

A Pannon-medence földtani-geofizikai modellje¹

HORVÁTH FERENC²

A Magyar Geofizikusok Egyesületének félvszázados története egybeesik azzal az időszakkal, amikor a Pannon-medence és az azt körülölelő hegláncok szerkezetfejlődési modelljében olyan jelentős haladás történt, amelyet joggal sorolhatunk a világméretű „földtudományi forradalom” fontos eseményei közé. Ennek az áttekintésnek az a fő célja, hogy bemutassa ezt a haladást, s ebben a geofizika vezető szerepét.

50 évvel ezelőtt az uralkodó koncepció a „köztes tömeg” elmélet volt. Eszerint a Pannon-medence aljzata a variszkuszi orogenezis során konszolidálódott rideg kéregblokk, amely körül gyűrődtek fel plasztikus kőzetekből a fiatalabb, alpi hegláncok. A kéregkutató szeizmikus, magnetotellurikus, geotermikus és gravitációs vizsgálatok fényében azonban hamarosan világossá vált, hogy a Pannon-medence kérge vékony, asztenoszféra felemelt helyzetű, hőmérséklete és hőárama pedig anomálishan magas. A hazai geofizika látványos fejlődése az 1960–70-es években lehetővé tette a medence szerkezeti viszonyainak és rétegtani architektúrájának részletes megismerését, s ezúton a medence extenziós eredetének és az ezt követő szerkezeti változások jellegének a bizonyítását.

A XXI. század földtudományának minden bizonnyal legnagyobb kihívása az, hogy a litoszféra-fejlődés dinamikáját és ennek szerepét a globális és regionális környezetváltozásokban hitelesen feltárja. Ebben a folyamatban a nagy mélységeket leképező szeizmikus tomográfia, a kértet 4-D-ben feltérképező és vizualizáló ipari geofizika mellett a felszínközeli tartományt „mikroszkopikus” részletességgel feltáró környezetgeofizikának van kardánális szerepe itthon és a nagyvilágban egyaránt.

F. HORVÁTH: Geological-geophysical model of the Pannonian basin

The half-a-century long history of the Hungarian Geophysical Society coincides with the time when such a dramatic progress has taken place in understanding the structural evolution of the Pannonian basin and surrounding orogens that can be considered as an important contribution to the worldwide “Earth science revolution”. The main goal of this review is to show that geophysics played a key role in this progress.

The ruling concept some 50 years ago was the idea of the “median mass”. This concept held that the substrata of the Pannonian basin was a rigid mass consolidated during the Variscan orogenesis, and the more plastic and younger rocks were deformed during the Alpine orogenesis around this rigid nucleus. However, in the years of 1950s and 1960s it was demonstrated by crustal seismic, magnetotelluric, geothermal and gravitational surveys that the Pannonian basin was characterised by thin continental crust, elevated asthenosphere and high heat flow values. Further progress in exploration geophysics led to a good knowledge of the basin architecture and structural conditions and, hence, recognition the extensional origin of the Pannonian basin in a former orogenic setting.

A greatest challenge of Earth sciences in the 21st century is given most probably by better understanding of the lithospheric dynamics and its role in global and regional environmental changes. Seismic tomography, 4-D seismic surveys, high-resolution geophysical technologies and high-performance data visualisation systems will certainly play a crucial role in this process of understanding.

1. Történeti előzmények

Az Alpok és a kapcsolódó hegláncok takarós szerkezetének felismerése és térképezése vezetett arra az eredményre, hogy a Pannon-medencét övező hegységkorszorúban a takarók elmozdulási iránya sugárszerűen kifelé, a stabil előterek felé irányul. Ezzel szemben a medencéből kiemelkedő „szigethegységek” láthatólag nem takarós felépítésűek, hanem szerkezetüket törései formaelemek uralják. Mindezeket a megfigyeléseket KOBER [1912, 1921] foglalta egyszerű tektonikai modellbe, amely több mint fél évszázadon keresztül alapvetően befolyásolta a hazai földtudományi gondolkodást. Szerinte Európa és Afrika egymás felé nyomulása következtében az ütköző szegélyterületek feltorlódtak és gyúrt-takarós övek alakultak ki. A pannon terület a plasztikusan deformálódó orogén területek között elhe-

lyezkedő merev tömeg, ún. *közbensőhegység* (Zwischengebirge). A merevség következtében az ilyen területeket blokk-tektonika és ehhez kapcsolódó függőleges elmozdulások jellemzik.

A közbensőhegység koncepciót tudományosan id. LÓCZY munkássága alapozta meg. Terepi megfigyelései, különösen a Balaton-felvidék részletes térképezése során meggyőződött arról, hogy hegységeinkre a blokk-tektonika jellemző. Az Alföld sík felszíne alatt EÖTVÖS gravitációs ingájával kimutatott eltemetett hegységet zömében ősi kristályos kőzetekből felépítettnek gondolta, amely az összekötő kapcsot képezi a Központi Alpok kristályos tömegei és a Rodope masszívum között [LÓCZY 1918]. A szigethegységek mezozoós kőzetei véleménye szerint hosszú ideig kiemelkedő kristályos háta (küszöbök) között elhelyezkedő szűk vályúkban képződtek. Ezen merev tömeg besüllyedése a miocénban kezdődött meg, intenzív vulkánosság kíséretében.

A pannóniai közbensőhegységet PRINZ [1926] Tisia névre keresztelte, határait jelentősen kiterjesztette és szerepét tovább hangsúlyozta. A következőket írta: „Az Alpok kelet felé kiszélesednek ... az egész redőzet szétnyílik, olló

¹ Beérkezett: 2003. december 4-én

² Eötvös Loránd Tudományegyetem Geofizikai Tanszék, H-1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/c.

alakal 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 tulajdonképpen a híres „kaptafa” modell.

A közbenső tömeg koncepció első radikális ellenzője PÁVAI VAJNA [1930] volt. A szigethegységek szerkezeti viszonyainak alapos ismeretében és több mélyfúrás adat birtokában arra következtetett, hogy „...gyűrődések szabják meg összes hegységeink tektonikájának alapjellegvonását, a kétségtelenül szembeszökő és elmaradhatatlan törések csak ennek a gyűrődéses hegyszerkezetnek következményei...”. A gravitációs méréseket is figyelembe véve arra következtet, hogy „Az Alföld síkja ... több pászta ősi hegység alámerült romjait és közöttük egy csomó mezozoos teknő teljes feltöltődését takarja el szemünk előtt”. Ezekben a teknőkben lévő üledékek az intenzívebb süllyedés időszakában „... nemcsak tovább gyűrődtek, hanem helyenként egymásra torlódva pikkelyeződtek, sőt lokálisan kisebb takarók alakjában át is tolódtak...”. PÁVAI VAJNA tehát a Pannon-medencét és teljes alját az alpi-kárpáti orogén szerves részének tartotta, nem pedig abból „kirívó exotikum”-nak. Elsőként fogalmazta meg, hogy az aljzat a Kárpátok ívét követő geoszinklinális pásztaiból épül fel, amely jelenlegi szerkezetét *orogenezis* és nem *epirogenetikus* mozgások során nyerte el.

Az ötvenes évek második felétől jelentősen meggyorsult a földtudományok hazai fejlődése. Medencekutató területén ennek legfontosabb hajtómotorjai a szénhidrogén-kutatás céljából végzett mélyfúrások és a geofizikai mérések voltak. Átfogó kép alakult ki a medence mélységviszonyairól, az aljzat felépítéséről és a medenceüledékek sztratigráfiájáról [KERTAI 1957; DANK 1963; KÖRÖSSY 1958, 1964]. Különösen fontos volt az Alföld tengelyében húzódó Szolnok–Mármaros flis öv felfedezése [KÖRÖSSY 1959], mert a flis árkok általában aktív orogének frontjához kapcsolódnak.

A geofizikai eredmények közül kiemelkedik az első és másodrendű gravitációs hálózat kifejlesztése és az országos gravitációs anomália-térképek megszerkesztése [FACSINAY, SZILÁRD 1956; RENNER 1959]. A Bouguer-anomáliák és a mágneses tér függőleges komponensének anomáliáit összehasonlítva SCHEFFER [1960] kimutatta azok jellegzetes irányítottágát. Felismerte a Nagykanizsa–Kecskemét–Debrecen vonalat követő KÉK–NyDNy csapású törésvonalakkal jellemzett zavarzónát, amelyet neogén eredetűnek gondolt.

Jelentős eredmények születtek a hazai geotermikus viszonyok további megismerésében. A felgyorsuló kőolaj-kutatás számos új hőmérsékleti adatot eredményezett, amelyek rámutattak arra, hogy a geotermikus gradiens a világátlagnál határozottan magasabb, de változó értékű [STEGENA 1958]. Döntő jelentőségű volt a hazai hőáram-meghatározások megindulása. BOLDIZSÁR [1956, 1959] első mérései azt mutatták, hogy a földi hőáramsűrűség a Mecsekben és Nagylengyel környékén több mint kétszerese a nyugodt kontinentális területekre jellemző értéknek. Véleménye szerint az egész Pannon-medencében hasonló a helyzet. Megállapításai heves vitát váltottak ki. STEGENA [1963] úgy vélte, hogy a magas hőmérsékleti gradiens nem kell feltétlen párosuljon magas földi hőáramsűrűséggel, mert a laza üledékek hővezető képessége alacsony. Felhívta

a figyelmet a hőáram-meghatározások két lényeges hibaforrására: a hővezető képesség laboratóriumi meghatározásának nehézségére, és az üledékes medencékben fellépő vízmozgások okozta hőmérsékleti torzulásokra.

A Pannon-medence kialakulásának megértése szempontjából legnagyobb jelentőségű adatokat a szeizmikus kéregvastagság-meghatározások szolgáltatották. GÁLFI és STEGENA [1957, 1960] kimutatta, hogy a medenceterület alatt a Moho-felület jelentősen emelt helyzetű, a Pannon-medence kérgé meglepően vékony. Ezeket az első eredményeket a későbbi pontosabb mérések [MITUCH et al. 1964; MITUCH 1964] némileg módosították, de az alapvető megállapítás helyesnek bizonyult. Hamarosan megszülettek az első magnetotellurikus szondázási eredmények, amelyek azt mutatták, hogy az elektromosan jól vezető köpeny is emelt helyzetben, 40–80 km mélységben található a Pannon-medence alatt [ÁDÁM 1964].

Mindezek fényében világossá vált, hogy a merev pannon közbenső tömeg elképzelés tovább már nem egyeztethető össze a geofizikai megfigyelésekkel. Az ellentmondás feloldására különböző modellek születtek.

Az alapvetően geofizikai adatokon nyugvó egységes medencefejlődési modellt STEGENA [1964, 1967] vázolta fel. Megvizsgálta, hogy a vékony kéreg miatti köpenyfelboltozódás hogyan jelentkezik a gravitációs anomáliákban. Összefüggést vezetett le a laza medenceüledékek sűrűségének mélységi változására, majd megbecsülte az emiatt kialakuló negatív anomáliákat. Az ily módon korrigált regionális Bouguer-anomáliák már elsősorban a köpenyboltozat miatti tömegtöbblet hatását tükrözik. Eredményként az adódott, hogy a felemelkedő köpenyanyag az átlagosnál hígabb és a boltozat a peremi hegységek irányában ellaposodik. Ezután, a Föld különböző korú és fejlettségű medencéit áttekintve, kimutatta, hogy a süllyedékek vékony vagy igen vékony kéreggel rendelkeznek. Ebből levonható az a valószínű következtetés, hogy süllyedés elindítója a kéreg elvékonyodása. Egyszerű izosztikus számítások azt mutatták, hogy az alulról elvékonyodott kéreg süllyedése, valamint a behordott üledékek súlya a Pannon-medencében ténylegesen megfigyelt üledékvastagságokkal jól egyező mélységű medencét eredményez. A konzisztens modell legnehezebb „végső” problémája a kéregkivékonyodás mechanizmusa. A szerző szerint erre nehéz jó választ adni, de a medence alatt felemelkedő és a szegélyező hegységek felé irányuló magmaáramlás valószínű feltevelés.

Egy másik, geofizikai indíttatású kísérlet a Pannon-medence tektonikai szintézisére SZÉNÁS [1967, 1969] nevéhez fűződik. Kimutatta, hogy a terület izosztikus egyensúlyi állapotban van, és lokális izosztikus kompenzáció érvényesül. A nem folyamatosan, de szisztematikusan mélyen (19–20 km) jelentkező Conrad-felület és az emelt helyzetű Moho összevetése alapján egyértelműnek látja, hogy a medencealakulás fő mechanizmusa a kéreg alulról való elvékonyodása. Ez az ausztriai orogén fázis után (felső kréta) indult meg. A Belső-Kárpátokban a preausztriai medencealjzat a felszínen van, tehát ezen a területen a jelenlegi 32–36 km vastag kéreg régóta megvan. Ebből arra a merész következtetésre jutott, hogy ez a terület nem is igazi geoszinklinális

és spekulatív úton megkérdőjelezett olyan tektonikai evidenciát, mint a Belső-Kárpátok takarós felépítése. A geotermikus adatokat nem tartotta használhatónak, mert szerinte az egész Pannon-medencében a hő zömét feláramló vizek szállítják. Mégis valószínű, hogy a Pannon-medence kérge az átlagosnál jóval melegebb, de ennek létrejöttét a felboltozódó kéreg alkotta zárt kupola hőgyűjtő hatásának tulajdonította. A felfűtött köpenyanyag a kéreg tenziós felrepedésekor létrejött nyomásesés során megolvadt és óriási mennyiségben a felszínre tört. A köpeny tetején így kialakuló anyagihiány helyébe sülyed le a kéreg. A sülyedést a vulkáni anyag és a lerakódó üledékek súlya tovább növelte. Nem nehéz azonban látni, hogy az összes negoén vulkanit térfogata legalább egy nagyságrenddel kisebb, mint a kéreg aljáról hiányzó anyag mennyisége. Ezért SZÉNÁS megfontolásra érdemesnek tart más kéregvékonyodási mechnizmusokat is.

A századelő merev pannon tömegétől a 60-as évek végére eljutottunk az aktív magmafelyomulással, kéregfelboltozódással, tenziós felszakadással, majd beszakadással jellemzett Pannon-medencéig. E látványos fejlődés eredményeképpen megszületett nagytektonikai modellek számos alaptételben megegyeztek vagy nagyon hasonlók voltak. Több fontos kérdésben azonban eltértek az álláspontok vagy plauzibilis megoldások híján tág tere volt a spekulatív magyarázatoknak. Ebben a tudományos helyzetben született meg az új lemeztekonikai elmélet, amely majd minden korábbi medencekutatói eredmény átértékelését vonta maga után [ROYDEN, HORVÁTH 1988].

2. A lemeztekonikai forradalom

A kéregkutató szeizmikus [POSGAY et al. 1981, 1986, ALBU et al. 1983] és magnetotellurikus szondázások [ÁDÁM 1977, 1984, HOBOT et al. 1990] együttes értelmezése eredményeképpen világossá vált [HORVÁTH et al. 1986], hogy a Dunántúli-középhegység takarós felépítésű. A takarók az Alcapa nagyszerkezeti egység keleti irányú kiszökését megelőzően az eoalpi orogén fázis idején, a Tethys óceán konzumációja során jöttek létre. A Dunántúli-középhegység a szerkezeti hierarchia legfelső tagja, vagyis az európai előtérre obdukálódott Penninikum feletti Alsó és Középső Ausztróalpkumra feltolódott takaróegységet képviseli. Belső takaróegységei közti csúszatófelületet a triász márgás és/vagy evaporitos kifejlődésű rétegek szolgáltatják. Ezek közül a megfelelően magas széntartalmúak a dinamometamorf hatásra elektromosan jólvezető fekete palává alakultak.

A kárpáti íven belüli terület más részéről is bebizonyosodott újabban, hogy takarós felépítésűek. Ez azt jelenti, hogy a Pannon-medence egésze alpi orogén területen jött létre. A medence kialakulására vonatkozó vizsgálatok szerint az iniciális sülyedési fázis során sík és lisztrikus normálvetők, valamint oldalelmozdulásos vetők működtek. TARI et al. [1992] arról adott számot, hogy az oldalelmozdulások jelentős része valójában transzfer vető. Ezek azért alakultak ki, mert a Pannon-medence különböző területein eltérő mértékű, ütemű vagy polaritású extenziók mentek végbe, s az ezek közti differenciális mozgást kellett kiegyenlíteni. Az extenzió mértékének területi változása ténylegesen igen nagy a Pannon-medencében: alig, gyen-

gén és nagymértékben megnyúlt kéregblokkok helyezkednek el egymás mellett.

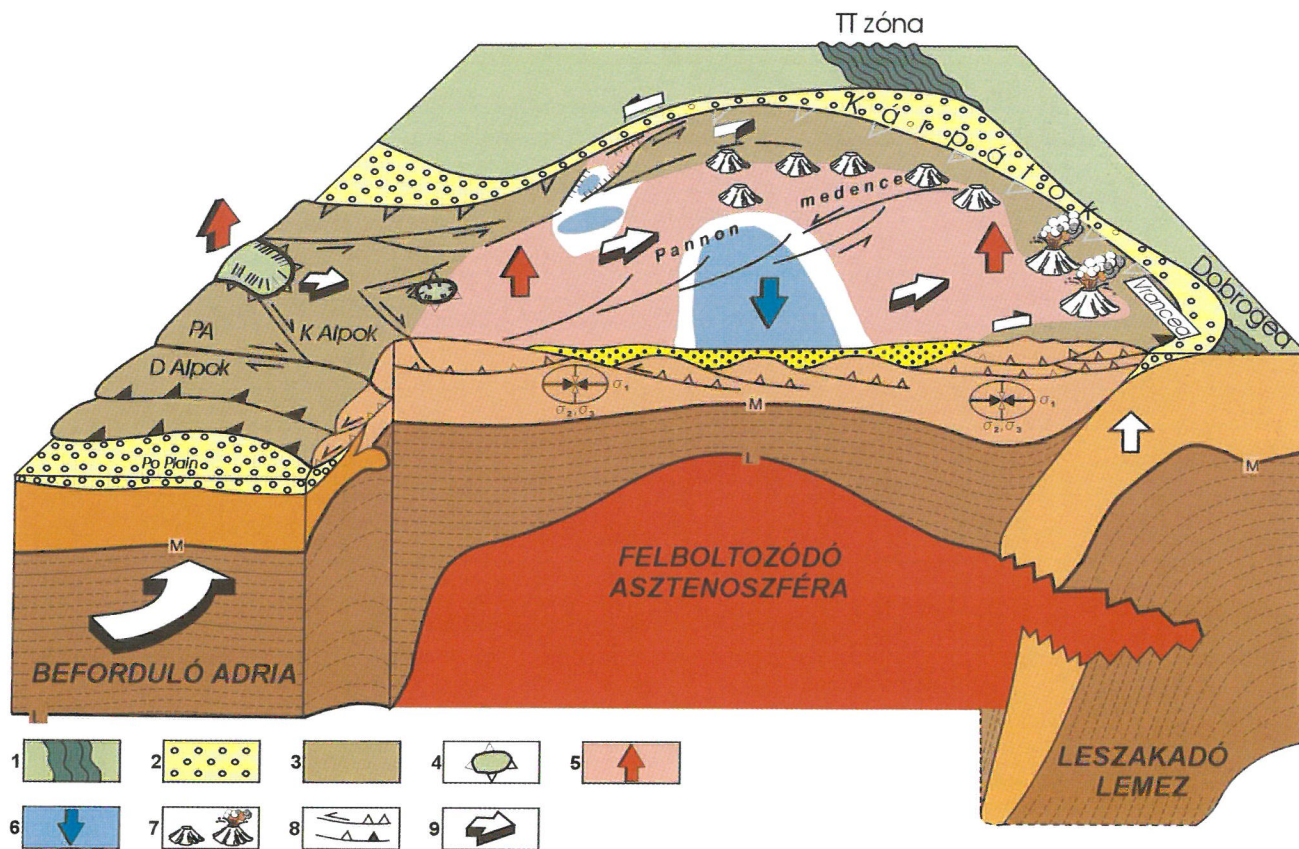
A Pannon-medence teljes extenziós megnyúlásának kialakításában értelemszerűen a nagymértékű extenziót mutató részmedencék szerepe a döntő. Eddigi ismereteink szerint két ilyen részmedence van a Pannon-medencében: a Kisalföld, valamint a Nagyalföld délkeleti része. A nagymértékű extenzió szerkezeti stílusának, valamint a korábbi kompressziós szerkezetekkel való kölcsönhatásának felismerését az ez tette lehetővé, hogy a szeizmikus kutatás eredményeképpen láthatóvá váltak a lapos dőlésű normálvetők és ezek kapcsolódása az alpi feltolódási síkokhoz [HORVÁTH 1993].

A Kisalföldön és a Nagyalföld délkeleti medencéjében észlelt háta és aszimmetrikus medencék lapos dőlésű normálvetők mentén, a középső miocén során végbement nagymértékű extenzió során jöttek létre. A háta lejtőjén induló és 30°–50° dőlésű és lefelé ellapuló extenziós csúszató síkok a mélyebb kéregtartományokig (15–20 km) követhetők, de az alsókéregben elhalnak és láthatólag nem vetik el a Moho határfelületet. Általában összeesnek vagy közepes mélységben egyesülnek a korábbi feltolódási síkokkal, vagyis a kompressziós siklató felületek reaktiválódásaként alakultak ki. A normálvető alatti fekvő blokk a fedő blokk lecsúszása során fokozatosan tehermentesítődik és 5–20 km-es izosztatikus kiemelkedést is végezhet, s ezúton mélységi metamorf kőzeteket hoz felszínre. A Kőszegi-hegység penninikuma és az Algyői-hát kristályos palái tipikus metamorf magkomplexumnak tekinthetők. A mélyszeizmika tanúsága szerint a magkomplexum alatt a Moho felület nem boltozódik fel jelentősen, vagyis az alsókéreg duktilisan folyik.

A Pannon-medence és környezete miocén kinematikáját alapvetően három tényező határozza meg:

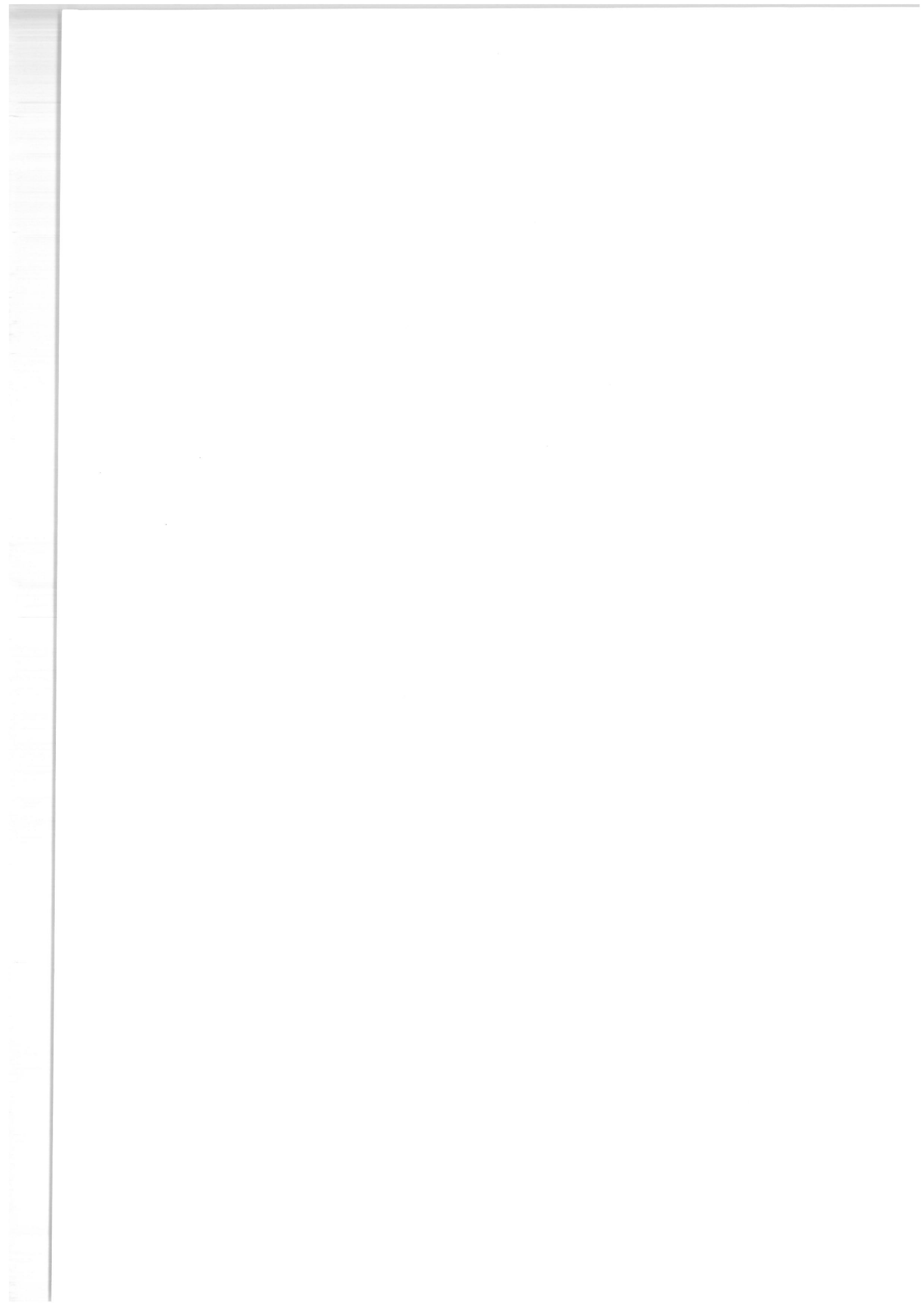
- a) az Afrikai-lemez hatására északra nyomuló, de közben az óramutató járásával ellentétes rotációt végző Adria blokk. Ennek következményeként a Keleti-Alpok nagy része kitéréselődik, oldalelmozdulásos vetőpárok mentén keleti irányba kiszökik. A Déli-Alpok északi vergenciájú takarói déli irányba visszatorlódnak, míg a Dinaridák területén a hegység főcsapásával párhuzamos jobbos transzpressziós vetőzónák alakulnak ki;
- b) a Keleti-Kárpátok előteréből a Pannon térség alá irányuló litoszférolemez szubdukciója és a szubdukálódó lemez „hajlatvonalának” visszafelé történő mozgása, azaz a szubdukált zóna hátragördülése (roll-back);
- c) a Pannon terület inhomogén extenziója. Ennek során egyes területeken nagymértékű extenzió jön létre alacsony dőlésű normálvetők mentén. A peremi differenciális elmozdulásokat KÉK–NyDNY csapású transzfer vetők egyenlítik ki, amelyekhez helyi széthúzásos medencék kapcsolódhatnak.

Az extenziós folyamatok létrejöttében a kéreg kardinális szerepe mellett fontos tényező még az alsó litoszféra is. Ennek oka az, hogy tenziót eredményező feszültségtérben a kéreg és a köpenylitoszféra egyaránt elvékonyodik és az ébredő izosztatikus felhajtóerő a két litoszférrétegre ellentétes előjelű. Egy litoszférolemez extenziója során bekövetkező eredő függőleges mozgását ezért e két hatás összege adja meg. Emiatt egy terület geodinamikai állapotának alapvető jellemzője a kéreg és



1. ábra. A Pannon-medence és a környező orogének recens geodinamikai modellje. Jelkulcs: 1—európai előtér és a Transz-Európai (TT) szutura zóna; 2—molassz; 3—alpi-kárpáti orogén; 4—pennini ablakok; 5–6—a Pannon-medence emelkedő, ill. süllyedő területei; 7—inaktív és aktív vulkánok a kvarterban; 8—takarós feltolódási síkok, és inaktív (üres háromszög), ill. aktív (fekete háromszög) takaróhatárok; 9—laterális blokkmozgási irányok

Fig. 1. Geodynamic model of the recent Pannonian basin and the surrounding orogens. Keys: 1—European foreland and the Trans-European suture zone (TT); 2—Molasse zone; 3—Alpine-Carpathian orogen; 4—Penninic windows; 5–6—Uplifting and subsiding regions of the Pannonian basin; 7—Inactive and active volcanism during the Quaternary; 8—Thrust planes, and inactive (open triangles) and active (black triangles) thrust fronts; 9—Direction of lateral block movement



a litoszféra vastagságváltozását mutató térkép [HORVÁTH 1993].

A Pannon-medencét elvékonyodott, környezetét megvastagodott, a Dunántúli-középhegységet pedig közel normális kéreg jellemzi. Ezek az alpi orogén fejlődés eredményeit tükrözik: vastag kéreg kontinentális kollízió, vékony kéreg a neogén során bekövetkezett extenziós kollapszus hatására jött létre.

A litoszféra mai átlagos vastagsága 60 km a Pannon-medence alatt, de lokálisan 40 km-re is csökkenhet [ÁDÁM et al. 1989]. 120–130 km-es minimális kiindulási vastagságot feltételezve és tekintettel arra, hogy az extenzió csúcsidezőzaka (17–13 Ma) óta a litoszféra konduktív hűléssel fokozatosan vastagodott, megállapítható, hogy a köpenylitoszféra eredeti elvékonyodása sokkal nagyobb volt, mint a kéregé. Vagyis a Pannon-medencében nyilvánvalóan inhomogén extenzió ment végbe.

A Pannon-medence riftesedési időszaka a kárpáti-alsóbádeni (17–14 Ma) volt. Ennek során gyorsan süllyedő medencerészek alakultak ki különböző részeken, s ezeket lassan süllyedő vagy stagnáló blokkok választották el. A peremi medencékben (Kárpátaljai-, Bécsi-, Stíriai-, Zalai- és Száva-medence) a gyors üledékfelhalmozás egyensúlyt tudott tartani a süllyedéssel, míg a belső medencében (Nagykunság, Makói- és Békési-árok) jelentős vízmélységek alakultak ki. Ez a morfológiai kontraszt a lassú süllyedéssel járó termális fázis során fokozatosan simult el, midőn a progradáló delta üledékképződés elérte és feltöltötte a belső medencerészeket.

A belső medencékben végbemenő tömeges üledékfelhalmozás az utóbbi 10–12 millió évben azt eredményezte, hogy az üledékben még nem jött létre termikus egyensúly, hidegebbek a stationárius értéknél. Ennek ellenére a nagymélységű bádeni és alsópannóniai anyaközetek eljutottak, sőt részben túljutottak az olajgenerációs ablakon. A peremi medencékben jóval kevesebb pannóniai és fiatalabb üledék tudott csak lerakódni, így azok hűtő hatása általában elhanyagolható. Mégis a sekélyebb pozíció miatt a pannon éretlen és csak a mélyebb bádeni vagy kárpáti rétegek voltak képesek CH-generálásra.

A Pannon-medence riftesedési időszakát a felsőbádenitől kezdődően a termikus süllyedési fázis követte. A termomechanikus medencefejlődési elmélet szerint ebben a fázisban nincs tektonikai aktivitás, csak lassú és fokozatosan csökkenő sebességű süllyedés. A tektonika markáns gyengülése a riftesedés után nyilvánvaló a Pannon-medencében. A meglévő gyengébb aktivitást kezdetben elhanyagolható, lokális jelenségnek véltük. Az ország szeizmikus anyagának tematikus átvizsgálása azonban alapvetően új helyzetet teremtett. Kiderült, hogy a színrift vetők jelentős részéhez a legfiatalabb üledékeket is átmetsző új vetők kapcsolódnak. Ennél is elgondolkodtatóbb volt az a megfigyelés, hogy a szarmata üledékek elterjedése kisebb, mint a bádenié; gyakran az alsópannóniai diszkordánsan a bádenire települ. További új felismerés volt, hogy néhány területen szarmata utáni kompressziós fázis mutatható ki [HORVÁTH 1995].

A medencefejlődési modell alapvető revízióját végül is a legfiatalabb tektonikai események felismerése tette elkerülhetetlenné. Kiderült, hogy a felsőpannóniai és neogénkori összletek átmenete csak az alföldi mélyzónában tekinthető folyamatosnak. Másutt, mint például a Dunántú-

lon, csupán néhány méter vastag lösz alkotja a kvartert és ez 5–7 Ma éves pannonra települ. Ez a jelentős rétegtani hiány fiatal emelkedéssel és erózióval magyarázható. Regionális szeizmikus szelvények értelmezése bizonyította, hogy az emelkedő területek tengelye a Magyar Középhegység. Ez a felismerés új fénybe helyezte azokat a korábbi geomorfológiai megfigyeléseket, amelyek a Duna egykori teraszai, valamint forrásmészkövek mai pozíciói alapján javasolták a középhegység pleisztocén és holocénkori emelkedését.

Az új szerkezeti megfigyeléseket a Pannon-medence recens feszültségállapotának megismerése tette érthetővé. Kiderült, hogy a medence ma nem extenziós, hanem kompressziós feszültségek hatása alatt áll. A váltás valószínűleg fokozatosan ment végbe, és az új feszültségtér a kvarter során vált meghatározóvá [HORVÁTH, CLOETINGH 1995; BADA et al. 1998].

A Pannon-medence neotektonikusan aktív terület. A tektonika negyedkori reaktiválódása a horizontális feszültség megnövekedésének eredménye. Az új feszültségtér hatására különböző skálájú kompresszív szerkezetek jönnek létre. Az új feszültségtér hatására oldalmozdulásos vetőként reaktiválódhattak az idősebb (főleg miocén) fő nyíróadási zónák. Ezek mentén az elmozdulás a feszültségtér jelentős térbeli változása miatt helyenként egyező, másutt ellentétes a korábbival. A Pannon-medence földrengéseinek döntő többsége korábbi és újonnan reaktiválódott vetőzónák mentén pattan ki. Hosszú távú előrejelzésekben a földrengés-tevékenység növekedésével lehet számolni.

A Pannon-medence neogén–kvarter szerkezetfejlődésének jobb megismerése világossá tette, hogy az extenziós medencék kialakulásának „klasszikus” termomechanikai modellje a valóságnak csak első közelítését tudja adni. Nevezetesen, helytálló a medencefejlődést két erőteljesen eltérő időszakra, azaz szín- és posztrift fázisra osztani, de ezen fázisokon belül markáns szerkezetfejlődési anomáliák jelentkeznek. Kiderült, hogy ilyen anomáliák valójában gyakori jelenségek más medencékben is, vagyis a litoszféra fejlődésének természetes velejárói. Másképpen fogalmazva ez azt jelenti, hogy ismereteink mai szintjén a termomechanikus modell már nem állja meg a helyét.

A területet ma elfoglaló két kontinentális kérgű nagy szerkezeti egység (Alcápa és Tisza–Dácia téren) az alpi orogén zóna két különböző tartományában megy át a krétakori takaróképződésen. Mindkettő sikeresen elkerüli azonban a fiatalabb alpi orogén fázisokat azáltal, hogy eredeti helyükről elmozdulnak, utóbbi Európával való leszakadása hozza létre a kárpáti flis medencéket. Az itt lévő, jórészt óceáni medence litoszférája a behatoló kontinentális terrének alá tolódik, s ily módon teszi lehetővé a két kontinentális egység fokozatos egyesülését. A szubdukciós lemez lehajlása és hátrálása (subduction roll-back) miatt a két orogén térenben húzásos feszültségtér alakul ki és bekövetkezik az extenziós kollapszus. Ettől kezdve napjainkig a terület szerkezetfejlődését az alpi kollíziós zónában fellépő kompresszió és a Keleti-Kárpátok íve mentén alátoló szubdukciós lemez szívó hatásának együtthatása irányítja (1. ábra).

Míndezek alapján a Kárpát–Pannon terület neogén-kvarter geodinamikájáról az alábbi összefoglaló következ-

tetések tehetők [HORVÁTH 1988, 1993, 1995; CSONTOS et al. 1992; TARI et al. 1999; BADA, HORVÁTH 2001]. Az alpi orogén terület különböző eredeti helyeiről származó litoszféra fragmentumok a miocén elején a kárpáti flis medence területére érkezve extenziós feszültségi állapotba jutottak. A túlvastagodott és gyenge litoszféra extenziós kollapszust szenvedett, s ennek során változó mértékben kivékonyodott és megsüllyedt. Az extenzió lefolyását az egykori flis medence litoszférájának szubdukciója irányította. A medencében megfigyelhető tektonikai fázisok a szubdukált lemez lehajlási ütemében és mértékében bekövetkező változások eredményei. A szubdukció folyamatának ellehetetlenülése az extenzió végét jelenti (1. ábra). Ez következett be 2–4 millió évvel ezelőtt, mikor minden szubdukcióra képes litoszféra elfogyott és az alátolódott lemez közel függőleges helyzetűvé vált. Ettől kezdve a kontinentális keretbe teljesen bezárt Pannon-medencében kompressziós feszültségtér vált uralkodóvá.

HIVATKOZÁSOK

- ÁDÁM A. 1964: A kéreg és felsőköpeny felépítése Magyarországon a magnetotellurikus és relatív tellurikus frekvenciaszondázások alapján. *Geofiz. Közl.* **13**, 2, 141–161
- ÁDÁM A. 1977: The Transdanubian crustal conductivity anomaly. *Acta Geol. Geophys. Mont. Hung.* **12**, 73–79
- ÁDÁM A. 1984: Fractures as conducting dykes and corresponding two-dimensional models. *Geophys. Prospect.* **32**, 543–553
- ÁDÁM A., LANDY K., NAGY Z. 1989: New evidence for the distribution of the electric conductivity in the Earth's crust and upper mantle in the Pannonian Basin as a „hotspot”. *Tectonophysics* **164**, 361–368
- ALBU I., ÁDÁM O., MAJKUTH T., NEMESI L., R. TÁTRAI M., RÁNER G., VARGA G. 1983: Regional study of the tectonics of Transdanubia. *Annual Rep. Eötvös L. Geophys. Inst. Hung.* 1982, 66–71
- BADA G., GERNER P., CLOETINGH S., HORVÁTH F. 1998: Sources of recent tectonic stress in the Pannonian region: inferences from finite element modelling. *Geophys. J. Int.* **134**, 87–102
- BADA G., HORVÁTH F. 2001: On the structure and tectonic evolution of the Pannonian basin and surrounding orogens. *Acta Geol. Hung.* **44**, 301–327
- BOLDIZSÁR T. 1956: Measurement of terrestrial heat flow in the coal mining district of Komló. *Acta Technica Acad. Sci. Hung.* **15**, 1–2, 219–227
- BOLDIZSÁR T. 1959: Terrestrial heat flow in the Nagylengyel oil field. *Publ. Mining Faculty Sopron*, **20**, 27–34
- CSONTOS L., NAGYMAROSY A., HORVÁTH F., KOVÁCS M. 1992: Tertiary evolution of the Intra-Carpathian area: a model. *Tectonophysics* **208**, 221–241
- DANK V. 1963: A délföldi neogén medencék rétegtani viszonyai és kapcsolatuk a délbaranyai és jugoszláv területekhez. *Föld. Közl.* **93**, 3, 304–324
- FACSINAY L., SZILÁRD J. 1956: A magyar országos gravitációs alaphálózat. *Geofiz. Közl.* **5**, 2, 3–49
- GÁLFI J., STEGENA L. 1957: Szeizmikus reflexiók méréssel meghatározott néhány adat a földkéreg magyarországi részéről. *Geofiz. Közl.* **6**, 1–2, 5–60
- GÁLFI J., STEGENA L. 1960: Deep reflections and crustal structure in the Hungarian basin. *Annales Univ. Sci. Bp. R. Eötvös nom.* **3**, 41–47
- HOBOT J., DUDÁS J., FEJES I., MILÁNKOVICH A., PÁPA A., NEMESI L., VARGA G. 1990: Regional geophysical exploration of the Little Hungarian Plain. *Annual Rep. Eötvös L. Geophys. Inst. Hung.* 1988–89, 13–19 (in Hungarian with English abstract)
- HORVÁTH F. 1988: Neotectonic behavior of the Alpine-Mediterranean Region. *In: L. H. ROYDEN, F. HORVÁTH (Eds): The Pannonian basin — A study in basin evolution. Am. Assoc. Petrol. Geol. Mem.* **45**, Tulsa, Okl., p. 49–55
- HORVÁTH F. 1993: Towards a mechanical model for the formation of the Pannonian basin. *Tectonophysics* **226**, 333–357
- HORVÁTH F. 1995: Phases of compression during the evolution of the Pannonian basin and their bearing on hydrocarbon exploration. *Mar. Petr. Geol.* **12**, 8, 837–844
- HORVÁTH F., ÁDÁM A., STANLEY W. S. 1986: New geophysical data: evidence for the allochthony of the Transdanubian Central Range. *Rendiconti Soc. Geol. Ital.* **9**, 123–130
- HORVÁTH F., CLOETINGH S. 1995: Stress-induced late stage subsidence anomalies of the Pannonian basin. *Earth Plan. Sci. Lett.*
- KERTAI Gy. 1957: A magyarországi medencék és kőolajtelepek szerkezete a kőolajkutatás eredményei alapján. *Földt. Közl.* **87**, 383–394
- KOBER L. 1912: Über Bau und Entstehung der Ostalpen. *Mitt. Geol. Ges. Wien*, **5**, 368–481
- KOBER L. 1921: Der Bau der Erde. Berlin, Borntraeger, 1–324
- KÖRÖSSY L. 1958: Adatok a Kisalföld mélyföldtanához. *Földt. Közl.* **88**, 291–298
- KÖRÖSSY L. 1959: A Nagy Magyar Alföld flissjellegű képződményei. *Földt. Közl.* **89**, 115–124
- KÖRÖSSY L. 1964: Tectonics of the basin areas of Hungary. *Acta Geol. Acad. Sci. Hung.* **8**, 1–4, 377–394
- LÓCZY L. 1918: Magyarország földtani szerkezete. A Magyar Szent Korona országainak földrajzi ... leírásában. Magyar Földr. Társ. kiadványa, Budapest, 1–180
- MITUCH E. 1964: A hazai szeizmikus kéregkutatás újabb eredményei. *Geofiz. Közl.* **13**, 3, 289–300
- MITUCH E. et al. 1964: Szélesszögű reflexiók alkalmazása a kéregkutatásban. *Geofiz. Közl.* **13**, 2, 201–210
- PÁVAI VAJNA F. 1930: Magyarország hegységeinek szerkezeti vázlat. *Földt. Közl.* **60**, 10–33
- POSGAY K., ALBU I., PETROVICS I., RÁNER G. 1981: Character of the Earth's crust and upper mantle on the basis of seismic reflection measurements in Hungary. *Earth Evol. Sci.* **1**, 3–4, 272–279
- POSGAY K., ALBU I., RÁNER G., VARGA G. 1986: Characteristics of the reflecting layers in the Earth's crust and upper mantle in Hungary. *In: M. BARAZANGI, L. BROWN (Eds), Reflection Seismology: a Global Perspective. AGU Geodyn. Ser.* **13**, 55–65
- PRINZ Gy. 1926: Magyarország földrajza. Tudományos Gyűjtemény 15, Pécs, Danubia, 1–190
- RENNER J. 1959: A magyar országos gravitációs alaphálózat végleges feldolgozása. *Geofiz. Közl.* **8**, 3, 105–141
- ROYDEN L. H., HORVÁTH F. (Eds) 1988: The Pannonian basin, a study in basin evolution. *AAPG Memoir* **45**, Tulsa, Okl., p. 1–394
- SCHEFFER V. 1960: A magyar „közbülső tömeg” kérdéséhez. *Geofiz. Közl.* **9**, 1–2, 55–68

- STEGENA L. 1958: A Nagyalföld geotermikus viszonyai. *Geofiz. Közl.* **7**, 3–4, 229–238
- STEGENA L. 1963: A magyarországi földi hőáram kérdéséhez. *MTA Műsz. Tud. Oszt. Közl.* **32**, 1–4, 151–158
- STEGENA L. 1964: The structure of the Earth's crust in Hungary. *Acta Geol. Acad. Sci. Hung.* **8**, 1–4, 413–431
- STEGENA L. 1967: A magyar medence kialakulása. *Földt. Közl.* **97**, 3, 278–285
- SZÉNÁS Gy. 1967: The crustal structure of the Carpathian basin. *Acta Geod. Geophys. Montanist. Acad. Sci. Hung.* **3**, 3–4, 373–393
- SZÉNÁS Gy. 1969: The evolution and structure of the Carpathian basin. *Spec. paper of the Hung. R. E. Geophys. Inst. for the Ixth Session CBGA, Budapest*, 1–111
- TARI G., HORVÁTH F., RUMPLER J. 1992: Styles of extension in the Pannonian Basin. *Tectonophysics* **208**, 203–219
- TARI G., DÖVÉNYI P., DUNKL I., HORVÁTH F., LENKEY L., STEFANESCU M., SZAFIÁN P., TÓTH T. 1999: Lithospheric structure of the Pannonian basin derived from seismic, gravity and geothermal data. *In: DURAND B., JOLIVET L., HORVÁTH F., SÉRRANE M. (Eds), The Mediterranean basins: Tertiary extension within the Alpine orogen. Geol. Soc. London Spec. Publ.* **156**, 215–250

TARTALOMJEGYZÉK

Tisztelt Kollégák! — <i>Bodoky Tamás</i>	1
A gravitációs és földmágneses kutatások története Magyarországon <i>Szabó Zoltán</i>	3
A hazai geoelektromos kutatások története I. A geoelektromos műszer- és módszerfejlesztés eredményei <i>Ádám Antal, Nagy Zoltán, Nemesi László, Takács Ernő</i>	22
A szeizmikus kutatások története <i>Bodoky Tamás, Késmárky István, Molnár Károly</i>	38
A mélyfúrási geofizika története Magyarországon (avagy „a világszínvonalról a világszínvonalig”) <i>Baráth István, Kiss Bertalan</i>	49
A geofizikai kutatások szerepe és jelentősége a nemzetgazdaságban <i>Meskó Attila</i>	59
Általános geofizika: a Föld körüli térség fizikája <i>Bencze Pál, Verő József</i>	68
Általános geofizika: a Föld fizikája <i>Márton Péter</i>	79
A mélyszeizmikus kutatások újabb eredményei: kapcsolat az alkalmazott kutatásokkal <i>Posgay Károly, Hegedűs Endre, Bodoky Tamás, Csabafi Róbert, Fancsik Tamás, Kovács Attila Csaba, Takács Ernő</i>	87
Környezetgeofizikai problémák megoldása <i>Törös Endre</i>	95
A Pannon-medence földtani-geofizikai modellje <i>Horváth Ferenc</i>	102

CONTENTS

Foreword (<i>T. Bodoky</i>)	1
History of gravity and magnetic surveys in Hungary <i>Z. Szabó</i>	3
History of the geoelectrical prospecting in Hungary <i>A. Ádám, Z. Nagy, L. Nemesi, E. Takács</i>	22
The history of the seismic exploration <i>T. Bodoky, I. Késmárky, K. Molnár</i>	38
The history of well logging in Hungary <i>I. Baráth, B. Kiss</i>	49
The role and significance of geophysical exploration in the economy <i>A. Meskó</i>	59
Physics of the Earth: Physics of the Earth's environment <i>P. Bencze, J. Verő</i>	68
The last fifty years in Earth's physics <i>P. Márton</i>	79
New results of deep seismic investigations: a link to the industrial surveys <i>K. Posgay, E. Hegedűs, T. Bodoky, R. Csabafi, T. Fancsik, A. Cs. Kovács, E. Takács</i>	87
Solution of environmental & engineering geophysical problems <i>E. Törös</i>	95
Geological-geophysical model of the Pannonian basin <i>F. Horváth</i>	102

HU ISSN 0025—0120

Főszerkesztő: dr. Bodoky Tamás

Szerkesztő: Tóth Lajos

Szerkesztőbizottság: dr. Aczél Etelka, dr. Ferenczy László, Hegybíró Zsuzsanna, Kakas Kristóf,
dr. Ormos Tamás, dr. Szarka László, Verő László

A szerkesztőség címe: Budapest, II., Fő u. 68. (1371 Budapest, Pf. 433)

Telefon: (1)201-9815