

Neotektonikai viszonyok a Balaton keleti medencéjében és tágabb környezetében nagyfelbontású szeizmikus mérések alapján

BADA Gábor^{1*}, SZAFIÁN Péter^{1**}, VINCZE Orsolya², TÓTH Tamás³, FODOR László⁴,
Volkhard SPIESS⁵, HORVÁTH Ferenc¹

¹ ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány P. sétány 1/c, e-mail: gabor.bada@gmail.com

² Mol Nyrt., 1117 Budapest, Október huszonharmadika utca 18.

³ Geomega Kft., 1095 Budapest, Mester u. 4.

⁴ Magyar Állami Földtani Intézet, 1143 Budapest, Stefánia út 14.

⁵ Dept. of Geosciences, University of Bremen, P.O. Box 330 440, 28334 Bremen, Germany

The neotectonic habitat of the eastern part of Lake Balaton and its broader environs: inferences from high-resolution seismic profiling

Abstract

High-resolution reflection seismic data acquired from Lake Balaton (mainly east of the Tihany Peninsula), provide a solid basis for a detailed analysis of the neotectonic habitat in the region. Two types of seismic profiling — imaging the subsurface with different resolutions and penetration — were utilised to carry out a structural investigation. Single-channel seismic sections show the uppermost 20 to 30 metres with an unparalleled (decimetre scale) resolution. A closely-spaced seismic grid allowed a 3D structural interpretation to be performed, as well a lateral correlation of the tectonic features. Multi-channel seismic data have a lower (i.e. on the metre scale) resolution which is compensated by deeper penetration down to 150–200 m. The joint interpretation of the two data sets enabled (1) the kinematic interpretation and detailed mapping of neotectonic structural elements, (2) the analysis of the relationship between older (Miocene) and younger (neotectonic) structures, and (3) the reactivation potential of the reconstructed faults. Several shear zones were identified under Balaton; these were oriented mainly parallel to the lake axis. Areas of localised deformation contain numerous smaller scale faults arranged primarily in an *en-echelon* manner. Geometric and kinematic considerations suggest the presence of relatively wide, sinistral strike-slip fault zones, with most first-order faults being rooted in the basement. Their repeated reactivation is demonstrated in the Miocene as well as post-Miocene (neotectonic). Tectonic activity at the Berhida seismic zone east of Lake Balaton suggests that some of these faults could still be active. Besides faulting, gentle folding of the Upper Miocene (Pannonian *s.l.*) sediments is also notable. 3D mapping of key horizons and unconformities within the Pannonian strata allowed the identification of a well-defined system of anticlines and synclines of neotectonic origin. However, interpretation of fold axis distribution is not straightforward because features of a secondary deformation appear near the strike-slip fault zones; this has resulted in a complex, often *en-echelon* folding geometry.

The neotectonic habitat at Lake Balaton was put in a more regional context by integrating the reconstructed structural pattern into a neotectonic model of South Transdanubia. Special attention was paid to the age of deformation, and the kinematics and morphological expression of fault geometries; this also referred to the present-day stress field and, particularly, the recent geodynamics of the Pannonian Basin System.

Keywords: Lake Balaton, Transdanubia, water seismics, neotectonics, fault and fold geometry

Összefoglalás

A Balaton Tihanytól keletre elterülő részén az elmúlt másfél évtizedben mért nagyfelbontású reflexiós szeizmikus adatrendszer megfelelő alapot nyújt a területet ért legfiatalabb deformációs események, a neotektonikai kép részletes elemzéséhez. A szeizmikus szelvények kétféle felbontásban, eltérő behatolással mutatják a földtani szerkezeteket. Az egysátonás szeizmikus adatok páratlan részletességgel, deciméteres felbontásban képezik le a legfelső 20–30 m-es tértartományt. A mért szelvényháló sűrűsége lehetővé teszi a háromdimenziós értelmezést, a szerkezetek laterális korrelálását. A többsátonás szeizmikus adatok közel méteres felbontásban, kb. 150–200 m-es mélységig mutatják a tő alatti rétegeket és szerkezeti elemeket. A terület földtani felépítését figyelembe véve a kétféle adatrendszer együttes értékelése lehetővé teszi 1) a neotektonikai jelenségek értelmezését és részletes térképezését, 2) az idősebb (miocén) és a fiatalabb (miocén utáni, neotektonikai eredetű) szerkezetek kapcsolatát és a törések ismételt felújulásának elemzését.

* jelenlegi munkahely: TXM Kft., 1093 Budapest, Közraktár u. 30–32.

** jelenlegi munkahely: Mol Nyrt., 1117 Budapest, Októberhuszonharmadika utca 18.

Vizsgálataink alapján a Balaton tengelyével párhuzamosan futó nyírási övet azonosítottunk, melyeket kisebb léptékű, jellemzően kulisszásan elhelyezkedő vetők építenek fel. Geometriai és kinematikai megfontolások alapján a törésrendszert egy viszonylag széles, balos jellegű nyírási zónaként értelmezzük. A fontosabb vetők többsége a pre-neogén aljzatban gyökerezik (pl. Balatonfői-vonal); működésük a miocén és posztpannóniai korszakban is bizonyítható. A környékbeli (Berhida) szeizmicitáskép alapján a vetők némelyike jelenkori aktivitást is mutathat. A törés deformáción kívül a fiatal üledékek enyhe gyűredezettségét is elemeztük. Pannóniai horizontok és diskordancia-felületek háromdimenziós térképezése alapján sikerült több, neotektonikus redőt kijelölni. A térképezett redőtengelyek értelmezése nem teljesen egyértelmű: gyakori az eltolódási zónához kötődő másodlagos deformációs bélyegek, így pl. kulisszás geometriájú gyűrődések jelenléte is.

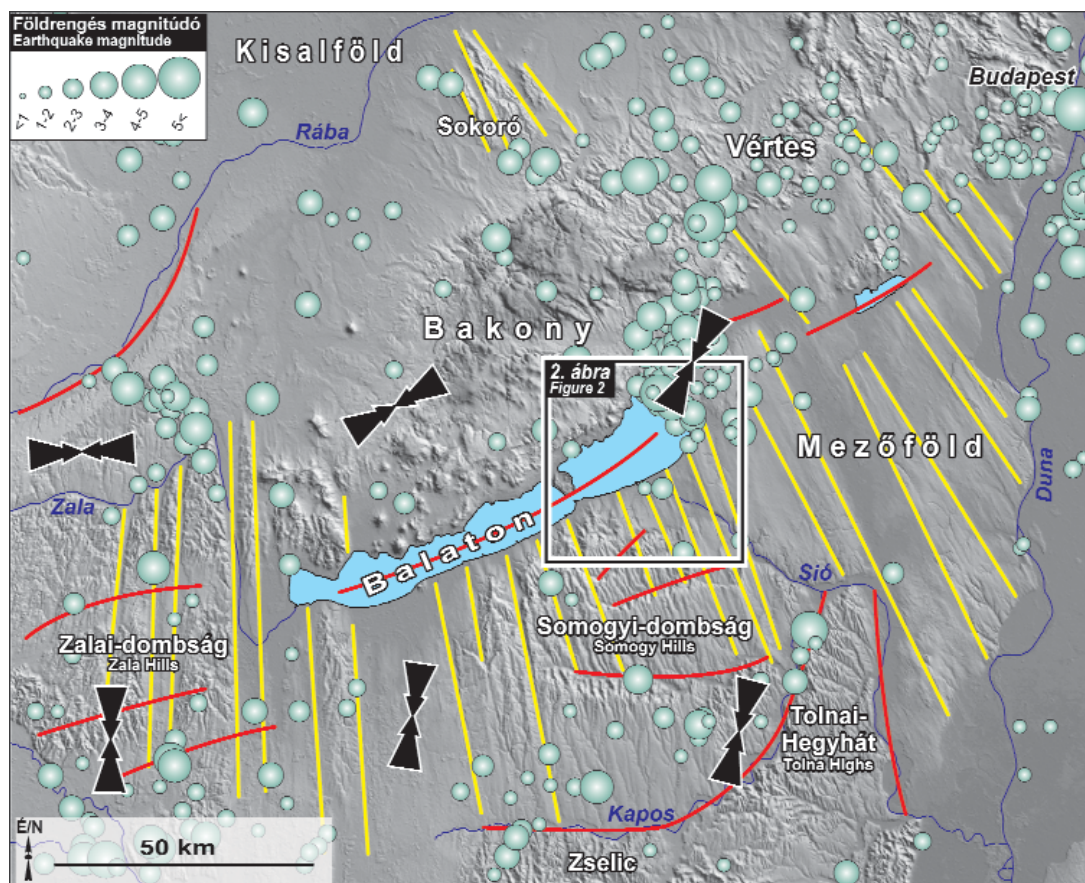
A tanulmány a Balaton alatti szerkezeteket tágabb, Dél-Dunántúl léptékű neotektonikai környezetbe helyezi. Tesszük ezt különös tekintettel a vetők keletkezésének és működésének korára, morfológiai kifejeződésére, valamint a rekonstruált deformációs elemek kinematikai jellegére a recens feszültségtér és a Pannon-medence általános jelenkori geodinamikai jellemzőinek fényében.

Tárgyszavak: Balaton, Dunántúl, vízi szeizmika, neotektonika, vetőgeometria, redőgeometria

Bevezetés

A Balaton és környéke kiváló terepet biztosít a Dunántúl morfo- és neotektonikai viszonyainak vizsgálatához. A Balaton jelentősen különböző morfológiai egységek határán helyezkedik el, amelyek a késő-miocén–pliocén időszaktól kezdődően (FODOR et al. 2005) változó ütemben emelkednek, ennél fogva — részben klimatikus hatások függvényében — eltérő módon és mértékben pusztultak le (*1.*

ábra). A Dunántúli-középhegység emelkedő térszínén az erózió főképp mezozoos képződményeket tárt fel, míg a Somogyi-dombvidéket nagyobb vastagságban felső-miocén, kisebb vastagságban pedig változó kifejlődésű negyedidőszaki képződmények — főképp lösz és allúvium — fedik. Ezekben a fiatal képződményekben rajzolódik ki a Dunántúl egyik legmarkánsabb morfológiai jellegzetessége, a sugaras geometriájú, ún. meridionális völgyhálózat. Ennek eredete a magyar földtan és földrajz évszázados problé-



1. ábra. A Dunántúl fontosabb morfológiai bélyegei, szeizmicitása és a vizsgált terület elhelyezkedése

A „meridionális” völgyeket sárga, a „longitudinális” jellegű völgyeket piros vonalak jelölik. A fekete nyilak a maximális horizontális feszültség (S_{Hmax}) irányát jelzik

Figure 1. Principal morphological features and seismicity in Transdanubia, and the location of the study area

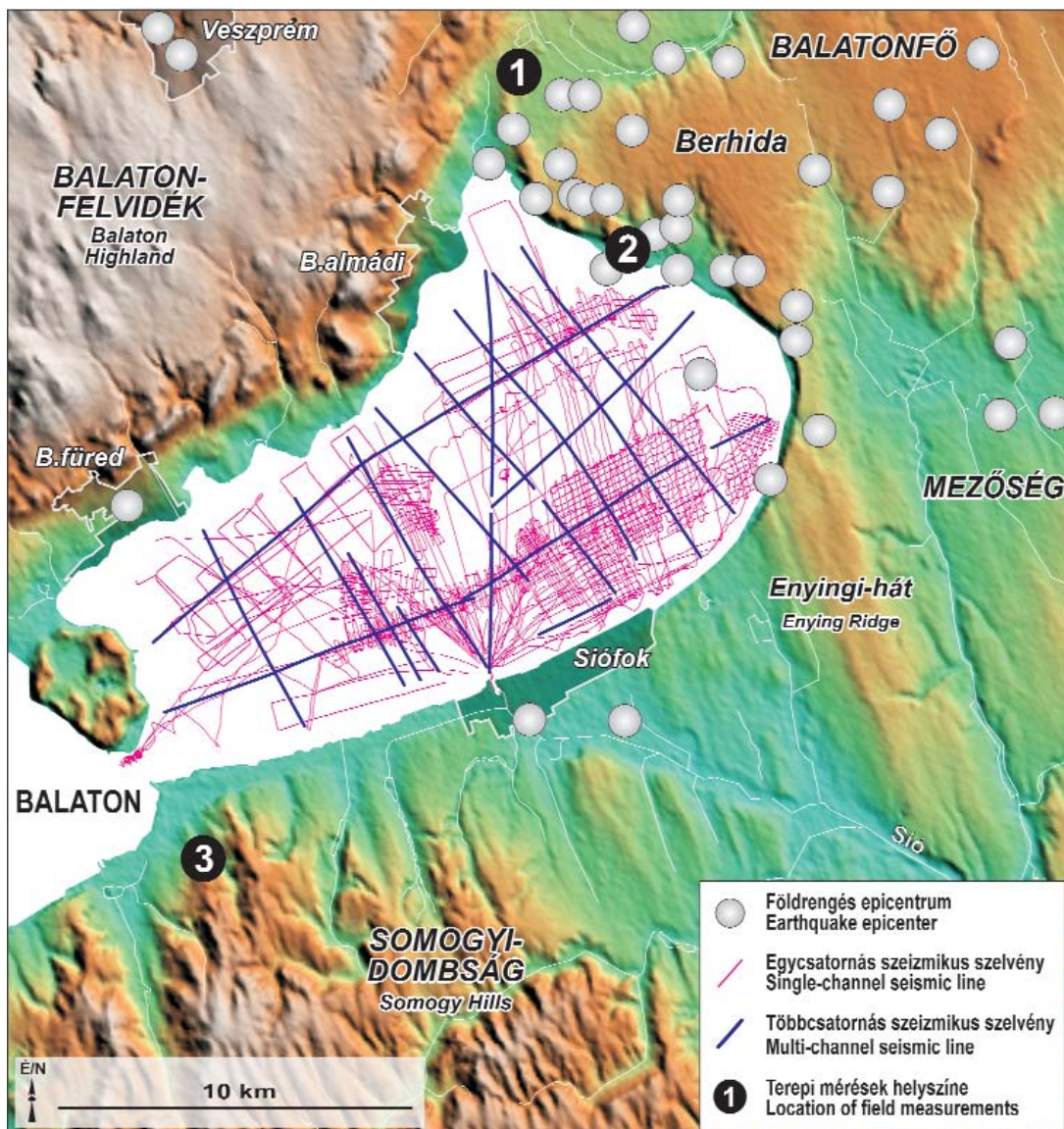
“Meridional” and “longitudinal” valleys are marked by yellow and red lines, respectively. Black arrows indicate the direction of maximum horizontal stress (S_{Hmax})

mája (I. CSILLAG et al., jelen kötet). A kérdésben kialakult vita igen termékenyen hatott a hazai tektonikai gondolkodás fejlődésére is (I. GERNER 1994; HORVÁTH & DOMBRÁDI, jelen kötet).

A Balaton medencéjének orientációja jól illeszkedik a Pannon-medence elsőrendű nagyszerkezeti elemeihez, amelyek mind az aljzatban (DANK et al. 1990), mind pedig a neogén fedőüledékekben (FODOR et al. 2005, HORVÁTH et al. 2005) javarészt ÉK–DNy-i lefutásúak. Ennél fogva a Balaton medencéjének keletkezését hagyományosan törések által irányított, árkos beszakadásként értelmezték (LÓCZY 1913, CHOLNOKY 1936). Ezen feltételezett törések — amelyek irányukat tekintve a Dunántúl már kevésbé markáns, ún. hosszanti vagy longitudinális völgyrendszerébe illesz-

kednek (I. ábra) — jelenléte a Balaton peremén nem bizonyított. Azonban a Balaton tengelyében, a Velencei-hegység felé folytatódva az aljzatban fut a Balatonfői-vonal (DUDKO 1986), amely lehatárolja a dunántúli-középhegységi és közép-dunántúli paleozoos–mezozoos képződményeket, és amelynek valószínűsíthető neotektonikai aktivitása (SACCHI et al. 1999).

Balatonfő térségében, Berhida közelében található hazánk szeizmikusan egyik aktív területe (2. ábra). A földrengések epicentrum-eloszlása nem mutat határozott trendet, sem korrelációt ismert törésekkel. Ha szerkezeti kapcsolatot tételezünk fel a Mór és a Komárom környezetében kipattanó rengésekkel, akkor a Komárom–Berhida között húzódó szeizmotektonikai pásztához nehéz ismert



2. ábra. A Balaton keleti medencéjében mért egy- és töbcsatornás szeizmikus mérések helyszínrajza, valamint a terület domborzata és szeizmicitása földrengés epicentrumok alapján. Földrengés epicentrumok TÓTH et al. (2002) nyomán

A digitális terepmodell az SRTM adatbázisából készült (RABUS et al. 2003). A terület elhelyezkedése az 1. ábrán látható

Figure 2. Location map of the single and multichannel seismic measurements in the eastern part of Lake Balaton, and the topography and seismicity of the study area. Earthquake epicentres are after TÓTH et al. (2002)

Digital elevation model was generated from the SRTM database (RABUS et al. 2003). See location in Figure 1

tektonikai elemet rendelni a Dunántúli-középhegységben. HORVÁTH (1984), GUTDEUTSCH & ARIC (1988), GERNER et al. (1999) és FODOR et al. (2005) egyöntetű véleménye szerint a magyarországi földrengések zöme már létező, főképp neogén szerkezeti elemek ismételt reaktiválódásához köthető. Berhida térségében ez az alapvetés azonban nem egyértelmű, a korreláció nem megoldott. Bonyolultabbá válik a kép a jelenkori kőzetfeszültségi adatok tükrében (1. ábra). A Balatontól nyugatra és északra a maximális horizontális feszültség (kompresszió, S_{Hmax}) iránya K–Ny-i vagy KÉK–NyDNy-i, jó összhangban a kéregmozgásokat jelző GPS adatokkal (GRENERCZY et al. 2005). A Balatontól délre a kompresszió fokozatosan vált az É–D-i irányból (Zala) ÉK–DNy-ivá (Tolna) (BADA et al. 2007a). Az 1985-ös berhidai földrengés ($M_b = 4,7$) fészekmechanizmusának első vizsgálata szerint (TÓTH et al. 1989) a kompresszió (P) tengelye közel K–Ny-i irányúnak adódott. A Berhida környéki földrengések reambulációja azonban rámutatott, hogy a szeizmikus események többsége (TÓTH et al. 2009) közel ÉK–DNy-i maximális nyomásirány mellett következik be. A Balatontól északra és délre jellemző kétféle feszültségirány tehát a Balaton keleti medencéjének környezetében látszik összesimulni. A szeizmológiai adatok kritikus jelentőséggel bírnak a vetőkinematika helyes rekonstrukciójában.

Tanulmányunkban kísérletet teszünk az utóbbi években a Balaton keleti medencéjében mért kiváló minőségű, nagyfelbontású reflexiós vízi szeizmikus mérések során nyert adatok szerkezeti, elsősorban is neotektonikai értelmezésére. Ennek keretében számos szerkezeti elemet (redőket, töréseket, vetőket²) térképeztünk, melyeket laterálisan korreláltunk és egységes kinematikai rendszerbe helyeztünk. Figyelembe véve az adatok mennyiségét és minőségét, az adatrendszer páratlan lehetőséget nyújt a neotektonikai elemzéshez. Munkánk egyik fő célja a Balaton keleti medencéje részletes neotektonikai térképének megszerkesztése volt. Vizsgáltuk továbbá — részben terepi mikrotektonikai megfigyelések felhasználásával —, hogy a Balaton környezetének morfológiai képe mennyiben mutat kapcsolatot a rekonstruált tektonikai elemekkel. Morfo-tektonikai megfontolásokon keresztül elsősorban azt igyekeztünk tisztázni, hogy a tó közelében mutatkozó meridionális völgyek és hátak tektonikusan preformáltak-e. Dolgozatunk végén a Balaton keleti medencéjében tapasztalt szerkezeti képet Dél-Dunántúl léptékű neotektonikai modellbe helyezzük a fontosabb vetőzónák és gyűrődések, földrengési epicentrumok és feszültségi trajektóriák elemzésén keresztül.

A szeizmikus adatrendszer jellemzői, értelmezési szempontok

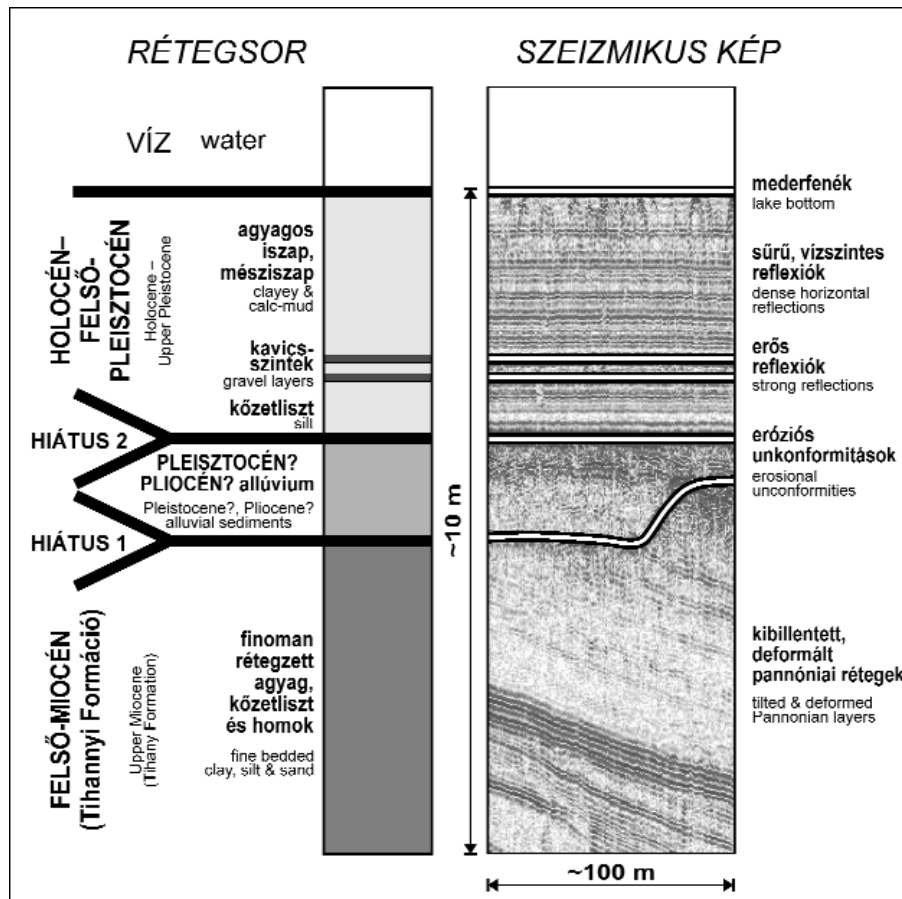
1997 óta rendszeres szeizmikus felvételezést végeztünk a Balaton keleti medencéjének területén elsősorban az

² A törés és vető kifejezéseket nem szinonimként használjuk. A törés általánosabb értelmű: a kőzetek tektonikai eredetű folytonosság hiányát jelöli. A vető olyan törés, amely mentén a kőzetek elmozdultak – függetlenül a mozgás jellegétől, kinematikájától.

ELTE Geofizikai Tanszéke és a Geomega Kft. együttműködésében. 2005-ben nyári szakmai gyakorlatunkon részt vett a Brémai Egyetem szeizmikus csoportja is. Mindezek eredményeképpen jelenleg mintegy 700 km összhosszúságban egycsatornás, ultranagy felbontású és 145 km összhosszúságban többsatornás, nagyfelbontású szeizmikus adat áll a rendelkezésünkre (2. ábra). Az eltérő felbontás és függőleges behatolás miatt a kétféle adatrendszer jól kiegészíti egymás. Az együttes értelmezés lehetővé teszi a szerkezeti elemek háromdimenziós geometriai elemzését, a tektonikai elemek korrelálását, valamint a mélyebben fekvő és a sekély szerkezetek kinematikai kapcsolatának tisztázását.

A Balaton keleti medencéjében a szeizmikus mérések helyszínrajza célorientált tervezést tükröz (2. ábra). Néhány hosszú szelvényrel az átnézetes térképezés volt a cél. A szeizmikus mérőműszer kis mérete miatt a méréseket jól manőverezhető, könnyen navigálható hajókról végeztük. A szelvények gyors, vizuális kiértékelése után az azonosított szerkezetek követése megoldható volt. Az egycsatornás szelvények túlnyomó többsége szerkezetileg zavart zónákat követ vagy rétegtanilag érdekes területeket tár fel. Előbbire jó példa a Siófoktól É–ÉNy-ra, a tó tengelyével párhuzamosan futó nyírási zóna, ami egy igen sűrű, bár meglehetősen szabálytalan szelvényhálóval lett felmérve. Szintén Siófok közelében, a várostól É–ÉK-re található széles területet szabályos, kb. 200×200 m sűrűségű rácsháló fedi, ami a korrelációt és térképezést jelentősen megkönnyítette. A többsatornás profilok a Balaton tengelyére merőlegesen vagy azzal párhuzamosan futnak. A szelvények többsége a korábbi mérések alapján már azonosított törési zónákra merőlegesen, a késő-miocén deltarendszer rekonstruált progradációjának irányával pedig nagyjából párhuzamosan halad. A többsatornás mérési konfiguráció hirtelen irányváltásokat nem tett lehetővé, viszont optimális volt a hosszú, egyenes szelvények felvételére. Az egycsatornás időszelvények mélységskálájának becsléséhez 1500 m/s, míg a többsatornás profilok esetén 2000 m/s átlagos sebességet használtunk a teljes leképzett összletre vonatkozóan.

Az egycsatornás, ultranagy felbontású szelvények páratlan felbontásban mutatják a rétegtani felépítést és tektonikai habitust. Az alkalmazott jelforrás frekvenciatartománya és energiája miatt a deciméteres nagyságú felbontáshoz viszonylag korlátozott behatolás társul: a mérési módszerrel értékelhető szeizmikus reflexiót max. 20–30 m mélységből kaptunk. A 3. ábra a Balaton alatti térrész elvi rétegsorát és annak tipikus szeizmikus képét mutatja. A tó vize alatti, javarészt holocén korú iszap vízszintesen jól rétegzett. A konszolidálatlan iszap alsó harmadában látható erőteljesebb reflexiók kavicsszinteket jelezhetnek, amit fúrások is feltártak (CSERNY 2002). Alatta közvetlenül települ, reflexiókban szegény szeizmikus képpel. A tavi mészszipap és az alatta elhelyezkedő kőzetek egy markáns unkonformitás választja el, amely a Balaton egész területén jól követhető. Ez a csaknem teljesen horizontális eróziós felszín jelentős rétegtani hiást jelez a max. 15 000 éves tavi üledékek (CSERNY & NAGY-BODOR 2000) és a mintegy 8–8,5 millió éves pannóniai összlet (MAGYAR et al. 1999, SZTANÓ &



3. ábra. A szeizmikus szelvények által a Balaton alatt leképzett tértartomány vázlatos rétegsora és a képződmények jellegzetes szeizmikus képe

A szelvény túlmagasítása kb. 30×-os

Figure 3. Generalised geology of the shallow subsurface underlying Lake Balaton, and the high resolution seismic image of the sediments

Seismic profile is vertically exaggerated by ~30×

MAGYAR 2007) között. A pannóniai rétegsor és a Balaton üledékei között helyenként bizonytalan korú (pleisztocén?) kőzetek települnek, melyek a szeizmikus képük és geometriájuk alapján folyóvízi környezetben képződtek (SZAFIÁN et al. 2007 — 3. ábra)

A Balaton alatti, meglehetősen konszolidált pannóniai üledékek (Tihanyi Formáció — SACCHI et al. 1999) településére jellemző a max. néhány fokos rétegdőlés. Ez a dőlés lehet az eredeti üledékes környezetből öröklött (progradáló deltalejtők) és/vagy szerkezeti kontrollált (regionális billenés, redőződés). A szeizmikus szelvényeken a dőlésviszonyok akkor rekonstruálhatók jól, ha a megjelenítésnél erőteljes — akár néhányszor tízszeres — túlmagasítást alkalmazunk (3. ábra). Az egycsatornás szelvények korlátozott mélysége miatt a nagyobb léptékű laterális korreláció nem, vagy csak korlátozottan valósítható meg. Vonatkozik ez a pannóniai összletben térképezett erősebb reflexiókra is. Ezek uralkodó dőlése (dél-délkeleti, így a max. 20–30 m mélységű leképzés („szeizmikus ablak”) mellett és a reflexiók D–DK-i irányú süllyedése miatt, még az igen csekély dőlés mellett is a rétegek 1–2 km távolságon eltűnnek a szelvényekről. Dőlésiránnyal ellentétesen,

E–ENY-i irányban ugyanezen reflexiók az iszap bázisán jelentkező regionális diszkordancia felület mentén erősiósan lefejeződnek. Más a helyzet a szerkezeti értelmezésnél: a törések túlnyomó többsége a pannóniai összlet legtetetejéig hatol, így a szelvényről szelvényre történő korreláció megoldható.

A többszatornás szeizmikus mérést 2005-ben a Brémai Egyetem szeizmikus csoportja végezte. Az alkalmazott forrás az egycsatornás felvételekhez képest jóval nagyobb energiájú és kisebb frekvenciájú jelet hoz létre. Ennek következménye, hogy a kapott szeizmikus szelvények felbontása lényegesen gyengébb, behatolása viszont jóval nagyobb. Egy átlagos szelvény felbontása 1–3 m, behatolási mélysége kb. 150–200 m. Ennél mélyebbről is érkeznek reflexiók, ezek értelmezése azonban az egyre gyakoribb többszörös, azaz földtani információt nem hordozó reflexiók miatt bizonytalan. A többszatornás szelvényeknek számos haszna van, és jól kiegészítik az egycsatornás szelvényeket. Mivel nagyobb mélységet képeznek le, a felszínközeli szerkezeti pásztták gyökérszínéről szolgáltatnak információt. Másrészt pedig a nagyobb léptékű térképezést és korrelációt teszik lehetővé, ami mind a

tektonikai, mind pedig a rétegtani interpretációnál lényeges szempont volt. Az adatrendszer feldolgozása a közelmúltban fejlődött be, a szelvények részletes értelmezése folyamatban van (TÓTH 2009).

Tanulmányunkban *neotektonika* alatt a földkéreg bármely dokumentálható mozgását vagy deformációját értjük, melyek a legfiatalabb jelentős tektonikai fázis következményei és amelyek a jövőben is bizonyos valószínűséggel folytatódhatnak. A neotektonikus és különösen az aktív szerkezetek térképezése problematikus feladat számos elvi és gyakorlati nehézséggel (BADA et al. 2000). A szerkezet-földtani gyakorlatban egy vető működésének korát a törés által még érintett és a már nem érintett rétegek korának összevetésével lehet becsülni. A módszer azonban több hibával is terhelt. Vakvető, azaz csak az aljzatot érintő, a felszínig fel nem hatoló vetők esetén nehéz lehet a szerkezet korolása. Problémák adódhatnak akkor is, ha a rétegsor hiányos: ekkor a vető korát csak tág határok között adhatjuk meg. Gyakori, hogy egy aktívan süllyedő medence legfelső, fiatal és még konszolidálatlan üledékei csak képlékenyen³ tudnak deformálódni, így az egyébként aktív törések még a felszín alatt elvégeződnek, eltűnnek.

A fenti megfontolások, valamint általában a Pannon-medence tektonikai, szeizmológiai és rétegtani viszonyai arra figyelmeztetnek, hogy a neotektonikus, ill. aktív szerkezetek azonosítása és korolása nagy körültekintést igényel. A jelenkori aktivitás egyértelmű bizonyítására csak olyan területen van esély, ahol a miocén, pliocén és a kvarter rétegek folyamatosan, nagyobb vastagságban települnek. Ezen területek földrajzi elterjedése hazánkban korlátozott: a Balaton környezete nem tartozik ide. A Közép-Dunántúl nagy részén, így a Balaton keleti medencéjében is a kiemelkedő és ezért erodálódó térszínen a legfiatalabb üledékek hiányzanak vagy csak hézagosan, ill. redukált vastagságban (eróziós roncsokban) fordulnak elő (3. ábra). Emiatt a szerkezetek jelenkori aktivitásának egyértelmű meghatározása alig vagy egyáltalán nem lehetséges. Ezen megfontolások alapján munkánk során nem az aktív, hanem a neotektonikus szerkezeteket térképeztük. Ez utóbbi halmaz természetesen bővebb, mint az aktív szerkezetek összessége, de a két csoport megbízható szétfésülése a Balaton környezetében jelenleg még nem megoldott. A továbbiakban neotektonikus szerkezetnek tekintünk minden olyan vetőt és redőt, amely a pannóniai, pliocén vagy negyedidőszaki képződményeket deformálja. Ezek között természetesen számos aktív és inaktív szerkezet is megtalálható, azonban a korrekt térképszerkesztés miatt — mivel elkülönítésük általában nem lehetséges — ezeket együtt tüntettük fel. Mindezek fényében kijelenthető, hogy a tanulmányunkban közölt szerkezeti vázlatok és térképek biztosan a pannóniai összlet lerakódása utáni, azaz a kb. 8 millió évnél fiatalabb szerkezeteket mutatják.

Szeizmikus szelvények szerkezeti értelmezése

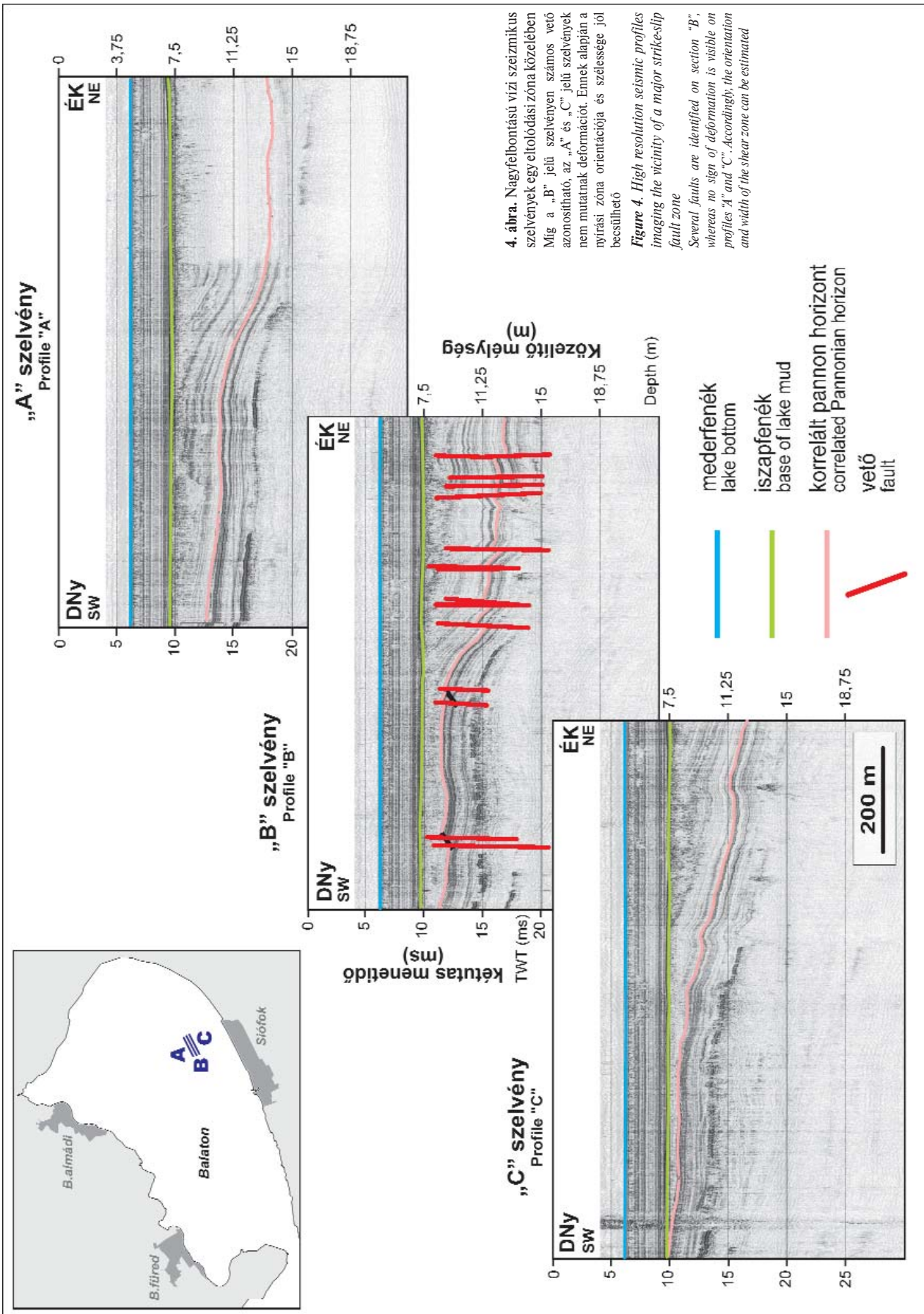
Az alábbiakban jellemző példákat mutatunk be a Balaton keleti medencéjének neotektonikai jellegzetességei szemléltetése céljából. A bemutatott szeizmikus szelvények kiválasztásánál fontos szempont volt, hogy 1) jól definiált és 2) tipizálható tektonikai jelenségeket tárjanak fel, valamint 3) megfelelő orientációban (csapás vagy dőlésirányban) 4) kellően nagyléptékű deformációs zónák részleteit mutassák. Először a töréses, majd a gyűrt szerkezeti elemeket, végül ezek kombinációit mutatjuk be.

Töréses szerkezeti elemek

A 4. ábra három egycsatornás szeizmikus szelvényt mutat, amelyek Siófoktól mintegy másfél km-re északra, a Balaton tengelyével párhuzamosan helyezkednek el. A szelvények mentén ÉK felé süllyedő pannóniai horizontok az egymástól mintegy 400 m távolságban lévő „A” és „C” jelű profilokon tektonikailag zavartalanok; sem törés, sem pedig redőződés nem mutatkozik. A köztes, „B” jelű szelvényen azonban több vető értelmezhető, melyek kisebb csoportokba rendeződnek, jellemzően néhány dm-es nagyságú elvetéssel. A szelvény erősen túlmagasított, ezért a töréses elemek közel függőlegesnek látszanak. A valódi dőlésszöget — részben a túlmagasítás, részben pedig a szelvény orientációja (áldőlés) miatt — csak becsülni lehet: mértéke kb. 40–60°. Az elvetések alapján látszólag normálvetőkkel van dolgunk, amelyek mellett egy-két kisebb feltolódás is látható. A vetők két oldalán eltérő a reflexiógeometria (pl. erős és gyenge reflexiók száma, reflexió együttesek vastagsági viszonyai), ami arra enged következtetni, hogy jelentősebb elmozdulás történhetett a szelvényre merőleges irányban, oldaleltolódás formájában. Ennek mértéke egyetlen profil alapján nehezen határozható meg. A szerkezeti értelmezés alapján, valamint a három szelvény párhuzamos volta és a köztük lévő kis távolság miatt az „A” és „C” jelű szelvények között egy nagyjából ÉK–DNy-i csapású eltolódási (nyírás) zónát rekonstruáltunk. Ennek kulisszasan rendeződő vetői a „B” jelű szelvényt hegyesszögben metszik, a zóna szélessége pedig kisebb, mint az A és C profilok távolsága.

A fenti értelmezést a zónán áthaladó nagyszámú további szelvény (2. ábra) is megerősíti, melyek közül két jellegzetes példát mutatunk be az 5. ábrán. Az „Ss1” jelű szelvény (5. ábra, a) — hasonlóan a 4. ábrán látható „B” jelű profillal — az eltolódási zónával párhuzamosan fut. A sűrűn összetoredezett pannóniai üledékek dőlése a törések mentén helyről helyre változik, amit az elvetésekhez kötődő finom kibillenések okoznak. Az egyes reflexiócsomagok vastagsága ellenben nem vagy alig változik. A szomszédos szelvényekkel való összevetés alapján úgy tűnik, hogy az „Ss1” jelű profil pontosan a nyírás zóna tengelyében, a kulisszás vetősíkokkal hegyesszöget bezáróan halad. Emiatt a szerkezetek valódi geometriája (dőlésirány és -szög) nehezen határozható meg. Jobb a helyzet az „Ss2” (5. ábra, b)

³ A „képlékeny deformáció” kifejezést a töréses deformációtól eltérő, folyamatos alakváltozásra használjuk, függetlenül attól, hogy a deformációnak pontosan milyen a mechanizmusa vagy a kőzet reológiai értelemben hogyan viselkedik.



4. ábra. Nagyfelbontású vízi szeizmikus szelvények egy eltolódási zóna közelében. Míg a „B” jelű szelvényen számos vető azonosítható, az „A” és „C” jelű szelvények nem mutatnak deformációt. Ennek alapján a nyírás zóna orientációja és szélessége jól becsülhető.

Figure 4. High resolution seismic profiles imaging the vicinity of a major strike-slip fault zone. Several faults are identified on section „B”, whereas no sign of deformation is visible on profiles „A” and „C”. Accordingly, the orientation and width of the shear zone can be estimated.

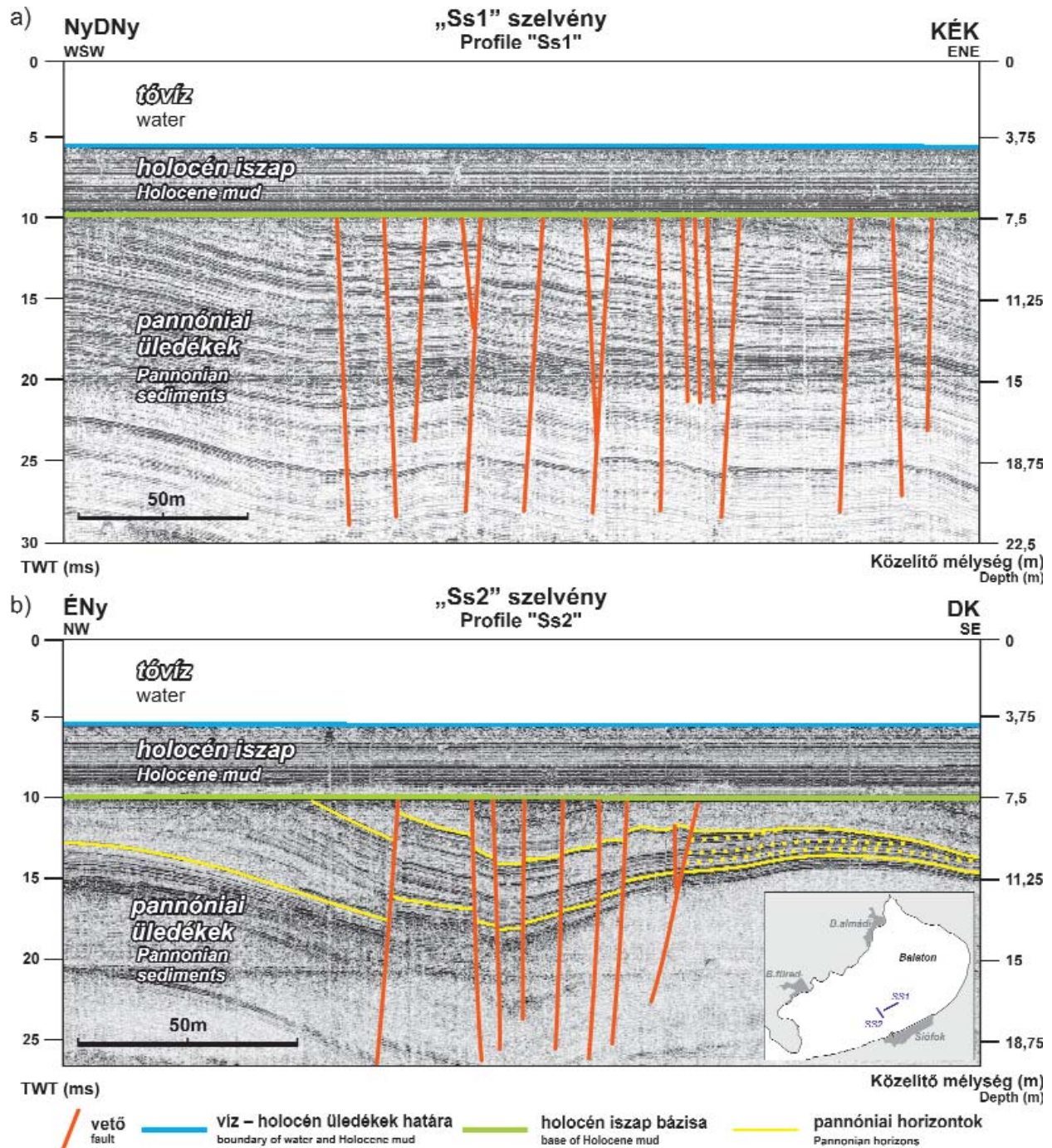
mederfenék
lake bottom

iszapfenék
base of lake mud

korrelált pannonian horizont
correlated Pannonian horizon

vető
fault

200 m



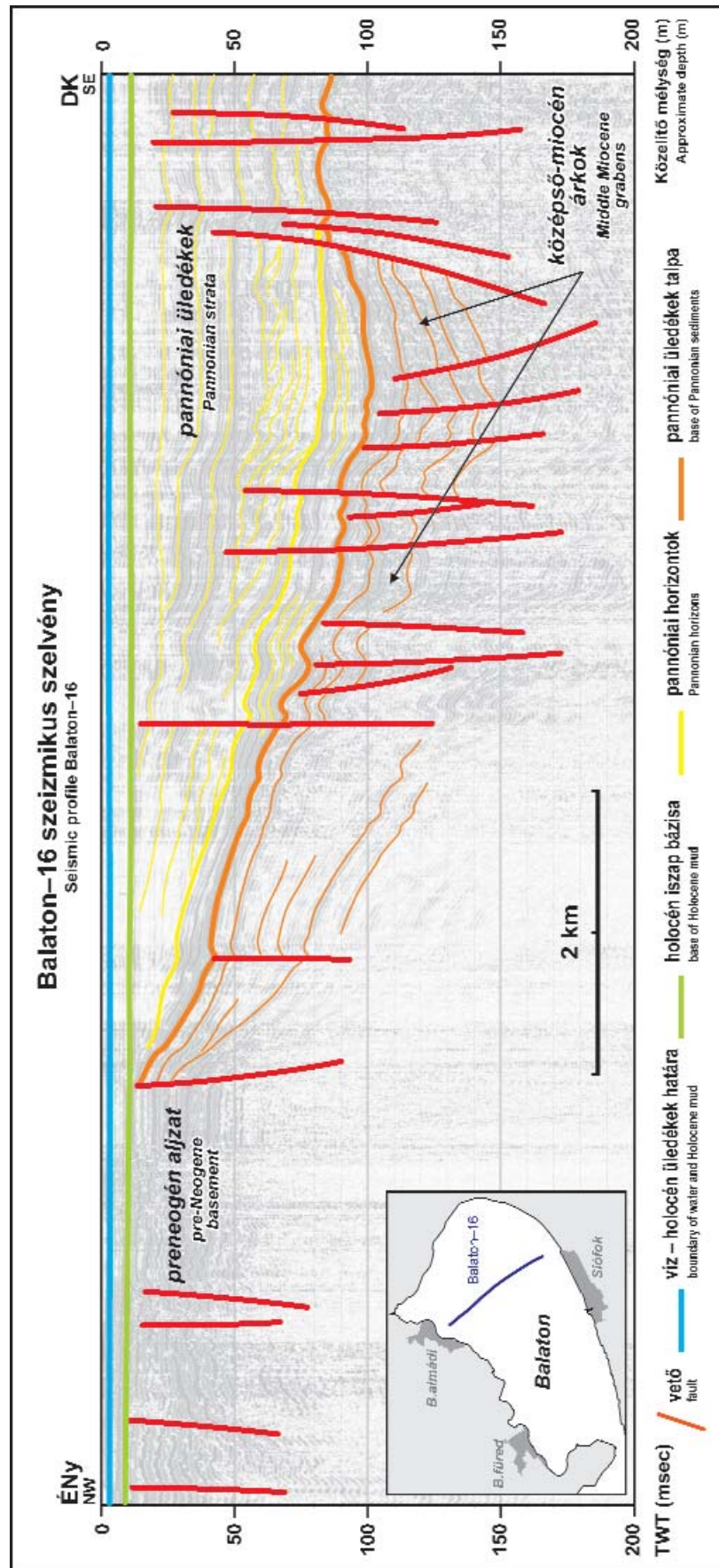
5. ábra. Eltolódási zóna belső szerkezete kulisszaszerűen elhelyezkedő vetőkkel az a) „Ss1” és b) „Ss2” jelű nagyfelbontású vízi szeizmikus szelvényeken
 Figure 5. High resolution seismic profiles "Ss1" and "Ss2" highlight the internal structure of a strike-slip fault zone with individual faults aligned in en-echelon geometry

jelű szelvény esetében, amely az előzőre merőlegesen, nagyjából ÉNy–DK-i irányban halad. Itt a szerkezetek egy kb. 60–80 m széles sávban jelentkeznek. A pannóniai összlet a vetők mentén viszonylag kis elvetéssel deformált. A szelvény legészakabbi és legnagyobb elvetésű szerkezetét leszámítva a vetők a mélységgel egymás felé tartanak, ami egy negatív virágszerkezet jelenlétére utal. A kis behatolási mélység miatt az eltolódási öv feltételezett gyökérszónájának vizsgálata azonban nem lehetséges. Az eltolódásos

komponens jellegének és mértékének becslését megnehezíti, hogy az ábrán sárga vonalakkal értelmezett két pannóniai reflexió által közrezárt összlet eredeti rétegződése sem volt párhuzamos. Jól látszik, hogy ez az üledékköteg DK-i irányban egyre vékonyabbá válik: a szelvény végén a két korrelált horizont gyakorlatilag összeér. A sárga szaggatott vonalakkal jelzett reflexiók elvégződése „toplap” geometriát mutat, ami egy intrapannóniai eróziós eseményt sejtet a szelvény DK-i felén látható magaslat tetőzónájában.

Hasonló eróziós eseményt a tó más területein, így pl. Fonyód előtt is megfigyeltek (Novák 2006). A szelvény középső részén az összlet kivastagszik, ami tükrözheti az eredeti vastagságviszonyokat egy helyi süllyedékben. Ezt azonban lehet magyarázni úgy is, hogy a nyírási zóna egyes eltolódásai eltérő vastagságú üledékkötegeket helyeztek egymás mellé. Az üledékes és tektonikai szerkezetek tehát gyakran hasonló geometriai képpel és léptékben jelentkeznek.

A fentiek alapján Siófoktól 1–2 km-re északra, a Balaton partjával nagyjából párhuzamosan egy oldal-eltolódási zóna képe rajzolódik ki. Ennek nagyobb léptékű elemzése, a mélyebb és sekélyebb szerkezetek kapcsolatának feltárása a többcsatornás szeizmikus szelvényeken lehetséges. A teljes adatrendszer értelmezése jelenleg folyamatban van (Tóth 2009). Az alábbiakban egy tipikus példával szemléltetjük az interpretáció lehetőségeit. A 6. ábra a Balaton-16 jelű profilt mutatja, amely a Balatont majdnem teljes szélességében harántolja a tó tengelyére nagyjából merőlegesen. Jól értelmezhető reflexiók a szelvény déli háromnegyedén jelentkeznek, jellemzően 80–140 m mélyséig. Az igen vékony holocén tavi iszap alatt DK-felé fokozatosan vastagodó pannóniai üledékek láthatók. Az összletben látható reflexiók belső geometriája (gyakori rálapolódások) arra utal, hogy a szelvény északi részén látható magaslat már a pannóniai összlet lerakódása alatt (11–8 Ma?) is relatíve kiemelt helyzetben volt. Délies irányú, posztpannóniai korú billenést — és ezzel együtt az északi magaslat fiatal kiemelkedését — valószínűsít a rétegfejek eróziós lefejeződése a tavi iszap bázisán (l. még 5. ábra). Értelmezésünk szerint a pannóniai üledékek alatt jelentősen eltérő reflexiók képpel középső-miocén (szarmata és/vagy badeni) üledékek alkotják a pannóniai fekvését. Ezeket a képződményeket lokálisan más szeizmikus mérések is kimutatták (SACCHI et al. 1999, CSERNY et al. 2005), valamint partközeli

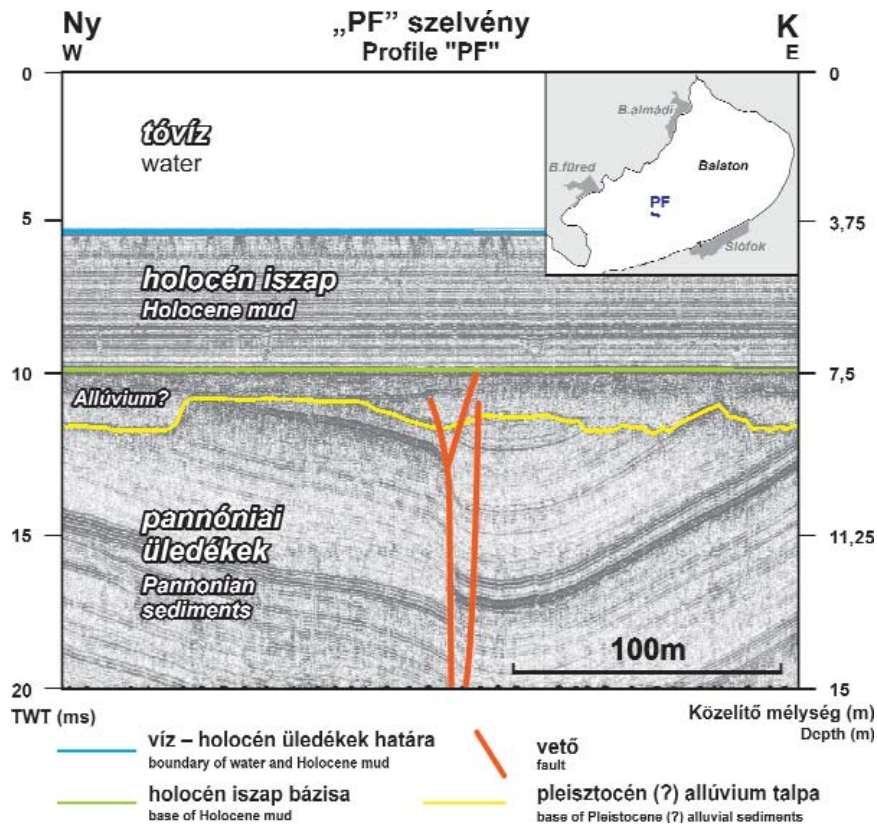


6. ábra. A Balaton tengelyére merőleges, Balaton-16 jelű többszörös vízi szeizmikus szelvény a pannóniai üledékek belső szerkezetét és szarmata fekvését, valamint számos törést mutat 100–120 m-es mélységig. *Figure 6. Multichannel seismic profile Balaton-16 shows the architecture of Pannonian sediments and the underlying Sarmatian strata, and the geometry of several faults*

fúrások harántolták (Balatonföldvár–MHSZ, Siófok–3, Tihany–62; JÁMBOR 1987). Ezek az üledékek kisebb (fél)árkokban települnek, melyek közül néhány enyhén invertált képet mutat. Az árkok jól láthatóan tektonikus eredetűek, peremüket általában vetők alkotják melyek nagy valószínűséggel középső-miocén korúak, azaz a Pannon-medence riftesedéséhez kötődnek. Független kiterjedésük nem korlátozódik a szarmata (badeni) üledékekre, hanem némelyikük jóval feljebb hatol, a teljes pannóniai összletet deformálva. Igaz ez még azokra a vetőkre is, melyek a szelvény közepe táján, még a pannóniai belül elhalva a vetőcsúcsuk felett boltozatokat hoznak létre (vakvetők). Mindezek fényében megállapítható, hogy a pannóniai deformáló törések egy jelentős része a középső-miocénból átöröklött szerkezeti elem. A feszültségtengelyek optimális orientációja esetén ezek a vetők a pannóniai korszak után, tehát már a neotektonikus fázis során ismételtelen működésbe léptek, reaktiválódtak. Erre jó példa a szelvény DK-i végén látható markáns törési zóna, melynek egyik fő ága a mélyebben fekvő szarmata süllyedék peremi vetőjében gyökerezik és egészen a felszín közelébe hatol. Ez a nyírási öv korrelálható a 4. és 5. ábrán bemutatott eltolódási zónával, amelynek csapása nagyjából egybe esik a Balaton tengelyével. Érdekes még a szelvény északi harmadán mutató, erőteljes reflexiókkal jelentkező térrész, melyet

észak felől kisebb vetők határolnak. Parti fúrások (pl. Balatonalmádi, Lovas) alapján a magaslaton prekainozoos aljzatképződményeket (Lovasi Fillit F. és Balatonfelvidéki Homokkő F.) valószínűsítünk. Ezt az értelmezést támogatja LÓCZY (1913) közelben mélyült IX-es számú tavi fúrása is, ami a tavi iszap alatt kavicsstetet tárt fel jelentős mennyiségű fillittörmelékkel.

A pannóniai rétegsort deformáló törések korolásának pontosítását segíti a 7. ábrán bemutatott szelvény szerkezeti értékelése. A „PF” jelű szelvény rétegtanilag is érdekes, hiszen a pannóniai üledékek meglehetősen szabálytalan lefutású, eróziós felszíne és a Balaton iszapja között egy a fedőjéltől és fekjéltől is lényegesen eltérő szeizmikus arculatú összlet települ, átlagosan 1–2 m vastagságban. A képződmény térképezése (SZAFIÁN et al. 2007) arra utal, hogy valószínűleg folyóvízi eredetű üledékekkel van dolgunk, amelynek keletkezése egy a Balaton keleti medencéjében meanderezve kanyargó egykori folyóhoz köthető. Hasonló következtetésre jutott Fonyód térségében NOVÁK (2006) is. MIKE (1976) modelljében a Balaton alatt egy egykori folyó (szerinte Ős-Duna) medernyomaival számol, amelynek kora a szerző szerint mintegy 1000–700 ka (korai-pleisztocén). Lehetséges az is, hogy az általunk térképezett mederrendszer léptéke egy Ős-Duna-léptékű folyónál kisebb méretű mellékfolyóra utal. Mindenesetre a Balaton tómeden-



7. ábra. Holocén tavi iszap és pannóniai üledékek közé települő, bizonytalan (pleisztocén?) korú, valószínűleg folyóvízi eredetű összletet is elvető törés a „PF” jelű nagyfelbontású vízi szeizmikus szelvényen

Figure 7. High resolution seismic profile “PF” shows faults offsetting sediments of uncertain (Pleistocene?) age and likely of alluvial origin, sandwiched between the Holocene mud lake and Pannonian strata

céjének eredetét egy ősi folyó meanderező medréhez kapcsoló elképzelés megerősítését a vízi szeizmikus mérések egyik fontos ősföldrajzi eredményének tekintjük (NOVÁK et al. 2010). A szelvényen (7. ábra) látható vető nem áll meg a pannóniai üledékek tetőszintjénél, hanem a pannóniaiainál (8 millió évnél) mindenképpen fiatalabb fluviális (?) összletet is deformálja. Ha ennek kora valóban pleisztocén, akkor a szelvény bizonyítottan negyedidőszaki deformációt mutat.

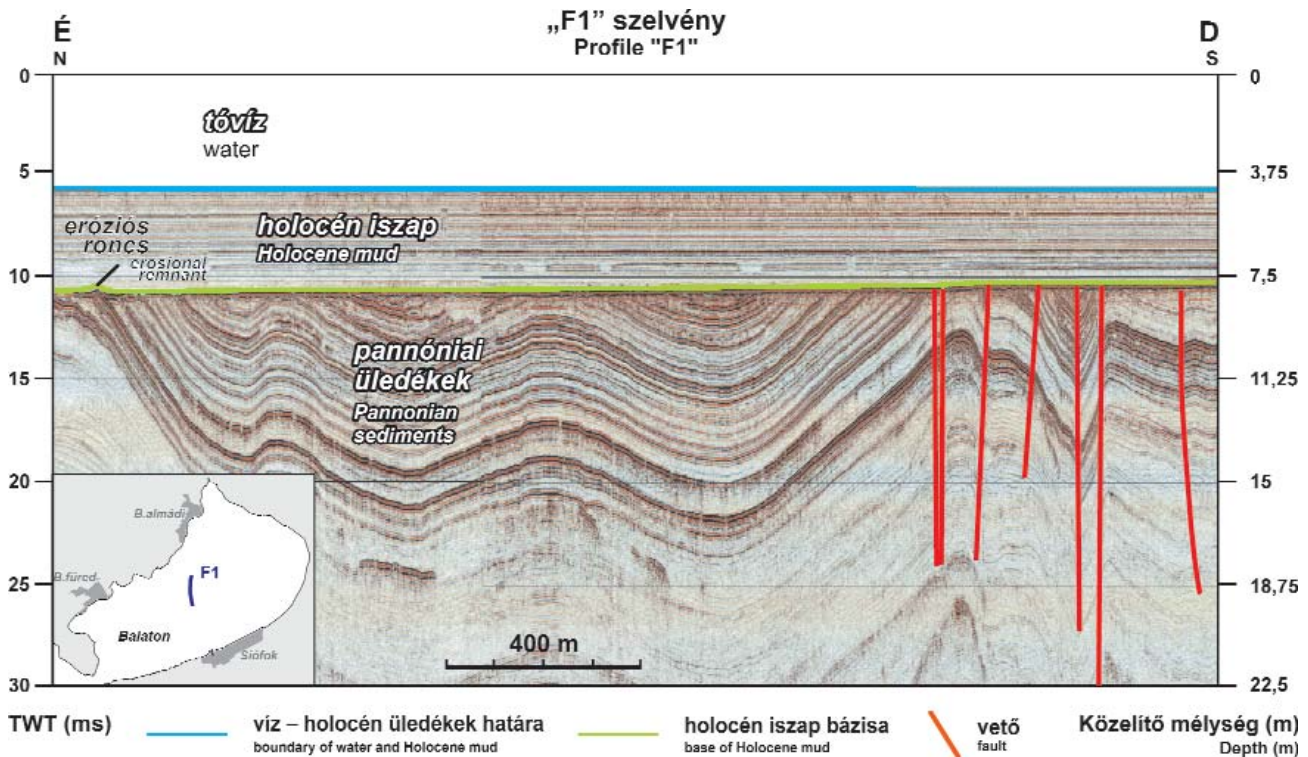
Gyűrődéses szerkezeti elemek

A pannóniai üledékek gyüredezettsége tipikus a Balaton keleti medencéjének térségében. A rétegek (szeizmikus reflexiók) valós dőlése alapján ennek mértéke igen csekély (néhány fok) és helyről helyre változik. A szeizmikus szelvények jelentős túlmagasításával azonban a redők könnyen felismerhetők, megbízhatóan térképezhetők és tektonikai jelentőségük megkérdőjelezhetlenné válik. Redőket más tanulmányok is kimutattak (SACCHI et al. 1999, CSERNY et al. 2005), de rendszeres térképezésük ez idáig nem történt meg.

A 8. ábra a keleti medence központi részén É–D-i irányban húzódó, nagyjából 2,5 km hosszú, „F1” jelű szelvényt mutatja. Míg a Balaton iszapja nem mutat deformációt, addig a pannóniai rétegek gyűrtek, ami még a szelvény déli végét átszelő eltolódási zóna belsejében is nyomozható. Az

iszap és a pannóniai rétegek közötti eróziós diszkordanciafelület a redők tetejét csaknem vízszintesre „borotválta”, számos rétegfejet lefejezve. Ez alól csupán egy kivétel látszik a szelvény északi végén, ahol egy erős reflexióval jelentkező kompetensebb pannóniai rétegfej kicsiny eróziós roncsként emelkedik ki a környezetéből. A függőleges és vízszintes lépték összevetésével a jellemző rétegdőlés — ami a szelvény orientációjának függvényében változó mértékű áldőlés — becsülhető: ennek maximális nagysága kb. 1–1,5°. Ez az érték a többi profil esetén is jó közelítésnek tekinthető. Részben a terepi eszközök limitált pontossága, részben pedig a feltárások általában korlátozott mérete miatt ilyen csekély rétegdőlés kimérése terepen gyakorlatilag kivitelezhetetlen. Ez egyfelől világossá teszi a szeizmikus szelvényezés fontosságát neotektonikai vizsgálatokban, másfelől pedig megértjük PÁVAI VAJNA F. hitvallásának jogosságát és méréseinek korlátozott érvényességét (HORVÁTH & DOMBRÁDI, jelen kötet).

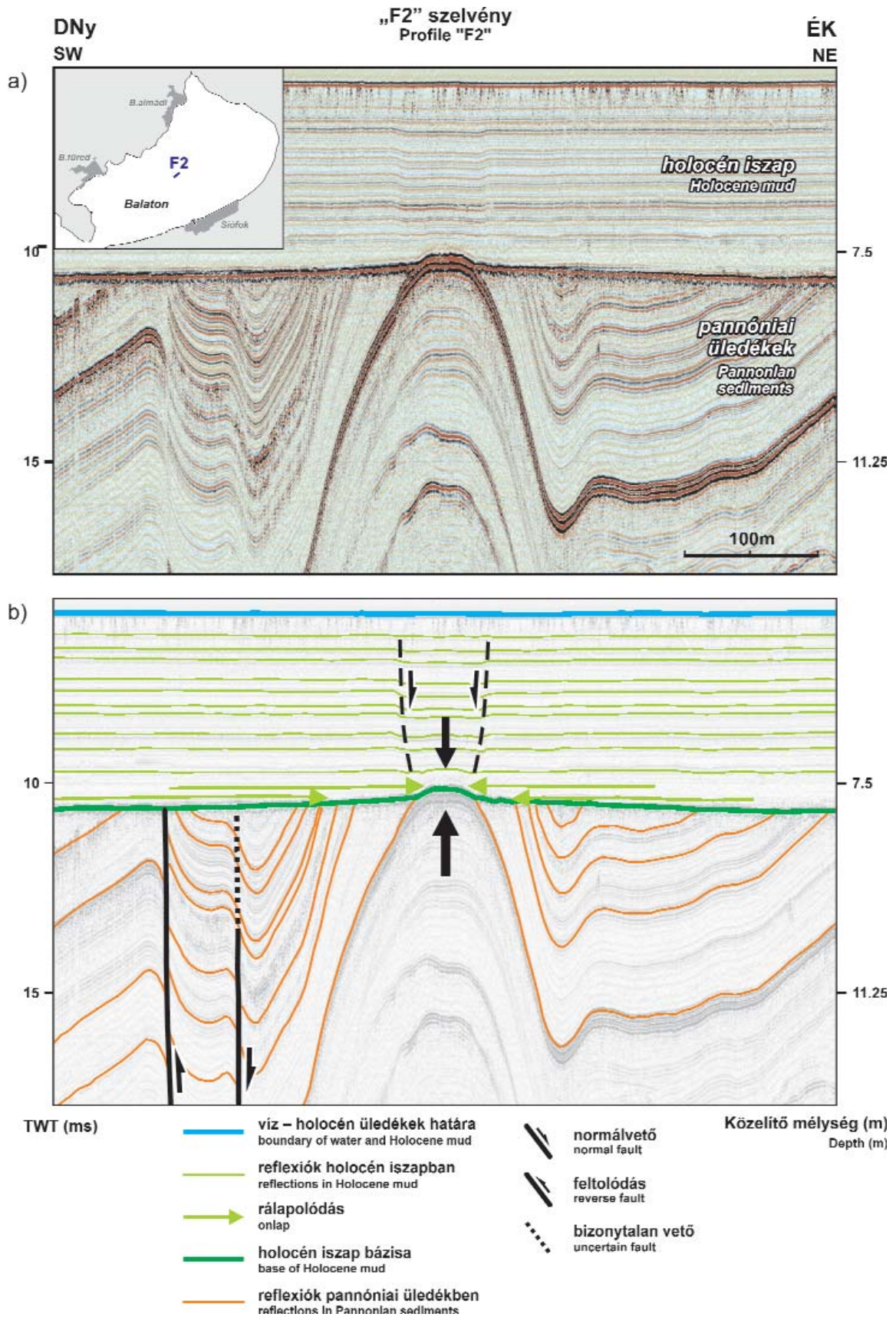
A 9. ábrán bemutatott „F2” jelű szelvény külön figyelmet érdemel, több szempontból is. A profil közepén egy markáns boltozat látszik, amelynek peremi helyzetén lévő reflexiók mindegyike eróziósan lefejezett. Az antiklinális tengelyében egy vélhetőleg kompetensebb réteg azonban enyhén kimagaslik a környezetéből. Ettől a ponttól DNy-i és ÉK-i irányban is enyhén dől a tavi iszap bázisát jelentő diszkordanciafelület. Az így előállt relatív magaslatra a legelső balatoni iszaprétegek rálapolódnak („onlap”), ami



8. ábra. Pannóniai üledékek jellegzetes gyüredezettsége az É–D-i lefutású „F1” jelű nagyfelbontású vízi szeizmikus szelvényen. Mivel a szelvény jelentősen (~55×) túlmagasított, a valós dőlésviszonyokat nem tükrözi hűven. A számított maximális rétegdőlés értéke ~1–1,5°

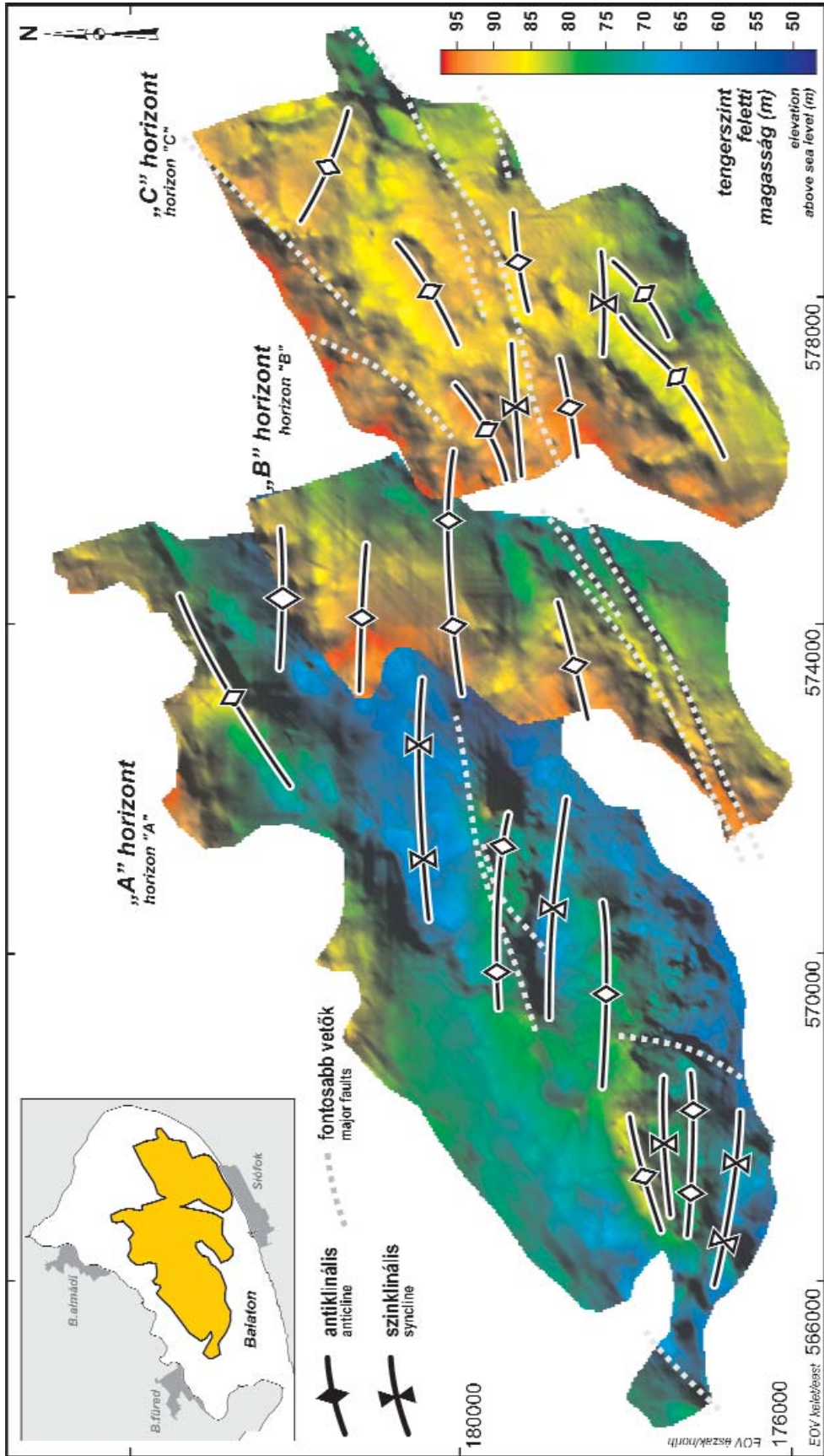
Figure 8. Characteristic folding pattern of the Pannonian strata on high resolution seismic section “F1”

As the profile is extremely (~55×) exaggerated vertically, apparent bedding is significantly higher than the calculated maximum of actual bedding (~1–1.5°)



9. ábra. Az „F2” jelű nagyfelbontású vízi szeizmikus szelvény és tektonikai értelmezése
A holocén iszapban mutató deformációs bélyegek igen fiatal (aktív?) szerkezeti mozgásokra utalnak

Figure 9. High resolution seismic profile “F2” and its structural interpretation
Deformation pattern in the Holocene lake mud refers to very young (recent?) tectonic activity



10. ábra. Három kiválasztott pannóniai horizont, ill. unkonformitás tengerszint feletti magassága és a fontosabb gyűrődéses szerkezeti elemek (redőténgelyek) elhelyezkedése
 Figure 10. Elevation of three selected Pannonian horizons and unconformities above sea level, and the location of major folds axes

arra utal, hogy a magaslat már a Balaton kialakulásának kezdetén is létezett. Az iszap felsőbb részén egy szimmetrikus, ellentétesen dőlő (konjugált) normálvetőpár rajzoldódik kicsiny, de jól látható elvetéssel. Hasonló, normálvetők által lehatárolt beszakadás kialakulása antiklinálisok vagy sódómok fedőüledékeiben gyakori jelenség (McCLAY 1989). Figyelembe véve az iszap reológiai tulajdonságait — lágy, plasztikusan deformálódó üledékről van szó —, nem rideg törés, hanem képlékeny nyírás zajlott az összletben, ami a rétegeket kis mértékben elmozdította. A legfelső, épp ezért legképlékenyebb iszaprétegek nem deformáltak, hanem valószínűleg viszkózus anyagként viselkedtek. A reflexiók kép mindezek alapján azt sugallja, hogy a redőződés rendkívül fiatal: véleményünk szerint a boltozat jelenleg is aktív. Hasonló szerkezeti jelenség rendkívül ritka a Balaton általunk tanulmányozott részein — elsősorban a balatoni iszap képlékeny volta miatt.

A nagyobb léptékű redők laterális korrelálásához, redőtengelyük meghatározásához kézenfekvőnek tűnt néhány markáns pannóniai horizont térképezése. Figyelembe kellett venni, hogy számos, elsősorban antiklinálisnak tűnő boltozat valójában korábbi, a pannóniai összlet keletkezésekor már meglévő topográfiai magaslatként is értelmezhető (5. ábra, b). Ez a reflexiók belső geometriájának, a reflexió elvégződés (rálapoldások, „toplap” geometria, rétegféjek lefejeződése) részletes vizsgálatával általában ellenőrizhető. Az egysatornás szeizmikus szelvények behatolása korlátozott és az összlet deformáltsága miatt a reflexiók rövid távon vagy lefejeződnek, vagy a profil által már le nem képzett mélységbe süllyednek. Emiatt nem volt lehetséges olyan horizont kijelölése, amely a vizsgált terület egészén térképezhető lett volna. A 10. ábra három viszonylag nagyobb távon követhető pannóniai reflexió mélységét mutatja.

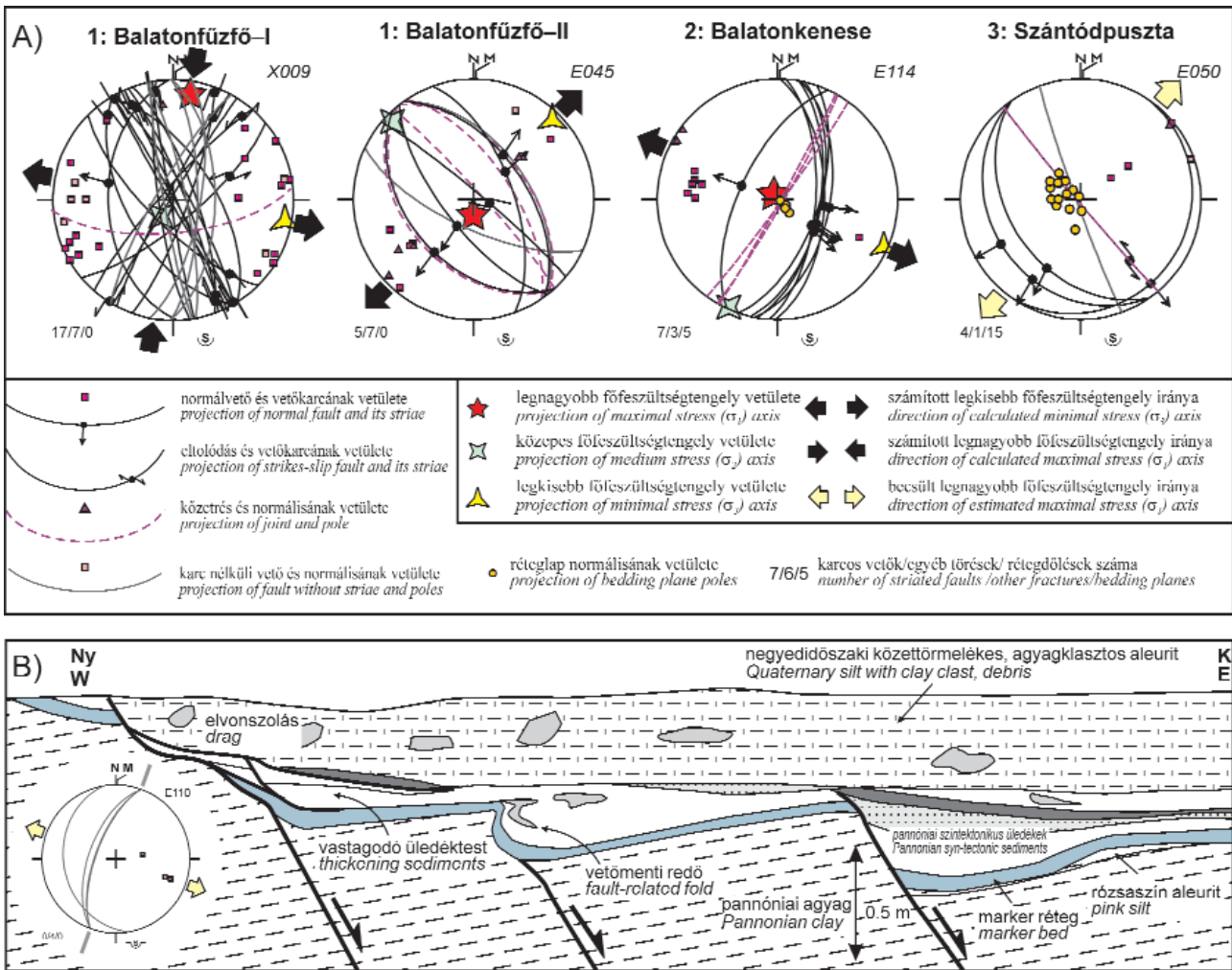
Az „A”, „B” és „C” rétegek ebben a sorrendben, azaz kelet-délkelet felé egyre magasabban helyezkednek el. Feltételezve, hogy ezeket a rétegtani szinteket hasonló jellegű és értelmű, posztpannóniai (neotektonikus) deformáció érte, a horizontok közös függőleges léptékbe helyezett mélységtérképeinek vizuális kiértékelésével kijelölhetőek voltak a nagyobb léptékű redők. A térképen magaslatként jelentkező formai elem (antiform) közül számosat antiklinálisnak, a topográfiai minimumok (szinform) egy részét pedig szinklinálisnak értelmeztük. Keresztező szelvények segítségével ellenőriztük, hogy az egyes szerkezetek valóban tektonikus eredetűek-e. Így jó biztonsággal kizárható volt, hogy a szerkezeti térképre olyan topográfiai elemek kerüljenek, melyek a késő-miocén daltarendszer részeként valójában egykori magaslatokat vagy mélyedéseket reprezentálnak. A térképen (10. ábra) a redőtengelyek — különösen a vizsgált terület központi és nyugati részén — viszonylag szabályszerűen, nagyjából K–Ny-i csapással jelentkeznek. A keleti részekben némiképp kuszább a kép: a tengelyvonalak kissé elfordulnak ÉK–DNy-i irányba. Előbbi területeken a redők hegyes-szögben metszik a szaggatott vonallal jelzett fontosabb

vetőzónákat, míg keleten többé-kevésbé párhuzamossá válnak azokkal. Helyi anomáliák is látszanak, amire jó példa az „A” horizonton térképezett legészakabbi antiklinális KÉK–NyDNy-i tengelyvonala. Az antiklinális-szinklinális párok jellemző távolsága — így a redőződés átlagos hullámhossza — a területen néhány száz méter és 1–2 km között változik. Ennél kisebb méretben is található számos másodlagos, gyűrt szerkezeti elem, melyek csapása jelentősebb szórást mutat (VINCZE 2006).

Neotektonikai megfigyelések a Balaton környezetében

A Balaton partja mentén felszíni szerkezeti vizsgálatokat is végeztünk (BADA et al. 1993), melyek jól kiegészítik a szeizmikus szelvények értelmezését (11. ábra). A kenesei magasparton ÉÉK–DDNy-i csapású kis normálvetők KDK–NyDNy-i extenzió hatására jöttek létre (11. ábra, a). A szántódpusztai homokbányában lapos normálvetők találhatók, melyek bizonytalanul ÉK–DNy-i széthúzást jeleznek. A balatonfűzfői Papvásár-hegyen a deformáció képe összetettebb: ÉÉNy–DDK-i csapású jobbos és ÉÉK–DDNy-i csapású balos eltolódások, É–D-i csapású vetők É–D-i összenyomásra és K–Ny-i széthúzásra utalnak. Az agyagfejtőben ugyanakkor ÉNy–DK-i csapású normálvetők is megjelennek (11. ábra, b; BADA et al. 1993). Két deformációs fázis fellépése valószínű, de a kettő sorrendje nem adható meg. Mivel a normálvetők párhuzamosak a hegy hosszú peremeivel, az sem zárható ki, hogy gravitációs hatásra jöttek létre — az eltolódásoknál ez kizárható. Az agyagbánya déli részén olyan normálvetők figyelhetők meg, melyek a pannóniai agyagot kb. 1 m-rel elvették és kissé kibillentik. A pannóniai agyag felső része mállott, a felette levő szürke homok a vetők felé vastagodó ék alakú testeket formál, leülepedése a vetőmozgás alatt történt (szinszediment deformáció). A homokot fedő, szenes agyag és mészkő klasztereket tartalmazó kőzetliszt, permi homokkővet, édesvízi mészkövet, kvarckavicsot tartalmazó homok már biztosan negyedidőszaki és a vetők kismértékben deformálják. A vetők iránya közel É–D-i, és bár a pontos kinematika nem ismert, de a 60° körüli dőlésszög normálvetőt sejtet (11. ábra, b).

A megfigyelt szerkezetek jelentős részének iránya és kinematikai jellege jól illeszkedik a tavi szeizmikus szelvények által meghatározott vetőmintához, szerkezeti stílushoz és a szerkezetek által becsülhető feszültségtérhez. A vetőkről tudható, hogy neotektonikus eredetűek, egy részük pedig a negyedidőszaki képződményeket is deformálja. A megfigyelt szerkezetek közül az ÉK–DNy-i húzásra utalók nem illeszkednek a szeizmikus szelvények alapján meghatározott szerkezeti mintához. Ugyanakkor ezen szerkezetek tektonikus eredete bizonytalan a lapos dőlés, illetve a morfológiával párhuzamos lefutás miatt. Mindezek fényében elképzelhető, bár nem túl valószínű a feszültségtér megváltozása a neotektonikus (késő-miocén utáni) időszakban.



11. ábra. A) Rekonstruált feszültségterek a Balaton szomszédságában, pannóniai és negyedidőszaki üledékekben (BADA et al. 1993 után módosítva). B) Terepi szerkezeti méréseink szerint a Balatonfüzfő, papvásár-hegyi agyagfejtőben negyedidőszaki üledékek is deformáltak. A feltárások elhelyezkedése a 2. ábrán látható

Figure 11. A) Structural measurements in Pannonian and Quaternary sediments, and the reconstructed palaeostress fields in the vicinity of Lake Balaton (modified after BADA et al. 1993). Note that Quaternary sediments in the Papvásár-hegy clay pit, Balatonfüzfő, are also deformed (B). See location of outcrops in Figure 2

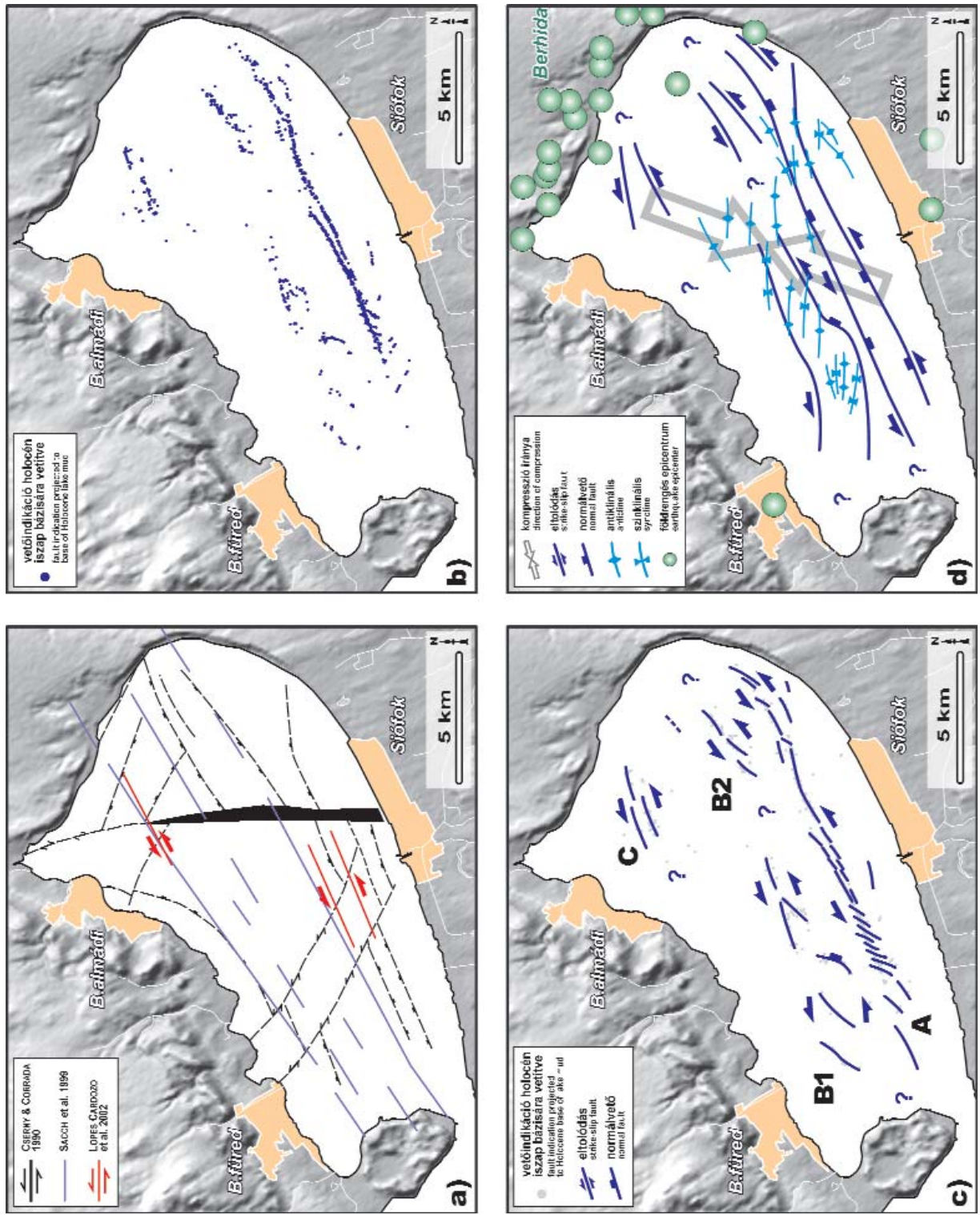
Diszkusszió

Szerkezeti szintézis: neotektonikai térkép

Munkánk szintézisét a Balaton keleti medencéje neotektonikai térképének megszerkesztése adja. Hasonló kísérletek korábban is történtek, ugyancsak vízi szeizmikus adatok értelmezésére építve (12. ábra, a). A legkorábbi mérések értelmezése alapján CSERNY & CORRADA (1990) egy nagyobb léptékű normálvetőzónát tétélezett fel a tő tengelyével párhuzamosan, Siófok előterében. Szerintük ezt a több ágra szakadó vetőrendszert haránt irányú eltolódások szabdalják: ezek közül a legfontosabb a Balatonfüzfőtől Siófokig haladó, É–D-i csapású eltolódás és egy másik vetőzóna Balatonfüred és Siófok között. A szeizmikus adatrendszerünkben ilyen haránt irányú vetőket — legalábbis térképezhető léptékben — nem találtunk. Az egész Balatonra vonatkozó átnézetes elemzés alapján SACCHI et al.

(1999) a keleti medencében több ÉK–DNy-i csapású törést tétélezett fel, a vetők részletes kinematikai jellemzése nélkül. Ezek közül LOPES CARDOZO et al. (2002) két balosnak tartott eltolódást azonosított, ami jó egyezést mutat jelen tanulmányunk eredményeivel.

A neotektonikai térkép kidolgozásához a teljes szeizmikus adatrendszer szelvényről szelvényre történő részletes szerkezeti értelmezését elvégeztük. Az adatsűrűség és a felbontás figyelembevételével megállapítható, hogy a szelvényekkel lefedett területeken sikerült a pannóniai tetőszintig felhatoló csaknem összes vetőt és redőt azonosítani. Először vetőindikáció térképet szerkesztettünk (12. ábra, b), amihez az értelmezett vetők és a tavi iszap bázisát adó diszkordanciafelület metszéspontját használtuk fel. Ha egy törés nem ért fel odáig, akkor annak legfelső pontját függőlegesen felvitettük erre a szintre. A térképen jól kirajzolódik a főbb vetőzónák domináns iránya, ami jellemzően ÉK–DNy-i, azaz a Balatonnal párhuzamos.



12. ábra. A Balaton keleti medencéjében végzett neotektonikai vizsgálat eredménye

a) Korábbi, vízi szeizmikus mérések alapján készített szerkezeti modellek. b) Szeizmikus szelvényeken azonosított vetők indikációinak térképe, a holocén tavi üledekek talpára vetítve. c) Vetőindikáció szerkezeti értelmezése. d) Generalizált neotektonikai térkép a fontosabb vetőkkel és redőkkel

Figure 12. Results of neotectonic investigation in the eastern part of Lake Balaton

a) Previous structural models based on water seismic measurements. b) Fault indications from seismic profiles projected to the base of Holocene lake sediments. c) Structural interpretation of fault indications. d) Generalised neotectonic map with main faults and folds

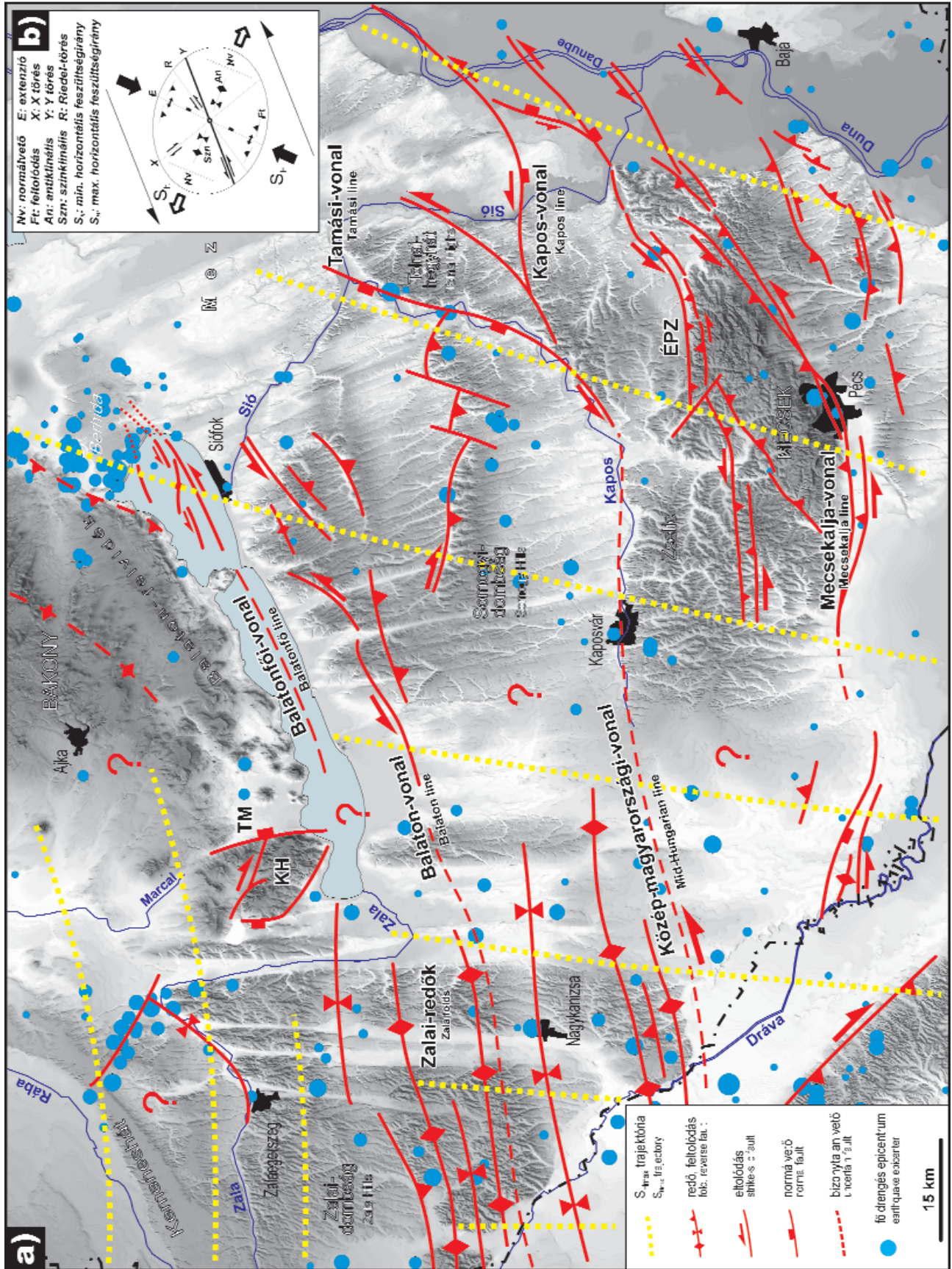
A vetőindikáció térkép segítségével lehetőség nyílt a szerkezetek korrelációjára és egységes kinematikai rendszerbe helyezésére (12. ábra, c). A munka során az értelmező bevallottan szubjektív döntéseire is szükség volt, hiszen még az extrém sűrű, helyenként 50–200 m közötti szelvényháló mellett sem mindig egyértelmű a szomszédos szelvények közötti korreláció (VINCZE 2006): akár ilyen rövid távon is változhat az egyes vetők csapása vagy, ritkábban, dőlésiránya, ill. az elvetés nagysága. Nyírási zónákban törvényszerű, hogy a törések elhalnak és a deformációt egy másik vető veszi át. Mindezen szempontokat is figyelembe véve a szerkezeteket szelvényről szelvényre korreláltuk. Ehhez figyelembe vettük 1) a törések geometriai jellemzőit (látszólagos dőlésirány és -szög), 2) a vetők elhelyezkedését egymáshoz képest, 3) az egyes törések mentén látható elvetés jellegét és mértékét, 4) a törések két oldalán látható reflexió együttes geometriai sajátosságait, valamint 5) alapvető kőzetmechanikai megfontolásokat. Utóbbi alatt értjük az eltolódási zónákban létrejött vagy reaktíválódott törések általános geometriai és kinematikai szabályszerűségeit (pl. WILCOX et al. 1973, HANCOCK 1985; l. 13. ábra, b). Ezek közé tartozik pl. az extenziós és kompressziós szerkezetek viszonya egymáshoz képest, a másodlagos deformációs bélyegek térbeli elrendeződése és a gyakori Riedel-törések kulisszaszerű geometriája.

A fenti elméleti és gyakorlati megfontolások alapján a Balaton keleti medencéjében három fő eltolódási zónát sikerült azonosítani és geometriai viszonyait rekonstruálni (12. ábra, c). Ezek közül a legdélebbi, „A” jelű zóna a legjobban kifejezett és leghosszabban követhető. Értelmezésünk szerint ez megfelel a Balatonfői-vonalnak, legalábbis annak legfiatalabb szerkezeti megnyilvánulásának. A zóna nyugati felén a szeizmikus háló rendkívül sűrű, így a belső geometriája jól ismert. A területet itt néhány száz 10 méteres szelvényközzel tapogattuk le, így jól követhető az egyes Riedel-törések, melyek egymással párhuzamos, nagyjából ÉK–DNy-i csapású vetőrendszerbe rendeződnek. Ezt egy nagyobb léptékű, balos értelmű oldaleltolódási zóna Riedel-rendszerének tekintjük, ahol a fő deformáció nem egy nagy törés mentén zajlott, hanem kisebb méretű, szegmentáltan megjelenő, kulisszás elrendeződésű vetők mentén összegződött. Természetesen egy szeizmikus szelvény alapján nem lehet az oldaleltolódások értelmét (balos vagy jobbos) meghatározni. Több tucatnyi, optimálisan elrendezett szelvény esetén azonban van erre lehetőség. A többi, „B” és „C” jelű vetőzónák esetén az értelmezés kevésbé megbízható, azonban a korrelációt elvégezve, hasonló geometriai megfontolások alapján ezeket is balos értelmű oldaleltolódásnak tekintjük. A „B” jelű zóna erősen szegmentált, a nyugati („B1”) és keleti („B2”) vége között a közvetlen szerkezeti kapcsolat bizonytalan. A „C” jelű zónát csak viszonylag rövid távolságon sikerült követni, a szerkezeti öv csapásirányú folytatása ezért kérdéses. Az „A” és „B” jelű eltolódások nyugat felé, csapásirányban a Tihanyi-félsziget felé folytatódnak, ahol indokoltnak tartjuk a vetők felszíni térképezését. Mindhárom eltolódási zónáról elmondható, hogy kelet felé a Balatonfő, azaz közvetlenül a Berhida

szeizmogén terület felé haladnak. Szárazföldi szeizmikus adatok hiányában a földrengések és vetők geometriai kapcsolatának elemzése a jövő feladata marad.

A 12. ábra c részén szembevetve a tó hossz tengelyére merőleges szerkezeti irányok szinte teljes hiánya: a tektonikai kép meglepően egyveretű, amit csak kisebb léptékű, lokális zavarzónák tarkítanak. Méréseink szerint a Balatontól délre kirajzolódó, meridionális értelmű völgyekhez és hátakhoz a Balaton alatt nem rendelhető törések, vagyis ezen morfológiai elemek szerkezetileg nem preformáltak. Ezzel szemben az adataink, mint analógia, arra utalnak, hogy a longitudinális vagy hosszanti völgyek — melyek csapásiránya jó egyezést mutat a Balaton alatt térképezett eltolódási zónákkal — jó eséllyel tektonikus eredetűek. Bár egyértelmű bizonyítékkal nem rendelkezünk, elképzelhető, hogy a Balaton keleti medencéjének kialakulása is szerkezetileg, vetők által kontrollált volt. Neotektonikai elemzésünk főbb eredményei közelebb vihetnek a Dunántúl egyik legrégebbi morfortektonikai problémájának, a völgyhálózat tektonikus vagy denudációs eredetének tisztázásához. Adataink az utóbbi eredet támogatják, ami egybeesik a völgyek deflációs eredetét valló kutatók véleményével (CHOLNOKY 1936, BADA et al. 2005, FODOR et al. 2005, CSILLAG et al., jelen kötet).

A részletes vetőtérkép felhasználásával és a redők feltüntetésével elkészítettük a Balaton keleti medencéjének neotektonikai vázlatát (12. ábra, d). Ezen a fő eltolódási zónákat generalizálva mutatjuk, a redőgeometriát a 10. ábráról vettük át. A Dél-Dunántúl területére rekonstruált jelenkori feszültségtér (BADA et al. 2007a) fontos határfeltételt ad a szerkezetek értelmezéséhez. Eszerint a Balaton déli és keleti környezetét jelenleg ÉK–DNy-i és ÉÉK–DDNy-i irányú maximális horizontális feszültség (S_{Hmax}) éri (1. ábra). Ilyen kompressziós irány mellett az ÉK–DNy-i csapású vetők balos eltolódásként működnek (13. ábra, b), ami jó összhangban van a szerkezeti értelmezésünkkel. A vetőkön túlmenően a redőgeometriát is rekonstruáltuk. Ez jól illeszkedik a Somogyi-dombságban a kainozoos összletekben kimutatott antiklinálisok és köztük lévő szinklinálisok nagyjából párhuzamos, K–Ny-i irányú tengelyvonalával (PÁVAI VAJNA 1925). A Balaton keleti medencéjétől délre, ipari szeizmikus szelvények alapján CSONTOS et al. (2005) inkább a tó tengelyével párhuzamos, azaz ÉK–DNy-i lefutású, eltolódásokkal kombinálódó feltolódásokat értelmezett. A MAGYARI et al. (2005) által Somogyban térképezett É–D-i tengelyű redők a Balaton aljzatában meglehetősen ritkák, méretüknél fogva inkább lokális jelenségnek tűnnek. Szerkezeti elemzésünk — amely a fenti tanulmányokhoz képest jóval kisebb területre korlátozódik — két fő redőződési irányt (K–Ny-i és ÉK–DNy-i redőtengelyek) mutatott ki, fokozatos laterális átmenettel. Értelmezésünk szerint a kétféle irány egy kinematikai rendszerbe illeszthető. A redők jórészt a főbb eltolódási zónák környezetében jelentkeznek, azok körül gyakran kulisszaszerűen elrendeződve. Az eltolódási zónákra általában jellemző, hogy komplex deformációs képet hoznak létre maguk körül. Az eltolódások ismételt felújulása miatt a redők utólag is



13. ábra. a) Dél-Dunántúl neotektonikai vázlata a domborzati viszonyokkal, fontosabb szerkezeti elemekkel, földrengés epicentrumokkal és a maximális horizontális feszültség (S_{Hmax}) trajektóriáival

Részletes magyarázat és hivatkozások a szövegben. ÉPZ = Északi-pikkely-zóna, KH = Keszthelyi-hegység, TM = Tapolcai-medence

b) Eltolódási zónákban kialakuló szerkezeti elemek általános, elvi sémája HANCOCK (1985) nyomán

Figure 13. a) Neotectonic map of South Transdanubia with topography, main structural elements, earthquake epicentres and trajectories of the maximum horizontal stress S_{Hmax}

See text for details and references. ÉPZ = Northern Thrust Zone, KH = Keszthely Hills, TM = Tapolca Basin

b) Idealised structural pattern in shear zones after HANCOCK (1985)

deformálódhatnak, ami a redőtengelyek további változékonyságát okozhatja. Az ÉK–DNy-i tengelyű redőknél az az értelmezés is lehetséges, hogy ezek nem kompressziós eredetűek, hanem a vetők (eltolódások) mentén fellépő úgynevezett vetőkapcsolt redők kategóriájába tartoznak (SUPPE 1983).

Regionális neotektonikai modell

A balatoni szeizmikus adatrendszer alapján kidolgozott neotektonikai képet egy Dél-Dunántúl léptékű szerkezeti modellbe helyeztük (13. ábra). Ennek kivágatát északon a Balaton, nyugaton a Zalai-dombság, keleten a Duna vonala, délen pedig a Mecsek déli előtere határolja. A modell készítésekor hasonló elvet tartottunk szem előtt, mint a balatoni térkép szerkesztésénél: azon neotektonikus szerkezeteket tüntettük fel, melyeknél igazolható a posztpannoniai, azaz miocén utáni működés is. A munkánál felhasználtuk a területre vonatkozó újabb szerkezeti elemzések eredményeit is (TÓTH & HORVÁTH 1997; WÓRUM 1999; CSONTOS et al. 2002, 2005; BADA et al. 2003, 2005, 2006; SÍKHEGYI 2002; WÓRUM & HÁMORI 2004; FODOR et al. 2005).

Egymástól független (kőzetfeszültség, űrgeodéziai, szerkezetföldtani, morfológiák) adatrendszerek egyaránt a Pannon-medencében zajló aktív térrövidülést, a medence szerkezeti inverzióját bizonyítják. Az adatok és modellezési eredmények alapján megállapítható, hogy főképp a délnyugat felől ható nyomás felelős a Pannon-térség recens, főképp eltolódásos, ill. kompressziós jellegű feszültségterének létrejöttéért (BADA et al. 2007b). A területen tapasztalt feszültségi irányok regionális eloszlása jellegzetes legyezőszerű képet mutat: a kompresszió (S_{Hmax}) Alpokban tapasztalt É–D-i irányú déleket és a medence-területek belseje felé fokozatosan elfordul és jellemzően ÉK-i orientációt vesz fel (BADA et al. 2007a). Űrgeodéziai mérések alapján 1,5–4 mm/év rövidülés becsülhető a Pannon-medence egészére vonatkozóan (GRENERCZY & BADA 2005, GRENERCZY et al. 2005), melynek iránya a központi területeken alapvetően DNy–ÉK-i.

A Pannon-medence délnyugati területein (pl. Zala, Mecsek) az inverzió szerkezeti jelei jóval fejlettebbek a keleti térségekhez képest. A (neo)tektonikai stílusra jellemző, hogy délnyugaton inkább a tisztán kompressziós szerkezetek uralkodnak, ami északkelet felé előbb transzpressziós (Dunántúl), majd eltolódásos, lokálisan transzpressziós (Nagyalföld) jellegűt ölt. Bár az aktív szerkezetek — részben a feltársági viszonyok, részben a fiatal üledékek redukált vastagsága vagy éppen hiánya miatt — térképezése

nehéz, a térség neotektonikus szerkezeti viszonyairól elmondhatjuk, hogy a deformáció alapvetően egykori törésvonalak ismételt felújulásához köthető. Ezek a reaktivált vetők bonyolult geometriával rendelkező, szélesebb nyírási övekbe rendeződnek, melyek csapása jellemzően ÉK–DNy-i. Jó példa erre a Közép-magyarországi nyírási öv, amely az Alcapa- és a Tiszai-egységek között egy többször felújult (CSONTOS & NAGYMAROSY 1998) deformációs zónát alkot, amelynek neotektonikus aktivitására több bizonyíték van (pl. TÓTH & HORVÁTH 1997, BADA et al. 2005, CSONTOS et al. 2005).

A balatoni neotektonikai térképet regionális környezetbe helyezve (vö. 12. és 13. ábra) megállapítható, hogy a rekonstruált vetőzónák jól illeszkednek a Dél-Dunántúlon húzódozó, nagyjából ÉK–DNy-i csapású szerkezeti pásztákhhoz. Ide tartozik pl. a Közép-magyarországi nyírási öv északi peremét alkotó Balaton-vonal és a déli határát adó Tamási-vonal, ill. annak keleti leágazása, a Kapos-vonal is, valamint délebbre a Mecsek-alja-vonal. Ez a szerkezeti trend nyugati irányban is folytatódik, bár Zalában a főbb tektonikai elemek csapása inkább K–Ny-i, ill. KÉK–NyDNy-i. A térképen látszik az is, hogy a Közép-magyarországi nyírási öv jelentése szigorúan neotektonikus értelemben felülvizsgálatra szorul. A Balaton alatt — tehát még az Alcapa-terrénum részét képező Dunántúli-középhegységi egységben — azonosított eltolódások neotektonikailag igen szoros rokonságot mutatnak a Balaton-vonal és az attól délre elhelyezkedő fiatal szerkezetek működésével. Ezért ezeket a vetőket akár egy zónába tartozónak is minősíthetjük.

Míg a főbb szerkezetek iránya meglehetősen egyveretű, a kinematikai képük nyugatról keleti irányban jellegzetes módon megváltozik. Az átöröklött szerkezetek — melyek, köszönhetően a Pannon-medence szerkezeti előéletének, döntő fontosságúak a területen (DANK et al. 1990) — az uralkodó jelenkori feszültségtér függvényében másképp reaktiválódnak (13. ábra). Zalában az É–D-i irányú kompresszió a közel K–Ny-i csapású aljzatszerkezeteket feltolódásként reaktiválja, ami a fedőüledékekben redőződéssel jár együtt (Zalai boltozatok, pl. Budafa, Liszó, Lovászi), a domborzaton is jól követhető módon. Keleti irányban a kompresszió iránya az óra járásával megegyezően elfordul, ami a fokozatosan ÉK–DNy-i csapásúvá váló szerkezeteket balos eltolódásként reaktiválja. A kompresszió és a felújuló szerkezetek által bezárt szög függvényében az eltolódásokat lokális térrövidülés (feltolódások–transzpresszió) vagy tágulás (normálvetők–transzpresszió) kísérheti. Előbbi eset inkább a Dél-Dunántúl központi, utóbbi pedig keleti részére

jellemző. A reaktiválódó szerkezetek a földkéreg felső, kb. 15 km vastag, ridegen viselkedő szeizmogén részében föld-rengéseket, a fiatal fedőüledékekben jellegzetes virágszerkezetet hoznak létre (WINDHOFFER et al. 2005).

A Dunántúlon a legfiatalabb vetők kora nem jól ismert. Az Alföldön, ahol több száz méter vastag, csaknem folyamatos kvarter rétegsor települ, szerencsésebb a helyzet. A Tiszán Martfű közelében mért, TÓTH & HORVÁTH (1999) által publikált nagyfelbontású szeizmikus szelvény nem hagy kétséget afelől, hogy az ott észlelt vetőzóna még a negyedidőszak fiatalabb részében, mintegy 300 ezer évvel ezelőtt (középső-pleisztocén) is biztosan működött. A szerkezeti korreláció szerint ez a vetőzóna nyugati irányban kapcsolatban áll a Kapos-vonallal, ami ennek megfelelően a kvarter folyamán szintén működhetett. Véleményünk szerint a Pannon-medence belsejében, így a Dél-Dunántúlon is áthúzódó, regionális elterjedésű, nagyjából ÉK–DNy-i csapású nyírási zónák számos vetője a negyedidőszak folyamán bizonyosan működött. Ezt szeizmológiai adatok is valószínűsítik (l. berhidai és a Kapos-vonalhoz köthető rengések). A szeizmicitás adatok és a GPS-es mozgásvizsgálatok eredményei szerint — amely alapján a területen 1 mm/év nagyságrendű horizontális kéregmozgás valószínűsíthető (GRENERCZY et al. 2005) — a jelenkori tektonikus aktivitás mérsékeltnek tekintendő.

A zalai és somogyi, valamint a mezőföldi területek legszembetűnőbb domborzati jelensége a markáns morfológiai arculattal bíró meridionális völgyrendszer. Ezek a lokális értelemben párhuzamos, regionális értelemben inkább sugaras elrendeződésű völgyek akár 50 km hosszúságúak, átlagosan néhányszor tíz méter mélyek és általában 0,5–5 km szélesek. A folyóvizek és a szél felszínformáló hatását a völgyek oldalában azonosított teraszmaradványok és jellegzetes morfológiai bélyegek, szélérozóiós jelenségek jól mutatják (pl. BULLA 1943; ERDÉLYI 1961; SOMOGYI 1961; MAROSI 1969; JÁMBOR 1992, 2002). A lineáris lefutású völgyek között hosszan elnyúló löszhátak általában enyhén billentettek délkeleti irányban — topográfiai és földtani értelemben egyaránt. ÉNy-i szegélyük meredekebb, mint a délkeleti elvégződésük; utóbbi irányban a kvarter fedő (általában lösz) is vastagodik. A völgyrendszer szerkezeti preformáltsága egyik fő „bizonyítékának” általában a völgyek feltűnő linearitását tekintik (pl. JÁMBOR 1993, SÍKHEGYI 2002), ami nem mutat túl LÓCZY és CHOLNOKY egykori érvein (HORVÁTH & DOMBRÁDI, jelen kötet). A regionális értelemben sugaras elrendeződést azonban igen nehéz bármilyen kőzetmechanikai modellel összehangolni. Erre kísérlet ugyan történt (GERNER 1992), azonban a kidolgozott modell — léptéke és geometriája miatt — nem tűnik meggyőzőnek. Másfelől pedig a megfigyelt szeizmicitással — legyen a rengések helymeghatározása bármekkora hibával is terhelt — a meridionális völgyek lefutása nem korrelál. Ezen völgyek uralkodó iránya sem az aljzat idősebb, alpi szerkezeteivel, sem pedig a fiatalabb, neogén törésszettel nem állnak semmilyen koherens geometriai és kinematikai kapcsolatban.

A neotektonikai modellek kritikai elemzésén túlmenően

nagyszámú dél-dunántúli szeizmikus szelvény értelmezése arra enged következtetni, hogy — legalábbis a szeizmikus felbontás határain belül — a meridionális völgyek szerkezetileg nem kontrolláltak. A szeizmikus felbontás hagyományos ipari szeizmikus adatok esetén néhány méter; nagyfelbontású, vízen kivitelezett szeizmikus szelvények esetén pedig 1–2 méterre, optimális esetben a szub-méteres tartományra csökkenthető. A kérdés szempontjából kulcsfontosságúak voltak a Balatonon mért szeizmikus szelvények, amelyek messze a legjobb felbontással bírnak a területen. Megállapítható, hogy a tanulmányunkban bemutatott szeizmikus adatrendszer — hasonlóan az ipari profilokhoz — nem mutatja a meridionális völgyek tektonikai meghatározottságát. Véleményünk szerint ehelyett inkább a külső felszínformáló erők, elsősorban is eolikus folyamatok dominanciájával számolhatunk. A szélérozóió döntő fontosságát már LÓCZY (1913) és CHOLNOKY (1918, 1936) felismerte, igaz ezek a szerzők a szerkezeti preformáltságot — ellentétben pl. PÁVAI VAJNÁVAL (1923) — is lényegesnek tartották (l. még GERNER 1994; CSILLAG et al. és HORVÁTH & DOMBRÁDI, jelen kötet 2010). A völgyek eszerint szélsősorúaként értelmezhetők, melyeket a szélsőséesebb (interglaciális) időszakokban a folyóvizek tovább alakítottak. A folyók részben az emelkedő, dombvidéki térszint kivájtva az eolikus eredetű üledékleplet (löss, futóhomok) roncsolták — gyakran teraszokat maguk mögött hagyván —, hogy aztán az erodált anyagot a laposabb, süllyedő területeken hordalékkúp formában szétterítsék. Részben pedig a hordalékanyagot készítették elő a következő száraz időszak eolikus üledékszállításához. A negyedidőszak nagy részén a felszínformáló erők ilyen értelmű ciklikus váltakozását valószínűsítjük.

A „meridionális” (v. keresztirányú) völgyekkel szemben az ún. „longitudinális”, vagy hosszanti völgyek szerkezeti preformáltságot számos adat valószínűsíti. Elsősorban szeizmikus szelvények regionális tektonikai kiértékelése (BADA et al. 2003, 2005; WÓRUM & HÁMORI 2004; CSONTOS et al. 2005; FODOR et al. 2005), de morfológiai vizsgálatok (SÍKHEGYI 2002) és fúrások vizsgálata (NÉMEDI VARGA 1977) is fontos adatokkal szolgáltak. Az ÉK–DNy, ill. KÉK–NyDNy-i tektonikai irány jól egybecseng az aljzat főbb szerkezeti elemeivel, ami kőzetmechanikai szempontból is kedvez azok ismételt reaktivációjának (WINDHOFFER et al. 2005). A fontosabb szerkezetek közül neotektonikusnak minősítjük a Balatonfői-, a Balaton-, a Kapos-, a Tamási- és a Mecsek-alja-vonalakat, valamint több hasonló csapású, de kisebb léptékű vetőt is (13. ábra). Számos szerző a Duna medrének néhány kanyarulatát, így pl. a paksi kanyart is fiatal vetőkhöz köti (pl. JASKÓ & KROLOPP 1991, BADA et al. 2005).

Következtetések

Balaton keleti medencéjének geometriája az eltolódási övek jellegzetes felépítését mutatja, gyakran kulissza-szerűen elrendeződő másodlagos (Riedel-)törésekkel.

A Balaton alatti pannóniai üledékek enyhén gyűrtek: a redő tengelyek uralkodó iránya K–Ny-i, ill. KÉK–NyDNY-i; a redők karakterisztikus hullámhossza néhány száz métertől 1–2 km-ig terjed. A szerkezeti kép kinematikailag jó összhangba hozható a területen uralkodó jelenkori feszültségtérrel. Az ÉK–DNY-i, ill. ÉÉK–DDNY-i irányú kompresszió a térképezett eltolódásokat balos értelemben aktiválta, míg a gyűrődések kissé ferdén helyezkednek el a maximális horizontális feszültség (S_{Hmax}) irányára.

A tektonikai elemek létrejöttének korát a Balaton alatti térrész földtani felépítése miatt nem lehet pontosan meghatározni. A szerkezeteket — bizonyítottan 8 millió évnél fiatalabb működésük alapján — neotektonikus eredetűnek minősítettük. Dunántúli és alföldi szerkezeti analógiák, valamint a berhidai földrengés tevékenység alapján feltételezhető, hogy a törések egy része a negyedidőszakban, vagy akár a jelenkorban is aktív lehetett.

Elemzésünk alapján úgy ítéljük meg, hogy a déldunántúli meridionális völgyhálózat nagy része neotekto-

nikai értelemben nem preformált. Ezzel szemben az ún. hosszanti vagy longitudinális völgyek egy jelentős része szerkezetileg kontrolláltnak mutatkozik.

Köszönetnyilvánítás

A mintegy másfél évtizedes múltra visszatekintő szeizmikus mérési kampányaink finanszírozásában és lebonyolításában számos intézmény vett részt. Elsősorban az OTKA pénzügyi segítségét (NK60445, T034928 és TS044765 sz. projektek), valamint a Geomega Kft. színvonalas munkáját köszönjük. Hálásak vagyunk a mérésekben részt vállaló összes egykori és jelenlegi kollégának, hallgatóknak. Köszönjük MAGYARI Árpád és POGÁCSÁS György lektori munkáját. A szeizmikus szelvények értelmezését GeoGraphix rendszeren végeztük, amelyet a Landmark University Grant program keretében használtuk.

Irodalom — References

- BADA G., ILLÉS K., KOROKNAI B., LELKES M., NÉMETH K. & TÓTH T. 1993: Összefoglaló jelentés az 1993. júliusában végzett geofizikai-geológiai terepgyakorlatról. — *Kézirat*, ELTE Geofizikai Tanszék, 53 p.
- BADA G., HORVÁTH F., TÓTH L. & TÓTH T. 2000: Radioaktív hulladékok elhelyezésének szeizmotektonikai problémái. — *Földtani Közlöny* **130/4**, 585–610.
- BADA G., FODOR L., WINDHOFFER, G., RUSZKICZAY-RÜDIGER, ZS., SACCHI, M., DUNAI, T., TÓTH, L., CLOETINGH, S. & HORVÁTH, F. 2003: Lithosphere dynamics and present-day deformation pattern in the Pannonian basin. — *Geophysical Research Abstracts* **5**, 05772.
- BADA G., BUS Z., GRIBOVSKI K., HORVÁTH F., MAGYARI Á., MÓNUS P., SZAFIÁN P., SZEIDOVITZ Gy., TIMÁR G., TÓTH T., WÉBER Z. & WÓRUM G. 2005: A Paksi Atomerőmű tervezett üzemidő-hosszabbítására vonatkozó Részletes Környezeti Hatástanulmányt (RKHT) előkészítő földtani, szeizmotektonikai és geotechnikai értékelés. II. kötet: A tíz éve folyó mikroszeizmikus monitorozás eredményeinek szeizmológiai értékelése és a neotektonikai modell megújítása. — *Kutatási jelentés az ETV-ERŐTERV Energetikai Tervező és Vállalkozó Rt. részére*, GeoRisk Kft. és Geomega Kft., Budapest, 219 p.
- BADA G., HORVÁTH, F., TÓTH, L., FODOR, L., TIMÁR, G. & CLOETINGH, S. 2006: Societal aspects of ongoing deformation in the Pannonian region. — In: PINTER, N., GRENERCZY, Gy., WEBER, J., STEIN, S. & MEDAK, D. (szerk.): *The Adria Microplate: GPS Geodesy, Tectonics, and Hazards*. — *NATO Science Series: IV: Earth and Environmental Sciences, Springer-Verlag* **61**, 385–402.
- BADA G., DÖVÉNYI P., HORVÁTH F., SZAFIÁN P. & WINDHOFFER G. 2007a: Jelenkori feszültségtér a Pannon-medencében és alpi–dinári–kárpáti környezetében. — *Földtani Közlöny* **137/3**, 327–359.
- BADA G., GRENERCZY, Gy., TÓTH, L., HORVÁTH, F., STEIN, S., CLOETINGH, S., WINDHOFFER, G., FODOR, L., PINTER, N. & FEJES, I. 2007b: Motion of Adria and ongoing inversion of the Pannonian basin: Seismicity, GPS velocities and stress transfer. — In: STEIN, S. & MAZZOTTI, S. (eds): *Continental Intraplate Earthquakes: Science, Hazard, and Policy Issues. Geological Society of America Special Paper* **425**, 243–262.
- BULLA B. 1943: Geomorfológiai megfigyelések a Balaton felvidéken. — *Földrajzi Közlemények* **71**, 18–45.
- CHOLNOKY J. 1918: A Balaton hidrológiája. — LÓCZY L. (szerk.): *A Balaton tudományos tanulmányozásának eredményei*. I. kötet, 2. rész. Magyar Földrajzi Társulat Balaton-Bizottsága, Kilián F. Bizománya, Budapest, 316 p.
- CHOLNOKY J. 1936: Magyarország földrajza. — *A Föld és élete, VI. kötet*. Franklin és Társa Kiadó, Budapest, 530 p.
- CSERNY T. 2002: A balatoni negyedidőszaki üledékek kutatási eredményei. — *Földtani Közlöny* **132/ különszám**, 193–213.
- CSERNY T. & CORRADA, R. 1990: A Balaton aljzatának szedimentológiai térképe. — *Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése 1988-ról*, 169–176.
- CSERNY, T. & NAGY-BODOR, E. 2000: Limnogeology of Lake Balaton (Hungary). — In: GIERLOWSKI-KORDESCH, E. H. & KELTS, K. R. (eds): *Lake basins through space and time*. — *AAPG Studies in Geology* **46**, 605–618.
- CSERNY T., PRÓNAY Zs. & NEDUCZA B. 2005: A Balatonon végzett korábbi szeizmikus mérések újraértékelése. — *Magyar állami Földtani Intézet Évi Jelentése, 2004*, 273–283.
- CSILLAG G., FODOR L., SEBE K., MÜLLER P., RUSZKICZAY-RÜDIGER Zs., THAMÓNÉ BOZSÓ E. & BADA G., 2010. A defláció szerepe a Dunántúl hegységi és dombvidéki területeinek felszínfejlődésében. — *Földtani Közlöny*, jelen kötet.

- CSONTOS, L., NAGYMAROSY, A. 1998: The Mid-Hungarian line: a zone of repeated tectonic inversions. — *Tectonophysics* **297**, 51–71.
- CSONTOS, L., BENKOVICS, L., BERGERAT, F., MANSY, J.-L. & WÖRUM, G. 2002: Tertiary deformation history from seismic section study and fault analysis in a former European Tethyan margin (the Mecsek–Villány area, SW Hungary). — *Tectonophysics* **410**, 63–80.
- CSONTOS, L., MAGYARI, Á., VAN VLIET-LANOË, B. & MUSITZ, B. 2005: Neotectonics of the Somogy hills (Part II): Evidence from seismic sections. — *Tectonophysics* **357**, 81–102.
- DANK V., FÜLÖP J., ÁDÁM O., BARABÁS A., BARDÓCZ B., BÉRCZI I., BREZSNYÁNSZKY K., CSÁSZÁR G., HAAS J., HÁMOR G., HORVÁTH F., JÁMBOR Á., KASSAI M., NAGY E., POGÁCSÁS Gy., RÁNER G., RUMLER J., SÍKHEGYI F., SZEDERKÉNYI T., VÖLGYI L. & ZELENKA T. 1990: Magyarország szerkezetföldtani térképe. M = 1:500 000. — Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest.
- DUDKO, A. 1986: A Velence-Balatonfő terület variszkuszi szerkezetalakulása. — *Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése 1984-ről*, 23–63.
- ERDÉLYI M. 1961. Külső-Somogy vízföldtana. — *Hidrológiai Közöny* **41**, 445–528.
- FODOR, L., BADA, G., CSILLAG, G., HORVÁTH, E., RUSZKICZAY-RÜDIGER, ZS., HORVÁTH, F., CLOETINGH, S., PALOTÁS, K., SÍKHEGYI, F. & TIMÁR, G. 2005: An outline of neotectonic structures and morphotectonics of the western and central Pannonian basin. — *Tectonophysics* **410**, 15–41.
- GERNER P. 1992: Recens kőzetfeszültség a Dunántúlon. — *Földtani Közöny* **122**, 89–105.
- GERNER P. 1994: Dél-dunántúli neotektonikai modellek a magyar földtani szakirodalom alapján. — *Földtani Közöny* **124**, 381–402.
- GERNER, P., BADA, G., DÖVÉNYI, P., MÜLLER, B., ONCESCU, M.C., CLOETINGH, S. & HORVÁTH, F. 1999: Recent tectonic stress and crustal deformation in and around the Pannonian basin: Data and models. — In: DURAND, B., JOLIVET, L., HORVÁTH, F. & SÉRANNE, M. (eds): The Mediterranean basins: Tertiary extension within the Alpine orogen. — *Geological Society, London, Special Publications* **156**, 269–294.
- GRENERCZY, Gy. & BADA, G. 2005: GPS baseline length changes and their tectonic interpretation in the Pannonian Basin. — *Geophysical Research Abstracts* **7**, 04808.
- GRENERCZY, Gy., SELLA, G. F., STEIN, S. & KENYERES, A. 2005: Tectonic implications of the GPS velocity field in the northern Adriatic region. — *Geophysical Research Letters* **32**, L16311.
- GUTDEUTSCH, R. & ARIC, K. 1988: Seismicity and neotectonics of the East Alpine - Carpathian and Pannonian area. — In: ROYDEN, L. & HORVÁTH, F. (szerk.): The Pannonian basin. — *AAPG Memoir* **45**, 183–194.
- HANCOCK, P. 1985: Brittle microtectonics: principles and practice. — *Journal of Structural Geology* **7**, 437–457.
- HORVÁTH, F. 1984: Neotectonics of the Pannonian basin and the surrounding mountain belts: Alps, Carpathians and Dinarides. — *Annales Geophysicae* **2**, 147–154.
- HORVÁTH F. & DOMBRÁDI E. 2010: A magyar tektonika fejlődése a Balaton és környéke kutatásának tükrében. — *Földtani Közöny*, jelen kötet.
- HORVÁTH F., BADA G., WINDHOFFER G., CSONTOS L., DÖVÉNYI P., FODOR L., GRENERCZY Gy., SÍKHEGYI F., SZAFIÁN P., SZÉKELY B., TIMÁR G., TÓTH L. & TÓTH T. 2005: A Pannon-medence jelenkori geodinamikájának atlasza: Euro-konform térképsorozat és magyarázó. — OTKA T034928 sz. projekt, zárójelentés. ELTE Geofizikai Tsz., Budapest, 38 p.
- JÁMBOR Á. (szerk.) 1987: Kunsági emelet — A Magyarországi Kunsági emeletbeli képződmények földtani jellemzése. — *Magyar állami Földtani Intézet Évkönyve* **69**, 452 p.
- JÁMBOR, Á. 1992: Pleistocene ventifact occurrences in Hungary. — *Acta Geologica Hungarica* **35**, 407–436.
- JÁMBOR Á. 1993: Rövid magyarázó a pleisztocénben aktív magyarországi törésvonalak 1:500 000-es térképéhez. — Kézirat, MÁFI adattár, Budapest, 42 p.
- JÁMBOR Á. 2002: A magyarországi pleisztocén éleskavics előfordulások és földtani jelentőségük. — *Földtani Közöny* **132/különszám**, 101–116.
- JASKÓ S. & KROLOPP E. 1991: Negyedidőszaki kéregmozgások és folyóvízi üledékfelhalmozódás a Duna-völgyben Paks és Mohács között. — *Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése 1989-ről*, 65–84.
- LOPES CARDOZO, G., BADA, G., LANKREIJER, A. & NIEUWLAND, D. 2002: Analogue modelling of a prograding strike-slip fault: Case study of the Balatonfő fault, western Hungary. — In: CLOETINGH, S., HORVÁTH, F., BADA, G. & LANKREIJER, A. (szerk.): Neotectonics and surface processes: the Pannonian basin and Alpine/Carpathian system. — *European Geosciences Union, Katlenburg-Lindau, Germany, St. Mueller Special Publication Series* **3**, 217–226.
- LÓCZY L. 1913: A Balaton környékének geológiai képződményei és ezeknek vidékek szerinti telepedése. — *A Balaton tudományos tanulmányozásának eredményei*. I. kötet, 1. rész, 1. szakasz. Magyar Földrajzi Társulat Balaton-Bizottsága, Kilián F. Bizománya, Budapest, 617 p.
- MAGYAR, I., GEARY, D. H., SÜTŐ-SZENTAI, M., LANTOS, M., MÜLLER, P. 1999: Integrated biostratigraphic, magnetostratigraphic and chronostratigraphic correlation of the Late Miocene Lake Pannon deposits. — *Acta Geologica Hungarica* **42**, 5–31.
- MAGYARI, Á., MUSITZ, B., CSONTOS, L. & VAN VLIET-LANOË, B. 2005: Neotectonics of the Somogy hills (Part I): Evidence from field observations. — *Tectonophysics* **410**, 43–62.
- MAROSI S. 1969: Adatok Belső-Somogy és a Balaton hidrogeográfiájához. — *Földrajzi Értesítő* **18**, 419–456.
- MCCLAY, K. R. 1989: Analogue models of inversion tectonics. — *Geological Society, London, Special Publications* **44**, 41–59.
- MIKE K. 1976: A Balaton kialakulása és fejlődése. — In: CSOMA J. & LACZAY I. (szerk.): *VITUKI Vízirajzi Atlasz Sorozat* **21/1**, 30–39.
- NOVÁK D. 2006: A Pannon-tó deltasíksági kifejlődései (Tihanyi Formáció) Fonyód környékén. — Szakdolgozat, ELTE Általános és Történelmi Földtani Tanszék, 89 p.
- NOVÁK D., KONCZ D., HORVÁTH A., SZAFIÁN P. & SZTANÓ O. 2010: Egy pleisztocén folyó kanyarulata Fonyódnál: medernyomok ultranagy felbontású szeizmikus szelvényeken. — *Földtani Közöny*, jelen kötet.
- NÉMEDI VARGA Z. 1977: A Kapos vonal. — *Földtani Közöny* **107**, 313–328.

- PÁVAI VAINA F. 1923: Válasz a magyar földgáz kutatás kritikájára. — *Földtani Közlemények* **51–52**, 21–30.
- PÁVAI VAINA F. 1925: A földkéreg legfiatalabb tektonikus mozgásairól. — *Földtani Közlemények* **55/1**, 63–85.
- RABUS, B., EINEDER, M., ROTH, A. & BAMLER, R. 2003: The shuttle radar topography mission — a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. — *Photogr. Rem. Sensing* **57**, 241–262.
- SACCHI, M., HORVÁTH, F. & MAGYARI, O. 1999: Role of unconformity-bounded units in the stratigraphy of the continental record: a case study from the Late Miocene of the western Pannonian Basin, Hungary. — In: DURAND, B., JOLIVET, L., HORVÁTH, F. & SÉRANNE, M. (eds): *The Mediterranean basins: Tertiary extension within the Alpine orogen*. — *Geological Society, London, Special Publications* **156**, 357–390.
- SÍKHEGYI, F. 2002: Active structural evolution of the western and central part of the Pannonian basin: A geomorphologic approach. — In: CLOETINGH, S., HORVÁTH, F., BADA, G. & LANKREIJER, A. (eds): *Neotectonics and surface processes: the Pannonian basin and Alpine/Carpathian system*. — *European Geosciences Union, Katlenburg-Lindau, Germany, St. Mueller Special Publication Series* **3**, 203–216.
- SOMOGYI S. 1961: Hazánk folyóhálózatának fejlődéstörténete. — *Földrajzi Közlemények* **9**, 25–50.
- SUPPE, J. 1983: Geometry and kinematics of fault-bend folding. — *American Journal of Science* **283/7**, 684–721.
- SZAFIÁN, P., BADA, G., SZTANÓ, O., ZLINSZKY, A., SZÉKELY, B. & HORVÁTH, F. 2007: High-resolution seismic investigations at Lake Balaton, Transdanubia, I: Paleoenvironments and lake level variations. — *Magyarhoni Földtani Társulat Vándorgyűlése, HUNTEK Workshop, Sopron*, Absztrakt kötet, p. 33.
- SZTANÓ, O. & MAGYAR, I. 2007: Deltaic parasequences on gamma logs, ultra-high resolution seismic images and outcrops of Lake Pannon deposits. — *Joannea* **9**, 105–108.
- TÓTH, L., MÓNUS, P. & ZSÍROS, T. 1989: The Berhida (Hungary) earthquake of 1985. — *Gerland. Beitr. Geophysik* **98**, 312–321.
- TÓTH, L., MÓNUS, P., ZSÍROS, T. & KISZELY, M. 2002: Seismicity in the Pannonian Region – earthquake data. — In: CLOETINGH, S., HORVÁTH, F., BADA, G. & LANKREIJER, A. (eds): *Neotectonics and surface processes: the Pannonian basin and Alpine/Carpathian system*. — *European Geosciences Union, Katlenburg-Lindau, Germany, St. Mueller Special Publication Series* **3**, 9–28.
- TÓTH L., MÓNUS P., ZSÍROS T., BUS Z., KISZELY M. & CZIFRA T. 2009: Magyarországi földrengések évkönyve 2008. — *GeoRisk – MTA GGKI*, Budapest, 98 p.
- TÓTH T. & HORVÁTH F. 1997: Neotektonikus vizsgálatok nagyfelbontású szeizmikus szelvényezéssel. — In: MAROSI S. & MESKÓ A. (szerk.): *A Paksi Atomerőmű földrengésbiztonsága*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 123–152.
- TÓTH T. & HORVÁTH F. 1999: Van bizonyíték a negyedidőszaki tektonizmusra Paks környékén! — *Földtani Közlemények* **129**, 109–124.
- TÓTH Zs., 2009. Balatoni többcsatornás vízi szeizmikus adatok feldolgozása és értelmezése. — *Szakkolgozat*, ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszék, 87 p.
- VINCZE O. 2006: Neotektonikai vizsgálatok a Balaton keleti medencéje környezetében nagy és ultranagy felbontású szeizmikus szelvények alapján. — *Szakkolgozat*, ELTE Geofizikai Tanszék, Budapest, 73 p.
- WILCOX, R. E., HARDING, T. P. & SEELY, D. R. 1973: Basic wrench tectonics. — *AAPG Bulletin* **57**, 74–96.
- WINDHOFFER G., BADA G., DÖVÉNYI P. & HORVÁTH F. 2001: Új kőzetfeszültség meghatározások Magyarországon lyukfaldeformációs mérések alapján. — *Földtani Közlemények* **131**, 541–560.
- WINDHOFFER, G., BADA, G., NIEUWLAND, D., WÓRUM, G., HORVÁTH, F. & CLOETINGH, S. 2005: On the mechanics of basin formation in the Pannonian basin: Inferences from analogue and numerical modelling. — *Tectonophysics* **410**, 389–415.
- WÓRUM G. 1999: A Mecsek-Villányi térség szerkezete és fejlődéstörténeti eseményei szeizmikus szelvények alapján. — *Szakkolgozat*, ELTE Geofizikai Tanszék, Budapest, 117 p.
- WÓRUM G. & HÁMORI Z. 2004: A BAF kutatás szempontjából releváns a Mol Rt. által készített archív szeizmikus szelvények újrafeldolgozása. — *Kutatási jelentés*, Geomega Kft., Budapest, 39 p.

Kézirat beérkezett: 2010. 03. 30.