

Gondolatok a lemeztektonikáról, szubdukcióról és a Kárpát-Pannon Régió geodinamikájáról – Mit mond erről az MI?

Kiss J.

Szabályzott Tevékenységek Felügyeleti Hatósága (SZTFH), Földtani Igazgatóság,
1123 Budapest, Alkotás utca 50.
E-mail: janos.kiss@sztfh.hu

A szubdukció lokális földtani jelenség megértéséhez sokszor a regionális okokat kell először tisztázni – a fizika alapvető törvényszerűségeitől kell eljutni egészen a különböző földtani folyamatok megértéséig. Ez a tanulmány is mesziről indul, hogy aztán a végén jobban rálássunk a lemeztektonika, a szubdukció és az azokat előidéző geodinamikai folyamatokra, valamint a Kárpát-Pannon Régió kialakulásának lehetséges forgatókönyvére. A válaszok pontosításához segítségül hívtuk az MI (mesterséges intelligencia) alapú keresést.

Kiss, J.: Thoughts about plate tectonics, subduction and the geodynamics of the Carpathian-Pannonian Region – What does the AI say about this?

To understand subduction as a local geological phenomenon, regional causes must often be clarified first – one must proceed from the fundamental laws of physics all the way to an understanding of various geological processes. This study also starts from a broad perspective so that, by the end, we can gain a better understanding of plate tectonics, subduction, and the geodynamic processes that cause them, as well as possible scenarios for the formation of the Carpathian-Pannonian Region. To refine the answers, we used AI (artificial intelligence)-based search.

Beérkezett: 2026. április 4.; elfogadva: 2026. augusztus 13.

Bevezetés

Néhány korábbi publikációban (Kiss & Bodoky 2016) és előadásban már foglalkoztunk a lemeztektonikával és a szubdukcióval (Kiss 2013, 2015), mert már akkor is úgy tűnt, hogy némi zavar érezhető ezzel kapcsolatban. Akkor ezek a vizsgálatok a térség geofizikai (gravitációs és mágneses) térképi adatrendszerének értelmezése céljából egyfajta előtanulmányként készültek.

Szoros kapcsolat van a geofizikai erőterek és az eltérő folyamatok hatására kialakult különböző földtani környezetek között – gyors geodinamikai folyamatok hegységeket építenek (Alpok, Kárpátok, Dinaridák), gyűrődéseket okoznak, megbontják egy adott terület települési viszonyait, miközben az egyensúlyra való törekvés miatt izosztatikus gyökérszónák (regionális gravitációs Bouguer-anomália-minimumok) és köpenykiemelkedések (Kárpát-medencei köpenydiapír, regionális Bouguer-anomália-maximumok) alakulnak ki. A mély törések, szubdukciók

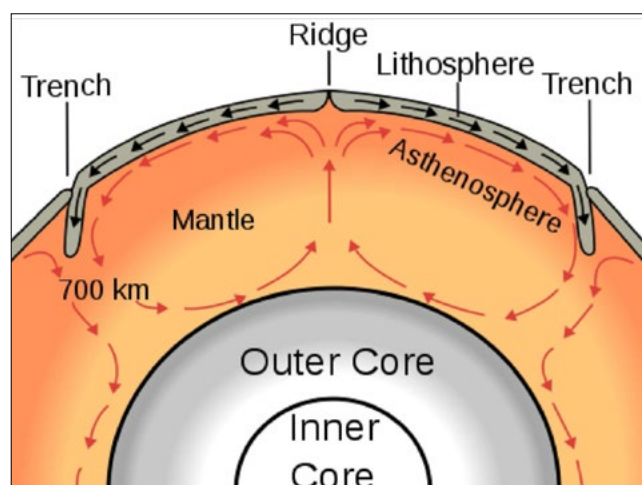
mentén aktív vulkanizmus kezdődik, bázisos (bazalt) és intermediér (andezit) lávaanyagot hozva a felszínközelségbe vagy a felszínre is, ami mágneses anomáliákat eredményez. E földtani folyamatoknak a hatása a Föld fizikai erőtereiben, illetve annak változásaiban is megjelenik. A folyamatok felismerése, megfejtése, tisztázása érdekében viszont, a fizikai folyamatok/kapcsolatok alaposabb megismerésére, megértésére van szükség. A megismerés folyamata lassú, és a főleg felszínről, illetve a geofizika segítségével kisebb mélységekből megszerzett ismereteink sokszor nem elegendőek, nem adnak teljes körű választ kérdéseinkre.

A Földet lefedő különböző tematikájú térképek és a szakmai folyóiratokban megjelenő információk alapján tájékozódhatunk ebben a témában. Az internetes keresések, az MI (mesterséges intelligencia) alapú gyorskeresés és értelmezés is segítségíthat.

Az MI válaszokat fogalmaz meg kerek mondatokban – azaz átfogalmazva a forrásanyagokat –, amelyek hivatkozását is megadja. Mivel a válaszok nem szó szerinti idéze-

tek, így a konkrét válasz nem mindig kapcsolható egyetlen forrásműhöz (és így nem adható meg annak pontos hivatkozása sem). Érdekes módon a keresőalgoritmusok a megismételt rákeresések során sem ugyanazokat az eredményeket hozták fel, illetve a válaszokat átfogalmazták (jelezve talán egyfajta bizonytalansági faktort). Az MI-keresések ugyanakkor sokszor nem ismerik a régi forrásműveket, amelyek még nem jelentek meg digitálisan, hanem csak régies, analóg formában érhetők el.

A tanulmányban felhasználtunk néhány olyan ábrát, amelyeket az internetről töltöttünk le, de azok forrása sokszor ismeretlen – az internetes felület vagy az adott forrásmű sem adja meg pontosan azokat. Ahol ezek forrása egyértelmű, azt az ábrafeliratokban megadtuk.



1. ábra Köpenykonvekció sematikusan (Wikipédia)

Figure 1 Schematic Convection of mantle (Wikipedia)

Trench – mélytengeri árok, Ridge – óceánközépi hátság, Lithosphere – litoszféalemez, Mantle – köpeny, Asthenosphere – asztenoszféra, Outer Core – külső mag, Inner Core – belső mag

Lemezmozgások

„A lemeztectonika elsődleges mozgatóereje a földköpenyben zajló hőáramlás (konvekció), amely mozgatja az asztenoszféra felett lebegő kőzetlemezeket.” (MI – PTE No.1)

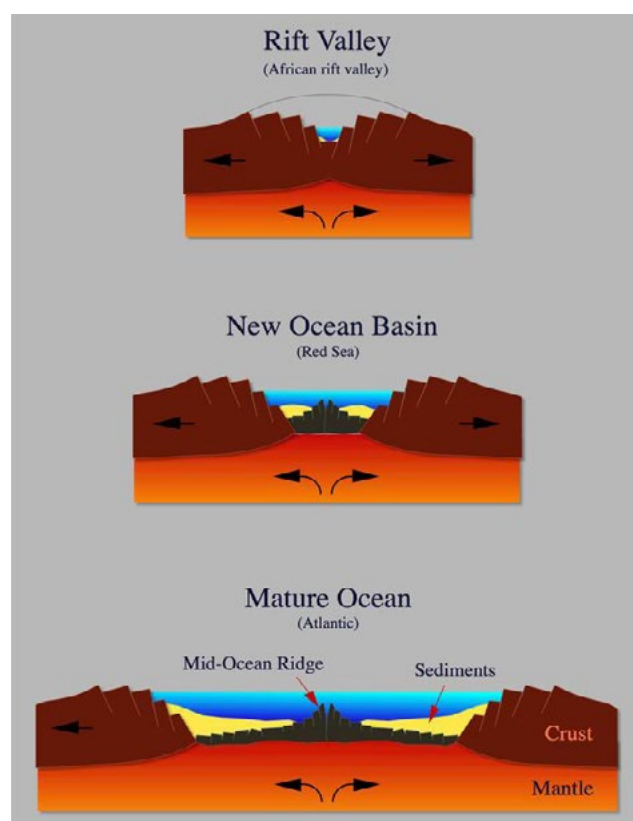
Az 1. ábrán láthatjuk földköpenyben zajló termikus konvekció korai, leegyszerűsített elképzelését. A hőáramlás menetét, valamint azt, hogy a köpeny fel- és leáramlásai között – azaz az óceánközépi hátság (Ridge) és a litoszféalemez lebukása, avagy a mélytengeri árok (Trench) között – a felszínnel párhuzamos vízszintes áramlások is történnek, amelyek mozgatják, szállítják a litoszféalemezeket.

Ez az alapelképzelés, amelyet számtalan tényező befolyásol (amelyekről ma sem tudunk eleget), de ez az alaptézis elfogadható, és sok tapasztalat támogatja azt. Vajon a „makrocellák” mellett vannak „mikrocellák” is – lásd például ’hot spot’-ok? Nagy valószínűséggel igen, de ma még nincsenek az egész Földre kiterjedő részletes adataink, méréseink, hogy ezeket pontosan megismerhessük.

Korábbi ismereteink alapján a lebukás (vagy szubdukció) az óceáni és a kontinentális litoszféalemezek között alakulhat ki. Az óceáni litoszféra alsó kéreg és felső köpeny (vagy köpenylitoszféra) összetételű lemez, míg a kontinentális litoszféra felső kéreg – alsó kéreg – felső köpeny (vagy köpenylitoszféra) összetételű, s ebből adódóan vastagabb és merevebb. Ez azért fontos, mert alábukás a két eltérő típusú lemez szegélyén jön létre, egy vékonyabb rugalmasabb és egy merevebb vastag lemez között (két különböző korú, sűrűségű és vastagságú óceáni lemez között is kialakulhat). Az 1. ábrán ez nincs kiemelve, pedig ez fontos részlet.

Hogy még egyszerűbb legyen a dolog, azt is tudjuk, hogy az eltérő litoszféalemezek között vannak aktív és passzív lemezszegek, s a különbség csak annyi, hogy a passzív lemezszegeknek nincs alábukás. A miértekre később megpróbálunk válaszolni!

Óceáni lemez kialakulhat hosszabb földtani idő alatt a kontinentális lemezek belsejében is, a riftesedésnek köszönhetően (2. ábra): divergens köpenyáramlás (pl. afrikai riftzóna, felül), majd riftesedés (pl. Vörös-tenger, közepén) és végül alsó kéreg típusú óceáni lemez kialakulása (pl. Atlanti-óceán, alul). A divergens köpenyáramlás miatt az óceáni lemez is riftesedhet, s kialakul az óceánközépi hátság.



2. ábra Óceáni lemez keletkezése a kontinensen

Figure 2 Formation of oceanic plates on the continent

Az MI-től kapott további magyarázatokban a következőket találhatjuk.

Mozgatóerők

„A lemezek vándorlását főként a sűrűbb, lehűlt óceáni litoszféra szubdukciós zónákban történő alábukása (gravitációs húzóerő) és az óceánközépi hátságoknál fellépő lemeztolás hajtja.” (MI – PTE No.2)

„A szubdukciós, vagy gravitációs húzóerő (*Slab pull*):

- A legjelentősebb erő, amikor a lehűlt, sűrűbb óceáni kőzetlemez a mélybe bukik, és súlyánál fogva húzza maga után a lemez többi részét.
- Az alámerülő óceáni lemez hidegebb és sűrűbb, mint a környező asztenoszféra, ezért saját súlyánál fogva húzza lefelé az egész lemezt. (MI – ELTE No.1)

Az óceánközépi hátságok tolóereje (*Ridge push*):

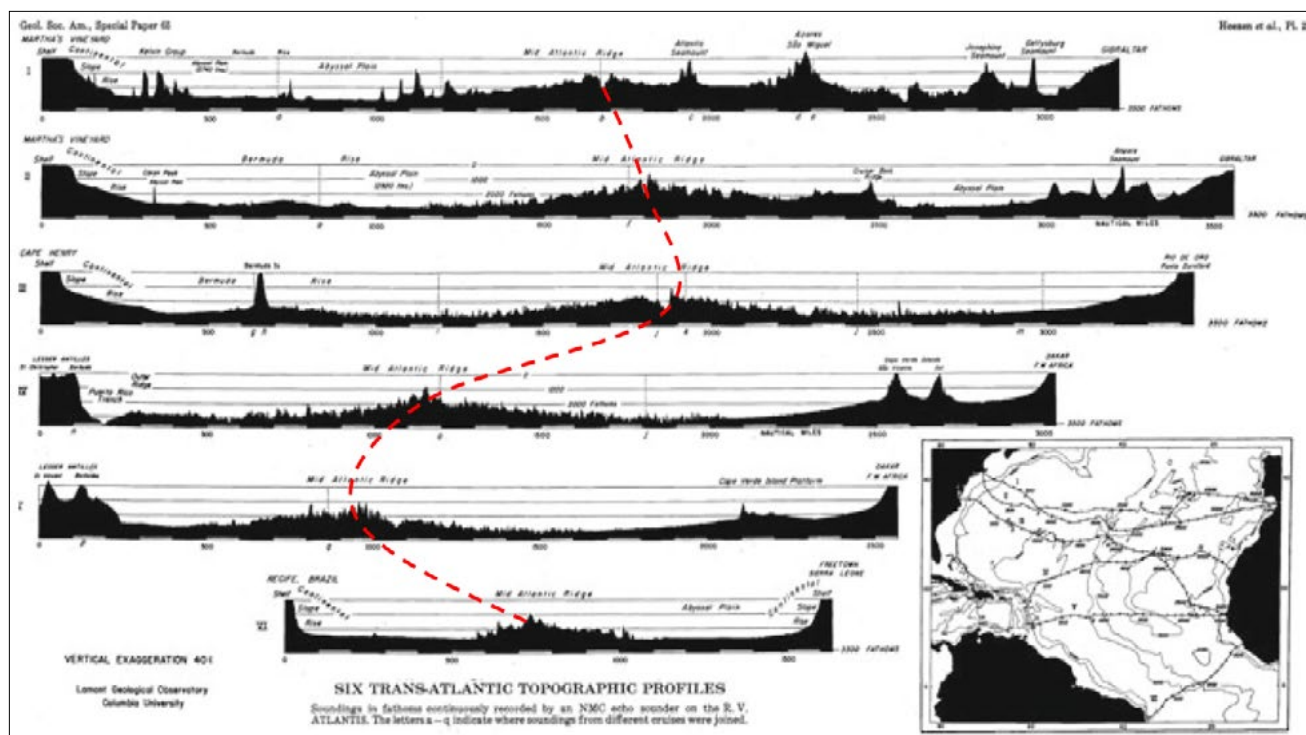
- A magasabban fekvő hátságoknál a kőzetlemez a gravitáció hatására lecsúszik és oldalirányba tolódik.
- Bár kevésbé meghatározó, az óceánközépi hátságoknál kiemelkedő, magasabban fekvő kőzetlemez gravitációs lecsúszása is hozzájárul a mozgáshoz.” (MI – ELTE No.2)

Vizsgáljuk meg először a *gravitációs húzóerőt*! Az a sűrűségkülönbség, amelyre a forrásanyag szerzői utalnak, megvan az azonos szinten található kontinentális felső kéreg és az óceáni alsó kéreg között, de nincs már meg a kontinentális és az óceáni alsó kéreg között! Az elmélet szerint két lemez közötti sűrűségkülönbség miatt bukik az egyik lemez a másik lemez alá, a kontinentális és óceáni litoszféralemezek találkozásánál. De mivel nem minden lemezszegély aktív,

ebből az látszik, hogy ez a sűrűségkülönbség nem elegendő, kell még valami az alábukáshoz, például egy tolóerő, amely a konvergens lemezmozgás esetén meg is van!

A Földben lefelé nő a sűrűség (*Függelék*) és egyre mafikusabb típusú kőzetek vannak, és a szubdukálódó lemezrész általában elenyésző méretű az óceáni lemez teljes méretéhez képest! A kis alábukó lemezrész húzza magával az 1000–5000 km-es óceáni lemezt, amelyet a súrlódás még vissza is fog? (Ez volt a korábbi elképzelés!) Ha ez így lenne, akkor nem lennének passzív lemezperemek, mert mindenhol szubdukciónak kéne lennie! Az asztenoszféra-ban zajló hőáramlás (termikus konvekció) a hőmérsékletkülönbségből adódó áramlás egy folyadékszerű közegben globálisan írja le ezt a geodinamikai folyamatot, amelyet csak a szubdukálódó nagyobb sűrűségű óceáni lemez hatásának állítanak be – szerintem helytelenül.

A fizika törvényei szerint szilárd testekben nincs konvektív hőáramlás, csak gázokban és folyadékokban. A kőzetek pórusterfogatában áramló víz esetében van hőáramlás, de az csak oldott anyagokat, ionokat, gázokat tud szállítani és nem kőzetlemezeket. Adódik, hogy a szilárd litoszférában nincs hőáramlás, tehát nincs sűrűségkülönbségből fakadó kőzetmozgás, azaz a litoszférában ilyen szempontból nincs jelentősége a sűrűségkülönbségnek, mert abból maximum kőzetfeszültség és/vagy izosztatikus kiegyenlítődés lehet (össztömeg egyensúlyra törekvés, a gravitáció és az úszás törvényei alapján)! Fennáll viszont a szilárd litoszféralemezek mozgása, amelyet a mélyebb, nem szilárd asztenoszféra-ban meglévő hőáramlások (termikus konvekciók) szállítanak (HUN-REN, Litoszféra-



3. ábra 6 darab tengermélység profil (40-szeres kimagyasítás) (Heezen et al. 1959)
Figure 3 6 seafloor profiles (40 times exaggeration) (Heezen et al. 1959)

fizika)! Tulajdonképpen ezek tolják a szubdukálódó lemezt – amelyet a szubdukciónál a fölötté lévő vagy a fölé kerülő kontinentális litoszférolemez is nyomhat saját súlyával lefelé, a mozgása mellett, a képlékeny (kvázifolyadék) állapotú asztenoszférába.

Az óceánközépi lemeztolás elvileg alkalmas lenne tolóerőnek, de ennek a tolóerőnek egy 1000–5000 km-es óceáni lemezt kellene először megmozgatni, hogy elérjen a hasadékvölgytől a szubdukció támadási pontjáig. Elvileg lehetséges, de a gyakorlatban eléggé kérdéses!

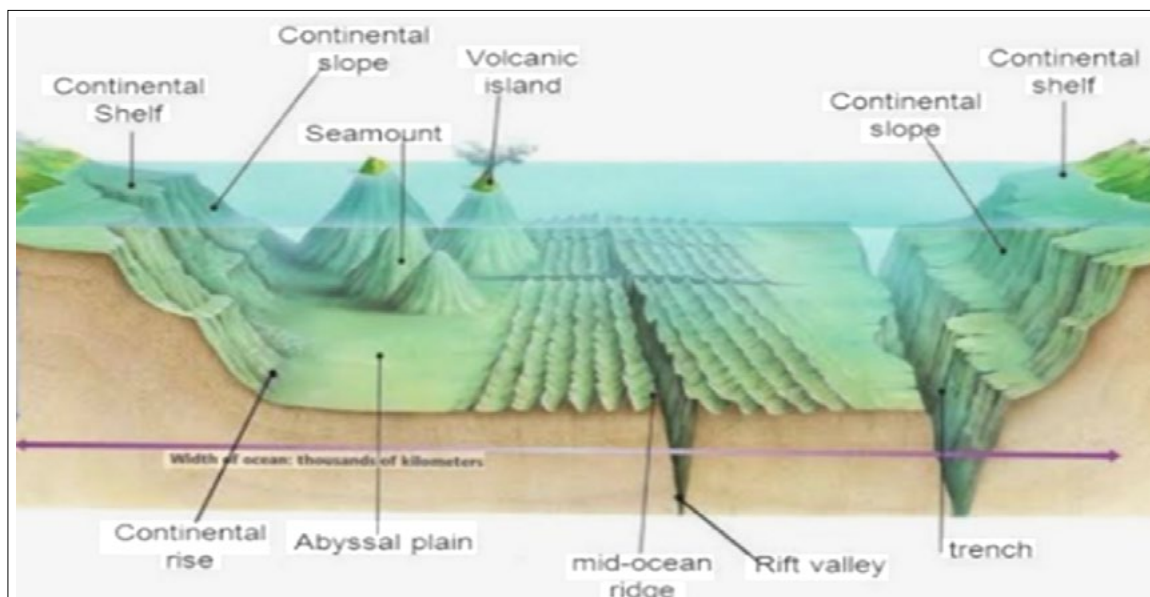
Az óceánközépi hátságoknál feljövő bazaltos magma az óceáni lemez méretéhez képest elenyésző térfogatú. Ha ez az anyag nyomná szét az óceáni kérget, akkor először egy hatalmas vulkáni hegységnek kellett volna épülnie a tenger fenekén, helyette hasadékvölgy, azaz riftzóna¹⁾ van. Van a riftzóna mindkét oldalán egy-egy domborzati kiemelkedés, amelyeket együtt óceánközépi hátság hívunk – nem hegységnek vagy hegycsúcsnak, hanem hátságnak. Azért hátság a neve, mert a vízszintes kiterjedése sokszorososa a vertikális méretének (3. ábra). Ha az óceánközépi árokban feljövő bazalt ereje nem elegendő ahhoz, hogy a felette lévő kis sűrűségű és kis közegellenállású vízben egészen a felszínig feljöjjön vulkáni hegygerincet építve, akkor hogyan mozgathatna meg 1000–5000 km hosszúságú, a köpenyen súrlódó óceáni lemezt (hogy elérjen a szubdukciós pontig), amely sokkal nagyobb közegellenállást fejt ki, mint a tengervíz? Nem a feláramló bazalt nyomja szét a lemezeket (az egyik oldalon semmit se, a másik oldalon szubdukciót okozva), hanem a termikus konvekció divergens mozgása miatt mozognak az óceáni litoszférolemezek.

A 3. ábra bemutatja a tengerfenék vizsgálatáról megjelent első 6 óceáni mélységsszelvényt, 40-szeres kimagassítás mellett (Heezen et al. 1959). Sajnos a feliratok nem olvashatók, ezért az óceánközépi hátságot (a közepén húzódó riftvölgy mentén) piros szaggatott vonallal is kiemeltük. A szelvényen a nagyon nagy kimagassítás mellett is érezhető, hogy mennyivel nagyobb az óceánközépi hátság szélessége a magasságánál.

„Az óceánfenékről kiemelkedő hatalmas víz alatti hegyláncok, amelyek átlagosan 2–4 km magasságba nyúlnak a környező mélytengeri síkságok fölé. Szélességük elérheti az 1–4 km-t, és a Föld óceánjait mintegy 80 000 km hosszan hálózják be.” (MI – Világlexikon²⁾)

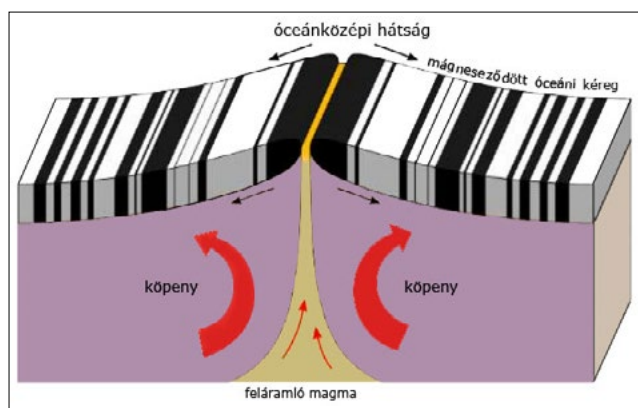
A 3. ábra (vagy a 6. ábra) alapján azonban az Atlanti-óceán közepén található óceánközépi hátság szélessége nem 1–4 km, hanem többször 100 km!

„A gravitáció hatására lecsúszik”, írják a magyarázatban. Tehát a forró magma kiömlik, aztán lecsúszik, de honnan, hiszen kezdetben nem hátság volt ott, hanem hasadékvölgy! A hátság magassága 2–4 km, ehhez képest a szélessége néhányszor 100 km körüli (3. ábra). Adódik, hogy a magma 4 km-ről (végmagasságból) elmozdul nem kevesebb, mint 100 km-re gravitációs csúszással (a lejtő szöge 2–3°)? A forró magma a hideg tengervízben, szinte helyben megszilárdul, és a köpenykonvekció – mint annak része – viszi magával, s ezért az óceánközépi hátság szélessége többször 100 km. A gravitációs csúszás egyébként is csak a szilárd tengerfenék (óceáni lemez) felszíni



4. ábra A tengerfenék felépítése vázlatosan. Az óceánközépi hátságok a kőzetlemezek távolodása (divergens lemezszegély) miatt jönnek létre, ahol a hasadékvölgyben a magma felemelkedik, és új óceáni kéreg keletkezik. A divergens mozgás miatt a kiömlő magma sávokba rendeződik és folyamatosan távolodik a hasadéktól

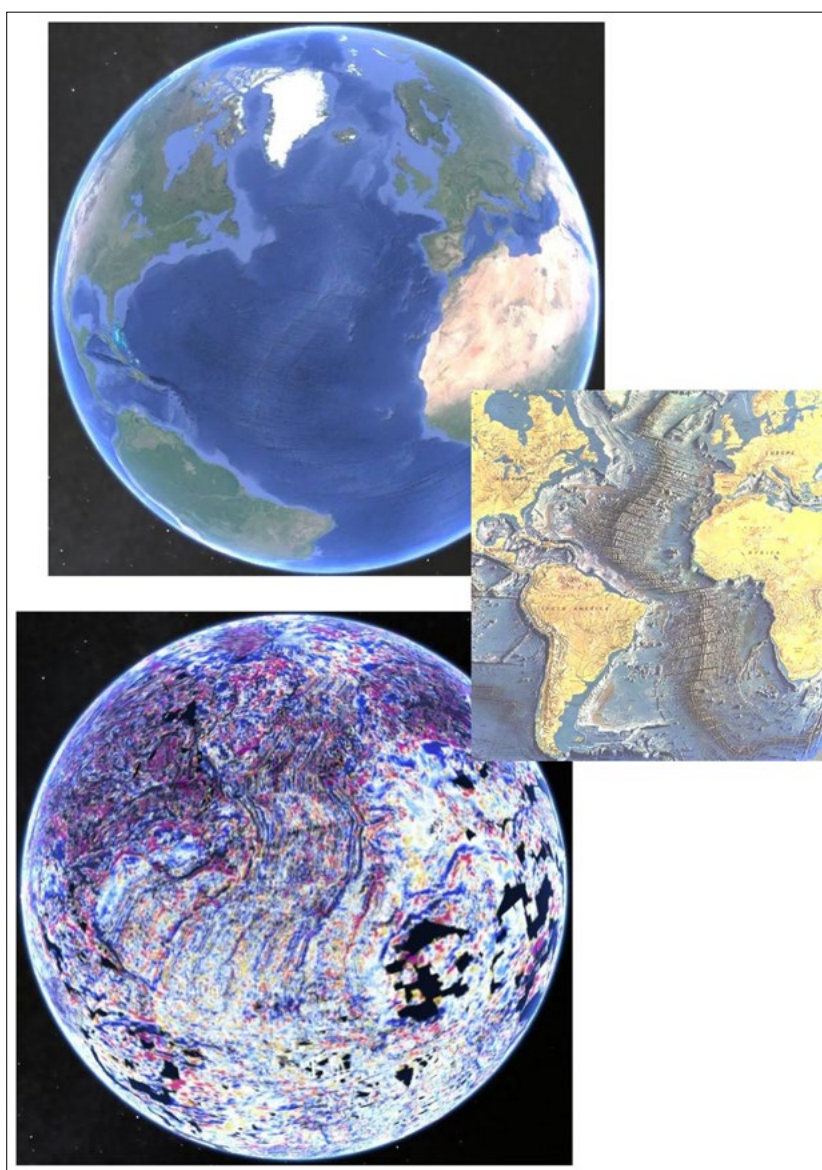
Figure 4 A schematic representation of the seafloor structure. Mid-ocean ridges form due to the divergence of tectonic plates (divergent plate boundary), where magma rises in the rift valley and new oceanic crust is formed. Due to the divergent movement, the erupting magma forms into bands and continuously moves away from the rift



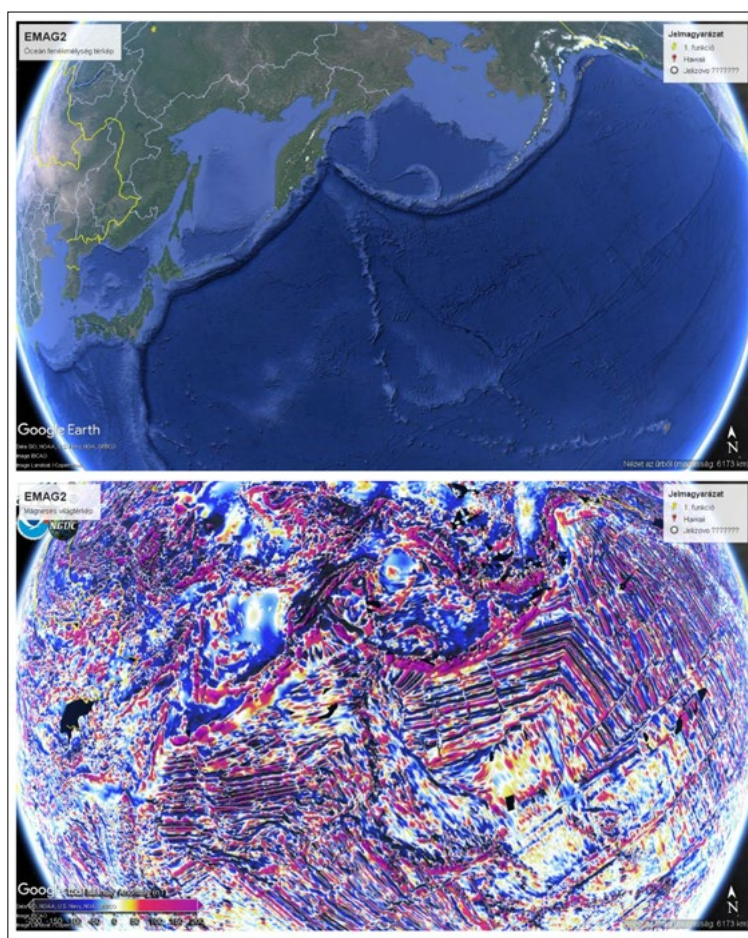
5. ábra Az óceánközépi hátság normál-reverz (fekete-fehér) mágnesezettségű pásztái
Figure 5 The normal-reverse (black-white) magnetization band of the mid-ocean ridge

képződményeit érintheti – mi köze lehet ennek a mélyebb litoszféra szintű lemezmozgásokhoz?

Arra is megvan a logikus magyarázat, hogy miért alakul ki a hátság. Az óceánközépi hátságok hasadékvölgyeiben (riftzónáiban) feljövő magma állandóan elvándorol a képződés helyéről (4. ábra). A feláramló magma, a hideg tengervízzel érintkezve megdermed, de nem marad ott, és nem képez egyre növekvő vulkáni hegységet a tenger mélyén (4. ábra), hanem időről időre távolabb kerül a képződés/felemelkedés helyétől, mert alatta a köpenyáramlás (termikus konvekció) vízszintesen tovább mozgatja azt. Így a tenger alatti vulkáni felépítmény, döntően nem felfelé, hanem vízszintesen irányban növekszik (3. ábra). A továbbvándorlás miatt marad nyitva a riftzóna (magma utánpótlási csatorna, vagy ha úgy tetszik hasadékvölgy), megteremtve a lehetőséget az újabb magmaanyag felemelkedésének.



6. ábra Atlanti óceánközépi hátság. Felül: Google Earth, alul: EMAG2, a Föld mágnesezésanómália-térképe (Maus et al. 2009) és középen: a National Geographic 1968-as melléklete (tengerfenék-mélységtérkép)
Figure 6 Atlantic Mid-ocean Ridge, above at Google Earth, below: the EMAG2, map of Earth's magnetic anomalies (Maus et al. 2009) and in the middle: the seafloor map of National Geographic (supplement, 1968)



7. ábra | A Csendes-óceán, Kamcsatka és Hawaii között, tengerfenék mélységtérképe (felül) és a világ mágneses ΔT térképe (alul) ugyanarra a kivágatra (Forrás: Google Earth & EMAG2)

Figure 7 | The Pacific Ocean, between Kamchatka and Hawaii, showing the depth of the seafloor (above) and the world's magnetic anomalies (below) on the same map (Credit: Google Earth & EMAG2)

A paleomágneses adatok (5. ábra) is inkább azt mutatják, hogy nem a magma nyomja szét az óceáni lemezeket, hanem a mélybeli áramlások (divergens köpenymozgások) szállítják el a képződő, kihűlő bazaltos magmát (amely a kinyíló, riftesedő óceáni kéregbe hiánypótló anyagként nyomul be alulról).

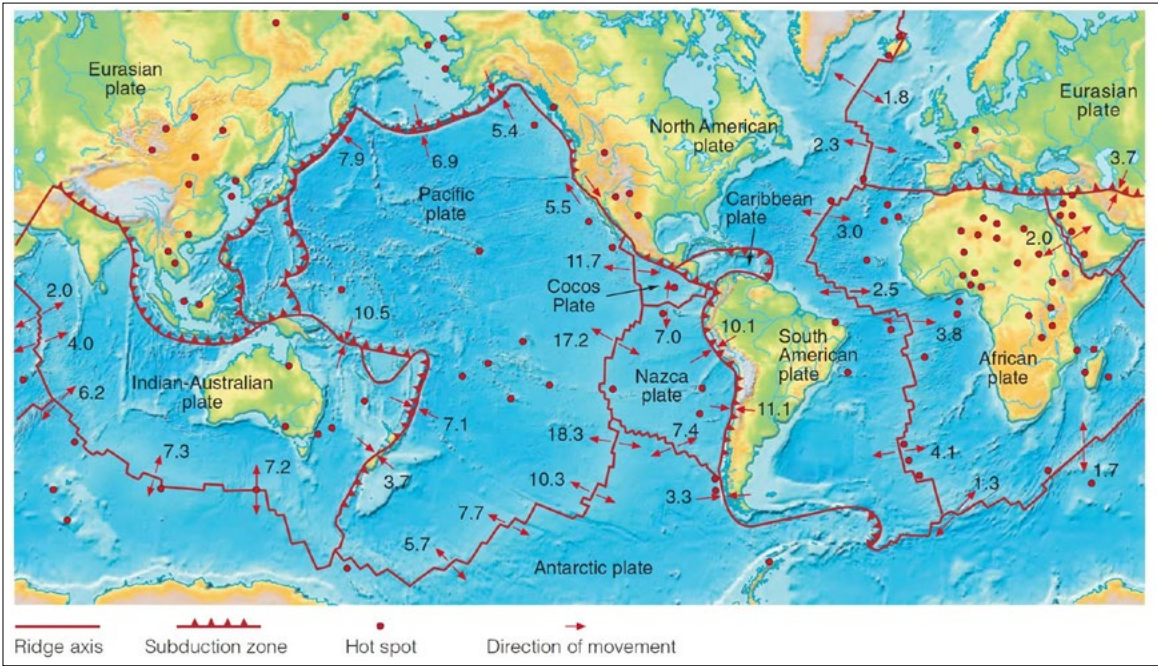
A bazaltok közel párhuzamos, kor szerinti pásztákba rendeződve egyenletesen helyezkednek el (4. ábra), amit a normál és reverz mágnesezettségű sávok (5., 6. ábra) alapján ismerhetünk fel – ezek alapján tudták meghatározni a bazaltok korát. Ezek alapján tudták meghatározni a Földön, a különböző földtani időkben a mágneses pólusok helyét és azonosítani a mágneses pólusátfordulásokat.

Konklúzió a szubdukcióval kapcsolatban

- Ha van is sűrűségkülönbség a felszíni lemezek között, a litoszférában, abból nem származhat akkora erő, amely a több száz, több ezer kilométeres litoszféalemezek húzásához elegendő lenne!
- Az óceánközépi hátságban feláramló bazalt „tolóereje” pedig, a tengervíz sűrűségű közegben úgy tűnik, hogy

csak egy hátság kialakítására elegendő, a néhány kilométer vastag tengervíz sem tudja leküzdeni, hogy vulkáni hegységet építsen, így a litoszféalemezek mozgatására sem lehet elég energiája! A mozgatást a mélybeli köpenykonvekció okozza.

- A lemeztectonika elsődleges mozgóereje az asztenoszférában/köpenyben zajló termikus konvekció, amely biztosítja a litoszféalemezek vándorlását és ezen keresztül a szubdukálódó lemez mozgási energiáját! Ennek a hőáramlásnak valóban az eltérő hőmérsékletből kialakuló sűrűségkülönbség a meghajtó ereje egy folyadékszerű közegben, de nem a szilárd litoszférában. A szilárd, szubdukálódó lemez ennek a termikus konvekciónak a legfelső, mozgó része, de nem ez a meghajtóerő!
- A lemezek vándorlása különböző sebességgel történik (8. ábra), ahol a sebesség egy kritikus határértéket meghalad (nagyobb lesz), ott a mélyebb helyzetű és kevésbé rideg óceáni lemez benyomul a ridegebb és nagyobb össztömegű (tehetetlenségű, közegellenállású) kontinentális vagy idősebb óceáni lemez alá, és létrejön a szubdukció. A szubdukálódó lemez a környezete tulajdonságait fokozatosan veszi csak fel, azaz sokáig rugal-



8. ábra Óceánközépi hátságok, szubdukciós zónák, 'hot spot'-ok és lemezmozgási irányok a mai ismereteink alapján. (Ott vannak szubdukciós peremek, ahol a lemezeknek a mozgási sebessége nagy!) (Minster & Jordan 1978)

Figure 8 Mid-ocean ridges, subduction zones, hotspots, and plate motion directions based on our current understanding. (That subduction zones are located where the plates move at high speeds!) (Minster & Jordan 1978)

- mas, de szilárd testként mutatkozik a sűrű folyadékszerű közegben.
- A konvekciós áramlások határozzák meg a szubdukció kialakulását. Divergens lemezmozgásoknál riftesedés (2. ábra) vagy óceánközépi árok alakul ki (4. ábra). Konvergens mozgások esetén alakulhat ki a szubdukció (1. ábra), de csak megfelelő meghajtó erő, azaz sebességkülönbség esetén (lásd aktív és passzív lemezperemek).
 - A szubdukció a lemezmozgás sebességétől, a lemezek összetételétől, a litoszféra/asztenoszféra/köpeny viszkozitásától (amely szintén hőmérsékletfüggő), reológiai tulajdonságaitól és a mozgásidő hosszától függően eltérő mértékben fejlődik ki. Ezekről a mélybeli egyedi paramétereiről keveset tudunk, ezért alakulhatnak ki eltérő elképzelések.
 - A köpeny konvekciós áramlásait még nem ismerjük eléggé. A tengerfenék mélysége és a mágneses világtér-

kép alapján azonban biztosan bonyolultabb, mint amire mi gondolunk (7. ábra).

Sokféle szakirodalom foglalkozik a kérdéssel. Mivel a Föld mélyének fizikai paraméterei, az ott lezajló folyamatok nehezen megismerhetők, ezért még napjainkban is csak hipotézisekről beszélhetünk. Vannak tanulmányok, amelyek a mozgatóerőket vizsgálják, például úgy, hogy a konvekciós áramlásból származó lemezmozgató erőket figyelmen kívül hagyják (Forsyth & Uyeda 1975). Az ilyen vizsgálatokból – elismerve a szerzők munkásságát – csak féligazságok derülhetnek ki. Mi van ugyanis akkor, ha az egész mechanizmusért a hőáramlás (konvekció) a felelős, azaz a litoszféra lemezeket megmozgató erő? Ha ezt elfogadjuk, akkor az ő elképzelésükből a legfontosabb meghajtóerő hiányzik!

Rengeteg angol elnevezés létezik az ezzel a témával foglalkozó szakirodalomban – szabad fordításban a követke-

1. táblázat Korábbi publikációkban közzétett mozgató erők mértéke és nagyságuk (a köpenyellenállásból származó erő, eltérő irányú lemezmozgást feltételez)

Table 1 The extent and magnitude of the driving forces reported in previous publications (the force from the mantle drag assumes plate motion in a different direction)

Fizikai mennyiség	Erők nagyságrendje (N/m)	Hivatkozás	Íránya
Lemez húzóereje / Slab pull	~3.00E+13 ~5.00E+13	Forsyth & Uyeda 1975 Bada et al 2014	+
Hátság tolóereje / Ridge push	~3.00E+12 ~2–5E+12	Parsons & Richter 1980 Bada et al 2014	+
Köpenyellenállás / Basal drag	~1.90E+13	Cui et al. 2024	–

2. táblázat Köpeny vonóerő különböző viszkozitás és sebesség mellett (a köpenyellenállásból származó nyíróerő, azonos irányú lemezmozgást feltételez)

Table 2 Mantle flow traction force at different viscosities and speeds (the shear force resulting from mantle resistance, assuming plate motion in the same direction)

Típus	Viszkozitás (Pa·s)	Sebesség (cm/év)	Mozgó lemez hossza (km)	Szélessége (km)	Nyíróerő (N/m) ³⁾	Forrás
Lemezmozgató köpenyvonóerő / Mantle flow traction	1.00E+21	2	3000	100	~1.90E+13	Cui et al. 2024 alapján
	1.00E+22	2	3000	100	~1.90E+14	
	1.00E+22	5	3000	100	~4.76E+14	
	1.00E+22	10	3000	100	~9.51E+14	

zők: hátsági tolóerő, ütközési ellenállás, köpenyellenállás, lemez húzóerő, a lebukás szívóereje, lemezellenállás, kontinentális húzás, köpenybeli lemezmozgató erő, felhajtóerő, lehúzóerő, lemezmozgató erő, lemezmozgató köpenybeli vonóerő, viszkózus vontatóerő stb.

Ugyanakkor ezek közül az erők közül csak néhányat számszerűsítettek többé-kevésbé – érthető okok miatt (1. táblázat) –, mert a feladat korántsem egyszerű! Ilyen például a lemez húzóerő (nem a litoszféra lemezeket mozgó erő, hanem a szubdukálódó lemez húzóereje), vagy a hátság tolóereje (amely a szubdukciótól több 100 vagy 1000 km-re fejt ki hatását, ha van ilyen egyáltalán), valamint a köpenyellenállás (amely az álló köpenyanyag és a mozgó, szubdukálódó lemez között alakul ki).

A publikációk többségében a litoszféra és az asztenoszféra közötti súrlódást mint fékező erőt (köpenyellenállás) vették figyelembe, azaz a szubdukálódó lemez mozgását gátló tényezőként (1. táblázat). A köpenyellenállást, Cui és társai (2024) számításaiból következtethetjük ki, amely azonos nagyságrendű lesz, mint a húzóerő!

Ha a szubdukálódó lemez a konvekciós áramlás része, akkor a köpenyellenállás már nem fékező, hanem mozgató erő lesz! A súrlódáson keresztül adja át a konvekciós áramlás mozgási energiáját a litoszféra lemezeknek (2. táblázat), amelyhez hozzáadódik a többi erő! Ez az erő függ

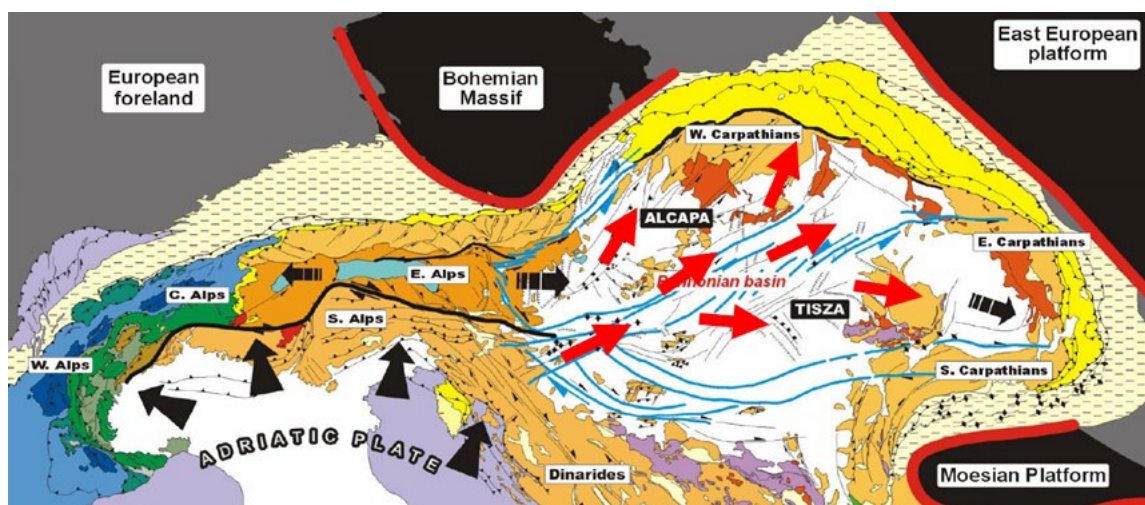
a viszkozitástól, az áramlási sebességtől és a litoszférolemez méretétől, ennek meghatározásával Cui és társai foglalkoztak (2024). Számításaik szerint ez az erő a különböző paraméterektől függően változhat, de ezt nem visszatartó, hanem meghajtóerőként kellene kezelni („mantle flow traction”).

„Thus, in the coldest region of the mantle, i.e., the lithosphere, viscosity undergoes drastic changes: mantle viscosity goes from 10^{21} Pa·s in the lower part of the upper mantle, to as low as 10^{18} in the asthenosphere (King 1995) to 10^{25} Pa·s (Beaumont 1976; Watts et al. 1982) or potentially higher in the lithosphere.”

Azaz, a köpeny leghidegebb részében, azaz a litoszférában a viszkozitás drasztikus változásokon megy keresztül:

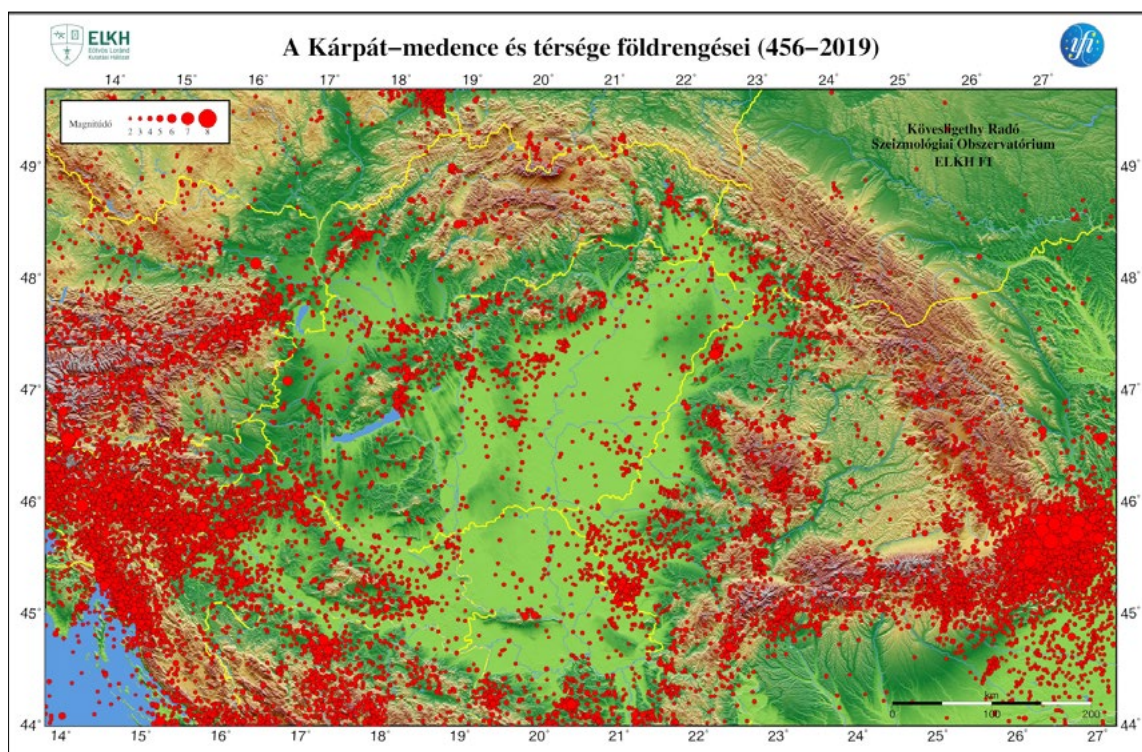
- a köpeny viszkozitása a felső köpeny alsó részén mért 10^{21} Pa·s-ról,
- az asztenoszférában akár 10^{18} Pa·s-ra lecsökkenhet (King 1995), illetve,
- a litoszférában 10^{25} Pa·s-ra, vagy akár ennél nagyobb értékre is megnőhet (Beaumont 1976, Watts et al. 1982).

Az óceáni litoszférolemez szerepéről, a méretéről és a sebességéről a korábbiakban már említést tettünk.

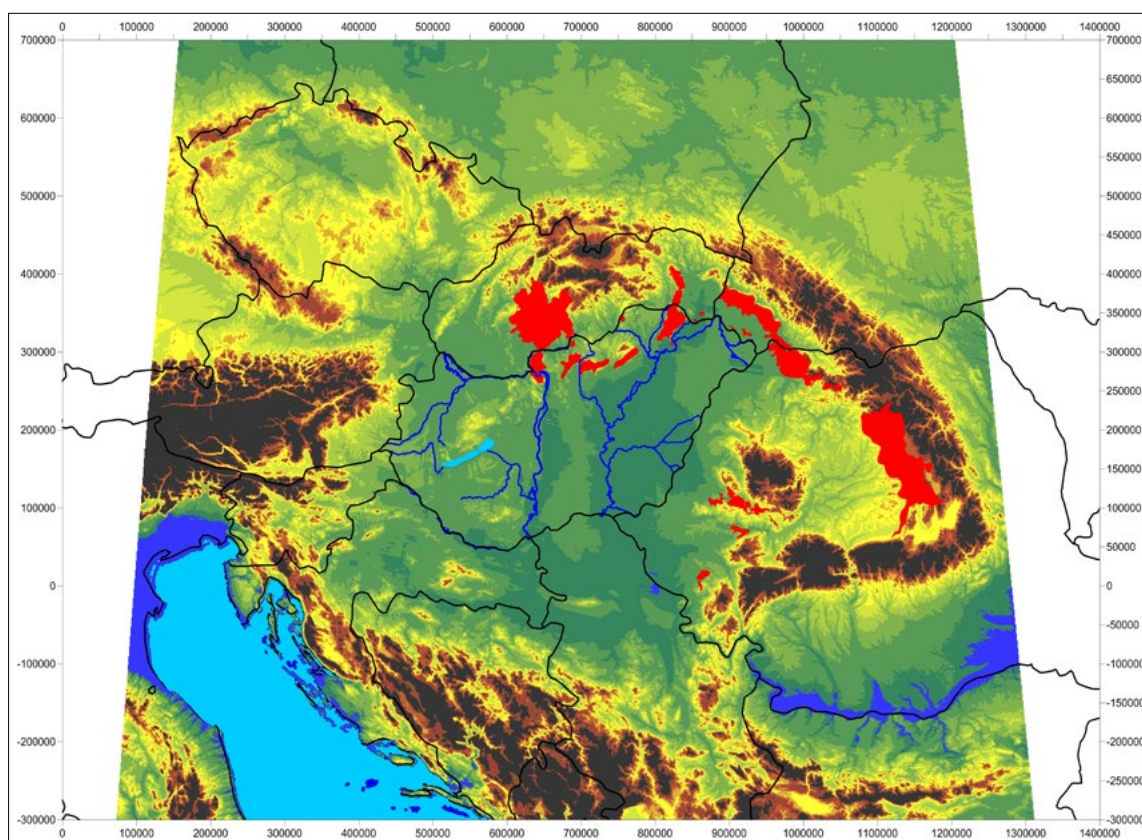


9. ábra Az Alpokat és a Kárpátokat létrehozó erők (Bada et al. 1999)

Figure 9 The forces that formed the Alps and the Carpathians (Bada et al. 1999)



10. ábra A Kárpát-Pannon Régió domborzata és földrengései (ELKH)
Figure 10 The topography and earthquakes of the Carpathian-Pannonian Region (ELKH)



11. ábra A Kárpát-Pannon Régió domborzati térképe a mészkáli vulkanizmussal (piros poligonok)
Figure 11 Topographic map of the Carpathian-Pannonian Region showing calcareous-alkaline volcanism (red polygons)

Meglepő módon azonban nem veszik figyelembe, és nem számították ki azt az erőt, amely az egész lemeztektonikát életben tartja. Nem számították ki a több ezer kilométer nagyságú termikus konvekcióval mozgatott litoszférolemez irtózatosan nagy tehetetlen tömegét és az abból származó erőket, nyomatókat, pedig az összes többi erő elenyészőnek bizonyulhat e mozgóerő nagysága mellett. Annyira nem veszik figyelembe, hogy a lemezmozgató erőre még becslés sem található a szakirodalomban (1. táblázat), pedig az a súrlódás (nyíróerő), amelyet kiszámítottak, az egyben a meghajtó erő is lehet, ha a lemezmozgás a szubdukcióval azonos irányú (2. táblázat, Cui et al. 2024)!

Kárpát-Pannon Régió

Az Alpok és a Kárpátok ívelt formája megmutatja, hogy milyen irányú kompressziós lemezmozgások, azaz milyen irányú erőhatás hozhatták ezeket létre (9. ábra). Az Alpok esetében ez főleg D–É irány, míg a Kárpátok esetében összetettebb, DNy–ÉK a Nyugat-Kárpátok esetében, Ny–K a Kelet-Kárpátok esetében, majd ez a mozgás DK (illetve D-i) irányra módosul a Déli-Kárpátokban (Vrancea-zóna). Ez a köpenyáramlás irányának megfelelő, feltételezhető mozgásirány!

Ezt az erőt az adriai és európai kompressziós lemezmozgások biztosították, amelyeknek iránya a hegyek kiemelkedésének köszönhetően, a kialakuló izosztikus gyökérzónák (kivastagodó kéreg és litoszféra) gátló hatása miatt az idők folyamán helyről-helyre változott. Az eredő mozgást, a meghajtóerő irányát a hegységképződés, és a szubdukciós jelenségekhez kapcsolható miocén andezites/riolitos vulkanizmus fiatalodási trendje alapján is nyomon követhetjük a régióban (Pécskay et al. 2006, Kiss 2014A).

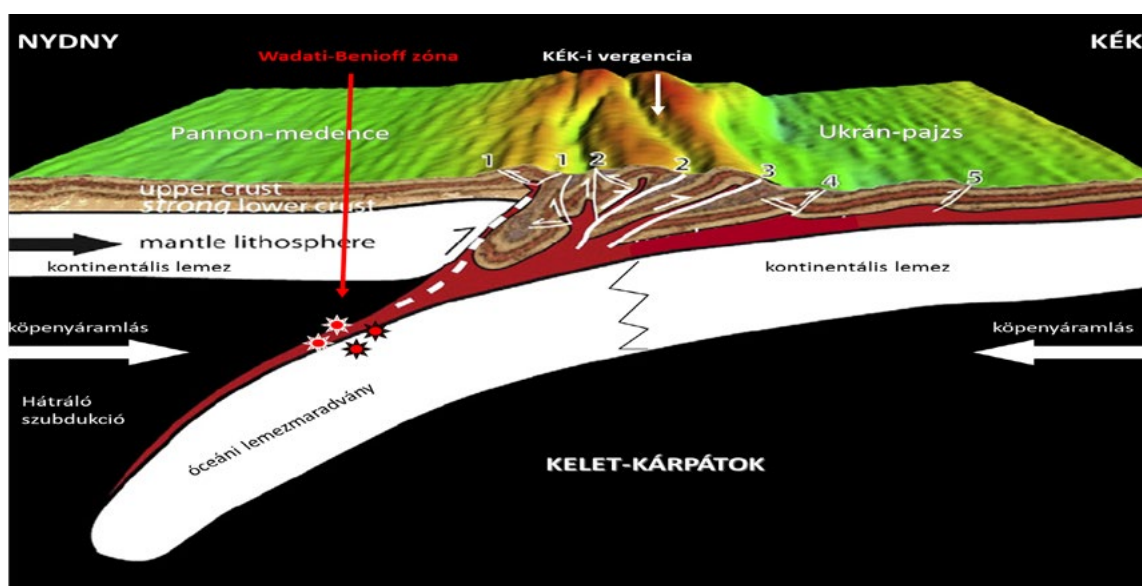
Az adriai és európai konvergáló lemezmozgások miatt szubdukció és/vagy kollízió (esetleg delamináció⁴⁾) alakult ki. Ha nem lenne köpenyáramlás, akkor ezek a jelenségek sem alakulhattak volna ki. Szubdukció csak addig van jelen, amíg a Paratethys maradványtengereinek (Ligura, Magura, Pannon-tenger) óceáni típusú lemezei alábuknak és elfogynak, aztán a kontinentális lemezek összeütközésekor már a kollízió vagy a delamináció lesz a meghatározó.

A szubdukció és a kollízió kéreg típusú kőzeteket visz le a felszínközelből a nagyobb mélységekbe, de eltérő módon. A szubdukció egy lemezszerű testet buktat le vagy nyom le gyorsan a mélybe, a kollízió viszont a felszíni ütközés, gyűrődés és felhalmozódás miatt inkább egy lassabb, az izosztázia miatt kialakuló gyökérzónát hoz létre. Ezeket a konvergens lemezmozgások hozzák létre,⁵⁾ ha ez nem lenne, akkor szubdukció és a kollízió sem alakulhatna ki – lásd az amerikai kontinentális lemez K-i partvonalát, vagy az európai kontinentális lemez Ny-i partvonalát.

Az óceáni és a kontinentális lemezek találkozása ezekben az esetekben is megvan, a sűrűségkülönbség is fennáll, még gyenge lemezmozgás is van, de mégsem bukik alá az óceáni litoszféra, mert nincs meg a szükséges toló-, nyomó-, illetve húzóerő!

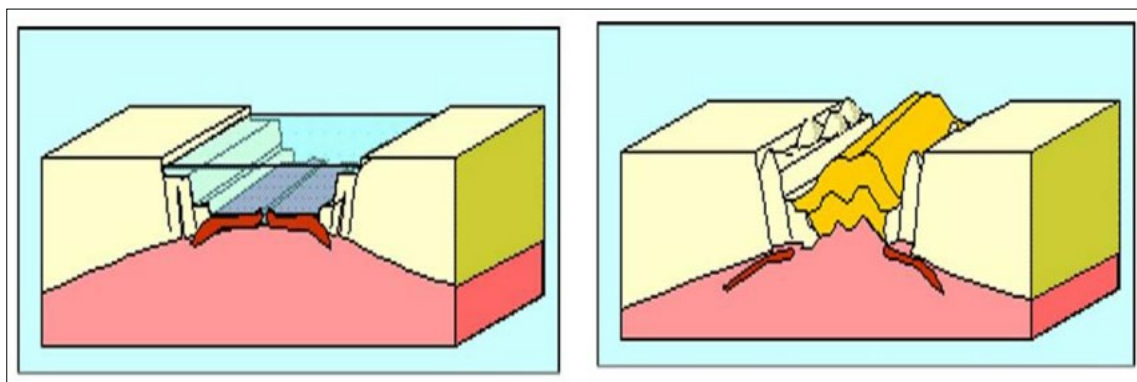
A szubdukciós jelenségek során kialakulnak földrengések (10., 12. ábra) a Benioff-zónában, és andezites vulkanizmus (11. ábra) az alábukó lemezek felett. Jelentős mélységű/nagyságú (~100 km) alábukó lemezt a térségünkben a geofizikai, passzív szeizmikus mérések alapján (Koulakov et al. 2009) nem találunk – a kiindulási korlátozott méretű óceáni litoszférolemezek miatt. A Benioff-zóna és a vulkanizmus is a lemezek kontaktusától a lebukás irányában, attól távolabb jelentkeznek (12. ábra).

Az óceáni litoszférolemez szubdukciója után már a kontinentális lemezek ütköznek, és a kollízió jelensége lesz a



12. ábra A K-Kárpátok feltételezhető szubdukciója a földtörténeti múltban – ha volt egyáltalán (Kiss 2015, módosítva). (Ma már a kollíziós folyamatok vannak, s talán roll-back szubdukció és izosztikus gyökérzóna kialakulása.)

Figure 12 The presumed subduction of the Carpathians in the geological past – if there was any subduction at all (Kiss 2015). (Today, collision processes are taking place and perhaps roll-back subduction and a formation of isostatic root.)



13. ábra Kétirányú szubdukció (balra), majd az óceán bezáródása utáni hegységképződés, például Alpok (jobbra)

Figure 13 Bidirectional subduction (left), followed by mountain formation after the closure of the ocean, such as the Alps (right)

domináns, ami a gyűrődés és hegységképződés mellett tovább növeli a felszínen kiemelkedő domborzatot, azaz a hegyeket a kontaktus zónában. A mélybe süllyedő szubdukciós lemez tovább vastagodik a kiemelkedő hegyek alatt, s az izosztázia miatt kialakulnak a mély izosztatikus gyökérszónák. A gyökérszónák pedig, módosíthatják a köpenyáramlás irányát. Az európai és az ukrán tábla – mint régi, vastag, szilárd, kristályos kontinentális litoszférelémezek – nem tudnak szubdukálódni!

Az Afrika és Európa közötti óceáni lemez kétféle irányban szubdukálódhat: vagy az idősebb vastag európai lemez alá, vagy a fiatalabb, vékonyabb adriai lemez alá. Az Alpok különböző részein mindkét szubdukciós irány kimutatható(?), de mivel kevés adat áll rendelkezésre, így nehéz állást foglalni. A 13. ábra egy ilyen lehetséges forgatókönyvet mutat be. Kétoldali szubdukció a kompresszió miatt, amelynek eredményeként az óceán megszűnik, s az egykor óceáni kéreg – a rajta kialakult jelentős mennyiségű üledékkal – felgyűrődik.

A Kárpátok esetében is kérdés, hogy a Magura-lemez a K-i vagy Ny-i irányba szubdukálódott? A fizikai törvények alapján a Ny-i irányú szubdukció (a Magura-lemez bukik a Pannon-lemez alá) a valószínűbb a Kelet-Kárpátokban, mert a Pannon-szegmens fiatalabb, vékonyabb, mint az Ukrán-tábla, így az alá az óceáni kéreg könnyebben benyomul (s utána a fennálló K-ies köpenyáramlás miatt létrejöhet a rollback-szubdukció is). A vergenciák is a Kárpátok K-i oldalán azonosíthatók.

A földrengések (Benioff-zóna) és a vulkanizmus a K-Kárpátok Ny-i oldalán jelentkeznek, azaz a hegység főgerincétől nyugatra (10., 12. ábra), s ez is a Ny-i irányú szubdukciót valószínűsíti.

Összefoglalás

Néhai Posgay Károly 100. születésnapja alkalmából az SZTFH-ban újra elindítottuk a róla elnevezett „Posgay Belső Akadémiát” – hogy megismerjük egymás kutatásait, azok nem publikált részére is ráláthassunk (geológusok, geofizikusok, geokémikusok és érdeklődő kollégák egyaránt). Az akadémia egyik előadása a „A Kárpát-Pannon

Régió gravitációs képe – geodinamikai vonatkozások” címmel hangzott el, amely egy 2013-as vándorgyűlésen elhangzott előadás felújított változata. Az előadás után élénk beszélgetés indult a témával kapcsolatban – ennek köszönhető ez a tanulmány.

A tanulmány első részében megpróbáltuk körbejárni a témát, megvizsgálni az MI-keresések segítségével, hogy milyen axiómák vannak, és azok mennyire fogadhatók el a szubdukció tárgykörében.

A lokális, csak a szubdukcióra koncentrált megközelítés helyett egy tágabb környezetet figyelembe vevő, általánosabb magyarázatot kerestünk, mert ellentmondásos az, hogy a világméretű lemeztektonikát a köpenykonvekció okozza, de annak egy részjelenségét, a szubdukciót – nagyon sok helyen – csak az alábukó lemez sűrűségével magyarázzák, elfeledve, figyelmen kívül hagyva a regionális lemezmozgató rendszer, a termikus konvekció hatását, erejét. Igen, a hőmérsékletkülönbség, és az ebből származó sűrűségkülönbség a meghajtó erő, azaz a termikus konvekció, de az a kőzetanyagokban csak a képlékeny, folyadékszerű köpenyben, asztenoszférában van jelen. A szilárd litoszférelémezek súrlódás révén kapják meg alulról ezt a mozgási energiát. A Föld felszínén lévő litoszférelémezek nyugalmi állapotban izosztatikusan egyensúlyban vannak. Ezt a nyugalmi állapotot csak egy „külső” erő bonthatja meg, például a termikus konvekció. A Föld nagyobb mélységeiben (a litoszféra alatt) „folyékony” halmazállapotú közegben lejátszódó konvekció felszíni következménye a litoszférelémezek mozgása.

Egy korábbi cikkben már foglalkoztunk a témával (Kiss & Bodoky 2015), de se pro, se kontra nem érkezett reakció. Azóta kicsit változtak a dolgok, további érvek is előkerültek. Fontos volt Cui és társai 2024-es cikke, amelyben a lemezek mozgatásáért felelős vonóerőket (mantle flow traction) vizsgálták és számszerűsítették. Ez az erő fékezhet is ellentétes irányú lemezmozgáskor, de előléphet mozgóerővé is azonos irányú mozgások esetén. A szubdukció konvergens lemezmozgások (konvencionális áramlások) során alakul ki, mert a divergens lemezmozgások riftesedést okoznak, ami például az óceánközépi hátságok esetében napjainkban is folyamatban vannak.

Nem oldottuk meg most sem teljesen a problémát – hiszen rengeteg paramétert kellene figyelembe venni, és azok hőmérsékletfüggését, továbbá minden terület eltérő adottságokkal rendelkezhet, pedig szakmai szempontból fontos lenne a kérdés tisztázása, egységes vélemény kialakítása, amelyhez bármilyen segítség, érv, számítás hozzájárulhat! Persze ehhez közzé kell tenni, azaz publikálni kell, felvállalva a nézeteinket, akár esetleges tévedéseinket is.

A tanulmány második részében röviden a Kárpát-Pannon Régió kialakulásának körülményeit taglaltuk, az első részben feltárt feltételrendszer és a korábbi cikk állításainak figyelembevételével, a lehető legegyszerűbb megvilágításban. Ezzel kapcsolatban is sor került már előadásra (Kiss 2013) és publikációra is (Kiss 2014B), így csak az erőter-geofizika alapján kialakult elképzelés pontosítása volt a cél. Ezekben a publikációkban az izosztatikus és a geodinamikai együttes hatásokat és szerepeket (izosztázia – köpenyáramlás – lemeztektonika – szubdukció – kollízió) vizsgáltuk a Kárpát-Pannon Régió kialakulása szempontjából.

A magyarországi lemeztektonikai elemzéseknek kiterjedt szakirodalma van, amelyet külön-külön nem sorolunk fel, de itt meg kell említeni Horváth Ferenc nagydoktori értekezését (Horváth 2007), amiben a szerző a lemeztektonika megismerésének legfontosabb hazai mérőföldköveit, annak hazai sajátosságait bemutatja, és a fontosabb szakmai cikkek hivatkozását is megadja

A tanulmány szerzője

Kiss János

Jegyzetek

- ¹⁾ Az óceánközépi hátság közepén gyakran egy hasadékvölgy (riftvölgy) húzódik a divergens lemezmozgások miatt.
- ²⁾ *Világlexikon* – Szakkönyvek, enciklopédiák és lexikonok valamint internetes felületek keresése alapján összeállított internetes lexikális anyag (www.vilaglex.hu)
- ³⁾ $F_{MFT} = \eta (dv_x/dy) L$ – mantle flow traction (köpenyvonóerő vagy -nyíróerő), ahol η – viszkozitás, dv_x – köpenysebesség, dy – lemezszélesség, L – lemez hosszúság. *Lemezszélesség*: ez az a távolság, mely alatt a lemez v_x sebessége zérusra csökken az asztenoszféra. Többek megfeleltetik az asztenoszféra vastagságával (150–200 km).
- ⁴⁾ *Delamináció* – rétegszerű szétválás, elválás ugyanazon anyagon belül, amely lehet vízszintes, de akár függőleges is.
- ⁵⁾ Még napjainkban is látszik a GPS mozgásvizsgálatok alapján (Grenerczy 2014).

Hivatkozások

- Bada, G., Horváth, F., Gerner, P., Fejes, I. (1999). Review of the present-day geodynamics of the Pannonian basin: progress and problems. *Journal of Geodynamics*, 27, 501–527.
- Beaumont C. (1976): The evolution of sedimentary basins on a viscoelastic lithosphere, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 55, 471–497.
- Cui Fengyuan, Li Zhong-Hai and Fu Hui-Ying (2024): Quantitative evaluation of mantle flow traction on overlying tectonic plate: linear versus power-law mantle rheology, *Geophys. J. Int.*, 239, 1063–1079.

- ELTE No.1: Eötvös Loránd Tudományegyetem 1-es számú forrásanyaga (MI)
- ELTE No.2: Eötvös Loránd Tudományegyetem 2-es számú forrásanyaga (MI)
- Forsyth D. W., Uyeda S. (1975): On the relative importance of the driving force of plate motion. *Geophysic. J. R. Astr. Soc.*, 43, 163–200.
- Grenerczy Gy. (2014): A Pannon-medence jelenkori 3D kéregmozgása közel negyedszázados GPS mérések alapján. *Geomatikai Szeminárium*, Sopron
- Horváth F. (2007): A Pannon-medence Geodinamikája – Eszmétörténeti tanulmány és geofizikai szintézis. Akadémiai Doktori Értekezés, MTA, Budapest, p. 239.
- HUN-REN, Litoszféra-fizika, <http://epss.hun-ren.hu/research/research-themes/lithosphere-physics>
- Heezen B, Tharp M, Ewing M (1959): The floors of the oceans. I. The North Atlantic. Physiographic diagram of the North Atlantic. Special paper 65. The Geological Society of America, New York
- King S. D. (1995): The viscosity structure of the mantle, *Reviews of Geophysics (Supplement): U.S. Quadrennial Report to the IUGG 1991–1994*, pp. 11–17, American Geophysical Union, Washington, DC.
- Kiss J. (2013): A Kárpát-Pannon Régió gravitációs képe – Geodinamikai vonatkozások. *Földtudományi Vándorgyűlés és kiállítás*, 2013. július 4–6., Veszprém
- Kiss J. (2014A): Lemeztektonika, vulkanizmus és a Kárpát-Pannon régió geomágnese anomália térképe. *Magyar Geofizika*, 55(2), 51–81.
- Kiss J. (2014B): A Kárpát-Pannon régió gravitációs képe – geodinamikai vonatkozások, 113–126. o., In: Fancsik Tamás, Piros Olga (eds): *Magyar Földtani és Geofizikai Intézet Évi Jelentése*, 184. o., 2012–2013, MFGI, HU ISSN-0368-9751
- Kiss J. (2015): Kép, térkép, szelvény – litoszféra a geofizikai adatok alapján. A litoszféra-kutatás legfrissebb hazai eredményei. MFGI előadóiülés, 2015. november 26.
- Kiss J., Bodoky T. (2016): Mi mozgatja, mi indítja el a szubdukciót? *Magyar Geofizika*, 56/4, 197–208.
- Koulakov I., Kaban M. K., Tesauro M., Cloetingh S. (2009): P and S velocity anomalies in the upper mantle beneath Europe from tomographic inversion of the ISC data. *Geophysical Journal International*, 179/1, 345–366.
- Maus S. (ed., 2009), EMAG2: A 2-arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, Q08005, DOI: 10.1029/2009GC002471
- Minster J. B., Jordan T. H. (1978): Present day plate motions. *Journal of Geophysical Research*, 83, 5331–5351
- NatGeo (1968): National Geographic (supplement) – Atlantic Ocean Floor Map, 1968. June issue
- Parsons B., Richter F. M. (1980): A relation between the driving force and geoid anomaly associated with mid-ocean ridges. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 51, 445–450.
- Pécskay Z., Lexa J., Szakács A., Seghedi I., Balogh K., Konecny J., Zelenka T., Kovacs M., Póka T., Fülöp A., Márton E., Panaiotu C., Cvetkovic V. (2006): Geochronology of Neogene magmatism in the Carpathian arc and intra-Carpathian area. *Geologica Carpathica*, 57/6, 511–530.
- PTE No.1: Pécsi Tudományegyetem 1-es számú forrásanyaga (MI)
- PTE No.2: Pécsi Tudományegyetem 2-es számú forrásanyaga (MI)
- Világlexikon: vilaglex.hu/Lexikon/html/OceanHats.html (MI)

Watts A. B., Karner G. D., Steckler M. S. (1982): Lithosphere flexure and the evolution of sedimentary basins. Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A, 305, 249–281.

Függelék

Sűrűségértékek (MI-keresések)

A litoszféra sűrűsége

A kontinentális kéreg könnyebb, míg az óceáni kéreg sűrűbb kőzetekből, főleg bazaltból áll, és a felső köpeny szilárd része teszi teljessé a réteget. A litoszféra (kőzetburok) átlagos sűrűsége körülbelül

$$3,0 \text{ g/cm}^3,$$

azonban szerkezeti felépítése miatt nem egységes. A litoszféra szilárd, törekeny külső réteg, amely több, a mélyebben fekvő, plasztikusabb asztenoszférán mozgó lemezre tagolódik.

A litoszféra sűrűségének főbb jellemzői:

- *Kontinentális kéreg*: Vastagabb (30–70 km), gránitos összetételű, sűrűsége kisebb, átlagosan $2,7 \text{ g/cm}^3$.
- *Óceáni kéreg*: Vékonyabb (kb. 10 km), bazaltos összetételű, sűrűsége nagyobb, $3,0\text{--}3,3 \text{ g/cm}^3$.
- *Vastagság*: A litoszféra átlagosan 70 – 150 km vastag, a kontinensek alatt vastagabb, az óceánok alatt vékonyabb.

Az asztenoszféra sűrűsége

Az asztenoszféra, a földköpeny felső, képlékeny része, sűrűsége a mélységgel nő, általában

$$3,3\text{--}4,4 \text{ g/cm}^3$$

közé esik. A litoszféra alatt helyezkedik el, és plasztikus tulajdonságai miatt teszi lehetővé a tektonikus lemezek mozgását. A hőmérséklet és nyomás növekedésével a kőzetanyag részlegesen megolvadt állapotban van.

Az asztenoszféra sűrűségének jellemzői:

- *Felső határ*: A litoszféra alatt, kb. 70–100 km mélységben kezdődik, ahol a sűrűség kezdetben alacsonyabb, hasonló a felső köpeny felső részéhez (kb. $3,3 \text{ g/cm}^3$).
- *Alsó határ*: Körülbelül 700 km mélységig terjed, ahol a nyomás és a sűrűség tovább nő, meghaladva a $4,0 \text{ g/cm}^3$ -t.
- *Plasztikusság*: Bár szilárdnak tekinthető, a nagy hőmérséklet miatt képlékeny, „lágymód” köpenynek is nevezik.
- *Szerepe*: Kisebbségi sűrűsége miatt a nehezebb, merev litoszféralemezek úsznak rajta.

A földköpeny sűrűsége

A köpeny a Föld térfogatának 82%-át teszi ki, és szilikátos kőzetekből áll, amelyek nagy nyomás alatt szilárdan viselkednek, de plasztikusan áramlanak. A földköpeny átlagsűrűsége körülbelül

$$4,5 \text{ g/cm}^3,$$

amely a mélységgel növekszik.

A földköpeny sűrűsége részletesebben:

- A *felső köpeny* (kb. 700 km-ig) sűrűsége $3,3\text{--}4,0 \text{ g/cm}^3$
- Az *alsó köpeny* (700 km-től 2900 km-ig) sűrűsége $4,4\text{--}5,5 \text{ g/cm}^3$

Egy szarvashiba

„Az asztenoszféra kisebb sűrűsége miatt a nehezebb, merev litoszféra lemezek úsznak az asztenoszférán”.

A megadott sűrűségértékek alapján nem tiszta, hogy ez hogyan jöhetett ki? Ha arra gondolnak, hogy egy vaslemez vízszintesen, a nyugalmi állapotban lévő vízre helyezünk, s a lemez nem süllyed el, akkor a jelenség érthető és a felületi feszültséggel magyarázható. De itt nem erről van szó, az asztenoszféra sokkal sűrűbb, sokkal nagyobb nyomás uralkodik benne, így nem teljesen világos, hogy mire gondolhatott a szerző, akitől az MI az idézetet összeszedte!