

# A Kárpát-medence és környezete kialakulásának egy lehetséges modellje (kaptafa<sup>1)</sup> után ejtőernyő)

KISS J.

Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat (MBFSZ), 1143 Budapest, Stefánia út 14.  
E-mail: kiss.janos@mbfsz.gov.hu

Geofizikus szemmel vizsgálva próbáljuk megérteni a Kárpát-Pannon régió kialakulását és az azt meghatározó tényezőket, folyamatokat. Ez nem egy egyszerű feladat, egyfajta időutazás. Minél messzebb akarunk visszamenni az időben, annál kevesebb megbízható információ áll rendelkezésre.

A Kárpát-Pannon régió valamikor a kréta időszak után alakult ki. Erről a kréta utáni időről vannak konkrét földtani-morfológiai információink, és rendelkezésre állnak napjaink különféle geofizikai mérési adatai. A „földtani jelenségek – geodinamikai folyamatok – mérési adatok” együttesét kell tehát logikailag összerakni és a köztük lévő kapcsolatot megfejteni az aktualizmus elve alapján. Választ adni a „hol”, „mi” és „miért” kérdésekre.

## Kiss, J.: An alternative model for the development of the Carpathian Basin and its environment

We are going to try to understand the development of Carpathian-Pannonian region and its determining factors from point of view of geophysicists. It is not a simple task; this is a kind of time travel. The farther we want to go back in time the less reliable information we have.

The Carpathian-Pannonian region has formed and developed after the Cretaceous period. We have certain geomorphologic and geological information about the post-Cretaceous period of that area and we have different kind of geophysical measurements in the region. We have to put reasonably together a set of geological phenomena, geodynamical movements and geophysical data and to find the connection between them using the theory of actualism to answer the questions of “where”, “what” and “why”.

*Beérkezett:* 2017. május 10.; *elfogadva:* 2017. szeptember 8.

## Bevezetés

Sokan és szerteágazóan vizsgálták a Kárpát-Pannon régió fejlődését, lehetséges fejlődéstörténetét, és általában minden szakember a saját szakterülete felől közelítette meg a kérdést. Valószínűleg a legtöbb megközelítés a célhoz, a valós fejlődési modellhez visz közelebb minket (feltételezhetően a megoldások a cél felé konvergálnak), de a háttérinformációk részletes ismerte hiányában egyik-másik elképzelést, feltételezést nehéz elfogadni és beépíteni egy „új” modellbe.

A hidrogeológia világszerte ismert professzora Tóth József<sup>2)</sup> jellemezte a saját, felszín alatti áramlási rendszereket vizsgáló megközelítését valahogy így:

„Mindig először egy egyszerű modelltől kell kiindulni, és azt bővíteni, kiegészíteni a rendelkezésre álló háttér adatokkal. Amíg az egyszerű modell nincs meg, s amíg annak működését nem értjük, addig szinte semmit sem tudunk, és nincs is értelme bonyolultabb rendszerekkel kísérletezni.”

Munkássága és eddigi eredményei őt igazolták! Keresük az egyszerű modellt, de kialakításakor tanulni kell a korábbi munkákból, eredményekből és a hibákból is.

Erről az oldalról közelít meg a kérdést azt találjuk, hogy a tudományokban sok olyan zseniális ötlet és sejtés született évek során, amit nehéz megmagyarázni és ez elgondolkodtató! Honnan jöttek rá, mi alapján értették meg azt, ami ma már nyilvánvaló, de korábban – a megfelelő

adatok hiányában – nem volt egyértelmű. Az adatok, amelyek ezt számunkra ma egyértelművé teszik, akkor még nem is léteztek.

Szentgyörgyi Albert egy idézete adja meg talán a legpontosabban a választ, miszerint: „Felfedezni valamit annyit tesz, mint látni, amit mindenki lát, és közben arra gondolni, amire még senki.”

Nyilvánvaló, hogy háttér-információk tömkelegének ismerete, feldolgozása alapján érezték meg vagy értették meg a kutatók a jelenségeket, noha bebizonyítani igazukat életük során nem mindig adatott meg. Több ilyen esetet is ismerünk a tudománytörténetben.

Érdeemes tehát olvasgatni a régi, archív szakirodalmat is, mert néha igazi gyöngyszemekre lelhetünk. A geofizikában ilyen például Szénás György *Geofizikai teleptan* című könyve (Szénás 1958). Sok olyan dolgot, ráérzést, elképzelést ír le, amit ma már nagyon jól értünk, de az ő korában kevesen értettek. E tanulmány gondolatait is ő motiválta kb. 60 évvel ezelőtti írásával.

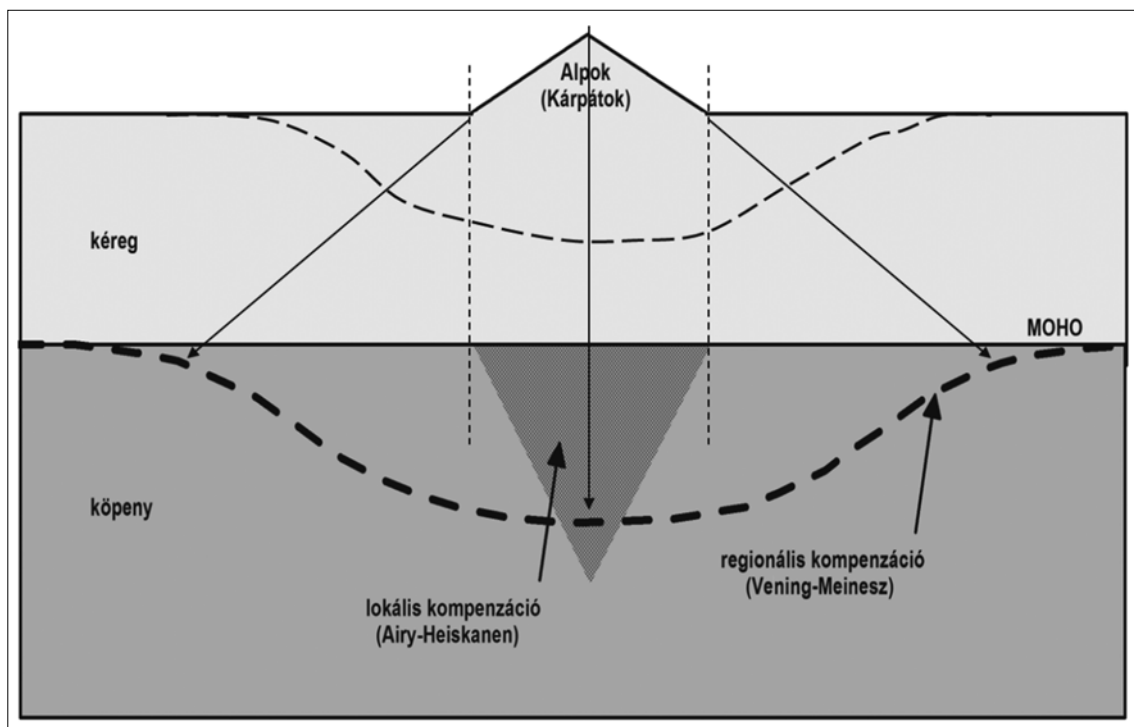
### A Kárpát-Pannon régió geodinamikai modellje

A Kárpát-Pannon régió kialakulásának megértéséhez, a folyamatokat szét kell választani az alábbi részfázisokra, egyszerűbb folyamatokra.

1. Kezdeti kompressziós orogén mozgások (lemeztektonika):
  - a) Szubdukció – az óceáni lemez (pl. Magura) megszűnéséhez kapcsolódó folyamatok,
  - b) Kollízió – kontinentális lemezek ütközése (alpi orogén mozgások), az Alpok és a Kárpátok felgyűrődése.
2. Kompressziós orogén utáni epirogén mozgások (izosztázia):
  - a) Kezdeti izosztatikus válaszok a hegységképződésre – lokális Airy–Heiskanen-féle izosztázia: izosztatikus gyökérszónák kialakulása,
  - b) A környező hegyek izosztatikus gyökérének hatása a belső medencére – regionális Vening Meinesz-féle izosztázia: kéregbehajlás, hegykoszorún belüli süllyedés.

### Kezdeti kompressziós orogén mozgások – lemeztektonika

Az 1. fázist a korábbi tanulmányokból (Balla 1984, 1987, 1988, Horváth 1993, 2007, Fodor, Csontos 1998, Fodor et al. 1999, Bada et al. 1999, Csontos, Vörös 2004, Horváth et al. 2004, Fodor et al. 2005, Seghedi et al. 2005, Kovács, Szabó 2008) viszonylag jól ismerjük, bár a részletekben vannak eltérések a különböző szerzők elképzelésében.



**I. ábra** A lokális és a regionális izosztatikus kompenzáció szemléltetése. Lokális kompenzáció csak a hegy alatti területre terjed ki, a regionális kompenzáció – a litoszférolemez behajlása miatt – sokkal nagyobb területre kiterjed, és előtéri süllyedések kialakulása sem zárható ki

**Figure 1** Illustration of the local and regional isostatic compensation. Roots of local compensation are located just under the mountains, while the roots of regional compensation are extended over the mountain area because of the bending of lithosphere plates

Ennek leglényegesebb eleme az, hogy az Afrikai-lemez É-i mozgásának hatására az Adriai-mikrolemez nekiütközik az Európai-lemeznek (szubdukció, kollízió) és kialakul az Alpok.

A hegységképződés bizonyos fázisában a feszültségek levezetése az Alpok vonalában már nem lehetséges, így ÉK–K-i irányú kilökődés történik. Ez a kilökődő egység a Pannon-mikrolemez, amely az adriai eredetű ALCAPA és az európai eredetű TISIA és DACIA egységekből áll.

A geodinamikai jelenségeket, a recens feszültségeteret (Bada et al. 1999, Grenczy 2005) vagy a vulkanizmus korát vizsgálva (Balogh, Pécskay 2001, Pécskay et al. 2006, Pospišil et al. 2012) megállapíthatjuk, hogy a Pannon-mikrolemezek mozgása idővel az irányában is megváltozott, a kezdeti É–ÉK után K–DK irányúvá vált (Kiss 2014). Ezt Szanyi Gyöngyvér (2017) doktori dolgozatában – az S-hullám csoportsebességek irányizotrópia vizsgálatai alapján – a felső kéregre, az alsó kéregre és köpenyre meghatározott maximum sebességirányok alapján, közvetett módon<sup>3)</sup> igazolta.

A Pannon-mikrolemeznek az Európai-lemezzel való ütközésekor szubdukció és kollízió alakul ki, amelynek nyomai többé-kevésbé megtalálhatóak ma is, ez a lemezmozgás létrehozza a Kárpátok hegykoszorújának 300 szögfoknál nagyobb ívét, amelynek a közepén található a Kárpát-medence.

Amikor az Alpok térségében az 1. fázis befejeződik és elkezdődik a 2. fázis, akkor kezdődik csak el a Kárpátok térségében az 1. fázis.

## Kompressziós orogén utáni epirogén mozgások – izosztázia

Az Alpok térségében a 2. fázis elején kialakul az Alpok izosztatikus gyökérvonala (lokális, plasztikus izosztázia). A lemeztektonikai mozgások legfőbb meghajtóereje a köpenyáramlás. A Kárpát-Pannon régió esetében is fontos szerepe lehet a köpenyáramlásnak (Royden et al. 1983, Kovács et al. 2011, 2012). Ha feltételezzük, hogy az Adriai-lemezt is a konvekciós köpenyáramlás mozgatja, akkor az Alpok izosztatikus gyökérvonala (a kéreg kivastagodása) olyan gátat képez, amely útját állja a köpenyáramlásnak, megváltoztatva annak irányát. A kezdetben közel É–D irányú köpenyáramlás az Alpok gyökérvonala miatt oldalsó irányokba terelődik el, pl. ÉK-i irányba. Valószínűleg ennek a mechanizmusnak köszönhető a Pannon-mikrolemez kilökődése.

A kilökődő mikrolemez, azonban ütközik a vastag Európai-táblával (bohémiai masszívum), aminek eredménye szubdukció és kollízió, és felgyűrődik a Ny-Kárpátok vonulata. Mivel a kilökődés iránya alapvetően ÉK–K-i, ezért É-on nem jellemző a szubdukcióra utaló vulkanizmus (kivéve talán a Szlovák-érchegységet). A konverziós mozgások miatt felgyűrődik a Ny-Kárpátok vonulata, ami alatt a kialakuló gyökérvonala tovább tereli a köpenyáramlást, ennek iránya egyre inkább K-i lesz.

A TESZ (TransEuropean Suture Zone) vonalánál ugyanaz a jelenség ismétlődik meg, azaz ütközés, szubdukció, kollízió és gyökérvonala kialakulása. Mivel a Magura óceáni lemez felemésztődéséért a TESZ vonala mentén ez a folyamat a felelős, a szubdukciós eredetű andezites vulkanizmus, a K-Kárpátok belső peremén szinte összefüggően megtalálható.

Kiemelkedik a K-Kárpátok vonulata, és elkezdődik a 2. fázisra jellemző lokális izosztatikus modell kialakulása, azaz a hegyvonulat alatt egyre erőteljesebb izosztatikus gyökérvonala fejlődik ki az egyensúlyi helyzet megteremtéséért. Ez a gyökérvonala megint megtereli a köpenyáramlást, amely elfordul abba a DK-i irányba, ahol napjaink legaktívabb földrengésfészke, a Vrancea-zóna található.

Lemezek, mikrolemezek összetett mozgásáról van szó, amelyet számtalan járulékos földtani jelenség kísér, de a kialakulás szempontjából talán ezek a legfontosabbak. Eddig nem esett még szó a regionális izosztáziáról!

## Regionális izosztázia

Vening Meinesz (1931) tengeri gravitációs mérések feldolgozása és értelmezése során jött rá a regionális izosztázia jelenségére. Ennek lényege, hogy a tengeri vulkáni szigetek esetén az izosztatikus gyökérvonala (gravitációs minimumok) sokkal tágabb környezetben jelentkeznek (azaz regionálisan), mint ahogyan azt a lokális izosztatikus modellekben leírjuk. Ennek oka az, hogy az óceáni kéreg képlékeny alakváltozásra kevésbé alkalmas, viszont a terhelést mégis csak fel kell vennie. Vening Meinesz szerint a tengerszint fölé emelkedő vulkáni szigetek nehézségi terhelését az óceáni litoszféra mint rugalmas lemez veszi fel, azaz a terhelés helyén a litoszférolemez behajlik. A behajló lemezrész mérete jóval meghaladja a vulkanikus sziget méretét, így egy regionális gravitációs minimum alakul ki. A formája alapján nem lokális izosztatikus gyökérvonala hasonlít, hanem egy nagy súly hatására rugalmasan viselkedő lemez behajlására, ez tulajdonképpen a regionális, elasztikus izosztatikus modell.

A Kárpát-Pannon régióban a regionális izosztázia szintén jelen van, de másképpen jelentkezik (noha a lényeg ugyanaz). A Kárpát-medencét szinte minden oldalról tengerszint fölé emelkedő hegyvonulatok veszik körül. Ezek a magas hegyek súlyukkal megterhelik a litoszférolemezt, egyrészt lokális gyökérvonala jelennek meg a kollízió során összegyűrt kőzetanyagból, másrészt az elasztikus lemez a regionális izosztáziának megfelelően szintén meghajlik. Mivel a hegyek szinte minden oldalról körülvesszik a Kárpát-medencét, ezért a litoszférolemez behajlása – amely a hegyek tágabb környezetéhez kötődik – a medence zárt belső részében összeadódik. A medence belseje kap egy, a külső környezetből származó terhelést. A jelenséget leginkább az „ejtőernyő modell” segítségével érthetjük meg.

### Az „ejtőernyő-dinamika”

A repülőből kiugró ember az ejtőernyő megtartó erejét kihasználva tud biztonságosan földet érni. A kiugró ember a kötélzet révén terheli meg az ejtőernyőt. Az ejtőernyő a nagy felületének visszatartó erejével<sup>4)</sup> védi meg az embert a szabadeséstől (2. ábra, bal oldali rész).

*Ebben a rendszerben hat a levegőben lévő ember súlyából származó nehézségi erő és az ejtőernyő megtartó ereje, amit felületének a közegbe (levegőbe) kapaszkodásával ér el, miközben az ejtőernyős összességében szép lassan süllyed.*

Földtanra átültetve, a Kárpát-medencei modell a következő. A környező hegyek adják a terhelést (mindegyik nagy hegycsúcs egy-egy terhelési pont, a kötélzet egy-egy darabja). Az ejtőernyő vitorlázatát a litoszféalemez adja, amelynek a peremén jelentkezik a hegyek terhelése, kialakul az ejtőernyő-effektus. A peremeken, a tengerszintből kiemelkedő hegyek terhelése nyomja lefelé az egész litoszféalemezt. Ennek a mozgásnak a litoszféalemez részben ellenáll, elasztikusan meghajlik. A széleken a hegyek növekedése (terhelése) miatt lesüllyed, középen a közegellenállás miatt felboltozódik. A terhelés a széleken jelentkezik – a medencében nincs ilyen terhelés –, és kialakul az ejtőernyő-effektus. Egy felfelé domboruló kupolaernyő alakul ki a Kárpát-medencei litoszféalemezből (2. ábra, jobb oldali rész).

*Ebben a rendszerben hat a levegőben lévő hegytömegek súlyából származó nehézségi erő és a litoszféalemez megtartó ereje, amit felületének a közegbe (köpenybe) kapaszkodásával ér el, miközben a medence összességében szép lassan süllyed.*

A kollízió miatt a kőzetlemez felgyűrődik, a hegyek tömege a széleken folyamatosan nő, emelkednek a hegyvidéki részek. Mivel nő a terhelés az izosztázia miatt, egyre nagyobb gyökérszónák alakulnak ki a kéreg anyagából, azaz

a Moho szintje egyre mélyebbre kerül. A terhelés nyomja lefelé a litoszféalemezt, és a zárt geometria miatt az egész régiót, többek közt a medence közepét (noha ott nincs plusz tömeg).

A medence a regionális terhelés miatt süllyed, ezért folyamatosan vastagodik a mechanikusan lerakódó, laza üledék, amelynek a sűrűsége a kéreg átlagsűrűségénél jóval kisebb. Ez viszont köpenykiemelkedéseket generál a medencében – az izosztatikus egyensúly elérése miatt –, merthogy a medencében nincs plusz tömeg és a lerakódó, kis sűrűségű laza üledék tömeghiányt okoz.

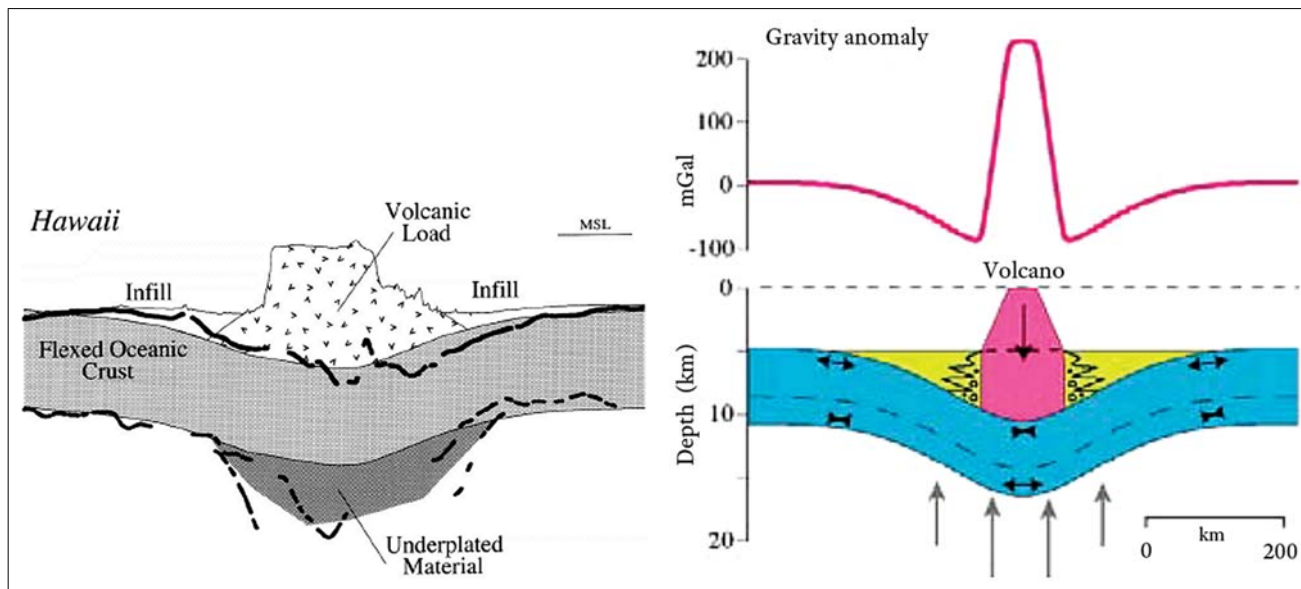
Az aktív köpenyáramlás (köpenykiemelkedés) miatt a kéreg alulról is kopik, vékonyodik (Szénás 1964). A medence vékonyodó szilárd kérge alatt nő a hőenergia és feltehetően a nyomás is, a normál állapotokhoz képest.

Ennek a folyamatnak a továbbgondolását az olvasóra bízunk – a Wilson-ciklushoz (Wilson 1963) jutunk...

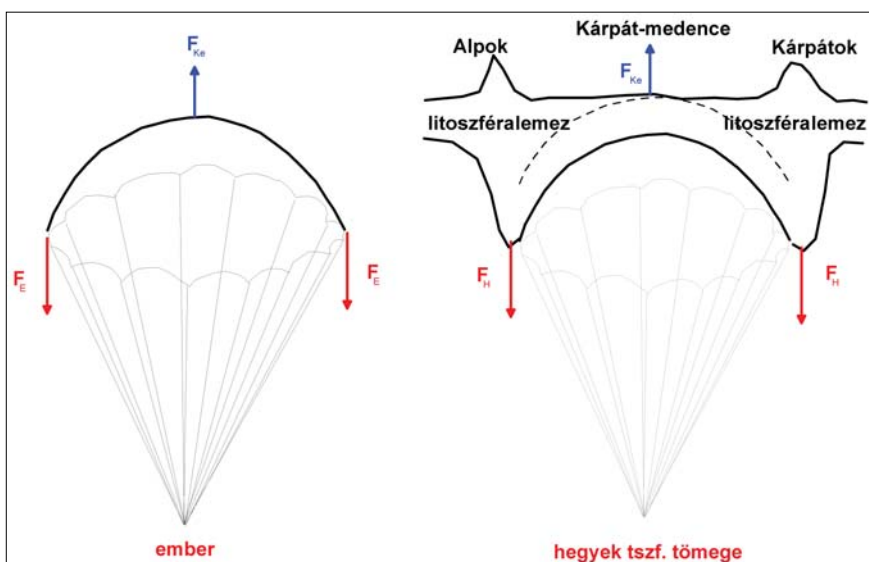
### Kupolaszerkezet a gravitáció alapján

A gravitációs Bouguer-anomáliatérkép regionális értelemben a Moho felületét (a földköpeny felszínét) írja le, ez valószínűleg korrelál a litoszféra alsó határfelületével, amely a szilárd és a képlékeny anyagállapotok határfelülete, azaz a litoszféra lemez alja. Ha a régió Bouguer-anomáliatérképét vizsgáljuk (3. ábra), akkor a hegykoszorún belüli gravitációs tér regionális összetevője meg fogja mutatni nekünk ezt a felületet.

A 8×8 km felbontású Bouguer-anomáliatérkép adataiból, a medenceterületre harmadrendű approximációval előállított regionális összetevő egy kupolafelület, tehát viszonylag egyszerű módon meghatározhattuk – mérési adatok alapján is – a földtani értelemben vett kupolaernyőt (3–5. ábra). 2009-ben az izosztáziáról szóló *Magyar Geo-*

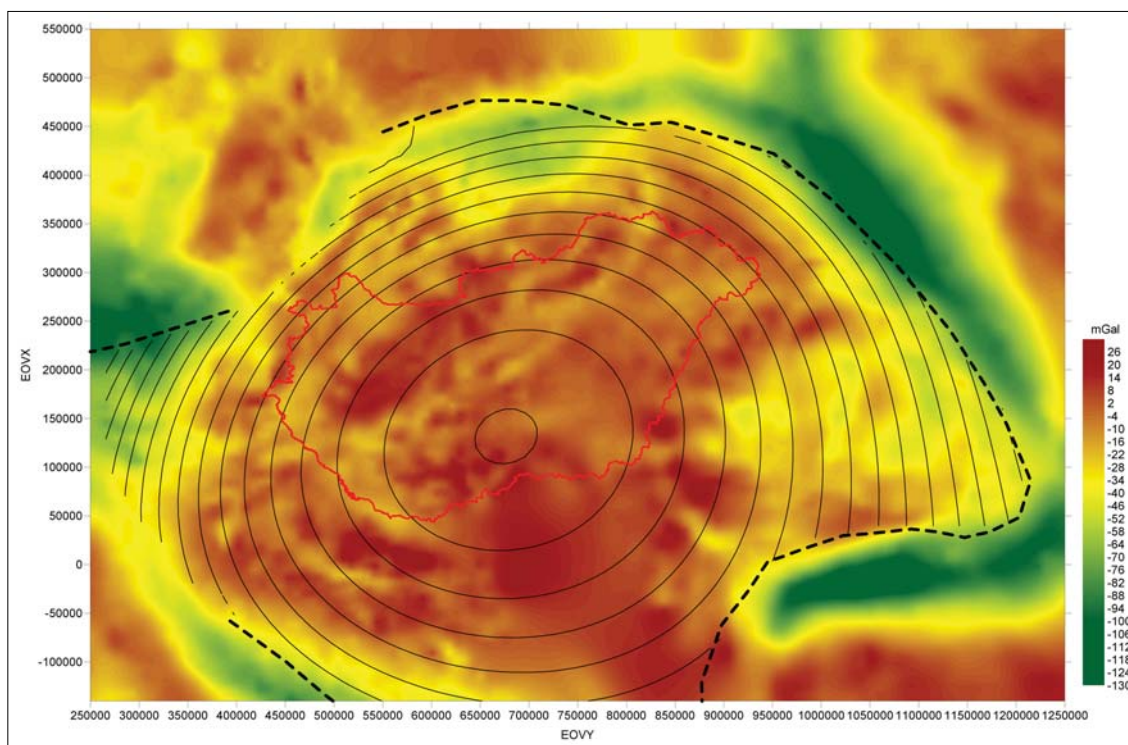


2. ábra Vening Meinesz regionális izosztatikus modellje. Hawaii vulkán valós mérés alapján (balra) és modellezéskor (jobbra)  
 Figure 2 Regional isostatic Vening Meinesz model based on real data of a Hawaii volcano (on the left) and computed on a model (on the right)



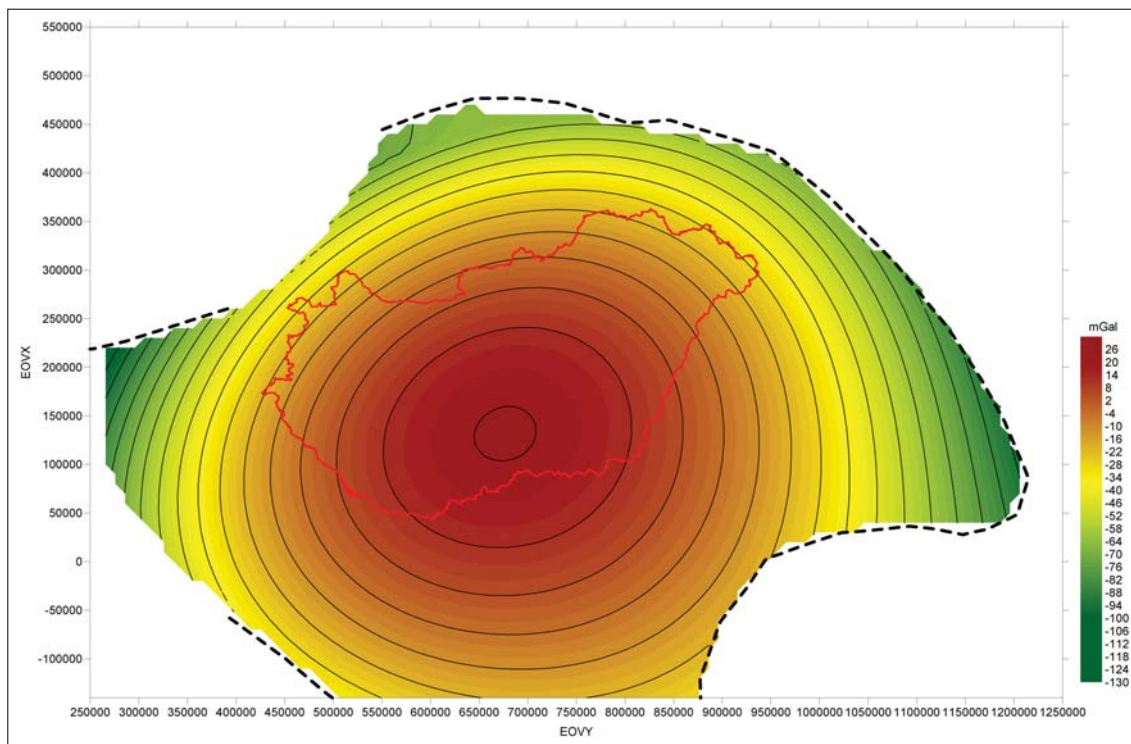
**3. ábra** Ejtőernyő-dinamika és annak a Kárpát-medencére vonatkozó modellje. Az ejtőernyő esetében a kupola úgy van méretezve, hogy az ember súlyából ( $F_E$ ) és közegellenállás megtartó erejéből ( $F_{Kc}$ ) adódóan a rendszer szép lassan süllyedjen (a közegellenállás nem állandó, nagysága a kupolafelülettől és a sebesség-négyzetétől függ). A hegyek többletsúlya a kivastagodó kéregnek köszönhetően előbb-utóbb elvileg egyensúlyba kerül, de amíg nincs egyensúly, addig süllyed. A Kárpát-medencei kéreg alulról nézve kupolaszerű alakzatot vesz fel, ami a környező hegyek többlet súlyát ( $F_H$ ), mint ejtőernyő veszi fel, s tartja meg ( $F_{Kc}$ ) a köpeny anyagú közegen. Kialakul a regionális izosztázia jelensége. Az  $F_H$  és  $F_{Kc}$  aránya határozza meg, hogy a rendszer süllyedni vagy emelkedni fog. Amíg a kompresszió tart, a hegyek emelkednek, addig a Kárpát-medence a regionális izosztatikus kiegyenlítődés miatt süllyedni fog

**Figure 3** Dynamics of the parachute and the parachute model for Carpathian Basin. The parachute is planned so that the body's weight ( $F_E$ ) and the sustaining force of drag ( $F_{Kc}$ ) let the system to sink slowly. The extra weight of the mountains ( $F_H$ ) duly the thickening of the crust theoretically gets sooner or later into balance, but before it is reached it sinks. The crust of Carpathian Basin take a parachute cupola form, and this canopy holds ( $F_{Kc}$ ) the weight of the mountains on the surface of the mantle. This is how the phenomenon of regional isostasy forms. The proportion of  $F_H$  and  $F_{Kc}$  determines the strengths whether the system sinks or rises. As long as the compression is lifting the mountains up the Carpathian Basin is going to sink because of the regional isostasy



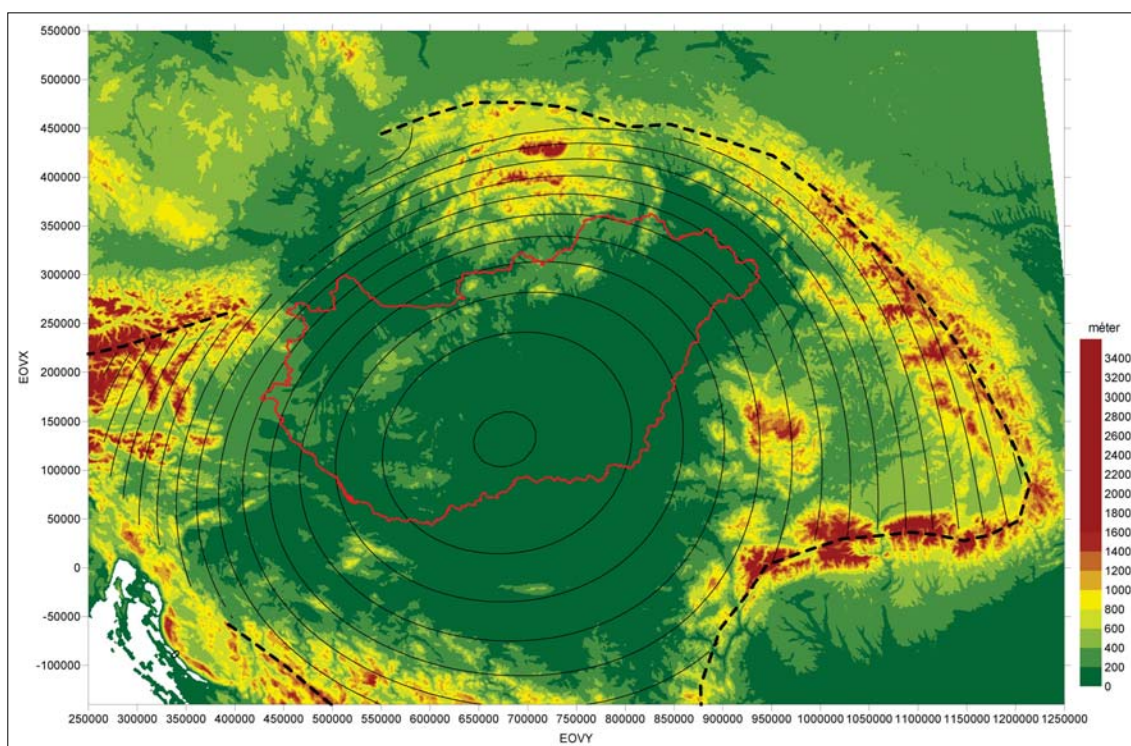
**4. ábra** A Kárpát-Pannon régió gravitációs Bouguer-anomáliatérképe (színekkel) és a térképi adatok harmadrendű approximációjából kapott kupolafelület (izovonalakkal). Szaggatott vonal jelzi a hegykoszorú vonalát

**Figure 4** Bouguer anomaly map of Carpathian-Pannonian region (by colours) and the 3rd order approximation of the data, the so-called "canopy" (by isolines). Dashed line indicates the range of mountains



5. ábra | A hegykoszorú belsejére meghatározott harmadrendű approximációs felület  
 Figure 5 | The 3rd order approximation of the Bouguer data between the mountain chains

*fizikában* közölt cikkben, térképileg előállítottuk és a négy főirány mentén szemléltettük már ezt a regionális hatást | (Kiss 2009). A 4. ábra alapján azonban mindenki elképzelheti, hogyan is nézhet ki ez a felületet.



6. ábra | A harmadrendű approximációs felület (izovalakkal) a domborzati térképen (színekkel)  
 Figure 6 | The 3rd order approximation surface (by isolines) on the topography map (by colours)

## Kupolaszerkezet és a bazaltvulkanizmus

Harangi Szabolcs és szerzőtársai 2015-ben tették közzé geodinamikai elképzelésüket a bazalt vulkanizmus eredetéről (Harangit et al. 2015), amelyben a köpenyáramlás régióban betöltött szerepe is megjelenik (6. ábra). Ezek alapján: „A vastag kőzetburok (litoszféra) alól az asztenoszféra kőzetanyaga áramlik lassan felfelé a peremterületek mentén, az elvékonyodott kőzetburokkal rendelkező medence alá. A változatos összetételű kőzetanyag olvadáspontja csökken a feláramlás (nyomáscsökkenés) következtében, ezért részlegesen megolvad, ami bazaltvulkáni működéshez vezet.”

Az Alpok és a K-Kárpátok között húzódó szelvényen (hasonlóan a 2. ábra nyomvonalához) a Kárpát-medence alatt egy köpenyboltozatot és köpenyfeláramlást jeleznek. A kupolaszerkezetet a geofizikai mérések alapján feltételezik. Arra nincs utalás, hogy miért van feláramlás, miért vékony a kéreg és miért alakul ki a boltozat. Az MTA honlapján is megjelent a tanulmány rövid összefoglalása (MTA 2015), amelyből kiemeltünk néhány mondatot:

„A tanulmányban ismertetett új modell arra alapoz, hogy a bazaltos magmaképződés elsődleges oka az asztenoszféra (földköpeny felső, folyékony magmából álló része) kőzetanyagának felfelé való mozgása. Ezzel a kőzetanyag olvadáspontja csökken, és a fennálló hőmérséklet alá kerülhet, ami olvadáshoz vezet. A kulcs tehát megtalálni azt a mechanizmust, ami a földköpeny áramlást előidézi.

Ha térképen megnézzük, hol helyezkednek el bazaltvulkáni területeink, akkor meglepődve tapasztaljuk, hogy nem ott, ahol várnánk, azaz nem a medence középső részén, hanem a széleken, ahol a litoszféra vastagsága hirtelen változik: a környező vastag kőzetburok a medence felé hirtelen elvékonyodik. De miért éppen ott vannak a bazaltvulkánok? Erre a Pannon-medence kialakulásának története adhat választ. Mintegy 12–18 millió évvel ezelőtt a

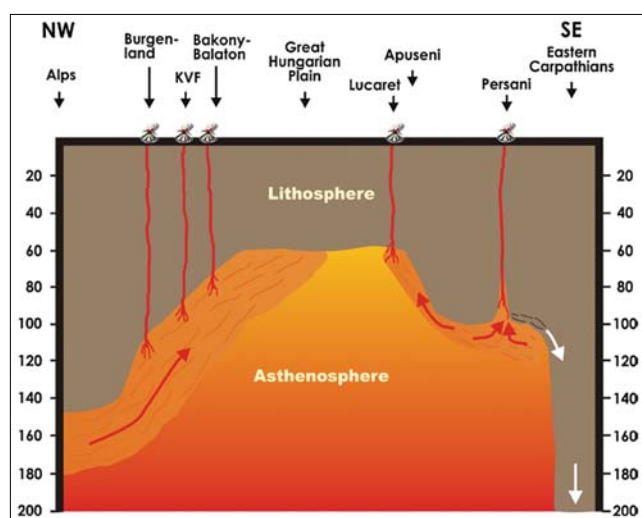
térségünk alatti kőzetburok és földkéreg jelentősen elvékonyodott. Amíg a környező területek alatt 120–200 kilométer vastag litoszféra található, addig a medence területe alatt mindössze 60–80 kilométer a vastagsága. A tanulmány szerzői szerint ennek egyik következménye, hogy a környező területek alól az asztenoszféra anyaga az elvékonyodott térség alá áramlik. A nyugati és északi peremeken a feláramlás majdnem függőleges, ami a magmaképződés egyik legfontosabb kritériuma.”

A lemezeket a köpenyáramlás mozgatja. Az ebben a cikkben felvázolt modell a köpenyáramlás eredetére nem ad újabb magyarázatot (eddig ismereteink alapján az ok a konvekciós hőáramlás), de a köpenyáramlást vízszintesen és függőlegesen megterelő okokra igen. Ez az ok pedig, a hegységek alatt kialakult izosztatikus gyökérszóna, amely értelemszerűen a litoszférát is vastagítja, ezzel a képlékeny köpenyanyag áramlását vízszintes és függőleges irányokban részben megtereli, illetve a köpenybe benyomuló tömeg (gyökérszóna) részben generálja is az áramlást. A Kárpát-medence szigorúan véve csak NyDNY-i irányból nyitott, a hegységek izosztatikus gyökérszónái majdnem teljesen körbezárják a Kárpát-medencét. A köpenyáramlás iránya a medence belseje felé mutat, ugyanakkor az áramlást minden oldalról „gátak” terelik, törvényszerű tehát – ebben a majdnem zárt rendszerben – a felfelé és lefelé irányuló áramlások kialakulása. Ebből a lefelé irányuló áramlás végső helye a Vrancea-zóna (DK-en), a felfelé áramlás pedig, mindenhol a „gátfal” mentén, ott ahol a litoszféra hirtelen kivékonyodik. Nyilván itt lesz az első kellően „gyenge” hely, ahol a bazalt a felszínre kerülhet.

Ha a hegységek alatt vastag kéreg (és litoszféra) alakul ki, akkor hozzá képest a medence alatt relatívan vékony kéreg (és litoszféra) lesz. A hegységek súlyából adódó többletterhelés azonban az egész régióra hatással van, amit a litoszféra lemez behajlással is kompenzál (regionális izosztázia), s ezért a rendszer részeként a medence is süllyedni fog. Ha a medence üledékekkel való feltöltődése nem tudja követni a süllyedést, akkor az egész térszín süllyedni fog. A lerakódó üledék sűrűsége kisebb, mint a kéreg átlagsűrűsége, így az izosztatikus egyensúly eléréséhez a nagy sűrűségű köpenyanyag alapszintjének megemelkedése szükséges (köpenydiapír), ez biztosítja a kompenzációt. A köpenykiemelkedése, a litoszféra meghajlása magyarázatul szolgál a medence szintű extenzióra.

A modellben feltételezzük, hogy a Pannon-mikrolemez viszonylag merev és a konverziós erők csak kisebb deformációkat (hullámzásokat) okoznak a medence belsejében (litoszféra gyűrődés jelensége, ld. Cloething et al. 1999, 2013).

A medence kialakulása után a geodinamikai mozgások „araszó hernyóra” emlékeztető módon lokális kompressziós (szinklinális) és extenziós (antiklinális) zónákat alakítanak ki a litoszférában, merőlegesen a kompressziós irányokra. Ennek következtében a mély törések a kompressziós zónában felfelé elzáródnak, az extenziós zónában felfelé kinyílnak, megteremtve ezzel is a magma felfelé áramlásának egy lehetséges útvonalát.



7. ábra Új modell a Pannon-medence bazalt vulkanizmusának eredetéről (Harangi et al. 2015)

Figure 7 New model for the triggering of melt generation beneath the Pannonian Basin (Harangi et al. 2015)

A szinklinális és antiklinális zónák a kompresszió hatására eltérő előjelű függőleges mozgást is végezhetnek a medence belsejében.

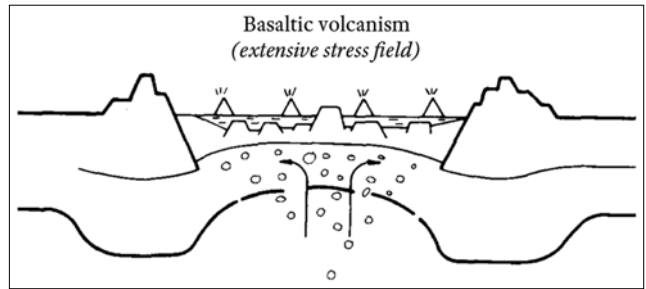
### Összefoglalás

Ismereteink arról, hogy a Kárpát-medencére a vastag üledékes összlet, a vékony kéreg, a süllyedő tendencia, a köpenydiapír és a magas geotermikus gradiens a jellemző, nem új keletűek.

Ezeket a részleteket mutatja Stegena Lajos és szerzőtársainak 1975-ben megjelent cikke és egy abból kiemelt szelvényvázlat (8. ábra), amelyet a szerzők akár ehhez a cikkhez is készíthettek volna. A cikk absztraktjának utolsó megállapítása nagyjából összhangban van jelen cikk mondanivalójával: „Continental-type thin crust, thinned out by the subcrustal erosion of the mantle diapir. The primary cause of the basin formation is the isostatic sinking of the thinned out crust”. (A köpenydiapír okozta erózió hatására a kontinentális kéreg alulról vékonyodik. A medence képződmények kialakulásának oka pedig, az elvékonyodott kéreg izosztatikus süllyedése.)

A „melyik volt előbb” problémája – a süllyedés vagy a vékonyodás – azonban itt is és a későbbi publikációk (Stegena, Horváth 1978) során is előkerül, amelyre eddig nem volt megbízható válasz. Ha vékonyodik a kéreg miért kellene süllyednie is?

A kéreg azért süllyed, mert a hegységek okozta terhelést a régió a regionális izosztázia elvének megfelelően elasztikusan veszi fel, azaz behajlik a litoszféralemez. A belső zárt medence esetén ez egyben a medence süllyedését is előidézzi, amit korábban nem ismertek fel. A süllyedés miatt a medence kis sűrűségű, laza üledékekkel töltődik fel,

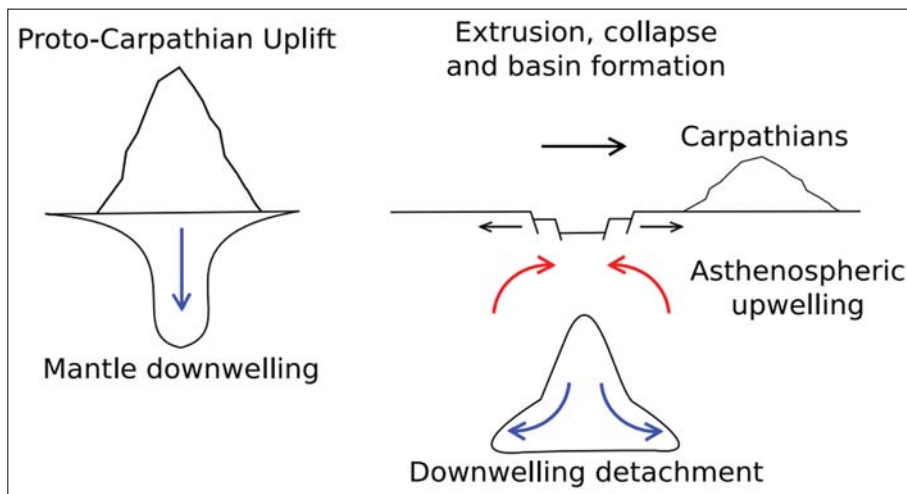


**8. ábra** Egy több mint 40 éve készült szelvényvázlat a Kárpát-medencéről (Stegena et al. 1975). Látszanak a lokális izosztázia jellemző gyökérezónák a hegyek alatt, a süllyedő belső medence, ami a laza üledékekkel történő feltöltődésből ismerhető fel és az izosztatikus egyensúly miatt megjelenő köpenydiapír (ami a bazaltvulkanizmus bázisos alapanyagát eredményezi), azaz kirajzolódik az ejtőernyőmodell. Mindezek együttesen, a felszínen egy extenziós feszültségtér jellegzetességeit mutatják

**Figure 8** Model of Carpathian Basin made by Stegena et al. (1975) more than 40 years ago. It can be seen the roots of local isostasy, the downwelling basin which characterised by sediment upfilling, and the mantle diapir, as the source of basalt volcanism. All these together result in an extensional basin system. This is the schema of the parachute model

amit az izosztatikus egyensúly miatt lokálisan kompenzálni kell. Ez a kompenzáció csak egy nagy sűrűségű anyag felemelkedésével képzelhető el (amire csak a köpenyanyag képes). A köpenyanyag kisebb nyomású szintre emelkedésének azonban következménye van. A kváziszilárd köpenyanyag nyomáscsökkenés hatására olvadékalapotba kerül, ami beolvaszthatja a környezetét (a kéreg eróziója alulról) és az olvadékananyag a felszínre is felemelkedhet (bazaltvulkanizmus).

Egy másik forrásműben, Dando 2010-es doktori dolgozatában, amely a Kárpát-Pannon régió szeizmikus szer-



**9. ábra** A vázlat a Pannon-medence kialakulását mutatja. *Balra:* A Kárpátok kiemelkedése, amely a Kelet-Alpok folytatásának tekinthető, generálja a litoszféra kivastagodását. *Jobbra:* A mélybe került litoszféra leszakadásának eredményeként forró asztenoszféra anyag áramlik fel. A feláramlás K-i irányú kilökődéshez és a Kárpáti orogén zóna beszakadásához, azaz a Pannon-medence extenziójához vezet (Dando 2010)

**Figure 9** A draft showing the development of the Pannonian Basin. *Left:* uplift of the Carpathian Mountains, they can be regarded as a continuation of the Eastern Alps, and the development of a lithospheric downwelling. *Right:* Detachment of the lithospheric downwelling result in hot asthenospheric upwelling. Upwelling accompanied by an eastward extrusion and orogenic collapse of the Carpathians, led to extension in the Pannonian (Dando 2010)



kezetét vizsgálja, felismer bizonyos sajátságokat, például a hegységek és a gyökérvonalak kapcsolatát (9. ábra, bal oldala), de nem veszi észre, hogy a köpenykiemelkedés és a köpenyáramlás a gyökérvonal jelenlétével vagy hiányával van kapcsolatban (9. ábra, jobb oldala).

Az ábra jobb oldala szerint: „A Kárpátok kiemelkedése, amely a Kelet-Alpok folytatásának tekinthető generálja a litoszféra kivastagodását.” Ez a kivastagodás az izosztatikus gyökérvonal megjelenésével van kapcsolatban.

Az ábra bal oldala szerint: „A mélybe került litoszféra leszakadásának eredményeként forró asztenoszféra anyag áramlik fel. A feláramlás okozza a K-i irányú kilökődést, ami a Kárpáti orogén zóna beszakadásához, azaz a Pannon-medence extenziójához vezet.” Az egész Kárpát-medence területét egy őshegységnek tekintik, amelynek mély gyökérvonalja leszakad, és ez generálja a forró köpenyáramlásokon keresztül a Pannon-szegmens K-i irányú kilökődését, majd beszakadását (medenceképződést) és a Pannon-medence extenzióját, ha jól értjük.

Felmerül ezzel kapcsolatban néhány kérdés. Vajon mitől szakad le, és miért süllyed le a nagyobb nyomású asztenoszféra a rideg, kis sűrűségű litoszférayagra? Talán az egész hegység elsüllyed? Ha igen, akkor miért van mégis ott a Kárpátok az ábra jobb oldalán? Akkor mi süllyedt le, csak a gyökérvonal? Ha igen, akkor miért vannak még most is izosztatikus gyökérvonalra utaló gravitációs minimumok a hegyvonulatok mentén?

A Kárpát-medence jellegzetességeinek magyarázatát a tanulmányban felvázolt egyszerű ejtőernyőmodell megadja, továbbá érthetővé teszi a részleteiben már feltárt fejlődéstörténetet és az azt kísérő földtani jelenségek jelentős részét. A felvázolt fejlődési modell egyszerű, könnyen érthető, és a változások okai, menete logikailag jobban nyomon követhető.

Az orogén és epirogén mozgások küzdelmének időrendisége (mikor melyik dominál), csak vázlatosan ismert, de ettől még a modell igaz lehet. Az orogén mozgások, majd az epirogén mozgások (amelyek nagy valószínűséggel az izosztatikus egyensúly céljából történnek) folyamatosan jelen vannak. Az izosztázia is léptékfüggő, kezdetben csak a lokális (plasztikus) izosztázia jelei ismerhetők fel, de idővel megfelelő körülmények között mindez regionális (elasztikus) izosztázia formájában is megjelenik. Ennek talán iskolapéldája lehet – ha már óceánjaink nincsenek – a Kárpát-medence és környezete.

## Utóirat

A cikk megírása után végiggondolva az izosztázia jelenségét, a folyamatok sorrendjében kisebb ellentmondás mutatkozik. A gyors geodinamikai változásokra (terhelésekre), a litoszféralemeznek is gyorsan kell reagálni, de nem tudjuk, hogy melyik típusú izosztázia jelenik meg. Lehet, hogy előbb van az elasztikus lemezbehajlás és utána a plasztikus gyökérvonal kialakulása. Az sem zárható ki, hogy egyszerre jelentkeznek a lokális és a regionális izosztázia.

Az elasztikus, regionális izosztázia a Hawaii szigeteken napjainkban is működő bazaltvulkanizmussal kapcsolatban írták le. Ez fiatal jelenség. Ezzel szemben egy nagy orogén zónának (hegységrendszernek) az izosztatikus gyökere már többször tízmillió éves is lehet, ami egy idősebb jelenség. Az orogén vonulatok nagy gyökérvonalai különböző (plasztikus, gyűrődéses, tektonikus) folyamatokon keresztül alakulhatnak ki, amely folyamatokhoz valószínűleg több idő kell.

Az izosztázia szó a görög „ίσος” (iszosz: egyenlő) és „στάσις” (sztaszisz: megállás, beállítás) szavakból származik, amelyet magyarul egyensúlynak lehet lefordítani. Persze egy adott egyensúlyi helyzet földtörténeti szempontból nem nevezhető tartósnak, mert minden folyamatosan változik.

## A tanulmány szerzője

Kiss János

## Jegyzetek

- <sup>1)</sup>A „kaptafa modell”-t Prinz Gyula (1926) földrajzi tanulmányában írta le: „Az Alpok kelet felé kiszélesedik ... az egész redőzet szétnyílik, olló alakú szétágazik. Az északi ág átmege a Kárpátokba, a déli a Dinaridákba, s így a kettő közrefogja a Tisia tömböt. A Tisia tömb így beékelődik az Alpok közé ...” Ez tehát a „kaptafa modell”, amelyben először megfogalmazta a közbenső tömeg – amit Prinz Tisiának nevez – merevségét és idegenségét az alpi orogén zónában.
- <sup>2)</sup>A soproni egyetem hallgatója volt, aki az 56-os események után elhagyva az országot a hollandiai Utrechtben szerzi meg a geofizikus diplomáját, majd a kanadai Albertában vált a hidrogeológia ismert szaktekintélyévé – néhány évig itthon, az ELTE hidrogeológia szakirányán hallhattuk színvonalas előadásait a felszín alatti vizek áramlási rendszeréről.
- <sup>3)</sup>A csoportsebességek anizotrópiáját – a legnagyobb sebességű tengelyirányok mélységtől függő változását – mutatta ki a Pannon-medence területén, ami 10–30 s periódusidejű intervalumban 27–49°-os irányváltást jelent. A felszíntől minél mélyebbre megyünk, annál képlékenyebb a közeg (rideg-képlékeny átmenet). Így a geodinamikai folyamatok nyoma, amelyet a konvekciós áramlás generál először a köpenyben jelenik meg, majd a kevésbé képlékeny alsó kéregben és végül a rideg felső kéregben. Az áramlásnak a felszínhez közelebbi és mélybeli megnyilvánulásai között fáziskésés van, ezt látjuk a tengelyirányok változásából. Változik a mélybeli köpenyáramlás iránya, aminek hatása késéssel jelenik meg az alsó, illetve a felső kéregben.
- <sup>4)</sup>A közegellenállás, ld. <http://www.vilaglex.hu/Fizika/Html/Kozegell.htm>

## Hivatkozások

- Balla Z. (1984): The Carpathian loop and the Pannonian Basin: A kinematic analysis. *Geophysical Transactions* 30/4, 313–353
- Balla Z. (1987): Tertiary Paleomagnetic data for the Carpatho-Pannonian region in the light of Miocene rotation kinematics. *Tectonophysics* 139/1–2, 67–98
- Balla Z. (1988): On the origin of the structural pattern of Hungary. *Acta Geologica Hungarica* 31, 53–63

- Bada G., Horváth F., Fejes I., Gerner P. (1999): Review of the present-day geodynamics of the Pannonian Basin: progress and problems. *Journal of Geodynamics* 27, 501–527
- Balogh K., Pécskay Z. (2001): K/Ar and Ar/Ar geochronological studies in the Pannonian-Carpathians-Dinarides (PANCARDI) region. *Acta Geologica Hungarica* 44/2, 281–299
- Cloetingh S., Burov E., Poliakov A. (1999): Lithosphere folding: primary response to compression? (from central Asia to Paris Basin). *Tectonics* 18, 1064–1083
- Cloetingh S., Burov E., Francois T. (2013): Thermo-mechanical controls on intra-plate deformation and the role of plume-folding interactions in continental topography. *Gondwana Research*, 24/3–4, 815, doi: 10.1016/j.gr.2012.11.012, ISSN: 1342937X 2013
- Csontos L., Vörös A. (2004): Mesozoic plate tectonic reconstruction of the Carpathian region. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 210, 1–56
- Dando B. D. E. (2010): Seismological structure of the Carpathian-Pannonian region of central Europe. PhD dissertation, The University of Leeds
- Fodor L., Csontos L. (1998): Magyarországi szerkezetföldtani kutatások és ezek legújabb eredményei. *Földtani Közlöny* 128/1, 123–143
- Fodor L., Csontos L., Bada G., Györfi I., Benkovics L. (1999): Tertiary tectonic evolution of the Pannonian Basin system and neighbouring orogens: a new synthesis of paleostress data. In: Durand B., Jolivet L., Horváth F., Séranne M. (eds): *The Mediterranean Basins: Tertiary extension within the Alpine Orogen*. Geol. Soc. London, Spec. Publ., pp. 1–156
- Fodor L., Bada G., Csillag G., Horváth E., Ruzsiczai-Rüdiger Zs., Palotás K., Síkhegyi F. (2005): New data on neotectonic structures and morphotectonics of the western and central Pannonian Basin. In: Fodor L., Brezsnaynszky K. (eds): *Proceedings of the workshop on „Application of GPS in plate tectonics, in research on fossil energy resources and in earthquake hazard assessment”*. Occasional Papers of the Geological Institute of Hungary 204, 35–44
- Grenczy Gy. (2005): Crustal motions from space geodesy: a review from EPN, CEGRN, and HGRN data. *Occasional Papers of the Geological Institute of Hungary* 204, 31–34
- Harangi Sz., Jankovics M. É., Sági T., Kiss B., Lukács R., Soós I. (2015): Origin and geodynamic relationships of the Late Miocene to Quaternary alkaline basalt volcanism in the Pannonian Basin, eastern–central Europe. *International Journal of Earth Sciences (Geol Rundsch)* 104, 2007–2032, doi: 10.1007/s00531-014-1105-7
- Horváth F. (1993): Towards a mechanical model for the Pannonian Basin. *Tectonophysics* 226, 333–358
- Horváth F. (2007): A Pannon-medence geodinamikája: eszméletörténeti tanulmány és geofizikai szintézis. Akadémiai doktori értekezés, MTA, Budapest, 238 p.
- Horváth F., Bada G., Windhoffer G., Csontos L., Dövényi P., Fodor L., Grenczy Gy., Síkhegyi F., Szafián P., Székely B., Timár G., Tóth L., Tóth T. (2004): A Pannon-medence jelenkori geodinamikájának atlasza, Euro-konform térképsorozat és magyarázó. [http://geophysics.elte.hu/atlas/geodin\\_atlas.htm](http://geophysics.elte.hu/atlas/geodin_atlas.htm)
- Kiss J. (2009): Regionális gravitációs anomáliák, izosztikus hatások Magyarországon. *Magyar Geofizika* 50/4, 153–171
- Kiss J. (2014): Lemeztektonika, vulkanizmus és a Kárpát-Pannon régió geomágneses anomáliatérképe. *Magyar Geofizika* 55/2, 51–81
- Kovács I. J., Falus Gy., Graham S., Hidas K., Szabó Cs., Flower M., Hegedűs E., Posgay K., Zilahi-Sebess L., Fancsik T. (2011): Asztenoszféra-áramlás, mint a tercier kilökődés és extenzió hajtóereje? *Magyar Geofizika* 52/2, 79–87
- Kovács I. J., Falus Gy., Graham S., Hidas K., Szabó Cs., Flower M., Hegedűs E., Posgay K., Zilahi-Sebess L., Fancsik T. (2012): Seismic anisotropy and deformation patterns in upper mantle xenoliths from the central Carpathian–Pannonian region: Asthenospheric flow as a driving force for Cenozoic extension and extrusion? *Tectonophysics* 514–517, 168–179
- Kovács I. J., Szabó Cs. (2008): Middle Miocene volcanism in the vicinity of the Middle Hungarian zone: Evidence for an inherited enriched mantle source. *Journal of Geodynamics* 45, 1–17
- MTA (2015): [http://mta.hu/tudomany\\_hirei/uj-modell-a-karpat-pannon-terseg-bazaltjainak-keletkezesere-105880](http://mta.hu/tudomany_hirei/uj-modell-a-karpat-pannon-terseg-bazaltjainak-keletkezesere-105880)
- 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
- Pospišil L., Hefty J., Hipmanov L. (2012): Risk and geodynamically active areas of the carpathian lithosphere on the base of geodetical and geophysical data. *Acta Geod. Geoph. Hung.* 47/3, 287–309, DOI: 10.1556/AGeod.47.2012.3.2
- Prinz Gy. (1926): Magyarország földrajza. I. kötet: Magyarország földjének származása, szerkezete és alakja. Danubia könyvkiadó, Pécs, 202 p.
- Royden L., Horváth F., Rumpler J. (1983): Evolution of the Pannonian Basin System: 1. *Tectonics*. *Tectonics* 2/1, 63–90, doi: 10.1029/TC002i001p00063
- Seghedi I., Downes H., Harangi Sz., Mason P. R. D., Pécskay Z. (2005): Geochemical response of magmas to Neogene–Quaternary continental collision in the Carpathian–Pannonian region: A review. *Tectonophysics* 410, 485–499
- Stegena L., Géczy B., Horváth F. (1975): Late Cenozoic Evolution of the Pannonian Basin. *Tectonophysics* 26, 71–90
- Stegena L., Horváth F. (1978): Kritikus tethysi és pannon tektonika. *Földtani Közlöny* 108, 149–157
- Szanyi Gy. (2017): A Pannon-medence S-hullám-sebességterének vizsgálata. PhD értekezés, ELTE, Földtudományi Doktori Iskola
- Szénás Gy. (1958): *Geofizikai teleptan*. Akadémiai Kiadó, p. 272.
- Szénás Gy. (1964): Néhány megjegyzés a magyarországi földkéregről. *Geofizikai Közlemények* 13/3, 301–303
- Vening Meinesz, F.A., (1931): Une nouvelle methode pour la reduction isostatique regionale de l'intensite de la pesanteur. *Bull. Geod.* 29, 33–51
- Wilson J. T. (1963): Evidence from Islands on the Spreading of Ocean Floors. *Nature* 197, 536–538, doi:10.1038/197536a0