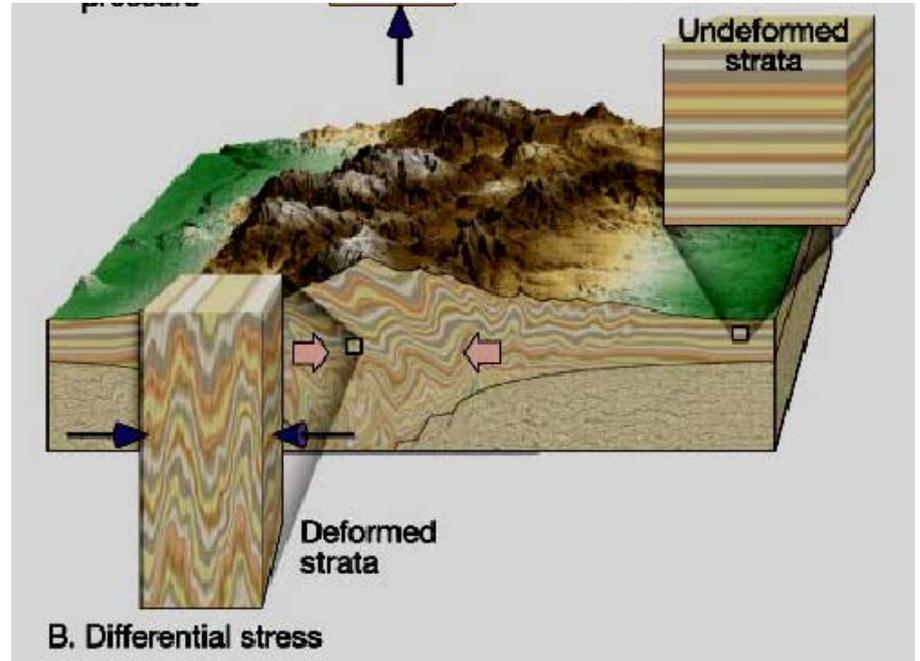
Wärme

Druck

Gerichteter Druck

Ungestört

Gerichteter
Druck



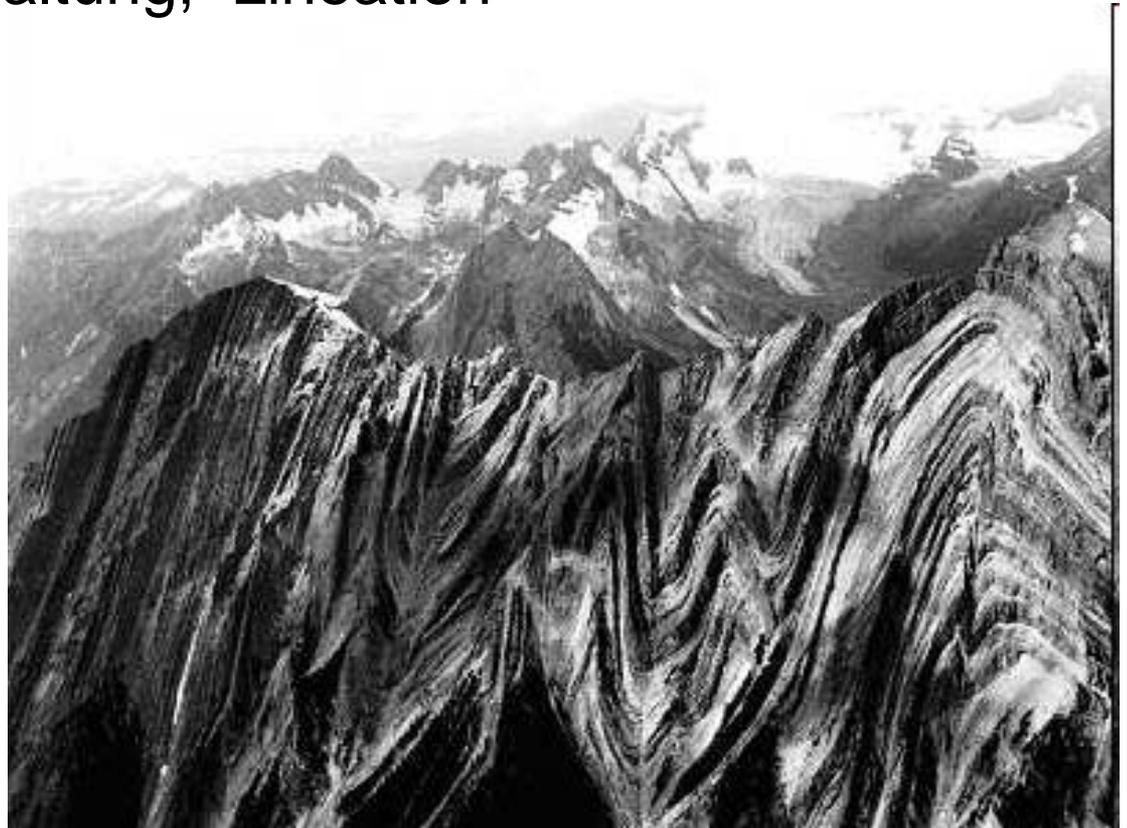
vorher

nachher

Regionalmetamorphose

- Tektonik → Deformation
Schieferung, Verfaltung, Lineation

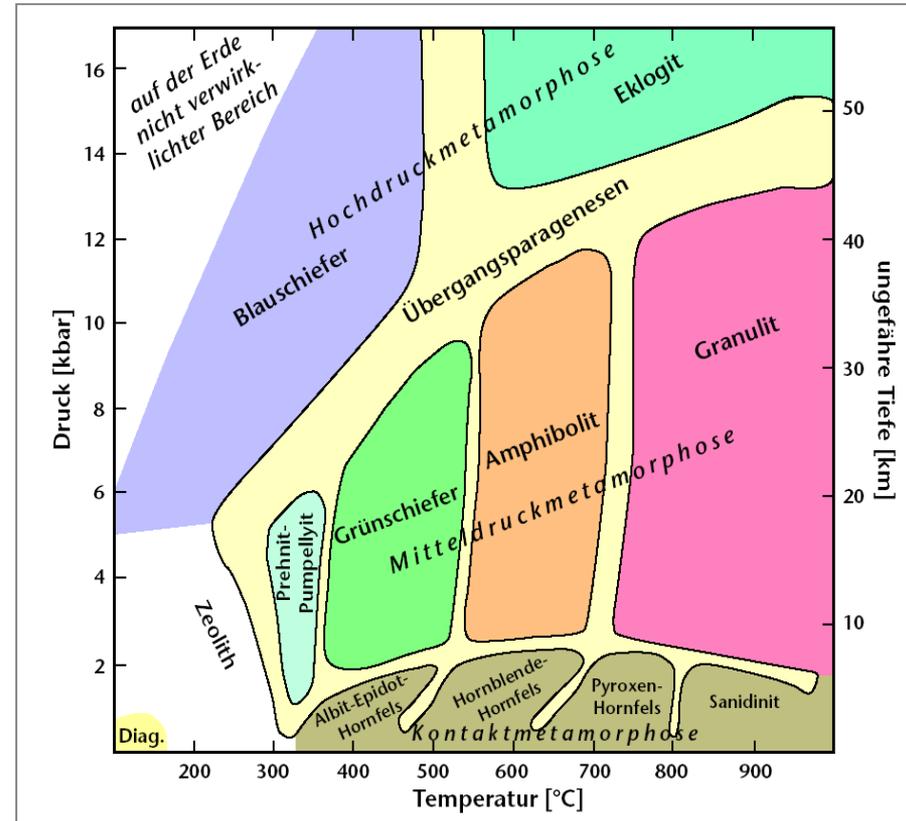
Unter Umständen
mehrere Phasen der
Kristallisation &
Deformation

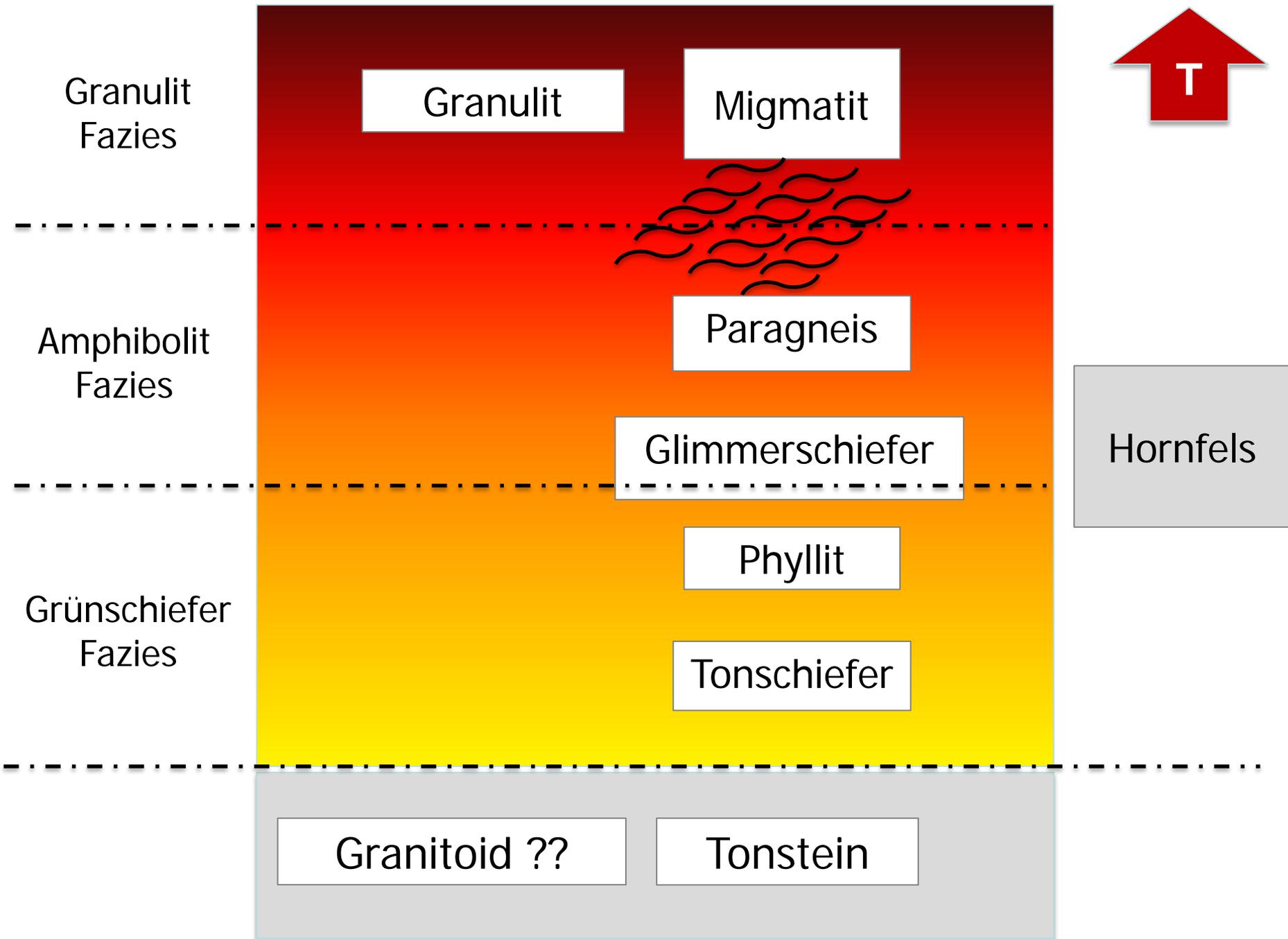


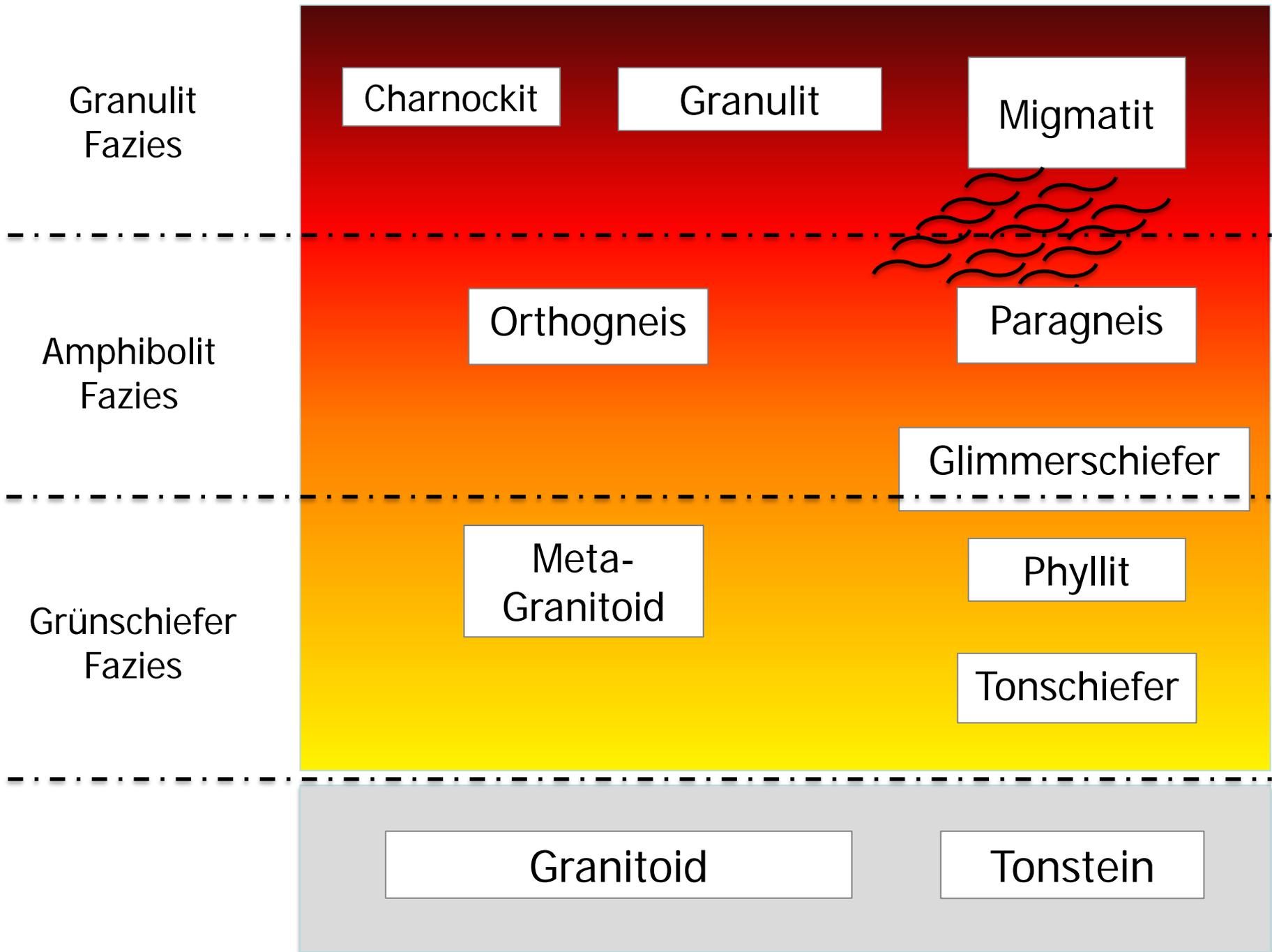
British Columbia (Kanada)

<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







Granit - Orthogneis

Metamorphes Gestein mit Paralleltextrur

→ eingeregeltere 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

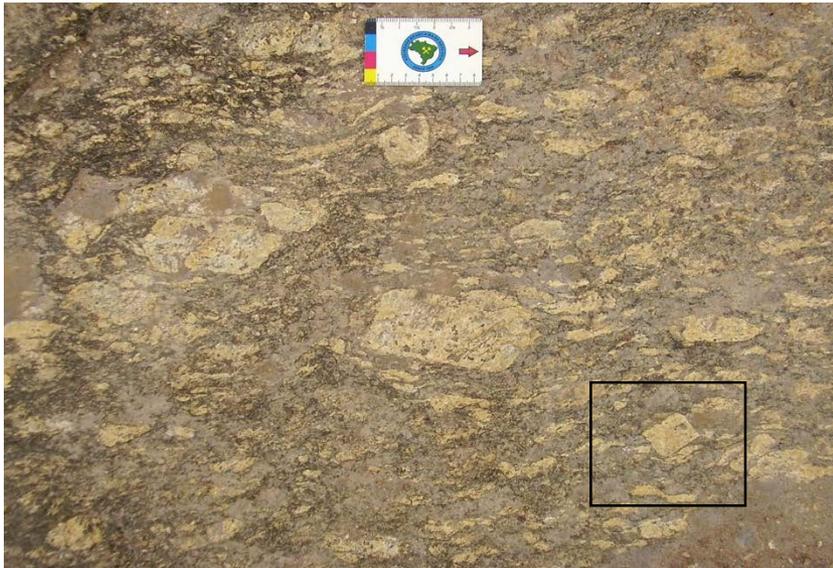
Definition

Granulit

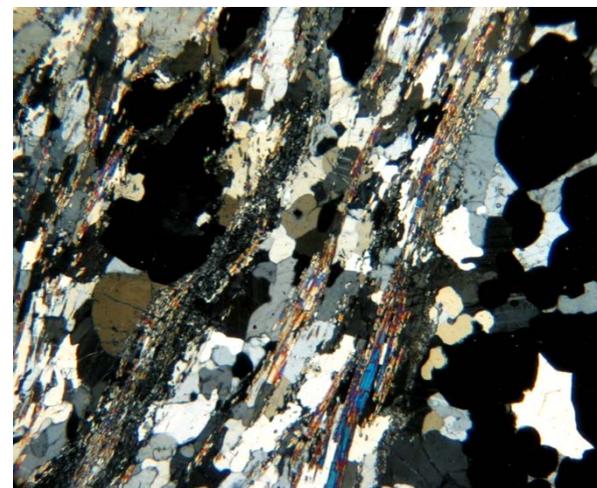
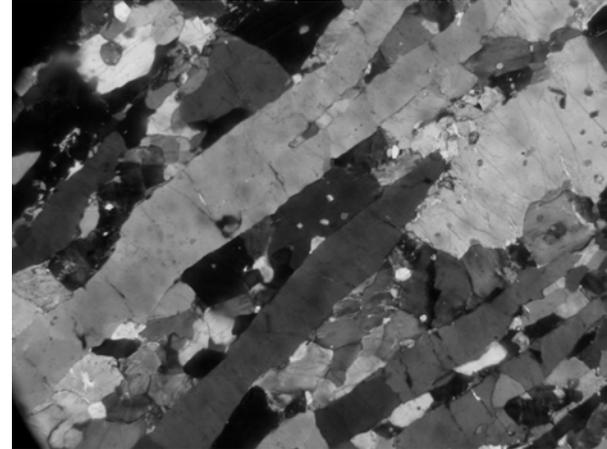
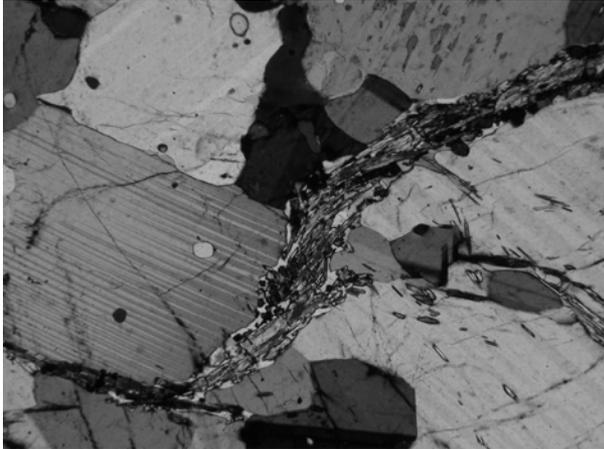
(latein. granulum: Körnchen)

- ✓ 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 ...



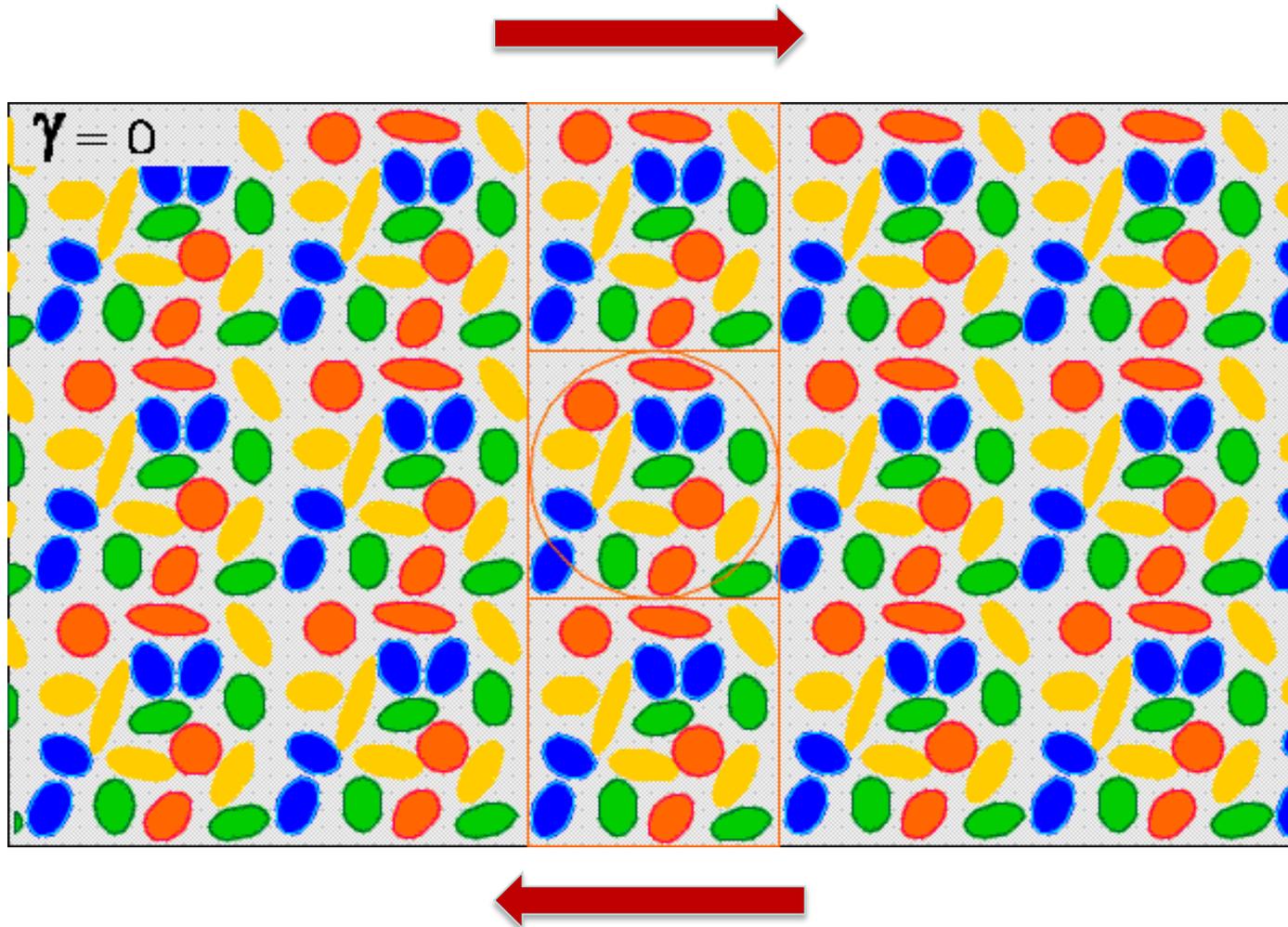
Entwicklung einer metamorphen Foliation im Gneis und Granulit



~ 1 cm

Deformation entlang von Scherbahnen

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

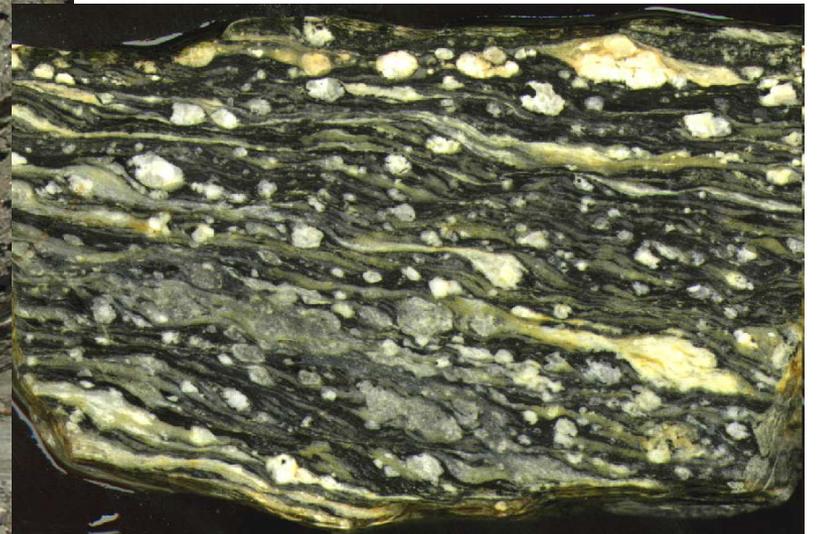


Kataklastische - Metamorphose / Mylonit

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



Kataklastose



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>

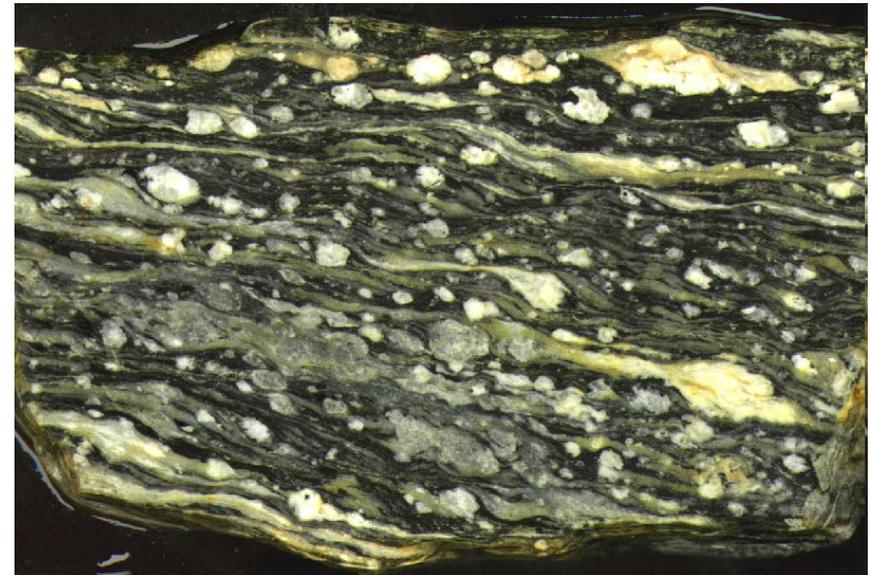


Bild: <http://earth.boisestate.edu/home/cjnorth/images/mylonite.JPG>

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

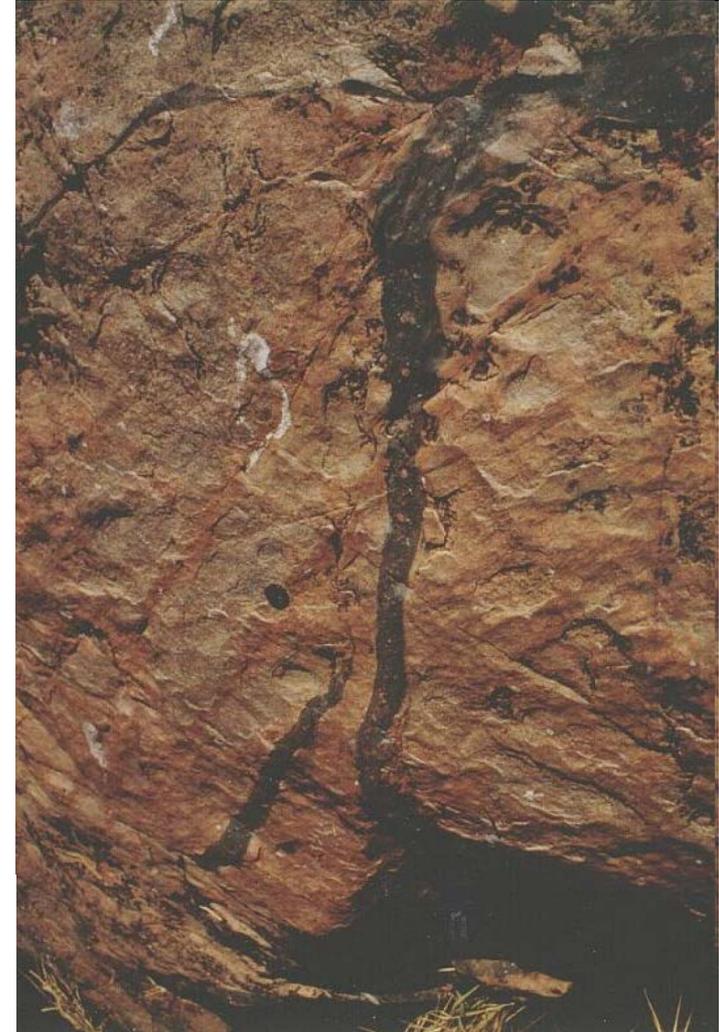


Bild: <http://www.impaktstrukturen.de/origi/pseudovredefort.jpg>
<http://www.impaktstrukturen.de/origi/070.jpg>

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