

Gestein



Petrologie = Gesteinslehre

Gesteine sind Gemenge aus Mineralen
(meistens gesteinsbildende Minerale)

- NICHT zufällige Gemenge/Vergesellschaftung
- Einige Minerale kommen häufig zusammen vor (z.B. Olivin und Pyroxen, Quarz und Kalifeldspat, Biotit und Hornblende).
- Einige Mineralien kommen nie zusammen vor (z.B. Olivin und Quarz, Leucit und Orthopyroxen, Nephelin und Quarz, Sanidin und Olivin)...

gesteinsbildende Minerale

Orthoklas



Quarz



Biotit

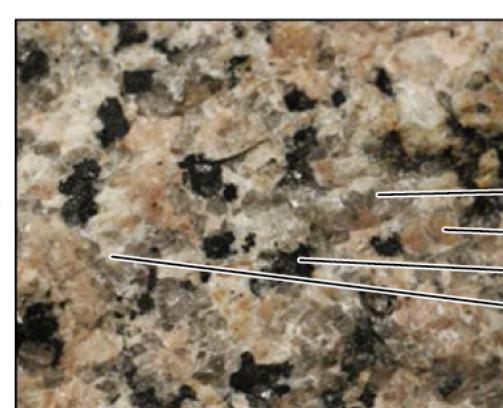


Plagioklas



Gesteine sind natürlich vorkommende
Gemenge aus Mineralaggregaten.

Eine Ansammlung von
Mineralen führt zu
einem Gestein



Plagioklas
Orthoklas
Biotit
Quarz



Gestein (Granit)

Abb. 3.23 Gesteine sind natürlich vorkommende Gemenge aus Mineralaggregaten (Fotos: © John Grotzinger/Ramón Rivera-Moret/Harvard Mineralogical Museum)

Hauptarten von Gesteinen

1. Magmatische Gesteine
2. Sedimentgesteine
3. Metamorphe Gesteine

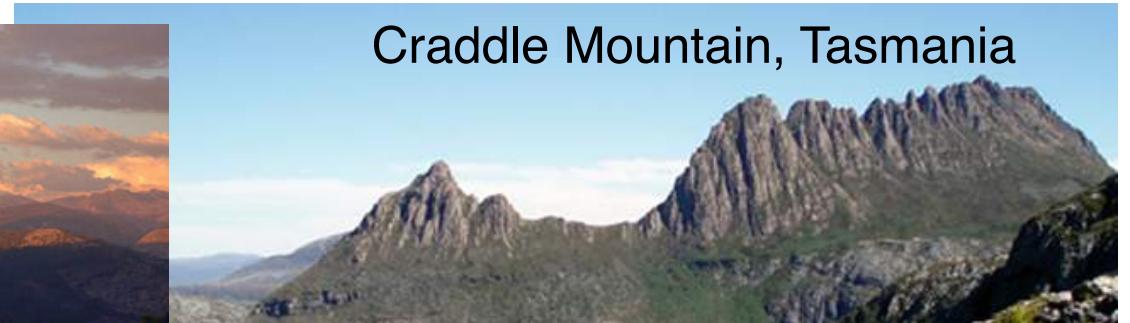
Magmatische Gesteine



- Entstehen aus einem Magma
 - Vulkanit: gekühlt an der Oberfläche (enthält **Glas** = schnell gekühltes („abgeschrecktes“), flüssiges Magma, feinkörnig)
 - Plutonit: in der Tiefe kristallisiert (zwischen ~ 2-3 km bis zum Oberen Mantel, grobkörnig)
- Weder Plutonit noch Vulkanit?
 - Mittelkörnige subvulkanische (hypabyssale) Gesteine

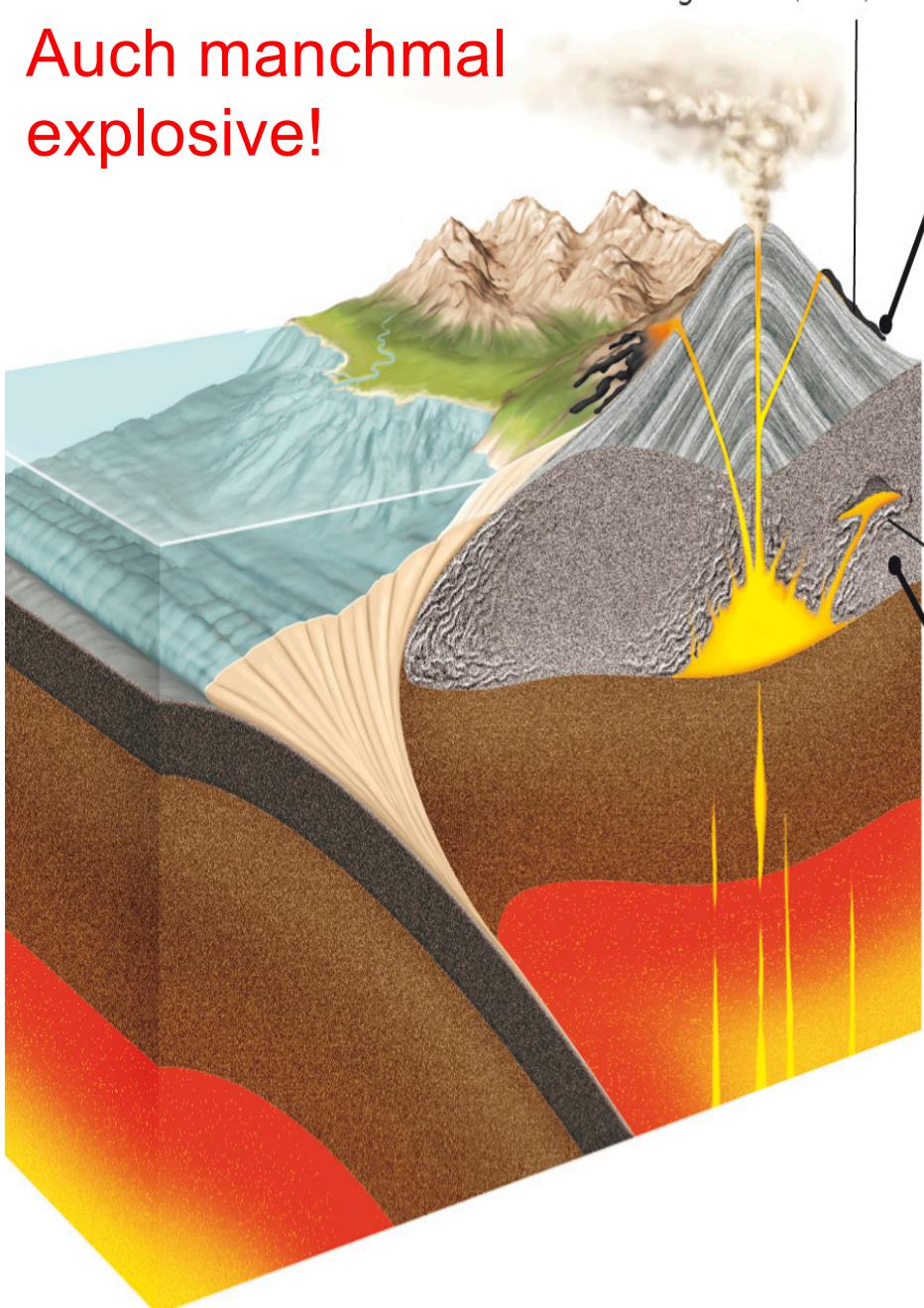


Half Dome, Yosemite



Cradle Mountain, Tasmania

Auch manchmal
explosive!



Effusivgestein (Lava)

Effusivgesteine entstehen, wenn Magma an der Erdoberfläche austritt und dort rasch zu Asche oder Lava erstarrt, wobei sich nur sehr kleine Kristalle bilden.

Als Folge ist das Gestein, wie der hier abgebildete Basalt, feinkörnig, oder aber die Gesteine besitzen eine glasige Grundmasse.



Magma-Intrusion

Intrusivgesteine entstehen, wenn tief in der Erdkruste geschmolzenes Gesteinsmaterial in das Nebengestein eindringt und dort erstarrt.

Im Verlauf der sehr langsamen Abkühlung kommt es zur Ausbildung eines grobkristallinen Gesteins wie dem hier abgebildeten Granit.



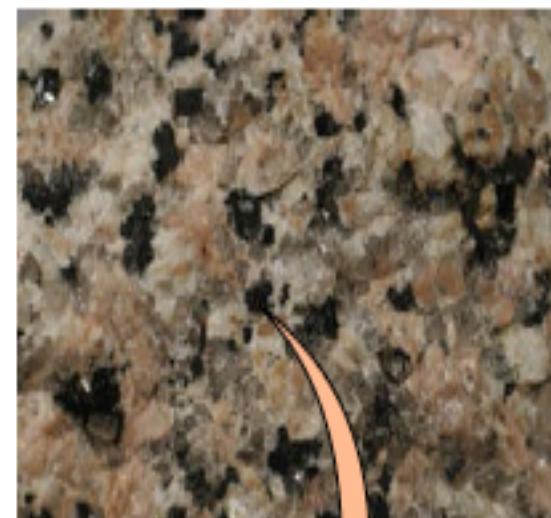
Gefüge - Struktur

Abb. 4.1 Magmatische Gesteine werden in erster Linie anhand des Gefüges klassifiziert. Früher beurteilte man das Gefüge mit einer einfachen Handlupe. Heute verwendet man zur Gesteinsuntersuchung hochauflösende Polarisationsmikroskope, mit deren Hilfe Fotos von Dünnschliffen, dünnen transparenten Gesteinsscheibchen wie hier gezeigt, hergestellt werden können (Fotos: © John Grotzinger/Ramón Rivera-Moret/Harvard Mineralogical Museum; Dünnschliffe: © Steven Chemtop)

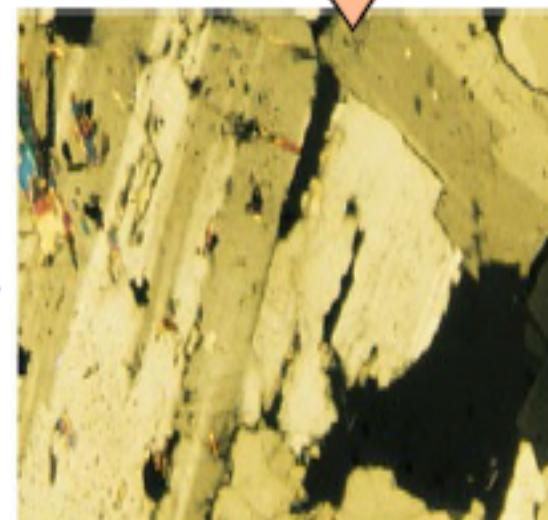
unter der Lupe
1 cm

Plutonite grobkörnig

Granit

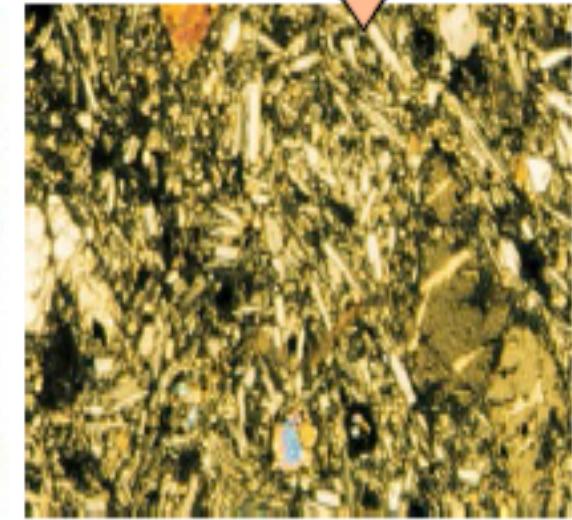


unter dem Polarisationsmikroskop
1 mm



Vulkanite feinkörnig

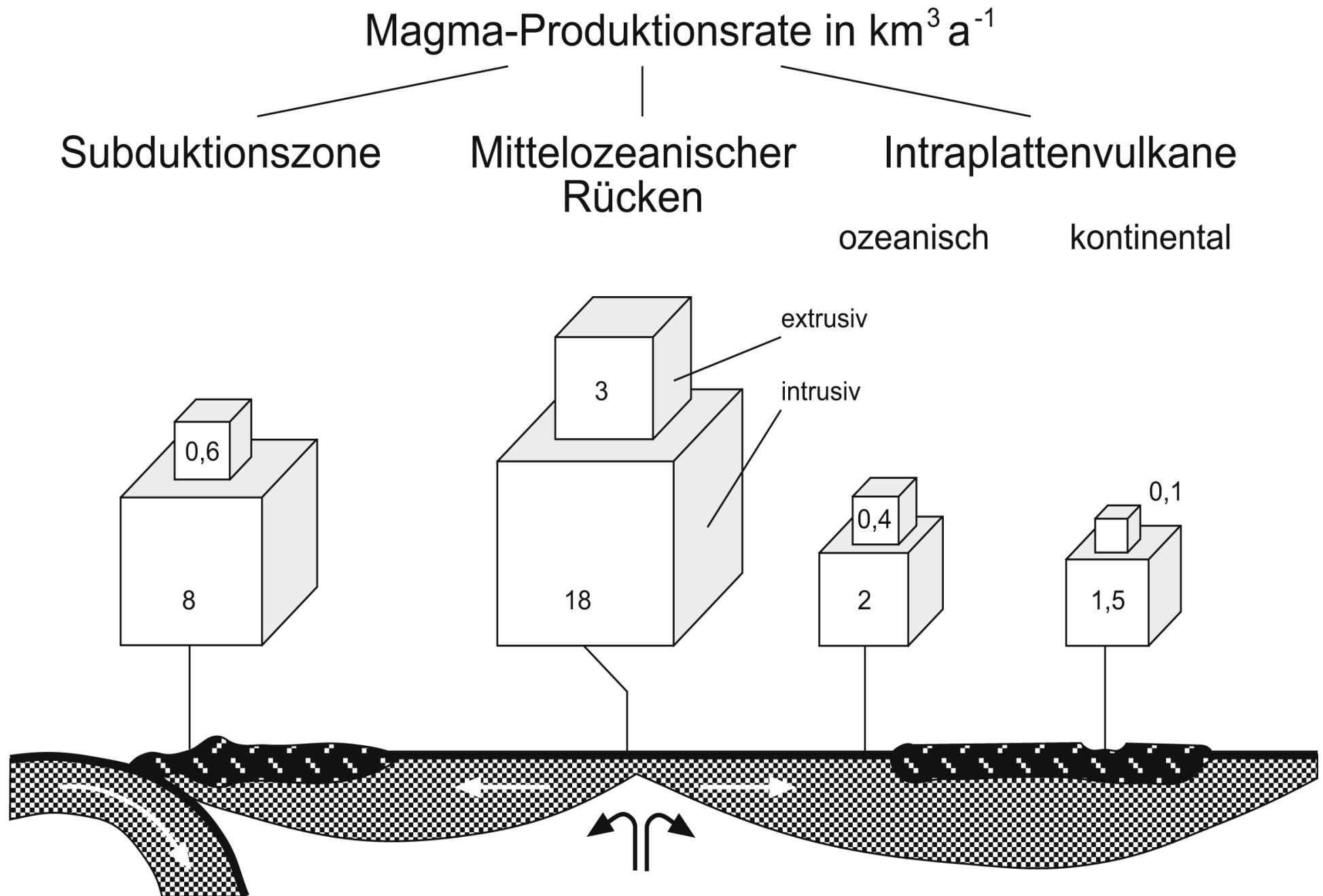
Basalt



Magmatische Gesteine

- Vulkanit weniger häufig als Plutonit, aber nicht genau bekannt
- In Kontinenten
 - *Wahrscheinlich* >~ 90% Plutonit (intrusiv) und < 10% Vulkanit (extrusiv)
- Am Mittelozeanischen Rücken
 - *Wahrscheinlich* >~ 80% Plutonit und < ~20% Vulkanit

Wie viel Magma pro Jahr (ganze Erde)?



Magmatische Gesteine; Bedingungen

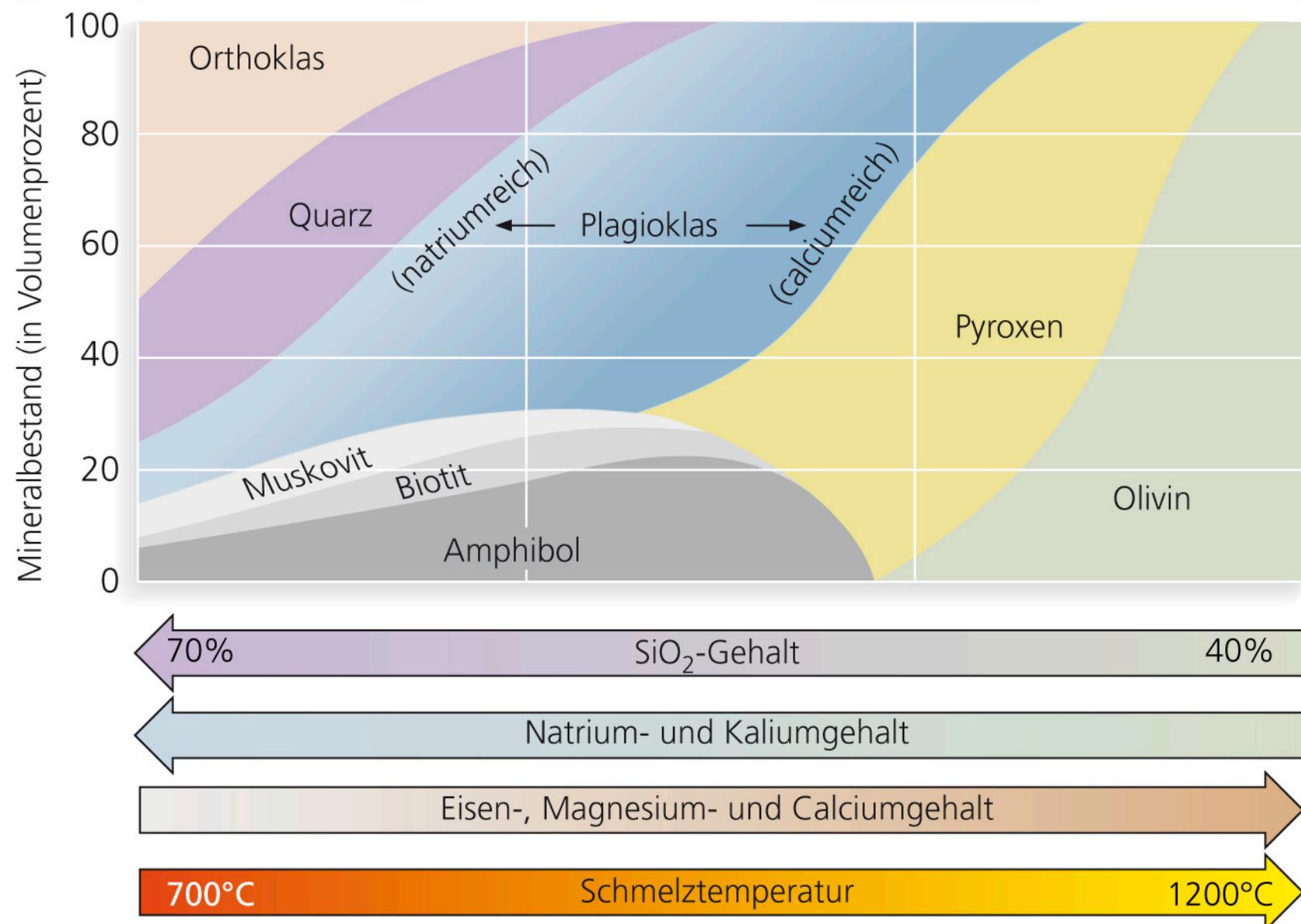
- Temperaturbereich:
 - Moderne Erde; $\sim 650 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow \sim 1400 \text{ } ^\circ\text{C}$
 - In der Vergangenheit, bis zum $\sim 1600 \text{ } ^\circ\text{C}$,
«Komatiite»)
- Druckbereich:
 - 1 bar ($\sim \text{atm}$) \rightarrow Oberer Mantel ($\sim 1\text{-}2 \text{ GPa}$ oder
 $10\text{-}20 \text{ kb}$)

Namen – Magmatische Gesteine

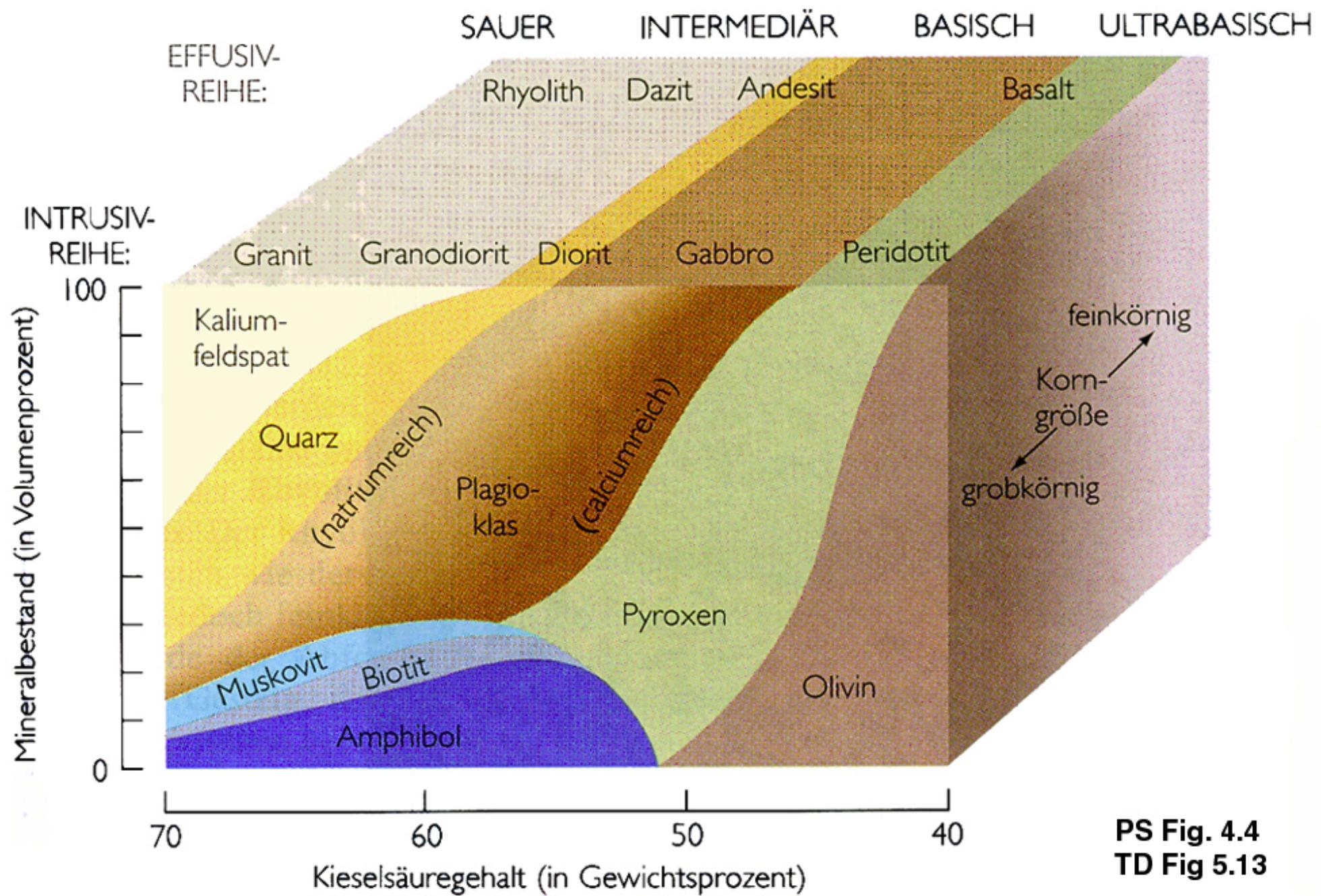
Wie definiert man diese Namen ?

- Plutonit?
 - Definiert durch den Inhalt des Minerals
- Vulkanit?
 - Definiert durch die Zusammensetzung des Gesteines

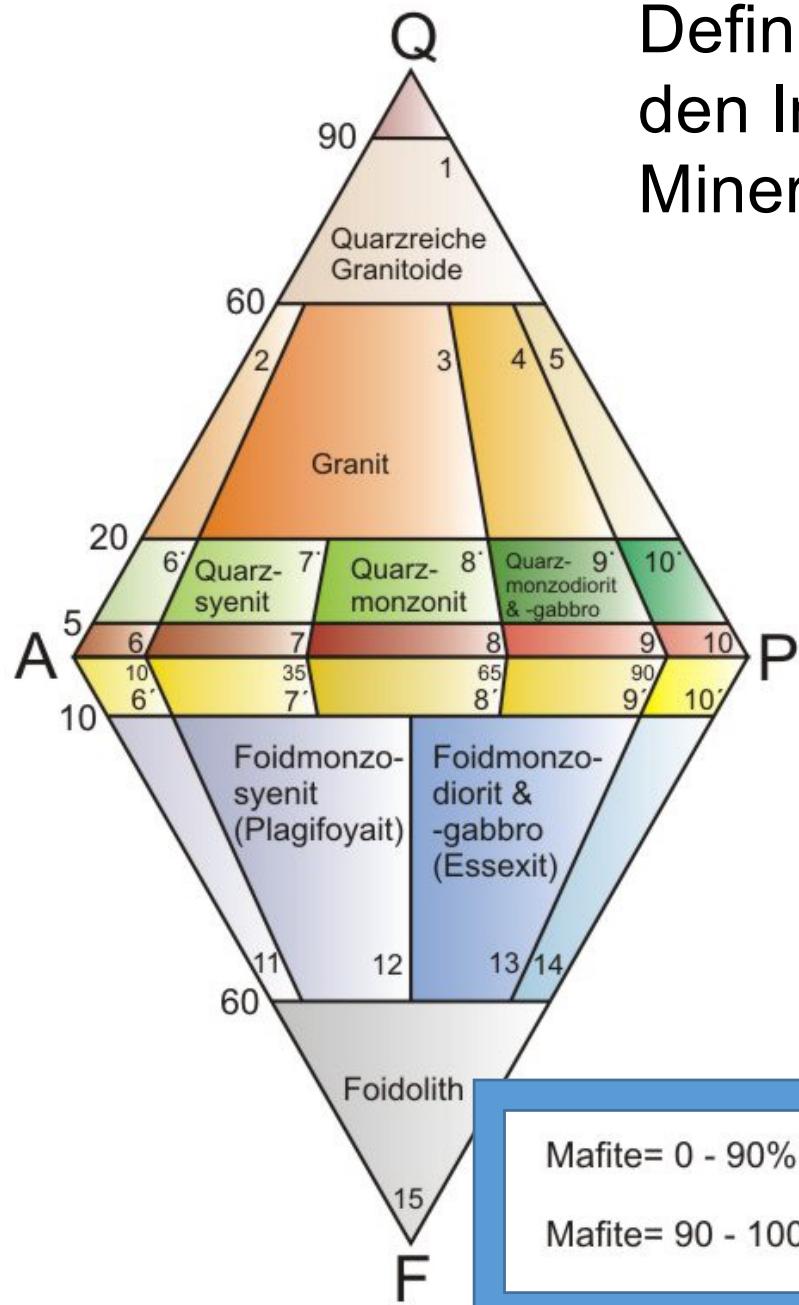
Zusammen- setzung	SAUER	INTERMEDIÄR	BASISCH	ULTRABASISCH
Intrusivgestein	Granit Rhyolith	Granodiorit Dazit	Diorit Andesit	Gabbro Basalt
Effusivgestein				Peridotit



Mineralbestand und Gesteinschemismus



Plutonit Namen



Definiert durch
den Inhalt des
Minerals

Q: Quarz

A: Alkalifeldspat (mit Albit An₀₀₋₀₅)

P: Plagioklas An₀₅₋₁₀₀

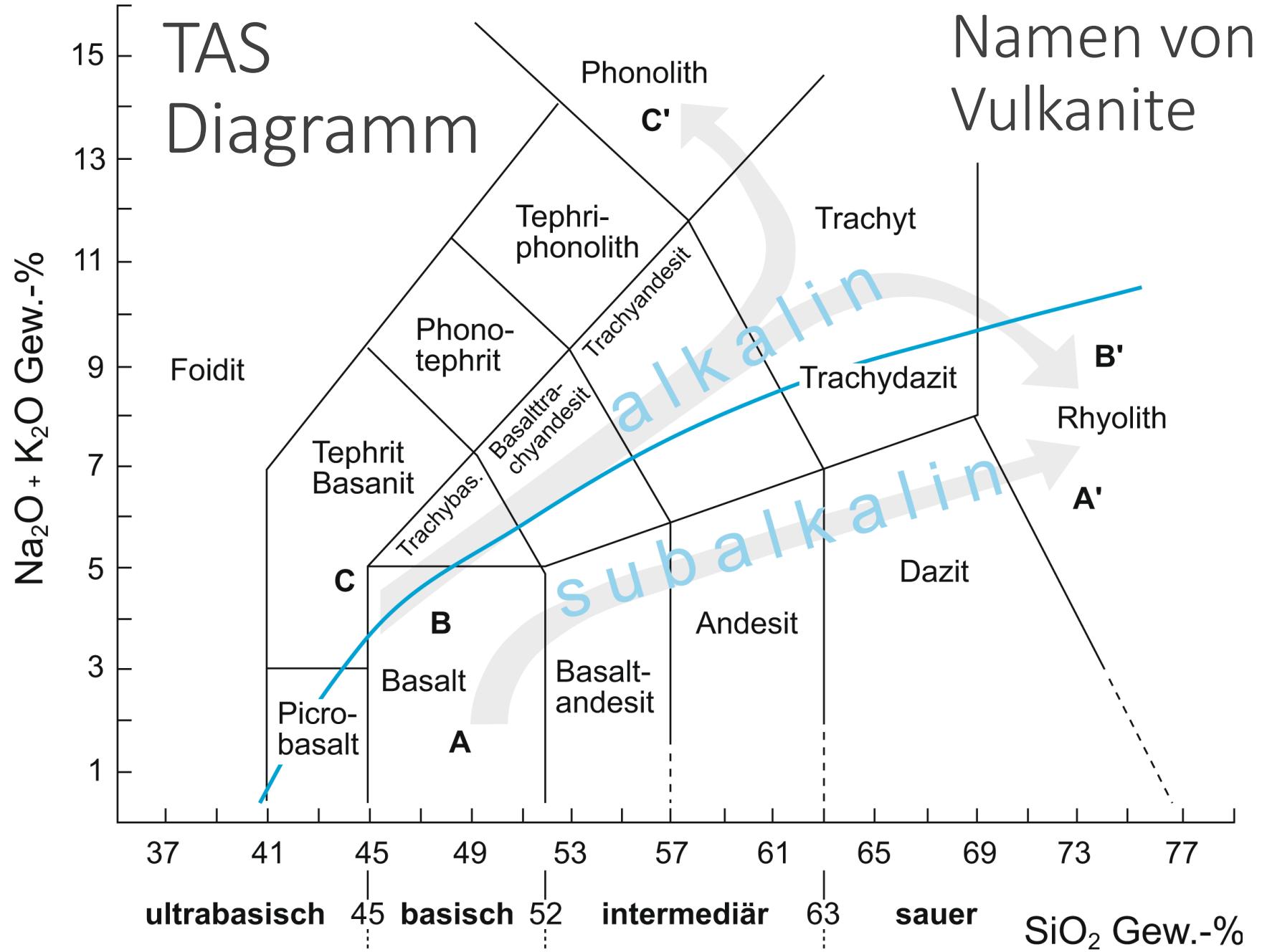
F: Foide

Albert Streckeisen

Legende

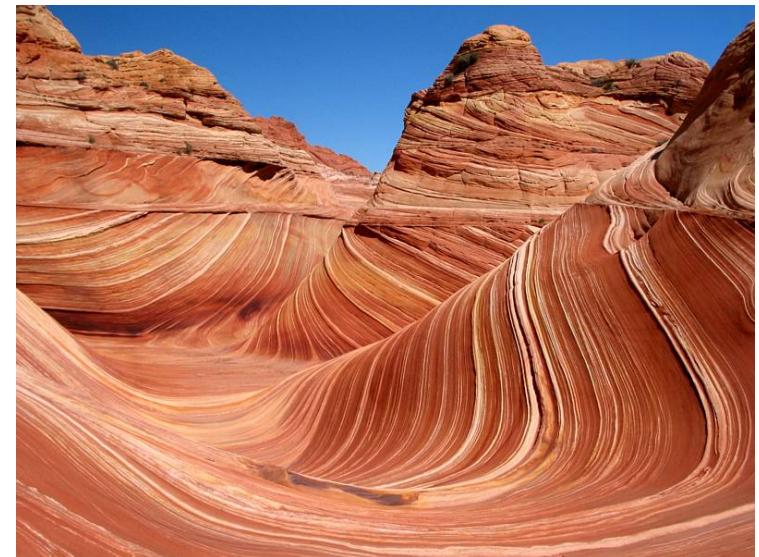
- 2: Alkalifeldspat-Granit
- 4: Granodiorit
- 5: Tonalit
- 6: Quarz-Alkalifeldspatsyenit
- 10: Quarzdiorit, Quarzgabbro
- 6': Alkalifeldspatsyenit
- 7: Syenit
- 8: Monzonit
- 9: Monzodiorit, Monzogabbro
- 10: Diorit, Gabbro, Anorthosit
- 6': Foidführender Alkalifeldspatsyenit
- 7': Foidführender Syenit
- 8': Foidführender Monzonit
- 9': Foidführender Monzodiorit bzw. -Gabbro
- 10': Foidführender Diorit bzw. Gabbro
- 11: Foidsyenit (Foyait)
- 14: Foiddiorit, Foidgabbro (Theralith)

Für
ultramafische
Gesteine
OPX-CPX-OI
Dreieck



Sedimentgesteine

- Abgelagert auf der Oberfläche
- Klastische oder (bio) chemische
- ~ 75% klastische und 25% chemische
- T-Bereich: ~ -89 °C → ~ 150 °C
- P-Bereich: 1 bar → 0.2 GPa
(Hydrostatisch, lithostatisch)



Metamorphe Gesteine

- Metamorphose = “Umwandlung“
Formänderung während das Gestein
fest ist (=Rekristallisation)
- Kontakt- oder
Regionalmetamorphose
- ~ 5% Kontakt- und 95%
Regionalmetamorphose
- T-Bereich: ~ 150 °C → ~ 1000 °C
- P-Bereich: 1 bar → 2 GPa
(lithostatischer oder gerichteter
Stress)

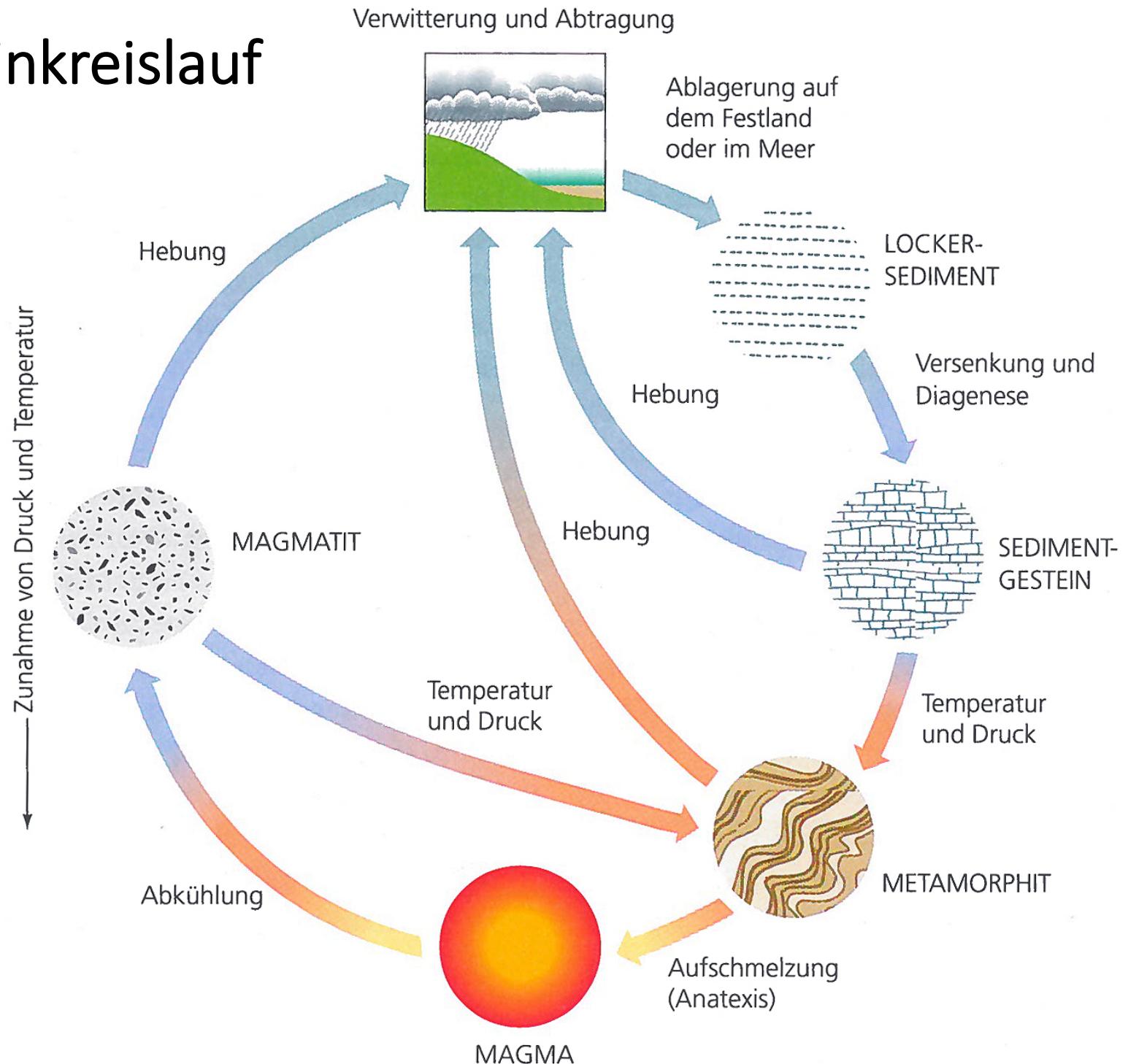


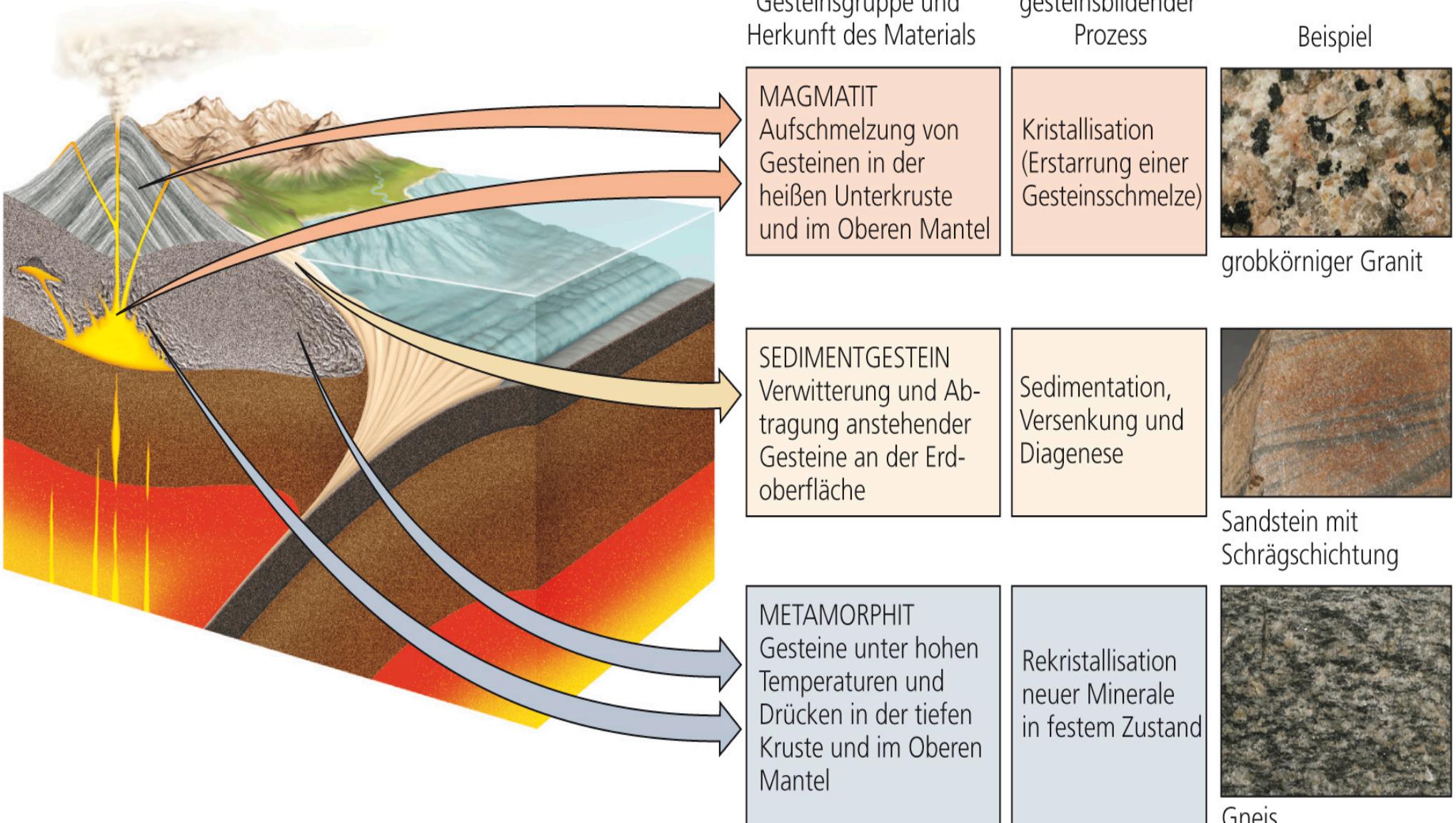
Ein Berg irgenwo



Migmatit

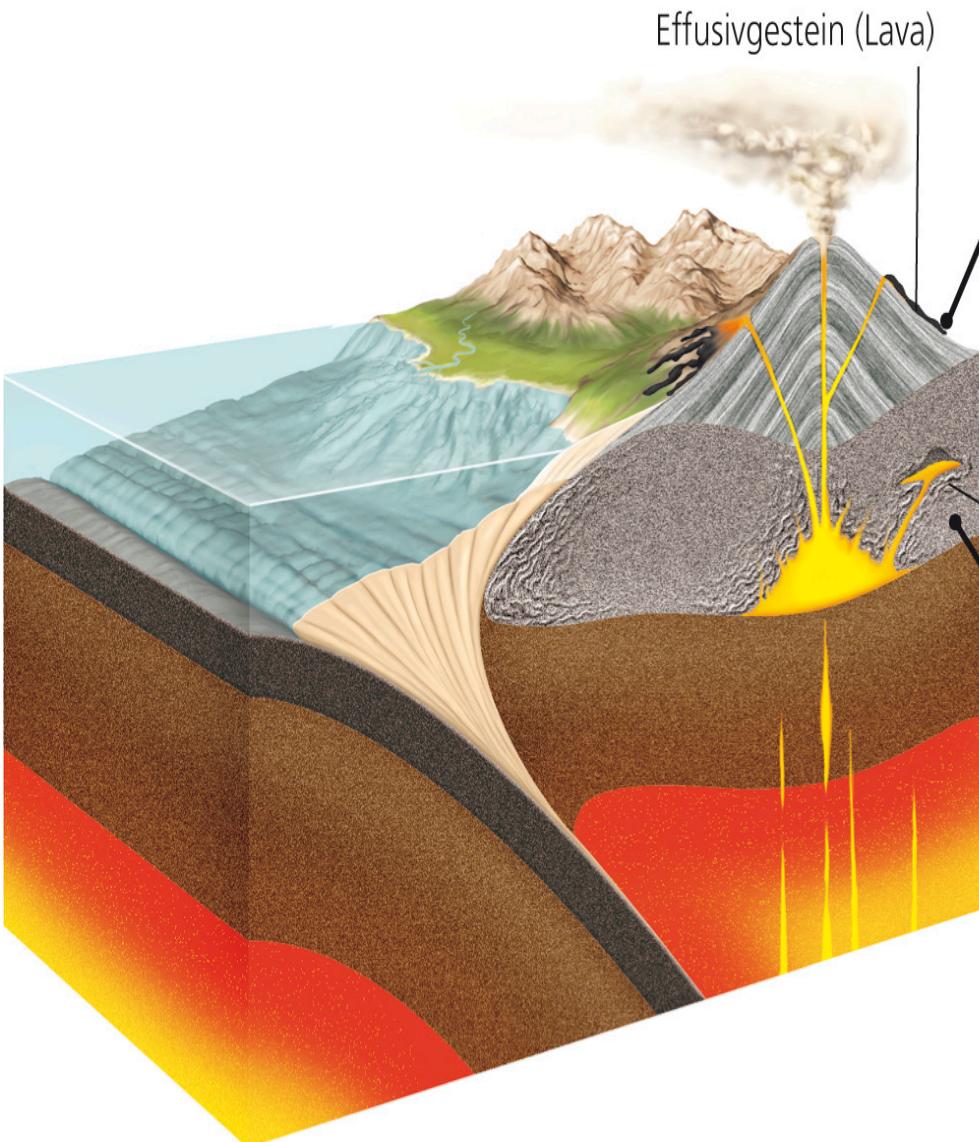
Der Steinkreislauf





Vom Buch - Press und Siever

Aus: Grotzinger/Jordan/Press/Siever, Allgemeine Geologie, 5. Aufl.
© Spektrum Akademischer Verlag GmbH 2008



Effusivgestein (Lava)

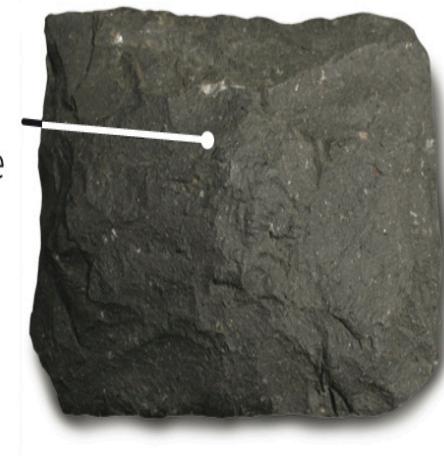
Effusivgesteine entstehen, wenn Magma an der Erdoberfläche austritt und dort rasch zu Asche oder Lava erstarrt, wobei sich nur sehr kleine Kristalle bilden.

Als Folge ist das Gestein, wie der hier abgebildete Basalt, feinkörnig, oder aber die Gesteine besitzen eine glasige Grundmasse.

Magma-Intrusion

Intrusivgesteine entstehen, wenn tief in der Erdkruste geschmolzenes Gesteinsmaterial in das Nebengestein eindringt und dort erstarrt.

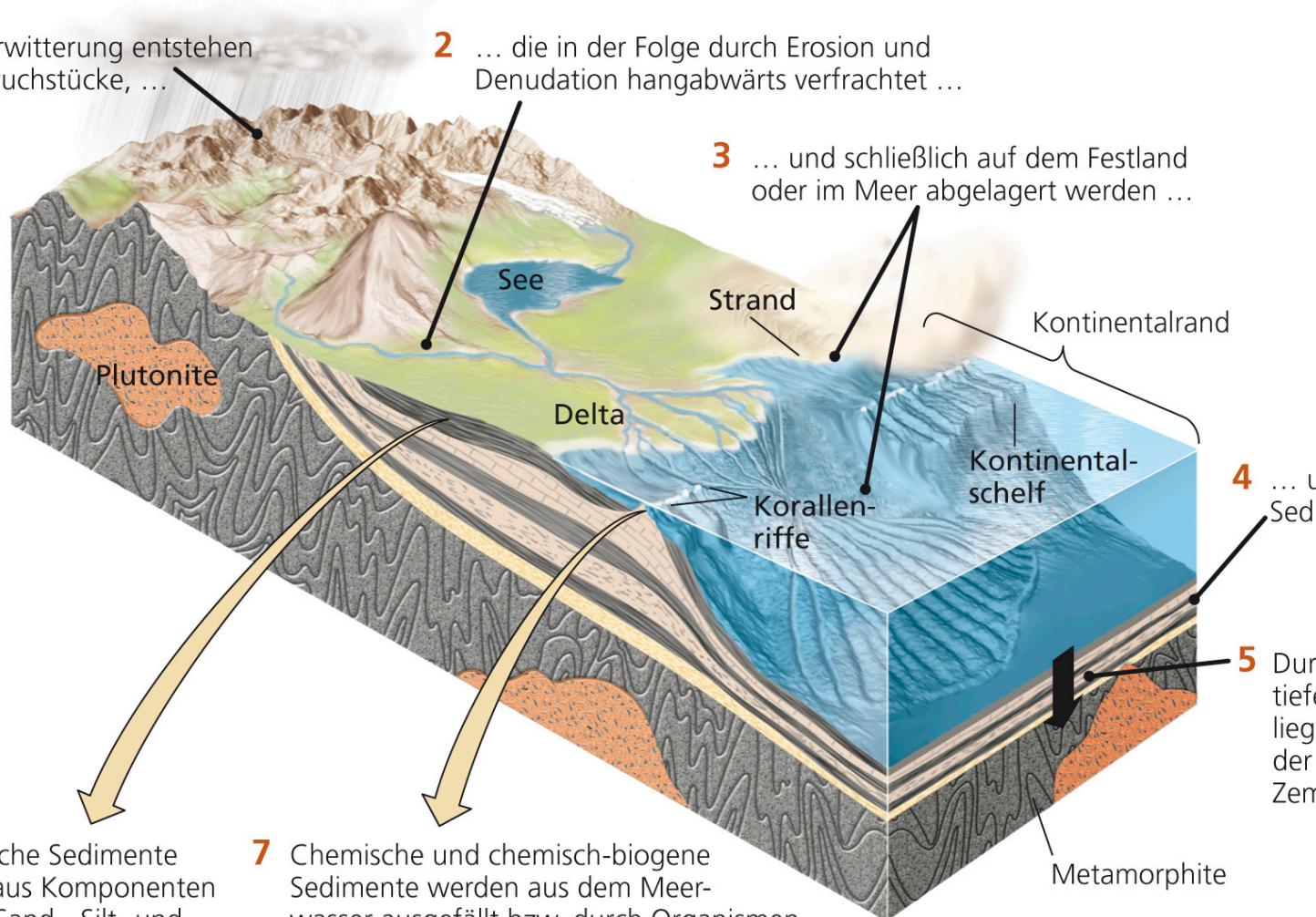
Im Verlauf der sehr langsamen Abkühlung kommt es zur Ausbildung eines grobkristallinen Gesteins wie dem hier abgebildeten Granit.



1 Bei der Verwitterung entstehen Gesteinsbruchstücke, ...

2 ... die in der Folge durch Erosion und Denudation hangabwärts verfrachtet ...

3 ... und schließlich auf dem Festland oder im Meer abgelagert werden ...

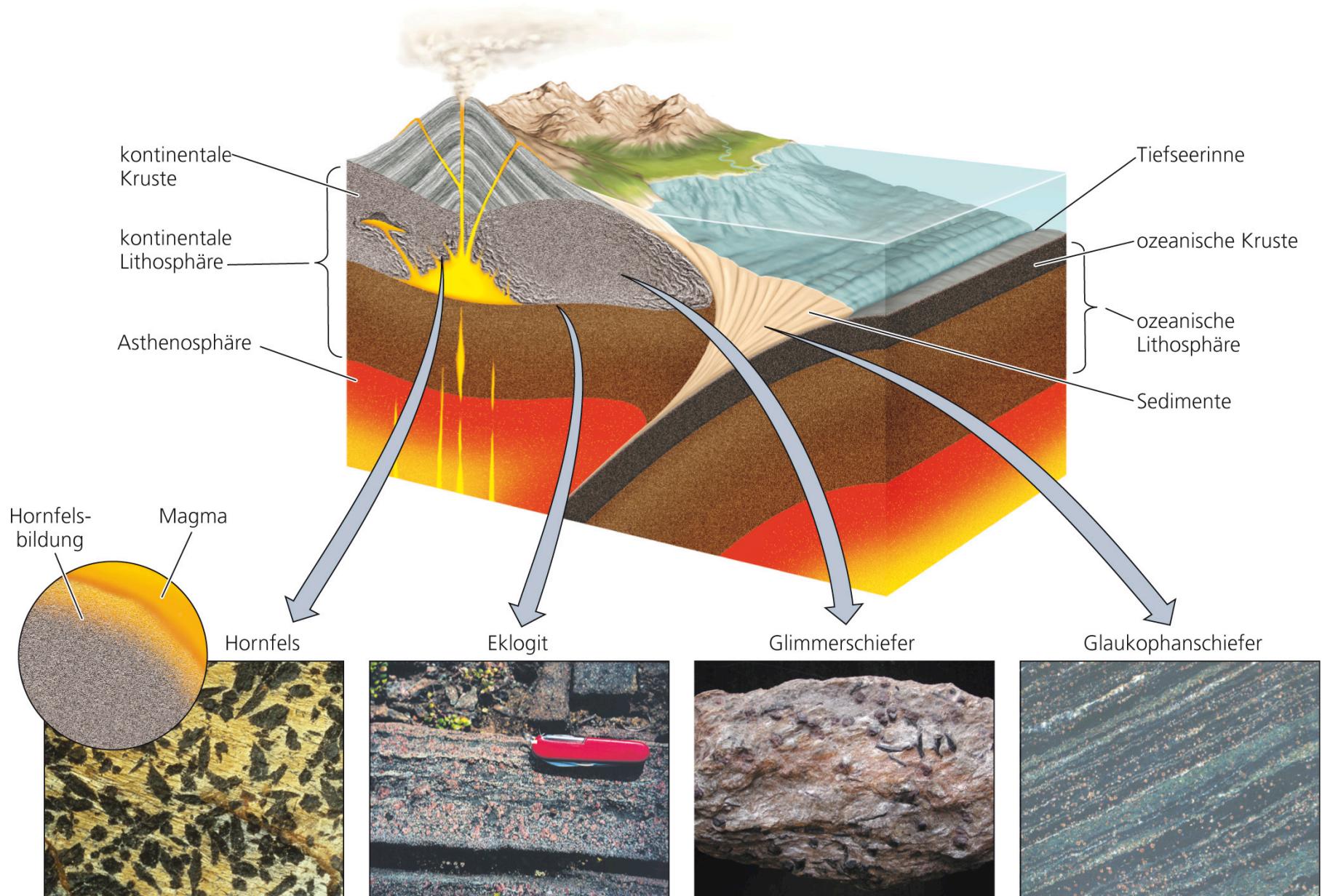


6 Siliciklastische Sedimente bestehen aus Komponenten der Kies-, Sand-, Silt- und Tonfraktion.



7 Chemische und chemisch-biogene Sedimente werden aus dem Meerwasser ausgefällt bzw. durch Organismen wie Korallen oder Muscheln gebildet.





Die **Kontaktmetamorphose** ist auf eng begrenzte Bereiche beschränkt, in denen bedingt durch die hohe Temperatur der Magma-Intrusion das Nebengestein in Hornfels übergeht.

Die **Ultrahochdruck-Metamorphose** ist auf die tiefen Bereiche der kontinentalen Lithosphäre und der ozeanischen Kruste beschränkt.

Die **Regionalmetamorphose** stellt sich ein, wo in ausgedehnten Bereichen hohe Druck- und Temperaturbedingungen herrschen.

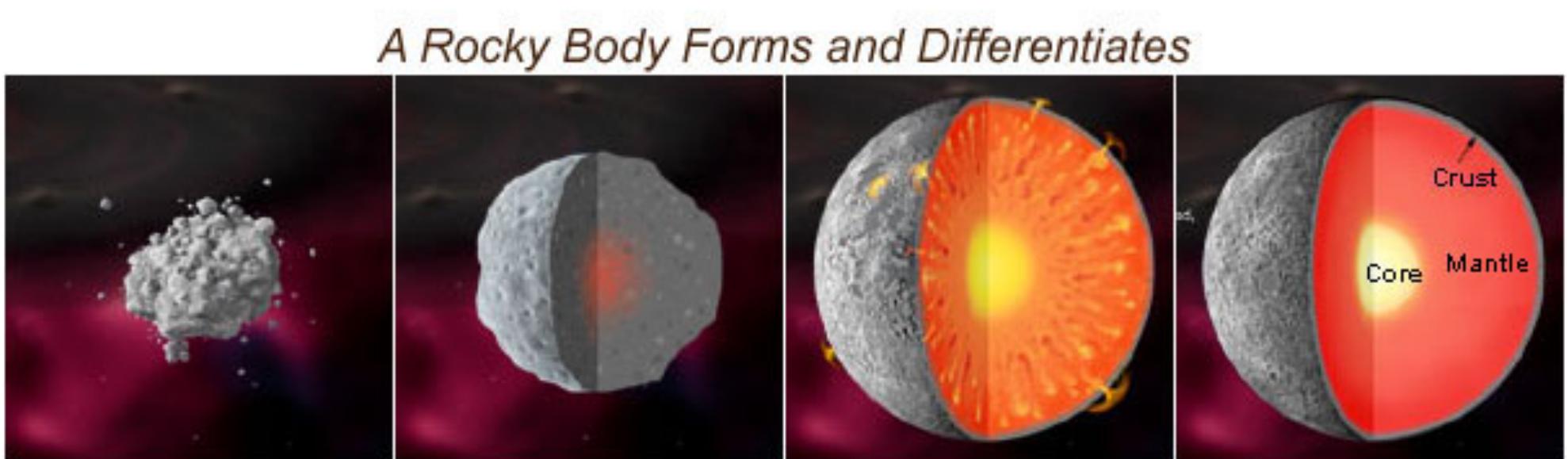
Zur **Hochdruck-Niedrigtemperatur-Metamorphose** kommt es, wo ozeanische Kruste unter dem Rand einer kontinentalen Platte subduziert wird.

Erdentwicklung der Erde

1. Homogen am Anfang (Bildung eines felsigen Körpers durch Akkretion)
2. Differenziation

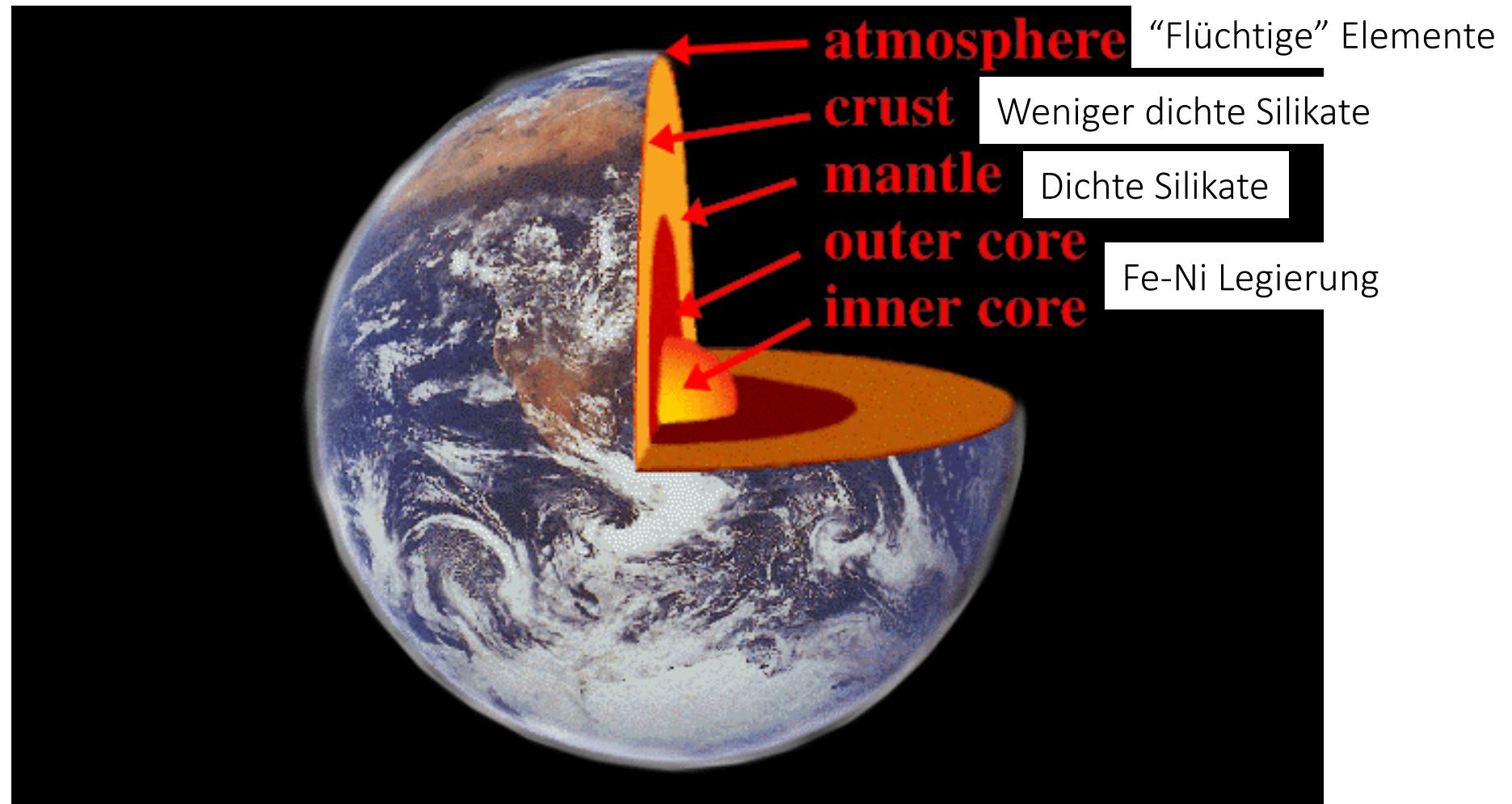


Früherde



(From Smithsonian National Museum of Natural History - http://www.mnh.si.edu/earth/text/5_1_4_0.html)

Erde Dissektion



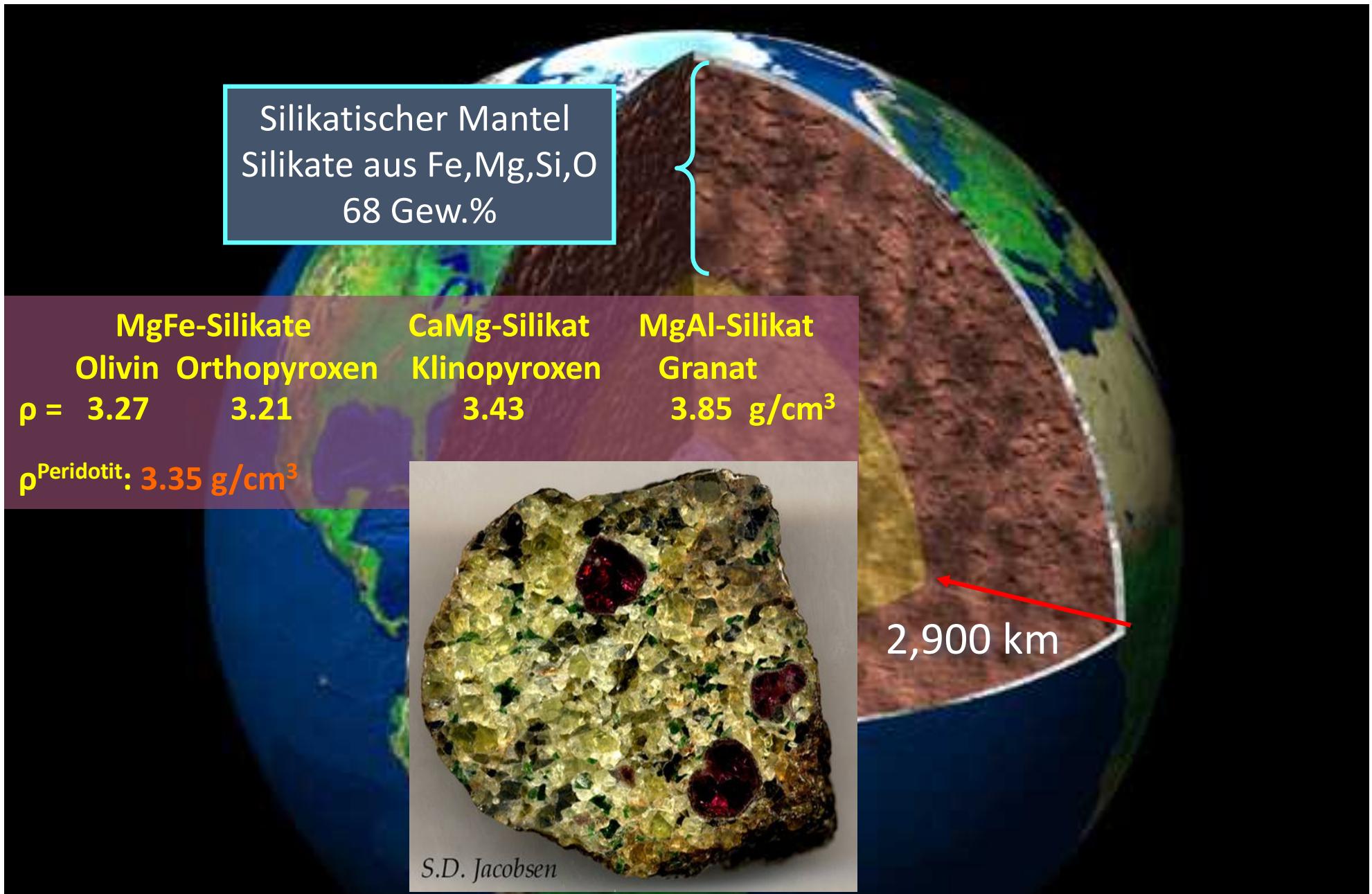
Wichtige Aspekte der Differentiation

1. Mantelkonvektion und Plattentektonik

- Führt zu vielen verschiedenen Umgebungen, in denen das Leben sich entwickeln kann

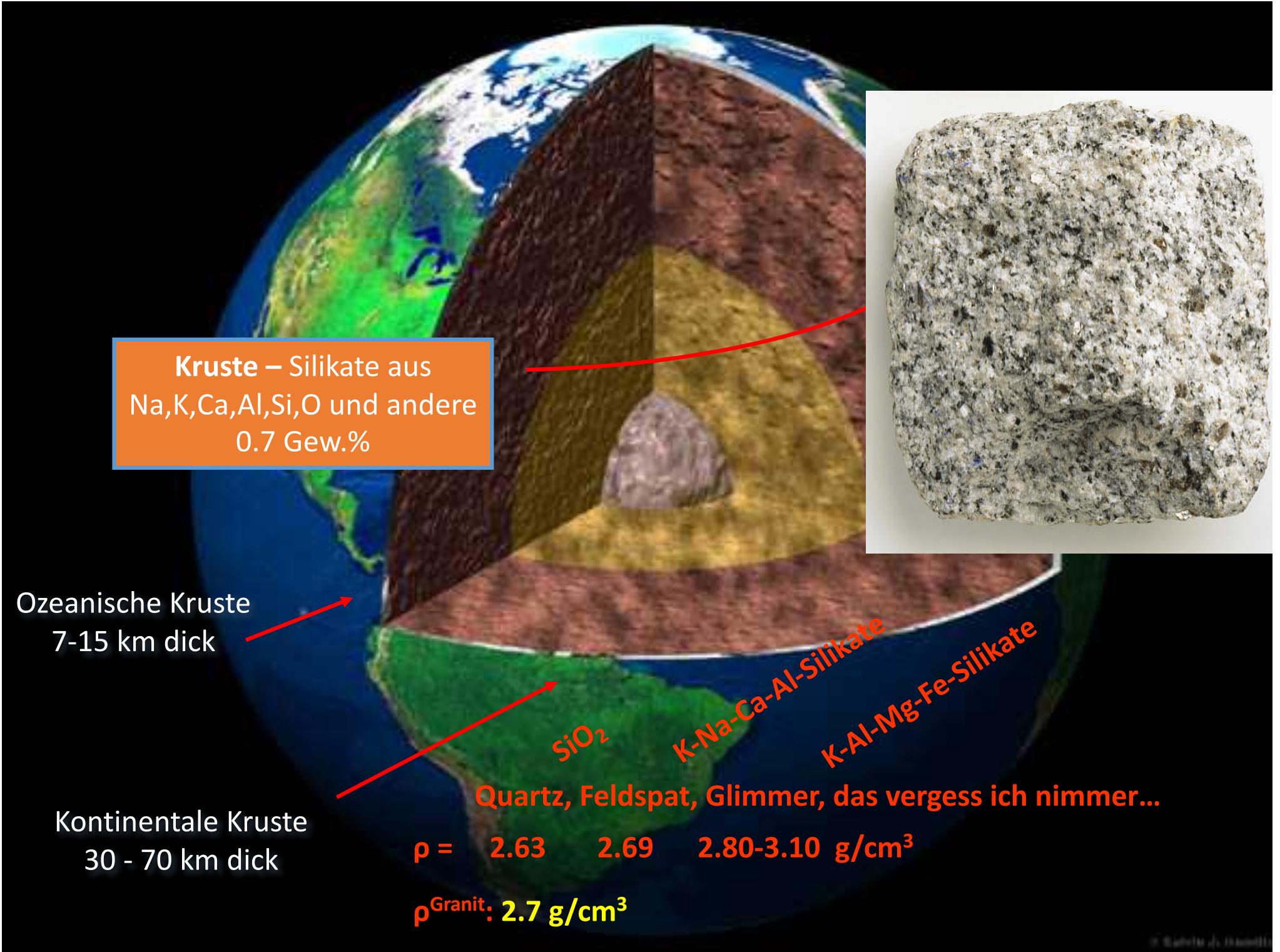
2. Magnetosphäre der Erde, durch Konvektionsströme im flüssigen äusseren Kern

- Schutzbild vor Sonne und Weltraumstrahlung



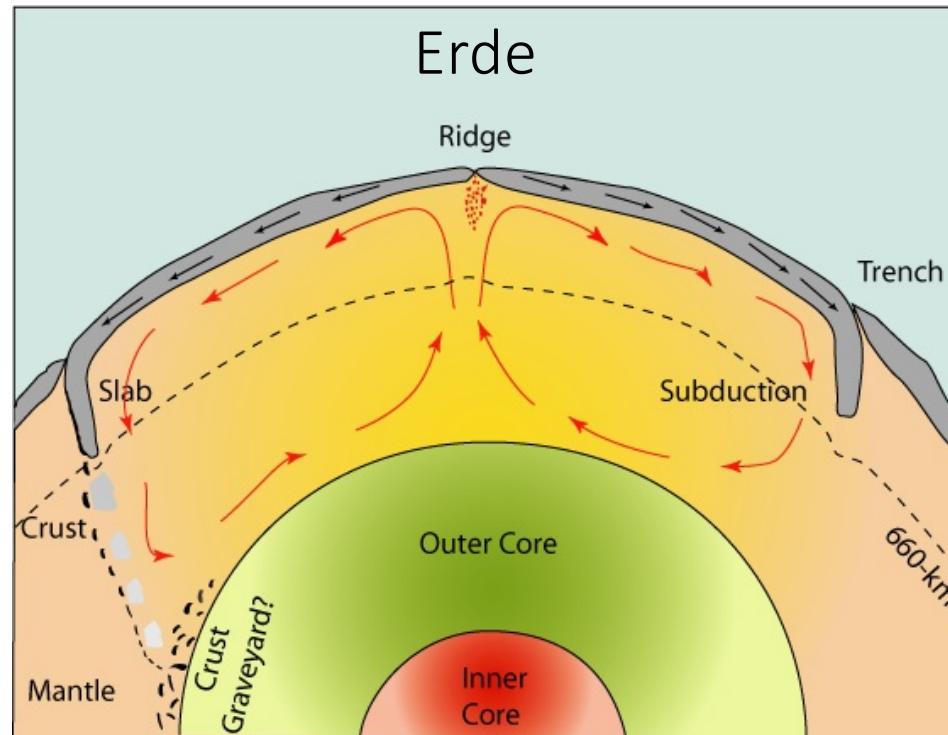
Das meiste Eisen befindet sich im metallischen Kern

O, Mg und Si befinden sich ausschliesslich im silikatischen äusseren Teil der Erde

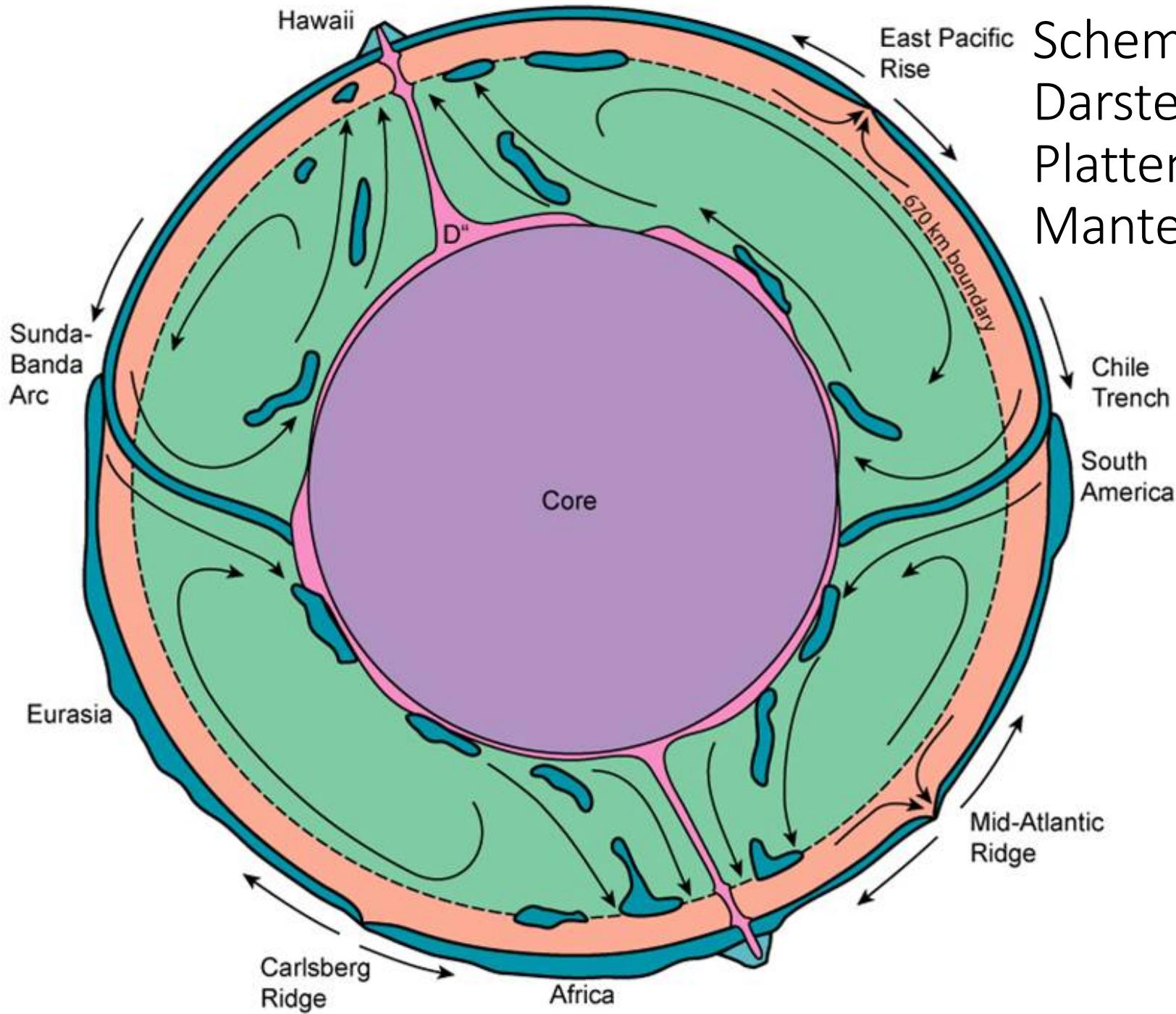


Plattentektonik

- Konvektionsströme im Erdmantel führen zu Plattenbewegungen und dem Gesteinskreislauf!

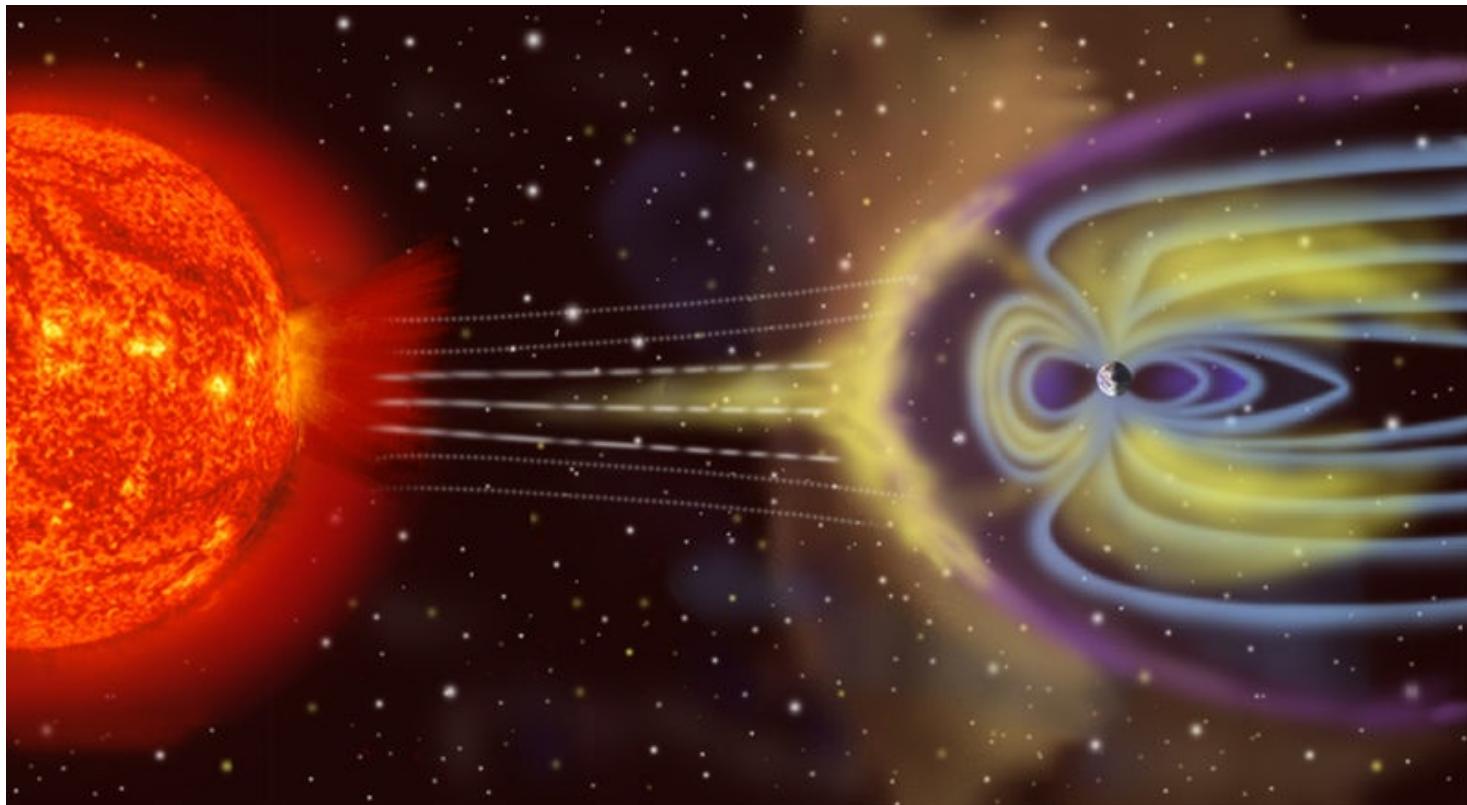


Schematische Darstellung der Plattentektonik und Mantelkonvektion



Magnetosphäre der Erde

- Konvektionsströme im flüssigen äusseren Kern
- => Schutzschild vor Sonne und Weltraumstrahlung



Welt des Magmas

- Magmen sind sehr vielfältig in ihrer chemischen Zusammensetzung und ihren physikalischen Eigenschaften.



Halemaumau Krater, Hawaii

Magma ist ...

- “Natürlich vorkommendes mobiles und flüssiges Gesteinsmaterial aus dem Erdinnern, das beim Erkalten zu Gestein wird. Es kann suspendierte Feststoffe (wie Kristalle und Gesteinsbruchstücke) und/oder Gasphasen enthalten”
- “Glossar der Geologie”, 3. Ausgabe

“Gr. μάγμα, mágma; dt. „geknetete Masse“

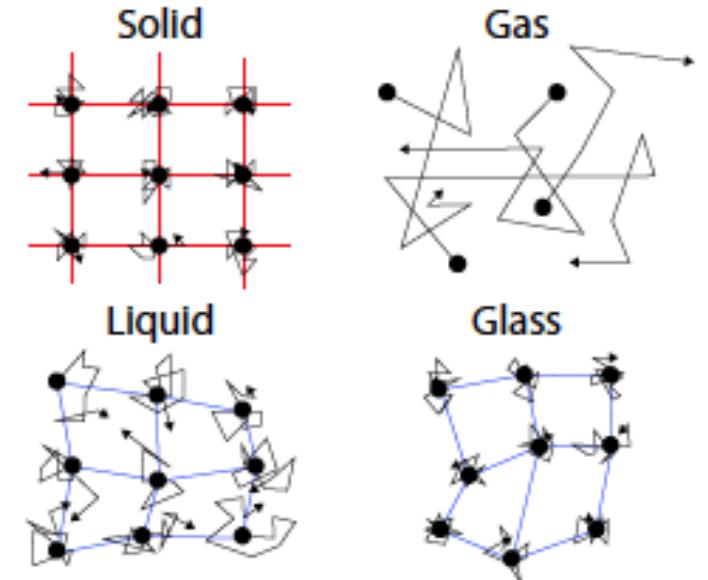
Magma

- **Mehrkomponentensystem und heterogen**
- **Mehrkomponentensystem:**
 - ca. 8-10 Hauptelemente (>1%) in der Regel als Oxide [SiO_2 , Al_2O_3 , FeO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , TiO_2]
 - Nebenelemente [P, Mn, ...] (0.1-1%)
 - Vielzahl von Spurenelementen (<0.1%)
- **Heterogen (multiphasig):** Magma enthält Material in mehr als einem Zustand: flüssig + suspendierte Kristalle (Phänokrysten und/oder Xenokrysten) + Gas (in der Regel überwiegend H_2O , aber auch CO_2 und SO_2)

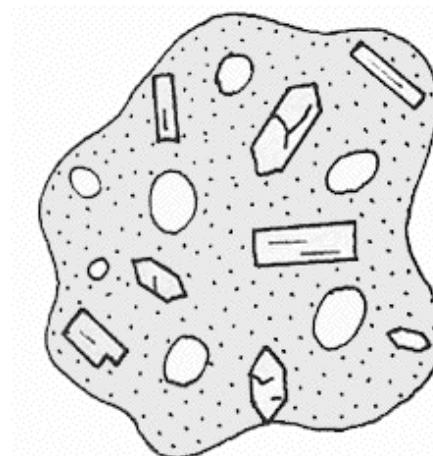


Magma

- Kristall
 - Gesteinsbildende Minerale
- Schmelze
 - Meistens auf Silikatbasis
- Gas
 - H_2O , CO_2 , SO_2 , H_2S , HCl , HF , ...
 - *Gelöst in der Schmelze vs. entgast*



heterogenes
Mehrkomponentensystem



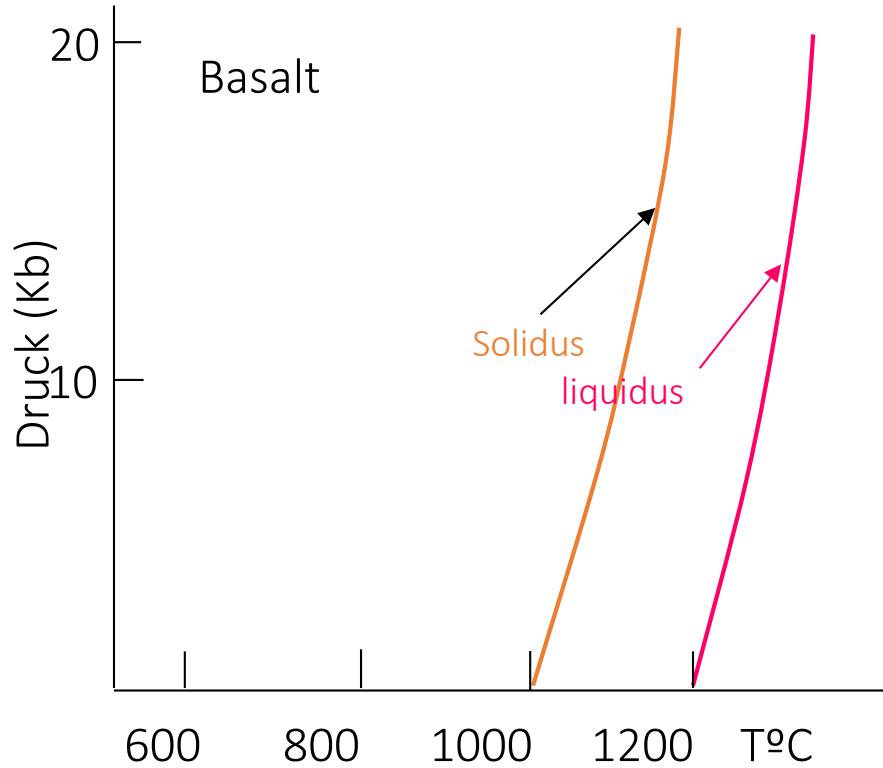
Four-phase system
Melt plus bubbles
of volatile fluid and
crystals of olivine
and plagioclase

Die physikalischen Haupteigenschaften von Magmen

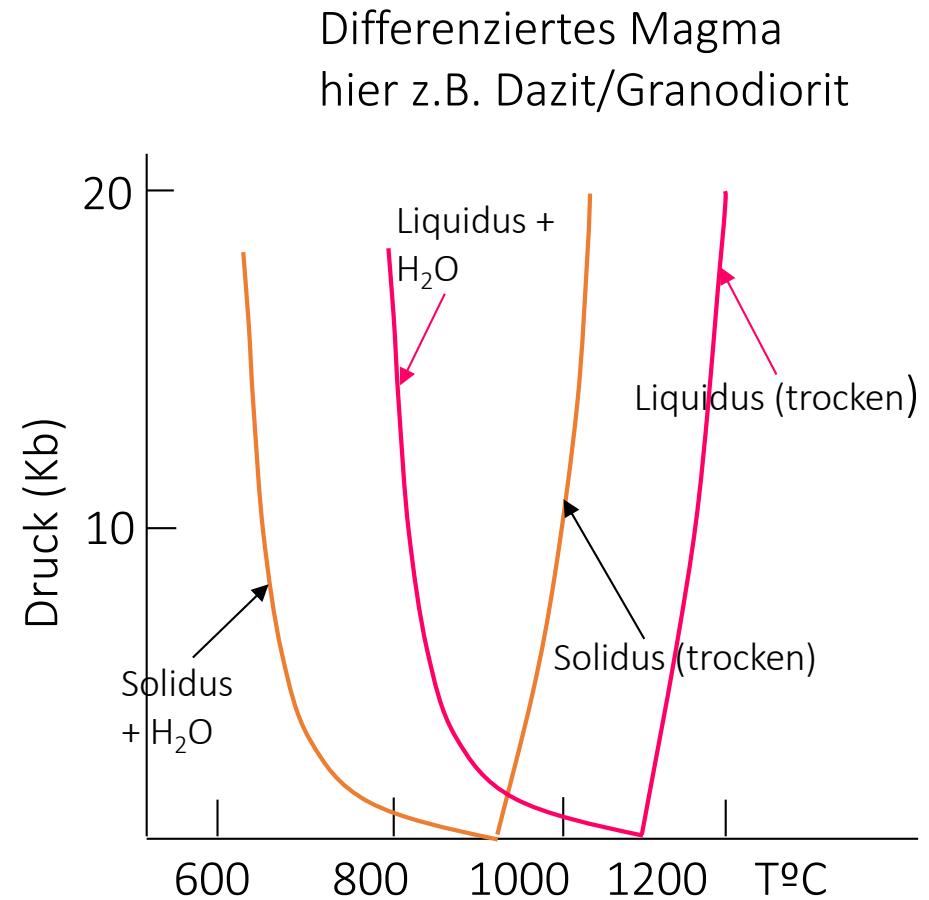
1. Dichte
2. Viskosität

Diese kontrollieren Strömungsgeschwindigkeiten, Kühlraten, Ausbruchraten, usw...

Temperatur von Magmen



$T_L - T_S$ = Kristallisations- und Schmelzintervall beträgt ca. 200 °C für Basalt.
Gradient dT/dP = ca. 5 °C/kbar

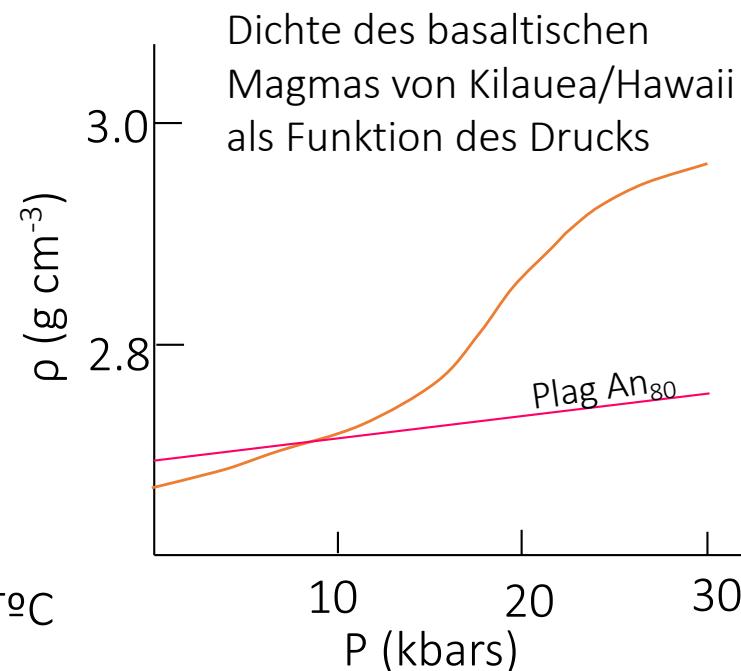
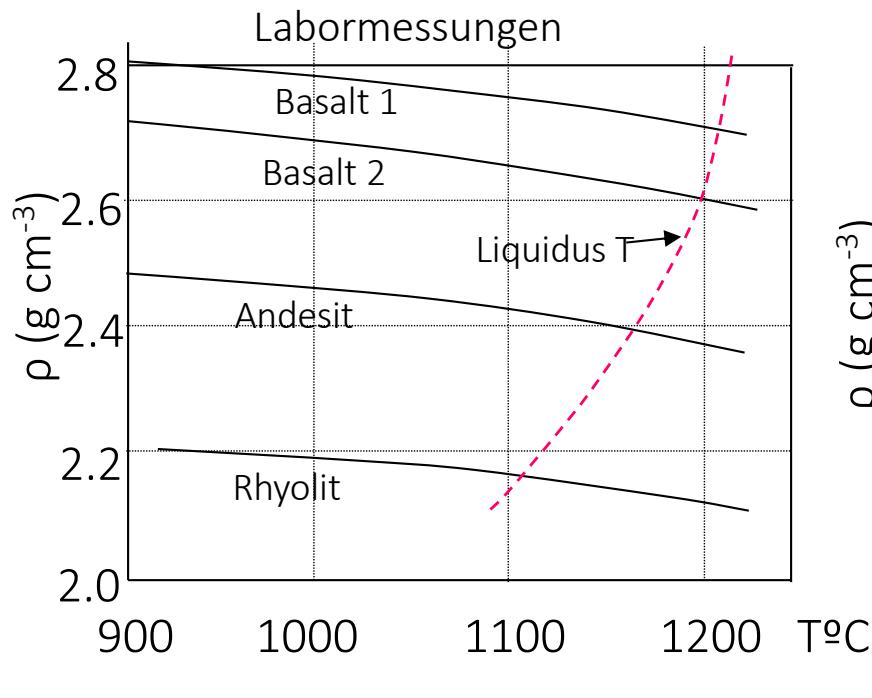


Solidus ist abhängig vom Wassergehalt im Magma. Bei H₂O-Sättigung kann die Solidus-Temp. bis zu 650 °C betragen.

1. Dichte; $\rho = M / V$ (g cm⁻³)

Dichte hängt ab von

- Chemischer Zusammensetzung (am stärksten mit FeO-Gehalt korreliert),
- Temperatur
- Druck



2. Viskosität (Pa s, oder Poise)

- Die physikalische Eigenschaft, die am stärksten das Ausbruchsverhalten von Magmen beeinflusst
- Viskosität hängt ab von
 - Chemischer Zusammensetzung (am stärksten mit SiO_2 -Gehalt und H_2O -Gehalt korreliert),
 - Temperatur
 - Druck
 - Kristallinitätsindex/Kristallgehalt

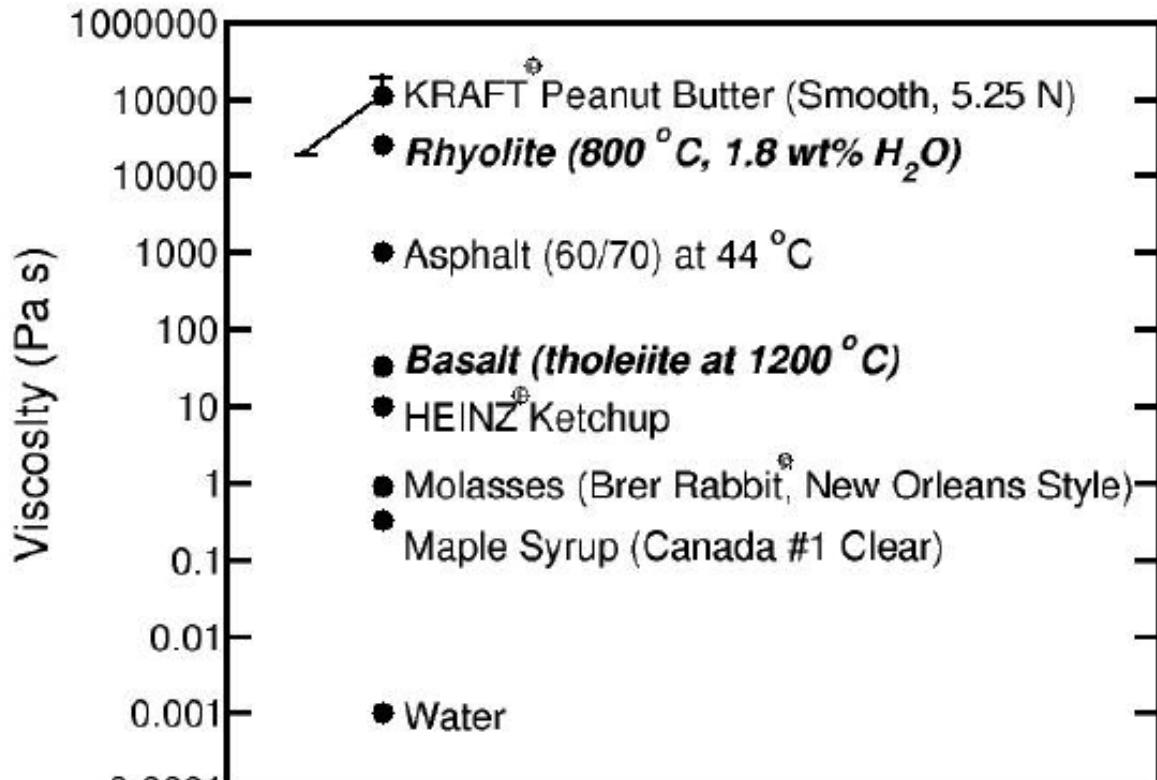
Definition Viskosität

- Die Viskosität ist ein Mass für die Zähflüssigkeit einer Substanz, z.B. eines Magmas.
- Je grösser die Viskosität, desto dickflüssiger ist die Substanz.



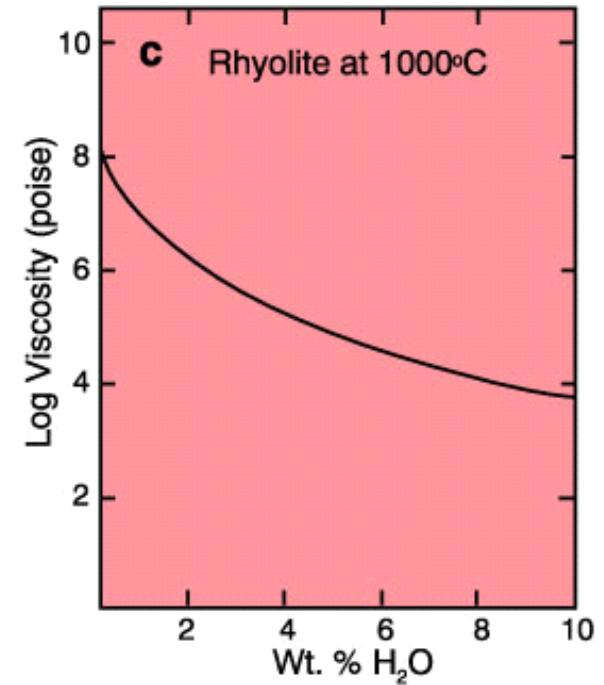
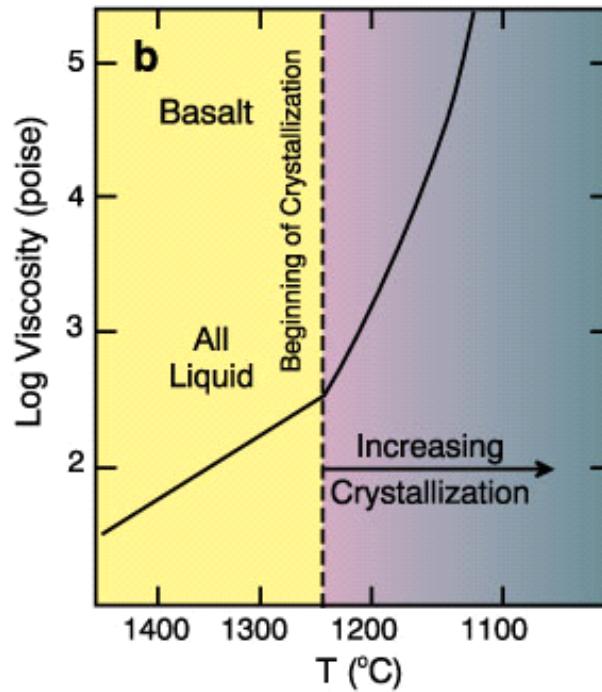
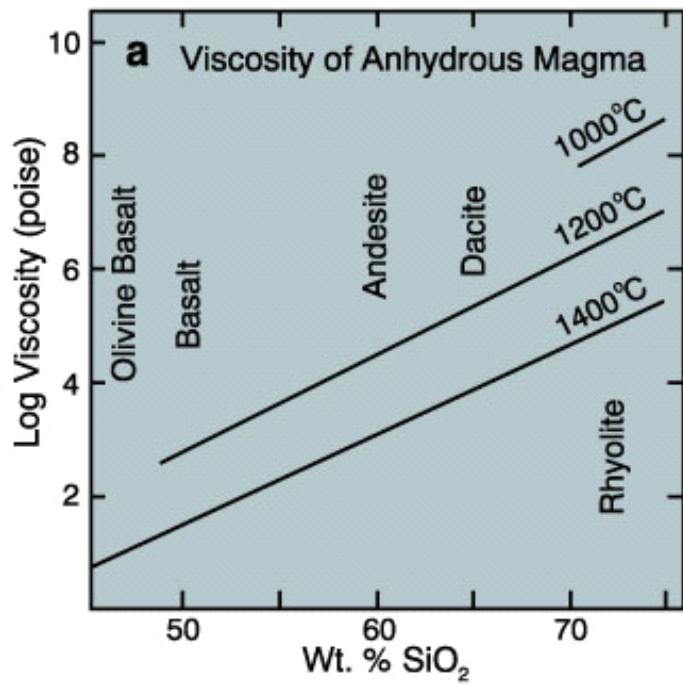
Einheiten: Pa s oder Poise,
10 Poise = 1 Pa s

Viskositäten im Vergleich



Baker et al., 2004

Figure 3. Viscosities of selected foods at 25 °C (from this study), water at 25 °C (Bauer et al., 1995) and asphalt at 44 °C (Shaw et al., 1968) compared with those of an anhydrous basaltic melt at 1200 °C (Shaw, 1969) and a rhyolitic composition melt with 1.8 wt % dissolved water at 800 °C, 1.0 GPa (Baker, 1996). Measurement uncertainties are smaller than the symbols except for peanut butter viscosity, whose lower error is displaced for clarity. The silicate melts span the range of commonly expected viscosities for terrestrial silicate melts (Basaltic Volcanism Study Project, 1981; Hess, 1989).



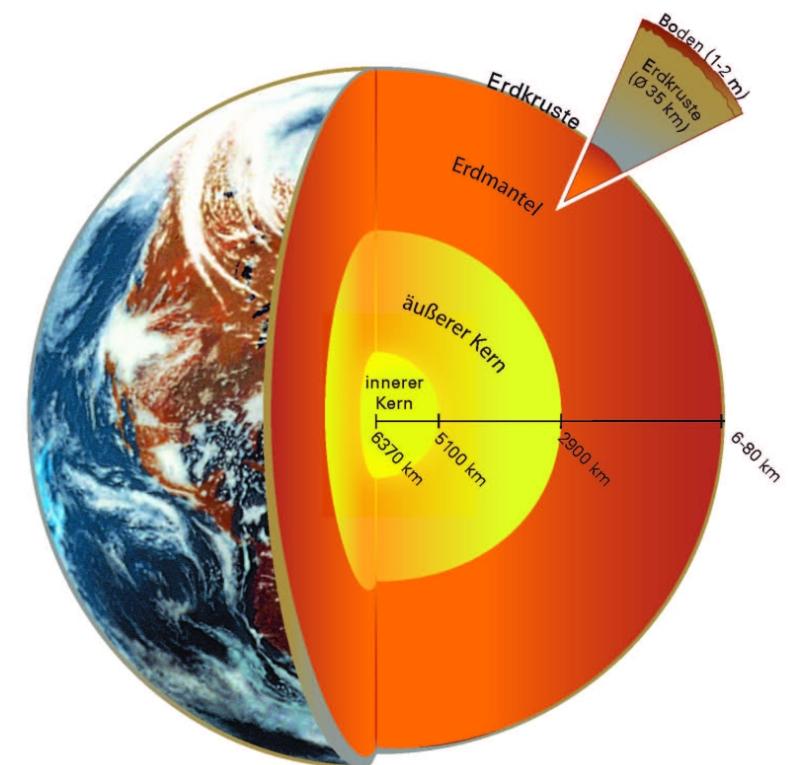
- Berechnete Viskositäten von wasserfreien Silikatschmelzen bei einem Druck von 1 Atmosphäre, berechnet nach der Methode von Bottinga und Weill (1972)
- Variation in der Viskosität von Basalt in Abhängigkeit der Kristallisation (nach Murase und Mc Birney, 1973)
- Veränderung in der Viskosität von Rhyolit bei 1000 °C in Abhängigkeit mit dem H_2O -Gehalt (nach Shaw, 1965).

Die Entstehung von Magma

Was ist primäres Magma?

- Innerstes, tiefstes, heißestes, am wenigsten differenziertestes,...

➤ Basalt



Wie entsteht Basalt?

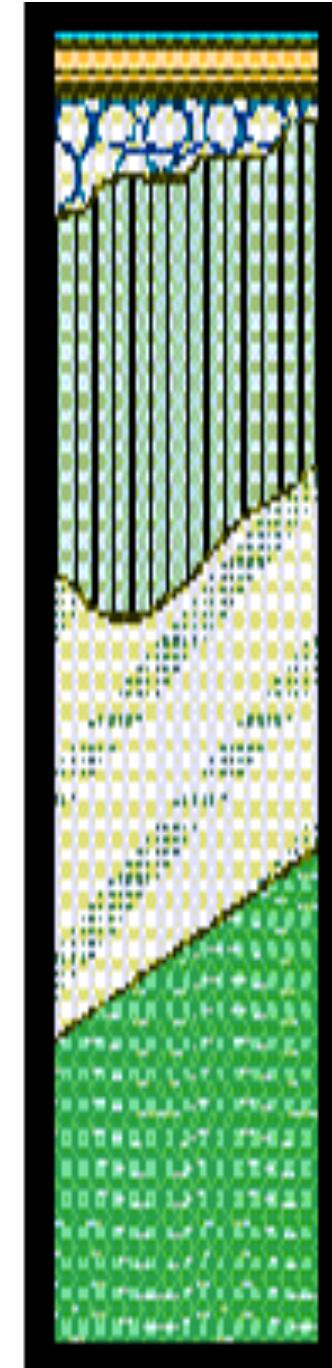
- Partielles Schmelzen im oberen Erdmantel
- *Der Anteil des Gesteins, der in geschmolzenem Zustand vorliegt, wird als **partielle Schmelze** bezeichnet*

Quellen von Mantelmaterial

- **Mantelxenolithe** und Knollen in Basalten, und Kimberlite (*häufig Diamant-führendes, ultramafisches Gestein aus dem Erdmantel, das in sehr tiefreichenden vulkanischen Schloten („Pipes“) an die Oberfläche gelangt*)
- **Ophiolithe**: Fragmente ozeanischer Kruste und des oberen Erdmantels, die bei Kontinent-Ozean-Kollision auf die Kontinente geschoben („obduziert“) werden
- **Dredgeproben** aus ozeanischen Bruchzonen

Ophiolith-Sequenz

- Ophiolith-Abfolgen (Sequenzen) können vollständig erhalten sein. Sie bestehen dann aus Ultramafitit resp. Serpentin, Gabbros, Pillow lava und einer Bedeckung aus pelagischen kalkigen und kieseligen Sedimenten (pelagic limestone and chert)
- (Ophis >> Schlange (grün) >> Serpentingrün)



Ophiolite Sequence

Subduktionszonen als Magmaproduzenten

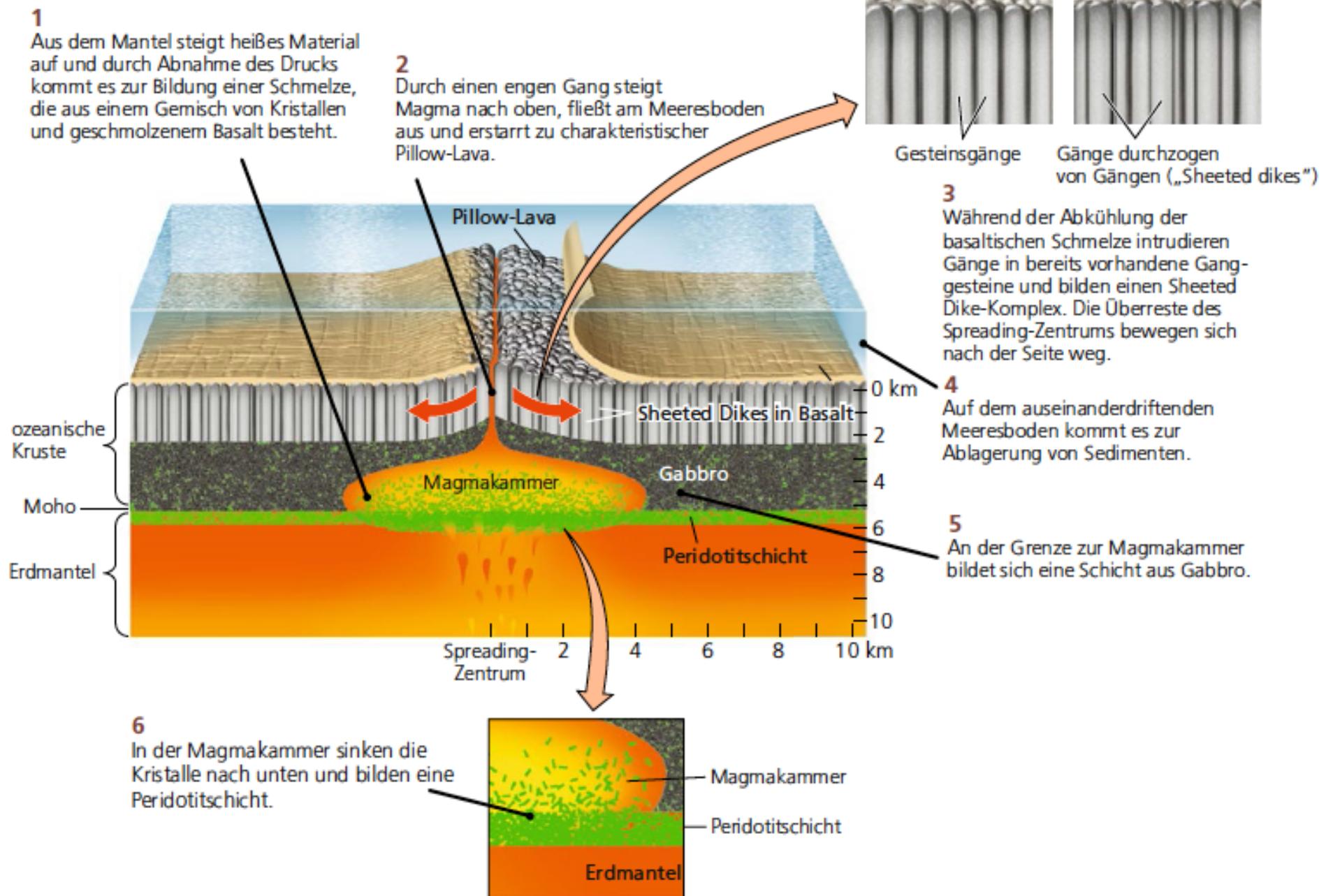
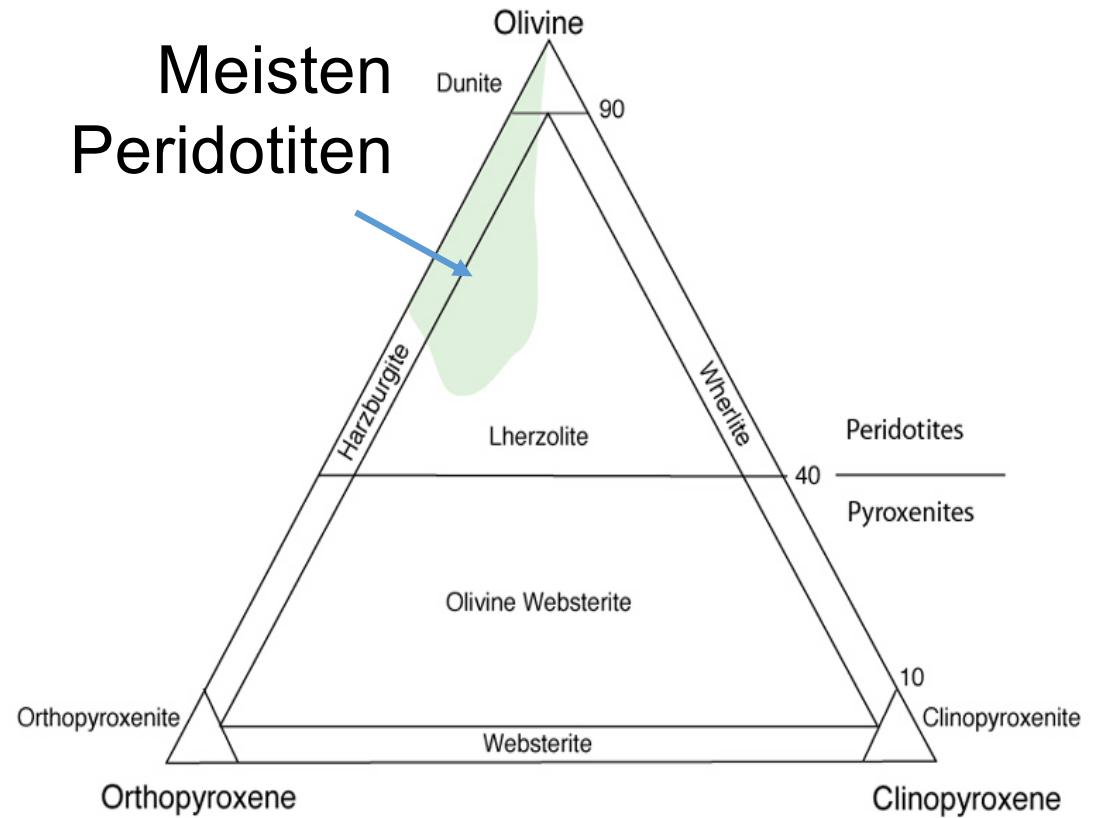


Abb. 4.15 Druckentlastung führt im Bereich der Spreading-Zentren zur Schmelzbildung und damit zur Entstehung eines magmatischen Geosystems

Wie funktioniert Mantel schmelzen?



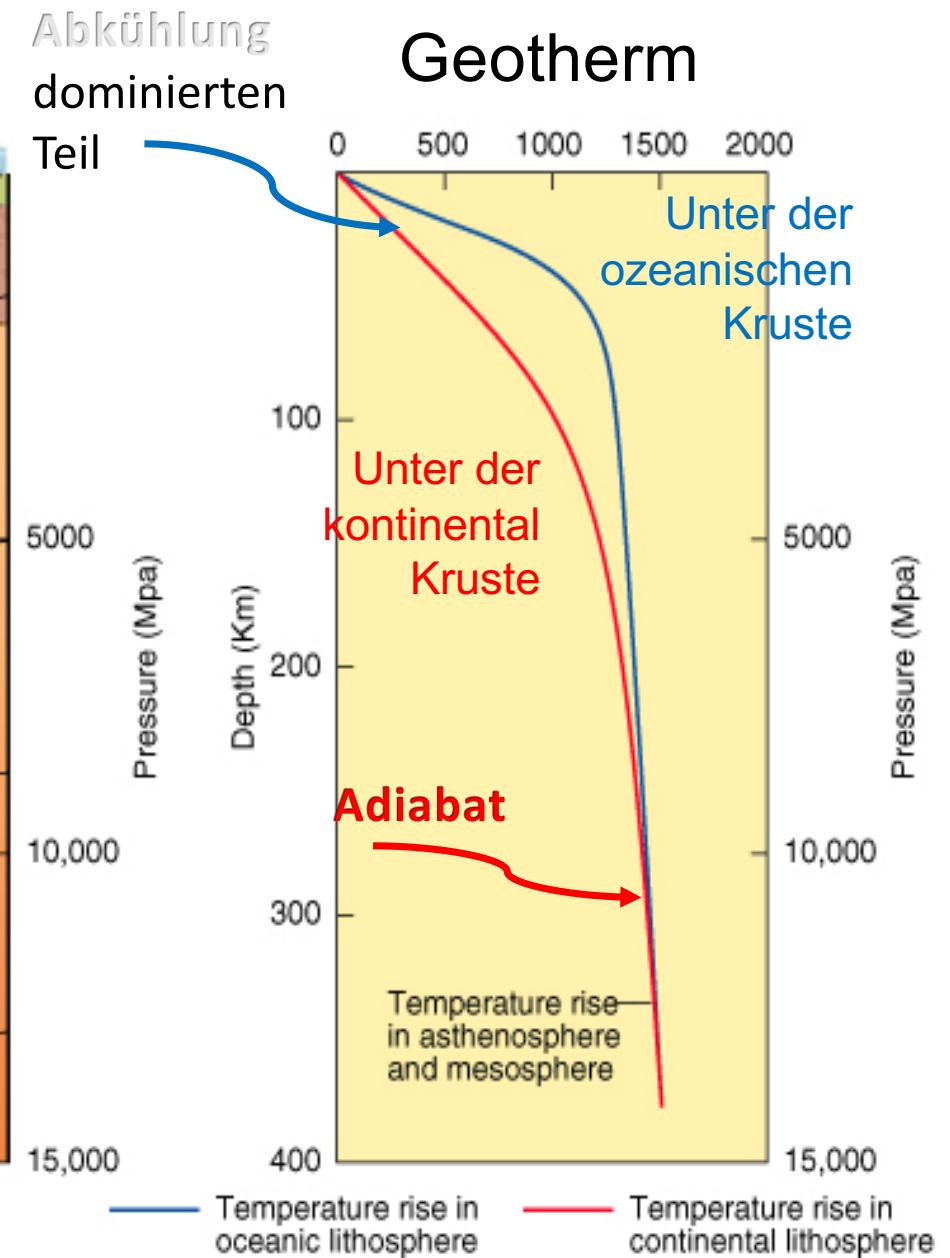
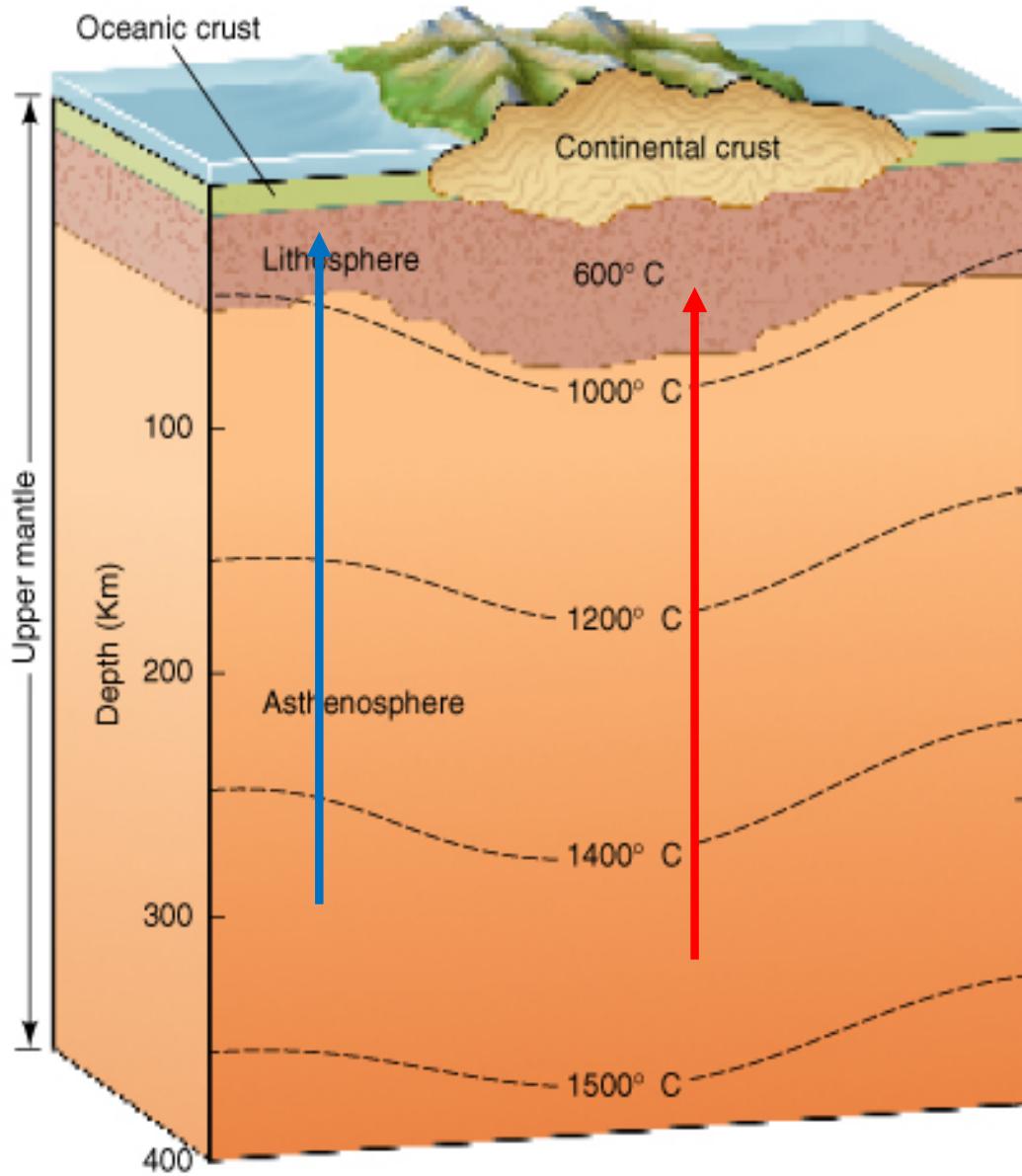
Meisten
Peridotiten



Peridotit Xenolite in Basalten
Stücke des Erdmantels, die die
Oberfläche der Erde erreicht
haben



- Die Temperatur der Erde steigt mit zunehmender Tiefe.



Wärmequellen in der Erde

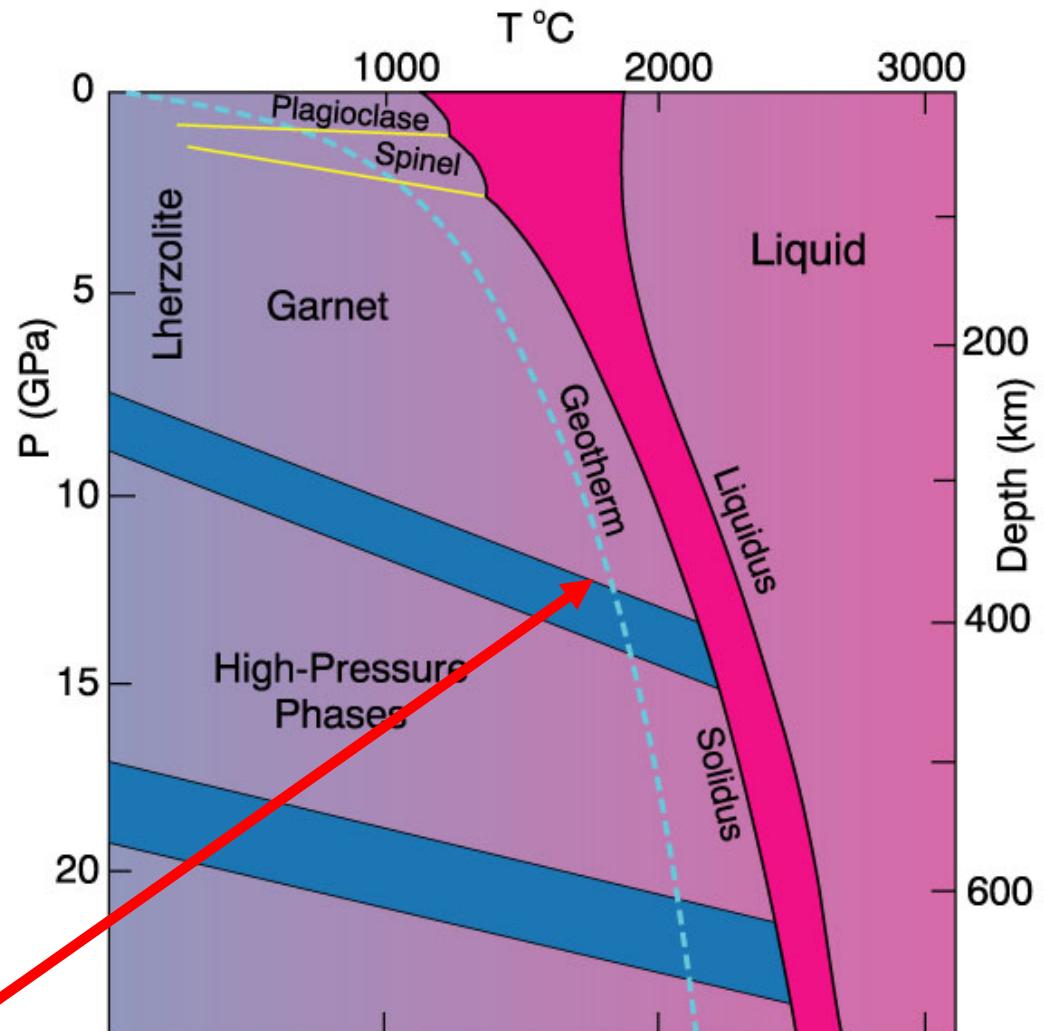
1. Wärme aus der frühen Akkretion und Differenzierung der Erde erreicht noch immer langsam die Oberfläche.
2. Wärme wird durch den radioaktiven Zerfall von instabilen Nukliden freigegeben (Heutzutage mehr wichtig für die Erdkruste).

Phasendiagramm für 4-Phasen-Lherzolith (OPX-CPX-Oli + Al):

Al-Phase =

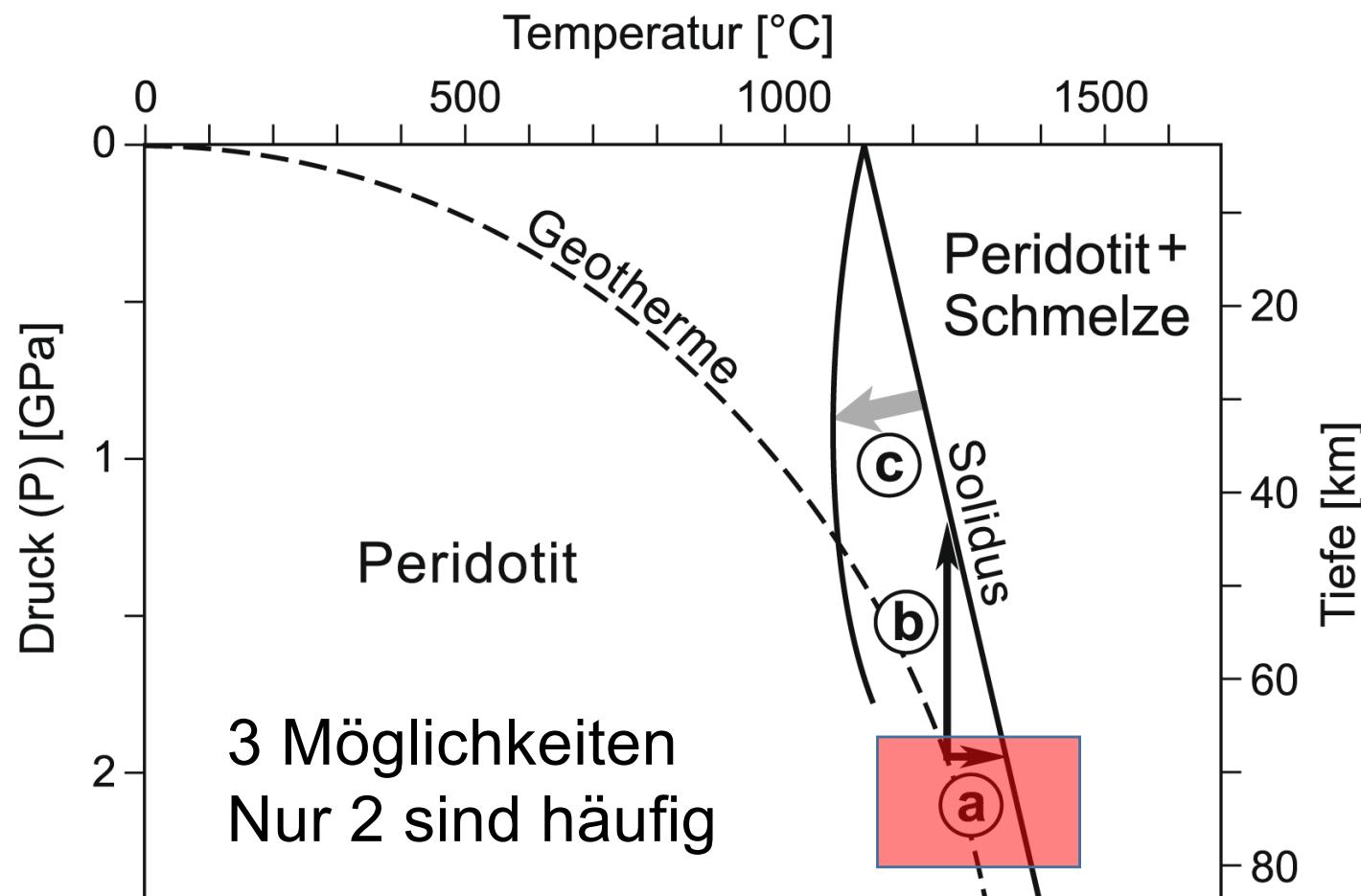
- Plagioklas
 - ◆ < 50 km
- Spinell (MgAl_2O_4)
 - ◆ 50-80 km
- Granat
 - ◆ 80-400 km

der Mantel wird nicht bei
normalem Geotherm
schmelzen!



Aus diesem Grund ist derzeit so wenig vom Erdmantel
geschmolzen (<< 1%)

Schmelzen – Überschreiten des Solidus



Drei Möglichkeiten, Mantel zu schmelzen und Magmen zu bilden

(a). **Wärmezufuhr:** Wenn heiße Gesteine mit kalten Gesteinen in Kontakt kommen, können diese aufgeschmolzen werden. Dieser Mechanismus ist eher von **geringer Bedeutung** im Erdmantel.

(b). **Druckentlastung:** Der Schmelzpunkt der meisten Gesteine erhöht sich mit steigendem Druck (im Gegensatz zu wasserreichen Bedingungen). Deshalb bleibt das Erdinnere trotz höheren Temperaturen fest. Wenn warme Mantelpartien durch Auftrieb/Konvektion in höhere Lagen gelangen, können sie infolge der Druckabnahme schmelzen.

(c). **Wasserzufuhr:** Durch Wasseraufnahme erniedrigen sich die Schmelztemperaturen der Mantelgesteine (vergleichbar mit Salzzugabe zu Eis).

Bildung des partiellen Mantelschmelzen and Plattenektonik

- 1. Druckentlastung = Adiabatischer Aufstieg des Mantels
 - Divergente Plattengrenzen => Grossräumiges Upwelling des Mantels (Konvektionszellen)
 - Hotspots => Lokale Mantelplumes
- 2. Wasserzufuhr (Herabsenken des Solidus)
 - Subduktionszonen

Basalte sind in alle tektonische Umgebungen

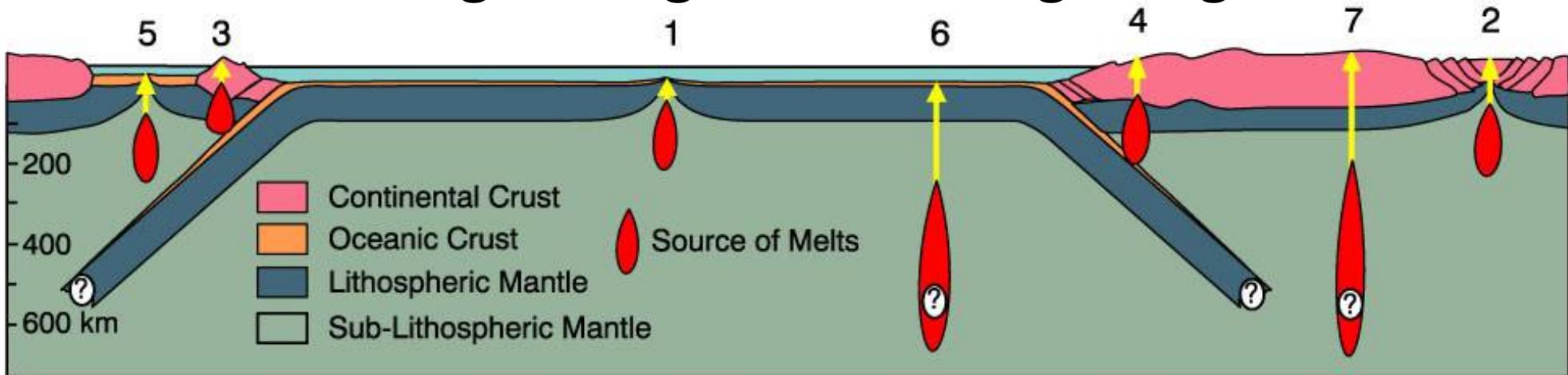
- ✓ MittelOzeanischer Rücken-Basalte (MORBs)
- ✓ Ozean Insel-Basalte (OIBs)
- ✓ Subduktionszonen-Basalte (SZBs)

Wie entstehen verschiedenen Arten von Basalt?

- Subduktions-/Inselbogen-Basalt => Wasserzufuhr
 - Hohe Wasser-Gehalte und Sauerstofffugazitäten (f_{O_2}) von der Entwässerung der subduzierten Platte
 - Frühe Kristallisation von Oxiden (daher geringe Konzentrationen an Fe, Ti, Nb und Ta im restlichen Magma)
 - Kalkalkalisch
- OIB und MORB => Druckentlastung
 - Schmelzen in *geringer Tiefe* des «chemisch verarmten» Mantels (zuvor aufgeschmolzen)
 - MORB (tholeiitische Basalte)
 - *Tiefes* Schmelzen einer weniger verarmten bis angereicherten („fertilen“) Mantelquelle
 - OIB (überwiegend tholeiitische aber auch alkalische Basalte)

Schematischer Querschnitt durch den oberen Teil der Erde

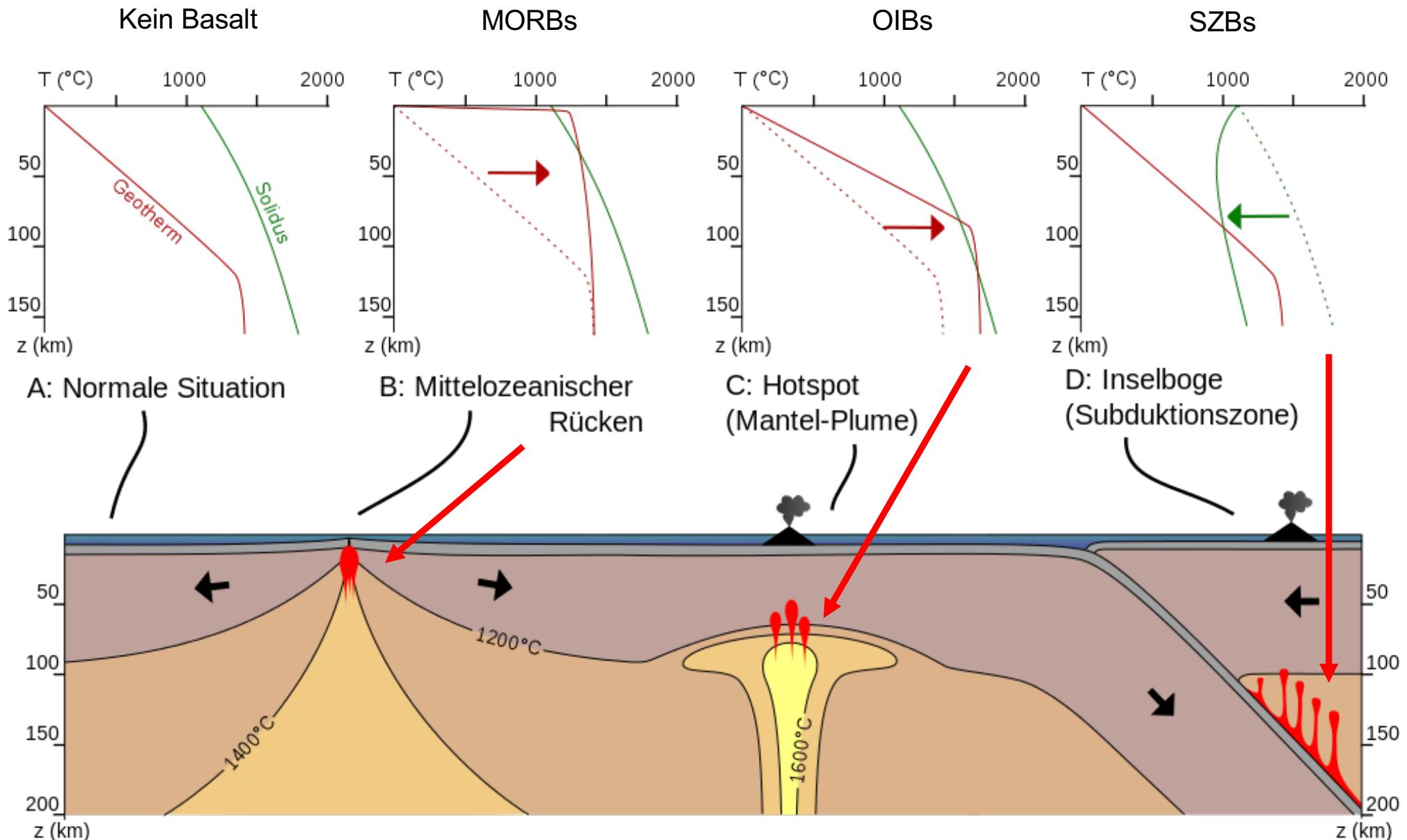
Wichtigste magmatische Umgebungen



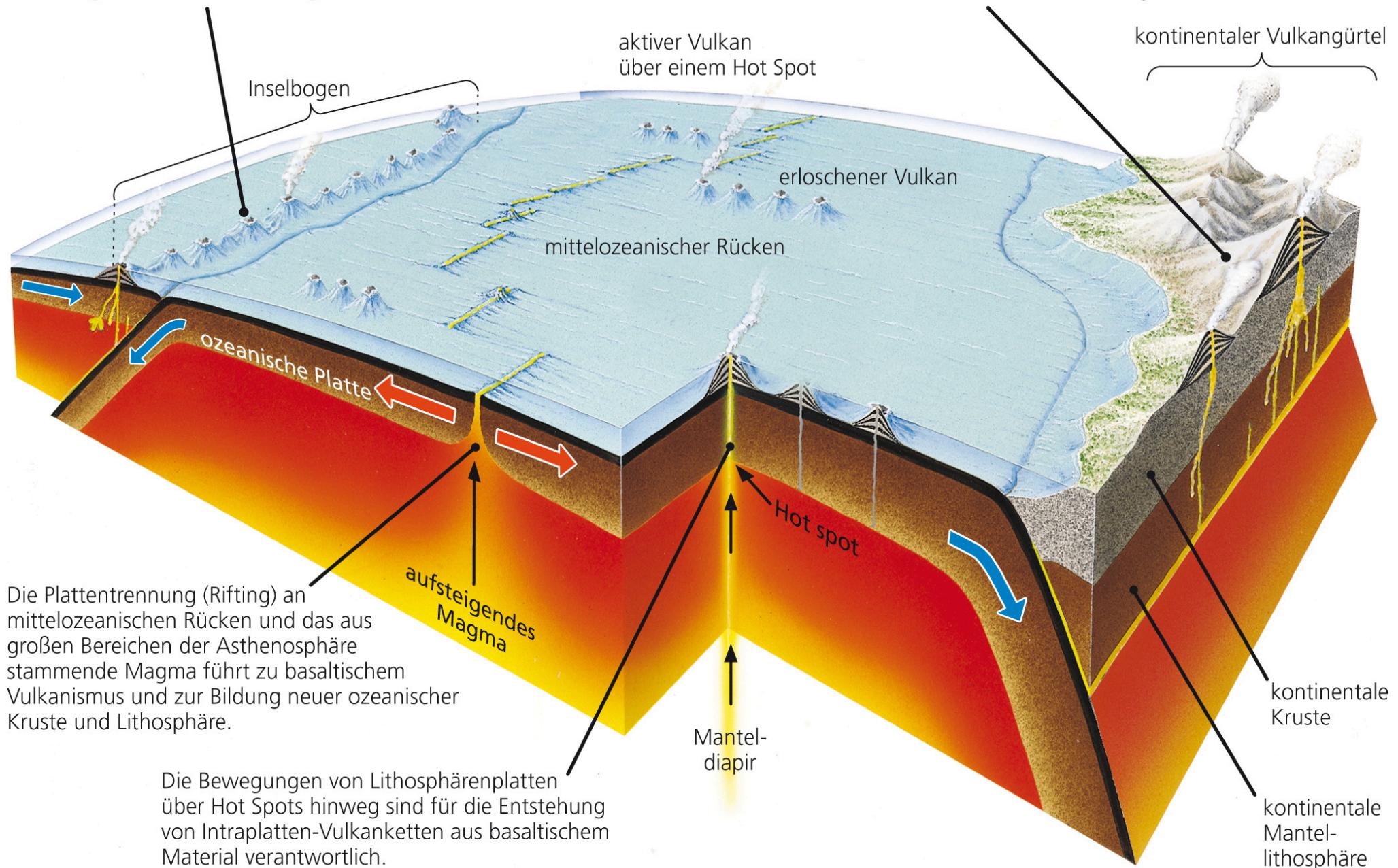
1. Mittelozeanischer Rücken: Mantelansteig, e.g. Juan de Fuca Ridge, East Pacific Rise, Mid-Atlantic ridge
2. Rift System, Mantelansteig. e.g. East African rift, Rio Grande Rift
3. Ozean Inseln: Mantelansteig von Plume/Hotspots e.g., Hawaii, Canaries,
4. Kontinental Hotspot, Mantelansteig von Plume/Hotspots, e.g., Yellowstone
5. Vulkanbögen (Insel): Wasserzufuhr, über ozeanische Kruste, e.g., Marianas
6. Vulkanbögen (Kontinental): Wasserzufuhr, über kontinentale Kruste, e.g., Anden
7. Backarc Becken: Mantelansteig, e.g., Korea

Welt der Basalte

Alkali Basalte; Geringer Schmelzgrad in alle tektonische Umgebungen

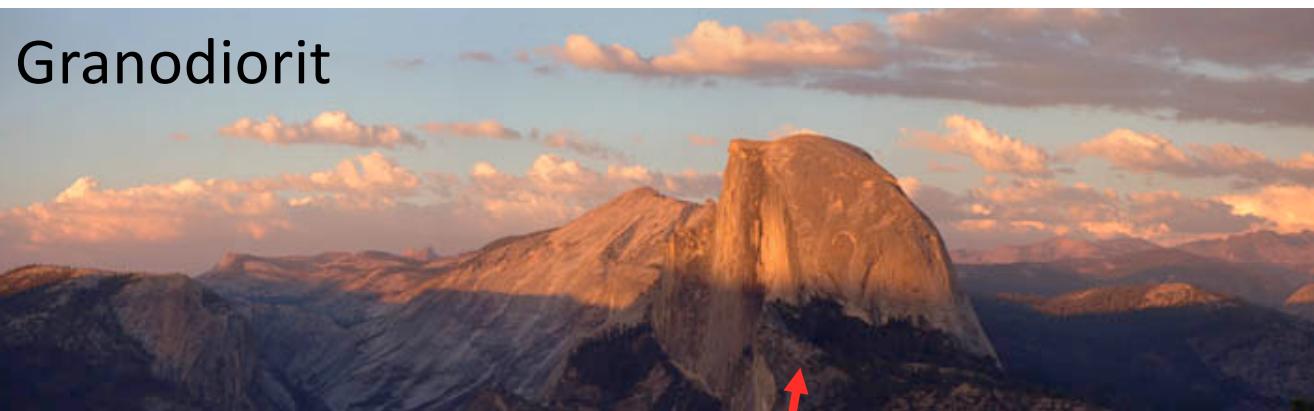


Konvergieren zwei ozeanische Platten, so führen die durch partielle Schmelzen entstehenden Magmen zu vulkanischen Inselbögen, an denen überwiegend basaltische Laven gefördert werden.



Magmen, die bei der Kollision von ozeanischen mit kontinentalen Platten gebildet werden, sind ein Gemisch aus Basalten des Mantels, aufgeschmolzener kontinentaler Kruste und Material, das an der Oberseite der subduzierten Platte aufgeschmolzen wird. Sie führen zu Vulkanen, in denen andesitische Laven gefördert werden.

Magmatische Differentiation und Krustenbildung



Basalt



Dazit

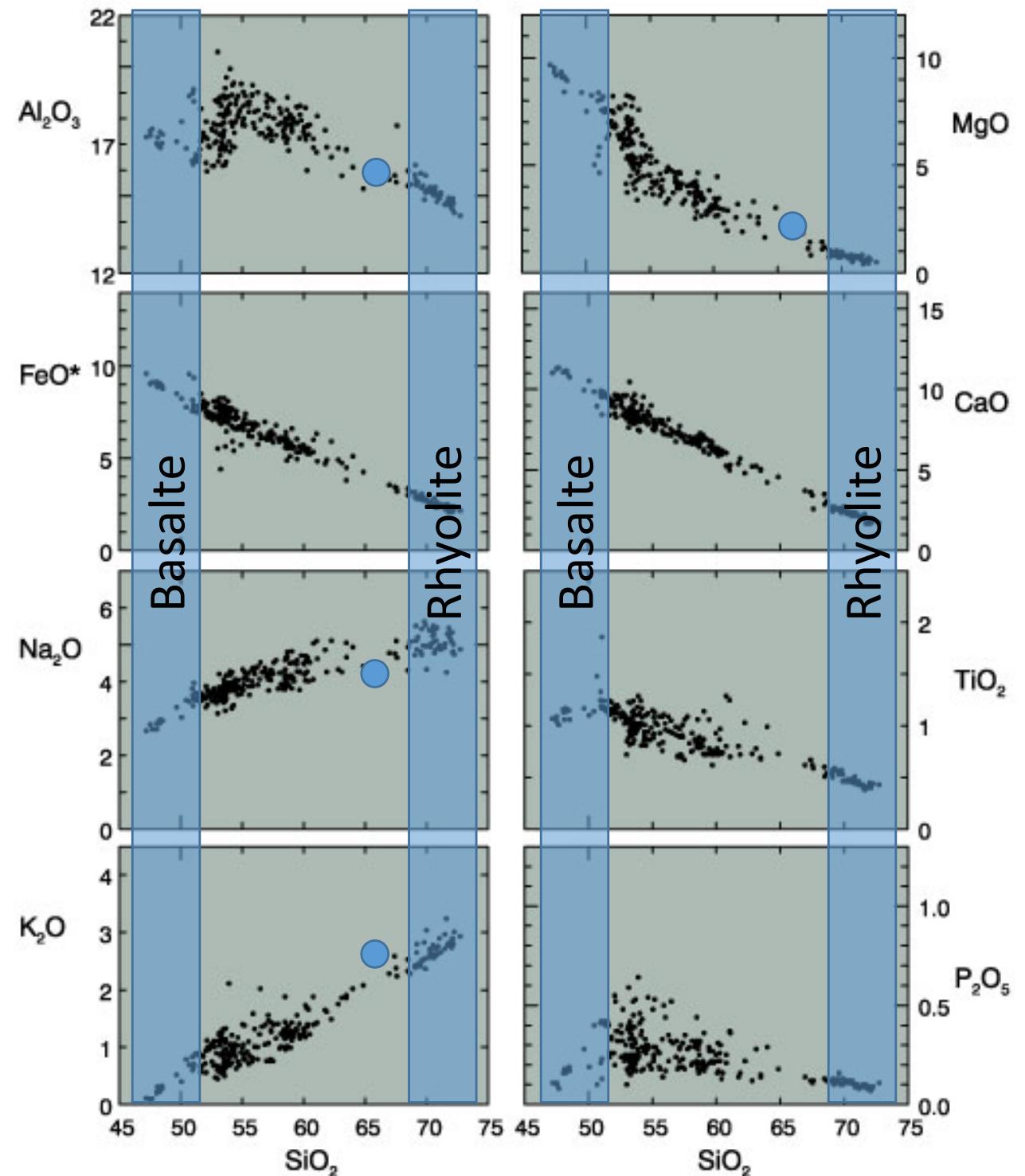


Differentiation Reihe

Durschnittliche
oberer
Kontinental-
Kruste

Gesteinsprobe

Crater Lake, OR



Ozeanische Kruste

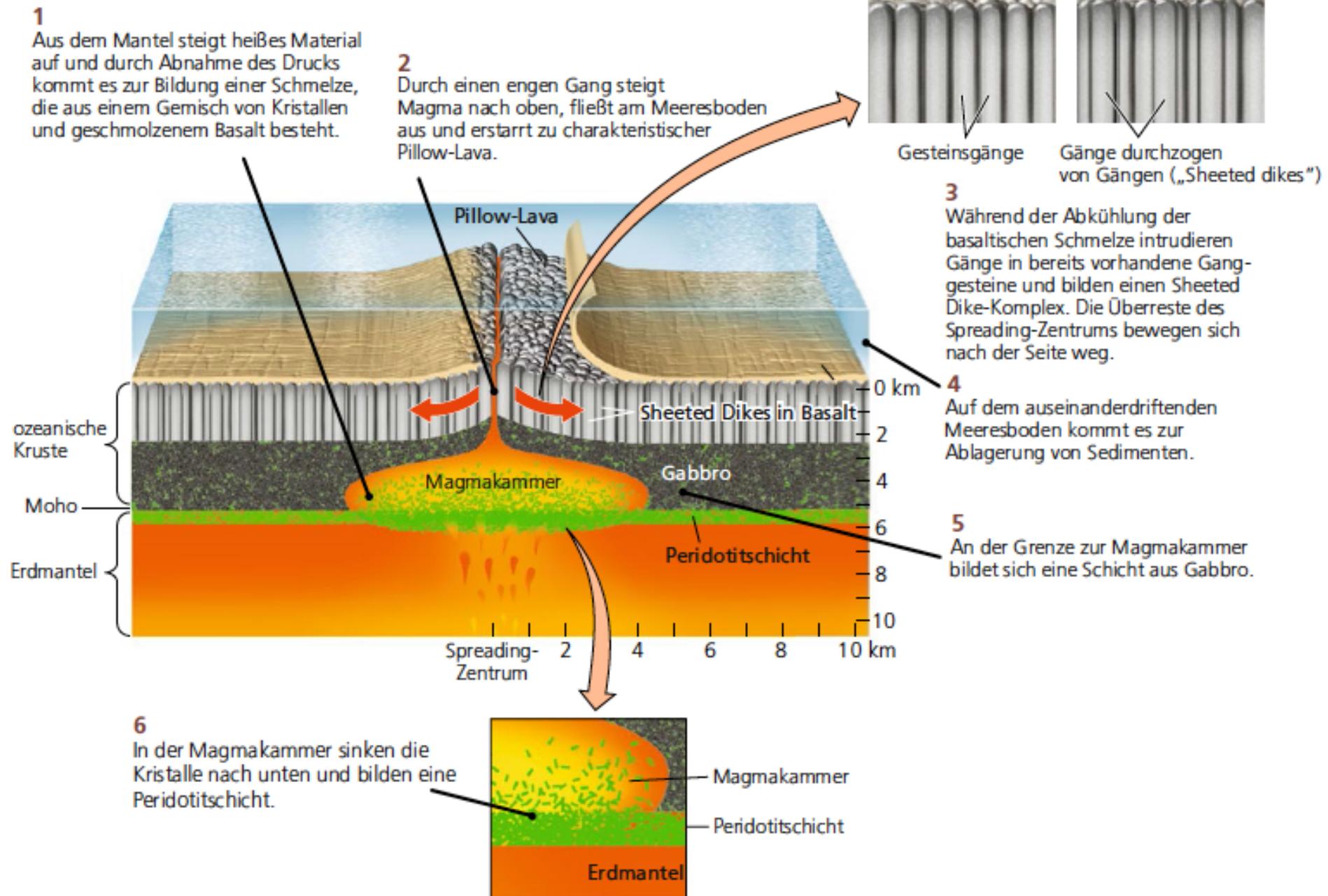
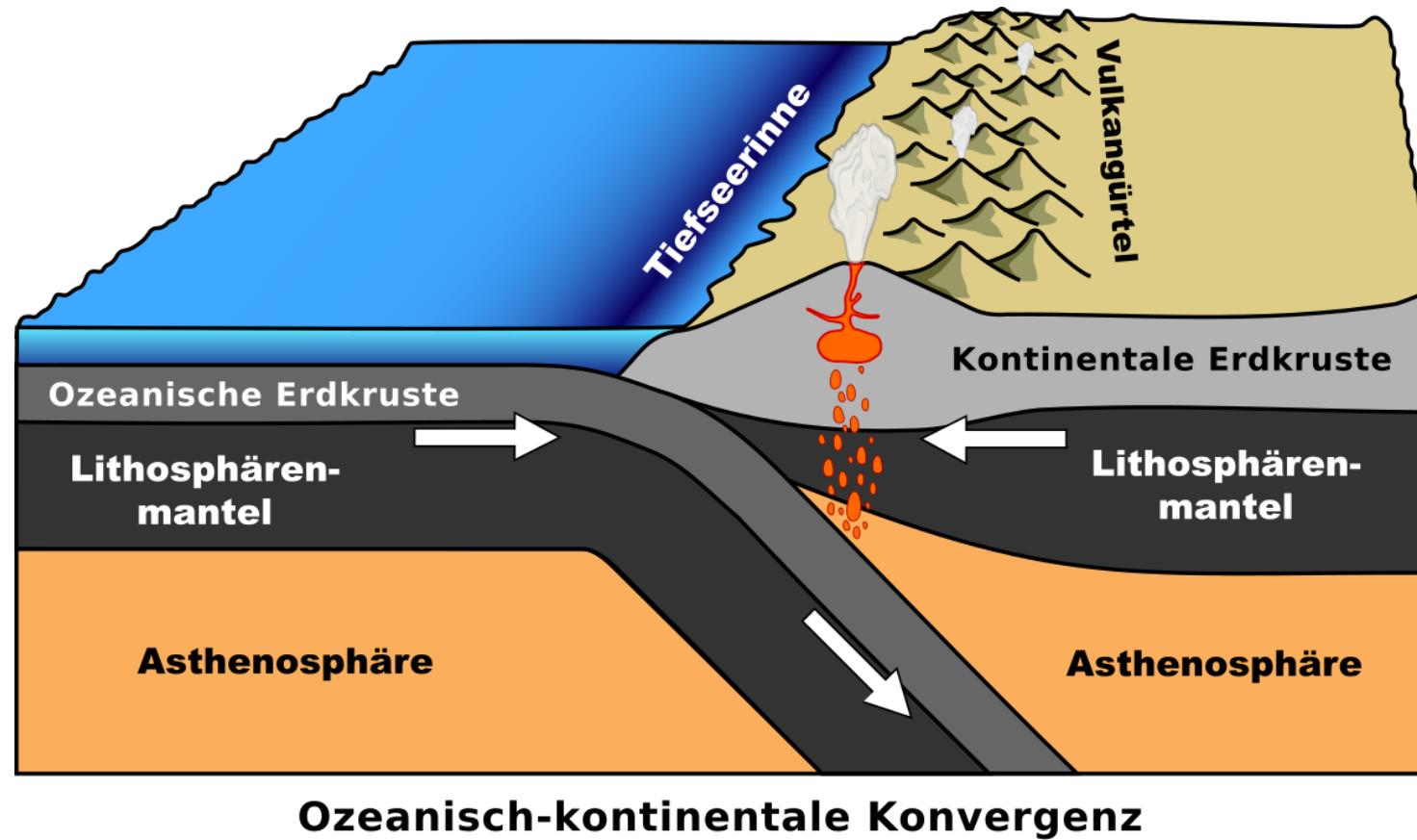


Abb. 4.15 Druckentlastung führt im Bereich der Spreading-Zentren zur Schmelzbildung und damit zur Entstehung eines magmatischen Geosystems

Kontinentalkruste



Warum gibt es so viele verschiedene magmatische Gesteine?

- **Mantelschmelzen produzieren hauptsächlich Basalte**
- Welche Prozesse sind für die Vielfalt der magmatischen Gesteine verantwortlich?
 - Entstehen Magmen unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung aus der Aufschmelzung verschiedener Gesteinsarten?
 - Oder resultiert diese Gesteinvielfalt aus einem ursprünglich einheitlichen Ausgangsmaterial?
 - Welche Prozesse spielen hierbei eine entscheidende Rolle?

Magmatische Differentiation

- Um ein Magma unterschiedlicher Zusammensetzung herzustellen muss
- 1. eine Zusammensetzungsunterschied (chemischer Unterschied) zwischen zwei oder mehreren Phasen entstehen
 - z. B. *Olivin ≠ basaltische Schmelze*
- 2. eine physikalische Trennung der Phasen auftreten
 - z. B. *Unterschied in Dichte: Minerale sinken, und Schmelze steigen auf*

Magmatische Differentiation

Destillationprozess

Krust aus dem Mantel
“herausziehen”

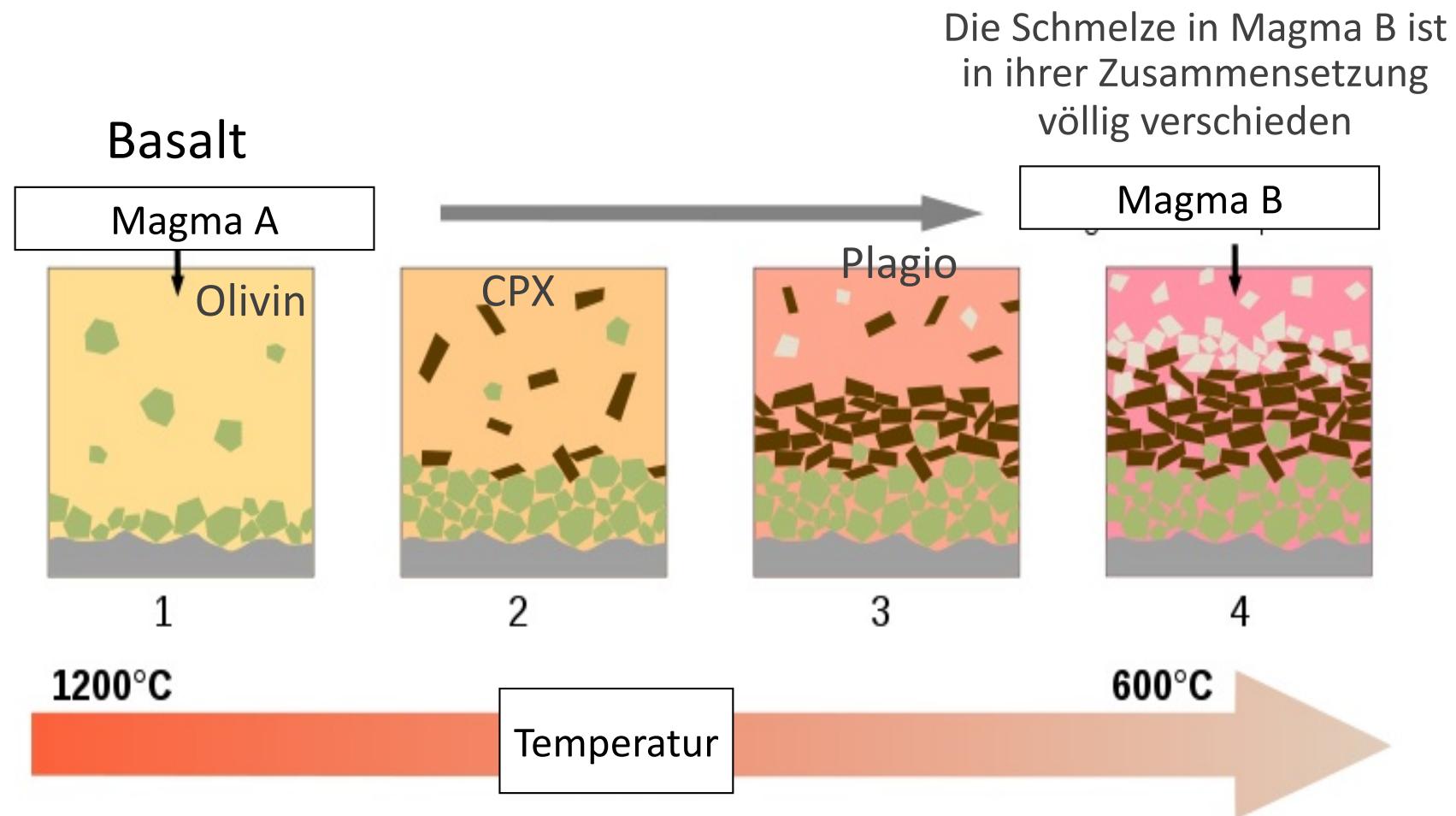


Krustendestillation

- Wichtigster Prozess:
 - Kristall-Schmelz-Trennung in Magmakammern oder partiell geschmolzenen Orten der Kruste
- Andere Prozesse spielen auch eine Rolle:
 - Entgasung (Gasaustritt)
 - Entmischung von unmischbaren Flüssigkeiten (z. B. Karbonatite – Silikate)

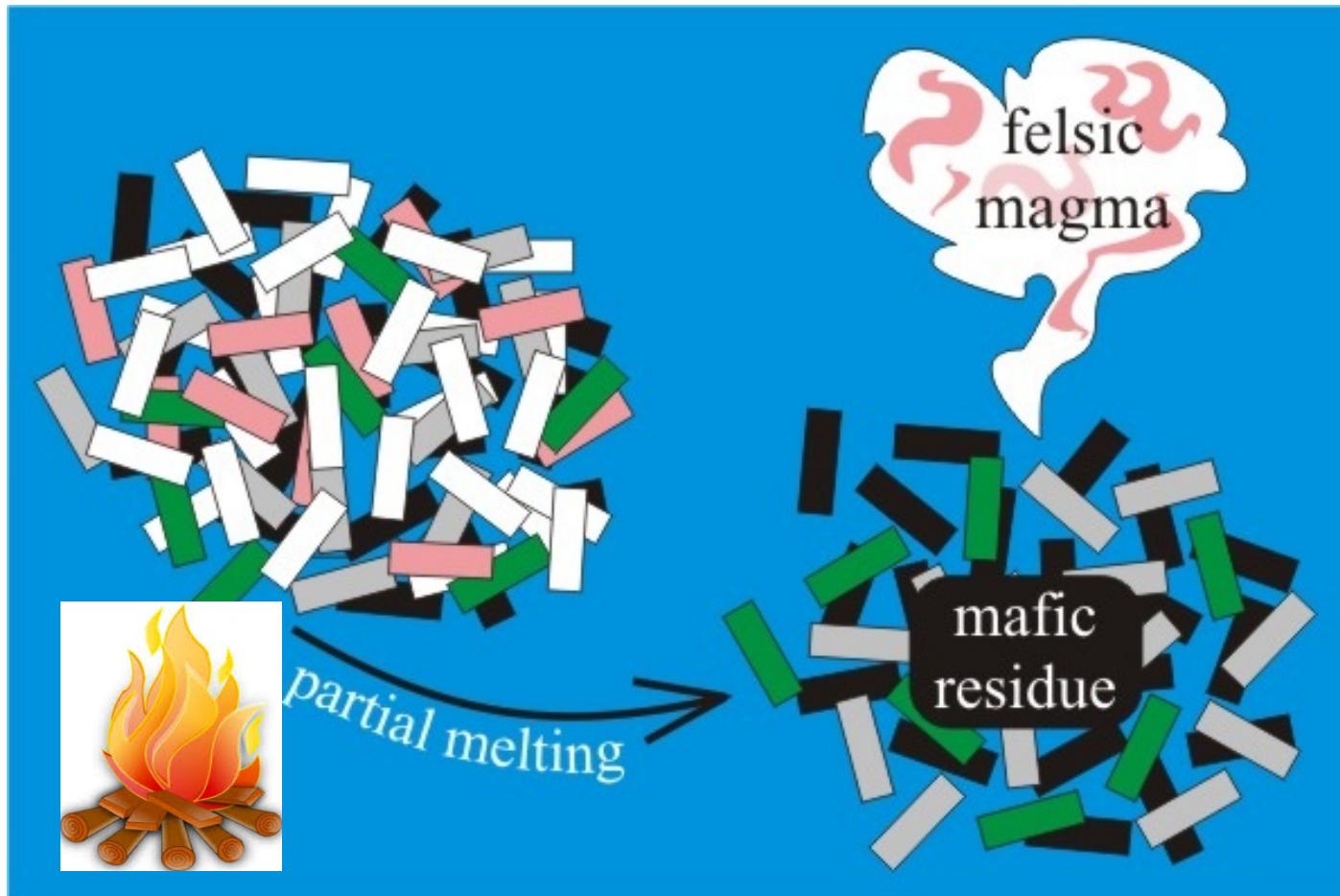
Kristallisation oder Schmelzen?

- Temperatur nimmt ab = fraktionierte Kristallisation



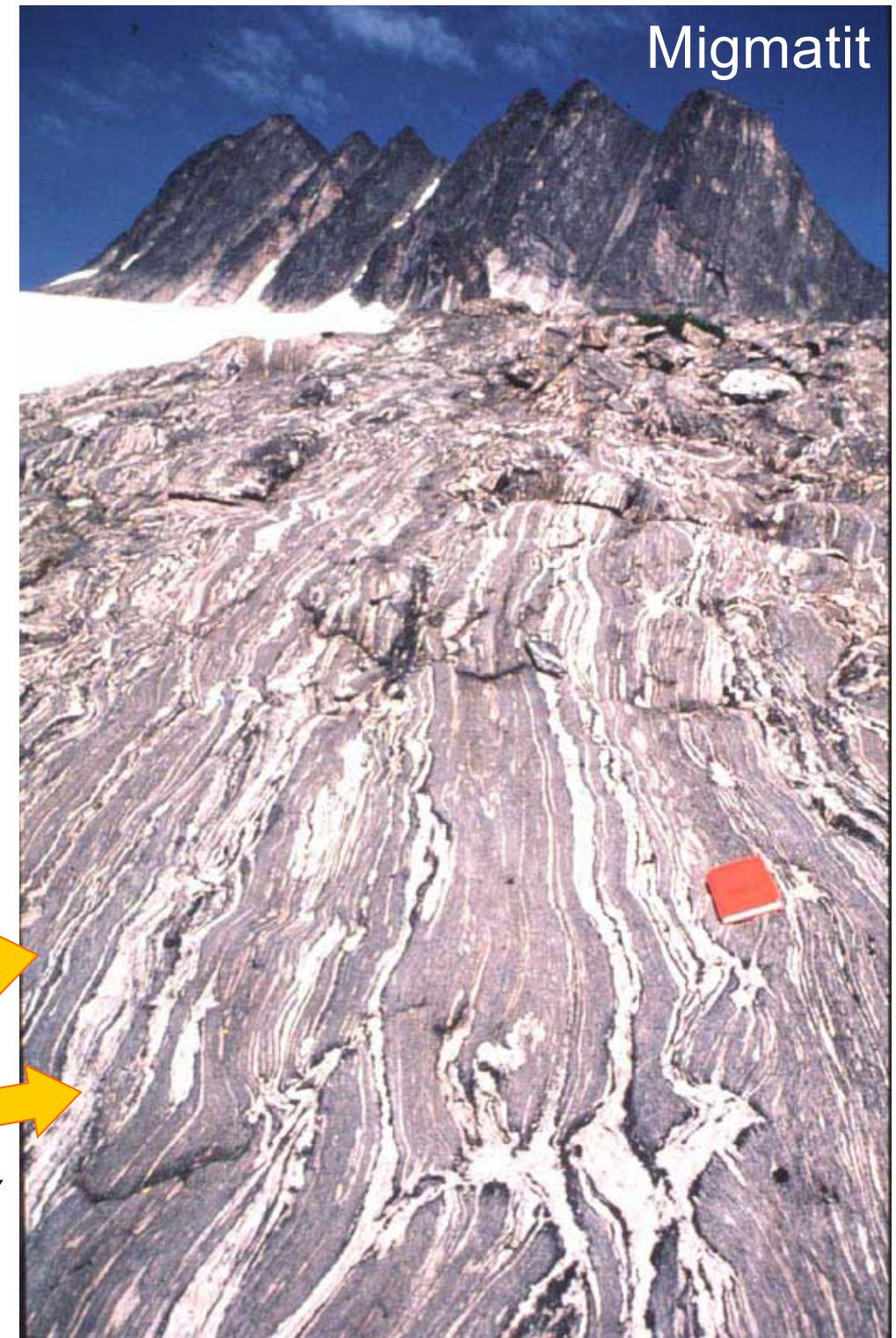
Kristallisation oder Schmelzen?

- Temperatur nimmt zu = Partielles Schmelzen

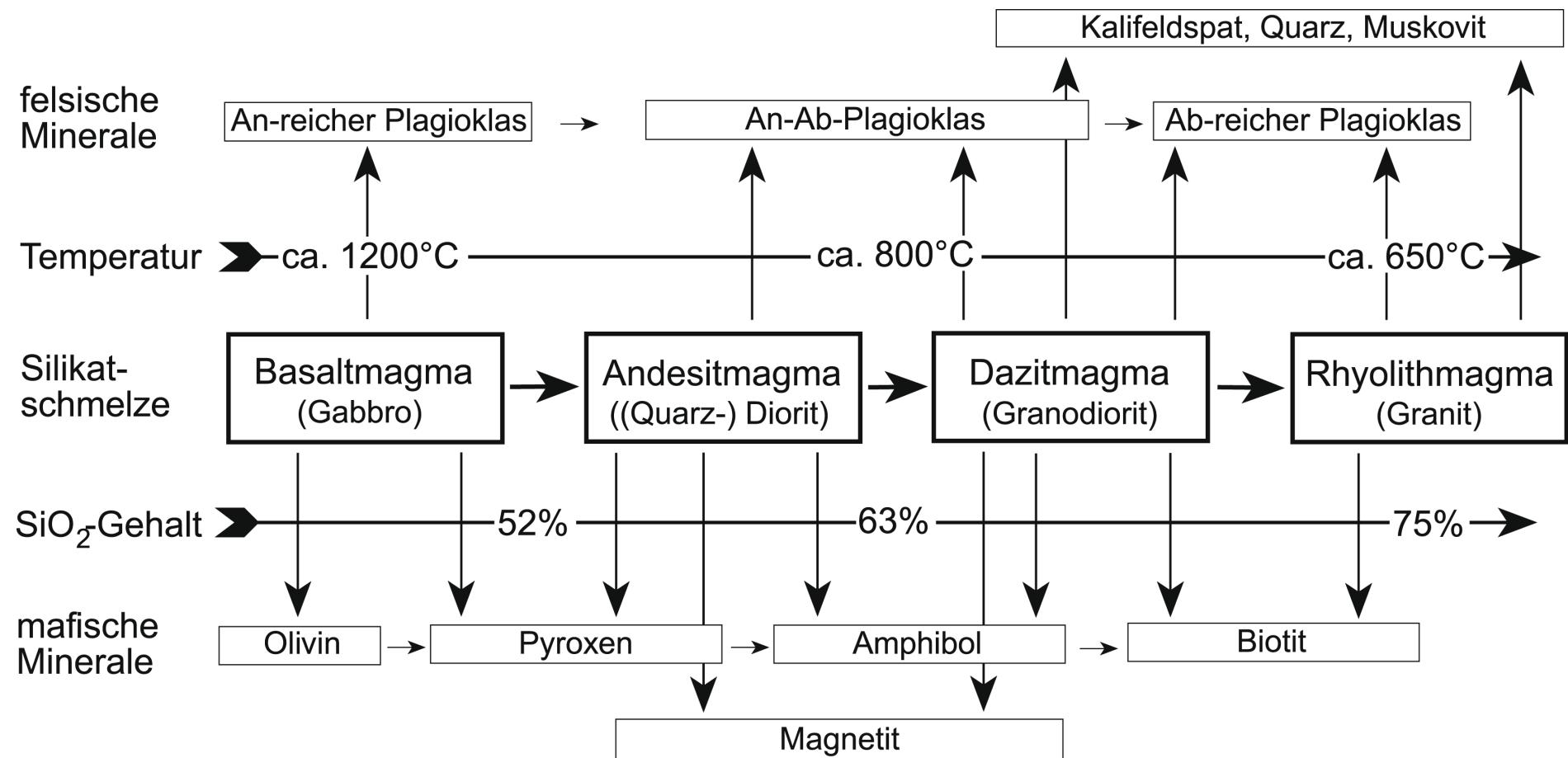


Partielles Aufschmelzen der Erdkruste

- Wie der Mantel kann auch die Erdkruste aufschmelzen

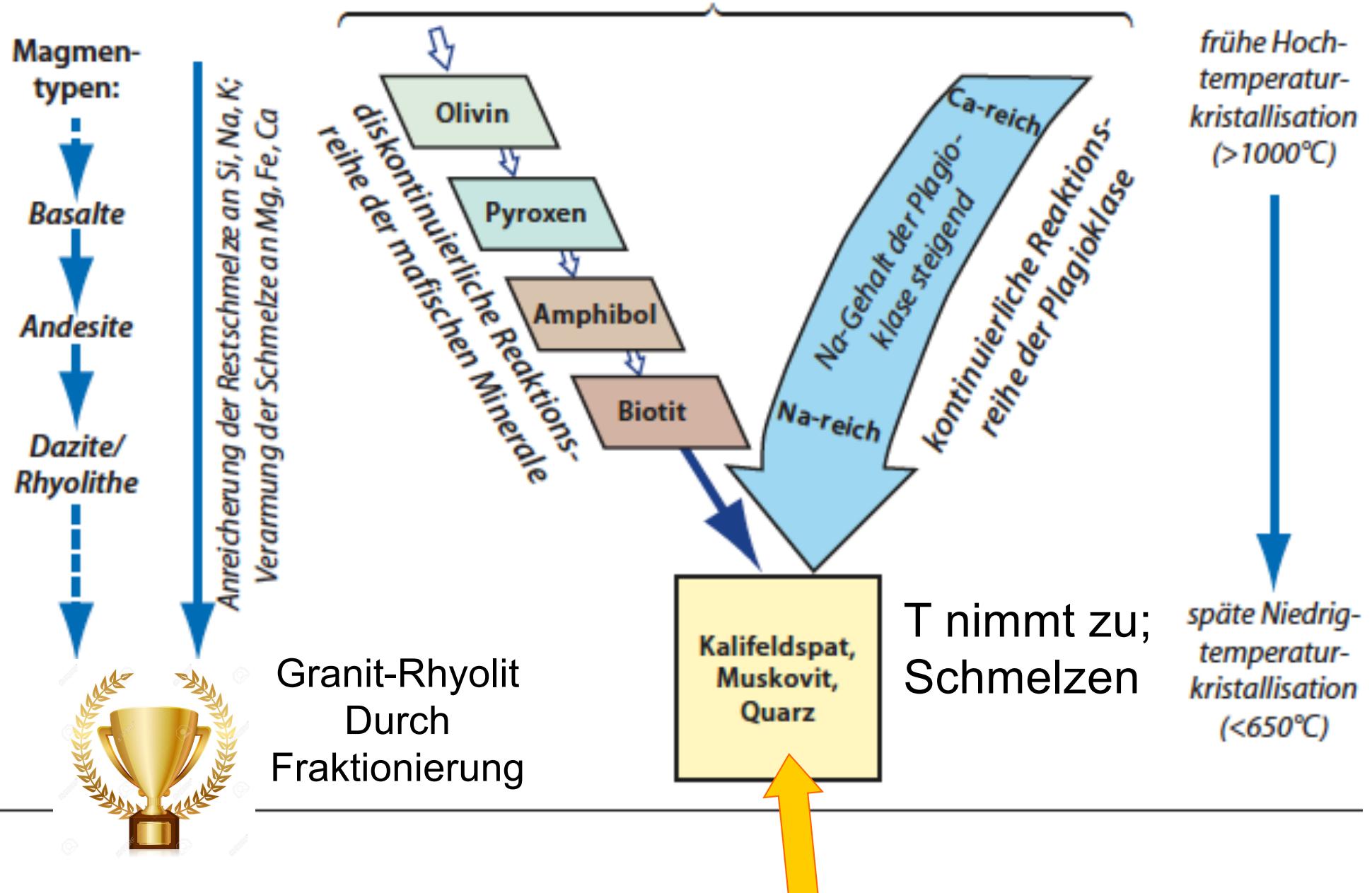


Fraktionierte Kristallisation



Bowen's Reaktionreihe - Fraktionierung

gleichzeitige Kristallisation von Mg-Fe-Silikaten und von Feldspäten



Die Entstehung von Granit (und Rhyolit)

- Neptunisten vs. Plutonisten? Wasser vs. Feuer?

Granitschmelzen liegen in einem sehr engen Zusammensetzungsraum

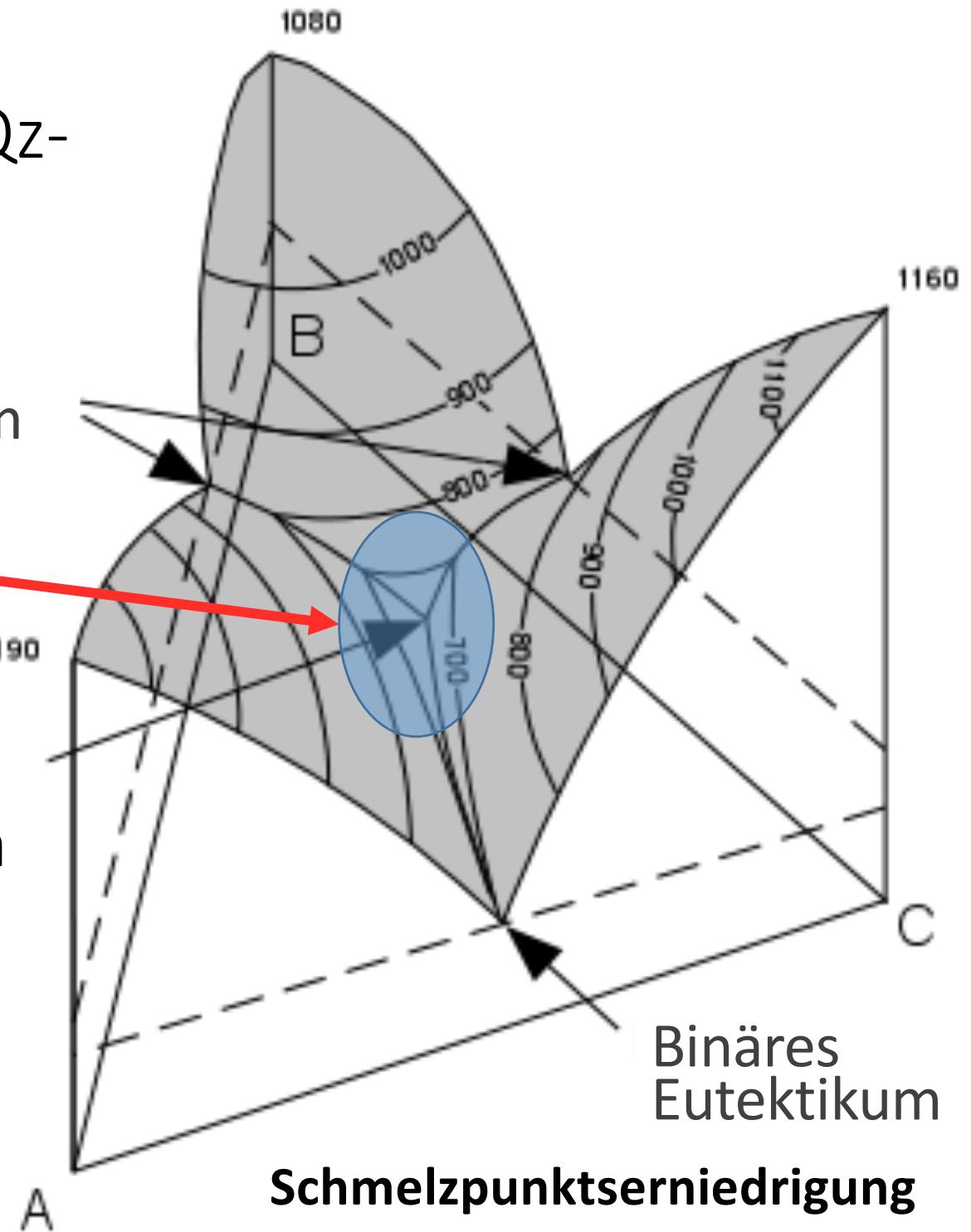
- Fraktionierung und Schmelzen führen beide dazu
- Krustenschmelze und fraktionierte Kristallisation sind beide möglich
 - Analog zu Basalt gibt es verschiedene Arten von Graniten (S-Typ, I-Typ, ...)

Granit System: Qz-Ab-Or

Binäres Eutektikum

Die meisten
Granite der
Welt

- **Tertiäres Eutektikum**

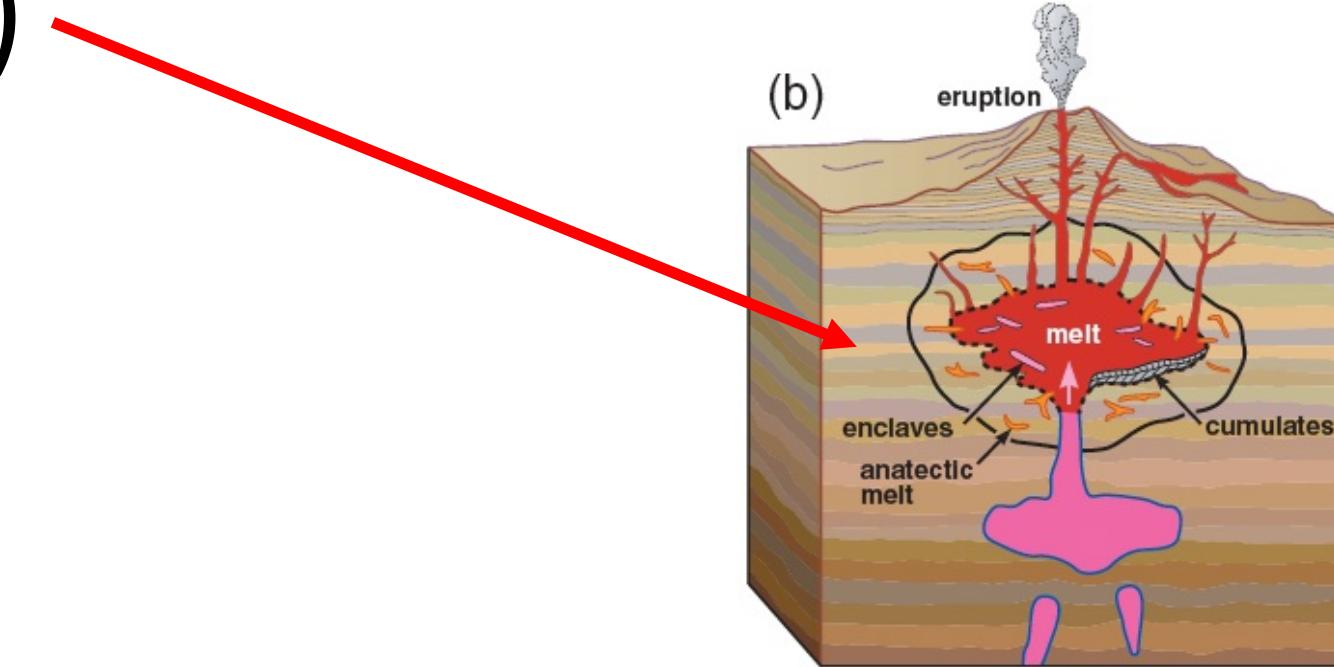


Wärmequellen, die zum Schmelzen der Kruste führen

1. Versenkung
2. Intrusion von warmen, mafischen Magmen

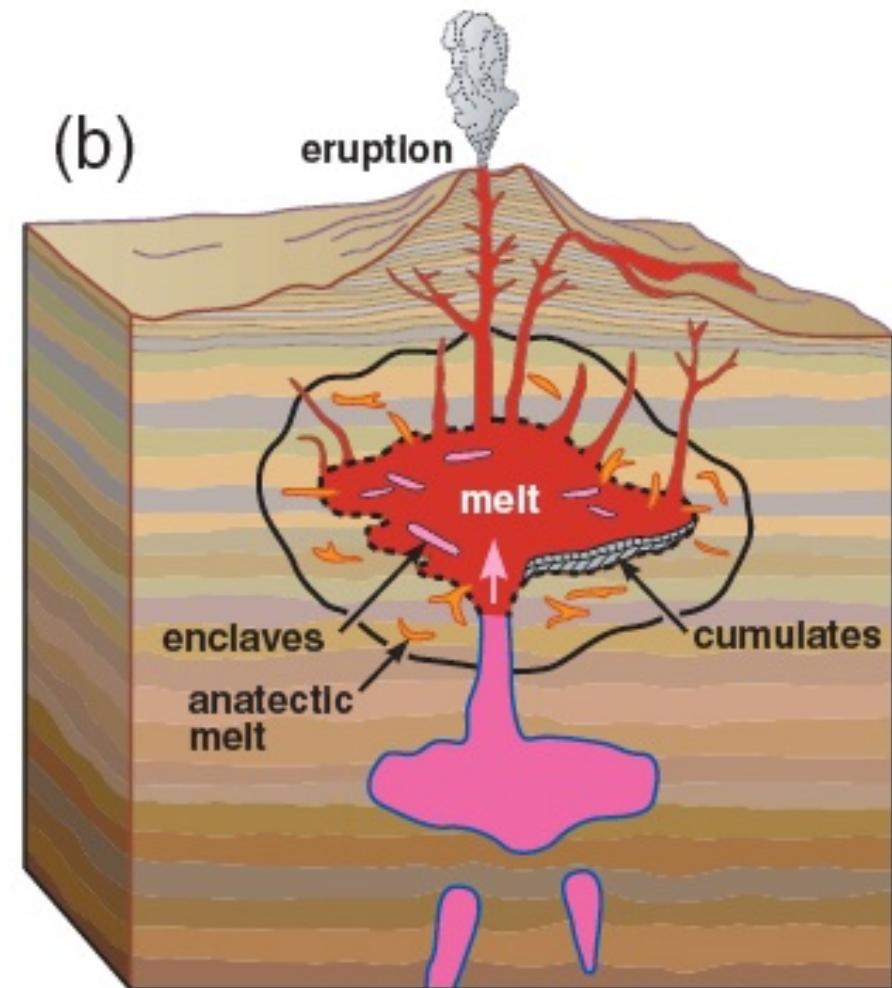
Die Zusammenarbeit zwischen Schmelzen und fraktionierter Kristallisation

- Beiden Prozesse können gleichzeitig ablaufen
- → “Assimilation Fractional Crystallization” (AFC)

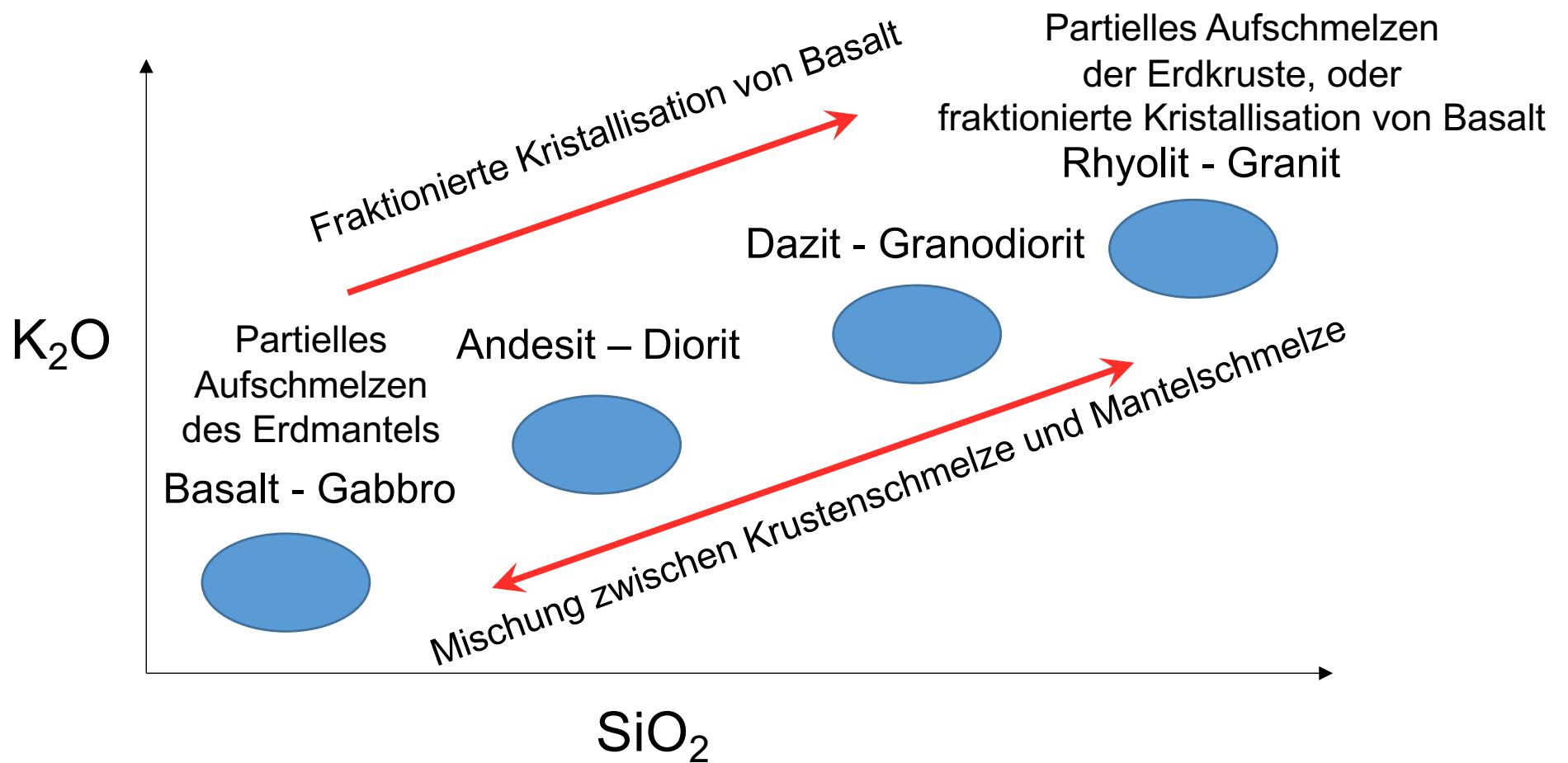


Die Diversifizierung der Magmen

- Magma
Mischung
(Mindestens
seit Bunsen,
1851 erkannt)



Differentiation: 2 Endglieder Möglichkeiten



Entgasung (Gasaustritt)

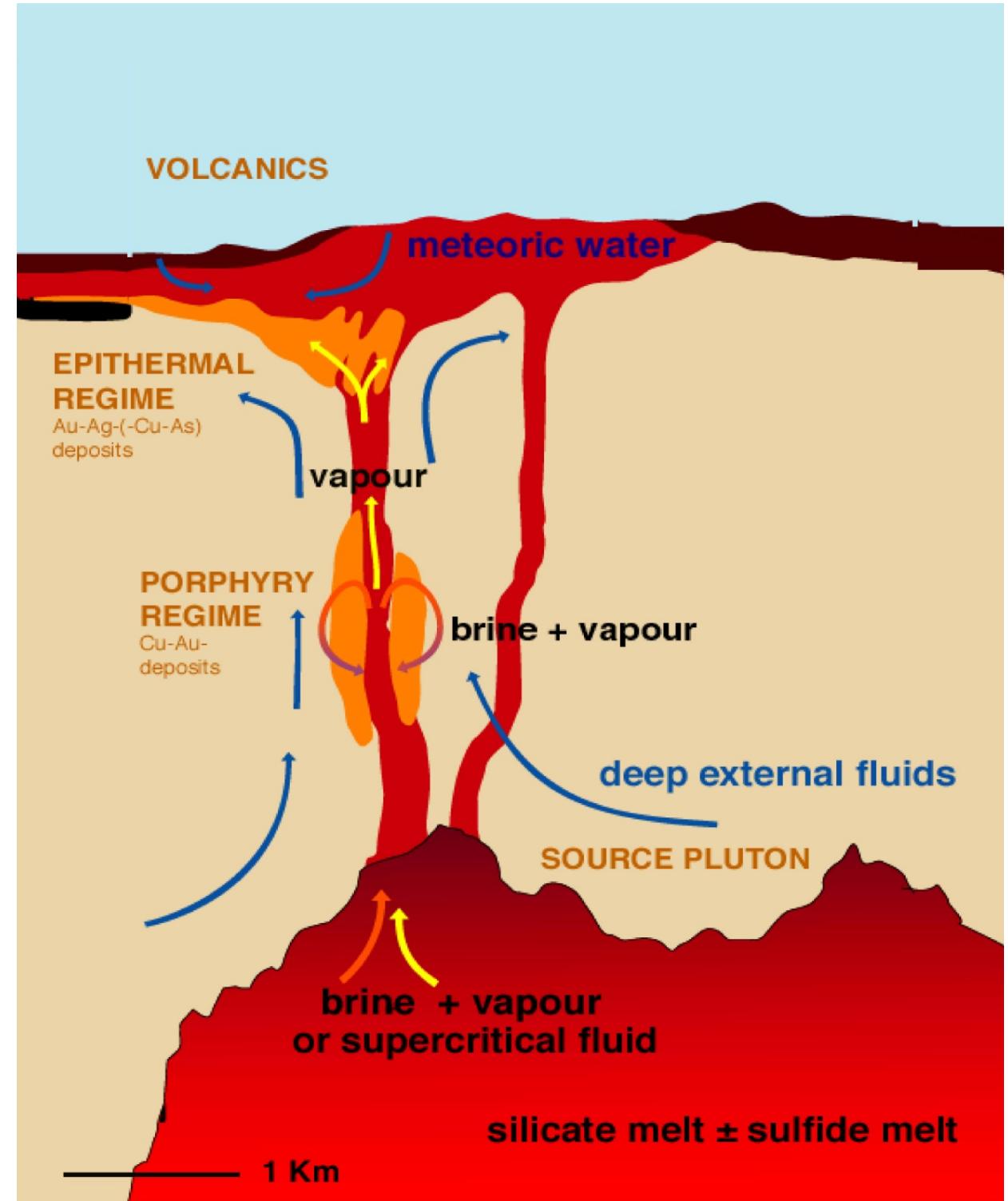
- Hydrothermale Fluide
- Erze (Rohstoffe)

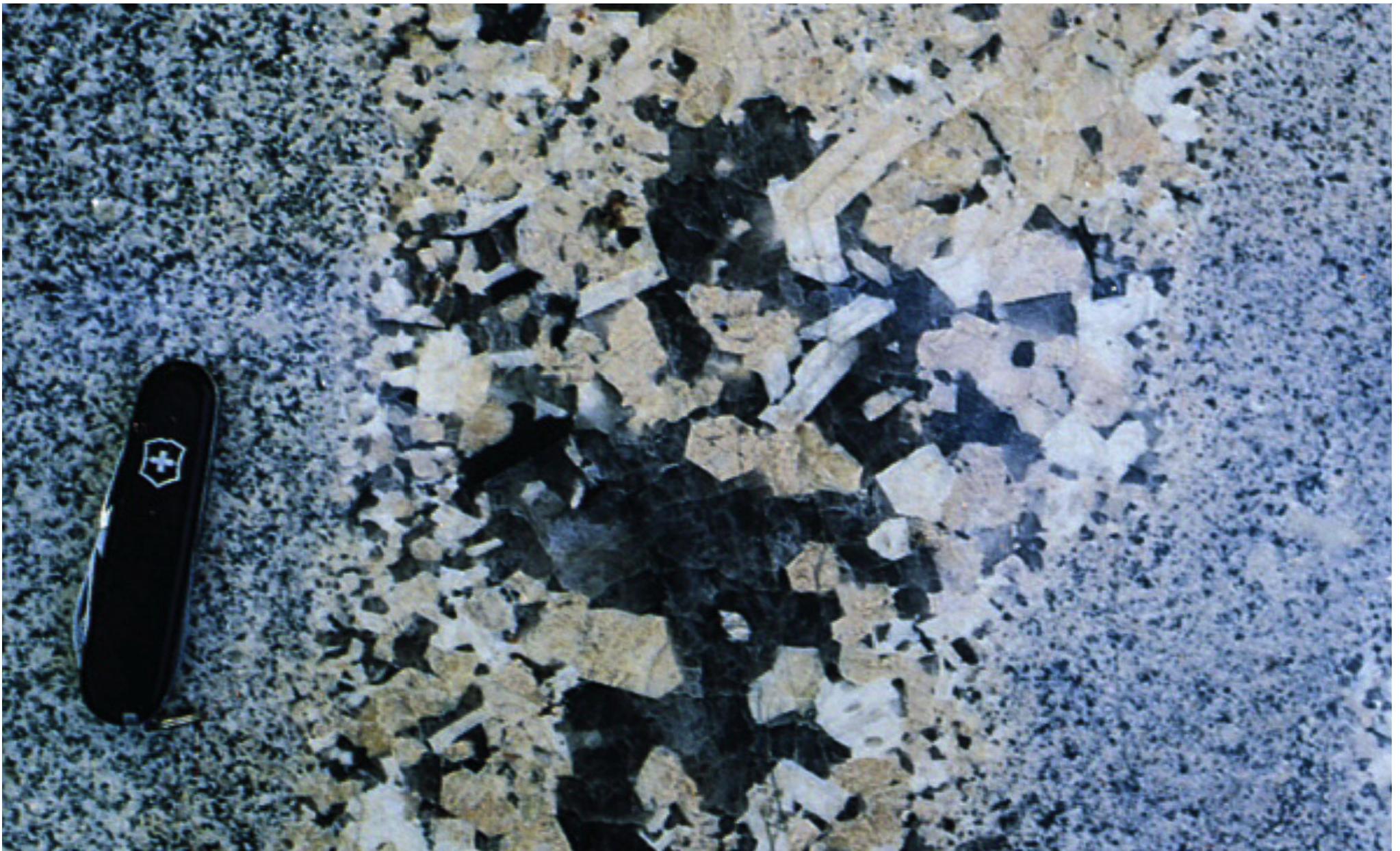
Hydrothermale Fluide

(H_2O + Salze + S + Spurenmetalle) am Übergang von Intrusion zur Vulkanstruktur:

Bildung von Cu, Mo, Sn, W, Au, Ag Erzen

Fumarolen an der Erdoberfläche





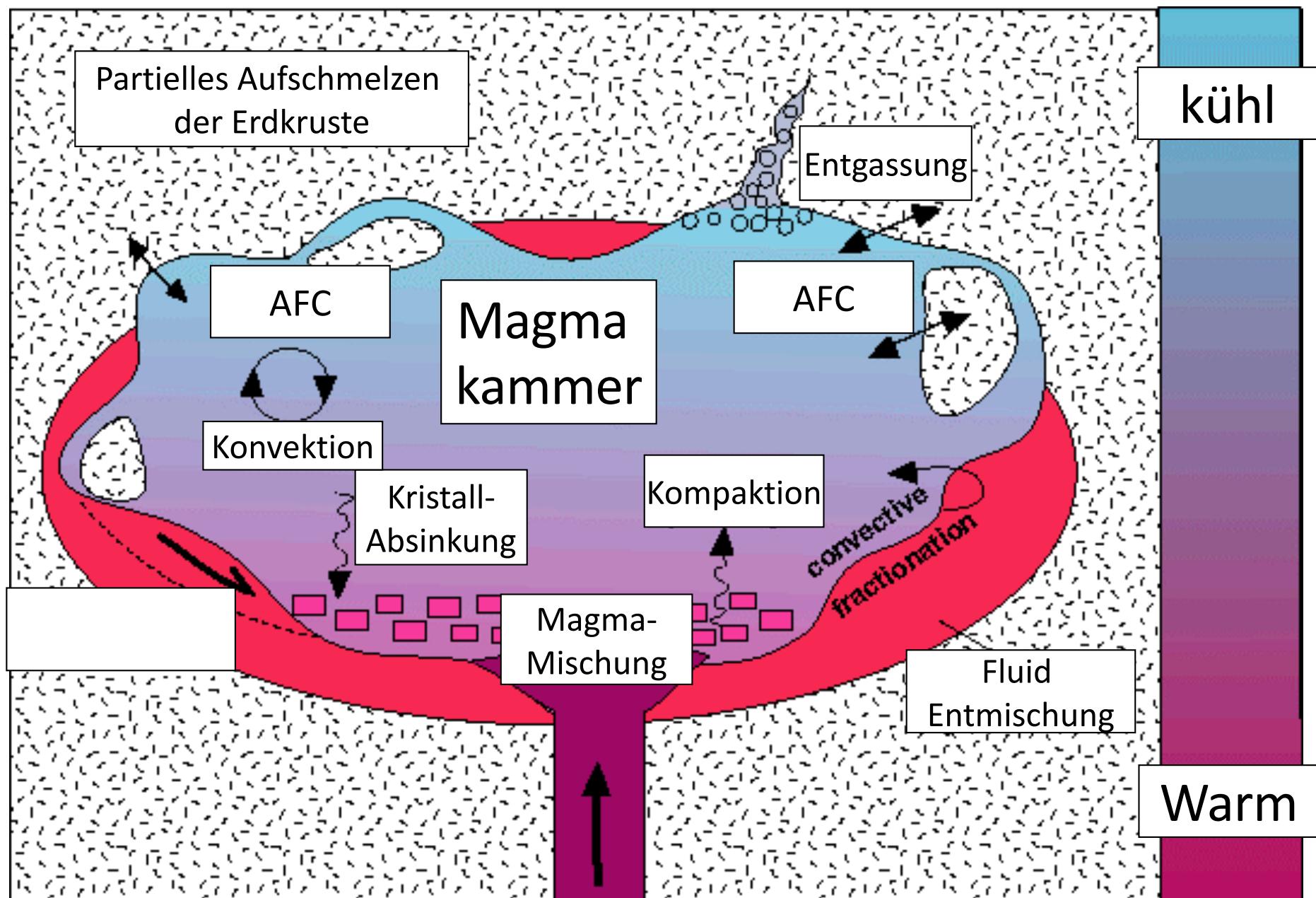
**Granitische Restschmelze mit vielen flüchtigen Elementen—> Pegmatit
Wichtige Quelle für viele Edelsteine**

Fluid Entmischung

- Manche Flüssigkeiten sind nicht mischbar
 - z.B., Öl und Wasser/Essig
 - Beispiele in Geologie:
 - Silikate-Karbonatite
-
- Sulfide in Silikaten
 - Fe-reiche Basaltschmelzen können zwei separate Schmelzen bilden – eine felsische, SiO_2 -reiche, und eine mafische und FeO -reiche.



Differentiation - Zusammenfassung



Vulkanologie

Mount St. Helens, WA, USA
1980-1986

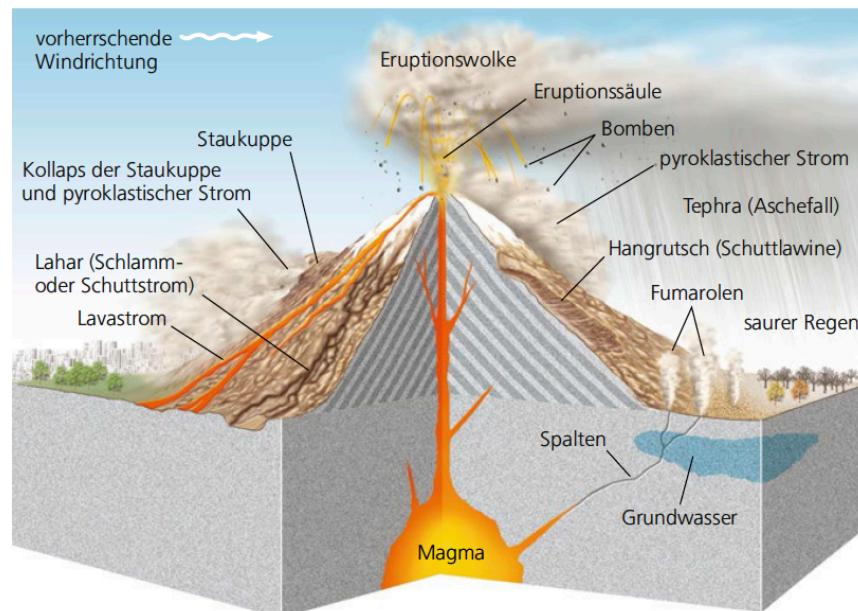


Explosiv oder effusiv? Das ist die Frage

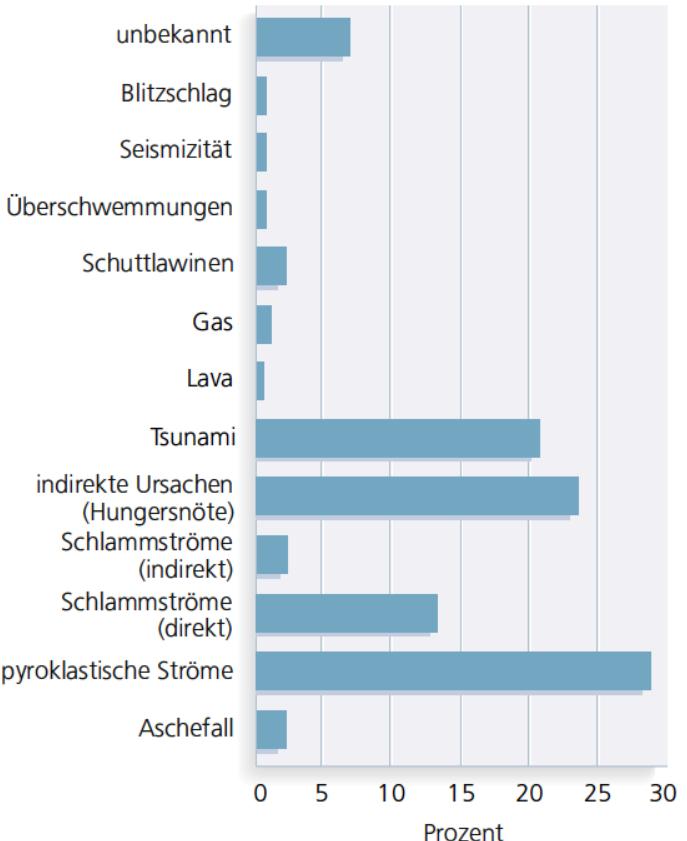
Eruptiver Stil

2 endglieder Effusiv / Explosiv

Einige vulkanische Gefahren, die Menschenleben fordern oder Sachschäden verursachen

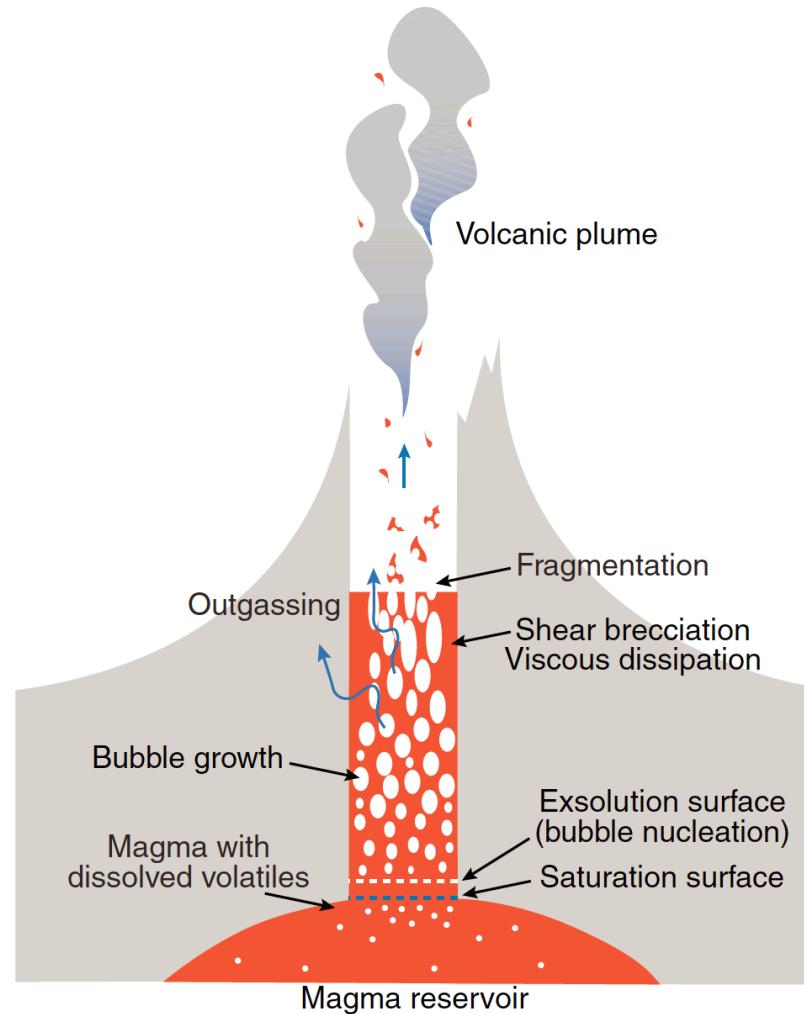


Ursachen der durch Vulkane verursachten Todesfälle seit 1500 n. Chr
b



Vulkanische Explosivität

- Vulkanische Explosivität kontrolliert durch:
 - Gasgehalt und Viskosität
 - Während des Aufstiegs (und der Dekompression) bilden sich viele Blasen im Magma => es verringert die Dichte und beschleunigt das Magma nach oben

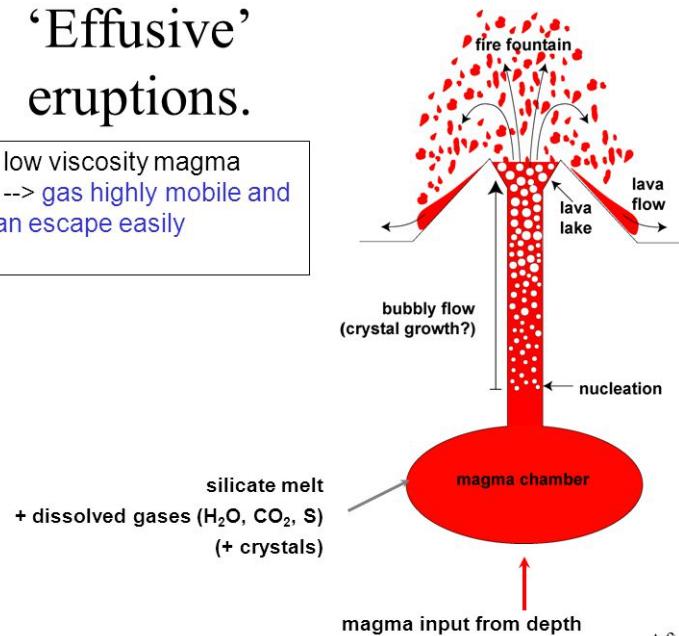


Explosiv oder effusiv?

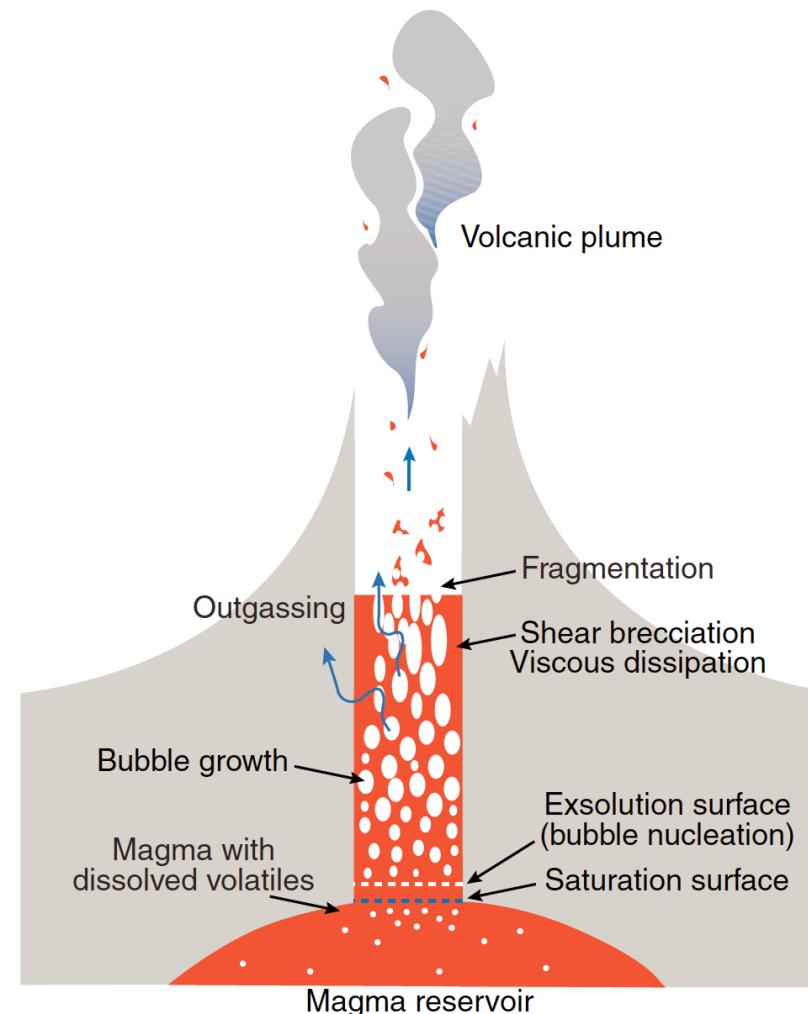
- Wenn die Ausgasung effizient ist, kann sie die Magmafragmentierung verzögern, bis sie unterdrückt wird
 - Effusiver Ausbruch
 - Einfacher für basalt (weniger wasser, und dünnflüssig => Ausgasung möglich)

‘Effusive’ eruptions.

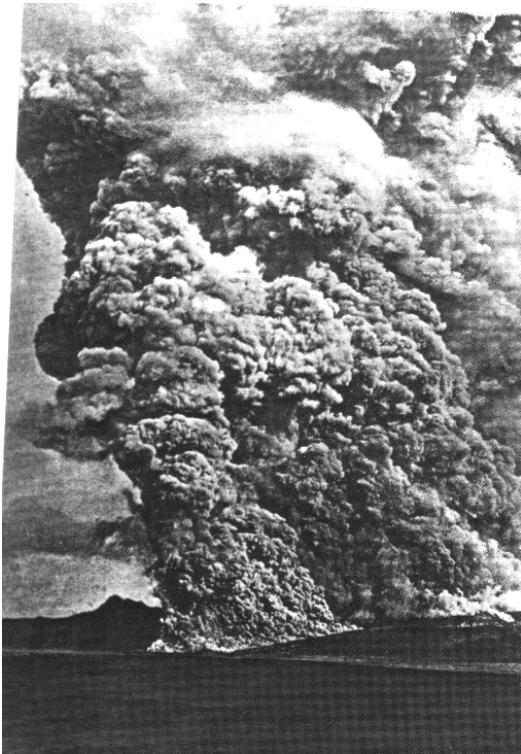
- low viscosity magma
- --> gas highly mobile and can escape easily



After H Mader



Explosive Ausbrüche



Mont Pelée, 1902

Mount Pinatubo 1991

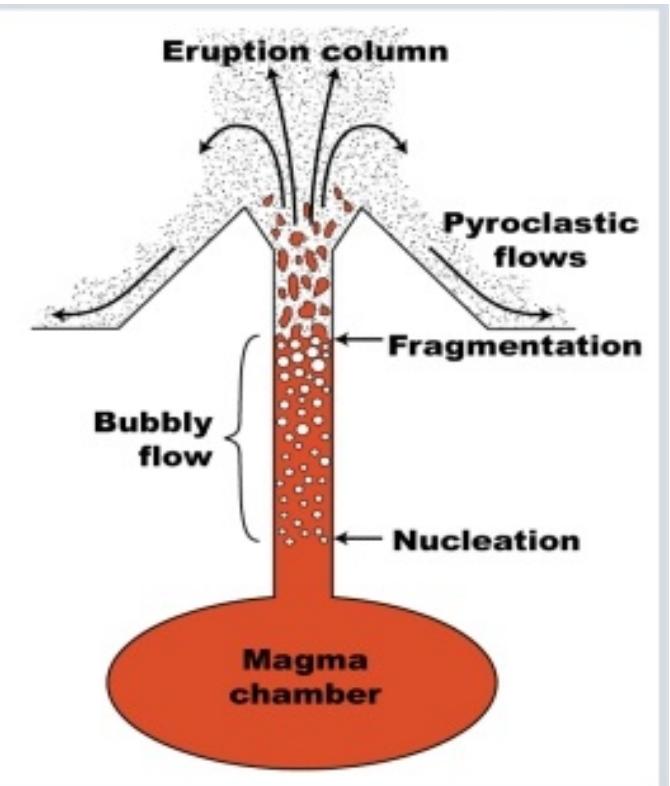


Kliuchevskoi,
Kamtchatka,

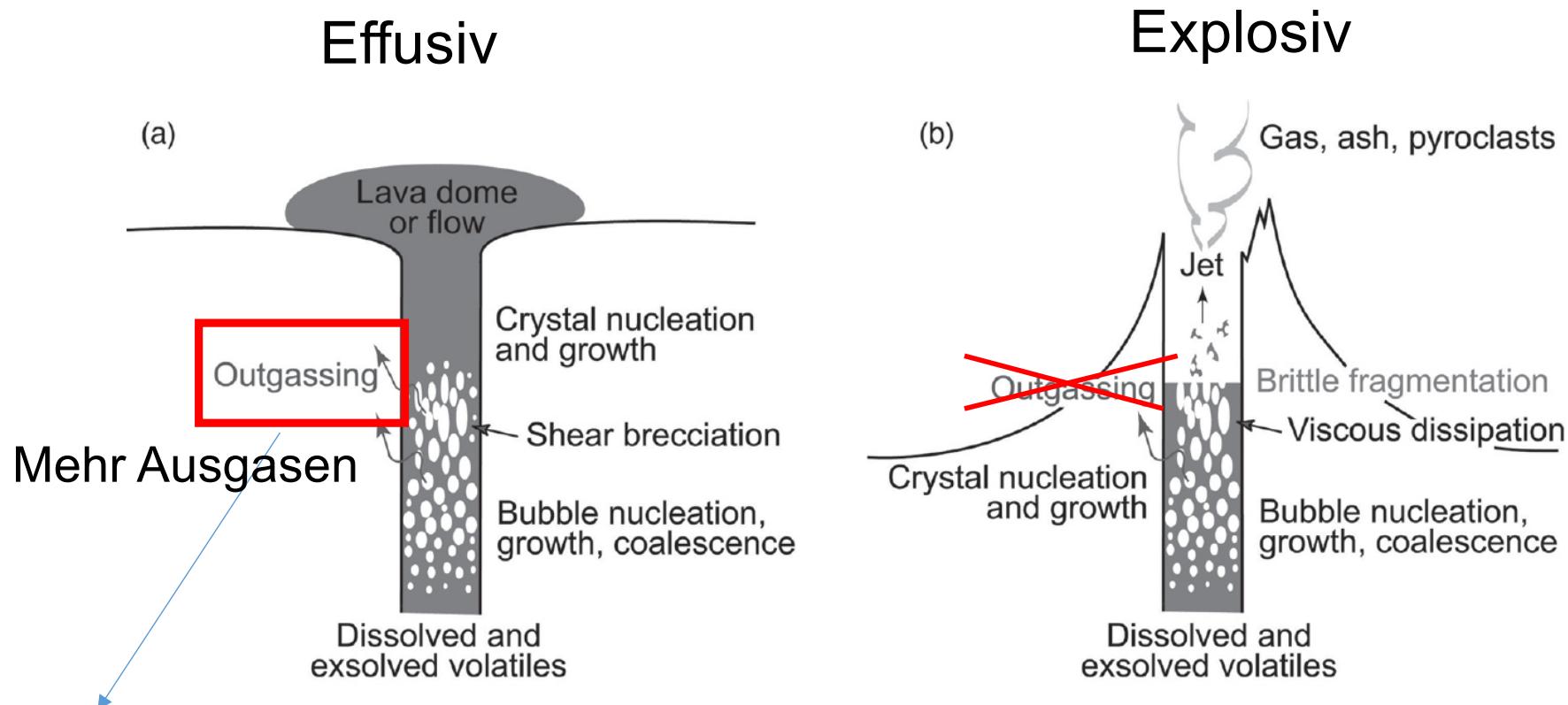


Wasserreiche Magmen mit hoher Viskosität?

- Blasen können nicht entfliehen, entweichen => führen in der Regel zu explosiven Ausbrüchen (starke Beschleunigung nach oben)
- Je mehr Gas und je höher die Viskosität ist, desto höher ist die “potenzial” Explosivität



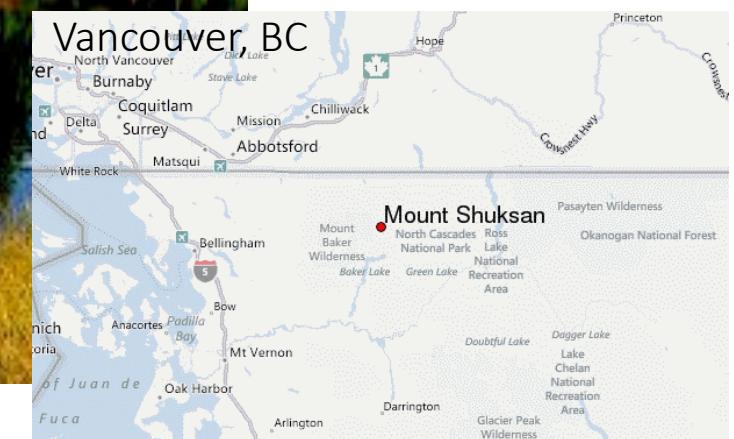
Entgassung in Förderkanäle



Das Magma wird für das Ausgasen
durchlässig (permeable)

Warum die Ausgasung manchmal
effizienter ist, ist noch nicht klar ...

Metamorphe Gesteine



Shuksan Greenschist; urspr. ozeanischen Basalt und darüberliegenden Tiefsee Schlamm und Sand

Definition - Gesteinsmetamorphose

- Die Umwandlung vorhandener Gesteine in ***festem Zustand***
- Wird verursacht durch die Zunahme von Druck und Temperatur und durch die Reaktionen mit Ionen oder chemischen Verbindungen, die durch Lösungen zugeführt werden.
- Das Ausgangsgestein wird als „Protolith“ bezeichnet.
- Bei der Metamorphose kommt es unter den veränderten physikalischen Bedingungen zu Mineralreaktionen, also zur Neu- oder Umbildung von Mineralen, wobei das Gestein im festen Zustand verbleibt.

Die Grenzen der Metamorphose

- Niedertemperaturgrenze:
 - Metamorphose beginnt im Bereich von 100-150 °C für die instabilsten Arten von Protolithen
 - Metamorphose folgt der „Diagenese“
 - *Verfestigung von Sedimenten durch erhöhten Druck und Temperatur*

Die Grenzen der Metamorphose

- Hochtemperaturgrenze:
 - Metamorphose endet im Bereich von 650-1000 °C je nach Art des Protolithen
 - Metamorphose entwickelt sich in „Anatexis“
 - *Partielles Aufschmelzen von Gesteinen der Erdkruste infolge von Temperaturerhöhung, Druckentlastung und/oder Fluidzufuhr (z. B. von H₂O, CO₂)*
 - *Auch bekannt als **Migmatisierung** (teilgeschmolzene Gesteine)*

Wichtige metamorphe Faktoren

1. Temperatur
2. Druck
3. Stress (Scherbewegung)
4. Anwesenheit von Flüssigkeiten

Metamorphose Faktoren

- **Temperatur**
- Typischerweise der wichtigste Faktor in der Metamorphose
- Die zunehmende Temperatur hat mehrere Effekte
 - 1) Überwindet kinetische Barrieren
 - 2) Fördert die Rekristallisation (Reaktion)
 - 3) Erhöht die Korngrösse

Metamorphose Faktoren

- **Druck**
- "Normale" Gradienten können auf verschiedene Weise gestört werden.
- Typischerweise
 - Niedrige P/T Geotherme in Bereichen von platonischer Aktivität oder Rifting
 - Hohe P/T Geotherme in Subduktionszonen

Metamorphose Faktoren

- **Stress**
- Abweichende Spannung = ungleicher Druck in verschiedenen Richtungen
- Aufgelöst in drei zueinander senkrechten Spannungs- Komponenten (σ):
 - σ_1 die maximale Hauptspannung,
 - σ_2 die Zwischenhauptspannung,
 - σ_3 die minimale Hauptspannung

Metamorphose Faktoren

- Stress
- Führt zu Verformung, aber selten zu Rekristallisation
- Beeinflusst die Texturen und Strukturen, aber in der Regel nicht das Gleichgewicht (Mineralvergesellschaft)

Foliation und Lineation

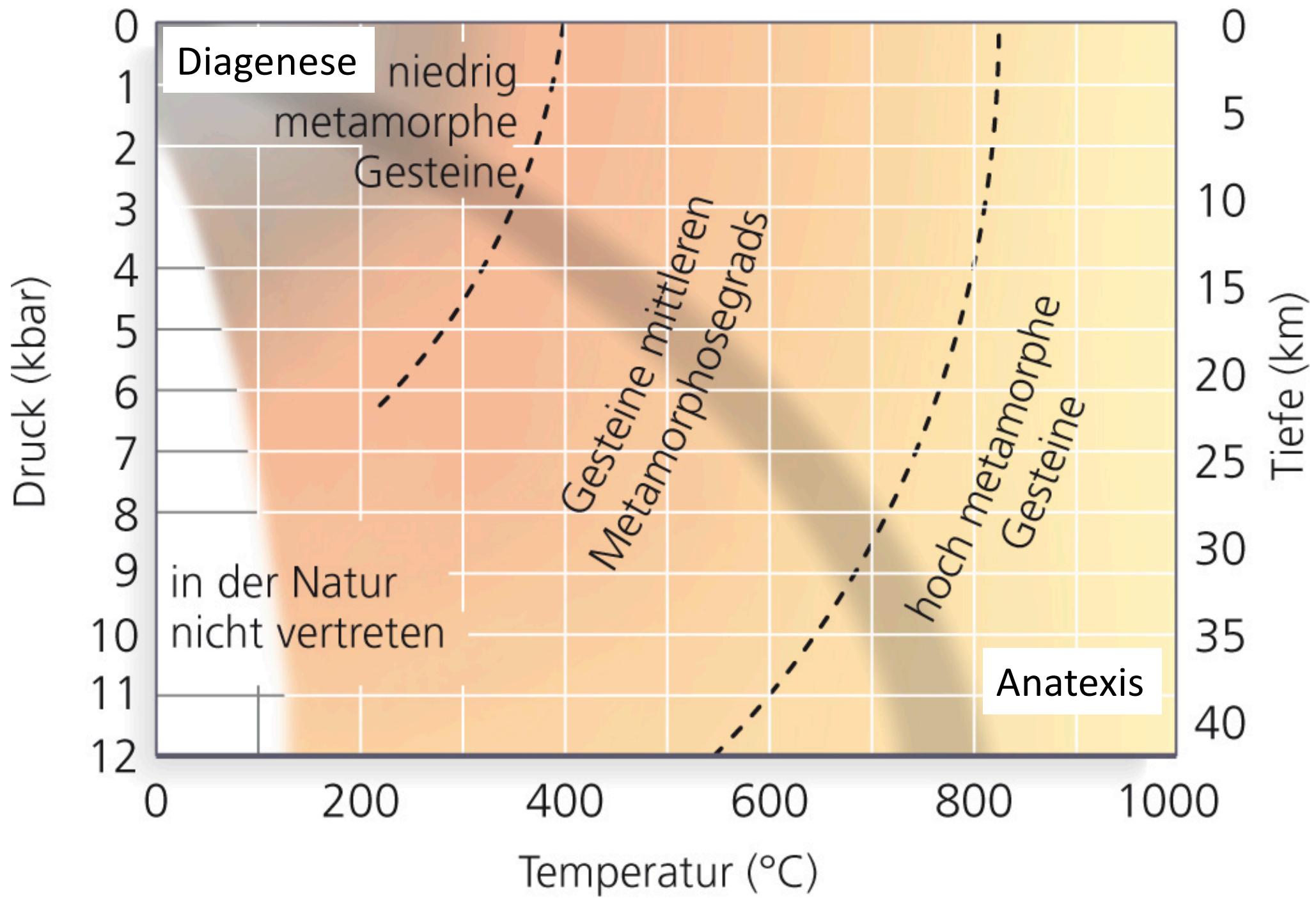
- Foliation:
 - zeigt parallel verlaufende Flächen auf
- Lineation:
 - zeigt Linien auf

Metamorphose Faktoren

- **Flüssigkeiten:**
- Führen zu Mineralreaktionen
- Beweis für die Existenz einer metamorphen Flüssigkeit:
 - Flüssigkeitseinschlüsse
 - Wässrige (H_2O) oder karbonate (CO_2) Phasen

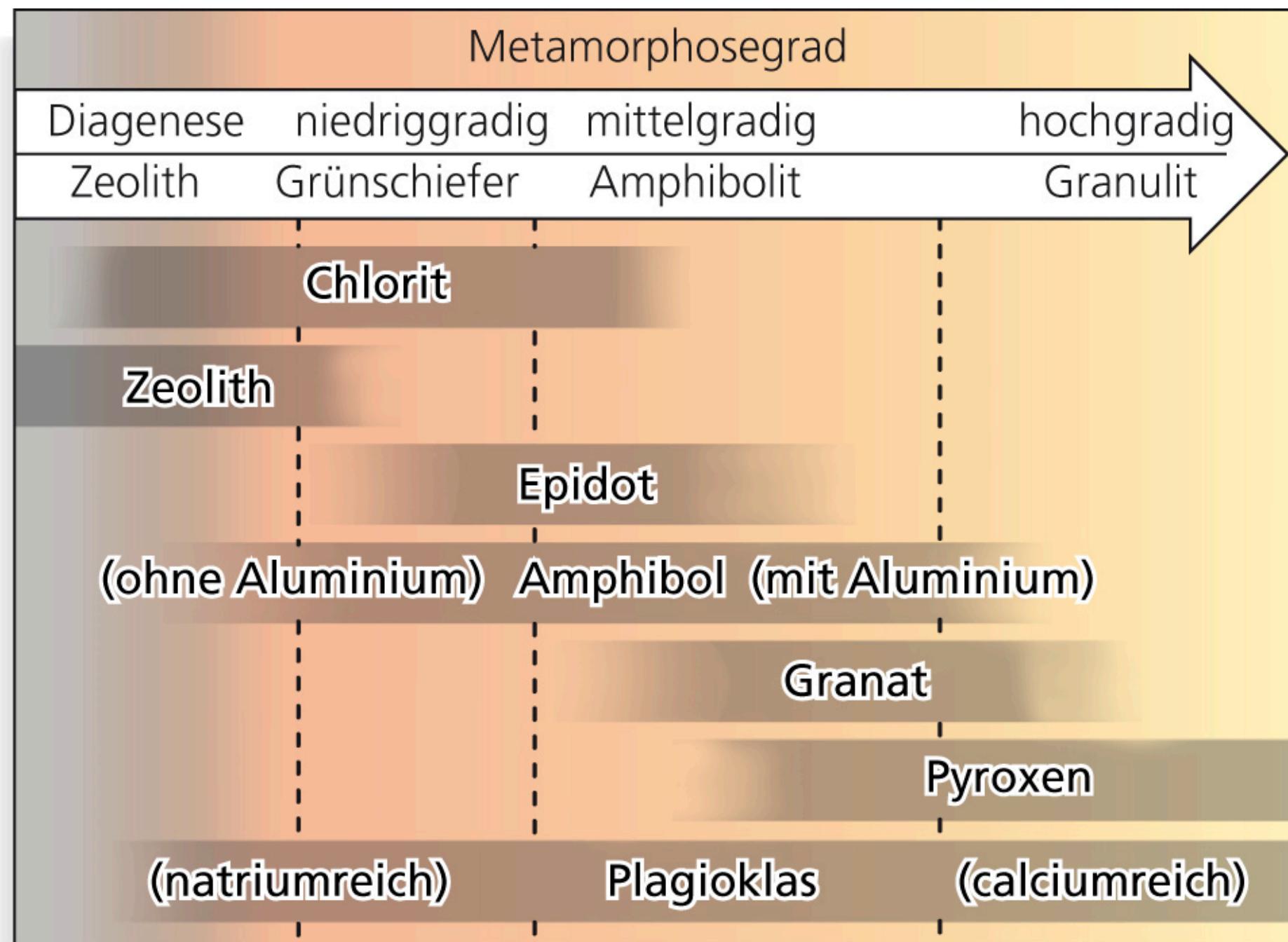
Definition - Gesteinsmetamorphose

- Die Umwandlung vorhandener Gesteine in ***festem Zustand***
 - Bei der Metamorphose kommt es unter den veränderten physikalischen Bedingungen zu ***Mineralreaktionen***, also zur ***Neu- oder Umbildung von Mineralen***, wobei das Gestein im festen Zustand verbleibt.
 - Das Ausgangsgestein wird als „***Protolith***“ bezeichnet.
- ***Grad***: Qualitative Information über die Intensität der Metamorphose ohne die genaue Beziehung zwischen Temperatur und Druck zu bestimmen
 - Niedrig, mittel, hoch
- ***Index Minerale***: markante Minerale, die zunehmende Grade der regionalen Metamorphose charakterisieren.
- ***Metamorphe Fazies***: Charakteristische Mineralvergesellschaftung in metamorphen Gesteinen, die jeweils für einen bestimmten Druck- und Temperaturbereich kennzeichnend sind, dem die Gesteine im Verlauf der Metamorphose ausgesetzt waren.
- Bereich auf dem Gebiet, über welchem diese eigenständige Assemblage auftritt, wird als „***Zone***“ bezeichnet



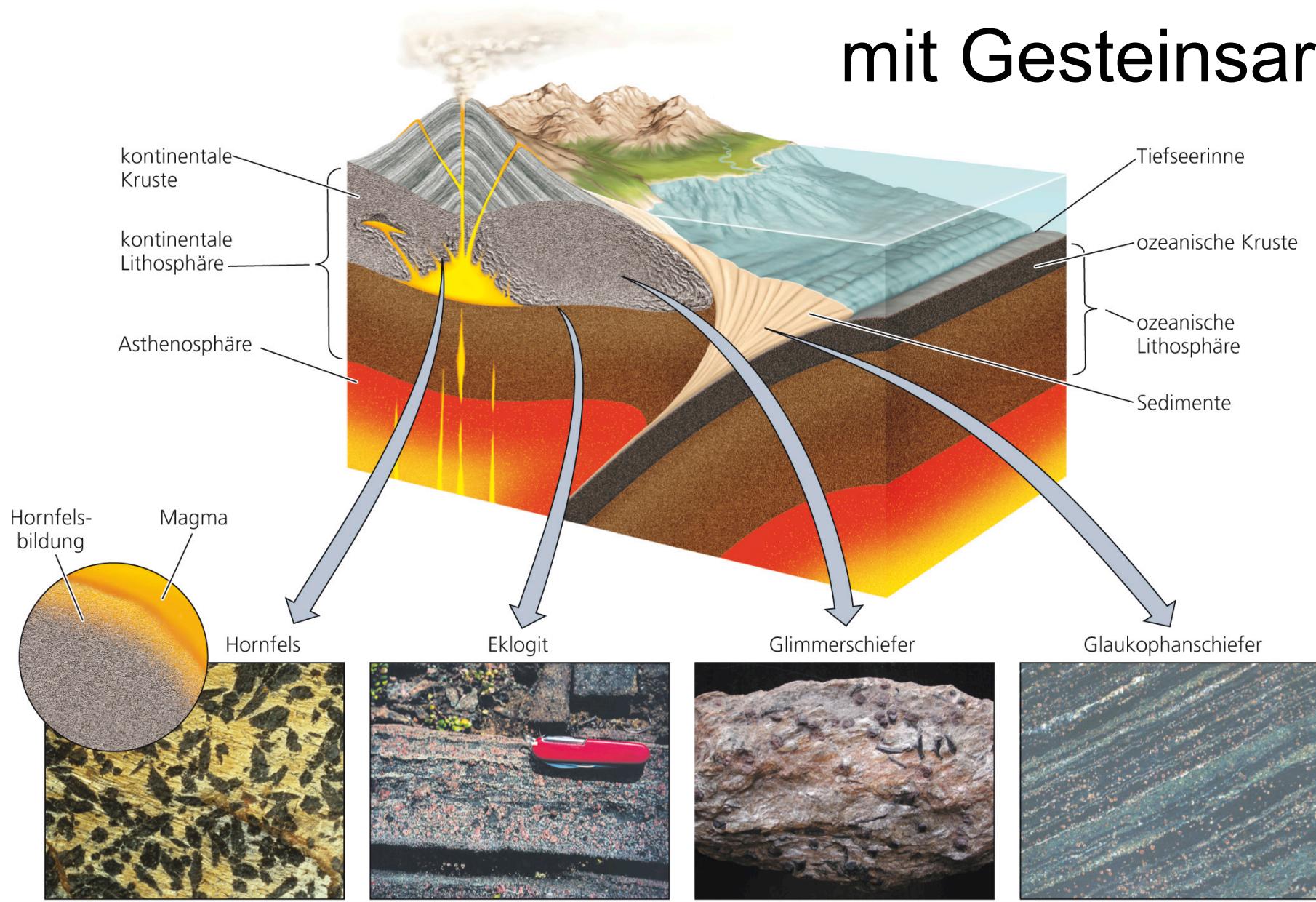
Aus: Grotzinger/Jordan/Press/Siever, Allgemeine Geologie, 5. Aufl.

© Spektrum Akademischer Verlag GmbH 2008



Aus: Grotzinger/Jordan/Press/Siever, *Allgemeine Geologie*, 5. Aufl.
© Spektrum Akademischer Verlag GmbH 2008

mit Gesteinsarter



Die **Kontaktmetamorphose** ist auf eng begrenzte Bereiche beschränkt, in denen bedingt durch die hohe Temperatur der Magma-Intrusion das Nebengestein in Hornfels übergeht.

Die **Ultrahochdruck-Metamorphose** ist auf die tiefen Bereiche der kontinentalen Lithosphäre und der ozeanischen Kruste beschränkt.

Die **Regionalmetamorphose** stellt sich ein, wo in ausgedehnten Bereichen hohe Druck- und Temperaturbedingungen herrschen.

Zur **Hochdruck-Niedrigtemperatur-Metamorphose** kommt es, wo ozeanische Kruste unter dem Rand einer kontinentalen Platte subduziert wird.

Arten von Protolithen

- Wir können die gemeinsamen Arten von sedimentären und magmatischen Gesteinen in **5 chemische Gruppen** klassifizieren
- 1. Ultramafisch - sehr hohes Mg, Fe, Ni, Cr
- 2. Mafisch - hohes Fe, Mg und Ca
- 3. Schiefer (pelitisch) / Quartz-feldspathisch; hohes Al, K, Na, Si
- 4. Quarz - fast reines SiO₂
- 5. Karbonate - hohes Ca, Mg, CO₂

4 Hauptarten der Metamorphose

1. Regionalmetamorphose, inkl.

- Hydrothermalmetamorphose
- Hochdruckmetamorphose /
subduktionmetamorphose
- Kollisionmetamorphose
- Versenkungmetamorphose

2. Kontaktmetamorphose

3. Schock-oder Impaktmetamorphose

4. Bruchzonenmetamorphose

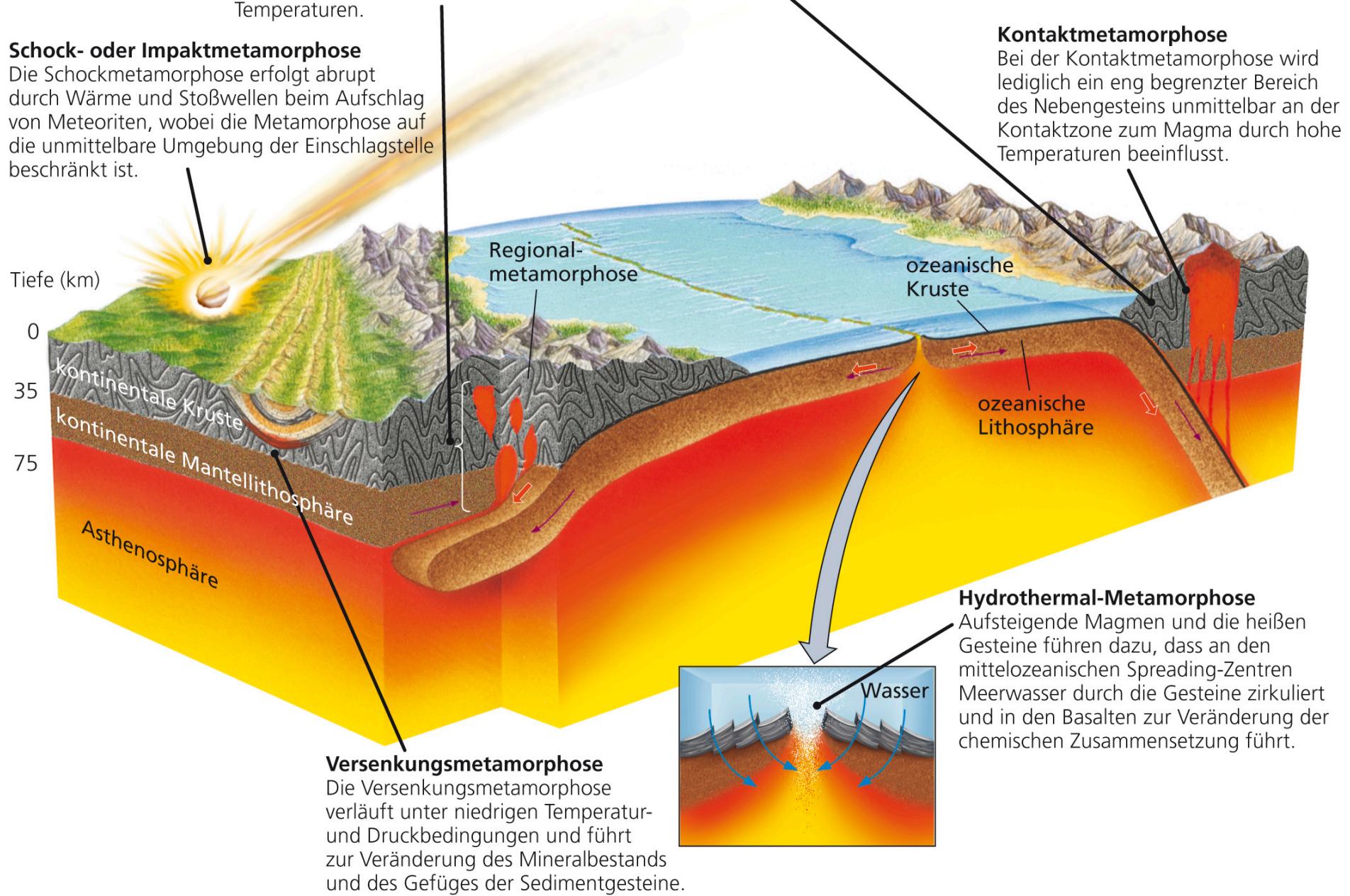
Arten der Metamorphose

Regionalmetamorphose

Die Regionalmetamorphose ist die typische Metamorphose an Plattenrändern, an denen es zur Kollision und Gebirgsbildung kommt. Sie erfolgt in mittleren bis großen Tiefen unter mittlerem bis hohem Druck und bei hohen Temperaturen.

Schock- oder Impaktmetamorphose

Die Schockmetamorphose erfolgt abrupt durch Wärme und Stoßwellen beim Aufschlag von Meteoriten, wobei die Metamorphose auf die unmittelbare Umgebung der Einschlagstelle beschränkt ist.



Hochdruckmetamorphose

Die Hochdruckmetamorphose ist überwiegend an Subduktionszonen gebunden, wo Gesteinsmaterial mit hoher Geschwindigkeit subduziert und zunehmend höheren Drücken ausgesetzt wird, während die Temperaturen vergleichsweise niedrig bleiben.

Kontaktmetamorphose

Bei der Kontaktmetamorphose wird lediglich ein eng begrenzter Bereich des Nebengesteins unmittelbar an der Kontaktzone zum Magma durch hohe Temperaturen beeinflusst.

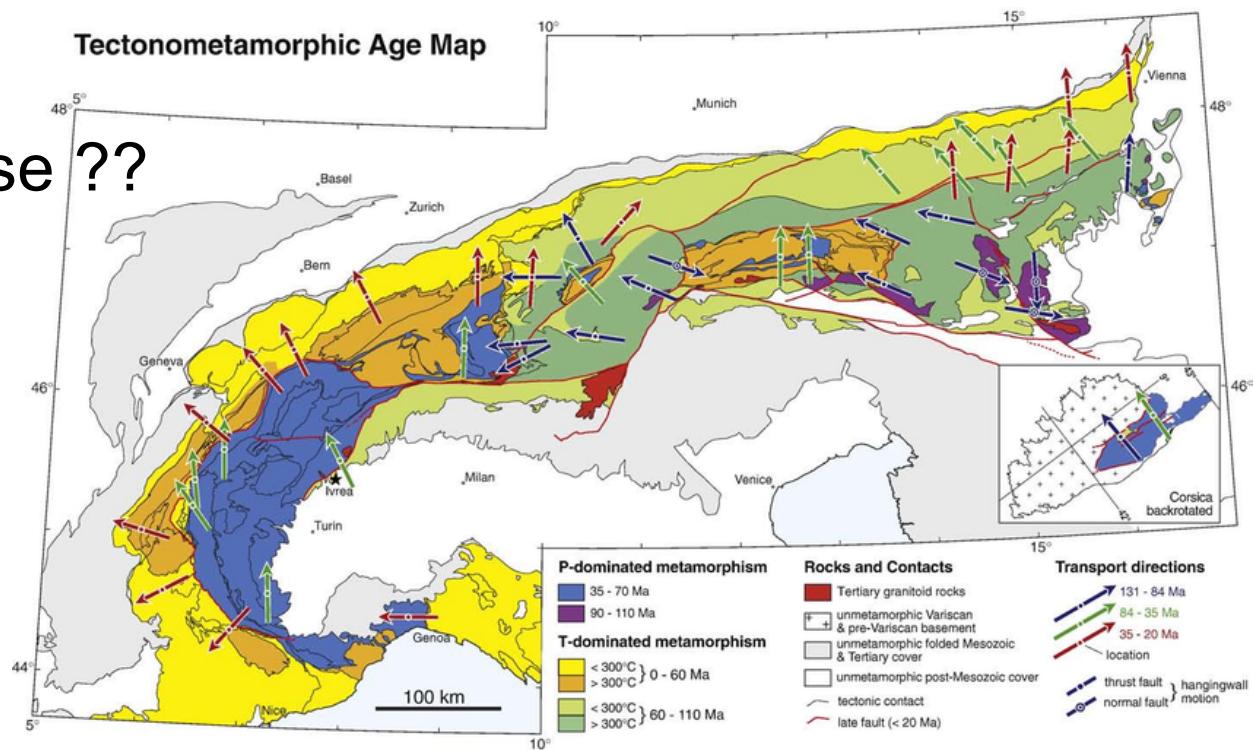
Hydrothermal-Metamorphose

Aufsteigende Magmen und die heißen Gesteine führen dazu, dass an den mittelozeanischen Spreading-Zentren Meerwasser durch die Gesteine zirkuliert und in den Basalten zur Veränderung der chemischen Zusammensetzung führt.

Die fortschreitende Natur der Metamorphose

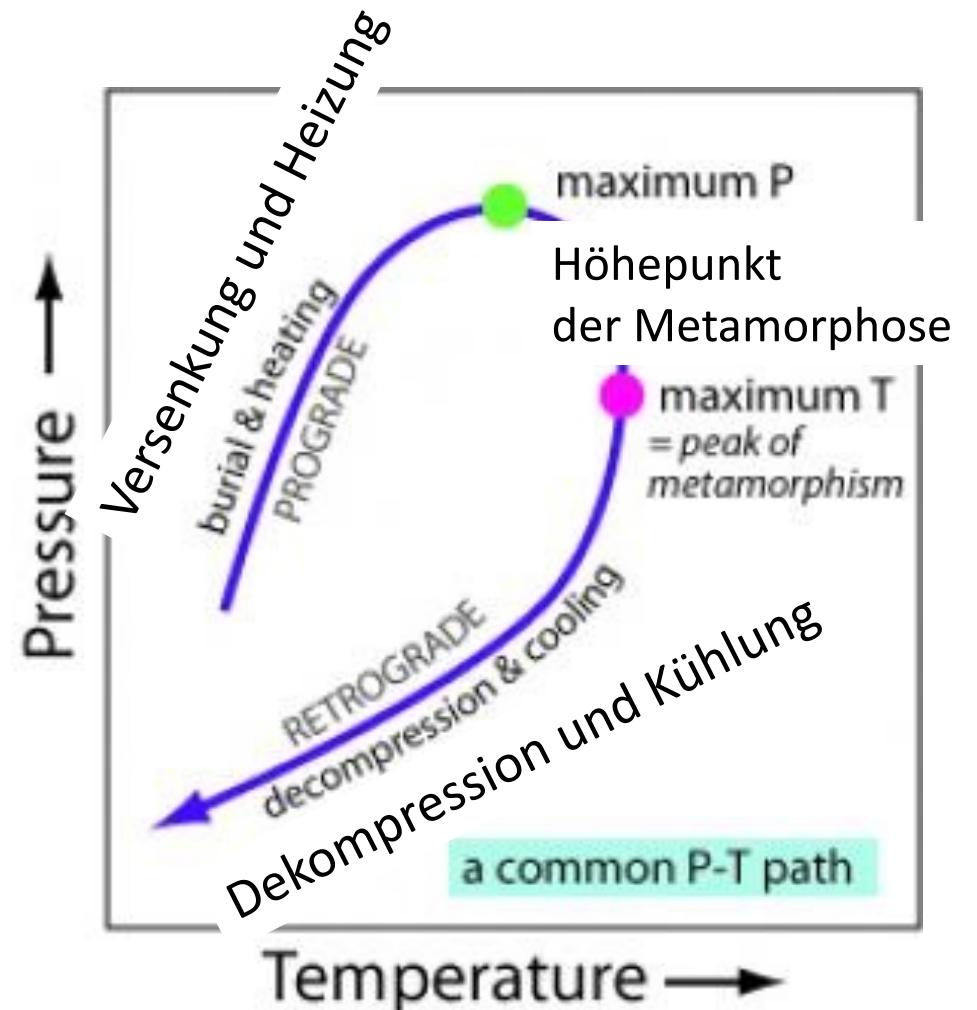
- Ein Gestein mit einem hohen Metamorphosegrad ist eine **Reihe von Mineralgemengen durchlaufen**, anstatt direkt von einem zum anderen metamorphen Gestein zu springen; braucht Zeit...

Alter der Metamorphose ??



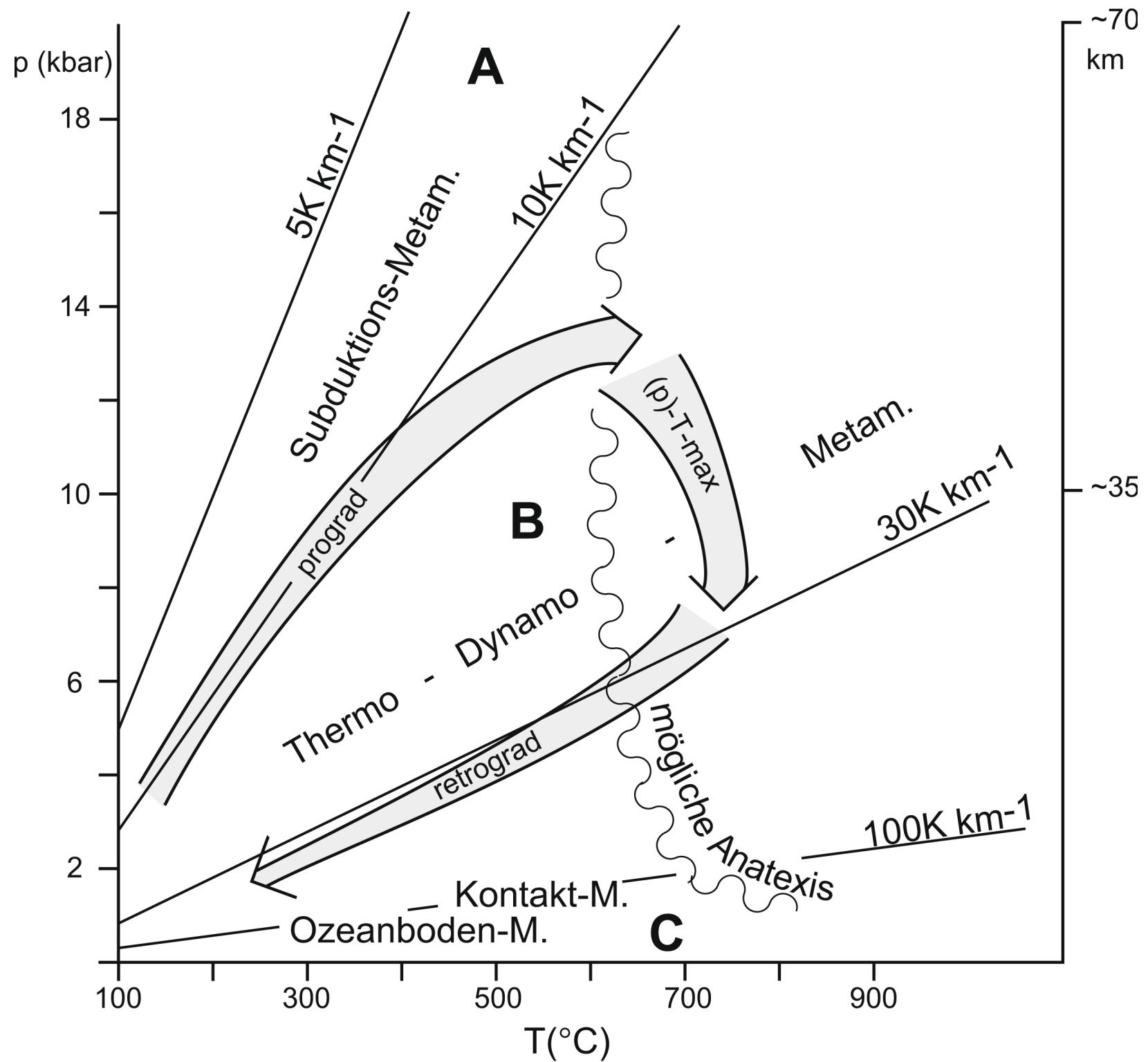
Prograde und retrograde Metamorphose

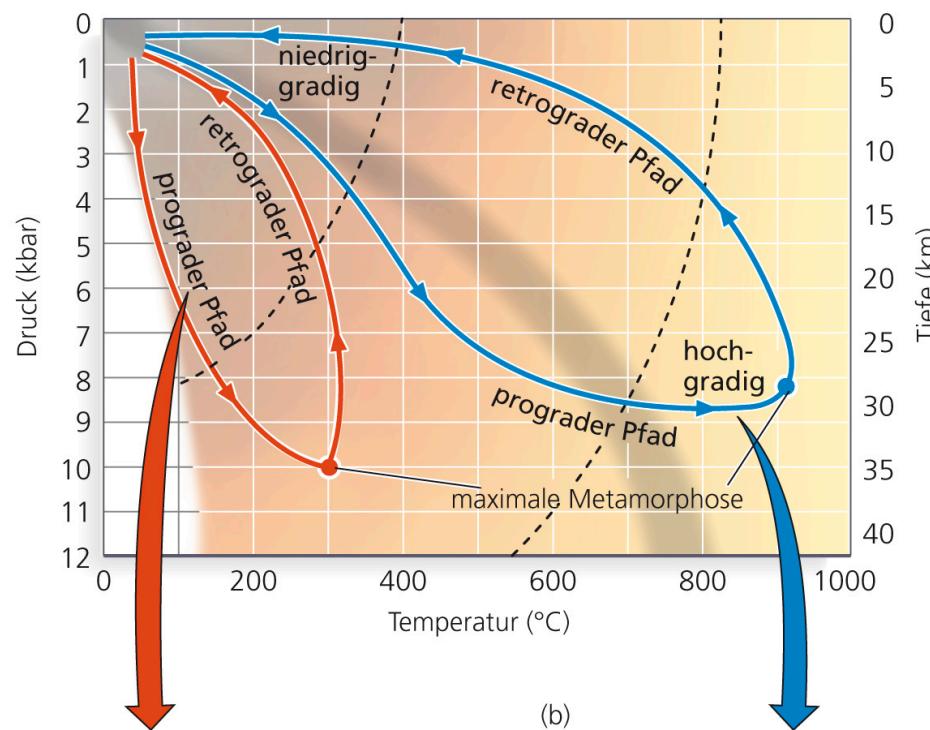
- **Prograde:** Zunahme der Metamorphosegraden mit der Zeit, da ein Gestein allmählich verschiedenen Bedingungen ausgesetzt wird
- **Retrograde:** Abnahme der Metamorphosegraden mit der Zeit, da die sich die Gesteine nach einer Metamorphose abkühlen und erholen



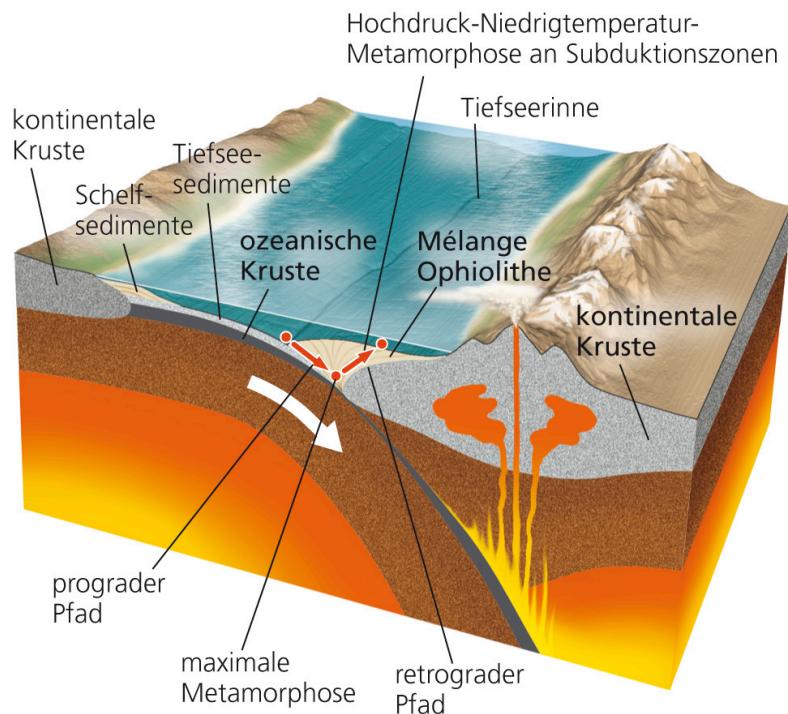
Retrograde Metamorphose typischerweise von untergeordneter Bedeutung

- Geothermometrie zeigt an, dass die mineralischen Zusammensetzungen üblicherweise die maximale Temperatur beibehalten
- Warum?
- - Devolatilizationsreaktionen geschehen einfacher als revolatilization Reaktionen. Flüchtige Elemente können entfliehen, aber nicht leicht zurück zu kommen.
- - Prograde Reaktionen sind endotherm und geschehen einfach durch die Erhöhung der Temperatur

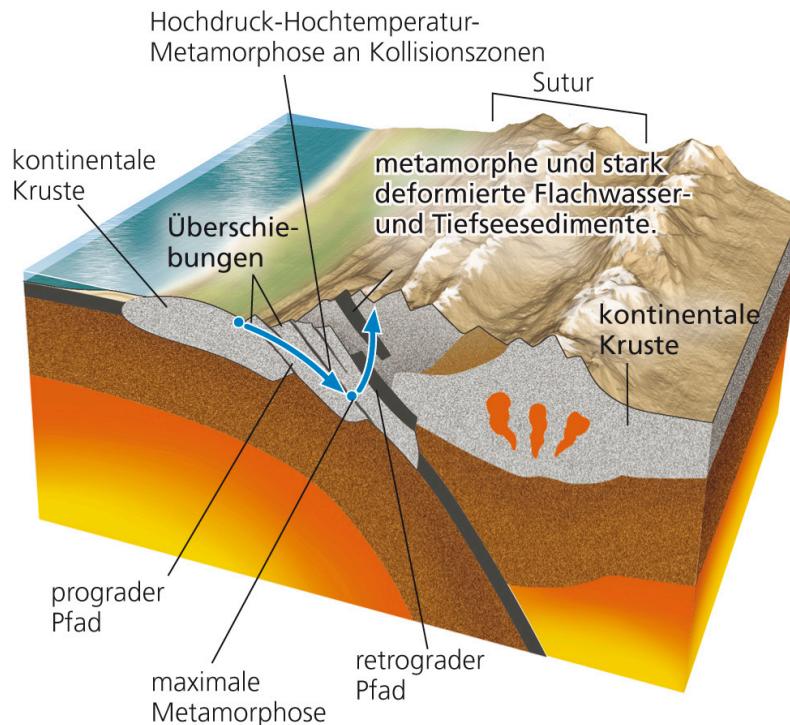




(a)

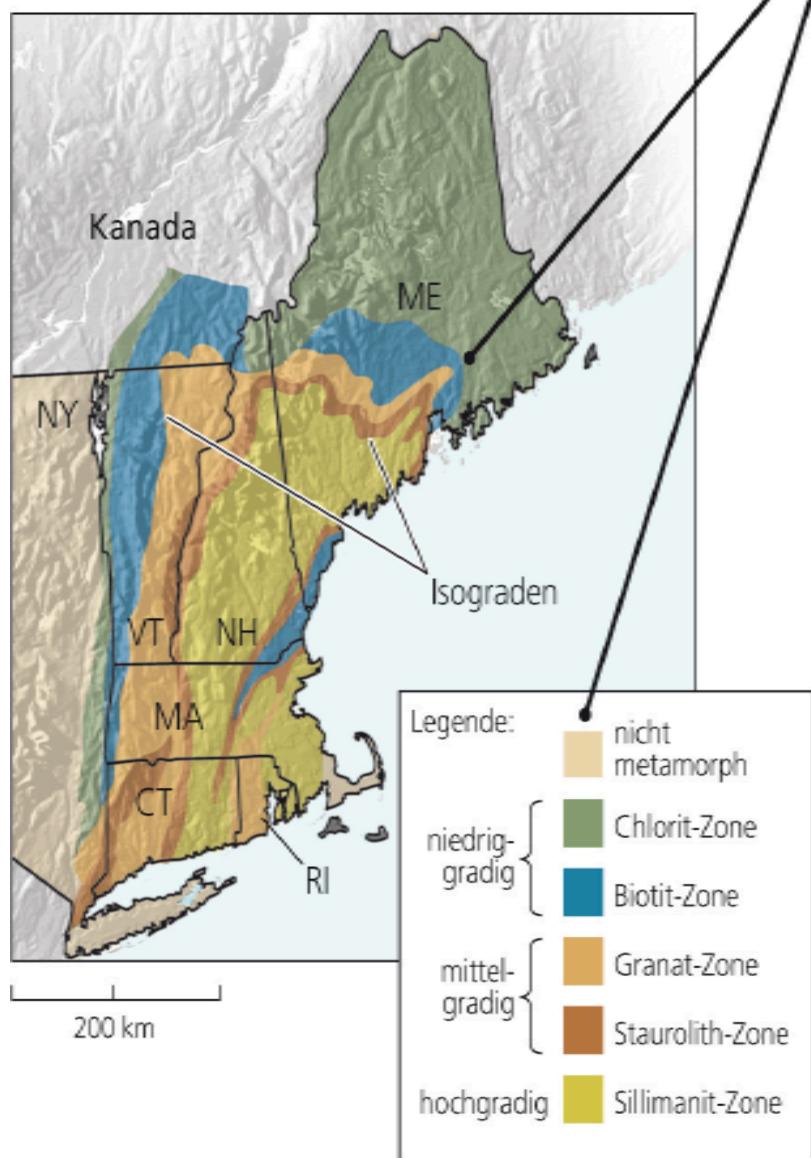


(b)



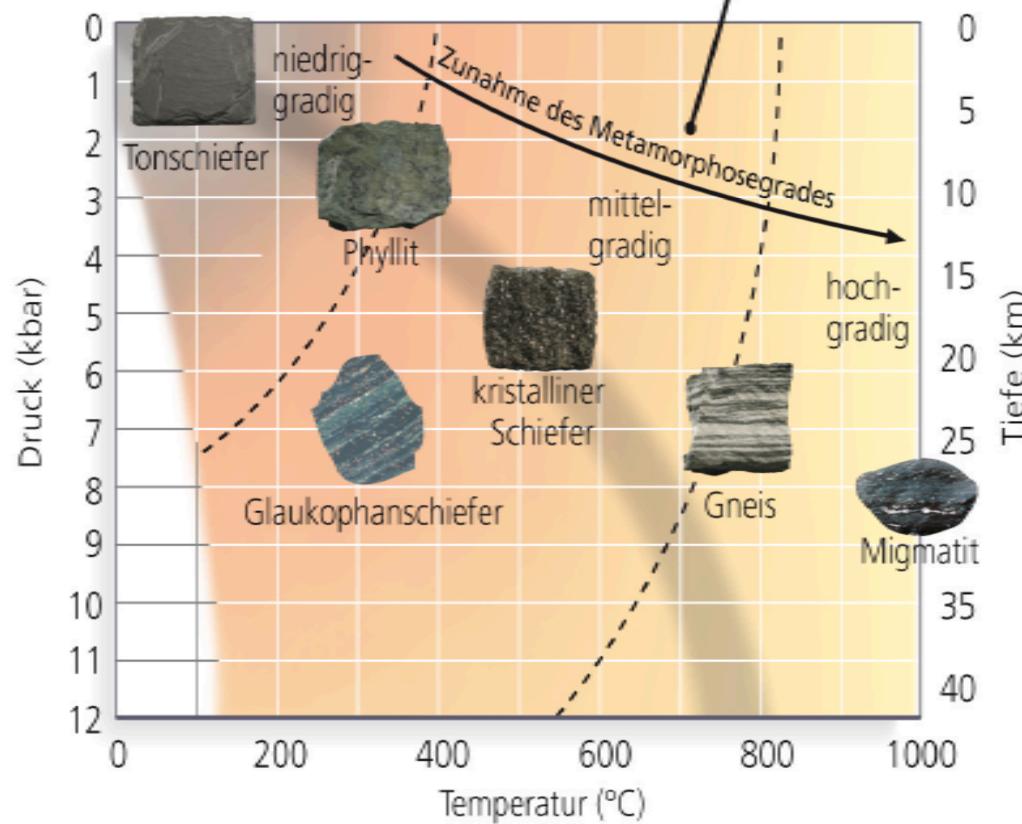
1 Indexminerale charakterisieren bestimmte metamorphe Zonen. In Laboruntersuchungen wurden die Druck- und Temperaturbedingungen ermittelt, bei denen die verschiedenen Gesteine und Minerale entstanden sind.

(a)



2 Isograde – Linien, die den Übergang von einem Mineral zum anderen kennzeichnen – können dazu herangezogen werden, wie hier für Neuengland, Bereiche mit unterschiedlichem Metamorphosegrad gegeneinander abzugrenzen.

(b)



3 Unterliegen Gesteine wie etwa Tonschiefer der Metamorphose, gehen sie von niedrig metamorphen in hoch metamorphe Gesteine über.