

Balatoni egycsatornás, nagy felbontású szeizmikus szelvények újrafeldolgozása

VISNOVITZ F.^{1,*}, TÓTH T.², HÁMORI Z.², KUDÓ I.², BALÁZS A.¹, M. SACCHI³,
SURÁNYI G.¹, HORVÁTH F.^{1,2}

¹ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/C

²Geomega Kft., 1095 Budapest, Mester utca 4.

³Istituto per l'Ambiente Marino Costiero (IAMC), CNR, Napoli

*E-mail: visnovitz.ferenc@gmail.com

1993-ban zajlottak Magyarországon az első nagyobb behatoló képességű (100–150 m) vízi szeizmikus mérések a Balatonon. Ez a magyar–olasz együttműködés keretében kivitelezett felmérés a tó alatti pannon rétegek és neotektonikus szerkezetek megismerését tűzte ki célul. A szelvényezés a Siófoki- és Szemesi-medencében zajlott, és kezdete volt egy napjainkig tartó balatoni mérőszorozatnak.

Akkoriban az adatok még analóg módon voltak rögzítve, de hamarosan kísérlet történt azok digitalizálására is. Ez a munka azonban nem vált teljessé, és az adatmegőrzés biztosítása sem valósult meg. A későbbi projektek és Marco Sacchi (2001) doktori munkája során született eredmények fényében mára ismét felmerült az igény az 1993-as adatok megmentésére. Munkánk során az eredeti olasz adatbázishoz visszanyúlva az egykori szelvényeket ismételtelen feldolgoztuk, melynek eredményeképpen 20 év elteltével végre bekerülhettek egy egységes balatoni szeizmikus adatbázisba.

A cikk végén a feldolgozott szelvények közül többet bemutatunk. Ezek értelmezésével illusztráljuk, hogy milyen gazdag rétegtani és tektonikai információt szolgáltatnak, valamint hogy ebből adódóan méltó társai a modernebb technikával regisztrált későbbi szelvényeknek.

Visnovitz, F., Tóth, T., Hámori, Z., Kudó, I., Balázs, A., Sacchi, M., Surányi, G., Horváth, F.: Reprocessing of the single channel high-resolution seismic data measured on the Lake Balaton

In 1993 a new set of high-resolution water-seismic profiles has been recorded at Lake Balaton with penetration of 100–150 m. The measurements were carried out in the frame of a Hungarian–Italian cooperation. The aim was to get information on Pannonian strata and tectonics in the Siófok and Szemes basins. The project has become the forerunner of the many surveys on the Lake Balaton in the following years.

The analogue data recorded originally in 1993 was attempted to be digitized soon after the survey but this work has never been completed. However, the successfully digitized sections were very informative and led to a new stratigraphic and tectonic synthesis in the doctoral theses of Marco Sacchi (2001). In the light of this work and subsequent new results it was demanded to complete the digitization of the 1993 data set. Fortunately, original analogue records were found in the data-bank of the Italian partner and it made possible to realize a complete and up-to-date conversion and digital processing of seismic data.

To show that our efforts were rewarding we present a couple of newly digitized seismic sections and their interpretation. It will be seen how informative they are and thus this 20 years old data represent a unique value in the unified water seismic database of Lake Balaton.

Beérkezett: 2013. július 26.; *elfogadva:* 2013. szeptember 25.

Bevezető

A magyarországi vízi szeizmikus szelvényezés múltja és szerepe a pannóniai üledékek kutatásában

A 1980-as évek végétől indult útnak Magyarországon az akkor még újdonságnak számító vízi szeizmikus szelvényezés (Tóth Zs. et al. 2010). Az első méréseket limnológiai kutató-

si céllal az ország legnagyobb felületű felszíni víztestére, a Balatonra tervezték. A fúrásokat és szeizmikus szelvényezést magában foglaló projekt magyar–kubai együttműködés keretében, a Magyar Állami Földtani Intézet gondozásában zajlott (Cserny, Corrada 1989, 1990). A fúrási anyag paleontológiai és izotóp-geokémiai vizsgálata, valamint tözegeken végrehajtott radiokarbon kormeghatározások alapján – oly sok korábbi vita és ellentmondó vélemény után – végre fő

vonalaiban tisztázódott a tómedence kialakulásának és fejlődésének története (Cserny, Nagy-Bodor 2000, Cserny 2002, Cserny et al. 2004).

1993-tól kezdődően, az ELTE Geofizikai Tanszékének koordinálásában újabb szeizmikus felmérések indultak a Balaton területén. Ezek a térség neotektonikájának nagy pontosságú megismerését és a tavi iszap alatt diszkoordinánsan települő késő miocén (pannóniai) üledékek tanulmányozását tűzték ki célul (Sacchi et al. 1998). A mérési kampányok alatt felvett több száz szeizmikus szelvényt tartalmazó, egyes többszörös adatrendszer felhasználva számos, figyelemre méltó publikáció is született (Bada et al. 2010, Horvath et al. 2010, Novák et al. 2010, Sacchi et al. 1999, Sacchi 2001, Sztanó et al. 2013).

Az ELTE részletes, több éven át tartó felméréseinek jelentősége abban rejlik, hogy a Balaton alatt neotektonikus hatásokra a felszín közelébe emelkedő, máshol több km mélységben elhelyezkedő késő miocén üledékeket nagy felbontásban tudják leképezni (Tóth T. et al. 1997). Az alkalmazott egyszörös IKB-SeistecTM műszer (Simpkin, Davis 1993) a felső 30–40 m-t deciméteres pontossággal, míg az airgun, illetve watargun forrással működtetett többszörös rendszerek a felső 150–250 m-t néhány méteres felbontásban képesek megjeleníteni (Tóth Zs. 2009). Erre a Balaton vízének és lágy iszapjának kiváló akusztikus csatoló tulajdonságai adnak lehetőséget. A két rendszer együttes használata teszi lehetővé a rétegek nagy léptékű leképezését a pannóniai aljzatig és a finom struktúrák megértését a felszín közelben, ezáltal teljes képet alkotva a Dunántúli-középhegység előterében elterülő medenceperemi pannon formációkról (Horváth et al. 2010).

A balatoni kutatások mellett az ELTE Geofizikai Tanszék és a Geomega Kft. együttműködésében vízi szeizmikus kutatások folytak a Dunán és a Tiszán (Horváth et al. 1996, Horváth et al. 1997a, 1997b, Tóth T. et al. 1995, Tóth T., Horváth 1997, 1998, 1999, Tóth 2003) valamint a Fertő-tó területén is (Diel 2011)

Az 1993-as mérési kampány

A Balaton alatti pannóniai rétegek kutatásának első fázisát az 1993-as magyar–olasz felmérés jelentette. Az ekkor mért szelvények kivételesnek tekinthetők a fentebb leírt és a későbbiekben alkalmazott leképezési gyakorlathoz képest, mivel ezek olyan egyszörös mérések voltak, melyek nagyobb energiájú (boomer) forrást alkalmaztak. Ennek köszönhetően ez a szeizmikus anyag az elért 0,5–1 m-es felbontással és 100–150 m-es behatoló képességgel átmenetet jelent az ultranagy felbontású SeistecTM és a nagy felbontású többszörös szelvényezési módszer között.

Az 1993. június 13–21. közötti felmérés egy Európai Unió Tempus projekt részeként, magyar–olasz együttműködés keretében zajlott. A résztvevő felek az ELTE Geofizikai Tanszéke (Budapest), a Nápolyi Egyetem és a nápolyi székhelyű tengerkutató intézet (GEOMARE) voltak. A használt műszereket és a kezeléshez szükséges technikus-

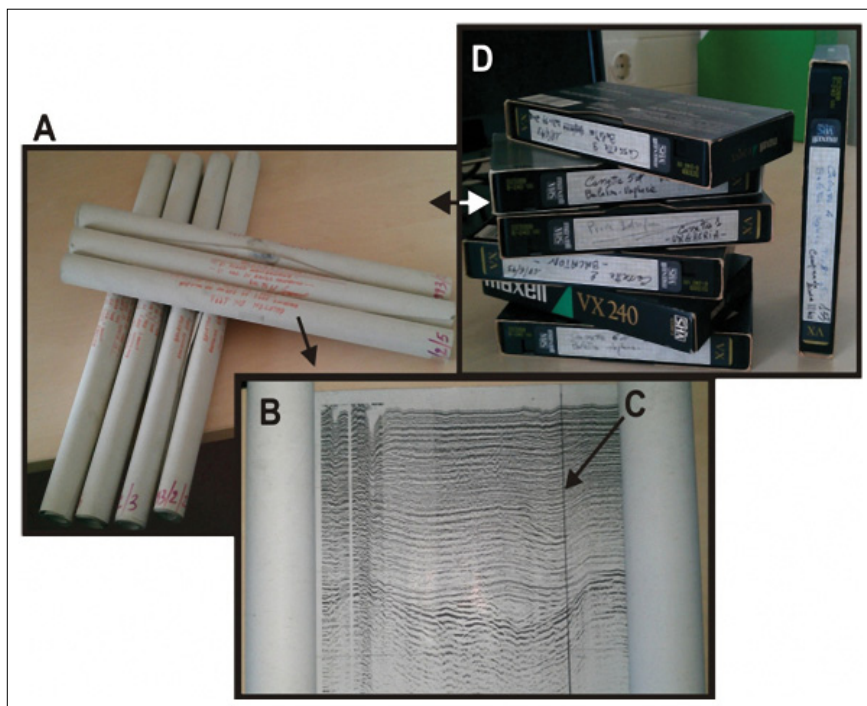


1. ábra A boomer forrás és a hozzá tartozó hordozó test vízre emelése a siófoki kikötőben, 1993 nyarán (Sacchi, 2001)

Figure 1 The boomer source and its carrier hull in the Siófok harbour (1993) (Sacchi, 2001)

kat az olasz fél biztosította. A mérések a Siófokról kifutó 35 m-es *Vízvédelem* nevű hajó segítségével zajlottak, melynek pozícióját DGPS segítségével, az akkortájt egyedinek számító, 2–3 m-es pontossággal lehetett meghatározni. Ezeket a munkákat Sárhidi Attila, az ELGI egykori szakembere végezte. A DGPS bázisát a Siófoki-medence keleti oldalán (Balatonvilágos vasútállomás), majd a Tihanyi-félszigeten (Diósi-tető) helyezték el. Ezt az indokolta, hogy a legtöbb tervezett szeizmikus vonal a Siófoki-medence területére esett. A mérési naplóban 10 percnként rögzítettek vezérkoordináta-adatokat, melyek pontos helyét nyomtatott papírszelvényeken is megjelölték. A munka során folyamatosan regisztrált szeizmikus anyagot végül 20 db szelvényre tagolták. Ezek közelítő összesített hossza mintegy 190 km. Közülük 14 („L” szelvények) a Tihanytól keletre, 6 pedig („LW” szelvények), a nyugatra lévő balatoni medencében helyezkedik el.

A szeizmikus felvételekhez a jelet egy 300 joule-os boomer forrás (1. ábra) szolgáltatta, mely a hozzá tartozó 4,6 m hosszú, 8 vevőből álló hidrofonsoporthoz képest 3 m-es offszettel helyezkedett el. Miközben a hajó átlagosan 6,5 km/h-s sebességgel haladt előre a boomer másodpercenként 1 lövést adott le. A felvételeket előerősítés és 100 Hz



2. ábra Az eredeti adatrendszer. A: papír szelvények, B: papírszelvény részlet, C: idővonal, D: VHS kazetták

Figure 2 Original dataset. A: paper sections, B: an example of printed section, C: timeline, D: video cassettes

– 5 kHz közötti sávszűrés után plotter segítségével a helyszínen kinyomtatták 250 ms kétutas futási időig, valamint (PAL VHS hifi rendszerrel) sztereo-videoszalagokon rögzítették.

A méréseket követően megkezdődött az analóg adatok digitalizálása is. Ebből a munkából mindössze három szépen feldolgozott áttekintő szelvény (L-6, L-11/12, LW-5) került be a tudományos köztudatba. Ezeket Marco Sacchi mutatta be és értelmezte a mérési kampányt követő publikációiban és doktori dolgozatában (Sacchi et al. 1998, 1999, Sacchi 2001). Az „olasz szelvényekként” emlegetett anyag további része csak papírszelvényeken és azok helyszínrajza-ként maradt fent. Legutóbb a Földtani Közlöny Balatonnal foglalkozó 140/4-es különszámában került sor a '93-as mé-

rések ismertetésére (Tóth Zs. et al. 2010). Ugyanitt Sacchi értelmezéseinek továbbgondolásáról is olvashatunk (Horváth et al. 2010), amely felvetette a szelvényeknek mai technikán alapuló digitális feldolgozásának igényét. Ebből a célból a Nápolyban tárolt eredeti sztereo-videoanyaghoz és papírszelvényekhez nyúltunk vissza (2. ábra). A most elvégzett munkával végre elérkeztünk egy 20 éves projekt sikeres lezárásához.

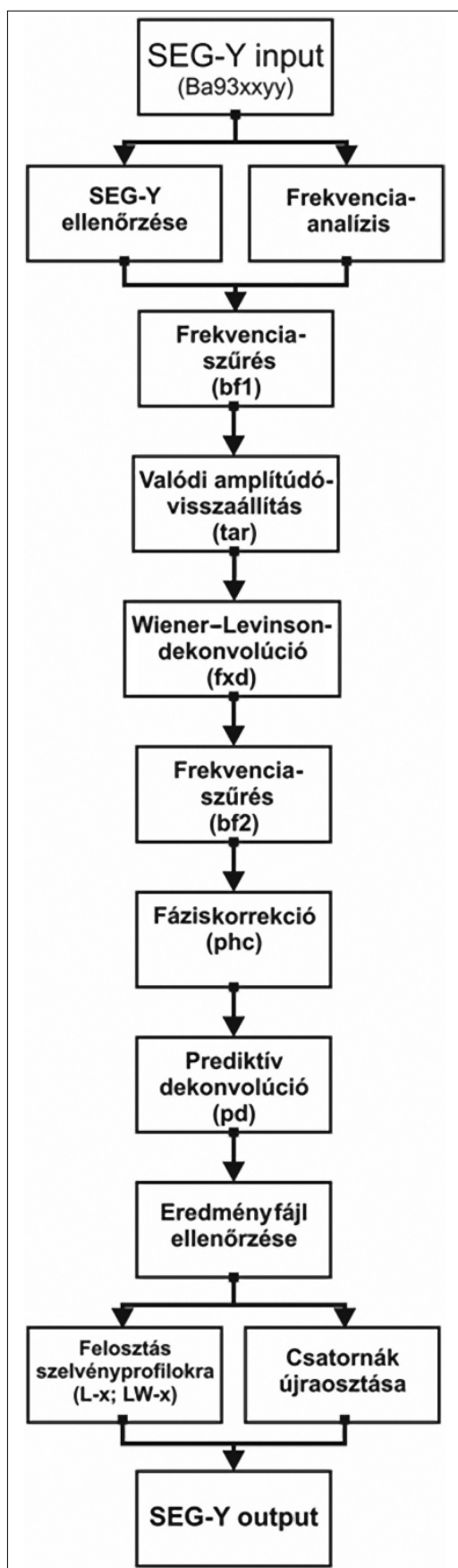
Az újrafeldolgozás menete

Az analóg anyag újrafeldolgozásának lehetőségét egy mára már szinte technikatörténeti emléktárgynak számító, de mű-



3. ábra A digitalizáló rendszer. Balra: az átjátszó összeállítása, jobbra: kapcsolási rajz

Figure 3 Digitizing system. Left panel: photo of the system, right panel: block diagram of the system. A: AD converter (black box), B: analogue signal processing unit, C: data converter box, D: oscilloscope, E: VHS video recorder



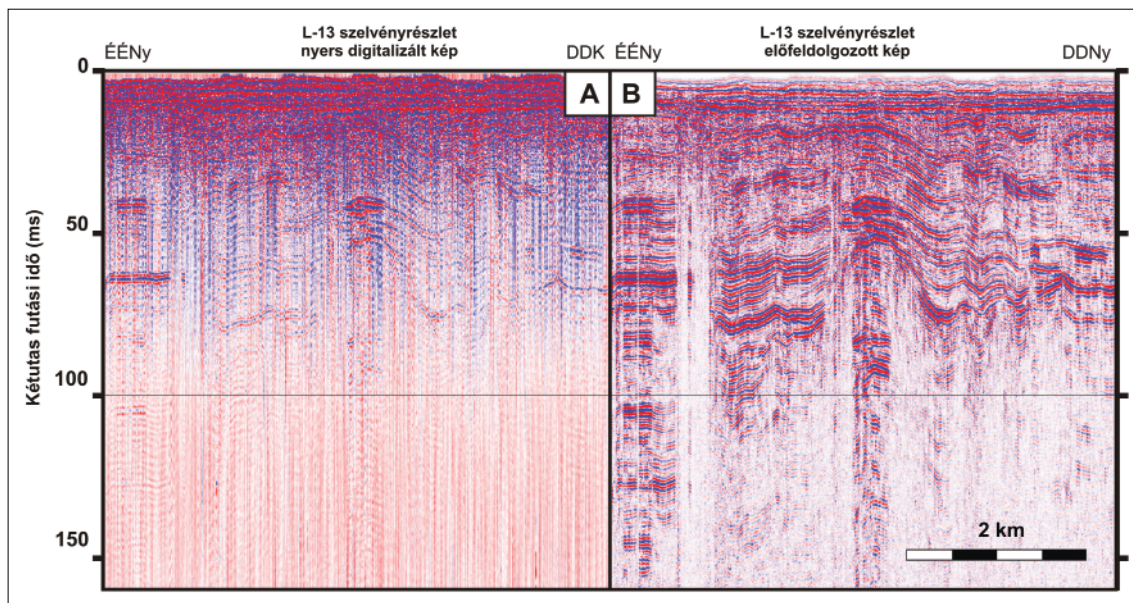
4. ábra A szeizmikus szelvények feldolgozásának menete
Figure 4 Main steps of the seismic processing

kódoképes VHS magnó megtalálása (ELTE oktatástechnika laboratórium) tette lehetővé. Az videokazettákon rögzített analóg adatokat tartalmazó a 3. ábrán látható módon összeállított rendszer segítségével digitális állománnyá konvertáltuk. Az átjátszórendszer részei egy adatátviteli egység, egy SPA-3 analóg jelfeldolgozó egység, a Preseis digitalizáló szoftvert (Vida R.) futtató, 16 bit-es AD konverterrel rendelkező számítógép (black box), egy oszcilloszkóp és az említett videomagnó. A digitalizálás során a VHS kazetták első csatornáján a '93-as méréseknél rögzített szeizmikus felvételt, a második csatornán rögzített trigger jel segítségével vettük át, mintegy szimulálva a valódi vízi szeizmikus mérést, annyi különbséggel, hogy a „beérkező” jelet maga a videomagnó szolgáltatja.

A digitalizálás mintavételi frekvenciája 20 kHz volt, és a szelvényeket 250 ms kétutas futási időnél vágta le a rendszer. A kazetták valós idejű lejátszása mellett a számítógép képernyőjén a szoftver kirajzolta a felvett szeizmikus csatornákat is. E csatornák alkotta szeizmikus kép alapján a digitalizálás során folyamatosan nyomon követtük, hogy a papírszelvények mely szakaszán, melyik szeizmikus profilt vesszük fel. Az átjátszás közben jegyzőkönyvben rögzítettük a papírszelvényeken található 10 percnél tartó csatornákat és az aktuális szalag kezdetétől eltelt időt a későbbi tájékozódás és felkoordinatázás megkönnyítése céljából. A fájlokat „Ba93xxy” névformában mentettük el, ahol „xx” a videokazetta számát, „yy” pedig az azon belüli SEG-Y fájl sorszámát jelölte. A szelvények pontos lokalizációját a nemrégiben elhunyt Dövényi Péter számítógépében archivált, báziskorrigált DGPS adatok alapján végeztük el. A munka során az 1 percnél mért koordinátaadatokat, az egykori mérési napló és a nyomtatott papírszelvények alapján a 10 perces idővonalakhoz illesztettük. A kapott digitális állományokat a biztonsági másolatok készítése és archiválás után ProMAX programmal dolgoztuk fel.

A szeizmikus felvételeket tartalmazó SEG-Y fájlok feldolgozását a már publikált szelvények feldolgozási lépéseinek ismeretében kezdhettük el (Sacchi 2001). Mivel a feldolgozás előtti tesztek és frekvenciaanalízis alapján a szelvények jellegében és az amplitúdóspektrumokban nem tapasztaltunk nagy eltéréseket, így 4. ábrán látható feldolgozást minden szelvényre egységesen végeztük el. Ennek eredményeképpen jól értelmezhető szeizmikus képet kaptunk (5. ábra).

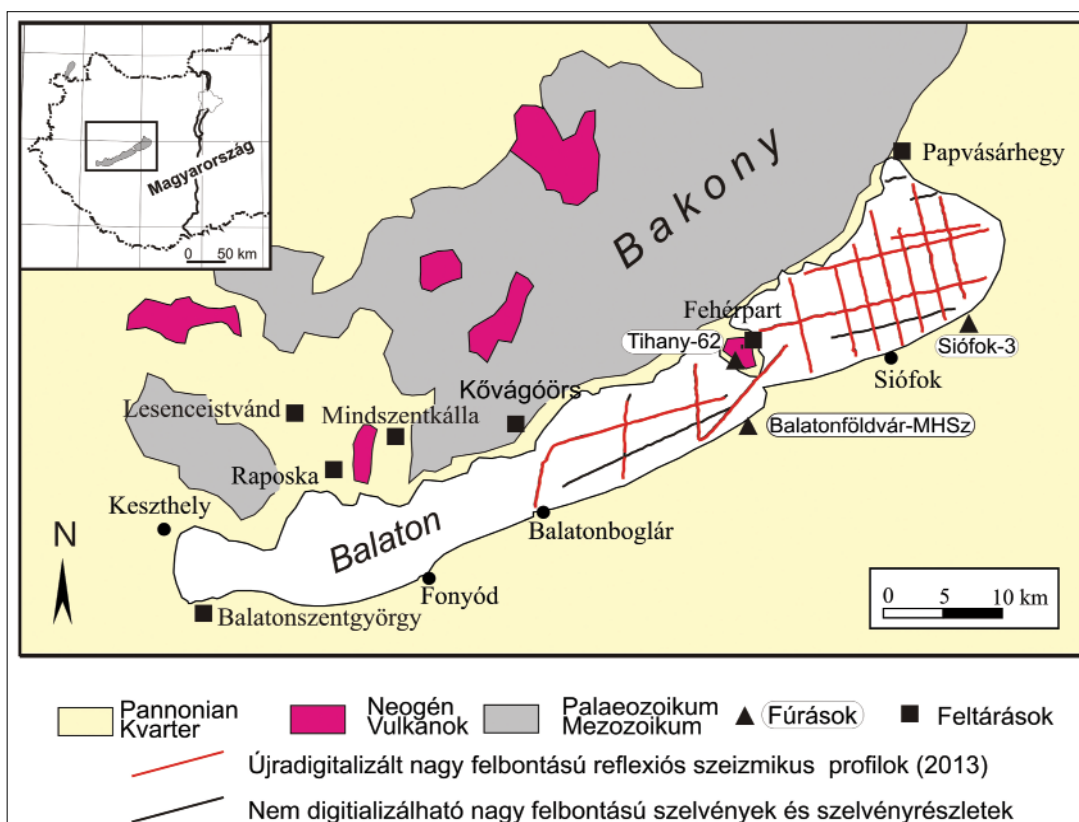
A feldolgozás során alkalmazott előszűrésnél (bf1) Ormsby frekvenciaszűrést alkalmaztunk, 100–400–3500–4000 Hz frekvenciaértékek mellett. Ezt követte a valódi amplitúdóvisszaállítás (tar). Itt a hanghullámterjedési sebességeket egyszerű rétegmodell segítségével adtuk meg. Ennek megfelelően 0–3 ms között 1480 m/s (víz), 3–10 ms között 1600 m/s (iszap), >10 ms mellett 2000 m/s (pannóniai korú vagy idősebb rétegek) sebességtérrel számoltunk azt feltételezve, hogy a sebességtér horizontális irányokban változatlan. Az amplitúdóviszonyok helyreállítása után a Wiener–Levinson-szűrő alapú F-x dekonvolúciót (fxd) alkalmaztuk az adatokra jellemző frekvenciatartományban. A



5. ábra Az L-13 szelvény egy részletének az előfeldolgozás előtti (A) és utáni (B) képe
Figure 5 A part of the L-13 profile before (A) and after (B) the main processing steps

dekonvolváltság eredményeket végül egy, a magasabb frekvenciákra nézve szűkebb szűrővel (bf2) megvágtuk. Utóbbi esetben egy 0–100–1500–2000 Hz értékekkel jellemz-

hető Ormsby frekvenciaszűrővel dolgoztunk. A fentiek szerint előfeldolgozott szelvényeken később fáziskorrekciót és prediktív dekonvolúciót végeztünk. A fáziskorrekciónál 2,5



6. ábra A sikeresen feldolgozott (piros) és a digitális állománnyá nem konvertálható (fekete) szeizmikus profilok helyszínrajza. Az ábra a Sacchi (1999, 2001) értelmezése során felhasznált fúrások és feltárások helyét is jelöli
Figure 6 Location map of the successfully digitized (red) and the unverifiable (black) seismic lines from the 1993 survey. Figure also shows the location of the boreholes and outcrops used by Sacchi (1999, 2001)

1. táblázat | A feldolgozás után kapott szelvények és fontosabb jellemzőik

Szelvény	Csatornák száma	Közelítő hossz (km)	Irány	Elhelyezkedés
L-3x4.sgy	5055	9	Ny–K	Siófoki-medence
L-4a.sgy	4568	8,2	NyDNy–KÉK	Siófoki-medence
L-4b.sgy	5667	10,2	NyDNy–KÉK	Siófoki-medence
L-6a.sgy	4167	7,5	NyDNy–KÉK	Siófoki-medence
L-6b.sgy	8426	15,1	NyDNy–KÉK	Siófoki-medence
L-9.sgy	5235	9,4	ÉÉNy–DDK	Siófoki-medence
L-10.sgy	4772	8,5	ÉÉNy–DDK	Siófoki-medence
L-10x11.sgy	5393	9,7	ÉÉNy–DDK	Siófoki-medence
L-11a.sgy	5918	10,6	ÉÉNy–DDK	Siófoki-medence
L-11b.sgy	2208	3,9	ÉÉNy–DDK	Siófoki-medence
L-11bis.sgy	7111	12,7	ÉÉNy–DDK	Siófoki-medence
L-11x12.sgy	5884	10,5	ÉÉNy–DDK	Siófoki-medence
L-12.sgy	8017	14,4	ÉÉNy–DDK	Siófoki-medence
L-13.sgy	6127	11	ÉÉNy–DDK	Siófoki-medence
LW-1.sgy	6792	12,2	ÉNy–DK–	Szemesi-medence
LW-2.sgy	4646	8,3	É–D	Szemesi-medence
LW-3a.sgy	2772	4,9	É–D	Szemesi-medence
LW-3b.sgy	1200	2,1	É–D	Szemesi-medence
LW-4.sgy	3374	6	É–D	Szemesi-medence
LW-5.sgy	8792	15,8	NyDNy–KÉK	Szemesi-medence

ms-os operátorhossz, míg a dekonvolúciónál 5 ms-os operátorhossz és 1,25 ms prediktív távolság mellett sikerült a legjobb szelvényprofilokat előállítani.

A kapott eredményfájlokat az egykori mérési napló szelvényprofiljainak megfelelően feldaraboltuk a digitalizálás során felvett, majd később ellenőrzött és javított csatornaértékek mentén. A csatornák újbóli leosztását követően 20 db szeizmikus profilrészlet állt elő, melyeket *.sgy formátumú fájlokként írtunk ki.

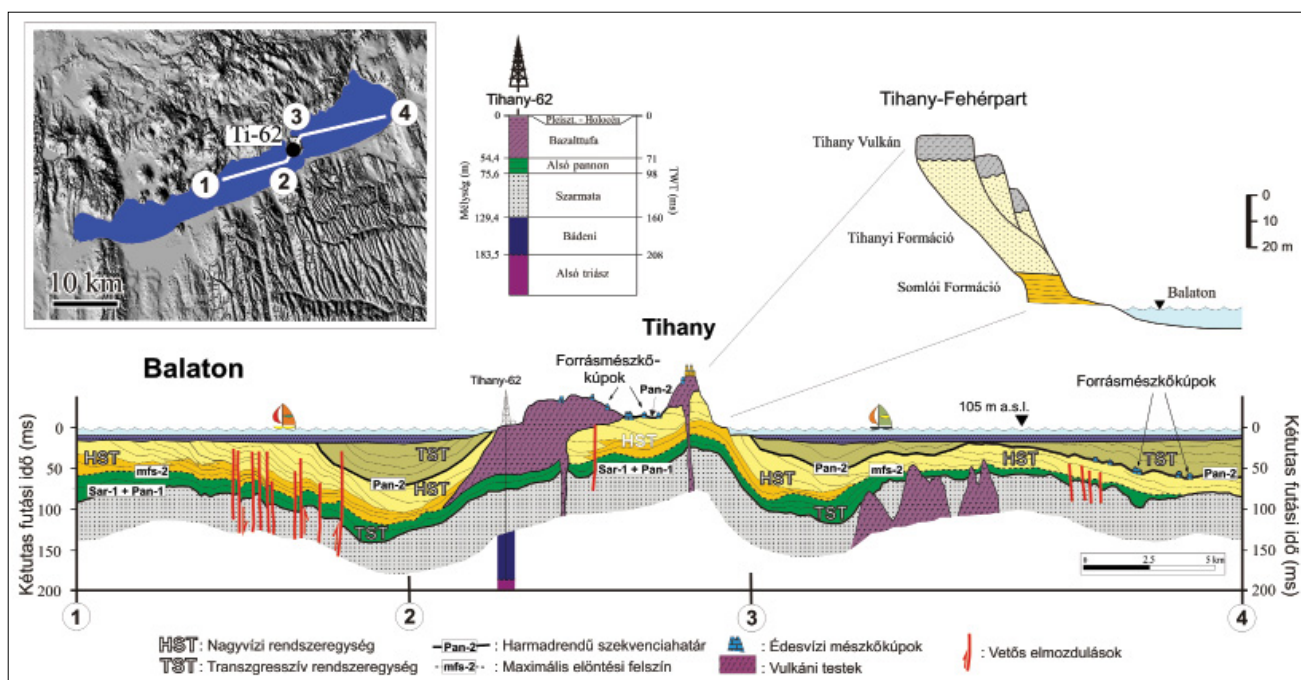
A munka eredményeként az egykori felmérés összesen 20 profilja közül (Tóth Zs. et al. 2010) 16 szelvény sikeres konverziója történt meg. Ezek közül négy szelvényt (L-4, L-6, L-11 és LW-3) a feldolgozás során a videoszalagok végeinél, illetve hajó leállás mentén 'a' és 'b' részre tördeltünk így összességében a projekt végén továbbra is 20 darab profil állt elő (1. táblázat, 6. ábra).

A szelvények értelmezése

Ebben a fejezetben néhány, korábban még nem bemutatott '93-as vízi szeizmikus szelvényt és előzetes azok értelmezését ismertetjük. Fontos megjegyezni, hogy a szelvények erősen túlmagasított formában kerültek megjelenítésre, és a rétegtani horizontok általános dőlése valójában nem több, mint 1–2°. Az itt bemutatott szeizmikus profilok immáron digitális állományokként bekerültek az 1993 utáni mérésekből összeállított, jelenleg is folyamatosan bővülő (Balázs et

al. 2013) „nagy” balatoni szeizmikus adatbázisba (Tóth Zs. et al. 2010). Az egyes horizontok követése tehát nem csupán az adott szelvény horizontjainak kijelölésével, hanem az ultranagy felbontású IKB-SeistecTM és a nagy felbontású többcsatornás szelvények horizontjaival való korreláció figyelembevételével történhetett. Az adatrendszerek összefésült használatától az itt bemutatott újrafeldolgozott anyag értelmezésén túl azt várjuk, hogy felfedi a Tihanyi-félsziget két oldalán eddig meg nem értett földtani struktúrákat és a félsziget két oldala közötti rétegtani összefüggéseket.

Az 1993-as vízi szeizmikus szelvények által leképzett rétegösszletről általánosságban elmondható, hogy három regionális, unkonformitásfelületekkel határolt makro-sztratiográfiai egységbe sorolható be (Sacchi et al. 1999). Ezek a holocén – késő pleisztocén balatoni iszap, a késő miocén (pannóniai) üledékek és az akusztikus aljzat, mely területileg változóan szarmata, perm vagy idősebb paleozoos képződményekből épül fel (Budai et al. 1999). A fenti egységek közül a szelvények legrészletesebben a pannóniai üledékes rétegeket képezik le. Az újrafeldolgozott szelvényeken jól követhető számos olyan pannóniai horizont, mely kisebb üledékes csomagokra (paraszekvenciákra) osztja ezt a maximálisan 100–150 m vastagságú közettettet. Sacchi et al. (1998, 1999) és Horváth et al. (2010) a szekvencia sztratiográfiaelveinek megfelelően transzgresszív, és nagyvízi rendszeregyeségekre osztották a pannóniai összletet e kitüntetett horizontok alapján (7. ábra). Kiemelt jelentőségének (harmadrendű szekvenciahatárnak) gondolták azt a Tihanyi-



7. ábra A Balaton alatti rétegsor és a Pan-2 szekvenciahatár korrelációja parti fúrásokkal és feltárásokkal (Sacchi 2001 alapján)

Figure 7 Stratigraphic architecture and Pan-2 sequence boundary below Lake Balaton and their correlation with outcrops and boreholes in the vicinity of the lake (after Sacchi 2001)

félszigeten megfigyelhető diszkordanciafelületet, amelyik a bazaltvulkáni összlet és a reá települő édesvízi mészkövek („gejziritek”) között húzódik (Horváth et al. 2010). Ennek a szárazföldi eróziós felszínnek a folytatását és a föléje települt mészkőkúpokat a Balaton alatti szeizmikus szelvényeken is értelmezik (7. ábra). A felület kialakulásának idejére jó becslést ad az újabban Ar-Ar módszerrel is meghatározott tihanyi vulkáni tevékenység kora (7,96–7,92 Ma, Wijbrans et al. 2007).

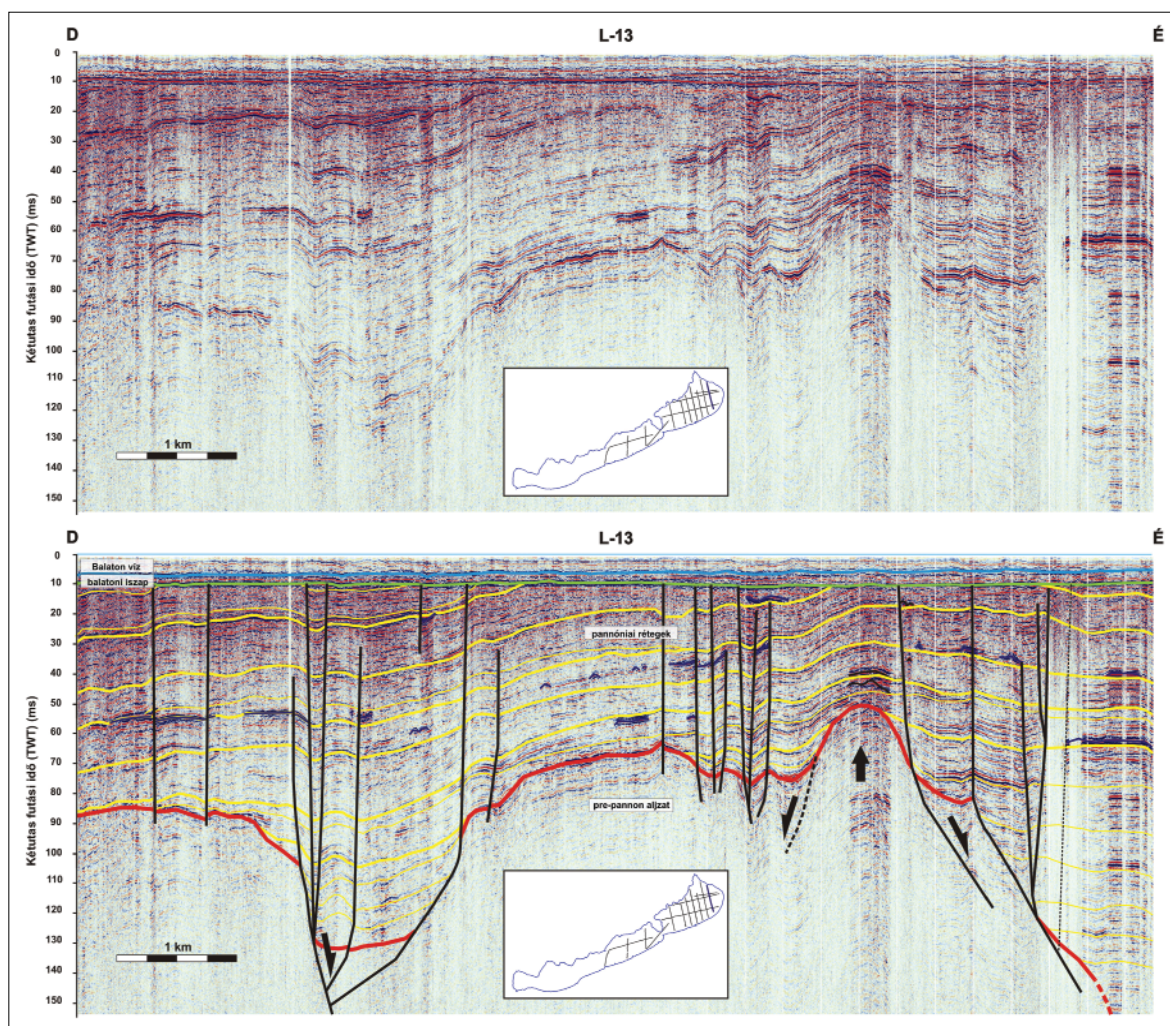
Más vélemények szerint a Balaton alatti üledékes ciklusok jellege és időtartama nagyobb frekvenciájú (negyedrendű és ötödrendű) ciklicitást mutat. Ezek valószínűleg klimatikus vezérelt 15–30 m-es vízszintingadozásokhoz kötődnek, melyek transzgresszív egységét vékony deltaelótéri üledékek, nagyvízi egységét pedig az épülő deltalebenyek alkotják (Sztanó et al. 2013, Visnovitz 2013). Ugyanakkor, elfogadva a finomabb ciklicitást mutató rétegtani képet, nem tartjuk kizártnak, hogy harmadrendű szekvenciahatárok is megerősítést nyernek, amennyiben azok regionális elterjedése bizonyítható.

A fenti értelmezésekkel szoros összhangban az újrafeldolgozott 1993-as szeizmikus szelvények alapján a következő általános megállapítások tehetők:

- 1) A Siófoki-medence pannóniai rétegsora jól lehatárolható üledékes egységekre osztható, melyek vastagsága néhányszor 10 m.
- 2) Az üledékes egységek általában lejtőépülési (progradációs) jellegeket mutatnak, ezek tetőszintje esetenként eróziósan lefejezettnek mutatkozik.
- 3) A lejtőépülést mutató sorozatokból legalább három, nagyobb kiterjedésben is jól követhető a Siófoki-medence területén.

- 4) Az üledéket tagoló, markáns reflektorok Tihanytól nyugatra is azonosíthatók, de az ezek alkotta struktúra eltérőnek mutatkozik a keleti oldalhoz képest.
- 5) Bizonyos területeken kiemelten erős amplitúdójú reflektorszakaszok figyelhetők meg, melyeket „kemény” közetpadokként értelmezhetünk. Ezek egy része megfeleltethető a Tihanyi-félsziget fentebb tárgyalt édesvízi mészkő padjaival („gejzirit” kúpjaival) (Horváth 2010, Sacchi 2001), míg máshol ezek lehetnek cementált homokkőpadok vagy vulkáni működéshez kapcsolódó rétegek.
- 6) A szeizmikus szelvényeken a nagy felbontás miatt számos vetős szerkezet azonosítható. Ezek két csoportba oszthatók. Az idősebb vetők csak a prepannon aljzatban mutathatók ki, míg a fiatalabb vetők deformálják a pannóniai üledékeket is. Utóbbiaknak két fontos altípusa figyelhető meg: a vetők egy része a pannóniai üledékeken belül elvégződik, míg más vetők egészen a balatoni iszap bázisáig követhetők.
- 7) A pannon szerkezeti mozgásokkal összekapcsoltnak az aljzatban árkok jöttek létre, illetve több helyen tapasztalható az aljzat kiemelkedése is.
- 8) Az iszap aljáig hatoló vetőket néhány decimétertől néhány méteres elvetések hoznak létre és regionálisan korrelálható vetőzónákat alkotnak. Ezek a szerkezetek a Balatonfő oldaleltolódási zóna Balaton alatti folytatásaként azonosíthatók (Bada et al. 2010, Visnovitz, Horváth 2013).

A fenti jellegeket az alább bemutatott és röviden jellemezett szelvények (8–12. ábra) segítségével illusztráljuk.



8. ábra Az L-13-as szelvény és helyszínrajza. Felül: feldolgozott szelvény, alul: a szelvény vonalas értelmezése, a piros vonal az akusztikus aljzatot, a sárga a pannon rétegtani egységek határait, a lila a „kemény” kőzetfelszíneket, a fekete pedig a vetőket mutatja

Figure 8 Section L-13 and its location map. Upper panel: processed profile, lower panel: interpreted profile; red: acoustic basement, yellow: Pannonian subunits, purple: strong reflectors, black: faults

Az L-13-as szelvény (8. ábra)

Az L-13-as közel É–D irányú szelvény a Siófoki-medence keleti peremén halad. A szelvényen jól azonosíthatók 10–15 m vastagságú pannóniai üledékciklusok. Ezek véleményünk szerint azokhoz a klímacyklusokhoz kötődnek, melyeket a földpálya excentricitásának 400 000 éves periódusú változásai generálnak. Több ciklusban is megfigyelhetők a „kemény” rétegtani padok.

Az L-13-as szelvény emellett látványosan mutatja a kisebb árkokkal tagolt akusztikus aljzatot. A szelvény É-i végén látható kimélyülést parti fúrások (Balatonkenese, Bk-1, Bkt-1) is megerősítik. A szelvényen jól kijelölhető vetők és a kapcsolódó gyűrődések regionálisan korrelálható oldalelmozdulásos zóna (Balatonfő-vonal) részei.

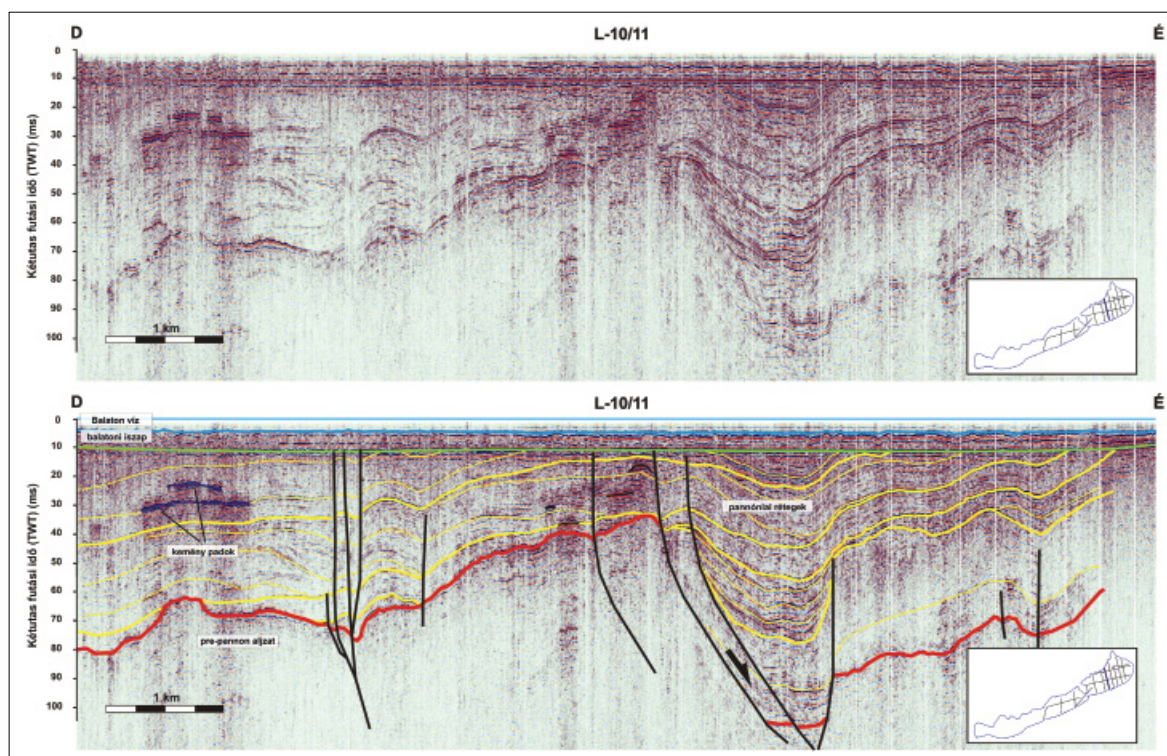
Az L-10/11-es szelvény (9. ábra)

Az előző szelvénnel közel párhuzamosan, a Siófoki-medence közepén húzódó szelvény. Ezen a szelvényen a pannóniai egység középső részén egy vastagabb progradáló

sorozat ismerhető fel. A szelvény déli végében a megszo-kottnál magasabb helyzetben jelennek meg egymás felett több rétegben a „kemény reflektorok”. A szelvény közepén az aljzat markáns levetést mutat, és a mélyebb részekben a szeizmikus fácies is megváltozik. Az aljzat kimélyüléséhez olyan szerkezeti elemek is társulnak, melyek az üledékképződés idején is aktívak voltak. Az árkot kitöltő pannóniai horizontok jellegzetes aszimmetrikus félárok szerkezetet rajzolnak ki.

Az L-11b szelvény (10. ábra)

A szintén É–D lefutású L-11 szelvény déli vége. Ezen a szelvényen figyelhető meg a legjobban a Siófok előterében jelentkező kemény padok több szintbe rendeződése, illetve a Balaton tengelyével párhuzamosnak leírt (Bada et al. 2010), fiatal balos eltolódási zóna. Érdeklőség, hogy a „kemény” reflektorok a vetőzóna közelébe esnek, illetve hogy ezek környékén a pannon üledékképződés jellegében is tapasztalunk némi változást.



9. ábra Az L-10/11-es szelvény és helyszínrajza. Felül: feldolgozott szelvény, alul: a szelvény vonalas értelmezése; a piros vonal az akusztikus aljzatot, a sárga a pannon rétegtani egységei határait, a lila a „kemény” kőzetfelszíneket, a fekete pedig a vetőket mutatja

Figure 9 Section L-10/11 and its location map. Upper panel: processed profile, lower panel: interpreted profile; red: acoustic basement, yellow: Pannonian subunits, purple: strong reflectors, black: faults

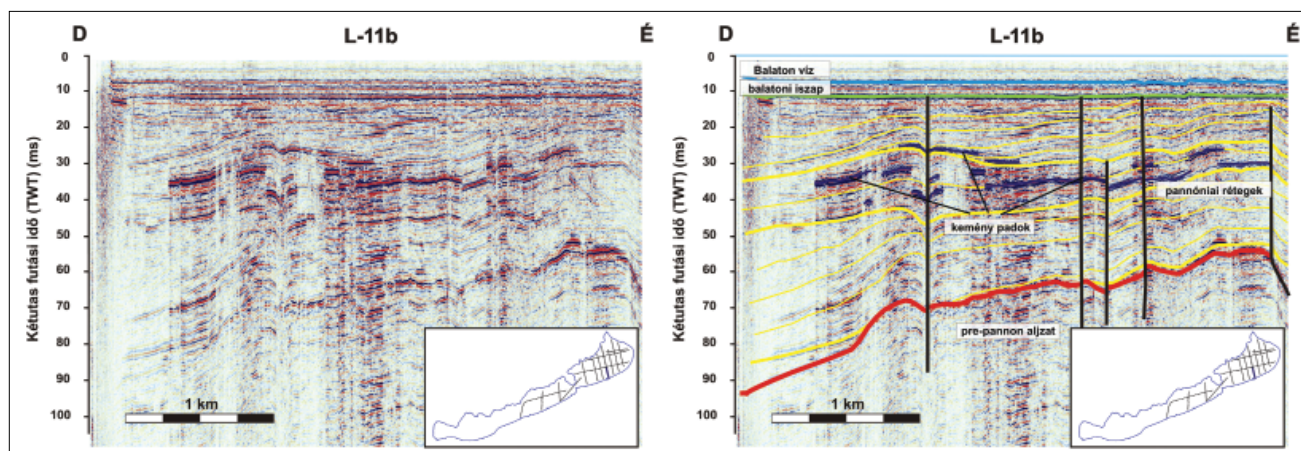
Az L-3/4 szelvény (11. ábra)

A közel K–Ny irányú szelvény jól mutatja a tó ÉK-i sarkának struktúráját. A szelvény nyugati végén látható aljzatmagaslat az Alsóörs előterében kiemelkedő, platószerű egység. A parti fúrások és feltárások alapján (Budai et al. 1999) anyaga a Lovasi Agypala formációval azonosítható. A magaslat előterében peremvetőkkel határolt süllyedék foglal helyet, melyet fokozatosan kitöltenek a pannóniai üledékek. A rétegek jellege arra enged következtetni, hogy a ma-

gaslat kiemelkedése a pannóniai üledékképződés után is folytatódott, kibillentve a kezdetben valószínűleg szimmetrikus miocén árkot.

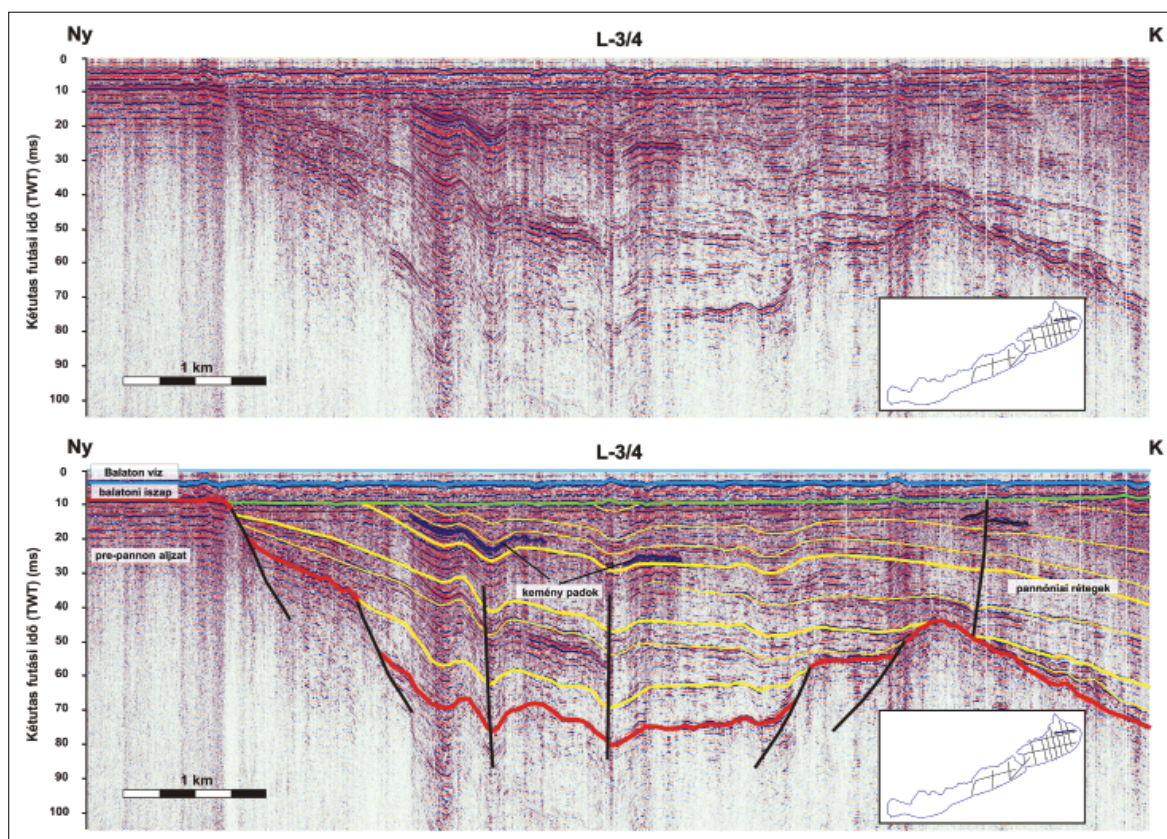
Az LW-3a szelvény (12. ábra)

A Tihanyi-félszigettől nyugatra eső, közel É–D irányú szelvényen már szembetűnőek a pannóniai üledék egészét, sőt még az akusztikus aljzatot is harántoló vetők. Ezek a tektonikai elemek a siófoki oldalon tapasztaltakhoz képest jóval



10. ábra Az L-11b szelvény és helyszínrajza. Felül: feldolgozott szelvény, alul: a szelvény vonalas értelmezése; a piros vonal az akusztikus aljzatot, a sárga a pannon rétegtani egységei határait, a lila a „kemény” kőzetfelszíneket, a fekete pedig a vetőket mutatja

Figure 10 Section L-11b and its location map. Upper panel: processed profile, lower panel: interpreted profile; red: acoustic basement, yellow: Pannonian subunits, purple: strong reflectors, black: faults

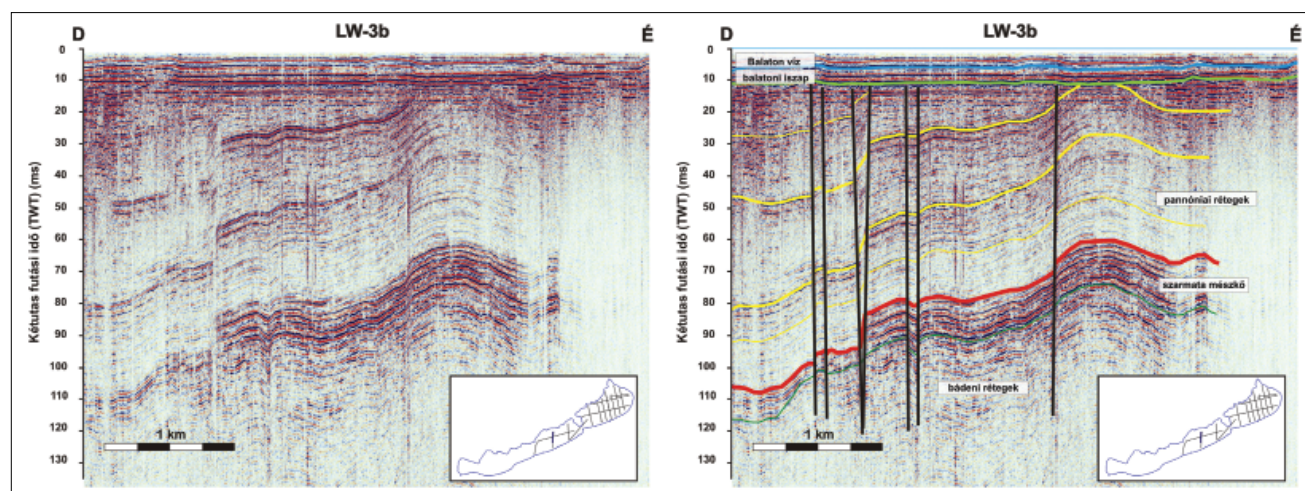


11. ábra Az L-3/4-es szelvény és helyszínrajza. Felül: feldolgozott szelvény, alul: a szelvény vonalas értelmezése; a piros vonal az akusztikus aljzatot, a sárga a pannon rétegtani egységek határait, a lila a „kemény” kőzetfelszíneket, a fekete pedig a vetőket mutatja
Figure 11 Section L-3/4 and its location map. Upper panel: processed profile, lower panel: interpreted profile; red: acoustic basement, yellow: Pannonian subunits, purple: strong reflectors, black: faults

sűrűbb rendszerben helyezkednek el, és a keleten leírt (Bada et al. 2010) vetők duplex szerkezetbe történő átmenetének eredménye (Visnovitz, Horváth 2013).

Az akusztikus aljzat felső részét közel párhuzamos, erős amplitúdójú reflexiók alkotják, melyek Sacchi (2001) értelmezése nyomán szarmata mészkő- és mészmárgarétegek-

ként (Tinnyei és Kozárdi Fm.) azonosíthatók. A szarmata réteg látszólagos vastagsága a vetők két oldalán eltérő, bár az összlet bázisa nem határozható meg teljes bizonyossággal. Az aljzat a középhegység irányában fokozatosan emelkedik, összhangban korábbi ismereteinkkel (Horváth et al. 2010).



12. ábra Az LW-3a szelvény és helyszínrajza. Felül: feldolgozott szelvény, alul: a szelvény vonalas értelmezése; a piros vonal az akusztikus aljzatot, a sárga a pannon rétegtani egységek határait, a lila a „kemény” kőzetfelszíneket, a fekete pedig a vetőket mutatja
Figure 12 Section LW-3 and its location map. Upper panel: processed profile, lower panel: interpreted profile; red: acoustic basement, yellow: Pannonian subunits, purple: strong reflectors, black: faults

A pannóniaiban több erősebb reflektor követhető, melyek mutatják a keleti oldalon bemutatott ciklicitást, de némileg eltérő rétegtani struktúrát alkotnak. A Szemesi-medencében leképezett horizontok a szeizmikus adatbázis többi szelvényét is figyelembe véve inkább egy nagyobb lejtő egymásra települő finom rétegeiként értelmezhetők (Visnovitz 2013).

Összefoglalás, konklúziók

Munkánk során az 1993-ban analóg módon (VHS videokazettákon) rögzített balatoni egycsatornás, nagy felbontású vízi szeizmikus szelvények digitális állománnyá való konverzióját és feldolgozását végeztük el. Az egyes szeizmikus csatornákhoz a mérési jegyzőkönyvek és a mért GPS adatok alapján EOY koordinátákat rendeltünk. Az így kapott digitális állományokat további feldolgozáshoz és értelmezéshez SEG-Y fájlok formájában tároltuk el, és beillesztettük az egységes balatoni vízi szeizmikus adatbázisba.

Az adatbázis további szeizmikus és fúrási anyagaival összekapcsoltan néhány szelvényre átfogó értelmezést adtunk, bemutatva az aljzat, a pannóniai rétegek és a tektonikai elemek főbb jellegzetességeit. Ezek főbb tanulságai a következőkben foglalhatók össze:

- A szeizmikus szelvényeken látható különböző korú (holocén, pannon, idősebb aljzat) képződmények közül a Balaton alatt a pannóniai rétegösszlet a legjobban kifejtett, és így az jól leképezhető a vízi szeizmikus módszerekkel.
- Tihanytól keletre a maximálisan 150 m vastag pannóniai rétegsorban pár 10 m-es vastagságú, egymásra települő, kb. 400 000 éves progradáló üledékciklusok azonosíthatók. Tihanytól nyugatra hasonló ciklusokból a pannonban épülő nagyobb lejtő képe rajzolódik ki. Ez nagyobb egykori vízmélységre (mélyebb aljzatra) utal.
- Az egyes ciklusokon belül, bizonyos rétegtani pozícióban „kemény” reflektorok helyezkednek el, melyek jelenlegi ismereteink szerint édesvízi mészkövek, cementált homokköpadok vagy vulkáni eredetű rétegek lehetnek. Ezek a jövőbeli részletes rétegtani vizsgálatok „próbakövei”-nek számíthatnak.
- Az aljzat eltérő korú és litológiai kőzetblokkokból épül fel. Ez a Tihanyi-félsziget tágabb környezetében és a Tihanytól nyugatra eső területeken főleg szarmata korú mészköveket és márgákat jelent.
- A pannóniai aljzata kisebb árkokat és más fiatalabb vetős szerkezetek mutat. Utóbbiak a Pannon-medence oldalmozdulásos neotektonikai aktivitásának látványos bizonyítékai.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnénk köszönetet mondani mindazoknak, akik segítettek az 1993-as analóg rögzítésű szeizmikus anyag digitális állománnyá való konverzióját. Köszönettel tartozunk olasz kollégáinknak (Istituto per l'Ambiente Marino Cos-

tiero, Napoli), akik rendelkezésünkre bocsátották az eredeti videokazettákat. Hálásak vagyunk az ELTE TTK oktatástechnikai labor munkatársainak, akik az átjátszáshoz nélkülözhetetlen VHS videomagnót szolgáltatottak.

A munka az OTKA NK83400 pályázat és a MTA/CNR (Messinai események a Pannon-medencében: egy régi legenda feltámasztása, 2010–2012) együttműködés támogatásával valósult meg. Végül köszönjük Tihanyi Barbarának, az MTA munkatársának, hogy hozzájárult a magyar–olasz kapcsolatok ápolásához.

A tanulmány szerzői

Visnovitz Ferenc, Tóth Tamás, Hámori Zoltán, Kudó István, Balázs Attila, Marco Sacchi, Surányi Gergely, Horváth Ferenc

Hivatkozások

- Bada G., Szafián P., Vincze O., Tóth T., Fodor L., Spiess V., Horváth F., 2010: Neotektonikai viszonyok a Balaton keleti medencéjében és tágabb környezetében nagyfelbontású szeizmikus mérések alapján. *Földtani Közöny*, 140/4, 367–390
- Balázs A., Visnovitz F., Spiess V., Fekete N., Tóth Zs., Hámori Z., Kudó I., Horváth F., 2013: Új szeizmikus mérések a Balatonon: beszámoló a 2011–2012. évi szelvényezésekről
- Budai T., Császár G., Csillag G., Dudko A., Koloszar L., Majoros Gy., 1999: A Balaton-felvidék földtana. Magyarázó a Balaton-felvidék földtani térképéhez, 1:50/000. A Magyar Állami Földtani Intézet Alkalmi Kiadványa
- Csorny T., Corrada R., 1989: A Balaton medencéje és holocén üledékei részletes geofizikai-földtani vizsgálatának újabb eredményei. A MÁFI Évi Jelentése 1987. évről, 341–347. o.
- Csorny T., Corrada R., 1990: A Balaton aljzatának szedimentológiai térképe. A MÁFI Évi Jelentése 1988. évről, 169–176. o.
- Csorny T., Nagy-Bodor E., 2000: Limnogeology of Lake Balaton. In: Gierlowski-Kordesch E., Kelts K. (eds): *Lake Basins Through Space and Time*. AAPG Studies in Geology 46, 605–618
- Csorny T., 2002: A balatoni negyedidőszaki üledékek kutatási eredményei. *Földtani Közöny* 132/különszám, 193–213
- Csorny T., Prónay Zs., Neduczka B., 2004: A Balatonon végzett korábbi szeizmikus mérések újraértékelése. A MÁFI Évi Jelentése 2004., 273–283. o.
- Diel M., 2011: A Fertő-tó vizsgálata tavi szeizmikus mérésekkel. Szakdolgozat, ELTE TTK, Geofizikai és Űrtudományi Tanszék, Budapest
- Horváth F., Dövényi P., Tóth T., Magyar O., Szafián P., Lenkey L., Györfi I., 1996: Folyóvízen kivitelezett, nagy felbontású szeizmikus kísérleti mérések végzése a Tisza Szeged és Szolnok közötti szakaszán. Készült a MOL Rt. megbízásából, Budapest, 1–30. o.
- Horváth F., Tóth T., Magyar O., Szafián P., Bada G., Dövényi P., 1997a: Folyóvízen kivitelezett, nagy felbontású szeizmikus kísérleti mérések végzése a Duna Mohács és Esztergom közötti szakaszán. Kutatási jelentés a MOL Rt. megbízásából, Budapest, 1–86. o.
- Horváth F., Tóth T., Szafián P., Bada G., Vida R., Benkovics L., Csontos L., Dövényi P., 1997b: A tervezett magas aktivitású radioaktív hulladéktároló tektonikai veszélyeztetettségének analízise a Dunán végrehajtott speciális szeizmikus szelvényezés

- alapján. Kutatási jelentés a Paksi Atomerőmű Rt. megbízásából, Budapest, 1–127. o.
- Horváth F., Sacchi M., Dombrádi E., 2010: A Pannon-medence üledékeinek szeizmikus sztratigráfiai és tektonikai vizsgálata Dél-Dunántúlon és Balatonon területén. *Földtani Közlöny* 140/4, 319–418
- Novák D., Koncz D., Horváth A., Szafián P., Sztanó O., 2010: Egy pleisztocén folyó kanyarulata Fonyódnál: medernyomok a balatoni iszap alatt ultranagy felbontású szeizmikus szelvényeken. *Földtani Közlöny* 140/4, 419–428
- Sacchi M., Tonelli R., Cserny T., Dövényi P., Horváth F., Magyarai O., McGee T., Mirabile L., 1998: Seismic stratigraphy of the Late Miocene sequence beneath Lake Balaton, Pannonian basin, Hungary. *Acta Geol. Hung.* 41, 63–88
- Sacchi M., Horváth F., Magyarai O., 1999: Role of unconformity-bounded unit in the stratigraphy of the continental record: a case study from the Late Miocene of western Pannonian Basin, Hungary. In: Durban 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
- Sacchi M., 2001: Late Miocene evolution of the Western Pannonian basin, Hungary. Doktori (PhD) értekezés, ELTE TTK Geofizikai Tanszék, Budapest
- Simpkin P. G., Davis A., 1993: For seismic profiling in very shallow water, a novel receiver. *Sea Technology* 34, 21–28
- Sztanó O., Magyar I., Szónoky M., Lantos M., Müller P., Lenkey L., Katona L., Csillag G., 2013: A Tihanyi Formáció a Balaton környékén: típuszelvény, képződési körülmények, rétegtani jellemzés. *Földtani Közlöny* 143/1, 445–468
- Tóth T., Horváth F., Dövényi P., Gerner P., Magyarai O., 1995: Acoustic profiling on the River Danube. *Kutatási Jelentés a PArt számára*. Budapest, 18 o.
- Tóth T., Simpkin P. G., Vida R., Horváth F., 1997: Shallow Water Single and Multichannel Seismic Profiling in a Riverine Environment. Special Issue of “The Leading Edge”. Society of Exploration Geophysicists.
- Tóth T., Horváth F., 1997: High resolution seismic profiling for neotectonic investigations. In: Marosi S., Meskó A. (eds.), *Seismic risk of the Paks Nuclear Power Plant of Hungary*. Publishing House of the Hung. Acad. Sci., pp. 123–152
- Tóth T., Horváth F., 1998: Van bizonyíték a negyedidőszaki tektonizmusra Paks környékén! *Földtani Közlöny* 129, 109–124
- Tóth T., Horváth F., 1999: Evidence for Quaternary tectonic activity in the Paks area, Hungary. *Acta Geol. Hung.* 42, 327–346
- Tóth T., 2003: Folyóvízi szeizmikus mérések. Doktori (PhD) értekezés, ELTE TTK Geofizikai Tanszék, Budapest, 141 o.
- Tóth Zs. 2009: Balatoni többcsatornás vízi szeizmikus adatok feldolgozása és értelmezése. Szakdolgozat, ELTE TTK, Geofizikai és Űrtudományi Tanszék, Budapest, 87 o.
- Tóth Zs., Tóth T., Szafián P., Horváth A., Hámori Z., Dombrádi E., Fekete N., Spiess V., Horváth F., 2010: Szeizmikus kutatások a Balatonon. *Földtani Közlöny* 140/4, 355–365
- Visnovitz F., 2013: Késő miocén sekélyvízi deltalebeny épülés balatoni nagyfelbontású vízi szeizmikus szelvényeken. In: Koncz I., Nagy E. (eds.), *Tudományos próbapálya. PEME VI. PhD konferencia elektronikus kiadványa* (ISBN: 979-963-88433-8-8), 684–693. o.
- Visnovitz F., Horváth F., 2013: Balatonfő line in ultrahigh-resolution: a neotectonic fault zone under Lake Balaton. In: Fodor L., Kövér Sz. (eds.), *Abstract Book of the 11th Meeting of the Central European Tectonic Studies Group* (ISBN: 978-963-671-294-5), pp. 73–74
- Wijbrans J., Németh K., Martin U., Balogh K., 2007: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronology of Neogene phreatomagmatic volcanism in the Western Pannonian Basin, Hungary. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 164, 193–204