

## Wegener-centenárium: Megszületett-e a kontinensvándorlás Newtonja? <sup>a)</sup>

HORVÁTH F.

ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszék, Budapest, Pázmány Péter sétány 1/C  
E-mail: frankh@ludens.elte.hu

### Bevezetés

Alfred Wegener (1880–1930) kontinensvándorlási elméletének első nyilvános bemutatására 1912. január 6-án került sor a német Földtani Társulat frankfurti ülésén „A földkéreg nagyformáinak (a kontinenseknek és az óceánoknak) a kialakulása geofizikai adatok alapján” c. előadás keretében. Ezt január 10-én Marburgban egy másik előadás követte „A kontinensek horizontális elmozdulása” címmel. Még ebben az évben két publikáció is napvilágot látott: az egyik egy földrajzi közleményekben, míg a másik a német geológusok vezető szaklapjában jelent meg (Wegener 1912a,b).

Indokolt, tehát a 2012-es évet a kontinensvándorlási elmélet centenáriumának tekinteni. Különösen megalapozott ez a megállapítás, ha az 1912-es munkákat elolvassuk, mert meglepve tapasztaljuk, hogy nem zseni, korai próbálkozásokkal állunk szemben, hanem ennek a forradalmian új elméletnek a legfontosabb alaptételei és bizonyítékai már akkor megszülettek. Érdekes módon azonban Wegener sem akkor, sem későbbi könyveiben nem tudott olyan fizikailag megalapozott mechanizmust kidolgozni, amely megadta volna azokat az erőket, amelyek képesek a kontinensek mozgására. Az adekvát dinamika hiányát maga Wegener (1929) fogalmazta meg szellemesen utolsó könyvében, amikor kijelentette, hogy „... a kontinensvándorlás Newtonja még nem született meg”.

Úgy vélte, ettől még a kontinensvándorlás elmélete nem kérdőjelezhető meg. Hiszen empirikus tudományok először a megfigyeléseket összegezve, induktív úton jutnak általános következtetésre, majd ezt követheti egy egységes elmélet megalkotása, amelyből deduktív úton magyarázható a megfigyelés. Frappáns példaként azt a bonyolult és sokszereplős történetet említette, amely a bolygómozgás és a szabadesés szabályosságainak felismeréséhez vezetett, és csak később derült ki, hogy mindez elméletileg pontosan levezethető a newtoni mechanika alaptörvényeiből.

E cikk első részében áttekintem Wegener és néhány kiemelkedő kortársának elképzeléseit a kontinenseket mozgató erőkről és az egyik legmarkánsabb kritikus ellenvetéseit. Tudománytörténeti ténynek véljük, hogy Wegener gondolatait általában nem fogadták el kortársai, és a kontinens-

vándorlással kapcsolatos majd két évtizedes munkássága ridegen elutasító szakmai légkörben zajlott. Reményem szerint ez a kép árnyaltabb lesz, ha elfogulatlanul áttekintjük a tényeket és figyelembe vesszük az egyik legfelkészültebb tudománytörténész érvelését (Oreskes 1999).

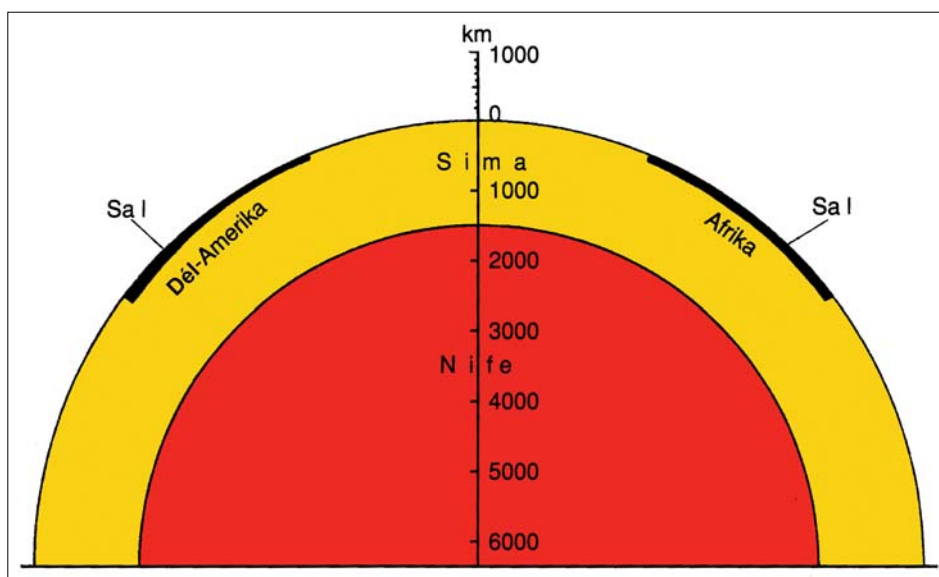
Ezt követően bemutatom, hogy a kontinensek és az óceáni aljzat mozgását összekapcsoló lemeztectonikai elmélet, bár pontosan számba vette a lehetséges hajtóerőket, mégis adós maradt a lemezmozgás dinamikájának megalkotásával. Elgondolkozunk azon a paradox helyzeten, hogy ennek ellenére a lemeztectonika mégis általánosan elfogadottá vált.

A cikk befejező részét az elmúlt évtizedekben született új globális földfizikai eredmények és számítógépes modellszámítások rövid bemutatásának szenteltem. Látni fogjuk, hogy az óriási fejlődés ellenére még mindig rengeteg bizonytalanság gátolja, hogy a jelen és múlt lemeztectonikai folyamatait a köpenyáramlások történetével összekapcsoló új globális geodinamikai elmélet megszülessen.

A bizonytalanságok feloldása új megfigyeléseket és magas szintű kutatómunkát kíván meg. E mögött valószínűleg nem egyetlen zseniális Newton, hanem számos kiemelkedő szakember fog állni, akik olyan intézményekben dolgoznak szerte a világban, ahol a motiváció, az inspiráció és a kutatás pénzügyi keretei szerencsésen találkoznak. Tudatában kell lennünk ennek a kivételes tudománytörténeti helyzetnek, mert ha az Akadémia és az egyetemek céltudatosan cselekednek, akkor van esély arra, hogy a fiatal magyar földtudósok legjobbjai is részt vehessenek ebben a nagyszerű munkában.

### Wegener elképzelései a hajtóerőről

Wegener szerint a kontinensek belemerülnek és úsznak az óceánok aljzatáig felemelkedő földköpenyben, amelyet Suess után „sima” övnek vagy egyszerűen magmának nevezett (1. ábra). Három lehetséges hajtóerőn gondolkodott, amelyek valamilyen mértékben hozzájárulnak a kontinensek mozgásához: ezek a „Polflucht”, az árapályúsúlódás és a köpenyáramlások voltak.

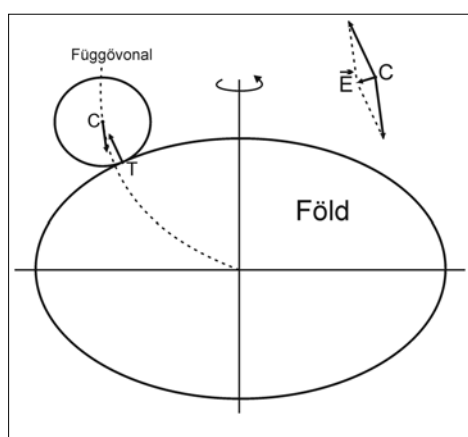


**1. ábra** Wegener elképzelése a Föld szerkezetéről (Wegener 1912a–b, eredeti ábra kiszínezve). A valóságosnál nagyobbak képzelt földmag (Nife) felett húzó bazaltos összetételű és viszkózus „Sima” földhéjban (földköpenyben) úsznak a kontinensek (Sal).

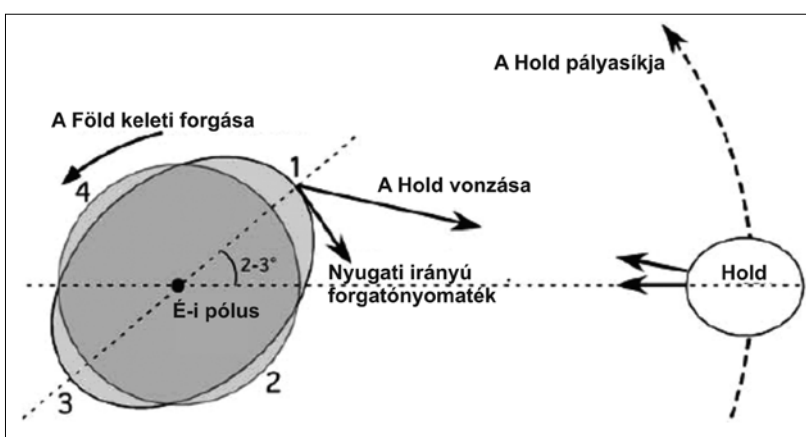
A *Polflucht* a Föld forgástengelyétől az egyenlítő felé „röpitő” erőt jelenti, és érdekessége az, hogy Eötvös Loránd (1905) fedezte fel, amire Wegener többször is hivatkozott. Fontos rögtön leszögeznünk, hogy ez nem azonos az általánosan ismert Eötvös-effektussal, amely a keletre vagy nyugatra mozgó testek súlyának csökkenését, ill. növekedését állapítja meg, és amelyet a geofizikában mozgó eszközön (pl. hajón) végzett gravitációs mérések korrekciói során alkalmaznak.

Az Eötvös-erő létrejöttét a 2. ábra magyarázza. Ennek lényege, hogy a Föld elvi alakja a tengely körüli forgás miatt ellipszoid, és ennek megfelelő a potenciáltér is. Ezért a

potenciálfelületre merőleges függővonalak a felszíntől a tömegközéppont felé haladva nem egy gömbhöz tartozó sugarak, hanem a sarkok felől nézve konkáv görbék (a pólusok és az egyenlítő kivételével). Ezért a Föld felszínén elképzelt gömb középpontjában (C) ható súlyerő és a gömb talpánál (T) azt kompenzáló ellenerő nem pontosan ellentétes irányú, hanem  $180^\circ$ -nál valamivel kisebb szöget zárnak be. Ezért a két erő eredője nem nulla, hanem az egyenlítő felé mutató kis erőt ad (2. ábra). Ez az Eötvös-erő, amely kétségtelenül hat minden kontinensre, sőt az asztenoszféra úszó litoszféralemezekre is. Wegener lehetségesnek gondolta, hogy Pangea szétszakadása után délről észak felé sodró-



**2. ábra** Az Eötvös-erő (*Polflucht*) kialakulása. A Föld lapultsága miatt az ekvipotenciális felületekre merőleges függővonalak a forgástengely felől nézve konkáv görbék. Ezért egy véges kiterjedésű test tömegközéppontjára (C) ható súlyerő és az ezzel egyenlő nagyságú, de a talpon (T) ható ellenerő nem esik egy egyenesbe, és eredőjük (E) az egyenlítő felé húzó erőt ad.

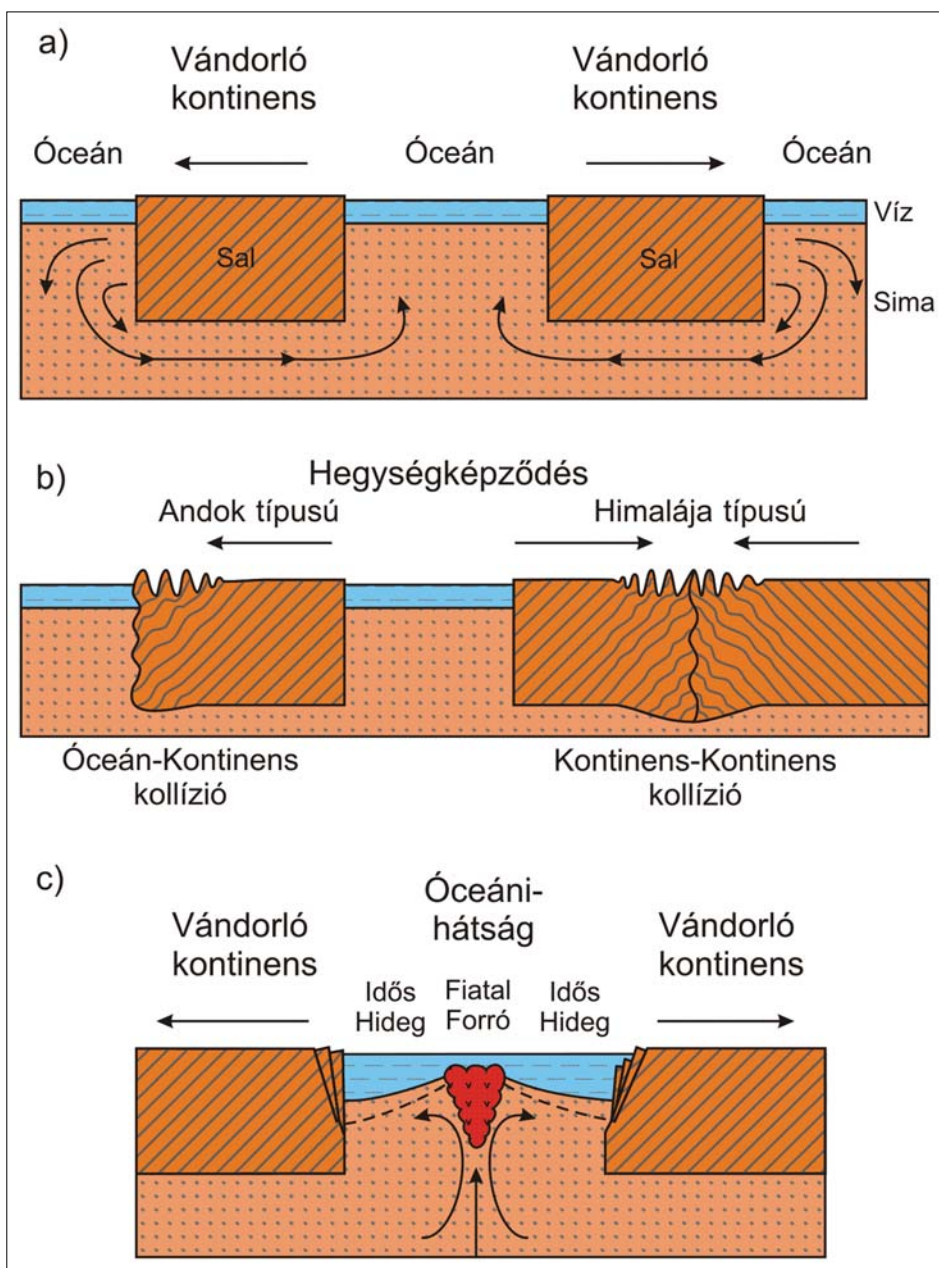


**3. ábra** A nyugati-drift kialakulása a Hold árapályának hatására. A holdi árapálydudor a teljes Föld viszkoelasztikus viselkedése miatt nem mutat pontosan a két égitest tömegközéppontját összekötő egyenes irányába, hanem 2–3 fokkal „túlforg” a Földdel. A túlforgott dudorra ható visszahúzó erő forgatónyomatéka mozgatja a litoszférát nyugatra a földköpenyhez képest.

dó kontinenseket (Afrika, Dél-Amerika, Ausztrália és India) ez az erő segítette.

Az *árapályúrlódás* pontos égi mechanikai leírása már a 19. század végére megszületett, és Wegener erre hivatkozva vetette fel a kontinensek nyugati irányú driftjét. Ennek lényegét a 3. ábra mutatja. Eszerint a Hold által okozott árapálydudor tengelye nem esik pontosan egybe a Föld–Hold tömegközéppontját összekötő egyenessel, hanem 2–3° szöggel „előreszalad” a keletre forgó Földdel. Ennek oka az, hogy a szilárd Föld, a hidroszféra és az atmoszféra együttes rendszere nem tökéletesen rugalmas, hanem viszkoelasztikus testként viselkedik. Ennek pedig az a következménye, hogy az árapálydudorra folyamatosan visszafelé húzó, azaz nyugati irányú forgatónyomatékként hat, ami a Föld–Hold rendszer kialakulása óta lassítja a Föld forgását, azaz növeli a nap hosszát. Témánk szempontjából most fontosabb, hogy ez a forgatónyomaték létrehozhatja a kontinensek nyugati irányú, lassú forgását a földköpenyhez képest, amelyet *nyugati driftnek* hívunk. Wegener úgy gondolta, hogy az Atlanti-óceán kinyílását eredményezhette Észak- és Dél-Amerika nyugati irányú driftje, ha az nagyobb mértékű volt, mint Európa és Afrika mozgása.

Végül számolt azzal is, hogy a radioaktív hőtermelés a folyadékszerű „sima” földövben *konvektív áramlásokat* gerjeszt, ami kézenfekvő következtetés egy, a légkörfizikában otthonos meteorológus részéről. Úgy gondolta, hogy a



4. ábra | Wegener elképzelése a kontinensek vándorlásáról (Wegener leírásai nyomán született, nem eredeti ábrásor). a) A kontinensek (sal) hajók módjára úsznak a folyadékszerű köpenyanyagban (sima), b) a kontinensek frontján, vagy ütköző kontinensek között alakulnak ki a lánchegységek, c) a köpenyben feláramlások valószínűleg a távolodó kontinensek között (Atlanti-óceáni-hátság) alakulnak ki.

felfelé irányuló áramlás a szétszakadó kontinensek között, azaz az Atlanti-óceán alatt van, és valószínűleg ez hozza létre az óceánközépi-hátságot. A nagy lánchegységek kialakulása pedig a mozgó kontinensek frontján vagy az ütköző lemezek között történik meg (4a–c. ábra).

Wegener tisztában volt azzal, hogy az általa lehetségesnek tartott erőhatások nagyon kicsik, ezért a „sima” folyadékszerűségét (azaz teljesen viszkózus viselkedését) feltételezte. Ez azért jó elképzelés, mert viszkózus folyadékokban kis erők is képesek arányosan piciny elmozdulások létrehozására, amelyek hosszú geológiai idők alatt naggyá növekedhetnek. A hosszabb időskálán folyásra képes szilárd anyagra ismert példaként a szurkot vagy az üveget hozta fel. Úgy érvelt, hogy a „sima” is ilyen, mert az izosztikus eredetű kéregmozgások (pl. Skandinávia és a Kanadai-pajzs jégkorszak utáni emelkedése) nem történhetnének meg mélybeni anyagáramlások nélkül.

### A földköpeny ridegsége vagy képlékenysége: britek ellentétes nézetei

A nem viszkózus, hanem tökéletesen szilárd és rideg viselkedésű földköpeny markáns képviselője és ily módon a kontinensvándorlás legélesebb kritikusa az angol Harold Jeffreys (1891–1989) volt. Igazi cambridge-i szellem: matematikus, csillagász és geofizikus egy személyben, aki a tudományos tevékenységéért 1953-ban lovagi rangot kapott. Számos valószínűségelméleti munkát publikált, és komoly eredményeket ér el a Naprendszer kialakulásának vizsgálatában is. Geofizikában a Föld belső szerkezetének szeizmológiai megismerésében játszott vezető szerepet. Nevéhez fűződik annak kimutatása, hogy a mag külső gömbhéja folyadékszerű, mert a nyíró hullámok nem tudnak benne haladni. Ezen túlmenően azonban szeizmológiai eredmények azt mutatták, hogy a Föld többi része szilárd halmazállapotú, mert a kéregben, a köpenyben és a belső magban is a mélységgel egyre növekvő sebességgel haladnak a nyomási (P) és a nyíró (S) hullámok is. Ennek alapján Jeffreys számára kétségtelen volt az, hogy a Föld anyagai annyira kemények, hogy minden erőhatást rugalmas deformációval kompenzáljanak. Jó matematikus lévén kiszámolta azt is, hogy a Wegener által javasolt erők mindegyike több nagyságrenddel kisebb feszültségeket eredményez, mint a köpeny anyagának szakítási szilárdsága. Tehát ezek az erők hatástalanok a köpenybeli diszlokációk létrehozásában.

Egyébként is szerinte a Föld ősi alakulat, és minden kezdeti hőmérséklet- és nyomáskülönbség kiegyenlítődése már régen megtörtént, s az így létrejött statikus térben a kontinensek vándorlása és a köpeny anyagainak áramlása fizikai képtelenség. Mindezt Jeffreys (1924) „A Föld eredete, története és fizikai felépítése” c. alapvető (néhány korabeli értékelő szerint „halhatatlan”) könyvében fejtette ki megcáfolhatatlannak tűnő logikával. Ez a könyv változatlan koncepcióval még további hat kiadást ért meg, és az utolsó kettő már a lemeztektonika általános elfogadása után jelent meg (1970 és 1976). De már ezt jóval megelőzően, 1926-ban

B. Gutenberg kimutatta, hogy a köpeny felső részén (100–400 km mélységtartományban) a P, még inkább az S hullámok sebessége nem növekedik, hanem stagnál vagy csökken. Az általa „csökkent sebességű zónának” nevezett tartományt amerikai szerzők hamarosan „asztenoszféranak” kezdték hívni. Ennek ellenére ez a szigorú ember hajthatatlan maradt: hosszú élete során semmit nem felejtett, semmit nem tanult a Föld dinamikájáról.

Hozzá kell tenni, hogy már fiatal emberként kitűnt sajátos egyéniségével és stílusával. Bailey Willis (1857–1949), a korabeli amerikai geológia és szeizmológia egyik vezető szaktekintélye, aki szintén elutasította a kontinensvándorlási elméletet, eszmei társat keresett benne. Találkozásuk után így jellemezte Jeffreyst: „... egyáltalán nem olyan ember, mint akire számítottam: nem magas, hanem alacsony, nem egy szívós agár, hanem kövérkés, hétköznapi figura. Nem méltóságteljes és jó modorú, hanem félszeg és kisiskolás, nem nyílt és magabiztos, hanem önhitt. Nem kemény harcos, hanem sunyi ellenző. Amikor vitás kérdéseket akartam vele megbeszélni, egyszer sem nézett a szemembe, és nem adott választ felvetéseimre. Azt mondják róla, hogy kiváló matematikus. Nos, szerintem az ördög is az, aki ha bizonyítaná a hamisról, hogy igaz, azt kellemesen tenné, mint egy úriember.” Willisben felrémlt a szintén cambridge-i Kelvin emléke is, midőn Dalynak írt levelében így summázta angliai tapasztalatait: „Óvakodj a matematikusoktól.”

A Dublinben dolgozó ír John Joly (1857–1933) nem volt matematikus, hanem olyan fizikus, akinek kutatásait nagymértékben meghatározta a természetes radioaktivitás felfedezése és ennek következményei a Föld fejlődésére. Ugyanez a kérdés foglalkoztatta a brit Arthur Holmest (1890–1965) is, aki munkásságának nagy részét Durham és Edinburgh egyetemén fejtette ki.

Joly tudományos működésének kezdetei ahhoz az izgalmas időszakhoz kapcsolódtak, amikor még Kelvin oktatta ki a geológusokat a Nap és a Föld hőjének végességéről, ami indokolt volt, hiszen nagyrésztük még a 19. század második felében is J. Hutton (1726–1797) uniformitarista nézetével szimpatizáltak („Nincs nyoma a kezdetnek, és nincs jele a végnek”). Kelvinnek azonban sikerült átesnie a ló túloldalarra, mikor egy leegyszerűsített földmodell alapján (homogén paraméterter és konduktív hőszállítással hűlő gömb feltételezése) a Föld korára a geológia ismeretekkel összeegyeztethetetlen kis értéket (96 millió évet, majd második nekifutásra már csak 30 millió évet) számolt. A kialakult éles vitát Joly újszerű kormeghatározással kívánta feloldani. Azt feltételezte, hogy a tengervíz sótartalma a szárazföldi kőzetek lepusztulása és behordása következtében alakult ki. Rejtélyes módon ez a számolás is 90 millió év körüli értéket adott.

A radioaktivitás felfedezése azonban teljesen átalakította Joly világnézetét és kutatási területét. Megértette, hogy mind a saját, mind Kelvin kormeghatározása azért hibás, mert rossz határfeltételeken alapult. A radioaktív bomlás törvényének megismerése után Rutherforddal együttműködésben végzett méréssel devon korú kőzetekre nagy meglepetésükre 400 millió éves kort kaptak (Joly, Rutherford 1913).

Az események ezután drámai fordulatot vettek. Még abban az évben megjelent az akkor még csak 23 éves ifjú títán, Arthur Holmes első könyve („The age of the Earth”), amelyben radioaktív és más kormeghatározások alapján megalotta az első abszolút korszakát, és a Föld korára 1600 millió évet valószínűsített (Holmes 1913). Végre meglett a helyes nagyságrend, amelyet a következő évtizedek mérései pontosítottak, és az űrkorszak eredményei tették világossá, hogy a 4560 millió év nemcsak a Föld, hanem az egész Naprendszer kialakulásának is a kora.

Holmes kutatásaival párhuzamosan Joly (1925) új koncepciót dolgozott ki a Föld fejlődésére. Ennek a lényege az volt, hogy a Föld nagytektonikai folyamataihoz a radioaktív hőtermelés biztosítja az energiát. A hegységképződések és a nagy bazaltömlések (mai terminológiával „forró folt” vulkanizmus) földtani korai alapján megfigyelt ciklicitást úgy magyarázta, hogy a radioaktív elemek által termelt hő fokozatosan akumulálódik olyan mértékben, hogy az időről-időre (100–200 millió évenként) képes megolvasztani a földköpeny jelentős részét. Ezekben az időszakokban a bazaltos köpenyanyag áramlása, felszínre ömlése és kontinensek vándorlása akadálytalanul megtörténhet. A Jeffreysnek és híveinek pedig megüzente, hogy gondolkodásuk az aktualizmus elvének a primitív alkalmazása, mert a Föld mai állapotáról hiszik azt, hogy az a múltban is ilyen volt.

Holmesra nagy hatással volt Joly érvelése. Teljes mértékben egyetértett azzal az állásponttal, hogy a földköpeny története ciklikusan bekövetkező felfűtések és tektonikai paroxizmusok után következő hűlési időszakok váltakozásának a folyamata. A kontinensek vándorlásának hajtómotorját ő is az időszakosan felpörgő köpenyáramlásokban látta. Az addigi eredmények alapján Holmes (1928) indokoltnak tartotta kijelenteni „... meggyőző bizonyítékaink vannak, ame-

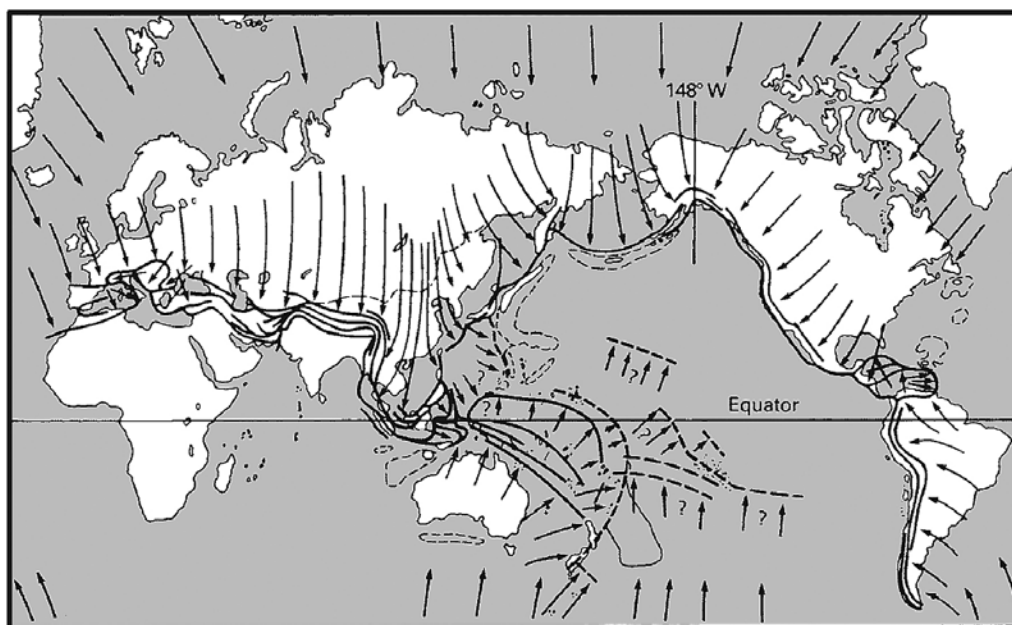
lyek a kontinensek egykori vándorlására mutatnak, mégpedig úgy, ahogy azt Wegener javasolta...”

Az elméletet szabatos megalapozását illetően pedig idézte Emile Argand (1879–1940) híres mondását: „Mi nem szándékozunk a tektonikát visszavezetni a fizikára, ez a jövő feladata.”

### Wegenert támogató amerikai kortársak és egy dél-afrikai

Frank B. Taylor (1860–1938) az Amerikai Földtani szolgálat (USGS) glaciológiai osztályán dolgozott, de érdeklődése szélesebb körű volt, mert a Harvard Egyetemen a geológia mellett asztronómiát is tanult. Wegenert megelőzve 1910-ben publikálta legérdekesebb munkáját, mely szerint az alpi–himalájai–melanéziai és a cirkum-pacifikus hegységrendszert kompresszió eredményezte, amely a kontinenseknek az egyenlítő felé való mozgása következtében alakult ki. Az 5. ábrán látható eredeti rajzon az ívelt nyilak a kontinensek mozgásának elképzelt irányát és nagyságát mutatják. Erre a meglepően újszerű elképzelésre csak akkor figyeltek fel az amerikaiak, amikor Wegener hivatkozott rá, sőt magyarázkodott, hogy az ő hasonló következtetése Taylortól függetlenül született. Erre a magyarázkodásra szükség is volt, mert az 1920-as években az amerikaiak Taylor–Wegener-elméletről kezdtek beszélni. Wegener (1922, 1929) erre úgy reagált, hogy hangsúlyozta: a kontinensek egyenlítő felé való mozgása az általa javasolt *Polflucht* legkézenfekvőbb megnyilvánulása.

De mekkora is ez az Eötvös-erő? Meglepő módon az első érdemi számolást 1921-ben W. Lambert (1879–1968), az USGS geodétája végezte el. Azt az egyszerű esetet számolta



5. ábra | Taylor (1910) úttörő elképzelése arról, hogy az Eurázsiai- és Cirkum-Pacifikus-lánchegységet a kontinensek egyenlítő felé való mozgása hozta létre. Az ábrán látható nyilak a mozgás irányát és mértékét is szemléltetik.



ki, hogy egy a  $30^\circ$  északi szélességen lévő, 1 km átmérőjű és kéregsűrűségű gömbre milyen gördítő erő hat (2. ábra). Arra jutott, hogy az egységnyi tömegre ható erő ezen a szélességi körön  $11 \cdot 10^{-6}$  g, ami megfelel kb. 10 mgalnak. Amennyiben a gömb súrlódásmentesen tud mozogni, akkor ennek hatására gyorsuló mozgással 14 és fél nap alatt jut el az egyenlítőre, ami 4–5 m/s átlagsebességet jelent. Úgy vélte, hogy ez az egyszerű számolás megmutatja, hogy a kontinensekre állandóan hat ez a kis erő, és ha a köpeny anyaga teljesen folyadékszerű, akkor ez is képes geológiai idők alatt a Taylor és Wegener által elképzelt ezer km nagyságrendű mozgásokat előidézni (Lambert 1921).

Lambert legfőbb támogatója egy igazi amerikai „nagyágyú”, Reginald A. Daly (1871–1957) volt. Ontarióban született, és a Torontói Egyetem elvégzése után a Harvardon folytatta tanulmányait. Ezt követően két éves ösztöndíjjal Heidelbergben és Párizsban sajátította el a németet és a franciát, valamint a geológia európai nyelvét. 1901 és 1907 között térképező geológus volt Kanadában, majd a fizikai geológia professzorává nevezték ki a Massachusetts Institute of Technologyba. Innét már csak egyetlen helyre lehetett továbblépni: 1912-től a Harvard Egyetemen lett a geológia professzora.

Daly szűkebb szakterülete a magmás kőzettan volt, de olyan széles körű ismeretekkel rendelkezett, hogy legnagyobb erényét a geológiai folyamatok sokoldalú megközelítése és lényegi megértése jelentette. Sokat idézett mondása szerint (Oreskes 1999): „... a Harvard Egyetem fő célja nem csupán ismeretek oktatása valamilyen szakterületen, hanem

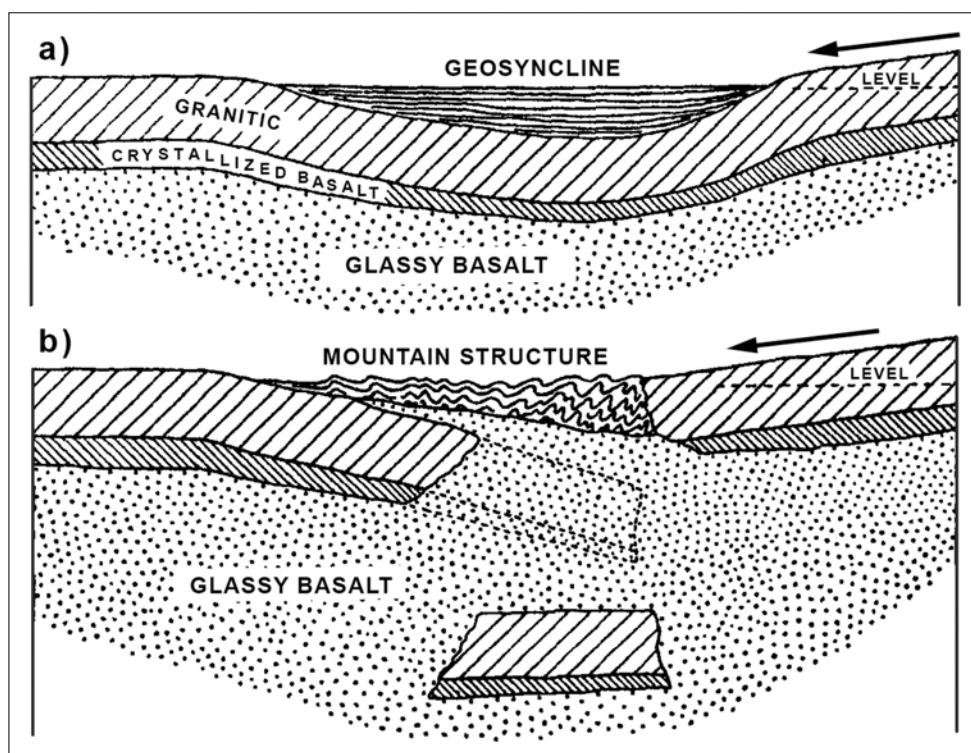
a megértés képességének a megtanítása. A megértés növekedése a képzelet erősödését jelenti. Ezúton a geológia elsőrangú kulturális képzés az egyetemen.”

A megértés vágya hajtotta, hogy mechanizmust találjon a kontinesvándorlásra is. Taylor munkáját ismerte, és Wegener 1912-es cikkeit eredetiben olvasta. Ezekről ösztönözve a hajtóerőre négy lehetőséget tartott elképzelhetőnek:

- az árapálysúrlódás miatt fellépő nyugati driftet,
- a geoszinklinálisokhoz kapcsolódó mélyáramlásokat,
- a Föld lapultsága miatti Eötvös-erőt és
- azt a feszültséget, amely az orogenezis során feltolódott kéregdarabokban kialakul.

Lamberthez írt levelében azonban kinyilvánította, hogy egyik erőt sem véli elegendőnek (Oreskes 1999). A megfelelő hajtóerő megtalálására csak akkor lát reményt, ha majd sokkal többet tudunk a földi anyagok szilárdságáról és viszkozitásáról (mai szóhasználattal a kőzetek reológiai-járól).

1922-ben azonban fontos esemény történt. A Carnegie Intézet támogatásával kilenc hónapos expedícióban vett részt Dél-Afrikában a Bushveld magmás komplexum tanulmányozása céljából F. Wright (1877–1953) petrológus társaságában. Az expedícióhoz csatlakozott G. Molengraaf (1860–1942) delfti professzor és Dél-Afrika vezető geológusa, Alexander du Toit (1878–1948) is. Holland Kelet-India (Indonézia) vezető geológusaként Molengraaf meggyőződéses híve volt a kontinesvándorlás elméletének, és úgy gondolta, hogy a Jáva-árok és az Indonéz-szigetív kialakulásáért



6. ábra | Daly (1926) elképzelése a geoszinklinálisokhoz kapcsolódó kéreggyökér kiszakadásáról, a folyós bazaltban (*glassy basalt*) való lesüllyedéséről, a peremi részek közeledéséről (kontinesvándorlás) és az üledékgyűjtőben lévő kőzetek felgyűrődéséről.

két kontinens (Ausztrália és Szunda-föld) közeledése és ütközése a felelős.

Alexander du Toit pedig annak a késő karbon – középső jura korú Karoo Formációnak volt legjobb ismerője, amelynek a déli kontinenseken való általános elterjedése alapján definiálta Suess Gondwanát. Wegener pedig a kontinensek egykori összetarozását bizonyítandó, az ebben a formációban lévő permi jégkorszaki maradványok (pl. tillitek) és a Glossopteris páfrányok déli kontinenseken való általános elterjedésére hivatkozott legtöbbször. A dél-afrikai feltárások megismerése és az éjszakákba nyúló számtalan eszme-csere hatására megtörtént Daly és Wright pálfordulása; a kontinensvándorlás meggyőződéses híveként tértek vissza az Egyesült Államokba (Oreskes 1999).

Azonnal javaslatot tettek a Carnegie Intézet tudományos tanácsának, hogy anyagilag támogassa du Toit kiküldetését Dél-Amerikába, az ottani Karoo Formációval rokonított képződmények részletes leírására. Az amerikaiak javaslatukban du Toit-t úgy jellemezték, hogy ő a világ legjobb térképező geológusa. Valóban, 1923-ban öt hónapi terepmunka után du Toit térképi felvételekkel, hatalmas kőzetanyaggal és ősmaradványokkal megrakodva tért haza. Ennek feldolgozása és a jelentés elkészítése további két évet vett igénybe. A Carnegie Intézet 1927-ben jelentette meg du Toit monográfiáját „Dél-Amerika és Dél-Afrika geológiai összehasonlítása” címmel.

Az amerikai tudományos módszertani elvárásoknak megfelelően (és szöges ellentétben Wegener stílusával) a monográfia döntő része a dél-amerikai megfigyelések részletes és komplex leírását tartalmazta, amelyet semmiféle tudományos prekonceptió nem zavart meg. Csak ezután következett az értékelés, amelynek a lényege a két kontinensen lévő karbon–jura képződmények rétegtani, őslénytani, közettani és szerkezetföldtani összevetése volt. A hasonlóságok, sőt azonosságok alapján dokumentált tényé vált a két kontinens késő karbontól kezdődő összetartozása és az óriási bazaltvulkanizmussal kísért középső jura kori szétszakadása. Végül következtetése az volt, hogy a geológiai megfigyelések megkérdőjelezhetetlenek, függetlenül attól, hogy van-e mechanizmus, vagy sem a kontinensek vándorlására.

Visszatérve Dalyra, ő sem tétlenkedett pálfordulása után. 1926-ban megjelent az „A mobilis Föld” c. könyve, amelynek mottója Galilei híres mondása („E pur si muove!”) volt. Fő témája pedig az, hogy korábbi gondolatát a geoszinklinálisokhoz kapcsolódó mélyáramlásokról részletesen kismunkálta (6. ábra). Eszerint a geoszinklinálisok tengelyében folyamatosan felhalmozódó üledéktömeg hatására betüremkedik a kéreg, és az alatta lévő folyadékszerű bazaltanyagot (az ábrán „glassy basalts”) a peremek felé nyomja. Ennek hatására a peremek megemelkednek és folyamatosan biztosítják a közeli lehordási területet. A folyamat előrehaladtával a geoszinklinális alatt egyre mélyebbre süllyedő kéreg hőmérséklete növekedik, ennek gyökere destabilizálódik, végül kiszakad és lesüllyed. Az így keletkező szabad térbe az emelt helyzetű peremi kéregrészt nyomul be gravitációs erő hatására, és ennek során felgyüri a geoszinklinálisokban felhalmozódott üledékeket. Ennek a folyamat-

nak a többszöri ismétlődése hozza létre a hegységeket, a geoszinklinálisokba fokozatosan becsúszó kéreg pedig megteremt a kontinensek vándorlásának a lehetőségét.

Nem vagyok – remélem – nagyon elfogult, ha ezt a modellt kísértetiesen hasonlóan találom a kollíziós zónák mai értelmezéséhez. Daly üzenete egyértelmű volt: „Sok geológus bizarrnak találja a kontinensvándorlás elméletét, mégis egyre több szakember győződött meg már arról, hogy komolyan kell vele foglalkozni, mert megteremt a hegységképződés elméletének valódi alapjait... Egyetlen művelt ember sem követheti el azt a hibát, hogy ne foglalkoztassa ez a forradalmi koncepció.”

Az amerikai geodéták nem is követték el ezt a hibát. William Bowie (1872–1940) az Amerikai Földtani Szolgálat (USGS) geodéziai osztályának a vezetője volt. Két periódusban az Amerikai Geofizikusok Egyesülete (AGU) elnökének választották, és jelentős szerepet játszott a Nemzetközi Geodézia és Geofizikai Unió (IUGG) megalakításában és korai irányításában. Komoly nemzetközi előkészítés után a New York Times hasábjain (1925. szept. 26-án) bejelentette: „... a világ csillagászai és geodétái elhatározták, hogy pontos tesztmérésekkel ellenőrzik Wegener hipotézisét...”

Az elképzelés az volt, hogy megismételt csillagászati helymeghatározásokkal és világméretű háromszögelési hálózatban rádióhullámok futási idejének pontos meghatározásával a kontinensek elmozdulása közvetlenül mérhető. Először 1922-ben, Rómában a Nemzetközi Asztronómiai Unió (IAU) nagygyűlésén foglalkoztak a mérés tervével, majd az IUGG 1924-es madridi ülésén határozatot is hoztak egy világméretű monitorozó hálózat létesítéséről. Végül az általános támogatás ellenére a világméretű teszt mégis elmaradt, mert a részletes hibaszámítások azt mutatták, hogy a rendelkezésre álló mérőeszközök pontossága néhány méter/év mozgási sebesség meghatározására még nem elegendő (Oreskes 1999).

### Vening Meinesz gravitációs mérései a tenger alatt

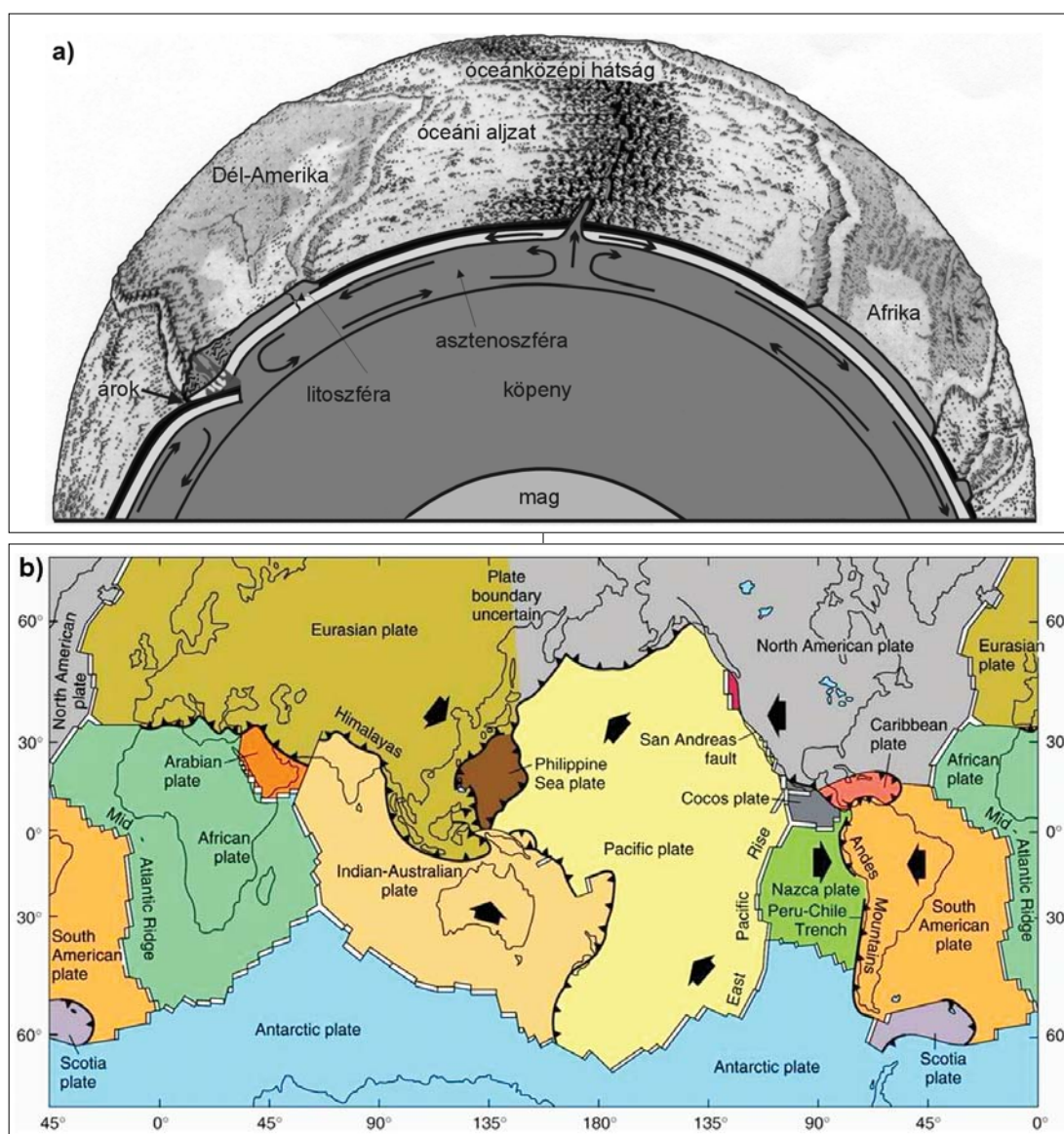
Wegener ellentmondásainak feloldását, azaz az óceánokról rendelkezésre álló ismeretek bővülése felé vezető utat egy holland „óriás” követte ki az 1920–30-as években. Felix Vening Meinesz (1887–1966) több mint két méter magas, holland mérnök volt. A nemzeti geodézia szolgálatnál dolgozott, és arról álmodozott, hogy a szárazföldi gravitációs méréseket ki kellene terjeszteni a tengeri területekre is. Ez a lehetetlen vállalkozás tipikus esetének látszott, ugyanis a gravitációs gyorsulás meghatározására szárazföldön precíziós ingákat használtak. Ezek nagy érzékenységu és rögzített helyzetű eszközök voltak, mert a lengésidő századmásodperces pontosságú meghatározására volt szükség. Vening Meinesz csodát tett, amikor elkészítette speciális kettős ingáját, amelyik működőképesnek mutatkozott enyhén ingatag alaplapon is. A következő nagyvonalú lépése az volt, amikor meggyőzte a holland haditengerészetet, hogy bocsássák rendelkezésére egyik tengeralattjárójukat. 1923 és

1927 között körbehajózták a Földet és eközben több száz tengeralatti mérést végzett ez a hatalmas ember, aki alig fért be egy tengeralattjáróba.

Tudni kell, hogy kontinentális területeken az izosztikus kompenzáció miatt a különböző nagyszerkezeti formákhoz csak kicsi,  $\pm 10\text{--}30$  mgal értékű gravitációs anomáliák kapcsolódnak. Ezt tapasztalták az óceáni mérések során is, kivéve a mélytengeri Jáva-árok területét. Meglepetésük leírhatatlan volt, mert az árok felett a vártak többszöröse, akár  $-120$  vagy  $-140$  mgal értékre csökkenő gravitációs anomáliásáv volt térképezhető. Vening Meinesz fejében azonnal megszületett a mérész értelmezés: a mélytengeri árok mentén, kompressziós eredetű kéregbetüremkedés történik, amely a Molengraaf és Wegener által javasolt kontinensvándorlás és -ütközés következménye. Nem volt véletlen, hogy

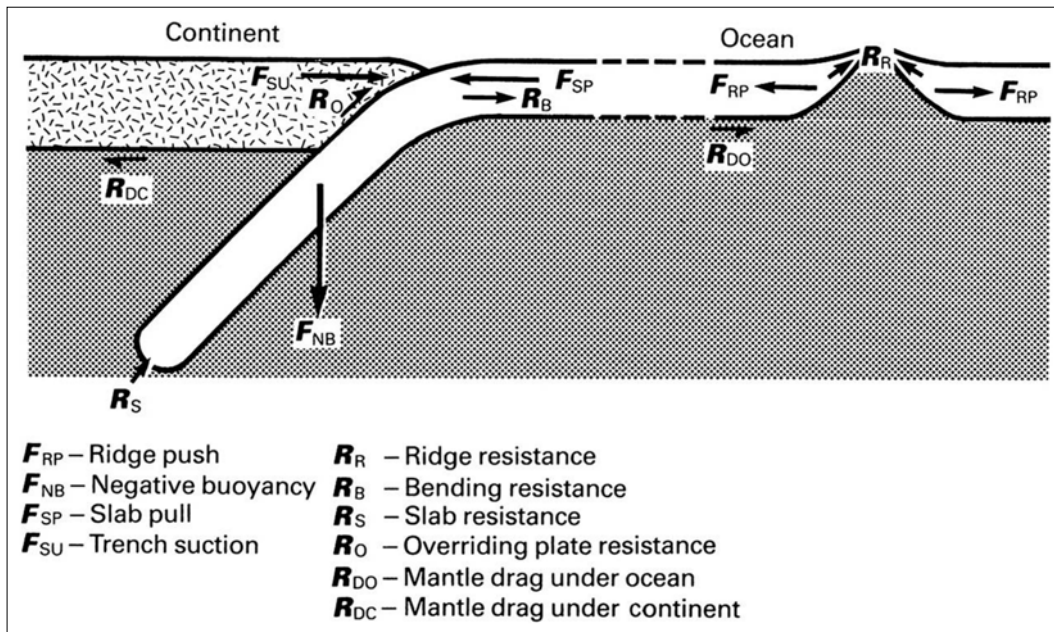
a Carnegie Intézet igazgatója du Toit jelentésének egyik első példányát azonnal elküldte a tengeren mérő Vening Meinesznek (Oreskes 1999).

Az amerikai geodéták rögtön felismerték a tengeri mérések korszakos jelentőségét. Ismét a Carnegie Intézettől pénzt, a hadseregtől pedig tengeralattjárót szereztek Vening Meinesz számára, hogy gravitációs méréseket végezzen a Karib-árok mentén is. 1932 és 1937 között a méréseket végrehajtották, és hasonló értékű és lefutású negatív anomáliásávot észleltek. A kutatásban résztvevő fiatal amerikai szakemberek Harry Hess (1906–1969) és Maurice Ewing (1906–1974) voltak, akik miután tovább folytatták az óceánok geofizikai kutatását (a II. világháború alatt az Amerikai Haditengerészet kötelékében) az 1960-as években a lemeztektonika megszületésénél vezető szerepet játszottak.



**7. ábra** | A lemezek határán végbemenő folyamatok ábrázolása mai földmodellen (a), és a lemezegységek térképe a relatív mozgást illusztráló nyilakkal (b). Az egyszerű cellás áramlási kép (hátságoknál feláramlás, szubdukciós zónáknál leáramlás) ma már meghaladott elképzelés. Egyúttal sokkal több ismeretünk van a szubdukált lemez alsó köpenybe való lehatolásáról, valamint a maghatárról felemelkedő köpenyoszlopokról is (Horváth 2006).





8. ábra | A lemezekre ható hajtó- ( $F$ ) és fékezőerők ( $R$ ) bemutatása (Forsyth, Uyeda 1975). Részletezés a szövegben.

Hess már a gravitációs mérések értelmezésénél is Veining Meinesz legjobb munkatársának bizonyult. Mestere gondolatmenetét követve megalkotta az árkoknál betüremkedő kéreg modelljét (Hess 1938). Ezzel véglegesen leszámoltak a tradicionális amerikai és Jeffreys-féle mítosszal, miszerint az óceánok ősidők óta stabil területek. Ugyanakkor túlléptek Wegeneren is, hiszen kiderült, hogy a „sima” nem passzív magmatenger, amelyben a kontinensek úsznak, hanem az óceáni kéreg és köpeny is mozog, ütközik a kontinentális szigetívekkel, és alájuk gyűrődik. Tehát az óceáni kéreg is résztvevője a globális geodinamikai rendszernek.

## A lemeztectonikától napjainkig

A lemeztectonika megszületésének dátumaként az 1962-es évet tekintjük, mert Harry Hess (aki élete végéig az Amerikai Haditengerészet főtisztja maradt) ekkor ismertette az óceáni aljzat szétterülésének (*ocean-floor spreading*) elméletét (Hess 1962). Ezzel egy csapásra összeállt a kép: a kontinensek nem vándorló hajók az óceáni köpenyben. Hanem a litoszféra hátán utazó, gyakran óceáni területekhez kapcsolódó lemezek részei, amelyek a részlegesen olvadt asztenoszféraán mozognak (7a–b. ábra). Ekkor szinte mindenki – még a kontinensvándorlás egykori makacs ellenzői is, Jeffreys kivételével – azonnal elfogadták a viharos gyorsasággal kibontakozó lemeztectonikai elméletet.

A „miért”-re a fentiek fényében könnyen választ adhatunk. Azért, mert Wegener kontinensvándorlási elmélete fokozatosan átformálta a földtudományi gondolkodást, és amint elméletének hiányzó láncszeme (ti., mit tesz az óceáni aljzat?) megoldódott, mindenki számára világossá vált, hogy megszületett a Föld külső héjának egységes kinematikai leírása, a lemeztectonikai elmélet.

És mit tudunk meg a lemezmozgás dinamikájáról? Már a korai munkák is jelentős előrelépést tettek lehetővé, a lehetséges hajtóerők számbavételével és az erők egymáshoz viszonyított nagyságának a meghatározásával (Forsyth, Uyeda 1975). A 8. ábra a lemezmozgást hajtó ( $F$ ) és fékező ( $R$ ) erőket foglalja össze.

Négy hajtóerő létezik:

- $F_{RP}$  a „hátságtolás”, amelyet a hátság alatti kiemelt asztenoszféraablatozatról gravitáció hatására lecsúszó litoszféra kelt a hátság tengelyére merőleges irányítottasággal;
- $F_{NB}$  az „alábukott lemez húzása”, amely szintén gravitációs erő, és azért lép fel, mert a szubdukálódott hideg litoszféralemez nagyobb sűrűségű, mint az olvadt asztenoszféra;
- $F_{SP}$  és  $F_{SU}$  az „árokshívás”, amelyek az alátolódo lemez által gerjesztett, köpenyáramlás árok felé mutató húzó hatást generál;

Hat fékező erő létezik, amelyekből öt a súrlódás következménye:

- $R_R$  a hátságról lecsúszó új óceáni lemez és az asztenoszféra közötti súrlódási erő;
- $R_B$  az a feszültség, amely az alátolódo litoszféralemez meghajlításához szükséges;
- $R_S$  a litoszféralemez alábukása során a felső köpenyben a mélységgel növekvő viszkozitású asztenoszféra súrlódási ellenállása;
- $R_O$  a kontinentális és az alátolódo óceáni lemez közötti súrlódás, amelyik a katasztrófális földrengések kipattanási helyén akár erős csatolás is lehet;
- $R_{DO}$  és  $R_{DC}$  az óceáni lemez, ill. a kontinentális lemez és az asztenoszféra közötti, köpenyáramlásból adódó súrlódás.

Ez utóbbi két erő nem feltétlen fékezi, hanem segítheti is a lemezmozgást, ha az áramlás a lemezmozgás irányába

mutat. Olyannyira, hogy A. Holmes korai javaslatától a lemeztektonika kezdeti időszakáig ezeket tartottuk a fő hajtóerőknek. Akkori elképzelés szerint a köpenyáramlás döntő mértékben a felső köpenyben zajlik. Mégpedig úgy, hogy a hátságok alatti feláramlás távolítja egymástól a lemezeket, a leáramlás pedig a mélytengeri árkok mentén lefelé húzza azokat. Ez az egyszerű cellás szerkezet szépen illusztrálható egy földmetszetben (7a. ábra).

A hátságok és a mélytengeri árkok bonyolult földfelszíni geometriája (7b. ábra) miatt azonban hihetetlenül szabálytalanná válik az áramlási cellák geometriája, ha három dimenzióban a teljes felső köpenyre próbáljuk elképzelni azokat. Még tarthatatlanabb lesz az egyszerű cellás modell, ha megértjük, hogy a hátságok helyzete egyáltalán nem fix, hanem a mélytengeri árkokhoz képest változó.

Gondoljuk meg például, hogy az Antarktisz-lemezt teljes mértékben hátságok veszik körül (7b. ábra), amelyek mindegyike termeli az új óceáni lemezanyagot, felerészben a kontinens irányában. Azaz, az Antarktisz-lemez területe növekedik, ami csak úgy tud működni, ha a hátságok magukat tolják el Antarktiszról.

A hátságok jelentős vándorlására, sőt szubdukciós zónában való elnyelődésére a Kelet-Pacifikus-hátság északi szegmense egy másik szemléletes példát ad. A hátságnak ez a vége ma Kalifornia déli részénél eltűnik Észak-Amerika alatt (7b. ábra). 30 millió évvel ezelőtt azonban még több mint 1000 km-rel nyugatabbra helyezkedett el a hátság, és összefüggő volt a Juan de Fuca hátsággal (Conrad, Lithgow-Bertelloni 2004).

A lemezek kinematikájának vizsgálata világossá tette, hogy a hátságok központi hasadékvölgye egyszerű szakadási vonal a litoszférában, amely a lemezekkel együtt mozog, és szerepük annyi, hogy lehetővé teszik az asztenoszféra anyagának a felszínre (zömében a tengerfenékre) való kifolyását. Nem lehetnek tehát a köpenyáramlás stabil felszálló ágai, azaz a 7a. ábrán mutatott áramlási kép a mai ismereteink alapján túlegyszerűsített!

Forsyth és Uyeda (1975) mindezt modellszámítások mellett egy egyszerű diagramsorozattal is alátámasztották. A gondolat lényege az volt, hogy a lemezmozgás dinamikájának megértéséhez nem elegendő a lemezek egymáshoz viszonyított mozgásának az ismerete (7b. ábra). Abszolút sebességekre van szükség, amelyeket egy „minden mozog” rendszerben elég nehéz meghatározni, hiszen nincsenek nyilvánvaló fix pontjaink. Az abszolút koordináta-rendszert a teljes köpenyen áthaladó és térben viszonylag lokalizált hőoszlopokhoz (*mantle plumes*), illetve ezek felszíni megnyilvánulásához a forró folt (*hot spot*) vulkánokhoz célszerű kötni (Gripp, Gordon 2002). Ebben a feláramlásokhoz kötött rendszerben tekintve a lemezek mozgását egy új világ tárul elénk (1. táblázat és 9. ábra).

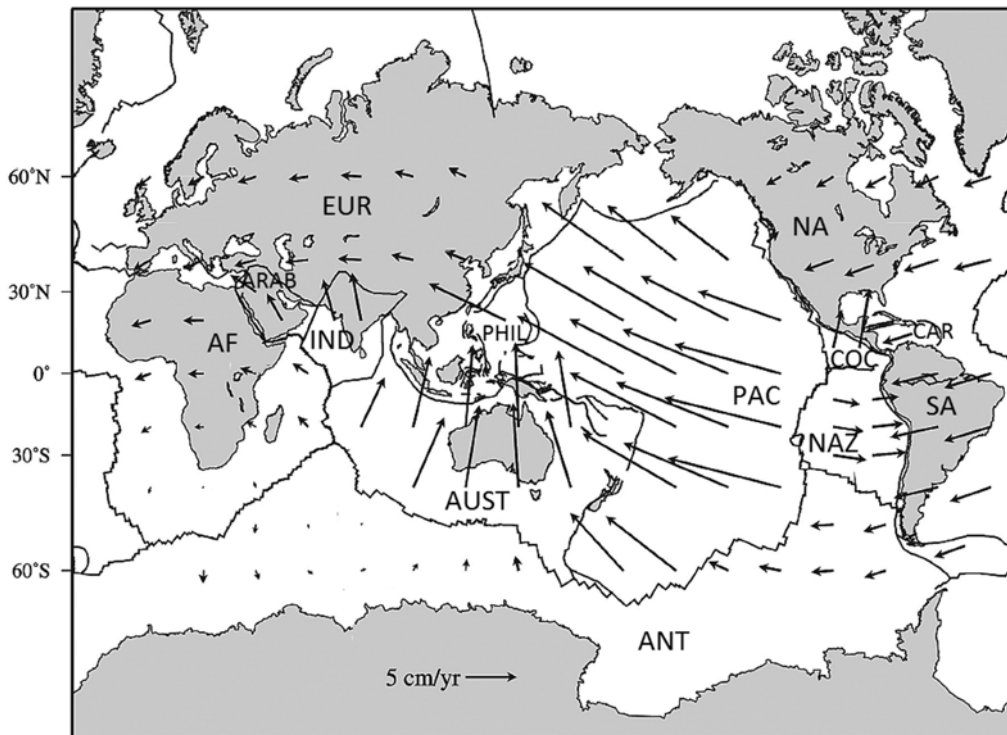
Megállapíthatjuk, hogy a lemezek sebességében és így mozgási energiájában jelentős eltérések vannak. A számítások azt mutatják, hogy a legnagyobb sebességgel mozgó Pacifikus-lemez mozgási energiája közel 2/3 részét adja a teljes litoszférendszer mozgási energiájának. Ha hozzávesszük az Indiai-Ausztrál-lemezt és a Nazca-lemezt is, akkor ez a három lemez több mint 95%-át képviseli a teljes mozgási energiának.

1. táblázat | A fő lemezek adatai (Forsyth, Uyeda 1975)

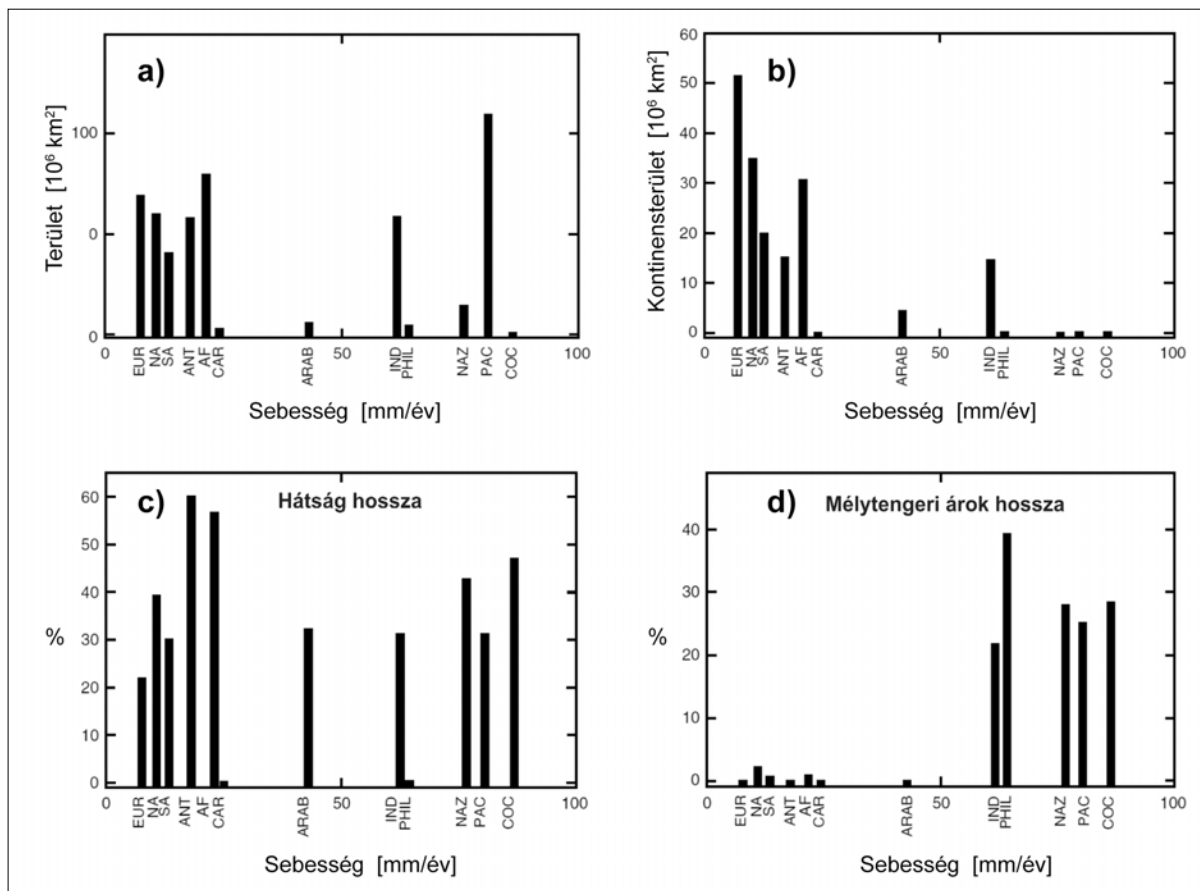
Lemez	Teljes terület ( $10^6$ km <sup>2</sup> )	Kontinensek területe ( $10^6$ km <sup>2</sup> )	Átlagos abszolút sebesség (mm/év)	Kerület ( $10^2$ km)	Hosszúság	
					Hátság ( $10^2$ km)	Árok ( $10^2$ km)
NA	60	36	11	388	146	12
SA	41	20	13	305	87	5
PAC	108	–	80	499	152	124
ANT	59	15	17	356	208	–
IND	60	15	61	420	124	91
AF	79	31	21	418	230	10
EUR		51	7	421	90	–
NAZ	15	–	76	187	76	53
COC	2,9	–	86	88	40	25
CAR	3,8	–	24	88	–	–
PHIL	5,4	–	64	103	–	41
ARAB	4,9	4,4	42	98	30	–

NA: Észak-Amerika  
SA: Dél-Amerika  
PAC: Pacifikus  
ANT: Antarktisz  
IND: India  
AF: Afrika

EUR: Eurázsia  
NAZ: Nazca  
COC: Kókusz  
CAR: Karib  
PHIL: Fülöp  
ARAB: Arábiai



9. ábra | A földfelszín lemeztekonikai egységei és a lemezek abszolút (forró foltokhoz viszonyított) sebessége (Gripp, Gordon 2002). Az egyes lemezegységek fő jellemzőit az 1. táblázat mutatja.



10. ábra | Az egyes lemezek átlagos abszolút sebességének kapcsolata a lemez területével (a), a lemezen lévő kontinens területével (b), a lemezhez kapcsolódó hátság hosszával (c) és a lemezhez kapcsolódó mélytengeri árok hosszával (d) (Forsyth, Uyeda 1975).

A 10a–b. ábra szerint úgy látszik, hogy nem a lemezek mérete befolyásolja a sebességet, hanem az, hogy tartozik-e a lemezhez kontinens, vagy sem. A kontinenst hordozó lemezek (eurázsiai, észak- és dél-amerikai, antarktiszi és afrikai) általában lassúak, valószínűleg azért, mert a kontinentális pajzsok alatt nincs jól fejlett asztenoszféra, és a vastag kontinentális gyökér akadályozza a mozgást. A 10c. diagram pedig azt suggerálja, hogy a lemezhez kapcsolódó hátság hossza nem befolyásolja a lemez sebességét, bizonyítván azt, hogy a hátságolás kis erő. Ezzel szemben a 10d. ábra szerint a lemezhez kapcsolódó mélytengeri árok hossza egyértelműen elősegíti nagy lemezmozgási sebesség kialakulását.

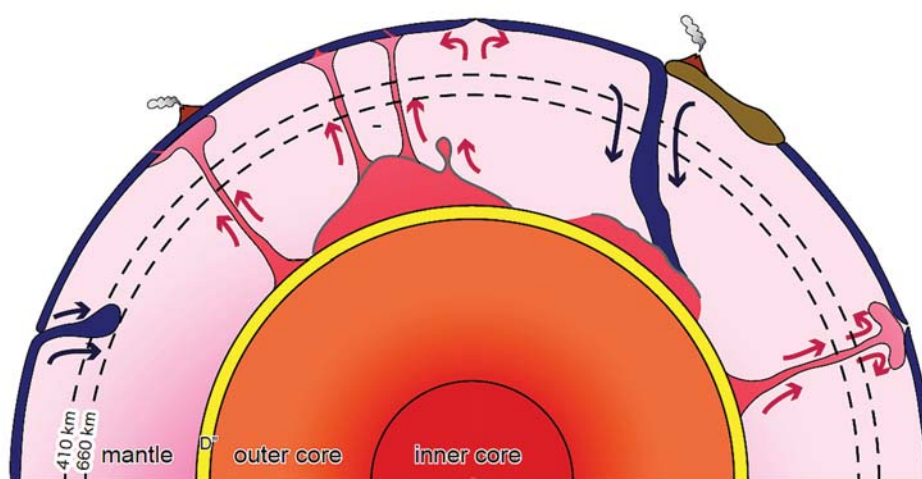
Az elmúlt 20 év lemezdinamikai sikertörténete annak kimutatása volt, hogy *alábukott lemez húzóereje a lemezmozgás egyik fő hajtóereje*. Számos részletes modellszámítás mutatja (pl. Faccenna et al. 2007), hogy az asztenoszféra merülő és környezeténél hidegebb, ezért sűrűbb litoszféranyelv húzza maga után a lemez felszíni részét. Ezek a modellek képesek a lemezhatáron és a lemezek belsejében ébredő feszültségek (földrengés-tevékenység) és deformációk leírására is. Sőt a szubdukciós zónák kialakulásának története alapján az óceáni nagylemezek múltbeli kinematikáját az utóbbi 100 millió évre is sikeresen rekonstruálni lehet (Conrad, Lithgow-Bertelloni 2004).

Marad azonban még sok megoldatlan kérdés is. Egy érdekes probléma, például az Indiai-lemez mozgástörténete. Suess óta tudjuk, hogy India a gondwánai szuperkontinens része volt, és annak jura időszaki szétarabolódása után indult el északra az Ausztrál-lemez részeként. Ma már az is pontosan ismert, hogy az alábukó Tethys-óceán húzó hatására az Indiai-Ausztrál-lemez 12–16 cm/év sebességgel mozgott az eocén közepéig (kb. 45 millió évig). Ekkor következett be India ütközése Ázsiával, ami a himalájai orogenezis kulminációját okozta és az India-lemeznek az Ausztrál-lemeztől való elkülönülését eredményezte. Az el-

különülés oka az volt, hogy az Indiai-lemez sebessége az ütközés után 4–6 cm/év értékre lecsökkent, és ennyi maradt azóta is. Bár ez egy lecsökkent sebesség, mégis túl nagy érték. Ez nehezen érthető, hiszen már nem kapcsolódik hozzá szubdukált tethysi lemez, azaz nincs, ami húzza. Más-képpen fogalmazva, mai ismereteink alapján nem értjük a Föld legnagyobb hegysége kialakulásának hajtóerejét. Hozzá kell tenni, hogy hasonló probléma áll fenn az Alpok esetén is, mert dinamikai szempontból nehezen magyarázható az Adria napjainkig folytatódó északias mozgása és a Pannon-medence aljzatát alkotó egységek rotációja.

Újabbán egyes szerzők mellett érvelnek, hogy az Indiai-lemez és más kisebb lemezek esetében is mégiscsak alapvető jelentőségű a köpenyáramlás vonzó hatása (Becker, Faccenna 2011). Ez azonban már egy más áramlási rendszer, mint az egyszerű felsőköpeny cella. A 11. ábrán a szeizmikus tomográfia eredményei alapján kidolgozott új földmodell látható (Coffin et al. 2006). Ennek egyik lényegi eleme az, hogy a felszínen megfigyelt kiterjedt bazaltömlések (forró folt vulkanizmus) a köpeny és a mag határán lévő D" rétegből felemelkedő nagy anyag- és hőáramlási oszlopokhoz (*mantle plumes*) kapcsolódnak (Horváth 2006).

A nagy leáramlások pedig a szubdukált lemezekhez köthetők. Ezekről ugyanis kiderült, hogy bár gyakran megrekednek a 410–660 km között elhelyezkedő csatornában, végső soron mégis leszállnak a köpeny aljára. Mai meggyőződésünk szerint ezek a teljes köpenyre kiterjedő és a szubdukált litoszféranyelveket, valamint a hőoszlopokat is magukban foglaló fő áramlási rendszerek mozgatják a lemezeket és tartják fenn a teljes földi dinamikus rendszert. Egy új globális geodinamika megalkotásáig még sok izgalmas kérdést kell megoldani. Legfőképpen tovább kell lépni az alsó köpeny tomográfiai megismerésében, és olyan egységes áramlási modellt szükséges alkotni, amelynek része a litosféra és a teljes köpeny is.



**11. ábra** Az új dinamikus földmodell vázlatja, amely a globális szeizmikus tomográfia eredményeire támaszkodva mutatja a köpeny/mag határról (D" réteg) felfelé induló hő- és anyagáramlásokat, valamint a lefelé süllyedő (hideg) litoszféranyelveket. Ezek sokszor nehezen tudnak átjutni a 410 és 660 km mélységben lévő, fázisátmenetekkel jellemzett köpenycsatornában, de általában eljutnak a köpeny aljára (Coffin et al. 2006).

Van azonban az abszolút lemezmozgási eredményeknek (Gripp, Gordon 2002) egy másik, különlegesen érdekes üzenete is. Arról van szó, hogy a forró foltokhoz rögzített koordináta-rendszerben kapott lemezmozgások összegzett sebessége nem ad zérust: azaz a Föld teljes litoszféragy-ségének van egy általános mozgási trendje a köpenyhez képest. Ez pedig egy 0,4–0,6 fok/millió év szögsebességű nyugati drift. Egy ismert olasz kutatócsoport a lemeztektonikai folyamatok minden lényeges elemét ezzel a holdi árapály-erők hatására kialakult nyugati litoszféradrifttel igyekszik magyarázni (Crespi et al. 2007). Talán ebben a kérdésben is Wegener sejtette meg legelőször a Föld működésének egy fontos elemét?

## Zárszó

Áttekintve néhány vezető amerikai és más nemzetiségű szakember, nemzeti és nemzetközi intézmények korabeli viszonyulását a kontinensvándorlás elméletéhez, meglepve vonhatjuk le azt a következtetést, hogy az eddigi képünk hiányos volt. Itt az ideje kimondani, hogy Wegener nem volt magányos és meg nem értett hős!

Wegener a 20. század elején, amikor a földtudományi eszmerendszer végletesen megosztott volt, teljesen új, mobilis koncepciót javasolt. Ezt meglévő geológiai-geofizikai ismeretekből levont néhány zseniális következtetéssel és paleoklimatológiai kutatási eredményekkel támasztotta alá. Eközben ellentmondásos elképzeléseket fogalmazott meg a kontinensek mozgásának mechanizmusáról. Úgy vélte, a kontinensek egyrészt kis erők hatására úszhatnak a folyadékszerű köpenyanyagban, másrészt mégis van az úszással szemben komoly ellenerő, amely képes feltorlasztani a hatalmas hegyláncokat. Wegener elméletét azok a kiemelkedő képességű és komoly tudományelméleti kultúrával rendelkező szakemberek támogatták és fejlesztették, akik tudták, hogy a földtudományokat a megfigyelések, mérések és koncepciók viszik előre, akár van, akár nincs mögöttük szabatos fizikai elmélet.

És a fejlődés azóta is látványosan folytatódik. Meghatároztuk és folyamatosan finomítjuk az óceánok és kontinensek együttesét alkotó litoszféralemezeket és azok kölcsönhatásának történetét. A lemeztektonika kinematikájának relatív és abszolút koordináta-rendszerben történt meghatározása alapján kiderült, hogy a lemezek jórészt saját magukat mozgatják a szubdukciós zónában fellépő húzóerők hatására. Mindezek mögött a fő energiaforrás a Föld hője, és a hajtóerő végső oka a gravitáció, amely a hajtja a Föld globális áramlási rendszerét.

Wegener és kortársai szerint ennek szabatos (geo)fizikáját a jövő tudósnemzedékének, jó eséllyel a mi generációnknak kell megalkotnia!

## A tanulmány szerzője

Horváth Ferenc

## Jegyzet

- <sup>a)</sup> Az MTA *Tudomány Ünnepe* rendezvényen a „Lemeztektonika: a földtudományok kopernikuszi fordulata” című, 2012. október 7-én elhangzott előadás bővített változata.

## Hivatkozások

- Becker Th., Faccenna C., 2011: Mantle conveyor belt beneath the Tethyan collisional belt. *Earth Planet. Sci. Letters* 310, 453–461
- Coffin M. F., Duncan R. A., Eldholm O., Fitton J. G., Frey F. A., Larsen H. Ch., Mahoney J. J., Saunders A. D., Schlich R., Wallace P. J., 2006: Large igneous provinces and scientific drilling. *Oceanography* 19/4, 150–160
- Conrad C., Lithgow-Bertelloni C., 2004: The temporal evolution of plate driving forces: Importance of “slab suction” versus “slab pull” during the Cenozoic. *J. Geophys. Res.* 109, B10407.
- Crespi M., Cuffaro M., Doglioni C., Giannone F., Riguzzi F., 2007: Space geodesy validation of the global lithospheric flow. *Geophys. J. Intern.* 168, 491–506
- Daly R., 1926: *Our mobile Earth*. Ch. Scibner’s Sons, New York
- du Toit A., 1927: A geological comparison of South America with South Africa. *Publ. Carnegie Inst. Washington* No. 381., Washington D. C.
- Faccenna C., Heuret A., Funicello F., Lallemand S., Becker T. W., 2007: Predicting trench and plate motion from the dynamics of a strong slab. *Earth Planet. Sci. Letters* 257, 29–36
- Forsyth D., Uyeda S., 1975: On the relative importance of the driving forces of plate motion. *Geophys. J. Royal Astr. Soc.* 43, 163–200
- Gripp A., Gordon R. G., 2002: Young tracks of hotspots and current plate velocities. *Geophys. J. Int.* 150, 321–361
- Hess H., 1938: Gravity anomalies and island arc structure with particular reference to the West Indies. *Proc. Amer. Philosophical Soc.*, 79, 71–96
- Hess H., 1962: History of the ocean basins. In: *Petrologic Studies: A volume to honor A. F. Buddington*, Geol. Soc. America, Denver
- Holmes A., 1913: *The age of the Earth*. Harper and Brothers, London
- Holmes A., 1928: Radioactivity and continental drift. *Geol. Magazine* 65, 236–238
- Horváth F., 2006: Lemeztektonika és az új globális geodinamika. *Magyar Tud.* 8, 930–945
- Jeffreys H., 1924, 1929, 1952, 1959, 1970, 1976: *The Earth, its origin, history and physical constitution*. Cambridge Univ. Press, Cambridge
- Joly J., 1925: *The surface-history of the Earth*. Clarendon Press, Oxford
- Joly J., Rutherford E., 1913: The age of pleochroic haloes. *Philosoph. Magazine* 7/25, 644–657
- Lambert W., 1921: Some mechanical curiosities connected with the Earth’s field of force. *Amer. J. Science* 202, 129–158
- Oreskes N., 1999: *The rejection of continental drift*. Oxford Univ. Press, New York, Oxford
- Wegener A., 1912a–b: Die Entstehung der Kontinente. *Petermann’s Mitteilungen aus Justus Perthes’ Geographischer Anstalt*, 58, 185–195, 253–256, 305–309; *Geol. Rundschau* 3, 276–292
- Wegener A., 1915, 1920, 1922, 1929: *Die Entstehung der Kontinente und Ozeane*. F. Vieweg und Sohns, Braunschweig