

Der Blick in unsere Erde

Das Erdinnere als Motor der Plattentektonik

Dr. Thomas Klügel
Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
Geodätisches Observatorium Wettzell



GIZ-Vortragsreihe, 17. September 2009

Gebirge entstehen...



aus McClay: Thrust Tectonics

... und vergehen



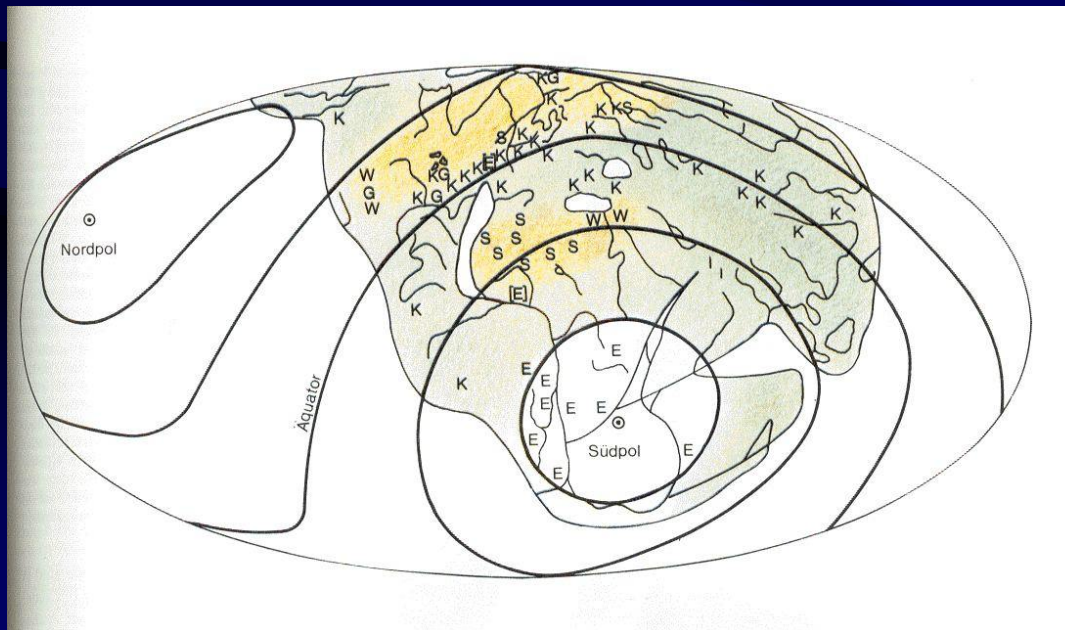
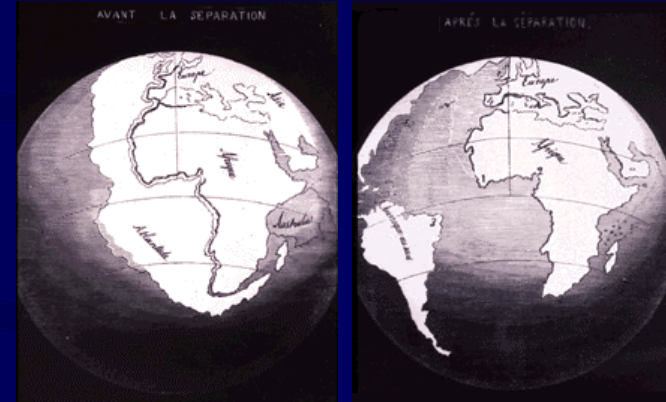
aus Thornbury: Principles of Geomorphology

Hypothesen zur Gebirgsbildung

- **Kontraktionshypothese**
 - Schrumpfung der Erde durch Abkühlung oder gravitative Dichtezunahme (Umwandlung von Mineralphasen)
- **Pulsationshypothese**
 - Zyklischer Wechsel zwischen Kontraktion und Expansion
- **Oszillationshypothese**
 - Aufbeulungen durch Vertikalbewegungen (kosmische Kräfte), Senkungen durch isostatischen Ausgleich (subkrustale Strömungen)
- **Undulationshypothese**
 - Vertikalbewegungen durch Konvektion (radiogene Wärme)
- **Expansionshypothese**
 - Ausdehnung der Erde durch radiogene Erwärmung, Umwandlung von Mineralphasen, Abnahme der Gravitationskonstante oder Zufuhr kosmischer Materie

Kontinentalverschiebung

- Erste Idee: Antonio Snider (1858)
- Urkontinent Gondwana: Eduard Suess (Ende 19. Jhd.)
- Erstes umfassendes Konzept: **Kontinentalverschiebung** von Alfred Wegener (1912)



Plattentektonik

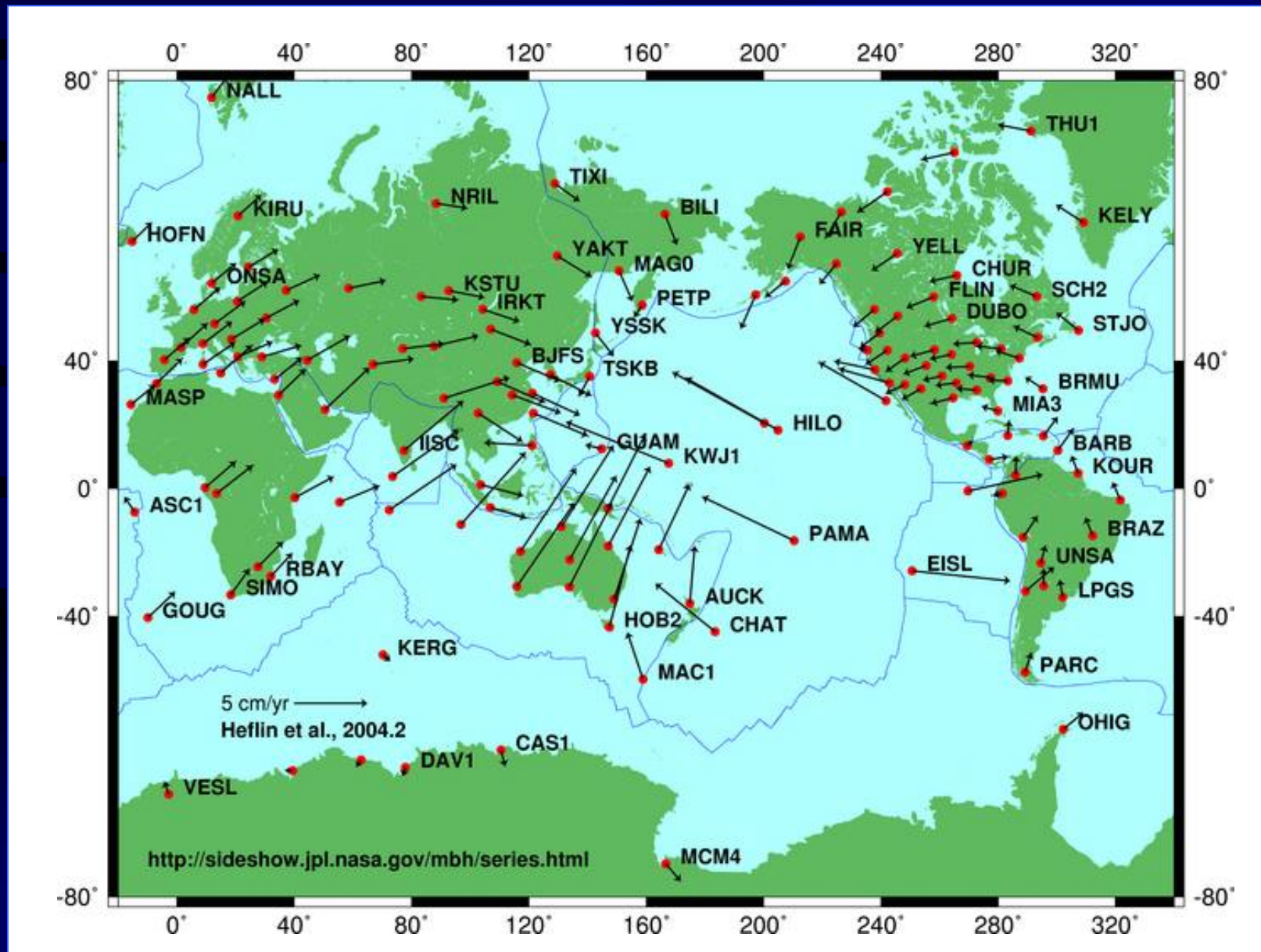
- Globales Modell, welches alle Beobachtungen aus den Geowissenschaften miteinander bestmöglich vereint, z.B.:
 - **Geographie**: Konturen der Kontinente
 - **Geologie**: durchgehende Gebirgszüge und Lagerstätten (Kohle, Salz), Vereisung in Südamerika, Afrika, Indien, Australien
 - **Paläontologie**: Divergenz von Fauna und Flora
 - **Paläomagnetismus**: Veränderung der magnetischen Inklination über die Zeit
 - **Geophysik**: magnetische Streifenmuster der Ozeankruste, Isostasie
 - **Geochemie**: Unterschiede zwischen kontinentaler und ozeanischer Kruste
 - **Geochronologie**: Altersunterschiede zwischen kontinentaler und ozeanischer Kruste
 - **Geodäsie**: kontinuierliche Änderung der Basislinie zwischen zwei Radioteleskopen (z.B. Wettzell – Westford 18 mm/Jahr)

Aufteilung der Erde in tektonischen Platten:



Quelle: U. Schmincke: Vulkanismus

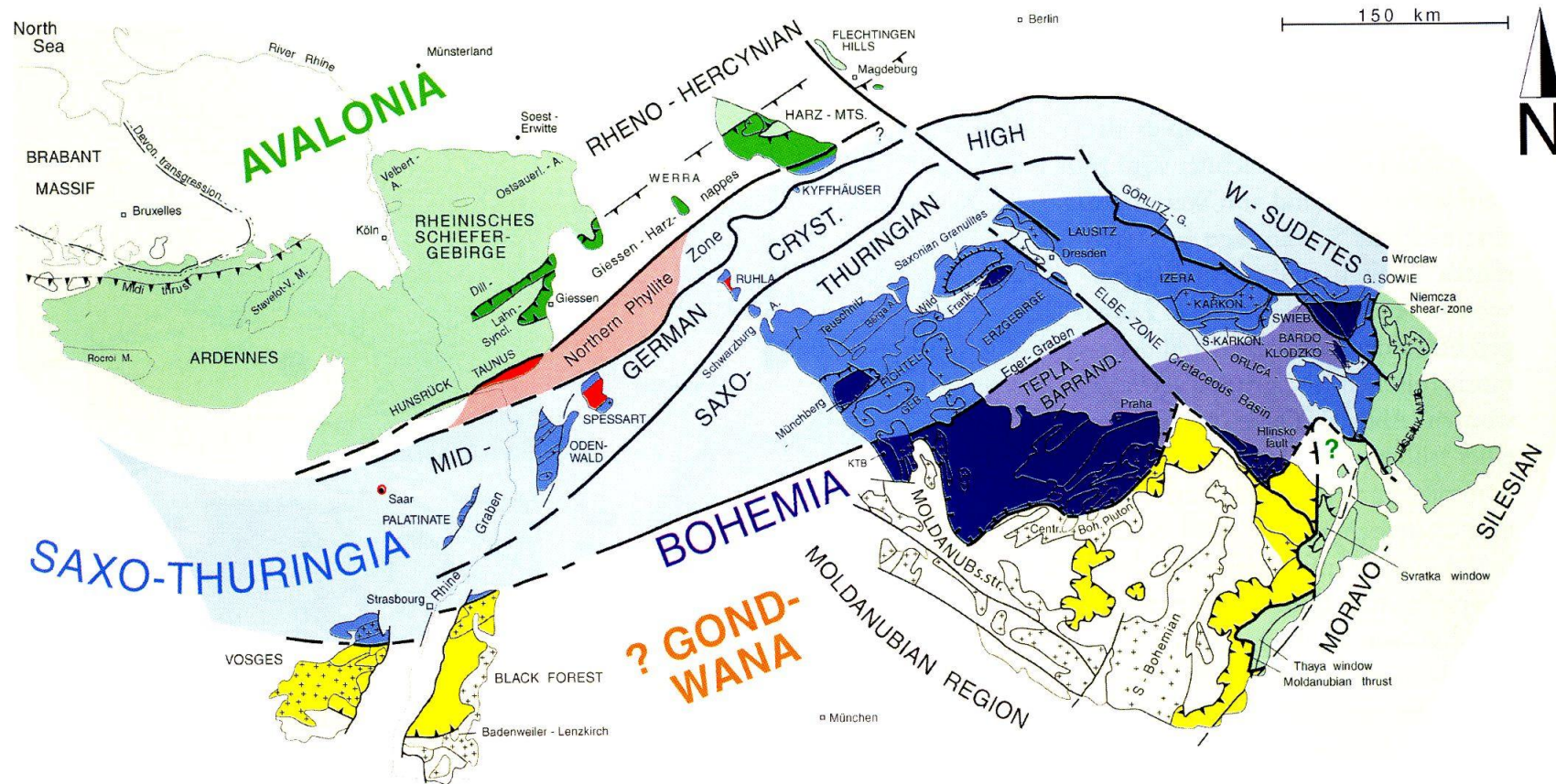
Gemessene Geschwindigkeiten mit GPS



Wichtige Prozesse der Plattentektonik

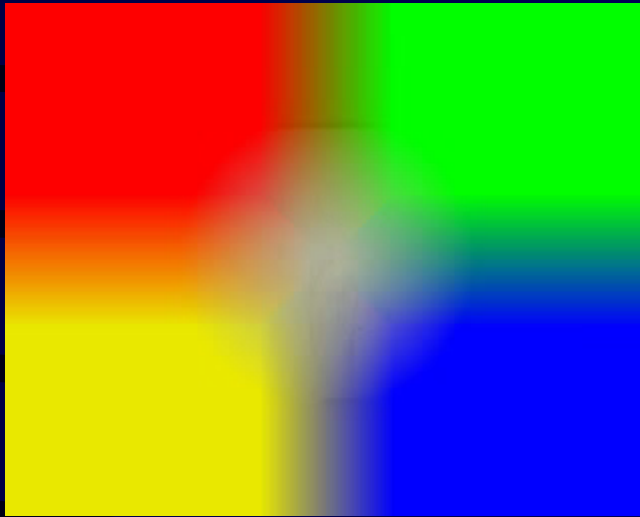
- **Meeresbodenspreizung** („sea floor spreading“)
 - An Dehnungszonen (ozeanische Rücken, „rifts“) wird neue Ozeankruste gebildet
 - Beispiele: Mittelatlantischer Rücken, Rotes Meer
- **Subduktion**
 - Ozeanische Lithosphäre taucht in den Erdmantel ab
 - Beispiele: Japan (Ozean / Ozean), Anden (Ozean / Kontinent)
- **Kollision**
 - Kontinent kracht gegen Kontinent, da kontinentale Kruste sich nicht subduzieren läßt (zu leicht!)
 - Beispiele: Alpen, Himalaya
- **Akkretion**
 - Fremdartige Krustenteile (Inselbögen, Kontinentfragmente = Terranes) werden bei der Subduktion abgeschert und angelagert
 - Beispiele: Westküste Nordamerikas, Mitteleuropa

Variszisches Gebirge in Europa



Aus: W. Franke: Vereinigte Platten von Europa (Expedition Erde, 2006)

Was ist der Antrieb der Plattentektonik?

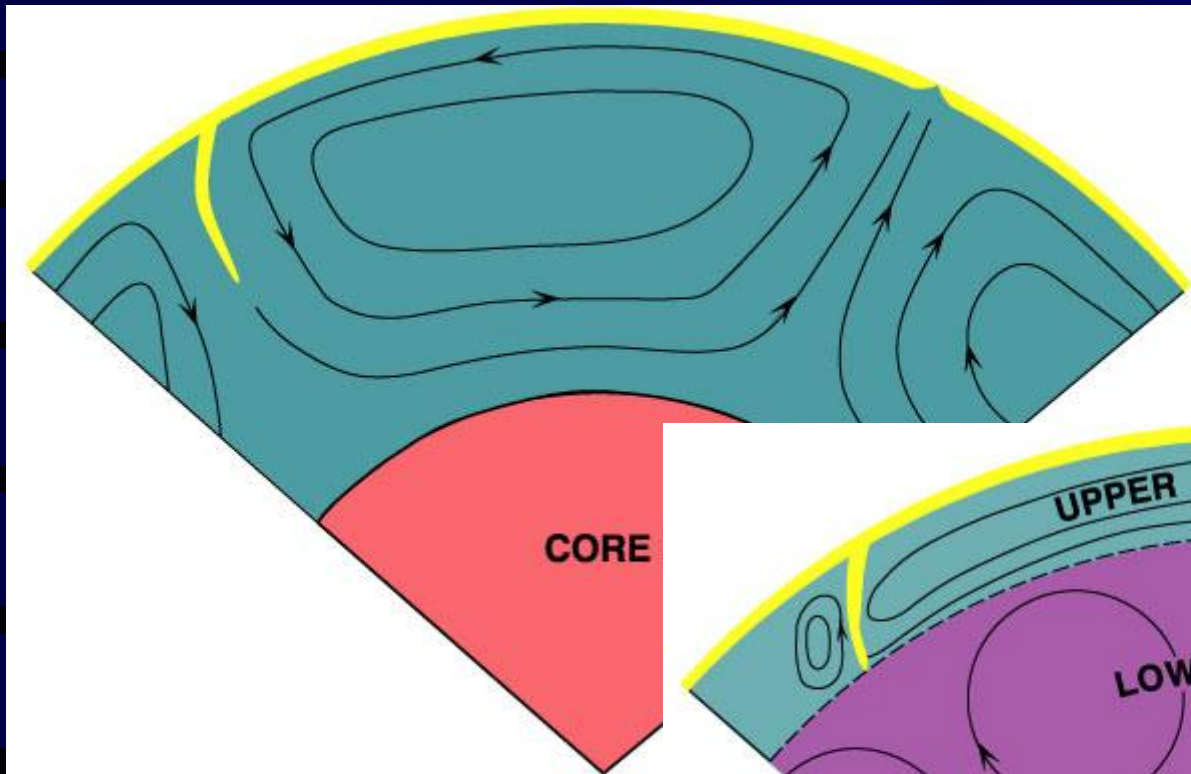


Experiment zur Konvektion von
Farbstoff in Wasser, geheizt von
unten (punktuell)

Institut für Physik, Universität Würzburg

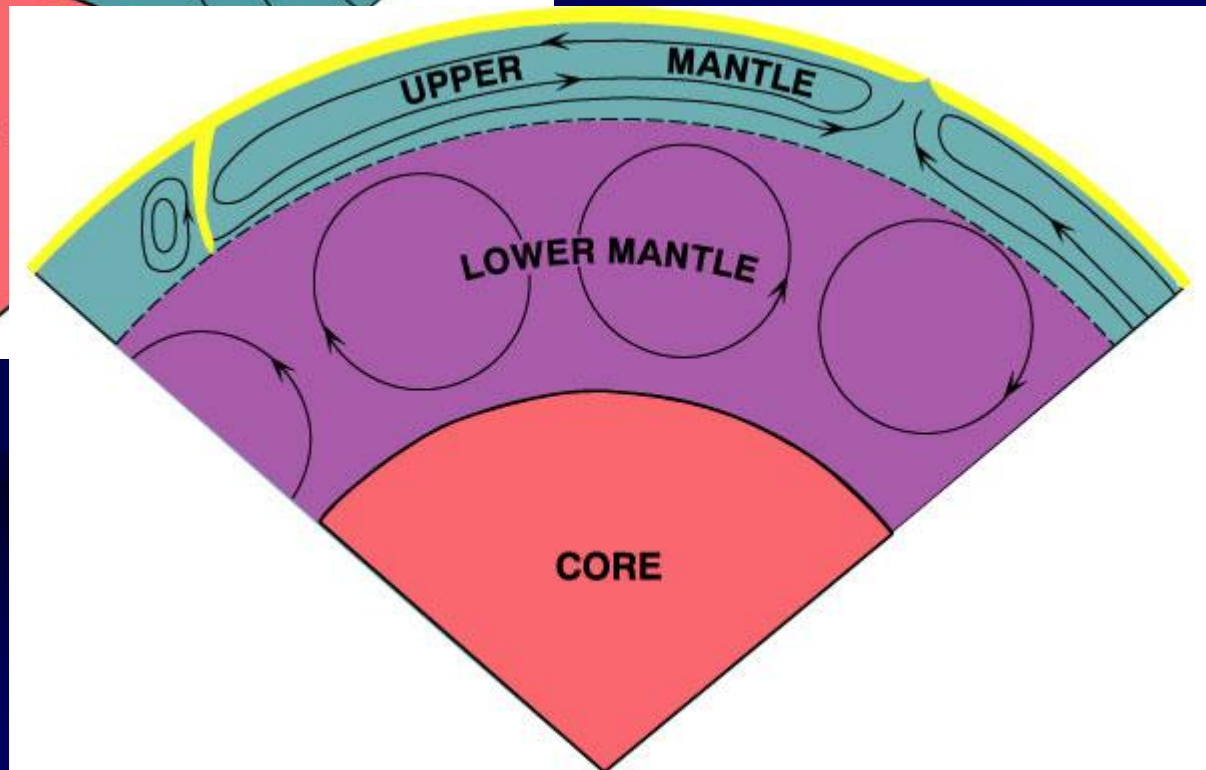
Konvektionsströmungen im festen Mantel

Vereinfachtes Konvektionsmodell des Mantels



**modern, aber
umstritten**

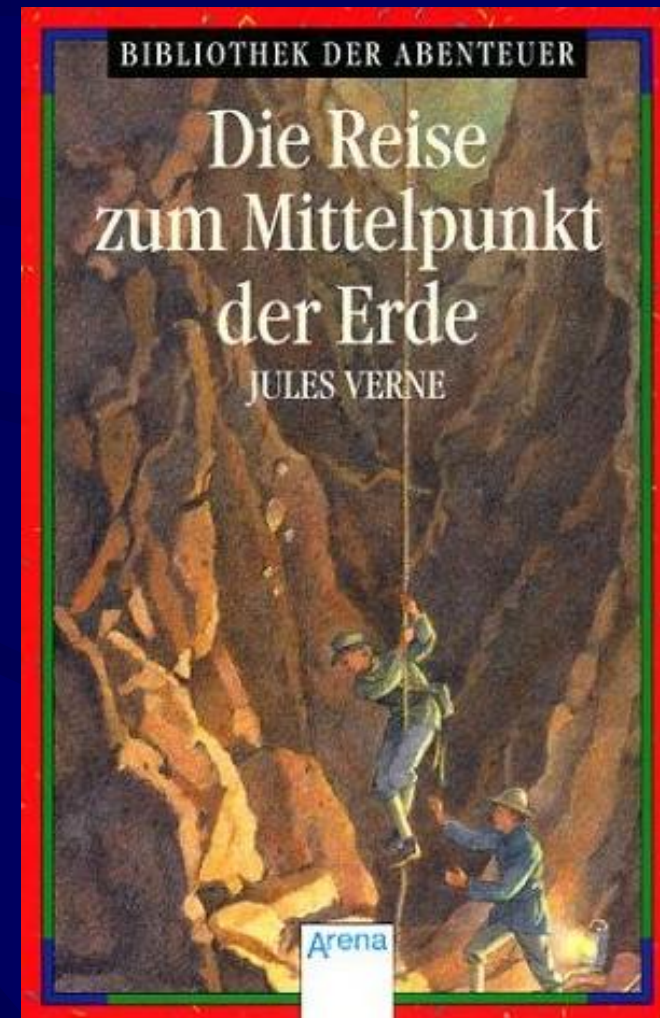
um 1975



(© John Winter, Igneous Petrology Online-
Script; after Basaltic Volcanism Study
Project (1981), Lunar and Planetary
Institute)

Wie gelangen wir an Informationen über das Erdinnere?

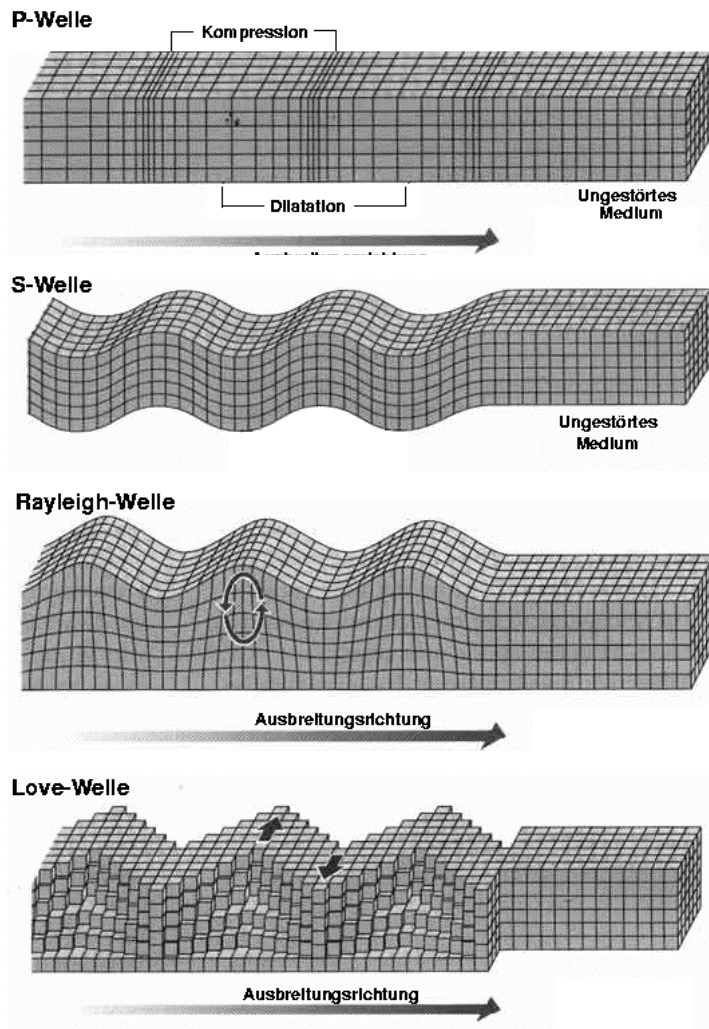
- direkte Verfahren
 - Geologie / Mineralogie (thermobarometrische Entwicklung von tektonischen Einheiten)
 - Geochemie von Vulkaniten (isotopischer “Geschmack”)
- indirekte Verfahren
 - Geophysikalische Messverfahren
 - Seismologie
 - Gravimetrie
 - Magnetik
 - Geophysikalische Modellierung
 - Experimentelle Geophysik/Geochemie



Indirekte Verfahren

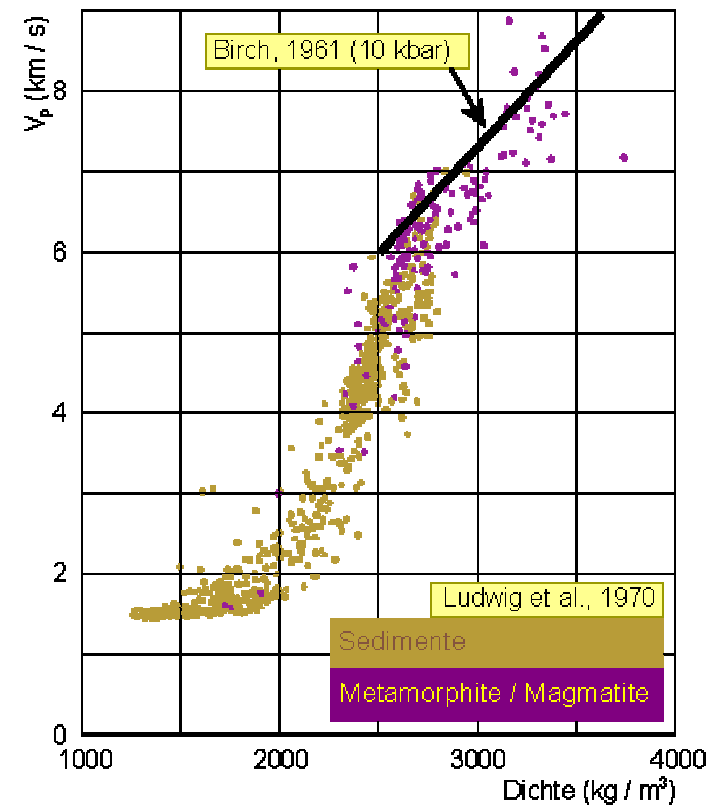
Seismologie

“Durchleuchtung” des Erdkörpers mit Erdbebenwellen

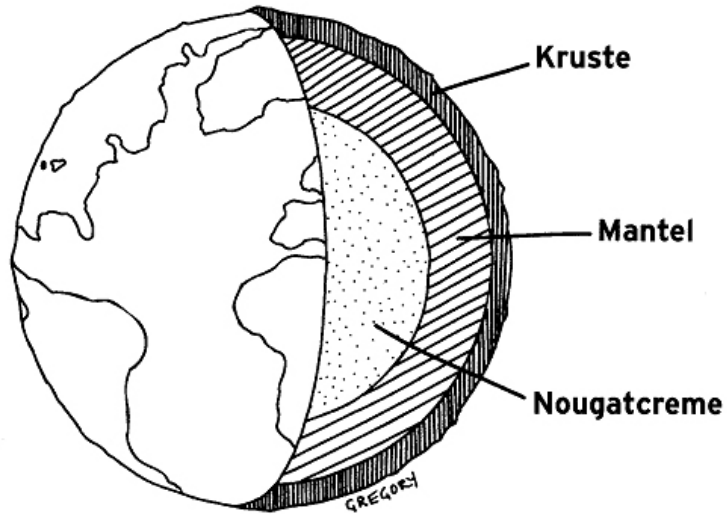


Wellengeschwindigkeiten:

$$\frac{V_p}{V_s} \cong \sqrt{3} \cong 1.73$$



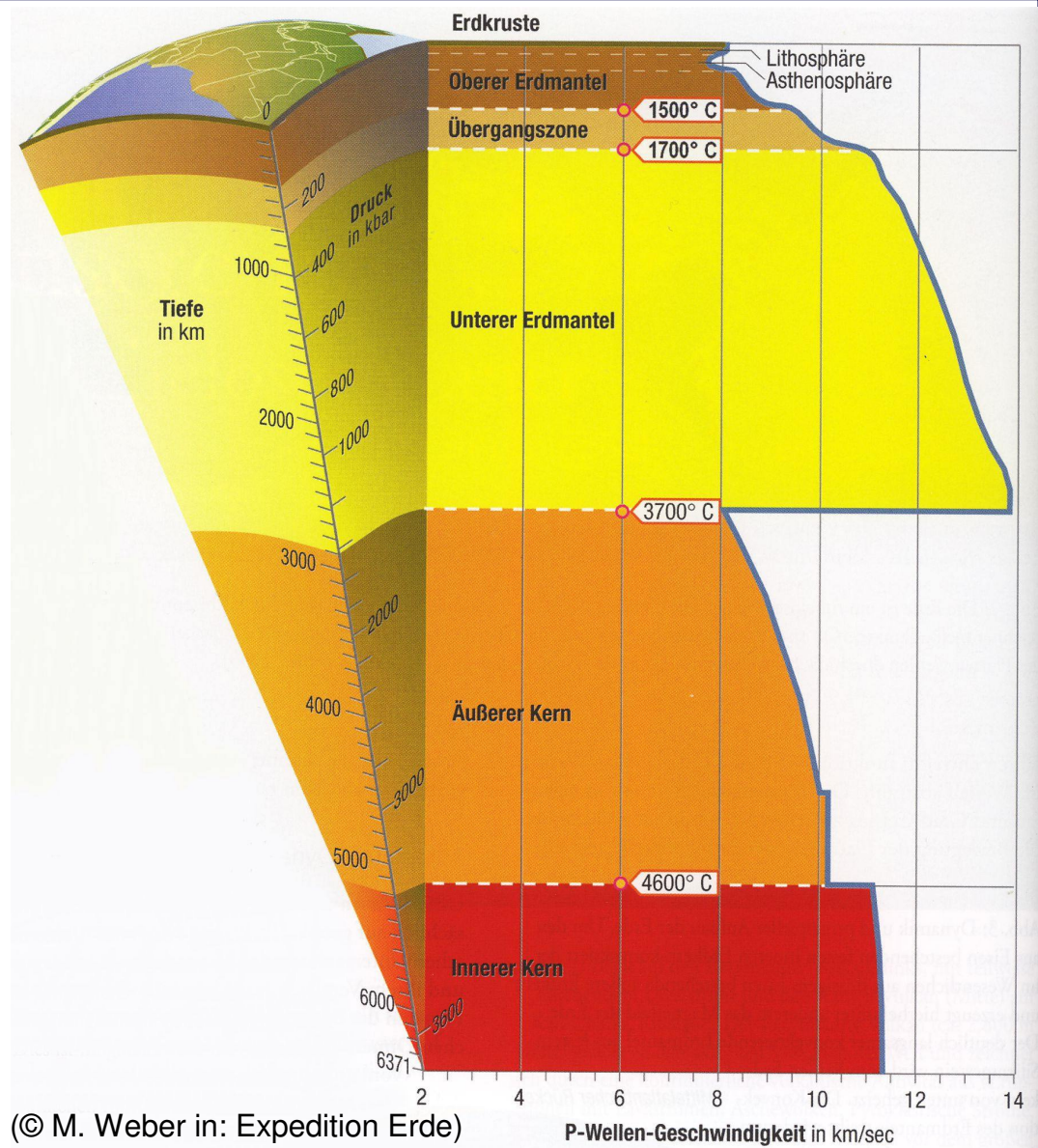
Schalenbau der Erde



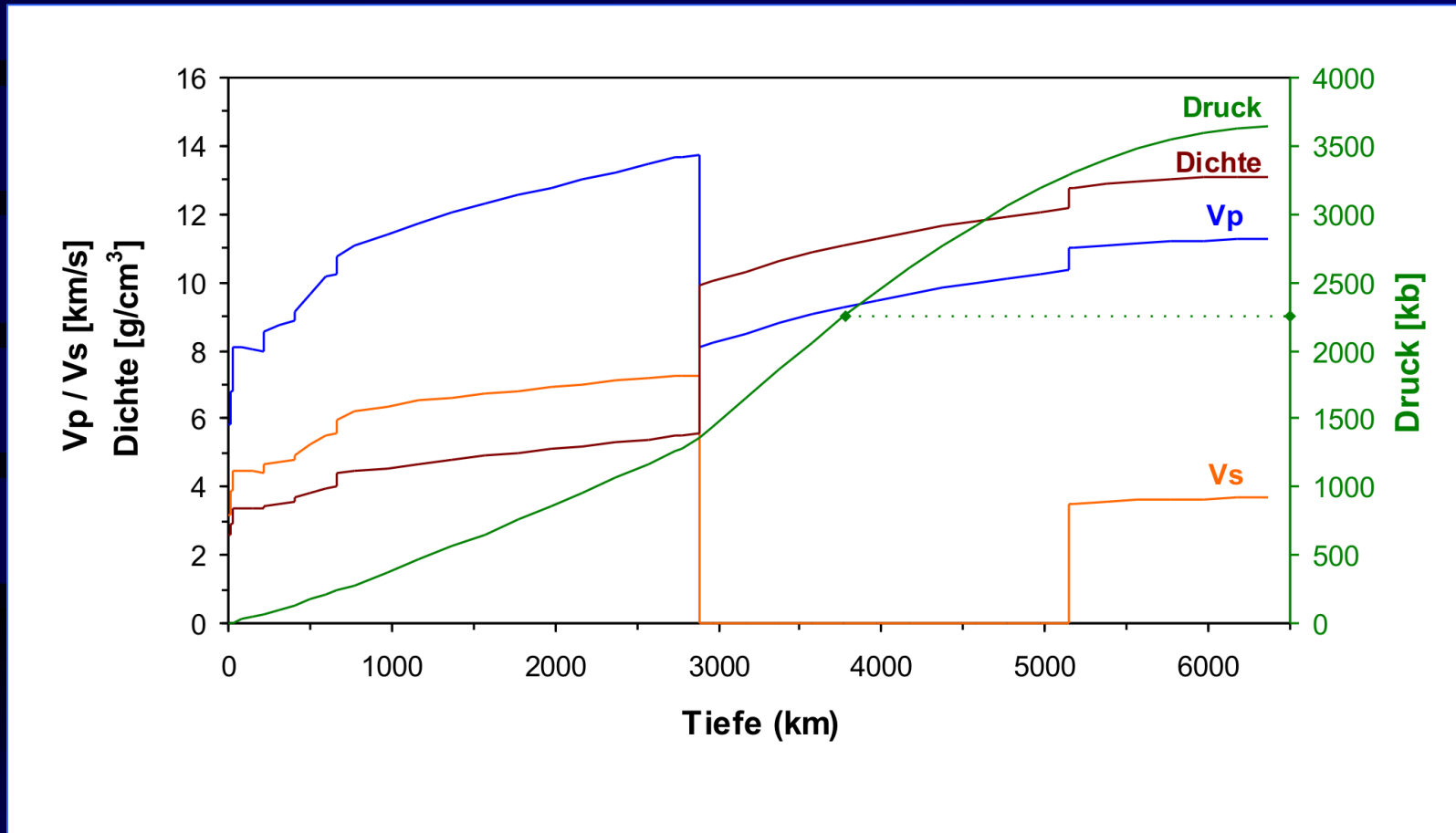
(Frankfurter Allgemeine Zeitung, 1.9.2002)



(© Ferrero)

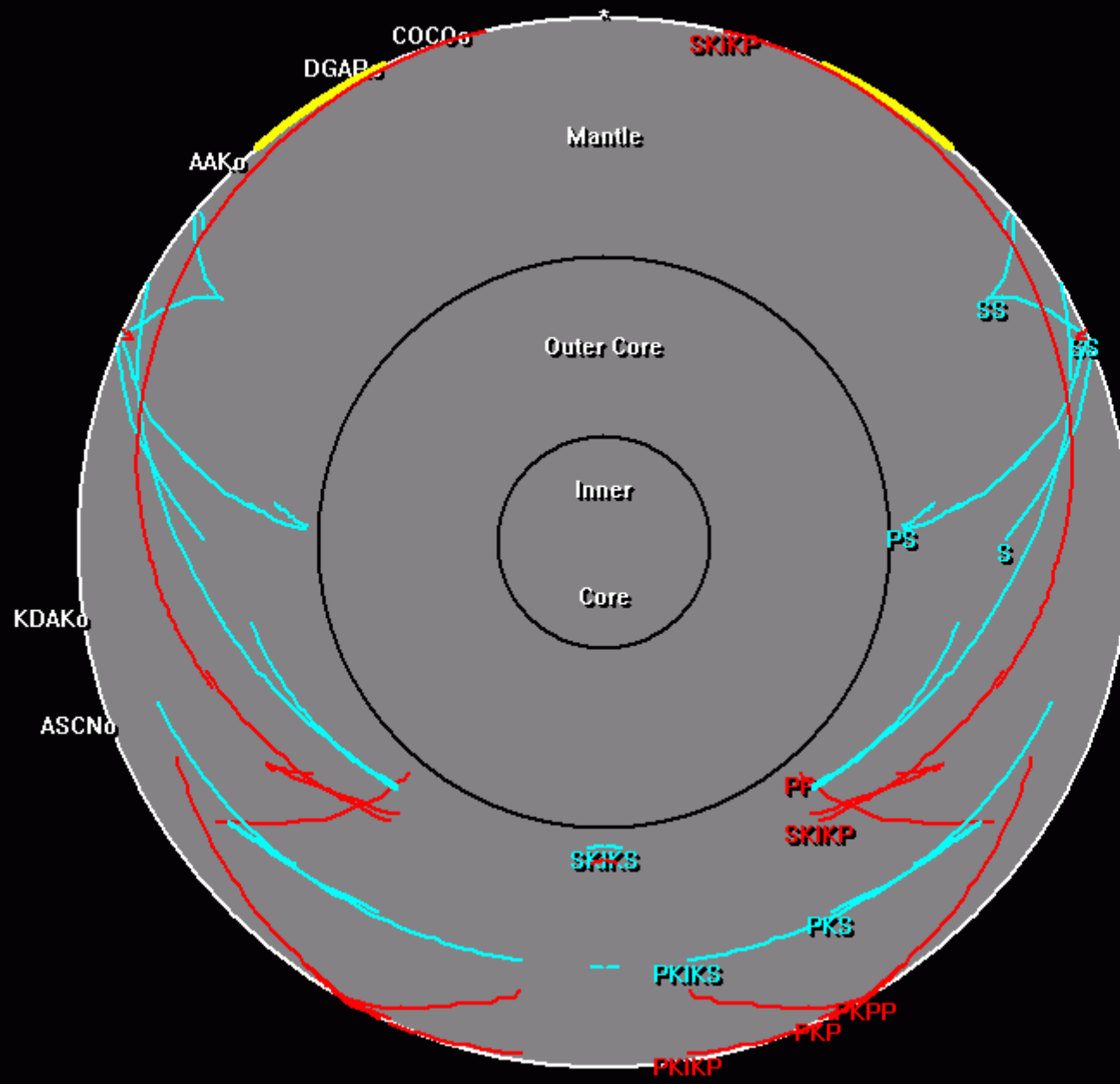


Referenz-Erdmodell „PREM“



A. M. Dziewonski & D. L. Anderson: Preliminary Reference Earth Model (1981)

— Surface
— P
— S



Earth Cross-Section

Info

Exit

World Menu

Repeat

Resume

Views

Event Info

Minutes
20

SPEED

100

80

60

40

20

0

-20

-40

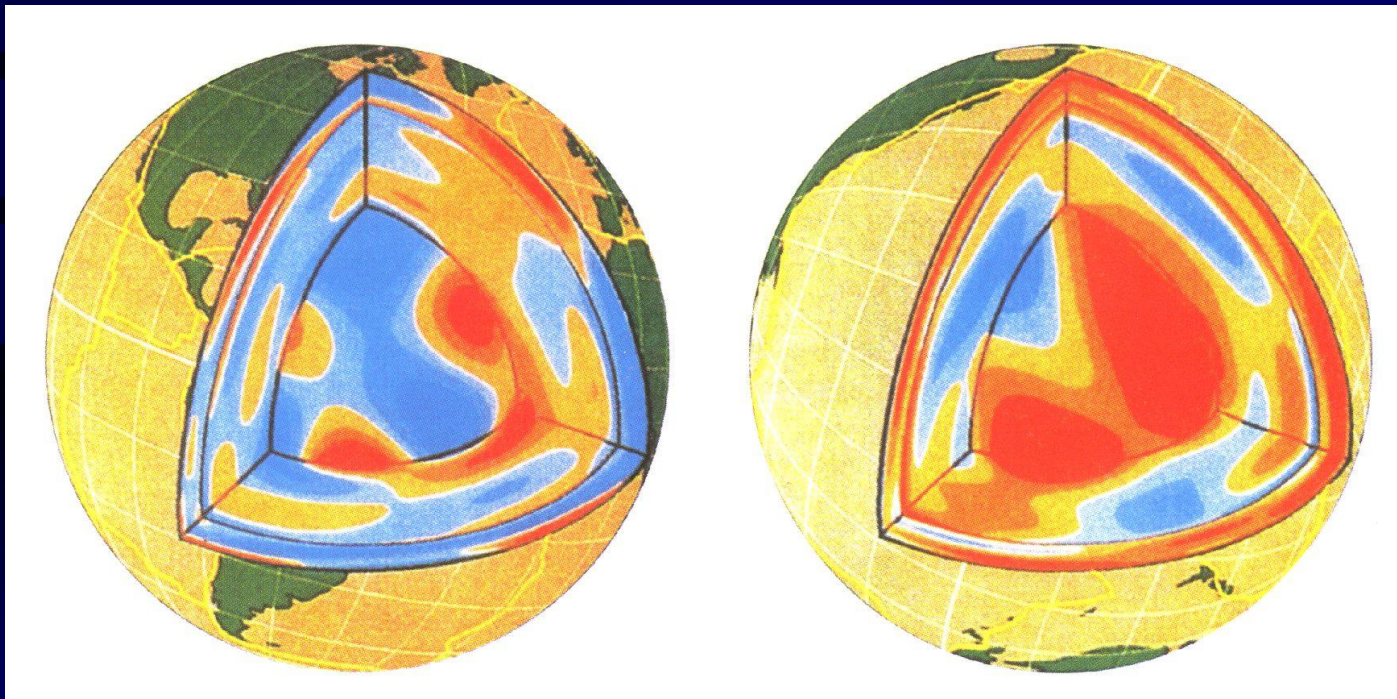
-60

-80

-100

Seismische Tomographie

- Viele Erdbeben, viele Meßstationen → viel räumliche Information
- Dreidimensionale Dichteverteilung / Temperaturverteilung im Erdinnern



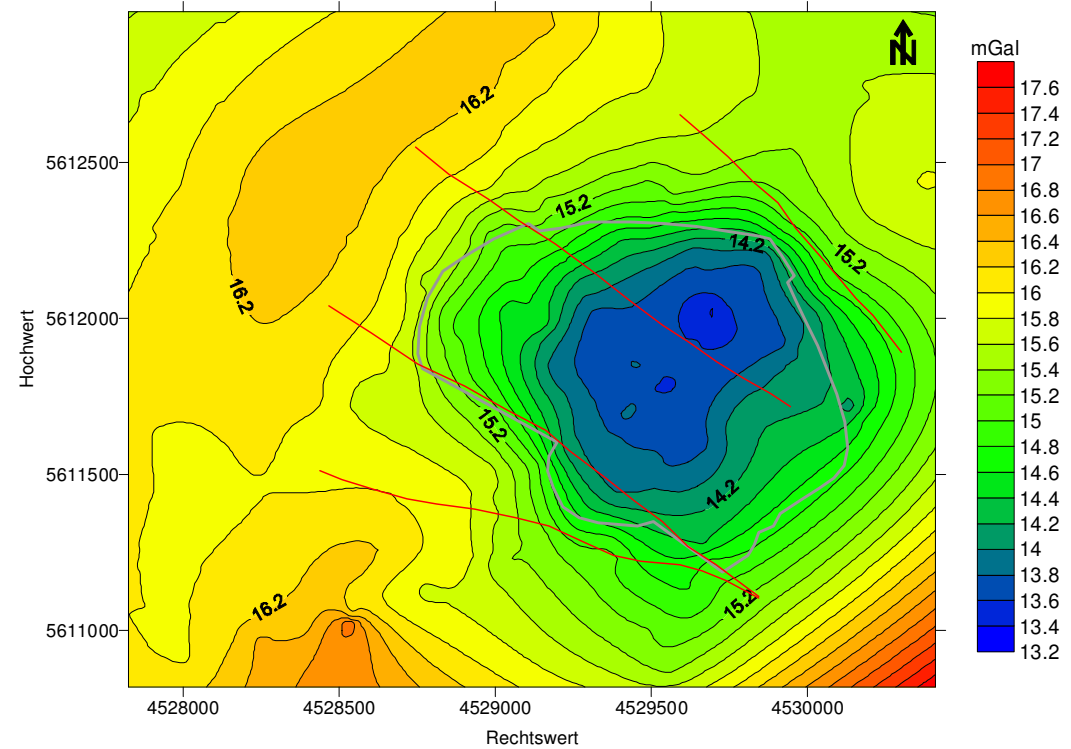
Gravimetrie

- Schwerebeschleunigung g
 - $g = 9.78 \dots 9.83 \text{ m/s}^2$ (Wertzell: 9.808 352 . . .)
 - $g = 9.82037 \text{ m/s}^2$ (um Zentrifugalbeschleunigung und Abplattung korrigiert)
 - homogene Kugel:
 - Masse: $5.977 \times 10^{24} \text{ kg}$
 - Radius: $6\,371 \text{ km}$
 - Dichte: 5.52 g/cm^3
 - Erdkruste: $2.7 \dots 3.0 \text{ g/cm}^3$
 - Erdmantel: $3.0 \dots 5.0 \text{ g/cm}^3$
 - Erdkern: $> 10 \text{ g/cm}^3$

Lokale Variation des Erdschwerefeldes

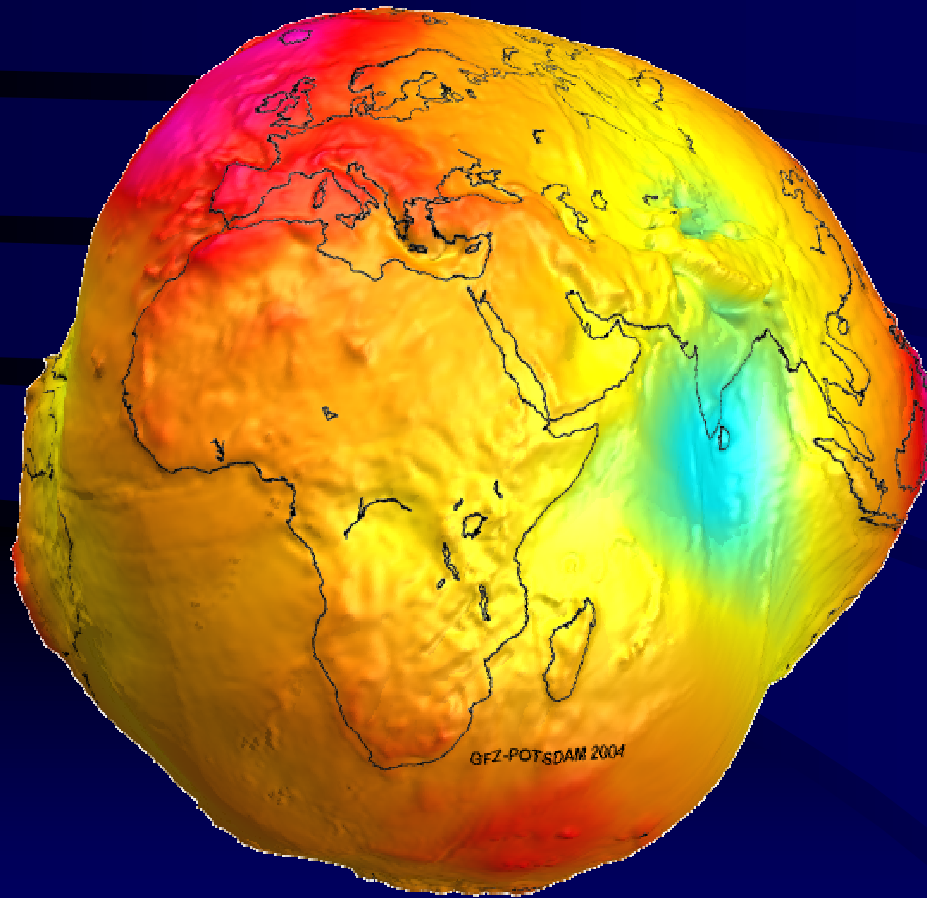


Schwereanomalie über einem Vulkanschlot

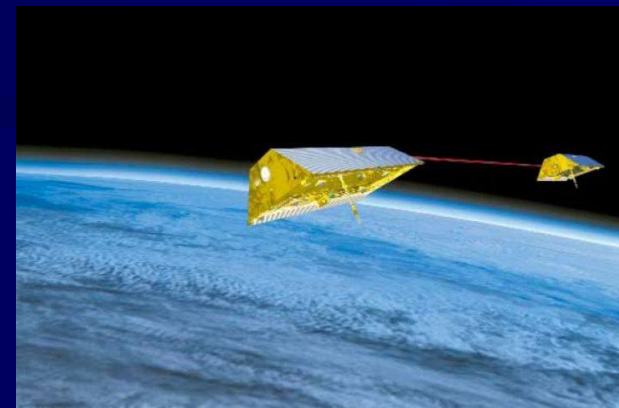


Quelle: Dr. Thomas Jahr, Univ. Jena

Globale Variation des Erdschwerefeldes



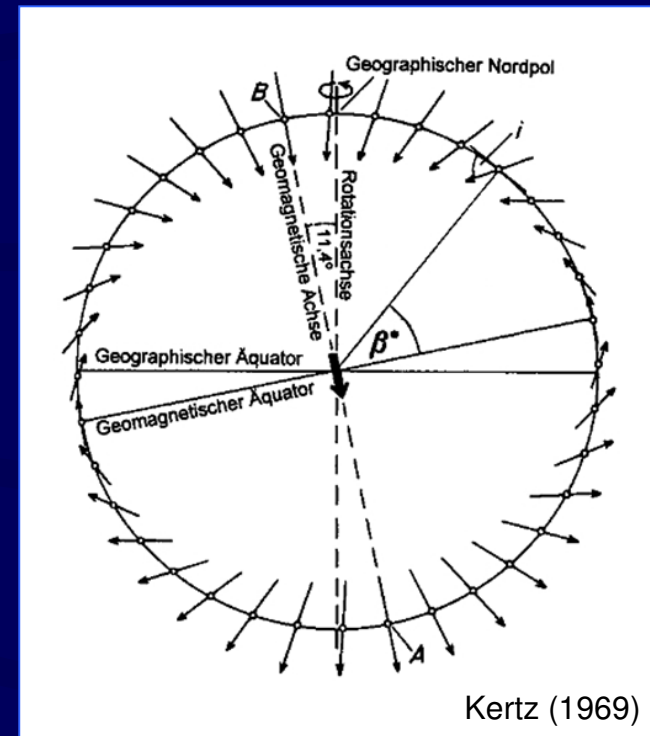
Geodätischer Satellit "LAGEOS"



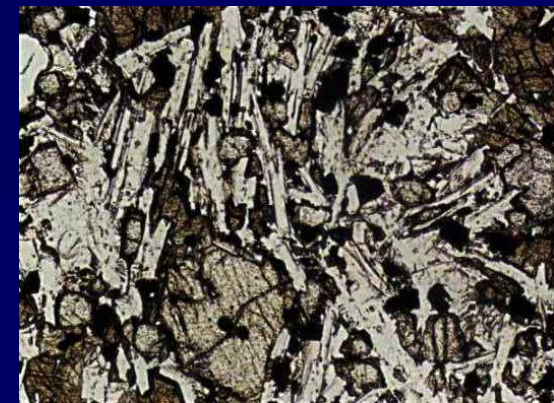
Zwillingssatellit "GRACE"

Magnetik

- Erdmagnetfeld
 - Konvektionsströme im äußeren Erdkern aus flüssigem Eisen (Wärmequelle erforderlich)
 - Induktion von elektrischen Strömen (Dynamoeffekt)
 - Magnetfeld durch Stromfluss



- Magnetisierung von Gesteinen
 - Ferrimagnetische Minerale: Magnetit (Fe_3O_4), Titanomagnetit (Fe_2TiO_4), Magnetkies (FeS)
 - „Einfrieren“ des momentanen Magnetfeldes
 - Magmatische Gesteine: Beim Abkühlen unter die Curie-Temperatur (Eisen 768°C)
 - Sedimentgesteine: Beim Absinken

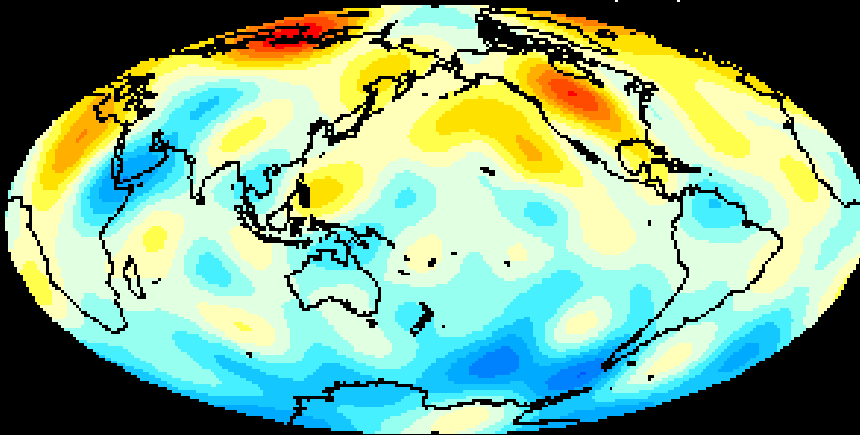


Magnetit in Basalt (Foto Jeff Ryan)

Änderung des Magnetfeldes

Intensität des Magnetfeldes an der
Kern-Mantel Grenze über 1000 Jahre

$t=0.00000$ (0)



Quelle: Peter Olson, John Hopkins University, Baltimore

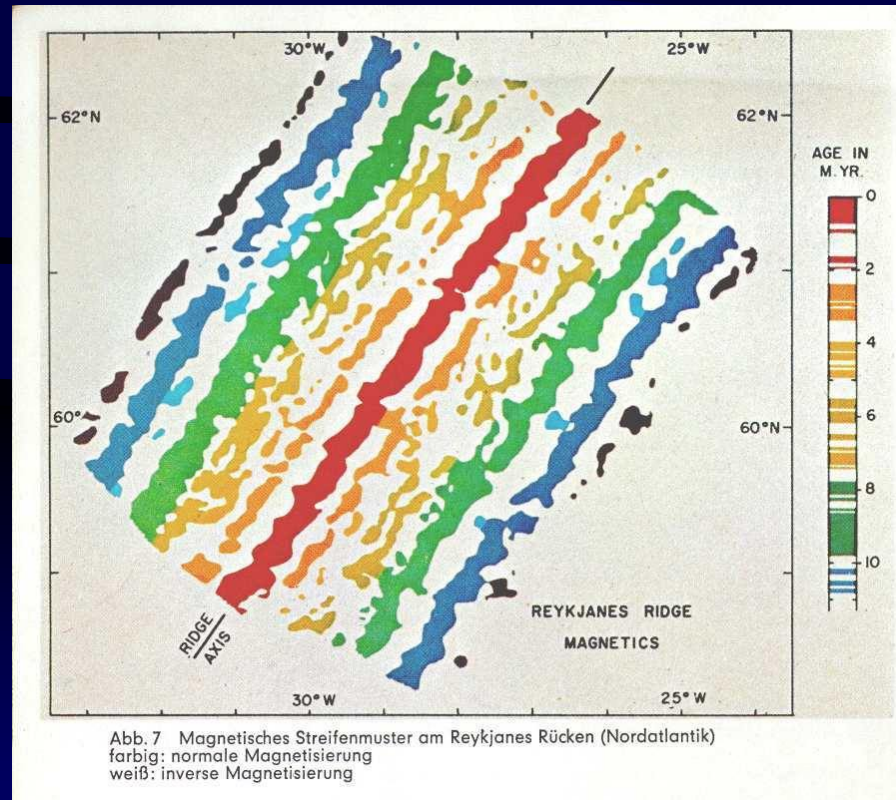


Quelle: Geological Survey Canada

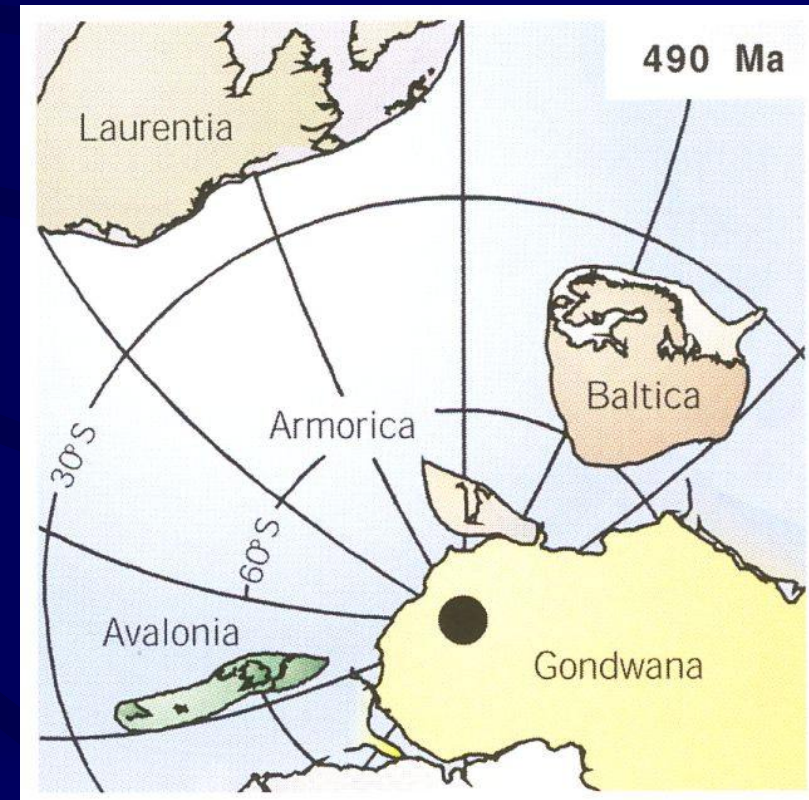
- Messung von Richtung und Intensität des magnetischen Feldes an der Erdoberfläche (Magnetometer) oder im Weltraum (Satelliten)
- Simulation der Magnetfeldänderungen mit hydrodynamischen Modellen
→ Physikalische Eigenschaften und Dynamik des äußeren Erdkerns

Paläomagnetik

- Erdgeschichtliche Rekonstruktion der geographischen Breite von tektonischen Platten
 - Bestimmung der Magnetisierungsrichtung (Inklination) und des Alters
 - Annahme: Dipolfeld



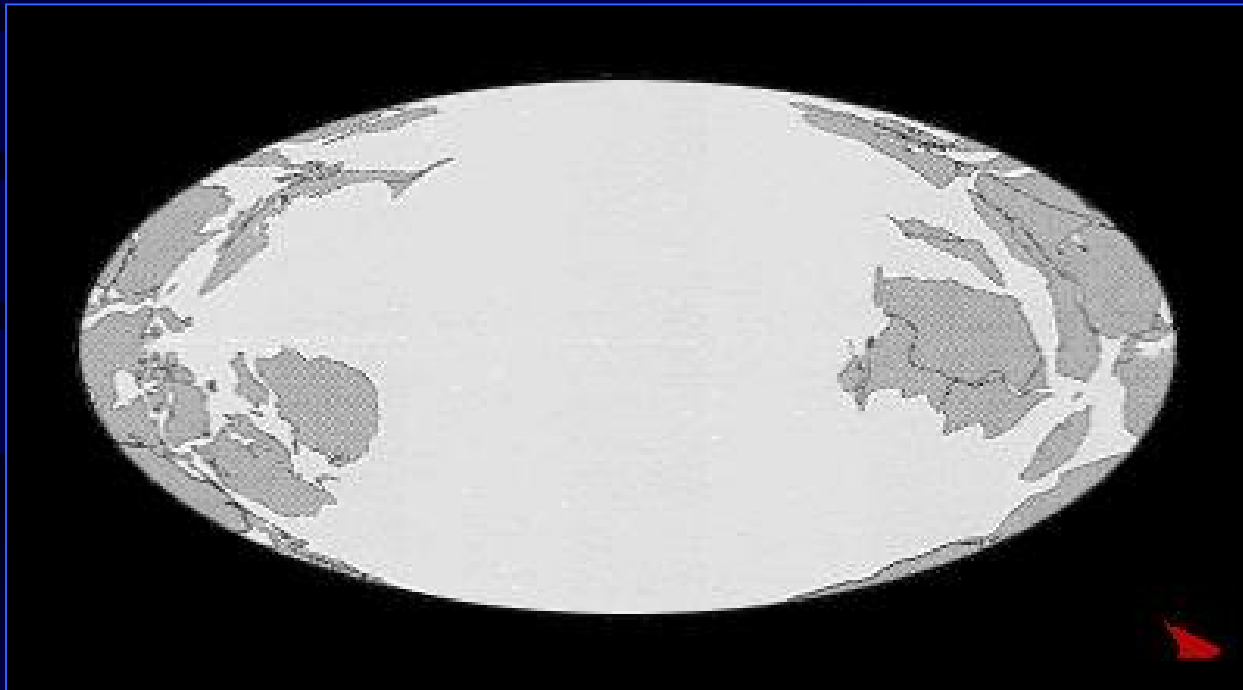
Aus: R. Meißner & U. Vetter: Großräumige Bewegungsvorgänge auf der Erde (Schöningh, 1982)



Aus: W. Franke: Vereinigte Platten von Europa (2006)

Plattentektonisches Daumenkino

Rekonstruktion seit dem Präkambrium (750 Ma)

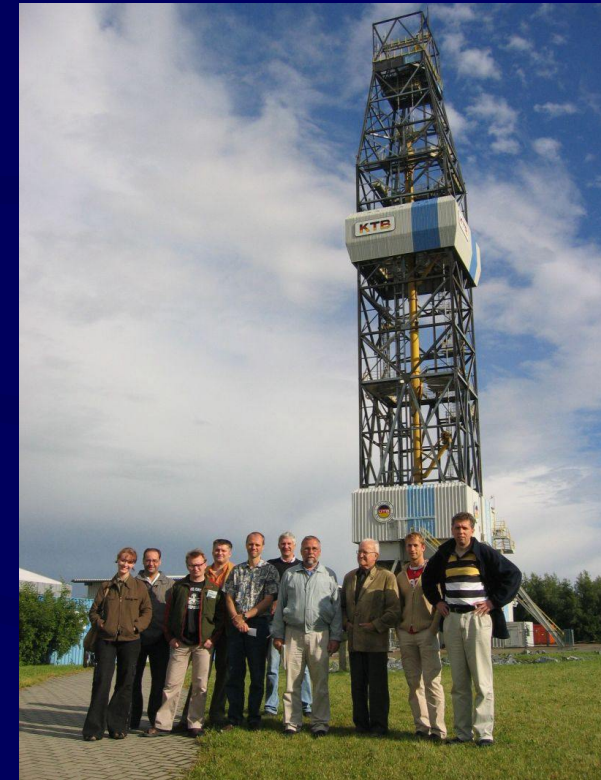


Aus: <http://www.geologieinfo.de>

Direkte Verfahren

Wie gelangt man an Proben aus dem Erdinnern?

- Durch Bohrungen
- Durch tektonische Prozesse

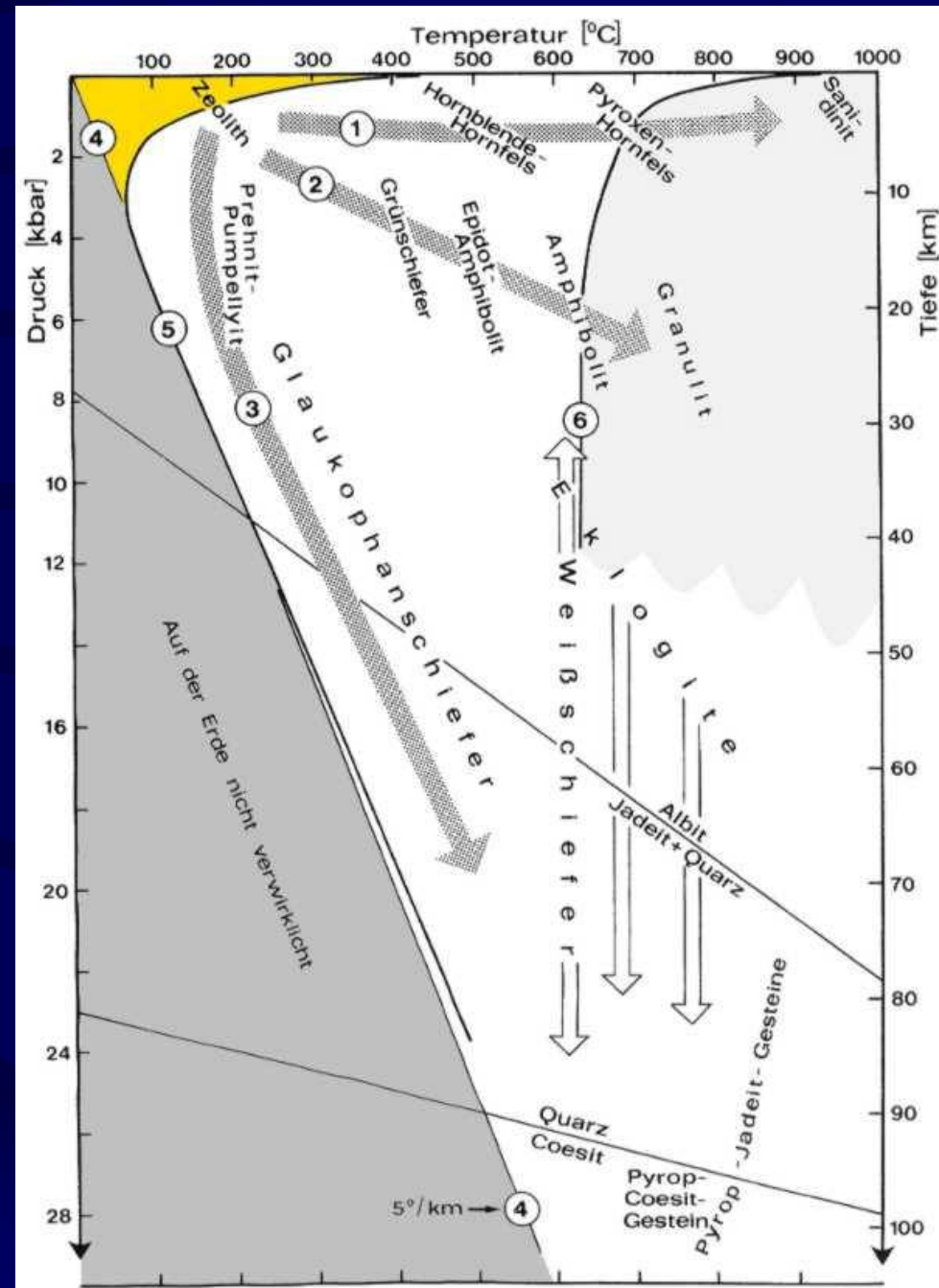


- Durch Vulkanismus

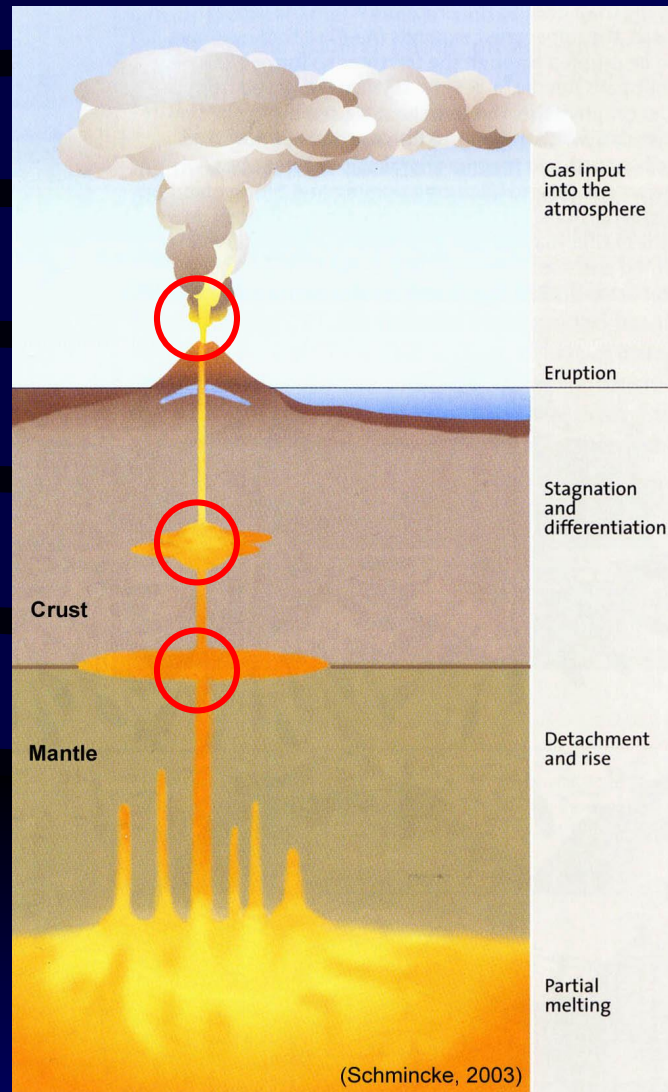


Thermobarometrie

- Bestimmte Mineralien erlauben Rückschlüsse auf Druck- und Temperaturverhältnisse
- Rekonstruktion der Versenkungs- und Hebungsgeschichte
- Versenkung: tektonische Stapelung (Faltung, Überschiebung)
- Hebung: Erosion, tektonische Denudation
- max. ~100 km



Vulkane: Probenlieferanten aus der Tiefe

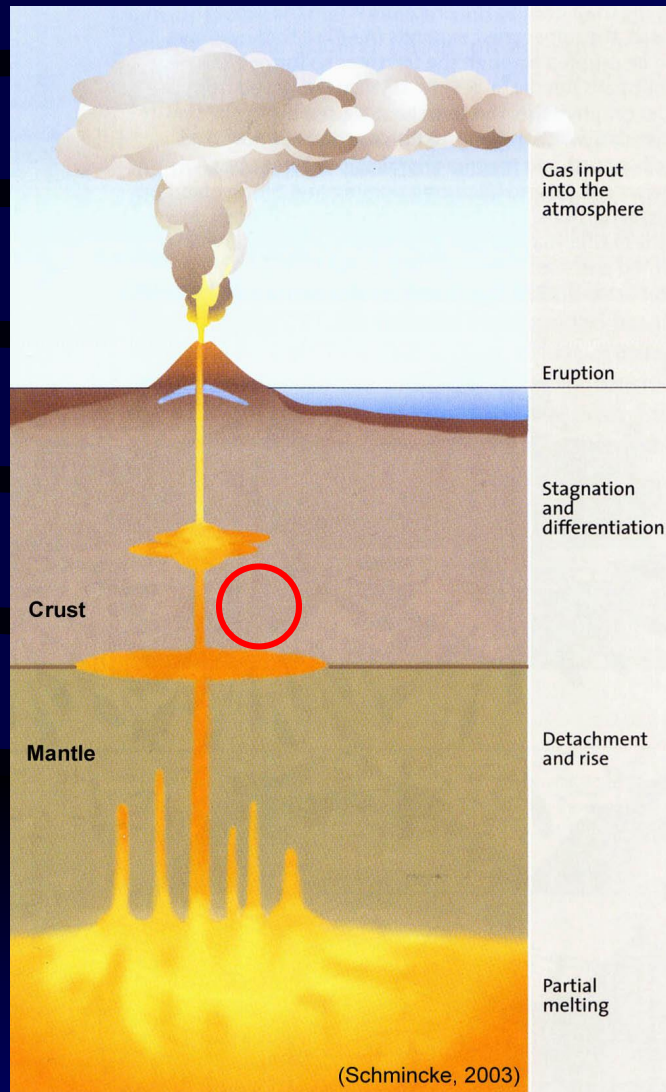


Lava (Basalte u.a.)



Vulkan-Magma-System

Vulkane: Probenlieferanten aus der Tiefe

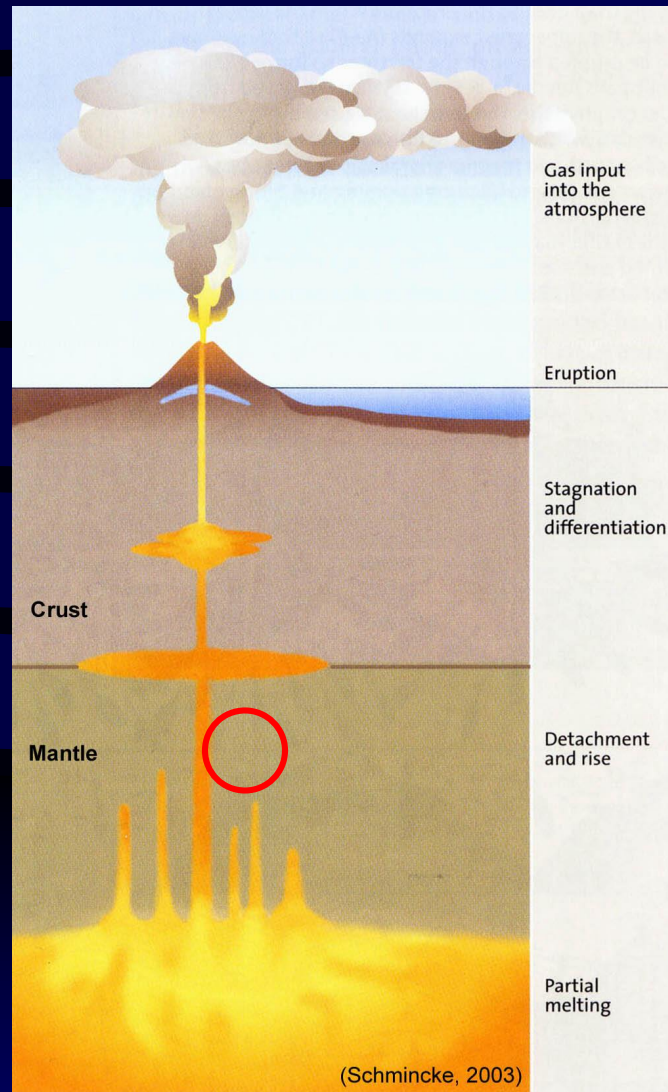


Vulkan-Magma-System

Xenolithe aus der Kruste



Vulkane: Probenlieferanten aus der Tiefe

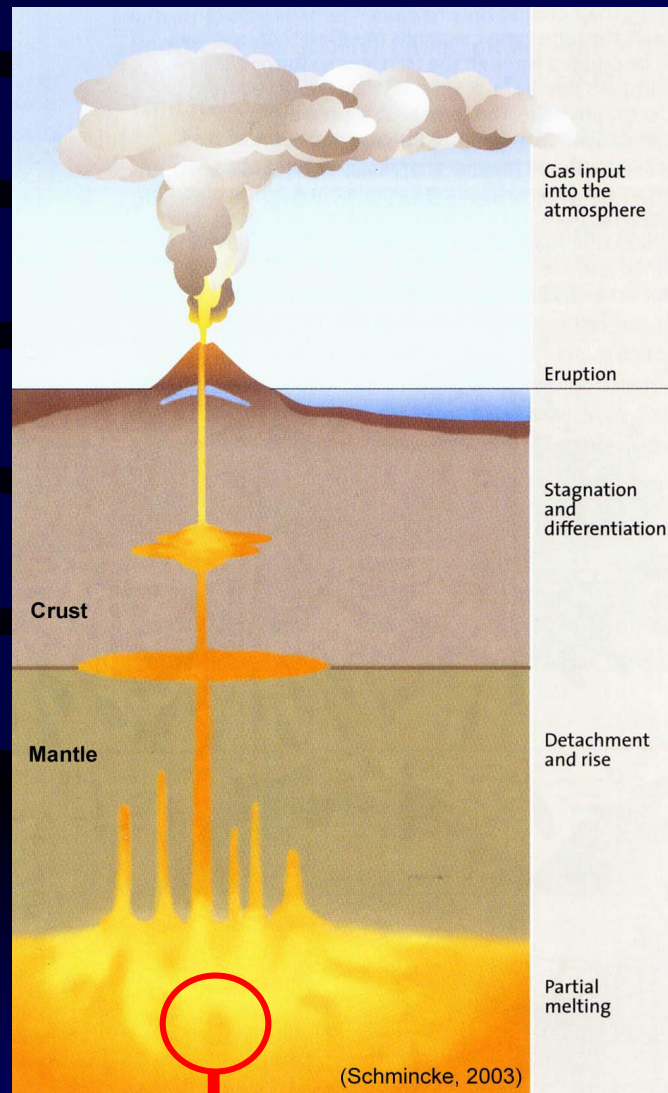


Vulkan-Magma-System

Xenolithe aus dem Mantel



Vulkane: Probenlieferanten aus der Tiefe



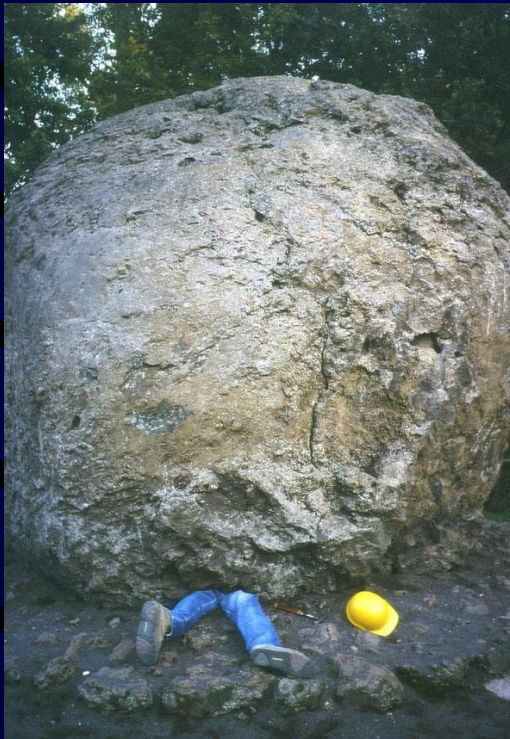
Vulkan-Magma-System

Basalt-Geochemie



Hinweise auf geologische Prozesse in den größten Tiefen... fast bis in den Erdkern!

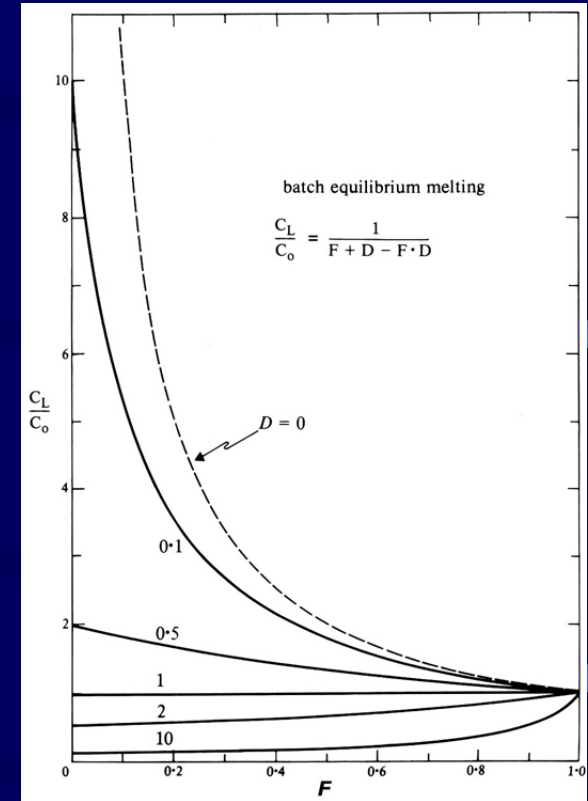
A. Klügel (2007)



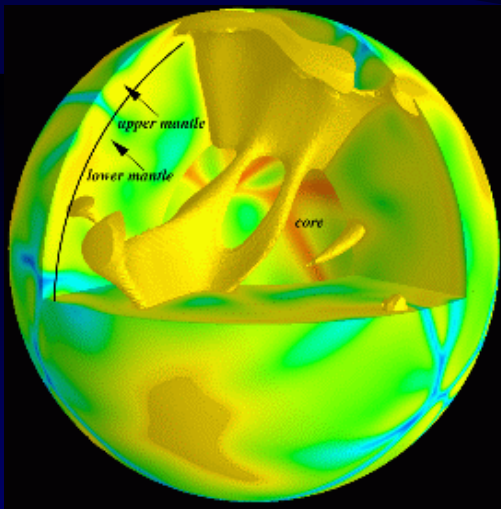
Probennahme



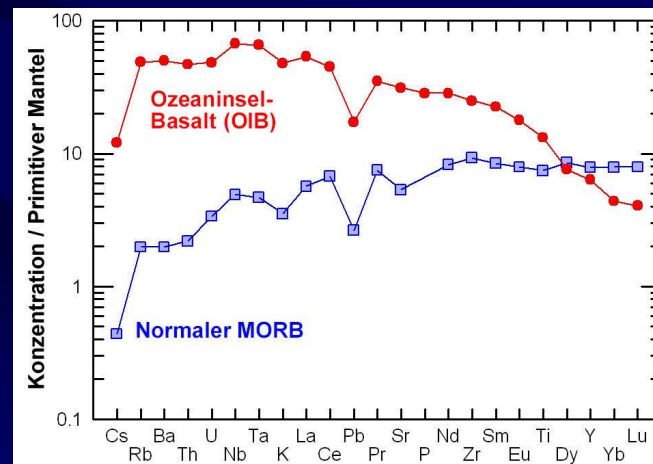
Analysen



Gesetzmäßigkeiten



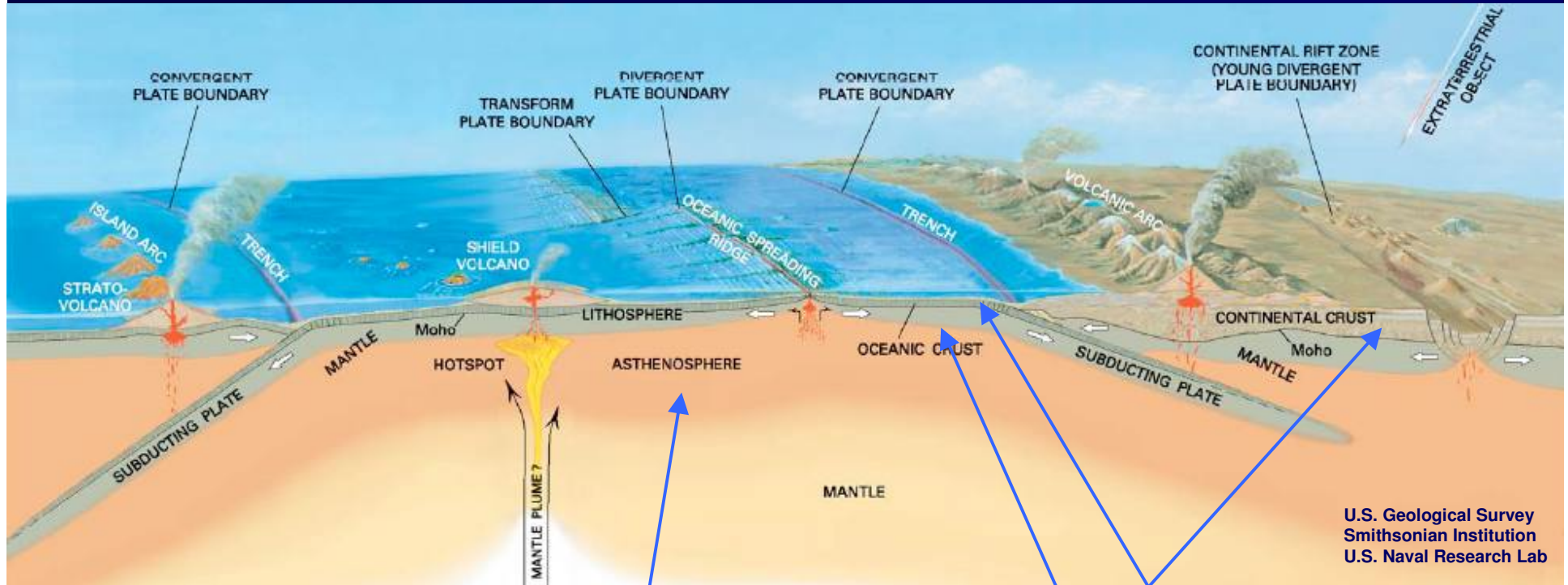
Globale Manteldynamik



Zusammensetzung der Mantelquelle

A. Klügel (2007)

Vulkane und Plattentektonik



Subduktionszone

Hotspot

Mittelozeanischer Rücken

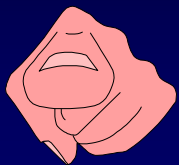
Kruste +
Subduktionszone

plastischer
Mantel:

spröder
Mantel

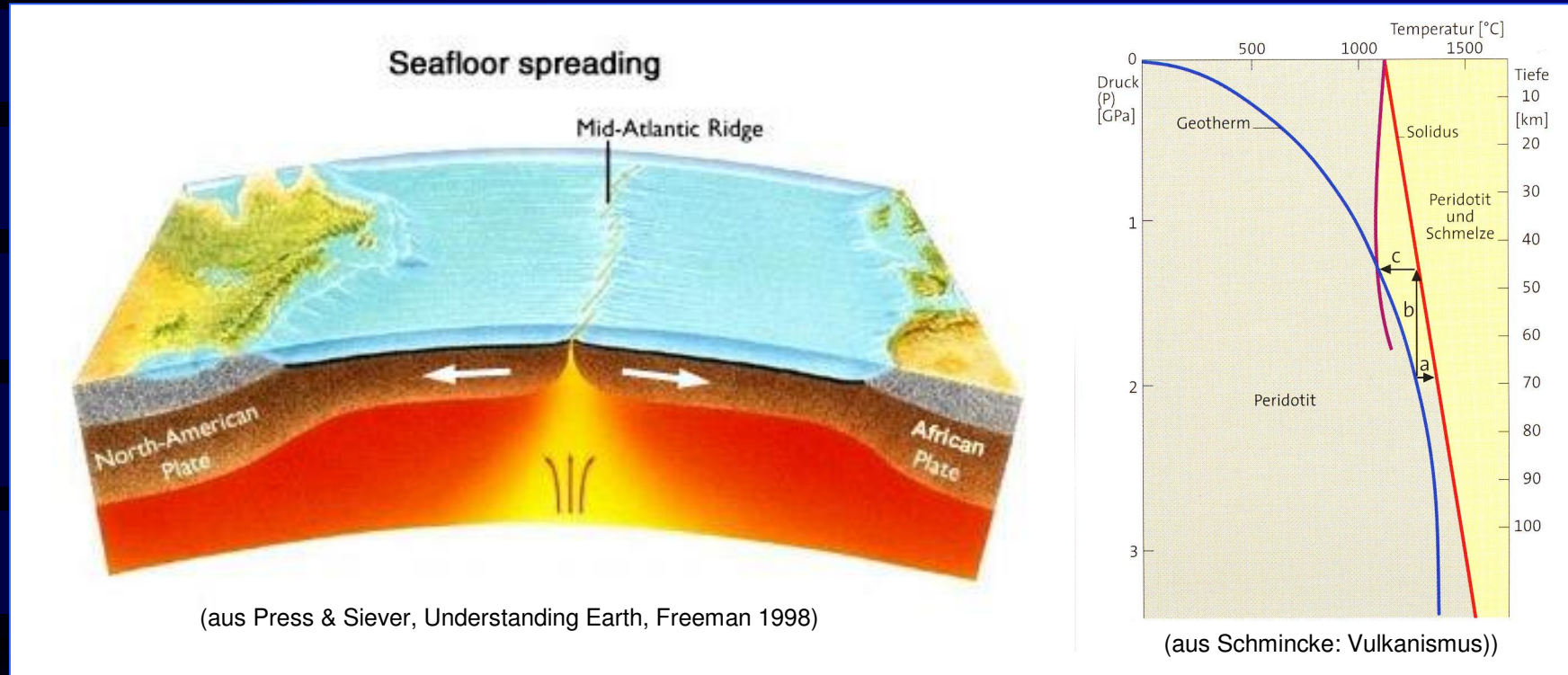
Astenosphäre

Lithosphäre



Die Astenosphäre ist plastisch, aber nicht flüssig!!

Bildung ozeanischer Kruste an den mittelozeanischen Rücken



Meist **passives** Spreading:

Platten driften auseinander, Gestein des oberen Mantels steigt auf und beginnt durch Druckentlastung zu schmelzen.



Plattentektonik im Lavasee des Erta Ale, Äthiopien

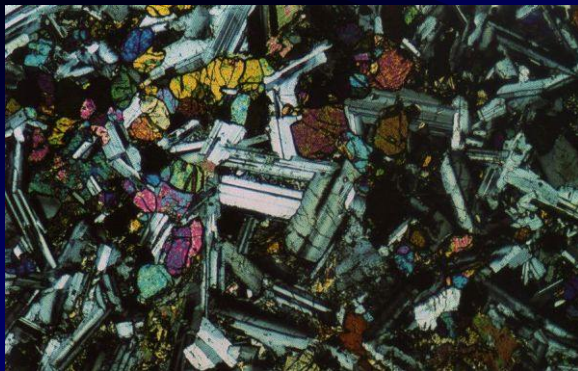
© J. Alean, R. Carniel, M. Fulle / Stromboli Online

Vergleich ozeanische – kontinentale Kruste

Ozeanische Kruste:

- Älteste Gesteine: 200 Ma
- Typ. Gestein: Basalt (MORB)
- Dichte: ca. 3,0 – 3,3
- Krustendicke: 5-8 km
- Nur in Ausnahmefällen an Gebirgsbildung beteiligt
- wird meistens subduziert

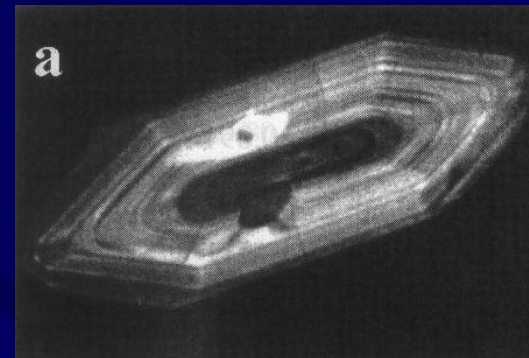
➔ Wird permanent recycelt!



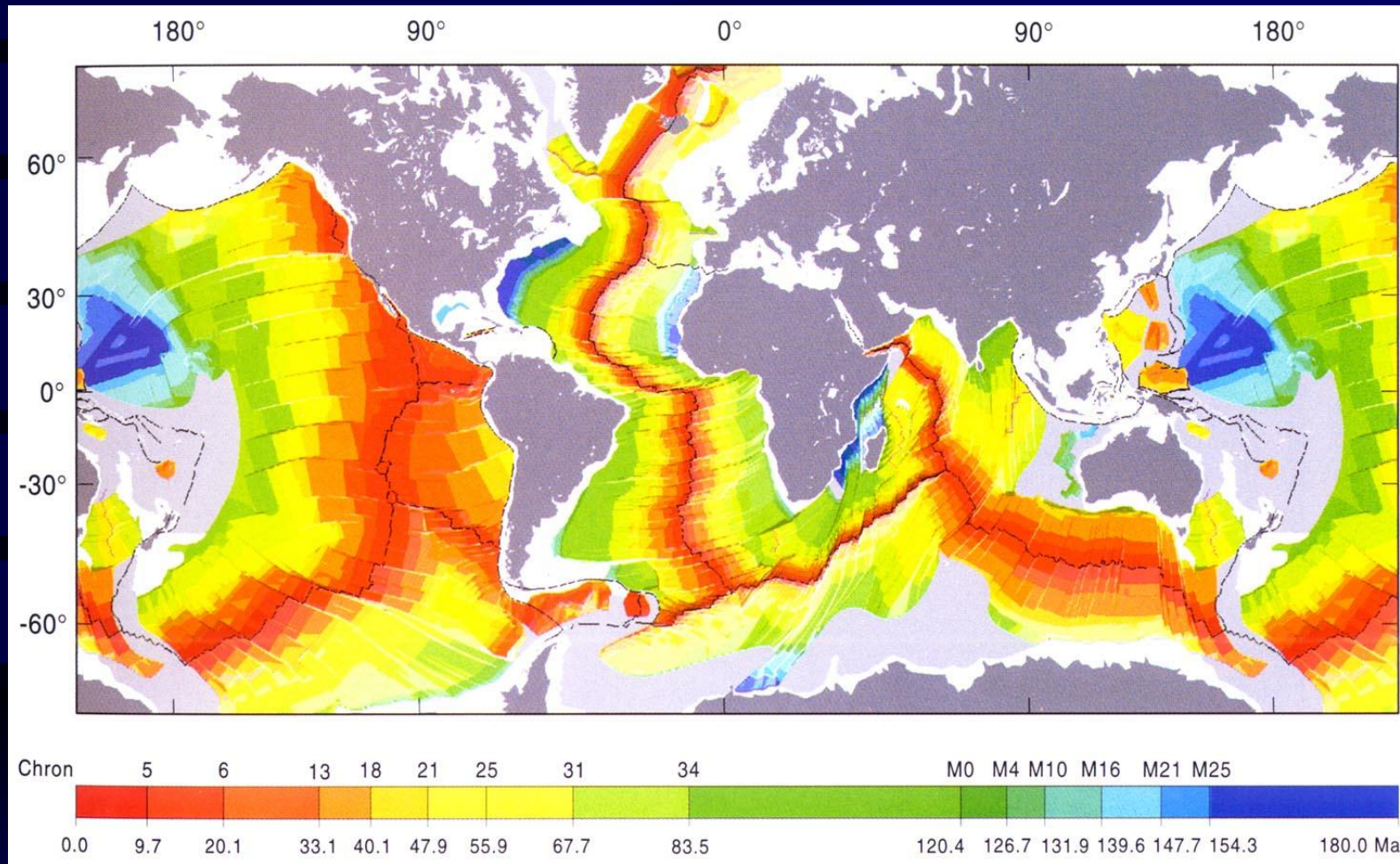
Kontinentale Kruste:

- Älteste Gesteine: 4000 Ma (Zirkone bis 4400 Ma)
- besteht aus verschiedensten Gesteinen mit oft langer Geschichte
- Dichte: ca. 2,7
- Krustendicke: 30-40 km (bis 70)
- Gebirgsbildung!
- wird nie subduziert (zu leicht!)

➔ Bleibt ständig erhalten!

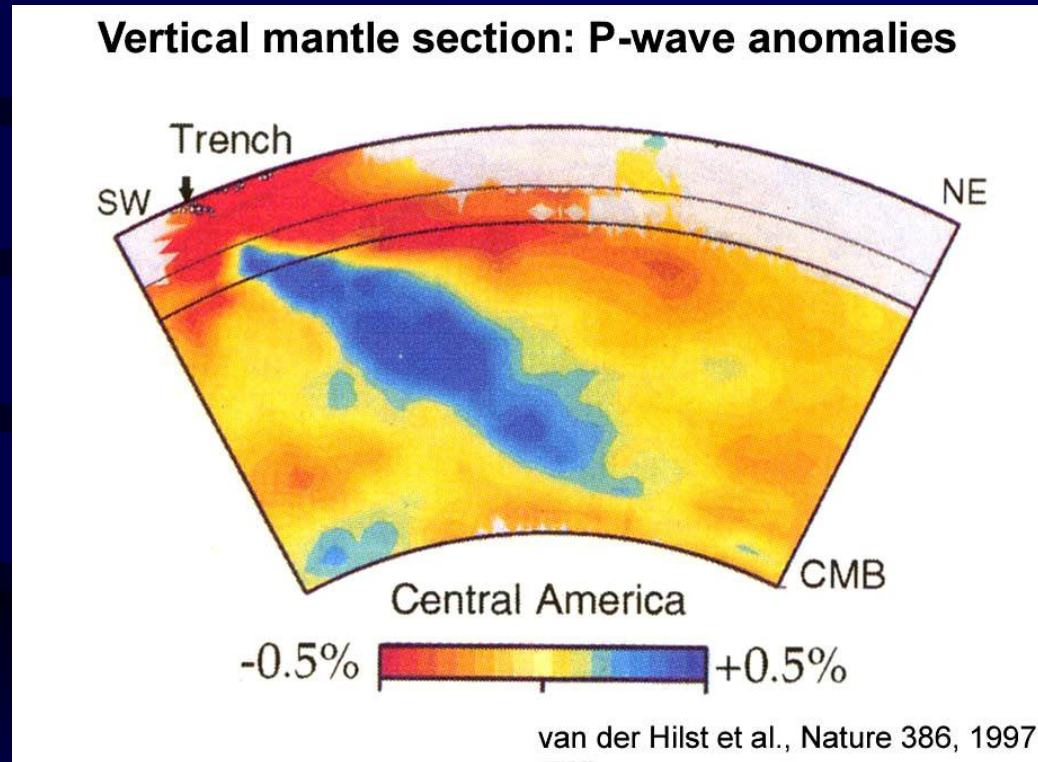


Alter von Ozeankruste

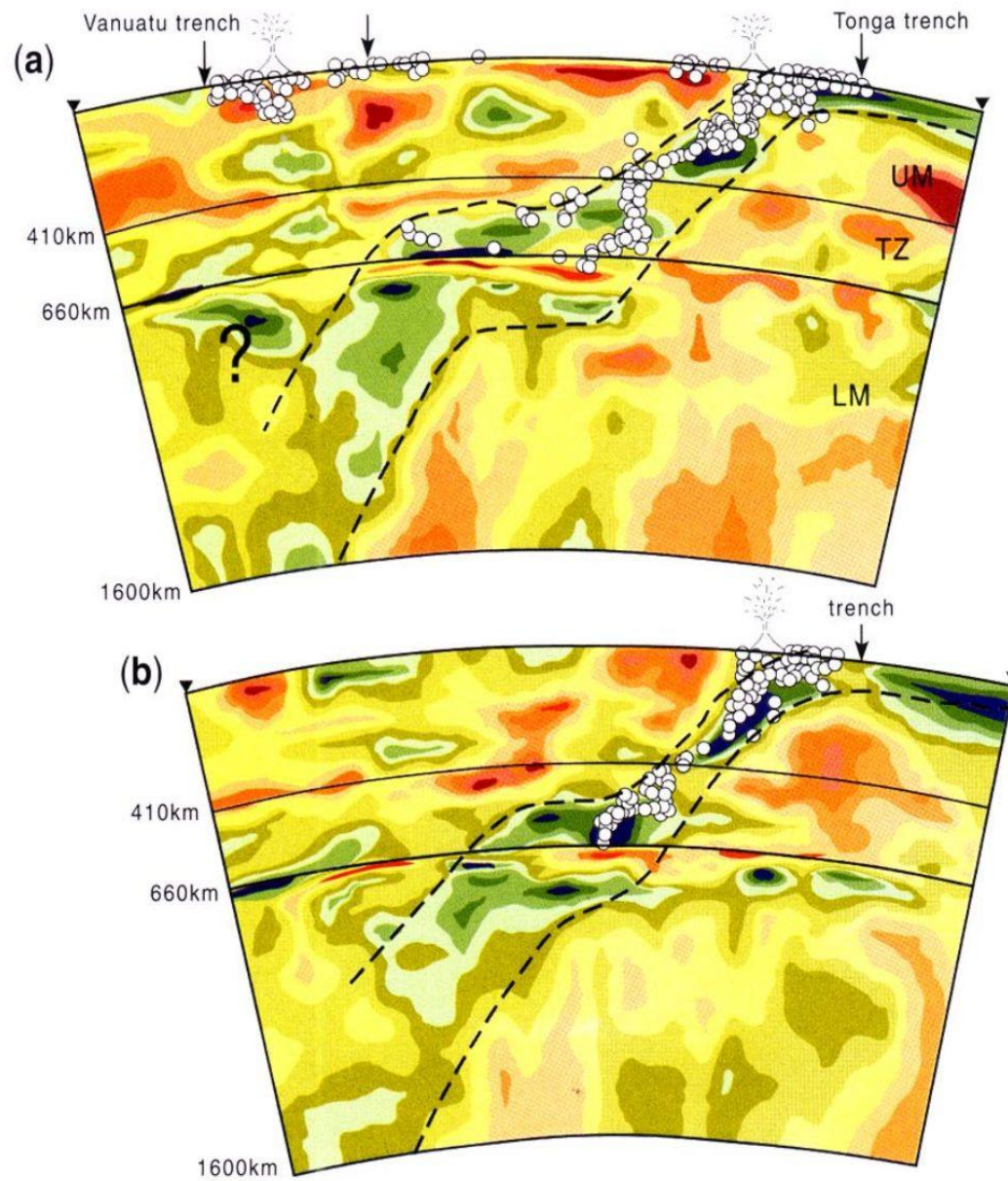


Ozeankruste wird im Mittel nur ca. 80 Mio. Jahre alt, maximal 200 Mio. Jahre - dann Subduktion!

Tauchen subduzierte Platten in den unteren Mantel ab?

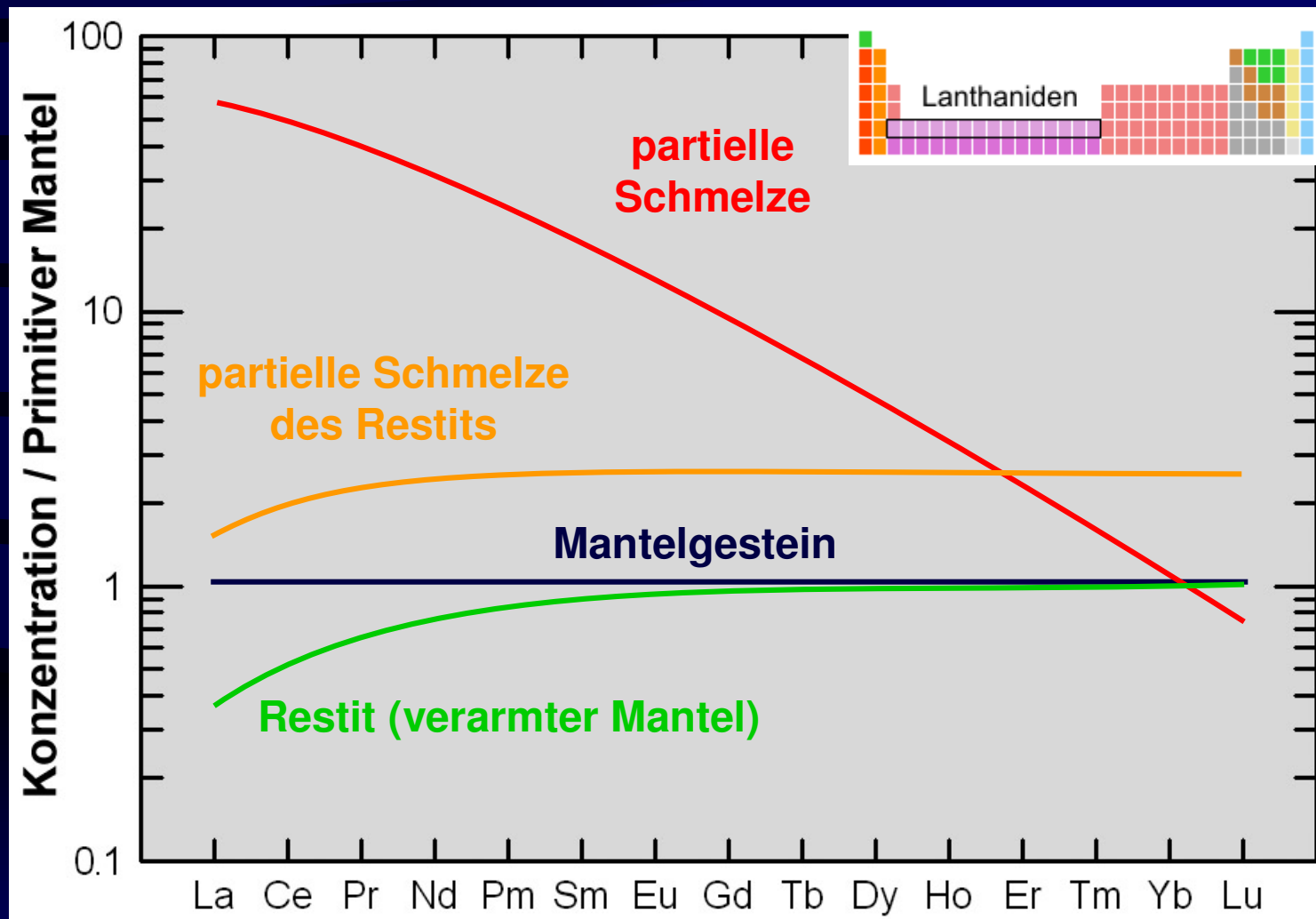


Laufzeitanomalien seismischer Wellen



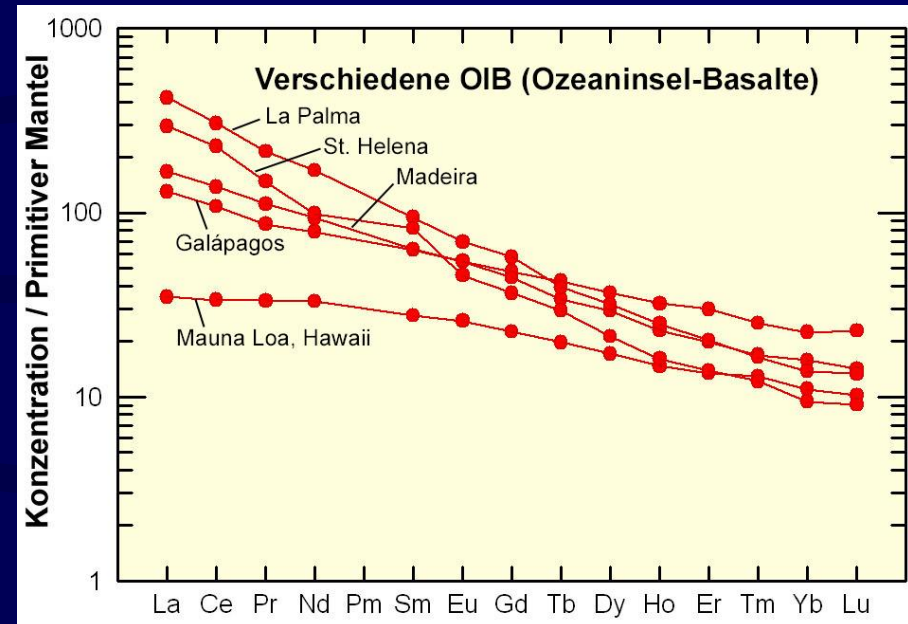
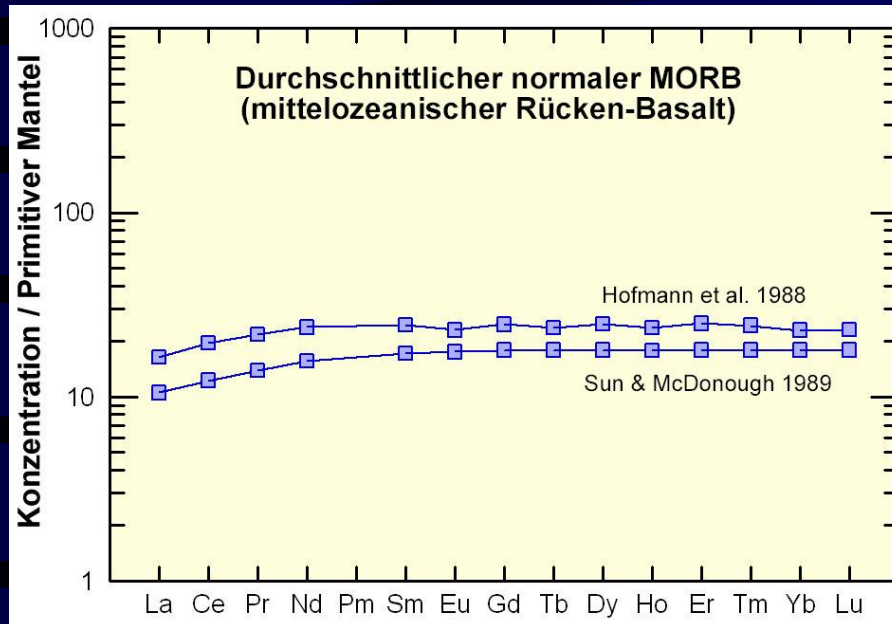
Tomographic sections of the Tonga-Kermadec Trench (Mussett and Khan 2000)

Geochemie der Seltenen-Erden-Elemente



← **inkompatibel**
(bevorzugt Schmelze)

→ **kompatibel**
(bevorzugt Gestein)



Fundamentale Unterschiede der Basalte der Ozeanbecken:

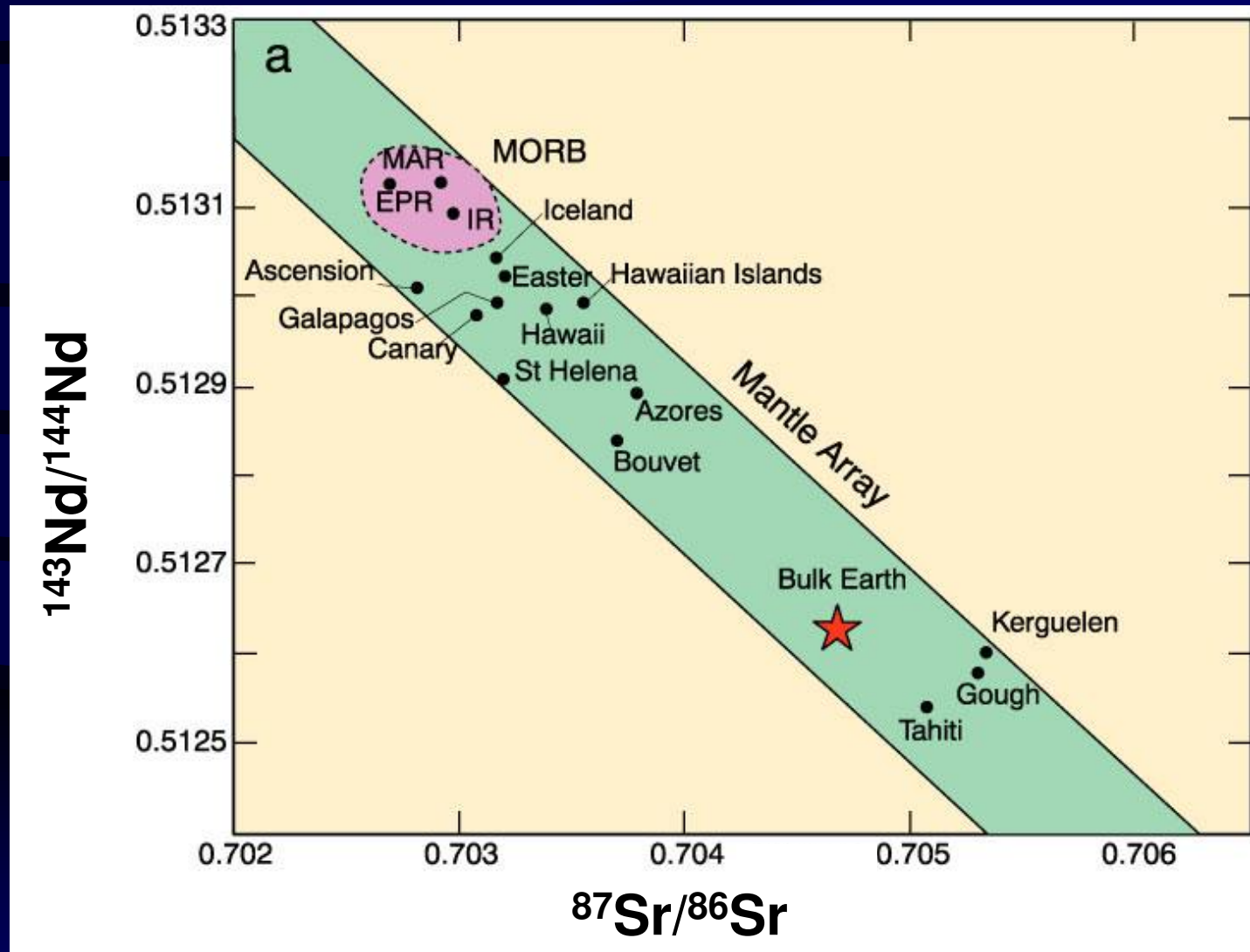
Mittelozeanische Rücken-Basalte (MORB):

- Schmelzen eines chemisch verarmten Mantels
- Stammen aus geringer Tiefe (oberer Mantel)

Ozeaninsel-Basalte (OIB) (und Subduktions-Basalte der Inselbögen):

- Schmelzen eines weniger verarmten bis angereicherten Mantels
- Stammen aus großer Tiefe (z.T. unterer Mantel)

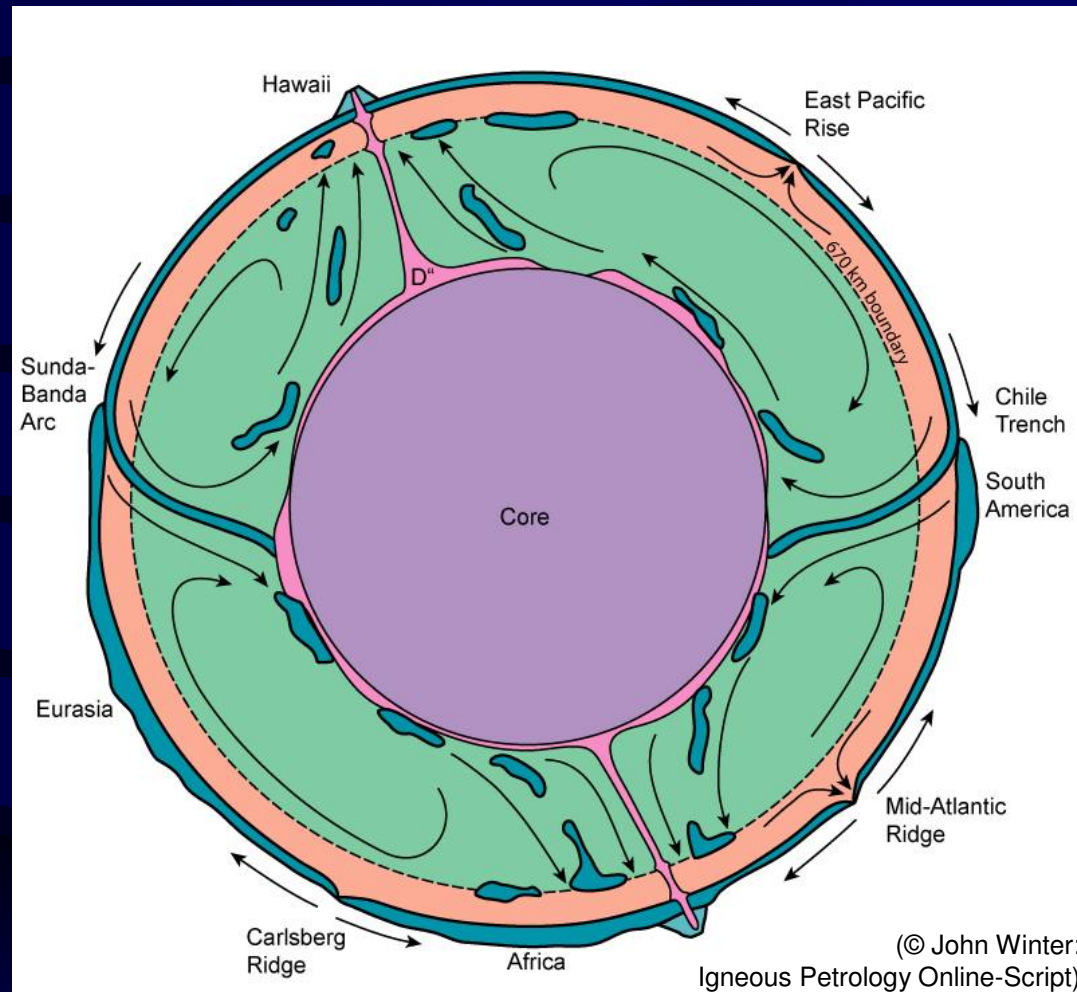
Mehr Einblicke durch radiogene Isotope



(© John Winter, Igneous Petrology Online-Script)

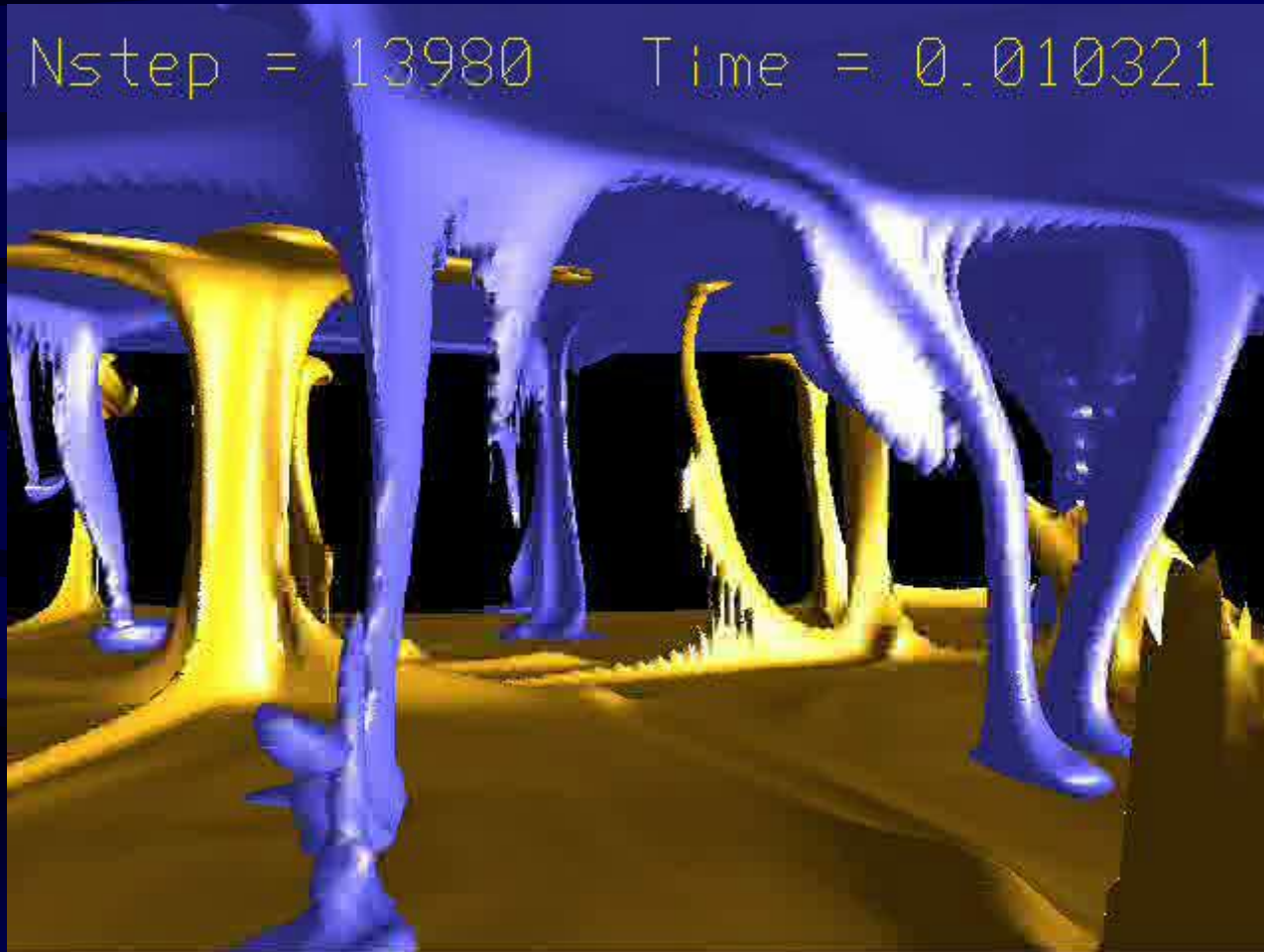
Jeder Hotspot hat seinen eigenen Isotopengeschmack!

Recycling subduzierter Ozeankruste



- Subduktion erzeugt permanent Heterogenitäten im Erdmantel
- Subduzierte Ozeankruste: bis zu 10 Gew.% des Erdmantels!
- Recycling "vererbt" geochemische Eigenschaften an OIB

Simulation der Mantelkonvektion



Universität Münster, Geodynamik / Prof. U. Hansen

Zusammenfassung

- Die Plattentektonik ist das einzige geodynamische Modell, das dem heutigen Stand der geowissenschaftlichen Erkenntnisse gerecht wird
- Bei der Erforschung der Prozesse im Erdinnern spielt der technologische Fortschritt eine wichtige Rolle, z.B.
 - geophysikalische Messtechnik
 - Satelliten
 - Spurenelementanalytik
 - Petrophysik
 - Rechentechnik
- Oft kann eine Fragestellung mit einer Technik allein nicht gelöst werden → Interdisziplinäres Arbeiten!

Unvollständig gelöste Probleme

- Gibt es unterschiedliche Konvektionszellen im oberen und unteren Mantel, oder ist die Konvektion mantelübergreifend?
- Welche Plumes stammen aus welcher Tiefe?
- Wie lassen sich Bewegungen im Erdmantel beobachten?
- Wie funktioniert die Kopplung zwischen Erdkern und Erdmantel?
- Wie ändert sich das Magnetfeld? Vorhersage?

Danke für's Zuhören!