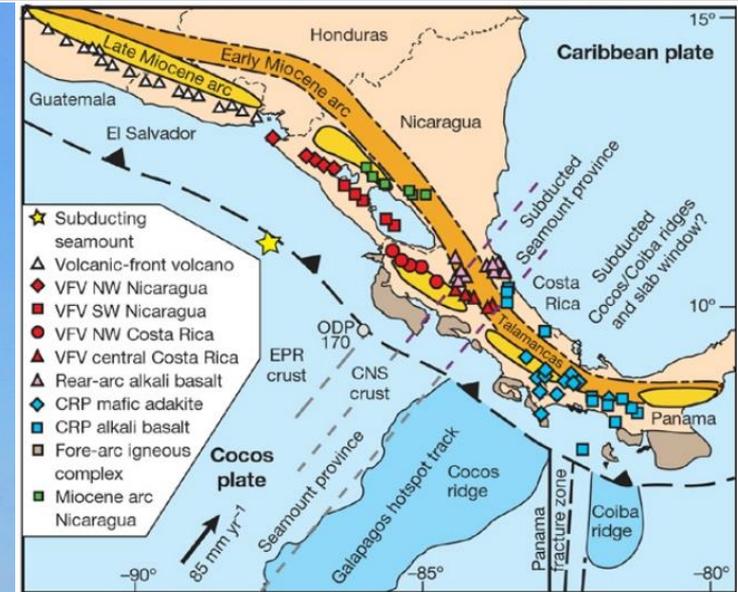
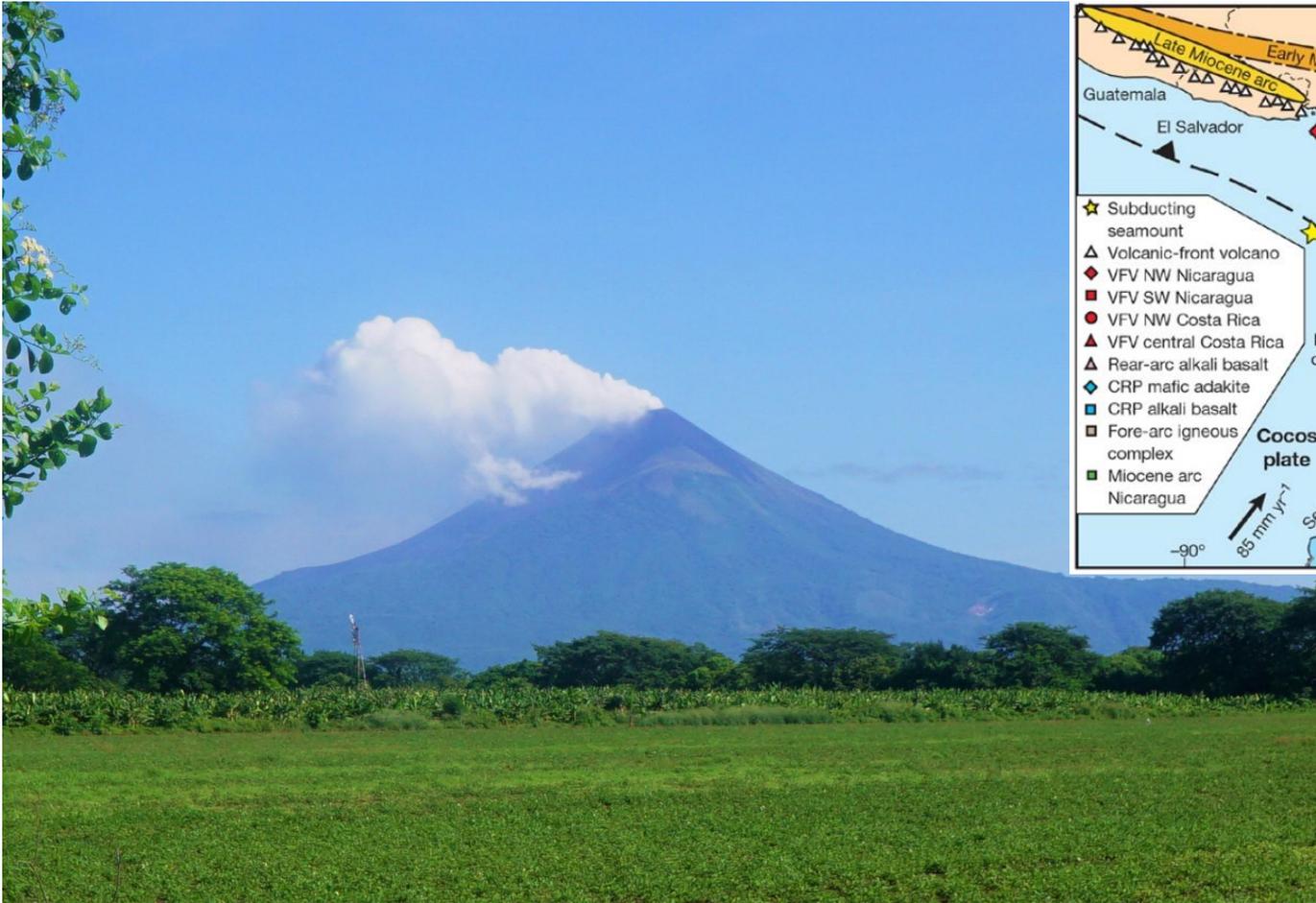


Estructuras y Reservorios

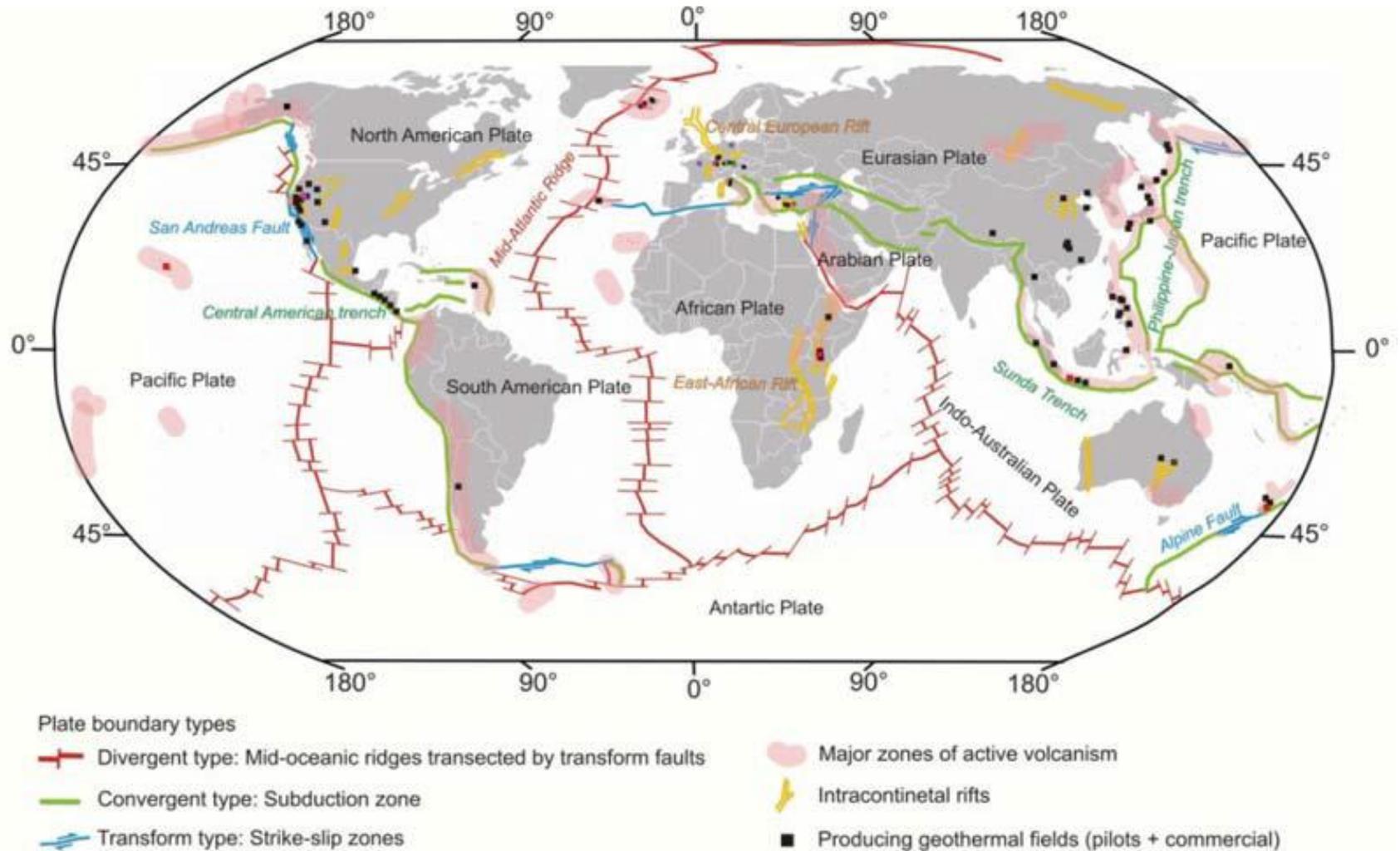
El rol de las estructuras geológicas para la exploración geotérmica



Geología de Estructuras

- Trata la orientación de los elementos tectónicos y de los paquetes de roca
- Trata definir „zonas homogéneas“ y el carácter de sus límites hacia otras
- Ordena los elementos tectónicos según sus épocas de formación y busca encontrar mecanismos para estos eventos
- Busca deducir de los patrones de estructura, campos actuales y anteriores de stress y strain resultante
- Es indispensable para entender ubicación y carácter de caminos de movimiento de fluidos en el subsuelo

Desde los patrones globales ...



... hasta lo más detallado

Tipos de planos de ruptura:

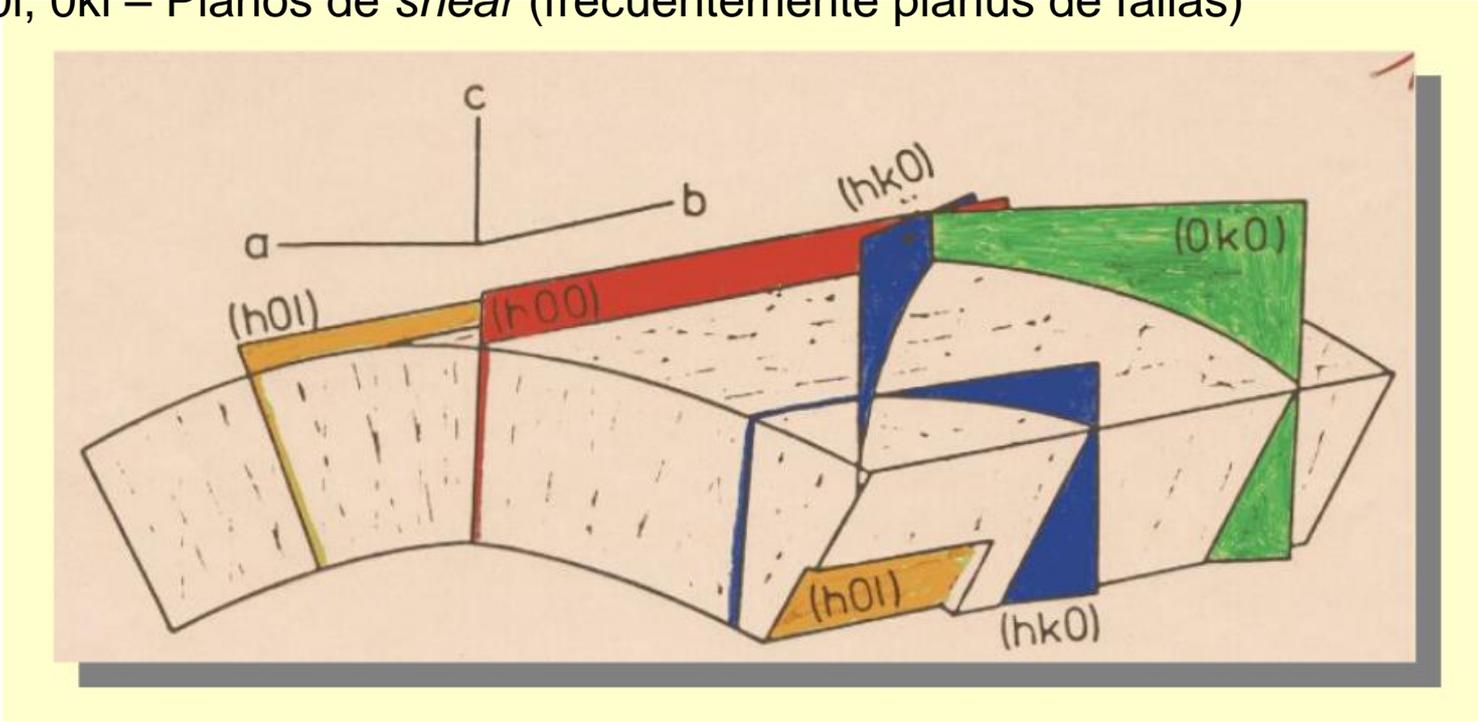
a- Eje de presión máxima, c- eje de presión mínima

b- Eje ortogonal a los dos (formará el eje de pliegues, p. ej.)

$h00$ - Planos bc – ortogonales a máxima presión

$0k0$ - Planos ac – ortogonales a mínima presión (frecuentemente fisuras abiertas)

$hk0$, $h0l$, $0kl$ – Planos de *shear* (frecuentemente planus de fallas)

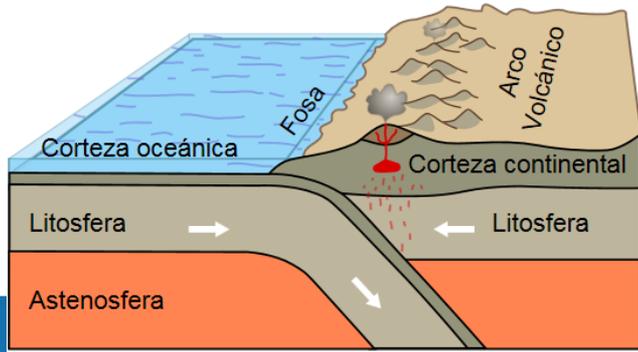
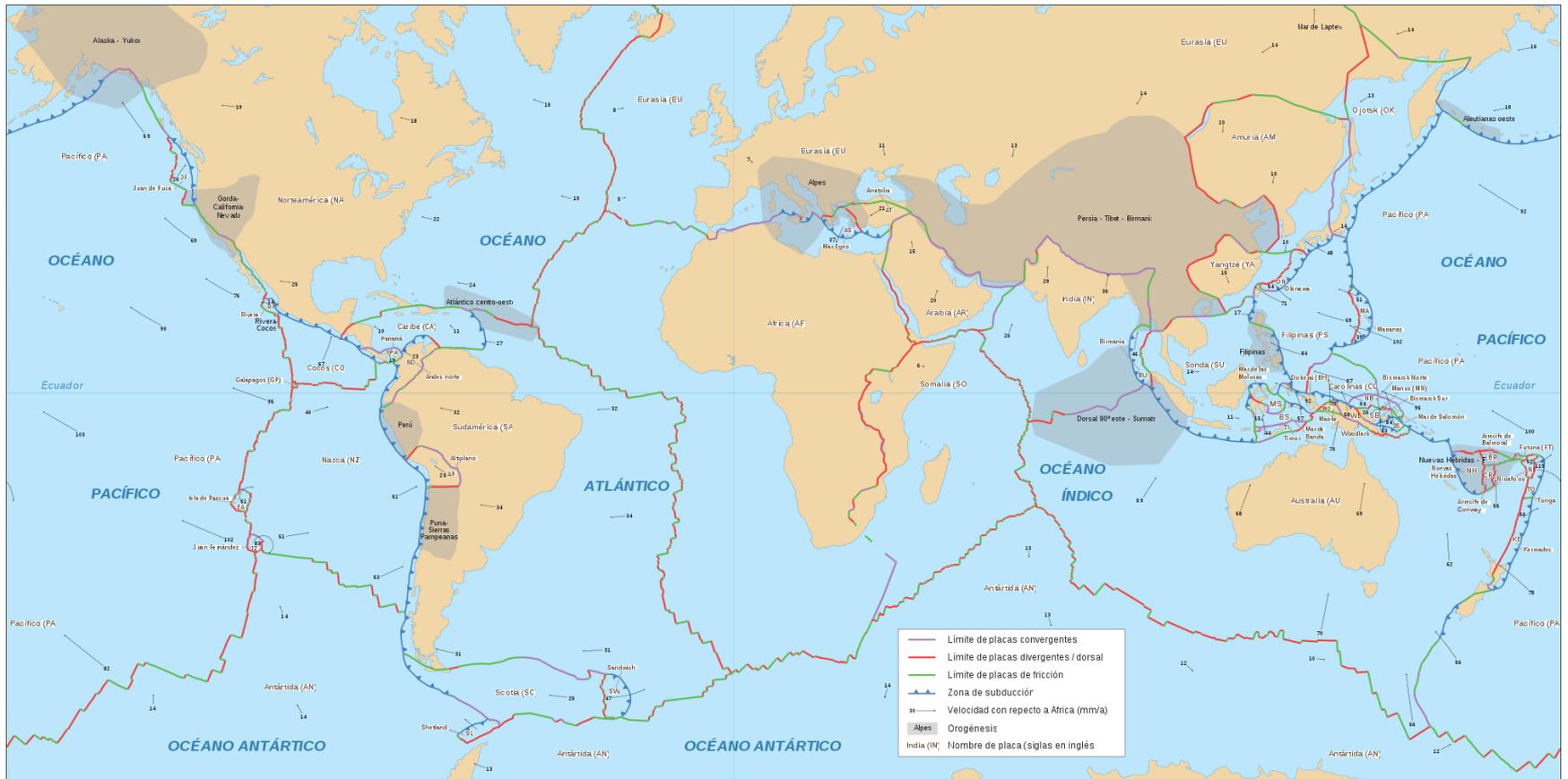


Las estructuras geológicas – tectónicas reflejan patrones de tensión de la corteza o partes de la corteza.

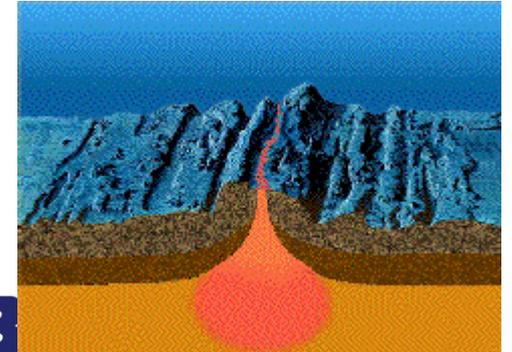
Sus formas son influenciadas por

- **Tensión** actual y las tensiones diferentes en los patrones anteriores,
- **Propiedades del material deformado** (ductilidad → Plegamiento, flexión, rigidez → Fracturas, rupturas, fallas)
- Condiciones de **presión y temperatura** local y regional.

Todos estos factores se influyen mutuamente.



- Límite de placas convergentes
- Límite de placas divergentes / dorsal
- Límite de placas de fricción
- Zona de subducción
- 30 → Velocidad con respecto a África (mm/a)
- Alpes Orogénesis
- India (IN) Nombre de placa (siglas en inglés)

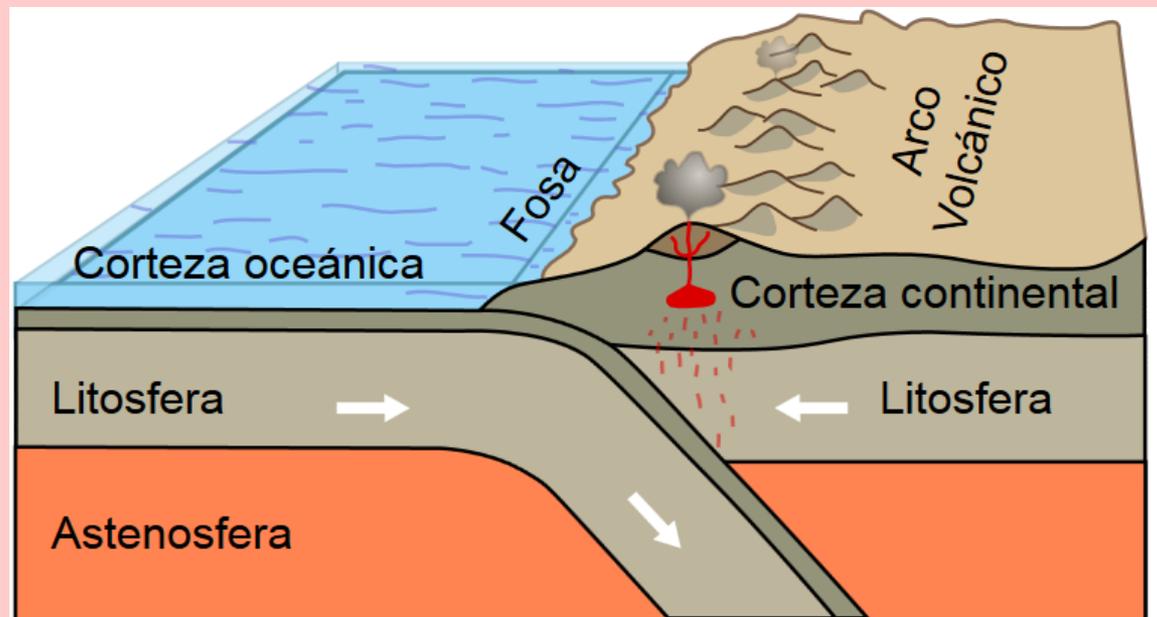


und Rohstoffe

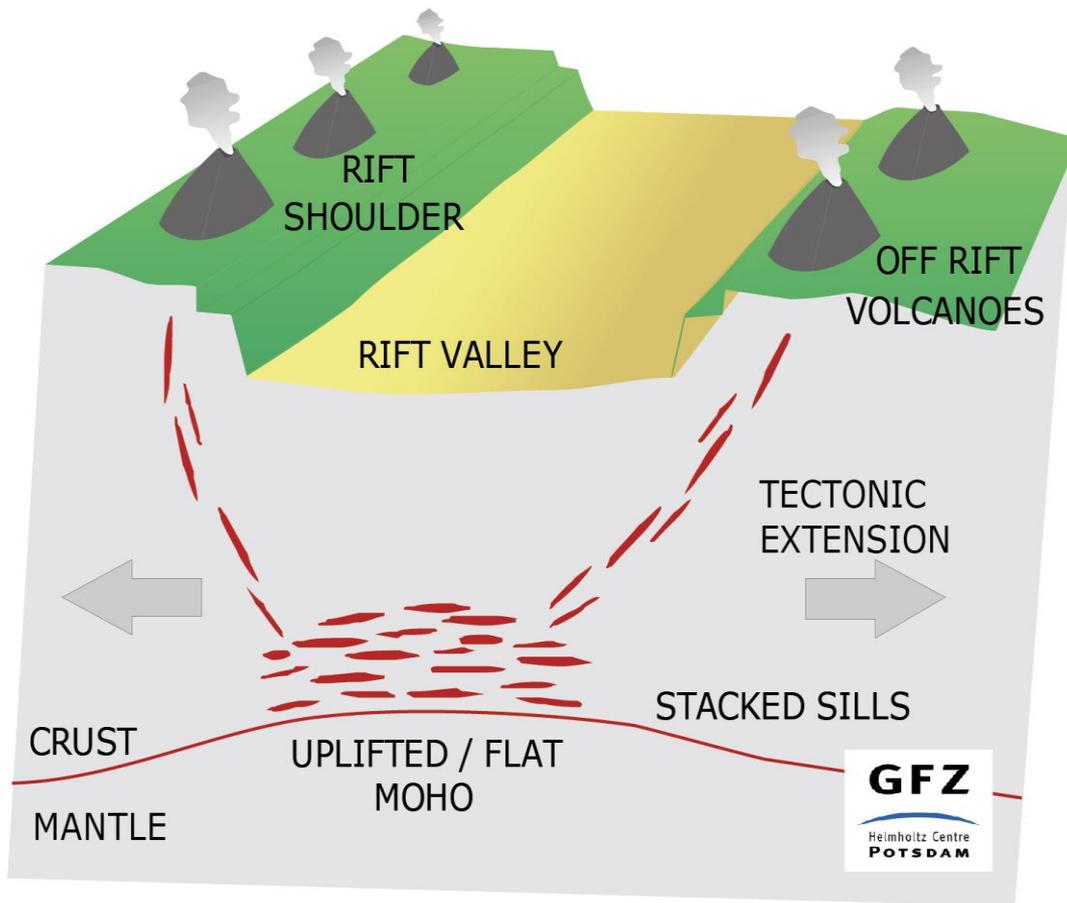
Volcanismo 1: „Zona de subducción“

.. Del tipo placa oceánica/continental:

- **Centroamérica**
- **Sudamérica occidental**
- **Norteamérica occidental, Alaska**
- **Kamchatka**
- **Japón**
- **Filipines**
- **Indonesia**
- **Nueva Zelanda**
- **el Mar Caribe**



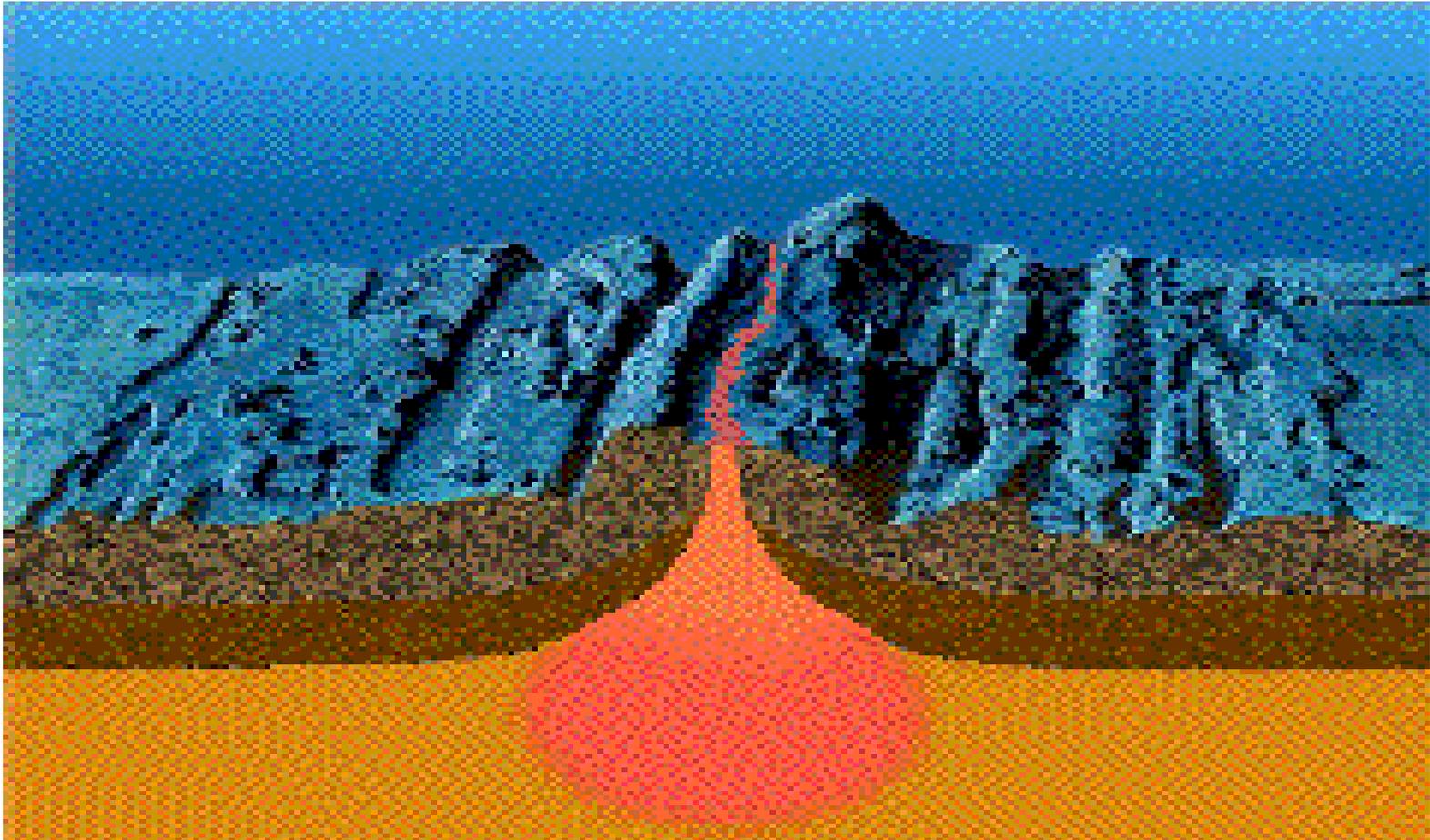
Volcanismo 2: Dorsal oceánico y rifts continentales



Ejemplos recientes:

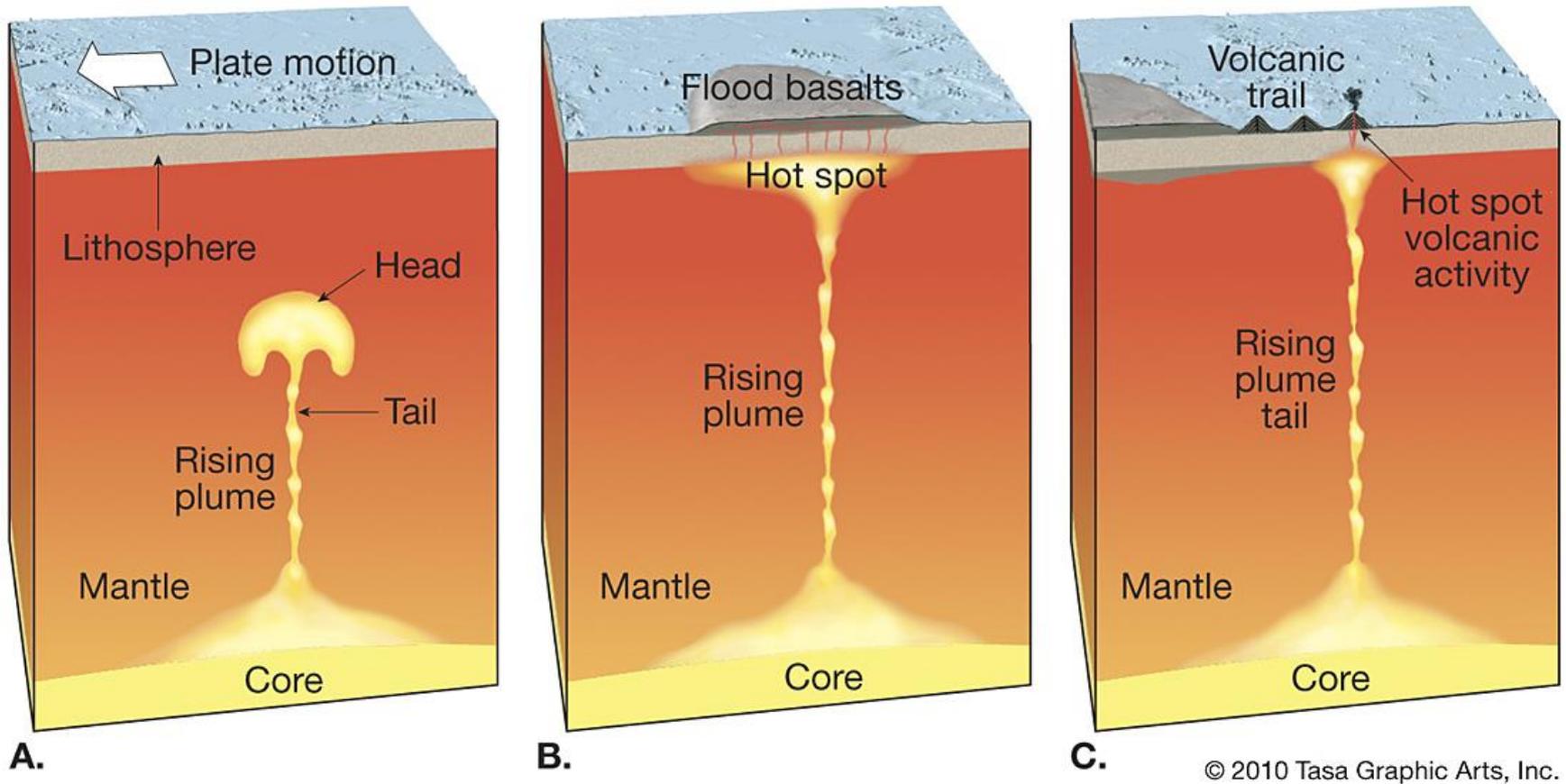
- **Africa Oriental (rift valley)**
- **Mar rojo y valle del Jordan**
- **Fosa del Rhin**

Volcanismo 2: „Dorsal oceánico y rifts continentales“



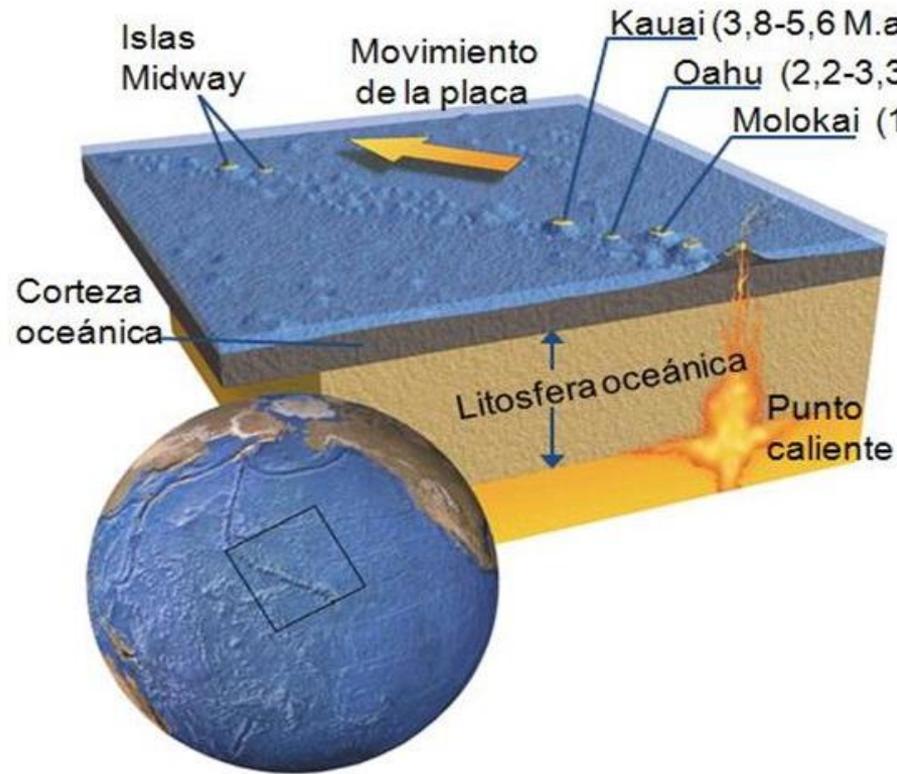
Unico ejemplo de un dorsal oceánico sobre nivel del mar: **Islandia**

Volcanismo 3: „Intra-placa / hot spot“



Ejemplos recientes: Hawaii, Galapagos, Salomon Islands, Eifel

Volcanismo 3: „Intra-placa / hot spot“



Punto caliente: islas Hawai,
Cabo Verde

Origen tectónico: Azores, Cook
australes

La posición de las placas de Centroamérica





Tierra

Temperatura en superficie:
~15°C

Temperatura del manto:
~600°C mín., 3500°C máx

Temperatura del casco:
~6000°C

Presión en superficie:
~100 hPa = 1 bar

Presión en el manto:
**Aumenta 3 bar con cada
10 m de profundidad**

Presión en centro:
~330 GPa = 33 Mbar

Emisión calórica
de la tierra:

Se mantiene en equilibrio
**Energía recibida ~
energía emitida.**

Gradiente geotermal (en la corteza)

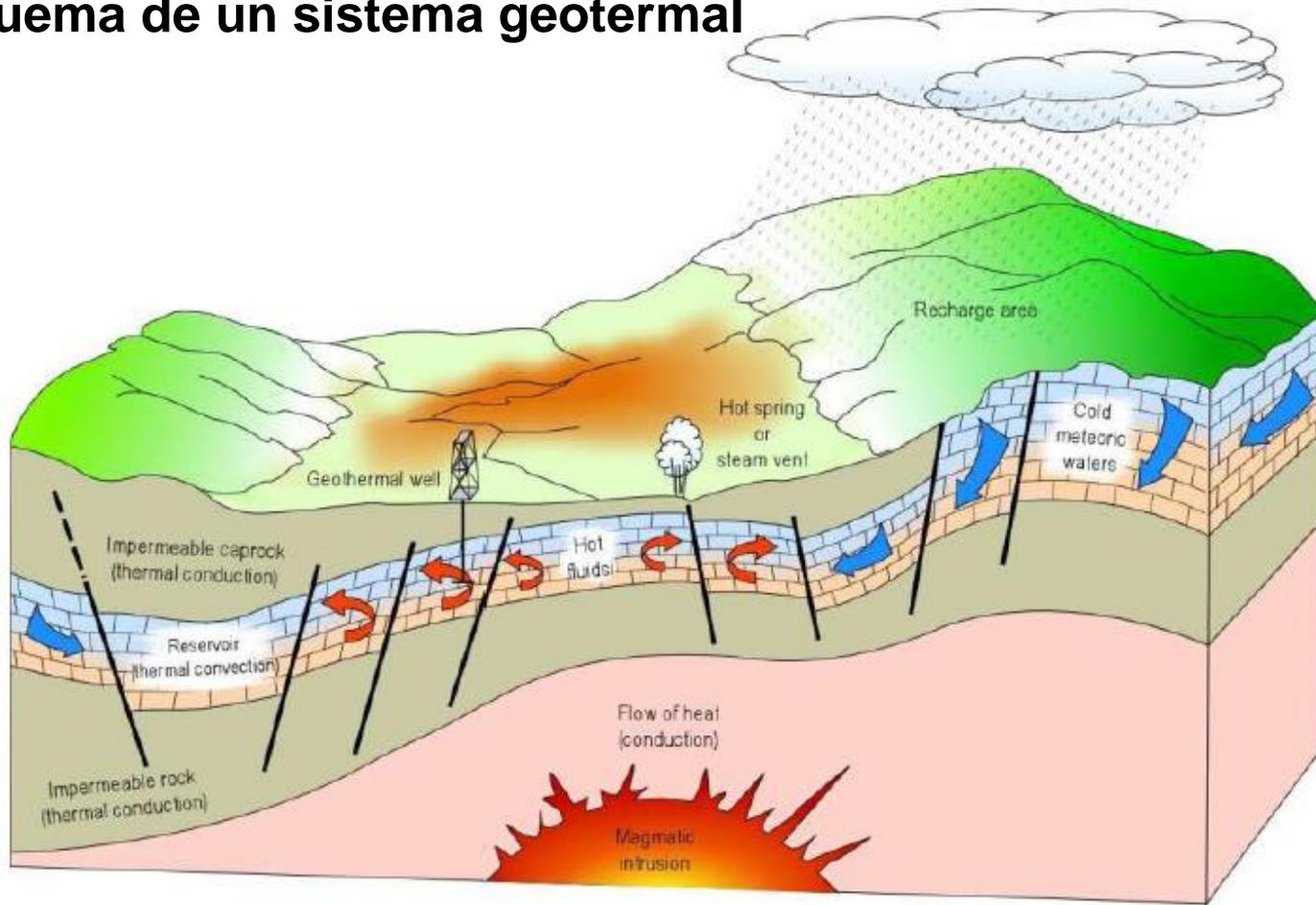
Alemania: 20 – 90 °C cada 1000 m => 50 m – 11 m / 1°C

Sudafrica: 8 – 30 °C cada 1000 m => 125 m – 33 m / 1°C

Centroamérica: Muy diverso – depende de las cercanías de magma. En el oriente de Honduras, Guatemala y Nicaragua más bajo que en las cadenas volcánicas hacia el oeste

Costa Rica: A averiguar – hacia el Caribe debería disminuir, hacia el Pacífico es poco definido por la **zona de subducción**

Esquema de un sistema geotermal



Source: Dickson et al, 2004

Hot-Dry-Rock

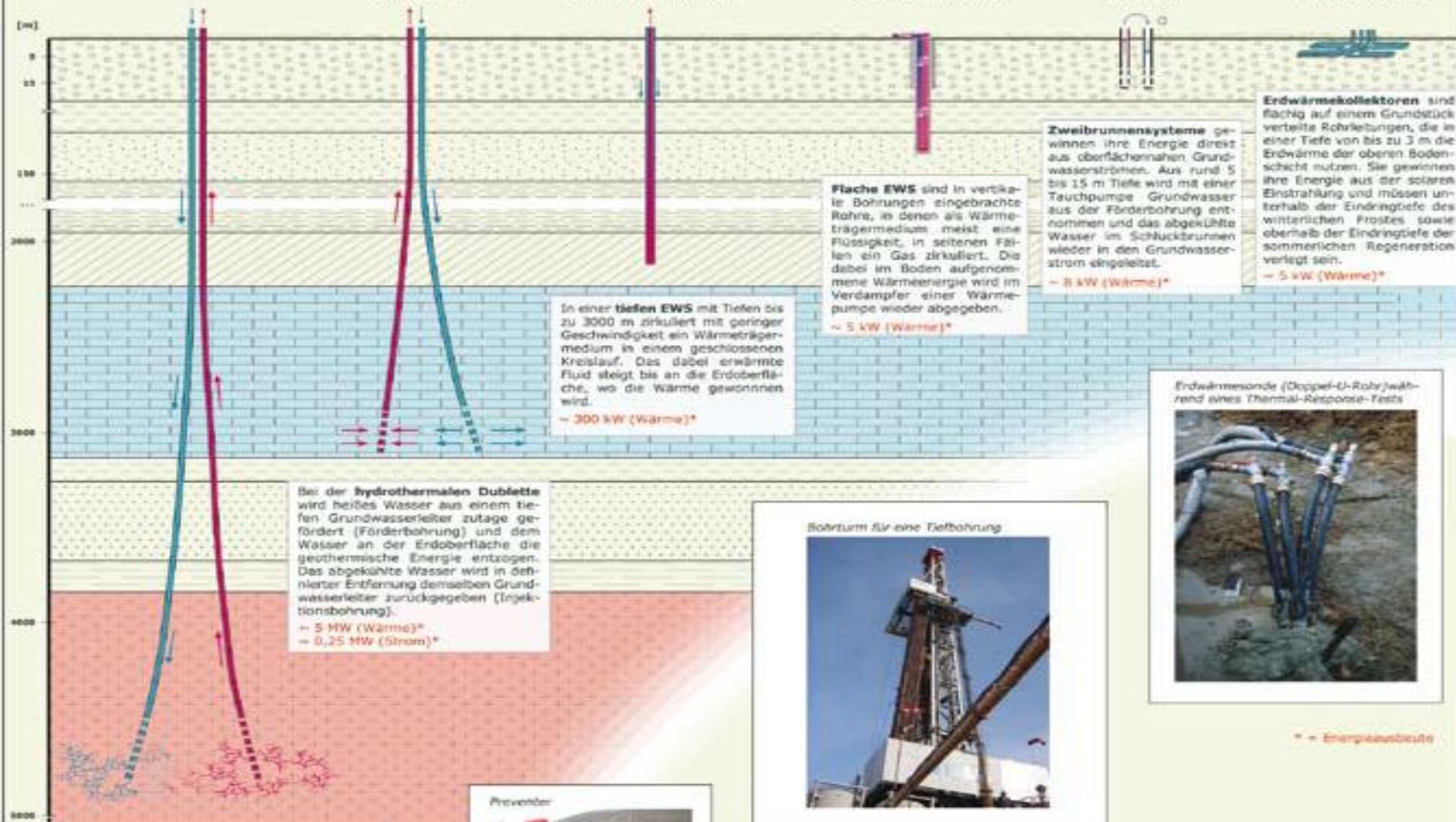
Hydrothermale Dublette

Tiefe Erdwärmesonde

Flache Erdwärmesonde

Zweibrunnensystem

Erdwärmekollektoren



Erdwärmekollektoren sind fähig auf einem Grundstück verteilte Rohrleitungen, die einer Tiefe von bis zu 3 m die Erdwärme der oberen Bodenschicht nutzen. Sie gewinnen ihre Energie aus der solaren Einstrahlung und müssen unterhalb der Eindringtiefe des winterlichen Frostes sowie oberhalb der Eindringtiefe der sommerlichen Regeneration verlegt sein.
 ~ 5 kW (Wärme)*

Zweibrunnensysteme gewinnen ihre Energie direkt aus oberflächennahen Grundwasserströmen. Aus rund 5 bis 15 m Tiefe wird mit einer Tauchpumpe Grundwasser aus der Förderbohrung entnommen und das abgekühlte Wasser im Schluckbrunnen wieder in den Grundwasserstrom eingeleitet.
 ~ 8 kW (Wärme)*

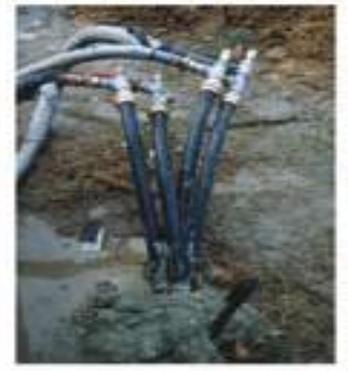
Flache EWS sind in vertikale Bohrungen eingebrachte Rohre, in denen als Wärmeträgermedium meist eine Flüssigkeit, in seltenen Fällen ein Gas zirkuliert. Die dabei im Boden aufgenommene Wärmeenergie wird im Verdampfer einer Wärmepumpe wieder abgegeben.
 ~ 5 kW (Wärme)*

In einer tiefen EWS mit Tiefen bis zu 3000 m zirkuliert mit geringer Geschwindigkeit ein Wärmeträgermedium in einem geschlossenen Kreislauf. Das dabei erwärmte Fluid steigt bis an die Erdoberfläche, wo die Wärme gewonnen wird.
 ~ 300 kW (Wärme)*

Bei der hydrothermalen Dublette wird heißes Wasser aus einem tiefen Grundwasserleiter zutage gefördert (Förderbohrung) und dem Wasser an der Erdoberfläche die geothermische Energie entzogen. Das abgekühlte Wasser wird in definierter Entfernung demselben Grundwasserleiter zurückgegeben (Injektionsbohrung).
 ~ 5 MW (Wärme)*
 ~ 0,25 MW (Strom)*

Petrothermale Systeme wie das Hot-Dry-Rock-Verfahren nutzen die im kristallinen Grundgebirge vorhandenen Klüfte der oberen Erdkruste zur Erzeugung eines Gesteins-Wärmetauschers (in Forschung: Sedimentgesteine). Über eine Injektionsbohrung wird Wasser zur Aufnahme von Gebirgswärme zugeführt. Das aufgeheizte Wasser gelangt anschließend über eine Förderbohrung zutage.
 ~ 5 MW (Strom)*
 ~ 10 MW (Abwärme)*

Erdwärmesonde (Doppel-U-Rohr) während eines Thermal-Reservoir-Tests



Bohrsturm für eine Tiefbohrung



Preventer



* = Energieausbeute

... Y para reducir los costos de la exploración meticulosa...

https://openei.org/wiki/Moeck-Beardsmore_Play_Types

... hay que definir bien el tipo de reservorio deseado.

Definición de un „play“ (significancia de: conjunto o combinación de estructuras)

- Inicialmente un „play“ se define como modelo en la mente de un geólogo o una geóloga que determina un conjunto de factores geológicos que generan un reservorio de energía geotermal utilizable dentro de una posición estructural en un marco geológico específico. En analogía a Allan & Allan (2005) que definían los „plays“ para depósitos de hidrocarburos, estos factores geológicos tienen que abarcar los ingredientes esenciales del tipo de reservorio geotermal:
 - La unidad del reservorio con lo suficiente de espacio de poros o fracturación para poder almacenar el fluido termal y soltarlo a una perforación en caudales comercializables. Si hecho artificialmente, tienen que estar susceptibles para tratamientos como estimulación de la roca de depósito por fracturar con pulsos de alta presión o explosivos, o acidización (conocidos como Enhanced Geothermal Systems – EGS). Lo más esquivada la unidad de depósito es, lo mejor responde a la estimulación hidráulica y al aumento sostenido de permeabilidad. Claramente existen límites físicos a la extracción de líquidos desde cualquier tipo de roca. El foco principal del asesoramiento de „plays“ es describir la unidad de reservorio para guiar la exploración y estrategia de extracción.

desde: *Moeck y Beardsmore (2014)*

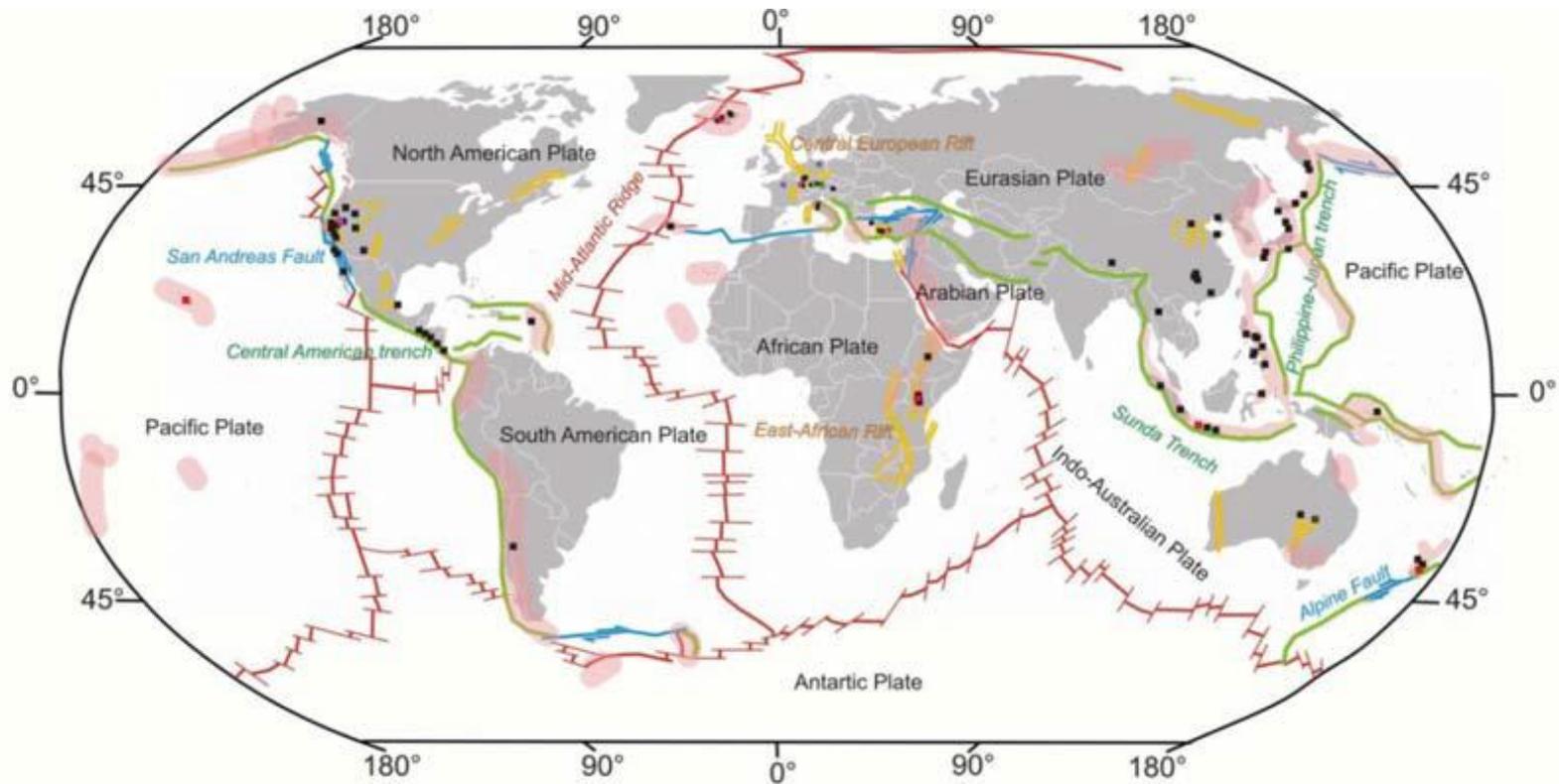


Plate boundary types

-  Divergent type: Mid-oceanic ridges transected by transform faults
-  Convergent type: Subduction zone
-  Transform type: Strike-slip zones

 Major zones of active volcanism

 Intracontinental rifts

 Producing geothermal fields (pilots + commercial)

Geothermal plays with geothermal production projects

CV1a - Magmatic: active or recent magmatism: Taupo (New Zealand), Kamojang (Indonesia), Reykjanes (Iceland), Puna (Hawaii/USA)

CV1b - Magmatic: inactive/extinct magmatism: Larderello (Italy), The Geysers (USA)

CV2 - Non-magmatic: Extensional domain type: Bradys (Nevada/USA), Kizildere (Turkey), Soultz-sous-Forets (France)

CD1 - Intracratonic Basin Type: Neustadt-Glewe [heat] (Germany), Paris Basin [heat] (France)

CD2 - Orogenic Belt Type: Unterhaching (Germany), Altheim (Austria)

CD3 - Basement (hot dry rock) Type: Habanero (Australia)

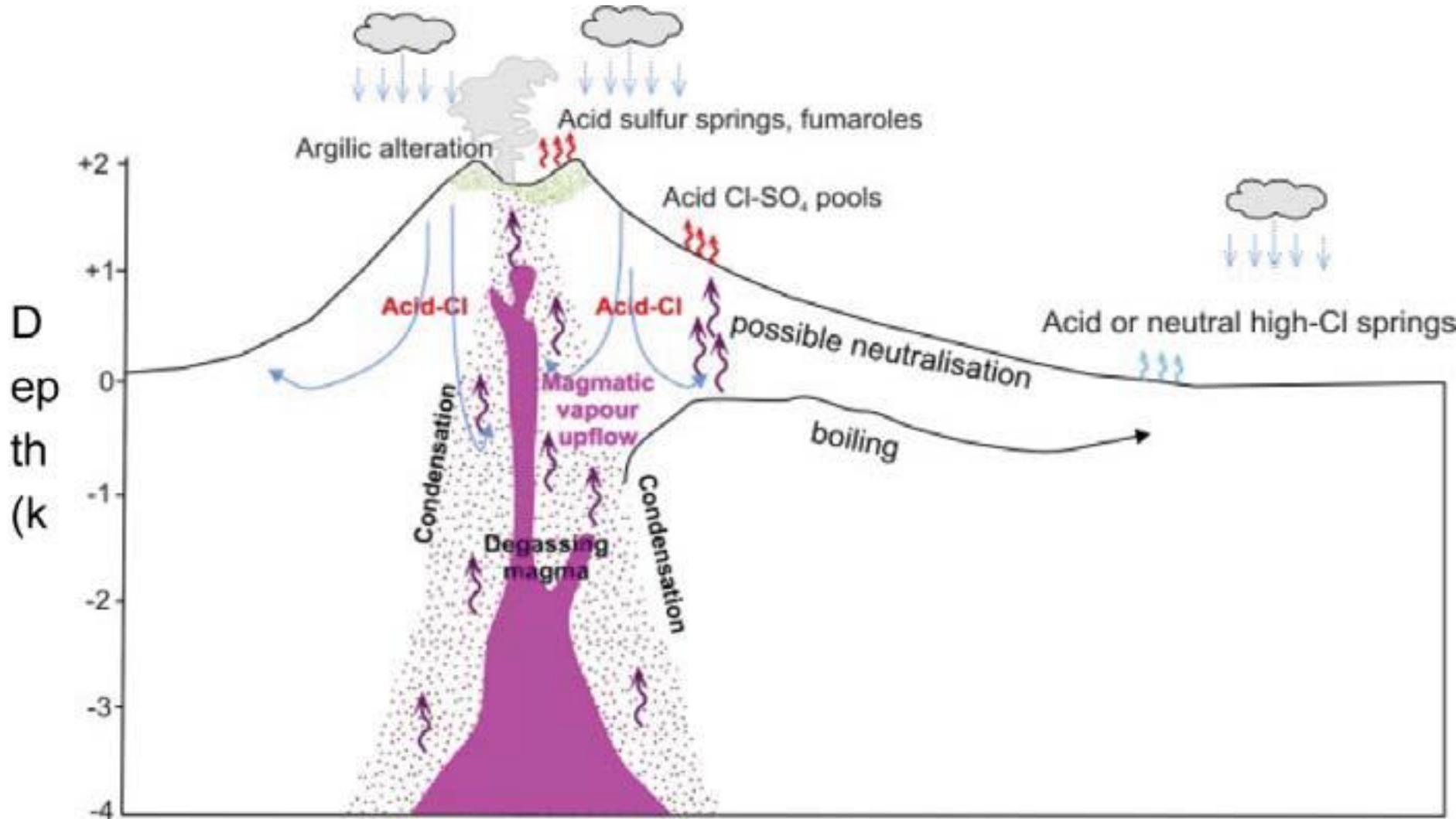
Tabla de los „play types“:

CV – transporte de calor predominantemente por **convección**

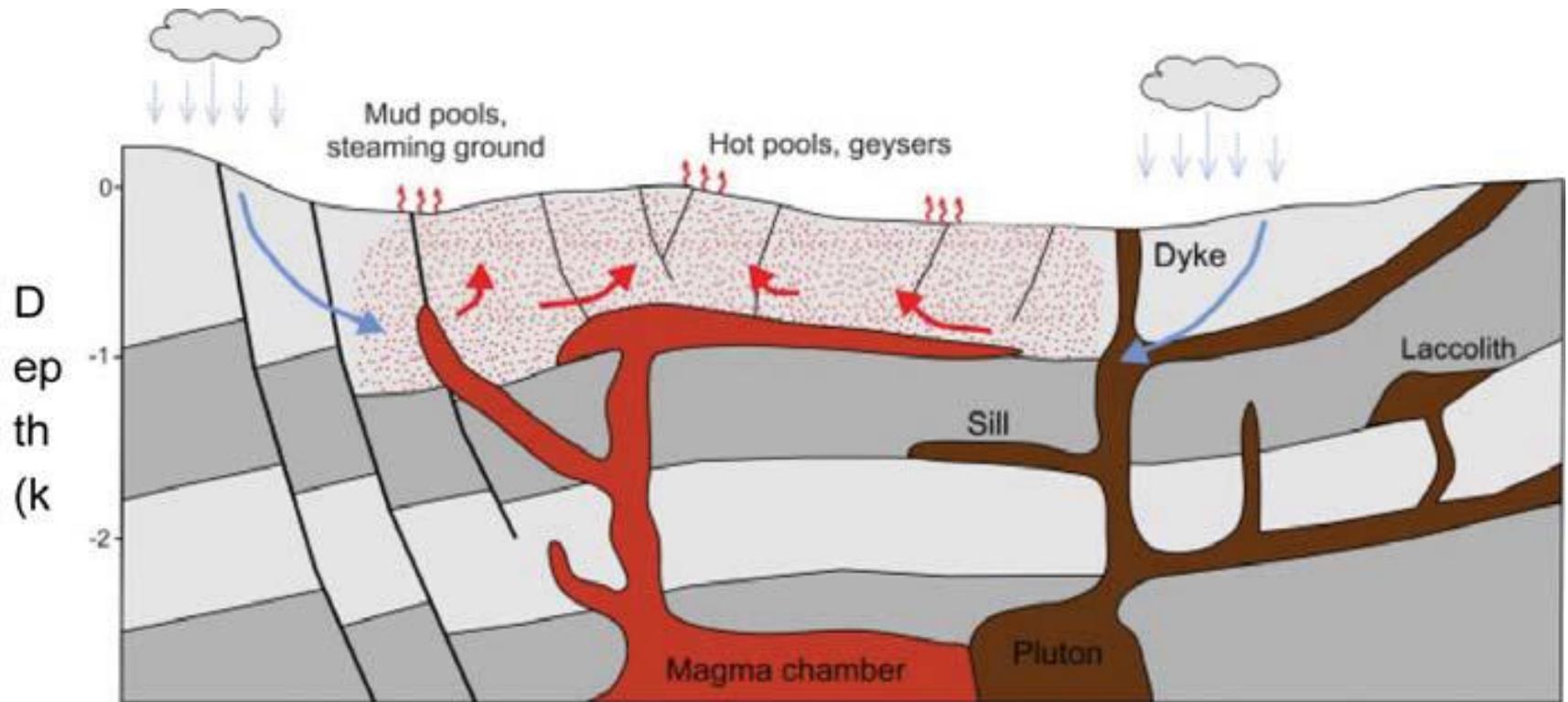
CD – transporte de calor predominantemente por **conducción**

Type		Geologic Setting	Heat Source	Dominant Heat Transport Mechanism	Storage Properties of Reservoir	Regional Topseal or Caprock	Examples	
Convection Dominated	CV-1: Magmatic	CV-1a: Extrusive	Magmatic Arcs, Mid Oceanic Ridges, Hot Spots	Active Volcanism, Shallow Magma Chamber	Magmatic-hydrothermal Circulation	---	Extensive Low Permeability Clay-rich Layers <i>Java</i>	
		CV-1b: Intrusive	Magmatic Arcs, Mid Oceanic Ridges, Hot Spots	Active Volcanism, Shallow Magma Chamber	Magmatic-hydrothermal Circulation, Fault Controlled	---	---	<i>Taupo Volcanic Zone</i>
	CV-2: Plutonic	CV-2a: Recent or Active Volcanism	Convergent Margins with Recent Plutonism (< 3 Ma), Young Orogens, Post-orogenic Phase	Young Intrusion+Extension, Felsic Pluton	Magmatic-hydrothermal Circulation, Fault Controlled	---	---	<i>Larderello</i>
		CV-2b: Inactive Volcanism	Convergent Margins with Recent Plutonism (< 3 Ma), Young Orogens, Post-orogenic Phase	Young Intrusion+Extension, Felsic Pluton, Heat Producing Element in Rock	Hydrothermal Circulation, Fault Controlled	---	Low Permeability Caprock	<i>The Geysers</i>
	CV-3: Extensional Domain	Metamorphic Core Complexes, Back-arc Extension, Pull-apart Basins, Intracontinental Rifts	Thinned Crust+Elevated Heatflow, Recent Extensional Domains	Fault Controlled, Hydrothermal Circulation	---	---	<i>Basin and Range, Soultz-sous-Forêts</i>	
Conduction Dominated	CD-1: Intracratonic Basin	Intracratonic/Rift Basins, Passive Margin Basins	Lithospheric Thinning and Subsidence	Litho/Biofacies Controlled	High Porosity/Low Permeability Sedimentary Aquifers	---	<i>North German Basin</i>	
	CD-2: Orogenic Belt	Foreland Basins within Fold-and-thrust Belts	Crustal Loading and Subsidence Adjacent to Thickened Crust	Fault/Fracture Controlled, Litho/Biofacies Controlled	High Porosity/High Permeability or High Porosity/Low Permeability Sedimentary Aquifers	---	<i>Southern Canadian Cordillera, Molasse Basin</i>	
	CD-3: Crystalline Rock - Basement	Intrusion in Flat Terrain	Heat Producing Element in Rock, Hot Intrusive Rock	Hot Dry Rock, Fault/Fracture Controlled	Low Porosity/Low Permeability Intrusive Rock (Granite)	Insulating Caprock	<i>Fenton Hill</i>	

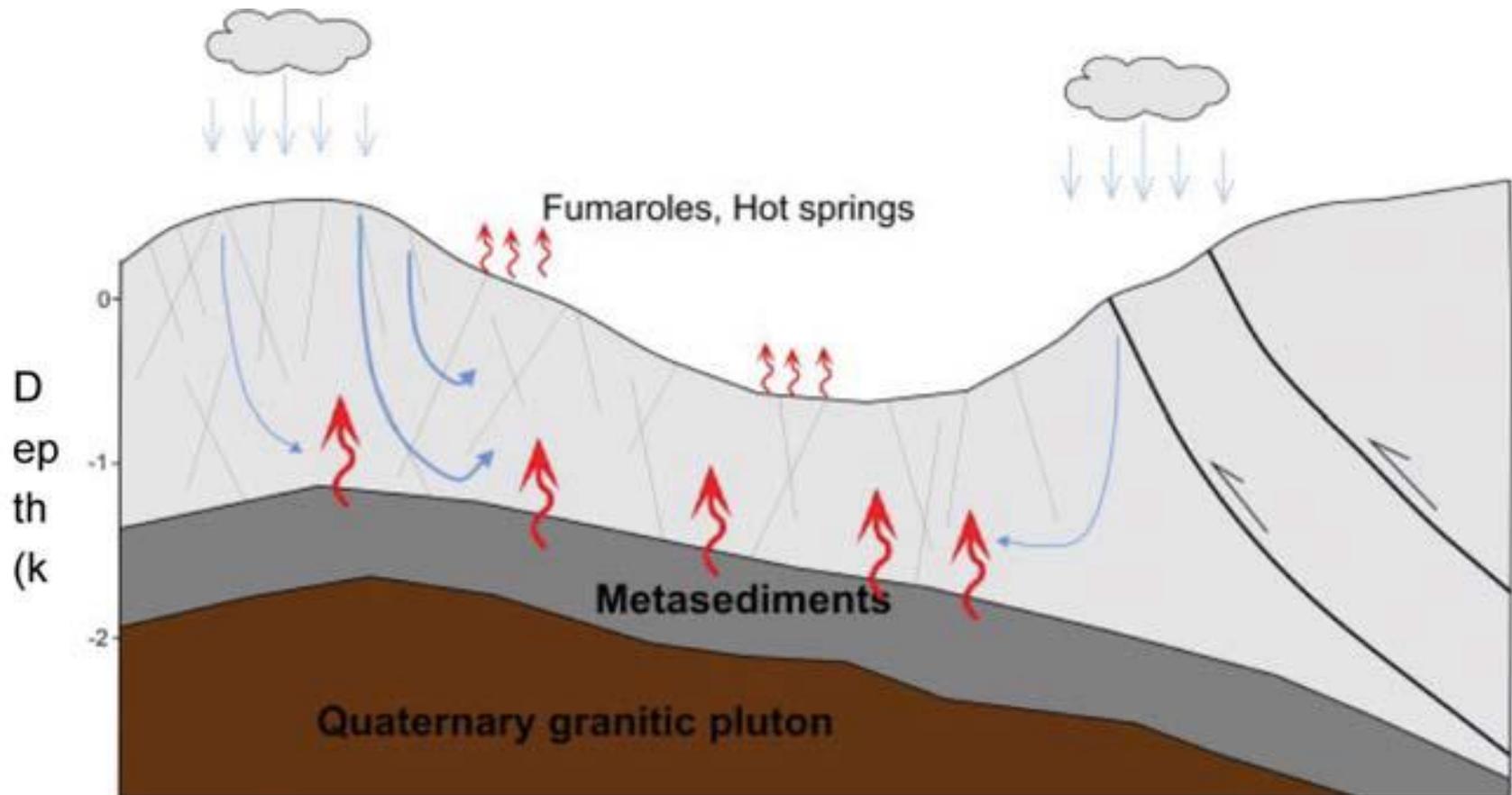
CV-1a: Magmatic Play Type, Active or Recent Magmatic Intrusion



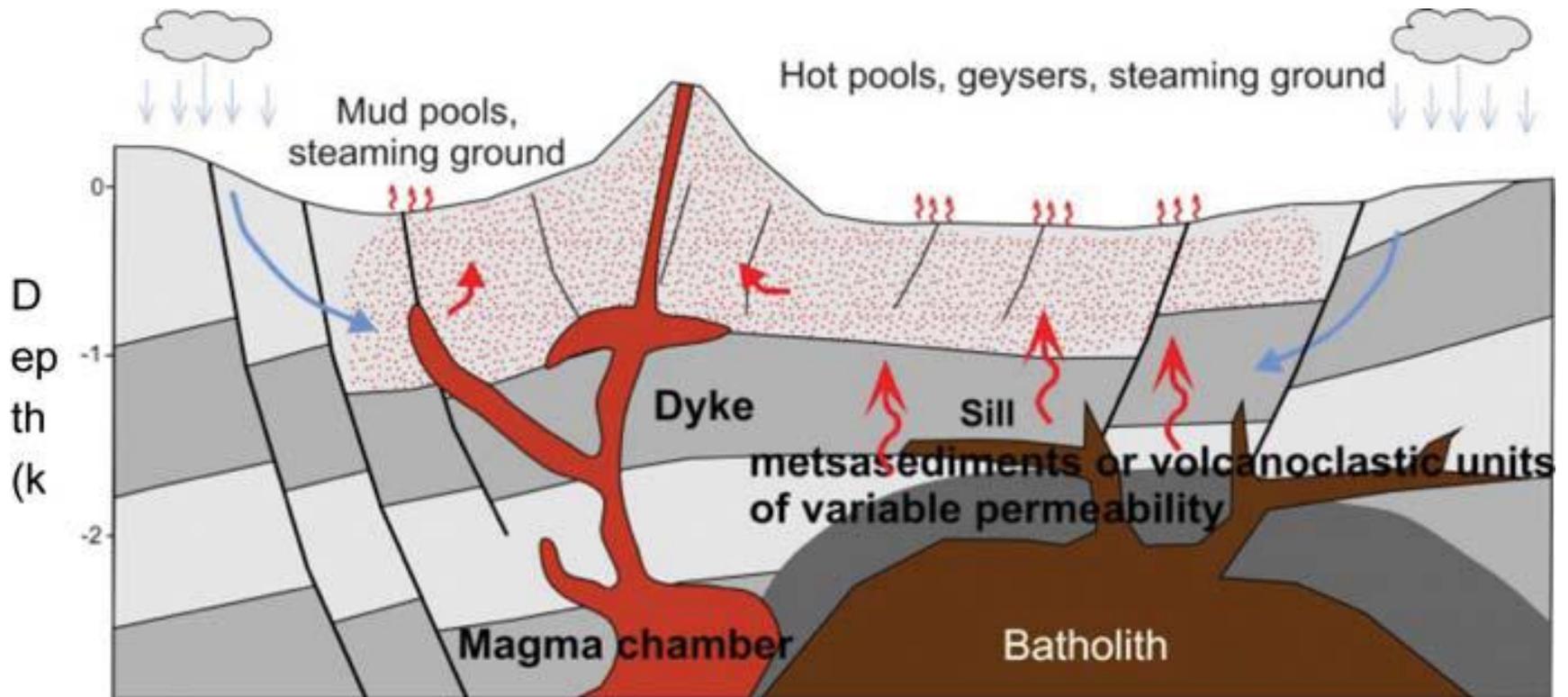
CV-1b: Active or recent magmatic play type with intrusive magma chamber.



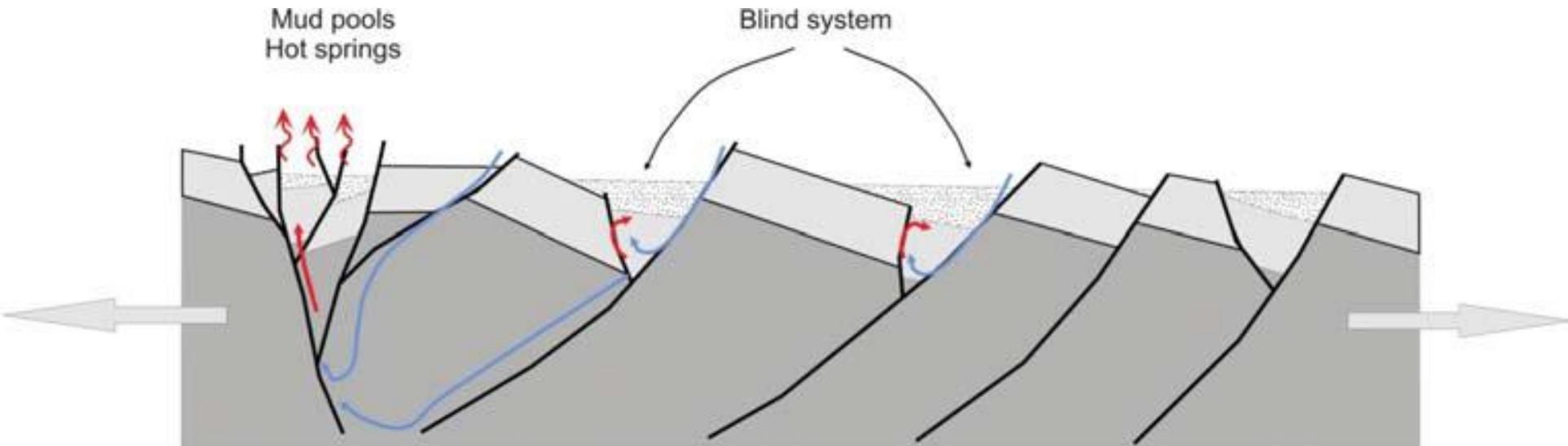
CV-2a: Extinct magmatic play types controlled by late Cenozoic to Quaternary plutons or batholiths without associated volcanism.



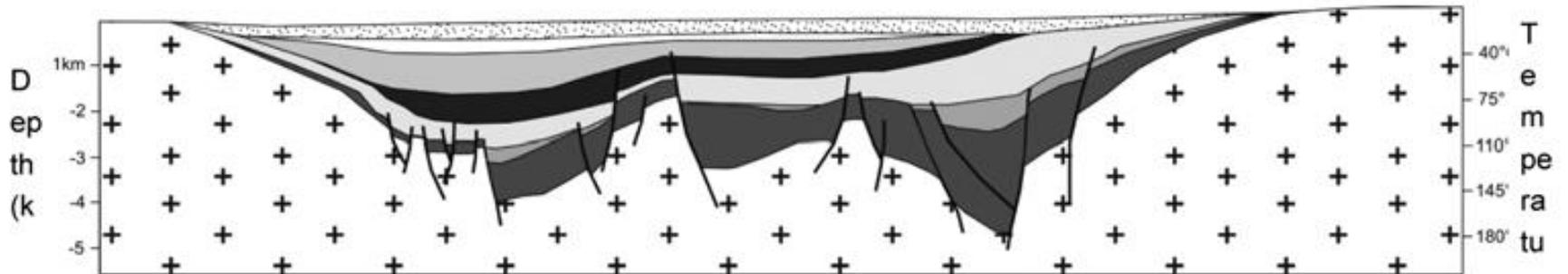
CV-2b: Extinct magmatic play types controlled by late Cenozoic to Quaternary plutons or batholiths with associated volcanism.



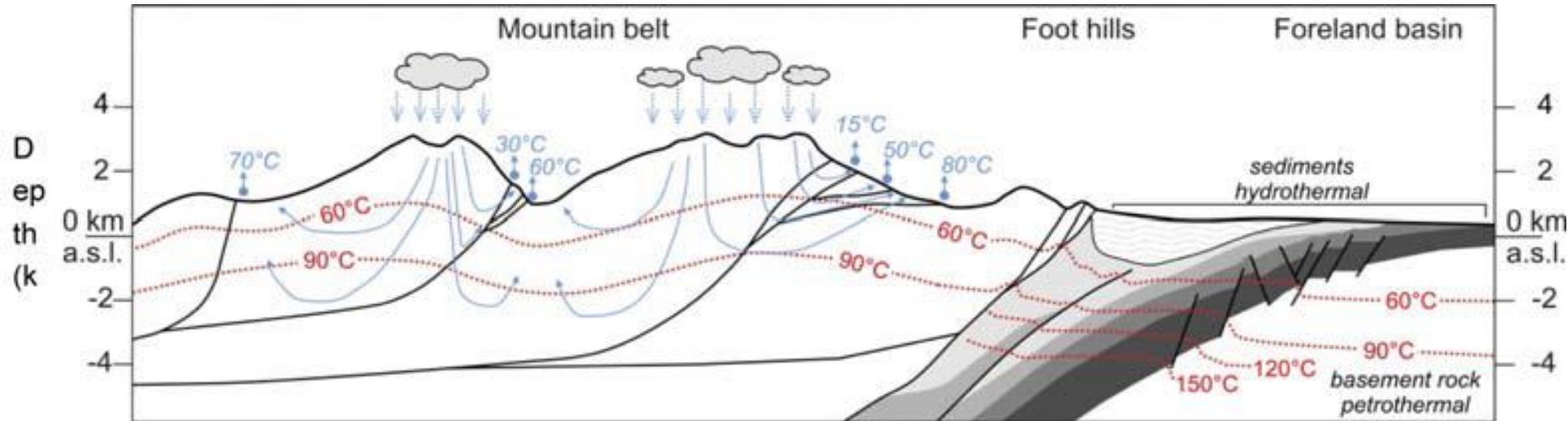
CV-3: Extensional domain play type as in the Basin and Range Province (Western U.S.), showing possible fault controlled fluid flow paths.



CD-1: Typical configuration of an intracratonic sedimentary basin with several troughs or sub-basins within.



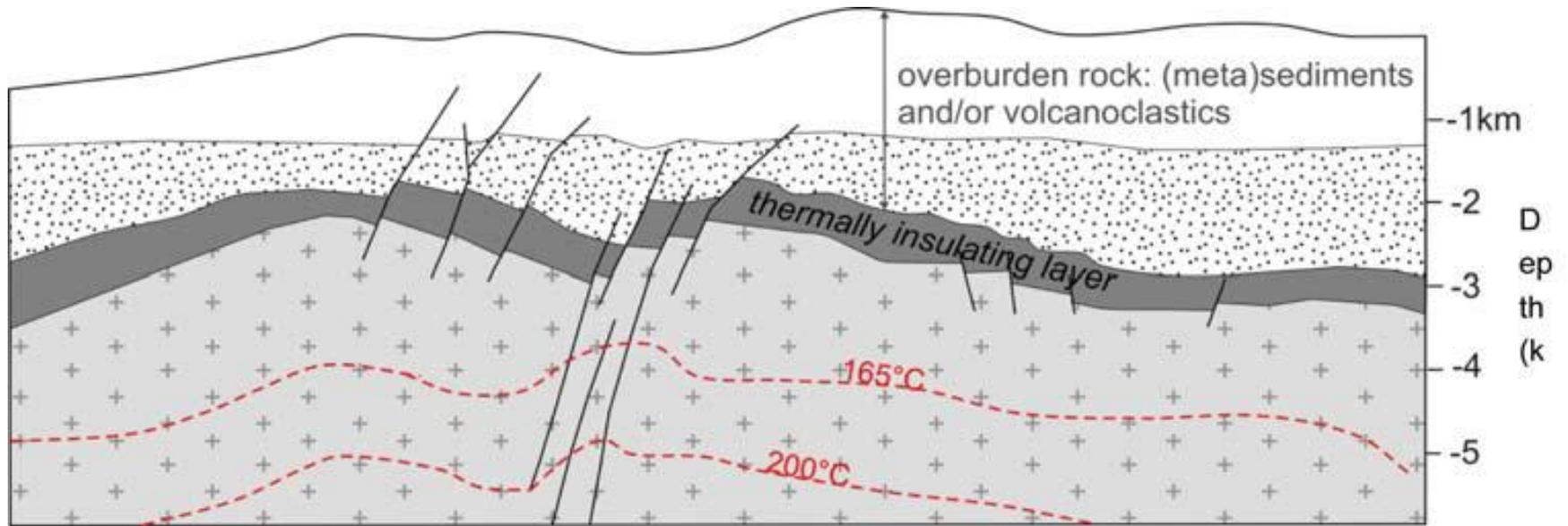
CD-2: Typical conductive thermal structure (red isotherms), groundwater flow paths, and discharge temperatures (blue arrows) in orogenic zones.



Note: The deeper parts of the foreland basin may provide targets for sedimentary geothermal reservoirs.

Source: From Moeck, 2014.

CD-3: Geological controls on temperature in a crystalline rock basement play type consisting of heatproducing rock covered by thermally insulating layers such as shale and other overburden sediments.



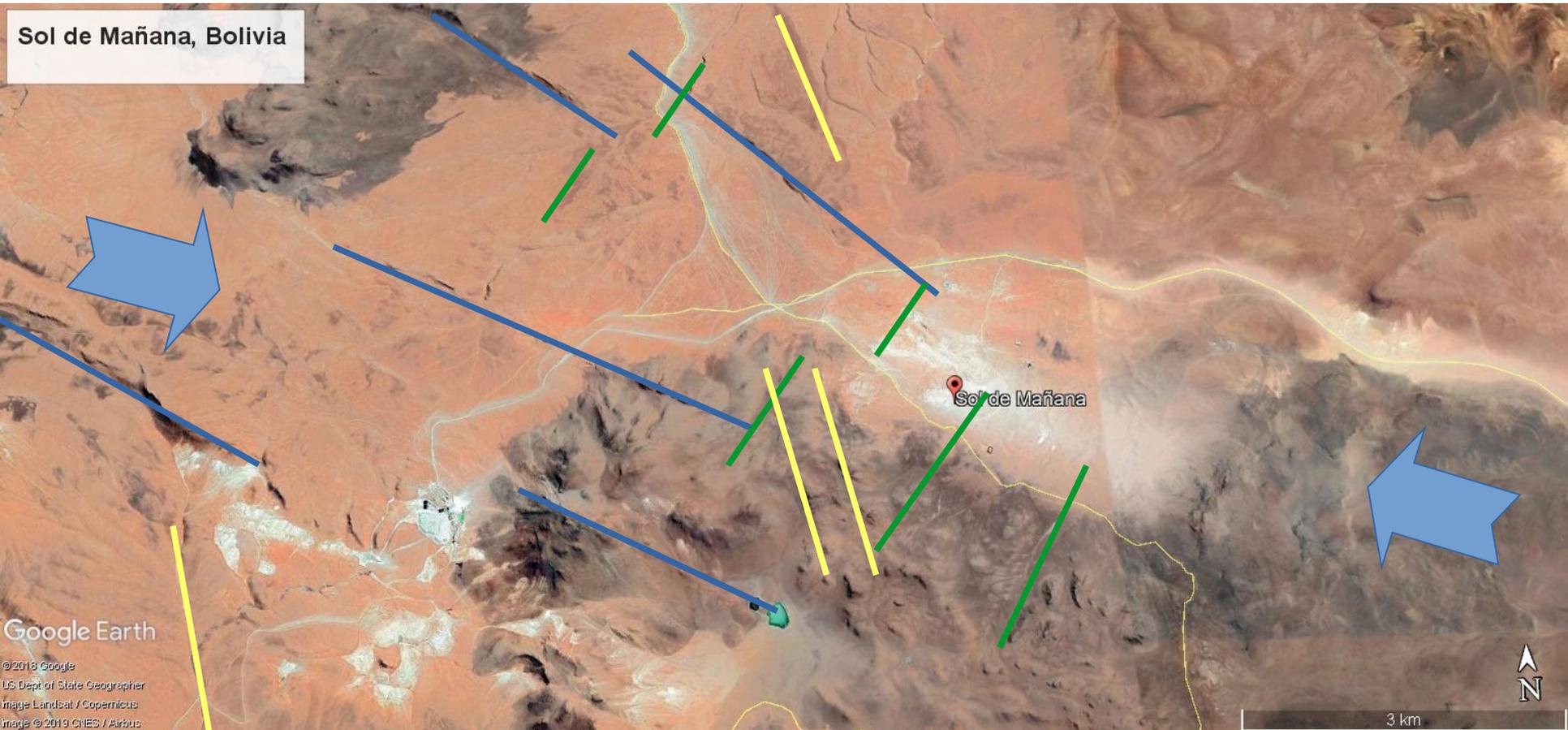
Llegar a un modelo conceptual

- Definir el „playtype“ del área de búsqueda
- Conseguir toda la información disponible de geología (mapas), perforaciones, manifestaciones hidrotermales, mediciones y escenas de sensorio remoto (interesante: Canal infrarrojo termal)
- Analizar donde faltan datos necesarios
- Mapeo geológico, estructural, hidrogeoquímico del área
- Decisión sobre métodos apropiados geofísicos para la exploración del subsuelo (ojo: La profundidad necesaria se define por play type y por el límite de costos)
- Modelo conceptual / estructural
- Primeras mediciones geofísicas para la confirmación o rechazo

Un ejemplo desde Bolivia...



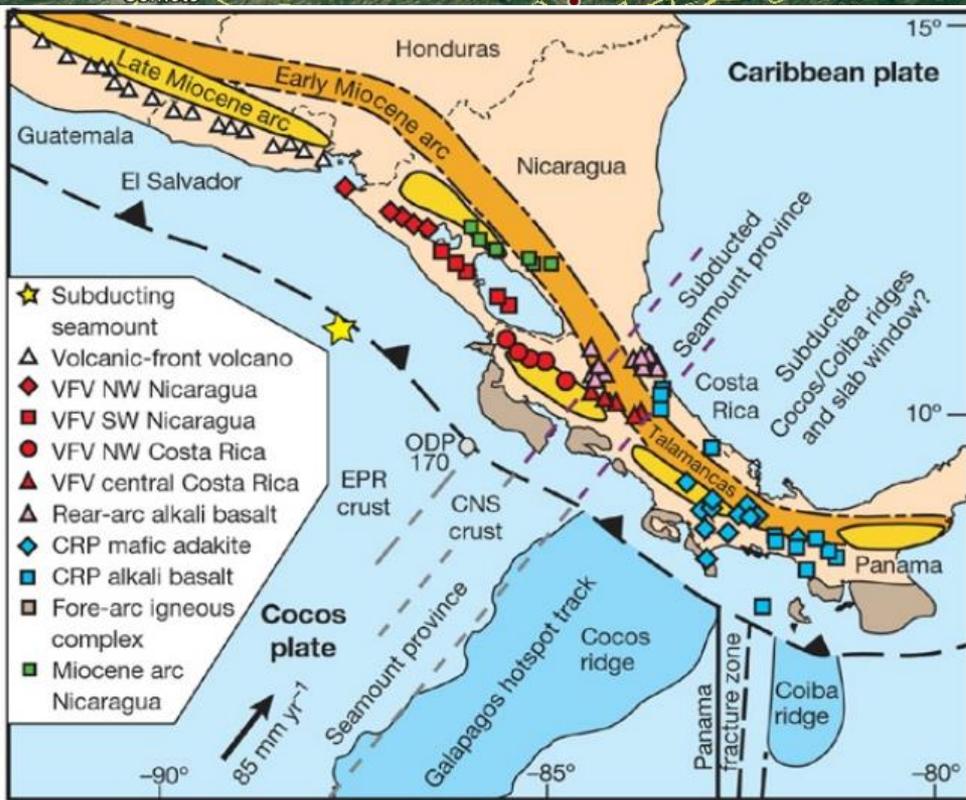
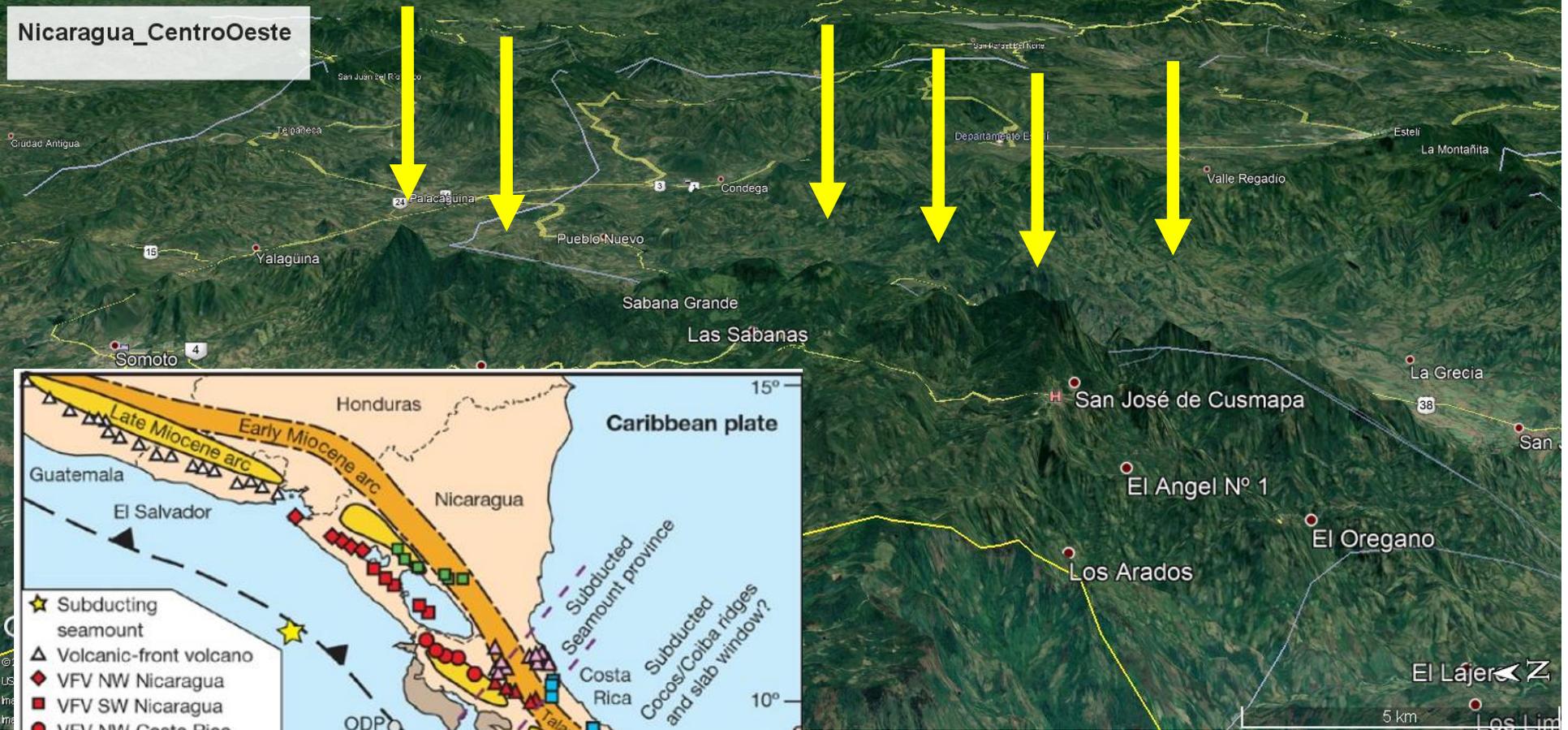
... con lineaciones



Reci3n, al Oeste de Estel3, Nicaragua

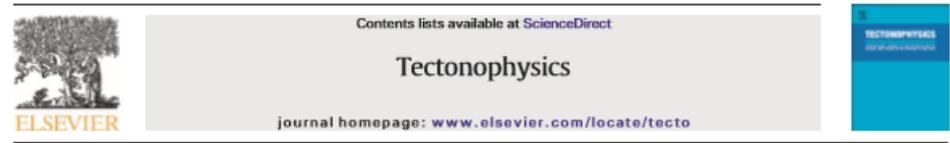
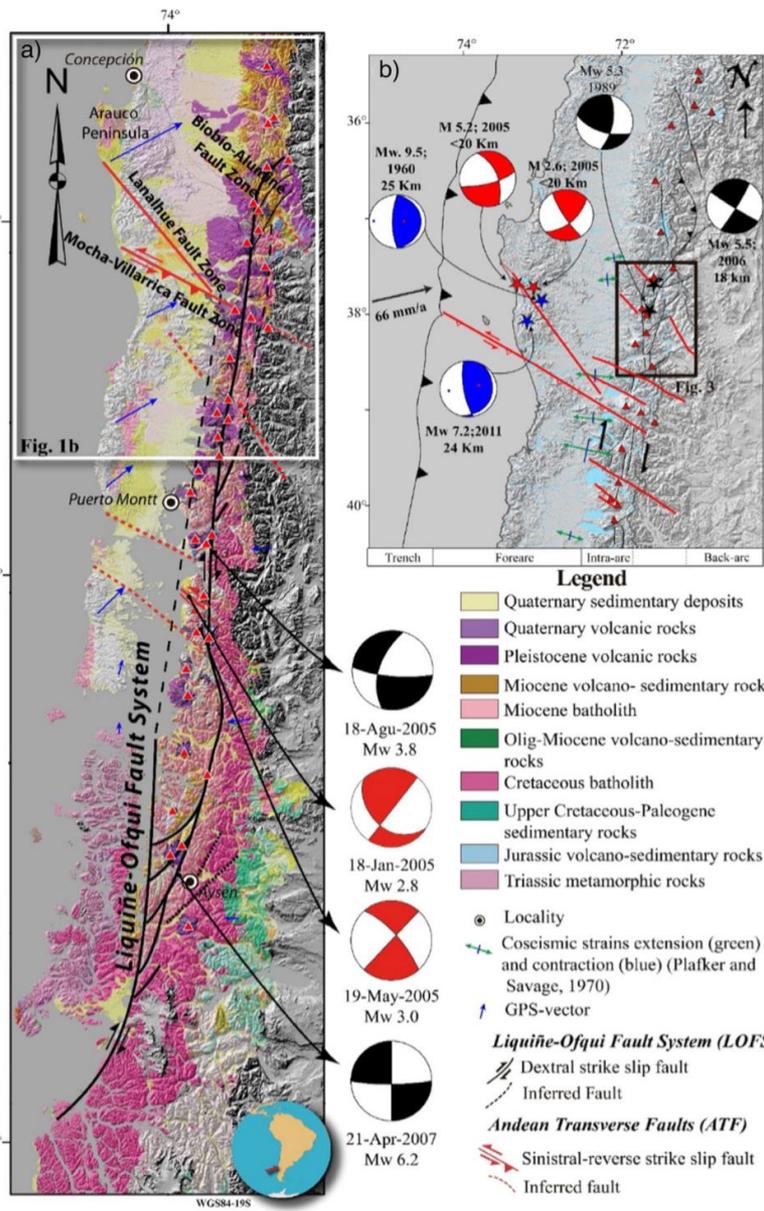


Nicaragua_CentroOeste



Ejemplo de un trabajo estructural avanzado

Falla Liquiñe-Ofqui, Chile: Por Pamela Pérez-Flores et al., 2015



Tectonics, magmatism and paleo-fluid distribution in a strike-slip setting: Insights from the northern termination of the Liquiñe-Ofqui fault System, Chile

Pamela Pérez-Flores^{a,b,*}, José Cembrano^{a,b}, Pablo Sánchez-Alfaro^{b,c}, Eugenio Veloso^{a,b}, Gloria Arancibia^{a,b}, Tomás Roquer^{a,b}

^a Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Pontificia Universidad Católica de Chile, Avenida Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, Chile
^b Andean Geothermal Center of Excellence (CEGA, FONDECYT), Santiago, Chile
^c Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago, Chile

ARTICLE INFO

Article history:
 Received 26 December 2015
 Received in revised form 30 April 2016
 Accepted 10 May 2016
 Available online 13 May 2016

Keywords:
 Liquiñe-Ofqui Fault System (LOFS)
 Andean Transverse Faults (ATF)
 Strain partitioning
 Fault-slip data inversion
 Stress field
 Magma/fluid transport

ABSTRACT

This study addresses the interplay between strain/stress fields and paleo-fluid migration in the Southern Andean Volcanic Zone (SVZ). The SVZ coexists with the margin-parallel Liquiñe-Ofqui Fault System (LOFS) and with NW-striking Andean Transverse Faults (ATF). To tackle the role of different fault-fracture systems on deformation distribution and magma/fluid transport, we map the nature, geometry and kinematics of faults, veins and dikes at various scales.

Fault-slip data analysis yields stress and strain fields from the full study area data base (regional scale) and fault zones representative of each fault system (local scale). Regional scale strain analysis shows kinematically heterogeneous faulting. Local strain analyses indicate homogeneous deformation with NE-trending shortening and NW-trending extension at NNE-striking Liquiñe-Ofqui master fault zones. Strain axes are clockwise rotated at second order fault zones, with ENE-trending shortening and NNW-trending stretching. The ATF record polyphasic deformation. Conversely, stress field analysis at regional scale indicates a strike-slip dominated transpressional regime with N64°E-trending σ_1 and N30°W-trending σ_3 . Deformation is further partitioned within the arc through NNE-striking dextral-reverse faults, NE-striking dextral-normal faults and NW-striking sinistral-reverse faults with normal slip activation. The regional tectonic regime controls the geometry of NE-striking dikes and volcanic centers. NE-striking faults record local stress axes that are clockwise rotated with respect to the regional stress field. NNE- and NE-striking faults are favorably oriented for reactivation under the regional stress field and show poorly-developed damage zones. Conversely, NW-striking fault systems, misoriented under the regional stress field, show multiple fault cores, wider damage zones and dense vein networks. Deformation driven by oblique subduction is partially partitioned into strike-slip and shortening components. The trench-parallel component is mostly accommodated by NS-striking right-lateral faults of the LOFS. Trench-perpendicular shortening is accommodated by sinistral-reverse ATF and dextral-reverse NNE-striking faults. We conclude that the SVZ records a deformation history coeval with magma/fluid migration.

© 2016 Elsevier B.V. All rights reserved.



Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

GEOZENTRUM HANNOVER

¡Gracias por su atención!



Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

GEOZENTRUM HANNOVER