

# Metamorphose von Gesteinen

Wenn Gesteine die Bedingungen ihrer Entstehung – Druck, Temperatur, chemische Umgebung – verlassen, wandeln sie sich um. Aus einem Kalkstein wird ein Marmor, aus einem Sandstein ein Quarzit, aus einem Granit ein Gneis, aus einem Basalt oder Gabbro ein Eklogit. Dies nennen wir Gesteinsmetamorphose. An dem anschaulichen und mineralogisch einfachen Beispiel **Basalt** → **Eklogit** erläutern wir die Vorgänge, die bei der Metamorphose ablaufen, und betten sie in die Theorie der Plattentektonik ein.

Das Thema „Metamorphose von Gesteinen“ ist ein weites Feld. Wir werden nur einen kleinen Teil bearbeiten können, in starker Vereinfachung, aber anschaulich.

Am Ende werden wir für das geduldige Lesen mit wunderschönen „Petrographiken“ von Michael M. Raith belohnt.

## **Gliederung**

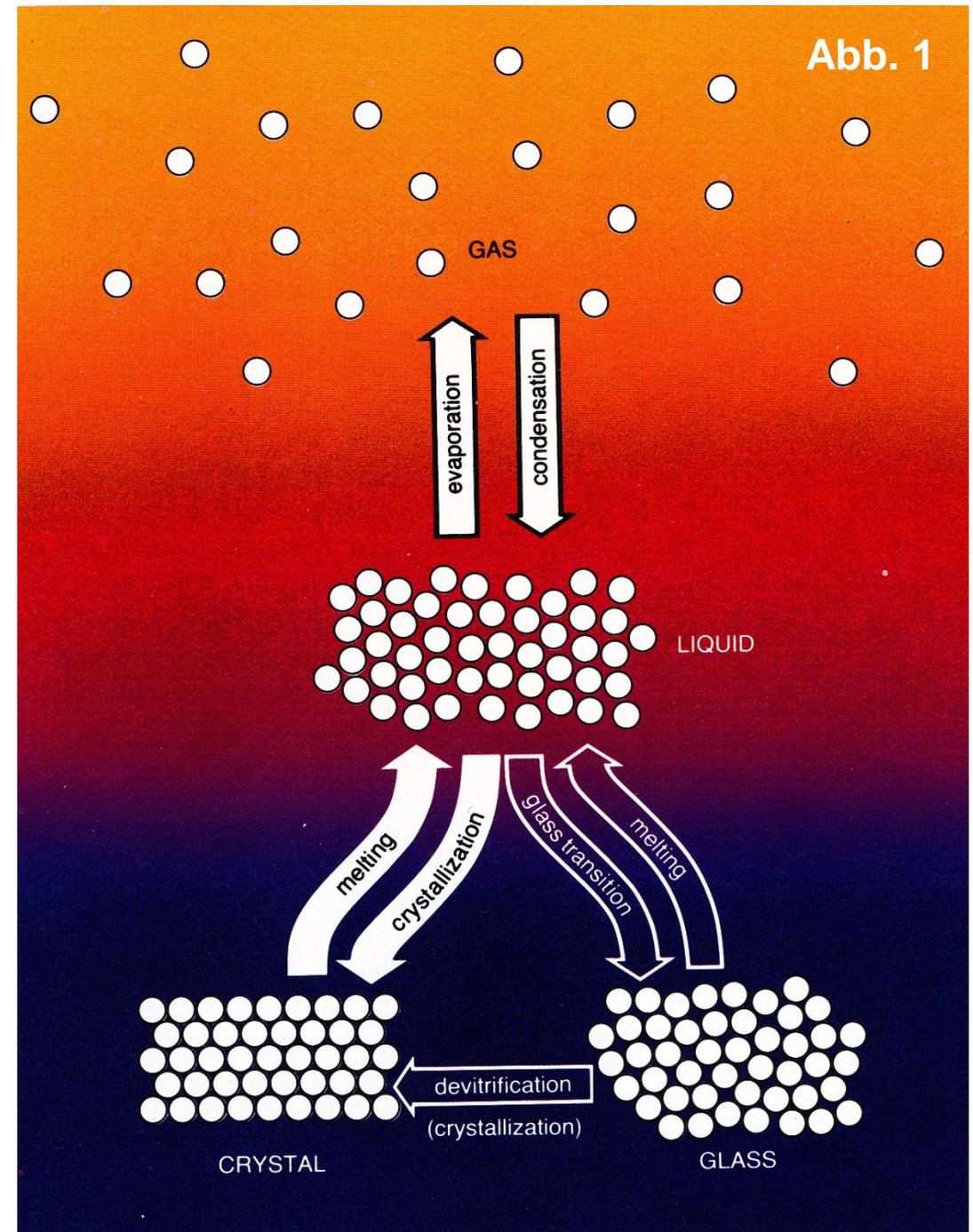
- Grundvorstellungen über Stoffumwandlungen
- Geschichte und Geschichten vom Eklogit
- Basaltentstehung und Plattentektonik
- Paläogeographie und Plattentektonik
- Stationen der Umwandlung Basalt→Eklogit: die fluide Phase
- Eklogit-Entstehung und Vulkanismus
- „Petrographiken“ von Michael M. Raith, Bonn

# Grundvorstellungen über Stoffumwandlungen

Dies ist eine anschauliche Graphik, um einen für die Metamorphose von Gesteinen zentralen Begriff einzuführen: den Begriff **Stabilitätsbereich**. Nehmen wir an, die Graphik würde das Verhalten von  $H_2O$  (in einem thermodynamisch geschlossenen System) darstellen. Dann ist im Temperaturbereich zwischen  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  Wasser die stabile Phase, oder anders ausgedrückt: Bei Normaldruck liegt der Stabilitätsbereich des Wassers zwischen  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Wird der Stabilitätsbereich nach oben verlassen, tritt eine Umwandlung ein, Wasser wird zu Wasserdampf. Verlässt Wasser seinen Stabilitätsbereich nach unten, wandelt es sich um in Eis.

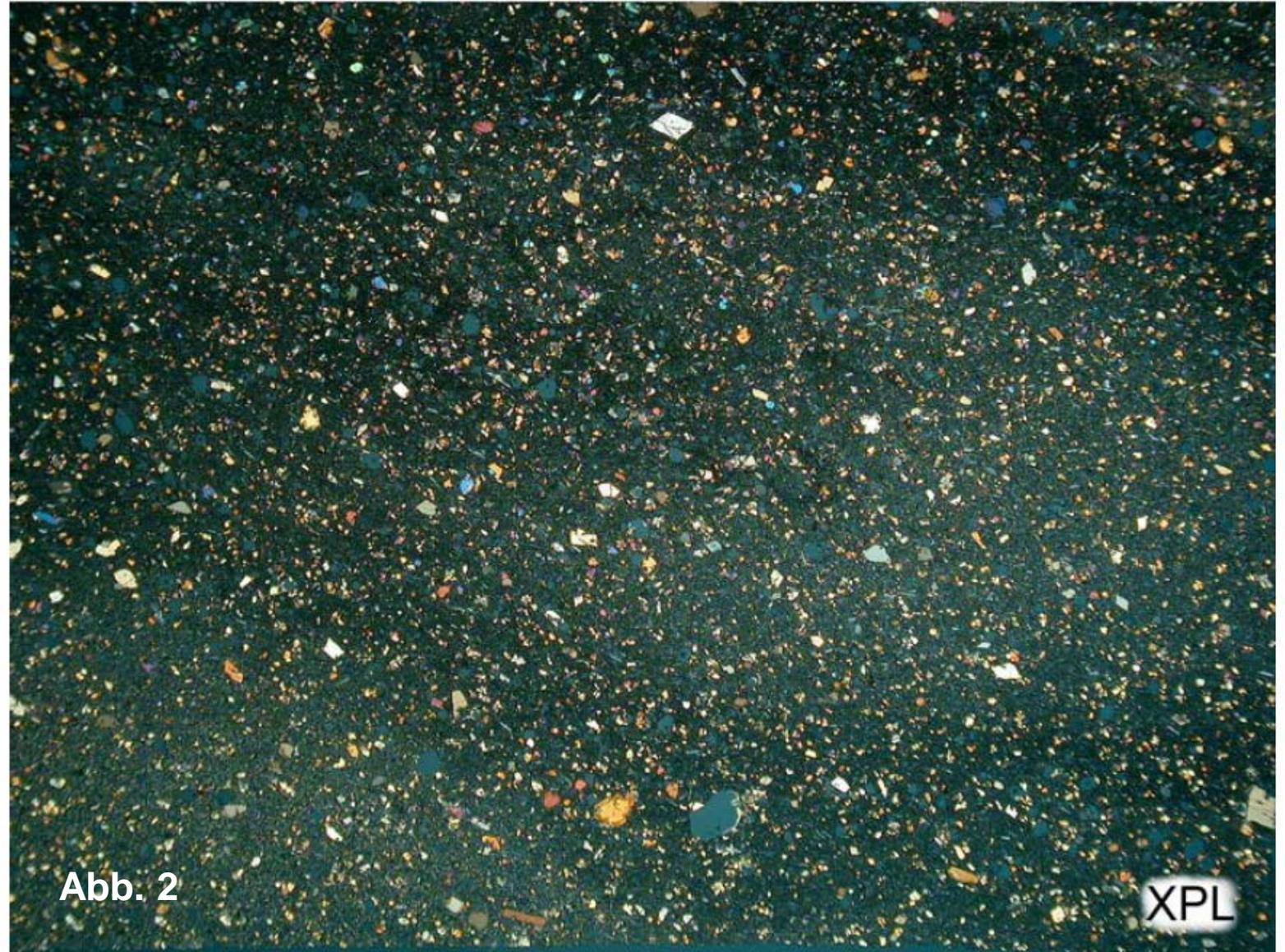
Im Wasserdampf („Gas“) schwirren die  $H_2O$ -Moleküle ungeordnet herum und ballern gegeneinander. Im Wasser sind sie immer noch ungeordnet, aber sie haben miteinander Kontakt („Liquid“). Eis hingegen besteht aus Kristallen. Das Kennzeichen von Kristallen ist eine streng periodische atomare bzw. molekulare Ordnung („Crystal“).

Wasser ist eine dünnflüssige Schmelze. Die Schmelze eines granitischen Gesteins ist demgegenüber extrem zähflüssig. Wenn sie an der Erdoberfläche ausfließt, haben die Moleküle während der Abkühlung keine Zeit, sich zu Kristallen zu ordnen; dann erstarrt die Schmelze zu einem Glas (Obsidian). Ist die silikatische Schmelze relativ dünnflüssig, wie bei einer Basalt-Schmelze, dann wachsen während der Abkühlung immerhin noch kleine Kriställchen.



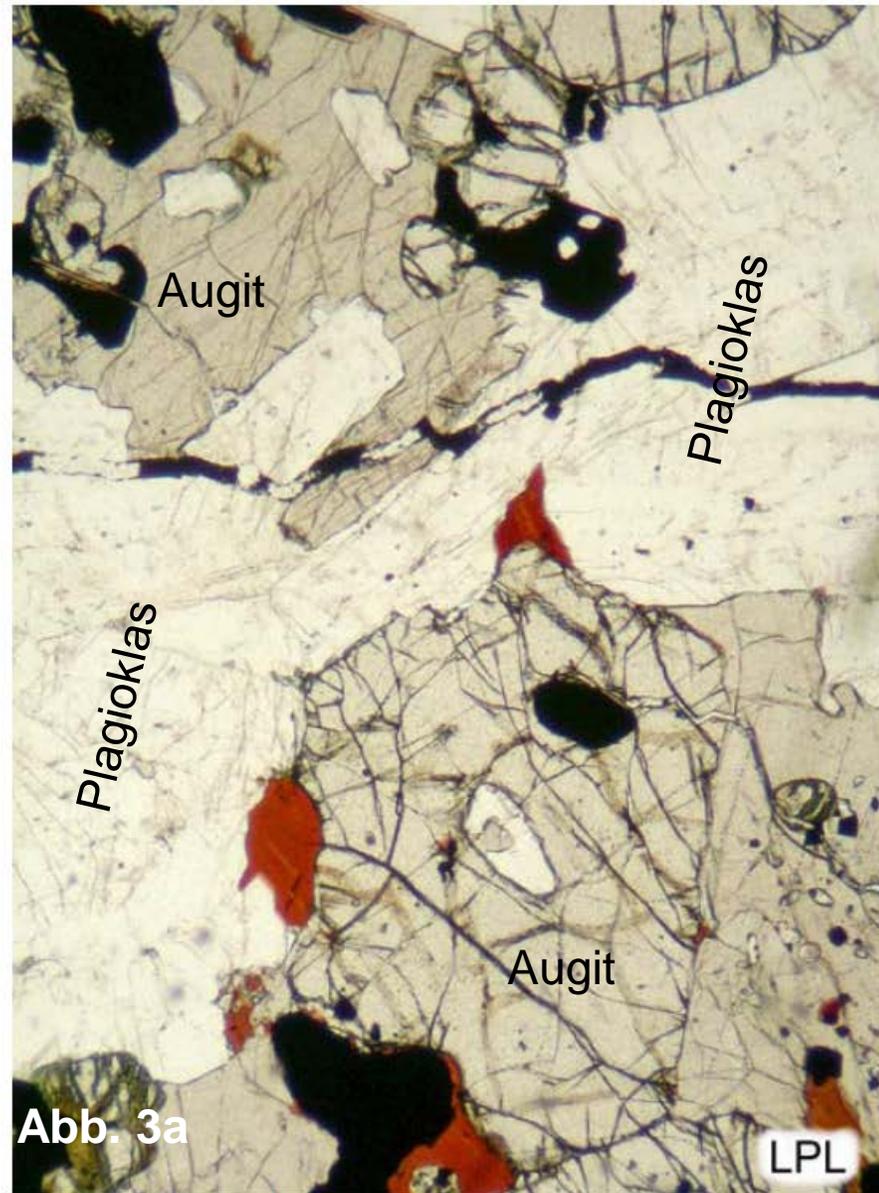
## Der Effekt der Abkühlgeschwindigkeit

Wir sehen in Abb. 2 das Dünnschliffbild eines Basaltes. In einer optisch nicht mehr auflösbaren, vielleicht glasigen Grundmasse liegen kleine Kriställchen, die sich gerade noch bilden konnten, als die Basalt-Schmelze ausfloss und rasch abkühlte.



Übersicht, Bildbreite 3.0 mm

Wenn die basaltische Schmelze nicht ausfließt, sondern in der Tiefe stecken bleibt und langsam erstarrt, bleibt genügend Zeit für die chemischen Komponenten, zu „ihren“ Kristallen zu diffundieren. So entstehen große Kristalle wie in diesem Gabbro. Basalt und Gabbro sind die Namen von zwei Gesteinen, die aus Schmelzen der gleichen Zusammensetzung entstehen: ist die Schmelze an der Oberfläche ausgeflossen, ist das Gestein feinkörnig und heißt dann Basalt, ist sie in der Tiefe stecken geblieben und langsam erstarrt, ist das Gestein grobkörnig und heißt jetzt Gabbro. Beide, Basalt und Gabbro, bestehen mineralogisch aus nur zwei Hauptkomponenten: Feldspat (Var. Plagioklas) und Pyroxen (Var. diopsidischer Augit).



Augit, Plagioklas, Bildbreite 2.1 mm

# Die Umwandlung von Basalt / Gabbro in Eklogit

Wie wir sehen werden, entstehen aus diopsidischem Pyroxen und Plagioklas-Feldspat, den beiden Hauptkomponenten von Basalten und Gabbros, durch die Metamorphose unter hoher Temperatur und hohem Druck zwei neue Mineralarten: der rotbraune Granat und der grüne omphazitische Pyroxen. Die pauschale chemische Zusammensetzung bleibt dabei erhalten. Das neue Gestein heißt **Eklogit**.

*Diopsid: CaMg-Pyroxen  
Niederdruck-Pyroxen*  
*Omphacit: (Ca,Na)(Mg,Al)-Pyroxen  
Hochdruck-Pyroxen*

Michael M. Raith „Eklogit“ Vortrag DVG, Mai 2023

Abb. 4: Raith 2023

1 cm

Foto: H.-P. Schertl, Uni Bochum

Isla Margarita

## Gesteinsmetamorphose

Eine Gesteinsumwandlung, die i. a. durch Versenkung in größere Tiefen und die damit verbundene Zunahme von Druck und Temperatur ausgelöst wird, heißt Metamorphose. Wenn die Ausgangsminerale des Gesteins ihre **Stabilitätsgrenzen** überschreiten, wird der ursprüngliche Mineralbestand umgebaut und den veränderten Druck-Temperatur-Bedingungen angepasst. Es entsteht ein neues Gestein.

Eine große Rolle spielt dabei das Vorhandensein einer **fluiden Phase** (wir kommen später darauf zurück). In einer fluiden Phase werden Atome und Ionen transportiert, wodurch chemische Reaktionen befördert werden, in denen sich neue Minerale auf Kosten der alten bilden. Des Weiteren senkt eine fluide Phase die Schmelztemperatur von Gesteinen.

# EKLOGITE

Repräsentieren Hochdruckgesteine  
subduzierter ozeanischer Erdkruste

---

Markieren die tektonischen Suturen  
zwischen ehemals getrennten Kontinenten

---

Schlüsselgesteine für die Rekonstruktion  
geodynamischer Prozesse

## Geschichte und Geschichten

Sigismund von Hohenwart, Naturforscher, nebenbei Bischof, vier Jahre älter als Goethe, hat um 1800 den Eklogit beim Ort Kupplerbrunn in der Saualpe, heute beliebtes Wandergebiet in Kärnten, entdeckt. Er hat ihn wegen seiner schönen grünen Farbe Smaragdith genannt. 1822 hat René-Just Haüy, der Vater der Kristallographie, den irreführenden Namen Smaragdith geändert in den noch heute gebräuchlichen Namen Eklogit. Haüy wollte mit der Namensgebung betonen, dass die Natur zwei schöne Minerale ausgelesen und in einem Gestein vereinigt hat.

## Historisches

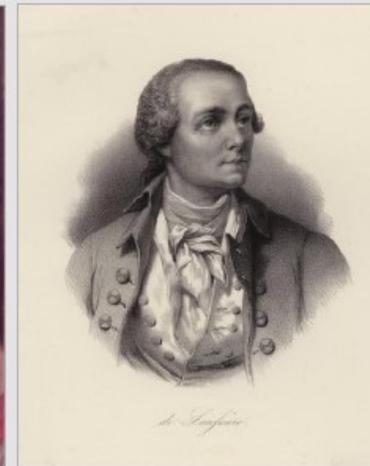
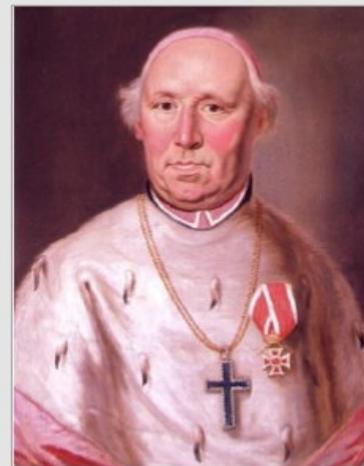
Abb. 6: Raith 2023

# EKLOGIT

**Typlokalität:** Kupplerbrunn  
Saualpe, Kärnten.

- **Erstmals 'entdeckt'** vor etwa 220 Jahren durch **Sigismund v. Hohenwart (1745–1825)**, Naturforscher, Generalvikar und Bischof von Linz zeitgleich mit **Horace-Bénédict de Saussure (1740–1799)**, Alpinist und Naturforscher. *,Voyages dans les Alpes, précédés d'un essai sur l'histoire naturelle des environs de Genève'*. 4 Vols., 1779–1796, S. Fauche, Neuchâtel.
- **Erstmals benannt** 1822 durch **René-Just Haüy (1743–1822)** in seiner *Traité de Minéralogie*, Vol. 2: 456, Vol. 4: 548.  
Name von ἐκλογή (eklogi, Auswahl; „Auslese“)
- **Erstmals näher beschrieben** 1823 durch den Mineralogen **Karl Caesar v. Leonhard (1779–1862)**

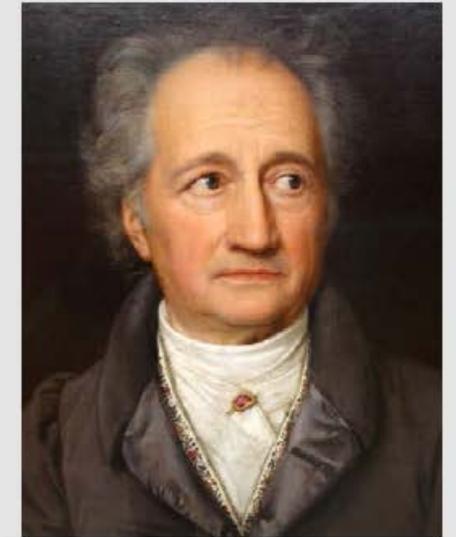
**Literatur:** F. Thiedig (2010). Eklogit – Ein interessantes Kärntner Gestein – Geschichte seiner Entdeckung, Verbreitung und Entstehung. Carinthia II 200./120. Jahrgang, 7–48, Klagenfurt.



# Historisches

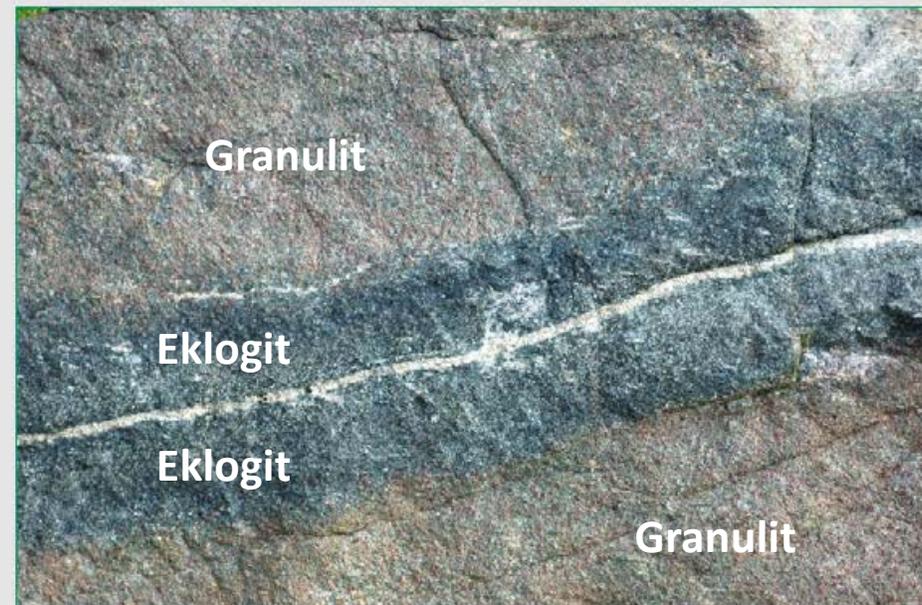
## EKLOGIT

Handstück aus Goethes Mineralsammlung im Gartenpavillon am Frauenplan, Weimar. Dieses Stück kam wahrscheinlich um 1800 in die Hände von Goethe als Präsident der Sozietät für die gesamte Mineralogie zu Jena.



Goethe gründete 1798 in Jena die „Sozietät für die gesamte Mineralogie“. Als Präsident ernannte er sogleich drei Ehrenmitglieder, einer davon war Sigismund von Hohenwart, der sich mit der Übersendung eines schönen Handstücks von Smaragdith artig bedankte.

In Abb. 7 ist ein dünner heller Gang zu sehen. Auf diesem ehemaligen Spalt bewegte sich eine fluide Phase. Sie bewirkte, dass über und unter dem Spalt der grau-grüne Granulit in einer Breite von jeweils ca. 7 cm umgewandelt wurde in den dunkelgrünen Eklogit. Der Granulit hatte zwar sein Stabilitätsfeld verlassen, wandelte sich aber starrköpfig nicht um. Erst die fluide Phase, so weit sie nach oben und unten wirken konnte, katalysierte die Umwandlung unter Lösung der alten und Kristallisation der neuen Minerale.



Eklogit: Typlokalität Kupplerbrunn, Saualpe, Kärnten.



„Smaragdith mit Granaten von Saualpen in Kärnthen. I. v. E.“  
[Graf Franz Josef v. Enzenberg].

Fotos von Aufschluss und Handstück in Goethes Mineralsammlung: F. Thiedig (2010); Porträt: Ölgemälde von Joseph Karl Stieler (1828), Wikipedia.

In seinem Gartenhaus am Frauenplan in Weimar besaß Goethe eine Sammlung von Gesteinen, Mineralen, Fossilien, die sage und schreibe 18.000 Fundstücke umfasste. Wir verbinden mit dem Namen Goethe meist nur den Dichter und vergessen, dass er gleichermaßen ein Naturforscher war. Er verbrachte über viele Jahre die Sommermonate in den böhmischen Bädern (Frau und Sohn hielten in Weimar die Stellung) und traf dort die Berühmtheiten seiner Zeit. Er organisierte Ausflüge in die Umgebung, um Minerale und Gesteine zu sammeln, die er nach Weimar sandte. Die Minerale klassifizierte er nach dem auf äußeren Kennzeichen beruhenden Schema von Abraham Gottlob Werner (1749-1817) (auch Alexander von Humboldt gehörte zu Werners Schülern). Goethe schätzte den gleichaltrigen Werner, war dieser doch der unbeugsame Hauptvertreter des Neptunismus, von dem auch Goethe sich zeitlebens nicht trennen mochte. Neptunisten nahmen an, dass alle Gesteine sich durch Absatz aus dem Meer bilden. Plutonisten meinten, dass Gesteine aus Schmelzen kristallisieren. Der Zank entzündete sich i. w. am Basalt. Goethe war alles Gewalttätige, Eruptive zuwider; er war auch kein Freund der französischen Revolution von 1789. Er neigte vielmehr dem Behutsamen, Evolutionären zu und war entsetzt, als A. v. Humboldt ihm bei einem Besuch in Weimar erklärte, Kaukasus und Himalaya seien durch gewaltige Kräfte und Schmelzen des Erdinneren entstanden. Goethes Reaktion: „Daß ich diese vermaledeite Polterkammer der neuen Weltschöpfung verfluche“.



Abb. 8: Thiedig 2010

Von oben nach unten:

Fast zeitgleich mit von Hohenwart fand de Saussure den Eklogit auch in den Westalpen.

Der Neptunisten-Plutonisten-Streit tobte zwischen 1790 und 1830.

Erste chemische Analysen ergaben, dass Eklogit und Basalt/Gabbro chemisch gleich zusammengesetzt sind.

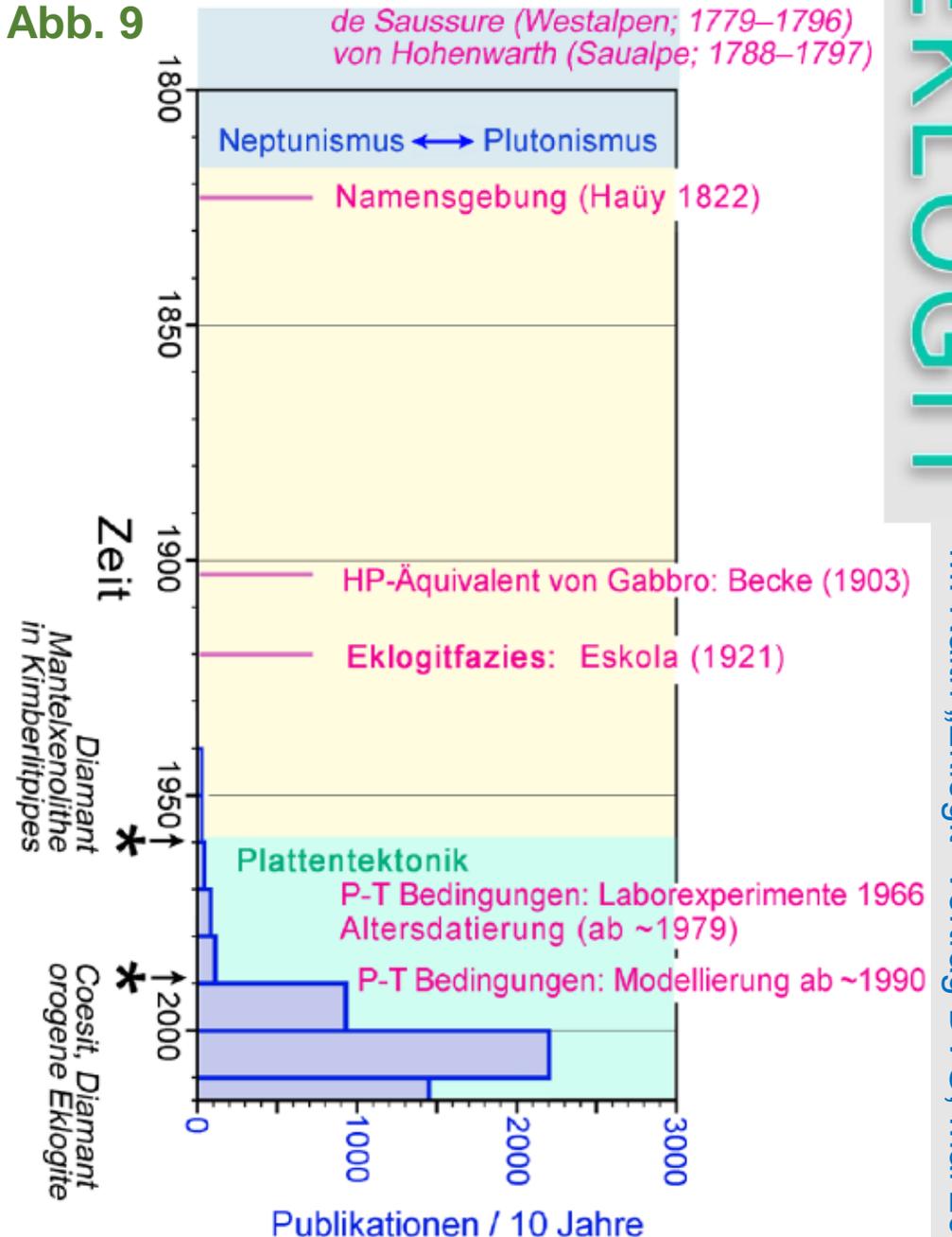
Bereits 1903 entwickelte Friedrich Becke (1855-1931), der als Professor für Mineralogie in Wien über Gesteinsmetamorphose arbeitete, die Idee, dass Eklogit das Hochdruck-Äquivalent (HP=high pressure) von Gabbro ist.

Pentti E. Eskola (1883-1964), Professor für Mineralogie in Helsinki, führte den Begriff der **Fazies** ein, womit der Druck-Temperaturbereich gemeint ist, in dem bestimmte Mineralparagenesen (=Mineralgesellschaften), wie z. B. der Granulit oder der Eklogit, stabil sind (Stabilitätsbereich).

Die Theorie der Plattentektonik trat ab der Mitte der sechziger Jahre ihren Siegeszug an.

Ab ungefähr 1990 waren die Rechnerleistungen ausreichend, um Software zu entwickeln, die aufgrund thermodynamischer Parameter von Mineralen gestattete, auszurechnen, welche Mineralparagenesen bei gegebenem Pauschalchemismus bei welchen Druck-Temperatur-Bedingungen stabil sind (Berechnung von Stabilitätsbereichen).

Abb. 9



## Das Mosaik der Lithosphärenplatten

Die äußere Schale der Erde besteht aus weitgehend starren Gesteinsplatten, den sog. **Lithosphärenplatten** (griech. *lithos*: fest). Unter den Ozeanen sind sie ca. 75 km dick, unter den Kontinenten ca. 150 km. In Abb. 10 sehen wir das Mosaik der kleinen und großen Platten. Die Platten bewegen sich gegeneinander, reiben aneinander, tauchen untereinander ab. Markante Plattengrenzen sind mittelozeanische Rücken (grün) und Subduktionszonen (rot), an denen eine Platte unter die andere abtaucht.

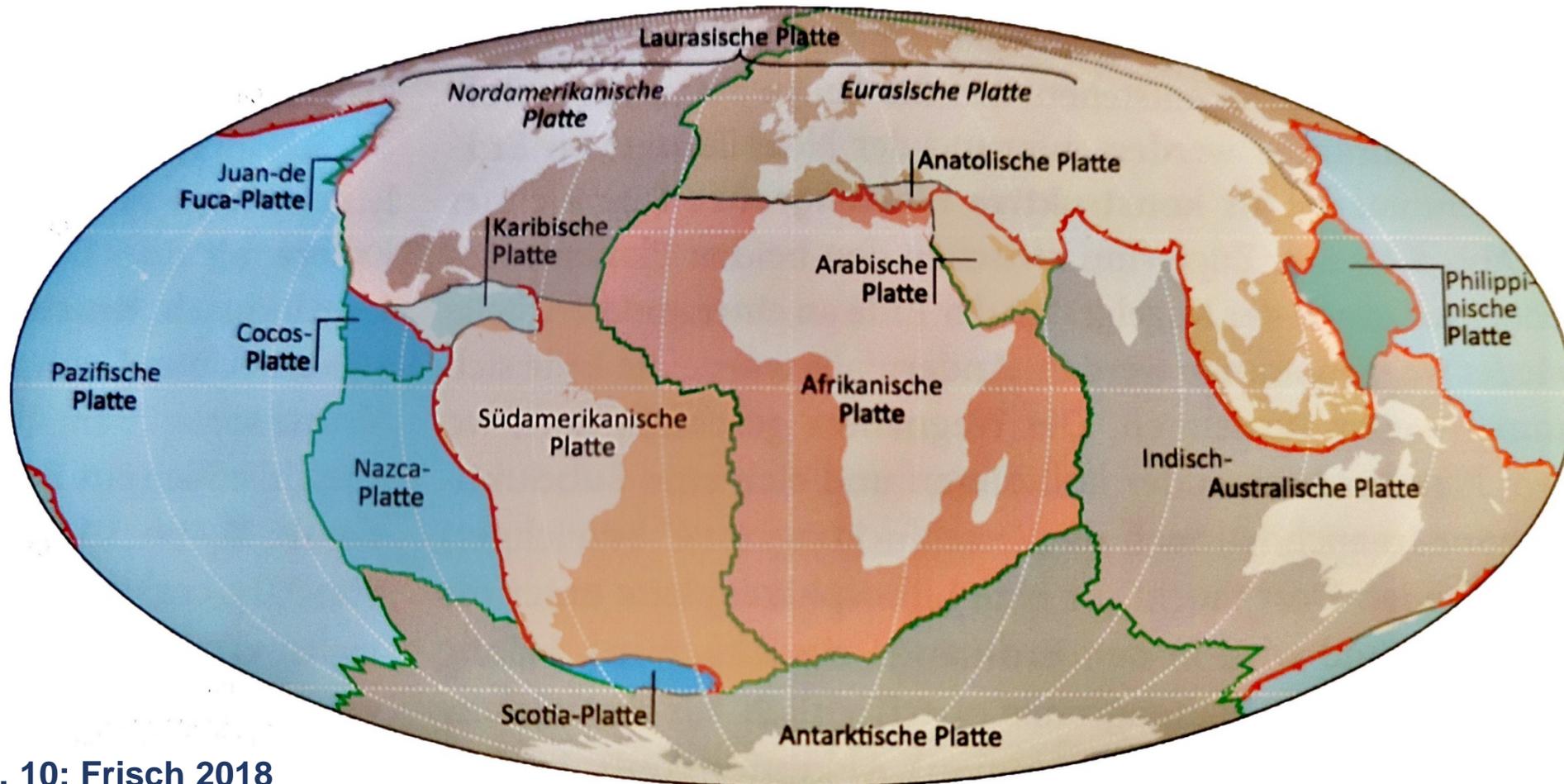


Abb. 10: Frisch 2018

## Basaltentstehung und Plattentektonik

In Abb. 11 sehen wir einen Schnitt durch die kontinentale Südamerikanische Lithosphärenplatte und durch zwei ozeanische Lithosphärenplatten, die Nazca- und die Ostpazifische Platte. Die beiden ozeanischen Platten driften am Ostpazifischen Rücken mit einer Geschwindigkeit von ca. 10 cm auseinander, die Nazca-Platte taucht im Osten unter die Südamerikanische Platte, die Ostpazifische Platte taucht im Westen unter pazifische Inselbögen. Man sagt die Platten werden subduziert.

**Die Lithosphärenplatten bestehen aus zwei Anteilen:** (1) aus ozeanischer (grün) bzw. kontinentaler Erdkruste (braun) **und** (2) aus lithosphärischem Mantel, d. i. der oberste, starre Teil des Erdmantels, 70 km dick (olivgrün). Aus diesen beiden Komponenten zusammen, Kruste plus lithosphärischem Mantel, besteht also die feste äußere Gesteinsschale der Erde. Die ozeanische Kruste ist dünn, nur 6-8 km mächtig. Sie ist außerdem jung, maximal 150 Mio. Jahre. Sie besteht aus Gesteinen, die aus basaltischer Schmelze entstanden sind. Die kontinentale Kruste dagegen ist im Mittel 40 km mächtig, unter Gebirgen 75 km, und sie ist uralt, 1-4 Milliarden Jahre. Sie ist sehr variabel aufgebaut aus magmatischen, metamorphen und sedimentären Gesteinen unterschiedlichster Zusammensetzung. Ihre Dichte beträgt nur 2,7-2,8 g/cm<sup>3</sup>, die der ozeanischen Kruste ist deutlich höher mit 3,0 g/cm<sup>3</sup>.

Unter dem starren lithosphärischen Mantel schließt sich der **asthenosphärische Mantel** an (griech. *asthenos*: schwach). Er ist zu einem geringen Teil, vielleicht zu 3-5%, aufgeschmolzen und daher plastisch fließfähig. Auf ihm bewegen sich die Lithosphärenplatten, angetrieben durch Konvektionsströme.

Unter der Spreizungsachse des Ostpazifischen Rückens steigt asthenosphärischer Material auf und gerät unter verminderten Druck. Unter der Druckentlastung bilden sich Teilschmelzen. **Diese Teilschmelzen besitzen basaltische Zusammensetzung.** Zum Teil fließen sie am Meeresboden aus, erstarren glasig bis feinkörnig (Kissenlaven) und bilden eine ca. 1 km mächtige Lage. Darunter schließt sich ein steilstehender Gangkomplex an, ca. 1-2 km mächtig, und unter ihm bilden sich aus der stecken-gebliebenen, sich langsam abkühlenden Schmelze massive Gabbros, ca. 3-6 km mächtig.

Der asthenosphärische Mantel besteht i. w. aus folgenden vier Mineralen:

Olivin	(Mg,Fe)SiO <sub>4</sub>	(60%)	Clinopyroxen	(Ca,Mg,Fe,Na)[(Al,Si)O <sub>3</sub> ]	(10-15%)
Orthopyroxen	(Mg,Fe,Na)[(Al,Si)O <sub>3</sub> ]	(10-15%)	Granat	(Mg,Fe,Ca) <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> [SiO <sub>4</sub> ] <sub>3</sub>	(10-15%)



Die Nazca-Platte driftet mit einer Geschwindigkeit von 10-15 cm/Jahr auf den südamerikanischen Kontinent zu. Basalte und Gabbros, die sich heute am Ostpazifischen Rücken bilden, werden nach ca. 30 Mio. Jahren unter Südamerika abtauchen. Ein Kontinentrand dieses Typs heißt **aktiver Kontinentrand**. Bei **passiven Kontinenträndern** dagegen „klebt“ ozeanische an kontinentaler Lithosphäre, ohne subduziert zu werden. Ein schönes Beispiel sind die Kontinentränder des Atlantiks.

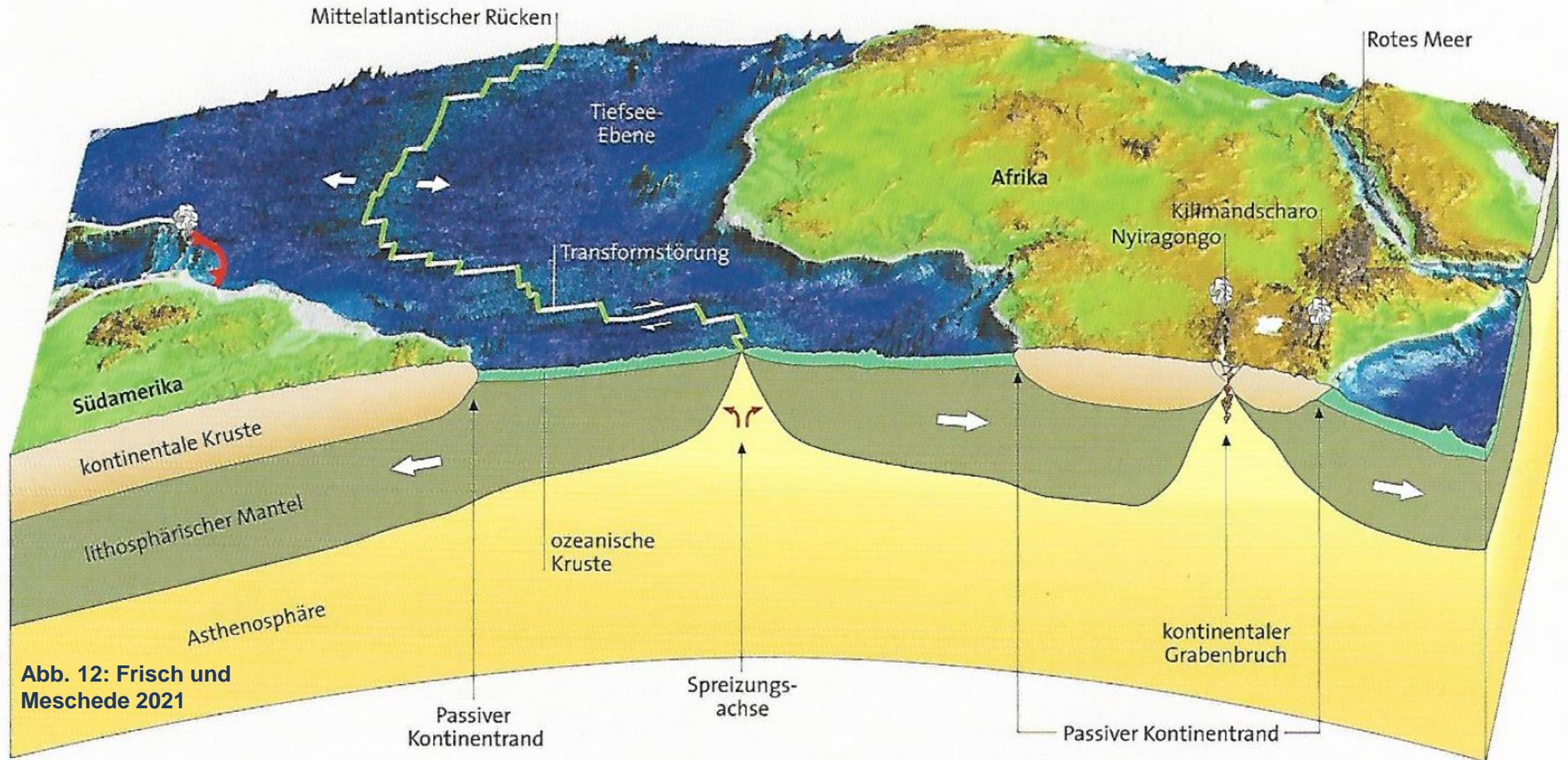


Abb. 12: Frisch und Meschede 2021

Zur Zeit des Perm und der Trias, vor 300 bis 200 Mio. Jahren, waren alle Kontinente zu einem Riesenkontinent vereinigt (**Pangäa**). Er begann im Jura aufzubrechen. Abb.13 zeigt die Situation im späten Jura, vor 150 Mio. J., der Südatlantik entsteht gerade.

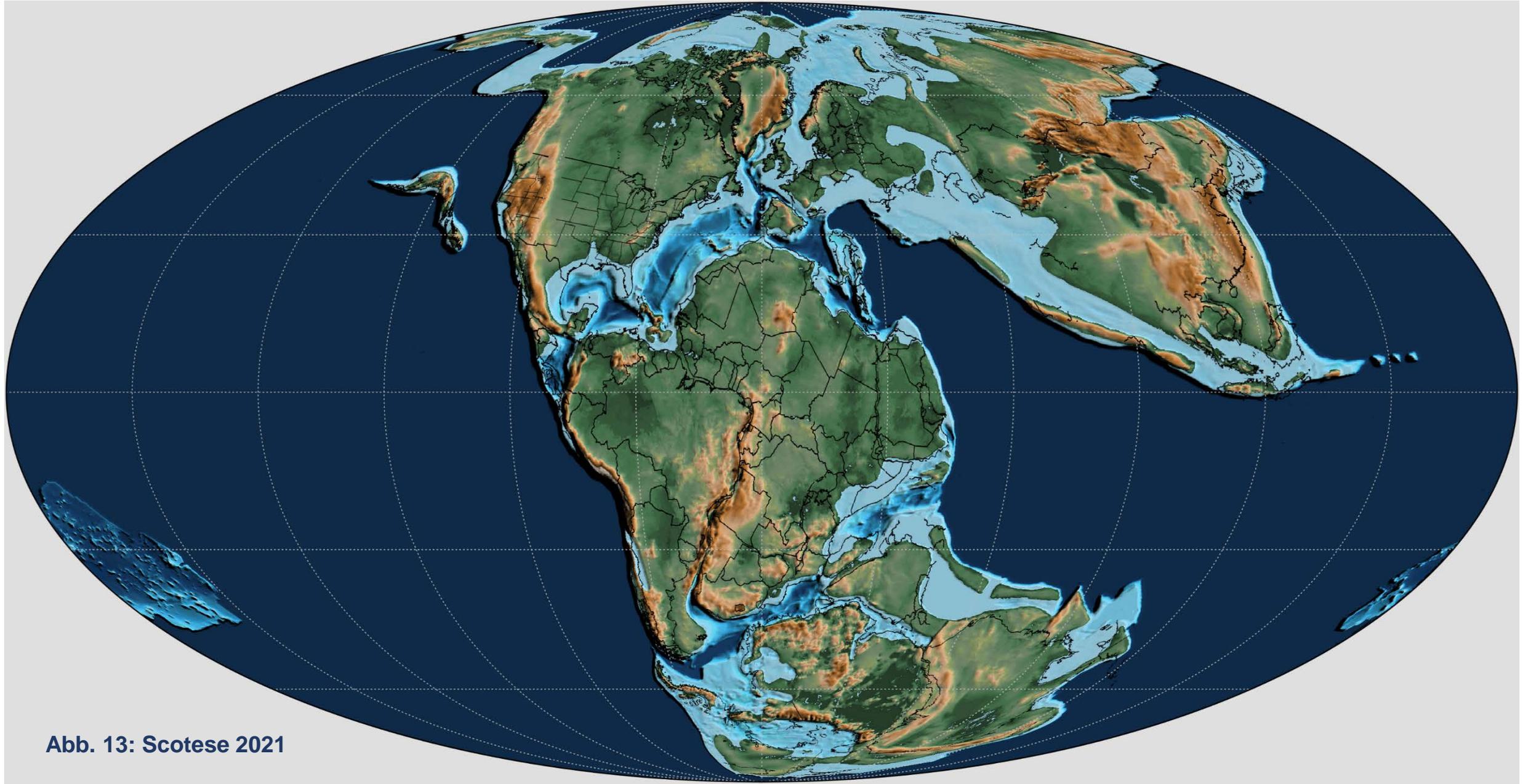


Abb. 13: Scotese 2021

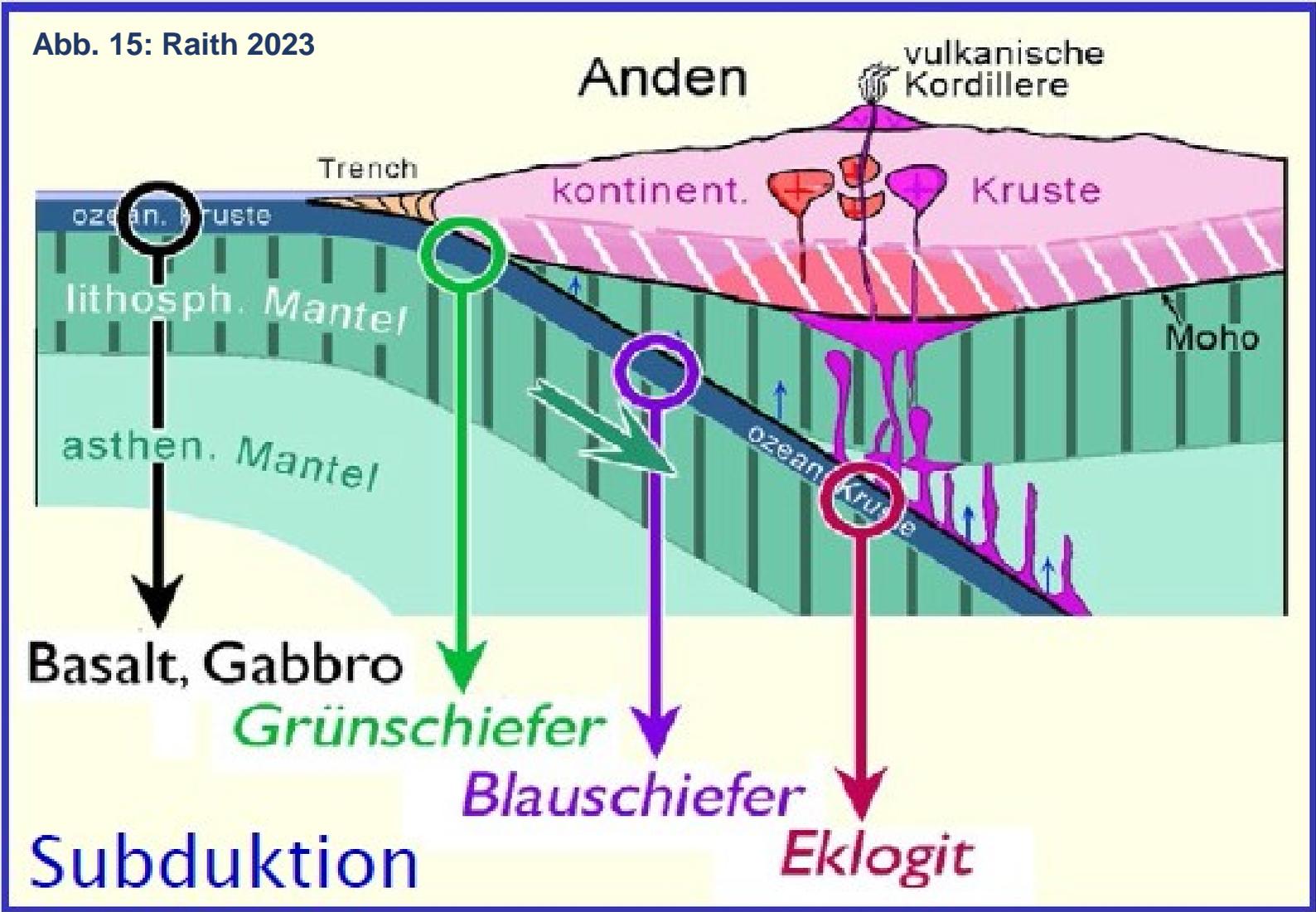
Die ozeanische Kruste, die sich vor 150 Mio. Jahren beim Aufbrechen von Afrika und Südamerika gebildet hat, „klebt“ heute *passiv* an den Küsten der beiden Kontinente.



Abb. 14: Scotese 2021

# Subduktion der Nazca-Platte unter Südamerika

Wir betrachten jetzt einen vereinfachten Schnitt durch den südamerikanischen Kontinent. Basalt und Gabbro sind nach einer Reise von 30 Mio. Jahren am Kontinentrand angekommen. Sie sind nicht mehr die frischesten. Das Unglück begann schon kurz nach ihrer Kristallisation am Ostpazifischen Rücken. Bei der Abkühlung bildete sich ein Netzwerk von feinsten bis groben Schrumpfrissen, auf denen das Pazifikwasser zutritt hatte und bei den noch herrschenden hohen Temperaturen mit den Pyroxenen zu grünen, H<sub>2</sub>O- bzw. OH-haltigen Chloriten u. a. Mineralen reagierte. Dieser **Grünstein** wird beim Abtauchen zunächst geschiefert, dann metamorph zu Blauschiefer und schließlich zu Eklogit umgewandelt. Wir betrachten zunächst Anfangs- und Endzustand und dann die Zwischenschritte.



## Die Neuverteilung der chemischen Elemente

Basalte und Gabbros bestehen i. w. aus nur zwei Mineralarten, genauso wie der Eklogit. Um uns nicht in Details zu verlieren, begnügen wir uns mit einfachen chemischen Zusammensetzungen.

Bei der Umwandlung Basalt → Eklogit werden die chemischen Elemente auf neue Minerale verteilt. Feldspäte (hier Var. Plagioklas) besitzen eine lockere Struktur und brechen bei hohem Druck zusammen. Ihre NaAl-Komponente geben sie an Diopsid ab, der ein Niederdruck-Pyroxen ist und durch die Aufnahme von NaAl zu einem Hochdruck-Pyroxen wird (Omphacit). Die Hälfte seines CaMg-Gehaltes stiftet der Diopsid, um den Granat aufzubauen. Die  $\text{CaAl}_2$ -Komponente, die dem Granat noch fehlt, holt er sich vom Plagioklas, der damit vollends von der Bildfläche verschwindet. Wie zu erwarten, führt der Umbau von einem Niederdruck- zu einem Hochdruckgestein zu einem Anstieg der Dichte. Sie steigt von  $3.0 \text{ g/cm}^3$  (Basalt/Gabbro) auf  $3,5\text{-}3,6 \text{ g/cm}^3$  (Eklogit).

### Basalt, Gabbro

Plagioklas (Fsp)



NaAl+CaAl<sub>2</sub>

+

Diopsid



CaMg+ CaMg

→ Eklogit

→

Granat



CaCaAl+MgAl

+

Omphacit



CaMg+NaAl

Abb. 16

## Die Zwischenschritte der Metamorphose Basalt/Gabbro → Eklogit

Die beiden Endglieder, Basalt/Gabbro und Eklogit, führen „wasser“-freie (= OH-freie) Minerale. Wir haben gesehen, dass nach Erstarren der basaltischen Schmelze Basalt und Gabbro in **Grünstein** umgewandelt werden, bei dem der „wasser“-freie Pyroxen durch „wasser“-haltige Minerale ersetzt ist: Chlorit, Epidot, Aktinolith (sog. Ozeanboden-Metamorphose). Geraten die Grünsteine in die Subduktion, werden sie zunächst geschiefert: **Grünschiefer** (s. nächste S.). Bei weiterem Druckanstieg bilden sich aus den alten neue wasserhaltige Minerale. Charakteristisch ist das Auftreten von blauem Glaukophan, ein Amphibol, der dem **Blauschiefer** seinen Namen gibt.

## Die Entstehung der H<sub>2</sub>O-reichen fluiden Phase

Je nach erreichter Temperatur überschreiten schließlich in Tiefen zwischen 50-80 km die „wasser“-führenden Minerale ihre Stabilitätsbereiche (s. nächste Abb.), sie werden instabil, „Wasser“ wird als hochgespannte, aggressive, H<sub>2</sub>O-reiche fluide Phase entlassen, und es bilden sich die „trockenen“ Minerale des **Eklogits**, Granat und Omphacit.

Die entlassene fluide Phase agiert im Mantelkeil über der Subduktionszone (s. vorletzte Abb.) wie ein Flussmittel, sie lässt die Schmelztemperatur der Mantelgesteine drastisch sinken. Schlauchförmige Schmelzbereiche sammeln sich an der Kruste/Mantel-Grenze, tropfen nach oben, heizen die Krustengesteine auf und lassen große granitoide Magmenkörper entstehen. Der riesige Yosemite-Granit, der einmal tief in der Erde gesteckt hat und heute frei-erodiert an der Oberfläche ansteht, ist ein anschauliches Beispiel. Die basaltartigen Schmelzen verändern sich bei ihrem Aufstieg durch die Kruste zu andesitischen und verwandten Schmelzen (der Andesit ist benannt nach den südamerikanischen Anden).

Die Vulkankette der Anden ist also Folge der Freisetzung von „Wasser“ bei der Eklogitbildung, und letztendlich pusten die andinen Vulkane einen Teil des Pazifik-Wassers wieder aus, das die Grünsteine vom Ostpazifischen Rücken bis in die Tiefen transportiert haben, in denen sich schließlich Eklogit bildete, der dieses Wasser wieder frei gab.

## Die „wasser“-speichernden Gesteine Grünschiefer und Blauschiefer

Die Endglieder der Metamorphose-Reihe, Basalt/Gabbro und Eklogit, bestehen aus „wasser“-freien Mineralen, die Zwischenstufen dagegen überwiegend aus „wasser“-haltigen Mineralen. Bei der Eklogit-Bildung wird das „Wasser“ freigesetzt und bewirkt als H<sub>2</sub>O-reiche fluide Phase Schmelzbildung im Mantelkeil über der Subduktionszone.

<b>Basalt, Gabbro:</b>	Feldspat (Plagioklas)	$(\text{Na}_x\text{Ca}_{1-x})[\text{Al}_{2-x}\text{Si}_{2+x}\text{O}_8]$
	Niederdruck-Pyroxen (Diopsid)	$\text{Ca}(\text{Mg},\text{Fe})[\text{Si}_2\text{O}_6]$
<b>Grünschiefer:</b>	Chlorit	$(\text{Mg},\text{Fe})_5\text{Al}[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8]$
	Epidot	$\text{CaAl}_2(\text{Al},\text{Fe}^{3+})\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$
	Aktinolith	$\text{Ca}_2(\text{Mg},\text{Fe})_5[\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2]$
	Albit	$\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$
	± Quarz ± Karbonat ± Muskovit	
<b>Blauschiefer:</b>	Glaukophan	$\text{NaCa}(\text{Mg},\text{Fe})_3\text{Al}_2[\text{AlSi}_7\text{O}_{22}(\text{OH})_2]$
	Lawsonit	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2\text{H}_2\text{O}$
	Chlorit	$(\text{Mg},\text{Fe})_5\text{Al}[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8]$
	Phengit	$\text{K}(\text{Mg},\text{Fe})_{0.5}\text{Al}_2\text{Si}_{3.5}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
	Albit	$\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$
<b>Eklogit:</b>	Granat	$(\text{Ca},\text{Mg},\text{Fe})_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$
	Hochdruck-Pyroxen (Omphacit)	$(\text{Ca}_x\text{Na}_{1-x})(\text{Mg}_x\text{Al}_{1-x})[\text{Si}_2\text{O}_6]$

Blicken wir über den andinen Tellerrand hinaus, erkennen wir im ganzen Umfang die Bedeutung der fluiden Phase, die bei der Eklogit-Bildung frei wird. Die (roten) Subduktionszonen werden nicht nur in den Anden, sondern weltweit in einem Abstand von einigen Zehnerkilometern von Vulkanketten (blassrote Dreiecke) begleitet. Schuld ist die fluide Phase, die im überliegenden Gestein dessen Schmelzpunkt erniedrigt und dadurch magmatische Schmelzen erzeugt, die an Vulkanen austreten können.

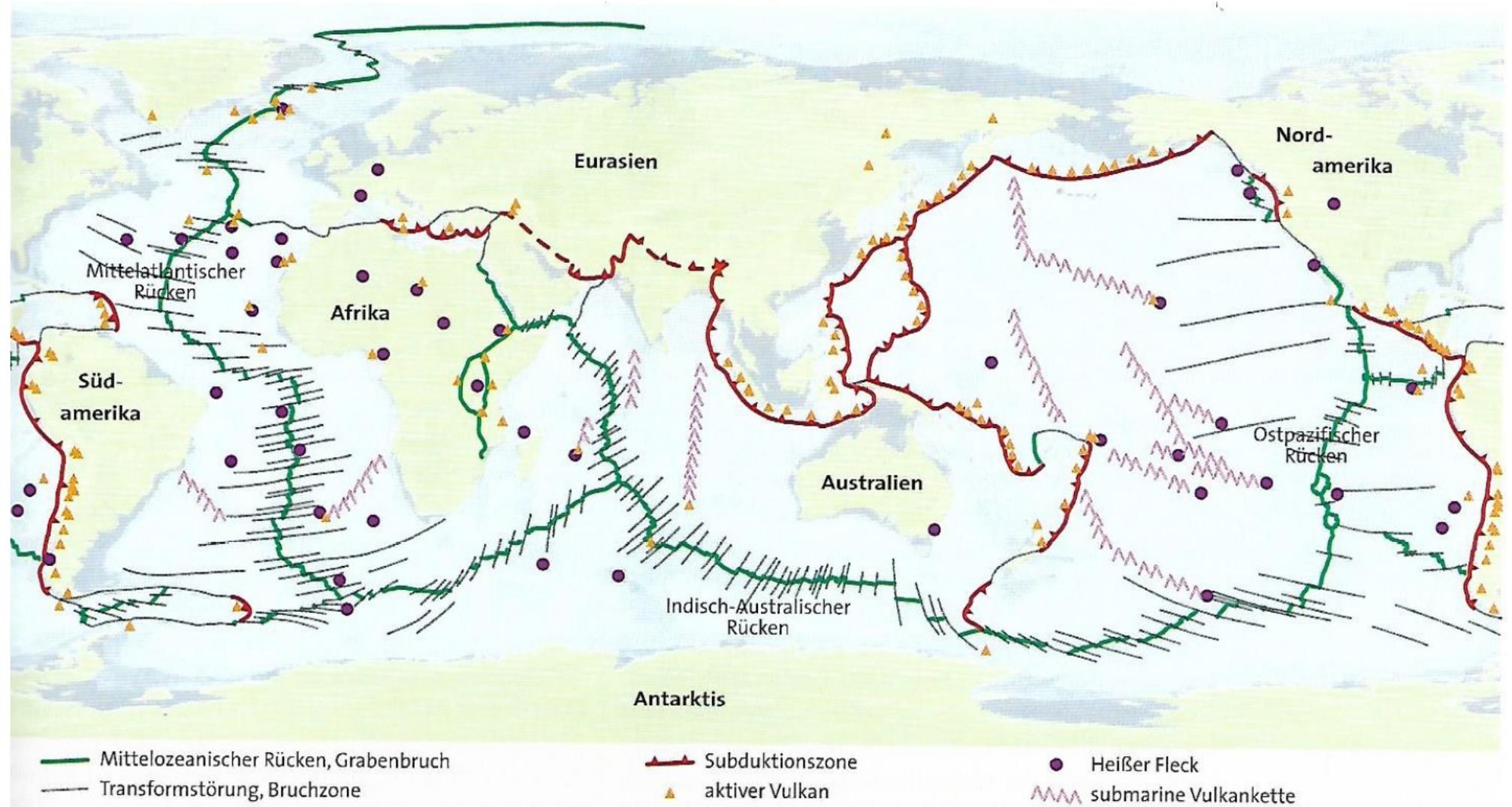


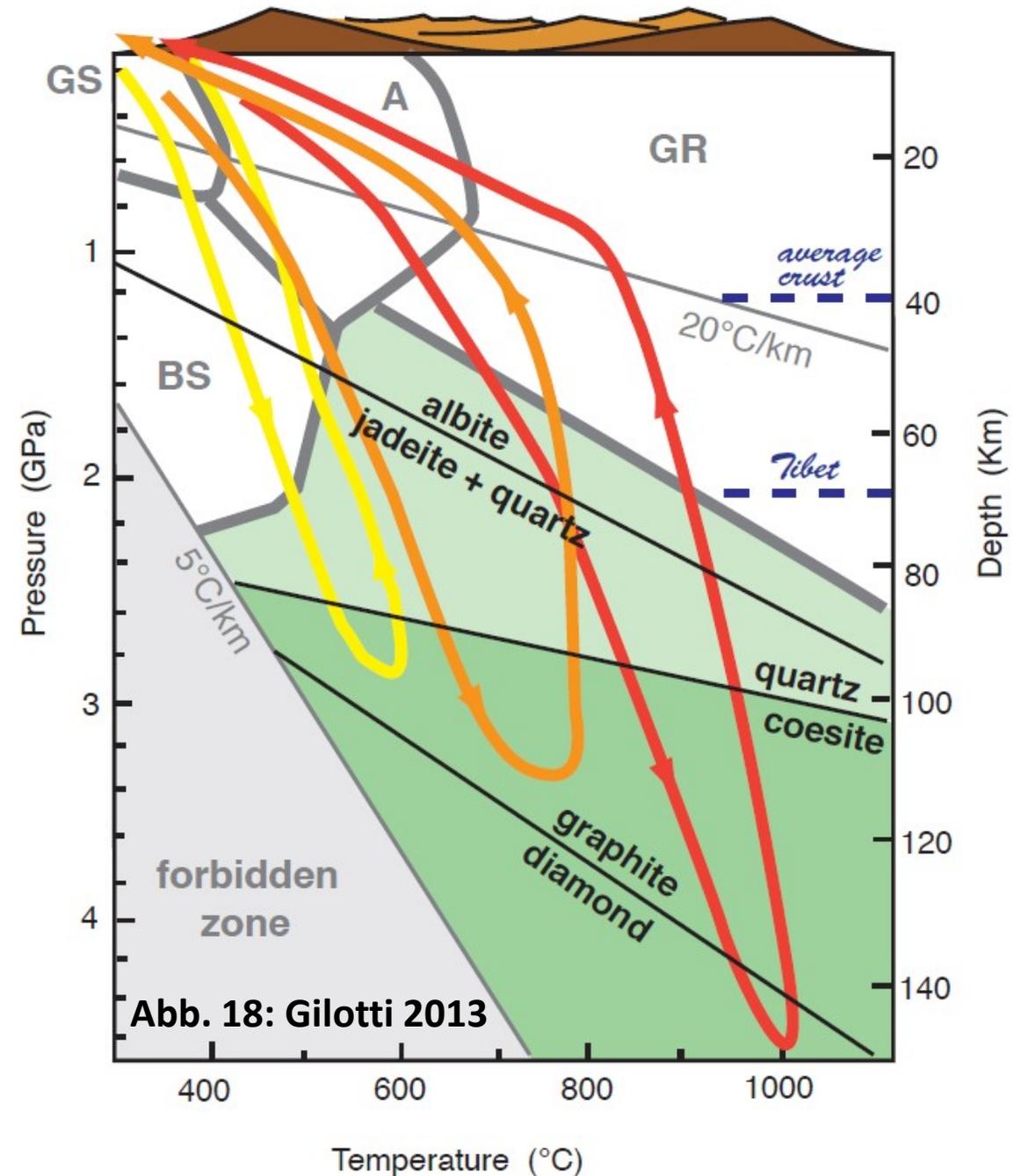
Abb. 17: Karte der Erde mit den wichtigsten plattentektonischen Merkmalen (Frisch und Meschede 2021)

## Druck-Temperatur-Pfade (PT-Pfade)

Im Diagramm sind in Schleifenform drei Abstiegs- und Aufstiegs-szenarien eingezeichnet. Der Abstiegs Pfad der gelben Schleife repräsentiert die Subduktion unter die Anden. Der vergrünte Basalt/Gabbro durchläuft zunächst den Grünschiefer-Faziesbereich (GS), tritt dann in den Blauschiefer-Bereich (BS) und erreicht schließlich den großen, grün markierten Bereich der Eklogit-Fazies. Dabei überschreitet das Gestein die Quarz/Coesit-Grenze, ehe es nach langem Aufstieg wieder an der Erdoberfläche auftaucht (wir kommen auf der nächsten Seite darauf zurück).

Mit der Quarz/Coesit-Grenze hat es folgende Bewandnis. Quarz ( $\text{SiO}_2$ ) besitzt einen Stabilitätsbereich, der je nach Temperatur bis in 80-100 km Tiefe reicht. Aber schließlich muss bei weiter steigendem Druck auch Quarz nachgeben und wandelt sich in eine neue Kristallstruktur des  $\text{SiO}_2$ , den **Coesit**, um. Man sagt, Quarz und Coesit sind zwei Modifikationen des  $\text{SiO}_2$  (es gibt noch weitere).

Wie erwartet, hat Coesit als Hochdruck-Mineral eine höhere Dichte als Quarz:  $2.9 \text{ g/cm}^3$  verglichen mit  $2,65 \text{ g/cm}^3$  für Quarz.



So weit, so gut. Es bleiben aber drei nahe liegende Fragen: (1) Wenn Eklogit in so großen Tiefen gebildet wird, wie kommt er wieder an die Oberfläche? (2) Wie kann Eklogit überhaupt als Eklogit an der Oberfläche anstehen, wenn er doch beim Aufstieg seinen Stabilitätsbereich längst verlassen hat? (3) Wie können wir wissen, ob ein Eklogit die Quarz/Coesit-Grenze überschritten hat?

Wir fangen mit **Frage (3)** an. Wenn ein Granatkristall wächst, umschließt er dabei häufig andere, schon existierende Mineralkörner, z. B. Quarz, der akzessorisch (untergeordnet) auch in Eklogiten vorkommt. Hat sich Coesit gebildet und will sich rückumwandeln, hält der harte Granat dagegen. Der sich bildende Quarz verlangt nämlich zusätzlichen Raum, denn er besitzt ein größeres (Mol-) Volumen als der Ausgangs-Coesit. Manchmal findet man deshalb einen Einschluss, bei dem im Kern Coesit überlebt hat, umgeben von einem Quarzring. Die gewaltsame Ausdehnung hat im Granat Radialrisse erzeugt.

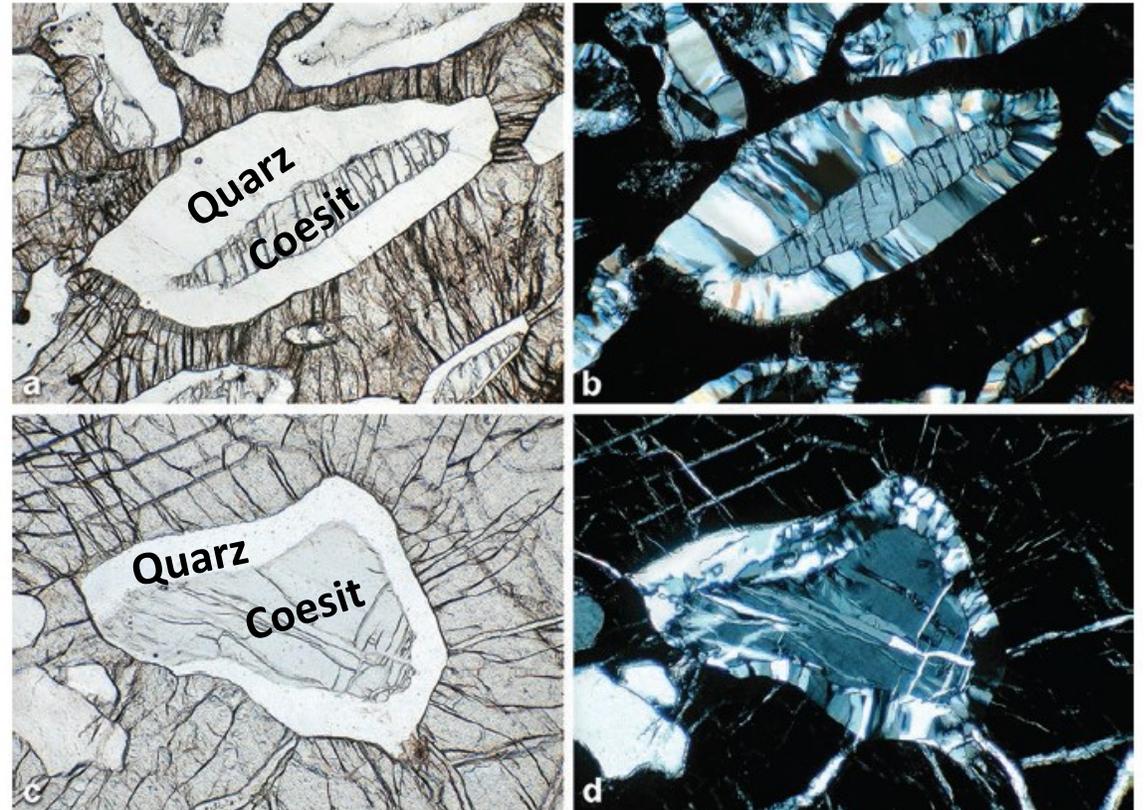
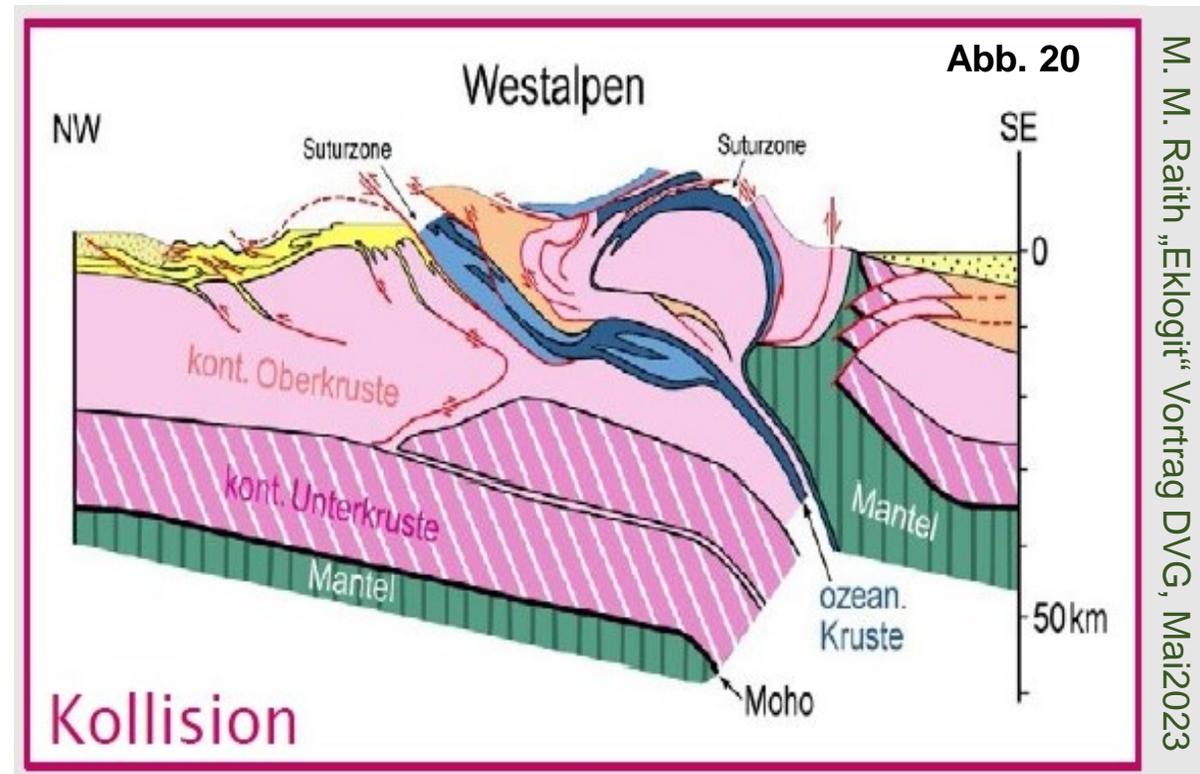


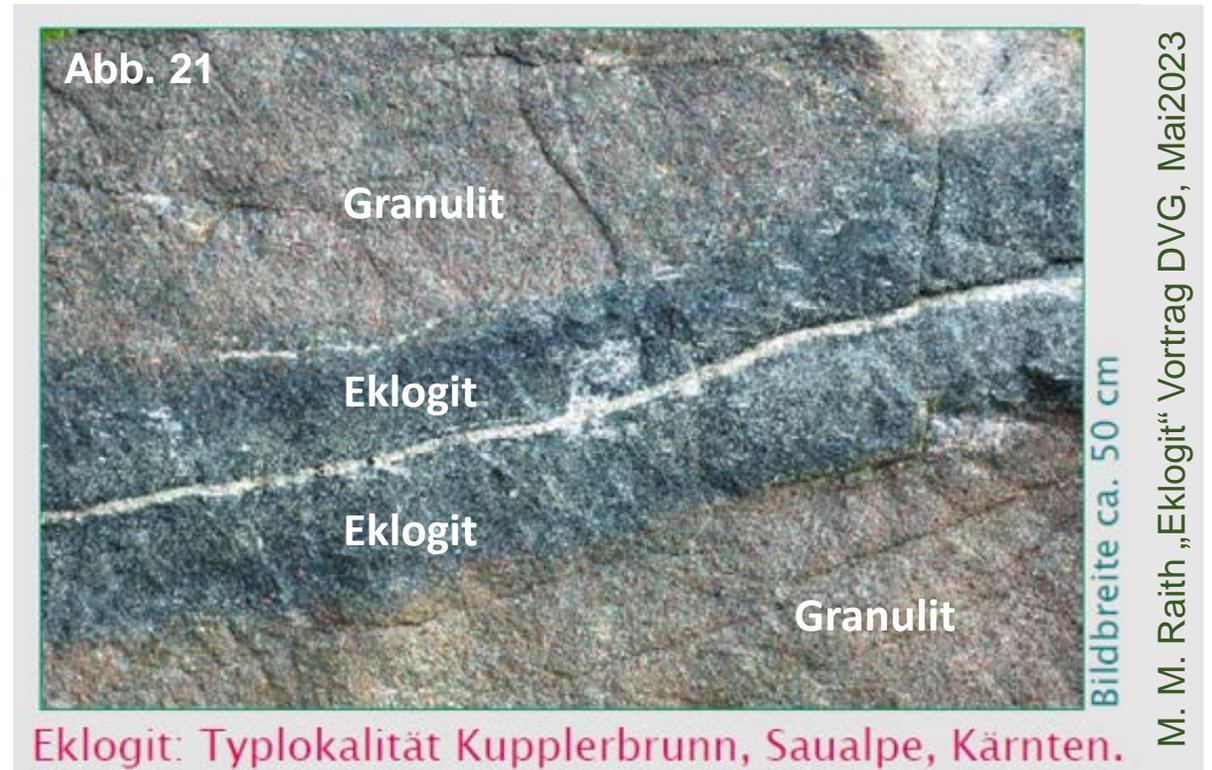
Abb. 19: Okrusch & Frimmel 2022 Bildbreite 1 mm

Jetzt zu **Frage (1)** „Wie kommt Eklogit wieder an die Oberfläche?“ In Subduktionszonen gebildeter Eklogit kommt i. a. gar nicht wieder an die Oberfläche. Das wundert nicht, denn wegen der mit der Tiefe zunehmenden Dichte tauchen solche Gesteine eher ab als auf und verschwinden im tieferen Mantel. Dennoch gibt es Eklogitvorkommen an der Oberfläche, auch Coesit-führende. Das ist dann der Fall, wenn in Kontinent-Kontinent-Kollisionen Eklogite hochgeschürft werden. Ein Beispiel findet sich in Gesteinskomplexen vom Lago di Cignana, West-Alpen. Hier hat Coesit in Granaten von Eklogiten als auch metamorphen Sedimenten überlebt (die Granate sind in einem Zeitraum von 9 Mio. J. zwischen 49 und 41 Mio. J. gewachsen). In Abb. 20 sehen wir die blaue Naht- (Sutur-) Zone, in der ehemals subduzierte ozeanische Kruste zwischen dem Europäischen Kontinent (li.) und einem Mikrokontinent (Mitte) während der Alpenbildung hochgequetscht wurde. Die meisten Coesit-Vorkommen finden sich in Krustengesteinen, meistens metamorphen Sedimenten, die durch Kontinent-Kontinent-Kollisionen in große Tiefen verfrachtet und anschließend wieder an die Oberfläche gebracht wurden. Die Frage der Aufstiegsmechanismen ist Gegenstand der Diskussion.

Es ist naheliegend, dass Coesit-Funde selten sind, noch seltener sind Diamantfunde in Gesteinen, welche die Graphit-Diamant-Grenze überschritten haben. Zuerst entdeckt wurde Coesit in Granat von Christian Chopin (1984) in einem Gestein im Dora-Maira-Massiv, West-Alpen. Danach setzte eine intensive Forschung ein, bis heute sind etwa 20 Terrains von Ultra-Hochdruckgesteinen bekannt. Fast alle sind in Gebirgsgürteln lokalisiert, die vom Kambrium bis heute in Kontinent-Kontinent-Kollisionen gebildet wurden (Kaledoniden, Erzgebirge, Alpen, Himalaya, u. a.). Mit unseren prä-kambrischen Gesteinen aus Skandinavien haben wir also Pech, wir werden keinen Coesit finden. Bedauerlich.



Nun zur **Frage (2)**: „Wie kann es sein, dass Eklogit überhaupt an der Oberfläche ansteht, wenn er doch sein Stabilitätsfeld längst verlassen hat“? Hier kommt wieder die Bedeutung der fluiden Phase ins Spiel. Wir kennen die Abbildung bereits: Ein granulitisches Gestein wird von einem dünnen hellen Gang durchschlagen, über und unter ihm hat sich in einer Breite von je ca. 7 cm, soweit die fluide Phase wirksam war, der Granulit in Eklogit umgewandelt. Hier ist es also so, dass der Granulit längst sein Stabilitätsfeld verlassen hatte und in das Stabilitätsfeld des Eklogit eingetreten war, sich aber dennoch nicht umgewandelt hat, weil Diffusionswege im „trockenen“ Granulit klein sind (Volumendiffusion findet praktisch nicht statt). In einer fluiden Phase dagegen werden Atome und Ionen transportiert, wodurch unter Lösung und Wiederabscheidung chemische Reaktionen befördert werden. Erst die Anwesenheit einer fluiden Phase, die in dem schmalen Gang transportiert wurde, machte die fällige metamorphe Umwandlung möglich. Wenn also eine fluide Phase nicht vorhanden ist, kann sich ein Eklogit beim Aufstieg nicht in *die* Gesteine mit ihren „wasser“-haltigen Mineralen rückumwandeln, aus denen er auf dem Hinweg entstanden ist.



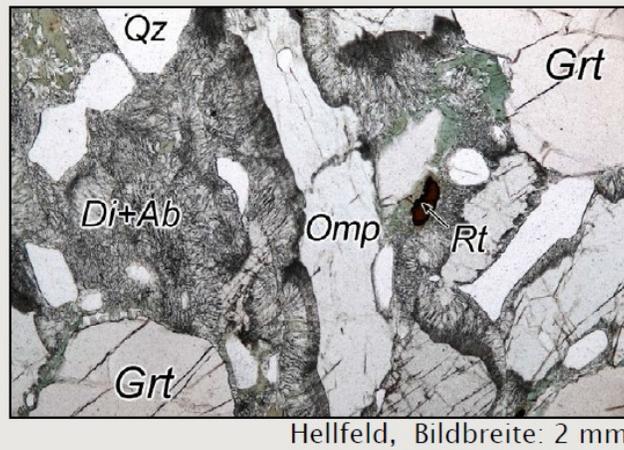
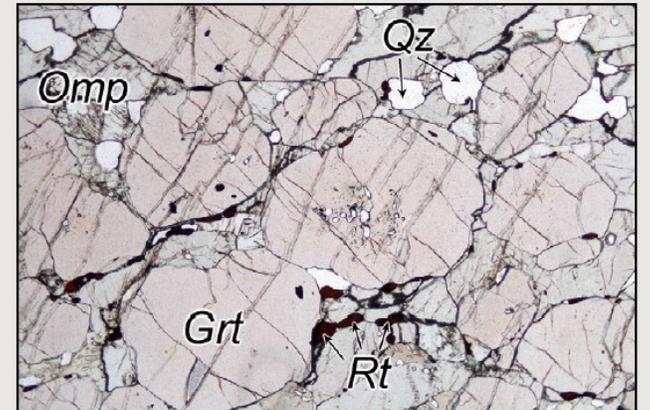
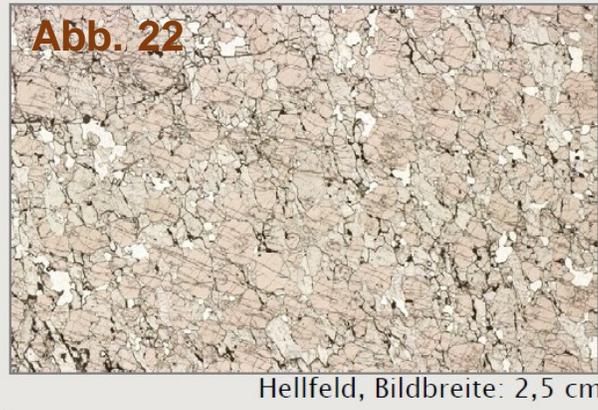
Ein wenig läuft aber auch unter „trockenen“ Bedingungen ab. Der Hochdruck-Pyroxen Omphacit (Omp) merkt beim Aufstieg, dass seine Anwesenheit unerwünscht ist und zerfällt in die beiden Komponenten, aus denen er entstanden ist. Er entlässt die NaAl-Komponente, aus der Na-Feldspat (Ab) entsteht, der unter vermindertem Druck wieder stabil ist, und zurück bleibt die CaMg-Komponente, die den Niederdruck-Pyroxen Diopsid (Di) bildet (Abb . 20). Da dies aber unter „trockenen“ Bedingungen und bei sinkender Temperatur abläuft, sind die Diffusionswege kurz und es entsteht kein grobkörniges Gefüge, sondern nur eine feine Verwachsung, ein sog. **Symplektit**.

## Petrographiken von Michael M. Raith

Mikrofotos von Dünnschliffen enthüllen eine wunderbare Farben- und Formenvielfalt. Michael M. Raith, Professor em. für Petrologie, Universität Bonn, hat Mikrofotos künstlerisch bearbeitet und verfremdet zu „Petrographiken“. Er sagt: „Dem Auge des Kunstschaffenden öffnet sich eine faszinierende Bildwelt, deren Vielfalt an Farben und Strukturen der kreativen Fantasie eine unerschöpfliche Quelle bietet. Im Idealfall entsprechen die Bildmotive der künstlerischen Intention, nicht selten aber erhalten sie erst durch digitale Bearbeitung und Verfremdung die beabsichtigte Aussagekraft“.

Passend zum Eklogit-Thema folgt von M. M. Raith eine Auswahl verfremdeter Mikrofotos von „Di+Ab“-Symplektiten.

### Mineralparagenesen (=Mineralgesellschaften) des Subduktions- und des Aufstiegspfades im Dünnschliff



**Subduktionsstadium**

Granat + Omphacit + Quarz + Rutil

**Aufstiegsstadium**

Zerfall des Omphacit zu einem Symplektit aus Diopsid + Albit



[+Pol & Lambda Platte; Bildbreite 1 mm]

## *Dünen am Meer*

Feine Verwachsung von Diopsid und Plagioklas  
mit Quarz

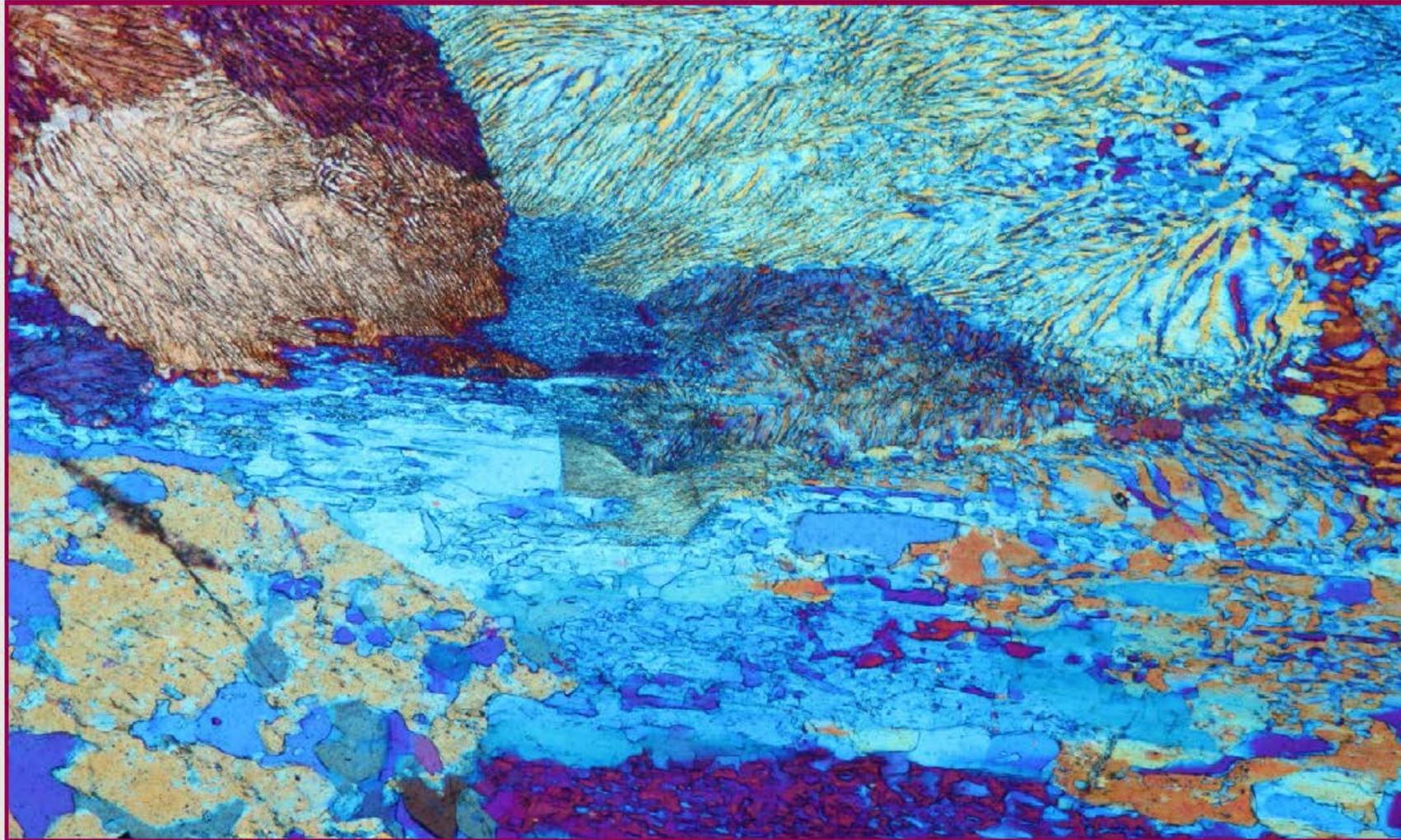
Eklogit: Kupplerbrunn, Saualpe, Österreich



[+Pol & Lambda Platte; Bildbreite 2 mm]

*Nördliches Gestade*

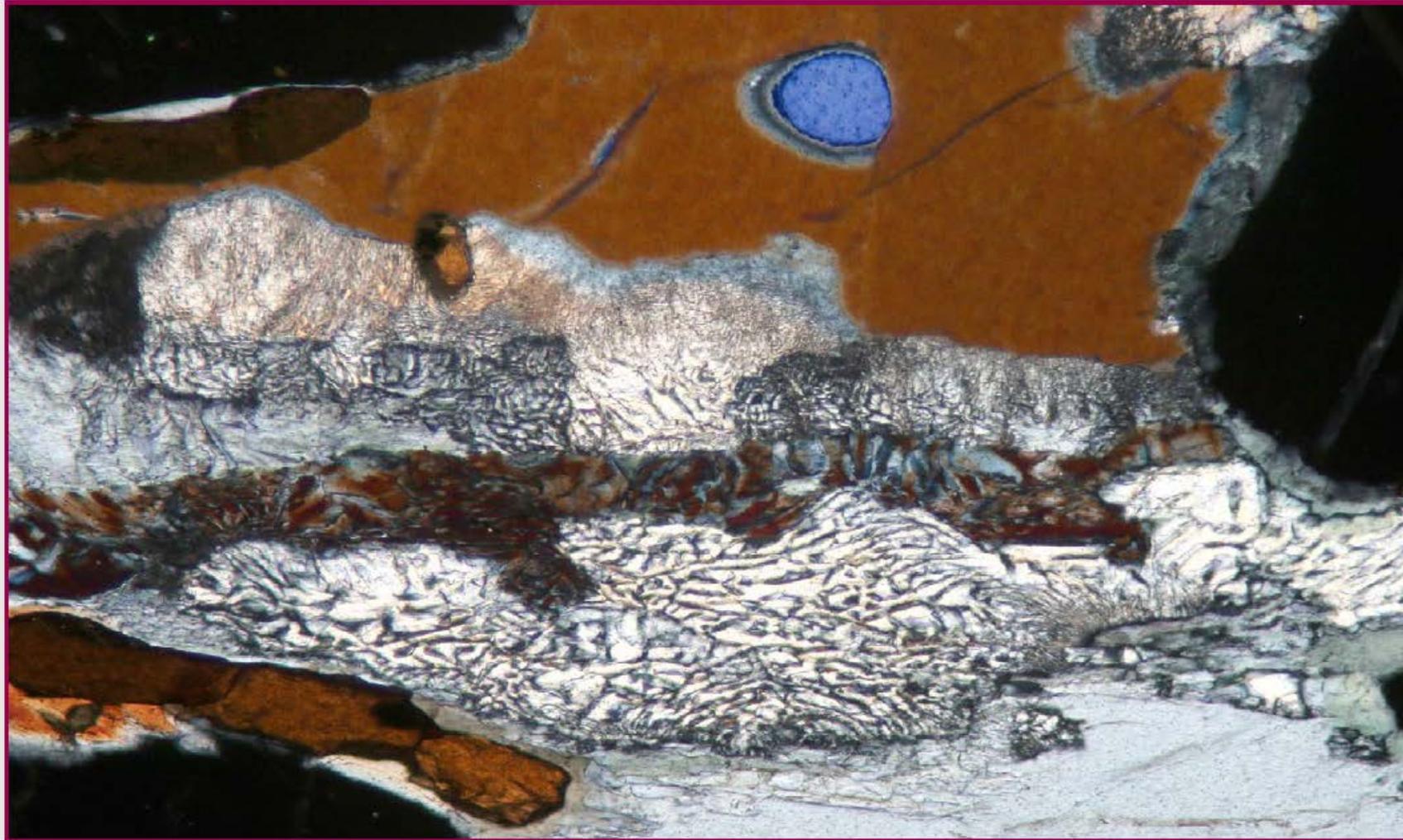
Feine Verwachsung von Diopsid und Plagioklas  
Eklogit: Kupplerbrunn, Saualpe, Österreich



[+Pol & Lambda Platte; Bildbreite 2 mm]

*Südliches Gestade*

Feine Verwachsung von Diopsid und Plagioklas  
Eklogit: Kupplerbrunn, Saualpe, Österreich



[+Pol; Bildbreite 1 mm]

*Traumlandschaft*

Feine Verwachsung von Diopsid und Plagioklas  
mit Granat, Quarz und Rutil

Eklogit: Kupplerbrunn, Saualpe, Österreich



[+Pol; Bildbreite 2 mm]

## *Abendstimmung*

Feine Verwachsungen von Diopsid und Plagioklas,  
sowie Hornblende und Quarz

Eklogit: Kupplerbrunn, Saualpe, Österreich

## Literatur

Frisch W., Meschede M. (2021) Plattentektonik. Kontinentverschiebung und Gebirgsbildung. 395 S. Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt

Gilotti J. A. (2013) The real of ultrahigh-pressure metamorphism. Elements 9-4, S. 255-260

Meschede M. (2018) Geologie Deutschlands. 252 S. Springer Spektrum Berlin

Okrusch M., Frimmel H. E. (2022) Mineralogie. Eine Einführung in die Spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde. 10. Aufl. Springer-Verlag, Berlin

Raith M. M. (2023) Eklogit. Vortrag Deutsche Vulkanologische Gesellschaft e.V. (DVG) Mendig

Thiedig F. (2010) Eklogit. Ein interessantes Kärntner Gestein – Geschichte seiner Entdeckung, Verbreitung und Entstehung. Carinthia II-200/120, S.7-48