

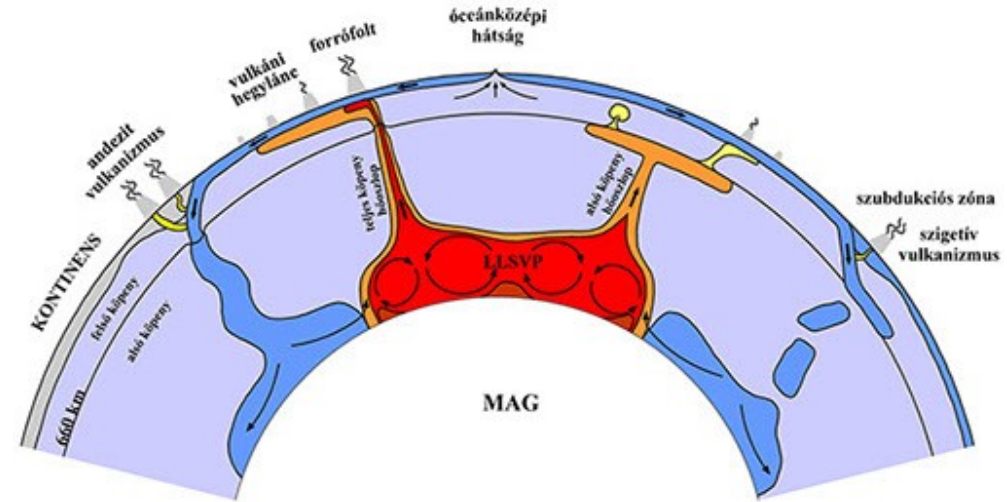
Milyen folyamatok zajlanak a Földköpenyben?

utazás a föld középpontja felé...

Molnár Bence

**ELTE, Geofizikai és Űrtudományi Tanszék
MS Energy Solutions Kft.**

Parádfürdő, 2025.07.07



(Galsa, 2018)



Utazás a Föld középpontja felé filmes adaptáció (2008)

Föld belseje a sci-fi könyvek és filmekben

Az emberiség gyakran álmodozik róla, hogy milyen is lehet a föld belseje...



Jules Verne
Utazás a föld középpontja felé



Utazás a föld középpontja felé filmes
adaptáció (2008)



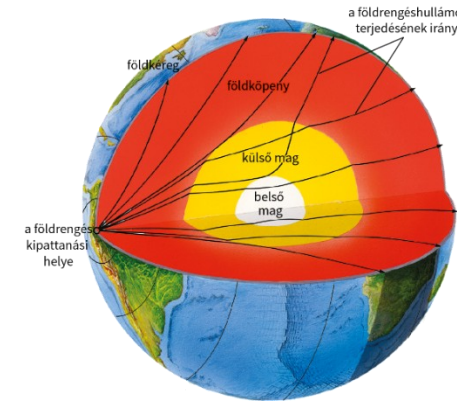
A mag (2003)

Föld belső szerkezete

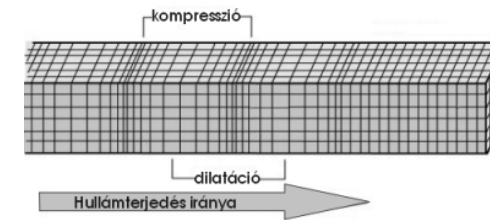
A világ legmélyebb fúrása az oroszországi Kola-félszigeten 12 262 m
(A fúrás időtartama 1970-1989)

Honnan szerezhethetünk információ róla?

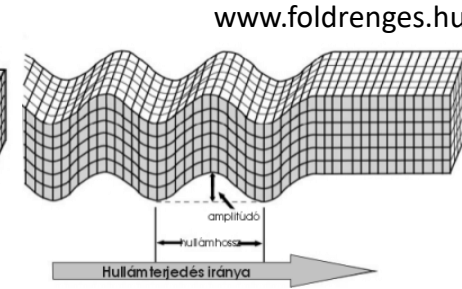
- **Szeizmikus tomográfia:** Földrengés hullámok átvilágítják Földet.
- **Laborkísérletek** (nagy nyomás, nagy hőmérséklet): bebizonyították az ásványtani fázisátmenetek létezését a köpenyben.
- **Geokémia/izotóp geokémiai:** kiömlési bazaltok információ azok keletkezési viszonyairól
- **Magnetotellúrika:** alacsony periódusidejű elektromágneses hullámok felhasználásával több száz kilométer mélységig képes vizsgálni a köpeny elektromos vezetőképességét, melyről a viszkozitáseloszlásra lehet következtetni
- **Ásványfizika:** viszkózus reológia magyarázza az ún. *creep* *folyást* jelenséget.



Analógia



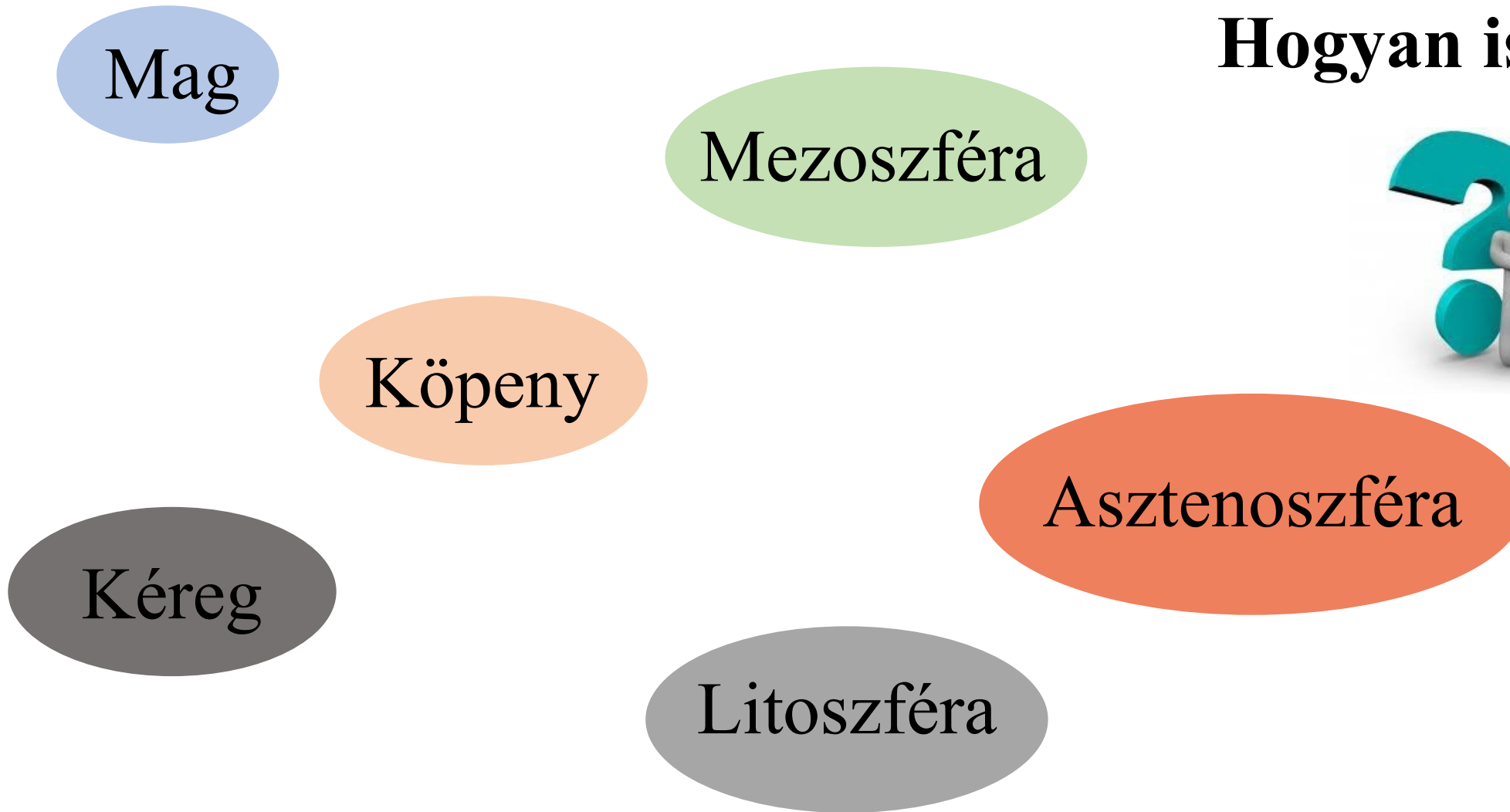
P (primer) hullám



S (secunder) hullám

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad \begin{array}{l} \lambda, \mu \text{ Lamé állandók} \\ \rho \text{ sűrűség} \end{array}$$

Folyadékokban, gázokban $\mu=0$



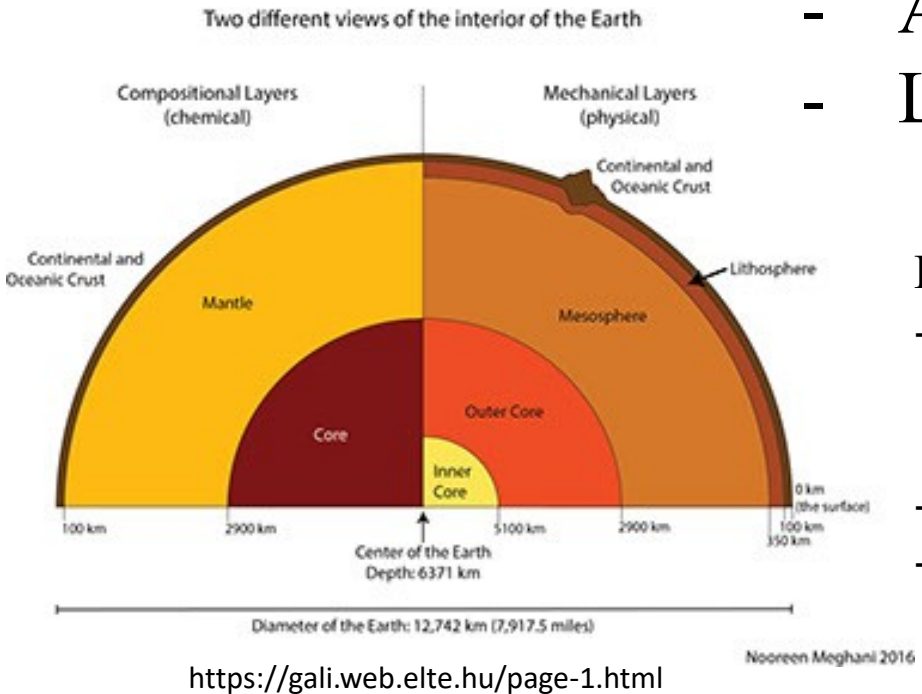
Hogyan is van ez?



Föld belső szerkezete

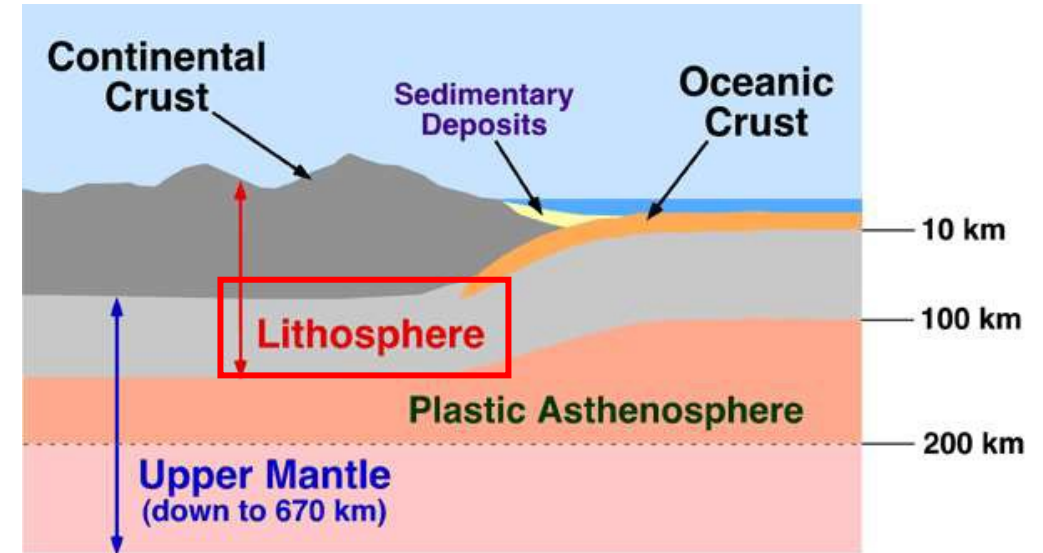
Kémiai jelleg alapján

- Mag
- Köpeny
- Kéreg



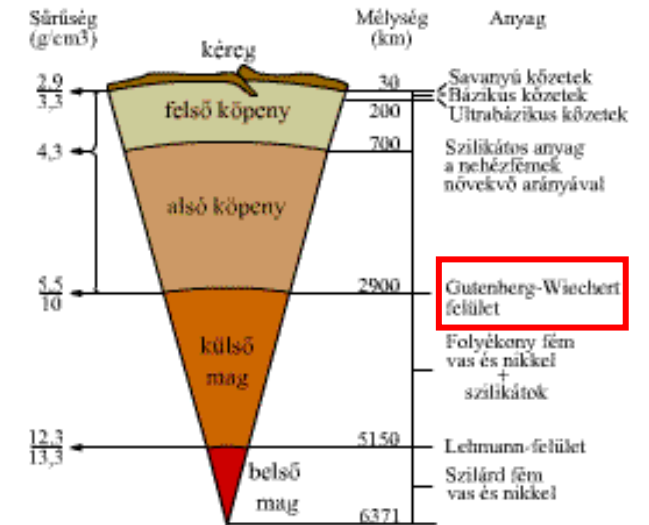
Mechanikai szerkezet alapján

- Belső mag
- Külső mag
- Mezoszféra
- Asztenoszféra
- Litoszféra



Köpeny:

- Moho felülettől (átlagos mélység 30-40 km) – Gutenberg Wiechert határfelületig (kb. 2900 km)
- Föld térfogatának 82%
- A földtani időskálán döntően szilárd halmazállapotú, és főleg vasban és magnéziumban gazdag szilikátok építik fel (peridotit).



Köpeny kémiai összetétele

Ásvány szinten:

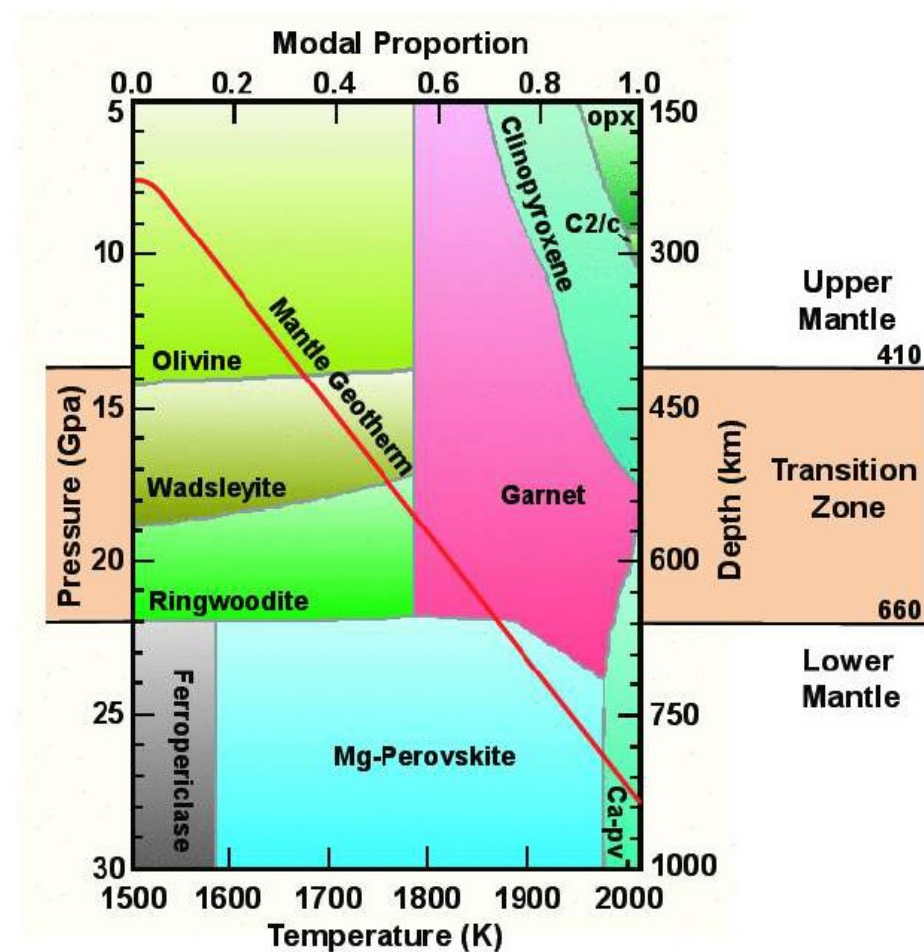
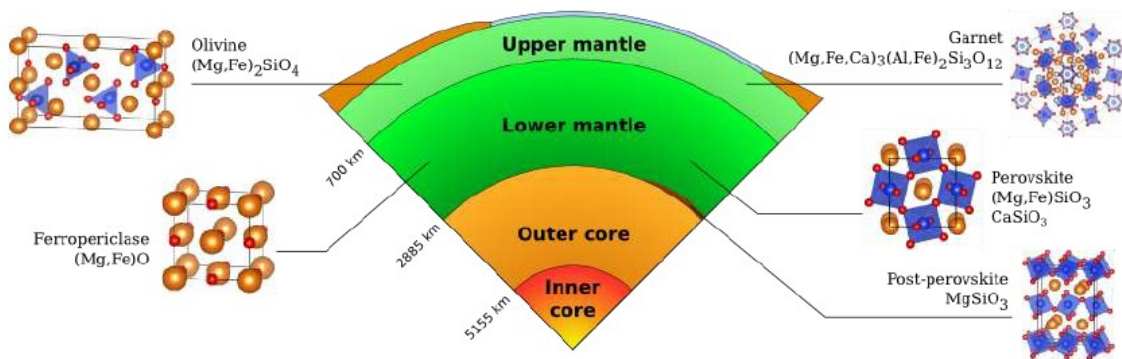
- 60% **Olivin** $[\text{Mg,Fe}]_2\text{SiO}_4$
- 30% Piroxén $[\text{Mg,Fe,Ca}]\text{SiO}_3$
- 10% Gránát $[\text{Mg,Fe,Ca}]_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$

Kőzet szinten: **Peridotit**



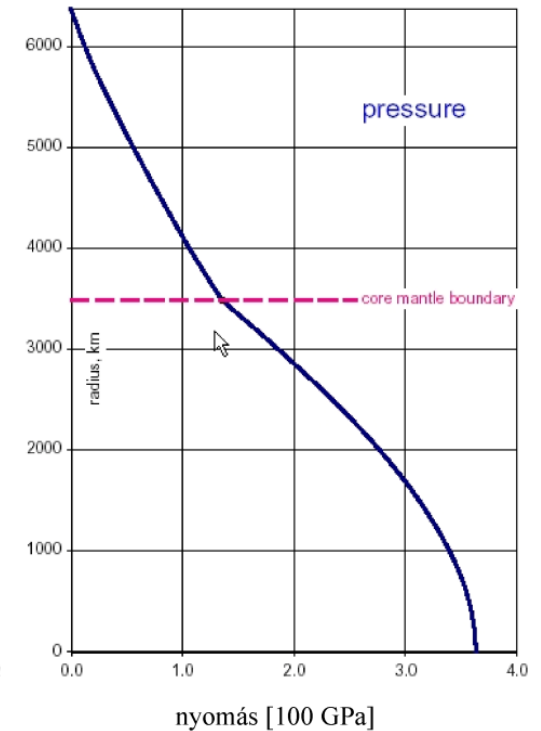
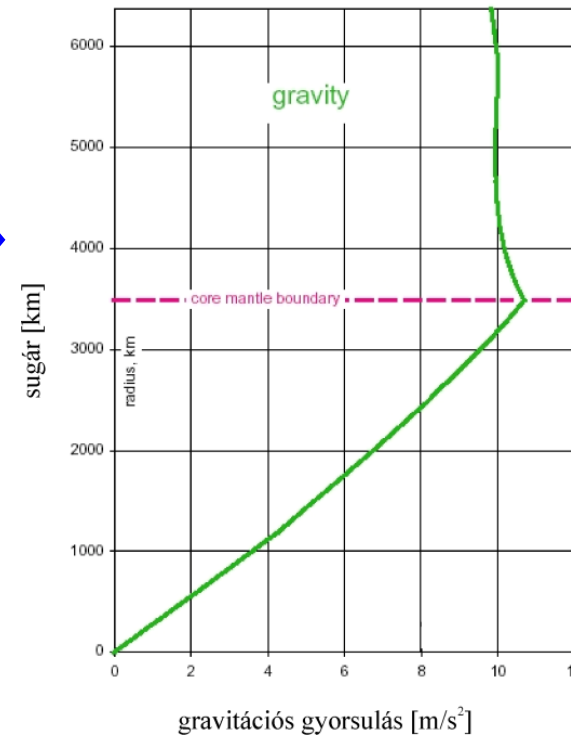
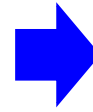
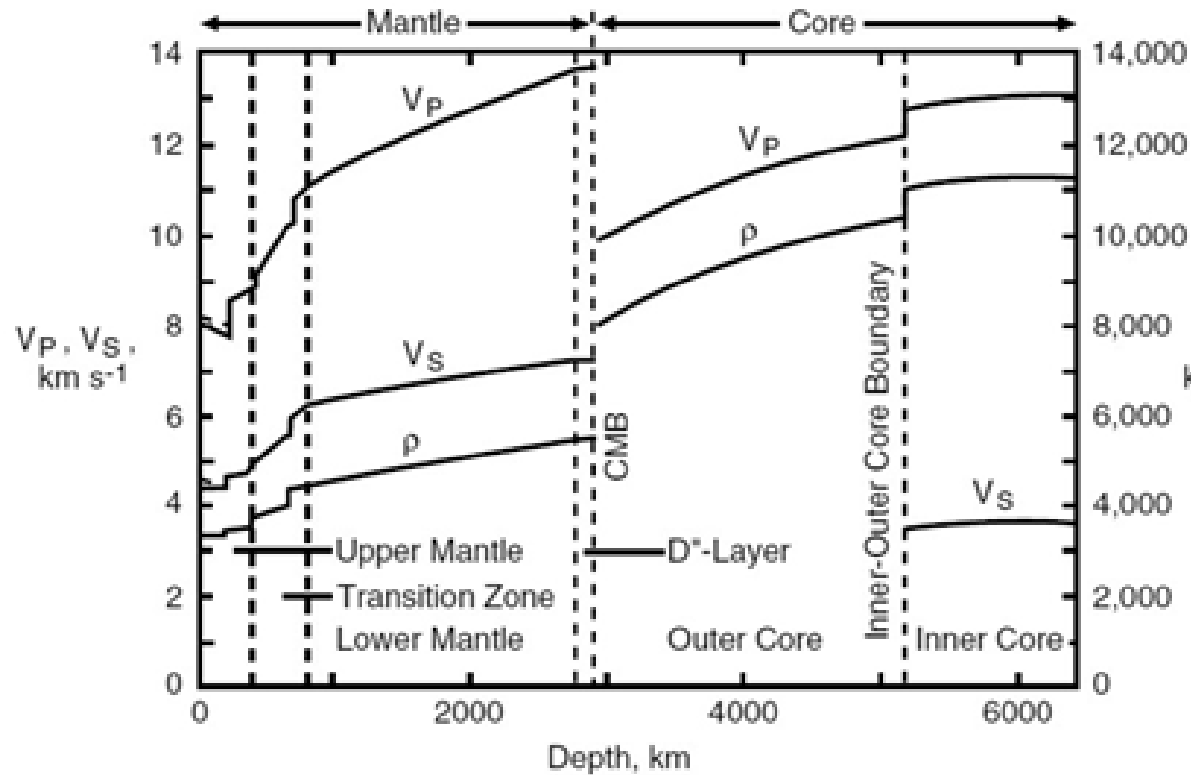
<https://kristalycentrum.hu/olivin-peridotkrizolit/>

<https://sk.wikipedia.org/wiki/Oliv%C3%ADn>



Kémiai összetétel fontossága: **Az olivinnek számos ásványtanifázis átmenete van a Köpenyben**

Köpeny szerkezete / PREM model



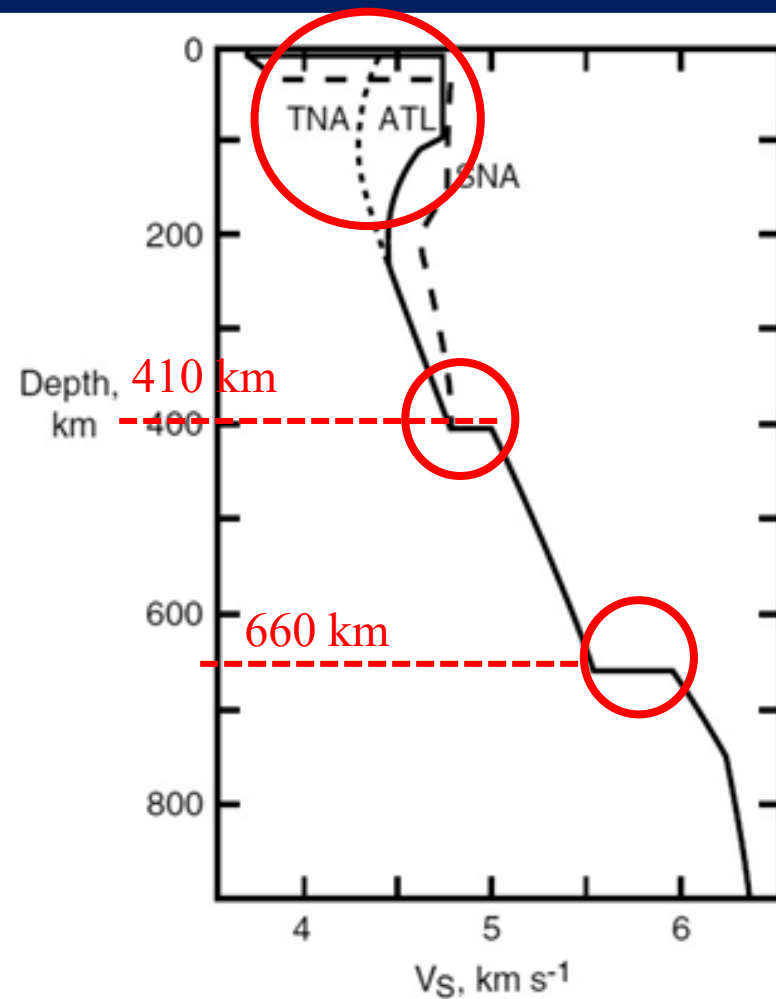
- **A PREM-modell** (*Preliminary Reference Earth Model*) a Föld radiális, 1 D szerkezetének kiinduló modellje.
- Input: menetidőgörbék, illetve a Föld szferoidális és toroidális sajátrezgésének frekvenciái
- A P és S hullámok terjedési sebessége meghatározható a mélység függvényében. A v_P és v_S szeizmikus sebességek és az **Adams–Williamson-egyenlet** felhasználásával Földünk sűrűségprofilja, valamint a gravitációs gyorsulás radiális változása számítható. Mindezek ismeretében pedig a rugalmas paraméterek, úgymint a Lamé-állandók, a kompresszibilitás, inkompresszibilitás, Young-modulus, Poisson-arány stb. változása határozható meg (Galsa, 2018).

Köpeny szerkezete

Felső köpeny kb. 35 km - 660 km mélység

- Szeizmikus fedő, ahol a szeizmikus hullámok relatíve nagy sebességgel terjednek az alatta lévő zónához képest → **Litoszféra**
- Alatta egy szeizmikus értelemben alacsony sebességű zóna található (*LVZ, low velocity zone*) → **Asztenoszféra**
- **Szeizmikus diszkontinuitás** található 410 és 660 km mélységben, ahol a rugalmas hullámok sebessége ugrásszerűen nő.
- Kontinentális pajzs alatti (Izosztázia) kivastagodott kontinentális litoszféra alatt nem, vagy csak nyomokban található meg a csökkent szeizmikus sebességű asthenoszféra! Asztenoszféra jelenléte erősen függ a felette elterülő képződményektől!

(Az izosztázia a litoszféra és az asthenoszféra közötti gravitációs egyensúlyi állapot. a különböző sűrűségű kéregdarabok „lebegését” jelenti a folyékony köpeny felett).



Az S hullám általánosított mélységprofilja a felső köpenyben egy kifejlődött óceáni litoszféra alatt (folytonos vonal, Északkelet-Atlantikum), óceáni hátság alatt (pontosított vonal, Kelet-Pacifikus-hátság), valamint egy kontinentális pajzs alatt (szaggatott vonal, Kanapai-pajzs) (Grand és Helmberger 1984, Galsa 2018).

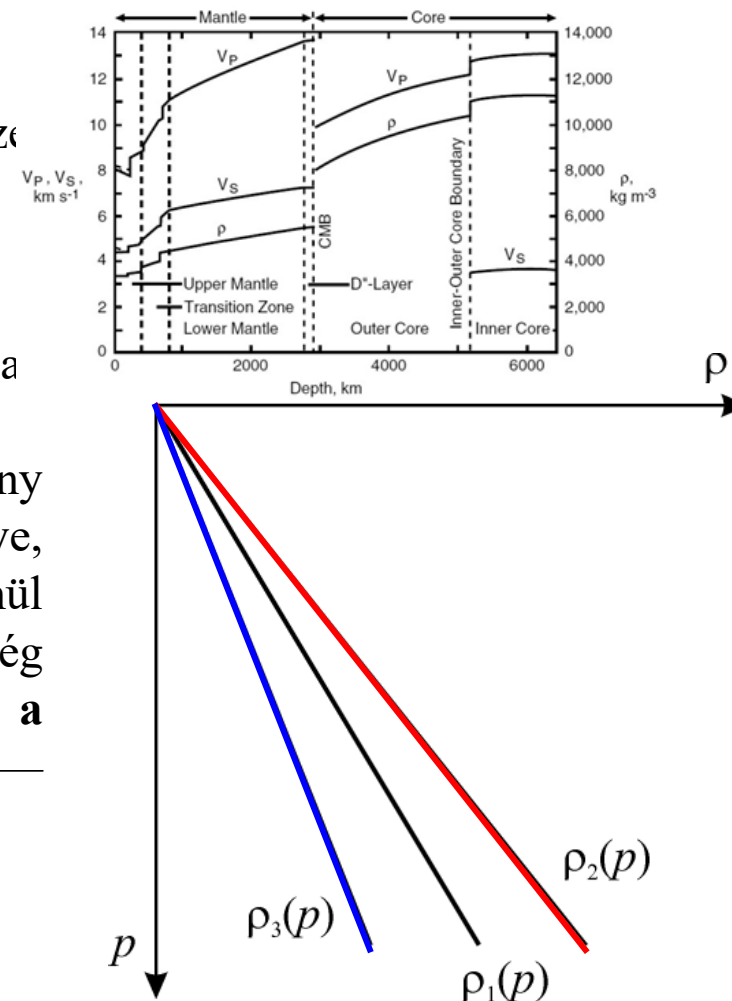
Köpeny szerkezete

Alsó köpeny kb. 660 km - 2600-2900 km mélység

- Az alsó köpeny a leghomogénebb, mind összetétel, mind ásványtani szerkezet szempontjából.
- Ezt a PREM modell folytonos sebesség-és sűrűség görbéi is jól érzékeltetik
- **Bullen-féle inhomogenitási paraméter**
- A Bullen-féle inhomogenitási paraméter a sűrűség nyomásváltozását viszonyítja a adiabatikus körülmények között bekövetkező sűrűségváltozáshoz.
- A PREM-modell alapján η_B mélységprofilja meghatározható, és az alsó köpeny döntő részére, 800 és 2600 km között $\eta_B \approx 1$ érték adódik. Ez annak következménye, **hogy az alsó köpeny jelentős része adiabatikus**. Más szóval, a kétségtelenül bekövetkező összetételbeli és hőmérsékleti inhomogenitásokat valamilyen jelenség megszünteti, homogenizálja, összekeveri. Ez a jelenség nem lehet más, **mint a köpenyben zajló termikus**, — vagy inhomogén kémiai összetétel esetén — **termokémiai konvekció folyamata**.

$$\eta_B = \Phi \frac{d\rho}{dp}, \quad \eta_B = \frac{1}{\chi_a \rho} \frac{d\rho}{dp} = \frac{\frac{d\rho}{dp}}{\left. \frac{d\rho}{dp} \right|_a},$$

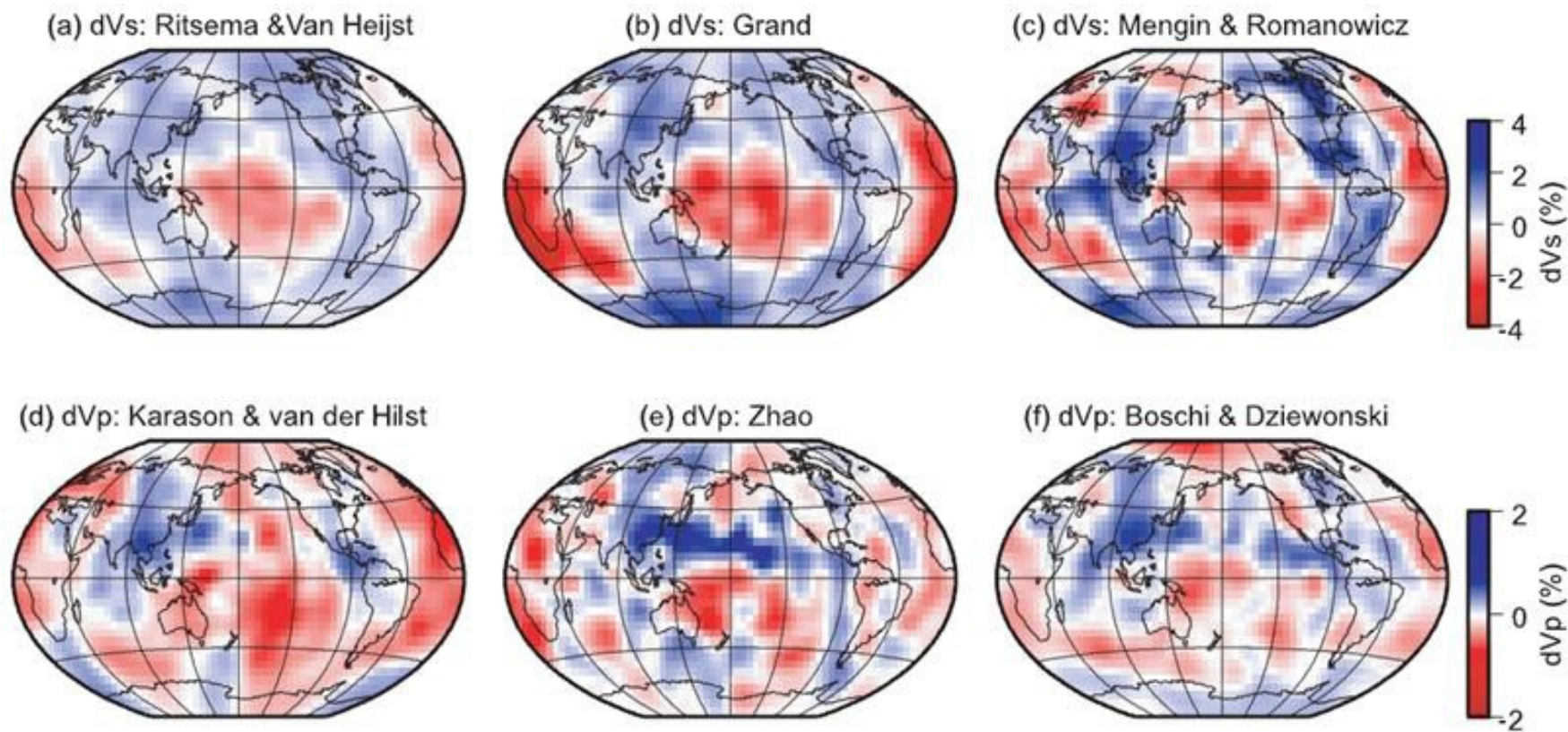
ρ és p a köpeny sűrűsége és
nyomása
 Φ szeizmikus paraméter
 χ_a adiabatikus
kompresszibilitás



Szuperadiabatikus sűrűségprofil
Adiabatikus sűrűség profil
Szubadiabatikus sűrűségprofil

Köpeny szerkezete

Legalsó köpeny – Köpeny Mag határ kb. 2900 km mélység, Gutenberg Wiechert határfelület, **D''-réteg**



Globális S (felső sor) és P (alsó sor) szeizmikus tomográfia a köpeny–mag határ felett (Ritsema és van Heijst 2000, Grand 2002, Mégnin és Romanowicz 2000, Kárasón és van der Hilst 2001, Zhao 2001, Boschi és Dziewonski 2000, **Galsa 2018**)

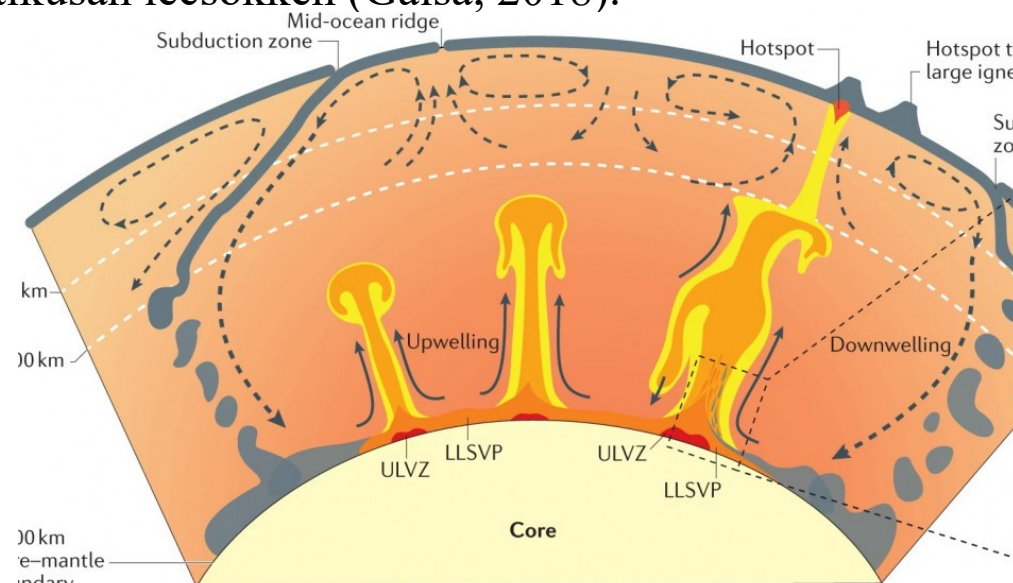
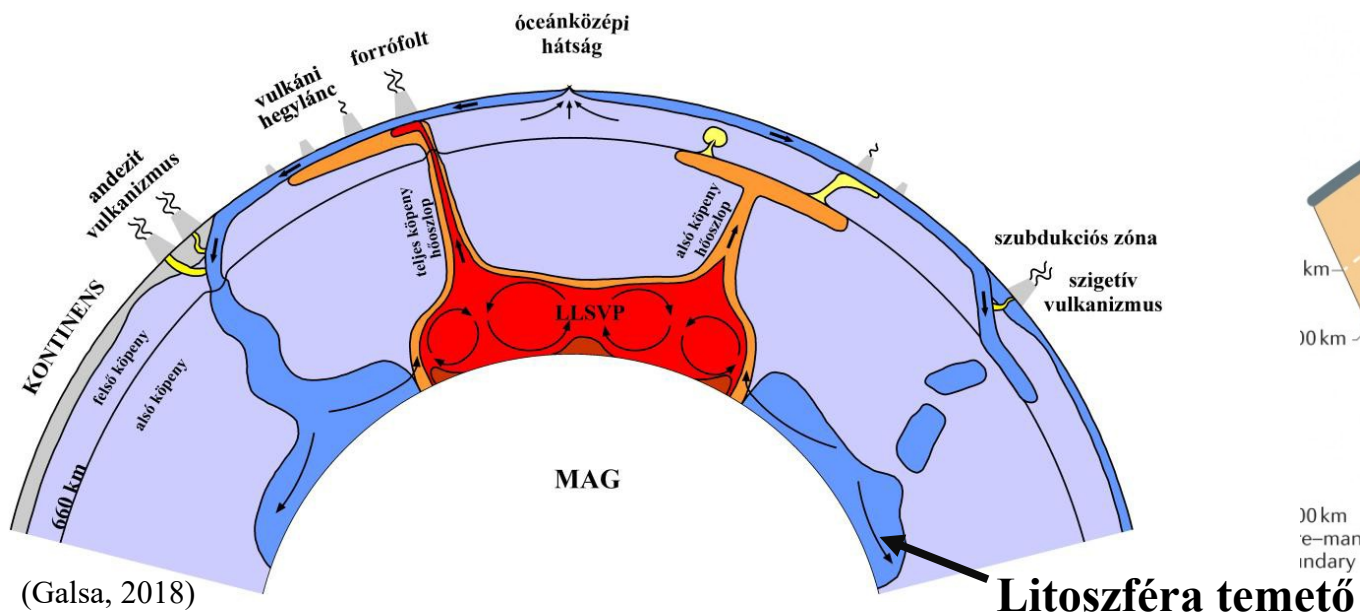
Nagy kiterjedésű, negatív nyíróhullám anomáliával rendelkező tartományok: **LLSVP** (*large low shear velocity province*).

- D'' a köpeny–mag határ felett található 200–300 km vastag tartományt
- Laterálisan erőteljesen inhomogén
- Antipodálisan elhelyezkedő nagyméretű negatív szeizmikus sebességanomália, a Pacifikum, Afrika alatt
- Ezen anomáliák laterálisan több 1000 km kiterjedésűek, vertikálisan is több 100 km-re emelkednek ki a KMH-ról.
- S hullám anomália 2 – 4%, P hullám anomália 0 – 1%

Köpeny szerkezete

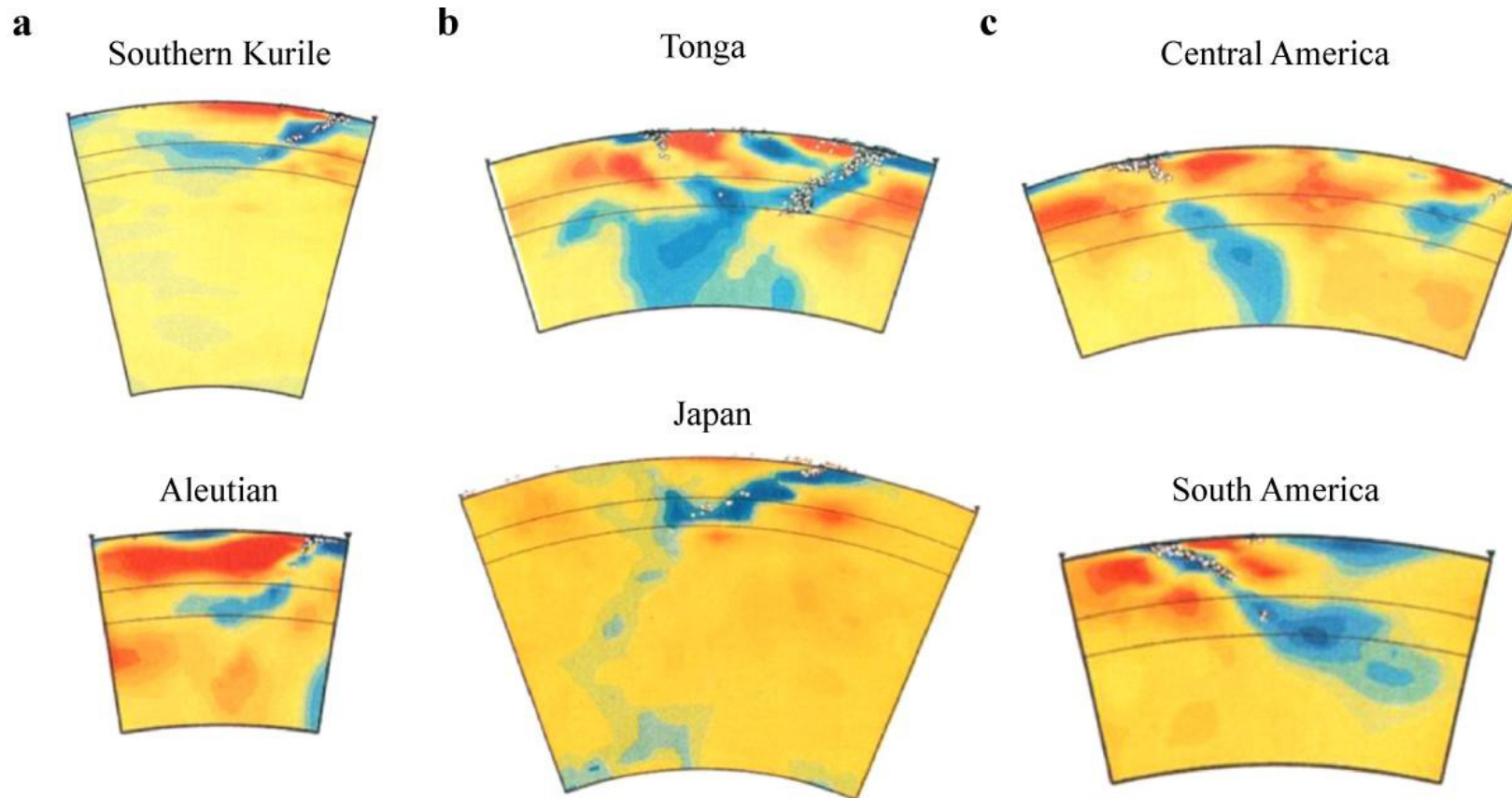
Legalsó köpeny – Köpeny Mag határ kb. 2900 km mélység, Gutenberg Wiechert határfelület, **D''-réteg**

- Az LLSVP-k a legalsó köpeny meleg, ezért kis sűrűségű képződményei. **DE** az LLSVP-k több száz millió éve léteznek
- Tehát a magasabb hőmérséklet miatt fellépő termikus felhajtóerőt **valami kompenzálja!!** → Erre a legjobb jelölt az LLSVP-k **magasabb vaskoncentrációja**, melyet okozhat a nem tökéletesen lezajlott sűrűség szerinti differenciáció, vagy aktív kémiai kapcsolat a külső maggal. Mindenesetre ez magmagyarázná, hogy miért létezhetnek meleg tartományok huzamosabb ideig a köpeny legalján, illetve magyarázatot adna az ún. **ULVZ-tartományok** (*ultra low velocity zone*) létezésére. Eszerint a KMH feletti **LLSVP-ken belül léteznek** olyan, néhány 10 km-es méretű tartományok, melyekben a szeizmikus hullámok terjedési sebessége és jósági tényezője drasztikusan lecsökken (Galsa, 2018).

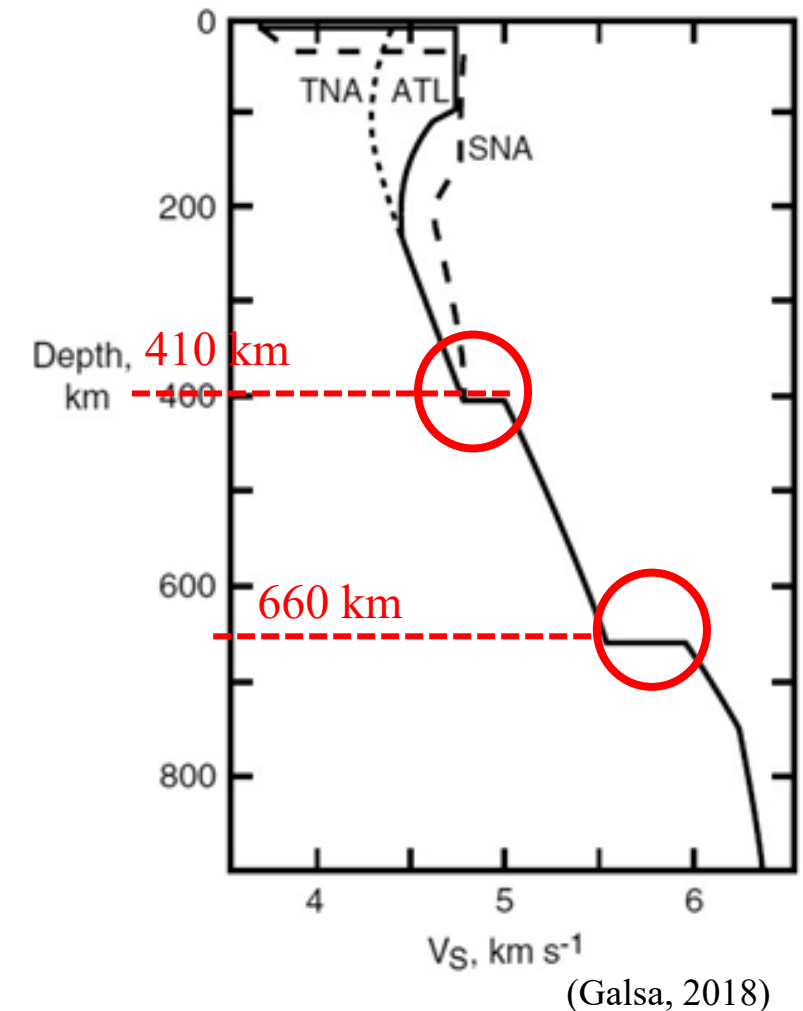


<https://qubit.hu/2024/09/02/tele-lehet-a-foldkopeny-melye-kulonos-rengeshullamokat-lassito-regiokkal>

Szeizmikus diszkontinuitások a köpenyben



A Pacifikumban szubdukálódó óceáni lemezek tomografikus képe. (a) A lemez ráfekszik a 660 km-es ásványtani fázishatárra, (b) a lemez elhajlik a fázishatárnál, de átjut az alsó köpenybe, (c) a lemez elhajlás nélkül átjut a fázishatáron (Fukao et al. 2001, Galsa, 2018).

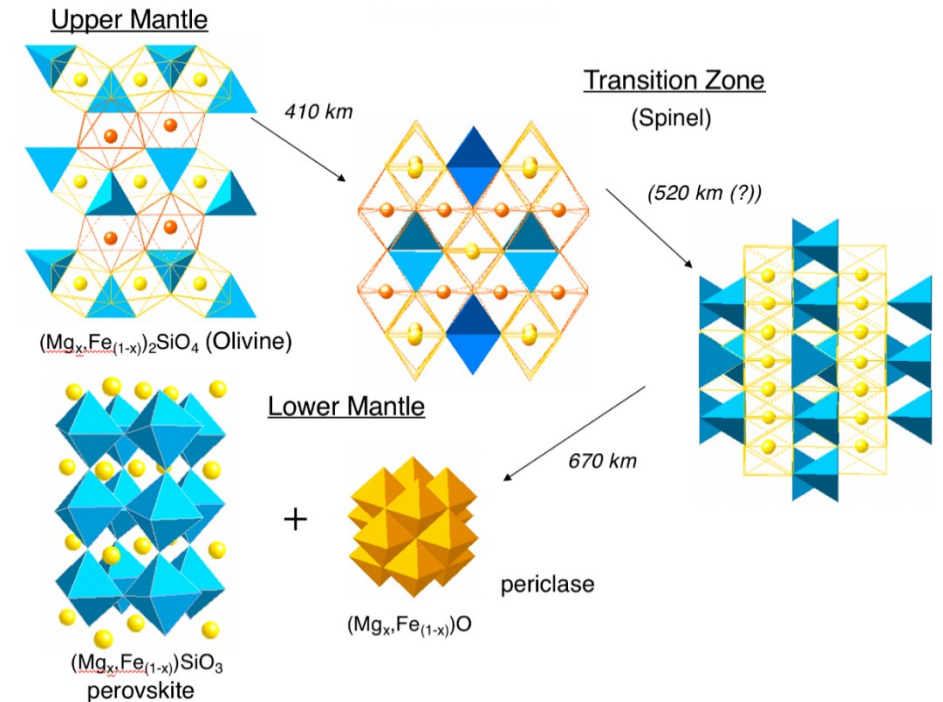
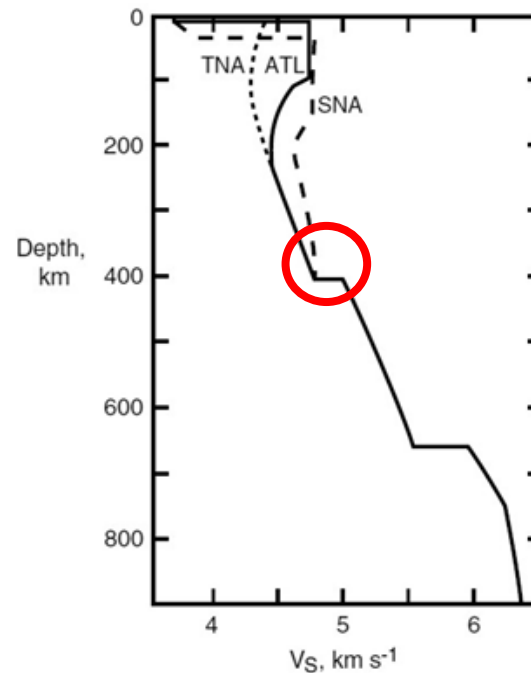
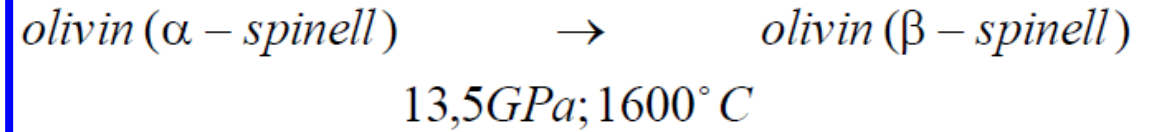


Ásványtani fázisátalakulások a köpenyben

410 km-es ásványtani fázisátmenet

- Szeizmikus diszkontinuitást az olivin fázisátmenete produkálja
- 13,5 GPa nyomáson és 1600°C hőmérsékleten egy tömörebb ásványtani szerkezetet vesz fel.
- Új ásványszerkezet tömörebb, sűrűsége 7–8%-kal megnő, a P hullám mintegy 0,3–0,4 km/s sebességgel gyorsabban terjed benne. Ráadásul az átmenet egy relatíve szűk, körülbelül 10 km vastag átmeneti tartományban megy végbe, azaz okozhatja az észlelt hirtelen sebességugrást.
- Az átmenet *exoterm*, azaz hőtermelő jellegű

EXOTERM



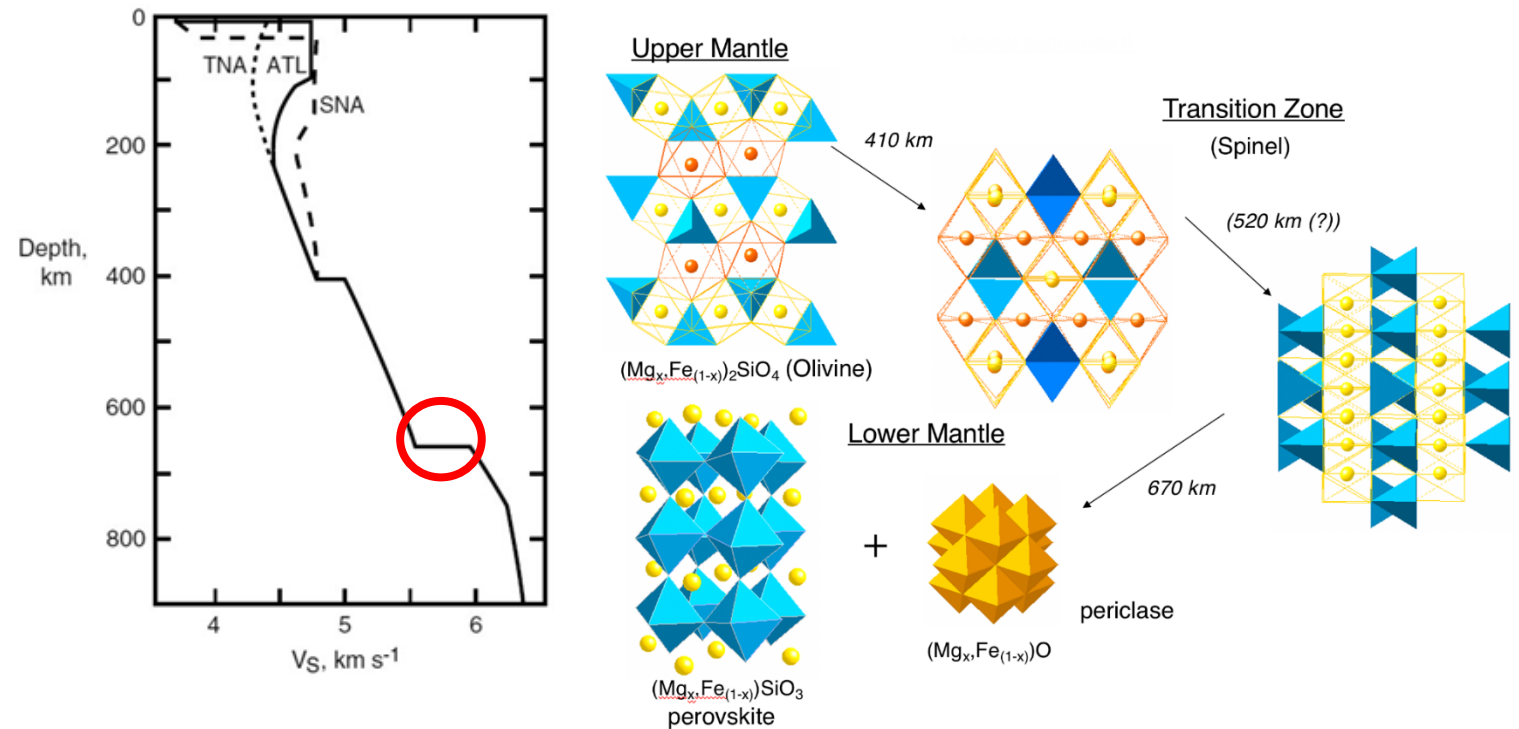
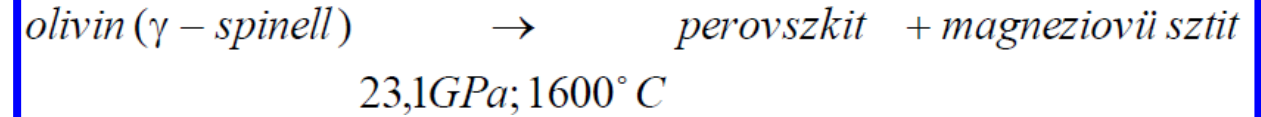
<https://chazeon.com/notes/mphys/mantle-composition/>

Ásványtani fázisátalakulások a köpenyben

660 km-es ásványtani fázisátmenet

- Ezen mélységnek megfelelő nyomás- és hőmérsékletviszonyok mellett ismételten az olivinnek létezik ásványtani fázisátmenete.
- 23,1 GPa nyomáson és 1600°C hőmérsékleten két ásvánnyá alakul át, perovszkittá és magneziovüsztitté.
- Az átmenet következtében az ásványcsoport sűrűsége közel 10%-kal nő, a benne terjedő P hullám 0,4–0,6 km/s sebességgel gyorsabban terjed.
- Az ásványtani reakció endoterm, azaz hőelnyelő jellegű.

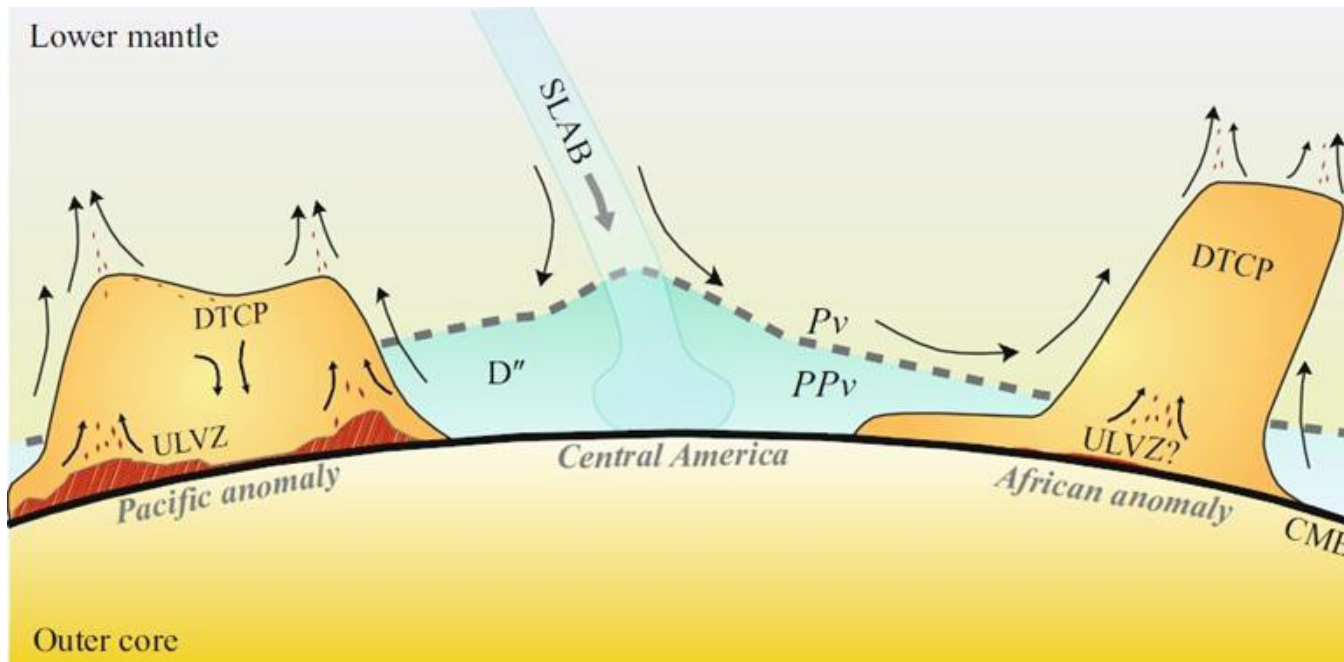
ENDOTERM



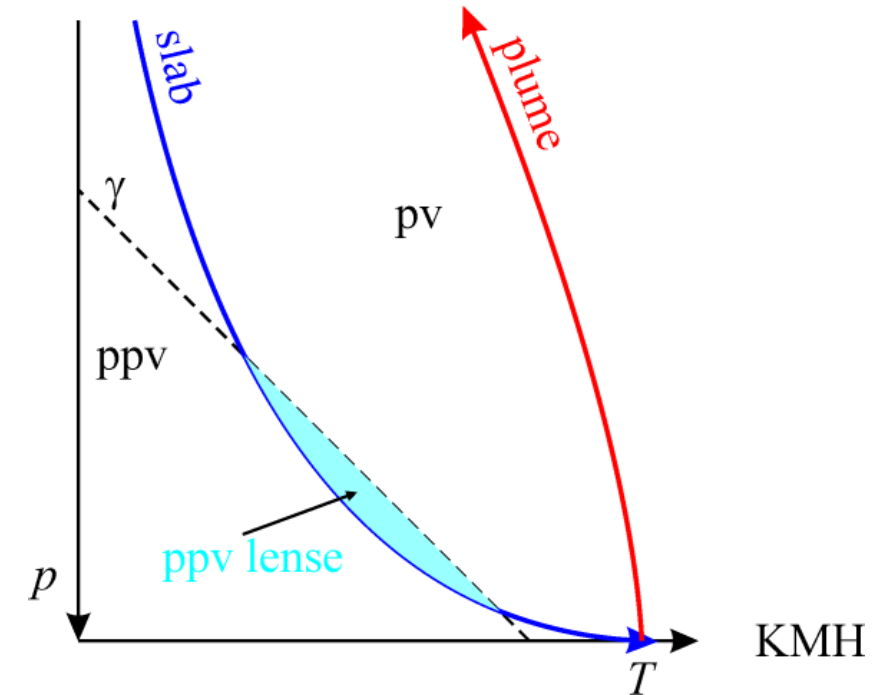
<https://chazeon.com/notes/mphys/mantle-composition/>

Ásványtani fázisátalakulások a köpenyben

- Az utóbbi bő évtizedben fedezték fel extrém nyomás- és hőmérsékletviszonyok mellett (125 GPa, 2500 K), hogy a perovszkitnak is létezik egy további fázisátmenete, ahol ún. posztpervovszkit fázissá alakul. Az átmenet szintén exoterm folyamat.

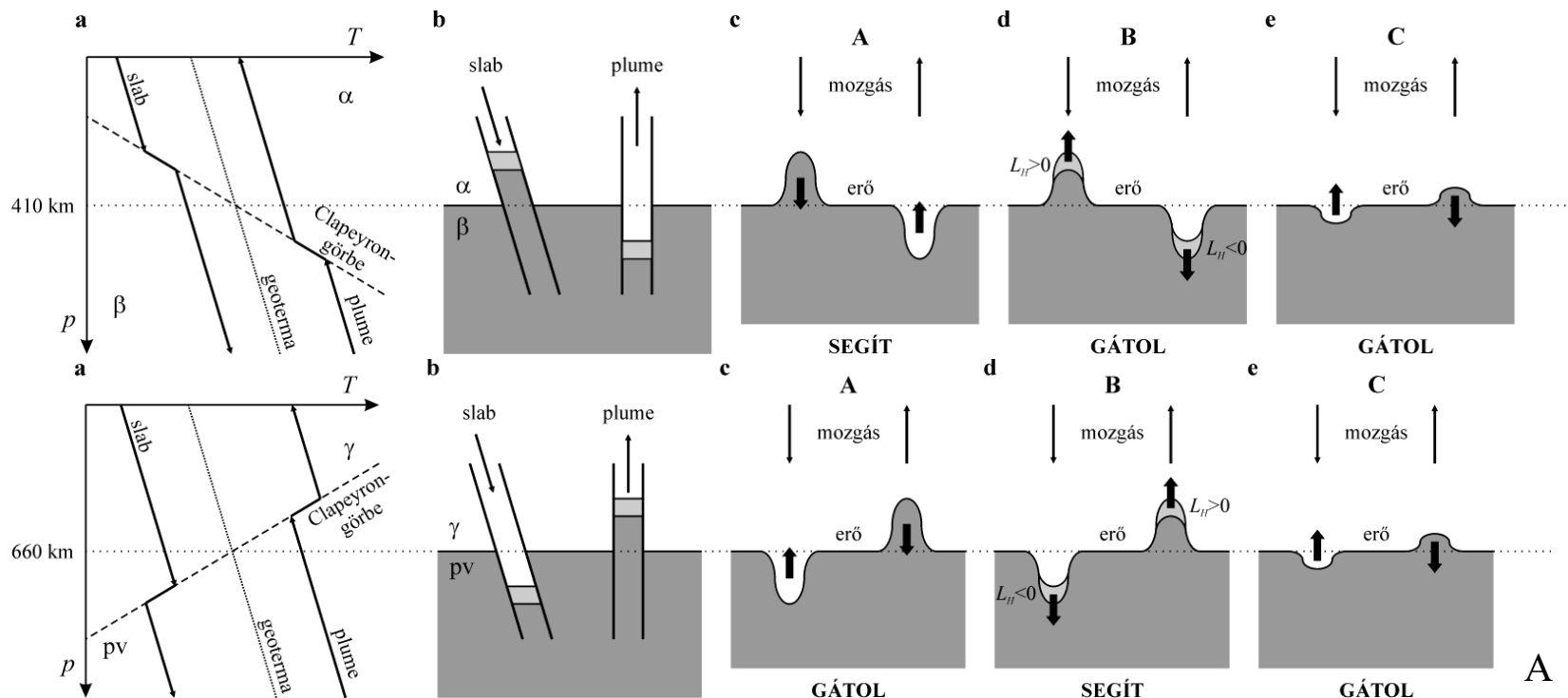


A köpeny–mag határ feletti tartományban zajló geodinamikai folyamatok illusztrációja, illetve a ppv fázis elhelyezkedése (Galsa, 2018)

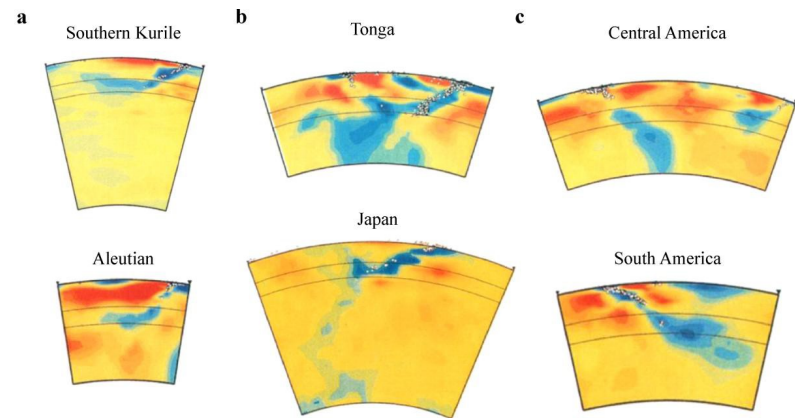


A posztpervovszkit lencse (ppv lense) kialakulása a KMh feletti hideg óceáni lemezben (slab), és hiánya a meleg felszálló köpenyoszlopban (plume). A perovszkit (pv) és a ppv fázist elválasztó Clapeyron-görbét szaggatott vonal jelöli (Galsa, 2018).

Ásványtani fázisátalakulások a köpenyben



Miért viselkedik úgy ahogy?



	Jelenség	Megnevezés	Erő iránya	Erő nagysága [N/m]
410 km	A	Fázishatár-elhajlás	↓	$6,4 \cdot 10^{12}$
	B	Látens hő → hőtágulás	↑	$6,3 \cdot 10^{10}$
	C	Látens hő → fázishatár-elhajlás	↑	$3,5 \cdot 10^{11}$
660 km	A	Fázishatár-elhajlás	↑	$1,0 \cdot 10^{13}$
	B	Látens hő → hőtágulás	↓	$3,0 \cdot 10^{10}$
	C	Látens hő → fázishatár-elhajlás	↑	$1,9 \cdot 10^{12}$

SEGÍT

GÁTOL

(Galsa, 2018)

A 410 km mélységű exoterm ásványtani fázisátmenet és a 660 km mélységű endoterm ásványtani fázisátmenet kvalitatív hatása a süllyedő lemezre, illetve az emelkedő hőoszlopra. (a) Fázisdiagram, (b) kétfázisú zóna elhelyezkedése a lemezben és a hőoszlopban, (c) A jelenség: a fázishatár-elhajlás okozta erők, (d) B jelenség: a látens hő okozta hőtágulás hatása és (e) C jelenség: a látens hő hatása a fázishatár-elhajlásra (Galsa, 2018).

Radiális hőmérséklet eloszlás a köpenyben

Hőtranszport egyenlet egyik alakja:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\overset{\text{Kondukcio}}{K \mathbf{grad} T}) - \rho c_p (\overset{\text{Advekcio}}{\mathbf{u} \mathbf{grad}}) T$$

ahol ρ , c_p és K a folyadék sűrűsége, fajhője és hővezető-képessége, míg T és $\mathbf{u}$ a hőmérsékletet és az áramlási sebességet jelöli

egydimenziós változata miután leosztottunk a ρc_p taggal

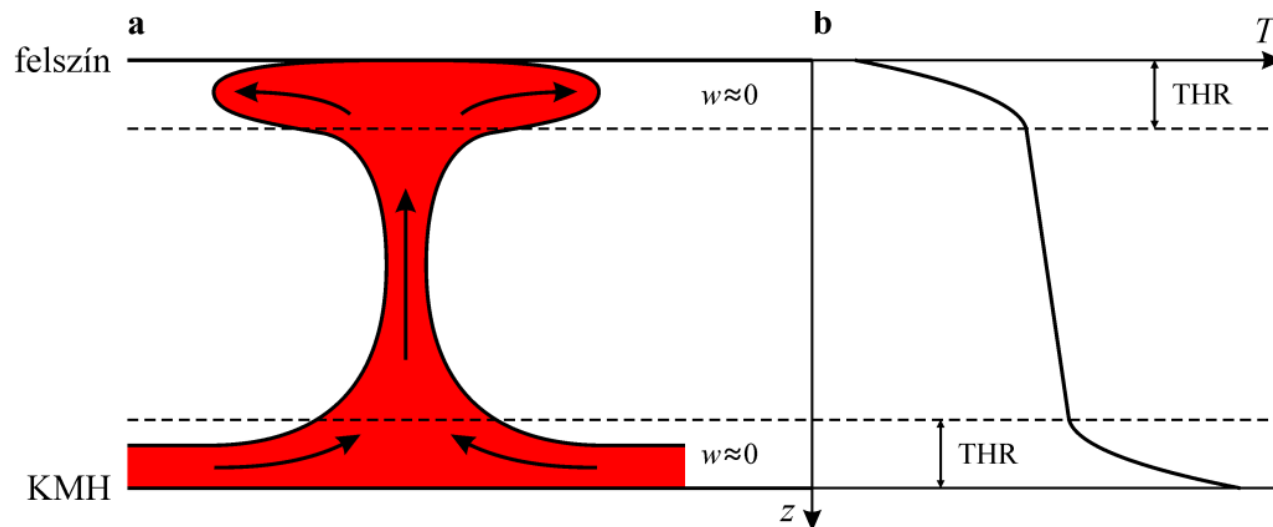
ahol w és z a vertikális sebesség és a mélység, valamint κ a köpeny hődiffúzitása

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - w \frac{\partial T}{\partial z} \quad \kappa = \frac{K}{\rho c_p}$$

$$\frac{\Delta T}{d^2 / \kappa} \frac{\partial T'}{\partial t'} = \kappa \frac{\Delta T}{d^2} \frac{\partial^2 T'}{\partial z'^2} - u_0 \frac{\Delta T}{d} w' \frac{\partial T'}{\partial z'}$$

A hőtranszport egyenlet alapján az advekció (hőszállítás) és a kondukcio (hővezetés) nagyságának aránya kifejezhető a tag nagyságát, dimenzióját meghatározó mennyiségek hányadosaként. Ezt a dimenziótlan számot Péclet-számnak nevezik

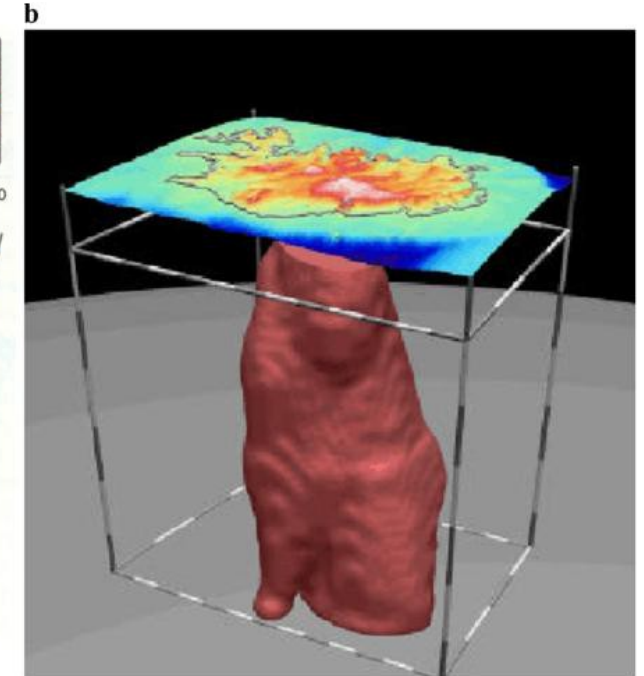
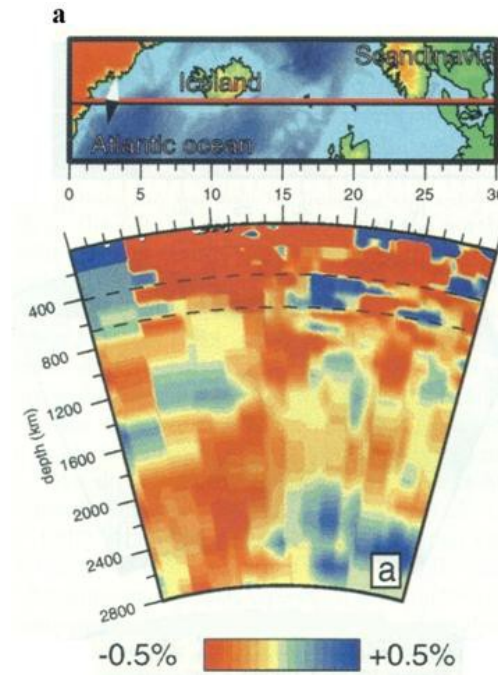
$$Pe = \frac{u_0 \frac{\Delta T}{d}}{\kappa \frac{\Delta T}{d^2}} = \frac{u_0 d}{\kappa} \quad Pe \cong \frac{3 \frac{cm}{év} \cdot 2900 km}{10^{-6} \frac{m^2}{s}} \cong \frac{10^{-9} \frac{m}{s} \cdot 2,9 \cdot 10^6 m}{10^{-6} \frac{m^2}{s}} \cong 2900$$



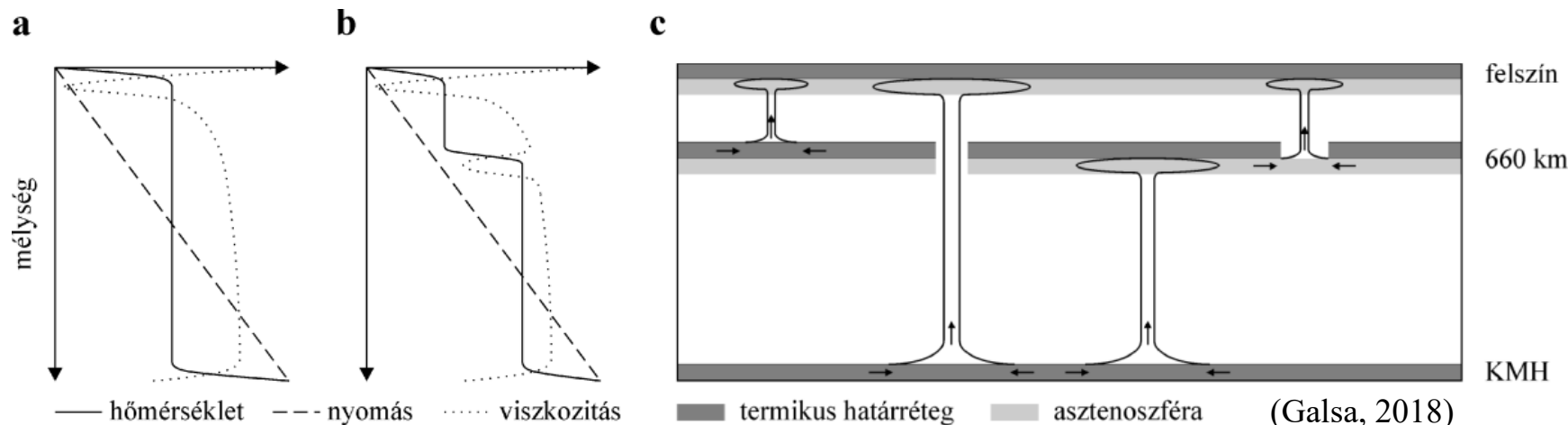
Termikus hattáréteg!!

Köpeny oszlopok

- Köpenyoszlopok
- Évtizedekig csupán numerikusan, vagy laboratóriumi körülmények között lehetett tanulmányozni
- XX. század utolsó évtizedében születtek olyan tomografikus eredmények, melyek már bizonyítékul szolgálhattak
- Tipikusan Izland és Hawaii alatt sikerült kimutatni meggyőzésre/elgondolkodásra alkalmas negatív szeizmikus anomáliát a klasszikus, vagy a diffrakció szeizmikus tomográfia segítségével.
- Az áttörést a véges frekvenciás szeizmikus tomográfia (*finite frequency seismic tomography*)



(Galsa, 2018)



belső termikus határréteg
„második asztenoszféra”

(Galsa, 2018)

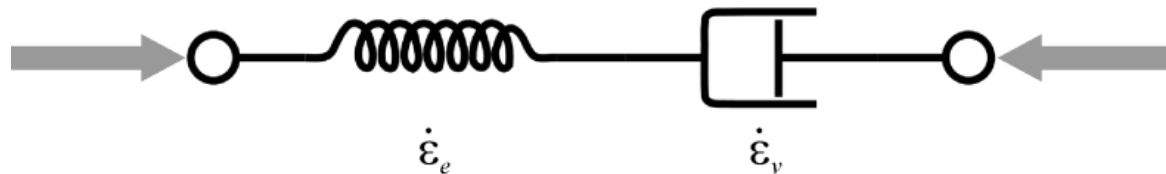
Szilárd, de folyik? Akkor most hogyan is van ez...?

Földköpeny, mint viszkoelasztikus közeg...

A szeizmológia eredményeire alapozva — nevezetesen, hogy a köpenyben mind longitudinális, P, mind transzverzális S hullámok terjednek — kijelenthetjük, hogy a köpeny szilárd. Ugyanakkor, ha a köpenyanyag viszkozitással jellemezhető, ráadásul abban termikus konvekció zajlik, akkor folyadéknak kell lennie. Hogyan békíthetjük ki, ezen két ellentmondó állítást?



A köpeny rövid idejű behatásokra rugalmasan, **elasztikusan reagál**. Ilyen rövid karakterisztikus feszültségeket okoznak például a szeizmikus hullámok (~10–60 s periódusidő), a Föld sajátrezgései (perc–óra), árapályjelenségek (12–24 óra), a Föld keringésével kapcsolatos feszültségek (éves). Hosszú karakterisztikus idejű feszültségekre azonban a köpeny **viszkózus deformációval reagál**, mint például a jégkorszak utáni felszínemelkedésre, vagy a köpenykonvekcióra. Az ilyen testet **viszkoelasztikusnak** nevezzük, és deformációja leírható az ún. **Maxwell-féle viszkoelasztikus modellel**



A **Maxwell-féle viszkoelasztikus modell** tulajdonképpen egy sorba **kötött rugó**, mely a gyors feszültségek hatására rugalmas deformációt okoz, illetve egy **olajcsillapító**, mely a lassú feszültségek okozta folyadékszerű deformációjáért felelős

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_e + \dot{\epsilon}_v = \frac{1}{2\mu} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{2\eta} \sigma$$

ahol $\dot{\epsilon}$, $\dot{\epsilon}_e$, $\dot{\epsilon}_v$, az eredő, az elasztikus és a viszkózus sebesség-deformáció, σ a feszültség, μ és η köpeny (rugó) nyírási modulusa, illetve a köpeny (olaj) dinamikus viszkozitása

Reológia: feszültség vs deformáció sebesség

Szilárd, de folyik? Akkor most hogyan is van ez...?

$$\frac{\text{"elasztikus deformáció"}}{\text{"viszkózus deformáció"}} = \frac{\frac{1}{2\mu} \frac{d\sigma}{dt}}{\frac{1}{2\eta} \sigma} \cong \frac{\frac{1}{2\mu} \frac{\sigma}{\tau}}{\frac{1}{2\eta} \sigma} = \frac{\eta/\mu}{\tau} = \frac{\tau_M}{\tau}$$

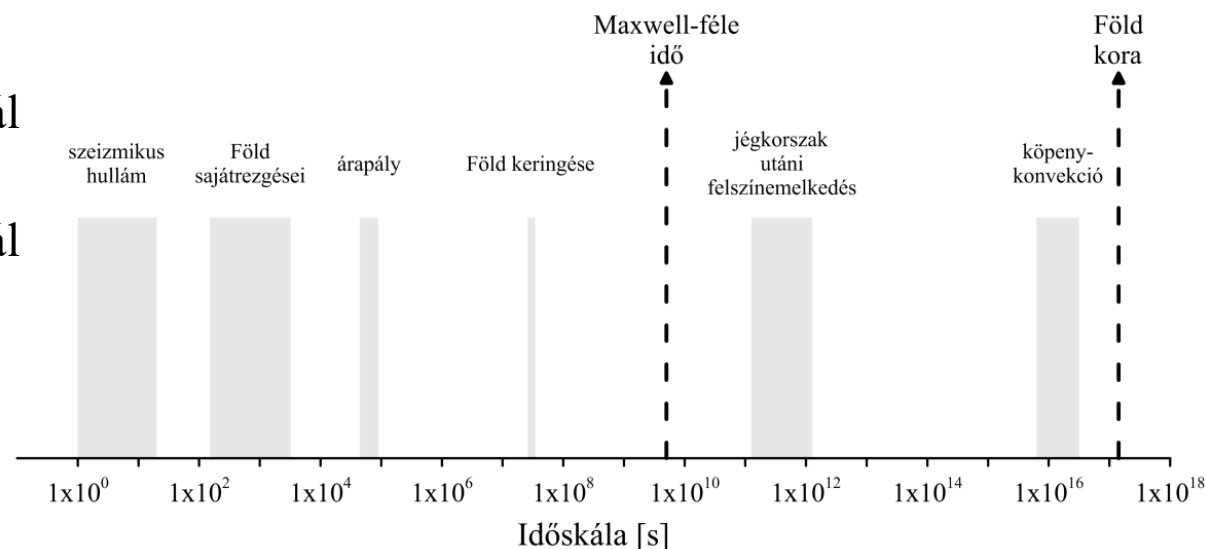
ahol τ a feszültség karakterisztikus ideje

$\tau_M = \frac{\eta}{\mu}$ Maxwell-féle karakterisztikus időnek nevezni, mely a közegre jellemző érték. Amennyiben

$\tau < \tau_M \Rightarrow \frac{\tau_M}{\tau} > 1$ elasztikus deformáció dominál

$\tau > \tau_M \Rightarrow \frac{\tau_M}{\tau} < 1$ viszkózus deformáció dominál

$$\tau_M = \frac{\eta}{\mu} \cong \frac{10^{21} \text{ Pas}}{2 \cdot 10^{11} \text{ Pa}} \cong 160 \text{ év}$$



Szilárd, de folyik? Akkor most hogyan is van ez...?

Oké, már értjük miért folyik a köpeny, de hogyan folyik...?

A creep folyás, mint viszkózus deformáció

Gordon (1965) megállapította, hogy **a termikusan aktivált szilárd anyag** (azaz olyan anyag, melynek hőmérséklete megközelíti, de nem éri el az olvadáspontot, mint amilyen a köpeny is) geológiai időskálán már kis feszültségek hatására is folyadékszerű viselkedést mutat. Ez a deformáció, az ún. **creep folyás** (*creep flow/deformation*), mely a **kristályhibákon keresztül történik**.

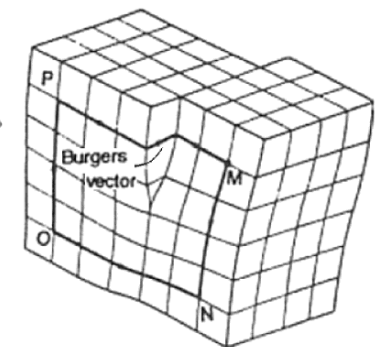
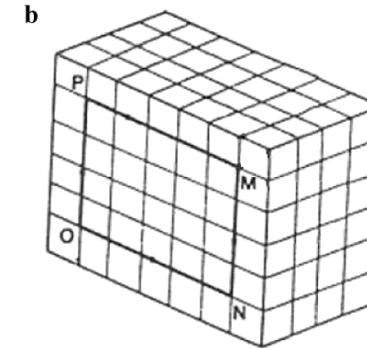
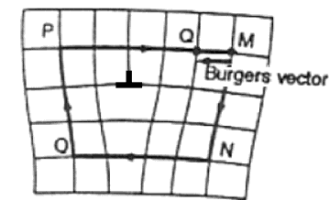
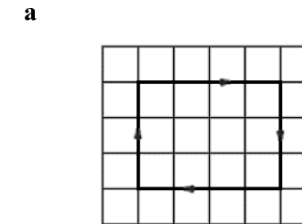
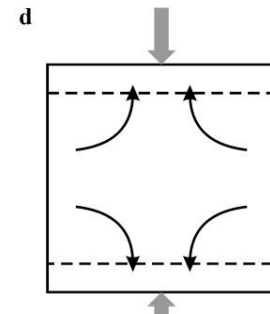
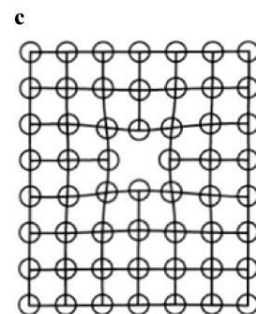
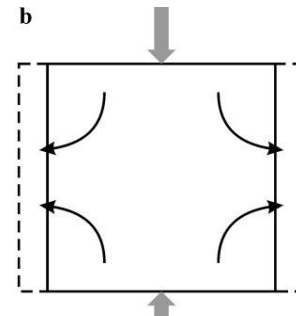
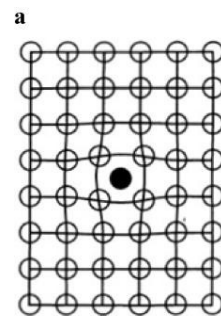
- ponthibák (*point defects*),
- vonalhibák (*line defects*),
- síkhibák (*plane defects*),

diffúziós folyás (*diffusion creep*) a ponthibák terjedésén keresztül

- extra atom
- vakancia (atomhiány)

A diszlokációs folyás (*dislocation creep*) a vonalhibák terjedésén keresztül

- éldiszlokációt (*edge dislocation*) és a
- csavardiszlokációt (*screw dislocation*)



Termikus köpenykonvekció alapegyenletei

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{div} \rho \mathbf{u} = 0$$

Tömegmegmaradást biztosító
KONTINUITÁSI egyenlet

$$\rho \frac{d\mathbf{u}}{dt} = -2\rho \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} - \mathbf{grad} p + \mathbf{div} \boldsymbol{\sigma},$$

Impulzusmegmaradást
biztosító NAVIER-
STOKES egyenlet

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = \alpha T \frac{dp}{dt} + \mathbf{div} (K \mathbf{grad} T) + \Phi + H$$

Energiamegmaradást
biztosító
HŐTRANSPORT
egyenlet

$$\rho(p, T) = \rho_r (1 + \chi_T \delta p - \alpha \delta T). \quad \text{Állapotegyenlet}$$

$$\sigma_{ij} = \eta \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \eta \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i}.$$

Köpenyanyag reológiája a
deviatórikus
feszültségtenzoron keresztül
épül az egyenletekbe

$$\eta(p, T) = \eta_0 \exp \left[\frac{E^* + pV^*}{RT} \right],$$

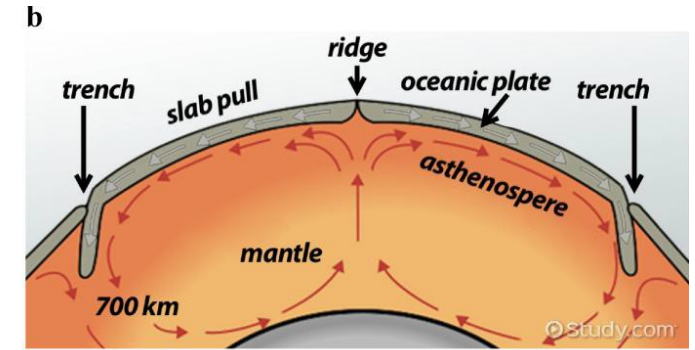
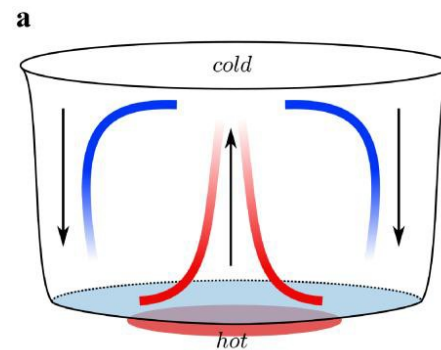
Arrhenius-törvény

$$\Phi = \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}.$$

Viszkózus disszipáció

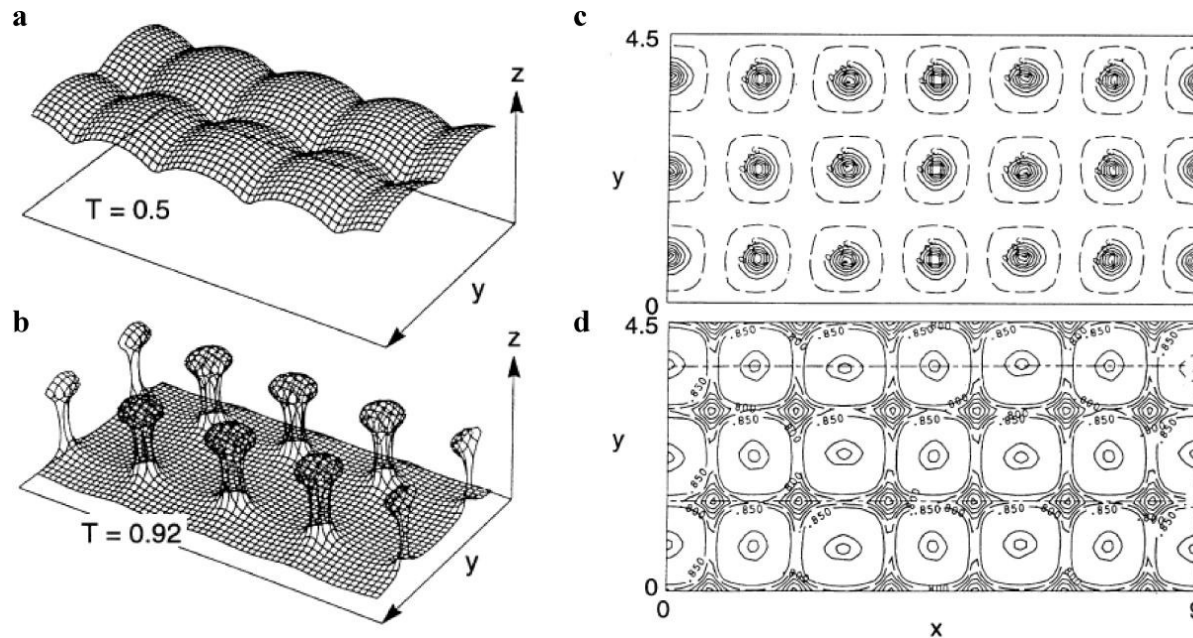
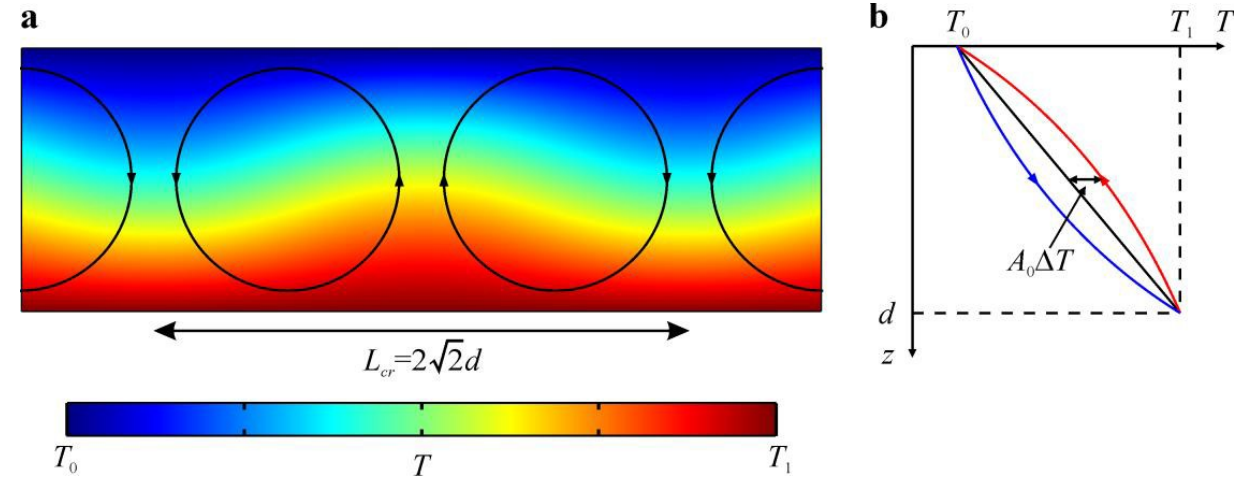
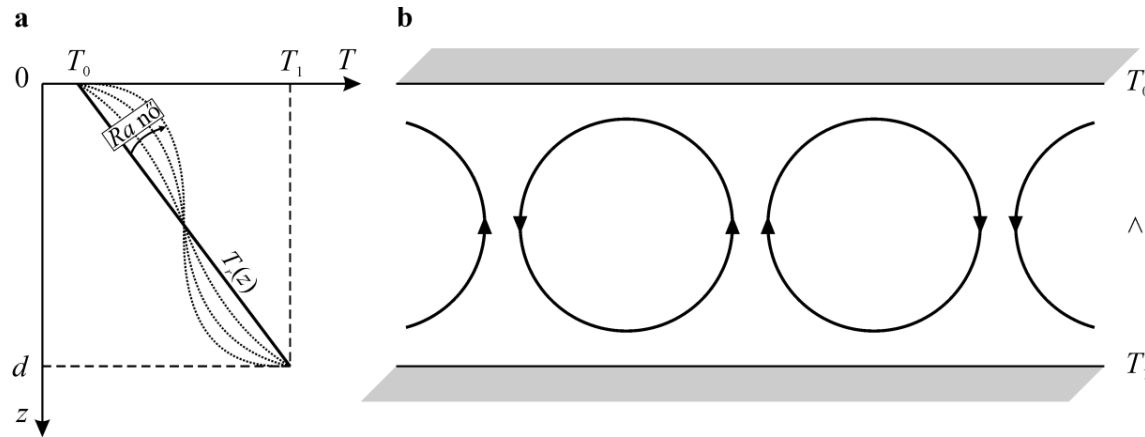
Habár a termikus konvekció jelenségének kvalitatív megértése valóban nem túl bonyolult, ugyanakkor annak kvantitatív, egzakt fizikai leírása meglehetősen komplex. A termikus konvekció jelenségét három megmaradási egyenletből álló parciális differenciálegyenlet-rendszer írja le, így

- a kontinuitási egyenlet, mely a tömegmegmaradást biztosítja,
- a Navier–Stokes-egyenlet, mely az impulzus megmaradásáért felelős, valamint
- a hőtranszport egyenlet, mely az energiamegmaradás egyik formája.



Ezt még numerikusan sem lehet megoldani mert annyira bonyolult! →
Közelítő egyenletek (dimenziótlan egyenletek)! → Boussinesq-approximáció!

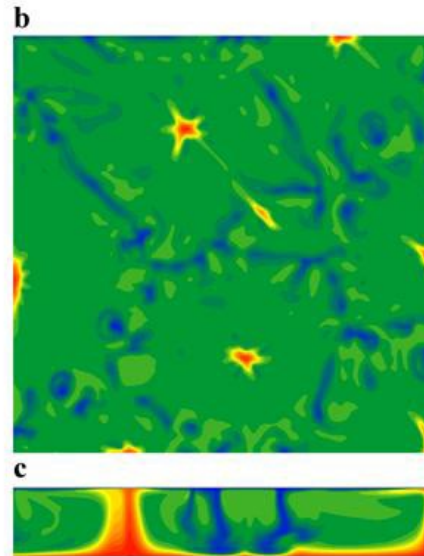
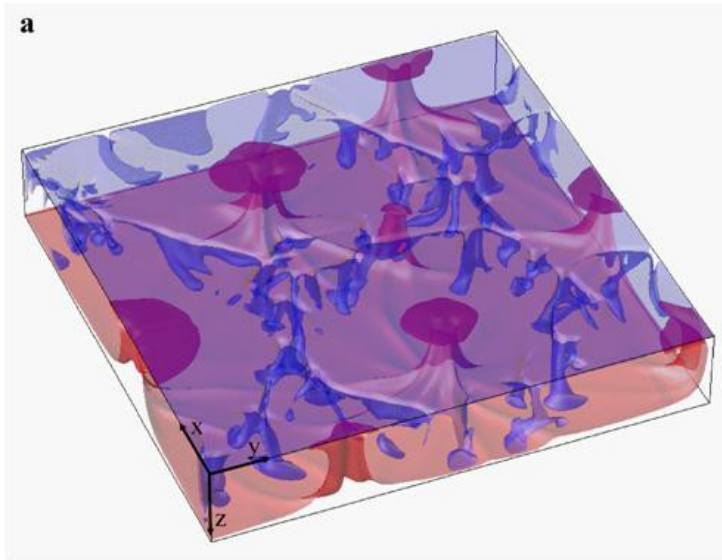
Rayleigh–Bénard-probléma



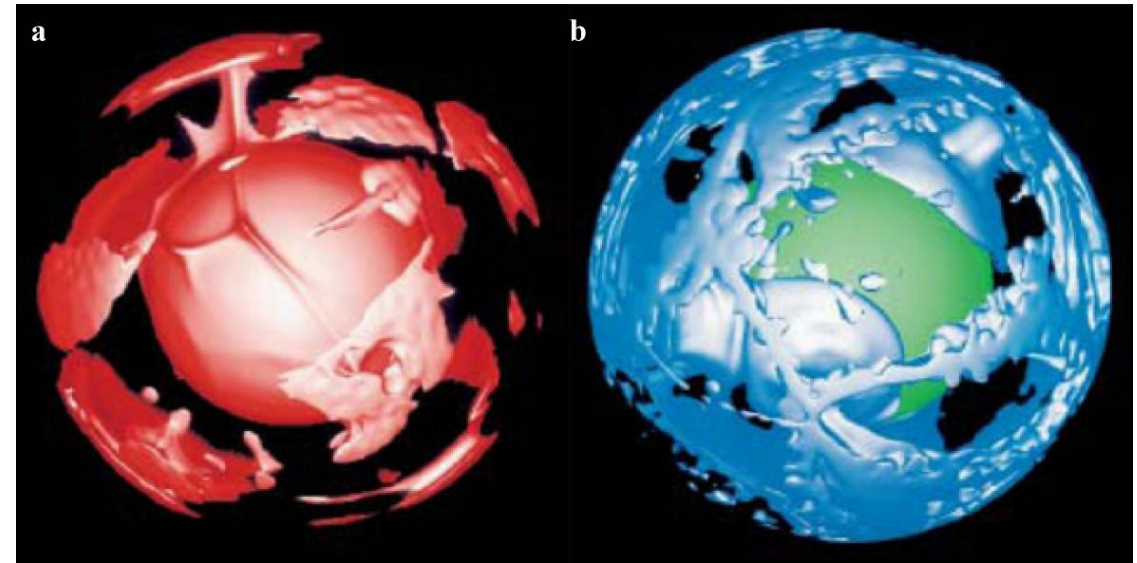
$$Ra := \frac{\rho_0 g \alpha \Delta T d^3}{\kappa \eta_0} = \frac{\text{"termikus felhajtóerő"}}{\text{"viszkózus erő"}}$$

$$Ra_{cr} = Ra(a = \frac{\pi}{\sqrt{2}}) = \frac{(\pi^2 + \frac{\pi^2}{2})^3}{\frac{\pi^2}{2}} = \frac{\left(3 \frac{\pi^2}{2}\right)^3}{\frac{\pi^2}{2}} = \frac{27}{4} \pi^4 \cong 657,5$$

Rayleigh–Bénard-probléma



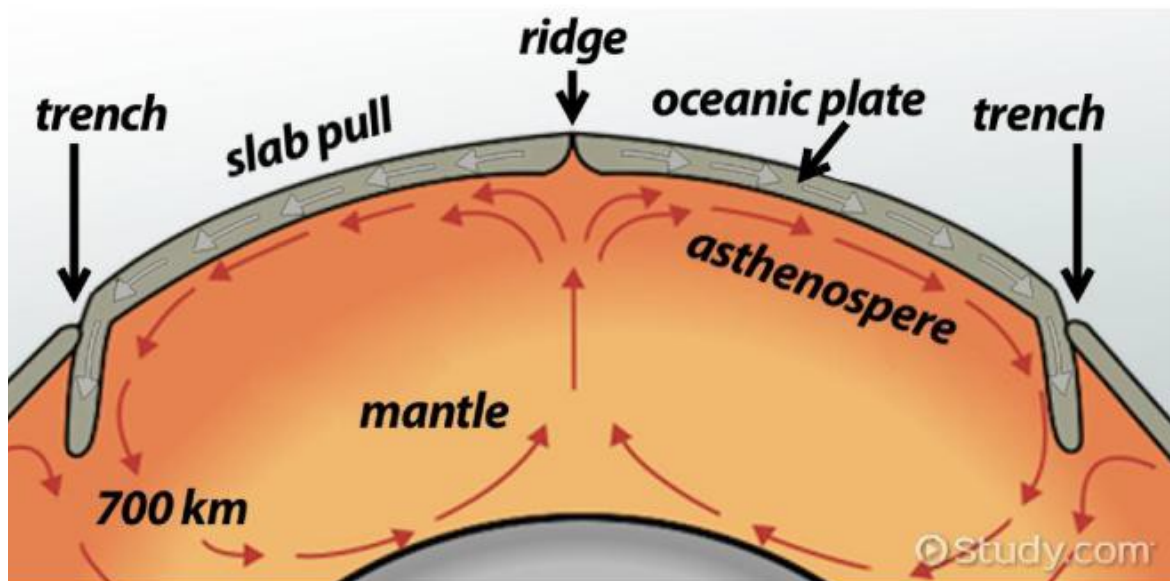
A hőmérsékleteloszlás pillanatképe egy háromdimenziós, erősen időfüggő termikus konvekció esetén, $Ra=5 \cdot 10^6$, $H=10$ és a viszkozitás exponenciálisan 100-szorosára növekszik a modelldoboz tetejétől az aljáig. (a) Perspektivikus kép egy meleg ($T=0,6$) és egy hideg ($T=0,25$) izotermafelülettel. A hőmérsékleteloszlás (b) horizontális metszete a modelldoboz félmélységében és (c) vertikális metszete az $x=0$ síkban (Galsa 2003).



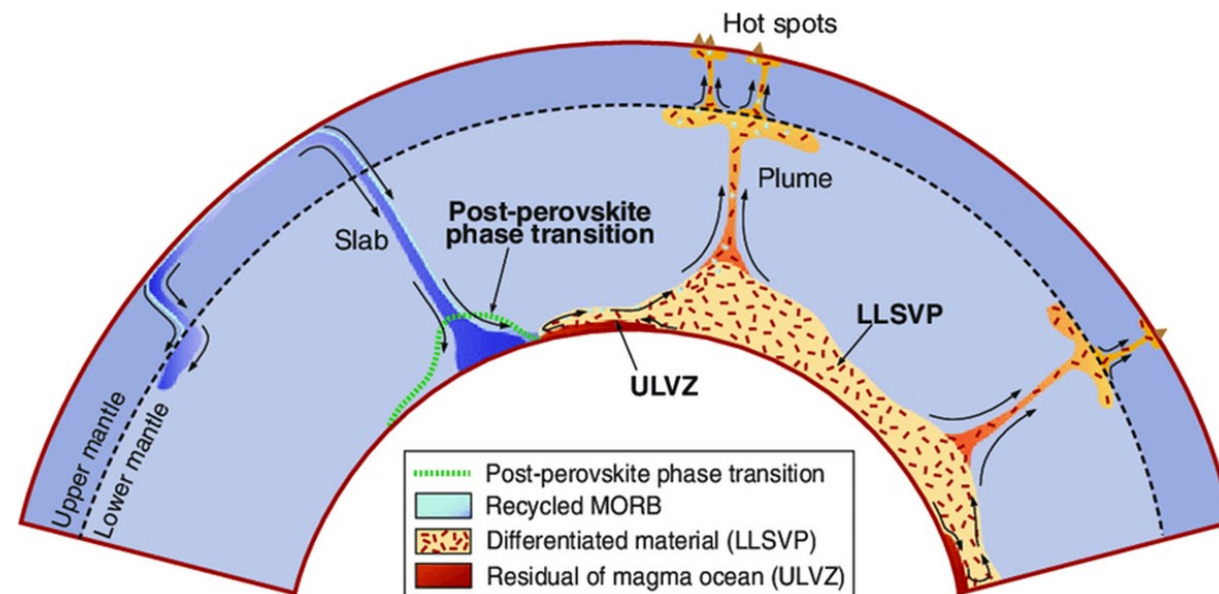
A hőmérsékleteloszlás pillanatképe egy gömbháj alakú modelltartományon. (a) A meleg izoterma (piros) az átlaghőmérsékletnél 110 K-nel melegebb pontokat köti össze. (b) A hideg izoterma (kék) az átlaghőmérsékletnél 110 K-nel hidegebb pontokat köti össze (Tackley et al. 1993).

Összefoglalás

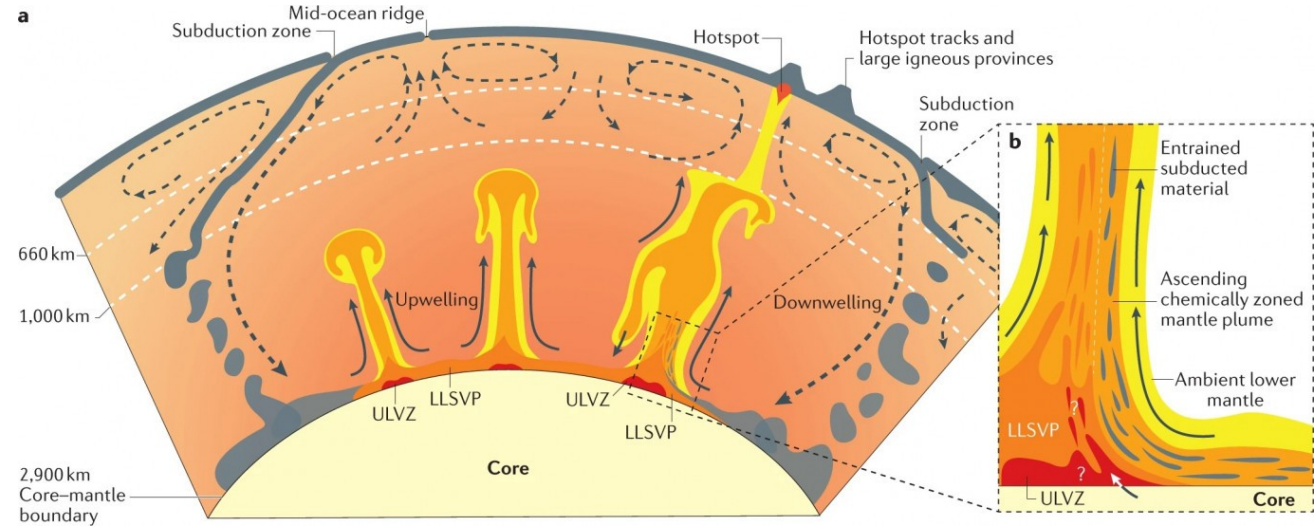
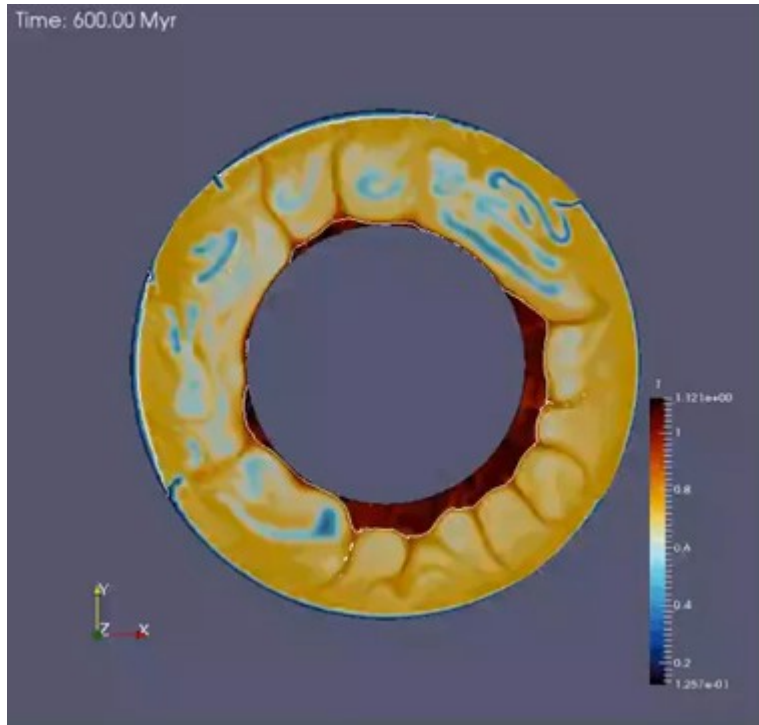
Korábbi elképzelés



Mai tudásunk szerint

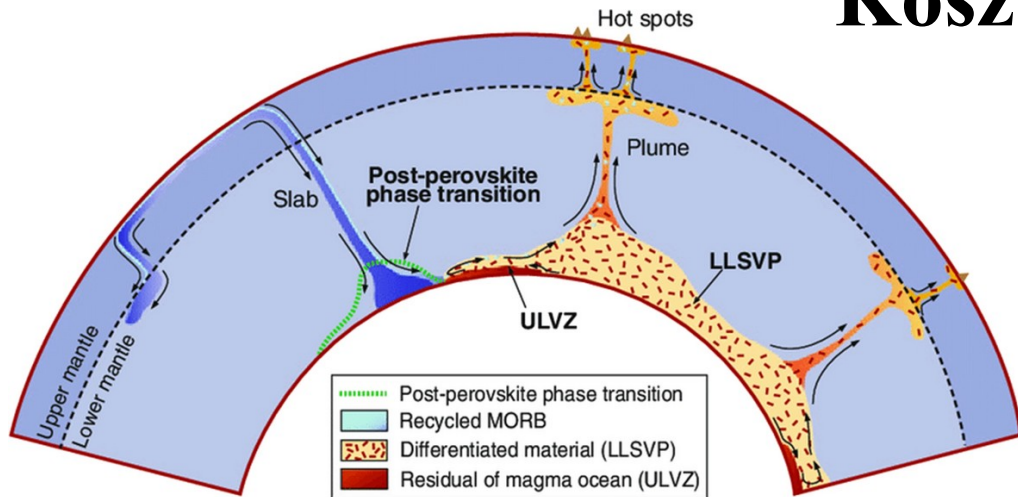


<https://link.springer.com/article/10.1007/s10712-021-09684-y>



<https://qubit.hu/2024/09/02/tele-lehet-a-foldkopeny-melye-kulonos-rengeshullamokat-lassito-regiokkal>

Köszönöm a figyelmet



<https://link.springer.com/article/10.1007/s10712-021-09684-y>



Hasznos olvasmányok:

Áramlások a Földköpenyben:

<https://gali.web.elte.hu/page-1.html>

Galsa Attila (2018) Földi áramlások fizikája:

chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgltclfindmkaj/https://gali.web.elte.hu/assets/f0%c3%b6ldi-%c3%a1raml%c3%a1sok-fizk%c3%a1ja.pdf

Tele lehet a földköpeny mélye különös, rengéshullámokat lassító régiókkal:

<https://qubit.hu/2024/09/02/tele-lehet-a-foldkopeny-melye-kulonos-rengeshullamokat-lassito-regiokkal>

Dehant, V., Campuzano, S.A., De Santis, A. et al. Structure, Materials and Processes in the Earth's Core and Mantle. Surv Geophys 43, 263–302 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10712-021-09684-y>:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s10712-021-09684-y#citeas>