

SOURCE-SINK MAGYARORSZÁG - A HORDALÉKSZÁLLÍTÁS MENNYISÉGI VIZSGÁLATA MAGYARORSZÁGON; KOMPLEX VIZSGÁLAT AZ ÜLEDÉKFORRÁSTÓL A MEDENCÉKIG

OTKA NK83400 projekt

Kutatási zárójelentés

**Timár Gábor, Balázs Attila, Bereczki László, Erdős Zoltán, Kovács Gábor, Sólyom
Péter, Visnovitz Ferenc**

I. A projekt eredeti célkitűzése, a kutatás főbb eredményeinek összefoglalása

A kutatási terv 3. fejezetében a következő fő célokat tűztük ki:

- (1) a Pannon-medencében végbemenő deformáció jellegének és mértékének meghatározása
- (2) a horizontális és vertikális kéregmozgások nagyságrendjének meghatározása
- (3) a vertikális elmozdulások mechanizmusának és tektonikai jellegének megismerése
- (4) korolt szediment-sorozatok térképezése
- (5) morfo-tektonikai vizsgálatok, és
- (6) mindezek kapcsolódása a változó klímával

A projekt legfontosabb kutatási eredményei a fenti pontokra adott tételes válaszokként a következők:

- (1) A Pannon-medence középső és nyugati részén (különös tekintettel a dunántúli vizsgálati területeinkre) a deformáció regionális jellegű. A vizsgálatok során megbecsült hibahatár (kb. 0,1 mm/év függőleges elmozdulási ráta) figyelembe vételével a hibahatárt meghaladó, konkrét tektonikai szerkezethez kapcsolódó függőleges elmozdulási sebességet nem valószínűsítünk. A kiemelkedés-süllyedési kép nagy (néhány tíz kilométer) hullámhosszúságú anomáliákkal írható le, amelyek geodinamikai eredetűek, a teljes litoszférát jellemzik, így az egyes, felszínen is térképezhető tektonikai vonalakhoz nem kapcsolódnak. A maximális kiemelkedés sebessége a vizsgált Dunántúli-középhegység középvonala mentén max. 0,35 mm/év mértékű, amely a korábbi, geodéziai eredetű becslési adatokhoz (Joó, 1992) képest nagyságrendileg alacsonyabb érték. A kiemelkedés mértéke a maximális kiemelkedési tengelytől északnyugatra és délkeletre, kb. 50 kilométer fél-szélességgel csökken, a Kis- és a Nagyalföld területén pedig süllyedés jellemző. A Középhegység területén jelentkező, szerkezeti vonalakhoz kapcsolódó, helyenként több száz méteres felszíni morfológiai elemek keletkezési oka ezért nem a szerkezetek neotektonikus aktivitásában, hanem a korábbi időszakban, a pannon extenzió idején mai helyzetükbe került blokkok differenciális eróziójában keresendő.
- (2) Az alföldek területén a süllyedés mértéke a fenti értéket negatív irányban kismértékben meghaladhatja, de azt fél nagyságrendnél nagyobb mértékben nem múlja felül. Az áttekintett GPS-mozgásvizsgálati adatsorok figyelembe vételével megállapítható, hogy a horizontális elmozdulások cm/év mértékűek. A Pannon-medencében a jelenleg zajló tektonikai kompresszió eredményeként térrövidülés történik, vagyis a horizontális

elmozdulás mértéke a délnyugati-nyugati és a keleti medenceperemen különböző (keleten lassabb).

- (3) Az (1) pontban leírt regionális kiemelkedési kép a hibahatárt meghaladóan nem kapcsolódik a felszíni topográfiában is tükröződő tektonikai elemekhez. A Középhegység nyilvánvaló tektonikai vonalai a medenceképződés folyamata óta nem szenvednek el akkora relatív függőleges elmozdulást, hogy azok a topográfiát megmagyarázzák. A Középhegység felszíni topográfiája tehát a korábbi tektonikai szerkezeti kialakulást követően a regionális kiemelkedés okozta fokozott erózió által okozott kipreparálódás eredménye. A regionális kiemelkedés – mivel annak tengelye a regionális főfeszültség DNy-ÉK-i irányával gyakorlatilag párhuzamos – nem, vagy nem kizárólagosan magyarázható a kivékonyodott litoszféra nyomás alatt történő felboltozódásával. A – sajnos még mindig nem tisztázott – okot a litoszféra reológiájában mutatkozó sávos különbségek, illetve az alsó litoszféra és az alatta áramló asztenoszféra közötti kölcsönhatások is jelenthetik.
- (4) Minthogy a kutatás időszakában már megjelent (Magyar et al., 2013) a Pannon-tó delta-feltöltődésének tér- és geokronológiai modellje, kutatást ebben az irányban nem folytattuk. Mindazonáltal a rendelkezésre álló irodalmi és ipari adatok integrációjával és annak feldolgozásával megadható, hogy a régió medencéinek – kompakcióval nem korrigált – üledék-térfogata 200.000 km^3 nagyságrendű. A projekt keretében elvégzett új balatoni szeizmikus mérések, illetve a korábban mért, de csak most feldolgozott vonalak mentén a Balaton területén, illetve a Kisalföld DK-i peremén 3D-szeizmikus adatok feldolgozásával sikerült a peremlejtő (deltafront) Magyar et al. (2013)-féle regionális modelljét lokálisan finomítani. A balatoni szeizmikus adatok jobb litológiai kontrollja érdekében Alsóörs előtt a tó medencéjében kutatófúrást is mélyítettünk.
- (5) Kiterjedt felszíni geofizikai mérések és geológiai-geomorfológiai mérések kombinációjával négy dunántúli mérési területen (Szombathely-Kőszeg; Nagyberek; Dorogi-medence; É-Gerecse) végeztünk morfortektonikai vizsgálatokat, a felszíni szerkezetek felszín alatti folytatásának feltárására. A gerecsei mérési területen, a Kőpíte-hegyen kutatófúrást is mélyítettünk. A morfológiailag érdekes területeken a geofizikai vizsgálatok az (1) és (3) pontban leírt következtetéseket nagyrészt alátámasztották. A medence Ny-i peremének közelében, a szombathelyi vizsgálati területen mindazonáltal sikerült olyan morfológiai elemet találni (Toronyi-perem), amelynek neotektonikus aktivitása is feltételezhető.
- (6) A Dunántúlra és az Északi-középhegység egy részére szisztematikus felszínfolyamat-modellezést (SPM) is végeztünk annak érdekében, hogy a völgyhálózat éghajlati kontrolljára vonatkozóan következtetésekre jussunk. A modellezés során kimutatható volt a Középhegység szél felőli (csapadékos) és szélárnyékos oldala között fennálló különbség a völgyhálózat paramétereiben. A völgyhálózat legfontosabb elemei közt számon tartott ős-Duna völgyek alakja viszont szintén az (1) pontban említett kiemelkedési képet támasztja alá: az ős-Duna vonalára gyakorlatilag merőleges kiemelkedési tengely mentén meginduló majd attól kétoldalt kiterjedő felboltozódás miatt egyenesek e völgyek.

II. Adatok, alkalmazott módszerek, részletes eredmények

A projekt végrehajtása során négyféle adatforrásra támaszkodhattunk:

1. Korábbi (nem a projekt során mért) mérési adatok: (a) *1993-2011 közötti balatoni szeizmikus adatok* (b) *2010-es dunai szeizmikus adatok*.
2. Közcéllú adatbázisokból vásárolt vagy megkapott adatok: (a) *MBH publikus szeizmikus adatvonalak*; (b) *MFGI fúrási adatok*.

3. Korábbi, illetve párhuzamos kutatásokból származó (hivatkozható irodalmi) eredmények és következtetések: (a) *Budai-hegységre vonatkozó kiemelkedési indikátorok; Kele (2009); Szanyi (2012)* (b) *Győr-Tatai-teraszrendszerre vonatkozó kiemelkedési adatok (Ruszkiczay et al., 2016)*
4. Saját (a projekt keretében mért) mérési adatok és azok feldolgozási eredményei. *Ezeket, terjedelmük és a projektben képviselt értékük miatt a következőkben külön pontokban soroljuk fel, ezzel e jelentés fő részét adva.*

Saját terepi mérések a projekt keretében:

2012. év

- balatoni egy- és többcsatornás szeizmikus mérés: Balaton nyugati medencéje;
- balatoni mágneses mérés, Balatonmárfürdő: eltemetett vulkáni test lehatárolása;
- nagyberekai szárazföldi mágneses és szeizmikus mérés: a Balaton alatti szerkezet szárazföldi részének kimutatása és lehatárolása;
- Alpokalja térségében sekélygeofizikai mérések (szeizmika, vertikális elektromos szondázás, multielektrodás elektromos szelvényezés, mágneses szelvényezések), kapcsolódó terepi geológiai-geomorfológiai megfigyelések

2013. év

- Dorogi-medencében sekélygeofizikai mérések (szeizmika, vertikális elektromos szondázás, multielektrodás elektromos szelvényezés, mágneses szelvényezések), kapcsolódó terepi geológiai-geomorfológiai megfigyelések, morfometriai mérések a piliscsési völgyhálózat elemein.

2014. év

- balatoni egycsatornás szeizmikus mérések: Alsóörs előterében a fúrési pont kijelölésére; Tihanyi-kút morfológiájának felmérése, mélységterkép készítése
- Kutatófúrás létesítése Alsóörs előtt a Balaton ajzatában
- A Gerecse északnyugati részén sekélygeofizikai mérések (szeizmika, vertikális elektromos szondázás, multielektrodás elektromos szelvényezés), kapcsolódó terepi geológiai-geomorfológiai megfigyelések

2015. év

- A Gerecse észak részén (Bikol-völgy) sekélygeofizikai mérések (szeizmika, vertikális elektromos szondázás, multielektrodás elektromos szelvényezés), kapcsolódó terepi geológiai-geomorfológiai megfigyelések.
- Kutatófúrás létesítése a Gerecsében, a Kőpíte-hegyen.

A projekt eredményei több, egymástól lényegesen elkülönülő geológiai időskálán jelentkeznek, amelyek eltérő módszerekkel és egymáshoz adott esetben csak lazán kapcsolódó módszertanú vizsgálatokhoz kapcsolódnak. E vizsgálatokban az a közös, hogy valamennyinek a célja az adott időskálán megbecsülhető függőleges elmozdulási ráta megismerését célozza, illetve van ilyen eredménye is, így adva hozzájárulást a hiányzó térfogatok (*source*) és a feltöltött medencékben található összes üledékanyag (*sink*) problémaköréhez. A Pannon-medence folyóinak vizsgálata a jelenlegi hordalékszállítás vizsgálatához jelent adalékot és igazolja néhány szerkezeti vonal neotektonikus aktivitását.

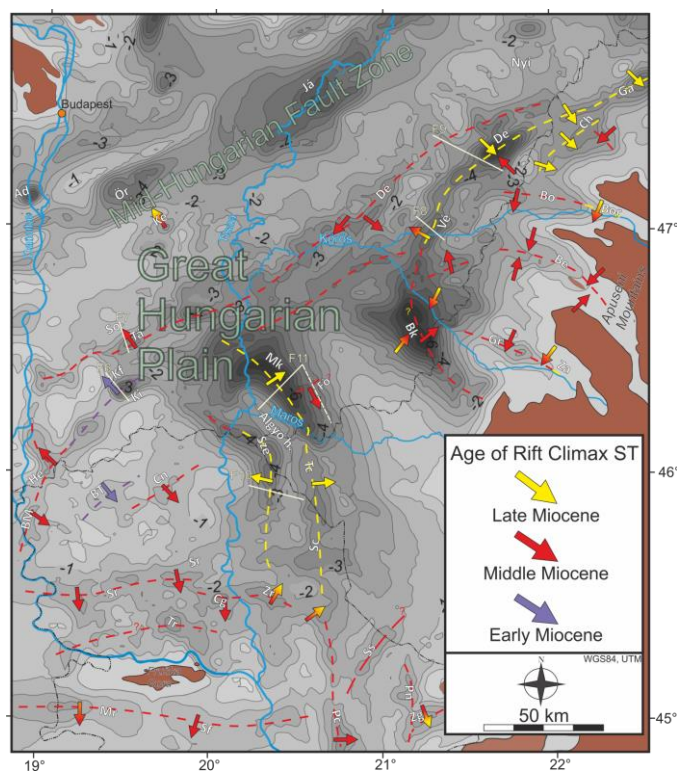
A következőkben részletesen ismertetjük az egyes mérések célkitűzésit, lefolytatását, az azokból származó eredményeket, és a kapcsolódó publikációinkat, az alábbi bontásban:

- Pannon időszaktól napjainkig tartó időskála: medenceléptékű geodinamikai modellezés, tektonikai jellegek és kapcsolódó térfogatok.
- Dunántúli középhegység Pannon kori lepusztulásának minimum-becslése
- A Dunántúli- és az Északi-középhegység numerikus morfológiai elemzése
- Balatoni vízi és kapcsolódó szárazföldi mérési kampányok, kutatófúrás
- A Gerecse északi peremén végzett sekélygeofizikai mérések, kutatófúrás
- A Nyugat-magyarországi peremvidék morfotektonikai vizsgálata
- A Pannon-medence folyóinak morfometriai elemzése

A részletes eredmények ismertetése

II.1 Pannon időszaktól napjainkig tartó időskála: medenceléptékű geodinamikai modellezés, tektonikai jellegek és kapcsolódó térfogatok.

Az üledékes medencék rétegtani felépítését mindenkoron a kitölthető tér és az üledékképződési ráta térbeli és időbeli viszonya határozza meg. E kapcsolat ív-mögötti medencék esetén különösképp változatos a nem egyenletes süllyedés és kiemelkedés események és az időnként izolált részmedencénként különböző üledékes folyamatok révén. Ennek következményeképp a medence fejlődés és feltöltődés történetének megértéséhez az üledékek forrásterülete, vagyis a medencét körülvevő orogének és a kitölthető teret biztosító medencén belüli folyamatok integrált vizsgálata szükséges. Hasonló tektonikai és szedimentológiai vizsgálatot végeztünk a Pannon-medence miocén – kvarter üledékes rétegsorán szeizmikus és fúrási adatok értelmezése által egy új modellt javasolva a Pannon-medence extenziójának folyamataihoz (1. ábra; Balázs et al., 2016).



1. ábra. Az Alföld központi részén az aljzat-topográfia kialakulásának, így az azt kialakító tektonikus erőhatásoknak a jellemző kora, szeizmikus szelvények és mélyfúrások értelmezése alapján, a neogén üledékek vastagság-térképén (Balázs et al., 2016).

Az általunk értelmezett 2D és 3D szeizmikus adatok, fúrási rétegsorok, továbbá karotázs-szelvények együttes értelmezése által a félárkok üledékeit progradáló és retrogradáló egységekbe soroltuk, elsősorban a félárkok egyes peremvetőinek aktivitását tükrözve. Ezeket ún. tektonikus rendszeregységekbe rendezve egy kvantitatív modellt alkottunk az aszimmetrikus félárkok fejlődését leírva, figyelembe véve a talpi blokk kiemelkedését és erózióját, illetve a levetett blokk süllyedéstörténetét. Ezt az általunk javasolt új modellt alkalmazva az Alföld számos részmedencéjén demonstráltuk az extenzió térbeli és időbeli migrációját a kora-, középső és késő miocén alatt, a Pannon-medence dinári peremétől az Erdélyi-középhegység felé, a legfiatalabb Pannóniai aktív félárkok (kb. 9 Ma) a medence kelet és délkeleti részein találhatóak. E migrációt elsősorban a Száva-szutúra és hozzá kapcsolódó kréta–paleogén szerkezeti elemek reaktivációja irányította.

Értelmezésünk szerint a Pannon-medence Tisza-Dácia egységének teljes megnyúlása nagyobb a korábban javasolt értékeknél (180 km), hozzávetőlegesen legalább 220-270 km lehetett figyelembe véve a dinári peremen található magkomplexumok és az Alföld aszimmetrikus extenziós szerkezeteit. Ezen érték pontosítása további kutatás feladatát kell, hogy képezze. Az extenzió egy rövid szünete tapasztalható a legkorábbi késő miocén idején, amely a medence középső részének kiemelkedéséhez és rövid inverziójához, ám a peremi területek (Kisalföld, Száva-medence, Morovic-medence, Erdélyi-medence, Kelet-Szlovák-medence) gyors süllyedését eredményezte. E nagy hullámhosszúságú differenciális vertikális mozgás és szerkezeti elemek dinamikus topográfia mechanizmussal magyarázhatóak. Szeizmikus vizsgálataink pontosították a Pannon-medence legkésőbbi miocén–kvarter inverziójához kapcsolódó differenciális vertikális mozgások kilométer-skálájú értékét, amely elsősorban az extenzió következményeképp reológiai gyenge litoszféra flexurális hatása által értelmezhető. Mindezen eredmények alapján a Pannon-medence egy ún. hiper-extendált ívmögötti medencének tekinthető.

II.2 A Dunántúli középhegység Pannon kori lepusztulásának minimum-becslése

A Pannon medence recens inverziója során az aljzatot tekintve egyébként is kiemelt helyzetű Dunántúli középhegység további emelkedésen és lepusztuláson ment keresztül. Munkánk során ezen lepusztulás mértékének becslését tűztük ki célul.

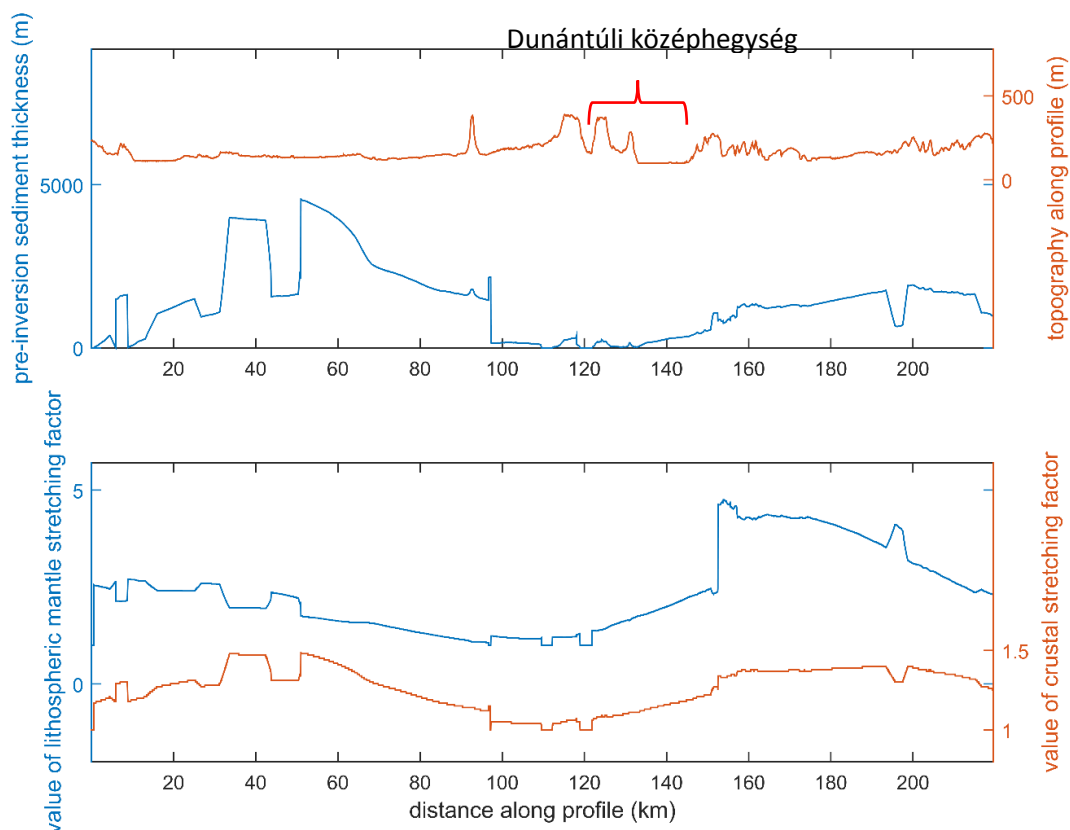
A hegység két oldalán fekvő medencék szin- és poszt-rift süllyedéstörténetéből, illetve a ma mért hőáram-adatokból „inverz” modellezéssel kéreg és köpeny-litoszféra megnyúlási együtthatókat becslünk (Jarvis és McKenzie, 1980). A null-hipotézisünk szerint ezen együtthatók a Dunántúli középhegységet keresztben átszelve valamilyen folyamatos trendet (pl. Gauss-görbe) követve változnak. A hegység két oldalán fekvő előtér medencékben (Kisalföld, Somogyi-medence) számolt megnyúlási együttható profilokra illesztett görbe segítségével az együtthatók interpolálhatóak a középhegység keresztmetszetében. Ezen interpolált együtthatókból a vizsgált szelvény mentén a tektonikai inverzió hatásától mentes elméleti üledékvastagság becsülhető. Ezen becsült üledékvastagságokat összehasonlítva a valóságban mérhető üledékvastagságokkal egy minimum becslést adhatunk a hiányzó üledék mennyiségére (White, 1994; Rowley és White, 1998).

A modellezéshez szükséges hőáram adatokat Lenkey et al. (2002) és Horváth et al. (2015) publikálta. A szin- és poszt-rift üledékréteg vastagsági adatokat szeizmikus szelvények és fúrási adatok értelmezéséből és korrelálásából kaptuk. A szeizmikus szelvények mellett egy víztest szelvényből kinyert adatokra is alkalmaztuk az eljárást (2. ábra).

A szeizmikus szelvények értelmezésénél és vizsgálatánál külön figyelmet kellett fordítani arra, hogy az inverzió kezdete időben és térben is változó (lásd pl. Uhrin et al. 2009). Az ebből adódó bizonytalanság kiküszöbölésére az üledékvastagság meghatározásakor a Pannon delta lejtő-tető horizontját vettük felső határként. Ez a horizont nem tekinthető egy egybefüggő izokron felületnek, ezért az ülepedési kor meghatározásánál Magyar et al. (2013) eredményeire támaszkodtunk.

A víztest-szelvényen (2. ábra) és az első szeizmikus szelvényeken elvégzett elemzések alapján a fentebb vázolt null-hipotézis nem állja meg a helyét. A kéreg-megnyúlási együtthatók a Dunántúli-középhegység két oldalán nagyjából egy nagyságrendben mozognak, azonban a köpeny-litoszféra megnyúlási együtthatói a Közép-Magyarországi zónát déli irányban átlépve jelentős ugrást mutatnak. Ezen ugrás oka elsősorban nem az üledékvastagság, hanem a felszíni hőáram jelentős változásában keresendő (lásd Horváth et al. 2015). Az eredmények arra utalnak, hogy a Közép-Magyarországi zóna két oldalán elhelyezkedő lemezdarabok az őket ért extenziós erőterre igen különböző módon reagáltak. Ezen jelenség magyarázata valószínűleg az Alcapa és a Tisza-Dácia lemezek egymástól független mozgásának kései megszűnésében keresendő (pl. Csontos et al., 1992; illetve Csontos és Vörös, 2004).

A – főleg a Dunántúli középhegység déli oldalán igazán hangsúlyos – kontrasztra a kéreg és a köpeny-litoszféra kivékonyodásában magyarázatot adhat Currie et al. (2008) hipotézise, melyben a Csendes-óceán körüli ív mögötti medencék vékony litoszféráját egy a szubdukció mögött keletkező köpenyáramlás segítségével reprodukálják.



2. ábra. A Dunántúli-középhegységet és előtereit a Balaton nyugati végénél keresztező víztest-szelvényen végzett teszt-modell előzetes eredményei. Felső grafikon: a baloldali függőleges tengelyen az inverzió előtti szin- illetve poszt-rift üledékvastagság. A jobboldali függőleges tengelyen a szelvény menti topográfia. Alsó grafikon: a baloldali függőleges tengelyen a modellezett köpenylitoszféra-megnyúlási együttható-profil. A jobboldali függőleges tengelyen a modellezett kéregmegnyúlási együttható-profil. A szelvény bal oldala az északnyugati, jobb oldala a délkeleti irányban áll.

II.3 A Dunántúli- és az Északi-középhegység numerikus morfológiai elemzése

A projekt keretében elvégzett 11 hónapos kutatás java része a Dunántúl felszínfejlődésének megértésére fókuszált abból a célból, hogy a felszínformák információtartalmából következtetni lehessen a geodinamikai folyamatokra. A Dunántúlon olyan felszínformák találhatóak, melyek egyedi alakjuk és nagy kiterjedésük (10 és 100 km-es nagyságrend) okán több mint száz éve a hazai geomorfológusok kitüntetett figyelmét élvezik. Egymásnak ellentmondó elméletek láttak napvilágot, tektonikai, folyóvízi és eolikus okokra vezetve vissza a sajátos felszínformákat.

Az alprojekt kutatási módszertana a numerikus modellezéssel történő számítógépes szimulációk készítése volt. A szimulációk elsősorban a felszínfejlődési elméletek kvalitatív tesztelésére nyújtanak lehetőséget azzal, hogy képesek a felszínfejlődés folyamatainak és a felszínformák jellemző alakjának reprodukálására. Maguknak az elméleteknek a megalkotása geomorfológiai és geodinamikai ismeretekre támaszkodik, és a modellezési munkafolyamat első lépését képezi.

Az kifejlesztett és alkalmazott felszínfejlődési modell a terRain nevet viseli, és szűken értelmezve nem modell, hanem egy C++ nyelven íródott modellező környezet, saját függvénykészlettel, amelyből a felhasználók saját modelljeiket állíthatják össze egyszerű programozás alkalmazásával. Az egyenleteket véges differencia módszerrel oldjuk meg. Elkészítettük a vízhalózat dinamikájának követésére és előrejelzésére alkalmas függvényeket, amelyekkel arra a kérdésre kerestük a választ, hogy milyen elvek szerint alakul ki a vízhalózat mintázat különböző geomorfológiai környezetekben, és hogyan lehet ennek geodinamikai viszonyokra vonatkozó információtartalmát értelmezni.

Az eróziós környezetet jellemzi, hogy a vízfolyás energiájának mekkora részét fordítja hordalék szállításra és mekkora részét bevágódásra. A kutatás alapját képező geomorfológiai gondolatmenet arra mutat rá, hogy kiemelkedési öv aszimmetrikus szélesedése a hegység két oldalán eltérő eróziós környezetet hoz létre, melyekben eltérő a vízfolyások hordalékszállításra és bevágódásra fordított energiaráfordításának az aránya. Analitikusan levezetendő, hogy ez a különbség eltérővé teszi a vízhalózat dinamikáját a két oldalon. Az ún. pro oldalakon a vízhalózat jellemzően kaptúrákkal rendeződik át, míg az ún. retro oldalakon a vízfolyások kaptúrák nélküli laterális elmozdulása jellemző. Szimulációkkal teszteltük, hogy a numerikus modellek adják-e a várt jellemzőket. A terRain folyásirányú lefolyást kezelő függvényei segítségével azonosítottuk iterációnként a vízhalózatot, majd figyeltük annak átrendeződését a szimuláció során. Mértük a vízfolyást alkotó pixelek összesített laterális elmozdulását, valamint a kaptúrák előfordulási gyakoriságát. A tendenciák megegyeztek az elméleti megfontolásokkal: mind a kaptúrák előfordulása, mind a laterális mozgás szignifikánsan függ az eróziós környezettől. Ilyen vizsgálatokkal az irodalomban nem találkoztunk..

Vizsgáltuk továbbá a vízhalózat rajzolatáért felelőssé tehető különbségeket. Itt is abból indultunk ki, hogy eltérő eróziós környezetekben eltérő eróziós egyenletek lesznek dominánsak és ebből a fejlődő vízhalózat növekedési irányaira lehet következtetni. Az elmélet tesztelésére ismét egyfajta újítást programoztunk a terRain-be: iterációnként előre jeleztük a vízfolyás növekedési irányát, míg a következő iterációban ellenőriztük, hogy milyen arányban teljesült az előrejelzés. Itt ismét igazolódott az elméleti tendencia, tehát eltérő preferenciák szerint nő a vízhalózat a különböző eróziós környezetekben, azonban érdekes módon a vízhalózat rajzolata nem lett vizuálisan különböző.

A numerikus futtatási eredmények szerint olyan geokronológiai modell javasolható, amely szerint egy sajátos tektonikai helyzet, a kiemelkedési öv szélesedése felelős a szokatlan és meglepő geomorfológiáért. A szélesedő kiemelkedési övet több helyen metsző ős-Duna

völgyek tökéletes egyenessége, valamint az ős-Duna völgyek között kiemelkedő területek szokatlan, párhuzamos vízhalózata és sajátos vízgyűjtő elrendeződése egyaránt magyarázható e modellel. A párhuzamos vízhalózat a kiemelkedési öv kifelé terjedő jellegére utal, vagyis a kezdetben a mainál egyenletesebb térszínen egy vonal mentén indult meg a kiemelkedés, amely az idő előrehaladtával fokozatosan kiszélesedő zónára terjedt ki. Az így kialakuló nyújtott vízgyűjtők kaptúra-érzékenysége pedig megerősödik az átfolyó vizek forrás felé eső szakaszán, ami a vízhalózatokban felfedezhető számos múltbeli kaptúra nyomát magyarázza. A párhuzamos vízhalózatok vízgyűjtőinek alakja is olyan elrendeződést mutat, amely a vízgyűjtők között versengésről, tehát fluviális erózióról, valamint a kiemelkedési öv tágulásáról tanúskodik, ami érdekes adalék az eolikus erózió vagy a tektonikus meghatározottságon alapuló korábbi modellekhez (pl. Fodor et al., 2005).

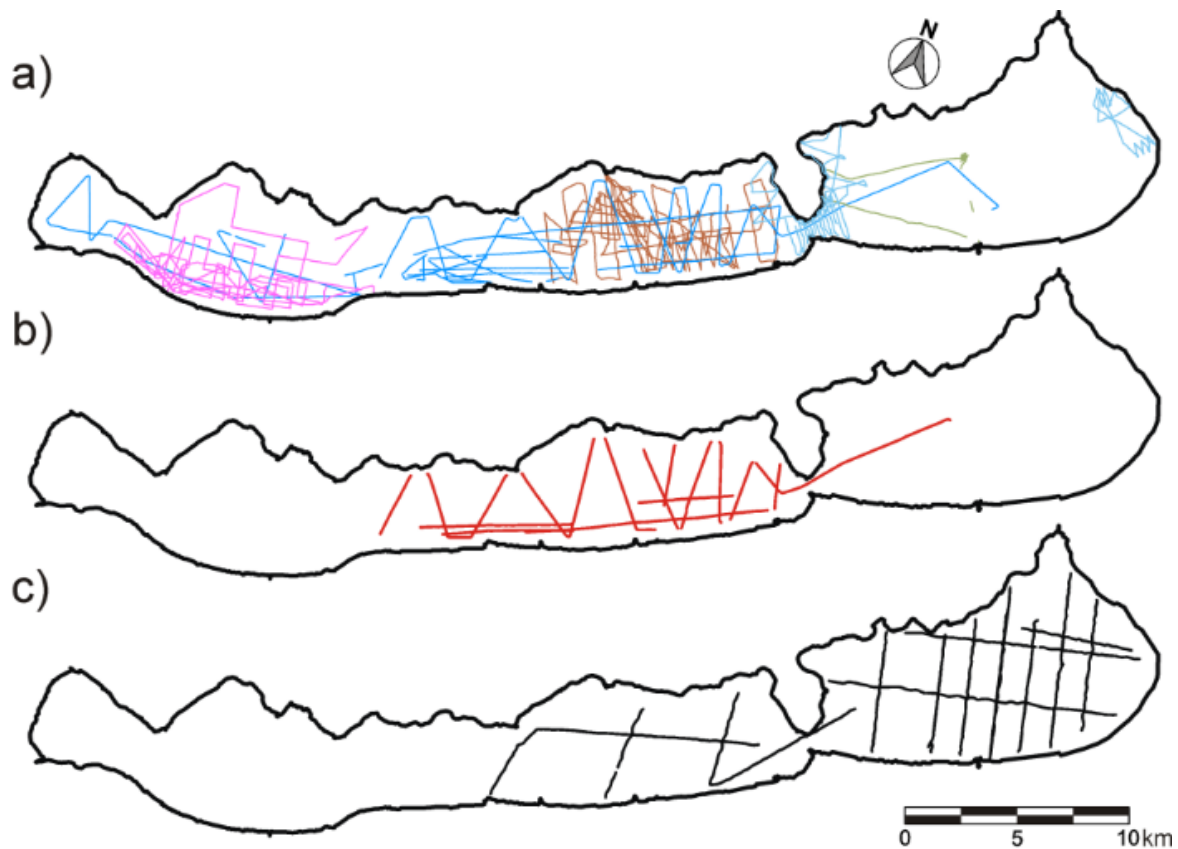
Az ős-Duna völgyek esetében is több morfológiai jellemző szolgáltat érveket az esetleges fluviális eredetre: a tektonikus kiemelkedési rátát tükröző szélesség, a mellékvízfolyások szisztematikusan változó befolyási szöge, valamint a teraszok jelenléte. E mellett az ős-Duna völgyek elvégződése olyan Ny-K irányú mintázatot mutat, amely arra utal, hogy a kiemelkedés Ny-on kényszerítette ki elsőként az ős-Duna meder K felé történő áthelyeződését. Az ős-Duna völgyek elvégződése ahhoz az időponthoz kötődik, amikor az ős-Duna elhagyta a medrét. Az elvégződés folytatásában olyan domborzat található, amely ezt az időpontot követően emelkedett ki. Ny-on végződnek az ős-Duna völgyek legtávolabb az erózióbázistól, K felé ez a távolság csökken, ami arra utal, hogy a K-i ős-Duna völgyek a legfiatalabbak. Tovább komplikálja a képet, hogy több eróziós fázis, és több elöntési szint azonosítható az ős-Duna völgyekben és környezetükben, ami az időként szárazra került területeken kialakuló vízhalózat részleges erodálódását, elmosódását okozza.

A jelen geomorfológiai gondolatmenet arra is jó példálul szolgál, hogy milyen szoros a kapcsolat a felszínformák és a tektonika által meghatározott eróziós folyamatok között, hogy mennyire felül tudják írni az eróziós folyamatok a kétségtelenül meglévő közettani, szerkezeti heterogenitást és hogy mennyire gazdag és olvasható a felszínformák információ tartalma.

II.4 Balatoni vízi és kapcsolódó szárazföldi mérési kampányok, kutatófúrás

II.4.1 A balatoni szeizmikus adatrendszer bővítése és egységesítése

Az OTKA futamideje alatt az elmúlt 2 évtized balatoni szeizmikus szelvényeinek (Tóth et al. 2010) rendszerezése, egységes adatbázisba integrálása és új mérési adatokkal való kiegészítése folyt. A különböző adatrendszerek referenciaszintjének összehangolása mellett megtörtént az 1993-as felmérés szelvényeinek újradigitalizálása (Visnovitz et al. 2013) és a Balaton nyugati tómedencék felmérése is (Balázs et al. 2013). Az új szelvényeket 3 nagyobb és 2 rövidebb mérési kampány keretein rögzítettük. Elsőként 2011 őszén a Szemesi-medence területén végeztünk áttekintő egycsatornás, ultra-nagy felbontású szelvényezést, majd 2012 áprilisában felmértük a Szigligeti-medencét. 2012 májusában a Brémai Egyetem ***Marine Technology – Environmental Research*** kutatócsoportjával együttműködésben egymással összehangolt, egy- és többcsatornás méréseket végeztünk a tó nyugati felében. Az ekkor rögzített nagyobb behatoló képességű többcsatornás mérések lehetővé tették a Szemesi-medence átfogó rétegtani és szerkezeti értelmezését is. 2013-2014 során két rövidebb egycsatornás felmérést történt. Az első felmérés célja (2013 őszén) az OTKA kutatás során mélyített balatoni mederfúrás előkészítése volt (Visnovitz et al. in prep), míg a második (2014) felmérés a Tihanyi-szoros térképezésére irányult. Az OTKA projekt ideje alatt elérhetővé vált új- és újra-feldolgozott, mintegy 1000 km hosszúságú szelvényháló nyomvonalát az *3. ábra* mutatja be.

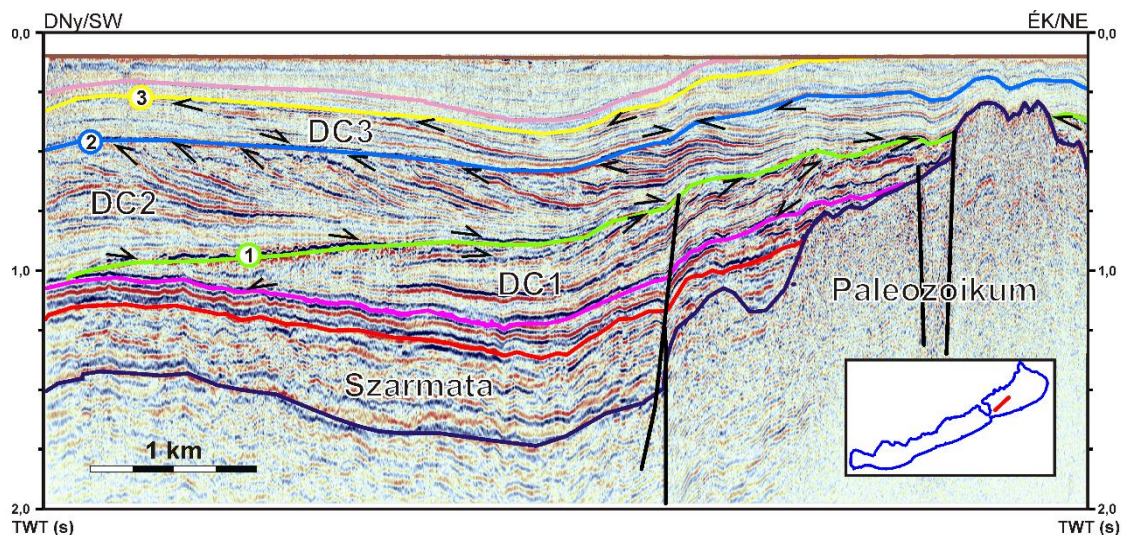


3. ábra. A Balaton területén végzett szeizmikus mérések az OTKA kutatás ideje alatt (2011-2016). (a) Új egycsatornás, ultranagy felbontású szelvények; (b) Új többcsatornás, nagy felbontású regionális szelvények; (c) Újra-feldolgozott és adatbázisba illesztett egycsatornás, nagy-felbontású regionális szelvények az 1993-as mérési kampányból.

II.4.2 Késő-miocén üledékképződési folyamatok a Dunántúli-középhegység déli előterében

Az új, egységített adatrendszeren elvégeztük a Balaton alatt települő késő-miocén (pannóniai – 7-9 Ma) rétegsor regionális térképezését. A tó alatt leképezett pannóniai rétegsor (4. ábra) sekélyvízi deltasorozatokként és deltasíksági üledékként értelmezhető (Sztanó et al. 2013). A pannóniai rétegsoron belül 3 nagyobb-, és több kisebb üledékciklust sikerült lehatárolni. A három nagyobb egységet (DC1, DC2, DC3) egymástól jól elkülöníthető deltaciklusokként értelmeztük. Ezen ciklusok fokozatos kiépülését a tó Siófoki- és Szemesi-részmedencéinek területén nagy-felbontású szeizmikus szelvények segítségével térképeztük (Visnovitz 2013, 2015). A szeizmikus vizsgálatok kimutatták, hogy a DC1 és DC2 ciklusok részben egyidősek, de eltérő irányokból építkeztek. A DC1 ciklus kiépülése É-ÉK felől, D-DNy-i irányban haladt előre, míg a DC2 ciklus kiépülése kezdetben K-DK felé, később K-ÉK irányba tartott (Visnovitz 2015, Visnovitz et al. 2015c). Az előbbi két rendszer fedőjében települő, fiatalabb és vékonyabb DC3 ciklus tendenciájukban a DC2 rendszerben megfigyelt feltöltési jellegeket mutatja. A delták előreépülése ebben az időszakban hosszan elnyúló üledéknyelvek formájában és a DC2 ciklus késői szakaszához hasonlóan, alapvetően keleties irányban folytatódott tovább.

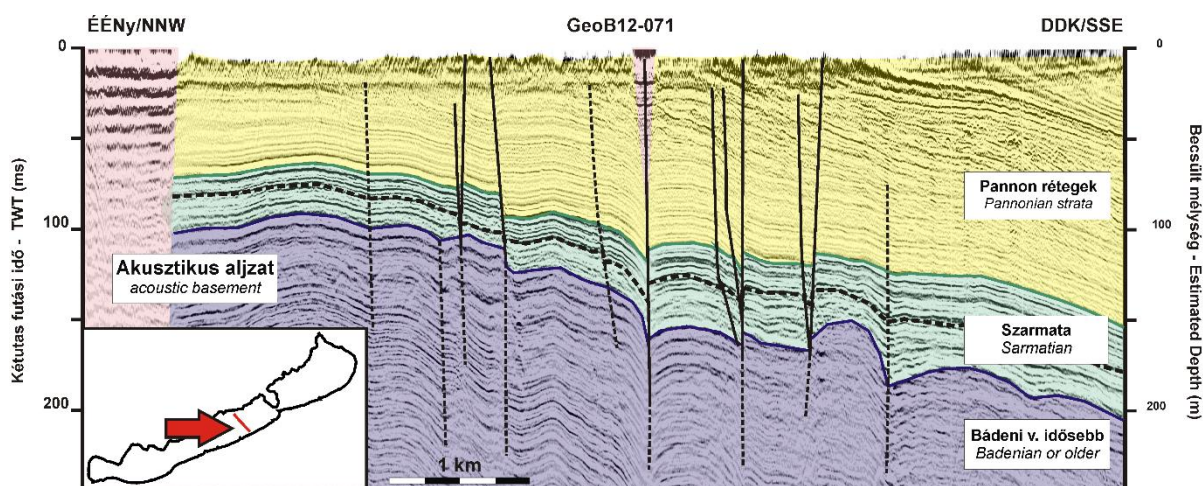
A deltaciklusok térképezése alapján a következő ösföldrajzi képet lehetett rekonstruálni: A Dunántúli-középhegység déli előtere kb. 9-10 millió éve fokozatosan víz alá került (Csillag et al. 2010) és a térségben egységes, sekély vízborítottságú (< 100 m-es) „morfológiai self” alakult ki. Az aljzat topográfiai viszonyaiból adóan az elöntést követő vízmélység nyugaton valamivel nagyobb (40-70 m), keleten ennél sekélyebb (10-30 m) lehetett. A Kisalföld felől érkező deltarendszer kb. 9-8 millió éve átlépték a Dunántúli-középhegység vonalát és megkezdődött a magaslat déli előterének feltöltődése. Ez a folyamat nem egyetlen összefüggő deltafront formájában valósult meg, hanem olyan oldalirányba (K-ÉK, illetve Ny-DNy felé) kiterjedő deltarendszerek révén, melyek a középhegységi magaslat vonalán az alacsonyabb topográfiai helyzetű szorosok mentén jutottak át. A feltöltés során bekövetkező ismétlődő relatív vízszintemelkedések hatására a Ny-DNy felé építkező „keleti” feltöltődésrendszer utánpótlása idővel megszakadt, és innentől kezdve a K-ÉK felé építkező delták domináltak a térségben. Az egységes deltasíkság kialakulását követően az üledékbehordás a mélyebb medencék (pl.: Mezőcsokonyai-árok) irányába, dél felé folytatódhattott tovább (Törő et al. 2012). A Dunántúli-középhegység déli előtere ebben az időszakban még többször víz alá kerülhetett. A kisebb elöntési események jelenlétét a balatoni vízi szeizmikán a korábbiaknál vékonyabb üledékciklusok jelzik, melyek során továbbra is a keleties feltöltés volt az uralkodó.



4. ábra. A Balaton alatt kimutatható 3 nagyobb progradáló üledékciklus (DC1, DC2, DC3) és az azokat határoló felszínek (1,2,3) a 2012-ben rögzített többsatornás szeizmikus felvételen.

II.4.3 Tektonikai megfigyelések a Balaton Szemesi-medencéjében

A Balaton nyugati felének szeizmikus felmérése új lehetőségeket teremtett a tó alatti szerkezeti zóna és a térség fiatal kéregmozgási eseményeinek vizsgálatához is. A szelvényezések nyomán a Szemesi-medence alatt egy 3-4 km szélesebb, vetőkkel erősen tagolt törésszónát lehetett kimutatni, amely összhangban Bada et al (2010) értelmezésével a tó alatti balos nyírás zóna folytatásának tekinthető (Visnovitz et al. 2015a). A részmedence alatti üledékeket jellemzően ÉK-DNy-i csapású vetők harántolják, melyeket néhány decimétertől 10-15 méterig terjedő vertikális elmozdulások jellemeznek. Előbbi vetők olyan szerkezetekként értelmezhetők, melyek az elsődleges elmozdulási zóna balos ellépésén jöttek létre és ezáltal az elsődleges törési zónák között átkötő funkcióval bírnak.



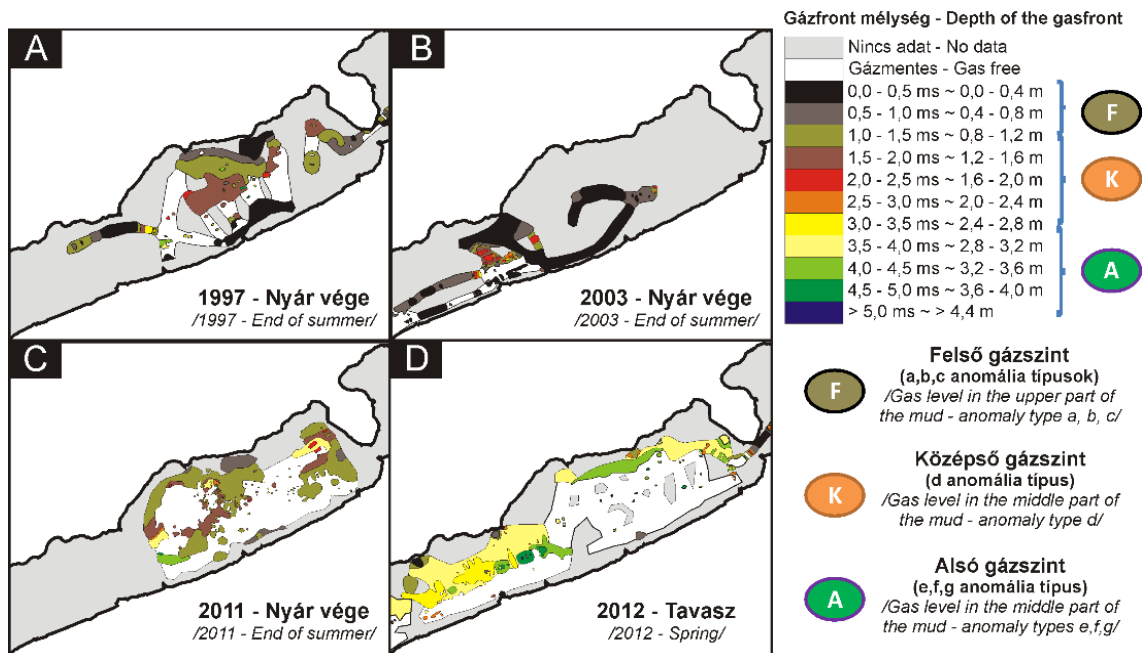
5. ábra. A Szemesi-medence aljzatának szerkezeti tagoltsága egy 2012-ben rögzített többcsatornás vízi szeizmikus szelvény alapján. A rózsaszín zónákban a tavi iszapban jelenlévő gázbuborékok árnyékoló hatása érvényesül (Visnovitz et al. 2015a).

Az új mérések másik kiemelkedő eredménye, hogy a Szemesi-medencében sikerült leképezni a pannóniai rétegek fekvését és a fekvő dőlési viszonyait. A Szemesi-medence alatta a pannóniai talpa alapvetően délies irányú dőlést mutat, amely a Dunántúli-középhegység fokozatos kiemelkedésével hozható összefüggésbe. A lefejezett pannóniai horizontok alapján az elmúlt közel 6-8 millió évben egy közel 30-50 méteres differenciális emelkedéssel lehet számolni a tó É-i és D-i partja között. Még ha feltételeznénk is, hogy e differenciális emelkedés a jelzett időszak egy kisebb részére koncentráltan jelentkezett volna, az is gyakorlatilag kizárja a Joó (1992)-féle kiemelkedési képnek a Középhegységre jellemző nagyságrendi értékeit.

II.4.4 A Balaton iszapjának sekélygázrendszere vízi szeizmikus vizsgálatok alapján

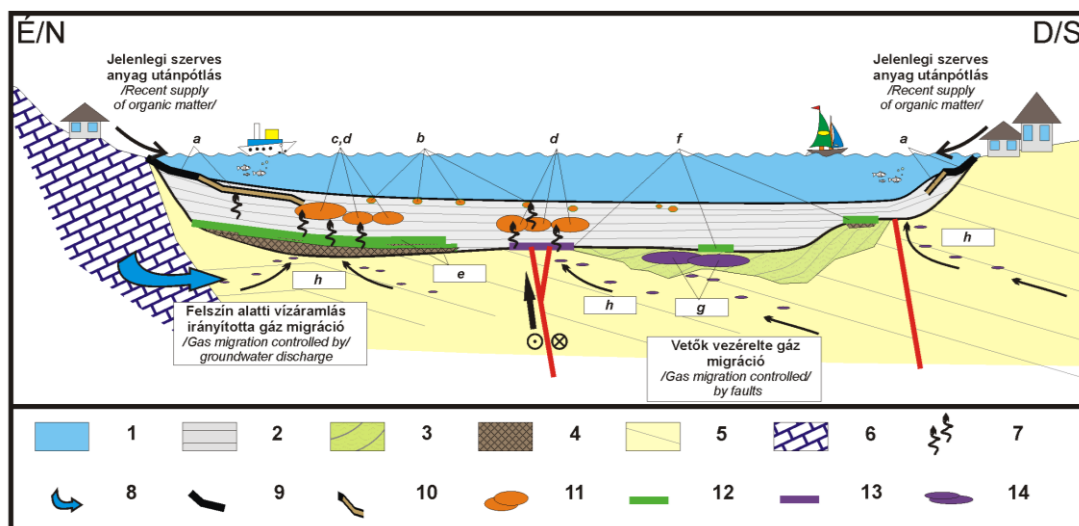
Az egységes balatoni adatbázis lehetőséget biztosított a Balaton iszapjában előforduló szabad gázbuborékok okozta szeizmikus anomáliák vizsgálatára és a gáz okozta anomáliák szisztematikus csoportosítására is (Visnovitz et al. 2015b). A mintegy 1500 km, ultranagy felbontású szelvényháló alapján három különböző gázzintet lehetett elkülöníteni. A felső két gázzint 1999 és 2014 között időben változó mélységet és térbeli kiterjedést mutatott, míg a legalsó gázzint esetében az anomáliák mélysége és kiterjedése stabil volt. A gáz szaturált zóna időbeli változását részletesen a Szemesi-medence területén vizsgáltuk. A 6. ábrán a leképezés szempontjából meghatározó első gázzint mélységtérképe látható, fehér sávokkal az adott időszakban gázmentes területeket jelöltük. A megfigyelések alapján a nyári végi, őszi időszakban a gázos zóna kiterjedése nagyobb, az első azonosítható gázzint mélysége pedig kisebb volt, mint a tavasszal vagy nyár elején.

A gázrendszer időbeli vizsgálata mellett kísérletet tettünk az egyes gázzintek lehetséges forrásainak meghatározására is. Sajnos gázmintavételre az érintett rétegekből egyelőre nem volt lehetőségünk, így a lehetséges forrásokra irodalmi adatok alapján, illetve a gázzintek rétegtani pozíciója alapján tudtunk csak következtetni. A kutatások alapján a felső két szint meghatározó vegyülete biogén metán, melynek elsődleges forrása a tavi iszap szervesanyag tartalma lehet. Az iszap talpához közeli, legalsó gázzint esetében a gázok jelenlétét az iszap alsó részében található tözegszintekkel, illetve mélységi feláramlásokkal lehetett összefüggésbe hozni (Visnovitz et al. 2015b). A gáz feláramlása láthatóan több helyen vetők mentén valósul meg (lásd pl.: 5. ábra közepe).



6. ábra. A Szemesi-medence üledékeinek szabad gáztartalmában bekövetkezett időbeli változások 1997 és 2012 között (Visnovitz et al. 2015b).

A szeizmikus vizsgálatok alapján elkészítettük a balatoni gázrendszer egy teoretikus modelljét, mely a 7. ábrán látható. Az É-D irányú, hipotetikus keresztmetszvény mentén követhetővé válnak a gázbuborékok keltette szeizmikus anomália típusok – így az egyes gázos zónák – jellemző előfordulásait, legvalószínűbb forrásait és a gázrendszer egyes elemei közötti lehetséges kapcsolatokat.



7. ábra. A Balaton alatti gázrendszert bemutató hipotetikus keresztmetszvény (Visnovitz et al. 2015b). Jelmagyarázat: 1= víz; 2= tavi iszap; 3= pleisztocén folyóvízi összlet; 4= pleisztocén tőzeg; 5= pannon rétegek; 6= mezozoós karbonátos aljzat; 7= kigázosodási és migrációs utak; 8= a mezozoós karbonátos víztartók megcsapolódása a tó felé; 9= partközeli kiterjedt gázfrontok a mederfenék közvetlen közelében; 10= időben változó partközeli gázfrontok az iszap felső 1 méterében; 11= szezonálisan változó szabadgáz-zónák az iszap felső és középső részében; 12= tőzeg jelenlétéhez köthető mély gázfrontok; 13= mélységi feláramláshoz köthető gázfrontok; 14= gázfelhalmozódások a pleisztocén folyóvízi üledékekben; a-h: a szeizmikus szelvényeken jellemző különböző anomália típusok.

II.5 A Gerecse északi peremén és a Pilisben végzett sekélygeofizikai mérések, kutatófúrás

A Dunántúli-Középhegység negyedidőszaki mozgásaihoz kapcsolódó kiemelkedési ráták meghatározásának alapját jórészt a Duna egyes teraszszintjeinek, barlangi lemezes kalcit kiválásának és édesvízvízi mészkövek keletkezési korának adatai képezik. A Gerecse-hegység É-i részén több mint 50 édesvízvízi mészkő feltárás ismert. Az elő-fordulások egy ÉK - DNy irányú vonal mentén sorakoznak (Scheuer és Schweitzer, 1988c) Legnagyobb előfordulásai Mogyorósbánya, Kő-hegy, Süttő, Haraszthegy, Dunaszentmiklós, Uj-hegy-Öreg-hegy térségében találhatók (Kele 2009).

A különböző édesvízvízi mészkő feltárások pontosítását valamint újabb mészkő testek lokalizálásával valamint terasz kavicsok kutatásával ezáltal a középhegységi terület negyedidőszaki kiemelkedésének pontosítását tűztük ki. A méréseket az ELTE geofizikus képzése keretében elvégzett 2013, 2014 és 2015. évi terepgyakorlatokon kiviteleztek. Ezek során az észak-gerecsei területen 170 pontban VLF, több mint 100 VESz valamint 4,5 km hosszban multielektrodás szelvények készültek, ezt kiegészítette a Dorogi-medencében és annak délkeleti peremén, Piliscsév térségében elvégzett mintegy 20 VESz-pontmérés, 3 km multielektrodás szelvényezés és völgyprofil-mérések.

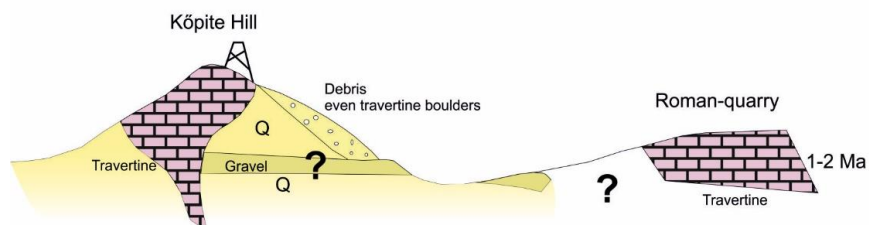
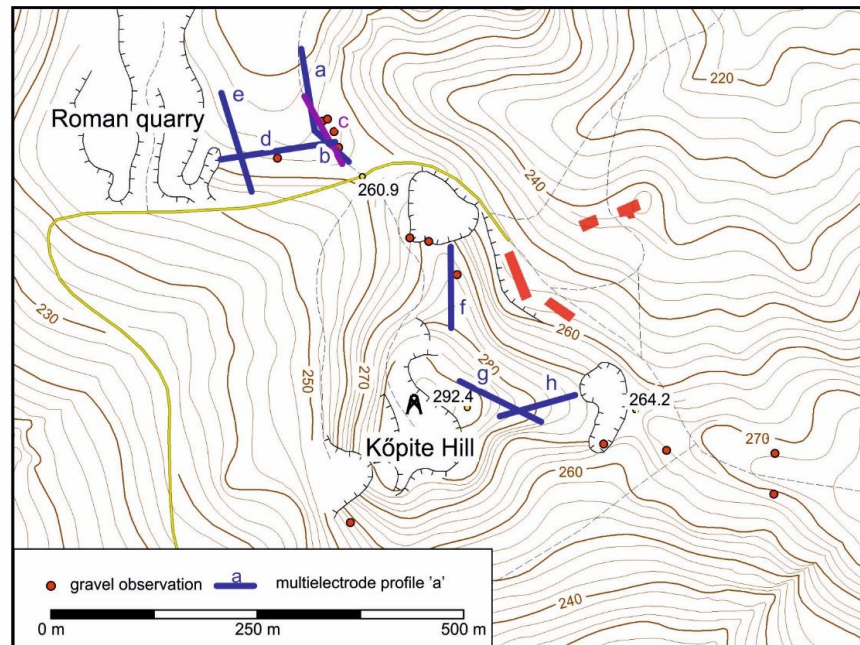
A geoelektromos méréseknek köszönhetően lehetővé vált a már ismert mészkőtestek lehatárolása, eltemetett újabb testek felkutatása és helyenként az egyes terasz kavicsok korrelálása. A Scheuer (2002) által a felső-pliocénbe helyezett jelentős karsztforrás működés következtében olyan nagyméretű édesvízvízi mészkő előfordulások keletkeztek, mint a Dunaszentmiklós határában található Les-hegy, Csúcsos-hegy, Kőpíte-hegy. Emiatt különös figyelmet fordítottunk az édesvízvízi mészkőtestek helyzetének megállapítására, mert ezek részben ismert kára és a kutatás során elvégzett mérésekből pontosított – ill. részben újként felfedezett – magassági helyzete mind a függőleges felszínmozgások indikátora.

A Gerecse-központi részén körülbelül 170 m magasságban található Betlehemi-kőfejtő 3-5 méteres vastagságban tár fel édesvízvízi mészkövet, Scheuer (1997) munkája során feltételezi, hogy a blokk nem szálban álló, önálló előfordulás, hanem a Csúcsos-hegyről lecsúszott darabnak valószínűsíti. Későbbi terepbejárások alapján azonban nem lehetett kizárni ennek autochton eredetét sem, ezt erősítik meg Kele (2009) terepi és szedimentológiai vizsgálatai. A 2014-ben a süttői bányákban, a Bikol-patak nyugati oldalán található Asszony-tetőn végzett VLF mérések alapján, továbbá a dunaalmási kőfejtőkhöz tartozó Római-bányában, a Kőpíte hegyen és a Betlehemi-kőfejtőben mért eredmények kimutatják, hogy az utóbbi területen csupán kis vastagságú valószínűsíthetően lecsúszott blokkról beszélhetünk, ellentétben a többi akár több10 vagy közel 100 métert is elérő területekkel.

Célul tűztük ki további ismert édesvízvízi mészkő előfordulások pontosabb lehatárolását is. Az 2015-ös mérésorozat során a süttői bányákban az egyes bányaudvarok közötti kapcsolat felderítésére végeztünk multielektrodás méréseket. A kutatás során 8 szelvény készült, amelyek alapján megállapítható, hogy a Diósvölgyi- és a Haraszti-, valamint a Gazda- és az Óharaszti-bánya mészkövei között kapcsolat van. A bánya udvarok falán található repedések tektonikus eredetűre nem sikerült bizonyítékot szerezni.

A Bikol-patak nyugati oldalán található Asszony-tetőn többféle elektromos sekélygeofizikai méréssel egy eddig nem ismert, kb. 2-300 méter É-D valamint 50-70 méter Ny-K irányú 10-30 méter vastagságú édesvízvízmészkő-testet mutatunk ki, mely 2-5 méter negyedidőszaki üledékkal van fedve. A Dunaszentmiklóstól ÉK-re található Iván-halálavölgyben található pannon konglomerátumos összlet lehatárolását célzó geoelektromos

mérések során a völgy K-i oldalán, a Cserhát tetején egy 40-50 méter vastag kb. kilométeres kiterjedésű édesvízimésző-tömböt sikerült felfedezni (Zalai et al., 2015). A Dunaszentmiklós környéki munkák során VESz mérések eredményeiből készített szelvényeken negyedidőszaki tektonikát valószínűsítettünk, majd terepi bejárásom a Nagy-Somló ÉNy-i peremén több töréses szerkezetet azonosítottunk. Ezeken megfigyelhető, hogy a negyedidőszaki üledékek a vetőhöz közeledve kivastagodnak, melyek alapján szin-szediment tektonikára következtethetünk (Zalai, 2015).



8. ábra. Példa az Észak-Gerecse területén végzett sekélygeofizikai mérésekre. A Dunaszentmiklóstól délre található Római-bánya (Roman-quarry) és a Kőpíte-hegy édesvízi mészkő (travertine) blokkjainak kapcsolatát kutató mérések elrendezése. A kavics-kibukkanások (gravel observation) a Duna feltételezett egykori szintjét jelzik (Kiss et al., 2015).

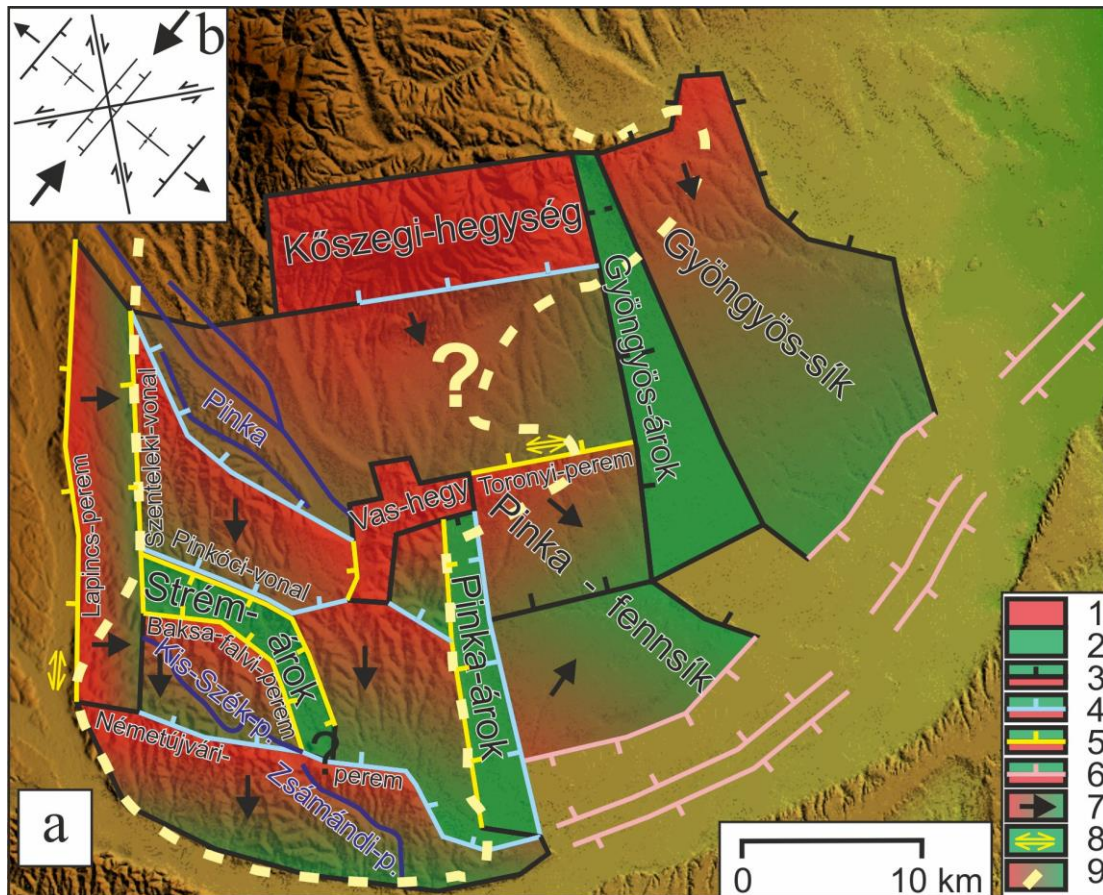
A jelen kutatás keretein belül a Dunaszentmiklós melletti Kőpíte-hegyen 21 méter mély mintavétellel újabb fúrást végeztünk el a kavicsos réteg megmintázására és korolására (ez utóbbi vizsgálatok a jelentés elkészítésekor még tartanak). Amennyiben bebizonyosodna, hogy a Duna egy terasz szintjét sikerült azonosítani abban az esetben a Gerecse területéről származó legnagyobb tengerszintfeletti magasságból származó terasz szintet lehetne korolnunk. Ha a környékről készült édesvízi mészkövek vizsgálatából származó koradatokat nézzük, úgy feltételezhetjük a kavics pliocén-alsó-pleisztocén korát. Összevetve a terasz tengerszintfeletti magasságával 0,3 mm/év kiemelkedési rátát kaphatunk (Kiss et al. 2015), amely nem alátámasztja Scheuer (2002) megállapítását, amely a Gerecse maximális pleisztocén aktivitását e területre helyezi, hanem fontos adalékot szolgáltat a bevezető összefoglalóban már említett kiemelkedési kép utolsó kétmillió évre becsülhető számértékére is e területen, vagyis a Középhegység kiemelkedési tengelyének közvetlen közelében.

A Dorogi-medencében végzett méréseink közül kiemelendő a medence délkeleti peremén, Piliscsév térségében elvégzett sekélygeofizikai mérés-sorozat. Ennek keretében a Pilisből lefutó patak völgyek esését és a hegyperemen szétterült kis hordalékkúpot vizsgáltuk, amely eltemetett egy geofizikailag jól megtalálható és viszonylag pontosan korolható római kövesutat. A kb. két négyzetkilométer vízgyűjtőterülettel rendelkező pataknak a római út megépülése óta becsülhető 2000 évben kb. 20.000 köbméter térfogatú hordalékkúpja képződött (Szabó, 2014).

II.6. A Nyugat-magyarországi peremvidék morfológiái vizsgálata

A Nyugat-magyarországi peremvidék felszínének és aljzatának kutatása igen fontos az üledékforrások és medencék közti anyagforgalom szempontjából. A terület a forrásokhoz viszonylag közel fekszik, miközben maga részben medence, részben pedig a Pannon-medence keletebbre eső mélyebb medencéi felé irányuló anyagforgalom egyik fontos színtere. A korábbi vizsgálatok alapján az aljzati és a felszíni morfológia számos egyezést mutat. Ezt a kutatási terület egy részére részére már Bendefy (1971) is kimutatta. A Dél-Burgenlandi-küszöb magasabb aljzata felett jobban kiemelt térszín található, ami helyzete alapján és erőteljes felszabdaltságának köszönhetően a geomorfometriai eszközökkel jól elkülöníthető a környezetétől. Részben a küszöbhez tartoznak a Kőszegi-hegység és a Vas-hegy K-i, eltemetett folytatásai, amik fölött környezetükhöz képest magasabb helyzetű földfelszín mutatható ki. Ezeket a különbséget elsőként egyértelműen kimutattuk (Kovács és Telbisz, 2013; Bereczki, 2013). A DK-i, síksági területen a morfológiában nehezen észrevehető, de a kitértség-térképen megjelenő, valamint a szakaszjelleg-változások vizsgálatával kimutatható vonulatok szeizmikus szelvények alapján értelmezett mélyszerkezeti háta fölött helyezkednek el. A Bendefy (1971) által kimutatott, gravitációs mérésekből származtatott aljzatmorfológia és a vízhálózat irányítottságának összefüggéseit tektonikus geomorfológiai módszerekkel 7 patak és a földfelszín kitértségének vizsgálatával sikerült kimutatni.

Nemcsak az aljzati magaslatok, hanem azok elvégződései, folyamatos mélybe bukása is megfigyelhető a pannon összletben és a felszínen is. Ezek mélyülésével megegyező irányú, de a földfelszín felé haladva egyre kisebb lejtőszögű dőlés figyelhető meg, ami a felszínen kibillent síkként jelenik meg. A földfelszín dőlését sávselvény-elemzés, a pannon rétegek morfológiáját szeizmikus szelvények és fúrási adatok, míg az aljzati különbségeket gravitációs, mágneses és szeizmikus mérési eredményekkel, valamint különböző aljzattérképek vizsgálatával mutattuk ki. Az aljzat morfológiáját követik a rá települő üledékek, ami csak kismértékű töréses deformációk esetén történhet meg. Ezt alátámasztják a megvizsgált fúrások leírásaiban nagy számban és sűrűségben előforduló csúszópályák csuszamlási felületek és litoklázisok. Ezen kívül a szeizmikus szelvényeken megfigyelt 0,5-1 reflexiót érintő, de hosszan nyomon követhető törések is erre utalnak. Azok kis felbontása miatt legtöbb esetben nem láthatók elvetések, látszólag a megfigyelt jelenségek esetén a pannon rétegek plasztikus deformációt szenvedtek el. Ez magyarázhatja a pannon horizontok reflexióinak látszólagos folytonosságát és változatos morfológiáját. A kis ugrómagasságú vetődések nem szakítják meg a vastagabb rétegeket, viszont a kiterjedtebb területen előforduló nagy számú, ám kis ugrások azok látszólagos görbülését okozzák.



9. ábra. (a) A nyugat-magyarországi vizsgálati terület felszínének egyszerűsített terepmodellje a peremeket kialakító tényezők feltüntetésével. 1 – a kibillent blokk magasabb része; 2 – a kibillent blokk alacsonyabb része; 3 – nem vizsgált meredek perem; 4 – erő eróziós perem; 5 – vetődéssel létrejött perem normál komponenssel; 6 – a kis mértékű deformáció által preformált fluvialis eróziós perem; 7 – a blokk általános dőlése; 8 – megfigyelt virágszerkezet, vagy oldaleltolódásra utaló jel; 9 – a Dél-Burgenlandi-küszöb relatív kiemelkedésének határa; (b) A Bada et al. (2007) által a területre kimutatott fő feszültségirányok (Kovács, 2013).

Az eredmények alapján a Dél-Burgenlandi-küszöb a Pannon-tó visszahúzódása közben és azóta a környezetéhez képest emelkedett, ami részben a határoló normálvetői (Alsó-Pinka-perem és a Szenteleki-vonal) mentén történhetett. Ezen vonalak aktivitásának idejét a hivatkozott szerzők munkáiban láthatjuk, ezenkívül a lignitrétegeket vizsgálva a rétegek Ny-i irányú emelkedését figyeltük meg, ami azok lerakódása utáni, tehát késő pannóniai vagy fiatalabb deformációra utal. A vízszintesen lerakódott rétegeket horizontális irányban változó vastagságú egyéb üledék választja el egymástól, ami az összlet szedimentációja során aktív deformációra utal. A Vas-hegytől K-re, az aljzatban és a pannonban felismert antiforomtól É-ra a rétegekben jól kivehető struktúrájú törésrendszer figyelhető meg. Ettől É-ra a rétegek újra É felé, az Kőszegi-hegység magkomplexuma irányába emelkednek. Ez alapján valószínűsítem, hogy a Vas-hegy K-i folytatása a késő pannóniaiban és egy ideig utána is emelkedett környezetéhez képest (Kovács et al., 2014; 2015a; 2015b).

A Dél-Burgenlandi-küszöb nem egységesen emelkedik: a Strém-völgy középső, íves szakasza egy aljzati árok fölött helyezkedik el, ezért következtethetünk annak az aljzattal összefüggő, részben tektonikus eredetére. Ezenkívül a Toronyi-perem normálvetős eredetét is bizonyítottam. A Rátóti-perem mentén a mellékvízgyűjtők egyensúlyi állapottól való eltérése Ny felé növekszik, ami feltételezhetően szintén a nem egységes emelkedés eredménye. (Kovács, 2015a, 2015b).

A vizsgálatok alapján megerősítést nyert, hogy a pannon rétegek felboltozódása és a kimutatott felszíni jelenségek sokszor a magasabb helyzetű aljzat fölött jelentkeznek (Bereczki et al., 2013). A földfelszín, a pannon ösztlet és az aljzat geometriája összefügghet a szilárd kéreg különböző hullámhosszú gyűrődéseivel (Dombrádi, 2012), az aljzati siklatófelületek és feltolódások aktivitásával, valamint atektonikus kompakció hatásával is. Több szelvény menti vizsgálat és különböző helyszíneken végzett megfigyelések arra utalnak, hogy ezek mindegyike, helyszínenként más-más dominanciával alakítja a területet. Összegezve a fentieket kijelenthető, hogy a mélyben levő szerkezeti elemek a rájuk települő plasztikus ösztletet úgy deformálják, hogy markáns vetővonal léte nélkül folyamatosnak tűnő réteggörbülést okoznak. A jelenségnek látványos felszíni megnyilvánulása a Toronyi-perem vizsgálatánál leírt feltárás, ahol méteres horizontális távolságonként, kis ugrómagasságú normálvetőket figyeltünk meg (Kovács et al., 2014; 2015b).

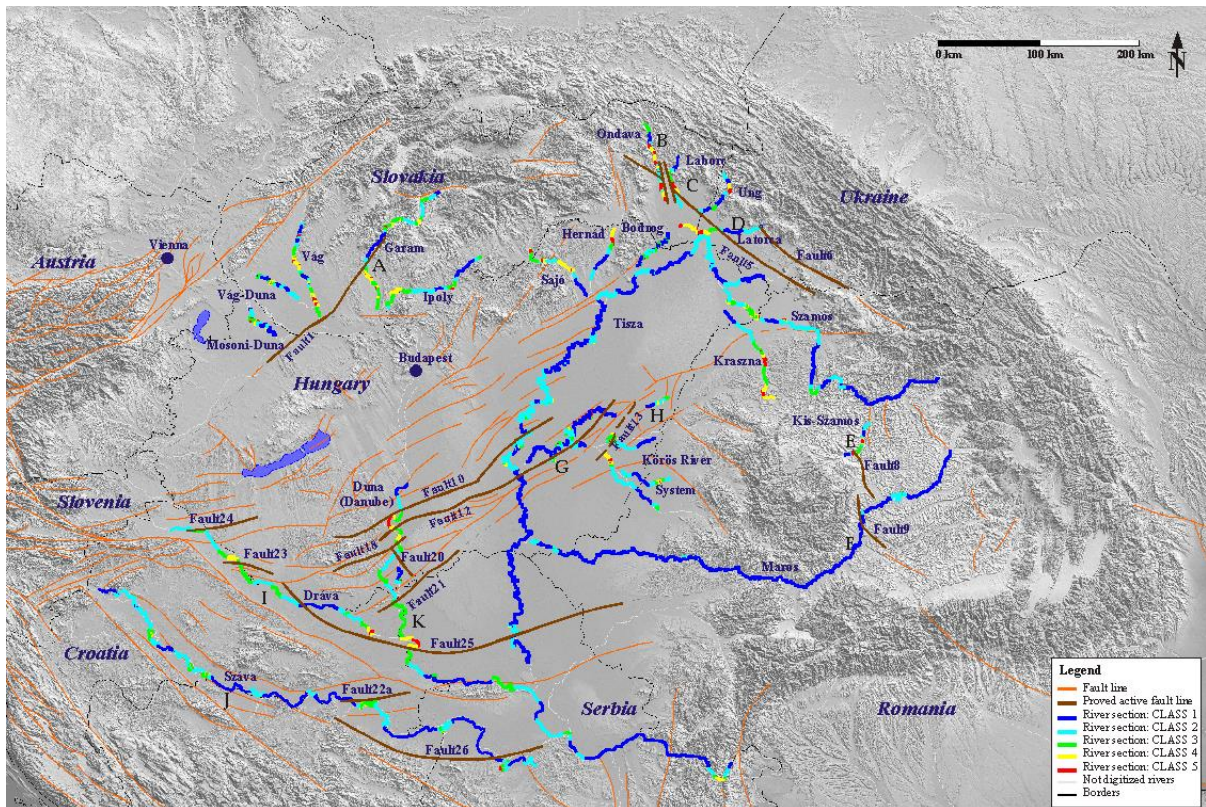
Az eredmények közt felvázolt elméletek közül, a kompakció kivételével minden esetben a tektonikával összefüggő, de részben nem közvetlenül a tektonikus hatások által okozott jelenségekről van szó. A Pannon-tó feltöltődése által meghatározott kezdeti folyásirány a negyedidőszakban a terület egységeinek általános déli, valamint a Strém-melléki-dombság keleti billenése folytán módosult, majd néhány kimutatott szerkezeti vonal aktivitása (Szenteleki-vonal, Pinkóci-vonal, Alsó-Pinka-perem) és vízhálózat-lefejeződések következtében alakult ki a mai vízhálózat.

II.7 A Pannon-medence meanderező folyóinak morfolometriai elemzése

Korábbi vizsgálataink (Timár, 2003; Zámolyi et al., 2010) eredményein alapulva, elvégeztük a Pannon-medence meanderező vízfolyásainak részletes és rendszeres morfolometriai analízisét. Ennek keretében egyrészt bizonyítani kívántuk, hogy a szeizmikus szelvényekről ismert, neotektonikusan feltehetően aktív szerkezeti vonalak melyike befolyásolja e folyók fő morfolometriai paramétereit, a kanyarfejlettségi indexet és annak statisztikai derivátumait (igazolva, hogy e szerkezeti vonalak ma is aktívak). Másfelől, vizsgálataink, ha nem is jutottak el addig, hogy a folyók hordalékhozamának (tehát a *source-to-sink* folyamat folyóvízi köztes lépésének) morfolometriai hatása is modellezhető legyen, annak jövőbeli kutatásához érdemi adatrendszert biztosítanak.

A vizsgálat során a Pannon-medence területét ábrázoló, a folyószabályozás előtti környezeti képet bemutató történeti térképsorozaton (Timár et al., 2006) digitalizáltuk a régió valamennyi nagyobb meanderező vízfolyásának szabályozás előtti sodorvonalát. Kiszámítottuk a medervonal mentén változó kanyarfejlettségi index értékeket és a folyószakaszokat számítási ablakmérettől független, statisztikai alapú osztályokba soroltuk, bizonyítva ezzel a közép-magyarországi deformációs öv 5 vonalának, a Kisalföld egy fő szerkezeti vonalának és a kárpátaljai előtér deformációs sávjának a folyók alakjára tett hatását (10. ábra, Petrovszki et al., 2012).

A fentiekben túlmenően vizsgálatot végeztünk a folyók kanyarfejlettségének a vízhozamtól és a lejtési viszonyoktól való függésére (Leopold és Wolman, 1957; Timár, 2003). Az ezen adatokra illeszkedő felületre becslést tettünk, és valószínűsítjük, hogy a tényleges kanyarfejlettségi értékeknek a becsléttől való eltérése a folyók hordalékhozamára utal (Petrovszki et al., 2014), de e kapcsolat bizonyításáig nem jutottunk el.



10. ábra. A Pannon-medence meanderező folyóinak kanyarfejltségi osztályozása. A magasabb sorszámú osztályok jelölik a kanyargósabb folyószakaszokat; ahol a folyó vonalát metsző szerkezeti vonalak metszéspontja következően több (pl. dunai és tiszai) osztályváltással is egybeesik, az indikálja a vonal neotektonikus aktivitását (Petrovszki et al., 2012). Az Alföld központi részén, az itt 10, 12 és 13-as számmal jelölt vonalak aktivitását a II.1. pontban irt kutatás is igazolta (Balázs et al., 2016).

III. Tudományos ismeretterjesztés

Kutatásainkról két tudományos ismeretterjesztő írás jelent meg. 2012-ben az [origo] hírportál számolt be a projekt keretében elvégzett első balatoni szeizmikus mérésről (Szedlák, 2012). A projekt zárulta után, a Természet Világában jelentettünk meg egy, a kutatás egyik fő üzenetét a nagyközönség számára is érthetően megjelenítő cikket (Timár, 2016). Az [origo] illetve a ResearchGate adatai szerint mindkét írást mintegy 2500-an olvasták. A 2012-es szombathelyi teregyakorlatunk érdemi megjelenést kapott a helyi médiában (városi rádiók, televízió, nyugat.hu. National Geographic Online, Vas Népe; Bajdó, 2012), kapcsolódó hírünket az MTI is átvette. Az ismeretterjesztő megjelenéseket az irodalomjegyzék végén adjuk meg.

Irodalom

(félkövérrel szedve a projekt keretében készült publikációk)

- Bada, G., Horváth, F., Dövényi, P., Szafián, P., Windhoffer, G. & Cloetingh, S. 2007. Present-day stress field and tectonic inversion in the Pannonian basin. — *Global and Planetary Change*, 58, 165–180.
- 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 Közlemény* 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. — *Magyar Geofizika* 54(2), 67-76.**
- Balázs, A., Matenco, L., Magyar, I., Horváth, F., Cloetingh, S., 2016. The link between tectonics and sedimentation in back-arc basins: New genetic constraints from the analysis of the Pannonian Basin. — *Tectonics*, 35, 1526–1559.**
- Bendefy L. 1971, A Duna magyarországi felső szakaszának, valamint a Rába vízrendszerének tektonikai elemei. — *Általános Földtani Szemle*, 1, 9–27.
- Berczki, L., Gärtner, D., Kemény, M., Péntek, A., Kovács, G., Timár, G., Molnár, G., Székely, B., 2013. Where do the Alps' foothill end? The depths of the Pre-Cenozoic basement in the foreground of Vas-hegy - Alpokalja, Western Hungary. — *Geographia Napocensis*, 7, 33-42.**
- Currie, C. A., Huismans, R. S., Beaumont, C., 2008. Thinning of continental backarc lithosphere by flow-induced gravitational instability — *Earth and Planetary Science Letters*, 269(3-4), 436-447.
- Csontos, L., Vörös, A., 2004. Mesozoic plate tectonic reconstruction of the Carpathian region. — *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 210(1), 1-56.
- Csontos, L., Nagymarosy, A., Horvath, F., Kovac, M., 1992, Tertiary Evolution of the Intra-Carpathian Area - a Model. — *Tectonophysics*, 208(1-3), 221-241.
- Dombrádi, E., 2012. Deformation of the Pannonian lithosphere and related tectonic topography: a depth-to-surface analysis. — *Utrecht Studies in Earth Sciences*, 19, 1–176.
- Fodor, L., Bada, G., Csillag, G., Horváth, E., Ruzsiczay-Rüdiger, Sz., Palotás, K., Síkhegyi, F., Timár, G., Cloetingh, S., Horváth, F., 2005. An outline of neotectonic structures and morphotectonics of the western and central Pannonian Basin. — *Tectonophysics*, 410, 15-41.
- Fodor, L., Ruzsiczay-Rüdiger, Zs., Braucher, R., Csillag, G., Grenczy, Gy., Kele, S., Molnár, G., Novothny, Á., Sebe, K., Surányi, G., Székely, B., Thamó-Bozsó, E., Timár, G., 2014. Neotectonic incision rates in the western Pannonian Basin (Hungary) based on complex geochronological, volcanological, GPS studies and sediment balance calculations, — *Buletini i Shkencave Gjeologjike*, 50(1), 94.**
- Horváth, F., B. Musitz, A. Balázs, A. Végh, A. Uhrin, A. Nádor, B. Koroknai, N. Pap, T. Tóth, and G. Worum (2015), Evolution of the Pannonian basin and its geothermal resources. — *Geothermics*, 53, 328-352.

- Jarvis, G. T., Mckenzie, D. P., 1980, Sedimentary Basin Formation with Finite Extension Rates. — *Earth and Planetary Science Letters*, 48(1), 42-52.
- Joó, I., 1992. Recent vertical surface movements in the Carpathian Basin. — *Tectonophysics*, 202, 129-134.
- Kele S., 2009: Édesvízi mészkövek vizsgálata a Kárpát-medencéből: Paleoklimatológiai és szedimentológiai elemzések – Ph.D. értekezés, MTA Geokémiai Kutatóintézet, ELTE Földtudományi Doktori Iskola, 176 p.
- Kiss, D., Szóts, G., Ruzsák, Zs., Bereczki, L., Molnár, G., Timár, G., Fodor, L., Csillag G., Lantos, Z., 2015: Mapping of buried river terraces on the Kőpíte Hill. — *Geophysical Research Abstracts*, 17, 13434.**
- Kovács G, Telbisz T, 2013. Tektonikus és fluviális hatások a Kőszegi-hegység és a Rába közti dombvidék kialakulásában, — *Földtani Közlöny* 143(2): 157-176.**
- Kovács. G., Telbisz, T., Székely, B., Koma, Zs., 2014. Tectonic geomorphometric studies in the surroundings of Rechnitz tectonic window, Eastern Alps — *Geologia Sudetica*, 42, 188-189.**
- Kovács., G., Telbisz, T., Székely, B., Timár, G., 2015a. DEM-derived markers of drainage network changes in the Eastern Alpine Foothills. — *Journal of Maps*, 11(2), 255-260.**
- Kovács , G. Fodor. L., Kövér Sz., Molnár. G., Raáb, D., Telbisz, T., Timár, G., 2015b. Verification of Late Miocene to Quaternary structural control on landforms: a case study with comprehensive methodology from a low hilly area (western Pannonian Basin) — *Austrian Journal of Earth Sciences*, 108(2), 88-104.**
- Lenkey, L., Dövényi, P., Horvath, F., Cloetingh, S., 2002. Geothermics of the Pannonian basin and its bearing on the neotectonics — *EGU Stephan Mueller Special Publication Series*, 3, 29-40.
- Magyar, I., Radivojević, D., Sztanó, O., Synak, R., Ujszászi, K., Pócsik, M., 2013. Progradation of the paleo-Danube shelf margin across the Pannonian Basin during the Late Miocene and Early Pliocene — *Global and Planetary Change*, 103, 168-173.
- Petrovszki, J., Székely, B., Timár G., 2012. A systematic overview of the coincidences of river sinuosity changes and tectonically active structures in the Pannonian Basin — *Global and Planetary Change*, 98-99, 109-121.**
- Petrovszki, J., Timár, G., Molnár, G., 2014. Is sinuosity a function of slope and bankfull discharge? – A case study of the meandering rivers in the Pannonian Basin — *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 11, 12271-12291.**
- Rowley, E., White, N., 1998. Inverse modelling of extension and denudation in the East Irish Sea and surrounding areas. — *Earth and Planetary Science Letters*, 161(1-4), 57-71.
- Ruszkiczay-Rüdiger, Zs., Braucher, R., Novothny, Á., Csillag, G., Fodor, L., Molnár, G., Madarász, L., 2016. Tectonic and climatic control on terrace formation: Coupling in situ produced ¹⁰Be depth profiles and luminescence approach, Danube River, Hungary, Central Europe. – *Quaternary Science Reviews*, 131, 127-147.
- Scheuer Gy., 1997: A Nyugat-Gerecse csúcsos-hegyi édesvízi mészkő-előfordulás paleohidrogeológiai vizsgálata. – *Hidrológiai Tájékoztató*, 1997. október, pp. 23-26.

- Scheuer Gy., 2002: A nyugat-gerecsei pliocén és quarter mészképző hévforrások paleo-karszt-hidrogeológiai vizsgálata. – *Hidrológiai Közlöny*, 2002, 1. pp. 7-14.
- Scheuer Gy., Schweitzer F., 1988: A Gerecse és a Budai-hegység édesvízi mészkőösszletei. – *Földrajzi Tanulmányok*, 20, Akadémiai Kiadó, Budapest, 131 p.
- Szabó R., 2014. Piliscsév határában futó római út geoelektromos vizsgálata. Szakdolgozat, ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszék.**
- Szanyi., Gy., Surányi, G., Leel-Össy, Sz., 2012. Cave development and Quaternary uplift history in the Central Pannonian Basin derived from speleothem ages. — *Quaternary Geochronology*, 14, 18-25.**
- Sztanó O., Magyar I., Szónoky M., Lantos M., Müller P., Lenkey L., Katona L., Csillag G., 2013. A Tihanyi Formáció a Balaton környékén: típusszelvény, képződési körülmények, rétegtani jellemzés. — *Földtani Közlöny* 143(1), 445-468.
- Timár, G., 2003. Controls on channel sinuosity changes: a case study of the Tisza River, the Great Hungarian Plain. — *Quaternary Science Reviews*, 22, 2199-2207.
- Timár, G., Molnár, G., Székely, B., Biszak, S., Varga, J., Jankó, A., 2006. Digitized maps of the Habsburg Empire - The map sheets of the second military survey and their georeferenced version. Arcanum, Budapest, 59 p. ISBN 963-7374-33-7.
- Timár G., 2016. Hol futnak a Balaton régi partvonalai – Függőleges felszínmozgások a Dunántúlon — *Természet Világa*, 2016/1. különszám, 17-19.**
- 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), 355-366.
- Törő B., Sztanó O., Fodor L., 2012. Aljzatmorfológia és aktív deformáció által befolyásolt pannóniai lejtőépülés Észak-Somogyban. — *Földtani Közlöny* 142(4), 445-468.
- Uhrin, A., I. Magyar, and O. Sztanó (2009), Az aljzatdeformáció hatása a pannóniai üledékképződés menetére a Zalai-medencében. — *Földtani Közlöny*, 139(3), 273-282.
- Visnovitz F., 2013. Késő-miocén sekélyvízi deltalebeny épülés balatoni nagyfelbontású vízi szeizmikus szelvényeken. — PEME, VI. PhD Konferencia, Budapest, Hungary, elektronikus konferencia kiadványa, 684-693.**
- Visnovitz F., 2015. Balatoni vízi szeizmikus szelvények környezetgeofizikai vizsgálata. — PhD értekezés, ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszék, Budapest, p. 165 + mellékletek.**
- Visnovitz F., Tóth T., Hámori Z., Kudó I., Balázs A., Sacchi M., Surányi G., Horváth F., 2013. Balatoni egycsatornás, nagy felbontású szeizmikus szelvények újrafeldolgozása. — *Magyar Geofizika* 54(2), 77-88.**
- Visnovitz F., Bodnár T., Tóth Zs., Spiess V., Kudó I., Timár G., Horváth F., 2015a. Seismic expressions of shallow gas in the lacustrine deposits of Lake Balaton, Hungary. — *Near Surface Geophysics*, 13, 433-446.**
- Visnovitz F., Horváth F., Fekete N., Spiess V., 2015b. Strike-slip tectonics in the Pannonian basin based on seismic surveys at Lake Balaton. — *Int. J. Earth Sciences* 104(8), 2273-2285.**

Visnovitz F., Sztanó O., Horváth F., 2015c. Progradation of Late Miocene delta clinofolds in the foreland of the Transdanubian Central Range. — In: Bartha I. R., Kriván Á., Magyar I., Sebe K. (eds): 6th Workshop on the Neogene of Central and South-Eastern Europe Conference, Orfű, Magyarország, Absztrakt kötet (kiadta a Magyarhoni Földtani Társulat), p. 97. ISBN 978-963-8221-57-5.

White, N. 1994. An Inverse Method for Determining Lithospheric Strain-Rate Variation on Geological Timescales, — *Earth and Planetary Science Letters*, 122(3-4), 351-371.

Zalai, Zs., Kovács, A., Molnár, G., Bereczki, L., Timár, G., Csillag, G., Fodor, L., Kerckmár, Zs., 2015: Extent freshwater limestone bank at Iván-halála Valley, Gerecse Mts., Northern Hungary: a key to understand the uplift history of the region – *Geophysical Research Abstracts*, 17, 9894.

Zalai, Zs., 2015: Térképezési és szerkezetföldtani megfigyelések a gerecsei Iván halála völgy és a Cser-hát területén geoelektromos módszerekkel – ELTE TTK OTDK dolgozat 36 p.

Zámolyi, A., Székely, B., Draganits, E., Timár, G., 2010. Neotectonic control on river sinuosity at the western margin of the Little Hungarian Plain. — *Geomorphology*, 122(3-4), 231-243.

A kutatáshoz kapcsolódó tudományos ismeretterjesztő- és média-megjelenések:

Az internetes források utolsó dokumentált elérési ideje: 2016. január 31.

Bajdó B., 2012. Veszélyezteteti-e földrengés Szombathely városát? – Geofizikai méréseket végeznek Vas megyében. — *Vas Népe*, 2012. szeptember 5. URL: <http://vaol.hu/hirek/veszelyezteteti-e-foldrenges-szombathely-varosat-fotokkal-1206728>

Szedlák Á., 2012. Hangágyúval soroztuk meg a Balaton fenekét. — *[origo]*, 2012. május 19. URL: <http://www.origo.hu/tudomany/20120516-hatszazezer-eves-szerkezeteket-kerestunk-a-balaton-alatt.html>

MTI-hír, Egyetemisták mérései szerint is földrengés pusztíthatott az ókori Savariában, 2012. szeptember 12. Átvéve:

- Délmagyar.hu (URL: http://www.delmagyar.hu/vilagvevo/egyetemistak_meresei_szerint_is_foldrenges_pusztithatott_az_okori_savariaban/2297575/)
- Limes Blog (URL: http://limes.blog.hu/2012/09/13/egyetemistak_meresei_szerint_is_foldrenges_pusztithatott_az_okori_savariaban)

Eltemetett hegység Szombathely környékén. — *National Geographic Magyarország Online*, 2012. augusztus 8.

(URL: http://www.ng.hu/Fold/2012/08/eltemetett_hegyseget_szombathely_kornyeken)

- átvéve: Nyugat.hu: Egyetemisták kutatják az eltemetett hegységet, 2012. augusztus 28.

(URL: https://www.nyugat.hu/tartalom/cikk/62429_egyetemistak_kutatjak_az_eltemetett_hegyseget)

Egy eltemetett hegység nyomait kutatják geofizikusok és egyetemi hallgatók Szombathely térségében. — Szombathelyi Televízió riportja, adásban: 2012. szeptember 7.

(URL: <http://www.tvszombathely.hu/hirek/egy-eltemetett-hegyseg-nyomait-kutatjak-geofizikusok-es-egyetemi-hallgatok-szombathely-tersegeben-20120907>)

Törésvonalak húzódnak a felszín alatt Szombathely és a Vas-hegy között. — Szombathelyi Televízió riportja, adásban: 2012. szeptember 12.

(URL: <http://www.tvszombathely.hu/hirek/toresvonalak-huzodnak-a-felszin-alatt-szombathely-es-a-vas-hegy-kozott-20120912>)

Igaz is lehet a földrengés mítosza — Rádió Szombathely 97.1, adásban: 2012. szeptember 13.

(URL: <http://www.radioszombathely.hu/?base=newsarchive&type=read&id=34911>)